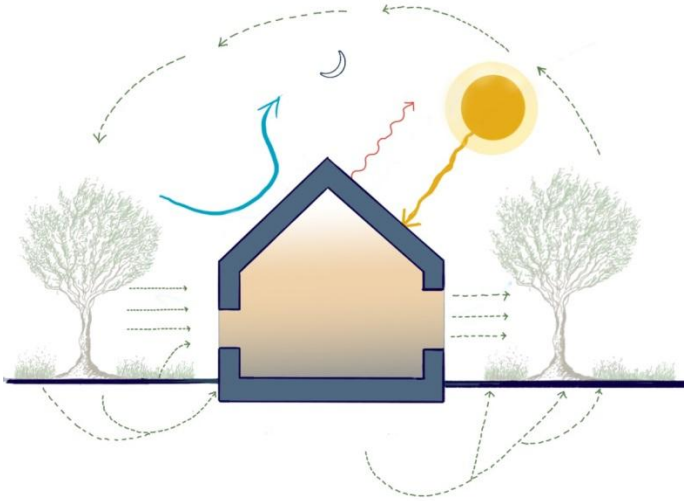
Αρχιτεκτονικές και Οικοδομικές Αρχές Σχεδιασμού Βιώσιμων Κτιρίων

Στοιχεία Βιώσιμου και Βιοκλιματικού Σχεδιασμού

Ελένη Αλεξάνδρου
Φλώρα-Μαρία Μπουγιατιώτη
Ευάγγελος Ευαγγελινός
Ηλίας Ζαχαρόπουλος
Μιλτιάδης Κατσαρός



ΚΑΛΛΙΠΟΣ ανοικτές ακαδημαϊκές εκδόσεις

Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης 2021-2025

Αρχιτεκτονικές και Οικοδομικές Αρχές Σχεδιασμού Βιώσιμων Κτιρίων

Στοιχεία Βιώσιμου και Βιοκλιματικού Σχεδιασμού

ΕΛΕΝΗ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ
Καθηγήτρια Σχολής Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ

ΦΛΩΡΑ-ΜΑΡΙΑ ΜΠΟΥΓΙΑΤΙΩΤΗ
Επίκουρη Καθηγήτρια Σχολής Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΙΝΟΣ
Ομότιμος Καθηγητής Σχολής Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ

ΗΛΙΑΣ ΖΑΧΑΡΟΠΟΥΛΟΣ
Ομότιμος Καθηγητής Σχολής Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ

ΜΙΛΤΙΑΔΗΣ ΚΑΤΣΑΡΟΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής Σχολής Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ

ΚΑΛΛΙΠΟΣ
σύγχρονες ακαδημαϊκές εκδόσεις

Αρχιτεκτονικές και Οικοδομικές Αρχές Σχεδιασμού Βιώσιμων Κτιρίων

Συγγραφή

Κύρια Συγγραφέας

Ελένη Αλεξάνδρου

Συνσυγγραφείς

Φλώρα-Μαρία Μπουγιατιώτη

Ευάγγελος Ευαγγελινός

Ηλίας Ζαχαρόπουλος

Μιλτιάδης Κατσαρός

Συντελεστές έκδοσης

Γλωσσική Επιμέλεια: Μαρία Τριαντάρη

Γραφιστική Επιμέλεια: Ηλίας Τσιώνης

Copyright © 2025, ΚΑΛΛΙΠΟΣ, ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ
(ΣΕΑΒ + ΕΛΚΕ-ΕΜΠ)



Εκτός από όπου ορίζεται διαφορετικά, το έργο με τίτλο *Αρχιτεκτονικές και Οικοδομικές Αρχές Σχεδιασμού Βιώσιμων Κτιρίων* από τη δημιουργό Ελένη Αλεξάνδρου διατίθεται με την άδεια Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Παρόμοια Διανομή 4.0. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε τον ιστότοπο https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.el

ΚΑΛΛΙΠΟΣ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου

www.kallipos.gr

ISBN: 978-618-228-308-0

Βιβλιογραφική Αναφορά: Αλεξάνδρου, Ε., Μπουγιατιώτη, Φ., Ευαγγελινός, Ε., Ζαχαρόπουλος, Η. & Κατσαρός, Μ. (2025). *Αρχιτεκτονικές και οικοδομικές αρχές σχεδιασμού βιώσιμων κτιρίων* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-1059

Οι συγγραφείς θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους καθηγητές μας που μας άνοιξαν δρόμους έρευνας και επιστημονικής γνώσης και τους σπουδαστές με τους οποίους συνεργαστήκαμε όλα αυτά τα χρόνια και μαζί τους διαβάσαμε, διερευνήσαμε και αποκτήσαμε νέες γνώσεις.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα **9**
Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων **17**
Πρόλογος **19**
Εισαγωγή **21**
Κύρια προβλήματα 21
Γενικές θέσεις – Μεθοδολογία προσέγγισης 22
Περιεχόμενο – Διάρθρωση κεφαλαίων 22
Βιβλιογραφία/Αναφορές **25**
Κεφάλαιο 1 Γενικά στοιχεία – Βιώσιμος βιοκλιματικός σχεδιασμός **27**
1.1 Εισαγωγικό πλαίσιο 27
1.2 Ορισμοί 28
1.3 Σύντομη ιστορική αναδρομή 29
1.3.1 Ιστορικά στοιχεία 29
1.3.2 Συμφωνίες και νομοθεσία 31
1.4 Δομημένος χώρος και περιβαλλοντικά προβλήματα 33
1.4.1 Σχέση δόμησης και περιβάλλοντος 33
1.5 Τα περιβαλλοντικά προβλήματα 35
1.6 Το οικολογικό αποτύπωμα 38
1.7 Κύκλος ζωής κτιρίων 40
1.7.1 Γενικά 40
1.7.2 Επανάχρηση κτιρίων 43
1.7.3 Επανάχρηση δομικών υλικών 44
1.7.4 Ανακύκλωση υλικών 46
1.7.5 Σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση 47
1.8 Δόμηση με φυσικά υλικά 50
1.8.1 Γενικά 50
1.8.2 Φυσικοί λίθοι 50
1.8.3 Ωμή άργιλος 51
1.8.4 Ξύλο και άλλες φυτικές ίνες 52
1.8.5 Αχυρόμπαλες 53
1.8.6 Άλλες φυσικές πρώτες ύλες 54
Βιβλιογραφία/Αναφορές **55**
2.1 Γενικά στοιχεία 63

2.2 Το κλίμα....63
2.3 Στοιχεία κλίματος....64
2.3.1 Ηλιακή ακτινοβολία....64
2.3.2 Θερμοκρασία – Θερμοκρασία του αέρα....65
2.3.3 Άνεμος....65
2.3.4 Υγρασία....65
2.4 Καταγραφή κλίματος και κλίμακες....66
2.5 Μακροκλίμα....66
2.5.1 Τύποι μακροκλίματος....67
2.6 Μεσοκλίμα....71
2.6.1 Τύποι μεσοκλίματος....75
2.7 Μικροκλίμα....76
2.8 Αστικό μικροκλίμα....77
2.8.1 Το φαινόμενο της αστικής χαράδρας....79
2.8.2 Αστική θερμική νησίδα....82
2.9 Ανάλυση κλιματικών δεδομένων....87
Βιβλιογραφία/Αναφορές....90
Κεφάλαιο 3 Ήλιος, φως και άνεμος....93
3.1 Ήλιος....93
3.1.1 Χαρακτηριστικά....93
3.1.2 Ηλιακή γεωμετρία....96
3.1.3 Προσανατολισμός και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας....98
3.1.4 Ηλιακή πρόσοδος....100
3.1.5 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας....103
3.1.6 Μετάδοση θερμότητας....104
3.2 Φως....105
3.2.1 Φυσική του φωτός....105
3.2.2 Φωτομετρικά μεγέθη....106
3.2.3 Φυσικός φωτισμός και δεδομένα κλίματος....108
3.2.4 Φωτισμός εσωτερικών χώρων....110
3.3 Άνεμος....112
3.3.1 Χαρακτηριστικά....112
3.3.2 Διαγράμματα ανέμου – Ροδογράμματα....113
3.3.3 Ροή ανέμου σε επίπεδο πόλης....114
3.3.4 Ροή ανέμου σε επίπεδο οικοπέδου....117
3.3.5 Ροή ανέμου στο εσωτερικό των κτιρίων....117

Βιβλιογραφία/Αναφορές..... 119
Κεφάλαιο 4 Στοιχεία άνεσης και εσωτερικού περιβάλλοντος κτιρίων..... 121
4.1 Άνεση.....121
4.2 Θερμική άνεση.....122
4.2.1 Γενικά.....122
4.2.2 Περιβαλλοντικοί παράγοντες.....123
4.2.3 Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες.....128
4.2.4 Παράγοντες που αφορούν το άτομο.....130
4.2.5 Υποκειμενικοί παράγοντες που αφορούν το άτομο.....132
4.2.6 Ψυχολογικοί παράγοντες – Η έννοια της προσαρμοστικότητας.....133
4.3 Εκτίμηση της θερμικής άνεσης.....137
4.3.1 Γενικά.....137
4.3.2 Δείκτες θερμικής άνεσης.....137
4.3.3 Διαγράμματα θερμικής άνεσης.....139
4.4 Οπτική άνεση.....144
4.4.1 Γενικά στοιχεία.....144
4.4.2 Ορισμοί.....144
4.4.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την οπτική άνεση.....145
4.4.4 Εκτίμηση της οπτικής άνεσης.....147
4.5 Ακουστική άνεση.....148
4.5.1 Γενικά στοιχεία.....148
4.5.2 Εκτίμηση ακουστικής άνεσης.....150
4.6 Υγιεινή – Ποιότητα εσωτερικού αέρα.....151
4.6.1 Γενικά στοιχεία.....151
4.6.2 Εκτίμηση ποιότητας εσωτερικού αέρα.....154
Βιβλιογραφία/Αναφορές..... 155
Κεφάλαιο 5 Φυσική κτιρίων – Κτιριακό κέλυφος..... 161
5.1 Διαδικασίες μετάδοσης θερμότητας.....161
5.1.1 Μετάδοση θερμότητας με αγωγή.....162
5.1.2 Μετάδοση θερμότητας με μεταφορά.....163
5.1.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.....164
5.1.4 Εξάτμιση και Συμπύκνωση (Υγροποίηση).....166
5.2 Επιφανειακές ιδιότητες υλικών.....167
5.2.1 Συντελεστές ανακλαστικότητας, r, και απορροφητικότητας, α.....168
5.2.2 Συντελεστής διαπερατότητας, τ.....169
5.2.3 Συντελεστής εκπομπής, ε.....170
5.3 Θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών.....171
5.3.1 Πυκνότητα, ρ.....171

5.3.2 Ειδική θερμότητα (ή ειδική θερμοχωρητικότητα), c....172
5.3.3 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, λ....172
5.3.4 Ογκομετρική θερμοχωρητικότητα, C....173
5.3.5 Θερμική διάχυση, κ....174
5.3.6 Θερμική επίχυση, μ....175
5.4 Θερμική συμπεριφορά δομικών στοιχείων....176
5.4.1 Θερμομόνωση κελύφους....177
5.4.2 Θερμομονωτικά υλικά....179
5.4.3 Εφαρμογές θερμομόνωσης....182
5.4.4 Θερμοχωρητικότητα C – Θερμική αδράνεια κελύφους....188
5.4.5 Θερμομόνωση κουφωμάτων ανοιγμάτων....192
5.5 Συμπεριφορά δομικών στοιχείων ως προς την υγρασία....196
5.5.1 Φυσικές ιδιότητες που σχετίζονται με τη συμπεριφορά ως προς την υγρασία και την υγροποίηση υδρατμών....196
5.5.2 Υγροποίηση υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια....197
5.5.3 Υγροποίηση υδρατμών στο εσωτερικό της κατασκευής....198
Βιβλιογραφία/Αναφορές....200
Κεφάλαιο 6 Στοιχεία βιοκλιματικού σχεδιασμού....203
6.1 Εισαγωγικές παρατηρήσεις....203
6.2 Προσανατολισμός....207
6.2.1 Γενικά στοιχεία....207
6.2.2 «Εσωτερικός» προσανατολισμός χώρων....209
6.2.3 Προσανατολισμός και σχήμα κτιρίου....210
6.3 Χωρικές διατάξεις....211
6.3.1 Αίθρια....211
6.3.2 Στοές – Ημιυπαίθριοι....216
6.3.3 Στέγαστρα – Πέργκολες....220
6.4 Το κτιριακό κέλυφος....220
6.4.1 Υλικά και κατασκευή κτιριακού κελύφους....220
6.4.2 Στοιχεία σκιασμού – Χειρισμός της ηλιακής ακτινοβολίας και του φυσικού φωτός....221
6.5 Η φύτευση ως στοιχείο σχεδιασμού....230
6.5.1 Γενικά στοιχεία....230
6.5.2 Πράσινες όψεις....232
6.5.3 Φυτεμένα δώματα....232
6.5.4 Φυτοδοχεία....234
6.5.5 Αναρριχητικά φυτά....235
6.6 Διαχείριση υπαίθριων χώρων....235
6.6.1 Φύτευση....235

6.6.2 Επιλογή υλικών κάλυψης υπαίθριων χώρων 236
6.7 Υπόσκαφες κατασκευές 237
6.8 Διπλοκέλυφες (δικέλυφες) προσόψεις (double-skin facades) 240
6.9. Παραδείγματα βιοκλιματικών εφαρμογών από την παραδοσιακή αρχιτεκτονική 241
6.9.1 Ψυχρό κλίμα 242
6.9.2 Εύκρατο μεσογειακό κλίμα 243
6.9.3 Θερμό και ξηρό (ερημικό) κλίμα 245
6.9.4 Θερμό και υγρό (τροπικό) κλίμα 247
Βιβλιογραφία/Αναφορές 249
Κεφάλαιο 7 Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης 253
7.1 Εισαγωγικές παρατηρήσεις 253
7.2 Άμεσο ηλιακό κέρδος 255
7.3 Έμμεσο ηλιακό κέρδος 260
7.3.1 Τοίχος Trombe-Michel και τοίχος μάζας 260
7.3.2 Προσαρτημένο θερμοκήπιο και ηλιακός χώρος 265
7.3.3 Σύστημα «roof pond» 269
7.4 Απομονωμένο ηλιακό κέρδος 271
7.5 Συγκριτική εξέταση των παθητικών ηλιακών συστημάτων θέρμανσης 272
Βιβλιογραφία/Αναφορές 274
Κεφάλαιο 8 Παθητικά συστήματα δροσισμού 275
8.1 Εισαγωγικές παρατηρήσεις 275
8.2 Φυσικός δροσισμός 275
8.2.1 Μικροκλίμα οικοπέδου 277
8.2.2 Αυτοσκιασμός του κτιριακού όγκου 279
8.2.3 Περιορισμός μετάδοσης θερμικών προσόδων από στοιχεία του κελύφους 279
8.2.4 Περιορισμός εσωτερικών θερμικών προσόδων 283
8.3 Φυσικός αερισμός 284
8.3.1 Οριζόντια κίνηση – Διαμπερής φυσικός αερισμός 285
8.3.2 Κατακόρυφη ανοδική κίνηση – Φαινόμενο της καμινάδας 287
8.3.3 Κατακόρυφη καθοδική κίνηση – Ανεμόπυργοι και ψυκτικοί πύργοι 288
8.4 Παθητικός δροσισμός 289
8.4.1 Σύστημα νυχτερινού δροσισμού με αερισμό 291
8.4.2 Σύστημα άμεσου δροσισμού με εξάτμιση (*direct evaporative cooling*) 292
8.4.3 Σύστημα έμμεσου δροσισμού με εξάτμιση (*indirect evaporative cooling*) 293
8.4.4 Σύστημα άμεσου δροσισμού από το έδαφος 295
8.4.5 Σύστημα έμμεσου δροσισμού από το έδαφος 296
8.4.6 Σύστημα νυχτερινού δροσισμού με ακτινοβολία (*radiant/radiative cooling*) 296

Βιβλιογραφία/Αναφορές 299
Κεφάλαιο 9 Φυσικός φωτισμός 301
9.1 Εισαγωγικές παρατηρήσεις 301
9.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή 302
9.3 Στοιχεία φυσικού φωτισμού 305
9.4 Σχεδιασμός ανοιγμάτων 306
9.4.1 Γενικά στοιχεία 306
9.4.2 Πλευρικά ανοίγματα 307
9.4.3 Φεγγίτες οροφής 310
9.5 Σχεδιασμός κτιρίου 314
9.5.1 Περίγραμμα/Σχήμα κτιρίου 314
9.5.2 Σχεδιασμός κάτοψης – Μεταβατικοί χώροι 315
9.5.3 Σχεδιασμός επιμέρους στοιχείων εσωτερικών χώρων 317
9.5.4 Σχεδιασμός του περιβάλλοντος χώρου 317
9.6 Στοιχεία ελέγχου/ρύθμισης 318
9.6.1 Διαχωριστικές επιφάνειες 319
9.6.2 Στοιχεία ηλιοπροστασίας – Εξωτερικά 320
9.6.3 Στοιχεία ρύθμισης – Εσωτερικά 320
9.7 Εξελιγμένα συστήματα φυσικού φωτισμού 321
9.7.1 Καινοτόμοι υαλοπίνακες 321
9.7.2 Ράφια φωτισμού (*light shelves*) και ανακλαστικές περσίδες 325
9.7.3 Φωταγωγοί και φωτοσωλήνες (*light ducts*) 326
9.8 Φυσικός φωτισμός και κατανάλωση ενέργειας 327
9.8.1 Τεχνητός φωτισμός 328
9.8.2 Σύζευξη φυσικού και τεχνητού φωτισμού 328
Βιβλιογραφία/Αναφορές 330
Κεφάλαιο 10 Βιοκλιματικός σχεδιασμός και διαχείριση υπαίθριων χώρων 333
10.1 Αστικό οικοσύστημα 333
10.2 Βιοκλιματικός σχεδιασμός υπαίθριων χώρων 334
10.3 Υλικά επικάλυψης επιφανειών 335
10.3.1 Ανοιχτόχρωμα υλικά 335
10.3.2 Ψυχρά υλικά (*cool materials*) 337
10.3.3 Διαπερατά υλικά 339
10.4 Σκιασμός υπαίθριων χώρων 340
10.5 Δροσισμός με εξάτμιση – Στοιχεία νερού 343
10.5.1 Οριζόντιες επιφάνειες νερού 344
10.5.2 Κανάλια νερού 345
10.5.3 Πίδακες ενσωματωμένοι στα αστικά δάπεδα – Διαβροχή υλικών 346

10.5.4 Κατακόρυφες επιφάνειες νερού 347
10.5.5 Δημιουργία τεχνητής ομίχλης 348
10.5.6 Μικροψεκαστήρες (*micronisers*) στο φύλλωμα στοιχείων βλάστησης 350
10.5.7 Πύργοι δροσισμού καθοδικού ρεύματος (PDEC) 350
10.6 Χρήση πρασίνου 352
10.6.1 Φύτευση δημόσιων αστικών χώρων (πλατείες – πάρκα) 353
10.6.2 Φύτευση δρόμων – αστικών λεωφόρων 354
10.6.3 Φύτευση υπαίθριων δημόσιων και ιδιωτικών χώρων 355
10.6.4 Φύτευση σε δώματα, εξώστες και κατακόρυφες επιφάνειες 355
Βιβλιογραφία/Αναφορές 357
Κεφάλαιο 11 Εξοικονόμηση ενέργειας – Αρχιτεκτονική ένταξη ΑΠΕ 359
11.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) 359
11.2 Ηλιακή ενέργεια 361
11.2.1 Γενικά στοιχεία 361
11.2.2 Συστήματα – Τεχνολογία 361
11.2.3 Αρχιτεκτονική ένταξη – Ζητήματα που τίθενται 363
11.3 Αιολική ενέργεια 368
11.3.1 Γενικά στοιχεία 368
11.3.2 Συστήματα – Τεχνολογία 370
11.3.3 Αρχιτεκτονική ένταξη – Ζητήματα που τίθενται 371
11.4 Γεωθερμία 372
11.4.1 Γενικά στοιχεία 372
11.4.2 Συστήματα – Τεχνολογία 372
11.4.3 Αρχιτεκτονική ένταξη – Ζητήματα που τίθενται 373
11.5 Βιομάζα 374
11.5.1 Γενικά στοιχεία 374
11.5.2 Συστήματα – Τεχνολογία 375
11.5.3 Αρχιτεκτονική ένταξη – Ζητήματα που τίθενται 375
11.6 Άλλες ΑΠΕ και Αρχιτεκτονική 375
Βιβλιογραφία/Αναφορές 377
Κεφάλαιο 12 Περιβαλλοντικά φιλικά υλικά και στρατηγικές 380
12.1 Περιβαλλοντική επίδραση των υλικών 380
12.1.1 Εισαγωγή 380
12.1.2 Ανάλυση των φάσεων του κύκλου ζωής ενός υλικού 381
12.1.3 Παράμετροι αξιολόγησης της περιβαλλοντικής επίδρασης των υλικών 385
12.2 Οικολογικά υλικά και συστήματα 400
12.3 Διαχείριση νερού 405
12.3.1 Όμβρια 406

12.3.2 Υγρά απόβλητα 409
12.4 Κομποστοποίηση 410
Βιβλιογραφία/Αναφορές 411
Κεφάλαιο 13 NZEB – Πράσινα κτίρια 417
13.1 Παραδοχές 417
13.1.1 Διαχρονικές παραδοχές 417
13.1.2 Νέα εποχή – Κίνδυνοι 418
13.1.3 Νέα εποχή – Πεδία αλλαγών, ευκαιρίες 419
13.1.4 Βασικά χαρακτηριστικά της νέας εποχής 419
13.1.5 Επιλεγμένα χαρακτηριστικά της νέας εποχής 420
13.2 Κτίρια ΣΜΚΕ/NZEB 427
13.2.1 Η ενεργειακή εξίσωση 427
13.2.2 Η βασική νομοθεσία 429
13.2.3 Ορισμός ΣΜΚΕ/NZEB 430
13.3 Σχεδιάζοντας ένα κτίριο ΣΜΚΕ/NZEB 433
13.3.1 Μεθοδολογία 433
13.4 Η ελληνική περίπτωση 442
13.4.1 Ελληνική ιδιαιτερότητα 442
13.4.2 Το υφιστάμενο κτιριακό απόθεμα 442
13.5 Προϋποθέσεις και επεκτάσεις 444
13.5.1 Βελτιστοποίηση κόστους 444
13.5.2 Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα 445
13.5.3 Ο ρόλος του αρχιτέκτονα 446
Βιβλιογραφία/Αναφορές 448

Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων

ACH	Air changes per hour (εναλλαγές αέρα ανά ώρα)
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
BIM	Building Information Modelling
BIPV	Building-Integrated Photovoltaics
BRI	Building-Related Illness (ασθένεια σχετική με το κτίριο)
C2C	Cradle to Cradle
CHP	Combined Heat and Power, βλ. ΣΗΘ
DFD	Design for Disassembly
DHW	Domestic Hot Water, βλ. ΖΝΧ
EPD	Environmental Product Declaration
GHGs	Green House Gases
IR	Infra-Red (υπέρυθρη)
KPI, KR	Key Performance Indicators, Key Results
LCA	Life Cycle Analysis, βλ. ΑΚΖ
NZEB	Near Zero Energy Buildings, βλ. ΣΜΚΕ
NIR	Near Infra-Red (εγγύς υπέρυθρη)
PCR	Post Consumer Recycled
PM	Particulate Matter (αιωρούμενα σωματίδια)
PV	Photovoltaics (φωτοβολταϊκά)
RE	Renewable Energy
SDG, SDGs	Sustainable Development Goal(s)
SBS	Sick Building Syndrome (Σύνδρομο Άρρωστου Κτιρίου)
SVOC	Semi-volatile organic compounds (ημιπτητικές οργανικές ενώσεις)
UV	Ultra-Violet (υπεριώδης)
VOCs	Volatile organic compounds (πτητικές οργανικές ενώσεις)
WFR	Window to Floor Ratio (ποσοστό ανοιγμάτων επί του δαπέδου)
WWR	Window to Wall Ratio (ποσοστό ανοιγμάτων επί του τοίχου)
ZEB	Zero Energy Buildings

ΑΚΖ	Ανάλυση του Κύκλου Ζωής, βλ. LCA
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΖΝΧ	Ζεστό Νερό Χρήσης, βλ. DHW
ΣΗΘ	Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας, βλ. CHP
ΣΜΚΕ	Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας (Κτίρια), βλ. NZEB

Πρόλογος

Το συγκεκριμένο σύγγραμμα παρουσιάζει τις βασικές αρχές που διέπουν τον αρχιτεκτονικό και οικοδομικό σχεδιασμό βιώσιμων κτιρίων. Πρόκειται για την ολοκλήρωση μιας μακρόχρονης πορείας, η οποία ξεκίνησε όταν άρχισε να διδάσκεται το υποχρεωτικό μάθημα της Οικοδομικής 3: «Κατασκευαστική διερεύνηση κτιρίου με έμφαση στον βιώσιμο σχεδιασμό» του 5ου εξαμήνου, τον Σεπτέμβριο 2008. Από το 1989 μέχρι το 2008, τα ζητήματα αυτά αναφέρονταν μόνο στο κατ΄ επιλογήν μάθημα: «Θέματα Προωθημένης Οικοδομικής» (του 8ου εξαμήνου), στο οποίο εντάσσονταν ο Βιοκλιματικός Σχεδιασμός και οι Περιβαλλοντικά Ήπιες Οικοδομικές Τεχνικές. Τμήματα του συγγράμματος βασίζονται στο Κεφάλαιο με τίτλο: Ευαγγελινός, Ε. & Ζαχαρόπουλος, Η. (2001). «Κεφάλαιο 1. Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό». Στο: Δ. Λουκόπουλος (επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου.* Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, σ. 21-154, έπειτα από σχετική άδεια του Γραφείου Ανάπτυξης Διδακτικού Υλικού του ΕΑΠ.

Στόχος του συγγράμματος είναι να αποτελέσει βοήθημα για τα μαθήματα της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του ΕΜΠ που σχετίζονται με τον βιώσιμο και βιοκλιματικό σχεδιασμό. Η δομή του επιχειρεί να συγκεντρώσει όλα τα σχετικά ζητήματα και να καλύψει όσο το δυνατόν περισσότερες πτυχές που σχετίζονται με τον αρχιτεκτονικό και οικοδομικό σχεδιασμό των κτιρίων. Η οργάνωση των κεφαλαίων ακολουθεί στοχευμένη σειρά που εισάγει τον αναγνώστη από το γενικότερο πλαίσιο του βιώσιμου σχεδιασμού και διαχείρισης του δομημένου περιβάλλοντος σε ειδικότερα ζητήματα. Παράλληλα, κάθε κεφάλαιο μπορεί να διαβαστεί αυτοτελώς και, ως εκ τούτου, εντοπίζονται μικρές επαναλήψεις στα επιμέρους κεφάλαια, προκειμένου να μη χρειάζεται ο αναγνώστης να ανατρέχει κάθε φορά σε άλλα τμήματα του βιβλίου. Πέρα από τα παραπάνω, σε όλα τα κεφάλαια υπάρχει βιβλιογραφία και αναφορές για εμβάθυνση.

Πιο συγκεκριμένα, το σύγγραμμα αφορά το υποχρεωτικό μάθημα της Οικοδομικής 3: «Ανάλυση και Σχεδιασμός Κτιριακής Δομής, με Έμφαση στις Αρχές Βιωσιμότητας και τη Βιοκλιματική Αρχιτεκτονική» και το υποχρεωτικό κατ’ επιλογήν (ειδικό) μάθημα των Ειδικών Θεμάτων Οικοδομικής του 6ου εξαμήνου: «Ειδικά Θέματα Βιώσιμου και Βιοκλιματικού Σχεδιασμού». Και τα δύο μαθήματα είναι εργαστηριακά· το πρώτο είναι υποχρεωτικό μάθημα κορμού του 5ου εξαμήνου και το δεύτερο είναι υποχρεωτικό κατ’ επιλογήν μάθημα του 6ου εξαμήνου. Ταυτόχρονα, κάποια κεφάλαια του συγγράμματος μπορούν να καλύψουν και τμήμα της διδακτέας ύλης του κατ’ επιλογήν μαθήματος των Ε.Θ. Δομικών Υλικών του 5ου εξαμήνου. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι την τελευταία δεκαετία υπάρχει συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την εκπόνηση ερευνητικών εργασιών (Διαλέξεων 9ου εξαμήνου) γύρω από τη θεματολογία του βιώσιμου και βιοκλιματικού σχεδιασμού και, άρα, το προτεινόμενο βιβλίο θα συμβάλει ως βασική βιβλιογραφία και στο μάθημα αυτό.

Γενικότερα, το βιβλίο αυτό φιλοδοξεί να καλύψει προπτυχιακά μαθήματα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών που σχετίζονται με τον βιοκλιματικό και βιώσιμο σχεδιασμό, από την κλίμακα του κτιρίου και των επιμέρους του έως την κλίμακα του αστικού σχεδιασμού. Μπορεί, επίσης, να συμβάλει και στη διδασκαλία αντίστοιχων μαθημάτων σε άλλες σχολές μηχανικών, ενώ ταυτόχρονα να αποτελέσει βοήθημα και σε σχετικά μεταπτυχιακά προγράμματα, αλλά και για επαγγελματίες μηχανικούς ως εισαγωγή στο ευρύτερο πλαίσιο των αρχών του βιώσιμου σχεδιασμού.

Εισαγωγή

Κύρια προβλήματα

Η αρχιτεκτονική εκπαίδευση με τις πολλαπλές πτυχές της επηρεάζει έως έναν βαθμό τη διαμόρφωση και τη συνολική συμπεριφορά των μελλοντικών γενιών αρχιτεκτόνων. Η αναγνώριση και κατανόηση των συνεχών πολυστρωματικών αλληλεπιδράσεων της κατασκευής και της λειτουργίας των κτιρίων με το φυσικό περιβάλλον αποτελεί αδιάσπαστο στοιχείο της πράξης των αρχιτεκτόνων (Maciel et al., 2006) Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αρχιτεκτόνων (Union Internationale des Architectes) (UIA, 2011): «Η αρχιτεκτονική εκπαίδευση που προετοιμάζει τους αρχιτέκτονες για την επαγγελματική τους ζωή θα πρέπει, κατ' ελάχιστον, να απευθύνεται στα παρακάτω πλαίσια και συγκεκριμένα αντικείμενα που αναφέρονται σε αυτά:

- κοινωνικά, πολιτιστικά, πολιτικά,
- επαγγελματικά, τεχνολογικά, βιομηχανικά,
- κόσμος: τοπικά, παγκόσμια, οικολογικά,
- ακαδημαϊκά, συμπεριλαμβανομένης και της επιστήμης και εν γένει της γνώσης, και
- διεθνή».

Αντίστοιχα, η National Architectural Accrediting Board (NAAB, 2020) προτείνει ότι ένα πρόγραμμα σπουδών Αρχιτεκτονικής θα πρέπει να αναφέρεται σε αξίες όπως ο σχεδιασμός, η περιβαλλοντική διαχείριση και η επαγγελματική υπευθυνότητα, η ισότητα, η διαφορετικότητα (*diversity*) και η ένταξη (*inclusion*), η γνώση και η καινοτομία, η αρχηγία, η συνεργασία, η κοινωνική εμπλοκή και η διά βίου μάθηση.

Τόσο η UIA (2011) όσο και η NAAB (2020) περιλαμβάνουν τη βιωσιμότητα στις ιδιαίτερες περιοχές δεξιοτήτων της αρχιτεκτονικής εκπαίδευσης, ενσωματώνοντας τον βιώσιμο σχεδιασμό και ανασχεδιασμό κτιρίων, μαζί με κοινωνικές αξίες και αξίες πολιτισμού και κληρονομιάς.

Η συνεχώς αυξανόμενη περιβαλλοντική καταστροφή, τα αποτελέσματα της οποίας βιώνουν σχεδόν οι περισσότερες περιοχές του πλανήτη, με διαφορετικά κλιματικά φαινόμενα αλλά παρόμοιες κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις, φανερώνουν ότι ο άνθρωπος δεν είχε μέχρι πολύ πρόσφατα συνειδητοποιήσει τις καταστροφικές συνέπειες των περισσότερων δραστηριοτήτων του. Είναι χαρακτηριστικό ότι, από την εποχή που ξεκίνησε η συγγραφή του παρόντος συγγράμματος, η ραγδαία εξέλιξη των κλιματικών κυρίως φαινομένων οδήγησε στη μετονομασία του όρου «κλιματική αλλαγή» σε «κλιματική κρίση», κάτι που εκφράζει τη συνειδητοποίηση ότι οι μοντελοποιήσεις και οι χρονικές προβολές των επιπτώσεων της περιβαλλοντικής υποβάθμισης δεν ήταν ακριβείς.

Υπάρχει μια συνεχώς αυξανόμενη ευαισθητοποίηση απέναντι στην εξέλιξη των κλιματικών φαινομένων, στα σημαντικά και συνεχώς εξελισσόμενα περιβαλλοντικά προβλήματα και στις βιώσιμες πρακτικές ως μια πιθανή απάντηση σε αυτά (Altomonte, 2012· Gaulmyn & Dupre· 2019, Keumala et al., 2016· Khan et al., 2013). Ταυτόχρονα, παρατηρήθηκε και μια στροφή του περιβαλλοντικού και χαμηλής ενέργειας σχεδιασμού που, ενώ συνιστούσε ένα καθαρά τεχνικό ζήτημα, ξεκίνησε να συνδέεται ακόμα και άρρηκτα με τους στόχους της εκπαίδευσης των αρχιτεκτόνων (Keumala et al., 2016). Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, οι περισσότερες Σχολές Αρχιτεκτονικής ανά τον κόσμο έχουν εισαγάγει στα προπτυχιακά και μεταπτυχιακά προγράμματα σπουδών τους μαθήματα σχετικά με τη βιωσιμότητα. Πολλοί ερευνητές (Altomonte, 2012· Gaulmyn & Dupre, 2019· Keumala et al., 2016· Khan et al., 2013· Taleghani et al., 2011· Wright, 2003) τονίζουν ότι η βιωσιμότητα πρέπει να τεθεί στο κέντρο της εκπαίδευσης των αρχιτεκτόνων και πολεοδόμων, από τα

πρώτα χρόνια, κατά τη διάρκεια των σπουδών και μέχρι τη διά βίου συνεχιζόμενη εκπαίδευση, καθώς συνιστά τον μόνο τρόπο για να εξασφαλιστεί η πλήρης κατανόηση των αρχών της και η εφαρμογή τους στην αρχιτεκτονική πρακτική και τον σχεδιασμό ή/και τον ανασχεδιασμό των κτιρίων στο μέλλον (Hamdan & Bashir, 2012). Πηγαίνοντας ακόμα παραπέρα, ο Meir (1999) προτείνει ένα συνεργατικό, πολυστρωματικό μοντέλο προώθησης του βιοκλιματικού και ενεργειακά αποδοτικού αρχιτεκτονικού και αστικού σχεδιασμού, τόσο στην εκπαίδευση όσο και στην πρακτική. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει πρότυπα κτίρια και την παρακολούθησή τους, εκπαιδευτικό και άλλο υλικό, ακαδημαϊκά μαθήματα, εναλλακτικά εργαστήρια, συμβουλευτική και συμμετοχή σε επιτροπές και βιβλιοθήκες τεχνικών θεμάτων (Meir, 1999).

Γενικές θέσεις – Μεθοδολογία προσέγγισης

Το κλίμα και τα στοιχεία του αποτελούν το νοητό περιβάλλον, με το οποίο αλληλεπιδρά ο άνθρωπος και κατ' επέκταση οι δομημένοι χώροι στους οποίους ζει. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή κτιρίων σε συμφωνία με τη φύση και με το άμεσο κλίμα, μια πρακτική κοινή στις προβιομηχανικές κοινωνίες, συμβάλλει καθοριστικά στην εξασφάλιση των βέλτιστων συνθηκών μέσα και γύρω από τα κτίρια, αλλά και στη μείωση της χρήσης μηχανικών μέσων και ενέργειας. Αποτελεί με λίγα λόγια μια βιώσιμη πρακτική. Οι γνώσεις των βασικών αρχών της κλιματολογίας είναι απαραίτητες για τον καθορισμό των στρατηγικών της βιοκλιματικής συμπεριφοράς των κτιρίων, δηλαδή για την επιλογή των δομικών υλικών και του κατασκευαστικού συστήματος, της διάταξης των χώρων κ.ά. Οι συνθήκες του άμεσου περιβάλλοντος επιδρούν στην ψυχοσωματική κατάσταση του ανθρώπου, στη θερμική και οπτική του άνεση, καθώς και στη συμπεριφορά των δομικών στοιχείων. Ο προηγούμενος αιώνας χαρακτηρίστηκε από την απομάκρυνση του ανθρώπου και του τρόπου ζωής του από τη φύση, δημιούργησε δηλαδή χώρους ζωής που απομονώνονται θερμικά από το κλιματικό τους περιβάλλον. Οι ενεργειακές κρίσεις όμως έδωσαν την αφορμή για τον επαναπροσδιορισμό του σχεδιασμού και της κατασκευής κτιρίων που αλληλεπιδρούν με το άμεσο κλιματικό τους περιβάλλον είτε ανοίγοντας προς τα στοιχεία του είτε προστατεύοντάς το από αυτά.

Είναι, λοιπόν, σημαντικό να τονιστεί η σημασία της κατανόησης του κλίματος και της επίδρασης των παραμέτρων του στη θερμική άνεση του ανθρώπου, καθώς και στη συμπεριφορά των δομικών στοιχείων των κατασκευών. Σε αυτό το βιβλίο, τα ζητήματα του βιοκλιματικού και βιώσιμου σχεδιασμού προσεγγίζονται μεθοδολογικά, τόσο ως προς τα διαφορετικά επίπεδά τους –από τα μεμονωμένα υλικά και τα δομικά στοιχεία, μέχρι την κλίμακα του κτιρίου ή/και του αστικού σχεδιασμού– όσο και ως προς την πολυπαραμετρική αλληλεπίδραση ανάμεσα στα κτίρια και στη ζωή στον πλανήτη.

Περιεχόμενο – Διάρθρωση κεφαλαίων

Το βιβλίο απαρτίζεται από 13 κεφάλαια.

Το **1ο κεφάλαιο** έχει στόχο την εισαγωγή στις διαφορετικές έννοιες και τους ορισμούς που σχετίζονται με τον βιώσιμο περιβαλλοντικό σχεδιασμό. Περιλαμβάνεται σύντομη ιστορική αναδρομή και στη συνέχεια περιγράφεται το ευρύτερο πλαίσιο, δηλαδή τα σύγχρονα περιβαλλοντικά προβλήματα και η συσχέτισή τους με το δομημένο περιβάλλον. Έπειτα, γίνεται μια πρώτη αναφορά στον κύκλο ζωής των κτιρίων και στα ζητήματα που σχετίζονται με αυτόν, δηλαδή στα θέματα επανάχρησης και ανακύκλωσης υλικών και κτιρίων, αλλά και στις πρακτικές του σχεδιασμού για αποσυναρμολόγηση. Τέλος, παρουσιάζονται βασικά στοιχεία πάνω στη δόμηση με φυσικά υλικά.

Η κλιματική παράμετρος είναι, όπως αναφέρθηκε, το βασικότερο εργαλείο στον βιοκλιματικό σχεδιασμό των κτιρίων. Στο **2ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται συνοπτικά τα γενικά χαρακτηριστικά του κλίματος, οι διαφορετικές ζώνες και τύποι του, καθώς και τα επιμέρους κλιματικά δεδομένα και χαρακτηριστικά που αυτές περιλαμβάνουν. Τέλος, παρουσιάζεται η μεθοδολογία αναζήτησης, αρχικής ανάλυσης και αξιολόγησης των βασικών στοιχείων του κλίματος και ειδικότερα του μικροκλίματος, που αποτελούν την αφετηρία του

σχεδιασμού. Στόχος είναι να τονιστεί η κατανόηση του κλίματος και της επίδρασης των παραμέτρων του στη θερμική άνεση του ανθρώπου, καθώς και στη συμπεριφορά των κτιρίων και των δομικών στοιχείων.

Ο ήλιος αποτελεί σημαντική, αν όχι τη σημαντικότερη, κλιματική παράμετρο που εμπλέκεται στον βιοκλιματικό σχεδιασμό. Στο **3ο κεφάλαιο** περιγράφονται τα ζητήματα της ηλιακής γεωμετρίας και της ηλιακής προσόδου και συσχετίζονται με τη συλλογή και την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας ως βασικές στρατηγικές του βιοκλιματικού σχεδιασμού. Άμεση συσχέτιση με τον ήλιο έχει και το φως ως παράμετρος σχεδιασμού. Ως εκ τούτου, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και η φυσική του φωτός και τα θεμελιώδη φωτογραμμετρικά μεγέθη. Τέλος, σημαντική παράμετρος για τον βιοκλιματικό σχεδιασμό είναι και ο άνεμος, αφού επηρεάζει τις συνθήκες που επικρατούν τόσο στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων όσο και στους υπαίθριους χώρους της πόλης.

Πέρα από την εξοικονόμηση ενέργειας, βασική παράμετρο του βιοκλιματικού σχεδιασμού αποτελεί η επίτευξη των βέλτιστων συνθηκών άνεσης στο εσωτερικό των κτιρίων. Στο **4ο κεφάλαιο** αναλύονται οι επιμέρους παράμετροι της άνεσης (θερμική, οπτική και ακουστική), ενώ γίνεται αναφορά και στην υγιεινή και την ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Όπως είναι προφανές, το κύριο μέρος αφορά τη θερμική άνεση και τις παραμέτρους που την επηρεάζουν. Ως προς την οπτική άνεση, περιγράφονται ποσοτικά και ποιοτικά στοιχεία αξιολόγησης των συνθηκών φωτισμού. Τέλος, γίνεται αναφορά σε τρόπους εκτίμησης της άνεσης (δείκτες, ψυχρομετρικά διαγράμματα κ.λπ.).

Το κτιριακό κέλυφος αποτελεί τον κύριο ρυθμιστή των στοιχείων του κλίματος, το όριο μεταξύ του εσωτερικού χώρου και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Στο **5ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι βασικές διαδικασίες μετάδοσης της θερμότητας, καθώς και οι επιφανειακές και θερμοφυσικές ιδιότητες των διαφόρων δομικών στοιχείων και υλικών που διαμορφώνουν το κτιριακό κέλυφος και τους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στη θερμομόνωση του κελύφους και των ανοιγμάτων, ως βασική στρατηγική της εξοικονόμησης ενέργειας.

Στο **6ο κεφάλαιο** συγκεντρώνονται, κατηγοριοποιούνται και περιγράφονται τα στοιχεία βιοκλιματικού σχεδιασμού, τα οποία συναντώνται διαχρονικά, τόσο στην παραδοσιακή όσο και στη σύγχρονη αρχιτεκτονική. Αφορούν καταρχήν τον προσανατολισμό των κτιρίων και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και, στη συνέχεια, τις χωρικές διατάξεις που ενσωματώνονται σε αυτά και συμβάλλουν στην καλή βιοκλιματική λειτουργία τους. Γίνεται αναφορά στο κτιριακό κέλυφος ως προς τα υλικά κατασκευής του και τα στοιχεία χειρισμού της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και στη φύτευση ως σχεδιαστικό εργαλείο. Παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για τις υπόσκαφες κατασκευές και τις διπλοκέλυφες (δικέλυφες) προσόψεις. Τέλος, δίνονται παραδείγματα βιοκλιματικών εφαρμογών από την παραδοσιακή αρχιτεκτονική.

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία για τη θέρμανση των εσωτερικών χώρων των κτιρίων, με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας και αυτήν των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για θέρμανση. Στο **7ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης, ομαδοποιημένα με βάση το ηλιακό κέρδος (άμεσο, έμμεσο και απομονωμένο).

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα δροσισμού εκμεταλλεύονται φυσικά στοιχεία συγκέντρωσης της θερμότητας (*heat sinks*) για τον δροσισμό των εσωτερικών χώρων των κτιρίων, με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας και αυτήν των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για ψύξη. Στο **8ο κεφάλαιο** διακρίνονται αρχικά οι έννοιες του φυσικού και του παθητικού δροσισμού και έπειτα παρουσιάζονται τα παθητικά συστήματα δροσισμού, ομαδοποιημένα κυρίως με βάση το στοιχείο συγκέντρωσης της θερμότητας που αυτά εκμεταλλεύονται.

Το **9ο κεφάλαιο** αναφέρεται στον φυσικό φωτισμό, που αποτελεί σημαντική παράμετρο του βιοκλιματικού σχεδιασμού και μπορεί να συμβάλει στην εξοικονόμηση συμβατικής ενέργειας καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους. Ανάλογα μάλιστα με το είδος και τη χρήση του κτιρίου, αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να είναι σημαντική. Ο σχεδιασμός του φυσικού φωτισμού σχετίζεται πρωτίστως με τα ανοίγματα του

κτιρίου, με τη θέση, τον σχεδιασμό και την κατασκευή τους, αλλά και με το σχήμα του κτιρίου, τον προσανατολισμό του, τον σχεδιασμό των εσωτερικών χώρων του, καθώς και του άμεσου περιβάλλοντος χώρου. Αρχικά, αναλύονται τα διαφορετικά στοιχεία φυσικού φωτισμού, με έμφαση στα ανοίγματα που αποτελούν και την κύρια είσοδο του φυσικού φωτός και της ηλιακής ακτινοβολίας στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα συστήματα ρύθμισης του φυσικού φωτισμού. Τέλος, γίνεται αναφορά σε εξελιγμένα συστήματα φυσικού φωτισμού, όπως καινοτόμοι υαλοπίνακες, ηλιακά ράφια (*light shelves*) κ.λπ.

Οι πόλεις τροποποιούν τις συνθήκες του μακροκλίματος και μεσοκλίματος, σε έναν ιδιαίτερο τύπο που αναφέρεται ως αστικό μικροκλίμα και, σε συνδυασμό με τις συνθήκες ρύπανσης και το σύνολο των περιβαλλοντικών παραμέτρων, συντελούν στη δημιουργία του αστικού οικοσυστήματος. Στο **10ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι στρατηγικές βιοκλιματικού σχεδιασμού υπαίθριων χώρων και αναλύονται οι βασικότερες από αυτές, που είναι η χρήση ανοιχτόχρωμων υλικών, ο σκιασμός και ο δροσισμός με εξάτμιση.

Η συνεχής μείωση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων, σε συνδυασμό και με την καταστροφή του περιβάλλοντος και την επιτακτική, πλέον, ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και για κτίρια (σχεδόν) Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (Net ή Near Zero Energy Buildings – NZEB), καθιστά πλέον απαραίτητη την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενεργείας (ΑΠΕ). Το **11ο κεφάλαιο** εστιάζει στην αρχιτεκτονική ένταξη συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα κτίρια και στους υπαίθριους χώρους των πόλεων. Ως εκ τούτου, γίνεται αναφορά μόνο σε εκείνες τις ΑΠΕ που σχετίζονται άμεσα με το δομημένο περιβάλλον, δηλαδή την ηλιακή ενέργεια, την αιολική ενέργεια, τη γεωθερμία και τη βιομάζα.

Στο **12ο κεφάλαιο**, και στο πλαίσιο του βιώσιμου σχεδιασμού, που απαιτεί τη συνολική/ολιστική θεώρηση του κτιριακού περιβάλλοντος, σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των κτιρίων, αναλύεται μια σειρά περιβαλλοντικά φιλικών στρατηγικών. Έτσι, γίνεται αναφορά στην περιβαλλοντική επίδραση των οικοδομικών υλικών, σε οικολογικά οικοδομικά υλικά και συστήματα, αλλά και σε ζητήματα που αφορούν τη διαχείριση του νερού (αποθήκευση και αξιοποίηση όμβριων υδάτων και διαχείριση υγρών αποβλήτων), πάντα μέσω της προσέγγισης του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και της ενσωμάτωσης στα κτίρια.

Το **13ο και τελευταίο κεφάλαιο** επικεντρώνεται στα προβλήματα που προκαλεί κυρίως η κλιματική αλλαγή-κλιματική κρίση σε συνδυασμό με την εξάντληση των φυσικών πόρων, και τα οποία έχουν άμεσο αντίκτυπο στην αρχιτεκτονική παραγωγή και ειδικότερα στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται τα κτίρια σε όλη τη διάρκεια του κύκλου της ζωής τους. Αναλύεται το ισχύον θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο στην Ευρώπη και στη χώρα μας, με βάση το οποίο καθορίζονται θεμελιώδεις αρχές σχεδιασμού και απαιτήσεις για την κατασκευή όλων των νέων κτιρίων, αλλά και για την ανακαίνιση-αναβάθμιση των όσων υφίστανται. Τα κτίρια μηδενικού ενεργειακού ισοζυγίου δεν αντιμετωπίζουν μόνο τα ζητήματα εξοικονόμησης ενέργειας, αλλά θέτουν στόχους προς ένα νέο πνεύμα στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό των κτιρίων, όπου η ενεργειακή και η περιβαλλοντική απόδοση μαζί με τη λειτουργικότητα, τη χρηστικότητα, τη σταθερότητα και την υψηλή αισθητική συναποτελούν βασικές παραμέτρους του σχεδιασμού.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Altomonte, S. (Ed.) (2012). *Sustainable architectural education. White Paper*. University of Nottingham, EDUCATE Press. https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/educate_sustainable_architectural_education_en.pdf

de Gaulmyn, C. & Dupre, K. (2019). Teaching sustainable design in architecture education: Critical review of Easy Approach for Sustainable and Environmental Design (EASED). *Frontiers of Architectural Research*, *8*(2), 238-260. https://doi.org/10.116/j.foar.2019.03.001

Hamdan, A. M. & Bashir, F. M. (2012). A proposed method for determining the pedagogical approach used by architecture educators in Universiti Teknologi Malaysia. In *Proceedings of Malaysian Architectural Education Conference* (pp. 27-42). http://irep.iium.edu.my/28611/3/MAEC_2012_Proceedings.pdf

Keumala, N., Younus, M., Kuan, Y., Razak, S., Ismail, M. & Al-Obaidi, K. (2016). Pedagogy of architectural education on Sustainability in Malaysia – Student Perspective. *Open House International*, *41*(4), 104-108. https://doi.org/10.1108/OHI-04-2016-B0014

Khan, A. Z., Vandevyvere H. & Allacker, K. (2013). Design for the Ecological Age: Rethinking the Role of Sustainability in Architectural Education. *Journal of Architectural Education*, *67*(2), 175-185. http://dx.doi.org/10.1080/10464883.2013.817155

Maciel, A., Ford, B. & Lamberts, R. (2007). Main influences on the design philosophy and knowledge basis to bioclimatic integration into architectural design—The example of best practices. *Building and Environment*, *42*(10), 3762-3773. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.041

Meir, I. A. (1999). "Spreading the Word": Toward a multiple layer program for information dissemination. In S. Szokolay S. (Ed.). *Sustaining the Future: Energy-Ecology-Architecture. Proc. 16th PLEA Int. Conf.* (vol.2. pp. 679-686). PLEA International & Dept. of Architecture, The University of Queensland, Brisbane.

National Architectural Accrediting Board (NAAB), 2020. *Conditions for Accreditation. 2020 Edition.* https://www.naab.org/wp-content/uploads/2020-NAAB-Conditions-for-Accreditation.pdf

Taleghani, M., Ansari, H. R. & Jennings, P. (2011). Sustainability in architectural education: A comparison of Iran and Australia. *Renewable Energy, 36*(7), 2021-2025. https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.024

UIA (2017). *UIA and architectural education reflections and recommendations*. General Assembly. https://www.uia-architectes.org/en/resource/architectural-education-charter/

Wright, J. (2003). Introducing sustainability into the architecture curriculum in the United States. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, *4*(2), 100-105. https://doi.org/10.1108/14676370310467131

Κεφάλαιο 1

Γενικά στοιχεία – Βιώσιμος βιοκλιματικός σχεδιασμός

Σύνοψη
Το πρώτο κεφάλαιο έχει στόχο την εισαγωγή στις διαφορετικές έννοιες και ορισμούς που σχετίζονται με τον βιώσιμο περιβαλλοντικό σχεδιασμό. Περιλαμβάνεται σύντομη ιστορική αναδρομή και, στη συνέχεια, περιγράφεται το ευρύτερο πλαίσιο, δηλαδή τα σύγχρονα περιβαλλοντικά προβλήματα και η συσχέτισή τους με το δομημένο περιβάλλον. Τέλος, γίνεται μια πρώτη αναφορά στον κύκλο ζωής των κτιρίων και στα ζητήματα που σχετίζονται με αυτόν, δηλαδή στα ζητήματα επανάχρησης και ανακύκλωσης υλικών και κτιρίων, αλλά και στις πρόνοιες του σχεδιασμού για αποσυναρμολόγηση, και παρουσιάζονται βασικά στοιχεία πάνω στη δόμηση με φυσικά υλικά.

Προαπαιτούμενη γνώση
Γενικές γνώσεις γύρω από την Οικολογία, τα Δομικά Υλικά και την Οικοδομική.

1.1 Εισαγωγικό πλαίσιο

> *«In the middle of the 20th century, we saw our planet from space for the first time. Historians may eventually find that this vision had a greater impact on thought than did the Copernican revolution of the 16th century, which upset the human self-image by revealing that the Earth is not the centre of the universe. From space, we see a small and fragile ball dominated not by human activity and edifice but by a pattern of clouds, oceans, greenery, and soils. Humanity's inability to fit its activities into that pattern is changing planetary systems, fundamentally. Many such changes are accompanied by life-threatening hazards. This new reality, from which there is no escape, must be recognized —and managed».*
>
> *Brundtland Report – Our common future 1987*

Η Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη (WCED) συγκλήθηκε ως ανεξάρτητη επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών υπό την Πρωθυπουργό της Νορβηγίας Gro Harlem Brundtland, η οποία ήταν και πρόεδρός της το 1983· κύριος στόχος της ήταν η εύρεση λύσεων για την εξασφάλιση και διατήρηση της εξέλιξης και της προόδου των ανθρώπινων έργων μέσω της ανάπτυξης χωρίς την εξάντληση των φυσικών πόρων για τις μελλοντικές γενιές. Χωρίς αυτή την ισορροπία, το γήινο οικοσύστημα δεν θα μπορεί να υποστηρίζει την ανθρώπινη ζωή. Το 1987, η Έκθεση της Επιτροπής με τίτλο *Το Κοινό μας Μέλλον* (*Our common future*) εισήγαγε τον όρο της **βιώσιμης ανάπτυξης**: «Η βιώσιμη ανάπτυξη καλύπτει τις ανάγκες του παρόντος, εξασφαλίζοντας το δικαίωμα στις επόμενες γενιές να καλύψουν τις δικές τους». (WCED, 1987) Οι τρεις (3) πυλώνες της βιώσιμης ανάπτυξης είναι η οικονομία (οικονομική αποτελεσματικότητα), το περιβάλλον (περιβαλλοντική προστασία) και η κοινωνία (κοινωνική δικαιοσύνη).

Τις τελευταίες δεκαετίες του 20ού αιώνα, το καταστροφικό αποτύπωμα της ανθρώπινης δραστηριότητας στον πλανήτη έγινε εμφανές. Μέσα σε λιγότερα από διακόσια χρόνια, η ανάπτυξη οδήγησε σταδιακά στην υποβάθμισή του. Τα βασικά περιβαλλοντικά προβλήματα τα οποία τις τελευταίες τρεις

δεκαετίες εξελίσσονται αλματωδώς και διαπλέκονται με όλες σχεδόν τις πτυχές της ανθρώπινης δραστηριότητας είναι:

- η μόλυνση του περιβάλλοντος σε πολλαπλά επίπεδα,
- η εξάντληση των φυσικών πόρων και των ορυκτών καυσίμων και
- η συνεχής υποβάθμιση της βιοποικιλότητας και των συνθηκών διαβίωσης.

Πιο αναλυτικά, η μόλυνση σχετίζεται με όλα τα στρώματα του φυσικού περιβάλλοντος. Η διατάραξη της ατμόσφαιρας, κυρίως λόγω των εκτεταμένων και χρόνιων και συνεχών εκπομπών, έχει προκαλέσει σημαντικές μεταβολές στο παγκόσμιο κλίμα, οδηγώντας στην αδιαμφισβήτητη πλέον κλιματική κρίση, αποτέλεσμα της οποίας είναι τα ακραία καιρικά φαινόμενα, που επηρεάζουν τον φυσικό πλούτο, τη χλωρίδα και την πανίδα, ενώ παράλληλα προκαλούν τεράστιες ζημιές στο ανθρωπογενές περιβάλλον, πολλαπλασιάζοντας παράλληλα τα δομικά και όχι μόνον απόβλητα. Ακόμα, η λανθασμένη διαχείριση υλικών και αγαθών έχει ως συνέπεια τον μεγάλο όγκο απορριμμάτων, η ελλειπής διαχείριση των οποίων μολύνει σε όλα τα επίπεδα το φυσικό περιβάλλον, δηλαδή το έδαφος, τον αέρα, τον υδροφόρο ορίζοντα και τις επιφάνειες νερού. Αν προστεθεί σε αυτά η συνεχής αύξηση του πληθυσμού και η ελλιπής ευαισθητοποίηση για το αποτύπωμα του καθενός μας στον πλανήτη που μας φιλοξενεί, μπορεί κανείς εύκολα να κατανοήσει το μέγεθος του προβλήματος και τη ραγδαία εξέλιξη της περιβαλλοντικής αλλοίωσης και καταστροφής.

Τα κτίρια αλληλεπιδρούν, τόσο με το άμεσο όσο και με το ευρύτερο περιβάλλον, με πολλούς τρόπους. Ο συσχετισμός της διαδικασίας παραγωγής, της λειτουργίας και της αποδόμησης των κτιρίων με τα περιβαλλοντικά προβλήματα είναι πλέον σαφής και αξιολογείται σε ποσοστό της τάξης του 45% περίπου.

1.2 Ορισμοί

- Ο **περιβαλλοντικά φιλικός** ή **οικολογικός σχεδιασμός** κτιρίων (*environmentally-friendly, ecological design*) αναφέρεται στον σχεδιασμό σε «συμφωνία» με τη φύση και με το περιβάλλον (Αλεξάνδρου, χ.ε.), και πιο συγκεκριμένα στην ένταξη του κτιρίου στο άμεσο περιβάλλον του με τις λιγότερο δυνατές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (περιβαλλοντικό αποτύπωμα). Σχετίζεται με τον τόπο (άμεσο περιβάλλον), τους εισερχόμενους πόρους, τη χρήση της ενέργειας και τον βιοκλιματικό σχεδιασμό, τους ρύπους και τις εκπομπές και, τέλος, την οικολογία, την υγιεινή και τις συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος.
- Ο **ενεργειακός σχεδιασμός** (*energy-efficient design*) σχετίζεται με τον σχεδιασμό κτιρίων υψηλών ενεργειακών επιδόσεων, δηλαδή με μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις για τη λειτουργία τους, και σχετίζεται με τη χρήση της ενέργειας (συστήματα με τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση, αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών και παραγωγή ενέργειας) (Αλεξάνδρου, χ.ε.). Ο ενεργειακός σχεδιασμός στοχεύει στη μείωση της συμβατικής ενέργειας που καταναλώνεται, και των αντίστοιχων ρύπων, αλλά και του φορτίου αιχμής για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό των κτιρίων, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα θερμική και οπτική άνεση μέσα στους χώρους (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 2006).
- Ο **βιοκλιματικός και παθητικός σχεδιασμός** κτιρίων και υπαίθριων χώρων (*bioclimatic. passive design* και *climate responsive design*) αναφέρεται στην αλληλεπίδραση των κτιρίων με τις κλιματικές συνθήκες του άμεσου περιβάλλοντος (μικροκλιματικές συνθήκες), τροποποιώντας τες με κατάλληλο σχεδιασμό, με στόχο τη δημιουργία εσωκλίματος που να παρέχει, με τη λιγότερη δυνατή ενεργειακή κατανάλωση, θερμική και οπτική άνεση στον χρήστη του, καθώς και υγιεινή διαβίωση του ανθρώπου μέσα στα κτίρια, αλλά και γύρω από αυτά. Σχετίζεται με την κλιματολογία, την επιλογή των υλικών και τη χρήση της ενέργειας. Δίνεται και ο ορισμός (με επίγνωση των κινδύνων υπεραπλούστευσης που έχουν οι ορισμοί) για το **βιοκλιματικό κτίριο**

(Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 23), το κέλυφος του οποίου καλείται να παίξει τον ρόλο ενός μεταβλητού φίλτρου, επειδή το κλίμα είναι μεταβλητό, για να παρέχει τις σταθερές εκείνες συνθήκες που περιγράφουμε ως συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης. Ένα βιοκλιματικό κτίριο, λοιπόν, πρέπει να διακρίνεται για τον δυναμικό χαρακτήρα της τροποποίησης του κλίματος και της προσαρμογής του σε αυτό και τούτο πρέπει να εκφράζει (Στο ίδιο).

- Ο **βιώσιμος σχεδιασμός** (*sustainable design*) αναφέρεται στην αλληλεπίδραση της αρχιτεκτονικής δραστηριότητας με το φυσικό περιβάλλον, τον άνθρωπο και την ανάπτυξη, σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των κτιρίων, και στοχεύει στους βασικούς πυλώνες της βιωσιμότητας. Στον βιώσιμο σχεδιασμό ενσωματώνονται: ο περιβαλλοντικός, ο ενεργειακός και ο βιοκλιματικός σχεδιασμός. Σε αυτό το βιβλίο, επιλέγεται ο όρος βιώσιμος σχεδιασμός γιατί, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, εστιάζει στον σχεδιασμό δομημένων χώρων, ο οποίος αποτελεί αντικείμενο της Αρχιτεκτονικής.

1.3 Σύντομη ιστορική αναδρομή

1.3.1 Ιστορικά στοιχεία

Πριν από τη Βιομηχανική Επανάσταση, η εξάρτηση του ανθρώπου από τη φύση, δηλαδή από τους φυσικούς πόρους και τις πηγές –όπως ο ήλιος, ο άνεμος και η βροχή–, από τον τόπο και τα φυσικά φαινόμενα, ήταν δεδομένη και ισχυρή και συχνά καθοριστική στη διαμόρφωση του δομημένου περιβάλλοντος. Ειδικά στις παραδοσιακές κατασκευές παρατηρούνται όλες σχεδόν οι αρχές βιωσιμότητας, όπως η οικονομία σε υλικά, η αξιολόγηση του τόπου και των κλιματικών συνθηκών, ο σεβασμός για τη φύση και τα περιορισμένα απόβλητα και απορρίμματα· κάθε αγαθό αξιοποιούνταν μέχρι την εξάντλησή του, με την επανάχρηση και την ανακύκλωση. Η βιομηχανική ανάπτυξη και η ραγδαία εξέλιξη σε όλους τους τομείς, ειδικά τον 20ό αιώνα, οδήγησαν στην απεξάρτηση του ανθρώπου από τις άμεσες φυσικές πηγές και κατ' επέκταση στην απομάκρυνσή του από τη φύση.

Ο όρος βιοκλιματικός σχεδιασμός πρωτοχρησιμοποιήθηκε από τους αδελφούς Olgyay στις αρχές της δεκαετίας του 1960 στο πλαίσιο των ερευνών τους για την επιστημονική διερεύνηση του τρόπου προσαρμογής ενός κτιρίου στις κλιματικές συνθήκες του περιβάλλοντός του.

Η εμφάνιση της πρώτης πετρελαϊκής ενεργειακής κρίσης στις αρχές της δεκαετίας του 1970 (Εικόνα 1.1), που είχε ως επίπτωση τη μεγάλη αύξηση στις τιμές του πετρελαίου, του βασικότερου τότε πόρου μαζί με τα ορυκτά καύσιμα, ανέδειξε το πρόβλημα της εξάρτησης της ανθρώπινης δραστηριότητας από αυτό. Αποτέλεσμα και των δύο πετρελαϊκών κρίσεων –του 1973 και του 1979– ήταν η μείωση της παγκόσμιας προσφοράς πετρελαίου, με ταυτόχρονη ξαφνική αύξηση της τιμής του βαρελιού, η οποία προκάλεσε ελλείψεις καυσίμων και μεγάλες ουρές στα βενζινάδικα (*Πετρελαϊκή κρίση του 1979*, 2023). Αυτό πυροδότησε το ενδιαφέρον για τη συστηματική εξέταση της σχέσης κτιρίου-κλίματος, με ιδιαίτερο στόχο να περιοριστεί η κατανάλωση της συμβατικά παραγόμενης ενέργειας.

Οι πρώτες προσπάθειες επικεντρώθηκαν στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση των κτιρίων και άνοιξαν τον δρόμο για τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης. Έτσι, εμφανίστηκαν τα πρώτα ηλιακά κτίρια και η ηλιακή αρχιτεκτονική (*Solar architecture*). Σύντομα, όμως, αναδείχθηκαν οι αδυναμίες της εστίασης του σχεδιασμού μόνο στη θέρμανση του κτιρίου, που ήταν η υπερθέρμανσή του το καλοκαίρι, ενώ συχνά η συγκέντρωση των υαλοστασίων στον νότιο προσανατολισμό για ηλιακή συλλογή δημιουργούσε προβλήματα στην οπτική άνεση. Ακόμα, ο ανεξέλεγκτος φυσικός αερισμός οδηγούσε σε απώλειες θερμότητας και, κατά συνέπεια, σε υψηλές καταναλώσεις.

Παρά το γεγονός ότι σταδιακά ο βιοκλιματικός σχεδιασμός εξελίχθηκε αντιμετωπίζοντας τα διάφορα ζητήματα, η επαναφορά της τιμής της ενέργειας σε φυσιολογικά επίπεδα και η ευκολία που παρείχαν τα

μηχανολογικά συστήματα για θέρμανση και ψύξη χωρίς τους περιορισμούς που επέβαλαν παράμετροι, όπως ο προσανατολισμός και ο σχεδιασμός του κελύφους, συνέβαλαν στις περιορισμένες εφαρμογές παθητικών συστημάτων.

Η απόλυτη εξάρτηση από τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό για ψύξη, θέρμανση, αερισμό και φωτισμό, ειδικά σε κτίρια γραφείων, σε συνδυασμό με τοξικές ουσίες που εκπέμπονται από τα υλικά των εσωτερικών χώρων, οδήγησαν σε υποβαθμισμένες και βλαβερές συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος, γεγονός που εντοπίστηκε από τα προβλήματα υγείας που ανέφεραν οι εργαζόμενοι. Το σύνδρομο του αρρώστου κτιρίου (Sick Building Syndrome – SBS) αναγνωρίστηκε πρώτη φορά στη δεκαετία του 1970, ενώ το 1984 ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας ανέφερε ότι το 30% των νέων ή ανακαινισμένων κτιρίων παρουσιάζει κακή ποιότητα εσωτερικού αέρα (Indoor Air Quality – IAQ) που οφείλεται στον ανεπαρκή αερισμό, στην έλλειψη συντήρησης και καθαρισμού των φίλτρων του κλιματισμού που ανακύκλωναν τον αέρα και τελικά τον καθαρισμό του αέρα από μικροσωματίδια και τοξικές εκπομπές («Sick Building Syndrome», 2016). Παράλληλα, ο ανεπαρκής αερισμός ευνοεί και την ανάπτυξη μικροοργανισμών, όπως η μούχλα και τα βακτήρια, καθώς και τη μετάδοση των ιών. Η πρόσφατη πανδημία του ιού Covid-19 επέβαλε τον καθαρισμό του εσωτερικού αέρα στα κτίρια, είτε με ελεγχόμενο φυσικό αερισμό είτε με τη χρήση φρέσκου αέρα και όχι ανακυκλωμένου στα μηχανολογικά συστήματα είτε με ειδικά μηχανήματα καθαρισμού του αέρα.



Εικόνα 1.1 *Πετρελαϊκή κρίση δεκαετίας 1970. Πηγή: Flag policy during the 1973 oil crisis by David Falconer via Wikimedia Commons, Public Domain.*
Στο Όρεγκον των ΗΠΑ, τα πρατήρια βενζίνης είχαν πινακίδες που επεξηγούσαν την πολιτική σημαίας κατά τη διάρκεια της πετρελαϊκής κρίσης τον χειμώνα του 1973-74. Η πράσινη σημαία σήμαινε ότι οποιοσδήποτε μπορούσε να προμηθευτεί καύσιμα, η κίτρινη μόνο τα εμπορικά οχήματα και η κόκκινη σημαία ότι δεν υπήρχαν καύσιμα.

1.3.2 Συμφωνίες και νομοθεσία

Η συνεχώς αυξανόμενη ευαισθητοποίηση απέναντι στα ολοένα εξελισσόμενα και οξυνόμενα περιβαλλοντικά προβλήματα εκφράζεται και μέσα από μια σειρά διεθνών περιβαλλοντικών συμφωνιών, αλλά και από την Ευρωπαϊκή Νομοθεσία. Χρονολογία σταθμός υπήρξε το 1987, όταν ορίστηκε πρώτη φορά η βιώσιμη ανάπτυξη. Ακολούθησαν η Συνδιάσκεψη του Ρίο (UN Conference on Environment and Development, 1992, Rio de Janeiro), το Πρωτόκολλο του Κιότο (Kyoto Protocol, 1997) και η Συμφωνία του Παρισιού (Paris Agreement, 2016).

Το 2015, όλα τα κράτη μέλη των Ηνωμένων Εθνών ενέκριναν την Ατζέντα 2030 για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη (2030 Agenda for Sustainable Development), η οποία παρέχει ένα κοινό σχέδιο για την ειρήνη και την ευημερία των ανθρώπων και του πλανήτη, για το παρόν και για το μέλλον. Στο επίκεντρό του βρίσκονται οι 17 Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (United Nations Sustainable Development Goals – UNSDGs) (βλ. Εικόνα 1.2), οι οποίοι αποτελούν μια επείγουσα έκκληση για δράση από όλες τις χώρες –ανεπτυγμένες και αναπτυσσόμενες– σε μια παγκόσμια συνεργασία. Αναγνωρίζουν ότι ο τερματισμός της φτώχειας και άλλων στερήσεων πρέπει να συμβαδίζει με στρατηγικές που βελτιώνουν την υγεία και την εκπαίδευση, μειώνουν την ανισότητα και δίνουν ώθηση στην οικονομική ανάπτυξη, ενώ ταυτόχρονα αντιμετωπίζουν την κλιματική αλλαγή και συμβάλλουν στη διατήρηση των ωκεανών και των δασών (United Nations, n.d.).



Εικόνα 1.2 *Στόχοι βιώσιμης ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (UNSDGs). 1 Μειωμένη φτώχεια, 2 Μηδενική πείνα, 3 Καλή υγεία και ευημερία, 4 Ποιοτική εκπαίδευση, 5 Ισότητα των φύλων, 6 Καθαρό νερό και αποχέτευση, 7 Φτηνή και καθαρή ενέργεια, 8 Αξιοπρεπής εργασία και οικονομική ανάπτυξη, 9 Βιομηχανία, καινοτομία και υποδομές, 10 Λιγότερες ανισότητες, 11 Βιώσιμες πόλεις και κοινότητες, 12 Υπεύθυνη κατανάλωση και παραγωγή, 13 Δράση για το κλίμα, 14 Ζωή στο νερό, 15 Ζωή στη στεριά, 16 Ειρήνη, δικαιοσύνη και ισχυροί θεσμοί, 17 Συνεργασία για τους στόχους. Πηγή: UN SDG by Paulbourgine via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.*

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η Ευρωπαϊκή Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων, EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) εκδόθηκε πρώτη φορά το 2002 (2002/91/EC), με στόχους την προστασία του περιβάλλοντος, τη μείωση των εκπομπών CO_2, στο πλαίσιο του Πρωτοκόλλου του Κιότο, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από τον κτιριακό τομέα (40% του συνόλου) κ.ά. Η EPBD αναθεωρήθηκε το 2010 με την EPBD Recast (2010/31/EU), με βάση κυρίως τους στόχους της ΕΕ «20-20-20».

Στην Ελλάδα, η Ευρωπαϊκή Οδηγία EPBD ενσωματώθηκε στην Εθνική Νομοθεσία με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης των Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ) (ΦΕΚ τ.Β’ 407/09.04.2010 και ΦΕΚ τ.Β’ 2367/12.07.2017). Ο Κανονισμός διαμορφώνει «το πλαίσιο αρχών και καθορίζει τους όρους και τις προϋποθέσεις βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων» (ΦΕΚ τ.Β’ 2367/12.07.2017), με στόχο τη «μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, κλιματισμό (ΘΨΚ), φωτισμό και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ΖΝΧ) με την ταυτόχρονη διασφάλιση συνθηκών άνεσης και ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος των

κτιρίων» (Στο ίδιο). Η επίτευξη του παραπάνω στόχου «επιτυγχάνεται μέσω του ενεργειακά αποδοτικού σχεδιασμού του κελύφους, της χρήσης ενεργειακά αποδοτικών δομικών υλικών και ηλεκτρομηχανολογικών (Η/Μ) συστημάτων, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ)» (Στο ίδιο). Για την υποστήριξη της εφαρμογής του ΚΕΝΑΚ εγκρίθηκαν και επικαιροποιούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα συγκεκριμένες κατευθυντήριες Τεχνικές Οδηγίες του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (ΤΟΤΕΕ), οι οποίες καθορίζουν αναλυτικά (ΤΕΕ, χ.ε.):

- τη μεθοδολογία υπολογισμού (ΤΟΤΕΕ 20701−1/2010 «Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης»),
- τα στοιχεία που αφορούν τα δομικά υλικά και στοιχεία (ΤΟΤΕΕ 20701−2/2010, 2017 & 20219 «Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων»),
- τα κλιματολογικά στοιχεία (ΤΟΤΕΕ 20701−3/2010 «Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών»),
- τη μεθοδολογία αξιολόγησης των Η/Μ εγκαταστάσεων (ΤΟΤΕΕ 20701−4/2010 «Οδηγίες και έντυπα ενεργειακών επιθεωρήσεων κτιρίων, λεβήτων και εγκαταστάσεων θέρμανσης και εγκαταστάσεων κλιματισμού»),
- τα συστήματα ΣΗΘ (ΤΟΤΕΕ 20701−5/2012 «Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού, Θερμότητας και Ψύξης: Εγκαταστάσεις σε Κτίρια»).

Ταυτόχρονα, εκδόθηκαν και δύο επιπλέον οδηγίες, οι οποίες αφορούν:

- τον βιοκλιματικό σχεδιασμό (ΤΟΤΕΕ 20701-6/2022 «Βιοκλιματικός σχεδιασμός στον ελλαδικό χώρο),
- τον φυσικό φωτισμό (ΤΟΤΕΕ 20701−7/2021 «Τεχνητός και φυσικός φωτισμός κτιρίων»).

Η έμφαση του ΚΕΝΑΚ δίνεται στη θερμομόνωση του κελύφους και των κουφωμάτων και στην αναβάθμιση των Η/Μ εγκαταστάσεων, καθώς και στην εφαρμογή ΑΠΕ, κυρίως με τη μορφή ενεργητικών ηλιακών συστημάτων (βλ. Κεφ. 11, παρ. 11.2). Η συμβολή των παθητικών συστημάτων θέρμανσης και δροσισμού δεν ποσοτικοποιείται ούτε επηρεάζει ουσιαστικά τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, παρά μόνο σε μεμονωμένες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα κάνει η συμβολή του σκιασμού.

Ταυτόχρονα, από τις πρώτες κιόλας εκδόσεις των οδηγιών για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων που εξαιρούσαν τα χαρακτηρισμένα κτίρια (διατηρητέα, μνημεία, ιστορικά κέντρα, παραδοσιακούς οικισμούς κ.λπ.) από την εφαρμογή των κανονισμών αναδείχθηκε σύντομα μια σειρά από αδυναμίες και προβληματισμούς. Στα μεν χαρακτηρισμένα κτίρια δεν ήταν δυνατόν να γίνουν επεμβάσεις βελτίωσης της ενεργειακής και θερμικής τους απόδοσης, με τον φόβο της αλλοίωσης της φυσιογνωμίας τους, με αποτέλεσμα να είναι οικονομικά ασύμφορα και προβληματικά ως προς τις συνθήκες άνεσης. Τα υπόλοιπα κτίρια που ανήκουν στην ίδια εποχή (παραδοσιακά, νεοκλασικά, κτίρια του μεσοπολέμου και του πρώιμου μοντερνισμού κ.λπ.) έχουν τα ίδια κτιριοδομικά χαρακτηριστικά και πιθανόν την ίδια ιστορική αξία, αλλά δεν είναι χαρακτηρισμένα, οπότε μπορούν να αναβαθμιστούν ενεργειακά σύμφωνα με τον αντίστοιχο κανονισμό, αψηφώντας τις πιθανές αστοχίες και αλλοιώσεις (Alexandrou et al., 2018).

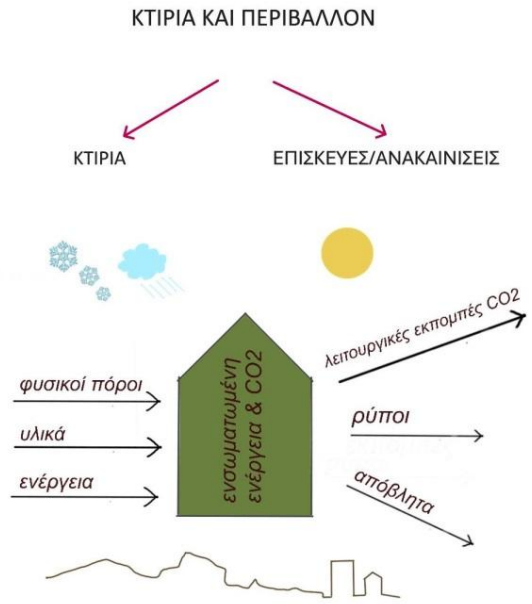
Ο προβληματισμός αυτός απασχόλησε όλες τις ευρωπαϊκές χώρες (και όχι μόνο) και είχε ως αποτέλεσμα την οργάνωση ερευνητικών προγραμμάτων και έρευνας προκειμένου να επιλυθούν και οι δύο προβληματικές. Μάλιστα, το 2017 εκδόθηκε Ευρωπαϊκή Οδηγία για τη μεθοδολογία αξιολόγησης τέτοιων κτιρίων πριν από οποιαδήποτε επέμβαση (CSN EN 16883:2017), ενώ αντίστοιχη προσπάθεια έγινε και από ομάδες εργασίας του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (ΤΕΕ) για την αναθεώρηση του ΚΕΝΑΚ (Alexandrou, 2023 και 2018).

1.4 Δομημένος χώρος και περιβαλλοντικά προβλήματα

1.4.1 Σχέση δόμησης και περιβάλλοντος

Τις τελευταίες τρεις (3) περίπου δεκαετίες, η ολοένα αυξανόμενη εισαγωγή νέων υλικών και πόρων στον κατασκευαστικό τομέα, καθώς και η αλλαγή στον τρόπο της ζωής των ανθρώπων και στις απαιτήσεις σχετικά με τις συνθήκες άνεσης και την αισθητική έχουν καταστήσει τον κατασκευαστικό τομέα έναν από τους πιο ενεργοβόρους και ρυπογόνους τομείς, καθώς συμβάλλει κατά μεγάλο ποσοστό (της τάξης >45%) στα περιβαλλοντικά προβλήματα. Οι πρακτικές δόμησης νέων κτιρίων, καθώς και η ανακαίνιση και η κατεδάφιση υφισταμένων κτιρίων συνοδεύονταν από κατασπατάληση υλικών και πόρων και απόρριψη μεγάλου όγκου δομικών αποβλήτων, των οποίων η διαχείριση ήταν μέχρι πρόσφατα προβληματική. Η κατασκευαστική αλυσίδα (βιομηχανική παραγωγή και επεξεργασία υλικών, μεταφορά, οικοδόμηση και αποδόμηση), καθώς και η λειτουργία των κτιρίων, που βασιζόταν κατά το μεγαλύτερο μέρος της στον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό –συχνά ιδιαίτερα ενεργοβόρο–, συνέβαλε σε υψηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG).

Είναι ενδεικτικό το γεγονός ότι το 50% των αποθεμάτων πρώτων υλών που εξάγονται από τη φύση και συγχρόνως το 35% των αποβλήτων σχετίζονται με την κατασκευή κτιρίων (Boonstra, 1996, σ. 24 και Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, n.d.). Επιπρόσθετα, οι εκπομπές από την εξόρυξη και τη βιομηχανική παραγωγή υλικών εκτιμάται στο 5-12%.



Εικόνα 1.3 *Η σχέση του κτιρίου με το περιβάλλον. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

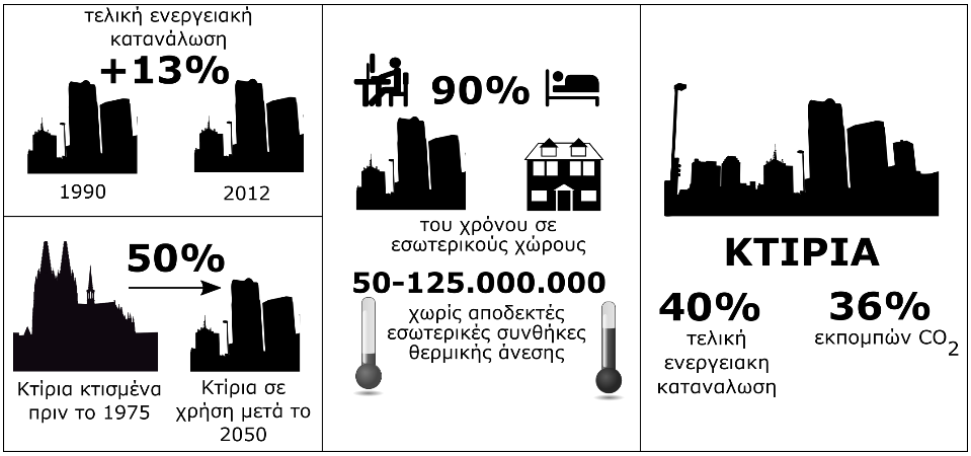
Στην Ευρώπη, ο κτιριακός τομέας είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας (Εικόνα 1.4), με τα κτίρια να καταναλώνουν το 42% της ενεργειακής κατανάλωσης για τη λειτουργία τους (θέρμανση, ψύξη-κλιματισμός, αερισμός, φωτισμός) και να εκπέμπουν σχεδόν 25% των non-ETS (Emissions Trading System) άμεσων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Arcipowska & Mariottini, 2016), ενώ το 42% της ενέργειας που δαπανάται στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχει σχέση με τον κτιριακό τομέα (European Commission-Department: Energy – In focus, 2020 & Sustainability for All, n.d.).

Η μη περιβαλλοντική διαχείριση λοιπόν του κτιριακού τομέα έχει πολυάριθμες και ιδιαίτερα σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις, στο φυσικό περιβάλλον και στο κλίμα, σε τοπικό, σε περιφερειακό, αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο. Όλα τα παραπάνω σημαντικότατα περιβαλλοντικά προβλήματα εντείνονται κυρίως από τις εκπομπές που παράγονται από την ενέργεια, η οποία δαπανάται για όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των κτιρίων, όταν αυτή παράγεται από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δηλαδή από την καύση

ορυκτών καυσίμων. Την τελευταία μόνο δεκαετία έχουν αρχίσει να εδραιώνονται πιο συστηματικά οι αρχές και οι κανονιστικές ρυθμίσεις για την περιβαλλοντική διαχείριση όλων των σταδίων που σχετίζονται με την κατασκευή και λειτουργία των κτιρίων, καθώς και τη διαχείριση των δομικών απορριμμάτων.

Οι σύγχρονες πόλεις εκφράζουν πιο καθαρά όλα τα παραπάνω, διότι, εκτός από τη συμβολή τους σε αυτά, επιβαρύνονται ιδιαίτερα με τα περιβαλλοντικά προβλήματα. Η μετατόπιση των συνεπειών που έχουν η παραγωγή, η μεταφορά και πολλές φορές και η απόρριψη των οικοδομικών υλικών από το περιορισμένο τοπικό επίπεδο στην παγκόσμια κλίμακα αποτελεί άμεση απόρροια της ανάπτυξης του παγκόσμιου εμπορίου και των μεταφορών. Έτσι, ενώ παλαιότερα οι πόλεις χρησιμοποιούσαν υλικά από μια περιορισμένη ακτίνα γύρω τους, σήμερα υπάρχει πλέον η δυνατότητα της χρησιμοποίησης οποιουδήποτε υλικού, από οποιοδήποτε μέρος του κόσμου.

Με τον τρόπο αυτόν η υπερεκμετάλλευση των φυσικών πόρων και η καταστροφή του τοπίου και των οικοσυστημάτων, που συνεπάγεται η παραγωγή υλικών σε μια περιοχή του πλανήτη, δεν επηρεάζουν άμεσα τις περιοχές όπου χρησιμοποιούνται τα υλικά αυτά. (Smith et al., 1998, σ. 80) Συγχρόνως, η εξάντληση των μη ανανεώσιμων φυσικών και ενεργειακών πόρων και η ρύπανση δεν πληρώνονται από τους υπεύθυνους, αλλά θα πρέπει να πληρωθούν από τις επόμενες γενιές (Minke, 1986, σ. 13). Επίσης, η ρύπανση του εδάφους, του αέρα και των υδάτων δεν περιορίζεται στα στενά όρια των κρατών. Όλα τα παραπάνω έρχονται σε άμεση αντίθεση με τις προϋποθέσεις της ισότητας μέσα σε μια γενιά (*intergenerational equity*), της ισότητας ανάμεσα στις διαδοχικές γενιές (*intragenerational equity*) και της διασυνοριακής ευθύνης (*transfrontier responsibility*) (Haughton & Hunter, 1996, σ. 16), που θεωρεί η Έκθεση Brundtland (WCED, 1987) απαραίτητες προϋποθέσεις της βιώσιμης ανάπτυξης.



Εικόνα 1.4 *Το κτιριακό απόθεμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης σε αριθμούς. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με αντικείμενα από το Publicdomainvectors.org, Public domain, με δεδομένα από Arcipowska & Mariottini (2016).*

Στην Ελλάδα, η τελική ενεργειακή κατανάλωση μειώθηκε κατά σχεδόν 13% από το 2000 έως το 2018. Οι μετακινήσεις αποτελούν τον κυριότερο καταναλωτή, με 38% της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης το 2018, έχοντας μειωθεί κατά 9% ανάμεσα στο 2000 και το 2018. Ο οικιακός τομέας αποτελεί τον δεύτερο σημαντικότερο καταναλωτή, με 27% της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης, και εμφανίζεται μειωμένος κατά 8%. Η συμβολή της βιομηχανίας είναι 18%, με μείωση κατά σχεδόν 38%, ενώ των υπηρεσιών 16%, με αύξηση κατά 86% (Odyssee Mure, 2021).

Για τις κατοικίες, η ενέργεια που καταναλώνεται για θέρμανση ανά τ.μ. μειώθηκε κατά 24% ανάμεσα στα έτη 2000 και 2018 (από 9,9 koe/m^2 σε 7,6 koe/m^2). Αυτή η μείωση οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων κτιρίων (λόγω εφαρμογής του ΚΕΝΑΚ), αλλά και στην αλλαγή της συμπεριφοράς των χρηστών (οικονομική κρίση, ενεργειακή φτώχεια κ.λπ.). Η ενεργειακή κατανάλωση αυξήθηκε για το μαγείρεμα (19%), τον κλιματισμό, τις ηλεκτρικές συσκευές (16%) και τον τεχνητό φωτισμό, ενώ για το ζεστό νερό χρήση (ΖΝΧ) μειώθηκε ελαφρώς (-12%) (Στο ίδιο).

1.5 Τα περιβαλλοντικά προβλήματα

Η υπερθέρμανση του πλανήτη, η τρύπα του όζοντος, η όξινη βροχή και το φωτοχημικό νέφος αποτελούν τα τέσσερα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα, τα οποία σχετίζονται με το δομημένο περιβάλλον και τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι διαφορετικές φάσεις του κύκλου ζωής των υλικών που χρησιμοποιούνται στις κτιριακές κατασκευές συμβάλλουν, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, στην όξυνση αυτών των φαινομένων. Συγχρόνως, οι άμεσες και μακροπρόθεσμες επιπτώσεις τους πλήττουν άμεσα τον άνθρωπο και τις κατασκευές του. Τα περιβαλλοντικά αυτά προβλήματα δεν έχουν όλα την ίδια σημασία. Έτσι, η υπερθέρμανση του πλανήτη και η τρύπα του όζοντος αφορούν το σύνολο του πλανήτη, η όξινη βροχή αφορά περιφέρειες, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες χώρες, ενώ το φωτοχημικό νέφος αποτελεί σχετικά τοπικό φαινόμενο (Μπουγιατιώτη, 2007). Στη συνέχεια, επιχειρείται μια πολύ συνοπτική παρουσίαση των περιβαλλοντικών αυτών προβλημάτων και η σύνδεσή τους με το δομημένο περιβάλλον.



Εικόνα 1.5. *Περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με το δομημένο περιβάλλον.*
Α. Υπερθέρμανση του πλανήτη και λιώσιμο των πάγων. Πηγή: Iceland, Photo by Asile Clairette on Unsplash.
β. Όξινη βροχή. Πηγή: Copse of bare trees, Photo by Casey Fyfe on Unsplash.
γ. Φωτοχημικό νέφος. Πηγή: Smog over the city, Photo by Alex Gindin on Unsplash.
δ. Ευτροφισμός των υδάτων. Πηγή: Caspian Sea from orbit by Jeff Schmaltz, MODIS Rapid Response Team, NASA/GSFC, via Wikimedia Commons, Public Domain.

Η *υπερθέρμανση του πλανήτη* (*global warming*) οφείλεται στο *φαινόμενο του θερμοκηπίου* (*greenhouse effect*), που ορίζεται ως «η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, που προκαλείται από την απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τη γη» (Κουιμτζής, 1998, σ. 34) (Εικόνα 1.5.α.). Το φαινόμενο του θερμοκηπίου οφείλεται σε διάφορα αέρια,[1] τα οποία δημιουργούν ένα στρώμα στην ατμόσφαιρα που παγιδεύει μέρος της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Τα κυριότερα αέρια είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) σε ποσοστό 61%, το μεθάνιο (CH_4) κατά 15%, το όζον (O_3) με 8,5%, το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) με 4% και οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs) σε ποσοστό 11% (Κουιμτζής, 1998, σ. 34). Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) είναι το σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου, καθώς εκλύεται από τις περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες, κυρίως ως αποτέλεσμα της καύσης οργανικών καυσίμων (Berge, 2003, σ. 32). Οι άμεσες συνέπειες της ανόδου της θερμοκρασίας είναι το λιώσιμο των πάγων στους πόλους και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας. Τα παραπάνω πλήττουν τις πόλεις και το δομημένο περιβάλλον. Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίο το κλίμα της Γης θα μεταβληθεί από την άνοδο της θερμοκρασίας και το λιώσιμο των πάγων δεν είναι γνωστός. Υπάρχουν σενάρια που αναφέρονται σε ερημοποίηση των περιοχών που βρίσκονται στην εύκρατη κλιματική ζώνη, δηλαδή ανάμεσα στα γεωγραφικά πλάτη από τον 20^o έως τον 40^o παράλληλο (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 34.), και άλλα που θεωρούν πιθανό το «πάγωμα» του βόρειου ημισφαιρίου ως απόρροια της επίδρασης των νερών των πόλων στο Ρεύμα του Κόλπου (Jancovici, 2003).

[1] Τα έξι κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου είναι: το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), οι υδροφθοράνθρακες (hydrofluorocarbons – HFC), οι υπερφθοράνθρακες (perfluorocarbons – PFC) και το εξάφθορο θειικό άλας (sulphurhexafluoride – SF6) (UNFCCC, 2009).

Η ύπαρξη όζοντος στη στρατόσφαιρα συμβάλλει στη δημιουργία ενός προστατευτικού στρώματος, το οποίο απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία (μήκη κύματος 200-300 nm), επιτρέποντας την ανάπτυξη και τη διατήρηση της ζωής πάνω στη Γη (Κουιμτζής, 1998, σ. 41). Η *τρύπα του όζοντος* (*ozone layer depletion*) αναφέρεται «στη μειωμένη συγκέντρωση της στοιβάδας του όζοντος πάνω από την Ανταρκτική» (Κουιμτζής 1998, σ. 43). Η καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος οφείλεται κυρίως στο μονοξείδιο του αζώτου (NO) και στους χλωροφθοράνθρακες (CFCs) (Κουιμτζής, 1998, σ. 42, Berge, 2003, σ. 145). Οι επιπτώσεις της τρύπας του όζοντος αφορούν πρωταρχικά την υγεία του ανθρώπου (αύξηση των καρκίνων του δέρματος, των παθήσεων των ματιών και εξασθένηση του ανοσοποιητικού συστήματος), ενώ υπολογίζεται ότι μπορεί να υπάρχουν και συνέπειες στο κλίμα (Κουιμτζής, 1998, σ. 45).

Ως *όξινη βροχή* (*acid rain*) ορίζεται «η βροχή με pH χαμηλότερο από το φυσιολογικό, που είναι το 5,6» (Κουιμτζής, 1998, σ. 131) (Εικόνα 1.5.β). Η όξινη βροχή προκαλείται από την ενσωμάτωση ενώσεων, όπως είναι τα οξείδια του αζώτου (NOx) και το διοξείδιο του θείου (SO_2), ουσιών στην ατμόσφαιρα, οι οποίες μετατρέπονται σε θειικό οξύ (H_2SO_4) και νιτρικό οξύ (HNO_3) και πέφτουν στη συνέχεια στη γη με τη μορφή βροχόπτωσης. (Στο ίδιο) Το βασικό χαρακτηριστικό της όξινης βροχής είναι ότι αποτελεί διακρατικό περιβαλλοντικό πρόβλημα, ότι δηλαδή πλήττει συνήθως περιοχές οι οποίες βρίσκονται μακριά από την πηγή της εκπομπής των αέριων ρύπων που την προκαλούν. Αυτό συμβαίνει γιατί οι αέριοι ρύποι μεταφέρονται με τον αέρα και τα μέτωπα της κακοκαιρίας. Οι Κουιμτζής κ.ά. (1998, σ. 133) αναφέρουν ότι αυτός είναι και ο βασικός λόγος για τον οποίο το πρόβλημα αυτό δεν συναντάται στην Ελλάδα, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό των βροχοπτώσεων προέρχονται από τα δυτικά-νοτιοδυτικά (35%-45%) και τα νότια (30%-40%) και δεν συναντούν στην πορεία τους σημαντικές πηγές ρύπανσης. Αντίθετα, το μικρό ποσοστό βροχοπτώσεων (20%-25%), που έχει προέλευση από την Κεντρική Ευρώπη, είναι ελαφρά όξινο. Οι πρωτογενείς επιπτώσεις της όξινης βροχής προκαλούν τη μείωση του χρόνου ζωής πολλών οργανισμών (φυτά και ψάρια) (Berge, 2003, σ. 32), ενώ οι δευτερογενείς επιπτώσεις προκαλούν φθορές σε υλικά όπως η πέτρα και το μάρμαρο (μνημεία), στα προϊόντα τσιμέντου και στα μέταλλα (Fox & Murrell, 1998, σ. 15).

Το *φωτοχημικό νέφος* (*photochemical smog*) ορίζεται ως «ο φωτοχημικός σχηματισμός δευτερογενών ατμοσφαιρικών ρύπων με οξειδωτικές ιδιότητες όπως το τροποσφαιρικό όζον (O_3) και το διοξείδιο του αζώτου (NO_2)» (Κουιμτζής, 1998, 122) (Εικόνα 1.5.γ). Τα οξείδια του αζώτου (NOx) και οι υδρογονάνθρακες (VOC και SVOC πτητικές και ημιπτητικές οργανικές ενώσεις),[2] σε συνδυασμό με τη σκόνη συντελούν στη δημιουργία του φωτοχημικού νέφους, το οποίο επηρεάζεται δραστικά από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του αέρα (Berge, 2003, σ. 33 και Κουιμτζής, 1998, σ. 78). Το φωτοχημικό νέφος έχει συνέπειες στους ανθρώπους (πρόκληση ερεθισμών και πνευμονικές παθήσεις), στα φυτά, αλλά και στα υλικά που υπάρχουν στις πόλεις, ενώ συγχρόνως, προκαλεί διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας και μείωση της ορατότητας (Κουιμτζής, 1998, σ. 127).

Ο *ευτροφισμός των υδάτων* (*eutrophication*) ορίζεται ως ο εμπλουτισμός των νερών σε θρεπτικά συστατικά αζώτου και φωσφόρου που ανατρέπει τη φυσιολογική ροή της τροφικής αλυσίδας και δημιουργεί εκρηκτική αύξηση των αλγών (World Resources Institute, n.d.) (Εικόνα 1.5.δ). Τα κυριότερα αίτια, δηλαδή οι κύριες πηγές προέλευσης ενώσεων αζώτου και φωσφόρου, είναι αγροτικές και βιομηχανικές δραστηριότητες και οικιακά απόβλητα. Οι συνέπειες του ευτροφισμού είναι κυρίως οικολογικές και αφορούν την αύξηση του φυτοπλαγκτού, τη μείωση διαπερατότητας των υδάτων ως προς την ηλιακή ακτινοβολία και τη μείωση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο (O_2), με τελικό αποτέλεσμα τον θάνατο ψαριών και πουλιών (απώλεια βιοποικιλότητας). Ταυτόχρονα, υπάρχουν και οικονομικές συνέπειες, οι οποίες αφορούν κυρίως την

[2] Ως *πτητικές οργανικές ενώσεις* μεταφράζεται ο αγγλικός όρος *volatile organic compounds* (VOC), ενώ ως *ημιπτητικές οργανικές ενώσεις* μεταφράζεται ο αγγλικός όρος *semi-volatile organic compounds* (SVOC). Στις πτητικές οργανικές ενώσεις ανήκουν οι υδρογονάνθρακες, τα βιοαλκένια, οι αλδεϋδες και οι κετόνες, και κάποια οργανικά οξέα, ενώ στις ημιπτητικές οργανικές ενώσεις ανήκουν οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια και οι οργανοχλωριωμένες ενώσεις (Κουιμτζής, 1998, σ. 78).

ακαταλληλότητα νερού για διάφορες χρήσεις, τη μείωση των ψαριών, κινδύνους για τη ναυσιπλοΐα κ.ά., με τελικό αποτέλεσμα τη μετατροπή λιμνών (στάσιμα νερά) σε έλη (Στο ίδιο).

Τέλος, *τα ακραία καιρικά φαινόμενα* αποτελούν την τελευταία δεκαετία την πιο συχνή έκφανση της κλιματικής αλλαγής. Σε αυτά περιλαμβάνονται μεγάλης έκτασης πυρκαγιές (Εικόνα 1.6.β), καταστροφικές καταιγίδες και έντονες πλημμύρες (Εικόνα 1.6.α) που πλήττουν κατοικημένες περιοχές (Καραγιανίδης, Κοτρώνη & Λαγουβάρδος, χ.ε.), το κόστος των οποίων, κυρίως σε ανθρώπινες ζωές και δευτερευόντως σε υλικές ζημιές, αυξάνεται συνεχώς.

> Το 2017 ήταν μια από τις χειρότερες χρονιές στην ιστορία των δασικών πυρκαγιών στην Ευρώπη. Οι φλόγες σκότωσαν 127 ανθρώπους και έκαψαν περισσότερα από 12 εκατομμύρια στρέμματα στην Ευρωπαϊκή Ένωση, με το ύψος των ζημιών να εκτιμάται περίπου στα 10 δισεκατομμύρια ευρώ. Το 2018, περισσότεροι από 100 άνθρωποι σε όλη την Ευρώπη έχασαν τη ζωή τους σε φυσικές ή ανθρωπογενείς καταστροφές. Δασικές πυρκαγιές έπληξαν 22 κράτη μέλη της ΕΕ. Ο κίνδυνος φυσικών καταστροφών αναμένεται να ενισχυθεί στο μέλλον λόγω της κλιματικής αλλαγής, η οποία προκαλεί ακραίες καιρικές συνθήκες και παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας. (Καραγιαννίδης, Κοτρώνη & Λαγουβάρδος, χ.ε.)

Σύμφωνα με την πρώτη διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για την Αλλαγή του Κλίματος του 1992 (UNFCCC, 1992), η κλιματική αλλαγή ορίζεται ως «μια αλλαγή του κλίματος που αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα στην ανθρώπινη δραστηριότητα που μεταβάλλει τη σύνθεση της παγκόσμιας ατμόσφαιρας και η οποία προστίθεται στη φυσική μεταβλητότητα του κλίματος που παρατηρείται σε συγκρίσιμες χρονικές περιόδους». Η ένταση των φαινομένων, δηλαδή οι εκτεταμένοι καύσωνες που επηρεάζουν τις καλλιέργειες και συμβάλλουν καθοριστικά στην ένταση των πυρκαγιών, τα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα και οι μεγάλης έντασης καταιγίδες και παγετοί της τελευταίας τριετίας σε πολλές περιοχές του πλανήτη, επιβεβαιώνει ότι πλέον βρισκόμαστε σε κλιματική κρίση. Στην τελευταία διάσκεψη του 2023 (28η) ο κυρίαρχος στόχος που τέθηκε ήταν η επείγουσα έκκληση προς όλα τα μέρη να αναλάβουν δράση για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προκειμένου να τηρηθούν οι δεσμεύσεις της συμφωνίας του Παρισιού (UNFCCC, 2016) για τον περιορισμό της ανόδου της θερμοκρασίας του πλανήτη (υπερθέρμανση) στον 1,5°C.

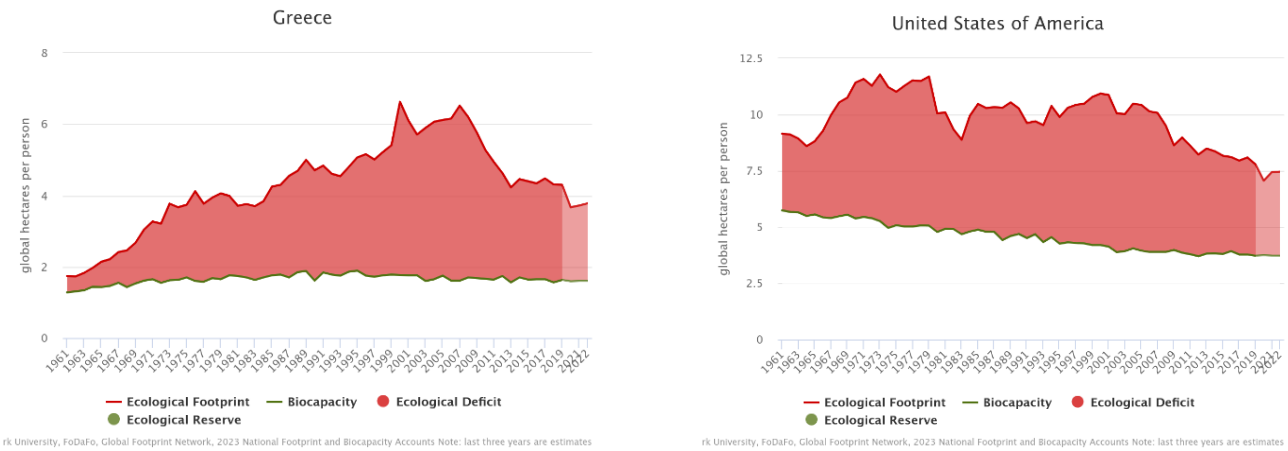


Εικόνα 1.6 *Ακραία καιρικά και άλλα φαινόμενα.*
α. Τυφώνας Katrina (Hurricane Katrina), Νέα Ορλεάνη, ΗΠΑ, 2005. Πηγή: Four days after Hurricane Katrina made landfall on the Gulf Coast, many parts of New Orleans remain flooded, U.S. Navy photo by Gary Nichols via Wikimedia Commons, Public Domain.
β. Rim Fire (1,000 km^2), Δάσος κοντά στο Εθνικό Πάρκο Yosemite (Yosemite National Park) 2013. Πηγή: The Rim Fire in the Stanislaus National Forest near in California began on Aug. 17, 2013-0004, U.S. Department of Agriculture via Wikimedia Commons, Public Domain.

1.6 Το οικολογικό αποτύπωμα

Το αποτύπωμα της ανθρώπινης δραστηριότητας αποτυπώνεται εύγλωττα από τους Robert και Brenda Vale (1991, σ. 171) στη φράση: «οι σύγχρονες πόλεις βασίζονται σε μια παγκόσμια ενδοχώρα για την παροχή υλικών που θα τις συντηρήσουν, ενώ τα απόβλητά τους επανέρχονται στο περιβάλλον και το ρυπαίνουν, σε πολλές περιπτώσεις, σε μια αντίστοιχη παγκόσμια κλίμακα». Η ποσοτικοποίηση αυτού του γεγονότος περιλαμβάνεται στη θεωρητική έννοια του οικολογικού αποτυπώματος, η οποία περιγράφει την έκταση (σε εκτάρια), που χρειάζεται ένα άτομο για την παραγωγή της τροφής και της ενέργειάς του, καθώς και για τις μεταφορές και τα απορρίμματά του. Με άλλα λόγια, το οικολογικό αποτύπωμα ανάγει σε μονάδες μέτρησης επιφάνειας τις εκτάσεις γης που καταναλώνονται από τις ενεργειακές απαιτήσεις (στις οποίες περιλαμβάνεται και η εμπεριεχόμενη ενέργεια των προϊόντων), που αντιστοιχούν στο κτισμένο περιβάλλον και στις απαιτήσεις για κήπους, καλλιέργειες, δάση και βοσκότοπους (Smith et al., 1998, σ. 21).

Το **οικολογικό αποτύπωμα** (βλ. ενδεικτικά Εικόνα 1.7) εκφράζει το μέτρο και τον χρόνο που ο άνθρωπος καταναλώνει φυσικές πηγές και πόρους και τα απόβλητα που παράγει σχετιζόμενα με τα αποθέματα της γης, τον χρόνο που χρειάζεται για να απορροφήσει τα απορρίμματα και να αναπαράγει νέες πηγές. Με λίγα λόγια, τη σχέση της ανθρώπινης δραστηριότητας σε όλα τα επίπεδα με τους φυσικούς πόρους ή αλλιώς πόσοι φυσικοί πόροι απαιτούνται για να τροφοδοτήσουν μια δραστηριότητα ή τον τρόπο ζωής (Global Footprint Network, 2003-2023). Πιο συγκεκριμένα, το *οικολογικό αποτύπωμα* (*ecological footprint*) είναι ένα μέτρο της επιφάνειας βιολογικά παραγωγικής γης και νερού που απαιτεί ένα άτομο, ένας πληθυσμός ή μια δραστηριότητα για να παραγάγει όλους τους πόρους που καταναλώνει και να απορροφήσει τα απόβλητα που παράγει, χρησιμοποιώντας τη διαθέσιμη τεχνολογία και τις πρακτικές διαχείρισης πόρων. Το οικολογικό αποτύπωμα μετριέται συνήθως σε παγκόσμια εκτάρια, καθώς το εμπόριο είναι παγκόσμιο, και άρα το αποτύπωμα ενός ατόμου ή μιας χώρας πρακτικά περιλαμβάνει γη ή θάλασσα από το σύνολο του πλανήτη (Στο ίδιο). Το 1 παγκόσμιο εκτάριο (*global hectare gha*) ισούται με 10 στρέμματα (10.000 m^2).



Εικόνα 1.7 *Οικολογικό αποτύπωμα για α. την Ελλάδα. β. τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Πηγή: Country trends, ©2003 – 2021 Global Footprint Network, CC BY-SA 4.0.*

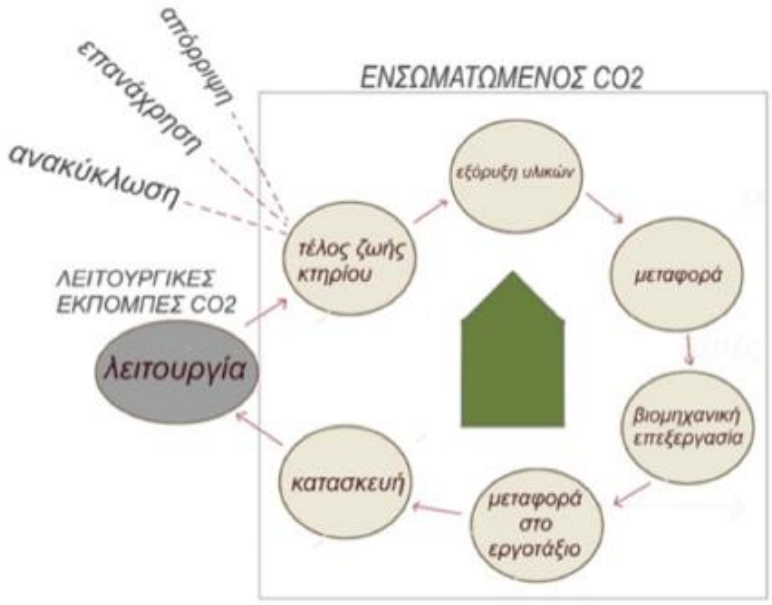
Το οικολογικό αποτύπωμα καταγράφει τη χρήση έξι κατηγοριών παραγωγικής επιφάνειας. Οι κατηγορίες είναι: Γεωργική γη, Κτηνοτροφική γη, Αλιεία, Κτισμένη γη, Δάση και Απαίτηση γης για δέσμευση CO_2. Με απλά λόγια, είναι ένας δείκτης που συνδέεται με τον ρυθμό με τον οποίο οι άνθρωποι καταναλώνουν τους πόρους της Γης (Μπασιαδάκη & Παπαγεωργίου, 2020).

Όσον αφορά τον κτιριακό τομέα, το οικολογικό αποτύπωμα σχετίζεται με τη διαχείριση του φυσικού περιβάλλοντος σε όλα τα στάδια της ζωής ενός κτιρίου. Μεταξύ αυτών και η επέμβαση που πραγματοποιείται

στο άμεσο περιβάλλον που οικοδομείται και, ειδικότερα στο πεδίο, συμπεριλαμβανομένων και των μη αναστρέψιμων βλαβών και αλλοιώσεων.

Με βάση το οικολογικό αποτύπωμα ορίζεται η *ημέρα υπέρβασης* (*World Overshoot Day*), ως η ημέρα του έτους που οι απαιτήσεις της ανθρωπότητας από τη φύση ξεπερνούν την παροχή της βιόσφαιρας ή την αναγεννητική της ικανότητα. Αυτή η υπέρβαση οδηγεί στην εξάντληση των οργανισμών που υποστηρίζουν το φυσικό απόθεμα, καθώς και στη συσσώρευση αποβλήτων. Σε παγκόσμιο επίπεδο, το οικολογικό έλλειμμα και η υπέρβαση ταυτίζονται, αφού δεν υπάρχει καθαρή εισαγωγή πόρων στον πλανήτη. Σε τοπικό επίπεδο, η υπέρβαση λαμβάνει χώρα όταν η εκμετάλλευση ενός τοπικού οικοσυστήματος είναι ταχύτερη από την ικανότητά του να αναγεννηθεί (Earth Overshoot Day, 2023).

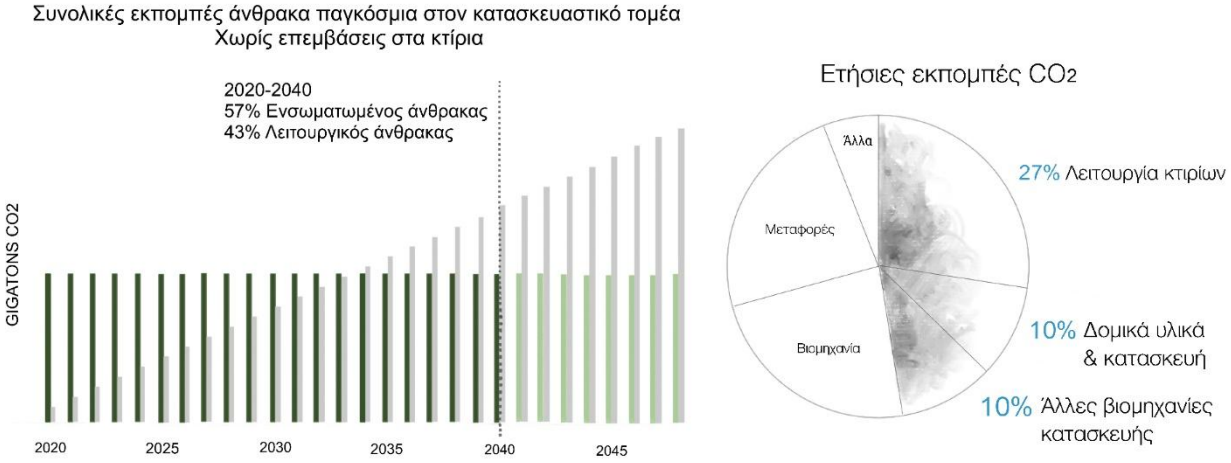
Το *αποτύπωμα άνθρακα* (*carbon footprint*) μετράει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) που σχετίζονται με τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Το αποτύπωμα άνθρακα προστίθεται στο οικολογικό αποτύπωμα, επειδή αποτελεί ανταγωνιστική χρήση βιοπαραγωγικής επιφάνειας, καθώς οι αυξανόμενες συγκεντρώσεις CO_2 στην ατμόσφαιρα θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν συσσώρευση οικολογικού χρέους (Εικόνα 1.8). Η αξιολόγηση του αποτυπώματος άνθρακα δίνεται σε κάποιες περιπτώσεις σε τόνους που εκλύονται ανά έτος, χωρίς αναγωγή στην επιφάνεια που απαιτείται για τη δέσμευσή τους (Global Footprint Network, 2003-2023).



Εικόνα 1.8 *Ενσωματωμένη ενέργεια και άνθρακας στον κύκλο ζωής κτιρίων. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

Το αποτύπωμα άνθρακα στον κατασκευαστικό τομέα διακρίνεται σε αυτόν που σχετίζεται με την κατασκευή, δηλαδή τον ενσωματωμένο άνθρακα (*embodied carbon*), και σε αυτόν που σχετίζεται με τη λειτουργία του κτιρίου, δηλαδή τον λειτουργικό άνθρακα (*operational carbon*). Ο ενσωματωμένος άνθρακας αναφέρεται στο ποσό των εκπομπών που εκλύεται κατά την οικοδόμηση και σχετίζεται με τον ενσωματωμένο άνθρακα των υλικών, δηλαδή τις εκπομπές που εκλύονται με την εξόρυξη, τη βιομηχανική επεξεργασία ή παραγωγή, τη μεταφορά και την τοποθέτησή τους, καθώς και με τις εκπομπές κατά τη διαδικασία της οικοδόμησης. Είναι φανερό πως το μέτρο αυτό αποτελεί μια σταθερή και αμετάβλητη τιμή που συνοδεύει το κτίριο σε όλη τη διάρκεια της ζωής του. Ο λειτουργικός άνθρακας σχετίζεται με τη λειτουργία των κτιρίων, δηλαδή τις εκπομπές από την καύση ορυκτών καυσίμων για ψύξη και θέρμανση, καθώς και άλλες που σχετίζονται με μηχανολογικά συστήματα. Ο λειτουργικός άνθρακας μπορεί να μεταβληθεί με τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς κάθε κτιρίου. Με δεδομένο ότι το δομημένο περιβάλλον εκλύει το 50% των ετήσιων εκπομπών CO_2, από τα οποία το 20% αφορά τα υλικά και την κατασκευή και το 27% αφορά τη λειτουργία των κτιρίων, και ότι το 2040 τα 2/3 των κτιρίων θα είναι κτίρια που υπάρχουν και σήμερα, γίνεται

ξεκάθαρο ότι για τη μείωση των συνολικών εκπομπών πρέπει πρωτίστως να αναβαθμιστεί ενεργειακά το υφιστάμενο απόθεμα και συγχρόνως η δόμηση νέων ή η ανακατασκευή των υφιστάμενων κτιρίων πρέπει να γίνεται με υλικά που έχουν καλό οικολογικό αποτύπωμα.



Εικόνα 1.9 *Εκπομπές άνθρακα (ενσωματωμένου και λειτουργικού) που σχετίζονται με τον κτιριακό τομέα. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου) με δεδομένα από Architecture (2030, n.d.)*

1.7 Κύκλος ζωής κτιρίων

1.7.1 Γενικά

Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) των κτιρίων και, κατ' επέκταση, των επιμέρους στοιχείων και των μεμονωμένων υλικών που τα διαμορφώνουν έχει αποκτήσει πλέον ιδιαίτερη σημασία. Η διαδικασία αυτή, που απεικονίζεται ενδεικτικά στην Εικόνα 1.10, παρέχει τη δυνατότητα, μέσω της συλλογής και της επεξεργασίας στοιχείων που αφορούν όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής των κτιρίων και των οικοδομικών υλικών και προϊόντων, της ποσοτικοποιημένης εκτίμησης της περιβαλλοντικής επίπτωσής τους, συνήθως με όρους ενέργειας και αέριων ρύπων που παράγονται (Smith et al., 1998, σ. 60). Περιλαμβάνει μια επίπονη και ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία συλλογής ποιοτικών και ποσοτικών δεδομένων, της οποίας όμως το τελικό προϊόν είναι, τις περισσότερες φορές, αδύνατο να ενταχθεί στην αρχιτεκτονική και κατασκευαστική πρακτική (Στο ίδιο).

Η LCA είναι μια διαδικασία στην οποία οι ροές υλικών και ενέργειας ενός συστήματος ποσοτικοποιούνται και αξιολογούνται. Στη συνέχεια, οι επιπτώσεις σε πλανητικό ή/και τοπικό επίπεδο (π.χ. υπερθέρμανση του πλανήτη, μείωση της στοιβάδας του όζοντος, οξίνιση και ευτροφισμός, όπως προαναφέρθηκε στην παρ. 1.3.1), υπολογίζονται με βάση την κατανάλωση ενέργειας, την παραγωγή αποβλήτων κ.λπ. Η LCA επιτρέπει την εκτίμηση των επιπτώσεων διαφορετικών διαδικασιών και φάσεων του κύκλου ζωής στο περιβάλλον. Η γενική δομή του μεθοδολογικού πλαισίου της LCA περιλαμβάνει τέσσερα στάδια: δηλαδή τον καθορισμό στόχου και πεδίου, την απογραφή στοιχείων κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory – LCI), την εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Ramesh, Prakash & Shukla, 2010).

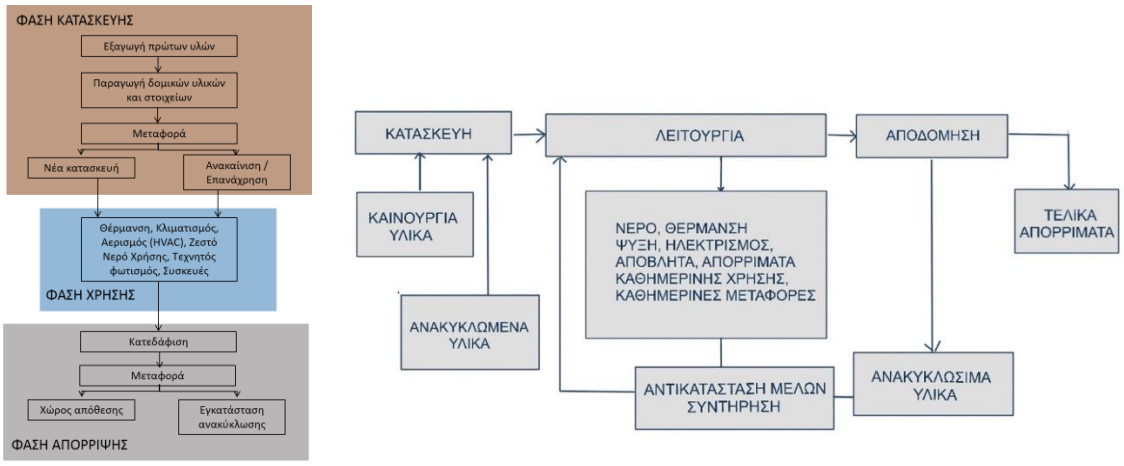


Εικόνα 1.10 *Ροή ενέργειας και πόρων στον κύκλο ζωής κτιρίου. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και απόδοση (Ε. Αλεξάνδρου) με δεδομένα από Koning et al. (2010).*

Η Ανάλυση Ενέργειας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Energy Analysis – LCEA) διαφέρει από την LCA ως προς τον υπολογισμό όλης της εισροής ενέργειας σε ένα κτίριο σε όλα τα στάδια της ζωής του, και συνεπώς αξιολογείται η ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών του (Ramesh, Prakash & Shukla, 2010). Οι ενεργειακές απαιτήσεις συνδέονται και με τις εκπομπές αέριων ρύπων του θερμοκηπίου. Έτσι, είναι δυνατή η διάκριση σε αρχική ενσωματωμένη ενέργεια και σε ενέργεια λειτουργίας, και κατά συνέπεια σε ενσωματωμένο άνθρακα (*embodied carbon*) και σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στη φάση λειτουργίας του κτιρίου (*operational carbon*).

Ο κύκλος ζωής ενός κτιρίου περιλαμβάνει τρεις (3) φάσεις (Ramesh, Prakash & Shukla, 2010):

- την κατασκευή, η οποία περιλαμβάνει την εξαγωγή, επεξεργασία και μεταφορά των υλικών και τεχνικών εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται στην ανέγερση και ανακαίνιση ενός κτιρίου και τα δομικά απορρίμματα που παράγονται,
- τη λειτουργία, η οποία αναφέρεται σε όλες τις δραστηριότητες που σχετίζονται με τη λειτουργία ενός κτιρίου, όπως η ηλεκτροδότηση συσκευών, η χρήση νερού, θέρμανση/ψύξη, συντήρηση κ.ά., και
- την απόρριψη, η οποία αφορά την κατεδάφιση ή αποδόμηση του κτιρίου και τη μεταφορά των υλικών σε χωματερές ή εγκαταστάσεις ανακύκλωσης.



Εικόνα 1.11 *Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων του κύκλου ζωής κτιρίων. Πηγή: α. Ίδια σχεδίαση, μετάφραση και απόδοση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με δεδομένα από Ramesh, Prakash & Shukla (2010). β Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

Καθεμία από τις φάσεις του κύκλου ζωής χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο δραστηριοτήτων που σχετίζονται είτε με την κατανάλωση ενέργειας και φυσικών πόρων είτε με την παραγωγή απορριμμάτων/αποβλήτων (βλ. Εικόνα 1.11) και είναι οι εξής (Bayer et al., 2010· Πέππα, 2021):

- **1η φάση: Κατασκευή, Παραγωγή οικοδομικών υλικών:** Η φάση αυτή σχετίζεται με την εξόρυξη, την επεξεργασία ή τη βιομηχανική παραγωγή και τη μεταφορά και ενσωμάτωση των υλικών. Οι παραπάνω φάσεις χρειάζονται ενέργεια, παράγουν ρύπους, εκπομπές και απορρίμματα.
- **2η φάση, Κατασκευή κτιρίου:** Η κατασκευή του κτιρίου ξεκινάει με τη μεταφορά υλικών στο εργοτάξιο, κατά την οποία, ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς και το καύσιμο, καταναλώνεται ενέργεια και εκπέμπονται αέριοι ρύποι. Στο εργοτάξιο, υπάρχει κατανάλωση ενέργειας για τη χρήση εργαλείων και εξοπλισμού, ενώ παράγονται και απόβλητα από τα υλικά που απορρίφθηκαν και δεν χρησιμοποιήθηκαν ή δεν ανακυκλώθηκαν.
- **3η φάση, Χρήση και Λειτουργία κτιρίου:** Η φάση αυτή αφορά τη λειτουργία του κτιρίου και είναι η πιο διευρυμένη χρονικά. Περιλαμβάνει την κατανάλωση ενέργειας και νερού και την παραγωγή αποβλήτων και απορριμμάτων. Ανάλογα με το διάστημα χρήσης του κτιρίου, υλικά και ενέργεια μπορούν να καταναλωθούν και κατά τη συντήρηση, ανακαίνιση ή επανάχρησή του, δηλαδή την επισκευή και την αντικατάσταση δομικών υλικών, στοιχείων και εγκαταστάσεων που ενδεχομένως χρειαστούν. Όπως και η κατασκευή, οι εργασίες ανακαίνισης περιλαμβάνουν κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές αέριων ρύπων από τη μεταφορά και τη χρήση εξοπλισμού, ενώ, ανάλογα με την έκταση της επέμβασης, μπορεί να οδηγήσουν και στην παραγωγή σημαντικής ποσότητας αποβλήτων και απορριμμάτων.
- **4η φάση: Απόρριψη, Τέλος ζωής κτιρίου:** Η τελευταία φάση του κύκλου ζωής ενός κτιρίου αφορά την κατεδάφισή του, η οποία ως διαδικασία καταναλώνει ενέργεια για τη μεταφορά και τη χρήση εξοπλισμού και παράγει απόβλητα και οικοδομικά απορρίμματα. Τα υλικά και τα δομικά στοιχεία από την κατεδάφιση μεταφέρονται, καταναλώνοντας ενέργεια και εκπέμποντας αέριους ρύπους, υποχρεωτικά πλέον σε χώρους διαχείρισης, από τους οποίους είτε επανέρχονται στη φάση της κατασκευής μέσω της επανάχρησης ή της ανακύκλωσης είτε απορρίπτονται. Ενέργεια καταναλώνεται και από τη μεταφορά τους στους χώρους απόθεσης ή ανακύκλωσης.

Ως υποσημείωση εδώ αναφέρεται ότι τα αρχικά LCEA αναφέρονται και στο πιστοποιητικό αξιολόγησης χαμηλού άνθρακα και ενέργειας κατά CIBSE (CIBSE, n.d.).

Το τέλος του κύκλου ζωής μπορεί να είναι το τέλος μιας γραμμικής πορείας ή η αρχή μιας νέας κυκλικής πορείας. Αυτή η λογική εκφράστηκε αρχικά με τα 3R (Reduce, Reuse, Recycle), δηλαδή «Μείωσε, Επαναχρησιμοποίησε, Ανακύκλωσε», που ήταν μια από τις πρώτες στρατηγικές βελτίωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ανθρώπινων δραστηριοτήτων γενικότερα. Σήμερα, τα «R» έχουν αυξηθεί αριθμητικά για να καλύψουν όσο το δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις και μπορεί να αναφέρονται στα παρακάτω (University of Colorado Boulder. Environmental Center, n.d.· Πέππα, 2021):

- **Rethink** (Ξανασκέψου): Επαναπροσδιορισμός των αναγκών και των δραστηριοτήτων.
- **Refuse** (Αρνήσου): Άρνηση της αποδοχής ή της υποστήριξης προϊόντων, στοιχείων, πρακτικών (ή και εταιρειών) που μπορεί να βλάψουν το περιβάλλον ως απόβλητα ή απορρίμματα ή διαδικασίες γενικότερα.
- **Reduce** (Μείωσε): Μείωση των πόρων που καταναλώνονται οδηγεί και σε μείωση των αποβλήτων.
- **Reuse** (Επαναχρησιμοποίησε) **& Repurpose** (Επαναπροσδιόρισε): Επαναχρησιμοποίηση υλικών, στοιχείων ή αντικειμένων, εφόσον μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν. Ο επαναπροσδιορισμός αναφέρεται στην εξεύρεση άλλων τρόπων χρήσης, τοποθέτησης ή/και αξιοποίησης.

- **Repair** (Επισκεύασε): Συντήρηση, επιδιόρθωση, αναβάθμιση, με στόχο την επέκταση του κύκλου ζωής και τη μείωση απορριμμάτων. Η συντήρηση καλύπτει ένα ευρύτατο φάσμα τόσο του δομημένου περιβάλλοντος (από τα κτίρια έως τα οικοδομικά στοιχεία και υλικά τους) όσο και της καθημερινότητας των ανθρώπων (αντικείμενα, συσκευές κ.λπ.).
- **Regift** (Δώρισε): Η παραχώρηση ή και η δωρεά στοιχείων που δεν χρειάζονται πια σε άλλους, ως εναλλακτική της απόρριψής τους.
- **Recycle** (Ανακύκλωσε): Η ανακύκλωση αναφέρεται στην επεξεργασία των υλικών με στόχο να παρέχουν πρώτες ύλες για την παραγωγή νέων υλικών και στοιχείων, εξοικονομώντας πρωτογενείς πρώτες ύλες και φυσικούς πόρους.
- **Recover** (Ανάκτησε): Η ανάκτηση αναφέρεται πρακτικά στην αξιοποίηση των αποβλήτων και των απορριμμάτων ως καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας και θερμότητας (Combined Heat and Power – CHP).

1.7.2 Επανάχρηση κτιρίων

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αξιοποίηση των κτιρίων μετά το τέλος της ζωής τους αποτελεί σημαντική συνιστώσα της βιώσιμης διαχείρισης του κτιριακού αποθέματος, μιας και μειώνει τη χρήση νέων υλικών, τις απαιτήσεις σε ενέργεια και την εκπομπή ρύπων που προκύπτουν από τις νέες κατασκευές· με λίγα λόγια, ακολουθεί μια από τις βασικές αρχές της βιωσιμότητας, δηλαδή την επισκευή (μείωση παραγωγής δομημένου χώρου), επανάχρηση και ανακύκλωση (reduce, reuse, recycle). Σε αυτό το πλαίσιο θα μπορούσε να γίνει και χρησιμοποίηση δομικών μελών κατεδαφιστέων και ερειπωμένων κελυφών, καθώς και ανακυκλωμένων υλικών για τη διαμόρφωση υπαίθριων χώρων ή πάρκων τσέπης και εφήμερων κατασκευών σε ανοιχτούς χώρους (Αλεξάνδρου, 2013β).

Η επανάχρηση υφιστάμενων κτιρίων είναι πολύ σημαντική και για έναν ακόμα λόγο. Η κατεδάφιση υφιστάμενων κτιρίων και η αντικατάστασή τους με νέα, πιο φιλικά περιβαλλοντικά, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι η βέλτιστη εναλλακτική, ούτε οικονομικά αλλά ούτε και οικολογικά. Στις μέρες μας, είναι σαφές πλέον ότι το πιο πράσινο κτίριο είναι αυτό που είναι ήδη κτισμένο –«The Greenest Building Is... One That Is Already Built» (Elefante, 2012)–, καθώς, σε σύγκριση με την κατεδάφιση, η επανάχρηση έχει σημαντικά οφέλη περιβαλλοντικά (μείωση οικοδομικών απορριμμάτων και ζήτησης πρώτων υλών), οικονομικά (μείωση κόστους μεταφοράς και διαχείρισης απορριμμάτων, ανάπτυξη τοπικής οικονομίας) και κοινωνικά (διατήρηση κοινωνικών δομών, ανανέωση και διαχείριση γειτονιών) (Gohardani & Bjork, 2012). Ταυτόχρονα, παρόλο που τα παραπάνω οφέλη μπορεί να είναι σχετικά περιορισμένα σε επίπεδο μεμονωμένων κτιρίων, μπορούν να είναι σημαντικά σε επίπεδο γειτονιάς, πόλης ή και χώρας (Elefante, 2012).

Η επανάχρηση υφισταμένων κτιρίων μπορεί να επιτευχθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Την επισκευή και αναβάθμιση παλαιών κτιρίων για την προσαρμογή τους στις σύγχρονες απαιτήσεις διαβίωσης, καθώς και στις σύγχρονες ενεργειακές απαιτήσεις. Μέρος των κτιρίων αυτών κατασκευάστηκε πριν από το 1980 που εισήχθη ο πρώτος κανονισμός θερμομόνωσης και, ως εκ τούτου, δεν είναι θερμικά μονωμένα, γεγονός που τα καθιστά ενεργοβόρα και κοστοβόρα στη διαχείριση, με δυσμενείς συνθήκες εσωκλίματος.
- Την προσαρμοστική αναβάθμιση (*adaptive reuse*) (Lanz & Pendlebury, 2022), η οποία αναφέρεται στη διατήρηση υφισταμένων κελυφών, αλλάζοντας τη χρήση τους και δίνοντάς τους νέα ζωή. Μεγάλος αριθμός τέτοιων κτιρίων έχει συχνά ιστορικό χαρακτήρα ή είναι χαρακτηρισμένα. Η εφαρμογή της προσαρμοστικής επανάχρησης ως στρατηγικής βιωσιμότητας συμβάλλει και στη διατήρηση της ιστορικής ταυτότητας και της δομικής ιστορίας μιας περιοχής.

Ο βιώσιμος ανασχεδιασμός και η ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων κτιρίων μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας για θέρμανση, δροσισμό και φωτισμό και, άρα, στη μείωση των εκπεμπόμενων αερίων του θερμοκηπίου. Ταυτόχρονα, έχουν επίδραση στην επίτευξη των στόχων της ΕΕ για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (low carbon economy roadmap 2050) και για τα κτίρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (Near Zero Energy Buildings – NZEB) και μηδενικού άνθρακα (*zero carbon*). Σε ό,τι αφορά τους στόχους των NZEB, η ενεργειακή απόδοση υφιστάμενων κτιρίων μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τόσο παθητικά (με την αξιοποίηση παθητικών συστημάτων θέρμανσης και δροσισμού) όσο και ενεργητικά (με την ενσωμάτωση ενεργητικών ηλιακών συστημάτων, όπως φωτοβολταϊκών στοιχείων ή/και ηλιακών συλλεκτών) (βλ. Κεφ. 11, παρ. 11.2).

Πέρα από τα παραπάνω, η διατήρηση του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος είναι συμβατή με τις έννοιες της κυκλικής οικονομίας. Παρόλο που η αρχική ενσωματωμένη ενέργεια και ο ενσωματωμένος άνθρακας αντιστοιχούν στο 10 με 20% των συνολικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής σε συμβατικά κτίρια, σε σύγκριση με την ενεργειακή κατανάλωση στο στάδιο λειτουργίας, η εξοικονόμηση μπορεί να είναι σημαντική λόγω του μεγάλου αριθμού υφιστάμενων κτιρίων.

1.7.3 Επανάχρηση δομικών υλικών

Η επανάχρηση δομικών υλικών αποτελεί μια αρχαία σχεδόν πρακτική. Η δυσκολία επεξεργασίας των υλικών κατά την προβιομηχανική περίοδο είχε καταστήσει πολύ συνήθη πρακτική την επανάχρηση των υλικών από κατασκευές που είχαν αποδομηθεί ή απλώς εγκαταλειφθεί. Αρχαία σπόλια (*spolia*) ή και νεότερα υλικά, όπως γωνιόλιθοι, σκαλοπάτια, παραστάδες και πεσσοί, ενσωματώνονται στη δόμηση νεότερων κατασκευών (Εικόνα 1.12).

Στο πλαίσιο της στρατηγικής αξιοποίησης κενών ιδιόκτητων κελυφών, πρέπει να γίνει και μια προσπάθεια διάσωσης και ανακύκλωσης (με τη μορφή της επανάχρησης) δομικών μελών που μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν αυτούσια ή έπειτα από μικρή επεξεργασία ή/και επισκευή. Σε πολλές περιοχές του κέντρου της Αθήνας (Κεραμεικός, Πατήσια κ.ά.), υπάρχει μεγάλος αριθμός εγκαταλελειμμένων παλαιών κτιρίων –πολλά από τα οποία είναι διατηρητέα– που ερημώνουν και τα δομικά τους μέλη φθείρονται ανεπανόρθωτα. Αυτή η στρατηγική έχει περιβαλλοντικά οφέλη, μιας και με τον τρόπο αυτόν μειώνονται τα δομικά απόβλητα και η ζήτηση νέων, ενώ η αντικατάσταση νέων υλικών με επαναχρησιμοποιούμενα μειώνει δραστικά το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Παράλληλα, μπορεί να επιφέρει και οικονομικά οφέλη, μιας και δημιουργεί μια νέα αγορά εργασίας που θα απασχολεί όχι μόνο εμπόρους αλλά και τεχνίτες, συντηρητές κ.λπ. (Αλεξάνδρου, 2013β).



Εικόνα 1.12 *Επανάχρηση δομικών υλικών σε μεταγενέστερα κτίρια. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*
α. Η Γοργοεπίκοος ή αλλιώς Άγιος Ελευθέριος δίπλα στη Μητρόπολη των Αθηνών αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα ενσωμάτωσης παλιών υλικών.
β. Κατοικία στα Άλικα Λακωνικής Μάνης. Επανάχρηση μυλόπετρας ως ποδιά παραθύρου.

Σύμφωνα με τη Salvo (διεθνής κατάλογος διάθεσης περισωθέντων αρχιτεκτονικών μελών – International directory of UK suppliers of architectural salvage), περίπου 5-10% από τα υλικά οικοδομών θα μπορούσε να έρχεται από παλιότερες οικοδομές (Kay, 2006). Η πρακτική αυτή, δηλαδή η δημιουργία ενός δικτύου διάθεσης οικοδομικών υλικών που προέρχονται από άλλες οικοδομές, έχει βρει πεδίο εφαρμογής σε πολλές πολιτείες των ΗΠΑ, καθώς και στο Ηνωμένο Βασίλειο (The Economist, 2012). Αντίστοιχες πρωτοβουλίες έχουν σημειωθεί στο Βέλγιο, όπως η εταιρεία RotorDC, η οποία συνεργάζεται με κατασκευαστές, μη κυβερνητικές και άλλες εταιρείες με στόχο την επανάχρηση δομικών υλικών και στοιχείων σε μεγάλη κλίμακα. Από την ίδρυσή της το 2014, πωλεί σχεδόν αποκλειστικά δομικά υλικά και στοιχεία, τα οποία είτε ανακτώνται από τους τεχνικούς της εταιρείας από έργα κατεδάφισης ή ανακαίνισης είτε αγοράζονται από εργολάβους κατεδαφίσεων και εταιρείες ακινήτων (*real estate*). Αντίστοιχη είναι και η BAMB (Buildings as Material Banks – BAMB, 2019-2020), η οποία λειτουργεί ως τράπεζα δομικών υλικών και εισήγαγε και τα λεγόμενα «διαβατήρια υλικών». Τα τελευταία χρόνια, η πρακτική συλλογής και επανάχρησης δομικών υλικών διευρύνεται διαρκώς σε πολλές χώρες και με ψηφιακές πλατφόρμες, όπως το Building Material Scout (2022) με έδρα τη Γερμανία. Παράλληλα, έχουν ήδη κατασκευαστεί κτίρια με ανακύκλωση/επανάχρηση υλικών (Εικόνα 1.13), ενώ συνηθέστερες και παλαιότερες εφαρμογές επανάχρησης συναντώνται σε εσωτερικούς χώρους. Χαρακτηριστική είναι κατοικία στο Ανόβερο, κατασκευασμένη με επανάχρηση υλικών που συλλέχθηκαν από κοντική απόσταση (New European Bauhaus, n.d.).

Στη χώρα μας υπάρχουν εδώ και χρόνια μάντρες οικοδομικών υλικών που συλλέγουν δομικά υλικά από κατεδαφίσεις. Αυτά είναι κυρίως λίθινες και μαρμάρινες πλάκες, μαρμάρινα σκαλοπάτια και νεροχύτες, κεραμίδια και κάποια ξύλινα στοιχεία κ.ά. (Εικόνα 1.14).



Εικόνα 1.13. *Lendager's Resource Rows housing project (2018), Κοπεγχάγη, Δανία. Πηγή: Lendager's Resource Rows by Eric Allix Rogers, via Flickr, CC BY-NC-ND.*



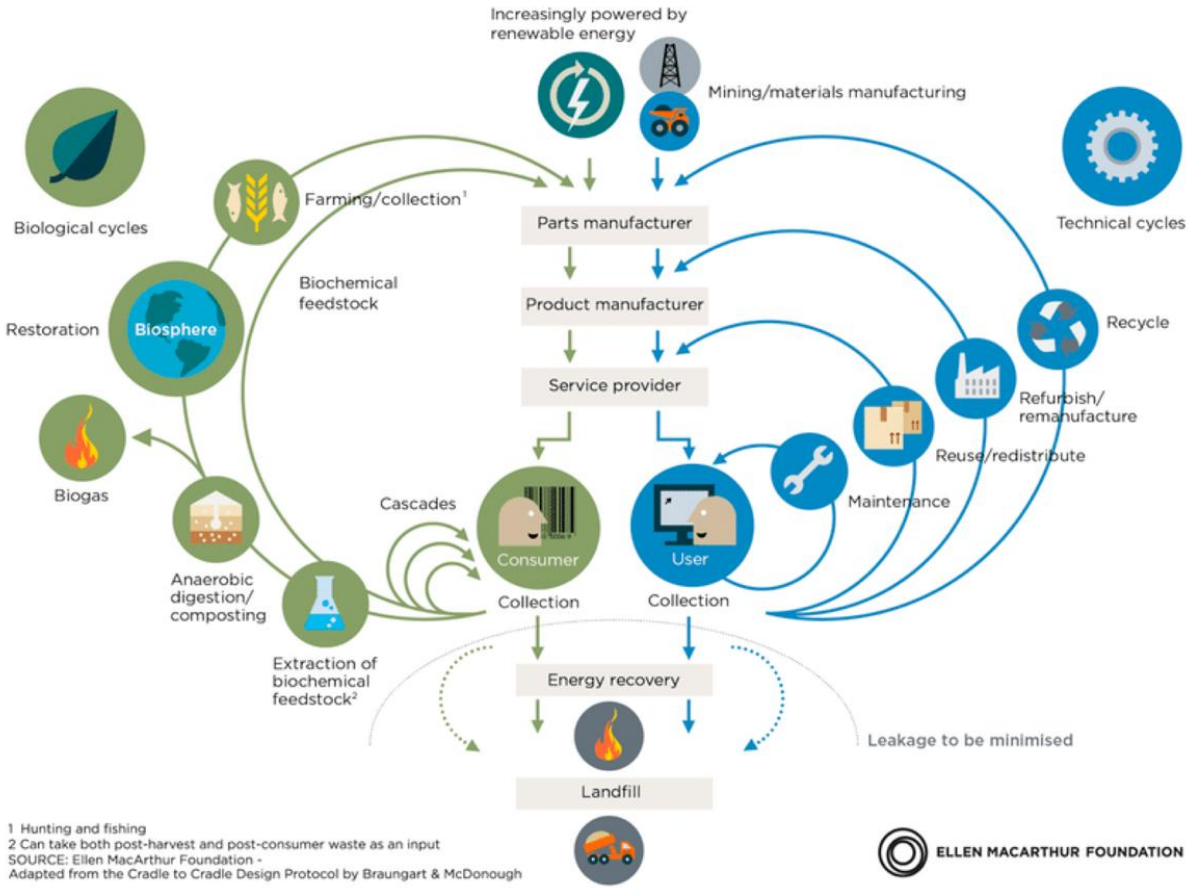
Εικόνα 1.14 *Επανάχρηση οικοδομικών υλικών κατεδάφισης.*
α. Μάντρα οικοδομικών υλικών από κατεδάφιση. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Αποκατάσταση στέγης με επανάχρηση παλιών κεραμιδιών από κατεδάφιση. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

1.7.4 Ανακύκλωση υλικών

Όταν δεν είναι δυνατή η επανάχρηση ενός δομικού υλικού ή στοιχείου, η αμέσως επόμενη βιώσιμη επιλογή είναι η ανακύκλωσή του (βλ. και Κεφ. 12, παρ. 12.1.3.3). Η ανακύκλωση ενός υλικού ή προϊόντος ουσιαστικά συνεπάγεται την επανάχρησή του ως πρώτη ύλη για την παραγωγή νέων. Οι ανακυκλωμένες πρώτες ύλες μπορεί να προέρχονται από οικοδομικά υλικά ή στοιχεία, αλλά και από άλλες παραγωγικές διαδικασίες και δραστηριότητες, για παράδειγμα από τη γεωργία, τη βιομηχανία ένδυσης κ.λπ., στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

Η κυκλική οικονομία είναι ένα μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης, το οποίο περιλαμβάνει τον διαμοιρασμό, την παροδική χρήση, την επανάχρηση, τη συντήρηση και την ανακύκλωση υπαρχόντων υλικών και προϊόντων για το μεγαλύτερο δυνατό χρονικό διάστημα, επεκτείνοντας έτσι τον κύκλο ζωής τους (European Parliament, 2015-2023). Πρακτικά, συνεπάγεται τη μείωση των αποβλήτων στο ελάχιστο, καθώς, όταν ένα προϊόν φτάσει στο τέλος της ζωής του, τα συστατικά του στοιχεία μέσω της ανακύκλωσης διατηρούνται μέσα στην οικονομία, όπου αυτό είναι εφικτό, και μπορούν να ξαναχρησιμοποιούνται με τρόπο παραγωγικό συνέχεια, δημιουργώντας επιπλέον αξία. Η προσέγγιση αυτή έρχεται σε ρήξη με το παραδοσιακό μοντέλο της γραμμικής οικονομίας, που βασίζεται στο μοτίβο της λήψης-παραγωγής-κατανάλωσης-απόρριψης, το οποίο βασιζόταν σε μεγάλες ποσότητες φτηνών και εύκολα προσβάσιμων υλικών και μορφών ενέργειας (Στο ίδιο).

Σύμφωνα με το Ellen MacArthur Foundation (n.d.), η κυκλική οικονομία είναι ένα πλαίσιο λύσης συστήματος που αντιμετωπίζει παγκόσμιες προκλήσεις όπως η κλιματική αλλαγή, η απώλεια βιοποικιλότητας, τα απόβλητα και η ρύπανση.



Εικόνα 1.15 *Διάγραμμα συστημάτων της κυκλικής οικονομίας του Ellen MacArthur Foundation. Πηγή: Ellen MacArthur Foundation (2013) στο Mangers et al. (2021), CC-BY.*

Σύμφωνα, πάντα, με το Ellen MacArthur Foundation, το διάγραμμα συστημάτων της κυκλικής οικονομίας (*butterfly diagram*) (Εικόνα 1.15) απεικονίζει τη συνεχή ροή υλικών σε μια κυκλική οικονομία, σε δύο βασικούς κύκλους: τον βιολογικό κύκλο και τον τεχνολογικό. Στον τεχνολογικό κύκλο, τα προϊόντα και τα υλικά διατηρούνται σε κυκλοφορία μέσα από διαδικασίες όπως η επανάχρηση, η συντήρηση, η επανακατασκευή και η ανακύκλωση. Στον βιολογικό κύκλο, τα θρεπτικά συστατικά από βιοδιασπώμενα υλικά επιστρέφουν στη γη για την αναγέννηση της φύσης (Ellen MacArthur Foundation, n.d.).

Η έννοια της κυκλικής οικονομίας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην έννοια «Cradle to Cradle» ή αλλιώς C2C, που αναπτύχθηκε από τους Michael Braungart και William McDonough στο ομώνυμο βιβλίο τους (McDonough & Braungart, 2002). Το Ινστιτούτο Καινοτομίας Cradle to Cradle Products Innovation Institute (C2CPII) ιδρύθηκε το 2011 και διαχειρίζεται το πρότυπο πιστοποίησης προϊόντων Cradle to Cradle Certified™. Το πρότυπο βασίζεται στη βασική καινοτόμα πρακτική του C2C, ότι τα απόβλητα είναι θρεπτικά συστατικά («waste as nutrients»), η οποία προάγει την ασφάλεια, την κυκλικότητα και την υπευθυνότητα απέναντι στα υλικά και τα προϊόντα με βάση πέντε κατηγορίες βιώσιμης απόδοσης (Cradle to Cradle Certified®, n.d.· Πέππα, 2021):

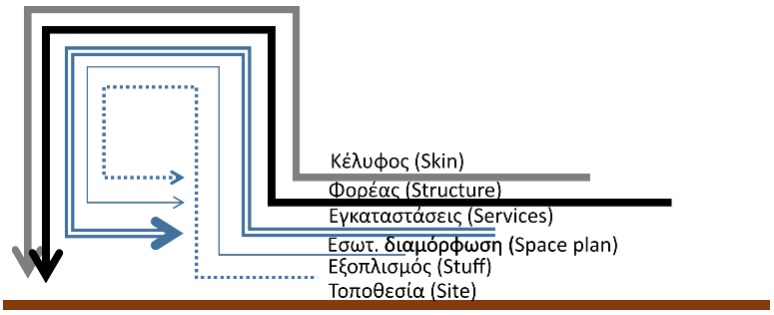
- **Υγεία υλικών** (*Material health*): Εξασφαλίζει ότι τα υλικά είναι ασφαλή για την υγεία των ανθρώπων και για το περιβάλλον. Η κατηγορία αυτή αξιολογεί κατά πόσο τα χημικά στοιχεία και τα υλικά που επιλέγονται έχουν ως προτεραιότητα την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος, εξασφαλίζοντας μια θετική επίδραση στην ποιότητα των υλικών που θα είναι διαθέσιμα για μελλοντική χρήση και ανακύκλωση.
- **Κυκλικότητα υλικών** (*Material reutilisation*): Εξασφαλίζει την κυκλική οικονομία μέσω του σχεδιασμού προϊόντων και διαδικασιών. Η κατηγορία στοχεύει στον σχεδιασμό των προϊόντων με στόχο την επόμενη χρήση τους και την παραμονή τους σε διαρκείς κύκλους χρήσης και επανάχρησης.
- **Καθαρός αέρας και προστασία του κλίματος** (*Clean air & Climate protection*): Εξασφαλίζει καθαρή ενέργεια και προστασία του περιβάλλοντος. Η κατηγορία διασφαλίζει ότι η παραγωγή των προϊόντων έχει θετικές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα, στην παροχή ανανεώσιμης ενέργειας και στην ισορροπία των αερίων του θερμοκηπίου.
- **Επιστασία του εδάφους και των υδάτων** (*Water & Soil stewardship*): Προστατεύει τον αέρα, τα νερά και τον αέρα ως φυσικούς πόρους. Η κατηγορία διασφαλίζει ότι το νερό και το έδαφος αντιμετωπίζονται ως πολύτιμοι κοινοί πόροι. Οι λεκάνες απορροής και τα εδαφικά οικοσυστήματα προστατεύονται, έτσι ώστε οι άνθρωποι και όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί να έχουν πρόσβαση σε καθαρό νερό και υγιή εδάφη.
- **Κοινωνική δικαιοσύνη** (*Social fairness*): Προωθεί ασφαλείς, δίκαιες και ίσες πρακτικές εργασίας, οι οποίες προωθούν τα ανθρώπινα δικαιώματα και τις ισχυρές κοινότητες. Η κατηγορία αυτή στοχεύει στη δέσμευση των εταιρειών ως προς τη διασφάλιση των ανθρώπινων δικαιωμάτων και την εφαρμογή δίκαιων και ίσων επιχειρηματικών πρακτικών.

1.7.5 Σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση

Στη βιβλιογραφία, ο σχεδιασμός κτιρίων με στόχο την αποσυναρμολόγησή τους αναφέρεται συχνά και ως DfD (Design for Disassembly) ή ADISA (Assembly for DISAssembly). Ο Berge (2003, σ. 13) σημειώνει ότι οι αρχές που πρέπει να τίθενται κατά την κατασκευή ενός τέτοιου κτιρίου είναι:

- διαχωρισμός των διαφορετικών «στρωμάτων» του κτιρίου (οικόπεδο, φέροντας οργανισμός, πληρώσεις, εσωτερική και εξωτερική επιδερμίδα, εγκαταστάσεις, εσωτερικά χωρίσματα, κινητός εξοπλισμός)·
- δυνατότητες διαχωρισμού των υλικών μέσα σε καθένα από τα «στρώματα»· και

- χρήση τυποποιημένων στοιχείων που αποτελούνται από ένα υλικό και όχι από συνδυασμό υλικών.



Εικόνα 1.16 *Διάγραμμα των έξι διαφορετικών στρωμάτων του κτιρίου. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και μετάφραση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με δεδομένα από Brand (1994).*

Ο σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τον βιώσιμο σχεδιασμό, αφού τα κτίρια που κατασκευάζονται με αυτή την πρακτική στο τέλος της ζωής τους αποσυναρμολογούνται και τα δομικά στοιχεία και υλικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή έστω να ανακυκλωθούν παράγοντας νέα υλικά, ή ακόμα και να αποσυντεθούν εξαλείφοντας πρακτικά τα δομικά απορρίμματα (Alexandri, 2014, σ. 163). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι, παρόλο που η αποσυναρμολόγηση μπορεί να πραγματοποιείται στο τέλος του κύκλου ζωής του προϊόντος, ο σχεδιασμός της πρέπει να ενσωματωθεί ήδη από το αρχικό στάδιο του σχεδιασμού, ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία της όταν έρθει η ώρα. Προς τούτο, ο Brand (1994) επέκτεινε τα τρία S (3 S's): **Shell** (Κέλυφος), **Services** (Εγκαταστάσεις), **Scenery** (Εσωτερική Διαρρύθμιση) του Duffy (1990) σε έξι, τα οποία είναι τα παρακάτω (Brand, 1994) (Εικόνα 1.16):

- **Site** (Τοποθεσία): Αναφέρεται στο νόμιμα οριοθετημένο οικόπεδο, στη γεωγραφική του θέση και στη θέση του εντός ή εκτός αστικού ιστού. Τα όρια και το πλαίσιο της τοποθεσίας συνήθως υπερβαίνουν τις γενιές των εφήμερων κτιρίων. Η τοποθεσία είναι αιώνια.
- **Structure** (Φέρων οργανισμός): Αναφέρεται στα θεμέλια και στα φέροντα στοιχεία του κτιρίου, τα οποία γενικά είναι επικίνδυνο αλλά και ακριβό να αλλάξουν. Η διάρκεια ζωής του φέροντα οργανισμού μπορεί να είναι από 30 έως 300 χρόνια, παρόλο που λίγα (;) κτίρια υπερβαίνουν τα 60 χρόνια ζωής, για λόγους που δεν αφορούν τη στατική επάρκεια.
- **Skin** (Κέλυφος και επιδερμίδα): Οι εξωτερικές επιφάνειες των κτιρίων συνήθως αλλάζουν κάθε περίπου 20 χρόνια, για να προσαρμοστούν στην τρέχουσα τεχνολογία ή μόδα ή ως μέρος εργασιών ανακαίνισης. Οι απαιτήσεις της νομοθεσίας για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων οδηγεί εκ των πραγμάτων σε αλλαγές στο κέλυφος, με στόχο την καλύτερη θερμομόνωση και ανεμοστεγανότητα.
- **Services** (Εγκαταστάσεις): Οι εγκαταστάσεις αναφέρονται στα λειτουργικά συστήματα του κτιρίου (δίκτυα επικοινωνίας, καλωδιώσεις, υδραυλικές εγκαταστάσεις, σύστημα πυρόσβεσης, σύστημα θέρμανσης, κλιματισμού και αερισμού –HVAC–, κινούμενα τμήματα, όπως ανελκυστήρες και κυλιόμενες σκάλες), τα οποία χαλούν ή απαρχαιώνονται κάθε 7 έως 15 χρόνια. Υπάρχουν παραδείγματα κτιρίων στα οποία η ενσωμάτωση των απαρχαιωμένων εγκαταστάσεων ήταν σε τόσο μεγάλη έκταση, που πρακτικά απέτρεπε την αντικατάστασή τους, οδηγώντας στην κατεδάφιση.
- **Space plan** (Διάταξη εσωτερικών χώρων): Αφορά τον σχεδιασμό των εσωτερικών χώρων, δηλαδή τη θέση των εσωτερικών τοίχων ή/και πετασμάτων, των οροφών, των δαπέδων και των εσωτερικών θυρών. Σε κτίρια με εμπορική ή/και ψυχαγωγική χρήση μπορεί να αλλάζουν κάθε περίπου 3 χρόνια, ενώ σε κατοικίες, αυτό το χρονικό διάστημα μπορεί να φτάσει και τα 30 χρόνια (1 γενιά).
- **Stuff** (Εξοπλισμός): Ο εξοπλισμός αναφέρεται πρακτικά σε όλα τα αντικείμενα που υπάρχουν σε ένα κτίρια, δηλαδή τα σταθερά και κινητά έπιπλα, τις οικιακές και άλλες συσκευές, αλλά και όλα

τα υπόλοιπα χρηστικά και άλλα αντικείμενα, τα οποία μπορεί να αντικαθίστανται σε ημερήσια, εβδομαδιαία, μηνιαία έως ετήσια βάση.

Ο σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση μεγιστοποιεί τη διατήρηση των υλικών ενός κτιρίου. Επιδιώκει, δηλαδή, τη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση της εμπεριεχόμενης ενέργειας και δυναμικής των υλικών που το απαρτίζουν (Σκαμαγκούλη, 2013, σ. 36), ενώ παράλληλα επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του κτιρίου διευκολύνοντας τη συντήρησή του. Εκτός από τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κτιρίου, ο σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση συμβάλλει στη μείωση του κόστους κατασκευής (Σκαμαγκούλη, 2013, σ. 39) και, ταυτόχρονα, δημιουργεί νέες θέσεις απασχόλησης. Για να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, οι Guy & Ciarimboli (2005, σ. 6) αναφέρουν 10 βασικές στρατηγικές για τον σχεδιασμό της αποσυναρμολόγησης:

1. **Καταγραφή υλικών και μεθόδων αποσυναρμολόγησης:** Τα σχέδια εφαρμογής (as-built), στα οποία επισημαίνονται οι συνδέσεις και τα υλικά, σε συνδυασμό με ένα «σχέδιο αποδόμησης» στις προδιαγραφές, συμβάλλουν στην αποτελεσματική αποσυναρμολόγηση και αποδόμηση.
2. **Επιλογή υλικών με την αρχή της προφύλαξης (precautionary principle):** Τα υλικά που επιλέγονται με γνώμονα τις μελλοντικές επιπτώσεις και έχουν υψηλή ποιότητα θα διατηρήσουν την αξία τους ή/και θα είναι πιο εφικτό να επαναχρησιμοποιηθούν και να ανακυκλωθούν.
3. **Σχεδιασμός προσβάσιμων συνδέσεων:** Οι οπτικά, φυσικά και εργονομικά προσβάσιμες συνδέσεις αυξάνουν την αποδοτικότητα και αποφεύγουν την απαίτηση για ακριβό εξοπλισμό ή για χρήση από τους εργαζομένους μέσων περιβαλλοντικής προστασίας για την υγεία και την ασφάλεια.
4. **Ελαχιστοποίηση ή εξάλειψη των χημικών συνδέσεων:** Οι συνδετικές ουσίες, τα στεγανοποιητικά υλικά και οι κόλλες πάνω ή μέσα στα υλικά καθιστούν δύσκολο τον διαχωρισμό και την ανακύκλωση και αυξάνουν τις πιθανότητες αρνητικών επιπτώσεων στον άνθρωπο και στο περιβάλλον λόγω της χρήσης τους.
5. **Συνδέσεις με μπουλόνια, βίδες και καρφιά:** Η χρήση τυποποιημένων και περιορισμένων συνδυασμών συνδέσμων μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων εργαλείων, καθώς και του χρόνου και της προσπάθειας που απαιτεί η εναλλαγή τους.
6. **Ξεχωριστές μηχανολογικές, ηλεκτρικές και υδραυλικές (Η/Μ) εγκαταστάσεις:** Η αποσύνδεση Η/Μ εγκαταστάσεων από τα δομικά στοιχεία στα οποία εντάσσονται διευκολύνει τον διαχωρισμό στοιχείων και υλικών, με στόχο την επισκευή, την αντικατάσταση, την επανάχρηση ή/και την ανακύκλωσή τους.
7. **Σχεδιασμός για τον εργαζόμενο και την εργασία διαχωρισμού:** Τα στοιχεία που είναι κοντά στην ανθρώπινη κλίμακα ή προσαρμοσμένα στην εύκολη αφαίρεση με τυποποιημένο μηχανικό εξοπλισμό μπορούν να μειώσουν την εντατική εργασία, αυξάνοντας την ικανότητα ενσωμάτωσης διαφορετικών δεξιοτήτων.
8. **Απλότητα φορέα και μορφής:** Τα απλά δομικά συστήματα, οι απλές μορφές και οι τυποποιημένοι κάνναβοι διευκολύνουν τη σταδιακή κατασκευή και αποδόμηση.
9. **Ευελιξία:** Χρήση υλικών και συστημάτων που βασίζονται στη συναρμολόγηση, στην ανεξαρτησία και στην τυποποίηση διευκολύνει την επανάχρηση.
10. **Ασφαλής αποδόμηση:** Η διευκόλυνση της κυκλοφορίας και της ασφάλειας των εργατών, του εξοπλισμού και της πρόσβασης στο εργοτάξιο, καθώς και της ροής των υλικών συμβάλλουν στην οικονομικότερη και ασφαλέστερη ανακαίνιση ή αποσυναρμολόγηση.

Ο σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση αποτελούσε έναν από τους έξι (6) πυλώνες του κινήματος Built Positive (Mosa Magazine, 2018):

- Κυκλικός σχεδιασμός (Circular design)
- Υγεία των υλικών (Material health)
- Σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση και ανάκτηση (Design for Disassembly & Recovery)
- Συνεργασία και ενσωμάτωση της αλυσίδας αξίας (Value Chain Collaboration & Integration)
- Προσδιορισμός και ποσοτικοποίηση της αξίας (Qualifying and Quantifying Value)
- Πολιτικές και πρότυπα (Policies and Standards)

Το κίνημα ήταν μια πρωτοβουλία του Cradle to Cradle Products Innovation Institute (C2CPII) το 2018, που είχε στόχο να μεγιστοποιήσει την αξία και την ποιότητα των δομικών υλικών και των προϊόντων που χρησιμοποιούνται στο δομημένο περιβάλλον και στην κυκλική οικονομία.

Οι παραπάνω στρατηγικές έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα σε κτίρια και κατασκευές, από τα οποία ενδεικτικά αναφέρονται ως παραδείγματα το R128 House στη Στουτγάρδη της Γερμανίας (Werner Sobek, 2000), η Βάση NASA's Sustainability Base στο Palo Alto της Καλιφόρνια των ΗΠΑ (William McDonough & Partners, 2012), το Nest We Grow, Sapporo, Hokkaido, Ιαπωνία (Kengo Kuma & Associates + College of Environmental Design UC Berkeley, 2014), το Circular Economy Building στο Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο (Arup Associates, 2016), το στάδιο για τους Ολυμπιακούς αγώνες του Λονδίνου (Populous 2012) και το Circular Garden Pavillion στην Ουτρέχτη της Ολλανδίας (Eva Architects, 2020).

1.8 Δόμηση με φυσικά υλικά

1.8.1 Γενικά

Η χρήση των φυσικών υλικών για τη δόμηση των κτιρίων υπήρξε κάποτε η μόνη κατασκευαστική πρακτική, με υλικά όπως οι φυσικοί λίθοι, η ωμή άργιλος, το ξύλο, το άχυρο, τα καλάμια, οι φυσικές ίνες κ.ά. Τα φυσικά υλικά χαρακτηρίζονται από τη μικρή εμπεριεχόμενη ενέργεια, κάποια μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν με μικρή επεξεργασία, ενώ οι θερμοφυσικές ιδιότητες ορισμένων συμβάλλουν στην καλή βιοκλιματική συμπεριφορά του κτιρίου. Για τους λόγους αυτούς, η χρήση τους στη δόμηση των κτιρίων αποτελεί περιβαλλοντικά φιλική πρακτική.

1.8.2 Φυσικοί λίθοι

Τα φυσικά πετρώματα χωρίζονται σε πυριγενή (ή εκρηξιγενή) (igneous), ιζηματογενή (sedimentary) και μεταμορφωμένα (ή μεταμορφωσιγενή) (metamorphic). Τα πυριγενή πετρώματα είναι στερεοποιημένα κομμάτια βράχου, τα οποία έχουν ανέβει μέσα από κενά στον φλοιό της Γης (Κουιμτζής, κ.ά., 2003, σ. 107). Τα ιζηματογενή πετρώματα προέκυψαν από την καθίζηση οργανικών υλικών, που βρίσκονταν αιωρούμενα στο νερό ή στην ατμόσφαιρα, και από την ανάμειξή τους με αποσυντεθημένη πέτρα (Στο ίδιο). Τέλος, τα μεταμορφωμένα (μεταμορφωσιγενή) πετρώματα έχουν σχηματιστεί από την επίδραση πιέσεων και υψηλών θερμοκρασιών σε πυριγενή και ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία μέσα από αυτές τις διαδικασίες μεταμορφώνονται (Στο ίδιο). Τα πυριγενή και τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα είναι πολύ σκληρά, ενώ τα ιζηματογενή είναι αρχαιότερα από τα πυριγενή. Για περισσότερα, βλ. και Βασιλάτος (2024), παρ. 5.2 & 5.3.

Τα προϊόντα φυσικών λίθων διακρίνονται σε λίθους που χρησιμοποιούνται για τη δόμηση κατακόρυφων στοιχείων και πλάκες. Οι φυσικοί λίθοι χρησιμοποιούνται για τη δόμηση κατακόρυφων στοιχείων, φέρουσες και μη τοιχοποιίες, ενώ οι πλάκες για την επίστρωση δαπέδων εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, και για τις στέγες. Οι φυσικοί λίθοι έχουν μεγάλη αντοχή στις μηχανικές καταπονήσεις και στον χρόνο. Έχουν ουσιαστικά απεριόριστο χρόνο ζωής, και γι' αυτό συχνά αποτελούν δομικό υλικό επανάχρησης. Παράλληλα, έχουν καλή θερμική συμπεριφορά λόγω της θερμοχωρητικότητάς τους που συμβάλλει στην απορρόφηση των θερμοκρασιακών μεταβολών.



Εικόνα 1.17 *Φυσικοί λίθοι.*
α. Παραδοσιακή κατοικία με φέρουσα λιθοδομή. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Φυσικοί λίθοι σε συρματοκιβώτια, Dominus Winery, Napa Valley, Καλιφόρνια, ΗΠΑ. (Herzog & De Meuron, 1995).
Πηγή: Dominus Winery, by Studio Sarah Lou via Flickr, CC BY 2.0.

1.8.3 Ωμή άργιλος

Ο πηλός είναι ένα μείγμα αργίλου (ένυδρες ενώσεις πυριτικών αργιλίων) και κόκκων άμμου διαφόρων πετρωμάτων (Παπαθεοδώρου, 1939, σ. 26). Ο πηλός περιέχει και μέταλλα, όπως οξείδια του αλουμινίου, ίχνη χαλαζία, οξείδια του σιδήρου και μαρμαρυγία (Woolley et al., 1997, σ. 145). Ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άργιλο και άμμο, οι πηλοί χωρίζονται σε παχείς (περιεκτικότητα σε άργιλο σε ποσοστό άνω του 80%) και ισχνούς (περιεκτικότητα σε άμμο σε ποσοστό άνω του 60%) (Παπαθεοδώρου, 1939, σ. 26).

Τα κυριότερα προϊόντα από ωμή άργιλο είναι τα παρακάτω (Minke, 2006):

- **Ωμόπλινθοι** (*adobe, earth blocks*): Μείγμα χώματος (με αρκετά υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο) και νερού, το οποίο συμπιέζεται σε ειδικά διαμορφωμένα καλούπια, τυποποιημένων διαστάσεων. Στο μείγμα συχνά προστίθενται επιπλέον υλικά (π.χ. οργανικές και ανόργανες ίνες) με στόχο τη μηχανική ενίσχυση του τελικού προϊόντος (Εικόνα 1.20).
- **Συμπιεσμένη άργιλος** (*rammed earth*): Υγρό μείγμα αργίλου χυτεύεται σε καλούπια σε διαδοχικά στρώματα (10-15 εκ.) και στη συνέχεια συμπιέζεται με συμπυκνωτές χειρός ή μηχανικούς (rammers).
- **Στοιβαχτός πηλός** (*cob*): Μείγμα αργιλοχώματος, αχύρου, άμμου και νερού, που αναμειγνύεται χωρίς μηχανήματα (με τα χέρια ή/και τα πόδια), το οποίο μορφοποιείται σε σβόλους που τοποθετούνται σε οριζόντιες στρώσεις· αυτές εξομαλύνονται και ομογενοποιούνται για την παραγωγή τελικών δομικών στοιχείων με ενιαία επιφάνεια και εμφάνιση.
- **Γαιόσακοι** (*superadobe/earth bags*): Σάκοι (τσουβάλια) από διάφορα υλικά (φυσικά, όπως κάνναβη ή λινάτσα, ή τεχνητά, όπως πολυπροπυλένιο – PP) που πληρούνται με χώμα, τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλον για την κατασκευή τοίχων. Ανάμεσα στους σάκους μπορεί να τοποθετηθεί συρματόπλεγμα για σταθερότητα ανά περίπτωση.
- **Συμπιεσμένα Μπλοκ Πηλού** (*Compressed Earth ή Mud Blocks*, CEB ή CMB): Στοιχεία τυποποιημένων διαστάσεων που παράγονται από υγρή άργιλο, η οποία συμπιέζεται με χειροκίνητη, μηχανική ή υδραυλική πρέσα σε καλούπια. Όταν στο μείγμα προστίθεται και κάποιος σταθεροποιητής (π.χ. τσιμέντο, ασβέστης, ασφαλτικά γαλακτώματα κ.λπ.), τότε προκύπτουν συμπιεσμένα και σταθεροποιημένα μπλοκ πηλού (Compressed Stabilised Earth Blocks – CSEB).



Εικόνα 1.18 *Ωμόπλινθοι.*
α. Παρασκευή ωμοπλίνθων στην Αίγυπτο. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β., γ. Παραδοσιακά κτίρια στη Φθιώτιδα και στη Φωκίδα κατασκευασμένα με ωμοπλίνθους. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

1.8.4 Ξύλο και άλλες φυτικές ίνες

Η ξυλεία χωρίζεται σε σκληρή (*hardwood*) και σε μαλακή *(softwood*). Η σκληρή ξυλεία παράγεται από πλατύφυλλα, φυλλοβόλα δέντρα, ενώ η μαλακή από κωνοφόρα, αειθαλή δέντρα. Ανάλογα με την αντοχή τους, τα ξύλα χωρίζονται σε κατηγορίες· από τις παραπάνω κατηγορίες, η τροπική ξυλεία είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στην αποσύνθεση, ακόμα και σε ιδιαίτερα επιβαρημένες περιβαλλοντικές συνθήκες, χωρίς να απαιτεί καμία επεξεργασία (π.χ. εμποτισμό με συντηρητικά και μυκητοκτόνα) (Berge, 2003, σ. 160).

Τα προϊόντα ξύλου διακρίνονται σε φυσικής και σύνθετης ξυλείας, καθώς και σε παράγωγα ξυλείας. Η παραγωγή πιστοποιημένης ξυλείας για δόμηση άνοιξε νέους δρόμους στη χρήση του υλικού στην κατασκευή. Το ξύλο έχει εξαιρετικές περιβαλλοντικές ιδιότητες, διότι είναι ανανεώσιμη πρώτη ύλη, έχει χαμηλή εμπεριεχόμενη ενέργεια, η διαδικασία παραγωγής του είναι καθαρή και τέλος το υλικό δεσμεύει το διοξείδιο του άνθρακα σε όλη τη διάρκεια της ζωής του. Τέλος, τα δομικά στοιχεία και υλικά από ξύλο μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν.



Εικόνα 1.19 *Ο κύκλος ζωής του ξύλου ως υλικού φυσικής δόμησης. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και απόδοση (Ε. Αλεξάνδρου) με δεδομένα από Architecture 2030, n.d.*



Εικόνα 1.20 *Το ξύλο ως υλικό φυσικής δόμησης. GC Prostho Museum Research Center, Kasugai-Shi, Ιαπωνία (Kengo Kuma & Associates, 2008-2010). Πηγή: Kengo Kuma – Prostho Museum Research Centre, by Forgemind ArchiMedia, via Flickr, CC BY 2.0*

1.8.5 Αχυρόμπαλες

Η χρήση του αχύρου ήταν συχνή σε παραδοσιακές κατασκευές σε όλες σχεδόν τις ηπείρους (Rudofsky, 1964 & Oliver, 1987). Με τη στροφή του κατασκευαστικού τομέα στα φυσικά υλικά, στοχεύοντας στη μείωση της εμπεριεχόμενης ενέργειας των υλικών, το υλικό επανήλθε σε κατασκευαστικές εφαρμογές ως υλικό πλήρωσης. Χαρακτηρίζεται για τις καλές ιδιότητες διαπνοής και θερμομόνωσης (Boundouva, 2016). Στο Ηνωμένο Βασίλειο, υπάρχουν παραδείγματα κτιρίων με άχυρο ως υλικό επικάλυψης στέγης και τοιχοποιίας με αναφορές στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική της χώρας. Με τη χρήση αχύρου και ωμής γης παρασκευάζεται ο αχυροπηλός (light straw clay), υλικό με καλή θερμική συμπεριφορά που χρησιμοποιείται για την πλήρωση τοίχων. Η αναλογία του άχυρου στο μείγμα καθορίζει τη θερμομονωτική του συμπεριφορά.



Εικόνα 1.21. *Το άχυρο ως υλικό φυσικής δόμησης. Κατοικία στην Αίγινα. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*

1.8.6 Άλλες φυσικές πρώτες ύλες

Άλλες φυσικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στη δόμηση είναι ο περλίτης, ο βερμικουλίτης και η φυσική κάνναβη, τα οποία χρησιμοποιούνται για τις θερμομονωτικές τους ιδιότητες. Η κάνναβη συνδυαζόμενη με ασβέστη χρησιμοποιείται και για τη δημιουργία πανέλων για την πλήρωση της τοιχοποιίας. Τέλος, τα τελευταία χρόνια, έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται/παράγονται και νέα υλικά φυσικής προέλευσης, με βάση το μυκήλιο (*mycelium*) –το φυτικό μέρος ενός μύκητα–, που αποτελείται από μια διακλαδωτή μάζα με νηματώδη υφή («Μυκήλιο», 2020) και το οποίο, σε συνδυασμό με γεωργικά ή/και οικοδομικά απόβλητα και απορρίμματα, χρησιμοποιείται για την παραγωγή τυποποιημένων δομικών στοιχείων (βλ. για παράδειγμα, Hy Fi Tower, MoMA PS1 gallery (2014), Εικόνα 1.22).



Εικόνα 1.22. *Το μυκήλιο ως υλικό φυσικής δόμησης. Hy-Fi, PS1 YAP, Νέα Υόρκη, ΗΠΑ (The Living, 2014). Πηγή: IMG_6063 & IMG_6053 by trevor.patt via Flickr, CC BY-NC-SA 2.0*

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Alexandri, E. (2014). Teaching Assembly for Disassembly; An Under-graduate Module Experience. In *Proc. Int. Conf. on Educational Technologies and Sustainability, Technology and Education* (pp. 163-170). https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED557343.pdf

Alexandrou, E. (2010). Environmental issues and sustainability in the Architectural Technology teaching process. In K.-V. Spyridonidis & M. Vogiatzaki (Eds). *European Network of Heads of Schools of Architecture – European Association for Architectural Education. International Conference. "Teaching a new Environmental Culture. The Environment as a Question of Architectural Education".* European Association for Architectural Education, Transactions on Architectural Education No 49.

Alexandrou, E. (2015). Thermal Behaviour of Historic and Traditional Post Byzantine Buildings in Greece. In: M. Philokyprou, A. Michael, A. Savvides (Eds). *Biocultural 2015, International Conference on Sustainability in Architectural Cultural Heritage* (pp. 38-47). Biocultural Research Programme, University of Cyprus.

Alexandrou, E. (2023). Energy efficiency retrofits versus sustainable interventions in the Greek old building fabric. An overview. In *Proc. Int. Conf. SBE23 Thessaloniki Sustainable built environments. Paving the way for achieving the targets of 2030 and beyond*.

Alexandrou, E., Katsaros, M., Aravantinos, D., Axarli, K., Chatzidimitriou, A, Gotoudis, A., Theodosiou, Th. & Tsikaloudaki, K. (2018). Technical guidelines for energy efficiency interventions in buildings constructed before 1955 in Greece Conference Report, Energy Efficiency in Historic Buildings (pp. 294-301). In *The 3rd Int. Conf. on Energy Efficiency in Historic Buildings (EEHB 2018)*. https://hansvalkhoff.files.wordpress.com/2018/10/report-eehb-2018-energy-efficiency-in-historic-buildings.pdf

Alexandrou, E., Bougiatioti, F. & Katsaros, M. (2020). Assessment of the sustainable redesign of existing buildings in Greece in the context of an undergraduate course: Application of passive solar systems in existing, typical residences. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, *410*, 012089. doi:10.1088/1755-1315/410/1/012089

Architecture 2030 (n.d.). Building Sector Intervention Points. *Architecture 2030*. https://www.architecture2030.org/intervention-points/

Architecture 2030 (n.d.). Carbon Smart Materials Pallette - Wood. https://www.materialspalette.org/wood/

Arcipowska, A. & Mariottini, F. (2016). The EU Building Stock Observatory: A New Tool to Support Europe's Building Policies. In *Proc. Int. Conf. 2016 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.* https://www.aceee.org/files/proceedings/2016/data/papers/9_150.pdf

Atsonios, I., Mandilaras, I., Kolaitis, D., Tsakanika-Theohari E., Alexandrou, E. & Founti, M. (2013). Large scale Measurement campaign to Assess the Thermal behavior of an 18th Century Historic Building in Athens. In: *Proc. 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation, EWCHP 2013*.

Bayer, C., Gamble, M., Gentry, R. & Joshi, S. (2010). *AIA Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice*. The American Institute of Architects. https://www.brikbase.org/sites/default/files/aiab082942.pdf

Behling, S. & Behling, S. (2000). *Solar Power*. Prestel Verlag.

Berardi, U. (2015). Building Energy Consumption in US, EU, and BRIC Countries. *Procedia Engineering, 118*, 128-136. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.411.

Berge, B. (2003). *The Ecology of Building Materials*. The Architectural Press.

Bountouva, I. & Alexandrou E. (2016) Thermal and environmental evaluation of buildings built with straw. In: F. Vavili-Tsinika, K. Axarli, K. Ioannidis (Eds), *Emerging Complexities, Transparency and Architecture, 4th Interntational Conference in Transparency and Architecture*. Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki.

Boonstra, C. (1996). Sustainable Choice of Building Materials. The Environmental Preference Method. In: O. Lewis & J. Goulding (Eds). *European Directory of Sustainable Energy Efficient Building 1996. Components. Services. Materials* (pp. 24-27). James & James Science Publishers Ltd.

Brand, S. (1994). *How buildings learn: What happens after they're built*. Penguin Books.

Brophy, V. & Owen Lewis, J. (2011). *A Green Vitruvius. Principles and practices of sustainable architectural design*. Earthscan.

Buildings as Material Banks, BAMB (2019-2020). https://www.bamb2020.eu/

Building Material Scout. https://building-material-scout.com/en/

CIBSE (n.d.). *Low Carbon Energy Assessor (LCEA) to produce Non Domestic EPCs*. https://www.cibsecertification.co.uk/personnel-certification/low-carbon-energy-assessor-lcea-to-produce-non-domestic-epcs/

CSN EN 16883:2017. Conservation of cultural heritage. Guidelines for improving the energy performance of historic buildings.

Cradle to Cradle Certified® (n.d.). *The standard.* https://c2ccertified.org/the-standard

Directive 2002/91/EC. *EPBD (Energy Performance of Buildings Directive)*. European Parliament, Council of the European Union. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:001:0065:0071:EN:PDF

Directive 2010/31/EC. *EPBD RECAST*. European Parliament, Council of the European Union. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF

Duffy, F. (1990). Measuring building performance. *Facilities, 8*(5), 17-20. https://doi.org/10.1108/EUM0000000002112

Earth Overshoot Day (n.d.). Country overshoot days. https://www.overshootday.org/newsroom/country-overshoot-days/

Earth Overshoot Day (2023). About earth overshoot day. https://www.overshootday.org/about-earth-overshoot-day/

Elefante, C. (2012). The Greenest Building Is... One That Is Already Built. *Forum Journal, 27*, 62-72.

Ellen MacArthur Foundation (n.d.). *What is circular economy?* https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview

Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy (1) – Economic and business rationale for an accelerated transition*. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf

European Commision-Department: Energy - In focus. (2020, February 17). *Energy efficiency in buildings*. European Commission. https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_en

European Parliament (2015-2023). *Circular economy: definition, importance and benefits.* https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits

Fox, A. & Murrell, R. (1989). *Green Design. A Guide to Environmental Impact of Building Materials*. Architecture Design and Technology Press.

Global Footprint Network (2003-2023). *Ecological Footprint*. https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/

Goulding J. R., Lewis J. O. & Steemers T.C. (1994). *Ενεργειακός Σχεδιασμός. Εισαγωγή για Αρχιτέκτονες*. Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy Conscious Design-A Primer for Architects].

Goulding, J. R., Lewis, J. O. & Steemers, T. C. (1996). *Ενέργεια στην Αρχιτεκτονική. Το Ευρωπαϊκό Εγχειρίδιο για τα Παθητικά Ηλιακά Κτίρια*. Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook].

Gohardani, N. & Björk, F. (2012), Sustainable refurbishment in building technology. *Journal of and Sustainable Built Environment*, *1*(3), 241-252. http://dx.doi.org/10.1108/20466091211287128

Guy, B. & Ciarimboli, N. (2008). *DfD: design for disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building*. Hamer Center.

Haughton, G. & Hunter, C. (1996). *Sustainable Cities*. Regional Studies Association & Jessica Kingsley Publishers.

Huet, S. & MVRDV, Climax (2003). *Un climat sous influence. Scenarios pour demain*. Editions Carre/Editions Adam Biro.

Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. (n.d.). Buildings and construction. European Commission. Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en

Jancovici, J.-M. (2003). Climate change or climate shock. In: Y. Arthus-Bertrand*. The Earth from the Air 366 Days*. Thames & Hudson.

Kay, T. (2006, November 25). *Salvo Reclamation Protocol 1995*. https://salvonews.blogspot.com/2006/11/salvo-reclamation-protocol-1995.html

Koning, H., Kohler, N., Kreibig, J. & Lutzekendorf, T. (2010). *A life cycle approach to buildings. Principles, calculations, design tools* . Detail Green Books.

Lanz, F. & Pendlebury, J. (2022). Adaptive reuse: a critical overview. *The Journal of Architecture, 27* (2-3). https://doi.org/10.1080/13602365.2022.2105381

Mangers, J., Minoufekr, M., Plapper, P. & Kolla, S. (2021). An Innovative Strategy Allowing a Holistic System Change towards Circular Economy within Supply-Chains. *Energies*, *14*(14), 4375. https://doi.org/10.3390/en14144375

Markus, T. A. & Morris, E. N. (1980). *Buildings, Climate and Energy*. Pitman Publishing Ltd.

Mazria, E. (1979). *The Passive Solar Energy Book*. Rodale Press.

McDonough, W. & Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle: Re-making the way we make things*. North Point Press.

Ministry of the Environment of Finland (n.d.), *International environmental agreements*. https://ym.fi/en/international-environmental-agreements

Minke, G. (1986). Ecological architecture: A demand. In A. Zold, (Ed.). *PLEA '86. International Conference on Passive and Low Energy Architecture in Housing. Pecs, Hungary, September 1-5 1986* (vol. II, pp. I1-I15). Hungarian Ministry of Industry.

Minke, G. (2006). *Building with earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture.* Basel: Birkhäuser. https://doi.org/10.1007/3-7643-7873-5

Mosa Magazine. (2018, April 5). Built Positive: the future of sustainable building and architectural design. *Mosa Magazine.* https://magazine.mosa.com/en-us/built-positive-the-future-of-sustainable-building-and-architectural-design

New European Bauhaus (n.d.). Recyclinghaus. European Union. New European Bauhaus. https://new-european-bauhaus.europa.eu/get-inspired/inspiring-projects-and-ideas/recyclinghaus_en

Odyssee Mure (2021). *Greece | Energy profile, March 2021. Energy efficiency trends and policies.* https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-trends-policies-profiles/greece.html#buildings

Oliver, P. (1987). *Dwellings – the house across the world.* Phaidon.

Olgyay, V. & Olgyay, A. (1963). *Design with Climate. Bioclimatic Aproach to Architectural Regionalism*. Princeton. Princeton University Press.

Ramesh, T., Prakash, R. & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview, *Energy and Buildings*, *42*(10), 1592-1600. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007

Rudofsky, B. (1964). *Architecture without architects.* New York, U.S.A.: The Museum of Modern Art.

Rotor DC. Deconstruction & Consulting. https://rotordc.com

Salvo (1994-2021), https://www.salvoweb.com/

Salvo, T. K. (2006, November 25). *Salvo, a reclamation Protocol 1995.* https://salvonews.blogspot.com/2006/11/salvo-reclamation-protocol-1995.html

Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V. & Goel, V. (2011). Life cycle assessment of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*, 871-875. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.008

'Sick Building Syndrome'. (2016, July 13). In: *Encyclopedia Britannica.* https://www.britannica.com/science/sick-building-syndrome

Smith, M., Whiteleg, J. & Williams, N. (1998). *Greening the Built Environment*. Earthscan Publications Ltd.

Sustainability for All (n.d.). *Non-polluting construction materials*. https://www.activesustainability.com/construction-and-urban-development/non-polluting-construction-materials/?_adin=02021864894

Szokolay, S. V. (1980). *Environmental Science Handbook for Architects and Builders*. The Construction Press.

United Nations Framework Convention on Climate Change (2009, December). *Fact sheet: UNFCCC Emissions Reporting.* https://unfccc.int/files/press/backgrounders/application/pdf/fact_sheet_unfccc_emissions_reporting.pdf

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (1992). *Zimbabwe and the United Nations Framework Convention on Climate Change. Article 1. Definitions*. https://unfccc.int/resource/ccsites/zimbab/conven/text/art01.htm

United Nations, Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development. (n.d.). *The 17 goals*. https://sdgs.un.org/goals

University of Colorado Boulder. Environmental center (n.d.). *7 steps to live zero waste*. https://www.colorado.edu/ecenter/7-steps-live-zero-waste

Vale, B. & Vale, R. (1991). *Green Architecture. Design for an Energy Conscious Future*. Thames and Hudson Ltd.

Woolley, T. (2022). *Natural Building Techniques – A guide to ecological methods and materials.* The Crowood Press.

World Commission on Environment and Development (WCED) (1987). *Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development (Brundtland Commission)*. Oxford University Press. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf

World Resources Institute, n.d. *Eutrophication and Hypoxia*. https://www.wri.org/initiatives/eutrophication-and-hypoxia/learn

Αλεξάνδρου, Ε. (χ.ε.). *Βιώσιμος σχεδιασμός* [Διάλεξη/Σημειώσεις]. Οικοδομική 3. Αθήνα: Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ.

Αλεξάνδρου, Ε. (2013β). Γενικό περίγραμμα δικτυακών παρεμβάσεων με στόχο την αναβάθμιση της πόλης και τη βιωσιμότητα του αστικού οικοσυστήματος. Στο: Γ. Παρμενίδης, Γ. κ.ά. (2013). *Διερεύνηση στρατηγικών για τη δικτύωση των αστικών παρεμβάσεων στο Μητροπολιτικό Κέντρο Αθηνών*. Ερευνητικό Πρόγραμμα, Β΄ Φάση: Σύνταξη προδιαγραφών για δικτυακές/κομβικές επεμβάσεις. Περιφέρεια Αττικής, Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ. http://oldwww.arch.ntua.gr/sites/default/files/resource/13959_/b_phase.pdf

Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, Ε. (2017) *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός. Κλιματική αλλαγή, Περιβάλλον, Βιωσιμότητα*. University Studio Press.

Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, Ε. (2019). *Βιοκλιματική Αρχιτεκτονική. Παθητικά-Ηλιακά Συστήματα*. University Studio Press.

Βάλλη, Ε. (2017). *Πράσινα Κτίρια. Η συμβολή τους στην αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου. Σχολή Αρχιτεκτόνων]. DSpace@NTUA. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.2048

Μιχάλαινας, Β. & Πετράκης, Π. (2020). *Δόμηση με χώμα: ανάλυση των τεχνικών adobe & rammed earth, ωμοπλινθοδομή & πατητή γη* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου. Σχολή Αρχιτεκτόνων]. DSpace@NTUA. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.18345

Βασιλάτος, Π. (2024). *Αρχιτεκτονική Δομή και Τεχνολογία* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-363

Ευαγγελινός, Ε. & Ζαχαρόπουλος, Η. (2001). Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου* (σσ. 21-154). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Ευσταθίου, Α. & Χρήστου, Μ.-Μ. (2019). *C2C - Σχεδιάζοντας με άξονα την κυκλική οικονομία: Η κυκλική οικονομία στη σύγχρονη κατασκευή* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. DSpace@NTUA. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.2653

Θέου-Τσαφαρά, Α. (2018). *Μηδενική ενέργεια και μηδενικές εκπομπές: μελέτη του κύκλου ζωής της κατασκευής* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. DSpace@NTUA. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.2170

Καραγιαννίδης, Α., Κοτρώνη, Β. & Λαγουβάρδος, Κ. (χ.ε.). *rescEU – Η δύναμη άμεσης επέμβασης της Ευρώπης*. https://meteo.gr/article_view.cfm?entryID=1207

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) (2006). *Ενεργειακός σχεδιασμός κτιρίων και οικιστικών συνόλων.* http://www.cres.gr/services/istos.chtm?prnbr=25338&locale=el

Κουιμτζής, Θ., Φυτιάνος, Κ. & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, Κ. (1998). *Χημεία Περιβάλλοντος*. University Studio Press.

Μαζαράκη, Σ. (2018). *Πειραματική μελέτη του κονιάματος της δομικής ασβεστοκάνναβης και διερεύνηση της επίδρασής της στη θερμική συμπεριφορά σε δομικά μέλη κτιρίων* [Μεταπτυχιακή εργασία. Διατμηματικό πρόγραμμα Μεταπτυχιακών σπουδών (ΔΠΜΣ) «Επιστήμη και Τεχνολογία υλικών»].

Μπασιαδάκη, Ε. & Παπαγεωργίου, Σ. (2020). *Σχεδιασμός με άξονα τα απόβλητα* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. DSpace@NTUA. https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/53444

Μπουλουγούρης, Κ. & Πίρουλα-Γοδόυ, Ε. (2022). *Rammed Earth: η τεχνική του συμπιεσμένου χώματος σε ξυλοτύπους και εφαρμογές στη σύγχρονη αρχιτεκτονική: ζητήματα βιωσιμότητας και σεισμικής συμπεριφοράς με έμφαση στον ελλαδικό χώρο* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. DSpace@NTUA. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.23177

Μπουντουβά, Ι. (2016). *Θερμική και περιβαλλοντική αξιολόγηση της δόμησης από άχυρο – 2 περιπτώσεις* [Μεταπτυχιακή εργασία. Διατμηματικό πρόγραμμα Μεταπτυχιακών σπουδών (ΔΠΜΣ) «Επιστήμη και Τεχνολογία υλικών»].

«Μυκήλιο». (2020, 6 Δεκεμβρίου). Στο: *Wikipedia*. https://el.wikipedia.org/wiki/Μυκήλιο

Παπαδόπουλος, Μ. & Αξαρλή, Κ. (1995). *Ενεργειακός Σχεδιασμός & Παθητικά Ηλιακά Συστήματα Κτιρίων. Δομική Φυσική ΙΙ*. Εκδοτικός Οίκος Αδερφών Κυριακίδη ΑΕ.

Παρμενίδης, Γ. κ.ά. (2013). *Διερεύνηση στρατηγικών για τη δικτύωση των αστικών παρεμβάσεων στο Μητροπολιτικό Κέντρο Αθηνών*. Ερευνητικό Πρόγραμμα, Β΄ Φάση: Σύνταξη προδιαγραφών για δικτυακές/κομβικές επεμβάσεις, Περιφέρεια Αττικής, Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ. http://www.arch.ntua.gr/sites/default/files/resource/4540_/b_phase.pdf

Πέππα, Μ. (2021). *Design for Disassembly |Σχεδιασμός για Αποσυναρμολόγηση* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. DSpace@NTUA. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.21359

«Πετρελαϊκή κρίση του 1973». (2022, October 3). Στο: *Wikipedia*. https://el.wikipedia.org/wiki/Πετρελαϊκή_κρίση_του_1973

«Πετρελαϊκή κρίση του 1979». (2023, October 4). Στο: *Wikipedia*. https://el.wikipedia.org/wiki/Πετρελαϊκή_κρίση_του_1973

Σκαμαγκούλη, Α.-Α. (2013). *Για μια βιώσιμη αρχιτεκτονική: σχεδιασμός με σκοπό την αποσυναρμολόγηση* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. DSpace@NTUA. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.568

ΤΕΕ (χ.ε.). *Ανακοίνωση. Εφαρμογή Κ.Εν.Α.Κ.* http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/GR_ENERGEIAS/kenak

ΤΟΤΕΕ 20701-1/2010. *Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης*. ΥΠΕΚΑ & ΤΕΕ. http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/TOTEE-20701-1-Final-%D4%C5%C5-2nd.pdf

ΤΟΤΕΕ 20701-2/2017 & 2021. *Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων*. ΥΠΕΚΑ & ΤΕΕ. http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/GR_ENERGEIAS/kenak/files/TOTEE_20701-2_2017_TEE_1st_Edition.pdf https://web.tee.gr/wp-content/uploads/TOTEE-20701-2-2021.pdf

ΤΟΤΕΕ 20701-3/2017. *Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών*. ΥΠΕΚΑ & ΤΕΕ. https://web.tee.gr/wp-content/uploads/TOTEE-20701-3.pdf

ΤΟΤΕΕ 20701-4/2010. *Οδηγίες και έντυπα ενεργειακών επιθεωρήσεων κτιρίων, λεβήτων και εγκαταστάσεων θέρμανσης και εγκαταστάσεων κλιματισμού*. ΥΠΕΚΑ & ΤΕΕ. http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/TOTEE-20701-4-Final-%D4%C5%C5%202ndnnn.pdf

ΤΟΤΕΕ 20701-5/2012. *Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού, Θερμότητας και Ψύξης: Εγκαταστάσεις σε Κτίρια*. ΥΠΕΚΑ & ΤΕΕ. http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/TOTEE-20701-5-Final-%D4%C5%C5.pdf

ΤΟΤΕΕ 20701-6/2022. *Βιοκλιματικός σχεδιασμός στον ελλαδικό χώρο*. ΥΠΕΚΑ & ΤΕΕ. https://web.tee.gr/wp-content/uploads/TOTEE-20701-6-Βιοκλιματικός-Σχεδιασμος.pdf

ΤΟΤΕΕ 20701-7/2021. *Τεχνητός και φυσικός φωτισμός κτιρίων*. ΥΠΕΚΑ & ΤΕΕ. https://web.tee.gr/wp-content/uploads/TOTEE-20701-7-2021.pdf

ΦΕΚ τ.Β΄ 407/09.04.2010. *Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων*. Ελληνική Δημοκρατία. http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/FEK%20407-B-2010%20-%20KENAK.pdf

ΦΕΚ τ.Β΄ 2367/12.07.2017. *Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων*. Ελληνική Δημοκρατία. https://tdm.tee.gr/wp-content/uploads/2017/07/fek_12_7_2017_egrisi_kenak.pdf

Κεφάλαιο 2

Κλίμα

Σύνοψη
Η κλιματική παράμετρος είναι το βασικότερο εργαλείο στον βιοκλιματικό σχεδιασμό των κτιρίων. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα γενικά χαρακτηριστικά του κλίματος, οι διαφορετικές ζώνες και τύποι του, καθώς και τα επιμέρους κλιματικά δεδομένα και χαρακτηριστικά που αυτές περιλαμβάνουν. Τέλος, παρουσιάζεται η μεθοδολογία αναζήτησης, αρχικής ανάλυσης και αξιολόγησης των βασικών στοιχείων του κλίματος και ειδικότερα του μικροκλίματος που αποτελούν τη βάση εκκίνησης του σχεδιασμού. Στόχος είναι να τονιστεί η κατανόηση του κλίματος και της επίδρασης των παραμέτρων που το διέπουν στη θερμική άνεση του ανθρώπου, καθώς και στη συμπεριφορά των κτιρίων και των δομικών στοιχείων.

Προαπαιτούμενη γνώση
Για το κεφάλαιο αυτό, χρειάζονται βασικές γνώσεις Φυσικής. Επιπλέον πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν σε ηλεκτρονικά συγγράμματα του Κάλλιπου, όπως (Στάθης, 2015).

2.1 Γενικά στοιχεία

Ως αρχική παρατήρηση είναι χρήσιμο να διευκρινιστούν οι διαφορές μεταξύ της έννοιας του **καιρού** και του **κλίματος**, καθώς συχνά συγχέονται στην καθημερινή ομιλία. Ο καιρός μιας περιοχής αποτελεί την κατάσταση της ατμόσφαιρας πάνω από αυτή για μια ορισμένη χρονική στιγμή, από μία ώρα έως και λίγες ημέρες, και η εξέλιξή της από τη γένεση ως το τέλος των συγκεκριμένων ατμοσφαιρικών διαταραχών (Πέννας, 2005). Το κλίμα σε μια γεωγραφική περιοχή προσδιορίζεται από τις μέσες τιμές των μετεωρολογικών στοιχείων, δηλαδή των συνθηκών της ατμόσφαιρας που έχουν καταγραφεί για μια μεγάλη χρονική περίοδο (30 ή περισσότερα χρόνια) (Πέννας, 2005).

Διάσημη είναι η φράση του Robert A. Henlein (1973), που αναφέρεται παραστατικά στη διαφορά των δύο εννοιών: «The climate is what you expect; the weather is what you get», δηλαδή «κλίμα είναι αυτό που περιμένεις, ενώ καιρός είναι αυτό που έχεις» (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 26), ενώ και ο Mark Twain (1887) σημείωνε: «Climate lasts all the time, and weather only a few days» (Quote Investigator. Tracing quotations, 2012). Οι μετεωρολογικές συνθήκες χαρακτηρίζουν τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν κάποιες μέρες και σε ακραίες περιπτώσεις μια ολόκληρη εποχή (Hegger et al., 2012, σ. 51). Συχνά ο όρος κλίμα αναφέρεται στο «παγκόσμιο κλίμα» (Στο ίδιο).

2.2 Το κλίμα

Σύμφωνα με τον Givoni (1969, σ. 1), το κλίμα μιας περιοχής καθορίζεται από την επαναληψιμότητα και τις διαφοροποιήσεις των μεταβλητών του και των συνδυασμών τους. Η κατάταξη των τύπων του παγκόσμιου κλίματος καθορίζεται σύμφωνα με τα γεωγραφικά και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, καθώς και με την ανάπτυξη της χλωρίδας.

Το κλίμα μπορεί να χωριστεί σε ζώνες και τύπους που βασίζονται σε συνδυασμούς κλιματικών παραμέτρων και παράγοντες όπως:

- η γωνία της Γης σε σχέση με τον Ήλιο,

- η κατανομή της στεριάς και των ωκεανών,
- οι διαφορές της ατμοσφαιρικής πίεσης,
- η ενέργεια από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και πώς αυτή ακτινοβολείται στην ατμόσφαιρα,
- οι τύποι και η πυκνότητα της βλάστησης,
- οι τύποι των βροχοπτώσεων,
- οι επικρατούντες άνεμοι και
- τα ρεύματα των ωκεανών.

2.3 Στοιχεία κλίματος

Το κλίμα, με τις παραμέτρους και την αλληλεπίδρασή τους, αποτελεί το σημαντικότερο δεδομένο για τον σχεδιασμό βιοκλιματικών κτιρίων.

Στοιχεία του κλίματος είναι (Πίνακας 2.1):

- Ο ήλιος, με παραμέτρους την ηλιακή ακτινοβολία, την ηλιακή γεωμετρία και την ηλιοφάνεια.
- Η θερμοκρασία του αέρα που εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και το υψόμετρο τοποθεσίας.
- Ο άνεμος, με παραμέτρους τη διεύθυνση και την ένταση.
- Η υγρασία, με παραμέτρους την υγρασία του αέρα και τη βροχόπτωση.
- Τα κλιματικά στοιχεία έχουν κάποια βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία συμβάλλουν με διαφορετικό τρόπο στη διαμόρφωση των κλιμάκων του κλίματος. Οι μεταβλητές αυτές, καθώς και ο συνδυασμός τους, μπορούν ανάλογα με την εποχή και με τις καιρικές συνθήκες να συμβάλουν θετικά στη βελτίωση των συνθηκών θερμικής άνεσης ή να έχουν αρνητικές επιδράσεις σε αυτή. Για παράδειγμα, η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί πηγή θερμότητας σε ψυχρές συνθήκες και η πρόσοδός της μέσα στο κτίριο είναι θετική, ενώ τη θερμή περίοδο επιβαρύνει θερμικά αισθητά τα κτίρια και τον άνθρωπο. Αντίστοιχα, ο άνεμος αποτελεί στοιχείο δροσισμού (υπό συνθήκες) το καλοκαίρι, ενώ τον χειμώνα εντείνει το αίσθημα ψύχους. Τέλος, οι υψηλές τιμές υγρασίας μεταβάλλουν καθοριστικά την αίσθηση των υψηλών, κυρίως, θερμοκρασιών από τον άνθρωπο.

Στοιχείο κλίματος	**Παράμετροι**		
Ήλιος	Ηλιακή γεωμετρία	Ηλιοφάνεια	Ηλιακή ακτινοβολία Άμεση, Διάχυτη, Ολική
Θερμοκρασία αέρα			
Άνεμος	Διεύθυνση	Ένταση	
Υγρασία	Υγρασία αέρα	Βροχόπτωση	

Πίνακας 2.1 *Βασικά στοιχεία του κλίματος. Παράμετροι.*

2.3.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Ηλιακή ακτινοβολία είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο. Τα διάφορα μήκη κύματος, δηλαδή το λεγόμενο ηλιακό φάσμα, εκτείνεται από μήκος κύματος 0,28 έως 3,0 μικρά (1 μm = 1000 mm) και διαχωρίζεται στην υπεριώδη ακτινοβολία (Ultra-Violet – UV), στο ορατό φως (*visible light*) και στην υπέρυθρη ακτινοβολία (Infra-Red – IR). Το ορατό φως καλύπτει ένα μικρό τμήμα του φάσματος από 0,38 μm έως 0,78 μm (1 μm = 1000 mm). Τα κύματα που είναι μικρότερα από 0,38 μm αποτελούν την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ τα κύματα που είναι μεγαλύτερα από 0,78 μm αποτελούν την υπέρυθρη. Παρά το γεγονός ότι η υψηλότερη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εμπίπτει στο ορατό διάστημα, πάνω από τη μισή ενέργεια εκπέμπεται ως εγγύς υπέρυθρη (Near Infra-Red – NIR) (περ. 48%), δηλαδή ακτινοβολία που γίνεται αισθητή

ως θερμότητα. Η υπεριώδης ακτινοβολία προκαλεί φωτοχημικές αντιδράσεις, αποχρωματισμό, ηλιακά εγκαύματα κ.λπ. (Givoni, 1969, σ. 2).

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στα ανώτερα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας καλείται «ηλιακή σταθερά» και η τιμή της σε κάθετο επίπεδο με τη διεύθυνσή της είναι 1398 W/m^2 (Szokolay, 1980, σ. 280). Η θέση του ήλιου, οι ώρες ηλιοφάνειας και η ένταση της ακτινοβολίας αποτελούν βασικές παραμέτρους σχεδιασμού και επηρεάζονται από τον προσανατολισμό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτιρίου και του περιβάλλοντός του, τη γεωγραφική θέση και την εποχή.

2.3.2 Θερμοκρασία – Θερμοκρασία του αέρα

Ο βαθμός δροσισμού και θέρμανσης της επιφάνειας της Γης αποτελεί τον βασικό παράγοντα που καθορίζει τη θερμοκρασία του αέρα. Όταν ο αέρας έρχεται σε επαφή με θερμές επιφάνειες, ζεσταίνεται και ανεβαίνει, ενώ όταν έρχεται σε επαφή με κρύες, ψύχεται και κατεβαίνει. Οι ετήσιες και ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα εξαρτώνται, λοιπόν, από τις παραλλαγές των επιφανειακών θερμοκρασιών, οι οποίες όμως διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ των επιφανειών νερού και στεριάς. Η θερμοκρασία μεγάλων επιφανειών νερού μεταβάλλεται πολύ πιο αργά από εκείνη της στεριάς κάτω από τις ίδιες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας. Για τον λόγο αυτόν, οι επιφάνειες στη στεριά είναι πιο θερμές το καλοκαίρι και πιο ψυχρές τον χειμώνα από τις υδάτινες που βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική θέση. Αντίστοιχα και οι μέσες θερμοκρασιακές τιμές του αέρα πάνω από τη στεριά είναι υψηλότερες το καλοκαίρι και χαμηλότερες τον χειμώνα από ό,τι πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. (Givoni, 1969, σ. 6)

Τέλος, η θερμοκρασία του αέρα μεταβάλλεται και με το υψόμετρο. Οι αέριες μάζες ψύχονται όσο το υψόμετρο αυξάνεται με ρυθμό 0,6°C περίπου κάθε 100 μ. (6°C/Km). Ωστόσο, μέσα στην τροπόσφαιρα (κατώτερο ατμοσφαιρικό στρώμα) υπάρχουν περιοχές, στις οποίες, κάτω από ειδικές καιρικές συνθήκες, η θερμοκρασία αυξάνει με το ύψος (περιοχές αναστροφής). Ο λόγος για τον οποίο η θερμοκρασία του αέρα στην τροπόσφαιρα μειώνεται με το υψόμετρο οφείλεται στο γεγονός ότι αυτή θερμαίνεται κυρίως από τη θερμότητα που εκπέμπεται από τη Γη και άρα από κάτω προς τα άνω, με ροή που μειώνεται με το ύψος (Givoni, 1969, σ. 6· Φείδας κ.ά., 2008).

2.3.3 Άνεμος

Ο άνεμος αποτελεί το στοιχείο του κλίματος με τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα, που επιδρά στις ανθρώπινες αισθήσεις με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με την ένταση και τη διεύθυνσή του και σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία του κλίματος, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία (Βλ. Κεφ. 3, παρ. 3.3).

Τα χαρακτηριστικά και η κατανομή του ανέμου σε μια περιοχή καθορίζονται από τοπικούς και παγκόσμιους παράγοντες, με κυρίαρχους παράγοντες τις εποχιακές κατανομές της ατμοσφαιρικής πίεσης, την περιστροφή της Γης, τις ημερήσιες παραλλαγές ψύξης και θέρμανσης της στεριάς και της θάλασσας και των τοπογραφικών και γεωφυσικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής.

Για τον σχεδιασμό κτιρίων που αλληλεπιδρούν με το τοπικό κλίμα έχει σημασία η κατανόηση των χαρακτηριστικών των τοπικών ανέμων που σχετίζονται κυρίως με τη γεωμορφολογία μιας ευρύτερης περιοχής (π.χ. κοιλάδες, ορεινές και παράκτιες περιοχές), καθώς και με τις επιδράσεις του άμεσου περιβάλλοντος. Η γεωμετρία, το ανάγλυφο και η υφή των επιφανειών διαμορφώνουν τα στοιχεία του ανέμου, όπως η ένταση, η διεύθυνση και η θερμοκρασία του.

2.3.4 Υγρασία

Η υγρασία της ατμόσφαιρας σχετίζεται με την ποσότητα των υδρατμών που περιέχεται σε αυτή. Οι υδρατμοί δημιουργούνται κυρίως από την εξάτμιση των ωκεανών, αλλά και από υγρές επιφάνειες, όπως η βλάστηση

και οι επιφάνειες νερού. Η χωρητικότητα του αέρα σε υδρατμούς αυξάνεται προοδευτικά με τη θερμοκρασία, που αποτελεί τον πρωτεύοντα παράγοντα (Givoni, 1969, σ. 12).

Η υγρασία της ατμόσφαιρας επηρεάζεται από τη γεωμορφολογία ενός τόπου, την ύπαρξη υγρού στοιχείου, καθώς και από τη βλάστηση.

2.4 Καταγραφή κλίματος και κλίμακες

Για την καταγραφή του κλίματος, χρησιμοποιούνται τρεις κλίμακες, ανάλογα με τη χρήση των μετεωρολογικών πληροφοριών. Για την πρόγνωση καιρού και για τα γενικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής, χρησιμοποιείται η κλίμακα του μακροκλίματος, που δίνει πληροφορίες για μεγάλες γεωμετρικές περιοχές και τα στοιχεία του είναι συνήθως καταγεγραμμένα σε χάρτες. Για τον βιοκλιματικό σχεδιασμό κτιρίων, αλλά και πόλεων, είναι χρήσιμη η κλίμακα του μεσοκλίματος, που αφορά μικρές γεωγραφικές περιοχές, ενώ ο βιοκλιματικός σχεδιασμός των κτιρίων επεμβαίνει στον περίγυρό τους, τροποποιώντας ή και μεταβάλλοντας το μικροκλίμα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 26) (Πίνακας 2.2).

Είδος	Χαρακτηριστικά καθορισμού	Κλιματικά στοιχεία	Εύρος
ΜΑΚΡΟΚΛΙΜΑ	Ηπειρωτικά και ωκεάνια χαρακτηριστικά	Θερμοκρασία του αέρα (μέσες τιμές)	Εύρος περιοχής: Μεγάλες γεωγραφικές περιοχές (>100 χλμ^2) ακόμη και χώρες
ΜΕΣΟΚΛΙΜΑ (ΤΟΠΙΚΟ ΚΛΙΜΑ) Ηπειρωτικό Πεδινό Δάσους Κοιλάδας Ορεινό Παράλιο Νησιωτικό Οικισμού	Γεωγραφικά χαρακτηριστικά (Γεωμορφολογία, Βλάστηση, Υψόμετρο, Υδάτινο στοιχείο), Ανθρωπογενείς επεμβάσεις	Ηλιακή ακτινοβολία Θερμοκρασία του αέρα Άνεμος Υγρασία	Εύρος περιοχής: Μικρές γεωγραφικές περιοχές (περίπου 1-100 χλμ^2) Χρονική διάρκεια καταγραφής: 1-10 ημέρες
ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ & ΑΣΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ	Γεωμορφολογία (κλίση και χαρακτηριστικά εδάφους), Γεωμετρία δομημένου περιβάλλοντος (Υψος κτιρίων, πυκνότητα κτιρίων), Επιφάνειες πρασίνου και κατανομή τους, Υλικά κατασκευής κτιρίων και κάλυψης υπαίθριων χώρων, Ρύποι	Ηλιακή ακτινοβολία Θερμοκρασία του αέρα Κίνηση του αέρα (ταχύτητα, διεύθυνση και θερμοκρασία) Υγρασία	Εύρος περιοχής: Αναφέρεται σε συγκεκριμένες περιοχές και τα περίχωρά τους, και σε συνθήκες ατμόσφαιρας στα 2 μ. περίπου από την επιφάνεια

Πίνακας 2.2 *Είδος, χαρακτηριστικά καθορισμού, στοιχεία κλίματος και εύρος των τριών κλιμάκων του κλίματος.*

2.5 Μακροκλίμα

Το μακροκλίμα είναι η γενικευμένη κλιματική εικόνα μιας περιοχής (μεγαλύτερης των 500 χλμ, με διάφορα γεωφυσικά χαρακτηριστικά που καθορίζεται από την επίδραση των ωκεανών και των ηπείρων (Hegger, 2008, σ. 52). Σημαντικό στοιχείο του μακροκλίματος είναι η θερμοκρασία του αέρα, που καταγράφεται ως μέση τιμή και δίνει τους κλιματικούς χάρτες και τις κλιματικές ζώνες. Η θερμοκρασία του αέρα σε κάποιον τόπο εξαρτάται από τις αέριες μάζες που κινούνται από μεγάλης κλίμακας καιρικά συστήματα και επηρεάζονται από τοπικά φαινόμενα, όπως η ηλιοφάνεια. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου από τα καιρικά συστήματα, τόσο μικρότερη είναι η επίδραση των τοπικών φαινομένων. Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρή, τότε είναι μεγαλύτερη η επίδραση από τοπικά φαινόμενα, όπως η επαφή του αέρα με το έδαφος που έχει ζεσταθεί από την ηλιακή ακτινοβολία ή που είναι ψυχρό από τον νυχτερινό δροσισμό. Όπως ήδη

αναφέρθηκε, η επαφή του αέρα με το έδαφος έχει σημαντική επίδραση στη διαφοροποίηση της θερμοκρασίας του. Όσο αυξάνεται η απόσταση από το έδαφος, τόσο η επίδραση στη διακύμανση της θερμοκρασίας μειώνεται. Οι μέσες τιμές θερμοκρασιών για την περίοδο θέρμανσης από τους διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς δίνουν ισοθερμικούς χάρτες, που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των κλιματικών ζωνών μιας μεγάλης γεωγραφικής περιοχής (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 26).

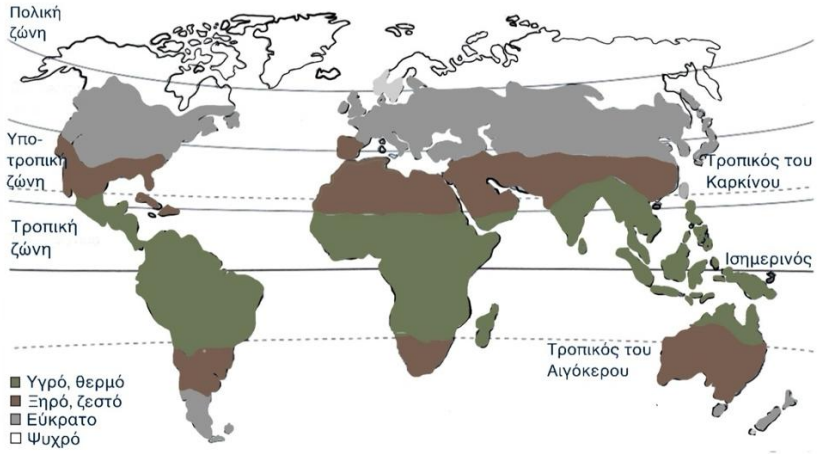
2.5.1 Τύποι μακροκλίματος

Έχουν μελετηθεί πολλοί διαφορετικοί τρόποι κλιματικής κατάταξης ανάλογα με τον σκοπό χρήσης τους. Για τον κτιριακό και πολεοδομικό σχεδιασμό, η πιο κατάλληλη κατηγοριοποίηση συσχετίζει τις κλιματικές συνθήκες με την επίδρασή τους στην ανθρώπινη θερμική άνεση (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 27-28), Με βάση, λοιπόν, τη θερμική άνεση, διακρίνονται στον παγκόσμιο χάρτη τέσσερις (4) βασικές κλιματικές ζώνες, τα χαρακτηριστικά των οποίων χαρτογραφούν το γενικό πλαίσιο για τον σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 27-28· και Hegger et al., 2008) (Εικόνα 2.1).

- **Ψυχρή – Πολική ζώνη** (*cold*): Το κύριο χαρακτηριστικό είναι οι χαμηλές θερμοκρασίες όλο τον χρόνο (0-6^{o}C και μέση ελάχιστη -15^{o}C και ετήσια ελάχιστη έως τους -40^{o}C).
- Χαμηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και πολύ χαμηλές ετήσιες θερμοκρασίες (0-6^{o}C).
- Μέτριες έως μικρές ημερήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.
- Μέτριες έως μικρές ετήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις ειδικά στις παράκτιες περιοχές.
- Υψηλές ετήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στις ηπειρωτικές περιοχές.
- Χαμηλές τιμές σχετικής υγρασίας τον χειμώνα.
- Μακρές περίοδοι παγετού.
- Χαμηλό ύψος βροχής.
- **Εύκρατη ζώνη** (*temperate*): Το κύριο χαρακτηριστικό είναι η διάκριση των εποχών σε ψυχρές και θερμές περιόδους, χωρίς θερμοκρασιακά ακρότατα. Η μηνιαία μέση θερμοκρασία μπορεί να φτάσει τους -15^{o}C τον χειμώνα, ενώ η μέση μηνιαία το καλοκαίρι δεν ξεπερνά τους 25^{o}C. Οι ακρότατες ετήσιες μέσες τιμές είναι δυνατόν να εκτείνονται από -30^{o}C έως 37^{o}C. Η βροχόπτωση είναι δυνατή καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ τον χειμώνα υπάρχει χιόνι.
- Μεγάλο εύρος στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Μεγάλες ετήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.
- Μέτριες έως μικρές ημερήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.
- Μέτριες έως υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας.
- Μέτριο ύψος βροχής.
- **Υποτροπική ζώνη. Θερμό, ξηρό κλίμα** (*hot and arid*): Το κύριο χαρακτηριστικό είναι οι υψηλές θερμοκρασίες και οι υψηλές τιμές ακτινοβολίας, τόσο εισερχόμενης όσο και μακροκύματης εξερχόμενης. Η μέση θερμοκρασία του πιο ζεστού μήνα είναι μεγαλύτερη από 25^{o}C. Η μέγιστη θερμοκρασία του έτους είναι γύρω στους 45^{o}C και η ελάχιστη μπορεί να φτάσει μέχρι -10^{o}C, ενώ οι ημερήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι μεγάλες, με πολύ υψηλές θερμοκρασίες την ημέρα και χαμηλές τη νύχτα. Ο αέρας είναι ξηρός, η ατμοσφαιρική σχετική υγρασία χαμηλή και είναι δυνατός ο δροσισμός με εξάτμιση. Οι άνεμοι είναι ισχυροί, γιατί δεν εμποδίζονται από την ελάχιστη βλάστηση και μεταφέρουν άμμο και σκόνη.
- Μεγάλη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Χαμηλές τιμές σχετικής υγρασίας.
- Χαμηλό ύψος βροχής.
- Υψηλές θερμοκρασίες την ημέρα.
- Χαμηλές θερμοκρασίες τη νύχτα.

- Υψηλές ημερήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.
- Ισχυροί άνεμοι από διάφορες διευθύνσεις.
- Χαμηλή νεφοκάλυψη/καθαρός ουρανός, με υψηλά επίπεδα φωτισμού.

- **Τροπική ζώνη. Θερμό, υγρό κλίμα** (*tropical*): Το κύριο χαρακτηριστικό είναι οι σταθερά υψηλές θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με υψηλή υγρασία. Η μέση σχετική υγρασία κυμαίνεται γύρω στο 80%, η βροχόπτωση είναι συχνά πάνω από 200 mm, με μικρή διάρκεια και μεγάλη ένταση, επαναλαμβανόμενη κατά διαστήματα. Σημαντικό στοιχείο για τον σχεδιασμό είναι η υψηλή μέση θερμοκρασία και σχετική υγρασία την ημέρα και τη νύχτα.
- Μεγάλη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας (60-100%).
- Μεγάλο ύψος βροχής.
- Χαμηλές ημερήσιες και ετήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις (25°C-30°C).
- Ισχυροί άνεμοι από διάφορες διευθύνσεις.
- Υψηλή νεφοκάλυψη και υψηλή διάχυτη ακτινοβολία.
- Χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση.
- Συχνές τροπικές καταιγίδες (κυκλώνες, τυφώνες) κατά περιοχές.

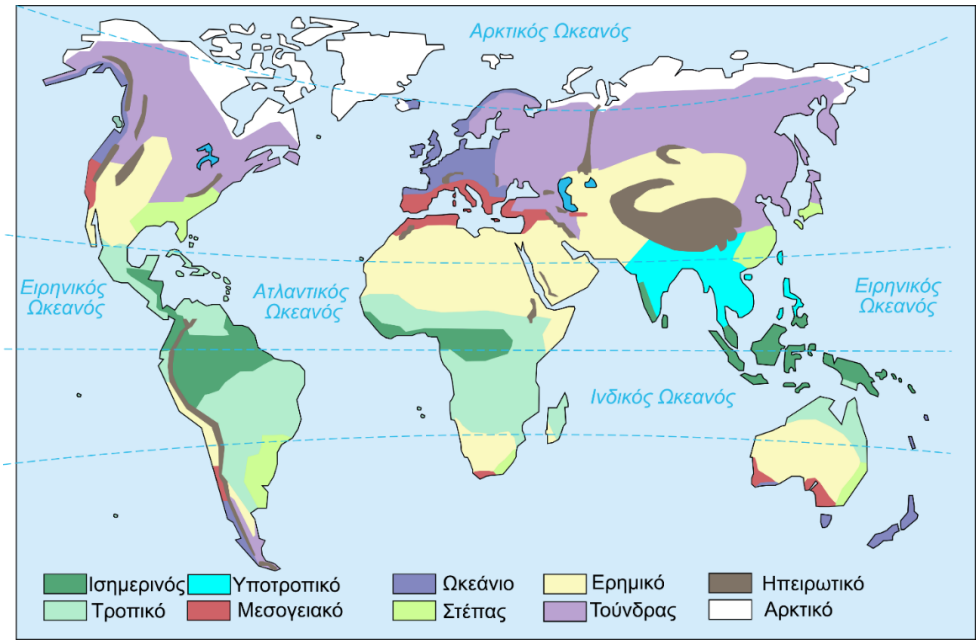


Εικόνα 2.1 *Καταγραφή των βασικών τύπων κλίματος στον παγκόσμιο γεωγραφικό χάρτη. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

Από τον κλιματικό διαχωρισμό που λαμβάνει υπόψη κάποια γεωφυσικά στοιχεία που διαμορφώνουν τα χαρακτηριστικά του κλίματος, προκύπτουν οι παρακάτω τύποι κλίματος (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 29-30) (Εικόνα 2.2):

- **Αρκτικό κλίμα:** Οι θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν είναι ο κανόνας, πολύ λίγο φως ημέρας για περισσότερο από τον μισό χρόνο, ισχυρές χιονοπτώσεις.
- **Κλίμα τούνδρας:** Θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν για τον μισό χρόνο, ήπια καλοκαίρια, βροχοπτώσεις όλον τον χρόνο, ισχυροί άνεμοι.
- **Αλπικό κλίμα:** Μεγάλης διάρκειας χειμώνες με χιόνια, πάγο, χιονοστιβάδες, δροσερά καλοκαίρια με πολλή ηλιοφάνεια, ισχυροί άνεμοι και ευμετάβλητες καιρικές συνθήκες.
- **Ηπειρωτικό κλίμα:** Κλίμα με ακραίες συνθήκες, στο οποίο οι κρύοι χειμώνες διαδέχονται τα ζεστά καλοκαίρια, με μικρής διάρκειας ενδιάμεσες εποχές, βροχοπτώσεις όλο τον χρόνο, ισχυροί άνεμοι.

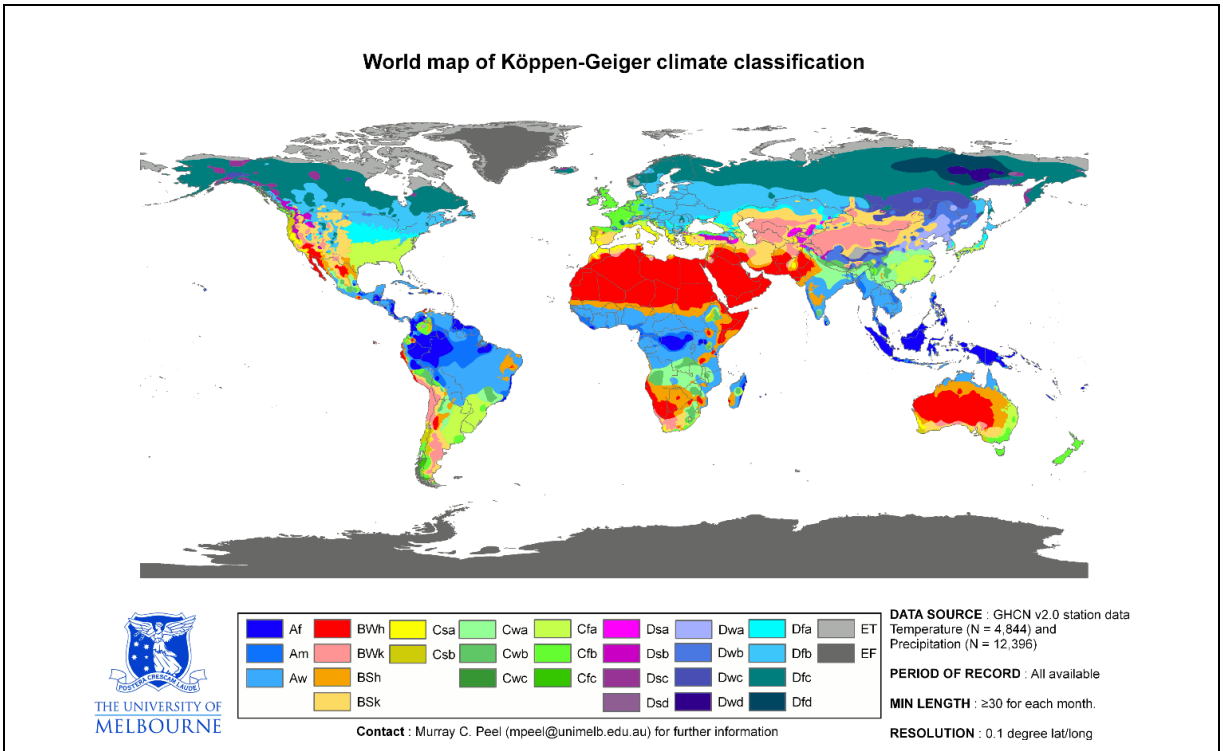
- **Εύκρατο κλίμα:** Αυτό το κλίμα επηρεάζεται από τη γειτνίαση με τους ωκεανούς, χαρακτηριστικοί είναι οι ήπιοι μεγάλης διάρκειας χειμώνες, με πολλές βροχές, καθώς και τα ζεστά και υγρά καλοκαίρια.
- **Μεσογειακό κλίμα:** Παρέχει τις καλύτερες συνθήκες, με ζεστά ξηρά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες. Απαντάται κυρίως σε χώρες γύρω από τη Μεσόγειο, αλλά και σε άλλες περιοχές με τα ίδια χαρακτηριστικά.
- **Υποτροπικό κλίμα:** Οι θερμοκρασίες ποτέ δεν πέφτουν κάτω από το μηδέν. Οι συνθήκες όλο τον χρόνο είναι άνετες και μόνο το καλοκαίρι είναι θερμό και υγρό. Οι κυκλώνες και οι τυφώνες αποτελούν μόνιμο κίνδυνο και η βροχόπτωση είναι υψηλή όλο τον χρόνο.
- **Τροπικό κλίμα:** Είναι ζεστό και θερμό όλο τον χρόνο με υψηλή βροχόπτωση και εξαρτάται από την ύπαρξη μεγάλων δασικών εκτάσεων.
- **Κλίμα σαβάνας:** Κλιματική ζώνη στην οποία η θερμοκρασία είναι αρκετά σταθερή, μεταξύ 20 και 30°C. Η βροχόπτωση είναι συνήθως εποχική.
- **Κλίμα στέπας:** Το κλίμα είναι συνήθως πολύ ζεστό το καλοκαίρι και ψυχρό τον χειμώνα, με πολύ λίγη βροχόπτωση. Σε πολλές περιοχές συναντώνται εποχικοί άνεμοι με σταθερές κατευθύνσεις, που προσφέρονται για τον δροσισμό των κτιρίων τη θερμή περίοδο.
- **Κλίμα ερήμου:** Πάρα πολύ υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι, οι οποίες όμως τη νύχτα πέφτουν πολύ χαμηλά και μάλιστα σε τοποθεσίες με μεγάλο υψόμετρο ακόμη και κάτω από το μηδέν. Ελάχιστη βροχόπτωση και ισχυροί, τοπικοί, ξαφνικοί άνεμοι συμπληρώνουν την εικόνα αυτού του αφιλόξενου περιβάλλοντος.



Εικόνα 2.2 *Ο διαχωρισμός της Γης σε κλιματικές ζώνες με βάση γεωφυσικά χαρακτηριστικά. Πηγή: Μετάφραση του Map world climate zones by historicair 21:12, 9 November 2006 (UTC) via Wikimedia Commons, GNU Free Documentation License CC BY-SA 3.0 CC BY-SA 2.5, CC BY-SA 2.0, CC BY-SA 1.0*

Ένας άλλος τρόπος κατάταξης είναι η κλιματική ταξινόμηση Köppen-Geiger, ο οποίος κατηγοριοποιεί το κλίμα σε πέντε κύριους τύπους (Α-Τροπικό, Β-Ξηρό, C-Εύκρατο, D-Ηπειρωτικό και Ε-Πολικό) και 30 υποτύπους. (Εικόνα 2.3) Η κατηγοριοποίηση βασίζεται στις ακραίες τιμές και στην περιοδικότητα των μηνιαίων τιμών θερμοκρασίας και βροχόπτωσης. Με βάση ότι η βλάστηση είναι η έκφανση του κλίματος, αυτή η κατηγοριοποίηση έχει στόχο να καταγράψει εμπειρικά την κατανομή των βιοτόπων (biomes) ανά την υφήλιο: διαφορετικές περιοχές με τον ίδιο τύπο έχουν κοινά χαρακτηριστικά βλάστησης. Η πρώτη εκδοχή αυτής της

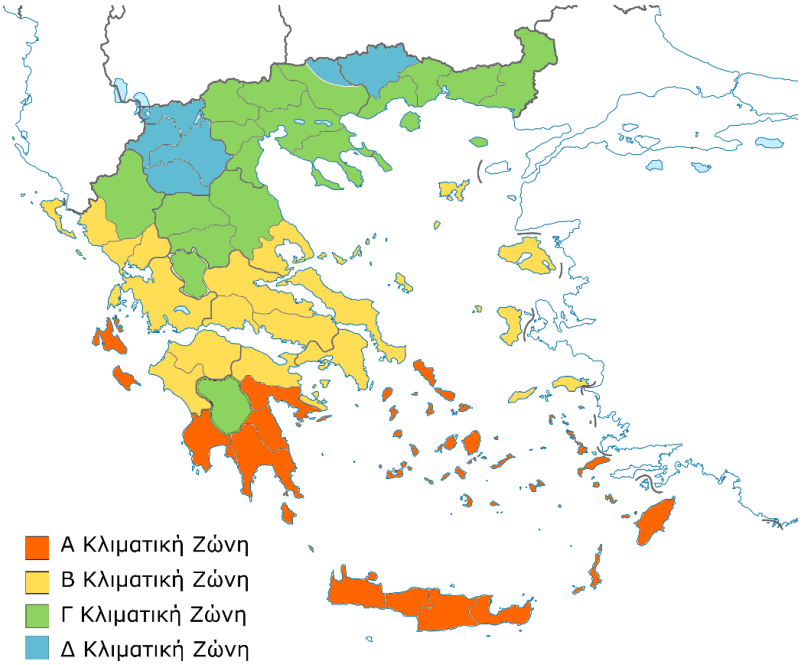
κατηγοριοποίησης αναπτύχθηκε στο τέλος του 19ου αιώνα και αποτελεί έναν κατάλληλο τρόπο να αντληθούν πολύπλοκα κλιματικά δεδομένα σε ένα απλό, αλλά με οικολογική σημασία σχέδιο κατάταξης (Beck et al., 2018· και «Köppen climate classification», 2021).



Ζώνη	Τύπος	Περιγραφή	Κριτήριο
A (Τροπικό)	f m w s	Βροχοδασών ή Ισημερινού Μουσώνων Σαβάνας, ξηρός χειμώνας Σαβάνας, ξηρό καλοκαίρι	
B (Ξηρό)	W S	Ερημικό Ημίξηρο ή Στέπας	
	h k	Ζεστό Κρύο	$T_{ετήσια} \geq +18^{o}C$ $T_{ετήσια} < +18^{o}C$
C (Εύκρατο)	w f s	Ξηρός χειμώνας No dry season Dry summer	
	a b c	Ζεστό καλοκαίρι Θερμό καλοκαίρι Δροσερό καλοκαίρι	$T_{μεγ ή max} \geq +22^{o}C$ όχι a & ≥ 4 μήνες $T_{μην} \geq 10^{o}C$ όχι b & $T_{ελαχ} > -38^{o}C$
D (Ηπειρωτικό)	w f s	Ξηρός χειμώνας Χωρίς ξηρή περίοδο Ξηρό καλοκαίρι	
	a b c d	Ζεστό καλοκαίρι Θερμό καλοκαίρι Δροσερό καλοκαίρι Πολύ κρύος χειμώνας	$T_{μεγ} \geq +22^{o}C$ όχι a & ≥ 4 μήνες $T_{μην} \geq 10^{o}C$ όχι b & $T_{ελαχ} > -38^{o}C$ παρόμοιο c & $T_{ελαχ} \leq -38^{o}C$
E (Πολικό)	T F	Τούνδρας Παγόβουνα	

Εικόνα 2.3 *Ο διαχωρισμός της Γης με βάση την κλιματική ταξινόμηση Köppen-Geiger. Πηγή: Köppen World Map by World Köppen Map.png: Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A.(University of Melbourne) via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0*

Στην Ελλάδα, ο χωρισμός σε κλιματικές ζώνες βασίζεται στις βαθμοημέρες θέρμανσης (*heating degree days*). Οι βαθμοημέρες θέρμανσης δίνουν τις ημέρες και τους βαθμούς κατά τους οποίους η μέση εξωτερική θερμοκρασία του αέρα είναι χαμηλότερη από μια θερμοκρασία βάσης (π.χ. τους 18°C).[3] Σύμφωνα με τον ισχύοντα Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης των Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ), ο ελληνικός χώρος διακρίνεται σε τέσσερις (4) κλιματικές ζώνες Α, Β, Γ και Δ (Εικόνα 2.4). Η κάθε ζώνη έχει διαφορετικό κλίμα, από την Α με το ηπιότερο κλίμα, στη Β με το μέσο, τη Γ με ψυχρότερο, έως και τη Δ με το πιο ψυχρό.



Εικόνα 2.4 *Ο διαχωρισμός της Ελλάδας σε κλιματικές ζώνες με βάση τον ΚΕΝΑΚ. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με υπόβαθρο το Greece Location map, by Lencer, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 και δεδομένα από την ΤΟΤΕΕ 20701-2/2017.*

2.6 Μεσοκλίμα

Τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά ενός τόπου, καθώς και οι ανθρωπογενείς επεμβάσεις αλλάζουν τα στοιχεία του κλίματός του και καθορίζουν το μεσοκλίμα του, το λεγόμενο τοπικό κλίμα. Το αστικό τοπίο και το φυσικό τοπίο έχουν τελείως διαφορετική επίδραση σε αυτή τη μεταβολή. Για την κατανόηση αυτών των επιδράσεων, αναλύονται ξεχωριστά τα χαρακτηριστικά του κάθε κλιματικού στοιχείου, δηλαδή της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας του αέρα, του ανέμου και της υγρασίας, στην κλίμακα αυτή.

Η **ηλιακή ακτινοβολία** επηρεάζεται από την ατμόσφαιρα. Όταν η ατμόσφαιρα είναι καθαρή, η μέγιστη τιμή της ακτινοβολίας (άμεσης και διάχυτης) που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι περίπου 1 kW/m^2, κάθετα στη διεύθυνση της ηλιακής ακτίνας. Η σκόνη και οι υδρατμοί προκαλούν φαινόμενα απορρόφησης και ανάκλασης, με αποτέλεσμα να μειώνουν το ποσό που φτάνει τελικά στο έδαφος. Στις πόλεις, ρύποι στην ατμόσφαιρα από διάφορες πηγές, όπως τα αυτοκίνητα, τα εργοστάσια και τα συστήματα κεντρικής θέρμανσης, απορροφούν και διαχέουν την ηλιακή ακτινοβολία, μειώνοντας την άμεση ακτινοβολία και αυξάνοντας τη διάχυτη. Η κατάσταση επιδεινώνεται το καλοκαίρι, όταν η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στους ατμοσφαιρικούς ρύπους είναι μεγαλύτερη και οι συνθήκες ευνοούν τη δημιουργία φωτοχημικού

[3] Έτσι, για παράδειγμα, εάν η μέση θερμοκρασία για 1 ημέρα ενός μήνα είναι ίση με 17°C, οι ανάγκες θέρμανσης για αυτή θα είναι: 18 – 17 = 1°C x 1 = 1 βαθμοημέρα θέρμανσης, ενώ εάν είναι για 5 ημέρες, αυτές θα είναι: 18 – 17 = 1°C x 5 = 5 βαθμοημέρες θέρμανσης. Εάν η μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι ίση με τους 18°C, δεν θα υπάρχουν βαθμοημέρες θέρμανσης.

νέφους (βλ. Κεφ.1, παρ.1.3.1). Οι συγκεντρώσεις στερεών ρυπαντών και σκόνης στην ατμόσφαιρα είναι δυνατόν να μειωθούν με φυτεύσεις. Τα φύλλα των φυτών λειτουργούν ως φίλτρα, κατακρατώντας μεγάλο ποσό σκόνης, που κολλά επάνω τους και με τη βροχή ξεπλένεται και διοχετεύεται στο έδαφος (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 30).

Εκτός από την ποιότητα της ατμόσφαιρας, η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζεται από διαφόρων ειδών γεωμετρικά εμπόδια που την περιορίζουν. Τέτοια εμπόδια είναι η γεωφυσική διαμόρφωση του τόπου με βουνά ή λόφους που να τον σκιάζουν, η βλάστηση και το είδος της (φυτά φυλλοβόλα ή αειθαλή) και για τις οικοδομημένες περιοχές, η πυκνότητα και η διαμόρφωση του προφίλ της τομής της, σε συνάρτηση με τον προσανατολισμό. Όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι σχετικοί με την παρεχόμενη εποχιακή σκίαση της περιοχής και τη δυνατότητα που έχει να δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία και να την εκμεταλλεύεται ή να την περιορίζει (Στο ίδιο).

Η **θερμοκρασία του αέρα** ενός τόπου επηρεάζεται από τη γεωμορφολογία του, τη βλάστηση και το είδος της επιφάνειας του εδάφους του. Η γεωμορφολογία του, δηλαδή το ανάγλυφο του εδάφους του, επηρεάζει τη θερμοκρασία του, ανάλογα με τον προσανατολισμό και την κλίση του εδάφους, σε συνάρτηση με τους ανέμους, καθώς και με την κίνηση των αερίων μαζών που ζεσταίνονται και ψύχονται στην περιοχή. Επιφάνειες του εδάφους που έχουν τέτοια κλίση, ώστε να είναι εκτεθειμένες στον ήλιο, ζεσταίνονται περισσότερο από άλλες που σκιάζονται. Επίσης, επιφάνειες που είναι περισσότερο εκτεθειμένες στον άνεμο θα ζεσταθούν λιγότερο, λόγω της ψύξης τους από τον αέρα. Η μορφή του εδάφους γενικότερα διαμορφώνει σε μεγάλο βαθμό την κίνηση του αέρα (Στο ίδιο, σ. 31).

Η **βλάστηση** ή η έλλειψή της είναι ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη θερμοκρασία. Σε μια δασωμένη περιοχή, τα δέντρα κατακρατούν μεγάλο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας στο φύλλωμά τους. Η θερμοκρασία του εδάφους, με αυτόν τον τρόπο, παραμένει χαμηλή με υψηλότερη θερμοκρασία στην περιοχή του φυλλώματος. Για τα αειθαλή δέντρα, αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα τον χειμώνα και το καλοκαίρι. Τη νύχτα, το φύλλωμα των δέντρων αποτρέπει τον δροσισμό του εδάφους, ο οποίος πραγματοποιείται με τη μεγάλου μήκους κύματος (θερμική) ακτινοβολία και έτσι διατηρεί τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στα δάση πολύ μικρότερες απ’ ό,τι στο γυμνό έδαφος (Στο ίδιο).

Οι θάμνοι και τα χόρτα, ανάλογα με το είδος τους, είναι δυνατόν να μειώσουν τη θερμοκρασία του αέρα, μέσω της σκίασης του περιβάλλοντός τους και της εξάτμισης που γίνεται στο φύλλωμά τους κατά τη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής (*evapotranspiration*). Με αυτόν τον τρόπο, η θερμοκρασία του αέρα γύρω από τα φυτά διατηρείται χαμηλή, παρόλο που η σχετική υγρασία αυξάνεται (Στο ίδιο). Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ο βαθμός εξατμισοδιαπνοής των διαφορετικών στοιχείων βλάστησης εξαρτάται κυρίως από το εάν πρόκειται για υδρόφιλα ή ξηροφυτικά είδη, αλλά και από τον ρυθμό της άρδευσής τους. Τα ξηροφυτικά, μεσογειακά ή ενδημικά είδη, υφίστανται μια σειρά από φυσιολογικές προσαρμογές, για παράδειγμα το σχήμα των φύλλων και το κλείσιμο των στομάτων τους, οι οποίες στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της διαπνοής, με στόχο την αντοχή τους σε συνθήκες ξηρασίας και ζέστης (Meletiou-Christou & Rhizopoulou, 2017· και Xerophyte, 2023).

Η θερμοκρασία του αέρα επηρεάζεται από το είδος, καθώς και από το χρώμα των επιφανειών που δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία. Ως προς την προέλευσή τους, τα υλικά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα φυσικά υλικά, όπως το χώμα, τα βράχια, οι θάμνοι, το χορτάρι, το νερό, και τα τεχνητά ή κατεργασμένα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως ως δομικά υλικά κτιρίων ή επικαλύψεων και καθορίζουν το αστικό περιβάλλον. Τα φυσικά υλικά, όπως το γυμνό χώμα και ο βράχος, επηρεάζουν τη θερμοκρασία του αέρα ανάλογα με το χρώμα και τη θερμοχωρητικότητά τους. Τα τεχνητά ανθρωπογενή υλικά, όπως οι διάφορες επικαλύψεις από άσφαλτο, μπετόν, λιθόπλακες, κεραμικά κ.ά., απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία ανάλογα με το χρώμα τους. Η θερμότητα αποθηκεύεται στη μάζα τους την ημέρα και επανεκπέμπεται τη νύχτα. Η εκπομπή αυτή είναι πολύ αισθητή το καλοκαίρι και είναι ένα από τα χαρακτηριστικά φαινόμενα που προκαλεί την υπερθέρμανση των αστικών περιοχών.

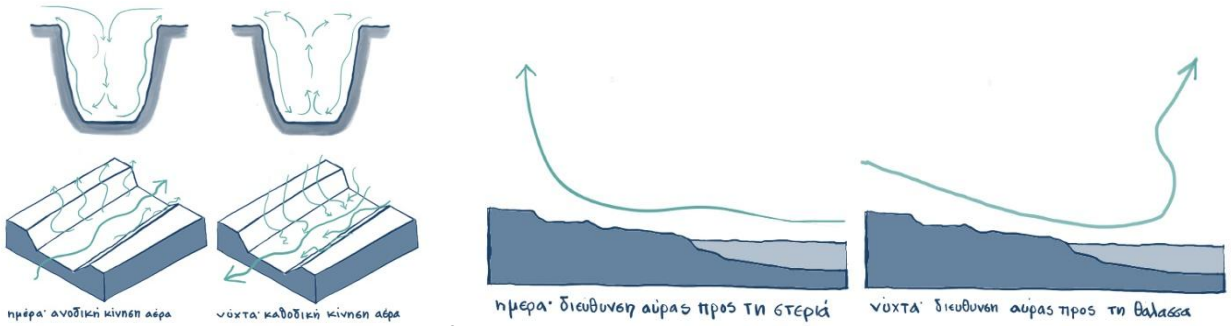
Η **ατμοσφαιρική ρύπανση** που προέρχεται από τα αυτοκίνητα, τις βιομηχανίες και τα συστήματα θέρμανσης των κατοικιών περιορίζει μεν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, αλλά συγχρόνως μειώνει (παγιδεύοντάς την) και την εξερχόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (δροσισμός με ακτινοβολία) που συμβάλλει στη μείωση της θερμοκρασίας. Το αποτέλεσμα είναι οι μεγάλες πόλεις να έχουν υψηλότερη θερμοκρασία από την περιβάλλουσα εξοχή. Η διαφορά αυτή λέγεται φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (urban heat island effect), το οποίο περιγράφεται στη συνέχεια (παρ. 2.8.1) και εμφανίζεται σταθερά, χειμώνα-καλοκαίρι στις μεγάλες πόλεις (Στο ίδιο).

Το **νερό**, με τη μορφή της θάλασσας και μικρής ή μεγάλης λίμνης, διατηρεί σταθερές θερμοκρασίες λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητάς του. Μια λίμνη απορροφά μεγάλη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς αισθητή διαφοροποίηση της θερμοκρασίας της, έτσι οι σταθερές θερμοκρασίες του νερού επηρεάζουν τον αέρα γύρω του και τον δροσίζουν την ημέρα, ενώ τον διατηρούν θερμότερο το βράδυ (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 31).

Ο **άνεμος** δημιουργείται από τις θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται μεταξύ γειτονικών τόπων και επηρεάζεται από τη γεωμορφολογία ενός τόπου. Τα χαρακτηριστικά του ανέμου σε μία περιοχή επηρεάζονται σημαντικά από το ανάγλυφό της. Η ταχύτητά του είναι μικρότερη σε μια αδρή περιοχή από ό,τι σε μια ομαλή. Ένας λόφος μπορεί να προστατεύει μια περιοχή στην υπήνεμη πλευρά του και να εκθέτει μια άλλη στην προσήνεμη. Επίσης, το ανάγλυφο του εδάφους μπορεί να αλλάζει τη διεύθυνση του ανέμου, κατευθύνοντας την κίνησή του, όπως συμβαίνει στις κοιλάδες. Οι ίδιες μεταβολές συμβαίνουν και μέσα σε μια πόλη, όπου τα εμπόδια είναι κτίρια και οι κοιλάδες είναι οι δρόμοι. Η κίνηση του ανέμου μέσα στις πόλεις είναι ένα σημαντικό ερευνητικό κεφάλαιο (κλιματολογία πόλης, *urban climatology*) που αντιμετωπίζεται από πολλούς ερευνητές (Στο ίδιο, σ. 32).

Όταν υπάρχει άπνοια, το φαινόμενο της τοπικής κίνησης του ανέμου είναι εντονότερο. Ο άνεμος που έρχεται σε επαφή με θερμές επιφάνειες ζεσταίνεται και ανεβαίνει, ενώ ο αέρας που έρχεται σε επαφή με ψυχρές κατεβαίνει. Αποτέλεσμα είναι να δημιουργείται τοπικός άνεμος, ο οποίος κινείται από την κρύα περιοχή προς τη ζεστή. Τέτοια παραδείγματα τοπικών ανέμων παρατηρούνται σε κοιλάδες, σε παραθαλάσσιες ή παραλίμνιες περιοχές, καθώς και μεταξύ αστικών περιοχών και της περιβάλλουσας υπαίθρου (Στο ίδιο).

Σε ορεινές περιοχές κατά τη διάρκεια της ημέρας δημιουργούνται ανοδικοί άνεμοι, γιατί οι επιφάνειες στις πλαγιές θερμαίνονται από τον ήλιο, και καθοδικοί κατά τη διάρκεια της νύχτας που αυτές κρυώνουν. Η κίνηση αυτή οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας που έχει ο αέρας πάνω από τις πλαγιές και πάνω από την κοιλάδα. Για τον λόγο αυτόν, στις μεγάλες ορεινές κοιλάδες παρατηρούνται δυνατοί άνεμοι από την κοιλάδα και προς τα πάνω την ημέρα και αντίστροφα τη νύχτα (Εικόνα 2.5.α) (Στο ίδιο).



α. *β.*

Εικόνα 2.5 *Τοπικοί άνεμοι.*
α. Κοιλάδες. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και απόδοση (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Απόγεια και επίγεια αύρα. Ημερήσια διακύμανση διεύθυνσης του αέρα σε παράκτιες περιοχές. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και απόδοση (Ε. Αλεξάνδρου).

Στις παράκτιες περιοχές, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας της στεριάς και της θάλασσας κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας μεταβάλλουν αντίστοιχα τη διεύθυνση του ανέμου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας ο αέρας πάνω από τη στεριά είναι πιο θερμός από εκείνον πάνω από τη θάλασσα, και μετακινείται προς τα πάνω δημιουργώντας «χώρο». Έτσι, δημιουργείται ρεύμα δροσερού θαλασσινού αέρα, της λεγόμενης «αύρας», προς τη στεριά. Τη νύχτα που η γη ψύχεται πιο γρήγορα το φαινόμενο αντιστρέφεται. Επειδή η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ξηράς και της θάλασσας είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια της ημέρας απ' ό,τι της νύχτας, η θαλάσσια αύρα προς τη στεριά είναι πιο δυνατή από την επίγεια (Givoni, 1969, σ. 12) (Εικόνα 2.5.β).

Όπως προαναφέρθηκε, το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας κάνει τις πόλεις θερμότερες από την περιβάλλουσα ύπαιθρο. Λόγω αυτής της θερμοκρασιακής διαφοράς, δημιουργούνται τοπικοί άνεμοι προς το κέντρο της πόλης. Παρόμοιες κινήσεις αέρα συμβαίνουν και μέσα στις πόλεις από πάρκα προς τα γειτονικά τους κτίρια. Αυτά τα φαινόμενα, προφανώς, γίνονται αντιληπτά όταν επικρατούν συνθήκες άπνοιας και είναι δυνατόν να συμβάλουν στον δροσισμό μίας πόλης (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 32).

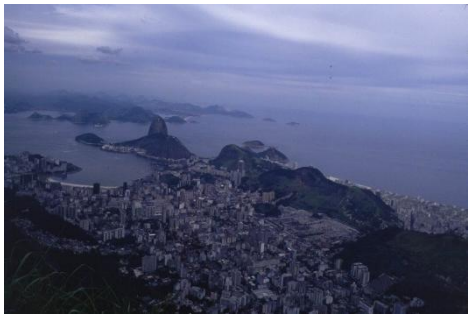
Τέλος, ως προς την ατμοσφαιρική **υγρασία** σε έναν τόπο, αυτή επηρεάζεται από την ύπαρξη λιμνών ή ποταμών λόγω της εξάτμισης. Η εξάτμιση με τη σειρά της χαμηλώνει τη θερμοκρασία του αέρα και ο κρύος αυτός αέρας μπορεί να συμβάλει στον δροσισμό της περιοχής το καλοκαίρι, εφόσον η σχετική υγρασία του αέρα είναι μέσα σε ορισμένα όρια. Ταυτόχρονα, και η βλάστηση επηρεάζει σημαντικά την υγρασία ενός τόπου, γιατί τα φυτά κατακρατούν μεγάλο μέρος του νερού της βροχής με το ριζικό τους σύστημα, επιβραδύνουν τη ροή του με το φύλλωμά τους, εμπλουτίζοντας τον υπόγειο υδροφορέα. Η βλάστηση, επίσης, αυξάνει την υγρασία της ατμόσφαιρας μέσω του φαινομένου της εξάτμισης που γίνεται στα φυλλώματα κατά τη διαπνοή των φυτών και συμβάλλει στον καλοκαιρινό δροσισμό (Στο ίδιο).

2.6.1 Τύποι μεσοκλίματος

Με βάση τα παραπάνω, μπορούν να απομονωθούν οι τύποι μεσοκλίματος, ανάλογα με τις γεωμορφολογικές συνθήκες του τόπου (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 32-34):

- **Παράλιο.** Στις παραθαλάσσιες περιοχές, οι θερμοκρασιακές μεταβολές είναι μικρές λόγω της θερμικής αδράνειας της μάζας του νερού. Για τον λόγο αυτόν, κατά τους ψυχρούς μήνες παρατηρείται υψηλότερη θερμοκρασία στις παράκτιες περιοχές σε σχέση με τις γειτονικές μεσόγειες, ενώ κατά τους θερμούς χαμηλότερη. Οι τιμές υγρασίας είναι υψηλές λόγω της εξάτμισης του νερού. Σε πολλές παράλιες περιοχές παρατηρείται υψηλός δείκτης βροχοπτώσεων λόγω της ύπαρξης μεγάλου ποσοστού υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Η διεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται μεταξύ ημέρας και νύχτας (θαλάσσια και επίγεια αύρα), ενώ όταν ο άνεμος έχει διεύθυνση από τη θάλασσα προς την ξηρά αναπτύσσει μεγάλη ταχύτητα λόγω έλλειψης εμποδίων (Εικόνα 2.6.α).
- **Πεδινό.** Το πεδινό κλίμα χαρακτηρίζεται από μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας ανάμεσα στο καλοκαίρι και στον χειμώνα (πολύ κρύοι χειμώνες με χιονοπτώσεις και πολύ ζεστά καλοκαίρια). Οι άνεμοι αναπτύσσουν μεγάλες ταχύτητες ελλείψει εμποδίων. Γενικώς, οι κλιματικές συνθήκες είναι οι ακρότατες που καταγράφονται στους μετεωρολογικούς σταθμούς (Εικόνα 2.6.β).
- **Δάσος.** Στα δάση η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος είναι περιορισμένη και η ποσότητά της εξαρτάται από το είδος των δέντρων (φυλλοβόλα ή αειθαλή). Την ημέρα, η θερμοκρασία κοντά στο έδαφος είναι χαμηλότερη από αυτή του φυλλώματος. Τη νύχτα, το φύλλωμα εμποδίζει τη μακροκύματη ακτινοβολία, και έτσι η θερμοκρασία μέσα στο δάσος διατηρείται υψηλότερη σε σχέση με τις μη δασικές περιοχές. Η ένταση των ανέμων είναι μικρή και η υγρασία παραμένει υψηλή λόγω διαπνοής των φυτών (Εικόνα 2.6.γ).
- **Κοιλάδα:** Ανάλογα με τον προσανατολισμό της, μια κοιλάδα μπορεί να προστατεύεται από τον άνεμο ή να τον οδηγεί κατά μήκος της. Επίσης, μπορεί να έχει ηλιόλουστες ή σκιασμένες πλαγιές. Ο συνδυασμός ηλιακής ακτινοβολίας και ανέμου δίνει μια περιπτωσιολογία με μεγάλη ποικιλία, από τη σκιερή και ιδιαίτερα εκτεθειμένη στον άνεμο μέχρι την ηλιόλουστη και προστατευμένη. Η παρουσία νερού, είτε με τη μορφή ποταμών είτε με τη μορφή λιμνών, επηρεάζει το κλίμα με τον τρόπο με τον οποίο προαναφέρθηκε (Εικόνα 2.6.δ).
- **Ορεινό:** Στα βουνά, η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και στους ανέμους είναι επίσης συναρτημένη με τον προσανατολισμό. Λόγω του υψόμετρου οι θερμοκρασίες διατηρούνται χαμηλές όλο τον χρόνο. Η βροχή και το χιόνι είναι συχνά φαινόμενα όλο τον χρόνο, ενώ το χιόνι διατηρείται για πολλούς από τους χειμερινούς μήνες (Εικόνα 2.6.ε).
- **Αστικό:** Το αστικό κλίμα διαμορφώνεται από μετεωρολογικούς και χωροταξικούς παράγοντες, καθώς και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Διαφέρει σημαντικά από αυτό της γειτνιάζουσας υπαίθρου, με κύριο χαρακτηριστικό τις υψηλότερες θερμοκρασίες (αστική θερμική νησίδα) και τη χαμηλότερη ηλιοφάνεια κατά 15% περίπου. Η κίνηση του ανέμου στον αστικό ιστό δυσχεραίνεται από την πυκνότητα του δομημένου κτιριακού όγκου ή διοχετεύεται σε δρόμους παράλληλους με τη διεύθυνσή του, δημιουργώντας το φαινόμενο του αστικού φαραγγιού ή της αστικής χαράδρας (*urban canyon*). Λόγω της πολυπλοκότητας και της σημασίας του, το αστικό μικροκλίμα αναλύεται εκτενέστερα στη συνέχεια (παρ. 2.6). (Εικόνα 2.6.ζ).

α.  β.  γ. 

δ.  ε.  ζ.  η. 

Εικόνα 2.6 *Τύποι μεσοκλίματος. α. Παραθαλάσσιο, β. Ηπειρωτικό, γ. Πεδινό, δ. Δάσος, ε. Κοιλάδα, ζ. Ορεινό, η. Αστικό. Πηγές: β., γ., η. Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Ευαγγελινός) και α., δ., ε., ζ. Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*

2.7 Μικροκλίμα

Το μικροκλίμα εκφράζει τη χαρακτηριστική διαμόρφωση των κλιματικών παραγόντων σε μια μικρή περιοχή και διαμορφώνεται από το ανθρωπογενές και το φυσικό περιβάλλον και τα χαρακτηριστικά τους, δηλαδή τα φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής, καθώς και τη φύτευση και τον σκιασμό της (Εικόνα 2.7). Το μικροκλίμα είναι πολύ σημαντικό για τις συνθήκες άνεσης εντός και γύρω από ένα κτίριο, γιατί χαρακτηρίζει τις συνθήκες του περιβάλλοντα χώρου του, με τις οποίες αλληλεπιδρά. Στοιχεία που επηρεάζουν το μικροκλίμα είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η κίνηση του αέρα και η υγρασία. Με τους κατάλληλους χειρισμούς των στοιχείων αυτών μπορεί να μειωθούν τα φορτία θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου ή των υπαίθριων χώρων (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 34-35).

Ηλιακή ακτινοβολία. Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται ένα οικόπεδο εξαρτάται από τον προσανατολισμό του, τη γεωμετρία του δομημένου και φυσικού περιβάλλοντός του, καθώς και τη φύτευση. Για τη χωροθέτηση του κτιρίου στο οικόπεδο πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ο σκιασμός από τα γειτονικά του κτίρια, τα στοιχεία φύτευσης ή άλλα εμπόδια.

Η φύτευση των υπαίθριων χώρων είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας γιατί μπορεί με την κατάλληλη επιλογή δέντρων και φυτών (φυλλοβόλων και αειθαλών) να συμβάλει στις στρατηγικές σκιασμού, δροσισμού ή ηλιασμού, μεγιστοποιώντας τα προσδοκώμενα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, φυτεύοντας φυλλοβόλα δέντρα στην προσήλια πλευρά του κτιρίου, υπάρχει ηλιασμός τον χειμώνα και σκίαση το καλοκαίρι. Επίσης, η κατάλληλη φύτευση αφορά και την εδαφοκάλυψη με φυλλοβόλους θάμνους, έρποντα φυτά ή χορτάρι που σκιάζουν το χώμα το καλοκαίρι, διατηρώντας το δροσερό, ενώ τον χειμώνα αφήνουν την ηλιακή ακτινοβολία να το θερμάνει. Η επιλογή των υλικών κάλυψης οριζόντιων κυρίως επιφανειών πρέπει να γίνεται με έλεγχο της ανακλαστικότητας και της θερμοχωρητικότητάς τους, και σε μικρή έκταση για να αποφεύγεται η θερμοσυσσώρευση από αυτά (Στο ίδιο).

Υγρασία. Η υγρασία του αέρα σε ένα οικόπεδο αλλάζει από την ύπαρξη νερού και φυτών. Η ύπαρξη του νερού σε οποιαδήποτε μορφή, όπως λίμνη, σιντριβάνι, ρυάκι ή με κατάλληλο σύστημα κυκλοφορίας κάτω από την πλακόστρωση, με μεταφορά και εξάτμιση, χαμηλώνει τη θερμοκρασία του αέρα γύρω του και,

εφόσον η σχετική υγρασία του αέρα είναι χαμηλή, παρέχει φυσικό δροσισμό. Τα φυτά, όπως έχει προαναφερθεί, δροσίζουν τον αέρα γύρω τους με την εξάτμιση κατά τη διαπνοή (Στο ίδιο).

Άνεμος. Οι τοπικές συνθήκες ανέμου είναι δυνατόν να διαφοροποιηθούν με τη χρήση φυτών και δέντρων, καθώς και από την παρουσία κτιρίων και άλλων εμποδίων. Τα δέντρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εμπόδια για τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Ανάλογα με το είδος, τη γεωμετρία τους και το αν είναι φυλλοβόλα ή αειθαλή, έχουν και διαφορετική δυνατότητα να εμποδίζουν τον αέρα. Τα κωνοφόρα, κυρίως τα κυπαρίσσια, είναι τα πιο κατάλληλα για ανεμοφράκτες στις βορινές πλευρές των οικοπέδων.



Εικόνα 2.7 *Επίδραση διαφορετικών στοιχείων στο μικροκλίμα: βλάστηση, εδαφοκάλυψη, νερό. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου, Ε. Ευαγγελινού και Η. Ζαχαρόπουλου).*

Τα κτίρια αποτελούν εμπόδια στην κίνηση του ανέμου. Έχουν μια προσήνεμη πλευρά και μια υπήνεμη. Η προσήνεμη πλευρά παρουσιάζει θετική πίεση, ενώ η υπήνεμη αρνητική. Ένα επίμηκες κτίριο αναγκάζει τον αέρα να κινηθεί από πάνω του, ενώ ένα πυργοειδές από δίπλα του. Ένα υψηλό κτίριο σε pilotis πολλαπλασιάζει την ταχύτητα του αέρα που περνά από κάτω του, δημιουργώντας ένα ισχυρό καθοδικό ρεύμα στην προσήνεμη όψη του. Κτίρια μέσα σε πόλεις, υπό γωνία ως προς την κατεύθυνση του ανέμου, μεταβάλλουν την κατεύθυνσή του. Ένα κτίριο δημιουργεί μια «σκιά» ανέμου προς την υπήνεμη πλευρά του, με μήκος περίπου έξι φορές το ύψος του. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό προστατευμένων εξωτερικών λειτουργιών, όπως κινήσεις πεζών, που θα πρέπει να τοποθετούνται στη «σκιά» του κτιρίου. Αν πρέπει, όμως, να τοποθετηθεί ένα δεύτερο κτίριο που να εκμεταλλεύεται πλήρως την κίνηση του αέρα για να δροσίζεται το καλοκαίρι, αυτό πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση μεγαλύτερη από το εξαπλάσιο του ύψους του πρώτου κτιρίου (Στο ίδιο).

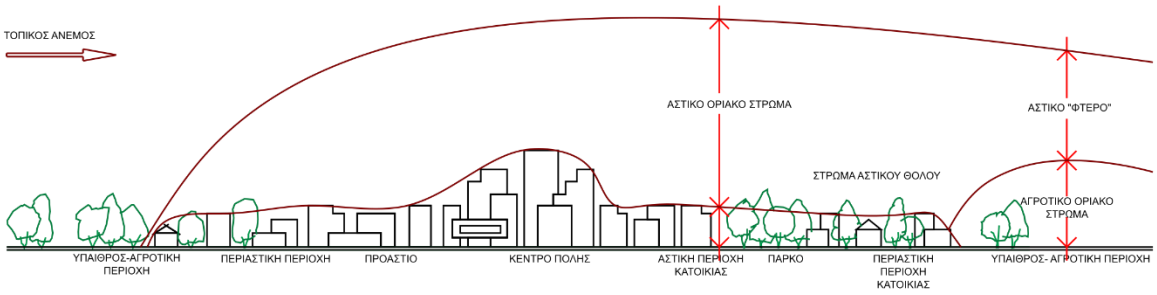
2.8 Αστικό μικροκλίμα

Οι σύγχρονες πόλεις αποτελούν ένα ιδιαίτερο ανοιχτό σύστημα το οποίο διαμορφώνεται από τη διαδραστική σχέση ανάμεσα στις ανθρώπινες δραστηριότητες και στο φυσικό περιβάλλον, το λεγόμενο αστικό οικοσύστημα. Ο σχεδιασμός τους, οι περίπλοκες λειτουργίες τους και η ανάπτυξή τους μεταβάλλουν τις κλιματικές συνθήκες και διαμορφώνουν αυτό που αναφέρεται ευρύτερα ως αστικό μικροκλίμα (*urban microclimate*). Μέσα στις αστικές περιοχές, οι διαδικασίες μετάδοσης θερμότητας, ο κύκλος του νερού και οι

κινήσεις του αέρα παρουσιάζονται σημαντικά διαφοροποιημένες σε σχέση με την ανοιχτή ύπαιθρο (Oke, 1995, σ. 272).

Η μελέτη του αστικού μικροκλίματος έχει πολύ μεγάλη σημασία για δύο βασικούς λόγους. Από τη μια μεριά, γιατί ο αριθμός των ανθρώπων που κατοικούν στις πόλεις αυξάνεται με ταχύτατους ρυθμούς. Από την άλλη μεριά, γιατί τα αστικά μικροκλίματα αντικατοπτρίζουν την επίδραση που έχει η ανάπτυξη των πόλεων στο κλίμα ευρύτερων περιοχών, αλλά ακόμα και στο κλίμα του πλανήτη (Oke, 1995, σ. 272).

Το αστικό μικροκλίμα αποτελεί μια ιδιαίτερη κατηγορία μικροκλίματος, καθώς οι συνθήκες που το προσδιορίζουν οφείλονται κυρίως στις επεμβάσεις και τις δραστηριότητες του ανθρώπου. Η μελέτη του γίνεται σε δύο επίπεδα, και αφορά τη μελέτη του κλίματος δύο οριακών στρωμάτων (*boundary layers*) –του αστικού οριακού στρώματος (urban boundary layer) και του στρώματος του αστικού θόλου (*urban canopy layer*)–, η σχηματική απεικόνιση των οποίων φαίνεται στην Εικόνα 2.8.



Εικόνα 2.8 *Σχηματική απεικόνιση του αστικού οριακού στρώματος και του στρώματος του αστικού θόλου. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με δεδομένα από Oke (1995, σ. 274).*

Το αστικό οριακό στρώμα (*urban boundary layer*) είναι το τμήμα του πλανητικού οριακού στρώματος (*planetary boundary layer*), το οποίο αναπτύσσεται πάνω από την επιφάνεια της πόλης και του οποίου το κλίμα διαφοροποιείται εξαιτίας της παρουσίας της (Oke, 1995, σ. 297). Το αστικό οριακό στρώμα αναπτύσσεται καθώς οι τοπικοί άνεμοι συναντούν το αστικό ανάγλυφο (Oke, 1995, σ. 273) (βλ. εικόνα 3.8), και έχει μεταβλητό πάχος, ανάλογα με την ώρα της ημέρας (Oke, 1995, σσ. 298-299). Το κλίμα του αστικού οριακού στρώματος αντικατοπτρίζει την επίδραση της πόλης στις υπαίθριες περιοχές που υπάρχουν γύρω από αυτή.

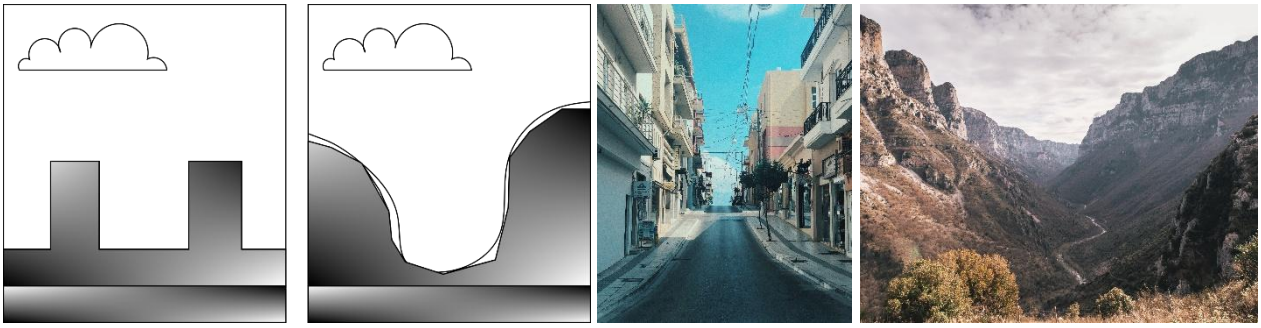
Το στρώμα του αστικού θόλου είναι το οριακό στρώμα που εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους έως το ύψος των δωμάτων της πόλης (*urban canopy*) (βλ. Εικόνα 2.8). Το κλίμα του συγκροτείται από πολλά διαφορετικά μικροκλίματα, καθένα από τα οποία καθορίζεται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του άμεσου περιβάλλοντός του (Oke, 1995, σ. 274). Τα χαρακτηριστικά του στρώματος του αστικού θόλου συγκροτούν τις μικροκλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην πόλη, επηρεάζοντας έτσι τις συνθήκες θερμικής άνεσης και την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και κλιματισμό.

Από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κλίματος του αστικού θόλου ξεχωρίζουν δύο φαινόμενα: το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (*urban heat island*) και το φαινόμενο της αστικής χαράδρας (*urban canyon*). Τα δύο αυτά φαινόμενα, όπως αναλύεται στη συνέχεια, συνδέονται μεταξύ τους, καθώς οι συνθήκες αερισμού, ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που επικρατούν στους αστικούς δρόμους (αστικές χαράδρες) επηρεάζουν καθοριστικά την ανάπτυξη του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας.

2.8.1 Το φαινόμενο της αστικής χαράδρας

Ορισμός και περιγραφή

Η διαφοροποίηση των συνθηκών του μικροκλίματος μέσα στους αστικούς δρόμους συνιστά το φαινόμενο της αστικής χαράδρας. Ο όρος αστική χαράδρα προκύπτει από την αναλογία που χαρακτηρίζει έναν αστικό δρόμο σε σχέση με μια φυσική χαράδρα (Σανταμούρης κ.ά., 2000, σ. 26) (βλ. Εικόνα 2.9) και χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη βασική μονάδα που διαμορφώνει το αστικό ανάγλυφο, δηλαδή τον δρόμο που ορίζεται από μέτωπα κτιρίων.

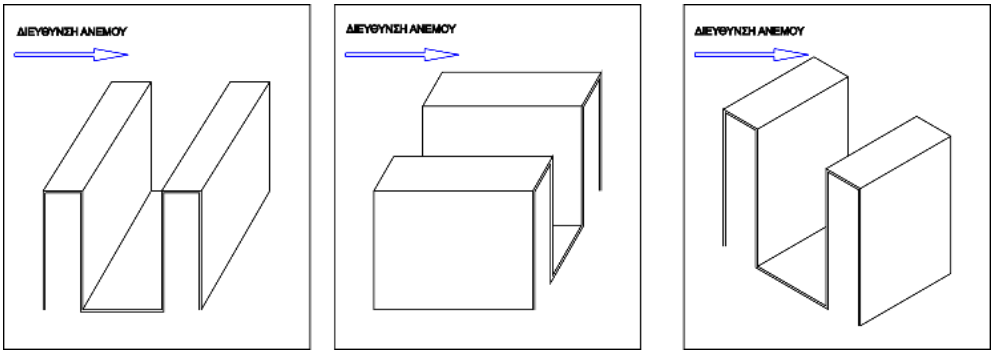


Εικόνα 2.9 *Αναλογία ανάμεσα σε αστικό δρόμο και φυσική χαράδρα. Πηγές: α., β. Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη), γ. Vikos, Greece, Photo by Pavel Nekoranec on Unsplash και δ. Crete, Greece, Photo by Christian Burri on Unsplash.*

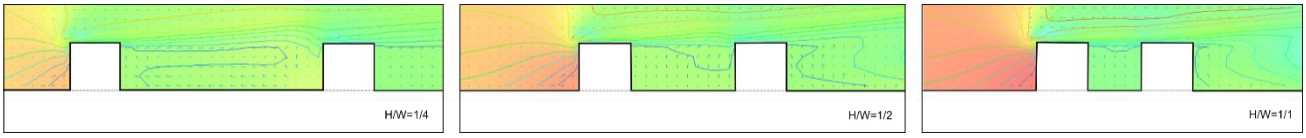
Η αστική χαράδρα περιγράφεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της, δηλαδή από τον λόγο του μέσου ύψους των κτιρίων προς το πλάτος του δρόμου (H/W, όπου H, το μέσο ύψος των κτιρίων και W, το πλάτος του δρόμου), την πυκνότητα των κτιριακών όγκων, καθώς και από το μήκος του δρόμου. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα υλικά της, σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό της και τη χωροθέτησή της ως προς τον άνεμο είναι οι τέσσερις βασικοί παράγοντες που διαμορφώνουν τις μικροκλιματικές συνθήκες που επικρατούν εκεί, επηρεάζοντας την κίνηση του ανέμου, τη διαστρωμάτωση των θερμοκρασιών του αέρα και τις διαδικασίες απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας και αποβολής θερμικής ακτινοβολίας (Μπουγιατιώτη, 2007).

Συνέπειες στην κίνηση του ανέμου

Σε μια πόλη, σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου υπάρχουν δρόμοι που είναι κάθετοι, άλλοι που είναι παράλληλοι και άλλοι που σχηματίζουν γωνία (Εικόνα 2.10), Τα χαρακτηριστικά της ροής του αέρα σε καθεμία από αυτές τις περιπτώσεις εξαρτώνται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αστικού δρόμου, δηλαδή τη σχέση H/W (Santamouris, 2001, σσ. 75-85) (Εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.10 *Χωροθέτηση αστικού δρόμου σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου, α. κάθετα, β. παράλληλα και γ. υπό γωνία. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*



Εικόνα 2.11 *Η ροή του ανέμου σε έναν δρόμο ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και προσομοίωση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη), με δεδομένα από Oke (1995), σ. 267.*

Όταν ένας αστικός δρόμος είναι κάθετος προς τη διεύθυνση του ανέμου, η ροή σε αυτόν είναι διαφορετική ανάλογα με τη σχέση του ύψους των κτιρίων και του πλάτους του δρόμου (Εικόνα 2.11). Όταν η απόσταση μεταξύ των κτιρίων είναι σχετικά μεγάλη (H/W < 0,4 για μεμονωμένα κτίρια κυβικού σχήματος και H/W < 0,3 για σειρές κτιρίων), η ροή του ανέμου στον δρόμο είναι ίδια με τη ροή που παρατηρείται σε μεμονωμένα κτίρια. (Oke, 1995, σσ. 264-266) Για μικρότερη απόσταση (0,4 < H/W < 0,7 για μεμονωμένα κτίρια κυβικού σχήματος και 0,3 < H/W < 0,65 για σειρές κτιρίων), η «σκιά» (*wake*) (υπήνεμη περιοχή) κάθε κτιρίου επεμβαίνει σε αυτή του επόμενου, δημιουργώντας μια περίπλοκη ροή. Τέλος, για αποστάσεις μικρότερες από αυτές που προαναφέρθηκαν (H/W > 0,7 για μεμονωμένα κτίρια κυβικού σχήματος και H/W > 0,65 για σειρές κτιρίων), ο αέρας διέρχεται πάνω από τα δώματα των κτιρίων και δεν εισέρχεται στον αστικό δρόμο. Αυτό δημιουργεί έναν στρόβιλο στην υπήνεμη πλευρά (*lee vortex*) του δρόμου, ο οποίος ενισχύεται από την εκτροπή του ανέμου προς τα κάτω, που προκαλείται από τις όψεις των κτιρίων στην προσήνεμη πλευρά του δρόμου (Oke, 1995, σσ. 266-267).

Όταν ένας αστικός δρόμος είναι παράλληλος προς τη διεύθυνση του ανέμου, δημιουργείται «φαινόμενο τούνελ» (*channeling*), το οποίο επιταχύνει τον άνεμο, με αποτέλεσμα η ταχύτητά του να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την ανοιχτή ύπαιθρο (Oke, 1995, σ. 267). Πέρα από την κυρίαρχη κίνηση του αέρα κατά μήκος της αστικής χαράδρας, μπορεί να παρατηρηθεί και μια ανοδική κίνηση στην άμεση περιοχή των όψεων των κτιρίων εξαιτίας φαινομένων τριβής που υπάρχουν εκεί (Santamouris ed., 2001, σ. 82).

Τέλος, *όταν ένας αστικός δρόμος σχηματίζει γωνία με τη διεύθυνση του ανέμου*, δημιουργείται στρόβιλος του οποίου η κίνηση έχει ελικοειδή μορφή και αναπτύσσεται κατά μήκος του άξονα του δρόμου (Oke, 1995, σ. 267).

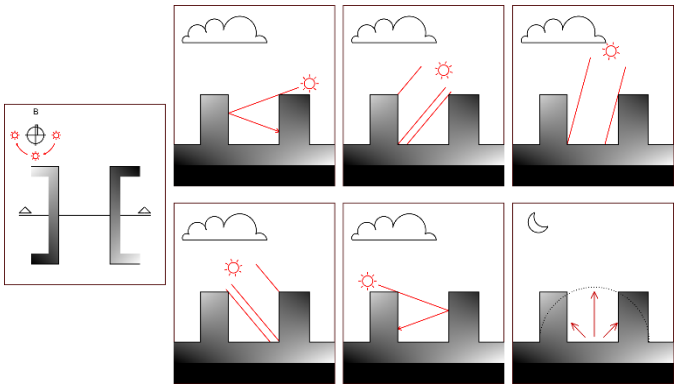
Οι συνέπειες που επιφέρει η μορφολογία των αστικών δρόμων, και κατ' επέκταση του αστικού ανάγλυφου στην κίνηση του αέρα, έχουν μεγάλη σημασία για τις συνθήκες που επικρατούν εκεί. Ο επαρκής αερισμός ενός δρόμου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες συμβάλλει στην απομάκρυνση του θερμού αέρα και ενισχύει την αίσθηση θερμικής άνεσης στο επίπεδο κυκλοφορίας των πεζών. Αντίστοιχα, σε όλη τη διάρκεια του χρόνου, η κυκλοφορία του αέρα στους αστικούς δρόμους έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση των αέριων ρύπων και των καυσαερίων των αυτοκινήτων από το επίπεδο της οδού.

Συνέπειες στη διαστρωμάτωση των θερμοκρασιών του αέρα

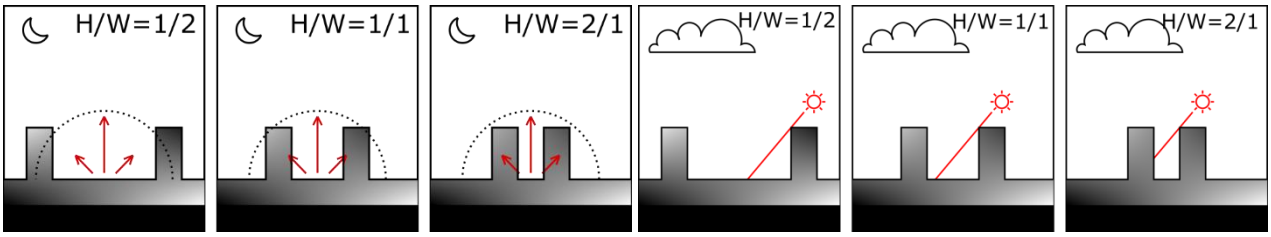
Μέσα σε μία αστική χαράδρα, υπάρχει διαφοροποίηση των θερμοκρασιών του αέρα σε σχέση με την ανοιχτή ύπαιθρο. Αυτή η διαφοροποίηση εξαρτάται καταρχήν από τον προσανατολισμό που επηρεάζει τις συνθήκες ηλιασμού και σκιασμού κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους, από τα υλικά που διαμορφώνουν τις όψεις των κτιρίων και την επιφάνεια του αστικού δρόμου, αλλά και από τις συνθήκες αερισμού. Από τη μια μεριά, αυτό συμβαίνει γιατί η συμπεριφορά των υλικών ως προς την ηλιακή και θερμική ακτινοβολία καθορίζει τις επιφανειακές τους θερμοκρασίες, και άρα τη θερμότητα που μεταδίδεται στον αέρα με μεταφορά. Από την άλλη μεριά, οι συνθήκες αερισμού (ταχύτητα, μορφή ροής κ.λπ.) επηρεάζουν τις διαδικασίες μετάδοσης θερμότητας με μεταφορά, αλλά και την κατανομή των θερμοκρασιών του αέρα στον χώρο. Η διαστρωμάτωση των θερμοκρασιών του αέρα σε μια αστική χαράδρα παρατηρείται καθ' ύψος και κατά πλάτος (Santamouris ed., 2001, σσ. 73-75).

Συνέπειες στην απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας και στην αποβολή θερμικής ακτινοβολίας

Οι διαδικασίες απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και της αποβολής θερμικής ακτινοβολίας μέσα σε μια αστική χαράδρα εξαρτώνται από τον προσανατολισμό της, από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της (λόγος H/W) και από τα υλικά που διαμορφώνουν τις επιφάνειές της (τις όψεις των κτιρίων και το έδαφος). Η επίδραση του προσανατολισμού γίνεται εύκολα κατανοητή μέσω της σχηματικής ανάλυσης των διαδικασιών απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας την ημέρα και απόρριψης της θερμότητας με ακτινοβολία τη νύχτα, σε μια αστική χαράδρα με λόγο ύψους προς πλάτος ίσο με 1, της οποίας ο κατά μήκος άξονας έχει διεύθυνση Βορρά-Νότου, όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12 *Οι διαδικασίες ανταλλαγής ηλιακής και θερμικής ακτινοβολίας σε μια αστική χαράδρα. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*



Εικόνα 2.13 *Διαφοροποίηση της μετάδοσης ακτινοβολίας σε σχέση με τον λόγο H/W. α. Εξερχόμενη θερμική ακτινοβολία. β. Εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι επιφάνειες των όψεων των κτιρίων και του δρόμου έχουν μειωμένη απώλεια θερμικής ακτινοβολίας προς τον ουρανό: τμήμα του ουρανού, ο οποίος αποτελεί στοιχείο συγκέντρωσης θερμότητας σε χαμηλή θερμοκρασία, αντικαθίσταται από τις επιφάνειες των κτιρίων, οι οποίες είναι σαφώς θερμότερες (Oke, 1995, σ. 286). Η ποσοτικοποίηση του τμήματος του ουρανού που «βλέπει» μια επιφάνεια εκφράζεται με τον συντελεστή θέασης του ουρανού (sky view factor, svf ή ψsky). Ο συντελεστής θέασης του ουρανού εκφράζει ουσιαστικά «τον λόγο του τμήματος του ουρανού που «βλέπει» ένα δεδομένο σημείο μιας επιφάνειας, προς το τμήμα του ουρανού που είναι διαθέσιμο, δηλαδή το ημισφαίριο του ουρανού» (Oke, 1995, σ. 405). Είναι προφανές ότι μια επιφάνεια στην ανοιχτή ύπαιθρο έχει ψsky = 1,0, ενώ αντίθετα, οποιαδήποτε επιφάνεια της οποίας περιοχές του ημισφαιρίου του ουρανού καταλαμβάνονται από άλλα αντικείμενα έχει ψsky < 1,0 (Oke, 1995, σ. 133). Για μια αστική χαράδρα, ο συντελεστής θέασης του ουρανού μπορεί να υπολογιστεί με βάση το πλάτος του δρόμου και το ύψος των κτιρίων (Εικόνα 2.13.α).

Το ισοζύγιο ηλιακής και θερμικής ακτινοβολίας μιας αστικής χαράδρας διαφέρει σημαντικά σε σχέση με τον προσανατολισμό. Έτσι, για παράδειγμα, όταν ο προσανατολισμός του κατά μήκος άξονα της αστικής χαράδρας έχει διεύθυνση Ανατολής-Δύσης, μόνο ο νότιος τοίχος και το έδαφος δέχονται άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Oke, 1995, σ. 286). Ο βόρειος τοίχος παραμένει στη σκιά σε όλη τη διάρκεια της ημέρας και

καθ’ όλη τη διάρκεια του χρόνου, και δέχεται μόνο ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από τον απέναντι νότιο τοίχο, ανάλογα με τα υλικά κατασκευής του.

Επίσης, η μείωση του λόγου H/W επιφέρει σημαντική μείωση στα ποσά της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχονται στην αστική χαράδρα, καθώς και στην εξερχόμενη θερμική ακτινοβολία. Η επίδραση αυτή γίνεται κατανοητή αν εξεταστεί σχηματικά η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται στις 21 Μαρτίου το μεσημέρι (γωνία ηλιακού ύψους ίση με περίπου 50 μοίρες, για 38^{o} βόρειο γεωγραφικό πλάτος), η νότια όψη υποθετικών αστικών χαραδρών με διαφορετικό λόγο H/W (βλ. Εικόνα 2.13.β).

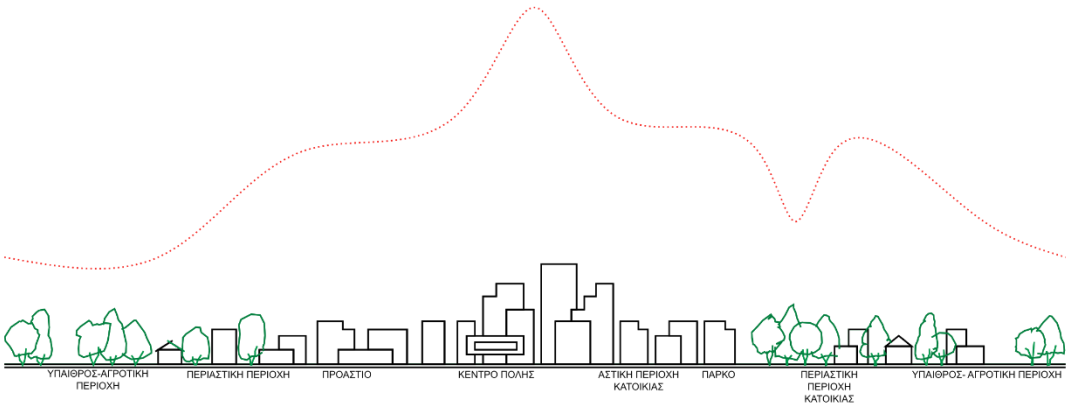
Καθοριστικό ρόλο στις διαδικασίες ανταλλαγής ηλιακής ακτινοβολίας και θερμικής ενέργειας, που λαμβάνουν χώρα σε μια αστική χαράδρα, παίζουν τα υλικά που διαμορφώνουν τις επιφάνειές της (Oke, 1995, σ. 288). Από τη μια μεριά, οι οπτικές ιδιότητες των υλικών (Κεφ. 5, παρ. 5.2) καθορίζουν τη συμπεριφορά τους ως προς τη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, δηλαδή το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που ανακλάται και απορροφάται από τις επιφάνειες, καθώς και το ποσοστό της θερμικής ενέργειας που εκπέμπεται από αυτές. Από την άλλη μεριά, οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών καθορίζουν τη συμπεριφορά τους κυρίως στη μετάδοση θερμότητας με αγωγή, δηλαδή τη δυνατότητά τους να αποθηκεύσουν θερμική ενέργεια, καθώς και την ταχύτητα της θερμικής φόρτισης και αποφόρτισής τους.

Τέλος, τις συνθήκες ανταλλαγής ενέργειας σε μια αστική χαράδρα επηρεάζουν και οι διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Η ύπαρξη αυξημένων ταχυτήτων ανέμου προκαλεί στροβιλισμό και αυξημένη μετάδοση θερμότητας με μεταφορά, γεγονός που εξαλείφει τις θερμοκρασιακές διαφορές μέσα στην αστική χαράδρα. Επίσης, σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού, μειώνονται οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών που οφείλονται στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και εξισώνονται οι απώλειες θερμικής ακτινοβολίας, γιατί διαφοροποιείται ο ρόλος του ουρανού ως στοιχείου συγκέντρωσης θερμότητας και, άρα, μειώνεται η σημασία του συντελεστή θέασης του ουρανού (Oke, 1995, σ. 288).

2.8.2 Αστική θερμική νησίδα

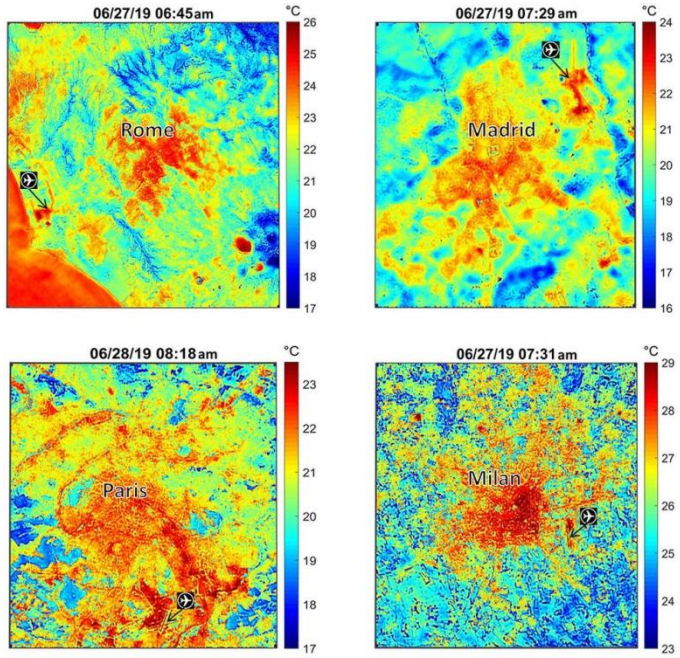
Ορισμός και περιγραφή

Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (*urban heat island*) αποτελεί κυρίαρχο χαρακτηριστικό των αστικών μικροκλιμάτων. Αφορά την ύπαρξη υψηλότερων θερμοκρασιών στα αστικά κέντρα σε σχέση με τις γύρω αγροτικές περιοχές (βλ. Εικόνα 2.14). Ο όρος αστική θερμική νησίδα προκύπτει από την αναλογία που υπάρχει ανάμεσα στη σχηματική απεικόνιση του φαινομένου και τη μορφή ενός νησιού (Oke, 1995, σ. 289).



Εικόνα 2.14 *Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη), με δεδομένα από Akbari et al. (1992), xvii.*

Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας είναι ήδη γνωστό από τον 19ο αιώνα και αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένων ερευνών (Barry & Chorley, 1998· Chandler, 1965· Landsberg, 1981· Lowry, 1967). Το 1818, ο Luke Howard δημοσίευσε τα αποτελέσματα μετρήσεων που ξεκίνησαν το 1806 σε διάφορες τοποθεσίες του Λονδίνου και οι οποίες αποδείκνυαν την ύπαρξη αστικού μικροκλίματος. (Howard, 1818 στο Markus & Morris, 1980, σ. 11). Το βασικό χαρακτηριστικό του φαινομένου είναι η έντασή του (urban heat island intensity), που ορίζεται ως η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του κέντρου της πόλης και της ανοιχτής υπαίθρου. Η ένταση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας έχει συσχετιστεί τόσο με τον πληθυσμό της πόλης όσο και με τη γεωμετρία των αστικών δρόμων στο κέντρο της πόλης (Oke, 1995).



Εικόνα 2.15 *Θερμογραφικές εικόνες τεσσάρων ευρωπαϊκών πόλεων κατά τις πρωινές ώρες στις 27 και 28 Ιουνίου 2019. πηγή: European Heat wave by NASA/JPL-Caltech, Public Domain.*

Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας παρουσιάζει κοινά χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά σε όλες σχεδόν τις πόλεις, με μικρές διαφοροποιήσεις εξαιτίας γεωγραφικών και κλιματικών στοιχείων (Εικόνα 2.15). Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ανοικτής υπαίθρου και του κέντρου της πόλης αρχίζει να παρατηρείται νωρίς το μεσημέρι, ενώ αποκτά τη μέγιστη τιμή της δύο ή τρεις ώρες μετά τη δύση του ήλιου, όταν τα υλικά που συνιστούν την επιδερμίδα της πόλης αρχίζουν να αποβάλλουν τη θερμότητα που αποθήκευσαν κατά τη διάρκεια της ημέρας (Akbari, 1992, σ. 9). Ο Landsberg (1981, σ. 5) αναφέρει χαρακτηριστικά την περιγραφή που έδωσε το 1820 ο Luke Howard, ο άνθρωπος που ανακάλυψε την αστική θερμική νησίδα της πόλης του Λονδίνου, που ήταν: «Η νύχτα είναι κατά 3,7 βαθμούς θερμότερη και η ημέρα κατά 0,34 βαθμούς δροσερότερη στην πόλη απ’ ό,τι στην ύπαιθρο».

Κυριότερα αίτια

Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας οφείλεται σε μια πληθώρα διαφορετικών παραγόντων που έχουν άμεση σχέση με τον σχεδιασμό και την κατασκευή των σύγχρονων πόλεων, καθώς και με τις διάφορες δραστηριότητες που αυτές ενσωματώνουν. Στη συνέχεια, γίνεται μια προσπάθεια να εξεταστούν οι παράγοντες αυτοί, όπως καταγράφονται από τον Oke (1995, σ. 294) και τον Σανταμούρη (2000, σ. 22), ξεκινώντας από την ευρύτερη κλίμακα της πόλης και καταλήγοντας στη μικρότερη κλίμακα των υλικών:

α. η αυξημένη επανεκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας από τον ουρανό,

β. η μειωμένη κυκλοφορία του αέρα στον αστικό ιστό,

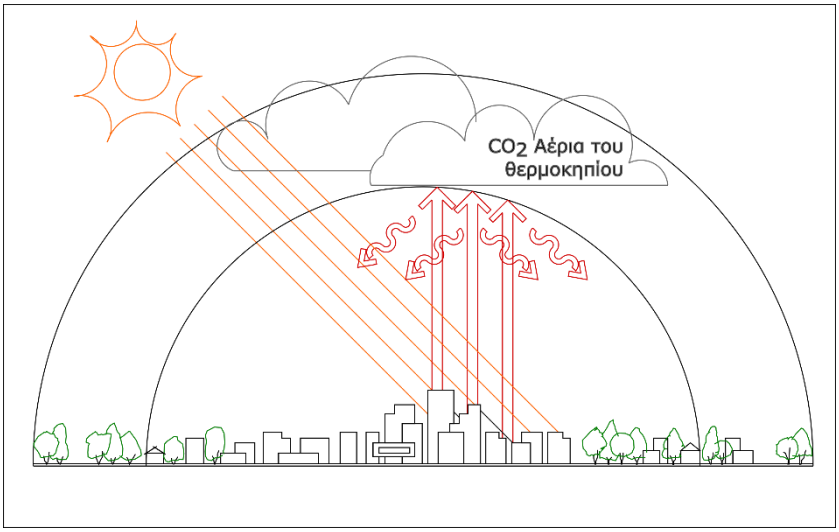
γ. η ανθρωπογενής θερμότητα,

δ. τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αστικών δρόμων,

ε. η μειωμένη εξάτμιση και διαπνοή,

ζ. τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις εξωτερικές επιφάνειες των κτιρίων και των υπαίθριων χώρων.

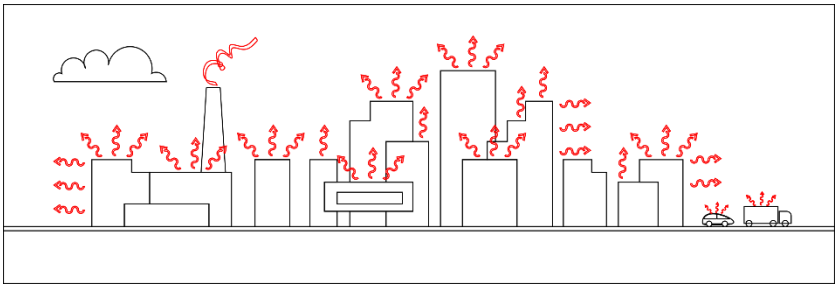
α. Η αυξημένη επανεκπομπή θερμικής ακτινοβολίας από τον ουρανό: Η ατμοσφαιρική ρύπανση που χαρακτηρίζει τις σύγχρονες πόλεις λειτουργεί αρνητικά, εμποδίζοντας τη διαφυγή της θερμικής ακτινοβολίας στο Διάστημα και εγκλωβίζοντάς τη στην πόλη (Εικόνα 2.16). Το γεγονός αυτό παρουσιάζει αναλογίες με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς η ατμοσφαιρική ρύπανση και κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα είναι αδιαπέραστα από τη θερμική ακτινοβολία (Lowry, 1956-1971, σσ. 180-188· και Σανταμούρης κ.ά., 2000, σ. 22).



Εικόνα 2.16 *Σχηματική απεικόνιση της επίδρασης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην όξυνση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας. Πηγή: Ιδία σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη), με δεδομένα από Γεωργιάδου (1996), σ. 37.*

β. Η μειωμένη κυκλοφορία αέρα στον αστικό ιστό: Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η γεωμετρία των αστικών δρόμων επηρεάζει τον τρόπο ροής του ανέμου σε αυτούς. Σε πολύ πυκνοδομημένες περιοχές, ο άνεμος δεν καταφέρνει να διέλθει μέσα στον αστικό ιστό. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι η ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο κυκλοφορίας μιας αστικής χαράδρας με διεύθυνση κάθετη σε εκείνη των επικρατούντων ανέμων είναι χαμηλότερη από 0,5 m/sec, ενώ την ίδια στιγμή στο επίπεδο των δωμάτων ξεπερνάει τα 4 m/sec. (Σανταμούρης, κ.ά., 2000, σ. 25) Κατά συνέπεια, μειώνονται οι δυνατότητες απαγωγής θερμότητας από τις κατακόρυφες επιφάνειες των κτιρίων και τις οριζόντιες επιφάνειες των επικαλύψεων των δρόμων και των πεζοδρομίων, μέσω του φαινομένου της μεταφοράς (Σανταμούρης κ.ά., 2000, σ. 22).

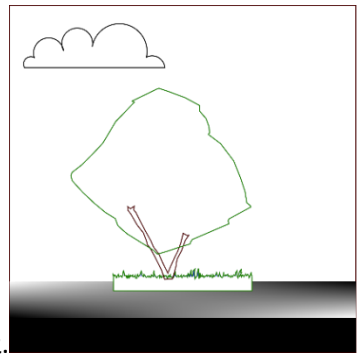
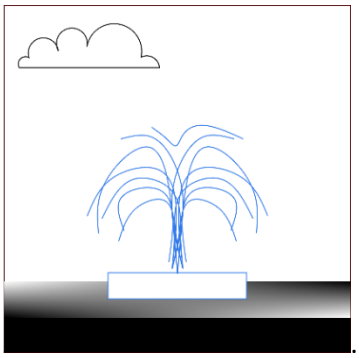
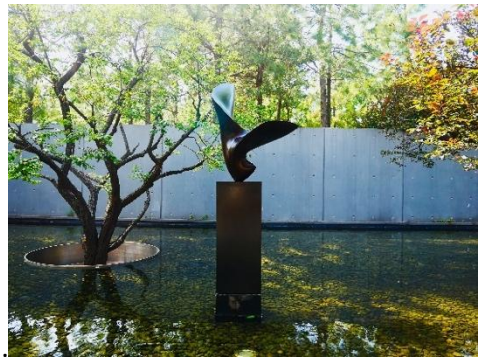
γ. Η ανθρωπογενής θερμότητα: Η ανθρωπογενής θερμότητα είναι η θερμότητα που εκλύεται από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως οι μεταφορές, η βιομηχανία και η παραγωγή ενέργειας (Santamouris, 2001, σσ. 41-42) (Εικόνα 2.17). Τα κτίρια συμβάλλουν στην αύξηση της ανθρωπογενούς θερμότητας με διαφορετικό τρόπο, ανάλογα με τις εποχές του χρόνου. Έτσι, κατά τη χειμερινή περίοδο, όταν οι θερμοκρασίες του αέρα είναι πολύ χαμηλές, οι θερμικές απώλειες από το κέλυφος των κτιρίων, καθώς και η θερμότητα που προέρχεται από τα (κεντρικά) συστήματα θέρμανσης αυξάνουν τη συμβολή της ανθρωπογενούς θερμότητας στο φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Αντίθετα, κατά την καλοκαιρινή περίοδο, η ανθρωπογενής θερμότητα που οφείλεται στα κτίρια αφορά κυρίως την εκτεταμένη λειτουργία συστημάτων κλιματισμού (Landsberg, 1981, σ. 120).



Εικόνα 2.17 *Αναπαράσταση της ανθρωπογενούς θερμότητας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με δεδομένα από Zold (Ed.) (2001).*

δ. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αστικών δρόμων: Όπως αναλύθηκε με λεπτομέρεια νωρίτερα (παρ. 2.8.1), η γεωμετρία των αστικών δρόμων καθορίζει τόσο την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας όσο και την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας (Εικόνα 2.13). Στα κέντρα των πόλεων, το ύψος των κτιρίων και το πλάτος των δρόμων είναι τέτοια, ώστε η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται κατά τη διάρκεια της ημέρας να απορροφάται κατά ένα μεγάλο ποσοστό, λόγω διαδοχικών ανακλάσεων. Αντίστοιχα, η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια της νύχτας δεν έχει τη δυνατότητα να διαφύγει άμεσα στην ατμόσφαιρα. Έτσι, έπειτα από διαδοχικές ανακλάσεις καταλήγει να απορροφάται κατά το μεγαλύτερο μέρος της από τις όψεις των κτιρίων, αυξάνοντας τις επιφανειακές θερμοκρασίες τους (Oke, 1995, σ. 294).

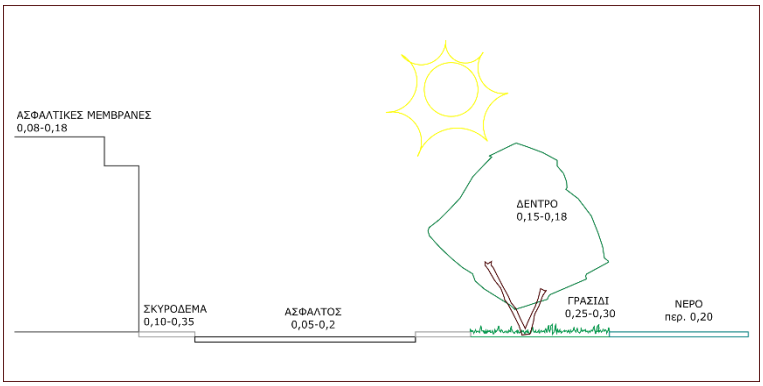
ε. Η μειωμένη εξάτμιση και διαπνοή: Η συνεχής μείωση των επιφανειών νερού και πράσινου στα κέντρα των σύγχρονων πόλεων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των δυνατοτήτων δροσισμού μέσω των φαινομένων της εξάτμισης και της διαπνοής, αντίστοιχα (Εικόνα 2.18). Συγχρόνως, όμως, η μείωση της εξάτμισης οφείλεται και στην αδυναμία απορρόφησης του νερού της βροχής από τις αστικές επιφάνειες, οι οποίες δεν είναι υδατοπερατές (Taha, 1997, σ. 101· και Minke, 1986, σ. 16) Η εξάτμιση του νερού συμβάλλει στη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα, καθώς για να πραγματοποιηθεί απορροφώνται σημαντικά ποσά θερμότητας από το περιβάλλον. Στις επιφάνειες νερού, η εξάτμιση πραγματοποιείται άμεσα, ενώ στη βλάστηση εξατμίζεται το νερό που εκλύεται από τα στόματα των φύλλων με τη λειτουργία της διαπνοής (Σανταμούρης κ.ά., 2000, σ. 22).

α.   β. 

Εικόνα 2.18 *α. Εξάτμιση νερού και διαπνοή των φύλλων. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη). β. Στοιχεία βλάστησης και νερού. Πηγή: Confluence Antoine Poncet France 1991, Photo by Emmanuel Appiah on Unsplash..*

ζ. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις εξωτερικές επιφάνειες των κτιρίων και των υπαίθριων χώρων εξετάζονται ως προς δύο παραμέτρους: το χρώμα και τη θερμοχωρητικότητά τους. Το χρώμα, και κατ' επέκταση ο συντελεστής ανακλαστικότητας των εξωτερικών επιφανειών των κτιρίων και των υπαίθριων χώρων μιας πόλης, καθορίζει την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας και τις επιφανειακές θερμοκρασίες· αυτές, με τη σειρά τους, επιδρούν στις θερμοκρασίες του αέρα που σημειώνονται κατά τη διάρκεια της περιόδου δροσισμού. Τα υλικά με μεγάλη θερμοχωρητικότητα αποθηκεύουν και διατηρούν τη θερμότητα στη μάζα τους για μεγάλο χρονικό διάστημα και την αποβάλλουν πολύ αργά. Τα υλικά που διαμορφώνουν την «επιδερμίδα» των σύγχρονων πόλεων είναι συχνά σκουρόχρωμα (Εικόνα 2.19) και χαρακτηρίζονται από μεγάλη θερμοχωρητικότητα. Το σκούρο χρώμα συνεπάγεται μεγάλη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας,

ενώ η αυξημένη θερμοχωρητικότητα έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών στη μάζα των υλικών για μεγάλα χρονικά διαστήματα. (Σανταμούρης κ.ά., 2000, σσ. 21-22) Έτσι, όπως είναι κατανοητό, τα υλικά που διαμορφώνουν τις αστικές επιφάνειες έχουν σημαντική επίδραση στις θερμοκρασίες του αέρα, ιδιαίτερα στο στρώμα του αστικού θόλου κατά το καλοκαίρι (Stathopoulou et al., 2006, σσ. 414-422).



Εικόνα 2.19 *Τιμές ανακλαστικότητας για τυπικά υλικά. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με δεδομένα από Akbari et al. (1992), σ. 45.*

Η σχέση των υλικών που διαμορφώνουν τις αστικές επιφάνειες και του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας γίνεται σαφής από προσομοιώσεις σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για μια τυπική βορειο-αμερικανική πόλη. Σύμφωνα με αυτούς τους υπολογισμούς, η αύξηση της ανακλαστικότητας της πόλης κατά 0,15 μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία του αέρα κατά 2,78°C. Η μείωση αυτή της θερμοκρασίας του αέρα μπορεί με τη σειρά της να επιφέρει μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη κατά περίπου 40% (Akbari et al., 1992, σ. 48).

Συνέπειες

Πρέπει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας δεν αποτελεί ένα κατεξοχήν αρνητικό φαινόμενο για όλες τις περιοχές της Γης. Σε χώρες με ψυχρό κλίμα, η αύξηση της θερμοκρασίας στις πόλεις εξαιτίας του φαινομένου αυτού συμβάλλει στη μείωση των θερμικών απωλειών και κατά συνέπεια σε μικρότερη κατανάλωση συμβατικής ενέργειας για τη θέρμανση των κτιρίων (Akbari et al., 1992, σ. 16· Γιάννας, 2001, σ. 184· Landsberg, 1981, σ. 118· Markus, Morris, 1980, σ. 215).

Το θετικό αυτό στοιχείο αναιρείται κατά πολύ από τις αρνητικές συνέπειες που έχει το φαινόμενο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Landsberg, 1981, σ. 118). Ιδιαίτερα, σε περιοχές με θερμό ή μεσογειακό κλίμα, η αύξηση της θερμοκρασίας, που παρατηρείται στις πόλεις κατά τις ενδιάμεσες εποχές και κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, προεκτείνει την περίοδο δροσισμού με αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας και παράλληλες αρνητικές συνέπειες τόσο για το περιβάλλον όσο και για τους ανθρώπους:

- Συνέπειες για το εσωτερικό των κτιρίων: αύξηση αναγκών δροσισμού, αύξηση εγκατάστασης κλιματιστικών μηχανημάτων.
- Συνέπειες για την υγεία των ανθρώπων: αύξηση θανάτων από θερμοπληξία και αναπνευστικά προβλήματα (Landsberg, 1981, σσ. 243-246).
- Συνέπειες για τη θερμική άνεση των ανθρώπων: θερμική δυσφορία στους υπαίθριους χώρους των πόλεων, με δευτερογενείς συνέπειες για τις πόλεις, καθώς δεν ευνοείται η χρήση φιλικών προς το περιβάλλον μέσων μετακίνησης, όπως το περπάτημα και το ποδήλατο.
- Συνέπειες για την οικονομία και το περιβάλλον: η αύξηση της λειτουργίας κλιματιστικών μηχανημάτων αυξάνει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής, και κατά συνέπεια απαιτεί την κατασκευή νέων σταθμών παραγωγής ενέργειας (Akbari et al., 1992, σσ. 16-21· Γιάννας, 2001, σ. 184).
- Συνέπειες για την ατμοσφαιρική ρύπανση: το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας επηρεάζει τη συγκέντρωση και διανομή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης άμεσα και έμμεσα. Η άμεση επίδραση οφείλεται στο ότι η θερμότητα επιταχύνει τις χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα που οδηγούν

σε υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος στη τροπόσφαιρα. Ωστόσο, η επίδραση του φαινομένου στην ανάπτυξη του φωτοχημικού νέφους δεν είναι ιδιαίτερα ξεκάθαρη. Οι Rosenfeld et al. (1995, σ. 256) αναφέρουν ότι, επειδή το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας αυξάνει το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος εξαιτίας της φυσικής μεταφοράς και της τύρβωσης, μειώνονται οι συγκεντρώσεις του τροποσφαιρικού όζοντος, αφού οι αέριοι ρύποι κατανέμονται σε μεγαλύτερο όγκο αέρα. Η έμμεση επίδραση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας στην αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αναφέρεται στην αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για κλιματισμό, η οποία αυξάνει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και άρα τους ρύπους που παράγονται από αυτήν (Akbari et al., 1992, σσ. 21-22) όταν προέρχεται από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

2.9 Ανάλυση κλιματικών δεδομένων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ανάγνωση των κλιματικών στοιχείων και παραμέτρων στην περιοχή μελέτης αποτελεί αφετηρία για τον σχεδιασμού. Τα κλιματικά και μικροκλιματικά χαρακτηριστικά προκύπτουν από τη συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων της ευρύτερης περιοχής και στη συνέχεια με την καταγραφή και μελέτη των χαρακτηριστικών, φυσικών και ανθρωπογενών (γεωμετρία φυσικού και δομημένου περιβάλλοντος, στοιχεία πρασίνου ή νερού, αστική πυκνότητα) που διαμορφώνουν τις μικροκλιματικές συνθήκες στον συγκεκριμένο χώρο. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης αξιολογούνται για τον καθορισμό των κρίσιμων περιόδων σχεδιασμού και ακολούθως των στρατηγικών που θα συμβάλουν στη βέλτιστη βιοκλιματική συμπεριφορά του υπό μελέτη κτιρίου και τη βέλτιστη ενεργειακή του απόδοση, το δομικό του σύστημα και τα υλικά κατασκευής. Τα στοιχεία αυτά καταγράφονται με ειδικό τρόπο σε χάρτες, πίνακες ή γραφήματα, ώστε η πληροφορία να μεταφέρεται όσο το δυνατόν πιο παραστατικά, αλλά και σε ψηφιακά αρχεία κλιματικών δεδομένων.

Τα κλιματικά δεδομένα συλλέγονται από διάφορες διαδικτυακές πηγές, στις οποίες διατίθενται με διαφορετική ανάλυση (resolution). Έτσι, υπάρχουν:

- Μέσες μηνιαίες τιμές, οι οποίες διατίθενται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία ή άλλα μετεωρολογικά δίκτυα (π.χ. Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθήνας), αλλά και πολλούς άλλους ιστότοπους.
- Ωριαία δεδομένα, τα οποία περιλαμβάνονται σε αρχεία κλιματικών δεδομένων με διάφορες μορφές (π.χ. epw, Energy Plus Weather Format) και διατίθενται σε ιστότοπους, για παράδειγμα το Energy Plus Weather, Climate.OneBuilding.org κ.ά.

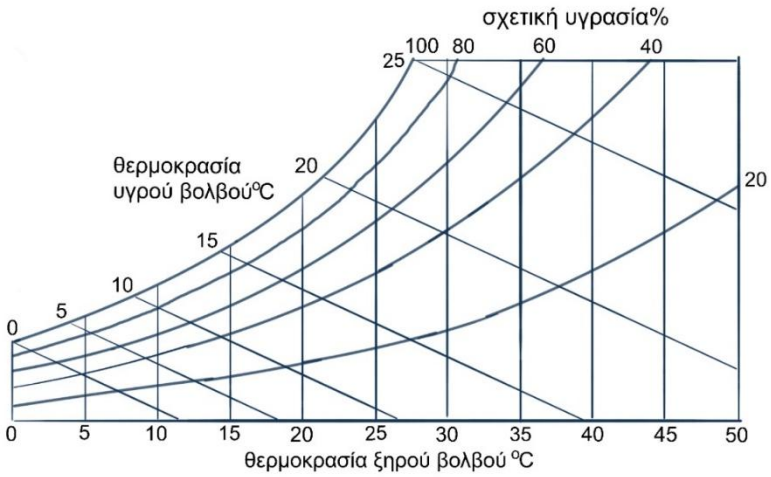
Ακόμα, μία σειρά από ψηφιακά προγράμματα προσομοίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτιρίου (Energy Modelling) περιέχει ή εισάγει αρχεία κλιματικών δεδομένων για τη δημιουργία των κατάλληλων διαγραμμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των κλιματικών χαρακτηριστικών και την προσομοίωση της συμπεριφοράς του κτιρίου όλο τον χρόνο.

Τα βασικά/απαραίτητα κλιματικά δεδομένα είναι:

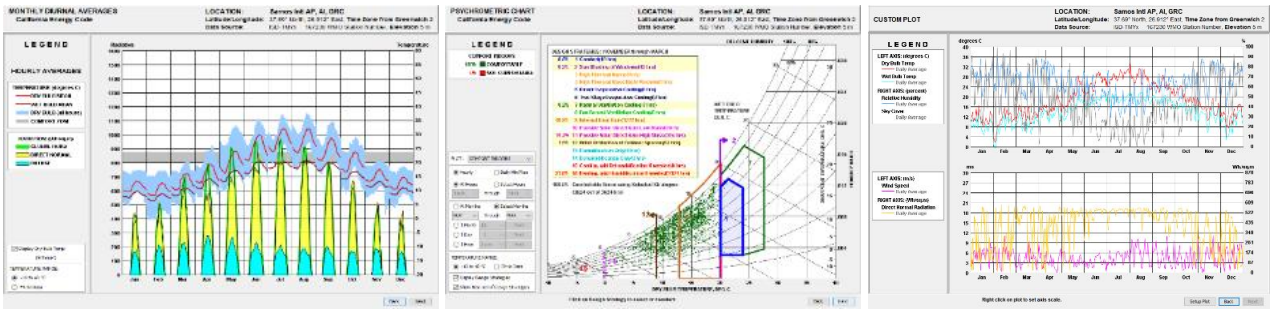
- οι μηνιαίες θερμοκρασίες του αέρα (με μέσες και ακρότατες τιμές),
- η ημερήσια θερμοκρασιακή μεταβολή (κυρίως για τη θερμή περίοδο),
- οι τιμές σχετικής υγρασίας,
- η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και οι ώρες ηλιοφάνειας,
- η νεφοκάλυψη,
- τα ροδογράμματα που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του ανέμου (ταχύτητα, διεύθυνση, κ.λπ.).

Κατά περίπτωση και ανάλογα με τον τόπο μελέτης και τη φύση του κτιρίου, μπορεί να κριθεί απαραίτητη η αξιολόγηση και άλλων στοιχείων, όπως η θερμοκρασία του εδάφους κ.ά. Επιπλέον, για κάποιες ακόμη εφαρμογές μπορεί οι ακραίες τιμές των διαφόρων κλιματικών παραμέτρων και η συχνότητά τους να είναι πιο σημαντικές από τις μέσες τιμές (Givoni, 1969). Η αξιολόγηση των παραπάνω δεδομένων γίνεται με τη βοήθεια διαγραμμάτων, στα οποία είναι εύκολο να εντοπίσει κανείς τις ημερήσιες μεταβολές στις διάφορες εποχές και τις μέσες ετήσιες αλληλεπιδράσεις των κλιματικών στοιχείων.

Η ανάλυση ολοκληρώνεται με τα ψυχρομετρικά διαγράμματα στα οποία αξιολογούνται η θερμοκρασία ξηρού και υγρού βολβού και η σχετική υγρασία για την υπόδειξη του εύρους θερμικής άνεσης σε κάθε εποχική και χρονική περίοδο και για τη διεύρυνση αυτής με την εφαρμογή παθητικών και ενεργητικών στρατηγικών που υποδεικνύονται. Το ψυχρομετρικό διάγραμμα είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιούν κυρίως οι μηχανικοί κλιματισμού και καθορίζει με παραστατικό τρόπο τη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και υγρασίας στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 2.20). Κάθε σημείο του αντιστοιχεί στον συνδυασμό μιας τιμής θερμοκρασίας και μιας τιμής σχετικής υγρασίας για μια συγκεκριμένη ώρα. Περιοχές στο διάγραμμα ορίζουν σύνολα τιμών, που μπορεί να περιγράφουν τις περιοχές τιμών θερμικής άνεσης, αλλά και το κλίμα μιας περιοχής (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 46).



Εικόνα 2.20 *Ψυχρομετρικό διάγραμμα. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και απόδοση (Ε. Αλεξάνδρου) από Psychrometric chart Engineering Thermodynamics by Norman Weiner at English Wikibooks via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0*



Εικόνα 2.21 *Κλιματικά δεδομένα από τον Μετεωρολογικό Σταθμό της Σάμου με τη χρήση του ανοικτού λογισμικού Climate Consultant (v.6.0), UCLA Energy Design Tools Group, © Regents University.*

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει μια σειρά από ζητήματα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση και την αξιολόγηση κλιματικών δεδομένων για μια συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, τα οποία αφορούν κυρίως την τοποθεσία του μετεωρολογικού σταθμού, μέσα στην πόλη ή στη μητροπολιτική περιοχή ή στο αεροδρόμιο (Bougiatioti et al., 2023). Τα αεροδρόμια χωροθετούνται συνήθως σε απόσταση από τα κέντρα των πόλεων, σε επίπεδες ανοιχτές περιοχές, χωρίς ή με περιορισμένη επιφανειακή βλάστηση, εκτεταμένη κάλυψη από τεχνητά υλικά (σκυρόδεμα ή/και ασφαλτικό σκυρόδεμα) και περιορισμένο αριθμό

κτιρίων εγκαταστάσεων (Gough & Leung, 2022). Κατά συνέπεια, κάποια μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τη διαμόρφωση του εδάφους και την τοπογραφία, όπως η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, μπορεί να διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με το κέντρο της πόλης. Οι Gough & Leung (2022) αναφέρονται σε έναν ιδιαίτερο τύπο μικροκλίματος που διαμορφώνουν τα αεροδρόμια, το οποίο αποκαλούν «κλίμα αεροδρομίου» (*airport climate*), και υποστηρίζουν ότι πρόκειται για ένα περιαστικό κλίμα (*peri-urban*) (Gough, 2020), το οποίο διαφοροποιείται από το άμεσο περιβάλλον τους, που μπορεί κατά περίπτωση να είναι πεδινό, παραθαλάσσιο ή και ορεινό.

Προκαταρτικές, ποιοτικές συγκρίσεις μετεωρολογικών δεδομένων από σταθμούς σε πόλεις και αεροδρόμια στην Ελλάδα δείχνουν ότι σε σύγκριση με τους αστικούς σταθμούς, τα αεροδρόμια έχουν (Bougiatioti et al., 2023):

- σχετικά υψηλότερες μέγιστες και χαμηλότερες ελάχιστες θερμοκρασίες αέρα, με ένα μεγαλύτερο εποχιακό εύρος,
- σημαντικά χαμηλότερες τιμές σχετικής υγρασίας τα μεσημέρια της θερμής, θερινής περιόδου,
- σχετικά υψηλότερες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και φυσικού φωτισμού,
- επικρατούντες ανέμους με σαφέστερη διεύθυνση, υψηλότερες ταχύτητες και συχνότητα.

Ως προς την περιοχή μελέτης, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα, αυτά καλό είναι να αντλούνται από κοντινούς σταθμούς και να λαμβάνονται υπόψη οι ομοιότητες στη γεωμορφολογία και την τοπογραφία. Έτσι, για παράδειγμα, στη μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας υπάρχουν μετεωρολογικοί σταθμοί που χωροθετούνται κοντά στα παράλια και επηρεάζονται από την παρουσία της θάλασσας, άλλοι στο κέντρο της πόλης που επηρεάζονται από το αστικό μικροκλίμα και την αστική θερμική νησίδα και άλλοι που χωροθετούνται πιο βόρεια και εμφανίζουν πιο «ηπειρωτικά» χαρακτηριστικά. Έτσι, πολλές φορές μπορεί να χρειάζεται να συγκριθούν οι διεποχικές διαφοροποιήσεις των βασικών μετεωρολογικών δεδομένων, έτσι ώστε να αποφασιστεί το αρχείο που θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του κλίματος και των βασικών στρατηγικών βιοκλιματικού σχεδιασμού (Bougiatioti et al., 2023).

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Akbari, H. et al. (Eds) (1992). *Cooling Our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing*. U.S. Environmental Protection Agency.

Barry, R. G. & Chorley, R. J. (1998). *Atmosphere, Weather & Climate*. London: Routledge.

Beck, H., Zimmermann, N., McVicar, T., Vergopolan, N., Alexis Berg, A. & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, *5*, 180214. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214

Bougiatioti, F., Alexandrou, E. & Kotsenos, A. (2023). Study and analysis of the climate in Greek cities with the aid of climatic data: Climate analysis as a design tool in undergraduate students' projects. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1196 012082. DOI 10.1088/1755-1315/1196/1/012082

CantyMedia. Weatherbase. http://www.weatherbase.com

Chandler, T.J. (1965). *The Climate of London*. Hutchinson.

Climate.OneBuilding. https://climate.onebuilding.org

ClimaTemps.com. http://www.climatemps.com

EnergyPlus. Weather data. https://energyplus.net/weather

Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture*. Amsterdam, London, Elsevier Publishing Company Ltd.

Givoni, B. (1998). *Climate considerations in Building and Urban Design*. John Wiley & Sons, Inc.

Gough, W. A. (2020). Thermal Signatures of Peri-Urban Landscapes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *59*(9), 1443-1452. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0292.1

Gough, W. A. & Leung, A. C. W. (2022). Do Airports Have Their Own Climate? *Meteorology*, *1*(2), 171-182. http://dx.doi.org/10.3390/meteorology1020012

Goulding J. R., Lewis J. O. & Steemers T. C. (1994). *Ενεργειακός Σχεδιασμός. Εισαγωγή για Αρχιτέκτονες*. Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy Conscious Design-A Primer for Architects].

Goulding, J. R., Lewis, J. O. & Steemers, T.C. (1996). *Ενέργεια στην Αρχιτεκτονική. Το Ευρωπαϊκό Εγχειρίδιο για τα Παθητικά Ηλιακά Κτίρια*. Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook].

Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T. & Zeumer, M. (2012). *Energy Manual: Sustainable Architecture*. Birkhäuser. https://doi.org/10.11129/detail.9783034614542

Howard, L. (1818). *The Climate of London*. Vol. I. W. Phillips αναφορά στο Markus, T.A. & Morris, E.N. (1980). *Buildings, Climate and Energy*. Pitman Publishing Ltd. σ. 11).

Köppen climate classification (2021, October 8). In: *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%B6ppen_climate_classification

Krautheim, M., Pasel, R., Pfeiffer, S. & Schultz-Granberg, J. (2014). *City and Wind – Climate as an Architectural Instrument*. A Dom Publishers

Ladybug Tools. Weather file sources. https://www.ladybug.tools/epwmap/

Landsberg, H. E. (1981). *The Urban Climate*. Academic Press.

Lowry, W. P. (1971). The climate of cities. In: AA. VV., *Readings from the Scientific American. Man and the Ecosphere* (pp. 180-188). W. H. Freeman & Co.

Marsh, A. J. (2021). *Data View 2D* [Online software]. http://andrewmarsh.com/software/data-view2d-web/

Marsh, A. J. (2021). *Psychrometric Chat* [Online software]. http://andrewmarsh.com/software/psychro-chart-web/

Meletiou-Christou, MS., Rhizopoulou, S. (2017) Leaf functional traits of four evergreen species growing in Mediterranean environmental conditions. *Acta Physiologiae Plantarum,* 39, 34. https://doi.org/10.1007/s11738-016-2330-4

Meteoblue. Weather close to you. https://www.meteoblue.com

Meteotest (2010). Meteonorm. (Version 6.0) [Computer software]. https://meteonorm.com/en/

Minke, G. (1986). Ecological architecture: A demand. In A. Zold (Ed.). *PLEA '86. International Conference on Passive and Low Energy Architecture in Housing. Pecs, Hungary, September 1-5 1986* (vol. II. pp. I1-I15). Hungarian Ministry of Industry.

Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. Routledge – Taylor & Francis Group.

Quote Investigator. Tracing quotations (2012, June 24). The Climate Is What You Expect; The Weather Is What You Get. https://quoteinvestigator.com/2012/06/24/climate-vs-weather/

Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B. L., Kurn, D. M., Sailor, D. & Taha, H. (1995). Mitigation of heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, *22*(9), 255-265. https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00927-P

Santamouris, M. (2001). The canyon effect. In M. Santamouris (Ed.). *Energy and Climate in the Urban Built Environment* (pp. 69-96). London: James and James Science Publishers Ltd.

Santamouris, M. (Ed.) (2001). *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. London: James and James Science Publishers Ltd.

Stathopoulou, M., Cartalis, C. & Chrysoulakis N. (2006). Using midday surface temperature to estimate cooling degree-days from NOAA-AVHRR thermal infrared data: An application for Athens, Greece. *Solar Energy*, *80*, 414-422. https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.02.004

Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, *25*(2), 99-103. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00999-1

UCLA Energy Design Tools Group (2020). *Climate Consultant* (Version 6.0) [Computer software]. https://www.sbse.org/resources/climate-consultant

U.S. Environmental Protection Agency (2008). Urban Heat Island Basics. In: *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Draft.* https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium

Whiston Spirn, A. (1984). *The granite garden - urban nature and human design.* Basic Books.

Xerophyte (2023, November 24). In: *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Xerophyte

Yahoo! Weather. http://weather.yahoo.com

Zold A. (Ed.) (2001). ECOBUILD. Environmentally friendly construction and building, version 1.0. [CD-ROM]

Γιάννας, Σ. (2001). Βιοκλιματικές αρχές πολεοδομικού σχεδιασμού. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Ανοικτών Χώρων*. *Τόμος Α. Περιβαλλοντική Τεχνολογία* (σσ. 175-234). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) (2017-2021). *Κλιματολογία. Το κλίμα της Ελλάδας*. http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology/climatology_html

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (χ.ε.). *Κλιματικά δεδομένα. Κλιματικά δελτία*. https://www.meteo.gr/climatic.cfm

Ευαγγελινός, Ε. & Ζαχαρόπουλος, Η. (2001). Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου* (σσ. 21-154). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Πέννας, Π. (2005). Γενική Κλιματολογία. Γενικά-Ορισμοί. Α.Π.Θ. Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. http://www.geo.auth.gr/courses/gmc/1000/orismoi.html

Σανταμούρης, Μ. κ.ά. (2000). *Οικολογική Δόμηση*. Αθήνα: Ελληνικά Γράμματα, Διεπιστημονικό Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Ερευνών, ΥΠΕΧΩΔΕ Δ/νση Οικιστικής Πολιτικής και Κατοικίας.

Στάθης, Δ. (2015). *Μαθήματα δασικής μετεωρολογίας και κλιματολογίας* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-562 Φείδας, Φ., Καρακώστας, Θ. & Μαυρομάτης, Θ. (2008). Η μεταβολή των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων με το ύψος. ΑΠΘ Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. http://www.geo.auth.gr/courses/gmc/gmc318y/th/math2.html

Χαλούτση, Μ. (2023). *Κλίμα και βιοκλιματικός σχεδιασμός: θερμική άνεση και στρατηγικές βιοκλιματικού σχεδιασμού στους διαφορετικούς κλιματικούς τύπους Köppen-Geiger* [Ερευνητική Εργασία – Διάλεξη 9ου εξαμήνου]. Αθήνα: Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.25069

Κεφάλαιο 3

Ήλιος, φως και άνεμος

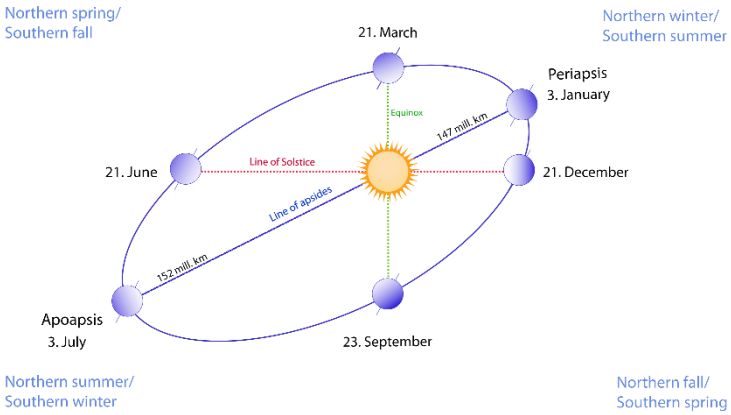
Σύνοψη
Ο ήλιος αποτελεί σημαντική, αν όχι τη σημαντικότερη, παράμετρο του κλίματος ως προς τον βιοκλιματικό σχεδιασμό. Σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφονται τα ζητήματα της ηλιακής γεωμετρίας και της ηλιακής προσόδου και συσχετίζονται με τη συλλογή και την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας ως βασικές στρατηγικές του βιοκλιματικού σχεδιασμού. Άμεση συσχέτιση με τον ήλιο έχει και το φως ως παράμετρος σχεδιασμού. Ως εκ τούτου, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και η φυσική του φωτός και τα βασικά φωτογραμμετρικά μεγέθη. Τέλος, σημαντική παράμετρος για τον βιοκλιματικό σχεδιασμό είναι και ο άνεμος, αφού επηρεάζει τις συνθήκες που επικρατούν τόσο στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων όσο και στους υπαίθριους χώρους της πόλης.

Προαπαιτούμενη γνώση
Για το κεφάλαιο αυτό, χρειάζονται βασικές γνώσεις Φυσικής. Επιπλέον πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν σε ηλεκτρονικά συγγράμματα του Κάλλιπου, όπως (Στάθης, 2015), ενώ το ζήτημα του φυσικού φωτισμού αναλύεται με πληρότητα στο σύγγραμμα του Κάλλιπου, Τσαγκρασούλης (2015), Φυσικός Φωτισμός.

3.1 Ήλιος

3.1.1 Χαρακτηριστικά

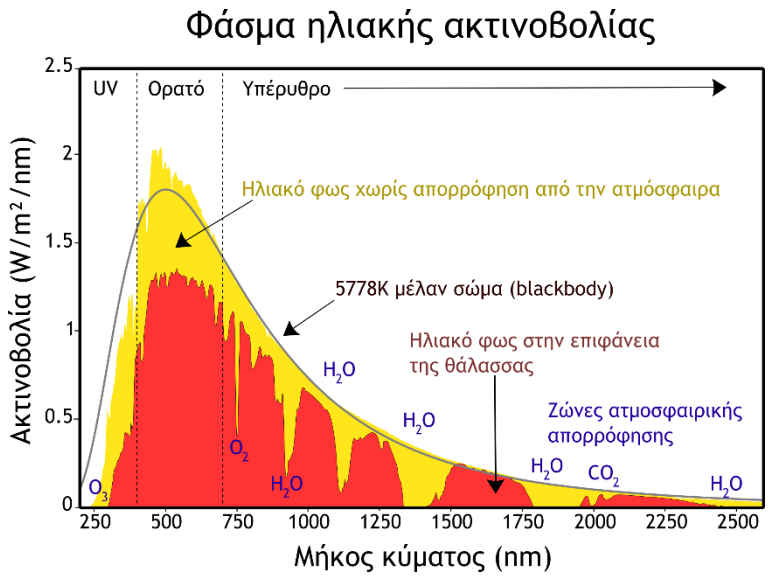
Η Γη κινείται γύρω από τον Ήλιο σε ελλειπτική τροχιά, με απόσταση 182 εκατομμύρια χιλιόμετρα στο αφήλιο και 147 εκατομμύρια χιλιόμετρα στο περιήλιο (Εικόνα 3.1). Η κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο γίνεται με μια σταθερή κλίση 23,8° (ακριβώς 23° 48') του άξονά της ως προς την ιδεατή κάθετο στο επίπεδο περιφοράς, γεγονός το οποίο δημιουργεί τις εποχιακές κλιματικές διαφορές. (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 52).



Εικόνα 3.1 *Η πορεία της Γης γύρω από τον Ήλιο. Αφήλιο-περιήλιο. Πηγή: Μετάφραση στα ελληνικά από The seasons and some of Earth's orbit's characteristics vector image by Gothika, following Duoduoduo's advice via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0*

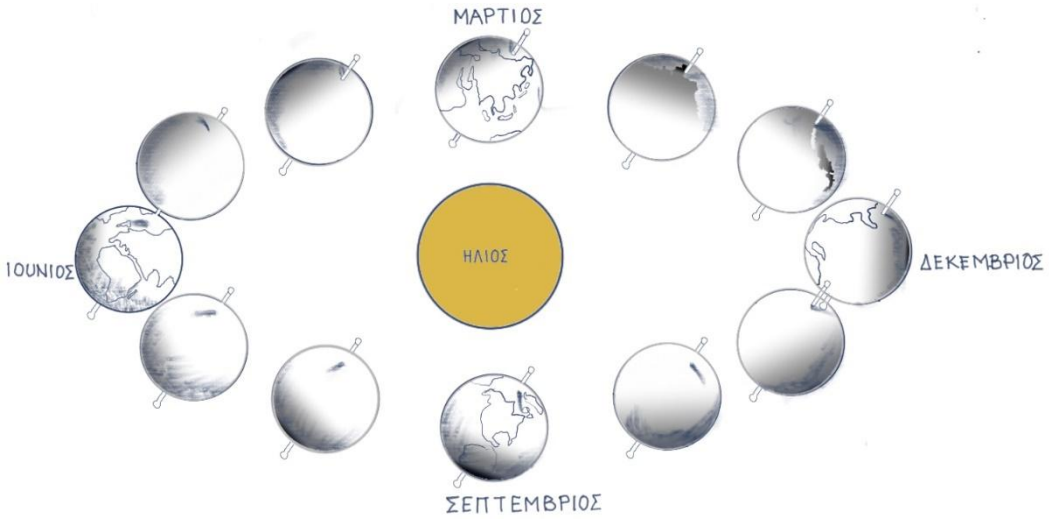
Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας εκτείνεται από μήκος κύματος 200 έως 3000 nm (1000 nm = 1 μm = 0,001 mm) και αποτελείται κατά ποσοστό 40% από ορατό φως μήκους κύματος από 380 nm (ιώδες) έως 700-750 nm (ερυθρό) (Εικόνα 3.2). Η υπέρυθρη ακτινοβολία, η οποία καλύπτει ένα ποσοστό περίπου

48%, είναι η ακτινοβολία που γίνεται αισθητή κυρίως ως θερμότητα· καλύπτει το μήκος κύματος πάνω από τα 750 nm και χωρίζεται σε εγγύς υπέρυθρη (Near Infra-Red – NIR ή IR-A) (750-1000 nm) και υπέρυθρη (IR-B) (1000-3000 nm). Το υπόλοιπο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας (200-380 nm) αποτελεί την υπεριώδη ακτινοβολία που είναι υπεύθυνη για φωτοχημικές αντιδράσεις, αποχρωματισμό, ηλιακά εγκαύματα κ.ά. (Στο ίδιο).



Εικόνα 3.2 *Το ηλιακό φάσμα. Πηγή: Μετάφραση στα ελληνικά από Solar Spectrum by Robert A. Rohde via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0*

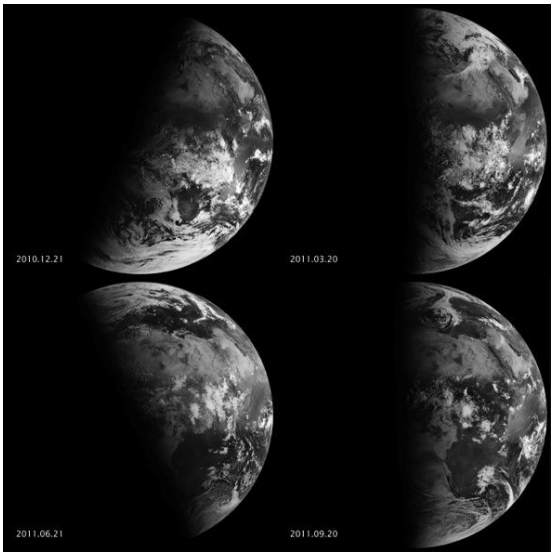
Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στα ανώτερα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας καλείται «ηλιακή σταθερά» και η τιμή της σε κάθετο επίπεδο με τη διεύθυνσή της είναι 1398 W/m^2 (Szokolay, 1980, σ. 280) (Στο ίδιο).



Εικόνα 3.3 *Η κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και προσαρμογή (Ε. Αλεξάνδρου) από Mazria (1979).*

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3, η κλίση του άξονα της Γης δημιουργεί τις εποχιακές διαφορές, οι οποίες οφείλονται στη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων επάνω της. Έτσι, στις 21 Ιουνίου, σε περιοχές

με βόρειο γεωγραφικό πλάτος 23,8° (Τροπικός του Καρκίνου), η φαινόμενη τροχιά του Ήλιου περνάει από το ζενίθ και εκεί είναι και η μεγαλύτερη ημέρα του χρόνου. Την ίδια στιγμή, οι περιοχές που έχουν νότιο γεωγραφικό πλάτος 23,4° (Τροπικός του Αιγόκερω) έχουν τη μικρότερη ημέρα του χρόνου και τη χαμηλότερη τροχιά του Ήλιου στον ορίζοντα. Στις 21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου, οι περιοχές του Ισημερινού έχουν τροχιές του Ήλιου που περνούν από το ζενίθ, τις ίδιες δε ημέρες είναι παντού ισημερία (Στο ίδιο) (Εικόνα 3.4). Προς τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, η διάρκεια της ημέρας αυξάνεται το καλοκαίρι και μειώνεται τον χειμώνα.



Εικόνα 3.4 *Οι εποχές. Πηγή: Seeing Equinoxes and Solstices from Space ©EUMETSAT, 2010-2011, Public Domain και Seasons from Space ©EUMETSAT, 2010-2011, Public Domain.*

Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται η Γη δεν είναι σταθερό, αλλά παρουσιάζει διακυμάνσεις, για λόγους που εξηγούνται στη συνέχεια. Έτσι, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 53-54):

- Περιορίζεται στην ατμόσφαιρα: Η μείωση είναι ανάλογη με το μήκος της διαδρομής που πρέπει να καλύψει η ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα έως ότου φτάσει στο έδαφος. Όσο πιο πλάγια είναι η γωνία πρόσπτωσης στην ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαδρομή και η μείωση της έντασής της. Όσο πιο κάθετη στην ατμόσφαιρα είναι η γωνία της ακτινοβολίας, τόσο μικρότερη είναι η διαδρομή της και μεγαλύτερη η έντασή της.
- Ελέγχεται από τον νόμο του συνημίτονου: Σύμφωνα με αυτόν τον νόμο, η ένταση της ακτινοβολίας μεγιστοποιείται σε επιφάνεια όταν είναι κάθετη στη διεύθυνσή της και ελαττώνεται ανάλογα με το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης.
- Εξαρτάται από τη διάρκεια του ηλιασμού: Η διάρκεια του ηλιασμού σχετίζεται καταρχήν με τη διάρκεια της ημέρας και κατά δεύτερο λόγο με την κατάσταση της ατμόσφαιρας και την πυκνότητα του αέρα. Οι συνθήκες υγρασίας και νεφοκάλυψης διαφέρουν επίσης, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος. Συνδυαζόμενες αυτές οι δύο παράμετροι αποδίδουν τη μεγαλύτερη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και σε ετήσιες μέσες τιμές στις υποτροπικές ξηρές ζώνες και όχι στην τροπική ζώνη (Givoni, 1969, σ. 4).

Η *ολική ηλιακή* ακτινοβολία (*global radiation)* που φτάνει σε κάποιο σημείο στην επιφάνεια της Γης προέρχεται απευθείας από τον Ήλιο, από ανακλάσεις και διαθλάσεις στην ατμόσφαιρα και από ανακλάσεις στην επιφάνεια της Γης. Σύμφωνα με τον Chapman (1974, σ. 414), «η ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα σώμα, ανά μονάδα χρόνου, ανά μονάδα επιφάνειας. Είναι το αποτέλεσμα εκπομπών και ανακλάσεων άλλων επιφανειών, και άρα μπορεί να έχει συγκεκριμένη διεύθυνση (*directional preference*) και μήκος κύματος (*spectral preference*)». Διακρίνεται, λοιπόν, σε άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη.

Η *άμεση ηλιακή ακτινοβολία* (*direct radiation)* έχει διεύθυνση που καθορίζεται από τη θέση του Ήλιου στον ουράνιο θόλο (ηλιακή γεωμετρία) και η έντασή της μεγιστοποιείται σε καθαρή ατμόσφαιρα.

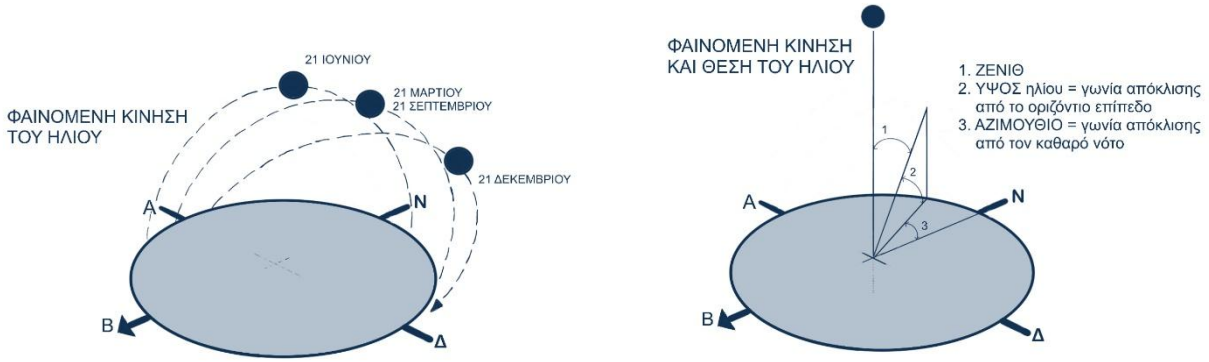
Η *διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία* (*diffuse radiation)* δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση. Η ποσότητα που δέχεται μια επιφάνεια εξαρτάται από το ποσό του ουράνιου θόλου που «βλέπει» αυτή η επιφάνεια (με την έννοια αυτή, οι οριζόντιες επιφάνειες «βλέπουν» μεγαλύτερο ποσοστό του ουράνιου θόλου από τις κατακόρυφες), ενώ η έντασή της μεγιστοποιείται σε περιπτώσεις θολής ή νεφοσκεπούς ατμόσφαιρας και ελαχιστοποιείται σε περίπτωση καθαρής ατμόσφαιρας, όταν μεγιστοποιείται η άμεση. Τα σύννεφα ανακλούν μεγάλο μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά το υπόλοιπό της φτάνει στην επιφάνεια της Γης σε μορφή διάχυτης (Givoni, 1969, σ. 2).

Η *ανακλώμενη ακτινοβολία* (*reflected radiation)* προέρχεται από το έδαφος και η έντασή της εξαρτάται από την ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία και την ανακλαστικότητα του εδάφους. Οι κατακόρυφες επιφάνειες δέχονται το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της ακτινοβολίας, ενώ οι κεκλιμένες λιγότερο και οι οριζόντιες καθόλου.

3.1.2 Ηλιακή γεωμετρία

Για τον σχεδιασμό των κτιρίων και για την αξιοποίηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ή την προστασία από αυτήν, είναι σημαντική η γνώση της τροχιάς του Ήλιου. Τα αναλυτικά στοιχεία του προσδιορισμού της θέσης του είναι οι γωνίες του ύψους (sun altitude) και του αζιμουθίου (sun azimuth) για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή. Τα στοιχεία αυτά υπάρχουν σε πίνακες και προσδιορίζουν επακριβώς τη γεωμετρία της τροχιάς του, ώστε να μπορεί να συσχετισθεί με τη γεωμετρία των κτιρίων. Για τον βιοκλιματικό σχεδιασμό είναι χρήσιμο να υπάρχει η καταγραφή αυτής της τροχιάς με τρόπο εύληπτο και παραστατικό, σε μορφή διαγραμμάτων. Η ηλιακή γεωμετρία είναι ένα στοιχείο σημαντικό για τον βιοκλιματικό σχεδιασμό, γιατί με τη χρήση της φαινόμενης τροχιάς του Ήλιου είναι δυνατός ο έλεγχος του σχεδιασμού (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 54).

Η *φαινόμενη τροχιά του Ήλιου* είναι η τροχιά που φαίνεται να ακολουθεί ο ήλιος στο στερέωμα κάθε τόπου. Η τροχιά αυτή για το βόρειο ημισφαίριο τον χειμώνα φαίνεται χαμηλά στον ορίζοντα και ο ήλιος παραμένει στο στερέωμα μόνο λίγες ώρες, ενώ το καλοκαίρι είναι υψηλά και ο ήλιος παραμένει στο στερέωμα περισσότερες ώρες (Εικόνα 3.5). Τα ηλιακά διαγράμματα έχουν στόχο την καταγραφή αυτών των τροχιών, ώστε σε κάθε χρονική στιγμή να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης του Ήλιου, με εύκολο και γρήγορο τρόπο. Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει τις φαινόμενες τροχιές του Ήλιου στον ουράνιο θόλο (Στο ίδιο).

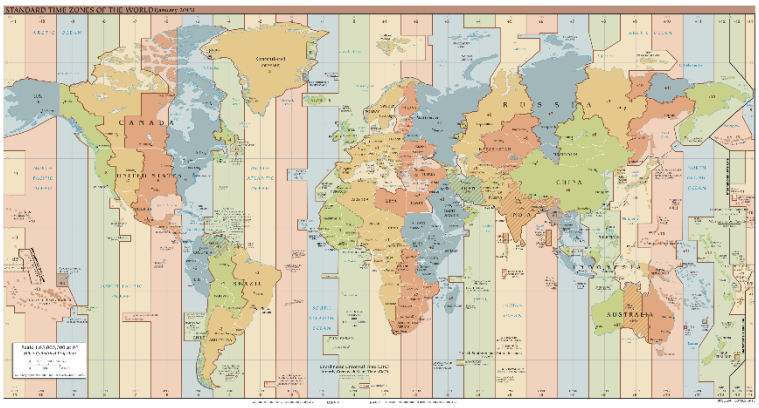


α. β.

Εικόνα 3.5 *α. Η φαινόμενη κίνηση του Ηλίου στο στερέωμα. β. Η φαινόμενη θέση του Ηλίου. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

Ηλιακά διαγράμματα

Για την καταγραφή της φαινόμενης κίνησης του Ηλίου χρησιμοποιούνται δύο ειδών ηλιακά διαγράμματα: αυτά που δείχνουν την προβολή της κίνησης του ήλιου σε οριζόντιο επίπεδο και αυτά που καταγράφουν την κίνηση του ήλιου σε κυλινδρική προβολή. Τα διαγράμματα αυτά αφορούν την ηλιακή ώρα (*solar time* ή *true solar time* – TST) και όχι την τοπική ώρα (*local time* ή *local clock time* – LCT).



Εικόνα 3.6 *Οι ζώνες ώρας. Πηγή: World Times Zones Map by TimeZonesBoy via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0*

Στις 12:00 ηλιακή ώρα, στο Βόρειο ημισφαίριο, ο ήλιος είναι στον Νότο και στο μέγιστο ύψος του (μεσουράνηση), ενώ αυτό δεν συμβαίνει για την τοπική ώρα (Εικόνα 3.7). Η τοπική και η ηλιακή ώρα συνδέονται μεταξύ τους σε μια σχέση που εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και περιλαμβάνει και την εξίσωση του χρόνου (Equation of Time – EoT) (Για περισσότερα, βλ. και Τσαγκρασούλης, 2015, σσ. 49-50).

Η τοπική ώρα, δηλαδή η ώρα που ισχύει σε μια χώρα, εξαρτάται από τη ζώνη που βρίσκεται σε σχέση με τον πρώτο μεσημβρινό του Greenwich (Μέση Ώρα Γκρίνουιτς, Greenwich Mean Time – GMT), την οποία αντικατέστησε η Συντονισμένη Παγκόσμια Ώρα (Universal Time Coordinated – UTC). («Συντονισμένη Παγκόσμια Ώρα», 2021). Οι ζώνες ώρας (Εικόνα 3.6) είναι 24 στο σύνολό τους, με 15° εύρος η καθεμία και γενικά έχουν ως κέντρο τους μεσημβρινούς του γεωγραφικού μήκους που είναι πολλαπλάσιο των 15°. Γειτονικές ζώνες ώρας μπορεί να έχουν μία ώρα διαφορά μεταξύ τους, ενώ ταυτόχρονα το σχήμα των ζωνών ώρας είναι ακανόνιστο, επειδή συνήθως ακολουθούν τα σύνορα επαρχιών ή κρατών («Ζώνη ώρας», 2021). Στις ζώνες ώρας δεν υπολογίζεται η θερινή ώρα (*daylight savings*).

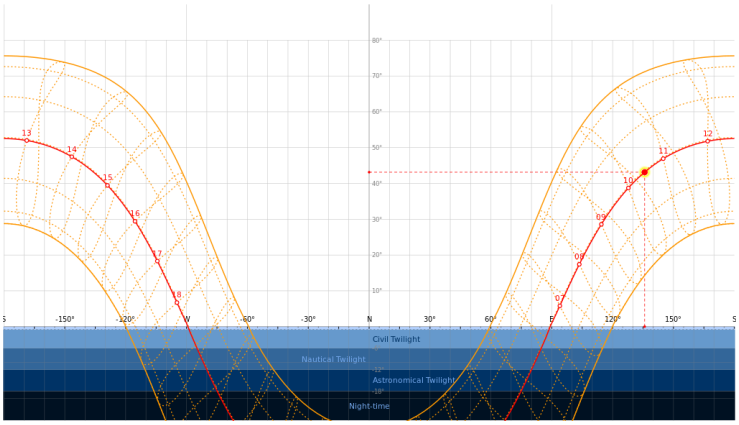


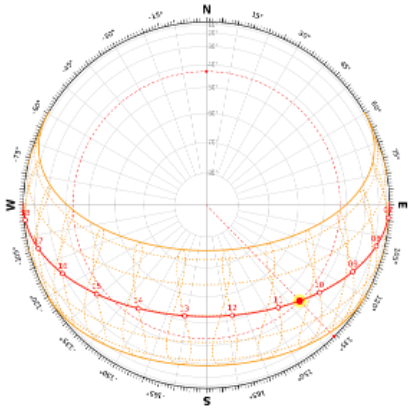
Εικόνα 3.7 *Ηλιακό ρολόι. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο Η. Ζαχαρόπουλου.*

Τα διαγράμματα που δείχνουν την οριζόντια προβολή της τροχιάς του Ηλίου, με διάφορες παραλλαγές ως προς τον τρόπο προβολής, είναι τα παρακάτω:

- Καρτεσιανά (*cartesian*) ή Κυλινδρικά (*cylindrical*) (Εικόνα 3.8.α)
- Στερεογραφικά (*stereographic*) (Εικόνα 3.8.β)
- Ισοαποστατικά (*equidistant*)
- Σφαιρικά (*spherical*)

Στη σφαιρική προβολή, οι τιμές επεκτείνονται στο ζενίθ, συστέλλοντας τον ορίζοντα, ενώ στη στερεογραφική προβολή γίνεται το αντίθετο. Στην ισοαποστατική προβολή, όλα τα ηλιακά ύψη δίνονται με τον ίδιο τρόπο, με τη χρήση μιας γραμμικής κλίμακας (Marsh, 2020). Τα στερεογραφικά και ισοαποστατικά χρησιμοποιούνται κυρίως στην εκτίμηση του φυσικού φωτισμού και τον έλεγχο του ηλιασμού, ενώ τα κυλινδρικά χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση της ηλιακής πρόσβασης (*solar access*) για δεδομένες τοποθεσίες (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 55).

α. 

β. 

Εικόνα 3.8 *α. Διάγραμμα ισοαποστατικής προβολής 38° ΒΓΠ (Αθήνα). β. Κυλινδρικό διάγραμμα 38° ΒΓΠ (Αθήνα). Πηγή: 2D Sun Path by © Dr. Andrew J. Marsh, 2020, CC BY-NC-SA 4.0*

3.1.3 Προσανατολισμός και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

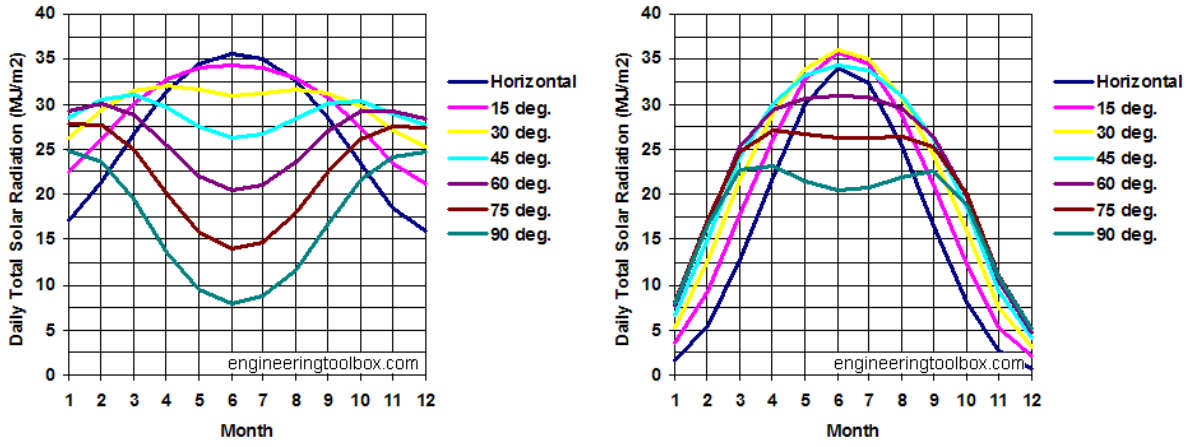
Η ηλιακή ακτινοβολία είναι η σημαντικότερη ενεργειακή πηγή που χρησιμοποιείται στον βιοκλιματικό σχεδιασμό. Η θερμότητα που λαμβάνεται από αυτή συμβάλλει στη θέρμανση των βιοκλιματικών κτιρίων τον χειμώνα, αλλά μπορεί να είναι και η αιτία της υπερθέρμανσής τους το καλοκαίρι. Γι' αυτό είναι απαραίτητη η γνώση της ηλιακής γεωμετρίας και των αποτελεσμάτων που μπορεί να έχει η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία των επιφανειών των κτιρίων με διαφορετικό προσανατολισμό (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 57).

Αν στα ηλιακά διαγράμματα μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο ο Ήλιος «βλέπει» τις επιφάνειες διαφόρων προσανατολισμών, είτε αυτές αποτελούν συμπαγείς επιφάνειες είτε ανοίγματα κτιριακού κελύφους, προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα που ενδεχομένως συνιστούν πολύτιμα στοιχεία για τον σχεδιασμό. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι οι νότια προσανατολισμένες κατακόρυφες επιφάνειες δέχονται τον χειμώνα την ηλιακή ακτινοβολία αρκετές ώρες της ημέρας (που είναι όμως μικρή σε διάρκεια), με τις πιο μικρές γωνίες πρόσπτωσης, που έχουν ως αποτέλεσμα την εισχώρηση των ακτίνων βαθιά στον εσωτερικό χώρο. Αντίθετα, το καλοκαίρι οι γωνίες πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγάλες και, συνεπώς, εισχωρούν λίγο στο εσωτερικό. Αντίστοιχα, οι οριζόντιες επιφάνειες τον χειμώνα δέχονται ακτινοβολία με μεγάλες (χαμηλές) γωνίες πρόσπτωσης, ενώ το καλοκαίρι με μικρές.[4] Ο ανατολικός ή δυτικός προσανατολισμός τον χειμώνα δέχεται ηλιακή ακτινοβολία πολύ λίγες ώρες την ημέρα και μόνο κατά τις πρωινές ή απογευματινές ώρες, όταν δηλαδή οι ακτίνες έχουν μειωμένη ένταση λόγω της διαδρομής τους

[4] Όταν η γωνία πρόσπτωσης ισούται με μηδέν, η δέσμη του φωτός προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια, ενώ όταν είναι ίση με 90°, τότε είναι παράλληλη (Αντωνίου κ.ά. (χ.ε.). Ενότητα 8).

στην ατμόσφαιρα. Τον χειμώνα, ο ήλιος ανατέλλει και δύει νότια της Ανατολής και της Δύσης. Αντίθετα, το καλοκαίρι, ο ανατολικός και ο δυτικός προσανατολισμός δέχονται περισσότερες ώρες ακτινοβολία, επειδή ο Ήλιος έχει υψηλότερη τροχιά στον ουράνιο θόλο και ανατέλλει και δύει προς τον Βορρά (Στο ίδιο) (Εικόνα 3.9).

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων της Εικόνας 3.9 γίνεται εμφανές ότι ο καταλληλότερος προσανατολισμός για ανοίγματα από τα οποία αναμένονται τα βέλτιστα ενεργειακά αποτελέσματα είναι ο νότιος, καθώς έχουμε τη μέγιστη ηλιακή ενεργειακή πρόσοδο τον χειμώνα και την ελάχιστη το καλοκαίρι. Ο ανατολικός και ο δυτικός προσανατολισμός δίνουν ελάχιστη ηλιακή πρόσοδο τον χειμώνα, ενώ έχουν σημαντική ηλιακή πρόσοδο το καλοκαίρι, πράγμα που δείχνει ότι ανοίγματα σε αυτούς τους προσανατολισμούς θα επιτείνουν το φαινόμενο της υπερθέρμανσης. Τέλος, ο βορινός προσανατολισμός δεν έχει ηλιακή πρόσοδο τον χειμώνα και έχει ελάχιστη το καλοκαίρι, λόγω μετατόπισης της θέσης της ανατολής και της δύσης του Ηλίου προς τον Βορρά το καλοκαίρι. Αυτό που είναι αξιοσημείωτο και θέλει ιδιαίτερη προσοχή στον σχεδιασμό είναι τα οριζόντια ή σχεδόν οριζόντια ανοίγματα, που όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9, εμφανίζουν τη μέγιστη ηλιακή πρόσοδο τους καλοκαιρινούς μήνες. Με βάση τα παραπάνω, για τα διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη και κλιματικές συνθήκες ορίζεται το βέλτιστο σχήμα κτιρίου ως προς τον επιθυμητό χειμερινό ηλιασμό τον χειμώνα και τη μείωση της υπερθέρμανσης κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου (βλ. Κεφ. 6, παρ. 6.1.1). Υπενθυμίζεται εδώ ότι η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται σε συνθήκες θολής ατμόσφαιρας που πολλές φορές συμβαίνει το καλοκαίρι. Η διάχυτη ακτινοβολία δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση και, όπως προαναφέρθηκε, η ποσότητά της εξαρτάται από το ποσοστό του ουράνιου θόλου που «βλέπει» μια επιφάνεια (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 59).

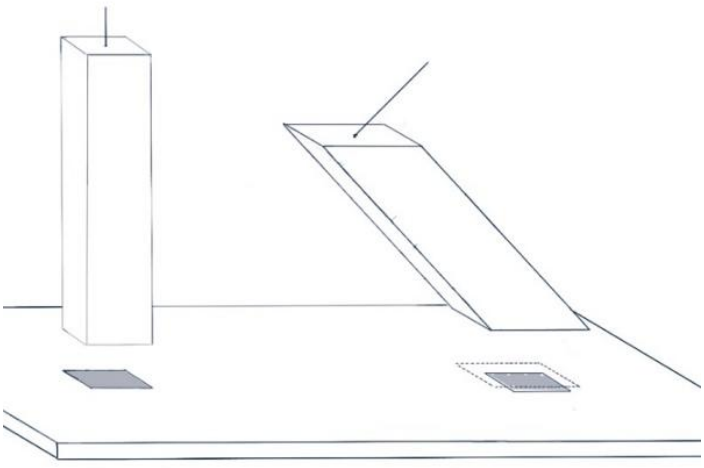


Ηλιακή ακτινοβολία για 30°Β γ.π. *Ηλιακή ακτινοβολία για 60°Β γ.π*

Εικόνα 3.9 *Ηλιασμός επιφανειών με νότιο προσανατολισμό και διαφορετικές κλίσεις (οριζόντιες, κεκλιμένες, κατακόρυφες) για διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη. Πηγή: © Engineering ToolBox, (2008).* Solar Radiation – Daily Surface Energy. *[Online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/surface-solar-radiation-d_1213.html [Accessed 14 October 2021].*

Η σχέση της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και της απορρόφησής της από μια επιφάνεια μπορεί να περιγραφεί απλά με μια αναλογία. Έστω ότι οι «παράλληλες ακτίνες του ήλιου [είναι] μια χούφτα γεμάτη μολύβια, των οποίων οι μύτες αγγίζουν την επιφάνεια ενός τραπεζιού. Οι τελείες που κάνουν οι μύτες των μολυβιών στην επιφάνεια αντιπροσωπεύουν μονάδες ηλιακής ενέργειας. Όταν τα μολύβια είναι κάθετα προς το τραπέζι, οι τελείες είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, και κατ' αναλογία η ενέργεια ανά [μονάδα επιφάνειας] είναι μέγιστη. Αν τα μολύβια αρχίσουν να παίρνουν κλίση, οι τελείες αρχίζουν να αραιώνουν μεταξύ τους και να καλύπτουν μεγαλύτερη επιφάνεια, άρα κατ' αναλογία η ενέργεια ανά [μονάδα

επιφάνειας] μειώνεται» (Εικόνα 3.10, Barbara Francis, Master's Thesis, New Mexico: University of New Mexico, 1976, παραπομπή στο Mazria, 1979, σ. 13).



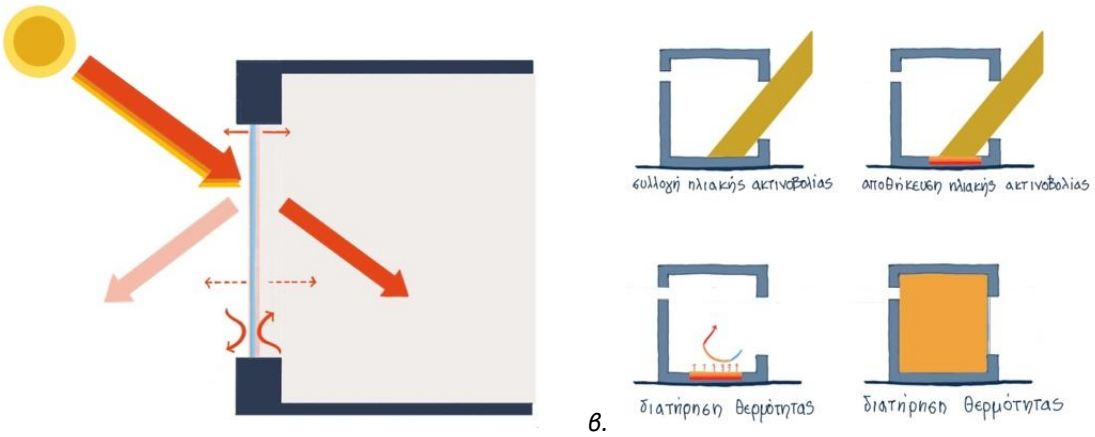
Εικόνα 3.10 *Σχέση της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και της απορρόφησής της από μια επιφάνεια. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και προσαρμογή (Ε. Αλεξάνδρου) από Barbara Francis, Master's Thesis, New Mexico: University of New Mexico, 1976, παραπομπή στο Mazria, 1979, σ. 13).*

3.1.4 Ηλιακή πρόσοδος

Συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας

Κάθε κτίριο δέχεται από τον Ήλιο ορατή, μικρού μήκους κύματος, αλλά και εγγύς υπέρυθρη (Near Infra-Red – NIR ή IR-A) ακτινοβολία, απευθείας (άμεση), από διάχυση στην ατμόσφαιρα (διάχυτη) και από ανάκλαση στις επιφάνειες που το περιβάλλουν (ανακλώμενη). Ταυτόχρονα, δέχεται και μεγάλου μήκους κύματος, θερμική ακτινοβολία (Infra-Red – IR-C) από το περιβάλλον του. Μέρος της ακτινοβολίας που δέχεται το κτίριο προσπίπτει στο αδιαφανές του κέλυφος και μέρος της εισέρχεται από τα διαφανή τμήματά του (υαλοστάσια) στο εσωτερικό του (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 66).

Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα δομικά υλικά ενός κτιρίου είναι φυσικό φαινόμενο που έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας των στοιχείων που ηλιάζονται. Εάν ληφθεί υπόψη πως το μεγαλύτερο τμήμα του εξωτερικού περιβλήματος των συμβατικών κτιρίων αποτελείται από αδιαφανή στοιχεία –ως επί το πλείστον θερμομονωμένα– θα διαπιστωθεί ότι η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας περιορίζεται στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους. Συνεπώς, η θέρμανση του εσωτερικού χώρου ενός κτιρίου άμεσα από τον ήλιο μπορεί να γίνει μόνο με τη διείσδυση της ακτινοβολίας από τα ανοίγματά του και πρακτικά από εκείνα που έχουν υαλοστάσια, καθότι η γυάλινη επιφάνεια εμποδίζει τη ροή αέρα μέσα από το άνοιγμα (άρα και τη διαφυγή θερμότητας με μεταφορά), ενώ παράλληλα ενεργοποιείται το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 85). Πιο συγκεκριμένα (Εικόνα 3.11), στα διαφανή τμήματα του κελύφους, η προσπίπτουσα ορατή ακτινοβολία κατά ένα ποσοστό θα απορροφηθεί, κατά ένα θα ανακλαστεί και κατά ένα ποσοστό θα εισέλθει στο κτίριο. Έτσι λοιπόν η ακτινοβολία που θα εισέλθει στο κτίριο από τα διαφανή τμήματα του κελύφους εν μέρει θα απορροφηθεί από τις εσωτερικές επιφάνειες του κτιρίου, θα μετατραπεί σε θερμότητα και θα εκπέμπεται ως θερμική (μεγάλου μήκους κύματος) ακτινοβολία. Μέρος της θερμικής ακτινοβολίας διαχέεται στο εσωτερικό του κτιρίου και αποθηκεύεται στη μάζα του, ενώ άλλο προσπίπτει στα υαλοστάσια, τα οποία δεν μπορεί να διαπεράσει και, έτσι, απορροφάται από το γυαλί στο μεγαλύτερό της ποσοστό, με αποτέλεσμα να εγκλωβίζεται στο εσωτερικό του κτιρίου (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 67).



α. β.

Εικόνα 3.11 *α. Συλλογή ηλιακής ενέργειας από διάφανα στοιχεία του κελύφους. β. Συλλογή, αποθήκευση, διανομή και διατήρηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμότητας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

Δεδομένης της συμβολής των υαλοστασίων στη διείσδυση και τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας στο εσωτερικό ενός κτιρίου, έχει ιδιαίτερη σημασία η εξέταση των παραγόντων που επηρεάζουν τη δυνατότητα να προσπέσει η ηλιακή ακτινοβολία στο υαλοστάσιο και κατόπιν να εισχωρήσει στο κτίριο. Ακολουθώντας την επιστημονική πρακτική για την ανάλυση αντίστοιχων θεμάτων, θα εξεταστούν ξεχωριστά οι παράγοντες που επηρεάζουν την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του υαλοστασίου, ενώ κατόπιν θα αποτιμηθεί το πόσο περιορίζεται η διείσδυση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ανάλογα με τα ειδικά χαρακτηριστικά του υαλοστασίου (Στο ίδιο).

Αρχικά, εξετάζονται οι παράγοντες που καθορίζουν τη δυνατότητα πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του ανοίγματος. Αυτοί είναι (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 86):

α. Η θέση του οικοπέδου, όπως ορίζεται από τις γεωγραφικές του συντεταγμένες και τον προσανατολισμό του. Ο προσδιορισμός του γεωγραφικού πλάτους είναι απαραίτητος εφόσον η φαινόμενη τροχιά του ήλιου εξαρτάται από τη θέση της εξεταζόμενης περιοχής στην επιφάνεια της Γης. Πρακτικά, η γνώση του γεωγραφικού πλάτους επιτρέπει την επιλογή ή/και την «κατασκευή» του κατάλληλου ηλιακού διαγράμματος με τη βοήθεια λογισμικών (π.χ. Climate Consultant) ή/και διαδικτυακών εφαρμογών, που περιγράφει με ακρίβεια τα στοιχεία της τροχιάς του ήλιου για τη συγκεκριμένη περιοχή. Από τα στοιχεία προσανατολισμού της όψης (ή των όψεων) του οικοπέδου, μπορούν να υπολογιστούν η διεύθυνση και η θεωρητική χρονική διάρκεια ηλιασμού αυτής της περιοχής (ή περιοχών).

β. Η γεωμορφολογία του ορίζοντα, όπως και το ανάπτυγμα των όγκων που περιβάλλουν το οικόπεδο. Τα φυσικά ή τα τεχνητά εμπόδια εμποδίζουν την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα όταν ο ήλιος βρίσκεται σε χαμηλό ύψος. Έχουν αναπτυχθεί απλές γραφικές τεχνικές και απλά λογισμικά που μεταφέρουν τη θέση των εμποδίων στο ηλιακό διάγραμμα, για να διαπιστωθεί με ακρίβεια χρόνου και θέσης ο περιορισμός του ηλιασμού.

γ. Το σχήμα και ο προσανατολισμός του κτιρίου, που για μεσαία γεωγραφικά πλάτη προτείνεται να είναι ορθογωνικό, με τον μεγάλο άξονά του στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης (βλ. Κεφ. 6, παρ. 6.1.1).

δ. Ο προσανατολισμός και η κλίση του επιπέδου του υαλοστασίου, που επηρεάζει την ένταση της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε αυτό. Για τον ελληνικό γεωγραφικό χώρο, ένα κατακόρυφο επίπεδο νότια προσανατολισμένο δέχεται περισσότερη ηλιακή ενέργεια τους χειμερινούς μήνες απ' ό,τι τους καλοκαιρινούς.

Από όσα αναφέρθηκαν, γίνεται αντιληπτό ότι οι παράγοντες που καθορίζουν την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του οικοπέδου και έτσι η δυνατότητα του μελετητή να τους επηρεάσει είναι πολύ περιορισμένη. Μπορεί να ισχυριστεί κάποιος πως απομένει στον μελετητή η

ελευθερία να ορίσει τον προσανατολισμό και την κλίση των ανοιγμάτων, όμως ζητήματα όπως αυτά των πολεοδομικών περιορισμών, θέας ή οχλήσεων από το περιβάλλον, που συναρτώνται με τη θέση του οικοπέδου, περιορίζουν σημαντικά τη δυνατότητα παρέμβασης.

Η διείσδυση στο εσωτερικό ενός κτιρίου της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο του ανοίγματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ανοίγματος και του υαλοστασίου που είναι ενταγμένο σε αυτό. Όπως φαίνεται παρακάτω, ο μελετητής έχει μεγαλύτερη ελευθερία επιλογών για να διαμορφώσει το άνοιγμα, άρα και για να ελέγξει την ακτινοβολία που εισέρχεται στο κτίριο (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 88) Εάν εντοπιστούν αναλυτικά οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας από ένα άνοιγμα, θα πρέπει να εξεταστούν τα ακόλουθα στοιχεία (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 88-89):

- α. το εμβαδόν του υαλοστασίου,
- β. ο εξωτερικός σκιασμός του υαλοστασίου από στοιχεία του ανοίγματος ή του κτιρίου,
- γ. το είδος και η πολλαπλότητα των υαλοπινάκων και
- δ. η χρήση στοιχείων εσωτερικού σκιασμού

α. Το εμβαδόν του υαλοστασίου. Είναι αυτονόητο ότι η διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ανάλογη του εμβαδού του ανοίγματος, δεδομένου ότι ανά πάσα στιγμή η ηλιακή ενέργεια κατανέμεται ομοιόμορφα στο επίπεδο που μελετάται.

β. Ο εξωτερικός σκιασμός του υαλοστασίου από στοιχεία του ανοίγματος ή του κτιρίου. Αρχιτεκτονικά στοιχεία διαμόρφωσης του ανοίγματος –όπως πλαίσια και γείσα διαφόρων διατομών–, διατάξεις σκιασμού –όπως περσίδες ή σχάρες–, αρχιτεκτονικές προεξοχές και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτιρίου μπορούν να περιορίσουν ή ακόμη και να εμποδίσουν εντελώς τη διείσδυση της άμεσης προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο υαλοστάσιο. Για όλες τις περιπτώσεις, πρέπει να εξεταστεί εάν υπάρχουν στοιχεία του κτιρίου που εμποδίζουν τον ηλιασμό τις ώρες και τις εποχές που είναι επιθυμητός.

γ. Το είδος και η πολλαπλότητα των υαλοπινάκων. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε έναν υαλοπίνακα δεν τον διαπερνά πλήρως. Τμήμα της ακτινοβολίας ανακλάται, ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης, τμήμα απορροφάται από τη μάζα του υαλοπίνακα και το υπόλοιπο διεισδύει στον χώρο. Η θερμότητα από την απορρόφηση της ακτινοβολίας στο γυαλί μεταδίδεται με ακτινοβολία και μεταφορά προς το εσωτερικό και το εξωτερικό, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες θερμοκρασίας και κίνησης αέρα στις δύο πλευρές του υαλοπίνακα. Συνεπώς, η συνολική μετάδοση (*total transmission*) ενέργειας διαμέσου του γυαλιού ισούται με το άθροισμα της μικρού μήκους κύματος ηλιακής ακτινοβολίας που διεισδύει συν τη θερμότητα που απορροφάται και μεταδίδεται προς το εσωτερικό.

Για να αξιολογηθεί η δυνατότητα συλλογής ηλιακής ενέργειας διαμέσου ενός υαλοπίνακα υπολογίζεται ο συντελεστής σκιασμού του, δηλαδή συγκρίνεται ο λόγος (%) του συνόλου της θερμικής προσόδου του υαλοπίνακα που εξετάζεται προς εκείνη του απλού υαλοπίνακα. Ο συντελεστής σκιασμού χρησιμοποιείται επίσης και για την αξιολόγηση διατάξεων σκιασμού, οπότε ορίζεται ως ο λόγος του συνόλου της θερμικής προσόδου που αποκτάται από τον συνδυασμό υαλοπίνακα-διάταξης σκιασμού προς εκείνη ενός ασκίαστου παραθύρου με μονό, απλό υαλοπίνακα.

Προκειμένου να τροποποιηθούν οι θερμικές ιδιότητες των υαλοπινάκων χρησιμοποιούνται πρόσθετα συστατικά στη μάζα τους, όπως χρώμα στους απορροφητικούς υαλοπίνακες ή επιστρώσεις στους ανακλαστικούς και τους υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής. Οι υαλοπίνακες αυτών των τύπων περιορίζουν τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, σε σχέση με τους κοινούς, λόγω της ειδικής επεξεργασίας τους. Το γεγονός αυτό, όμως, αντισταθμίζεται πολλαπλά από το θετικότερο θερμικό ισοζύγιό τους, σε σχέση με εκείνο των υαλοπινάκων από απλό γυαλί.

Περιορισμός της ροής θερμότητας ενός υαλοστασίου μπορεί να γίνει με τη χρήση διπλών ή τριπλών υαλοπινάκων –κοινών ή ειδικών– σε διάφορους συνδυασμούς. Η προσθήκη, όμως, επιπλέον υαλοπίνακα (ή υαλοπινάκων) αυξάνει τις επιφάνειες ανάκλασης και τη μάζα απορρόφησης, με συνέπεια να μειώνεται η διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας στον χώρο. Βέβαια, οι σημαντικά μειωμένες θερμικές απώλειες αντισταθμίζουν κατά πολύ τον περιορισμό της διείσδυσης της ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε το θερμικό ισοζύγιο του διπλού ή τριπλού υαλοπίνακα να υπερτερεί εκείνου του απλού.

δ. Η χρήση στοιχείων εσωτερικού σκιασμού. Πρόκειται για εσωτερικά στοιχεία ρύθμισης, όπως είναι οι κουρτίνες, τα ρολά, τα βενέτικα, οι κατακόρυφες λωρίδες κ.ά. (Βλ. Κεφ. 9, παρ. 9.6.2) Πρέπει να διευκρινιστεί ότι τα στοιχεία εσωτερικού σκιασμού, όπως χαρακτηρίστηκαν, δεν τοποθετούνται αποκλειστικά για να ρυθμίζεται η διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και για άλλους λόγους, όπως ο έλεγχος του φυσικού φωτισμού και της θάμβωσης, η προστασία των φωτοευαίσθητων υλικών, η εξασφάλιση της ιδιωτικότητας, η διακόσμηση του χώρου κ.ά. Η πολλαπλή χρησιμότητα των στοιχείων αυτών περιορίζει συχνά τη δυνατότητα να παραμένουν ανοικτά τις ώρες που είναι επιθυμητός ο ηλιασμός του χώρου, με αποτέλεσμα να συγκαταλέγονται στους παράγοντες μείωσης των ηλιακών προσόδων.

Η ηλιακή ακτινοβολία όταν προσπίπτει επάνω σε στοιχείο εσωτερικού σκιασμού ανακλάται και οδεύει προς τα έξω διαμέσου του υαλοπίνακα. Η ανάκλαση αυτή δεν είναι πλήρης, επειδή μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από το στοιχείο σκιασμού –ανάλογα με το χρώμα του–, μέρος από τον υαλοπίνακα, ενώ ταυτόχρονα προκαλείται το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Συνολικά, περιορίζεται η διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας στον χώρο, λιγότερο όμως αποτελεσματικά σε σύγκριση με ένα στοιχείο σκιασμού που τοποθετείται έξω από το υαλοστάσιο.

Συμπέρασμα της διερεύνησης αυτής είναι ότι ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο του ανοίγματος με τον καθορισμό μεγέθους του υαλοστασίου, την κατάλληλη διαμόρφωση των όποιων στοιχείων εξωτερικού σκιασμού, την επιλογή είδους και πολλαπλότητας υαλοπινάκων, όπως και την πιθανή χρήση εσωτερικών στοιχείων σκιασμού.

3.1.5 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας

Εάν συσχετιστεί χρονικά η παροχή ενέργειας από τον ήλιο με την ανάγκη θέρμανσης, θα διαπιστωθεί ότι κατά διαστήματα η παροχή υπολείπεται της ζήτησης για να επιτευχθούν συνθήκες θερμικής άνεσης, ενώ άλλοτε συμβαίνει το αντίθετο, οπότε είναι πιθανό να παρατηρηθεί υπερθέρμανση του χώρου. Στην εξομάλυνση των συνεπειών της χρονικής αυτής ανισοκατανομής της ηλιακής ενέργειας έχει αποδειχθεί ότι συμβάλλει σημαντικά η δυνατότητα αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας σε στοιχεία του κελύφους. Η λειτουργία δηλαδή της αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας, που πραγματοποιείται με τη μορφή αποθήκευσης θερμότητας, είναι αφενός μεν η διατήρηση της θερμότητας που συλλέχθηκε για να επιμηκυνθεί ο χρόνος εκμετάλλευσής της, αφετέρου η αποτροπή της υπερθέρμανσης του χώρου με την απορρόφηση της πλεονάζουσας θερμότητας. Ίσως θα γίνει καλύτερα αντιληπτή η λειτουργία της θερμικής αποθήκευσης εάν αναφερθεί ένα ηλεκτρικό ανάλογο που χρησιμοποιείται στη φυσική: εάν δηλαδή η ροή θερμότητας αντιστοιχιστεί με ροή ηλεκτρικού ρεύματος, η θερμική αποθήκευση παρομοιάζεται με τη λειτουργία ηλεκτρικού πυκνωτή σε κύκλωμα που φορτίζεται και αποφορτίζεται ανάλογα με την παροχή του ηλεκτρικού ρεύματος (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 90).

Το πιο πρόσφορο μέσο για αποθήκευση θερμότητας αποτελούν τα υλικά με υψηλή θερμοχωρητικότητα. Στον χώρο της κατασκευής, υψηλή θερμοχωρητικότητα διαθέτουν τα λιθώδη δομικά υλικά που έχουν μεγάλη πυκνότητα, όπως οι φυσικοί λίθοι (π.χ. λιθοσώματα, μάρμαρο κ.ά.), το οπλισμένο σκυρόδεμα και τα επιχρίσματα τσιμέντου και οι τεχνητοί λίθοι με πρώτη ύλη το τσιμέντο (σκυρόδεμα, τσιμεντόλιθοι, επιχρίσματα κ.ά.), η άργιλος (ωμόπλινθοι, οπτόπλινθοι, κεραμικά πλακίδια κ.ά.), κ.λπ. Η μάζα

των υλικών που συμμετέχει στη λειτουργία της θερμικής αποθήκευσης ονομάζεται θερμική μάζα. Έχει παρατηρηθεί ότι –πρακτικά– σε πολλές περιπτώσεις, η θερμική μάζα ενός δομικού στοιχείου είναι μικρότερη από τη συνολική του μάζα. Το φαινόμενο εξηγείται με βάση την παρατήρηση ότι δεν συμμετέχει όλο το πάχος (ή βάθος) ενός δομικού στοιχείου στη διαδικασία θερμικής φόρτισης-αποφόρτισης, επειδή η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας του υλικού φθίνει όσο αυξάνεται η απόσταση από τη θερμαινόμενη επιφάνειά του. Μετρήσεις έχουν δείξει ότι σε λιθώδη υλικά, για 24ωρο κύκλο θερμικής φόρτισης-αποφόρτισης και παροχή θερμότητας από τη μία πλευρά του στοιχείου, συμμετέχει αποδοτικά στη θερμική λειτουργία πάχος υλικού κυμαινόμενο από 6 έως 12 εκατοστά. Συνεπώς, σε ένα λιθώδες δομικό υλικό, η θερμική του μάζα περιορίζεται πρακτικά έως τα πρώτα 12 εκ. του πάχους του. Θα πρέπει να τονιστεί εδώ η θετική συμβολή που έχει η τοποθέτηση θερμομονωτικής στρώσης ανάμεσα στο δομικό υλικό και στο εξωτερικό περιβάλλον, ώστε να περιοριστεί η απώλεια της θερμότητας που συλλέχθηκε εσωτερικά (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 91). Η θερμοχωρητικότητα των δομικών στοιχείων μιας κατασκευής αναλύεται και σε επόμενα κεφάλαια που περιγράφουν την επίδρασή της στη φυσική των κτιριακών κατασκευών.

Η έκθεση ενός στοιχείου θερμικής αποθήκευσης απευθείας στην ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί την αποδοτικότερη μέθοδο για τη θερμική του φόρτιση. Εάν επιπλέον το στοιχείο αυτό έχει σκούρο χρώμα, θα παρατηρηθεί αυξημένη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι τα λιθώδη υλικά με σκούρο χρώμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ αποδοτικά για την αποθήκευση θερμότητας, αρκεί όμως να εξεταστεί ότι η υψηλότερη θερμοκρασία τους σε σχέση με εκείνα του άμεσου περιβάλλοντος δεν θα δημιουργεί δυσφορία στους χρήστες του χώρου. Τα στοιχεία θερμικής αποθήκευσης ενός κτιρίου που εκτίθενται στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία αποτελούν την κύρια θερμική αποθήκη του (Στο ίδιο).

Δεύτερος τρόπος για να φορτιστεί θερμικά ένα στοιχείο θερμικής αποθήκευσης είναι να δεχθεί θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από άμεσα ηλιαζόμενη περιοχή του κτιρίου. Προϋπόθεση για να συμβεί αυτό είναι να υπάρχει «οπτική» επαφή ανάμεσα στην πηγή θερμότητας και τον δέκτη, όπως επίσης και ο δέκτης να έχει χαμηλότερη επιφανειακή θερμοκρασία από την ακτινοβολούμενη της πηγής. Παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης είναι η οροφή ενός χώρου στον οποίο το δάπεδο δέχεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Τα στοιχεία θερμικής αποθήκευσης ενός κτιρίου που φορτίζονται έμμεσα κατά τον τρόπο με τον οποίο περιγράφηκε αποτελούν τη δευτερεύουσα θερμική αποθήκη του (Στο ίδιο).

Ο τρίτος και λιγότερο αποδοτικός τρόπος φόρτισης ενός στοιχείου θερμικής αποθήκευσης είναι με μεταφορά διαμέσου της κίνησης του αέρα που θερμάνθηκε. Πλεονέκτημα αυτού του τρόπου φόρτισης είναι ότι η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί σε απομακρυσμένα σημεία του κτιρίου που δεν έχουν «οπτική» επαφή με τις άμεσα ηλιαζόμενες περιοχές. Η κίνηση του αέρα προς τα στοιχεία θερμικής αποθήκευσης μπορεί να υποβοηθηθεί με μηχανικά μέσα, π.χ. ανεμιστήρες (Στο ίδιο).

Η αποθήκευση θερμότητας στο κέλυφος ενός χώρου επιτυγχάνεται πρακτικά και με τους τρεις τρόπους, δηλαδή με έκθεση στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία, με απορρόφηση θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από άμεσα θερμαινόμενες επιφάνειες και με μεταφορά θερμού αέρα (Στο ίδιο).

3.1.6 Μετάδοση θερμότητας

Μετά τη συλλογή και εν μέρει, μετά την αποθήκευση η θερμότητα πρέπει να διανεμηθεί εκεί όπου χρειάζεται. Οι φυσικοί ή παθητικοί τρόποι μετάδοσης της θερμότητας είναι τρεις: με αγωγή, με μεταφορά και με ακτινοβολία (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 92).

Έχει διαπιστωθεί ότι η διάρθρωση των χώρων του κτιρίου επηρεάζει καθοριστικά τη μετάδοση θερμότητας. Εάν δηλαδή η συλλογή και αποθήκευση της θερμότητας γίνεται μέσα ή σε επαφή με τους χώρους όπου πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, τότε η μετάδοση επιτυγχάνεται με την υψηλότερη απόδοση. Διαφορετικά, θα πρέπει η θερμότητα να διανεμηθεί κατάλληλα στους χώρους όπου απαιτείται, με συνεπαγόμενες όμως μεγαλύτερες απώλειες σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση (Στο ίδιο).

Η μετάδοση θερμότητας σε έναν χώρο πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να μην προκαλεί έντονες διαφορές θερμοκρασίας ανάμεσα στις επιφάνειες που περιβάλλουν τον χώρο και τον εσωτερικό αέρα, ούτε να δημιουργεί ενοχλητικά ρεύματα αέρα. Έχει παρατηρηθεί ότι στις περιπτώσεις που υπάρχει επαρκής θερμική μάζα μέσα σε έναν χώρο η ακτινοβολούμενη θερμότητα, καθώς και η θερμότητα που μεταφέρεται από τον αέρα προσφέρουν τον πιο ικανοποιητικό τρόπο μετάδοσης της ηλιακής ενέργειας που συλλέχθηκε (Στο ίδιο).

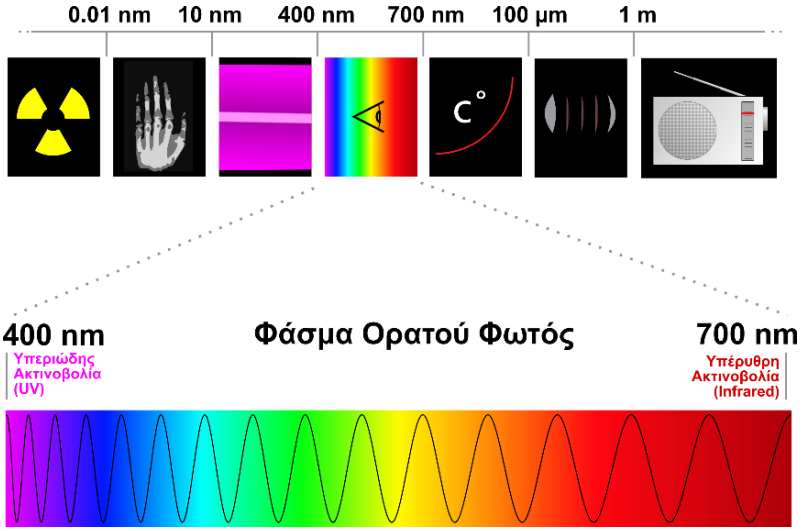
Ρύθμιση της διανομής θερμότητας μεταξύ γειτονικών χώρων μπορεί να γίνει απλώς με το άνοιγμα ή το κλείσιμο των εσωτερικών κουφωμάτων, όπως είναι κυρίως οι πόρτες. Δεδομένου ότι ο θερμός αέρας τείνει να συγκεντρωθεί κοντά στην οροφή, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν θυρίδες ή στόμια επικοινωνίας των χώρων στην υψηλότερη στάθμη των διαχωριστικών τοίχων. Τέλος, θα πρέπει να εξετάζεται και η περίπτωση χρήσης ηλεκτρικών ανεμιστήρων για την υποβοήθηση της κυκλοφορίας του θερμού αέρα προς τις επιθυμητές κατευθύνσεις (Στο ίδιο).

3.2 Φως

3.2.1 Φυσική του φωτός

Το φυσικό φως είναι το τμήμα του ενεργειακού φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον ήλιο μέσα στα ορατά μήκη κύματος (από 0,38 έως 0,76 μm ή 380 έως 760 nm), δηλαδή μεταξύ του υπεριώδους και του υπέρυθρου) (Εικόνα 3.12) και που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης έπειτα από απορρόφηση και ανάκλαση από την ατμόσφαιρά της. (Baker et al., 1993, σ. 2.7) Το φυσικό φως διακρίνεται σε άμεσο, διάχυτο και ανακλώμενο. Το ηλιακό φως είναι ουσιαστικά το άμεσο τμήμα του φυσικού φωτός (Baker et al., 1993, σ. 2.7).

Το φυσικό φως παρουσιάζει συνεχείς μεταβολές στην ένταση και στο χρώμα και, για τον λόγο αυτόν, χρησιμοποιούνται μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές (Fontoynont, 2002, σ. 84). Η ένταση του φυσικού φωτός μπορεί να ξεπεράσει τις 100.000 lux κατά τις μεσημεριανές ώρες του καλοκαιριού, με συνθήκες καθαρού ουρανού (Baker et al., 1993, σ. 2.8), ενώ μπορεί να είναι λίγες χιλιάδες lux (π.χ. 4000-5000 lux) με συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού (Fontoynont, 2002, σ. 84). Η θερμοκρασία χρώματος του φυσικού φωτός μπορεί να ποικίλλει από 3000K έως 30000K (Fontoynont, 2002, σ. 85). Η θερμοκρασία χρώματος του ηλιακού φωτός είναι μικρότερη από 5000K (θερμό φως), ενώ η θερμοκρασία χρώματος του γαλάζιου βορειοδυτικού τμήματος του ουρανού ξεπερνά τις 20000K (ψυχρό φως) (Baker et al., 1993, σ. 2.7 και 2.11). Περιλαμβάνει όλα τα χρώματα και ο συνδυασμός αυτών είναι το άσπρο φως, που τελικά είναι αντιληπτό (Αξαρλή, 2001, σ. 173).



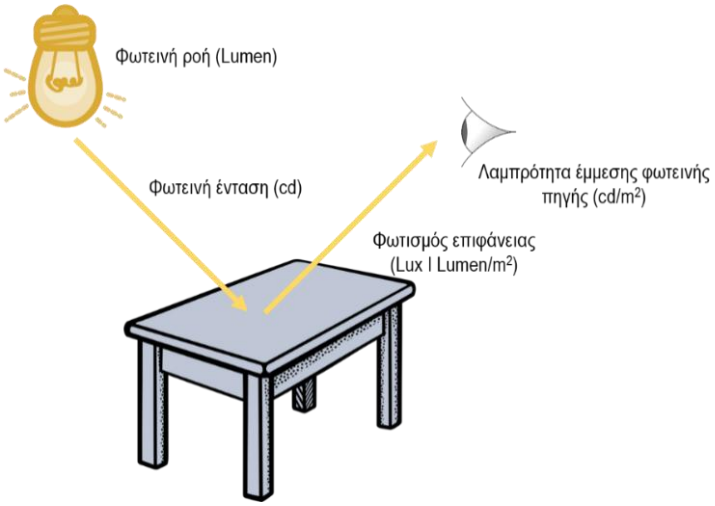
Εικόνα 3.12 *Ορατό μέρος του φάσματος. Πηγή: Spectre visible light by User:84 user derivative work: Ggia (talk) derivative work: Ggia via Wikimedia Commons, CC BY-SA 2.5.*

Τα βασικά χαρακτηριστικά του φωτός είναι η λαμπρότητα και το χρώμα: η λαμπρότητα ενός αντικειμένου είναι το αποτέλεσμα της ποσότητας του φωτός που προέρχεται από αυτό και προσπίπτει στο μάτι, ενώ το χρώμα του συνδέεται με τη διανομή του μήκους κύματος αυτού του φωτός. Ένα αντικείμενο είναι φωτεινό γιατί εκπέμπει μια ποσότητα φωτός, είτε ως πρωτογενής πηγή (αυτόφωτη) (π.χ. ο ήλιος ή ένα αναμμένο κερί) είτε ως δευτερογενής πηγή (ετερόφωτη) που λαμβάνει φως από μια πρωτογενή πηγή και στη συνέχεια το ανακλά. Ο φωτισμός που τελικά δεχόμαστε εκφράζει τη λαμπρότητα της πηγής (Αξαρλή, 2001, σ. 175).

Το χρώμα είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για την αισθητική αντίληψη του χώρου. Το φως με το λευκό χρώμα (λευκό φως) είναι σύνθετο γιατί προέρχεται από τη μείξη διαφόρων χρωμάτων του φάσματος του ορατού φωτός. Σε κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε ορισμένου μήκους κύματος ακτινοβολία (Αξαρλή, 2001, σ. 181). Όταν το φυσικό φως προσπίπτει σε μία έγχρωμη επιφάνεια, αποκτά χρώμα. Το έγχρωμο φως περιγράφεται από τρεις όρους: την απόχρωση (*hue*), τη φωτεινότητα (*brightness*) και τον κορεσμό (*saturation*). Η απόχρωση περιγράφει το βασικό χρώμα,[5] η φωτεινότητα περιγράφει την υποκειμενική αίσθηση της λαμπρότητας και, τέλος, ο κορεσμός περιγράφει την ένταση της συγκεκριμένης απόχρωσης (Baker et al., 1993, σ. 2.6).

3.2.2 Φωτομετρικά μεγέθη

Η φωτομετρία είναι ένας κλάδος της οπτικής τεχνολογίας που ασχολείται με μετρήσεις σχετικές με το φως (Αραβαντινός, 2015). Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φυσικού φωτός σε έναν χώρο περιγράφονται από τα μεγέθη της φωτεινής ροής, της φωτεινής έντασης, της έντασης φωτισμού, της λαμπρότητας και της φωτεινότητας (Εικόνα 3.13).



Εικόνα 3.13 *Φωτομετρικά μεγέθη. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με αντικείμενα από το Publicdomainvectors.org, Public domain.*

Φωτεινή ροή (*light flux*) **ή φωτεινή ισχύς (Φ, μονάδα μέτρησης: Lumen, lm)** είναι η φωτεινή ενέργεια που αποδίδεται από μια φωτεινή πηγή (πρωτογενή ή δευτερογενή) και διέρχεται από ή προσπίπτει σε μια επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου (Αξαρλή, 2001, σ. 175). Είναι το αντίστοιχο της ισχύος ακτινοβολίας (δηλαδή Watt) που εκπέμπεται από κάποιο σώμα ή λαμβάνεται από κάποια επιφάνεια. Ο λόγος χρησιμοποίησης διαφορετικών μονάδων είναι η μεταβλητή ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού στα διάφορα μήκη κύματος. Η γνώση της επιτρέπει μια χονδροειδή εκτίμηση των επιπέδων του φυσικού φωτισμού σε κάποια επιφάνεια αν διαιρεθεί με το εμβαδό της επιφάνειας αυτής, με την προϋπόθεση ότι το σύνολο της ροής προσπίπτει στην επιφάνεια (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 31).

[5] Τα βασικά χρώματα στον φωτισμό είναι το κόκκινο (R), το πράσινο (G) και το μπλε (B), ενώ τα συμπληρωματικά που προκύπτουν από τη «μείξη» των βασικών είναι το κίτρινο (Y = R + G), το κυανό (C = G + B) και το ιώδες (M = B + R).

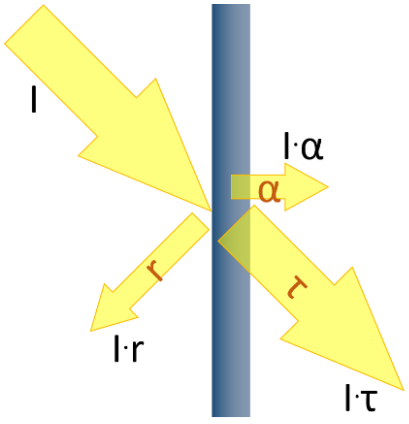
Επειδή το φως δεν εκπέμπεται με τον ίδιο τρόπο, π.χ. δύο πηγές μπορούν να αποδίδουν την ίδια ποσότητα φωτισμού, αλλά με διαφορετικό εύρος φωτεινής δέσμης, εισάγεται η έννοια της φωτεινής έντασης.

Η φωτεινή ένταση (*luminous intensity*) **(I, μονάδα μέτρησης: Candelas, cd)** είναι ο λόγος της φωτεινής ροής dΦ που εκπέμπεται από μια πηγή κατά μια ορισμένη διεύθυνση υπό στερεά γωνία dΩ, προς τη γωνία αυτή (I = dΦ / dΩ) (Baker et al., 1993, σ. GL12). Εξαρτάται από τη διεύθυνση και ορίζεται με τον λόγο της φωτεινής ροής (σε κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση) προς τη στερεά γωνία (η οποία «περιέχει» αυτή τη ροή) (Τσαγκρασούλης, 2015, σσ. 32-33). Η φωτεινή ένταση είναι καθοριστικό μέγεθος για τη δημιουργία των φωτομετρικών διαγραμμάτων φωτιστικών. Τέτοιου είδους διαγράμματα, μερικές φορές, χρησιμοποιούνται και για συστήματα σκίασης ή σε συστήματα φυσικού φωτισμού, ώστε να παρουσιαστεί π.χ. η ικανότητα ανακατανομής του φωτισμού. Προφανώς, λόγω της δυναμικής φύσης του φαινομένου (μεταβλητή θέση ήλιου, τιμή άμεσου φωτισμού και κατανομή λαμπρότητας στον ουρανό), ένα τέτοιου είδους φωτομετρικό διάγραμμα θα είναι χρονικά μεταβαλλόμενο και συνεπώς δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σε υπολογισμούς. Έτσι συνήθως χρησιμοποιείται π.χ. μια σταθερή κατανομή λαμπρότητας του ουρανού (π.χ. πλήρως νεφοσκεπής) ή μόνο ηλιακός φωτισμός με συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης στο σύστημα (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 33).

Φωτισμός επιφάνειας ή απλώς φωτισμός (*illumination ή illuminance*) **(E, μονάδα μέτρησης: Lux = Lumen/m^2)** είναι ο λόγος της φωτεινής ροής dΦ που προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια, προς το εμβαδόν dA της επιφάνειας αυτής (E = dΦ / dA) (Baker et al., 1993, σ. GL14· Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 34). Ο φωτισμός μιας επιφάνειας είναι ανάλογος προς την ένταση της φωτεινής πηγής που φωτίζει το σύστημα, αντιστρόφως ανάλογος προς το τετράγωνο της απόστασης της επιφάνειας από την πηγή και ανάλογος προς το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης (Αξαρλή, 2001, σ. 176). Ο φωτισμός επιφάνειας μετριέται με συσκευές μέτρησης που ονομάζονται φωτόμετρα (lux meters) (Στο ίδιο).

Η **λαμπρότητα ή φωτεινότητα** (*brightness ή luminance*) **(L, μονάδα μέτρησης: cd/m^2) της φωτεινής πηγής** είναι ο λόγος της φωτεινής έντασης I που εκπέμπεται από μια επιφάνεια κατά μια ορισμένη διεύθυνση προς το εμβαδόν A της επιφάνειας αυτής (L = I / A) (Baker et al., 1993, σ. GL13). Η λαμπρότητα σε κάποιο σημείο μιας επιφάνειας ορίζεται ως ο λόγος της φωτεινής ροής που «περιέχεται» σε στοιχειώδη στερεά γωνία ορισμένης διεύθυνσης προς το γινόμενο της στερεάς γωνίας επί το εμβαδό της προβαλλόμενης στοιχειώδους επιφάνειας που βρίσκεται στο σημείο μέτρησης (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 38).

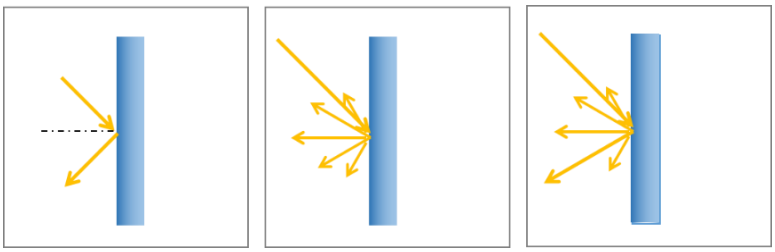
Σε κάποιον χώρο, αυτό που γίνεται αντιληπτό είναι η κατανομή λαμπρότητας και όχι η κατανομή φωτισμού, αφού ο φωτισμός είναι φωτεινή ροή που προσπίπτει σε επιφάνεια, ενώ για να «μετατραπεί» σε λαμπρότητα πρέπει να ανακλαστεί στην επιφάνεια. Συνεπώς στην παραπάνω μετατροπή υπεισέρχεται και η ανακλαστικότητα της επιφάνειας (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 38), η οποία ανήκει στις επιφανειακές ιδιότητες των υλικών (Κεφ. 5, παρ. 5.2), μαζί με την απορροφητικότητα και τη διαπερατότητα (τ). Για τα συμπαγή υλικά ισχύει: r + α = 1, ενώ για τα διαφανή και ημιδιαφανή υλικά ισχύει: r + α + τ = 1 (Εικόνα 3.14).



Εικόνα 3.14 *Ανακλαστικότητα (r), Απορροφητικότητα (α), Διαπερατότητα (τ) σε διαπερατή ή ημιδιαπερατή επιφάνεια. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Ο συντελεστής ανακλαστικότητας καθορίζει μόνο την ποσότητα του φωτός που ανακλάται, όχι όμως τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η ανάκλαση. Έτσι, ως προς την ανάκλαση, ορίζονται τρεις βασικές περιπτώσεις (Αξαρλή, 2001, σ. 177) (βλ. Εικόνα 3.15):

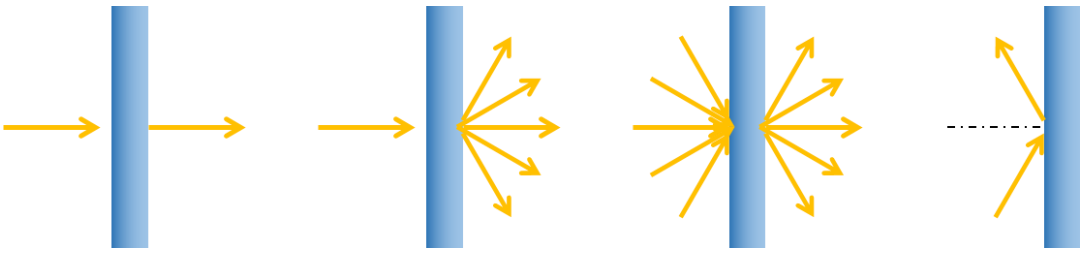
- Κατοπτρική ανάκλαση, στην οποία η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης και συναντάται για παράδειγμα σε πολύ στιλπνές επιφάνειες ή σε ανακλαστικούς υαλοπίνακες.
- Διάχυτη ανάκλαση, που συμβαίνει, για παράδειγμα σε μια αδρή ή ματ επιφάνεια.
- Μεικτή ανάκλαση, που αποτελεί συνδυασμό των δύο παραπάνω και συναντάται στα περισσότερα κοινά οικοδομικά υλικά.



Εικόνα 3.15 *Ανάκλαση: α. Κατοπτρική ανάκλαση, β. Διάχυτη ανάκλαση, γ. Μεικτή ανάκλαση. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με δεδομένα από Αξαρλή (2001), σ. 240.*

Ως προς τη διαπερατότητα, σε σχέση με την πρόσπτωση, διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις (Αξαρλή, 2001, σσ. 239-240) (Εικόνα 3.16):

- Κάθετη πρόσπτωση / Κάθετη διαπερατότητα (π.χ. διαφανής/απλός υαλοπίνακας).
- Κάθετη πρόσπτωση / Ημισφαιρική διαπερατότητα (π.χ. έγχρωμος υαλοπίνακας).
- Ημισφαιρική πρόσπτωση / Ημισφαιρική διαπερατότητα (π.χ. έγχρωμος υαλοπίνακας συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού).
- Ανάκλαση (π.χ. ανακλαστικός υαλοπίνακας).



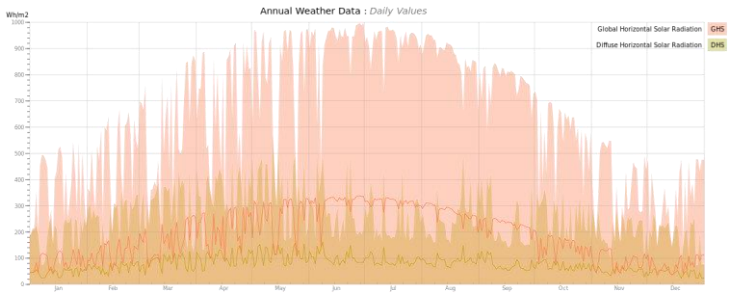
Εικόνα 3.16 *Διαφορετικές περιπτώσεις διαπερατότητας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη), με δεδομένα από Αξαρλή (2001), σ. 179.*

3.2.3 Φυσικός φωτισμός και δεδομένα κλίματος

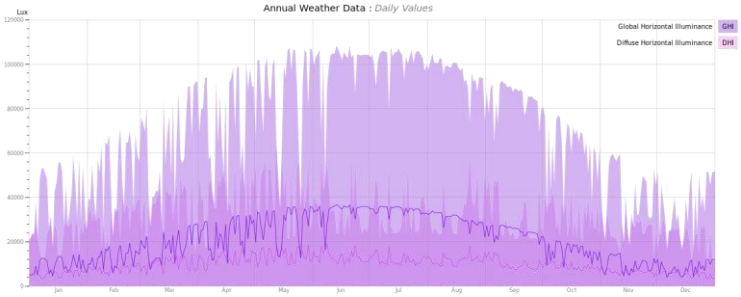
Ηλιακή ακτινοβολία και νέφωση

Ο φυσικός φωτισμός είναι απόρροια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη. Έτσι, εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και, ταυτόχρονα, από την εποχή του έτους, την ώρα της ημέρας και τις συνθήκες του ουρανού (Αξαρλή, 2001, σ. 204). Στην Εικόνα 3.17 παρουσιάζονται διαγράμματα ολικής και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, ολικού και διάχυτου φωτισμού και νέφωσης, με στόχο να γίνει κατανοητή η άμεση σχέση ηλιακής ακτινοβολίας, φυσικού φωτισμού και νεφοκάλυψης (Εικόνα 3.18).

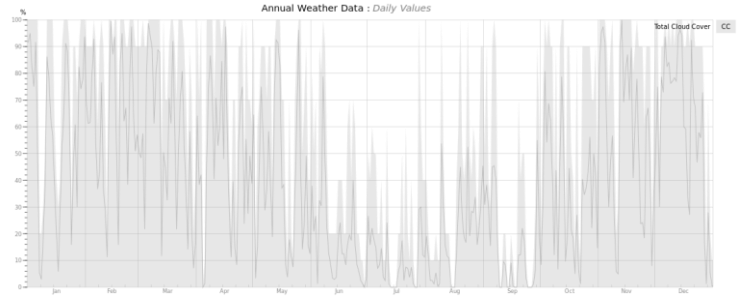
α.



β.



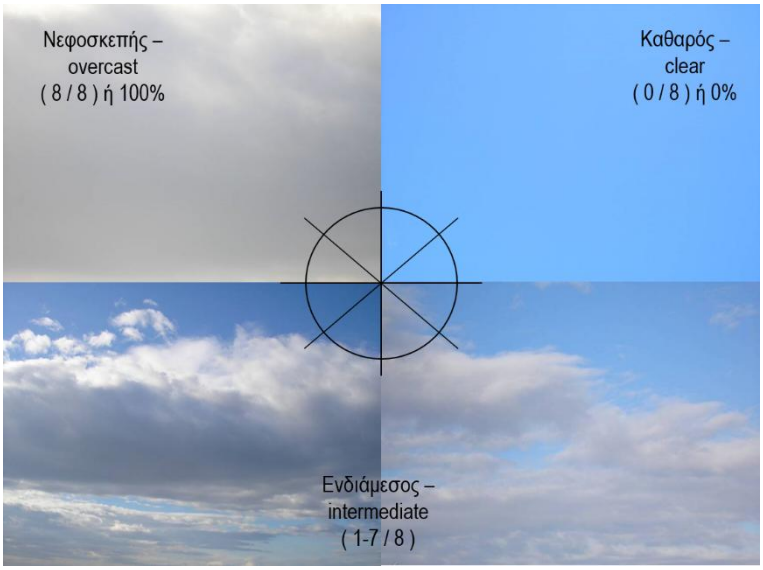
γ.



Εικόνα 3.17 *Κλιματικά δεδομένα και φυσικός φωτισμός.*
α. Ολική και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο (Global & Diffuse Horizontal Solar Radiation) (Wh/m²) (Wh/m²).
β. Ολικός και διάχυτος φωτισμός σε οριζόντιο επίπεδο (Global & Diffuse Horizontal Illumination) (Lux).
γ. Νεφοκάλυψη (Cloud cover) (0-100%).
Πηγή: Data view 2D by © Dr. Andrew J. Marsh, 2020, CC BY-NC-SA 4.0. Αρχείο κλιματικών δεδομένων: Athens 167160 (IWEC) via EnergyPlus Weather Data Download.

Τυπικοί ουρανοί

Η εκτίμηση της επίδρασης του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των κτιρίων προϋποθέτει σε διάφορα στάδια σχεδιασμού και τη γνώση του διαθέσιμου φωτισμού. Όχι μόνον ως ποσότητα, αλλά με γνώση της κατανομής λαμπρότητας στον ουράνιο θόλο, επιτρέποντας έτσι και την εκτίμηση της άμεσης ή έμμεσης συνεισφοράς των διαφόρων τμημάτων του ουρανού στον φωτισμό του εσωτερικού (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 45).

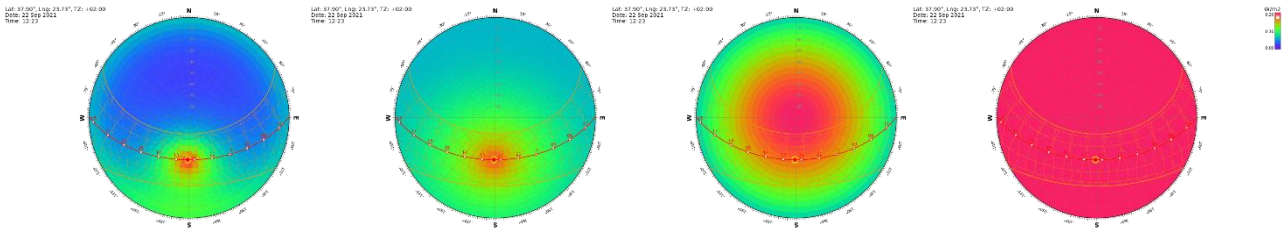


Εικόνα 3.18 *Τύποι ουρανών. Πηγή: Ιδία επεξεργασία με φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Λόγω της δυσκολίας εξέτασης εναλλακτικών σεναρίων σχεδιασμού σε πραγματικές συνθήκες, για την αρχική μελετητική προσέγγιση χρησιμοποιούνται «τυπικοί ουρανοί». Η δυσκολία οφείλεται σε πολλούς λόγους, για παράδειγμα, στο γεγονός ότι η κατανομή λαμπρότητας σε πραγματικό ουρανό μεταβάλλεται συνεχώς και συνεπώς τα αποτελέσματα μετρήσεων σε μακέτες δεν θα παραμένουν σταθερά. Επιπρόσθετα, χάνεται και η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών σεναρίων (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 45).

Για τον λόγο αυτόν, με βάση την κατανομή λαμπρότητας, έχουν οριστεί από τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού (Commission International d'Éclairage – CIE) 15 διαφορετικές τυπικές κατανομές λαμπρότητας (τυπικοί ουρανοί) (Εικόνα 3.19) σύμφωνα με το πρότυπο ISO 15469:2003 (CIE S011/E:2003) (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 47-48), οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι (CLEAR, 2004):

- Ο Καθαρός (Αίθριος) ουρανός (CIE Clear sky): Η λαμπρότητά του διαφοροποιείται με βάση τις γωνίες ηλιακού ύψους και αζιμουθίου. Είναι πιο λαμπρός κοντά στον ήλιο και πιο σκοτεινός απέναντί του, ενώ στον ορίζοντα η λαμπρότητά του είναι ανάμεσα στα δύο αυτά ακρότατα.
- Ο Ενδιάμεσος ουρανός (CIE Intermediate sky): Αποτελεί μια σχετικά πιο θολή παραλλαγή του καθαρού ουρανού. Ο ήλιος δεν είναι τόσο λαμπρός όσο στον καθαρό ουρανό και οι διαφοροποιήσεις στη λαμπρότητα δεν είναι πολύ δραστικές.
- Ο Νεφοσκεπής ουρανός (CIE Overcast sky): Η λαμπρότητά του διαφοροποιείται με τις γωνίες ηλιακού ύψους. Είναι τρεις φορές πιο λαμπερός στο ζενίθ σε σχέση με τον ορίζοντα. Χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του συντελεστή φυσικού φωτός (Daylight Factor) (βλ. παρακάτω παρ. 3.2.4), ενώ μπορεί να προσομοιωθεί και με τεχνητό ουρανό (artificial sky).
- Ο Ομοιόμορφος ουρανός (CIE Uniform sky): Η λαμπρότητά του είναι ομοιόμορφη και δεν διαφοροποιείται με βάση τις γωνίες ηλιακού ύψους και αζιμουθίου.



Εικόνα 3.19 *Απεικόνιση των τυπικών κατανομών λαμπρότητας (τυπικών ουρανών) της CIE. Πηγή: CIE Sky Generator by © Dr. Andrew J. Marsh, 2020, CC BY-NC-SA 4.0 Αρχείο κλιματικών δεδομένων: Athens 167160 (IWEC) via EnergyPlus Weather Data Download.*

Είναι προφανές ότι ο «τυπικός ουρανός» είναι επιθυμητό να αντιπροσωπεύει τις συνθήκες που επικρατούν σε έναν τόπο (π.χ. ο νεφοσκεπής ουρανός επικρατεί σε βορειότερες περιοχές). Συνήθως, όμως, τα κτίρια εξετάζονται σε ένα εύρος συνθηκών, για παράδειγμα: α) σε συνθήκες πλήρως νεφοσκεπούς ουρανού, β) σε συνθήκες καθαρού (αίθριου) ουρανού με τον ήλιο στη χαμηλότερη (χειμερινό ηλιοστάσιο) και στην ψηλότερη (θερινό ηλιοστάσιο) τροχιά του. Με αυτόν τον τρόπο, ελέγχονται τα όρια των συνθηκών στις οποίες θα βρεθούν (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 46).

3.2.4 Φωτισμός εσωτερικών χώρων

Στο εσωτερικό των κτιρίων εισέρχεται φως από τρεις πηγές (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 45):

- από τον ήλιο,
- από τον ουρανό και
- με ανάκλαση από το έδαφος/εξωτερικά εμπόδια.

Έτσι, η ποσότητα του φυσικού φωτός σε ένα σημείο εξαρτάται από (McNicholl & Lewis, 1994, σ. 6) (Εικόνα 3.20):

- το φως που προέρχεται απευθείας από τον ουρανό (SC – Sky Component),
- το φως που προέρχεται από ανάκλαση σε εξωτερικές επιφάνειες (ERC – Externally Reflected Component),
- το φως που προέρχεται από ανάκλαση σε εσωτερικές επιφάνειες (IRC – Internally Reflected Component).

Τα παραπάνω στοιχεία συνδυάζονται στον Παράγοντα ή Συντελεστή Φυσικού Φωτισμού (Daylight factor – Df), που αποτελεί έναν από τους πλέον χρησιμοποιούμενους (και παλαιότερους) δείκτες (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 59). Είναι ο λόγος της έντασης φωτισμού E_{int} που δέχεται ένα σημείο του εσωτερικού χώρου προς την ένταση φωτισμού E_{ext} που δέχεται ένα εξωτερικό οριζόντιο επίπεδο από τον ανεμπόδιστο ουράνιο θόλο (Baker et al., 1993, σ. GL33). Ορίζεται από την παρακάτω σχέση (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 59):

$$D_f = \frac{E_{int}}{E_{ext}} \times 100\% \tag{3.1}$$

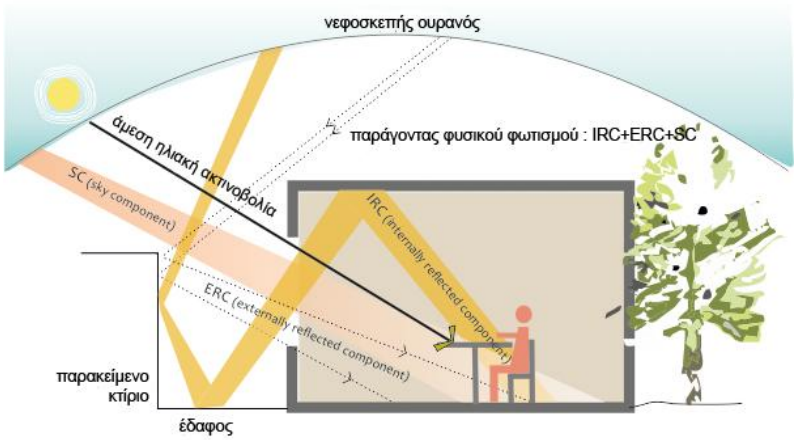
όπου:

D_f : ο Παράγοντας Φυσικού Φωτισμού (ΠΦΦ)

E_{int} : η τιμή φωτισμού στο εσωτερικό κάποιου χώρου, σε Lux

E_{ext} : η τιμή του φωτισμού νεφοσκεπούς ουρανού σε οριζόντιο επίπεδο στο εξωτερικό, σε Lux

Ο Παράγοντας Φυσικού Φωτισμού χρησιμοποιείται υπό την προϋπόθεση ότι ο ουρανός είναι πλήρως νεφοσκεπής και φυσικά χωρίς την ύπαρξη σημαντικών εμποδίων, τα οποία μειώνουν την τιμή του εξωτερικού φωτισμού. Καθώς στον νεφοσκεπή ουρανό υπάρχει αζιμουθιακή συμμετρία στην κατανομή λαμπρότητας, οι τιμές του ΠΦΦ δεν εξαρτώνται ούτε από τον προσανατολισμό του χώρου ούτε από τον χρόνο. Επειδή ο ΠΦΦ είναι ένα πηλίκο, η επίτευξη μιας συγκεκριμένης τιμής φωτισμού στο εσωτερικό εξαρτάται από την τιμή φωτισμού που υφίσταται στο εξωτερικό και η οποία προφανώς είναι διαφορετική ανά περιοχή (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 59).



Εικόνα 3.20 *Ο συντελεστής φυσικού φωτισμού και οι παράγοντες που τον διαμορφώνουν. Πηγή: Μετάφραση στα Ελληνικά από Daylight factor via USAID PACE-D, U.S. Agency for International Development (USAID) Partnership to Advance Clean Energy-Deployment (PACE-D), Public Domain.*

3.3 Άνεμος

Ο άνεμος αποτελεί το δεύτερο πιο σημαντικό, μετά τον ήλιο, κλιματικό στοιχείο για τον βιοκλιματικό σχεδιασμό και ίσως εκείνο που καθορίζει –συνήθως συνδυαζόμενο και με άλλες κλιματικές παραμέτρους– τη θερμική άνεση στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων και στους υπαίθριους χώρους της πόλης. Η κατανομή και τα χαρακτηριστικά των ανέμων σε μια περιοχή σχετίζονται με διάφορους παράγοντες, τοπικούς και παγκόσμιους. Οι πιο καθοριστικοί είναι η εποχιακή κατανομή της ατμοσφαιρικής πίεσης σε παγκόσμια κλίμακα, η περιστροφή της Γης, οι ημερήσιες εναλλαγές θέρμανσης και δροσισμού της γης και της θάλασσας και, τέλος, η τοπογραφία μιας περιοχής (Givoni, 1969, σ. 8).

3.3.1 Χαρακτηριστικά

Τα βασικά χαρακτηριστικά του ανέμου που αξιολογούνται στον βιοκλιματικό σχεδιασμό των κτιρίων είναι η διεύθυνση, η ταχύτητα και η θερμοκρασία. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνονται στα κλιματικά δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών. Επειδή, όμως, τα στοιχεία αυτά συλλέγονται σε αεροδρόμια που είναι χώροι ανοιχτοί χωρίς εμπόδια, πρέπει να αξιολογηθούν σε σχέση με την περιοχή μελέτης.

Πιο συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά της ροής του ανέμου μιας περιοχής διαμορφώνονται από τρεις βασικούς παράγοντες (Brown & DeKay, 1985, σ. 26):

α. Η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη κοντά στην επιφάνεια της Γης απ’ ό,τι στα ψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας λόγω του φαινομένου της τριβής. Άρα τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους επηρεάζουν την ταχύτητα του ανέμου. Για τον ίδιο λόγο, οι περιοχές ή τα επίπεδα των κτιρίων που βρίσκονται σε μεγαλύτερο υψόμετρο από την περιοχή καταγραφής του μετεωρολογικού σταθμού του αεροδρομίου θα έχουν μεγαλύτερες ταχύτητες από αυτές που υποδεικνύουν τα κλιματικά δεδομένα.

β. Η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται, αλλά δεν αλλάζει. Ενώ ο άνεμος σε ευρύτερη κλίμακα έχει συγκεκριμένη διεύθυνση, η γεωμετρια φυσικών και δομημένων στοιχείων μπορεί σημειακά να τον εκτρέψει. Η ροή του μπορεί να παρομοιαστεί με αυτήν ενός υγρού: όταν το υγρό συναντά ένα εμπόδιο, η ροή του δεν αντιστρέφεται, αλλά συνεχίζεται γύρω ή πάνω από αυτό. Είναι κατανοητό, λοιπόν, ότι μέσα στον πυκνό αστικό ιστό, όπου οι πολεοδομικές χαράξεις και η γεωμετρία (ύψη και πυκνότητα) των κτιρίων ποικίλλουν, η ροή του ανέμου που έρχεται από μια καθορισμένη διεύθυνση μεταβάλλεται. Τα διάφορα εμπόδια δεν μεταβάλλουν, όμως, μόνο τη διεύθυνση, αλλά και την ταχύτητα του ανέμου. Όταν συναντά ένα εμπόδιο (κτίριο ή λόφο), δημιουργείται μια ζώνη υψηλής πίεσης με μείωση της ταχύτητας στην προσήνεμη πλευρά και μια χαμηλής πίεσης με μικρή ταχύτητα στην υπήνεμη πλευρά του εμποδίου. Αντίθετα, η ταχύτητα αυξάνεται στις πλευρές ή πάνω από το εμπόδιο.

γ. Ο άνεμος κινείται από περιοχές υψηλής πίεσης σε περιοχές χαμηλής. Όταν ο αέρας θερμανθεί, παρατηρείται μείωση της πίεσής του και κινείται προς τα ψηλότερα στρώματα. Τότε, οι ψυχρότερες μάζες από την περιοχή με υψηλότερη πίεση κινούνται προς αυτή τη διεύθυνση για να καταλάβουν το κενό που δημιουργείται. Δηλαδή η διεύθυνση του ανέμου είναι από την ψυχρότερη προς τη θερμότερη περιοχή.

Από τα παραπάνω είναι κατανοητό ότι ο άνεμος δρα ως ρευστό. Προσομοιάζοντάς τον, λοιπόν, με ένα υγρό, μπορεί να προσομοιαστεί και η κίνησή του, παρά το γεγονός ότι δεν είναι ορατός. Ακόμα, τα παραπάνω στοιχεία αξιολογούνται σε συνδυασμό με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φυσικού και του δομημένου περιβάλλοντος, τη γεωμορφολογία και τη γειτνίαση με στοιχείο νερού. Στις κοιλάδες, την ημέρα ο άνεμος που ζεσταίνεται από τον ήλιο κινείται ανοδικά, ενώ τη νύχτα, η διεύθυνση αντιστρέφεται, διότι η επιφάνεια της Γης που έχει κρυώσει ψύχει τον άνεμο που γίνεται βαρύτερος. Συνέπεια αυτού είναι και η πλήρωση των κοιλοτήτων, που δημιουργούνται από την τοπογραφία ή τη φύτευση, από τα καθοδικά αυτά ρεύματα. Σε περιοχές που βρίσκονται δίπλα στη θάλασσα ή σε λίμνες, κατά τη διάρκεια της ημέρας ο άνεμος κατευθύνεται προς την ξηρά, η επιφάνεια της οποίας είναι θερμότερη από εκείνη του νερού (φαινόμενο

θαλάσσιας αύρας). Τη νύχτα που η ξηρά ψύχεται γρηγορότερα από το νερό, η κίνηση αντιστρέφεται (βλ. Κεφ. 2, παρ. 2.6).

Η θερμοκρασία του αέρα σχετίζεται με την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία των επιφανειών με τις οποίες έρχεται σε επαφή.

Η αίσθηση του ανέμου εξαρτάται από την ταχύτητά του σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία του και τη σχετική υγρασία. Με την κίνηση του αέρα, ο άνθρωπος αποβάλλει θερμότητα με μεταφορά, καθώς και με εξάτμιση. Όσο πιο δυνατός είναι ο άνεμος, τόσο πιο γρήγορος είναι ο δροσισμός και όσο πιο χαμηλή η θερμοκρασία, τόσο πιο μεγάλη η επίδραση του ανέμου στην αποβολή θερμότητας.

Ο άνεμος όπως και ο ήλιος είναι μια πηγή η οποία, ανάλογα με την εποχή, μπορεί να συμβάλλει θετικά ή αρνητικά στη διαμόρφωση του εσωκλίματος και, κατ' επέκταση, στη θερμική άνεση του ανθρώπου. Κατά την ψυχρή περίοδο, ο άνεμος συμβάλλει στις θερμικές απώλειες του κελύφους και η παρουσία του εντείνει την αίσθηση ψύχους στον άνθρωπο. Αντίθετα, κατά τη θερμή περίοδο ο άνεμος, όταν η θερμοκρασία του είναι μικρότερη από 30^{o}C, συμβάλλει στην αίσθηση δροσισμού, καθώς και στην αποβολή θερμότητας από έναν χώρο μέσω διαφόρων μορφών αερισμού (βλ. Κεφ. 8).

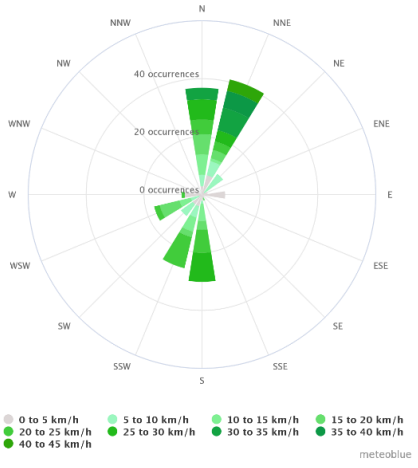
3.3.2 Διαγράμματα ανέμου – Ροδογράμματα

Η απεικόνιση των χαρακτηριστικών του ανέμου για μια περιοχή γίνεται με διαγράμματα που ονομάζονται, κατά περίπτωση, ανεμολόγια, ανεμόρροδα ή ρόδακες ανέμου. Πρόκειται για ένα γραφικό εργαλείο που χρησιμοποιείται από τους μετεωρολόγους για να δώσουν μια συνοπτική εικόνα του τρόπου με τον οποίο η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου κατανέμονται τυπικά σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Ιστορικά, τα ροδογράμματα ήταν πρόγονοι του ρόδακα πυξίδας (compass rose), καθώς δεν υπάρχει διαφοροποίηση ανάμεσα στα τέσσερα σημεία του ορίζοντα και στη διεύθυνση του ανέμου που πνέει από εκεί. Με τη χρήση ενός πολικού συστήματος συντεταγμένων, απεικονίζεται η συχνότητα των ανέμων που πνέουν για μια χρονική περίοδο για κάθε διεύθυνση, ενώ με διαφορετικό τρόπο (π.χ. χρώμα) απεικονίζονται οι διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (συνήθως ως εύρος). Η διεύθυνση με το μεγαλύτερο μήκος δείχνει την επικρατούσα διεύθυνση ανέμου («Wind rose», 2021).

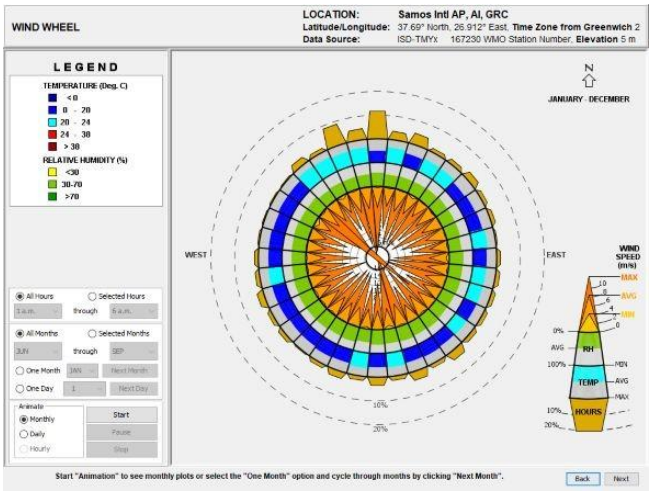
Τα ροδογράμματα (ρόδακες ανέμου, *wind wheels*) εκφράζουν γραφικά τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Αποτελούν ένα συνοπτικό εργαλείο με πληροφορίες για τη συχνότητα και τα χαρακτηριστικά του, που αξιοποιείται στον βιοκλιματικό σχεδιασμό δίνοντας τα στοιχεία για τις επικρατέστερες συνθήκες ανέμου στην περιοχή μελέτης.

Υπάρχουν απλούστερα και πιο πολύπλοκα ροδογράμματα. Τα πιο απλά (Εικόνα 3.21.α) απεικονίζουν μόνο τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου και αφορούν συνήθως την περίοδο ενός έτους. Τα πιο σύνθετα (Εικόνα 3.21.β) συνδυάζουν τη διεύθυνση και την ταχύτητα, με επιπλέον στοιχεία, όπως η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του ανέμου, ενώ μπορεί, με κατάλληλα λογισμικά ή διαδικτυακές εφαρμογές, να αφορούν συγκεκριμένες περιόδους του έτους ή/και της ημέρας.

α.



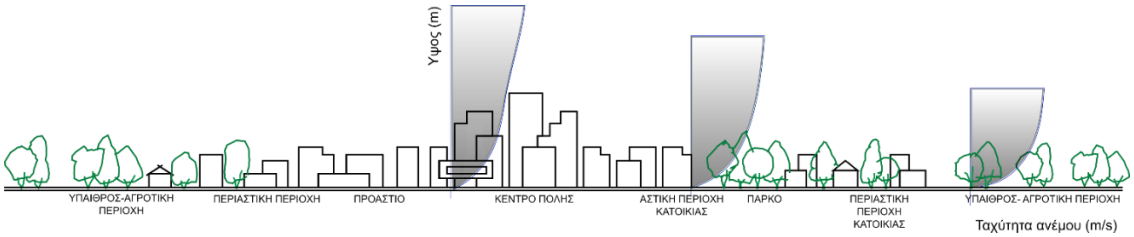
β.



Εικόνα 3.21 *Ροδόγραμμα/Ρόδακας αερισμού (wind wheel).*
α. Ετήσιο ροδόγραμμα με διεύθυνση και ταχύτητα ανέμων. Πηγή: Ανεμολόγιο Αθήνα by meteoblu, CC BY-ND.
β. Ετήσιο, αναλυτικό ροδόγραμμα, με διεύθυνση και ταχύτητα ανέμων, θερμοκρασία αέρα και σχετική υγρασία. Πηγή: Developed by the UCLA Energy Design Tools Group, Climate Consultant (v.6.0), © Regents University © SBSE 2014-2018.

3.3.3 Ροή ανέμου σε επίπεδο πόλης

Όπως προαναφέρθηκε (βλ. Κεφ. 2, παρ. 2.8.1), σε επίπεδο πόλης, η ροή και η κίνηση των ανέμων παρουσιάζονται σημαντικά διαφοροποιημένες σε σχέση με την ανοιχτή ύπαιθρο. Ο ελεύθερος, ανεμπόδιστος άνεμος πάνω από την επιφάνεια της γης ονομάζεται γεωστροφικός άνεμος, με το γεωστροφικό ύψος να ποικίλλει από περίπου 275 μ. (ανοιχτή ύπαιθρος, μικρή τραχύτητα) σε περίπου 500 μ. (κέντρο πόλης, μεγάλη τραχύτητα), ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας της γης (Kofoed & Gaardsted, 2004, σ. 7) (Εικόνα 3.22). Στο επίπεδο κυκλοφορίας, η ροή του ανέμου είναι αποτέλεσμα του σχεδιασμού των δρόμων και των υπαίθριων χώρων (παράλληλα, κάθετα ή υπό γωνία σε σχέση με τους επικρατούντες ανέμους) και κυρίως της γεωμετρίας των αστικών υπαίθριων χώρων (ύψη κτιρίων και πλάτος χώρου, λόγος H/W) (Βλ. Κεφ. 2, παρ. 2.8.1).



Εικόνα 3.22 *Διαφορετικές ταχύτητες ανέμου σε αστικές, περιαστικές και αγροτικές περιοχές, σε σχέση με το ύψος των κτιρίων, που καθορίζει την τραχύτητα της επιφάνειας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη), με δεδομένα από Baumbach (1991).*

Η εκτίμηση της ροής και της κατανομής του ανέμου σε έναν αστικό ανοιχτό χώρο μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους, που περιλαμβάνουν (Kofoed & Gaardsted, 2004, σ. 8):

- μετρήσεις (επιτόπου στην πόλη ή υπό κλίμακα σε αεροσύραγγα),
- προσομοιώσεις μέσω υπολογιστικού μοντέλου σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με λογισμικά Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics – CFD).

Κατά την αξιολόγηση των συνθηκών ανέμου στους υπαίθριους χώρους της πόλης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μια σειρά παραμέτρων (Kofoed & Gaardsted, 2004, σ. 9):

- Οι επικρατούντες άνεμοι της ευρύτερης περιοχής και η έκθεση του συγκεκριμένου χώρου σε αυτούς ή η προστασία του από αυτούς.
- Ο τύπος του χώρου (δρόμος, πλατεία), το σχήμα του και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δομημένου περιβάλλοντος της γύρω περιοχής, κυρίως τα ύψη και η πυκνότητα των γύρω κτιρίων.
- Το είδος της χρήσης του χώρου (πως χρησιμοποιείται, από ποιους χρήστες, ποιες ώρες της ημέρας και ποια περίοδο του έτους κ.λπ.).

Λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει ο άνεμος ως κλιματικό στοιχείο, κάθε υπαίθριος χώρος πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ειδική περίπτωση (Εικόνα 3.23). Ωστόσο, οι Kofoed & Gaardsted (2004, σ. 10), παραθέτουν μια σειρά γενικών οδηγιών ως προς τις συνθήκες ανέμου που επικρατούν στους αστικούς υπαίθριους χώρους, και αφορούν τη σχέση τους με (Στο ίδιο):

- πολύ ψηλά, παρακείμενα κτίρια,
- μεγάλου μήκους ευθύγραμμους δρόμους,
- περιμετρικά περάσματα,
- τις διαστάσεις του χώρου (μήκος και πλάτος) σε σχέση με το ύψος των γύρω κτιρίων,
- στοιχεία προστασίας (ανεμοφράκτες).

Τα κτίρια που έχουν αρκετά μεγαλύτερο ύψος από το μέσο ύψος των κτιρίων της γύρω περιοχής μπορούν να προκαλέσουν δυσάρεστα έντονο κατακόρυφο ρεύμα αέρα (κατά μήκος των όψεων με δυνατή ροή προς τα κάτω) και σε υψηλής ταχύτητας άνεμο γύρω από τις γωνίες τους. Για τον λόγο αυτόν, πρέπει να αποφεύγεται ο σχεδιασμός ανοιχτών χώρων σε επαφή με αυτά. Όσο ψηλότερο είναι το κτίριο, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται έντονες συνθήκες ανέμου γύρω από τη βάση και τις γωνίες του κτιρίου και οριζόντια ροή με κατεύθυνση από το απέναντι κτίριο προς την κύρια κατεύθυνση του ανέμου. Τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν για την αποφυγή του φαινομένου περιλαμβάνουν τη χαμηλότερη δόμηση περιμετρικά της πλατείας. Εάν αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί, τότε μπορούν να προστεθούν κατασκευαστικά στοιχεία, π.χ. βεράντες. Τα γωνιακά φαινόμενα είναι δύσκολο να αποφευχθούν, αλλά σε επίπεδο πεζών μπορούν να μειωθούν με τη χρήση ανεμοφρακτών (Kofoed & Gaardsted, 2004, σ. 10).

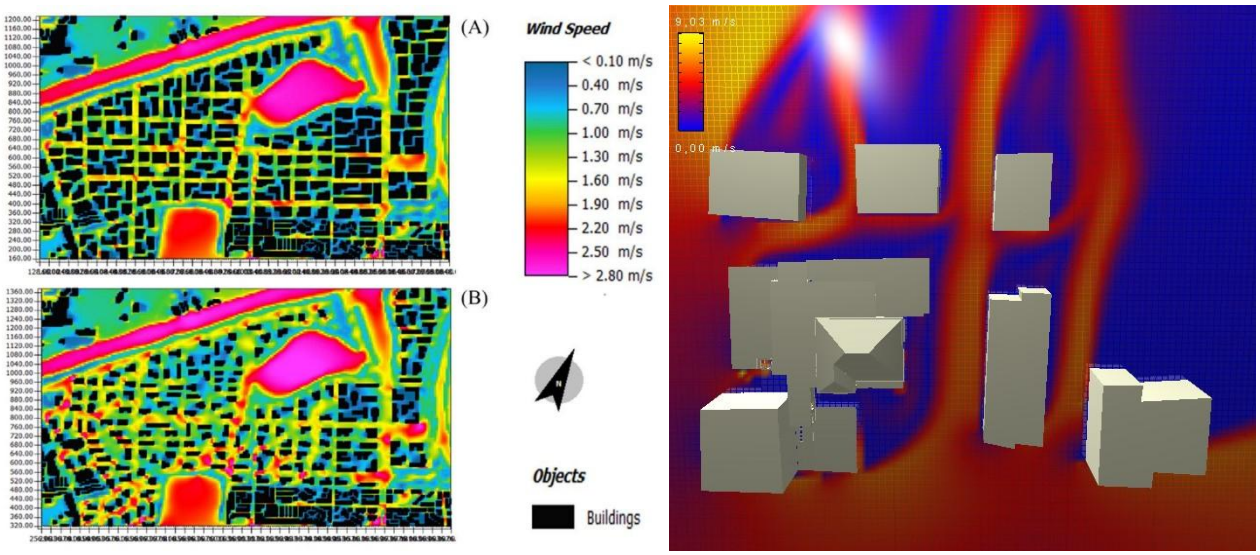
Όπως προαναφέρθηκε (βλ. Κεφ. 2, παρ. 2.8.1), όταν ένας αστικός δρόμος είναι παράλληλος προς τη διεύθυνση του ανέμου, δημιουργείται *φαινόμενο τούνελ* (*channeling*), το οποίο επιταχύνει τον άνεμο, με αποτέλεσμα η ταχύτητά του να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την ανοιχτή ύπαιθρο (Oke, 1995, σ. 267). Το φαινόμενο παρατηρείται σε δρόμους μακρύτερους από 100-125 μ. (Kofoed & Gaardsted, 2004, σ. 10). Τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν για τον περιορισμό του φαινομένου είναι: η αποφυγή ανοιχτής σύνδεσης μεταξύ του χώρου και του δρόμου, η αποφυγή κατασκευής δρόμων με τον κύριο άξονα στην κυρίαρχη κατεύθυνση του ανέμου, η δημιουργία κοντύτερων δρόμων (σε νέες περιοχές), η διάσπαση της γραμμικότητας του δρόμου (καμπύλες διατάξεις δεν συνιστώνται καθώς παρουσιάζουν χαμηλή αντίσταση στον άνεμο) και η φύτευση του δρόμου, ώστε να αυξάνεται η αντίσταση στον άνεμο και να μειώνεται η ταχύτητά του (Στο ίδιο).

Φαινόμενο τούνελ μπορεί να δημιουργηθεί και σε περάσματα ανάμεσα ή κάτω από κτίρια που οδηγούν σε ανοιχτούς χώρους. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται δραματικά όταν συνδυάζεται με ψηλά κτίρια ή μακριούς ευθύγραμμους δρόμους (Στο ίδιο).

Οι διαστάσεις των ανοιχτών αστικών χώρων μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο, ώστε ο αέρας να ρέει κυρίως πάνω από τον χώρο και όχι μέσα σε αυτόν, χωρίς να επηρεάζονται οι συνθήκες στο επίπεδο

των πεζών. Αυτό αποκαλείται *φαινόμενο πλέγματος* (*mesh effect*) και ισχύει και σε χώρους εκτός των τετραγώνων και των ορθογωνίων. Υπάρχει μια περίπλοκη σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών του ανέμου στο επίπεδο των πεζών και του μήκους (L) και πλάτους (W) του χώρου, του ύψους των περιμετρικών κατασκευών (H) και της διεύθυνσης του ανέμου. Σημαντικός παράγοντας είναι η σχέση μεταξύ της επιφάνειας του αστικού χώρου και του ύψους των κτιρίων στα όριά του (ή άλλων κατασκευών, όπως ανεμοφράχτες), που μπορεί να εκφραστεί ως: Επιφάνεια χώρου (L x W) / Ύψος ορίων $(H)^2$ = K, όπου το K είναι μια μονοδιάστατη σταθερά που δεν πρέπει να υπερβαίνει το 6[6] (Στο ίδιο). Τέλος, ως προς τα ανοίγματα της πλατείας, είναι σημαντικό το πλάτος τους να μην είναι μεγαλύτερο από 25% του μήκους της περιμέτρου του χώρου[7] και να μη βρίσκονται στην κυρίαρχη διεύθυνση του ανέμου (Στο ίδιο).

Τα στοιχεία προστασίας από τον άνεμο (ανεμοφράχτες) στοχεύουν στην προστασία της ζώνης των πεζών από υψηλές ταχύτητες και τύρβη, και μπορούν να είναι είτε συμπαγείς κατασκευές (κτίρια, τοίχοι κ.λπ.) είτε διαπερατές κατασκευές (βλάστηση, ανοιχτοί φράχτες κ.λπ.). Οι συμπαγείς κατασκευές προσφέρουν καλή ανεμοπροστασία κοντά στην κατασκευή, όμως τείνουν να δημιουργήσουν υψηλές ταχύτητες και τύρβη σε κάποια απόσταση από αυτές. Για τον λόγο αυτόν, σε πολλές περιπτώσεις είναι προτιμότερη η χρήση διαπερατών ανεμοφραχτών, που μπορεί να είναι είτε από τεχνητά στοιχεία είτε από στοιχεία βλάστησης. Στα τεχνητά στοιχεία, έχει σημασία τα ανοίγματα (οπές) να κατανέμονται σε όλη την επιφάνεια, έτσι ώστε η κατανομή του ανέμου να είναι πιο ομαλή σε σχέση με τα λίγα και μεγάλα ανοίγματα. Τα στοιχεία βλάστησης είναι πολύ αποτελεσματικά, καθώς τα κλαδιά και τα φυλλώματα επιβραδύνουν τον άνεμο χωρίς να δημιουργούν πολλούς στροβιλισμούς. Ταυτόχρονα, ο συνδυασμός διαφορετικών στοιχείων βλάστησης, για παράδειγμα, δέντρων και θάμνων, παρέχει τη δυνατότητα για ανεμοπροστασία σε διαφορετικά ύψη από το έδαφος (Στο ίδιο).



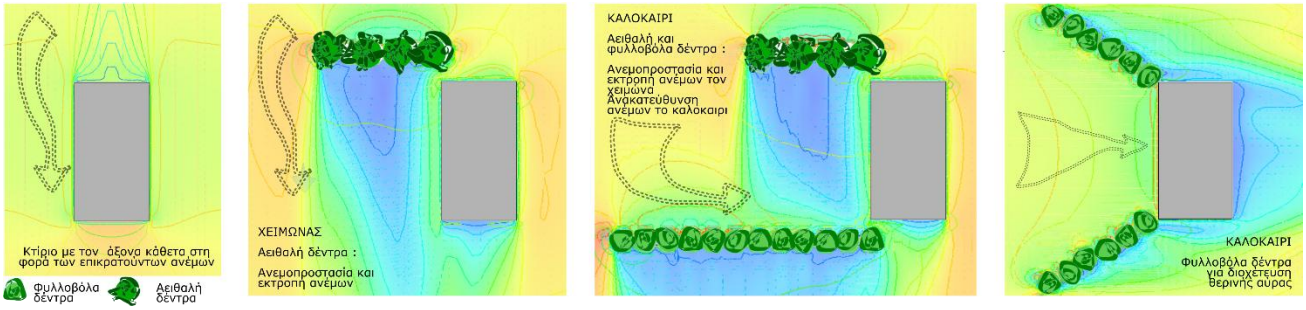
Εικόνα 3.23 *Αναλύσεις CFD (Computational Fluid Dynamics) για τη ροή του ανέμου στην πόλη. Πηγές: α. Distribution of simulated wind speeds. © 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. Open access article, CC BY και β. Ε. Αλεξάνδρου, υλικό από το προσωπικό ερευνητικό αρχείο.*

[6] Έστω ότι πρέπει να σχεδιαστεί μια πλατεία στην περίμετρο της οποίας υπάρχουν κτίρια ύψους 18 m (άρα H = 18 m). Με δεδομένη τη μέγιστη τιμή της σταθεράς K, προκύπτει ότι η επιφάνεια του χώρου θα είναι: 18^2 x 6 = 1944 m^2. Για μια τετράγωνης κάτοψης πλατεία, προκύπτουν πλευρές L = W = 44 m.

[7] Για την παραπάνω πλατεία, η περίμετρος θα είναι 4 x 44 m = 176 m. Το 25% της περιμέτρου θα είναι 176 m x 0,25 = 44 m, το οποίο ισόποσα κατανεμημμένο στις 4 πλευρές τις πλατείας δίνει: 44 m / 4 = 11 m άνοιγμα ανά πλευρά (περ. ίσο με το μέσο πλάτος ενός δρόμου).

3.3.4 Ροή ανέμου σε επίπεδο οικοπέδου

Όπως και στους ανοιχτούς υπαίθριους χώρους, έτσι και σε επίπεδο οικοπέδου, η ροή του ανέμου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των επικρατούντων ανέμων, σε συνδυασμό με τη μορφή του άμεσου δομημένου και φυσικού περιβάλλοντος (βλ. παραπάνω παρ. 3.3.3). Η χωροθέτηση στοιχείων βλάστησης ή τεχνητών στοιχείων σε απόσταση ή σε επαφή με το κτίριο μπορεί να αποτρέψει ή να διευκολύνει τη διείσδυση του ανέμου μέσα στο κτίριο (Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, 2017, σ. 93), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.24. Η προστασία από τους ανέμους απαιτείται κατά την ψυχρή χειμερινή περίοδο, καθώς μειώνει τις θερμικές απώλειες, ενώ η εκμετάλλευσή τους συμβάλλει στον παθητικό αερισμό και δροσισμό κατά τη θερμή, θερινή περίοδο (βλ. Κεφ. 8, παρ. 8.3.1). Η ανεμοπροστασία μπορεί να επιτευχθεί με τεχνητά στοιχεία ή με στοιχεία βλάστησης, όπως είναι τα αειθαλή δέντρα και οι θάμνοι που διατηρούν το φύλλωμά τους κατά τη διάρκεια του χειμώνα, εμποδίζοντας ή εκτρέποντας τη ροή του ανέμου. Για την εκμετάλλευση των ανέμων, είναι δυνατή η διοχέτευσή τους προς το κτίριο και τα ανοίγματά του με τεχνητά στοιχεία ή/και στοιχεία βλάστησης, κατά περίπτωση φυλλοβόλα ή/και αειθαλή (Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, 2017, σ. 93).

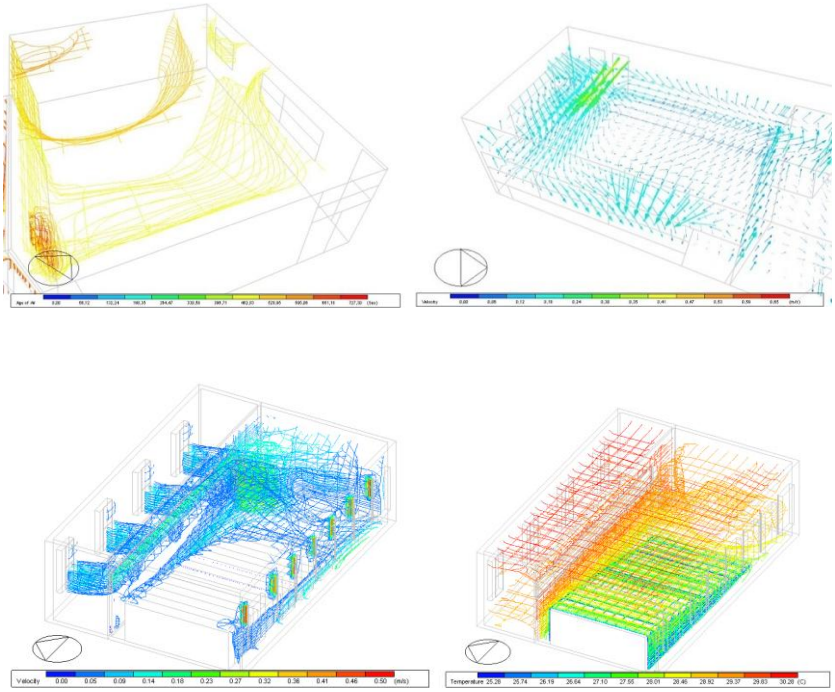


Εικόνα 3.24 *Χρήση στοιχείων βλάστησης με στόχο την ανεμοπροστασία κατά τη χειμερινή περίοδο και τον αερισμό κατά τη θερινή. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και προσομοίωση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη), με δεδομένα από Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, 2017, σ. 93.*

3.3.5 Ροή ανέμου στο εσωτερικό των κτιρίων

Στο εσωτερικό των κτιρίων, η ροή του ανέμου καθορίζεται από τη θέση και το μέγεθος των ανοιγμάτων σε σχέση με τη διεύθυνση των επικρατούντων ανέμων και τη διαφορά των πιέσεων που δημιουργούνται στο κέλυφος του κτιρίου και τις θερμοκρασιακές διαφορές, σε συνδυασμό με τον σχεδιασμό της κάτοψης (Εικόνα 3.25). Για τον αποτελεσματικό αερισμό των χώρων καλό είναι να υπάρχουν ανοίγματα σε περισσότερους τοίχους και κατά προτίμηση σε τοίχους αντιμέτωπους, έτσι ώστε η ροή του αέρα να ακολουθεί κυκλική κίνηση (Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, 2017, σ. 93). Η διάταξη των εσωτερικών διαχωριστικών πετασμάτων μπορεί να αλλάξει την κατεύθυνση του αέρα, οδηγώντας τον διαμέσου διαφορετικών χώρων της κάτοψης ή απομονώνοντας συγκεκριμένους χώρους (Στο ίδιο, σ. 94).

Ως προς την ταχύτητα του ανέμου, αυτή εξαρτάται τόσο από τη θέση καθ' ύψος των ανοιγμάτων εισόδου και εξόδου όσο και από τα μεγέθη τους. Ανάλογα με το είδος και τη χρήση του κτιρίου και τις απαιτήσεις λειτουργίας του, προτείνεται τα ανοίγματα να έχουν παρόμοιο μέγεθος και διαφορετική θέση καθ' ύψος, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται διαγώνια ροή του αέρα που θα διέρχεται από το επίπεδο διαβίωσης (Στο ίδιο, σ. 94).



Εικόνα 3.25 *Αναλύσεις CFD (Computational Fluid Dynamics) για τη ροή του ανέμου σε εσωτερικούς χώρους. Πηγή: Υλικό από προσωπικό ερευνητικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου και Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Baker, N. Fanchiotti, A. & Steemers, K. (Eds). (1993) *Daylighting in Architecture. A European Reference Book*. Commission of the European Communities, Directorate-General XII for Science, Research and Development.

Baumbach, G. (1991). *Luftreinhaltung*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-662-08426-7

Brown, G.Z. & DeKay, M. (1985). *Sun, wind and Light- Architectural design strategies*. John Wiley & Sons

Buckley, S. (1979). *Sun up to Sun down. Understanding solar energy*. McGraw-Hill Book Company.

CIE Sky Generator by © Dr. Andrew J. Marsh, 2020, CC BY-NC-SA 4.0

CLEAR, Comfortable Low Energy Architecture (2004). *Sky types.* Διαθέσιμο στο: https://www.new-learn.info/packages/clear/visual/daylight/sun_sky/sky_types.html, GFDL.

Commission International d' Eclairage – CIE. http://www.cie.co.at/

Engineering ToolBox (2008). *Solar Radiation – Daily Surface Energy*. Retrieved 2021, October 14, from https://www.engineeringtoolbox.com/surface-solar-radiation-d_1213.html

Fontoynont, M. (2002). Perceived performance of daylighting systems: lighting efficacy and agreeableness. *Solar Energy, 73(*2), 83-94. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00035-X

Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture*. Elsevier Publishing Company Ltd.

Goulding, J. R., Lewis, J. O. & Steemers, T. C. (1994). *Ενεργειακός Σχεδιασμός. Εισαγωγή για Αρχιτέκτονες*. Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy Conscious Design-A Primer for Architects].

Goulding, J. R., Lewis, J. O. & Steemers, T. C. (1996*). Ενέργεια στην Αρχιτεκτονική. Το Ευρωπαϊκό Εγχειρίδιο για τα Παθητικά Ηλιακά Κτίρια*. Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook].

Goulding, J. R. & Lewis, J. O. (1997). *Bioclimatic design. Thermie Programme Action No. DIS-0162-95-IRL*. European Commission Directorate-General for Energy (DG XVII), Energy Resecarch Group, University College Dublin.

Kofoed, N.-U. & Gaardsted, M. (2004). Μελέτη του Ανέμου σε Αστικούς Χώρους. Στο: Μ. Νικολοπούλου (Επιμ.). *Σχεδιασμός Υπαίθριων Αστικών Χώρων με Βιοκλιματικά Κριτήρια* (σσ. 7-11). Αθήνα: Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).

Krautheim, M., Pasel, R., Pfeiffer, S. & Schultz-Granberg, J. (2014). *City and Wind – Climate as an Architectural Instrument*. A Dom Publishers.

Majoros, A. (1998). *PLEA Note 4: Daylighting.* Διαθέσιμο στο: http://www.plea-arch.org/wp-content/uploads/PLEA-Note-4-Daylighting-lowre.pdf

Marsh, A. J. (2020). Software development. Retrieved from: http://andrewmarsh.com/software/

Mazria, E. (1979). *The Passive Solar Energy Book*. Rodale Press.

McNicholl, A. & Lewis, J. O. (1994). *Daylighting in Buildings.* The European Commission. Directorate-General for Energy (DGXVII).

Ruck, N. et al. (2000). *Daylight in Buildings – A source book on daylighting systems and components*. Berkeley, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory.

Surface Reflectance by © Dr. Andrew J. Marsh, 2020, CC BY-NC-SA 4.0

UCLA Energy Design Tools Group (2020). *Climate Consultant* (Version 6.0) [Computer software]. https://www.sbse.org/resources/climate-consultant

Wienold, J. (2002). Guest editorial. *Solar Energy. (73)*2. 75-76. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00063-4

Wind rose. (2022, January 1). In: *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_rose

Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, Ε. (2017). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός. Κλιματική αλλαγή, Περιβάλλον, Βιωσιμότητα*. University Studio Press.

Αντωνίου, Ν., Δημητριάδης, Π., Καμπούρης, Κ., Παπαμιχάλης, Κ. & Παπατσίμπα, Λ. (χ.ε.). *Φυσική Γ' Γυμνασίου. Βιβλίο Μαθητή*. Αθήνα: Υπουργείο Παιδείας, Έρευνας και Θρησκευμάτων, Ινστιτούτο Εκπαιδευτικής Πολιτικής. http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2226/Fysiki_G-Gymnasiou_html-empl/index8.html

Αξαρλή, Κ. (2001). Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης της ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό – Η συμβολή του φυσικού φωτισμού. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου* (σσ. 155-252). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Αραβαντινός, Α. (2015). «Φυσική Οπτική (Ε). Ενότητα 5: Φωτομετρικά μεγέθη – πολική κατανομή φωτοβολίας». Έκδοση: 1.0. Διαθέσιμο στο: https://tinyurl.com/2eauwytb, CC BY-NC-SA 4.0

Ευαγγελινός, Ε. & Ζαχαρόπουλος, Η. (2001). Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου* (σσ. 21-154). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Ζώνη ώρας. (2021, 26 Δεκεμβρίου). Στο: *Wikipedia*. https://el.wikipedia.org/wiki/Ζώνη_ώρας

Συντονισμένη Παγκόσμια Ώρα. (2021, 26 Δεκεμβρίου). Στο: *Wikipedia*. https://el.wikipedia.org/wiki/Συντονισμένη_Παγκόσμια_Ώρα

Τσαγκρασούλης, Ά. (2015). *Φυσικός Φωτισμός* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-443

Κεφάλαιο 4

Στοιχεία άνεσης και εσωτερικού περιβάλλοντος κτιρίων

Σύνοψη
Πέρα από την εξοικονόμηση ενέργειας, βασική παράμετρο του βιοκλιματικού σχεδιασμού αποτελεί η επίτευξη των βέλτιστων συνθηκών άνεσης στο εσωτερικό των κτιρίων. Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύονται οι επιμέρους παράμετροι της άνεσης (θερμική, οπτική και ακουστική), ενώ γίνεται και αναφορά στην υγιεινή και στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Όπως είναι προφανές, το κύριο μέρος αφορά τη θερμική άνεση και τις παραμέτρους που την επηρεάζουν. Ταυτόχρονα, περιγράφονται ποσοτικά και ποιοτικά στοιχεία αξιολόγησης των συνθηκών φωτισμού και της οπτικής άνεσης. Τέλος, γίνεται αναφορά σε τρόπους εκτίμησης της άνεσης (δείκτες, ψυχρομετρικά διαγράμματα κ.λπ.).

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις Φυσικής και Μαθηματικών. Ταυτόχρονα, περαιτέρω στοιχεία μπορούν να αναζητηθούν στα συγγράμματα του Κάλλιπου του Α. Τσαγκρασούλη (2015) και του Ν. Παπαμανώλη (2015). Τεχνικά δεδομένα μπορούν να αναζητηθούν στις σχετικές Τεχνικές Οδηγίες του ΤΕΕ (ΤΟΤΕΕ).

4.1 Άνεση

Βασική επιδίωξη στον σχεδιασμό και στην κατασκευή κάθε κτιρίου είναι η εξασφάλιση συνθηκών άνετης διαβίωσης για τους χρήστες του. Η έννοια της άνεσης αναφέρεται στις αισθήσεις με τις οποίες αντιλαμβανόμαστε τις συνθήκες και τα ερεθίσματα του περιβάλλοντος, δηλαδή την όραση, την αφή και την ακοή και, κατ' αντιστοιχία, έχουμε την οπτική (*visual*), τη θερμική (*thermal*) και την ακουστική (*acoustic*) άνεση (*comfort*) (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 36).

Όπως είναι γνωστό, στα σύγχρονα κτίρια η βέλτιστη ενεργειακή και περιβαλλοντική τους επίδοση αποτελεί βασική απαίτηση. Η θερμική, αλλά και οπτική άνεση επιτυγχάνονται με τη χρήση ενέργειας και για τον λόγο αυτόν αποτελούν τις βασικές συνιστώσες του βιοκλιματικού σχεδιασμού, όπου στόχος είναι η αξιοποίηση και η χρήση των άμεσων και διαθέσιμων φυσικών και ανανεώσιμων πηγών. Η διερεύνηση και κατανόηση των παραγόντων που συσχετίζονται με τις συνθήκες άνεσης είναι, λοιπόν, απαραίτητες.

Οι κλιματικοί παράγοντες, όπως η κίνηση και η ποιότητα του αέρα, η υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία και η βροχόπτωση, και ο συσχετισμός τους καθορίζουν τη φυσική και ψυχολογική κατάσταση του ανθρώπου. Τα κλιματικά στοιχεία, όπως αυτά γίνονται αντιληπτά τροποποιημένα στο εσωτερικό ενός κτιρίου, επηρεάζουν την άνεση (Hegger et al., 2012, σ. 55). Επιπρόσθετα, ο τρόπος με τον οποίο προσλαμβάνονται από τον κάθε άνθρωπο είναι υποκειμενικός, μιας και επιδρούν συνδυαστικά με την ηλικία του ατόμου, τον ρυθμό μεταβολισμού, τη δραστηριότητα και την ένδυση (Energy manual, σ. 55).

Ο ηλιασμός στο εσωτερικό ενός χώρου επηρεάζει την αίσθηση άνεσης των χρηστών του. Ανάλογα με τη λειτουργία και την εργασία που εκτελείται, αυτός ο παράγοντας είναι δυνατόν τον χειμώνα να μεταβάλλεται από πλήρως αποδεκτός και επιθυμητός για μια κατοικία έως μη αποδεκτός για έναν εργασιακό χώρο. Η απαίτηση για προσήλωση σε κάποια εργασία γραφείου δεν επιτρέπει τον ταυτόχρονο άμεσο ηλιασμό της θέσης εργασίας. Αυτό είναι μια γενική αποδοχή που γίνεται πιο αυστηρή όσο το κλίμα είναι πιο θερμό. Ο ενδεχομένως παραδεκτός άμεσος ηλιασμός γραφειακών χώρων στη Βόρεια Ευρώπη είναι μη αποδεκτός για χώρες με Μεσογειακό κλίμα γενικά, και για τη χώρα μας ειδικότερα. Το ίδιο ισχύει και για τις

σχολικές αίθουσες και προφανώς και για άλλες περιπτώσεις, στις οποίες ο έλεγχος του ηλιασμού του χώρου από τον χρήστη δεν είναι δυνατός (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 36).

Η κίνηση του αέρα στο εσωτερικό ενός χώρου, ηθελημένη ή μη, συναρτάται με τη λειτουργία του χώρου και, ως εκ τούτου, σχετίζεται με την απρόσκοπτη εργασία ή ασχολία του χρήστη οποιαδήποτε και αν είναι αυτή. Ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται η κίνηση του αέρα και η διεύθυνσή του είναι σημαντικοί παράγοντες. Αρκεί να αναφερθεί η δυνατότητα χρήσης ανεμιστήρων οροφής σε γραφειακούς χώρους, οι οποίοι επιτρέπουν μεγαλύτερες ταχύτητες αέρα, χωρίς αυτός να παίρνει τα χαρτιά από τα γραφεία (Στο ίδιο).

Η άνεση, λοιπόν, σε έναν χώρο καθορίζεται και από τις λειτουργίες που εκτελούνται σε αυτόν. Πρέπει, λοιπόν, κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη η λειτουργία του χώρου και οι περιορισμοί που σχετίζονται με αυτήν, ώστε να επιτυγχάνεται η γενικότερη άνεση των χρηστών του (Στο ίδιο).

4.2 Θερμική άνεση

4.2.1 Γενικά

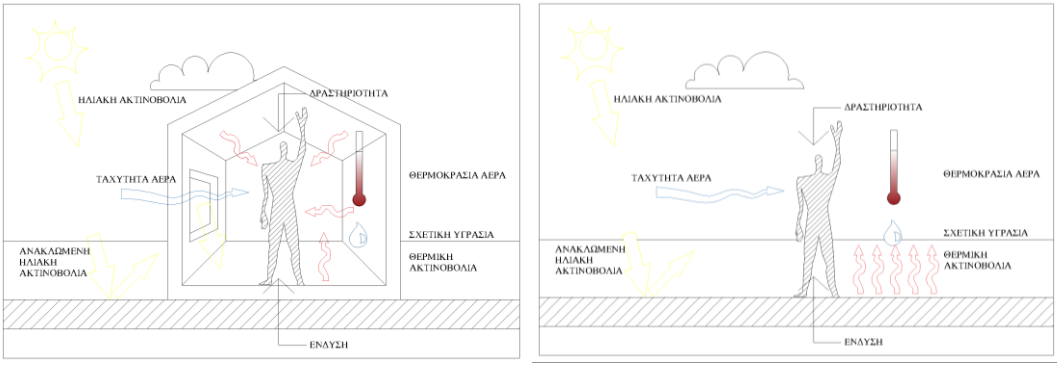
Η έρευνα γύρω από τη θερμική άνεση έχει αρχίσει από πολύ παλιά. Είναι ένας τομέας που αφορά τόσο την Επιστήμη των Κατασκευών όσο και την Ιατρική και τη Φυσική. Οι αρχικές εργασίες στις αρχές του 18ου αιώνα αφορούσαν την Ιατρική και τη Θερμομετρία και αναπτύχθηκαν περαιτέρω κατά τον 20ό αιώνα, με έρευνες από πολλούς και σημαντικούς ερευνητές, όπως οι αδελφοί V. & A. Olgyay (1963), ο P. O. Fanger (1970), ο Baruch Givoni, οι T. A. Markus & E. N. Morris (1980) κ.ά., και εξελίσσονται μέχρι σήμερα με έρευνες και πρότυπα (π.χ. ISO 7730:2005 και ANSI/ASHRAE Standard 55) (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 37).

Η θερμική άνεση εξαρτάται από τις βιολογικές λειτουργίες του ανθρώπινου σώματος, δηλαδή από αυτό που ονομάζουμε μεταβολισμό και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες γύρω του. Με τον ανθρώπινο μεταβολισμό παράγεται θερμότητα, η οποία διατηρεί τον οργανισμό σε σταθερή θερμοκρασία, γύρω στους 37^{o}C. Το ανθρώπινο σώμα ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον του με μεταφορά, εξάτμιση, αγωγή και ακτινοβολία (βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.1). Όταν η παραγωγή θερμότητας από τον οργανισμό είναι ίση με τις απώλειες που έχει προς το περιβάλλον του, τότε έχουμε «θερμική ουδετερότητα». Η θερμική ουδετερότητα είναι θεωρητικά η αναγκαία συνθήκη για τη θερμική άνεση. Επειδή όμως η θερμική άνεση έχει σχέση με τον ανθρώπινο μεταβολισμό, δεν είναι δυνατόν να περιγραφεί με αντικειμενική ακρίβεια. Η ικανοποίηση των υποκειμενικών απαιτήσεων διασφαλίζεται με την οριοθέτηση μιας περιοχής συνθηκών θερμικής άνεσης για πλήθος ανθρώπων που εκφράζει τη στατιστική πλειοψηφία (Στο ίδιο).

Ο τρόπος έρευνας και διερεύνησης των παραμέτρων της θερμικής άνεσης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός ειδικά επιλεγμένου πλήθους ανθρώπων και την καταγραφή των αντιδράσεών τους στις παραμετρικές αλλαγές (Fanger, 1970, σ. 60). Ο τελικός σκοπός των ερευνών της θερμικής άνεσης ήταν η διαμόρφωση της Εξίσωσης Άνεσης (*Comfort Equation*), στην οποία οι παράμετροι τίθενται ως μεταβλητές. Συνεπώς, θέτοντας κάποιες τιμές μεταβλητών, είναι δυνατός ο υπολογισμός των υπόλοιπων (Στο ίδιο, σ. 61). Η Εξίσωση Θερμικής Άνεσης είναι αρκετά σύνθετη, γιατί η μετάδοση θερμότητας που περιγράφει είναι πολύπλοκη (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 37). Εκφράζει την αναγκαία συνθήκη της θερμικής άνεσης, ότι δηλαδή το συνολικό θερμικό ισοζύγιο του ανθρώπινου σώματος πρέπει να ισούται με μηδέν και περιγράφεται από τον Fanger (1973, σ. 21). Η επίλυση της εξίσωσης έχει γίνει για διάφορες τιμές μεταβλητών και με τα αποτελέσματα έχουν κατασκευαστεί διαγράμματα θερμικής άνεσης, στα οποία θα γίνει αναφορά παρακάτω (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 37).

Οι παράγοντες που καθορίζουν τη θερμική άνεση είναι περιβαλλοντικοί (θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, θερμοκρασία επιφανειών και ταχύτητα του αέρα) και ατομικοί (δραστηριότητα και ένδυση) και απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 4.1. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η αίσθηση θερμικής άνεσης

ενός ατόμου είναι δυνατό να επηρεάζεται από επιπλέον υποκειμενικές παραμέτρους που αφορούν το άτομο, αλλά και από ψυχολογικές παραμέτρους.



Εικόνα 4.1. *Σχηματική αναπαράσταση των παραμέτρων θερμικής άνεσης στον εσωτερικό χώρο και στο εξωτερικό περιβάλλον. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

4.2.2 Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ευεξία και τη θερμική άνεση του ανθρώπου είναι η θερμοκρασία του αέρα και η ταχύτητά του, η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία των επιφανειών (μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία, mean radiant temperature – MRT) (Εικόνα 4.3), καθώς αυτές συμβάλλουν στην ανταλλαγή θερμότητας του ανθρώπινου σώματος με το περιβάλλον του, με αγωγή, μεταφορά και ακτινοβολία (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2 *Θερμική άνεση και διαδικασίες μετάδοσης της θερμότητας.*
α. Αγωγή. Πηγή: person on pallet stage, Photo by Brina Blum on Unsplash.
β. Μεταφορά. Πηγή: Wind on Wheat, Photo by Alex Seinet on Unsplash.
γ. Ακτινοβολία. Πηγή: Close up photo of fire, Photo by Tao Wen on Unsplash.



Εικόνα 4.3 *Θερμική άνεση, Περιβαλλοντικοί παράγοντες:*
α. Θερμοκρασία αέρα. Πηγή: beige Centurion home appliance controller on wall, Photo by Will on Unsplash.
β. Σχετική υγρασία. Πηγή: Water drops on a monstera leaf, Photo by feey on Unsplash.
γ. Ταχύτητα αέρα. Πηγή: Fly away, Photo by Oliver Hihn on Unsplash.
δ. Μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία. Πηγή: Grey oil heater, Photo by Alex Perz on Unsplash.

Θερμοκρασία του αέρα

Η σημαντικότερη παράμετρος θερμικής άνεσης και ο απλούστερος θερμικός δείκτης είναι η θερμοκρασία του αέρα σε έναν χώρο (Szokolay, 1980, σ. 272). Η καταγραφή αυτή γίνεται με ένα θερμόμετρο ξηρού βολβού (dry bulb temperature – DBT ή Tair). Τα συνήθη θερμόμετρα επηρεάζονται από ακτινοβολίες και δείχνουν θερμοκρασίες συνήθως υψηλότερες. Για τη σωστή καταγραφή της θερμοκρασίας αέρα, το θερμόμετρο πρέπει να τοποθετείται σε μία ειδική κυλινδρική θήκη από στιλβωμένο ή λευκό μέταλλο (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 38· Markus & Morris, 1980, σ. 398).

Το ανθρώπινο σώμα αισθάνεται τη θερμοκρασία του αέρα γύρω του και ανταλλάσσει θερμότητα με μεταφορά (Goulding et al., 1994, σ. 121). Αν η θερμοκρασία του αέρα πλησιάζει ή είναι ίση με τη θερμοκρασία του δέρματος, γίνεται αντιληπτή η διακοπή της μεταφοράς θερμότητας, η οποία εκδηλώνεται με αίσθημα υπερβολικής ζέστης (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 38).

Όταν η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται, προκαλείται «αίσθημα κρύου». Η πρώτη αντίδραση του ανθρώπινου σώματος σε αυτή την κατάσταση είναι η συστολή των αγγείων του αίματος κάτω από το δέρμα, έτσι ώστε να μειωθεί η μετάδοση θερμότητας από τους ιστούς στο περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα, χαμηλώνει η θερμοκρασία του δέρματος, και έτσι μειώνεται ο ρυθμός απώλειας θερμότητας με μεταφορά και με ακτινοβολία προς το περιβάλλον. Συγχρόνως, προκαλείται ανόρθωση των τριχών του σώματος (ανατριχίλα), έτσι ώστε να παγιδευτεί αέρας και να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας (Oke, 1995, σ. 219). Τέλος, το σώμα αντιδρά με σπασμωδικές κινήσεις των μυών (ρίγος), έτσι ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας από τον μεταβολισμό. Αν καμία από τις παραπάνω αντιδράσεις δεν καταφέρει να επαναφέρει τη θερμική ισορροπία, η εσωτερική θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 35°C και προκαλείται υποθερμία (Chalkley & Cater, 1968, σ. 15· Szokolay, 1980, σσ. 271-272).

Αντίθετα, οι υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος προκαλούν «αίσθημα ζέστης» και μια τελείως διαφορετική σειρά ρυθμιστικών διαδικασιών. Η πρώτη αντίδραση του ανθρώπινου σώματος σε αυτή την κατάσταση είναι η διαστολή των αγγείων του αίματος κάτω από το δέρμα, έτσι ώστε να αυξηθεί η μετάδοση θερμότητας προς το περιβάλλον με μεταφορά, αγωγή προς το πάτωμα ή τα έπιπλα και με ακτινοβολία. Στη συνέχεια, το σώμα αντιδρά με την έκκριση ιδρώτα, του οποίου η εξάτμιση (διαπνοή) προκαλεί δροσισμό και πτώση της θερμοκρασίας του δέρματος. Σε περίπτωση που οι ρυθμιστικές αυτές αντιδράσεις δεν φέρουν αποτέλεσμα, η καρδιά εξαντλείται από την υπερλειτουργία για τη διαστολή των αγγείων και η εσωτερική θερμοκρασία του σώματος ανεβαίνει στους 40°C, προκαλώντας θερμοπληξία (Chalkley & Cater, 1968, σ. 15· Szokolay, 1980, σ. 271).

Η θερμοκρασία σε έναν χώρο διαφοροποιείται καθ' ύψος και εκφράζεται με θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση από το δάπεδο στην οροφή από τη χαμηλότερη στην υψηλότερη θερμοκρασία. Η διαστρωμάτωση αυτή, η οποία οφείλεται στην πυκνότητα του αέρα σύμφωνα με τη θερμοκρασία του, είναι ένα φαινόμενο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό της τομής ενός χώρου ή ενός συνόλου επάλληλων συγκοινωνούντων χώρων. Το φαινόμενο αυτό δεν είναι στατικό, αλλά συνεχές, με τον ζεστό αέρα να ανέρχεται και, εφόσον ψύχεται, να κατέρχεται για να δημιουργεί τη φαινομενική διαστρωμάτωση (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 38).

Υγρασία του αέρα

Η υγρασία που περιέχει ο αέρας μπορεί να εκφραστεί με δύο βασικούς τρόπους: με την πίεση υδρατμών (mm Hg) και με τη σχετική υγρασία. Παρόλο που στην Εξίσωση Άνεσης η υγρασία του αέρα υπολογίζεται με βάση την πίεση υδρατμών, πρακτικά η έννοια της σχετικής υγρασίας είναι πιο κατανοητή. Ως σχετική υγρασία ορίζεται «το ποσοστό επί τοις εκατό της υγρασίας του αέρα ως προς την υγρασία που θα περιείχε αν ήταν κορεσμένος στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης» (Goulding et al., 1994, σ. 121). Η υγρασία του αέρα επιδρά στη θερμική άνεση με πολύπλοκο και έμμεσο τρόπο, καθορίζοντας τις απώλειες θερμότητας

που οφείλονται στη διάχυση υδρατμών στο δέρμα και στην εξάτμιση του ιδρώτα (Goulding et al., 1994, σ. 121). Ο ανθρώπινος οργανισμός χάνει θερμότητα προς το περιβάλλον του με τη μεταφορά, την ακτινοβολία και με την εξάτμιση που γίνεται στους πνεύμονες. Όταν οι απώλειες αυτές δεν επαρκούν για την ισορροπία της παραγωγής μεταβολικής θερμότητας, τότε ενεργοποιούνται οι αδένες παραγωγής ιδρώτα, ώστε το σώμα να χάσει θερμότητα με εξάτμιση. Η ατμοσφαιρική υγρασία παίζει, λοιπόν, τον ρόλο του ελεγκτικού παράγοντα της δυνατότητας εξάτμισης, και ως εκ τούτου η επίδρασή της στη θερμική άνεση περιορίζεται σε ορισμένες θερμοκρασιακές περιοχές.

Για τα άτομα που βρίσκονται σε συνθήκες θερμικής άνεσης, ο βαθμός στον οποίο η σχετική υγρασία επηρεάζει την άνεση είναι σχετικά περιορισμένος. Η επίδρασή της εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα. Έτσι, για υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, οι υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας (πάνω από 80%) ενισχύουν το «αίσθημα ζέστης» και προκαλούν δυσφορία εξαιτίας της μειωμένης εξάτμισης του ιδρώτα. Αντίθετα, όταν η θερμοκρασία του αέρα είναι χαμηλή, η χαμηλή σχετική υγρασία (κάτω από 20%) εντείνει το «αίσθημα κρύου», ενώ συγχρόνως προκαλεί αποξήρανση των βλεννογόνων αδένων (Szokolay, 1980, σ. 272). Τέλος, η επίδραση της σχετικής υγρασίας στις συνθήκες άνεσης εξαρτάται και από τον χρόνο έκθεσης του ατόμου. Για μικρά χρονικά διαστήματα έκθεσης, το αποτέλεσμα της υγρασίας είναι σημαντικότερο εξαιτίας φαινομένων απορρόφησης ή αποβολής υγρασίας από την ένδυση και το δέρμα (Fanger, 1973, σ. 48).

Ταχύτητα του αέρα

Η ταχύτητα του αέρα επηρεάζει ουσιαστικά τη μετάδοση θερμότητας με μεταφορά που πραγματοποιείται ανάμεσα στο ανθρώπινο σώμα και στο περιβάλλον του. Η απώλεια θερμότητας με μεταφορά μπορεί να εκφραστεί με την Εξίσωση Μεταφοράς του Newton (*Newton's Law of Cooling*), η οποία περιγράφεται στο Fanger (1973, σ. 33) και ισχύει κατά προσέγγιση, ανεξάρτητα από τη στάση του ανθρώπινου σώματος, όταν η ροή του αέρα πραγματοποιείται κατά μήκος του σώματος (Fanger, 1973, σ. 36). Η επίδραση διαφόρων τιμών ταχύτητας αέρα στην αίσθηση θερμικής άνεσης περιγράφεται στον Πίνακα 4.1.

Ταχύτητα αέρα		**Αίσθηση για εσωτερικούς χώρους**	**Αίσθηση για εξωτερικούς χώρους**
m/sec	**km/h**		
έως 0,25	έως 0,90	δεν γίνεται αισθητός	
0,25-0,50	0,90-1,80	ευχάριστος	
0,50-1,00	1,80-3,60	επίγνωση της κίνησης του αέρα	
1,00-1,50	3,60-5,40	αίσθηση «ρεύματος»	
πάνω από 1,50	πάνω από 5,40	δυσφορία λόγω «ρεύματος»	
	30		Αίσθηση -2^{o}C
	50		Αίσθηση -5^{o}C

Πίνακας 4.1. *Τιμές ταχύτητας αέρα και αίσθηση που προκαλείται. Πηγή: Επιλογή από Szokolay (1980, σ. 273) και Krautheim et al. (2014).*

Η κίνηση του αέρα επιδρά στη θερμική ισορροπία του ανθρώπινου σώματος και κατ' επέκταση και στη θερμική άνεση με δύο τρόπους, επηρεάζοντας (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 39):

- την ταχύτητα ανταλλαγής θερμότητας του ανθρώπινου σώματος με το περιβάλλον του μέσω αγωγής και μεταφοράς και
- την ταχύτητα δροσισμού του σώματος μέσω της εξάτμισης του ιδρώτα.

Η ταχύτητα ανταλλαγής θερμότητας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα σε σχέση με τη θερμοκρασία του ανθρώπινου δέρματος (31-34^{o}C). Αν η θερμοκρασία του αέρα είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του δέρματος, γίνεται μετάδοση θερμότητας προς το σώμα με αγωγή και μεταφορά. Αντίστροφα, αν η θερμοκρασία του αέρα είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του δέρματος, υπάρχει απαγωγή θερμότητας

από το σώμα με αγωγή και μεταφορά. Με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα υπάρχει αύξηση της ροής θερμότητας, η κατεύθυνση της οποίας εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας αέρα-δέρματος (Στο ίδιο).

Η ταχύτητα δροσισμού έχει ως χαρακτηριστικό το γεγονός ότι η ταχύτητα εξάτμισης εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα και την υγρασία της ατμόσφαιρας. Αυξάνοντας την ταχύτητα του αέρα, πάντα έχουμε αύξηση της εξάτμισης και του δροσισμού που συνεπάγεται, ενώ με συνθήκες υψηλής ατμοσφαιρικής υγρασίας, το αίσθημα δροσισμού είναι μηδαμινό (Στο ίδιο).



Εικόνα 4.4 Η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στην αίσθηση θερμοκρασίας από τον άνθρωπο. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου), με δεδομένα από Krautheim M. et al. (2014).

Και με τους δύο τρόπους επίδρασης που προαναφέρθηκαν, το αποτέλεσμα της κίνησης του αέρα είναι για το καλοκαίρι η επέκταση της περιοχής θερμικής άνεσης σε περιοχές υψηλότερων θερμοκρασιών αέρα, εφόσον η θερμοκρασία του αέρα δεν είναι υψηλότερη των 34°C (θερμοκρασία του δέρματος) και η σχετική υγρασία είναι χαμηλή (κάτω του 70%). Για τον χειμώνα, όταν η θερμοκρασία του αέρα είναι χαμηλή, η κίνηση του αέρα μειώνει την αίσθηση θερμικής άνεσης (Στο ίδιο). Δηλαδή, όσο πιο χαμηλή είναι η θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση του αέρα που δίνει την αίσθηση χαμηλότερων θερμοκρασιών από τις πραγματικές και όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα (σε χαμηλές θερμοκρασίες), η θερμοκρασία προσλαμβάνεται ως χαμηλότερη από το άνθρωπο (αισθητή θερμοκρασία, *windchill factor*).

Η κίνηση του αέρα και η θερμοκρασία αποτελούν τους βασικούς ρυθμιστές στην αίσθηση ευεξίας του ανθρώπου. Στη βιοκλιματική αρχιτεκτονική, η κίνηση του αέρα πρέπει να ελέγχεται για να μεγιστοποιείται η θετική επίδρασή της στη θερμική άνεση. Τον χειμώνα, μια κρύα επιφάνεια τοίχου ή υαλοστασίου δημιουργεί καθοδικό ρεύμα αέρα δίπλα της, το οποίο κάποιος χωρίς επίγνωση μπορεί να αποδώσει σε διείσδυση αέρα. Η θερμομόνωση του τοίχου ή του υαλοστασίου, διορθώνει το φαινόμενο αυτό και επαναφέρει την αίσθηση θερμικής άνεσης. Η κίνηση του αέρα στον εσωτερικό χώρο το καλοκαίρι είναι γνωστό ότι βελτιώνει την αίσθηση άνεσης. Ο διαμπερής αερισμός βοηθά όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι χαμηλότερη του εσωτερικού, αλλιώς ένα εύκολος τρόπος είναι η χρήση ηλεκτρικού ανεμιστήρα. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται όταν σχεδιάζονται συστήματα που χρησιμοποιούν αέρα για θέρμανση. Η υψηλή ταχύτητα του αέρα γίνεται αισθητή ως ρεύμα, με συνέπεια να απαιτείται μεγαλύτερη θερμοκρασία του χρησιμοποιούμενου αέρα για να διατηρηθεί η θερμική άνεση (Στο ίδιο).

Στους υπαίθριους χώρους, η σημασία της ταχύτητας του αέρα για τη θερμική άνεση έχει σχέση τόσο με τη θερμοκρασία του αέρα όσο και με τη σχετική υγρασία. Η σχέση της ταχύτητας του αέρα και της θερμοκρασίας ξηρού βολβού είναι διαφορετική στις συνθήκες κρύου και τις συνθήκες ζέστης. Σε συνθήκες ζέστης, ο αποτελεσματικός αερισμός θεωρείται ευχάριστος. Ο Givoni (1991, σ. 27) σημειώνει ότι ακόμα και σε ακραίες συνθήκες υπερθέρμανσης, της τάξης των 40°C, ο ελαφρύς άνεμος μειώνει τη θερμική δυσφορία, καθώς συμβάλλει στην εξάτμιση του ιδρώτα από την επιφάνεια του δέρματος. Αντίθετα, σε συνθήκες κρύου, ο αέρας εντείνει τη θερμική δυσφορία. Ποσοτικά στοιχεία για τη σχέση της ταχύτητας του αέρα και της θερμοκρασίας υπάρχουν στη βιβλιογραφία μόνο για τους εσωτερικούς χώρους (Fanger, 1973, σσ. 48-50). Η αλληλεπίδραση της σχετικής υγρασίας και της ταχύτητας του αέρα σχετίζεται βασικά με τον τρόπο με τον οποίο αυτοί οι δύο παράγοντες παρεμβαίνουν στη διαδικασία της εξάτμισης του ιδρώτα, και άρα στις συνθήκες θερμικής άνεσης κατά τη θερμή περίοδο. Για χαμηλές τιμές σχετικής υγρασίας (κάτω από 30%), το αποτέλεσμα του αερισμού στην επιτάχυνση της εξάτμισης είναι ασήμαντο, καθώς η εξάτμιση πραγματοποιείται συνεχώς και ανεμπόδιστα. Για υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας (πάνω από 85%), η

εξάτμιση περιορίζεται σημαντικά και η κίνηση του αέρα δεν μπορεί να αυξήσει το αποτέλεσμα δροσισμού. Για μέσες τιμές σχετικής υγρασίας (40-50%), η συμβολή της κίνησης του αέρα είναι σημαντική για την ενίσχυση της εξάτμισης, καθώς διαφορετικά δημιουργείται κορεσμός στο οριακό στρώμα του δέρματος (Szokolay, 1980, σσ. 272-273).

Μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία (Mean Radiant Temperature – MRT)

Ο μέσος όρος των θερμοκρασιών των περιβαλλουσών επιφανειών, συμπεριλαμβανομένης και της ηλιακής ακτινοβολίας, αποτελεί τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (mean radiant temperature). Η θερμοκρασία αυτή μετριέται συνήθως με το θερμόμετρο σφαίρας (globe thermometer): πρόκειται για μια μαύρη χάλκινη σφαίρα στο κέντρο της οποίας τοποθετείται ένα θερμόμετρο. Η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας υπολογίζεται από τη θερμοκρασία του θερμομέτρου σφαίρας σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία και την ταχύτητα του αέρα, βάσει ενός αλγόριθμου (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 38· Markus & Morris, 1980, σ. 399).

Ως μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία για ένα άτομο με συγκεκριμένη στάση και ένδυση, το οποίο βρίσκεται σε ένα δεδομένο σημείο ενός χώρου, ορίζεται «η ομοιόμορφη θερμοκρασία ενός μαύρου κλειστού χώρου, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τις ίδιες απώλειες θερμότητας με ακτινοβολία» (Fanger, 1973, σ. 34). Σε κλειστούς χώρους, η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία καθορίζεται κυρίως από τις θερμοκρασίες των επιφανειών που διαμορφώνουν το περιβάλλον ενός ατόμου. Επίσης, καθώς η ακτινοβολία είναι διανυσματικό μέγεθος, έχει, δηλαδή, διεύθυνση και φορά, η επίδραση της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας στις συνθήκες θερμικής άνεσης εξαρτάται και από τη στάση του ατόμου και τη θέση του σε έναν χώρο (Goulding et al., 1994, σ. 121).

Πρακτικά, η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία επηρεάζει τις ανταλλαγές θερμότητας με ακτινοβολία που πραγματοποιούνται ανάμεσα στο ανθρώπινο σώμα και τις επιφάνειες που το περιβάλλουν (Goulding et al., 1994, σ. 121· βλ. και Κεφ. 5, παρ. 5.1.3). Αν η θερμοκρασία των επιφανειών του περιβάλλοντός του είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του δέρματος, η μετάδοση θερμότητας προς το σώμα με ακτινοβολία γίνεται αντιληπτή και εκδηλώνεται με αίσθημα ζέστης. Αντίστροφα, αν αυτή η θερμοκρασία είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία του δέρματος, η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία γίνεται αντιληπτή και εκδηλώνεται με αίσθημα ψύχους.

Η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας έχει μεγαλύτερη επίδραση στη θερμική άνεση από τη θερμοκρασία του αέρα. Μάλιστα, κάποιοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι είναι δύο φορές πιο σημαντική από τη θερμοκρασία του αέρα (Szokolay, 1980, σ. 273). Μια αλλαγή θερμοκρασίας αέρα κατά 1^{o}C αντισταθμίζεται από μια αντίθετη αλλαγή μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας 0,5 έως 0,8^{o}C, χωρίς να μεταβάλλεται η θερμική άνεση. Το γεγονός αυτό βοηθάει τα κτίρια με καλή θερμομονωτική επάρκεια, στα οποία η χαμηλότερη θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό τους αντισταθμίζεται από υψηλότερες θερμοκρασίες στην επιφάνεια των τοίχων τους. Γενικά, τα κτίρια που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία για τη θέρμανσή τους έχουν υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και κατά τη διάρκεια της νύχτας, λόγω της αποθηκευμένης στο κέλυφός τους θερμικής ενέργειας. Αυτό, όμως, δεν συμβαίνει με τα μεγάλα ανοίγματα (υαλοπίνακες) που τοποθετούνται για ηλιακή συλλογή και δεν είναι εξοπλισμένα με κινητή θερμομόνωση, διότι κατά τις νυχτερινές ώρες ή τις νεφελώδεις ημέρες της ψυχρής περιόδου δυσχεραίνουν τις συνθήκες άνεσης μέσω ακτινοβολίας προς τις ψυχρές τους επιφάνειες. Το καλοκαίρι, η θερμική άνεση απαιτεί μια πλήρη αντιστροφή της θερμικής λειτουργίας, ώστε η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας να γίνει η μικρότερη δυνατή, με αποτέλεσμα το ανθρώπινο σώμα να ακτινοβολεί προς το περιβάλλον του. Τέλος, στους υπαίθριους χώρους, η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς διαμορφώνεται ουσιαστικά από τις επιφανειακές θερμοκρασίες των υλικών ή της βλάστησης και από την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 39).

4.2.3 Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες

Ο Fanger αναφέρει και μια σειρά δευτερευόντων περιβαλλοντικών παραγόντων που είναι δυνατό να επηρεάσουν την κατάσταση θερμικής άνεσης των ατόμων, όπως είναι οι θερμικές μεταβολές (thermal transients), η μονομερής θέρμανση ή δροσισμός του σώματος (Fanger, 1973, σσ. 95-103), το χρώμα και η ατμοσφαιρική πίεση (Fanger, 1973, σσ. 105-106· Μπουγιατιώτη, 2007).

Θερμικές μεταβολές

Βασιζόμενος σε προηγούμενες έρευνες, ο Fanger υποστηρίζει ότι οι μηχανισμοί ρύθμισης της θερμοκρασίας του ανθρώπινου σώματος κατά τις θερμικές μεταβολές δεν έχουν καμία απολύτως επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία. Κατά συνέπεια, απορρίπτει τη θεωρία του «θερμικού σοκ», το οποίο πιστεύεται ότι προκύπτει από ξαφνικές αλλαγές στις συνθήκες θερμοκρασίας. Επίσης, σημειώνει, χωρίς να αποδέχεται πλήρως, την άποψη ότι οι μεταβολές στη θερμοκρασία του αέρα μπορεί να έχουν θετικές συνέπειες, καθώς έχουν διεγερτικά και αναζωογονητικά αποτελέσματα για τον οργανισμό (Fanger, 1973, σσ. 94-95).

Μονομερής θέρμανση ή δροσισμός του σώματος

Η μονομερής θέρμανση ή ο μονομερής δροσισμός του ανθρώπινου σώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με καθεμιά από τις διαδικασίες μετάδοσης θερμότητας (αγωγή, μεταφορά και ακτινοβολία). Η σημασία του φαινομένου διαφέρει κατά περίπτωση, ενώ σχετίζεται και με το σύνολο των περιβαλλοντικών παραγόντων της θερμικής άνεσης. Με άλλα λόγια, η σημασία του φαινομένου εντείνεται όταν το άτομο δεν βρίσκεται σε συνθήκες θερμικής άνεσης (Fanger, 1973, ό.π., σ. 97, 100, 102).

Η μονομερής θέρμανση του σώματος με ακτινοβολία αφορά είτε την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 4.5.α) είτε την επίδραση μιας επιφάνειας η οποία έχει υπερθερμανθεί. Ο Fanger αναφέρεται σε εργαστηριακό πείραμα, όπου ένας τοίχος, ο οποίος ήταν κατά 30°C θερμότερος από τη θερμοκρασία του αέρα, προκάλεσε θερμική δυσφορία λόγω ασυμμετρίας στα άτομα που βρίσκονταν κοντά σε αυτόν (Fanger, 1973, σ. 98).

Ο μονομερής δροσισμός του σώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί και με μεταφορά, περιλαμβάνοντας το φαινόμενο των «ρευμάτων αέρα» (Fanger, 1973, σσ. 99-100).

Τέλος, η μονομερής θέρμανση του σώματος με αγωγή αφορά άτομα που περπατούν με γυμνά πόδια και μπορεί να γίνει εξαιτίας της επιφανειακής θερμοκρασίας του δαπέδου. Όταν το πόδι ακουμπήσει στο δάπεδο, το πέλμα αποκτά τη θερμοκρασία επαφής, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία του δαπέδου και τον συντελεστή επαφής. Στην περίπτωση ατόμων με υποδήματα, ο Fanger (1973, σσ. 100-103) σημειώνει ότι η επίδραση της επιφανειακής θερμοκρασίας του δαπέδου συσχετίζεται με το είδος των υποδημάτων, καθώς και από το αν τα άτομα κάθονται, στέκονται όρθια ή περπατούν.

Υλικό δαπέδου	**Συντελεστής επαφής**	**Εύρος άνεσης επιφανειακής θερμοκρασίας δαπέδου**	**Όρια πόνου**	
			κατώτερο	**ανώτερο**
	W/m^2K	°C	°C	°C
Ατσάλι	106,7	29-32	14	45
Σκυρόδεμα	14,8	27 -34	4	54
Λινόλεουμ, λάστιχο	5,3	24-35	-12	67
Ξύλο, βελανιδιά	4,1	22-35	-20	74
Ξύλο, έλατο	2,3	17-39	-53	84
Φελλός	1,2	5-42	-140	150

Πίνακας 4.2 *Συντελεστές επαφής διαφόρων υλικών πηγή: Απόδοση από Fanger (1973, σ. 102).*

Για την εκτίμηση αυτής της επίδρασης, ο Fanger (1973, σ. 102) συνδυάζει τις βασικές φυσικές ιδιότητες των υλικών, δηλαδή τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ, την πυκνότητα ρ και την ειδική θερμότητα c,

σε έναν συντελεστή που καλείται *συντελεστής επαφής* (*contact coefficient*), και ο οποίος ταυτίζεται με τη θερμική επίχυση (*thermal admittance*) (βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.3.6). Το μέγεθος του συντελεστή επαφής καθορίζει το θερμικά αποδεκτό εύρος των επιφανειακών θερμοκρασιών ενός υλικού (βλ. Πίνακα 4.2), δηλαδή, όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής επαφής, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος επιφανειακών θερμοκρασιών του υλικού, στο οποίο δεν υπάρχει απώλεια θερμικής άνεσης (Markus & Morris, 1980, σ. 65).

α.  β.  

Εικόνα 4.5 *Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες.*
α. Μονομερής θέρμανση ή δροσισμός του σώματος. Πηγή: Myrtos Beach, Greece, Photo by Christina Deravedisian on Unsplash.
β. Χρώμα. Πηγές: White and blue brick wall, Photo by Felipe Vieira on Unsplash & Photo by Patrick Tomasso on Unsplash.

Χρώμα

Γενικά πιστεύεται ότι το χρώμα ενός χώρου επηρεάζει το αίσθημα ζέστης. Έτσι, υποτίθεται ότι σε χώρους βαμμένους με χρώματα, όπως το κόκκινο ή το πορτοκαλί, ένα άτομο αισθάνεται θερμότερα απ' ό,τι σε χώρους βαμμένους με χρώματα, όπως είναι το πράσινο και το μπλε (βλ. Εικόνα 4.5.β). Το κατά πόσο η αίσθηση θερμικής άνεσης επηρεάζεται πραγματικά από το χρώμα δεν έχει αποδειχτεί σε πειραματικές έρευνες που αφορούν την αίσθηση θερμικής άνεσης σε εσωτερικούς χώρους. Ο Fanger αναφέρει ότι για εσωτερικούς χώρους το χρώμα δεν σχετίζεται ούτε με φυσιολογικές μεταβολές, αλλά ούτε και με την αίσθηση θερμικής άνεσης (Fanger, 1973, σ. 103). Η επίδραση του χρώματος στην αίσθηση θερμικής άνεσης στους εσωτερικούς χώρους είναι μόνο ψυχολογική (Fanger, 1973, σ. 104· Τόσκα, 1989, σ. 97).

Πειράματα που αφορούν την καθαρά ψυχολογική επίδραση των χρωμάτων στους ανθρώπους, δηλαδή στα συναισθήματα που προκαλούν τα διάφορα χρώματα, έδειξαν ότι «η ένταση των συναισθημάτων που προκαλούν τα χρώματα ακολουθεί το μήκος κύματος». Έτσι, το ιώδες και το μπλε που έχουν μικρό μήκος κύματος προκαλούν συναισθήματα ηρεμίας, το πράσινο που βρίσκεται στη μέση του χρωματικού φάσματος δίνει την αίσθηση ισορροπίας, ενώ το κόκκινο που βρίσκεται στο ανώτερο άκρο του φάσματος προκαλεί συναισθήματα διέγερσης (Τόσκα, 1989, σ. 98). Τέλος, σημειώνεται ότι η ψυχολογική επίδραση ενός χρώματος εξαρτάται από τον φωτισμό των χώρων και από την επίδραση της ανακλαστικότητας των γειτονικών χρωμάτων, καθώς έτσι διαφοροποιούνται η ένταση και ο τόνος του, αντίστοιχα (Στο ίδιο).

Οι παραπάνω επισημάνσεις ισχύουν για εσωτερικούς χώρους, όπου οι ανταλλαγές θερμότητας που πραγματοποιούνται με θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, η οποία δεν επηρεάζεται από το χρώμα των επιφανειών. Αντίθετα, στους υπαίθριους χώρους και με την κυριαρχία της ηλιακής ακτινοβολίας, το χρώμα των επιφανειών που περιβάλλουν το άτομο επηρεάζει το ποσό της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας, το οποίο διαφέρει ανάλογα με το χρώμα.

4.2.4 Παράγοντες που αφορούν το άτομο

Οι παράμετροι που εξαρτώνται από το άτομο είναι ο μεταβολικός ρυθμός (η δραστηριότητα) και η ένδυση (Goulding et al., 1994, σ. 120). Συγχρόνως όμως, οι θερμικές προτιμήσεις ενός ατόμου επηρεάζονται και από διάφορες υποκειμενικές και μη ποσοτικοποιημένες παραμέτρους, οι οποίες επιδρούν είτε στον ρυθμό μεταβολισμού είτε στους μηχανισμούς αποβολής θερμότητας. Καθώς, σύμφωνα με τον Fanger, η επίδραση των παραμέτρων αυτών στην Εξίσωση Άνεσης είναι αμελητέα, η παρουσίασή τους γίνεται ξεχωριστά (παρ. 4.2.5).

Μεταβολικός ρυθμός / Δραστηριότητα

Η δραστηριότητα ενός ατόμου επηρεάζει τον μεταβολισμό του αυξάνοντας την παραγόμενη ενέργεια και την ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον. Ο μεταβολικός ρυθμός είναι «η ενέργεια που εκλύεται από τις διαδικασίες οξείδωσης στο ανθρώπινο σώμα ανάλογα με τη δραστηριότητά του, ανά μονάδα χρόνου» (Fanger, 1973, σ. 23). Η ενέργεια αυτή μετατρέπεται κυρίως σε εσωτερική σωματική θερμότητα, ενώ ανάλογα με τη δραστηριότητα μετατρέπεται και σε εξωτερικό μηχανικό έργο (Fanger, 1973, σ. 23). Η μονάδα μέτρησης της ενέργειας μεταβολισμού είναι το met, για το οποίο ισχύει 1 met = 58 W/m^2 (Goulding et al., 1994, σ. 120) και είναι η μεταβολική ενέργεια που παράγει ένα καθιστό άτομο.

Οι τιμές του μεταβολικού ρυθμού για διάφορες δραστηριότητες που πραγματοποιούνται στους υπαίθριους χώρους της πόλης παρατίθενται στον Πίνακα 4.3 (βλ. και Εικόνα 4.6). Για κάθε δραστηριότητα υπάρχει κάποια αντίστοιχη ενδυμασία και μια αντίστοιχη θερμοκρασία άνεσης. Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται για να ορίσει το θερμικό περιβάλλον που καθορίζεται για τις διάφορες ζώνες δραστηριότητας.

Δραστηριότητα	**Ενέργεια μεταβολισμού**			**Σχετική ταχύτητα σε συνθήκες χωρίς αέρα**
	kcal/hr m^2	**W/m^2**	**met**	**m/sec**
Ύπνος	35	41	0,7	0
Ανάπαυση (ξαπλωτή θέση)	40	47	0,8	0
Καθιστή στάση	50	58	1	0
Όρθια στάση	60	70	1,2	0
Περπάτημα σε οριζόντιο επίπεδο, 3,2 km/h	100	116	2	0,9
Περπάτημα σε οριζόντιο επίπεδο, 4,8 km/h	140	151	2,6	1,3
Περπάτημα σε οριζόντιο επίπεδο, 6,4 km/h	190	221	3,8	1,8
Περπάτημα σε οριζόντιο επίπεδο, 8,0 km/h	290	336	5,8	2,2
Περπάτημα σε κλίση 5% ή 2,9°, 1,6 km/h	120	140	2,4	0,6
Περπάτημα σε κλίση 15% ή 8,5°, 1,6 km/h	145	168	2,9	0,4
Περπάτημα σε κλίση 25% ή 14°, 1,6 km/h	180	209	3,6	0,4
Περπάτημα σε κλίση 27% ή 15°, 3,2 km/h	230	267	4,6	0,9
Οδήγηση σε συνθήκες χωρίς κίνηση	50	58	1	0
Οδήγηση σε συνθήκες με κίνηση	100	116	2	0
Καθαρισμός σπιτιού	100-170	116-198	2,0-3,4	0,1-0,3
Ψώνια	80	93	1,6	0,2-1
Γυμναστική	150-200	175-233	3,0-4,0	0,5-2,0
Χορός	120-220	140-256	2,4-4,4	0,5-2,0
Μπάσκετ	380	441	7,6	1-3
Πριόνισμα με το χέρι	198-241	232-280	4,0-4,8	0,1-0,2
Βαριά εργασία με εργαλεία	175-225	204-262	3,5-4,5	0-0,2

Πίνακας 4.3 *Τιμές μεταβολικού ρυθμού για διάφορες δραστηριότητες. Πηγή: Fanger (1973, σσ. 24-26) και Markus & Morris (1980, σ. 43).*



Εικόνα 4.6 *Θερμική άνεση, ατομικοί παράγοντες: Δραστηριότητα. Πηγές: Leopard on tree beside river, Photo by Sofia Zubiria on Unsplash, Leopard on brown grass at daytime, Cheetah running on brown field, Photo by Maria dagboek on Unsplash, Photo by Cara Fuller on Unsplash.*

Ενδυμασία

Η ενδυμασία είναι ο παράγοντας που ελέγχει τη θερμική μετάδοση μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντός του και παρεμβάλλεται στη διαδικασία εξάτμισης του ιδρώτα και της απώλειας θερμότητας με μεταφορά (βλ. Εικόνα 4.7). Η ένδυση αποτελεί ουσιαστικά τον βασικό τρόπο θερμικής μόνωσης του ανθρώπινου σώματος από τις διάφορες κλιματικές επιδράσεις. Έτσι, συμβάλλει στη μείωση των θερμικών απωλειών του κατά τον χειμώνα ή στα ψυχρά κλίματα, καθώς και των θερμικών φορτίων του κατά το καλοκαίρι ή στα ζεστά κλίματα (Oke, 1995, σ. 225). Επίσης, η ενδυμασία μειώνει την ευαισθησία του σώματος στις αλλαγές της θερμοκρασίας και στην κίνηση του αέρα και είναι ο μόνος παράγοντας τον οποίο ο ίδιος ο άνθρωπος μπορεί να μεταβάλλει, προσθέτοντας ή αφαιρώντας ρούχα, για να βελτιώσει τη θερμική άνεση (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 40).

Η μονάδα μέτρησης της ένδυσης είναι το clo, για το οποίο ισχύει 1 clo = 0,155 m^2K/W (Fanger, 1973, σ. 31). Από τον ορισμό του clo γίνεται φανερή η σχέση της ένδυσης με τον συντελεστή θερμικής αντίστασης των οικοδομικών υλικών (βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.3.3). Όμως, αντίθετα με ό,τι συμβαίνει με τα υλικά, η τιμή του clo διαμορφώνεται κυρίως από το πάχος των υφασμάτων, ενώ ο τύπος του (μαλλί, μετάξι, συνθετικό κ.λπ.) και το πορώδες του δεν έχουν ιδιαίτερη σημασία (Fanger, 1973, σ. 31). Επίσης, αντίστοιχα με τα οικοδομικά υλικά, η διαβροχή ενός υφάσματος από ιδρώτα, βροχή ή χιόνι έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της θερμικής του αντίστασης, και άρα της τιμής clo. Αυτό συμβαίνει γιατί με τη διαβροχή ο αέρας που υπάρχει ανάμεσα στις ίνες του υφάσματος αντικαθίσταται από νερό, του οποίου ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι σημαντικά μεγαλύτερος (Fanger, 1973, σ. 31 και Oke, 1995, σ. 226). Η θερμική αντίσταση της ενδυμασίας δεν εξαρτάται μόνο από την αντίσταση των υφασμάτων, αλλά και από την εφαρμογή τους στο ανθρώπινο σώμα. Για να μετρηθεί η θερμική αντίσταση χρησιμοποιούνται θερμαινόμενες κούκλες σε φυσικό μέγεθος ντυμένες με τον επιθυμητό συνδυασμό ρούχων (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 41).

Η σχέση της ένδυσης με τη μονάδα μέτρησης clo μπορεί να γίνει κατανοητή από τα στοιχεία που παρατίθενται ενδεικτικά στον Πίνακα 4.4.

Ο τρόπος με τον οποίο τα ρούχα επηρεάζουν τη θερμική άνεση για θερμοκρασίες αέρα έως 35°C είναι παρέχοντας θερμομόνωση στο σώμα με τη μείωση της μετάδοσης θερμότητας προς το περιβάλλον και την αύξηση της αίσθησης της ζέστης. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 35°C, η επίδραση των ρούχων είναι πολύπλοκη. Αφενός μειώνουν τη μετάδοση της θερμότητας προς το σώμα, συγχρόνως, όμως αυξάνουν την υγρασία και μειώνουν την κίνηση του αέρα, με τελικό αποτέλεσμα να μην ευνοείται η εξάτμιση του ιδρώτα στο σώμα και ο δροσισμός τον οποίο αυτό συνεπάγεται. Πάντως, ένα τμήμα της εξάτμισης τελικά γίνεται στα ρούχα που έχουν απορροφήσει τον ιδρώτα. Μάλιστα, το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τον μεταβολισμό, την υγρασία και την ταχύτητα του αέρα. Ο περιορισμός του δροσισμού με εξάτμιση από την ενδυμασία εξαρτάται από τη σχετική υγρασία του αέρα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 40-41).

Ένδυση	Τιμές clo και m^2K/W	
	clo	m^2K/W
Χωρίς ένδυμα	0	0
Κοντό παντελόνι	0,1	
Τυπικό καλοκαιρινό ένδυμα για Β. ημισφαίριο	0,1	0,0155
Τυπικό αθλητικό ένδυμα για Β. ημισφαίριο	0,8	0,124
Ενδυμασία για τροπικό κλίμα (κοντό παντελόνι, κοντομάνικο πουκάμισο με ανοιχτό λαιμό, λεπτές κάλτσες, σανδάλια)	0,3-0,4	
Καλοκαιρινή ενδυμασία (μακρύ ελαφρύ παντελόνι, κοντομάνικο πουκάμισο με ανοιχτό λαιμό)	0,5	
Χειμερινή ενδυμασία (φούστα, μακρυμάνικη μπλούζα και πουλόβερ, εσώρουχα, κάλτσες, παπούτσια)	0,7-0,9	
Τυπικό κουστούμι (+βαμβακερά εσώρουχα, μακρυμάνικο πουκάμισο με γραβάτα, μάλλινες κάλτσες, παπούτσια)	1,0	
Τυπικό χειμωνιάτικο ένδυμα για Β. ημισφαίριο: Τυπικό κουστούμι (+βαμβακερά εσώρουχα, μακρυμάνικο πουκάμισο με γραβάτα, μάλλινες κάλτσες, παπούτσια)	1,5	0,2355
Τυπικό χειμωνιάτικο κουστούμι + παλτό	2,0-2,5	
Χειμωνιάτικη ενδυμασία ισχυρού ψύχους (πολική στολή)	3,0-4,0	

Πίνακας 4.4 *Τιμές clo για διάφορες ενδύσεις. Πηγή: επιλογή από Fanger (1973, σ. 33) και Markus & Morris (1980, 45).*



Εικόνα 4.7 *Θερμική άνεση, ατομικοί παράγοντες: Ενδυμασία. Πηγή: Person wearing brown leather boots, Photo by Kartini Maxson on Unsplash & Person standing near shore, Photo by Bianca Castillo on Unsplash.*

Η ένδυση στους εξωτερικούς χώρους, που είναι εκτεθειμένοι στις καιρικές συνθήκες και όπου οι συνθήκες δεν είναι ελεγχόμενες, όπως συμβαίνει στο εσωτερικό των κτιρίων, πρέπει να έχει ορισμένα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά, ανάλογα με την εποχή (χειμώνας ή καλοκαίρι) και το κλίμα (ψυχρό ή ζεστό) (Oke, 1995, σ. 226). Ο Givoni (1978, σ. 84) αναφέρει ότι για την έρημο, όπου η σχετική υγρασία είναι πολύ μικρή, η απαραίτητη εξάτμιση μπορεί να διατηρηθεί κάτω από τα ρούχα. Το κέρδος, λοιπόν, σε αυτή την περίπτωση από την ενδυμασία που προφυλάσσει το σώμα από την ακτινοβολία του ήλιου είναι σημαντικό, εφόσον δεν διακόπτεται και ο δροσισμός από την εξάτμιση του ιδρώτα. Η επίδραση του ανέμου στη μονωτική ικανότητα της ενδυμασίας προφανώς εξαρτάται από τη διαπερατότητα των υφασμάτων στον αέρα και τη γενική ανεμοστεγανότητά της. Ενδυμασίες που προορίζονται για εξωτερικές συνθήκες ψυχρών περιοχών πρέπει να είναι ανεμοστεγανές, ενώ αυτές που προορίζονται για θερμές περιοχές ανεμοδιαπερατές.

4.2.5 Υποκειμενικοί παράγοντες που αφορούν το άτομο

Τόσο ο Fanger (1973, σ. 69) όσο και ο Szokolay (1980, σ. 273) αναφέρονται σε μια σειρά υποκειμενικών ατομικών παραμέτρων που διαμορφώνουν την κατάσταση θερμικής άνεσης των ατόμων. Οι παράμετροι αυτές είναι: ο εγκλιματισμός, η εθνικότητα, η ηλικία, το φύλο, ο βιορυθμός, το σχήμα του σώματος, ο κύκλος περιόδου για τις γυναίκες, η κατανάλωση φαγητού και ποτού, η κατάσταση της υγείας και ο συνωστισμός.

Από την καθημερινή εμπειρία, η επίδραση των υποκειμενικών ατομικών παραμέτρων φαίνεται λογική και υπολογίσιμη. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, ο Fanger αναλύει όλες αυτές τις επιπλέον παραμέτρους με βάση υλοποιημένα πειράματα και έρευνες, σημειώνοντας ότι καμία από αυτές δεν είναι αρκετά σημαντική ώστε να συμπεριληφθεί στην Εξίσωση Άνεσης. Ο λόγος είναι, πιθανόν, ότι η Εξίσωση Άνεσης αναπτύχθηκε

βασικά για να συμβάλει στον αποτελεσματικό σχεδιασμό των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού. Έτσι, ενώ οι παράμετροι αυτές έχουν σίγουρα ποιοτική υπόσταση, ποσοτικά και αριθμητικά δεν φαίνεται να αναιρούν την Εξίσωση Άνεσης.

4.2.6 Ψυχολογικοί παράγοντες – Η έννοια της προσαρμοστικότητας

Η φυσική τάση των ανθρώπων να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντός τους εκφράζεται με την προσαρμοστική προσέγγιση της θερμικής άνεσης (*adaptive approach to thermal comfort*) (Nikol & Humphreys, 2002, σ. 563). Η αξιολόγηση αυτή βασίζεται μελέτες πεδίου, στις οποίες έχει βρεθεί ότι το εύρος των συνθηκών στις οποίες τα άτομα αισθάνονται άνεση είναι αρκετά πιο μεγάλο σε σχέση με αυτό που προκύπτει από την Εξίσωση της Θερμικής Άνεσης και τους διάφορους δείκτες (βλ. παρακάτω, παρ. 4.6) (Στο ίδιο). Η βασική υπόθεση της προσαρμοστικής προσέγγισης εκφράζεται από την αρχή προσαρμογής: εάν συμβεί μια αλλαγή η οποία προκαλεί δυσφορία, τα άτομα κάνουν τις απαραίτητες ενέργειες για να αποκαταστήσουν την άνεση (Nikol & Humphreys, 2002, σ. 564).

Το σύνολο των μη ποσοτικοποιήσιμων παραμέτρων που διαμορφώνουν τη θερμική άνεση συνοψίζεται στον όρο προσαρμοστικότητα (*adaptability*) (Βλ. Εικόνα 4.8). Η Νικολοπούλου (2002) ορίζει την προσαρμοστικότητα ως «τη βαθμιαία μείωση της αντίδρασης του οργανισμού σε επαναλαμβανόμενη έκθεση σε συγκεκριμένο ερέθισμα» και σημειώνει ότι η προσαρμοστικότητα «περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες ενέργειες που επιτρέπουν την καταλληλότερη επιβίωση σε αυτό το περιβάλλον».

Στο εσωτερικό των κτιρίων, οι Nikol & Humphreys (2002, σσ. 566-567) παραπέμπουν στους Leaman & Bordass (1997), οι οποίοι έχουν αποδείξει ότι οι ένοικοι κτιρίων που έχουν καλύτερη πρόσβαση στα συστήματα ελέγχου της λειτουργίας έχουν μεγαλύτερη κατανόηση και ευρύτερα όρια άνεσης. Η στάση αυτών των ενοίκων απέναντι σε προβλήματα στο θερμικό τους περιβάλλον είναι πιο ελαστική και μπορεί εν μέρει να εξηγηθεί με βάση την πρόσβασή στους στον έλεγχο των συστημάτων λειτουργίας. Σε κτίρια που λειτουργούν αποκλειστικά με τεχνητό κλιματισμό, οι διαφοροποιήσεις κρίνονται αρνητικά, καθώς οι ένοικοι είναι συνηθισμένοι σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες.

Η έννοια της θερμικής άνεσης στους υπαίθριους χώρους της πόλης έχει πολύ πιο ευρεία και ευμετάβλητα όρια απ’ ό,τι στο εσωτερικό των κτιρίων. Συγχρόνως, η εκτίμηση των συνθηκών που επικρατούν σε έναν υπαίθριο χώρο βασίζεται πρώτα στην αξιολόγηση των οπτικών και αισθητικών ερεθισμάτων που αυτός προσφέρει, και στη συνέχεια στην αξιολόγηση των μικροκλιματικών συνθηκών του (Boussoualim & Adolphe, 2002, σ. 338). Επίσης, η άμεση έκθεσή του υπαίθριου χώρου στις διημερήσιες και διεποχικές αλλαγές των καιρικών συνθηκών και της ηλιακής ακτινοβολίας, σε συνάρτηση με την πολυπλοκότητα της μορφής του, έχει ως αποτέλεσμα τη χρονική και χωρική διαφοροποίηση των συνθηκών θερμικής άνεσης. Το γεγονός αυτό καθιστά την εκτίμηση των συνθηκών άνεσης στους υπαίθριους χώρους ιδιαίτερα δύσκολη. Οι μέχρι σήμερα έρευνες αποδεικνύουν ότι η θερμική άνεση στους υπαίθριους χώρους των πόλεων διαμορφώνεται –πέρα από τους περιβαλλοντικούς και ατομικούς παράγοντες– και από ψυχολογικές παραμέτρους (Nikolopoulou et al., 1998, σ. 181).



Εικόνα 4.8 *Μοντέλο προσαρμοστικότητας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη), βασισμένη στο Weber et al. (1993-1995).*

Η προσαρμοστικότητα χωρίζεται σε φυσιολογική, φυσική και ψυχολογική. Η φυσιολογική προσαρμοστικότητα ταυτίζεται ουσιαστικά με το φαινόμενο του εγκλιματισμού. Η φυσική και η ψυχολογική προσαρμοστικότητα αναλύονται στη συνέχεια.

Φυσιολογική προσαρμοστικότητα – Εγκλιματισμός

Ο εγκλιματισμός αποτελεί ένα καλά τεκμηριωμένο φαινόμενο, το οποίο περιλαμβάνει μια σειρά φυσιολογικών προσαρμογών· αυτές ενεργοποιούνται σε άτομα τα οποία, έχοντας συνηθίσει να ζουν σε ψυχρό κλίμα, μεταφέρονται ξαφνικά σε ζεστό κλίμα, και το αντίστροφο (Fanger, 1973, σ. 82). Ο εγκλιματισμός σε ψυχρότερες συνθήκες αφορά ουσιαστικά τη ρύθμιση των ορμονών με στόχο την αύξηση του μεταβολικού ρυθμού (Szokolay, 1980, σ. 271). Αντίθετα, ο εγκλιματισμός σε θερμότερες συνθήκες περιλαμβάνει την αύξηση του ρυθμού εφίδρωσης και τη μείωση του μεταβολικού ρυθμού και των σφυγμών, με στόχο την αύξηση των θερμικών απωλειών και τη μείωση της παραγωγής εσωτερικής ενέργειας, αντίστοιχα (Givoni, 1998, σ. 21).

Ο Fanger σημειώνει ότι, με βάση πειραματικές έρευνες σε άτομα από χώρες του βόρειου ημισφαιρίου, ο εγκλιματισμός δεν προκαλεί σημαντικές διαφοροποιήσεις στις συνθήκες θερμικής άνεσης. Επίσης, αναφέρει ότι η σύγκριση των αποτελεσμάτων ερευνών πεδίου στους Τροπικούς και της Εξίσωσης Άνεσης δείχνουν ότι ισχύει (Fanger, 1973, σ. 85).

Φυσική προσαρμοστικότητα

Η φυσική προσαρμοστικότητα εκφράζεται με τις συνειδητές πράξεις των ανθρώπων, οι οποίες έχουν ως στόχο τη διαφοροποίηση του θερμικού περιβάλλοντός τους, επιδρώντας είτε στους περιβαλλοντικούς παράγοντες (θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, ταχύτητα αέρα και μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία) είτε στους αντίστοιχους ατομικούς παράγοντες (ένδυση και δραστηριότητα).

Οι Baker & Standeven (παραπομπή στο Nikol & Humphreys, 2002, σσ. 567-568) αναφέρονται στη «δυνατότητα προσαρμογής» (*adaptive opportunity*), που μεταφράζεται ως η δυνατότητα ανοίγματος ενός παραθύρου, ανοίγματος ή κλεισίματος των παντζουριών ή των ρολών, χρήσης ενός ανεμιστήρα κ.λπ., πρέπει όμως να περιλαμβάνει και τον ενδυματολογικό κώδικα (*dress code*), καθώς και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση ανάμεσα στα άτομα και το κτίριο. Αλλαγές στην ένδυση, στη δραστηριότητα και στη στάση, καθώς και ενίσχυση της κίνησης του αέρα αλλάζουν τις συνθήκες στις οποίες τα άτομα νοιώθουν άνετα. Πολλές δυνατότητες προσαρμογής που είναι διαθέσιμες στα κτίρια δεν έχουν άμεσο αποτέλεσμα στις συνθήκες θερμικής άνεσης, επιτρέπουν ωστόσο στους χρήστες να τις αλλάξουν, έτσι ώστε να τους ταιριάζουν. Το εύρος των συνθηκών που θεωρούνται άνετες επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του

κτιρίου και τις δυνατότητες για εξατομικευμένη προσαρμογή από τους χρήστες (Στο ίδιο). Έτσι, σε ό,τι αφορά τους περιβαλλοντικούς παράγοντες της άνεσης, η προσαρμογή περιλαμβάνει ρυθμίσεις του κελύφους των κτιρίων, για παράδειγμα τον χειμώνα, την απόσυρση εσωτερικών μέσων, όπως κουρτίνες, με στόχο το άμεσο ηλιακό κέρδος, ενώ το καλοκαίρι, το άνοιγμα των παραθύρων με στόχο την ενίσχυση του αερισμού, το κλείσιμο των παντζουριών με στόχο την ηλιοπροστασία κ.λπ. Σε ό,τι αφορά τους ατομικούς παράγοντες, οι συνειδητές αυτές πράξεις έχουν να κάνουν με τη διαφοροποίηση της ένδυσης (π.χ. προσθήκη ή αφαίρεση ρούχων ανάλογα με τις συνθήκες, βλ. Εικόνα 4.9), αλλά και των δραστηριοτήτων, όπως ο μεσημεριανός ύπνος (*siesta*), αλλά και ο ύπνος στα δώματα το βράδυ (Rapoport, 1969, σ. 90) σε περιοχές με θερμά ή ζεστά καλοκαίρια.

Στον υπαίθριο χώρο της πόλης τα όρια άνεσης δεν είναι τόσο στενά και οι άνθρωποι βρίσκονται εκεί είτε καθώς κινούνται από το ένα κτίριο στο άλλο είτε για λόγους αναψυχής. Η προσαρμοστικότητα εκφράζεται με την επιλογή της κατάλληλης ένδυσης και την αναζήτηση της κατάλληλης θέσης ανάλογα με την εποχή και τις καιρικές συνθήκες (Katzschner et al., 2002, σ. 413). Η προτίμηση των υπαίθριων χώρων διαφοροποιείται ανάλογα με την εποχή. Κατά τους χειμερινούς μήνες, οι άνθρωποι προτιμούν υπαίθριους χώρους, όπου κυριαρχούν τα τεχνητά στοιχεία και υλικά και απρόσκοπτος ηλιασμός. Αντίθετα, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και ιδιαίτερα στα θερμότερα κλίματα, οι χώροι που προτιμώνται για στάση και αναψυχή είναι εκείνοι όπου υπάρχει σκιά και δροσιά, δηλαδή φυτεμένοι χώροι, όπως πάρκα και κήποι (Boussoualim & Adolphe, 2002, σ. 339· Katzschner et al., 2002, σ. 414· Dessi, 2002, σ. 375).

Αντίστοιχα, ο ίδιος υπαίθριος χώρος χρησιμοποιείται διαφορετικά ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Ένα απλό παράδειγμα είναι ο τρόπος με τον οποίο περπατάει κανείς στους αστικούς δρόμους, τον χειμώνα και το καλοκαίρι. Τον χειμώνα, όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι επιθυμητή και ευχάριστη κανείς επιλέγει να περπατάει στο πεζοδρόμιο που λιάζεται, ενώ το καλοκαίρι συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο.



Εικόνα 4.9 *Οικογένεια Εσκιμώων Inuit, c.1917. Πηγή: Eskimo Family by George R. King via Wikimedia Commons, Public domain.*

Ψυχολογική προσαρμοστικότητα

Η ψυχολογική προσαρμοστικότητα αφορά την επίδραση που έχει στην αίσθηση θερμικής άνεσης το σύνολο των προσωπικών, κοινωνικών, ιστορικών και πολιτιστικών εμπειριών του κάθε ανθρώπου. Οι εμπειρίες αυτές αποτελούν στην ουσία το φίλτρο, μέσα από το οποίο «περνάει» κάθε ερέθισμα και συμβάλλουν στην αξιολόγηση της σημασίας του. Αυτή η αξιολόγηση των συνθηκών θερμικής άνεσης συνοψίστηκε από τους Baker και Standeven στον όρο γνωστική ανοχή (*cognitive tolerance*), με βάση την οποία η αναγνώριση και η κατανόηση της αιτίας ενός συγκεκριμένου περιβαλλοντικού ερεθίσματος έχουν ως αποτέλεσμα την ανοχή του και τη διεύρυνση των ορίων άνεσης (Baker & Standeven, 1995).

Ένα απλό παράδειγμα είναι ο τρόπος με τον οποίο η ηλιοφάνεια επηρεάζει τη χρήση των αστικών υπαίθριων χώρων, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα μιας περιοχής. Έτσι, στις βόρειες χώρες, η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία είναι ευπρόσδεκτη σε όλη τη διάρκεια του χρόνου, ανεξάρτητα από τις

υπόλοιπες καιρικές συνθήκες (Γιάννας, 2002). Κατά συνέπεια, είναι δυνατό, ακόμα και σε συνθήκες υπερθέρμανσης, ο αριθμός των ατόμων που βρίσκονται στις εκτεθειμένες περιοχές μιας πλατείας να είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο στις σκιασμένες (Katzschner et al., 2002, σ. 413). Στην περιοχή της Μεσογείου, η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία έχει εποχικό χαρακτήρα, δηλαδή είναι επιθυμητή τον χειμώνα, το φθινόπωρο και την άνοιξη, αλλά μάλλον δυσάρεστη το καλοκαίρι. Τέλος, σε υποτροπικά και τροπικά κλίματα, η μεγάλη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε όλη τη διάρκεια του χρόνου κάνει τους ανθρώπους να αποφεύγουν, κατά το δυνατό, την έκθεση σε αυτή.

Με τον ίδιο τρόπο εξηγείται το γεγονός ότι το καλοκαίρι περιβάλλοντα υψηλής ιστορικής και αισθητικής αξίας, όπως το εσωτερικό ενός παραδοσιακού κτιρίου ή ένας αστικός υπαίθριος χώρος με πυκνή βλάστηση και νερό, κρίνονται ως δροσερά, ακόμα και αν οι συνθήκες που επικρατούν εκεί δεν διαφέρουν σημαντικά από τις συνθήκες που επικρατούν σε ένα οποιοδήποτε σύγχρονο κτίριο ή σε έναν οποιοδήποτε αστικό χώρο. Οι Markus και Morris (1980, σ. 72) σημειώνουν και την πιθανή επίδραση συσχετισμών που έχουν σχέση με τον κίνδυνο και την αίσθηση περιπέτειας, όπως συμβαίνει με όλες τις δραστηριότητες που πραγματοποιούνται σε ακραίες κλιματικές συνθήκες, για παράδειγμα τα αθλήματα στη θάλασσα και στο βουνό.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι η αίσθηση άνεσης προσλαμβάνεται ως συνδυασμός της θερμικής κατάστασης, των πέντε αισθήσεων και των νοητικών λειτουργιών. Οι Rauzier και Berger (1991, σ. 143) σημειώνουν ότι η δυσφορία προέρχεται από όλα τα παραπάνω ως αθροιστικό αποτέλεσμα, ενώ υπάρχει αλληλεπίδραση που γίνεται αισθητή ως θερμική συνεισφορά. Με τον τρόπο αυτόν, εξηγούν τη θετική επίδραση που έχουν στις συνθήκες θερμικής άνεσης η απουσία οχημάτων (άγχος, θόρυβος, κυκλοφοριακός φόρτος), οι οσμές και τα χρώματα από τα φυτά, η ευχαρίστηση που προσφέρει η ιστορική αρχιτεκτονική και η ευχαρίστηση των ήχων της καθημερινότητας (Rauzier & Berger, 1991, σ. 143).

Ακόμη ένας παράγοντας που συσχετίζεται με την αξιολόγηση των συνθηκών θερμικής άνεσης είναι η κοινωνική και οικονομική καταγωγή των ατόμων. Οι άνθρωποι που ανήκουν σε κατώτερα οικονομικά στρώματα έχουν ευρύτερα όρια άνεσης ως προς το κρύο και τη ζέστη, ενώ συγχρόνως εκτιμούν ένα μέτριο ή κακό θερμικό περιβάλλον με καλύτερους όρους απ’ ό,τι τα άτομα που ανήκουν σε υψηλότερες κοινωνικοοικονομικές ομάδες (Markus & Morris, 1980, σ. 72). Το γεγονός αυτό αναλύεται και υποστηρίζεται ιδιαίτερα από τον Givoni, ο οποίος το χαρακτηρίζει ως καθοριστικό για τις συνθήκες άνεσης ανθρώπων που ζουν σε αναπτυσσόμενες χώρες με ζεστό-ξηρό και ζεστό-υγρό κλίμα. Ο Givoni υποστηρίζει ότι οι άνθρωποι αυτοί αποδέχονται μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα, ενώ ταυτόχρονα διαφοροποιούν την ένδυση, τη δραστηριότητα, αλλά και το περιβάλλον τους με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών θερμικής άνεσης (Givoni, 1998, σ. 36).

Όλες οι παράμετροι άνεσης (θερμικής, οπτικής, ακουστικής) επηρεάζονται από υποκειμενικούς παράγοντες. Έτσι, παρόλο που υπάρχουν γενικά αποδεκτά όρια, η ερμηνεία και οι αντιδράσεις στα διάφορα θερμικά, οπτικά και ακουστικά ερεθίσματα ποικίλλουν από άτομο σε άτομο, καθώς εξαρτώνται, σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιαιτερότητες, τη διάθεση και τις προσδοκίες κάθε ατόμου (ψυχολογικές παράμετροι), αλλά και από παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπως ο μεταβολισμός κ.λπ. Έτσι, οι συνθήκες θερμικής άνεσης για τα άτομα που κάνουν ηλιοθεραπεία κατά τις μεσημεριανές ώρες του καλοκαιριού κρίνονται ως ευχάριστες (Markus & Morris, 1980), ενώ αντίθετα οι ίδιες συνθήκες προκαλούν θερμική δυσφορία στα άτομα που κινούνται σε ασκίαστους υπαίθριους χώρους στην πόλη. Αντίστοιχα, σε παραδοσιακούς οικισμούς στην περιοχή της Μεσογείου και της Μέσης Ανατολής, η χρήση ανοιχτών χρωμάτων μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα οπτικής θάμβωσης, τα οποία όμως δεν αξιολογούνται αρνητικά, όπως αντίθετα συμβαίνει σε ένα φορτισμένο αστικό κέντρο. Και βέβαια, η ένταση του θορύβου και της μουσικής σε ένα υπαίθριο μπαρ κρίνεται ως ευχάριστη από τα άτομα που βρίσκονται εκεί, ενώ αντίθετα μπορεί να προκαλεί ενόχληση στους ανθρώπους που κάθονται σε έναν κοντινό υπαίθριο χώρο ή σε ένα μπαλκόνι.

Τέλος, είναι προφανές ότι οι συνθήκες άνεσης στους υπαίθριους χώρους της πόλης δεν είναι δυνατό να ρυθμιστούν στον βαθμό στον οποίο αυτό συμβαίνει στο εσωτερικό των κτιρίων. Άλλωστε, ο χρόνος που περνούν οι κάτοικοι της πόλης σε εξωτερικούς χώρους, καθώς και οι δραστηριότητές τους εκεί διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με τους εσωτερικούς χώρους (Lopez de Asiain, 1990, σ. 78.). Αντίστοιχα, οι προσλαμβάνουσες στις συνθήκες θερμικής, οπτικής και ακουστικής άνεσης στους εξωτερικούς χώρους διαφέρουν από εκείνες στους εσωτερικούς χώρους κατοικίας και εργασίας. Με άλλα λόγια, τα αποδεκτά όρια, η ερμηνεία και οι αντιδράσεις στα διάφορα θερμικά, οπτικά και ακουστικά ερεθίσματα είναι πολύ πιο ελαστικά και διαπραγματεύσιμα στον υπαίθριο χώρο της πόλης.

4.3 Εκτίμηση της θερμικής άνεσης

4.3.1 Γενικά

Η εκτίμηση της θερμικής άνεσης αποτελεί ένα ιδιαίτερα εκτεταμένο πεδίο έρευνας, παρουσιάζεται σε ξεχωριστή ενότητα. Κατά τον σχεδιασμό των κτιρίων, για την εκτίμηση του παρεχόμενου θερμικού περιβάλλοντος, είναι χρήσιμη η κριτική των συνθηκών θερμικής άνεσης και η εξαγωγή συμπερασμάτων με βάση μια τυποποιημένη μεθοδολογία. Οι θερμικοί δείκτες και τα διαγράμματα θερμικής άνεσης καλύπτουν αυτήν την ανάγκη, καταγράφοντας με παραστατικό τρόπο και μεθοδευμένο τρόπο τη θερμική αίσθηση ενός δεδομένου εσωτερικού περιβάλλοντος.

4.3.2 Δείκτες θερμικής άνεσης

Για να γίνει κατανοητή η σχέση και η αλληλεπίδραση των έξι παραμέτρων που επηρεάζουν τη θερμική άνεση πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει διάφορους δείκτες, με στόχο την εκτίμηση του θερμικού περιβάλλοντος, τη θερμική κατάσταση, καθώς και τη θερμική αίσθηση του ανθρώπου. Οι δείκτες θερμικής άνεσης είναι διάφορα υπολογιστικά μοντέλα που δίνουν μια αποτίμηση της θερμικής δυσφορίας, η οποία αφορά είτε το κρύο είτε τη ζέστη. Ο Szokolay (1980, σσ. 276-277) διακρίνει τους διαθέσιμους δείκτες για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης σε αναλυτικούς (*analytical indices*) και εμπειρικούς (*empirical indices*) (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 43).

Οι εμπειρικοί δείκτες συνδυάζουν έναν ή περισσότερους περιβαλλοντικούς παράγοντες σε έναν και στη συνέχεια υπολογίζουν την επίδραση αυτού στις συνθήκες θερμικής άνεσης (Fanger, 1973, σ. 109). Οι εμπειρικοί δείκτες προκύπτουν κυρίως από πειράματα που αφορούν κυρίως την αποτίμηση του θερμικού περιβάλλοντος συγκεκριμένων περιβαλλοντικών συνθηκών (Szokolay, 1980, σ. 276). Ενδεικτικά αναφέρονται οι: ET (Yaglou et al., 1923-24), EqT (Dufton & Bedford, 1932-36), To (Gagge et al., 1937-40), SET (Gagge et al., 1973) και CET (Gagge et al., 1974) (Fanger, 1973, σσ. 108-9 και Szokolay, 1980, σσ. 276-277).

Οι αναλυτικοί δείκτες επικεντρώνονται στις διαδικασίες μετάδοσης θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα στο περιβάλλον, λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο με τον οποίο οι διάφοροι περιβαλλοντικοί παράγοντες επιδρούν σε αυτή τη ροή θερμότητας. Ο κύριος στόχος των αναλυτικών δεικτών είναι η εκτίμηση του βαθμού θερμικής δυσφορίας (Szokolay, 1980, σσ. 276-277), και άρα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση κοινών, μη ακραίων συνθηκών (Fanger, 1973, σ. 108). Ενδεικτικά αναφέρονται οι: P4SR (McArdle et al., 1947, 1955, 1960), HSI (Belding & Hatch, 1955-56) και RSI (Lee & Henschel, 1963, 1965-66) (Fanger, 1973, σσ. 108-9 και Szokolay, 1980, σσ. 276-277). Σήμερα, ο πιο γενικευμένος τρόπος εκτίμησης της θερμικής δυσφορίας είναι με τη χρήση των δεικτών της Προβλεπόμενης Μέσης Ψήφου (Predicted Mean Vote – PMV) και του Προβλεπόμενου Ποσοστού Δυσαρεστημένων (Predicted Percentage of Dissatisfied – PPD), που αναπτύχθηκαν από τον Fanger. Αυτό οφείλεται τόσο στην υιοθέτησή τους από το ISO 7330: 1984 όσο και στην ενσωμάτωσή τους σε λογισμικά προγράμματα ενεργειακής προσομοίωσης (π.χ. Design Builder®) και διαδικτυακές εφαρμογές (AndrewMarsh.com).

Μια σύντομη αναφορά στους πιο σημαντικούς δείκτες θερμικής άνεσης πραγματοποιείται στη συνέχεια:

- η λειτουργική θερμοκρασία (Το),
- η τυπική ενεργός θερμοκρασία (SET),
- η προβλεπόμενη μέση ψήφος (PMV),
- το προβλεπόμενο ποσοστό δυσαρεστημένων (PPD).

Λειτουργική θερμοκρασία

Πρόκειται για έναν δείκτη που συνδυάζει τη θερμοκρασία του αέρα, τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία και την κίνηση του αέρα. Ορίζεται ως η ενιαία θερμοκρασία ενός φανταστικού χώρου, στον οποίο το άτομο θα ανταλλάσσει το ίδιο ποσό θερμότητας, με ακτινοβολία και μεταφορά, όπως στο πραγματικό περιβάλλον. Για ταχύτητα αέρα μικρότερη από 0,2 m/s, η Λειτουργική Θερμοκρασία είναι ο μέσος όρος της θερμοκρασίας αέρα και της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 43).

Τυπική Ενεργός Θερμοκρασία

Η Τυπική Ενεργός Θερμοκρασία (Standard Effective Temperature – SET) είναι ένας δείκτης που έχει υιοθετηθεί από την American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) και έχει χρησιμοποιηθεί από μηχανικούς παγκοσμίως. Οποιοδήποτε περιβάλλον, ενδυμασία και δραστηριότητα ανάγονται σε ένα φανταστικό ενιαίο περιβάλλον με σχετική υγρασία 50%, ταχύτητα αέρα 0,125 m/s, δραστηριότητα 1 MET (καθιστή στάση 58 W/m^2) και ενδυμασία 0,6 clo (κανονικά ελαφρά ρούχα εσωτερικού χώρου). Έτσι, π.χ., αν για οποιονδήποτε συνδυασμό των έξι παραμέτρων της θερμικής άνεσης η SET είναι 5^oC, αυτό θα σημαίνει ότι η θερμική αίσθηση θα είναι η ίδια όπως για ένα καθιστό άτομο που φορά ρούχα εσωτερικού χώρου και σε ενιαίο περιβάλλον 5^oC με ακίνητο αέρα και σχετική υγρασία 50% (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 43).

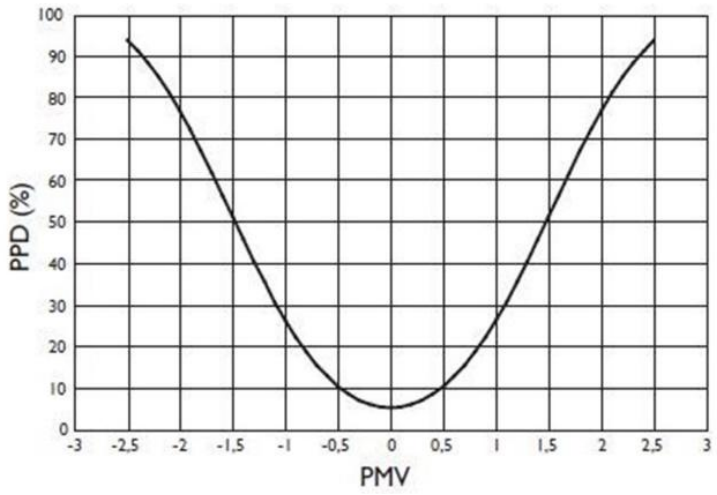
Οι Markus & Morris (1980, σ. 57) υποστηρίζουν ότι η χρήση των ψυχρομετρικών χαρτών από τους οποίους προκύπτουν οι τιμές SET, w και DISC (thermal discomfort) αποτελούν τον καλύτερο τρόπο εκτίμησης των συνθηκών θερμικής άνεσης, τόσο στο εσωτερικό των κτιρίων όσο και στους υπαίθριους χώρους της πόλης (Markus & Morris, 1980, σ. 57). Οι τρεις αυτοί δείκτες αναφέρονται και από τους Weber et al. (1993-1995) ως οι αμέσως επικρατέστεροι των PMV και PPD, ενώ σημειώνεται ότι ειδικά ο w είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την εκτίμηση της θερμικής δυσφορίας σε ζεστές συνθήκες περιβάλλοντος. Αυτό συμβαίνει γιατί οι τρεις δείκτες αλληλοσυμπληρώνονται. Η SET δίνει τον συνδυασμό όλων των περιβαλλοντικών συνθηκών, ο DISC δίνει άμεσα την απόλυτη εκτίμηση του θερμικού περιβάλλοντος για τους διαφορετικούς συνδυασμούς των περιβαλλοντικών και ατομικών παραγόντων, ενώ τέλος ο w προσθέτει την επιπλέον πληροφορία του βαθμού εφίδρωσης του δέρματος.

Προβλεπόμενη Μέση Ψήφος (PMV) και Προβλεπόμενο Ποσοστό Ανικανοποίητων (PPD)

Ο δείκτης PMV (Predicted Mean Vote – PMV) της Προβλεπόμενης Μέσης Ψήφου εκφράζει την εκτίμηση της αίσθησης θερμικής άνεσης ενός περιβάλλοντος για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των τεσσάρων βασικών περιβαλλοντικών παραγόντων (θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, ταχύτητα αέρα και μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία) και των δύο βασικών ατομικών παραγόντων (δραστηριότητα και ένδυση). Ο δείκτης χρησιμοποιεί την κλίμακα εύρους από το 1 έως το 7 της ASHRAE, με τη διαφορά ότι διαφοροποιεί το εύρος συμμετρικά ως προς το 0, από το -3 (κρύο) έως το +3 (ζεστό), με αποτέλεσμα οι θετικές τιμές της PMV να αφορούν την εκτίμηση της θερμικής δυσφορίας ως προς τη ζέστη και οι αντίστοιχες αρνητικές τιμές την εκτίμηση της θερμικής δυσφορίας ως προς το κρύο (Fanger, 1973, σ. 110).

Η PMV αποτελεί τον μέσο όρο της εκτίμησης του θερμικού περιβάλλοντος ενός μεγάλου αριθμού ατόμων με την ίδια δραστηριότητα και ένδυση, που είναι εκτεθειμένα σε ένα συγκεκριμένο συνδυασμό περιβαλλοντικών παραγόντων. Στην ουσία εκφράζει τον γενικό βαθμό δυσφορίας μιας ομάδας ατόμων. Το πρόβλημα της PMV είναι ότι είναι δύσκολο να μεταφραστεί πρακτικά. Για τον λόγο αυτόν, ο Fanger (1973, σ. 128) ορίζει τον δείκτη PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), δηλαδή το Προβλεπόμενο Ποσοστό Ανικανοποίητων, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του το γεγονός ότι ανάμεσα στα άτομα μιας ομάδας υπάρχουν σίγουρα διαφορές στην αίσθηση θερμικής άνεσης και δίνει συμπληρωματικές πληροφορίες ως προς τα άτομα που νοιώθουν άβολα. Ο δείκτης PPD συμπληρώνει τον PMV και δίνει τα ποσοστά των ατόμων που αισθάνονται έλλειψη θερμικής άνεσης σε ένα δεδομένο θερμικό περιβάλλον, δηλαδή τον αριθμό των ατόμων σε ποσοστό επί τοις εκατό, που αναμένεται να είναι δυσαρεστημένοι, και για τον λόγο αυτό είναι εύκολο να ερμηνευτεί. Η σημασία του PPD είναι μεγάλη, καθώς τα άτομα που είναι δυσαρεστημένα με το θερμικό περιβάλλον είναι και εκείνα που είναι πιθανότερο να παραπονεθούν (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 43). Αν, π.χ. ο δείκτης PMV κυμαίνεται από -1 έως +1, τότε ο δείκτης PPD δείχνει ότι ένα ποσοστό 25% των ατόμων δεν θα είναι ικανοποιημένα από αυτές τις θερμικές συνθήκες. Για τη δημιουργία του δείκτη, ο Fanger (1970, σ. 128) χρησιμοποίησε ένα πλήθος 1.296 ατόμων και κατέγραψε τις αντιδράσεις τους χρησιμοποιώντας την κλίμακα της Μέσης Προβλεπόμενης Ψήφου.

Η καμπύλη που συνδέει τα PMV και PPD είναι συμμετρική ως προς την τιμή PMV = 0, όπου υπάρχει η ελάχιστη τιμή PPD = 5% (Εικόνα 4.10). Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στις ιδανικότερες συνθήκες θερμικής άνεσης. Το γεγονός ότι σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να επιτευχθεί ποσοστό PPD μικρότερο του 5%, εκφράζει την αδυναμία που υπάρχει να ικανοποιηθούν πλήρως οι θερμικές προτιμήσεις όλων των ατόμων μιας ομάδας. Με άλλα λόγια, αναγνωρίζεται το ότι ακόμα και σε ένα ιδανικά ομοιόμορφο θερμικό περιβάλλον θα υπάρχει πάντα ένας μικρός αριθμός ατόμων που θα αισθάνονται άβολα (Fanger, 1973, σ. 130).



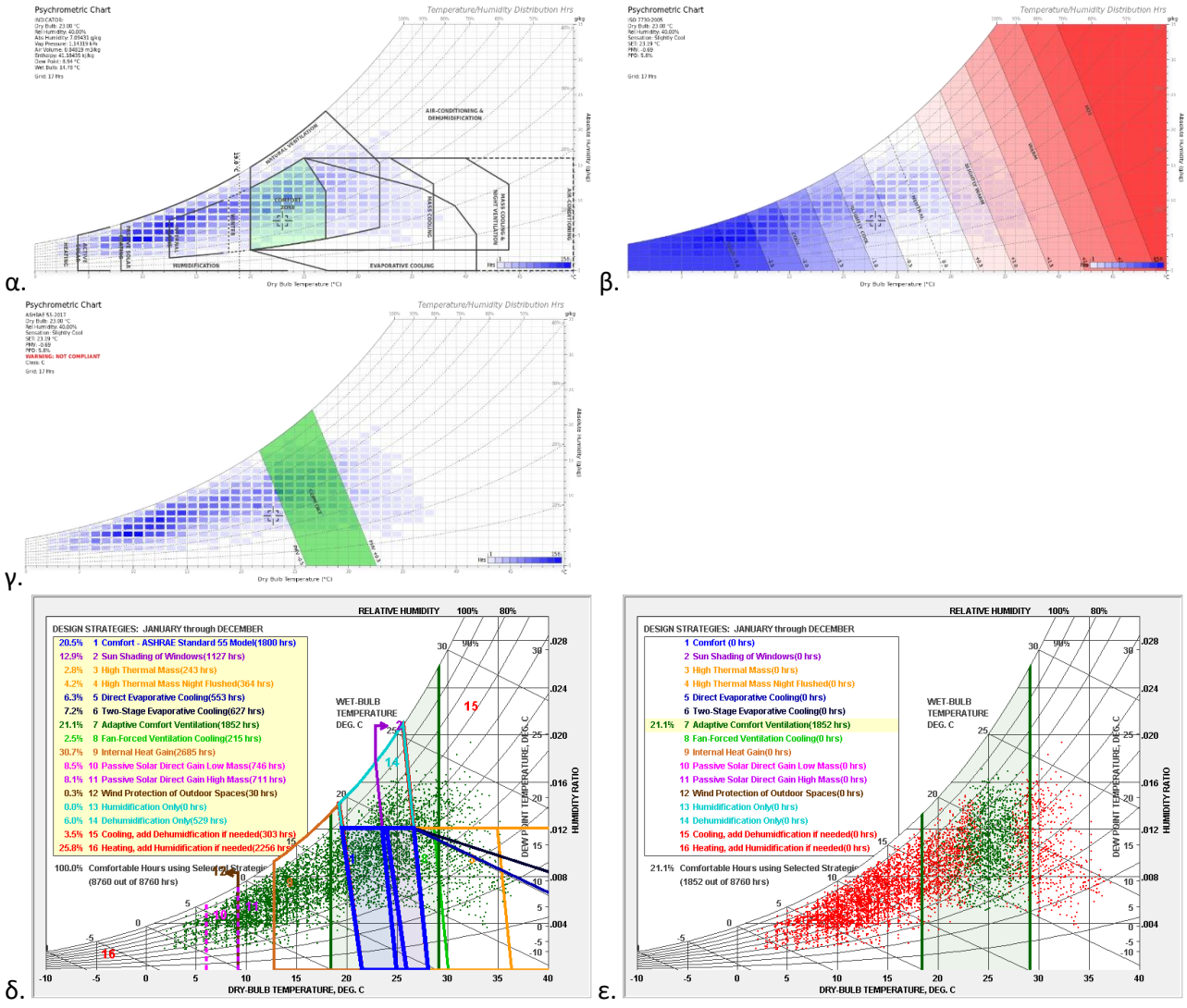
Εικόνα 4.10 *Οι δείκτες PMV και PPD και η μεταξύ τους σχέση. Πηγή: PMV PPD by Benjamin BERT via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.*

4.3.3 Διαγράμματα θερμικής άνεσης

Όπως προαναφέρθηκε, η σχέση μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν τη θερμική άνεση ορίζεται από την Εξίσωση Θερμικής Άνεσης, η οποία βασίστηκε και επιβεβαιώθηκε από έρευνες που γίνονται με τη χρήση ενός ειδικά επιλεγμένου πλήθους ανθρώπων και με την καταγραφή των αντιδράσεών τους στις παραμετρικές αλλαγές. Τα διαγράμματα άνεσης είναι ο πιο άμεσος και κατανοητός τρόπος της παρουσίασης των σχέσεων μεταξύ των θερμικών δεικτών και των άλλων παραμέτρων θερμικής άνεσης, καθώς και των προβλεπόμενων ποσοστών των δυσαρεστημένων (PPD) (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 44).

Τα διαγράμματα θερμικής άνεσης συνδυάζουν τους περιβαλλοντικούς και ατομικούς παράγοντες άνεσης και δίνουν, με γραφικό τρόπο είτε μια εκτίμηση των συνθηκών άνεσης είτε προτάσεις και στρατηγικές βιοκλιματικού σχεδιασμού για την επίτευξη ή τη διεύρυνση συνθηκών άνεσης. Παρόλο που κάποια από αυτά τα διαγράμματα, όπως ο Βιοκλιματικός Χάρτης του Olgyay και τα διαγράμματα των Markus και Morris, δεν χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως, παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Μια σημαντική «οικογένεια» διαγραμμάτων η οποία τείνει να επικρατήσει τα τελευταία χρόνια είναι αυτή που χρησιμοποιεί ως βάση το «ψυχρομετρικό διάγραμμα» (βλ. Κεφ. 2, παρ. 2.9) και περιλαμβάνει τον «Κτιριακό Βιοκλιματικό Χάρτη» (Building Bio-Climatic Chart – BBCC) του Givoni και τα ψυχρομετρικά διαγράμματα που δίνονται από διαφορετικά λογισμικά (π.χ. Climate Consultant®) και διαδικτυακές εφαρμογές (π.χ. AndrewMarsh.com), τα οποία ενσωματώνουν τις αρχές των Olgyay και Givoni, σε συνδυασμό με τα πρότυπα ASHRAE Standard 55 and EN 1679801: 2019 (πρώην EN 15251: 2007) (όπως παρουσιάζονται ενδεικτικά στην Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11 *Συγκριτική απεικόνιση της ζώνης θερμικής άνεσης με βάση:*
α. τον Βιοκλιματικό Χάρτη του Givoni, β. το πρότυπο ISO 7330-2005 (PMV). Πηγή: Psychrometric Chart by © Dr. Andrew J. Marsh, 2020, CC BY-NC-SA 4.0 Αρχείο κλιματικών δεδομένων: Athens 167160 (IWEC) via EnergyPlus Weather Data Download, γ. και δ. το πρότυπο ASHRAE 55-2017 και ε. την προσαρμοστική άνεση. Πηγή: Developed by the UCLA Energy Design Tools Group, Climate Consultant (v.6.0), © Regents University © SBSE 2014-2018.

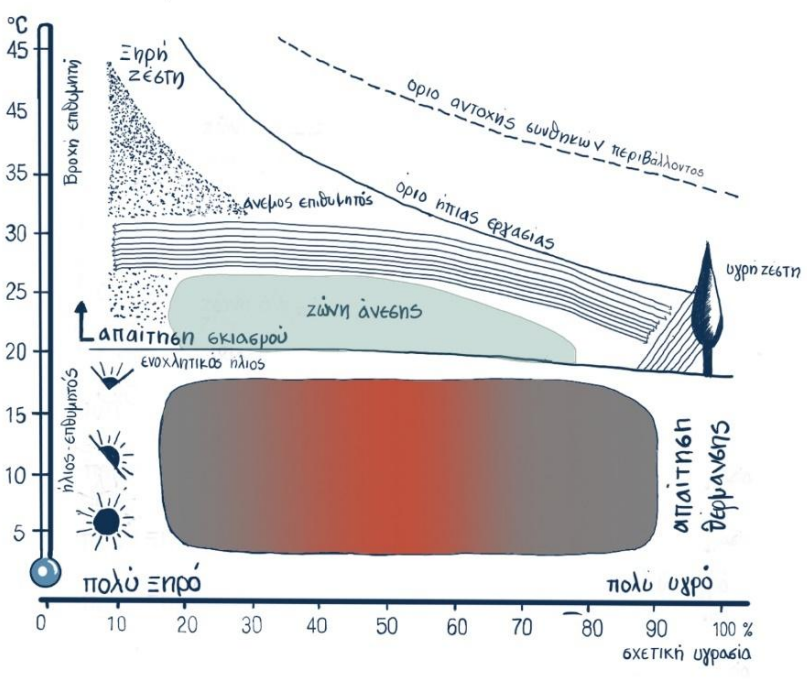
Ο βιοκλιματικός χάρτης του Olgyay

Ένας από τους πρώτους που πρότειναν ένα διάγραμμα θερμικής άνεσης ήταν ο Olgyay (1963). Αναφέρεται στις συνθήκες θερμικής άνεσης ατόμων με τυπική ενδυμασία εσωτερικού χώρου που κάθονται ή εκτελούν ελαφριές δραστηριότητες και ισχύει για τις περιοχές των ΗΠΑ με γεωγραφικό πλάτος 40° και υψόμετρο έως 305 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας (Olgyay & Olgyay, 1963, σ. 22). Η ζώνη άνεσης ορίζεται ανάμεσα στους 21,1 και τους 27,7°C (Olgyay & Olgyay, 1963, σ. 19), με τιμές σχετικής υγρασίας ανάμεσα στο 30% και το 65% (Olgyay & Olgyay, 1963, σ. 18). Σχετικά με αυτά τα όρια της ζώνης άνεσης, ο Szokolay αναφέρει ότι δεν είναι απόλυτα, αλλά μπορεί να είναι ευρύτερα ή στενότερα ανάλογα με το κλίμα ή και τις προσδοκίες των ανθρώπων (Szokolay, 1980, σσ. 275-276).

Ο βιοκλιματικός χάρτης του Olgyay συσχετίζει τους τέσσερις περιβαλλοντικούς παράγοντες για ένα άτομο που έχει μια ορισμένη δραστηριότητα και ένδυση. Η ζώνη άνεσης καταγράφεται στο διάγραμμα ανάλογα με τη θερμοκρασία αέρα και τη σχετική υγρασία και περιορίζεται από μια καθορισμένη ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας 16°C και μια ανώτερη 23°C, για ένα άτομο με καθιστική δραστηριότητα και ένδυση 1 clo (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 45).

Η ζώνη αυτή τροποποιείται από την κίνηση του αέρα και τη θερμοκρασία ακτινοβολίας, τόσο για τον εσωτερικό όσο και για τον εξωτερικό χώρο, με τιμές ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο. Για τον εσωτερικό χώρο, μια κλίμακα θερμοκρασίας ακτινοβολίας (MRT) δίνεται στο διάγραμμα κάτω-αριστερά· αυτή δείχνει ότι μια αύξηση της MRT κατά 0,8°C αντισταθμίζει μια μείωση της θερμοκρασίας του αέρα (DBT) κατά 1°C (οι τιμές της MRT φτάνουν μέχρι 5°C, γιατί σε εσωτερικό χώρο είναι απίθανο να υπάρχουν διαφορές μεταξύ MRT και DBT μεγαλύτερες από 5°C (Στο ίδιο).

Για να χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα αυτό όταν υπάρχει κίνηση αέρα, η περιοχή άνεσης μετακινείται παράλληλα μέχρι τη γραμμή που ορίζει τη δεδομένη ταχύτητα του αέρα. Όταν μάλιστα σε εξωτερικό χώρο επιδρά ηλιακή ακτινοβολία γνωστής έντασης (στο διάγραμμα καταγράφονται τιμές από 100 έως 700 W/m^2), τότε η περιοχή άνεσης μετακινείται παράλληλα, μέχρι τη γραμμή που ορίζει τη δεδομένη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας. Το ίδιο ισχύει όταν σε εσωτερικό χώρο έχουμε διαφορά ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας (MRT) από τη θερμοκρασία αέρα (DBT). Τότε, η ζώνη άνεσης μετακινείται παράλληλα, μέχρι τη γραμμή που ορίζει τη δεδομένη διαφορά MRT-DBT (που, όπως προαναφέρθηκε, φτάνει τους 5°C) (Στο ίδιο).



Εικόνα 4.12 *Απόδοση του Βιοκλιματικού Χάρτη του Olgyay από τον Szokolay. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου), με δεδομένα από Szokolay (1980), σ. 276.*

Οι Olgyay (1963, σ. 23) θεωρούν σημαντική τη χρήση του Βιοκλιματικού Χάρτη για την αξιολόγηση των βασικών κλιματικών δεδομένων μιας περιοχής, καθώς με τον τρόπο αυτόν φαίνονται τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται ώστε να επικρατούν συνθήκες θερμικής άνεσης. Ο Szokolay (1980, σ. 279) σημειώνει ότι ο Βιοκλιματικός Χάρτης του Olgyay αποτελεί το πιο κατάλληλο εργαλείο για την οπτικοποίηση και τον καθορισμό των παραμέτρων θερμικής άνεσης, καθώς ενσωματώνει όλους τους βασικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες (θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, ταχύτητα αέρα και μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία) σε ένα και μόνο διάγραμμα, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει τον δυναμικό χειρισμό τους (Szokolay, 1980, σ. 276). Τέλος, ο Βιοκλιματικός Χάρτης του Olgyay συνυπολογίζει το αποτέλεσμα της ακτινοβολίας που υπάρχει στους εξωτερικούς χώρους (Szokolay, 1980, σ. 274).

Τα διαγράμματα άνεσης του Fanger

Η πολυπλοκότητα της Εξίσωση Άνεσης του Fanger καθιστά σχεδόν αδύνατη την εύκολη χρήση της σε απλά, πρακτικά προβλήματα. Για τον λόγο αυτόν, ο Fanger ανέπτυξεμια σειρά από διαγράμματα, τα οποία καλύπτουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των παραμέτρων που την επηρεάζουν (Fanger, 1973, σ. 43). Τα διαγράμματα άνεσης του Fanger παρουσιάζουν τις γραμμές άνεσης, δηλαδή τις γραμμές που διέρχονται από σημεία (συνθήκες) που ικανοποιούν την Εξίσωση Άνεσης και άρα παρέχουν την καλύτερη θερμική άνεση (Fanger, 1973, σ. 43). Η συνολική μελέτη του Fanger αφορά την επίτευξη συνθηκών άνεσης στο εσωτερικό των κτιρίων μέσω της ρύθμισης ενός ή περισσότερων περιβαλλοντικών παραγόντων.

Οι ψυχρομετρικοί χάρτες των Markus και Morris

Τα διαγράμματα των Markus και Morris έχουν συνταχθεί για μια ποικιλία 55 συνδυασμών ενδυμασίας, δραστηριότητας και ταχύτητας αέρα. Έχουν καταγραφεί σε αυτά (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 46-47):

- Ο θερμικός δείκτης της Τυπικής Ενεργού Θερμοκρασίας (Standard Effective Temperature – SET).
- Το ποσοστό της επιδερμικής ύγρανσης, w, το οποίο λαμβάνει τιμές από w = 0,06, όταν δεν εμφανίζεται εφίδρωση στο ανθρώπινο σώμα και φτάνει στην ανώτερη τιμή w = 1,00 πάνω από την οποία δεν αντέχει το ανθρώπινο σώμα.
- Οι περιοχές θερμικής άνεσης και έλλειψης θερμικής άνεσης (thermal discomfort), εκφρασμένες με τις γραμμές DISC, σε μια κλίμακα των 10 βαθμών. Οι γραμμές για τις τιμές DISC = +0,5 και -0,5 αποτελούν τα όρια των βέλτιστων συνθηκών κάθε διαγράμματος, στα οποία 80% του πληθυσμού θεωρεί τις συνθήκες ανεκτές. Οι τιμές DISC μεταξύ +1,00 και -1,00 ικανοποιούν το 70% του πληθυσμού.

Ο Κτιριακός Βιοκλιματικός Χάρτης του Givoni

Ο Κτιριακός Βιοκλιματικός Χάρτης (Building Bioclimatic Chart – BBC) του Givoni αναφέρεται σε συνθήκες ενδυμασίας εσωτερικού χώρου και για καθιστή θέση. Ο BBCC (Givoni, 1998, σσ. 36-38) ορίζει δύο διαφορετικές περιοχές θερμικής άνεσης, την περιοχή για αναπτυγμένες χώρες (developed countries) και την περιοχή για θερμές αναπτυσσόμενες χώρες (hot developing countries). Το σκεπτικό για τη διαφοροποίηση αυτή βασίζεται στην εξοικείωση των κατοίκων μιας χώρας στο τοπικό κλίμα. Οι κάτοικοι μιας θερμής χώρας θεωρούν αποδεκτές πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τους κατοίκους μιας ψυχρής χώρας. Οι αναπτυγμένες χώρες κλιματίζουν τα κτίριά τους σε χαμηλότερες θερμοκρασίες το καλοκαίρι και τα θερμαίνουν σε υψηλότερες τον χειμώνα. Οι κλιματισμός, ο οποίος χρησιμοποιείται κατά κανόνα στις θερμές αναπτυγμένες χώρες, εκπληρώνει τις υψηλότερες απαιτήσεις και αντιστοιχεί στο επιπλέον ενεργειακό κόστος, χωρίς να καταγράφει τις δυσμενείς συνέπειες από το θερμικό σοκ που δημιουργούν τα κλιματιζόμενα σε χαμηλές θερμοκρασίες κτίρια στους επισκέπτες και στους χρήστες τους. Η μετάβαση από

μια εξωτερική θερμοκρασία 34°C σε μια εσωτερική 29°C δίνει την αίσθηση του δροσερού εσωτερικού, ενώ η μετάβαση σε έναν εσωτερικό χώρο 25°C δίνει την αίσθηση κρύου εσωτερικού. Οι ακρότατες θερμοκρασίες που ορίζουν τις συνθήκες θερμικής άνεσης κατά τον Givoni είναι σχετικές με την εξοικείωση των ανθρώπων με το τοπικό κλίμα. Εφόσον σε μια αναπτυσσόμενη θερμή χώρα δεν χρησιμοποιείται ευρέως ο κλιματισμός, οι κάτοικοι ανέχονται υψηλότερες θερμοκρασίες (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 49-50).

Ο Κτιριακός Βιοκλιματικός Χάρτης (Building Bioclimatic Chart) του Givoni βασίζεται σε έναν κοινό ψυχρομετρικό χάρτη. Η βασική καινοτομία του Givoni είναι ότι διαφοροποιεί τη ζώνη άνεσης για αναπτυγμένες χώρες από αυτήν των αναπτυσσόμενων χωρών. Συγχρόνως, ο Givoni (1998, σσ. 36-38) σχεδίασε τις στρατηγικές παθητικής θέρμανσης και δροσισμού. Με τον τρόπο αυτόν, είναι δυνατό, όταν αποτυπώνονται τα βασικά κλιματικά στοιχεία μιας πόλης ή τα μετρημένα κλιματικά δεδομένα μιας περιοχής, να εντοπιστούν οι περίοδοι που ανήκουν στη ζώνη άνεσης, καθώς και οι στρατηγικές που πρέπει να ακολουθηθούν για τις ψυχρές και τις θερμές περιόδους, έτσι ώστε η ζώνη άνεσης να διευρυνθεί, δηλαδή οι συνθήκες να προσεγγίσουν τη ζώνη άνεσης.

4.3.4 Συμπεράσματα

Παρόλο που ο Fanger σημειώνει ότι η Εξίσωση Άνεσης ισχύει ανεξάρτητα από τους υποκειμενικούς παράγοντες που αναλύθηκαν παραπάνω (Fanger, 1973, σ. 43), ο Givoni (1998, σ. 36) και άλλοι ερευνητές (Szokolay, 1980, σ. 279 και Hawkes et al., 2002, σ. 31) θεωρούν ότι η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης σε όλες τις περιοχές του πλανήτη με τη χρήση μίας και μόνο μεθόδου είναι ανεδαφική και μάταιη. Η ακριβής θερμική προτίμηση διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες διαβίωσης, την προσαρμοστικότητα και τις εμπειρίες των ανθρώπων. Το γεγονός αυτό αποκλείει τον καθορισμό ενός συγκεκριμένου επιπέδου άνεσης και υπαγορεύει τη σύσταση ενός εύρους, μιας ζώνης ή μιας περιοχής άνεσης.

Στην ίδια λογική κινούνται και οι Nikol & Humphreys (2002, σ. 569), που προτείνουν ένα προσαρμοστικό πρότυπο (adaptive standard) εκτίμησης της θερμικής άνεσης, στο οποίο θα καθορίζονται τα εσωτερικά περιβάλλοντα που είναι πιθανό να παρέχουν συνθήκες θερμικής άνεσης, το εύρος των αποδεκτών θερμικών περιβαλλόντων, καθώς και ο ρυθμός μεταβολής του εσωτερικού περιβάλλοντος που είναι αποδεκτός από τους χρήστες. Παρόλο που είναι δύσκολο να καθοριστεί το εύρος των συνθηκών άνεσης, η προσαρμοστική προσέγγιση βασίζεται στο γεγονός ότι η μεταβλητότητα στις εσωτερικές θερμοκρασίες μπορεί να προκληθεί είτε από συνειδητές πράξεις για τη μείωση της δυσφορίας είτε από την αδυναμία τοπικής ρύθμισης, η οποία είναι πιθανότερο να προκαλέσει δυσφορία. Κατά συνέπεια, η προσαρμοστική θερμική άνεση εξαρτάται από τις δυνατότητες αλλαγής/προσαρμογής, αλλά και από τις θερμοκρασίες αέρα που προκύπτουν. Το εύρος μιας «ζώνης» άνεσης, αν μετρηθεί με καθαρά φυσικούς όρους, εξαρτάται από την ισορροπία ανάμεσα στις παραπάνω δράσεις. Έτσι, για παράδειγμα, στην περίπτωση που δεν υπάρχει δυνατότητα μεταβολής της δραστηριότητας ή/και της ένδυσης ούτε αύξηση της ταχύτητας του αέρα, η ζώνη άνεσης έχει στενότερα όρια, της τάξης των $\pm 2^{o}$C. Αντίθετα, όταν υπάρχουν διαθέσιμες κατάλληλες επιλογές προσαρμογής (adaptive opportunities), τα όρια της άνεσης μπορεί να είναι σημαντικά πιο διευρυμένα (Nikol & Humphreys, 2002, σ. 570). Το πρότυπο της ASHRAE 55 περιλαμβάνει ένα ξεχωριστό προσαρμοστικό μοντέλο για τον καθορισμό αποδεκτών συνθηκών θερμικής άνεσης σε κτίρια με φυσικά κλιματιζόμενους χώρους ελεγχόμενους από τους ενοίκους (ASHRAE, 2020).

4.4 Οπτική άνεση

4.4.1 Γενικά στοιχεία

Η οπτική άνεση έχει μεγάλη σχέση με την απρόσκοπτη λήψη των οπτικών ερεθισμάτων του περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτόν, για την οπτική άνεση χρησιμοποιείται ο αγγλοσαξονικός όρος *visual comfort* αντί του όρου *luminous comfort* (Baker et al., 1993, σ. 2.1). Η όραση είναι η πιο ανεπτυγμένη ανθρώπινη αίσθηση (Στο ίδιο, σ. 1.1). Το σύστημα της όρασης είναι ένα σύνθετο σύστημα αντίληψης, το οποίο δίνει χρήσιμες πληροφορίες όταν υπάρχουν διαφοροποιήσεις και ασυνέχειες στο οπτικό πεδίο (Στο ίδιο, σσ. 2.2-2.4). Η ανθρώπινη οπτική αντίληψη βασίζεται στην ύπαρξη αντιθέσεων φωτός και σκιάς, καθώς και στην ύπαρξη χρωματικών αντιθέσεων (Στο ίδιο).

Το ανθρώπινο μάτι αντιλαμβάνεται το τμήμα του φυσικού φωτός που έχει μήκος κύματος από 380 έως 770 nm. Η μεγαλύτερη ευαισθησία της όρασης εμφανίζεται στο φως με μήκος κύματος 555 nm, που αντιστοιχεί στην περιοχή του πράσινου-κίτρινου. Κάτω όμως από συνθήκες ανεπαρκούς φωτισμού, το ανθρώπινο μάτι προσαρμόζεται κατάλληλα και η λειτουργία του βασίζεται περισσότερο στα ραβδία (φωτοευαίσθητα κύτταρα που δεν είναι ευαίσθητα στο χρώμα) παρά στα κωνία (φωτοευαίσθητα κύτταρα ευαίσθητα στο χρώμα) του αμφιβληστροειδούς χιτώνα. Σε αυτή την περίπτωση, η μεγαλύτερη ευαισθησία εμφανίζεται στο φως μήκους κύματος 507 nm (Στο ίδιο, σ. 2.3, 2.6).

Ο φυσικός φωτισμός έχει ιδιαίτερα θετική επίδραση στον άνθρωπο. Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται και από πολλές ιατρικές έρευνες. Πιο συγκεκριμένα, το φυσικό φως είναι πολύ σημαντικό για τον μεταβολισμό και το ανοσοποιητικό σύστημα του ανθρώπου. Συγχρόνως, οι συνθήκες φωτισμού επηρεάζουν σημαντικά την ψυχολογική και συναισθηματική κατάσταση των ατόμων (Baker et al., 1993, σ. 2.5). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η έλλειψη φυσικού φωτός για μεγάλα χρονικά διαστήματα προκαλεί διαταραχές στο νευρικό σύστημα και κατάθλιψη (Baker et al., 1993, σ. 2.6). Τέλος, το φως παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον βιορυθμό των όντων (Baker et al., 1993, σ. 2.6).

Το φυσικό φως παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και στην απόδοση των ανθρώπων σε διάφορες εργασίες και δραστηριότητες, η οποία είναι πολύ καλύτερη από ότι σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού. Παρ' όλα αυτά, το σωστό οπτικό περιβάλλον δεν είναι συνυφασμένο με πολύ αυξημένα επίπεδα φυσικού φωτισμού. Οι συνθήκες οπτικής άνεσης σε έναν χώρο δεν μεταφράζονται σε συνθήκες απόλυτα ομοιογενούς κατανομής φωτισμού, αλλά σε μια εξασφάλιση επαρκούς φυσικού φωτισμού σε όλα τα σημεία του χώρου, χωρίς όμως να εμφανίζονται φαινόμενα θάμβωσης και μεγάλες αντιθέσεις (Wienold, 2002, σ. 75).

4.4.2 Ορισμοί

Η οπτική άνεση είναι η κατάσταση στην οποία ο φωτισμός ενός χώρου έχει τέτοια στάθμη και ποιότητα, ώστε να μη δημιουργεί προβλήματα θάμβωσης (glare) και ισχυρών αντιθέσεων (Goulding et al., 1994, σ. 125, 127).

Ως θάμβωση ορίζεται η αίσθηση που «προκαλείται από την εισαγωγή μιας πολύ έντονης πηγής φωτισμού στο οπτικό πεδίο και έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση αισθημάτων δυσφορίας και κούρασης, ενώ συγχρόνως περισπά ελαφρά ή τυφλώνει οπτικά το άτομο» (Goulding et al., 1994, σ. 127). Η Διεθνής Επιτροπή Φωτισμού (Commission International d'Éclairage – CIE) ορίζει τη θάμβωση ως την «κατάσταση της όρασης όπου υπάρχει έλλειψη άνεσης ή μείωση της δυνατότητας θέασης λεπτομερειών ή αντικειμένων, η οποία δημιουργείται από ακατάλληλη κατανομή ή διακύμανση της λαμπρότητας ή από ακραίες αντιθέσεις» (Baker et al., 1993, σ. 2.15). Η θάμβωση είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που έχει σχέση με την αναλογία λαμπρότητας ανάμεσα στην πηγή θάμβωσης και στο περιβάλλον της.

Η θάμβωση χωρίζεται σε άμεση και σε έμμεση θάμβωση. Η άμεση (ή απευθείας) θάμβωση επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του χώρου και τις φυσικές ή τεχνητές πηγές φωτισμού που είναι άμεσα

ορατές στο πεδίο όρασης. Όσο κεντρικότερα στο οπτικό πεδίο βρίσκεται η φωτεινή πηγή, τόσο πιθανότερο είναι να αποτελέσει πηγή θάμβωσης. Η έμμεση θάμβωση διακρίνεται σε ανακλώμενη θάμβωση και θάμβωση «πέπλου». Η έμμεση, ανακλώμενη θάμβωση προκαλείται από την ανάκλαση του φωτός σε έντονα λείες και γυαλιστερές επιφάνειες, οι οποίες στην ουσία αναπαράγουν τη φωτεινή πηγή της οποίας το φως ανακλούν. Η έμμεση θάμβωση «πέπλου» προκαλείται όταν η λεία και γυαλιστερή επιφάνεια βρίσκεται στο επίπεδο εργασίας γιατί μειώνεται η αντίθεση μεταξύ του ανοιχτόχρωμου χαρτιού (άμεσου περιβάλλοντος) και των γραμμάτων, με αποτέλεσμα τη δυσκολία στην ανάγνωση, σαν να υπάρχει ένα πέπλο μπροστά στα μάτια (Baker et al., 1993, σ. 2.15).

Η θάμβωση μπορεί να διακριθεί σε θάμβωση ανικανότητας (*disability glare*) και θάμβωση δυσφορίας (*discomfort glare*). Η πρώτη, η οποία σχετίζεται με τη φυσιολογία (φυσιολογική θάμβωση), «εμποδίζει την όραση χωρίς αναγκαστικά να προκαλεί δυσφορία» και διορθώνεται συνήθως «με τροποποίηση της θέσης εργασίας ή/και της διεύθυνσης παρατήρησης», ενώ η δεύτερη σχετίζεται με την ψυχολογία (ψυχολογική θάμβωση) και «προκαλεί απλώς δυσφορία, χωρίς απαραίτητα να επηρεάζεται η ικανότητα εκτέλεσης κάποιας εργασίας», «δεν ανιχνεύεται άμεσα», μπορεί όμως να δράσει συσσωρευτικά (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 90).

Τέλος, ορίζεται και η αντίθεση ορίζεται ως «η διαφορά μεταξύ της οπτικής εμφάνισης ενός αντικειμένου και του άμεσου βάθους πίσω από αυτό» (Goulding et al., 1994, σ. 126).

4.4.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την οπτική άνεση

Στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων, η οπτική άνεση σχετίζεται με:

- Τη χρήση του κάθε χώρου, βάσει της οποίας διαφοροποιούνται και οι απαιτήσεις φωτισμού που περιλαμβάνονται στο πρότυπο DIN EN 12464-1 Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places, στην ΤΟΤΕΕ 20701-1/2017 (ΤΕΕ, 2017) και στην ΤΟΤΕΕ 20701-7/2021 (ΤΕΕ, 2021).
- Την επιφάνεια των ανοιγμάτων σε σχέση με την επιφάνεια του χώρου (WFR-Window to Floor Ratio ή WFA-Window to Floor Area στο πρότυπο LEED). Με βάση το άρθρο 5 του Κτιριοδομικού Κανονισμού (ΥΑ 3046/304/1989 – ΦΕΚ 59/Δ/3-2-1989) πρέπει να προέρχεται από ανοίγματα στην οροφή ή σε εξωτερικούς τοίχους του χώρου που βλέπουν, είτε σε κοινόχρηστο χώρο του οικισμού είτε σε ακάλυπτο χώρο του οικοπέδου, έτσι ώστε να θεωρείται ότι ο χώρος έχει άμεσο φυσικό φωτισμό. Το εμβαδόν ανοιγμάτων πρέπει να είναι κατ’ ελάχιστον ίσο με 0,1 (10%) του καθαρού εμβαδού του χώρου.
- Το είδος και την πολλαπλότητα των υαλοπινάκων των υαλοστασίων (π.χ. μονοί, διπλοί, διαφανείς, έγχρωμοι, ανακλαστικοί κ.λπ.), που επηρεάζουν τη διαπερατότητα.
- Την ύπαρξη και τη μορφή εξωτερικών μέσων σκίασης και εσωτερικών μέσων ρύθμισης, που επηρεάζουν τη διαπερατότητα και τον συντελεστή σκίασης.



Εικόνα 4.13 *Οπτική άνεση. Πηγή: Brown wooden table, Photo by Hannah Busing on Unsplash.*

Η οπτική άνεση διαφέρει και αντιμετωπίζεται διαφορετικά από την οπτική δυσφορία. Η οπτική δυσφορία μπορεί να προκληθεί από έναν αριθμό αιτιών, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται οι προσδοκίες, καθώς και η συνάφεια της σχεδίασης με τη χρήση του χώρου, και αφορά το σύνολο του οπτικού πεδίου. Αντίθετα, η οπτική άνεση αφορά κυρίως την ικανότητα εκτέλεσης κάποιου έργου, όπου ενδιαφέρει μόνο το τμήμα του οπτικού πεδίου που καλύπτει την επιφάνεια εργασίας (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 88).

Τέλος, όπως συμβαίνει και με τη θερμική άνεση, οι συνθήκες φυσικού φωτισμού και η οπτική άνεση σε έναν χώρο δεν μπορούν να εκτιμηθούν αποκλειστικά και μόνο με ποσοτικές παραμέτρους (Εικόνα 4.13). Σχετίζονται, δηλαδή, και με τις απαιτήσεις και τις προτιμήσεις του κάθε μεμονωμένου χρήστη. Ως προς αυτό, ο Τσαγκρασούλης (2015, σ. 89) αναφέρει χαρακτηριστικά:

> Είναι τελικά η προτίμηση στα ανοίγματα αποτέλεσμα μιας εγγενούς μας τάσης να είμαστε σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον (βιοφιλία); Το συγκεκριμένο ερώτημα δεν είναι εύκολο να απαντηθεί γιατί θα πρέπει να εκτιμηθεί αν η σπουδαιότητα των ανοιγμάτων οφείλεται στο γεγονός ότι παρέχουν μόνο φωτισμό (π.χ. φεγγίτες), μόνο θέα ή και τα δύο; Είναι αρκετά συνηθισμένο χώροι με μεγάλα ανοίγματα να εκτιμώνται αρνητικά από πλευράς οπτικής άνεσης (π.χ. μεγάλες τιμές σε δείκτες θάμβωσης) λόγω της μεγάλης διαφοράς λαμπροτήτων που παρουσιάζουν τα ανοίγματα σε σχέση με τις υπόλοιπες επιφάνειες του χώρου, ενώ οι χρήστες να είναι εξαιρετικά ικανοποιημένοι από τη θέα που τα ανοίγματα αυτά παρέχουν.

Στους υπαίθριους χώρους της πόλης, η οπτική άνεση συνήθως δεν σχετίζεται με συγκεκριμένη χρήση ή εργασία, ενώ, όπως συμβαίνει με τη θερμική άνεση, τα όρια άνεσης είναι εκ των πραγμάτων πιο διευρυμένα. Παρ' όλα αυτά, στην πόλη, τα χρώματα των όψεων των κτιρίων και των υλικών επικάλυψης των υπαίθριων χώρων μπορούν να προκαλέσουν απώλεια της οπτικής άνεσης και θάμβωση. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα αισθητό τους καλοκαιρινούς μήνες στις χώρες με Μεσογειακό κλίμα, στις πλατείες και στους δρόμους με μεγάλο πλάτος. Αυτή η διαπίστωση αποκτά ιδιαίτερη σημασία αν εξεταστεί σε σχέση με τη θερμική αξιολόγηση των υλικών, η οποία για τα θερμά κλίματα ευνοεί τη χρήση ανοιχτόχρωμων υλικών για την αποφυγή της υπερθέρμανσης, τόσο στους εξωτερικούς χώρους όσο και στο εσωτερικό των κτιρίων (Givoni, 1998, σ. 209). Η οπτική ποιότητα του υπαίθριου χώρου εξαρτάται επίσης από τις ημερήσιες και διεποχικές διαφοροποιήσεις των χρωμάτων και από το παιχνίδι φωτός και σκιάς (Romero, 1993, σ. 496).

4.4.4 Εκτίμηση της οπτικής άνεσης

Η ποιότητα του εσωτερικού οπτικού περιβάλλοντος και η οπτική άνεση των χρηστών ενός κτιρίου είναι άμεση συνάρτηση της ποσότητας του φυσικού φωτός που εισέρχεται στο εσωτερικό του κτιρίου (Σανταμούρης κ.ά., 2000, σ. 125). Συνεπώς, ο πλέον τυπικός δείκτης εκτίμησης της οπτικής άνεσης είναι η τιμή έντασης φωτισμού (*illuminance* – βλ. Κεφ. 3, παρ. 3.2.2). Η ελάχιστη τιμή της εξαρτάται από την εργασία ή/και τη δραστηριότητα, ενώ η μέτρηση πραγματοποιείται στην επιφάνεια εργασίας ή στα σημεία που κρίνονται απαραίτητα. Συνιστώμενες μέσες τιμές υπάρχουν σε κάθε πρότυπο σχετικό με τον σχεδιασμό φωτισμού (π.χ. EN 12464-1:2011, που αντικαταστάθηκε από το EN 12464-1:2021, Light and Lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places), ενώ η ελάχιστη τιμή μπορεί να καθοριστεί, για παράδειγμα, από το μοντέλο σχετικής απόδοσης (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 55). Αφορούν τον φυσικό φωτισμό, τον τεχνητό φωτισμό ή τον συνδυασμό τους στο επίπεδο εργασίας (περ. 80 cm από το δάπεδο) και δίνονται είτε σε τιμές έντασης φωτισμού (Lux, lx) είτε/και σε τιμές συντελεστή φυσικού φωτισμού (Daylight Factor – Df) (%).

Η οπτική άνεση όμως επηρεάζεται και από άλλες παραμέτρους, όπως είναι (Baker et al., 1993, σ. 2.12 και Fontoynont, 2002, σ. 84):

- η χωρική κατανομή της έντασης του φωτισμού,
- οι αναλογίες λαμπρότητας (*luminance ratios*) των διαφόρων επιφανειών,
- τα σχήματα των σκοτεινών περιοχών (σκιών),
- το χρώμα των επιφανειών και η χρωματική απόδοση (colour rendering),
- η ύπαρξη θάμβωσης.

Ως προς τη χωρική κατανομή της έντασης του φωτισμού, έχει διαπιστωθεί ότι όσο πιο ομοιόμορφη είναι η κατανομή του φωτισμού σε έναν χώρο, τόσο μειώνεται η τάση των χρηστών να χρησιμοποιήσουν τεχνητό φωτισμό (Μερέση, 2010).

Ως προς την αξιολόγηση της θάμβωσης και πιο συγκεκριμένα της θάμβωσης δυσφορίας, έχουν αναπτυχθεί αρκετοί δείκτες, των οποίων ο υπολογισμός βασίζεται γενικώς σε τέσσερις παραμέτρους (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 90):

- τη λαμπρότητα της πηγής,
- τη λαμπρότητα του υποβάθρου,
- το μέγεθος και τον αριθμό των πηγών,
- τη σχετική τους θέση ως προς τον παρατηρητή.

Πέρα από τους διάφορους δείκτες θάμβωσης που περιγράφονται στη βιβλιογραφία (Τσαγκρασούλης, 2015, σσ. 92-93), η εκτίμηση της οπτικής άνεσης μπορεί να βασιστεί και στις λαμπρότητες του αντικειμένου της εργασίας (π.χ. κάποιο έγγραφο), του εγγύς περιβάλλοντος σε αυτό (επιφάνεια εργασίας) και του υποβάθρου (τοίχοι κ.λπ.) (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 96), αλλά και στις λαμπρότητες των επιφανειών του χώρου. Οι στρατηγικές που μπορούν να υιοθετηθούν ώστε να περιοριστούν τα προβλήματα θάμβωσης είναι οι λαμπρότητες των επιφανειών και η ισορροπημένη κατανομή τους (Τσαγκρασούλης, 2015, σσ. 96-98). Σύμφωνα με τον Τσαγκρασούλη (Στο ίδιο):

> Η πλέον πρόσφατη έκδοση του ευρωπαϊκού πρότυπου (EN 12464-1/2011, Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places) υιοθετεί μαζί με τις συνήθεις απαιτήσεις σε χώρους γραφείων (φωτισμός, ομοιομορφία, θάμβωση κ.λπ.) και απαίτηση για τα επίπεδα φωτισμού τοίχων και οροφής μαζί με μια σχετικά μικρή ομοιομορφία. Επιφάνειες στο οπτικό πεδίο με μεγάλες τιμές λαμπρότητας αποσπούν την προσοχή, ενώ η δημιουργία περιοχών με επαναλαμβανόμενες περιοχές

υψηλών/χαμηλών τιμών λαμπρότητας δημιουργούν σημαντικά προβλήματα στην εκτέλεση εργασιών ιδίως όταν βρίσκονται στην επιφάνεια εργασίας.

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η εκτίμηση της κατανομής των τιμών φωτισμού στο επίπεδο του ματιού και ο καθορισμός των ωρών στις οποίες υπάρχει άμεση οπτική επαφή με τον ήλιο, καθώς και η κατανομή στην οροφή που συνεισφέρει στην αίσθηση φωτεινότητας του χώρου (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 59).

4.5 Ακουστική άνεση

4.5.1 Γενικά στοιχεία

Η ακουστική άνεση περιγράφει την αίσθηση που προκαλεί το ηχητικό περιβάλλον στον άνθρωπο και είναι άμεσα συνδεδεμένη με την έννοια της ηχοενόχλησης (*noise annoyance*) (Εικόνα 4.14). Η ακουστική άνεση σε έναν εσωτερικό χώρο εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως τα επίπεδα του εξωτερικού θορύβου και η ηχομονωτική ικανότητα του κελύφους –δηλαδή η ικανότητά του να απομονώνει τον εξωτερικό θόρυβο–, ο θόρυβος από τα μηχανολογικά συστήματα του κτιρίου, το μέγεθος και το σχήμα του κτιρίου, καθώς και τα υλικά των επιφανειών του και τα έπιπλα. Τα στοιχεία μέτρησης και χαρακτηρισμού του ήχου είναι η συχνότητα (Hz), η ακουστική ισχύς (dB) και ο χρόνος αντήχησης (Hegger et al., 2012, σ. 59). Σύμφωνα με το Άρθρο 12 του Κτιριοδομικού Κανονισμού (ΥΑ 3046/304/1989 – ΦΕΚ 59/Δ/3-2-1989), η ακουστική άνεση σχετίζεται με την προστασία των ενοίκων μιας κατοικίας, ενός τόπου εργασίας, διαμονής ή άλλης δραστηριότητας από κάθε μορφής εξωγενείς θορύβους, λαμβάνοντας μέτρα κτιριακής ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας. Η ακουστική άνεση ενός χώρου καθορίζεται από ένα σύνολο ηχητικών παραμέτρων, που αφορούν την ηχομόνωση και ηχοπροστασία του χώρου από:

- αερόφερτους και κτυπογενείς ήχους σε γειτονικούς χώρους,
- αερόφερτο ήχο που παράγεται από κοινόχρηστες ή ιδιωτικές εγκαταστάσεις του ίδιου κτιρίου και
- αερόφερτο ήχο που παράγεται από εξωτερικές πηγές.

Αερόφερτος ήχος είναι ο ήχος που φτάνει στο εξεταζόμενο κτιριακό στοιχείο μέσω του αέρα, ενώ κτυπογενής ήχος είναι ο ήχος που παράγεται με κτυπήματα πάνω στο εξεταζόμενο κτιριακό στοιχείο. Στα κτίρια, ο κτυπογενής ήχος δημιουργείται στα πατώματα είτε από τα βήματα είτε από την πτώση ή την κρούση διαφόρων αντικειμένων πάνω στο δάπεδο (Πουλάκος & Κορωναίος, 2005, σ. 66).

Η ηχορύπανση (*noise pollution* ή *sound pollution*) ορίζεται ως το σύνολο «των βλαβερών ή μη επιθυμητών ήχων (θορύβων) στο περιβάλλον (...)» (EIONET, 2005), ενώ ο θόρυβος αναφέρεται σε «κάθε ακανόνιστο περιοδικό ήχο, του οποίου η στιγμιαία τιμή αυξομειώνεται, γενικά, με τυχαίο τρόπο» (Κορωναίος & Πουλάκος, 2002: 56). Η ηχορύπανση στο περιβάλλον, και ιδίως ο θόρυβος από την οδική κυκλοφορία, αποτελεί ολοένα και μεγαλύτερη πηγή ανησυχίας στην Ευρώπη. Η μακροχρόνια έκθεση στον θόρυβο από περιβαλλοντικές πηγές, όπως από τις οδικές, τις σιδηροδρομικές και τις εναέριες μεταφορές, μπορεί να προκαλέσει, πέρα από ενόχληση, διάφορες επιπτώσεις στην υγεία, για παράδειγμα διαταραχές ύπνου, αρνητικές επιπτώσεις στο καρδιαγγειακό και στο μεταβολικό σύστημα, καθώς και γνωστική δυσλειτουργία σε παιδιά (European Environment Agency, n.d.).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακουστική άνεση στους εξωτερικούς χώρους εξαρτώνται, όπως συμβαίνει και στο εσωτερικό των κτιρίων, από τα φυσικά χαρακτηριστικά του θορύβου, όπως είναι η στάθμη, το είδος και τα φασματικά του χαρακτηριστικά, αλλά και η διαφοροποίησή του στον χρόνο (UNEP & WHO, 1980, σσ. 11-12 και Κορωναίος & Πουλάκος, 2005, σσ. 51-58). Οι ιδιαιτερότητες που υπάρχουν στους εξωτερικούς χώρους αφορούν κυρίως τη μετάδοση των ήχων. Έτσι, καθώς δεν υπάρχουν σημαντικές ανακλάσεις, όπως συμβαίνει σε έναν κλειστό χώρο, ο ήχος μειώνεται με την απόσταση. Συγχρόνως, η έλλειψη ανακλάσεων και αντηχήσεων αναδεικνύει την κατευθυντικότητα του ήχου (Szokolay, 1980, σσ. 189-195).

Ως προς τον υπαίθριο χώρο, ιδιαίτερη σημασία για την ακουστική άνεση έχει αποκτήσει τις τελευταίες δεκαετίες η έννοια του ηχοτοπίου (*soundscape*). Ως ηχοτοπίο ορίζεται το ακουστικό περιβάλλον, το πανταχού παρόν σύνολο θορύβων, στο οποίο ζει το άτομο και το οποίο προσλαμβάνεται και γίνεται κατανοητό από αυτό ή το κοινωνικό σύνολο (Murray Schafer, 1993). Το ηχοτοπίο περιλαμβάνει τρεις συνιστώσες (Krause, 2008 και «Soundscape Ecology», 2023):

- **Τη γεωφωνία**, που τυπικά αναφέρεται στους ήχους των φυσικών δυνάμεων, όπως το νερό, ο άνεμος, ο κεραυνός κ.λπ., που είναι συνήθως αντιληπτά σε σχετικά απομακρυσμένα και μη διαταραγμένα περιβάλλοντα.
- **Τη βιοφωνία**, η οποία αναφέρεται στις φωνές που παράγονται από τους διαφορετικούς οργανισμούς σε έναν δεδομένο βιότοπο σε μια δεδομένη στιγμή, για διάφορους λόγους (π.χ. επικοινωνία).
- **Την ανθρωποφωνία**, η οποία αναφέρεται σε ήχους, που παράγονται είτε από τον ίδιο τον άνθρωπο και είναι συνεκτικοί (π.χ. μουσική, θέατρο, γλώσσα) είτε από τις ηλεκτρικές, μηχανικές και μηχανολογικές εγκαταστάσεις, μηχανήματα και συσκευές που ο άνθρωπος χρησιμοποιεί και είναι συνήθως ασυνεχείς και χαοτικοί.

Τέλος, όπως συμβαίνει με την εκτίμηση της άνεσης γενικά, η ακουστική άνεση σχετίζεται και με ποιοτικές παραμέτρους, που αφορούν τα ίδια τα άτομα και τη δραστηριότητά τους, αλλά και τις προσδοκίες τους με βάση τα παραπάνω. Παρόμοια επίπεδα θορύβου αξιολογούνται διαφορετικά από άτομα που βρίσκονται στην κατοικία τους, στον χώρο εργασίας τους ή σε δημόσιους χώρους. Έτσι, ανάλογα με τη δραστηριότητα, τα άτομα που συμμετέχουν σε μια δραστηριότητα (π.χ. σε ένα γήπεδο ή σε έναν χώρο διασκέδασης) είναι πιθανόν να μην αντιλαμβάνονται τα υψηλά επίπεδα θορύβου, ή ακόμα μπορεί να τα αξιολογούν και θετικά, ενώ άτομα εκτός μπορούν να αισθάνονται ενόχληση ή δυσφορία (Szokolay, 2014, σ. 160).



Εικόνα 4.14 *Ακουστική άνεση και θόρυβος. Πηγή: Man closing his ear, Photo by @chairulfajar on Unsplash.*

4.5.2 Εκτίμηση ακουστικής άνεσης

Η εκτίμηση του ηχητικού περιβάλλοντος και της ακουστικής άνεσης γίνεται με (Szokolay, 2014, σ. 159):

- Δείκτες, δηλαδή μετρήσεις με φυσική βάση, πάνω στις οποίες μπορούν να επιβληθούν άλλοι παράγοντες, με προέλευση κυρίως από τις κοινωνικές επιστήμες (έρευνες).
- Κλίμακες, στις οποίες οι διάφοροι φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις απαντήσεις των ατόμων συνδυάζονται για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Τέτοιες είναι η ηχητική ένταση, η στάθμη ηχητικής έντασης (κλίμακα των ντεσιμπέλ, dB), η σταθμισμένη ηχητική ένταση (dBA) κ.ά. (Κορωναίος & Πουλάκος, 2005, σσ. 56-58).

Ως προς τη σταθμισμένη ηχητική ένταση, η επίδραση του θορύβου σε γενικές γραμμές περιγράφεται παρακάτω (Szokolay, 2014, σσ. 153-154):

- 65 dBA: έως αυτό το επίπεδο ο θόρυβος ή άλλος ανεπιθύμητος ήχος μπορεί να προκαλέσει ενόχληση, όμως το αποτέλεσμα περιορίζεται σε ψυχολογική επίδραση (νευρικότητα). Πάνω από αυτό το επίπεδο, υπάρχει και φυσιολογική επίδραση, όπως νοητική και σωματική κόπωση.
- 90 dBA: σε παρατεταμένη (χρόνια) έκθεση σε αυτά τα επίπεδα θορύβου προκαλεί μόνιμη μέτρια απώλεια ακοής.
- 100 dBA: η σύντομη έκθεση σε αυτά τα επίπεδα θορύβου μπορεί να προκαλέσει παροδική απώλεια ακουστικής οξύτητας, ενώ παρατεταμένη έκθεση προκαλεί ανεπανόρθωτη ζημιά στα όργανα ακοής.
- 120 dBA: είναι το όριο του πόνου.
- 150 dBA: προκαλεί ακαριαία απώλεια ακοής.

Οι παραπάνω πληροφορίες αφορούν τον σχεδιασμό των κτιρίων, διότι συγκεκριμένες χρήσεις κτιρίων εμπλέκονται με συστήματα υψηλής έντασης (ηχητικής όχλησης) και, ως εκ τούτου, πρέπει να απομονώνονται ηχητικά από τους γειτονικούς χώρους.

Στην Ελλάδα, η ΤΟΤΕΕ 2425/86 ορίζει τις οριακές καμπύλες κατάταξης θορύβου (Noise Rating curves – NR), οι οποίες συσχετίζουν την ηχητική στάθμη με τη συχνότητα. Ορίζεται η NR85, όπου η συνεχής έκθεση σε αντίστοιχα επίπεδα θορύβου προκαλούν μόνιμες βλάβες στην ακοή και καθορίζονται οι συνιστώμενες στάθμες θορύβου για διαφορετικές χρήσεις χώρων.

Πέρα από τα παραπάνω, ειδικά σε αίθουσες ακροατηρίου, η ακουστική άνεση αξιολογείται με βάση τις συνθήκες ακρόασης, οι οποίες επηρεάζονται από την αντήχηση και την ευκρίνεια της ομιλίας. Το φαινόμενο της αντήχησης παρατηρείται σε έναν κλειστό χώρο όταν, σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, δεδομένη ηχητική πηγή παύει να εκπέμπει ήχο, αλλά το ηχητικό πεδίο διατηρείται για μακρύτερο χρονικό διάστημα –ανάλογα με την ηχοαπορροφητικότητα των επιφανειών– λόγω των πολλαπλών ηχοανακλάσεων στις περατωτικές επιφάνειες (Πουλάκος & Κορωναίος, 2005, σ. 59).

Η αντήχηση χαρακτηρίζεται από τον χρόνο αντήχησης. Ως ευκρίνεια της ομιλίας ορίζεται το ποσοστό των ήχων που διακρίνει καθαρά ο ακροατής σε σχέση με το σύνολο των ήχων που εκφωνεί ο ομιλητής. Καλή ευκρίνεια ομιλίας συνεπάγεται ότι ο ακροατής δεν καταβάλλει έντονη προσπάθεια για να αντιληφθεί την ομιλία, γεγονός που είναι αιτία δυσφορίας και κόπωσης (Στο ίδιο, σ. 60).

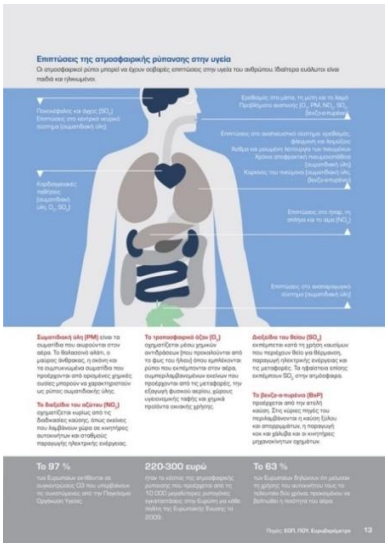
Τέλος, τα υλικά που αποτελούν την εσωτερική επιδερμίδα των χώρων (δάπεδα, οροφές, επιχρίσματα και επενδύσεις) επηρεάζουν καθοριστικά τα επίπεδα ακουστικής άνεσης, ανάλογα με τις ιδιότητες ηχοαπορρόφησης ή ανάκλασης, και πρέπει να αξιολογούνται ανάλογα με τη χρήση και τη λειτουργία του κάθε χώρου.

4.6 Υγιεινή – Ποιότητα εσωτερικού αέρα

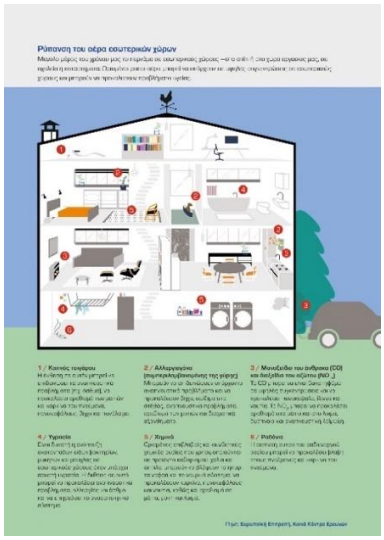
4.6.1 Γενικά στοιχεία

Τις τελευταίες δεκαετίες, η συζήτηση για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα ή ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων (ΠΑΕΧ) (*indoor air quality*) έχει αποκτήσει πολύ μεγάλη σημασία, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ζωής των ανθρώπων, ειδικά σε κάποιες κλιματικές ζώνες, λαμβάνει χώρα σε εσωτερικούς χώρους. Η ποιότητα των εσωτερικών συνθηκών στα κτίρια αξιολογείται όχι μόνο ως προς τις κλιματικές συνθήκες, αλλά και ως προς τις συνθήκες υγιεινής, σημαντική παράμετρο των οποίων αποτελεί η ποιότητα εσωτερικού αέρα. Το εσωτερικό περιβάλλον των κτιρίων (Εικόνα 4.16) συντίθεται από υλικά, αέρα και σκόνη (αιωρούμενα σωματίδια), συσκευές και μηχανολογικά συστήματα και τέλος ανθρώπους. Οι εκπομπές των παραπάνω σε συνδυασμό με τον κακό αερισμό και τις συνθήκες εσωτερικού κλίματος μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στην υγεία (σωματική και ψυχική) των ανθρώπων που ζουν ή εργάζονται σε αυτά. Πιο συγκεκριμένα, τα δομικά υλικά, καθώς και τα υλικά επιπλώσεων ανάλογα με την ποιότητα και τη σύνθεσή τους μπορεί να αποδίδουν στον χώρο χημικές εκπομπές, αλλεργιογόνα και ίνες, ενώ κατασκευαστικές ατέλειες και αστοχίες μπορεί να οδηγήσουν στην εμφάνιση υγρασιών και στην ανάπτυξη μικροοργανισμών (Block & Bokalders, 2009, σ. 4). Ο μέσος άνθρωπος καθημερινά εισπνέει 14 κιλά αέρα, πίνει μόλις 2 κιλά νερό και καταναλώνει 1,5 κιλά τροφής. Με κάθε αναπνοή, εισπνέει το απαραίτητο οξυγόνο, ταυτόχρονα, όμως, μαζί με μικρές ποσότητες δυνητικά επιβλαβών αερίων και σωματιδίων. Αυτά τα στοιχεία επηρεάζουν άμεσα την υγεία, χωρίς αυτό να είναι πάντα αντιληπτό (Εικόνα 4.15). Ταυτόχρονα, έρευνες δείχνουν ότι οι δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία δεν οφείλονται μόνο σε στιγμιαία, αλλά και σε χρόνια έκθεση, μειώνοντας το προσδόκιμο ζωής κατά περισσότερο από οκτώ μήνες κατά μέσο όρο, έως και πάνω από δύο χρόνια στις πιο μολυσμένες πόλεις και περιοχές του πλανήτη (Copernicus, n.d.).

Ταυτόχρονα, στο πλαίσιο της εξοικονόμησης συμβατικής ενέργειας για τη θέρμανση των κτιρίων και της αύξησης της ενεργειακής τους απόδοσης, τα κτίρια γίνονται ολοένα και πιο ανεμοστεγανά, ο φυσικός αερισμός μειώνεται, ενώ στα μηχανολογικά συστήματα θέρμανσης, ψύξης και τεχνητού αερισμού (HVAC) προτιμάται η ανακύκλωση του εσωτερικού αέρα με τη χρήση ειδικών φίλτρων των οποίων ο καθαρισμός είναι συχνά πλημμελής.



Εικόνα 4.15 *Οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία. Πηγή: Επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία by EEA, CC BY 2.5 DK.*



Εικόνα 4.16 *Ρύπανση του αέρα στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων. Πηγή: Ρύπανση του αέρα εσωτερικών χώρων by EEA, CC BY 2.5 DK.*

Σύμφωνα με τα παραπάνω και συνοψίζοντας, η ποιότητα του εσωτερικού αέρα σχετίζεται με (Κυπριακή Δημοκρατία, ΥΕΠΚΑ, 2013):

- Εκπομπές από πηγές στο εσωτερικό του κτιρίου, όπως έκλυση αερίων από τα οικοδομικά υλικά, τα έπιπλα, καθώς και από άλλον εξοπλισμό.
- Ανεπαρκή παροχή φρέσκου εξωτερικού αέρα για θέρμανση, εξαερισμό και συστήματα κλιματισμού (HVAC).
- Κακό σχεδιασμό, ελλιπή συντήρηση, ανεπαρκή καθαρισμό και προβληματική λειτουργία των συστημάτων κλιματισμού.
- Ρύπους που βρίσκονται στον εξωτερικό αέρα που εισέρχεται στο κτίριο.
- Ελλιπή έλεγχο της θερμοκρασίας και της υγρασίας του εσωτερικού του κτιρίου.

Παρόλο που δεν υπάρχει ένας γενικά αποδεκτός ορισμός για «καλή» ποιότητα εσωτερικού αέρα, υπάρχουν τρεις (3) βασικοί τρόποι βελτίωσής της (ASHRAE, 2020):

Έλεγχος των πηγών: Χρήση οικοδομικών υλικών, επίπλωσης, συσκευών και καταναλωτικών προϊόντων με χαμηλές εκπομπές ρύπων, μείωση των εσωτερικών πηγών ρύπων από τις δραστηριότητες των ενοίκων, προστασία από τους εξωτερικούς ρύπους μέσω του φιλτραρίσματος και του καθαρισμού του αέρα πριν αυτός διοχετευθεί στο κτίριο. Επίσης, σχεδιασμός, λειτουργία και συντήρηση των εσωτερικών χώρων, συστημάτων HVAC και υδραυλικών εγκαταστάσεων, με στόχο τη μείωση προβλημάτων υγρασίας ή/και την άμεση αντιμετώπισή τους, εφόσον προκύψουν.

Αερισμός: Εξασφάλιση εναλλαγών αέρα με εισαγωγή καθαρού αέρα στους χώρους χρήσης του κτιρίου και εκτόνωσή του στους γειτονικούς εξωτερικούς χώρους, με στόχο την αποτελεσματική απομάκρυνση των ρύπων που εκπέμπονται από εσωτερικές πηγές.

Καθαρισμός του αέρα: Περιλαμβάνει αποτελεσματικές τεχνολογίες εξυγίανσης, με στόχο την απομάκρυνση των ρύπων από τον εξωτερικό αέρα και από την επανακυκλοφορία του εσωτερικού αέρα.

Οι ρύποι που επηρεάζουν την ποιότητα εσωτερικού αέρα μπορούν να διακριθούν σε εξωτερικούς και εσωτερικούς (Σανταμούρης κ.ά., 2001, σσ. 12-129) (βλ. Πίνακα 4.5).

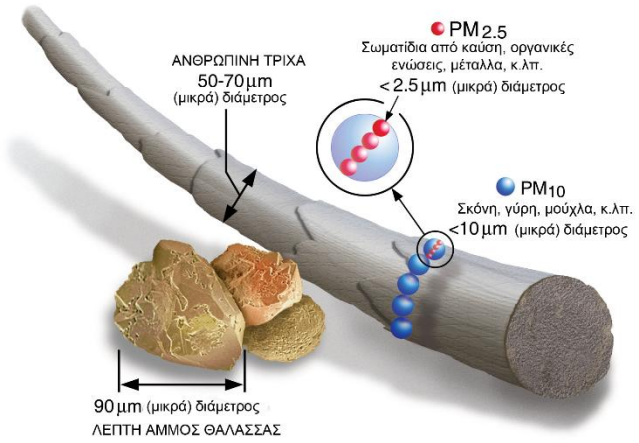
Ρύποι που από το εξωτερικό περιβάλλον	**Προέλευση / Πηγή**	**Ρύποι που από το εσωτερικό περιβάλλον**	**Προέλευση / Πηγή**
Οξείδια του θείου (αέρια, σωματίδια)	Παραπροϊόν καύσεων	Ραδόνιο (Rn)	Κυρίως από το έδαφος, δομικά υλικά
Όζον (τροποσφαιρικό) O_3	Φωτοχημικές αντιδράσεις	Φορμαλδεΰδη (CH_2O)	Μονωτικά, μοκέτες, προϊόντα ξυλείας
Μόλυβδος, μαγγάνιο	Καυσαέρια αυτοκινήτων	Αμίαντος, συνθετικές ίνες	Υλικά πυροπροστασίας και μονωτικά
Ασβέστιο, χλώριο, κάδμιο, πυρίτιο		Υδράργυρος	Μυκητοκτόνα και χρώματα
Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs)	Φυσικές πηγές, Πετροχημικοί διαλύτες, Εξάτμιση καυσίμων	Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs)	Κόλλες, διαλύτες, καλλυντικά, δομικά υλικά, επίπλωση
Οξείδια του αζώτου		Πολυκυκλικοί υδρογονάνθρακες (PAH)	Καπνός τσιγάρων
Μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα (CO, CO_2)	Μαγείρεμα με αέριο, Θέρμανση και Κάπνισμα	Αμμωνία (NH_3)	Καταναλωτικά προϊόντα
Σωματίδια (PM)		Αερολύματα	Καταναλωτικά προϊόντα
Οργανικές ενώσεις	Εντομοκτόνα, Μεταβολικές δραστηριότητες, Βάψιμο, Διαδικασίες καύσης	Αλλεργιογόνα	Κυρίως φυτική
		Μικροοργανισμοί	Ζωική, ανθρώπινη ή φυτική

Πίνακας 4.5 *Κυριότεροι εξωτερικοί και εσωτερική ρύποι. Πηγή: Επιλογή από Σανταμούρης κ.ά. (2001, σσ. 128-129).*

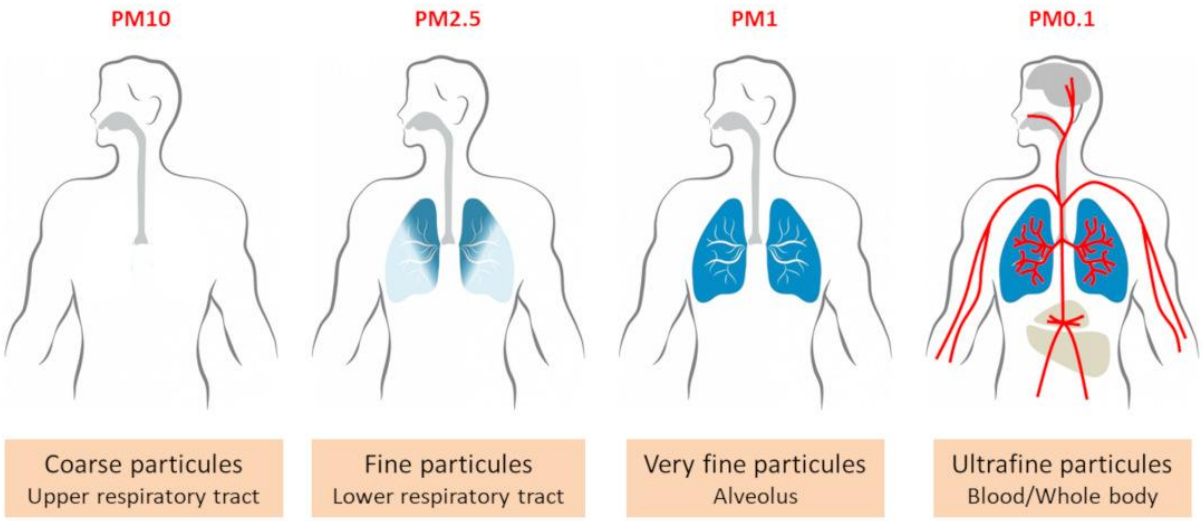
Ιδιαίτερη κατηγορία ρύπων αποτελούν τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter – PM), οι επιπτώσεις των οποίων στην υγεία εξαρτώνται από το μέγεθος και τη χημική τους σύσταση. Η σκόνη είναι «στερεά σωματίδια μεγάλου σχετικά μεγέθους που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα της διάβρωσης ή του κατακερματισμού στερεών υλικών» (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σσ. 48-49) και μπορεί να είναι χημικά ουδέτερη ή να φέρει τοξικές ουσίες (Berge, 2003, σ. 28), ίνες ή φορτισμένα σωματίδια. Ως προς το μέγεθος διακρίνονται με βάση τη διάμετρό τους σε εκείνα με διάμετρο (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 91 και Εικόνα 4.17):

- d < 10μm (PM10), που ανήκουν στο εισπνεύσιμο κλάσμα
- d < 7μm, που αφορούν τα θωρακικά σωματίδια
- d < 2,5μm, που ανήκουν στο αναπνεύσιμο κλάσμα, το οποίο είναι και το σημαντικότερο από πλευράς επιπτώσεων

Η μακροχρόνια εισπνοή αιωρούμενων σωματιδίων προκαλεί κατά περίπτωση πνευμονοκονιάσεις (επαγγελματικές ασθένειες), αλλεργικές αντιδράσεις, άσθμα και σε κάποιες περιπτώσεις (π.χ. αμίαντος, ραδόνιο) καρκίνο (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 91).



Εικόνα 4.17 *Συγκριτική απεικόνιση διαφορετικών διαμέτρων αιωρούμενων σωματιδίων (PM). Πηγή: Size comparisons for PM particles by U.S.E.P.A., Public domain (Μετάφραση Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*



Μεγάλα σωματίδια | Αναπνεύσιμο κλάσμα | Πολύ μικρά σωματίδια | Πάρα πολύ μικρά σωματίδια
Ανώτερο αναπνευστικό | Κατώτερο αναπνευστικό | Κυψελίδες | Αίμα

Εικόνα 4.18 *Οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων (PM) στην υγεία ανάλογα με τη διάμετρό τους. Πηγή: Lung penetration of particles by ©Encyclopédie de l'Environnement, CC BY-NC-SA.*

Τέλος, συσχετιζόμενο με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα είναι το Σύνδρομο Άρρωστου Κτιρίου (Sick Building Syndrome – SBS) και οι ασθένειες που σχετίζονται με το κτίριο (Building Related Illnesses – BRI). Με βάση την US EPA (1991) «ο όρος Σύνδρομο Άρρωστου Κτιρίου (SBS) χρησιμοποιείται για να περιγράψει καταστάσεις κατά τις οποίες οι ένοικοι των κτιρίων αντιμετωπίζουν οξείες επιπτώσεις στην υγεία και την άνεση που φαίνεται να συνδέονται με τον χρόνο που διαβιούν σε ένα κτίριο, χωρίς να μπορεί να εντοπιστεί συγκεκριμένη ασθένεια ή αιτία. Τα παράπονα μπορεί να εντοπίζονται σε ένα συγκεκριμένο δωμάτιο ή ζώνη ή ακόμα και στο σύνολο του κτιρίου». Από την άλλη μεριά, «οι ασθένειες που σχετίζονται με το κτίριο (BRI) είναι όρος που χρησιμοποιείται όταν εντοπίζονται συγκεκριμένα συμπτώματα διαγνώσιμης ασθένειας και μπορούν να αποδοθούν άμεσα σε ατμοσφαιρικούς ρύπους κτιρίων» (EPA, 1991). Το Σύνδρομο του Άρρωστου Κτιρίου περιλαμβάνει μια σειρά συμπτωμάτων που οφείλονται στην κακή ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και εκδηλώνονται με ερεθισμό των ματιών, της μύτης και του λαιμού, κόπωση, πονοκεφάλους, ζαλάδα, ναυτία, αλλεργίες και παθήσεις του αναπνευστικού συστήματος (Berge, 2003, σ. 142 και Smith et al., 1998, σ. 133).

4.6.2 Εκτίμηση ποιότητας εσωτερικού αέρα

Η ποιότητα του εσωτερικού αέρα σε έναν χώρο εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις σε αυτόν αέριων ρύπων και από τον ρυθμό ανανέωσης του αέρα, με φυσικά μέσα (φυσικός αερισμός) ή τεχνητά μέσα (μηχανικός αερισμός – HVAC). Οι σημαντικότεροι αέριοι ρύποι για την ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων είναι οι παρακάτω (Κυπριακή Δημοκρατία, ΥΕΠΚΑ, 2013):

- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)
- Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)
- Οξείδια του αζώτου (NOx)
- Αιωρούμενα σωματίδια (PM)
- Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), π.χ. φορμαλδεΰδη (CH_20)

Για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων χρησιμοποιούνται ειδικά όργανα/αισθητήρες, είτε μόνιμα εγκατεστημένα είτε σε καμπάνιες μέτρησης. Οι συγκεντρώσεις των σημαντικότερων αέριων ρύπων καθορίζονται κατά περίπτωση από τη νομοθεσία, από σχετικά πρότυπα ή κανονισμούς.

Ο εξωτερικός αέρας στην Ευρώπη αξιολογείται με βάση τον Ευρωπαϊκό Δείκτη Ποιότητας Αέρα (European Air Quality Index) (European Environment Agency, n.d.), ενώ στις ΗΠΑ με τον Δείκτη Ποιότητας Αέρα (Air Quality Index – AQI) (AirNow.gov, n.d.).

Για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα, ορίζονται μέγιστα επιτρεπόμενα όρια συγκέντρωσης για τους σημαντικότερους εσωτερικούς ρύπους, με βάση διεθνείς οργανισμούς και πρότυπα, όπως το WELL Building Standard®. Η ποιότητα του εσωτερικού αέρα εξαρτάται εξίσου και από τον αερισμό των χώρων με στόχο την ανανέωσή του, που εκφράζεται είτε σε ωριαία εναλλαγή αέρα (Air Changes per Hour – ACH) είτε σε απαιτούμενο αερισμό ανά άτομο (m^3/h). Σε κλιματιζόμενα κτίρια, για τη ρύθμιση της ποσότητας του φρέσκου αέρα αερισμού τηρούνται υποχρεωτικά οι προδιαγραφές του προτύπου EN 15251 και του ισχύοντος CEN EN 16798-1:2019. Energy performance of buildings – Ventilation for buildings, το οποίο καθορίζει την ποσότητα αερισμού, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη θερμική άνεση και η επιθυμητή ποιότητα εσωτερικού αέρα. Στην Ελλάδα, σχετικές προδιαγραφές και απαιτήσεις περιλαμβάνει η ΤΟΤΕΕ 2425/86, καθώς και η ΤΟΤΕΕ 20701-1/2017 και η ΥΑ.Δ6/Β/14826/2008 (ΦΕΚ 1122/Β΄ 17.6.2008).

Βιβλιογραφία/Αναφορές

AirNow.gov (n.d.). Air Quality Index (AQI) Basics. AirNow. https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/

Akbari, H., Davis, S., Dorsano, S., Huang, J. & Winnett, S. (Eds) (1992). *Cooling Our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing*. U.S. Environmental Protection Agency.

AndrewMarsh.com. https://andrewmarsh.com/

ASHRAE (2020). *ANSI/ASHRAE Standard 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.* https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy

ASHRAE (2020). *ASHRAE Position Document on Indoor Air Quality*. Retrieved from: https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd_indoor-air-quality-2020-07-01.pdf

Baker, N. Fanchiotti, A. & Steemers, K. (Eds). (1993). *Daylighting in Architecture. A European Reference Book.* Brussels and Luxemburg: Commission of the European Communities, Directorate-General XII for Science, Research and Development.

Baker, N. & Standeven, M. (1996). Thermal comfort for free-running buildings. *Energy and Buildings*, *23*(3), 175-182. https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00942-6

Block, M. & Bokalders, V. (2009). *The Whole Building Handbook: How to Design Healthy, Efficient and Sustainable Buildings* (1st ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781849774833

Boussoualim, A. & Adolphe, L. (2002). Microclimate conditions and space use variations. In GRECO and ACAD (Eds). *PLEA 2002. Design with the Environment. Proceedings of the 19th International Conference. Toulouse-France, July* 2002 (pp. 335-340).

CEN EN 16798-1:2019. *Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/b4f68755-2204-4796-854a-56643dfcfe89/en-16798-1-2019

Chalkley, J. N. & Cater H. R. (1968). Thermal environment for the student of architecture. The Architectural Press.

Copernicus, Union's Earth Observation Programme. (n.d.) *Air quality*. https://atmosphere.copernicus.eu/air-quality

Dessi, V. (2002). People's behaviour in an open space as design indicator. Comparison between thermal comfort simulation and users' behaviour in an open space. In GRECO and ACAD (Eds). *PLEA 2002. Design with the Environment. Proceedings of the 19th International Conference. Toulouse - France, July 2002* (pp. 373-377).

DIN EN 12464-1. *Light and lighting - Lighting of work places – Part 1: Indoor work places*. https://standards.iteh.ai/

Directive 2004/107/EC. *Relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air.* https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2004/107/oj

Directive 2008/50/EC. *On ambient air quality and cleaner air for Europe*. European Union. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0050

Dodd, N., Donatello, S. & Cordella, M. (2020). *Level(s) indicator 4.1: Indoor air quality. User manual: overview, guidance and instructions (Publication version 1.0).* European Commission, Joint Research Centre

(JRC). https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2020-10/20201013%20New%20Level(s)%20documentation_Indicator%204.1_Publication%20v1.0.pdf

European Environment Agency (n.d.). European Air Quality Index. European Environment Agency https://airindex.eea.europa.eu/AQI/index.html

European Commission. *Environment. Air. Air Quality Standards.* https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm

European Environment Agency (2020). *Environmental noise in Europe — 2020*. uxembourg: Publications Office of the European Union. https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe

European Environment Agency. (2021). *Air quality standards.* https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-quality-standards

European Environment Agency. (Δημοσίευση 18/06/2013 Τελευταία τροποποίηση: 11/05/2021). *Ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων.* https://www.eea.europa.eu/el/simata-eop-2010/simata-2013/arthra/poiotita-aera-esoterikon-choron

European Environment Agency. (χ.ε.) *Πώς επηρεάζει την υγεία μου η ηχορύπανση στο περιβάλλον;* https://www.eea.europa.eu/el/help/sychnes-erotiseis/pos-epireazei-tin-ygeia-moy

Fanger, P. O. (1973). *Thermal Comfort*. Danish Technical Press / McGraw-Hill Book Company.

Fontoynont, M. (2002). Perceived performance of daylighting systems: lighting efficacy and agreeableness. *Solar Energy. 73*(2). 83-94. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00035-X.

Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture*. Elsevier Publishing Company Ltd.

Givoni, B. (1993). Climate, microclimate, the urban scale. In *C.E.C., D.G. XVII for Energy, Solar Energy and Buildings. Symposium Proceedings. 8-10 December 1993* (pp. 4.1-4.10). Academy of Athens, C.R.E.S., P.L.E.A.

Givoni, B. (1994). *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. Van Nostrand Reinhold.

Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Van Nostrand Reinhold.

Goulding, J. R., Lewis, J. O. & Steemers, T. C. (1996). *Ενέργεια στην Αρχιτεκτονική. Το Ευρωπαϊκό Εγχειρίδιο για τα Παθητικά Ηλιακά Κτίρια.* Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook].

Goulding, J. R., Lewis, J. O. & Steemers, T. C. (1994*). Ενεργειακός Σχεδιασμός. Εισαγωγή για Αρχιτέκτονες*. Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy Conscious Design-A Primer for Architects].

Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T. & Zeumer, M. (2012). *Energy Manual: Sustainable Architecture.* Birkhäuser. https://doi.org/10.11129/detail.9783034614542

Hawkes, D., McDonald, J. & Steemers K. (2002). *The selective environment. An approach to environmentally responsive architecture*. Spon Press.

International Well Building Institute. (2016). *The Well Building Standard*. Delos Living LLC. https://standard.wellcertified.com/sites/default/files/The%20WELL%20Building%20Standard%20v1%20with%20May%202016%20addenda.pdf

ISO. (2005). *ISO 7730:2005, Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.* https://www.iso.org/standard/39155.html

Katzschner, L., Bosch, U. & Rottgen M. (2002). Behaviour of people in open spaces in dependency of thermal comfort conditions. In GRECO and ACAD (Eds) *PLEA 2002. Design with the Environment. Proceedings of the 19th International Conference. Toulouse-France, July 2002* (pp. 411-415).

Krause, B. (2008). Anatomy of the Soundscape: Evolving Perspectives. *Journal of the Audio Engineering Society. 56*. 73-80.

Krautheim, M., Pasel, R., Pfeiffer, S. & Schultz-Granberg, J. (2014). *City and Wind – Climate as an Architectural Instrument*. A Dom Publishers.

Lawrence Berkeley National Laboratory. Desktop Radiance (Version 1.02 7) [Computer software]. http://radsite.lbl.gov/deskrad

Leaman, J. & Bordass, W. T. (1997). *Productivity in Buildings: the KillerVariables*. London, UK: Workplace Comfort Forum, παραπομπή στο Nicol, J.F. & Humphreys M.A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings. 34*(6). 563-572. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3

Lopez de Asiain, J. (1990). Comfort in urban space in Southern Europe. In T.C. Steemers, W. Palz, Commission of the European Communities (Eds) *2nd European Conference on Architecture. Science and Technology at the Service of Architecture. Proceedings of an International Conference held at Paris, France, 4-8 December 1989* (pp. 78-81). Kluwer Academic Publishers.

Markus, T. A. & Morris, E. N. (1980). *Buildings, Climate and Energy*. Pitman Publishing Ltd.

Marsh, A. J. (2021). *Psychrometric Chat* [Online software]. http://andrewmarsh.com/software/psychro-chart-web/

Metsovo lung. (2023, 23 Οκτωβρίου). *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Metsovo_lung

Murray Schafer, E. (1993). *The soundscape. Our sonic environment and the tuning of the world.* Destiny Books.

Nicol, J. F. & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings. 34*(6). 563-572. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3

Nikolopoulou, M. (Ed.) (2004). *Designing open spaces in the urban environment: a bioclimatic approach. RUROS- Rediscovering the Urban Realm and Urban Spaces*. Centre for Renewable Energy Sources.

Nikolopoulou, M., Baker, N. & Steemers, K. (1998). Thermal comfort in outdoor urban spaces. In E. Maldonado Eduardo & S. Yannas, (Eds). *Environmentally Friendly Cities. Proceedings of PLEA 98, Passive and Low Energy Architecture, 1998, Lisbon, Portugal, June 1998* (pp. 179-182). James & James Science Publishers Ltd.

Oke, T. R. (1995). *Boundary Layer Climates.* Routledge.

Olgyay, V. & Olgyay, A. (1963). *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.

Pachi, M. & Alexandrou, E. (2017). Influence of the Building Envelope on the Thermal Comfort of Residential Buildings of 1930-1940. In: F. Vavili-Tsinika, K. Axarli, K. Ioannidis (Eds), *Emerging Complexities, Transparency and Architecture, 4th Interntational Conference in Transparency and Architecture*. Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki.

Rapoport, A. (1969). *House Form and Culture*. Prentice-Hall Inc.

Rauzier, E. & Berger, X. (1991). Urban conception of the old city of Nice to provide summer thermal comfort. In: S. Alvarez Servando et al. (Eds). *Architecture and Urban Space. Proceedings of the Ninth International Conference, Seville, Spain, September 24-27* (pp. 139-144). Kluwer Academic Publishers.

Romero, M. A. B. (1993). Bioclimatic Architecture in Open Public Space. In: N. Foster Norman & H. Scheer (Eds) *Solar Energy in Architecture and Urban Planning. Third European Conference on Architecture. Commission of the European Communities. Proceedings of an International Conference. Florence, Italy, 17-21 May 1993* (pp. 495-496). H.S. Stephens & Associates.

Soundscape Ecology (2023, November 24). In: Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Soundscape_ecology.

Szokolay, S. V. (1980). *Environmental Science Handbook for Architects and Builders*. The Construction Press.

Szokolay, S. V. (2014). *Introduction to Architectural Science. The Basis of Sustainable Design*. Architectural Press. An imprint of Elsevier Science.

U.S. Green Building Council (2021). *LEED BD+C: New Constructionv4 - LEED v4. Indoor air quality assessment. Indoor Environmental Quality.* https://www.usgbc.org/credits/new-construction-commercial-interiors-core-and-shell-schools-new-construction-retail-new-c-8?view=language

UCLA Energy Design Tools Group (2020). *Climate Consultant* (Version 6.0) [Computer software]. https://www.sbse.org/resources/climate-consultant

United Nations Environment Programme (UNEP) & the World Health Organization (WHO). (1980) *International Programme on Chemical Safety. Environmental Health Criteria 12 Noise.* Health Organization. http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc012.htm (1 Δεκεμβρίου 2021)

United States Air Quality Index (n.d.). *Air Quality Index (AQI) Basics*. https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (1991). *Indoor Air Facts No. 4 (revised). Sick Building Syndrome.* https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-08/documents/sick_building_factsheet.pdf

Weber, W., Lachal, B., Drexler, H., Gallinelli, P. & Gonzalez D. (1993-1995). Passive Electronic Metahandbook, P.E.M. Passive Cooling Design Guidelines for Mediterranean Climate and Countries. (Version 1.2) [Computer software]. Geneva: C.U.E.P.E., University of Geneva.

Wienold, J. (2002). Guest editorial. *Solar Energy. (73)*2. 75-76. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00063-4.

World Health Organisation (2005). *Air Quality Guidelines Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.* https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf

Γιάννας, Σ. (2002). Βιοκλιματικά κριτήρια σχεδιασμού στην πόλη. Στο *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός στον Αστικό Χώρο*. Ημερίδα. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας. 24 Μαΐου 2002. [CD-ROM]

Ευαγγελινός, Ε. & Ζαχαρόπουλος, Η. (2001). Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου* (σσ. 21-154). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Κορωναίος, Α. Γ. & Πουλάκος, Γ. Ι. (2005). *Τεχνικά Υλικά*. τ.2. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κυπριακή Δημοκρατία, Υπουργείο Εργασίας, Πρόνοιας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων (ΥΕΠΚΑ), Τμήμα Επιθεώρησης Εργασίας (ΤΕΕ), (2013). Οδηγός Ποιότητας Αέρα Εσωτερικού Χώρου. http://www.mlsi.gov.cy/mlsi/dli/dliup.nsf/All/A2B442F4ADA5D942C2257E0C00414C35/$file/Odigos%20Poiot%20Esot%20Aera%202013.pdf

Μαύρος Π. (2000). Στοιχεία Μετάδοσης Θερμότητας. Στο: Δ. Ζαμπούλης, Α. Ι. Ζουμπούλης, Κ. Α. Μάτης, Π. Μαύρος, *Εισαγωγή στη Χημική Τεχνολογία, Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης* (σ. 6-1-24). ΑΠΘ, Τμήμα Εκδόσεων, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο.

Μερέση, Α. (2010). Εξοικονόμηση ενέργειας στη σχολική αίθουσα μέσω του φυσικού φωτισμού. [Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών]. Aristotle University of Thessaloniki - ΙΚΕΕ https://ikee.lib.auth.gr/record/124686/files/GRI-2010-5866%20.pdf

Μπουγιατιώτη, Φ.-Μ. (2007). *Η θερμική συμπεριφορά και η περιβαλλοντική επίδραση των υλικών που χρησιμοποιούνται στους υπαίθριους χώρους και στο κέλυφος των κτιρίων στην Ελλάδα* [Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών. https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/17018

Νικολοπούλου, Μ. (2002). Μικροκλίμα και θερμική άνεση: η επίδραση τους στη χρήση του υπαίθριου χώρου. Στο *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός στον Αστικό Χώρο*. Ημερίδα. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας. 24 Μαΐου 2002. [CD-ROM]

Παπαμανώλης, Ν. (2015). *Δομική Φυσική και Αρχές Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού Κτιρίων* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-498

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ). (2002). *ΤΟΤΕΕ 2425/86. Εγκαταστάσεις σε κτίρια. Στοιχεία υπολογισμού φορτίων κλιματισμού κτηριακών χώρων*. https://web.tee.gr/wp-content/uploads/totee_2425_86.pdf

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ). (2021). *ΤΟΤΕΕ 20701-2/2021. Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων.* https://web.tee.gr/wp-content/uploads/TOTEE-20701-2-2021.pdf

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ). (2021). *ΤΟΤΕΕ 20701-7/2021. Τεχνικός και φυσικός φωτισμός κτιρίων*. https://web.tee.gr/wp-content/uploads/TOTEE-20701-7-2021.pdf

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ). (2017). *ΤΟΤΕΕ 20701-1/2017. Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και την έκδοση πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης.* http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/TOTEE-20701-1-Final-%D4%C5%C5-2nd.pdf

Τόσκα, Θ.-Φ. (1989). *Αρχιτεκτονικό Χρώμα. Θεωρία και Σχεδιασμός*. Εκδόσεις Αδελφών Κυριακίδη.

Τσαγκρασούλης, Ά. (2015). *Φυσικός Φωτισμός* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-443

ΥΑ 3046/304/1989 (ΦΕΚ 59/Δ/3-2-1989). *Κτιριοδομικός Κανονισμός*. Ελληνική Δημοκρατία. http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teelar/NOMOTHESIA/KTIRIOOIKODOMIKOS%20KSNONISMOS

ΥΑ Δ6/Β/14826/2008 (ΦΕΚ 1122/Β` 17.6.2008). *Μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την εξοικονόμηση ενέργειας στο δημόσιο και ευρύτερο δημόσιο τομέα.* Ελληνική Δημοκρατία.

Κεφάλαιο 5

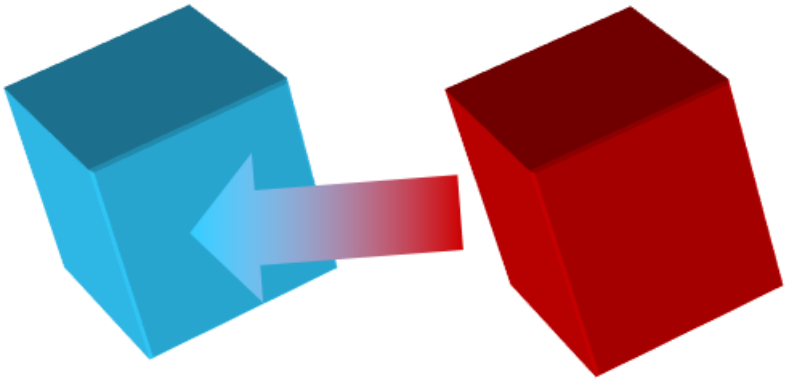
Φυσική κτιρίων – Κτιριακό κέλυφος

Σύνοψη
Το κτιριακό κέλυφος αποτελεί τον κύριο ρυθμιστή των στοιχείων του κλίματος, το όριο μεταξύ του εσωτερικού χώρου και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται οι βασικές διαδικασίες μετάδοσης της θερμότητας, καθώς και οι επιφανειακές και θερμοφυσικές ιδιότητες των διάφορων υλικών και δομικών στοιχείων που διαμορφώνουν το κτιριακό κέλυφος και τους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στη θερμομόνωση του κελύφους και των ανοιγμάτων ως βασική στρατηγική εξοικονόμησης ενέργειας.

Προαπαιτούμενη γνώση
Για την ανάγνωση απαιτούνται βασικές γνώσεις Φυσικής και Μαθηματικών.

5.1 Διαδικασίες μετάδοσης θερμότητας

Ως θερμότητα ορίζεται «η ενέργεια που μεταβιβάζεται από ένα σώμα σε ένα άλλο ως αποτέλεσμα μιας διαφοράς θερμοκρασίας» (Αλεξόπουλος, 1957, σ. 20) (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1 *Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται πάντα από το σημείο υψηλής θερμοκρασίας στο σημείο χαμηλής θερμοκρασίας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Οι τρόποι μετάδοσης θερμότητας είναι γνωστοί από τη Φυσική. Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με μία από τις παρακάτω τρεις βασικές διαδικασίες μετάδοσης θερμότητας ή και με τον συνδυασμό τους (Chapman, 1974, σ. 3) (Εικόνα 5.2):

- με αγωγή (*conduction*),
- με μεταφορά (ή συναγωγή) (*convection – advection*) και
- με ακτινοβολία (*radiation*).

Όταν η προσθήκη ή η αφαίρεση θερμότητας προκαλεί θερμοκρασιακή μεταβολή, ονομάζεται αισθητή θερμότητα (sensible heat). Όταν συνοδεύεται από αλλαγή φάσης, από υγρό σε αέριο (εξάτμιση) ή το αντίθετο (συμπύκνωση), ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα (Givoni, 1998, σ. 109).



Εικόνα 5.2 *Παραδείγματα των τριών μορφών μετάδοσης θερμότητας:*
α. Αγωγή. Πηγή: Brown ceramic mug, Photo by Katlyn Boone on Unsplash.
β. Μεταφορά. Πηγή: Person holding snowboard, Photo by Cherry Laithang on Unsplash.
γ Ακτινοβολία. Πηγή: Firewood in flame, Photo by Maurice Sahl on Unsplash.

5.1.1 Μετάδοση θερμότητας με αγωγή

Θερμική αγωγή είναι ο όρος που αναφέρεται στον μηχανισμό εσωτερικής ανταλλαγής ενέργειας από ένα σώμα που βρίσκεται σε επαφή με ένα άλλο ή από ένα μέρος ενός σώματος σε ένα άλλο, μέσω της ανταλλαγής κινητικής ενέργειας των μορίων από άμεση επικοινωνία ή από το ρεύμα των ελεύθερων ηλεκτρονίων, σε περίπτωση θερμικής αγωγής σε μέταλλα (Chapman, 1974, σ. 110· Givoni, 1998, σ. 110) Η θερμική αγωγή αναφέρεται τόσο σε στερεά όσο και σε υγρά και αέρια σώματα.

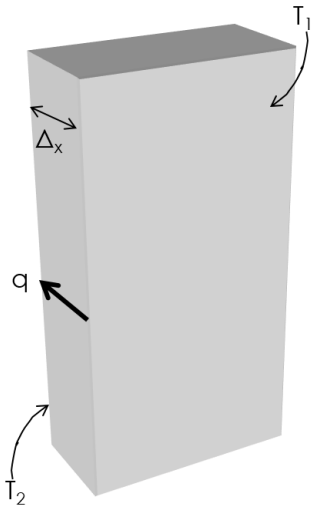
Για την περίπτωση της μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας (one-dimensional heat conduction) σε μόνιμη κατάσταση (steady state), σε ένα απλό κατασκευαστικό στοιχείο, η μετάδοση θερμότητας με αγωγή όταν T1 > T2 είναι (Εικόνα 5.3):

$$\frac{q}{A} = \lambda \times \frac{dT}{dx} \text{ ή } \frac{q}{A} = \lambda \times (T_1 - T_2) \times (x_2 - x_1) \quad (5.1)$$

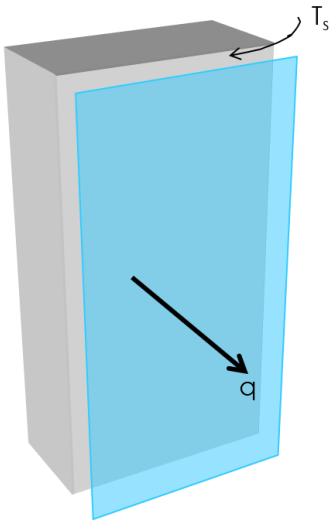
όπου:

q	:	ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας, σε W
A	:	η επιφάνεια, σε m^2
λ	:	ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, σε W/m.K
dT	:	η διαφορά θερμοκρασίας, σε K
dx	:	το πάχος υλικού, σε m

Συνεπώς, η μετάδοση θερμότητας με αγωγή είναι ανάλογη του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού, ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας και αντιστρόφως ανάλογη με το πάχος του υλικού.



Εικόνα 5.3 *Απλοποιημένη απεικόνιση της μετάδοσης θερμότητας με αγωγή διαμέσου ενός στερεού σώματος. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*



Εικόνα 5.4 *Σχηματική απεικόνιση της μετάδοσης θερμότητας με μεταφορά. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

5.1.2 Μετάδοση θερμότητας με μεταφορά

Θερμική μεταφορά είναι ο όρος που αναφέρεται στον μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας που λαμβάνει χώρα όταν ένα ρευστό (υγρό ή αέριο) έρχεται σε επαφή με ένα στερεό, το οποίο έχει διαφορετική θερμοκρασία από το ρευστό (Chapman, 1974, σ. 3· Givoni, 1998, σ. 110). Είναι προφανές ότι στο δομημένο περιβάλλον η μετάδοση θερμότητας με μεταφορά πραγματοποιείται ανάμεσα στις επιφάνειες και στον αέρα που βρίσκεται σε επαφή με αυτές.

Η μετάδοση θερμότητας με μεταφορά, όταν Ts > Tf, είναι (Εικόνα 5.4):

$$\frac{q}{A} = \alpha \times (T_s - T_f) \tag{5.2}$$

όπου:

q : ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας, σε W

A : η επιφάνεια, σε m^2

α : ο συντελεστής θερμικής μεταβίβασης ή επιφανειακός συντελεστής θερμικής μεταφοράς (heat transfer coefficient – film coefficient) (Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, 1999), ο οποίος δεν αποτελεί φυσική ιδιότητα του υλικού, αλλά εξαρτάται από τη σύσταση του ρευστού και τη φύση και τη γεωμετρία της κίνησής του καθώς διέρχεται από την επιφάνεια (Chapman, 1974: 14), σε $W/m^2.K$

Ts : η θερμοκρασία της επιφάνειας, σε K

Tf : η θερμοκρασία του ρευστού, σε K

Η μετάδοση θερμότητας με θερμική μεταφορά πραγματοποιείται μέσω ενός ρευστού (υγρού ή αερίου). Η κίνηση του ρευστού γίνεται λόγω της διαφοράς στην πυκνότητά του, η οποία οφείλεται σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Στη φυσική θερμική μεταφορά που συμβαίνει στο εσωτερικό των κτιρίων, ο αέρας θερμαίνεται ή ψύχεται από την επαφή του με το κέλυφος και κινείται μεταφέροντας ή απάγοντας θερμότητα.

Ο θερμός αέρας έχει μικρότερη πυκνότητα από τον ψυχρό και ανέρχεται δημιουργώντας χώρο που καταλαμβάνεται από ψυχρό κι έτσι προκαλείται ένα ρεύμα, το οποίο γίνεται αντιληπτό στους εσωτερικούς

χώρους των κτιρίων υπό συνθήκες άπνοιας. Η κίνηση αυτή του αέρα είναι δυνατόν να επιταχυνθεί ή να μεταβληθεί με τη χρήση ανεμιστήρων, οπότε πραγματοποιείται υποβοηθούμενη θερμική μεταφορά (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 70).

Η κίνηση του αέρα η οποία οφείλεται στη θερμική μεταφορά είναι πολύ σημαντική στον σχεδιασμό των βιοκλιματικών κτιρίων, γιατί μέσω της μελέτης της προσδιορίζονται βασικές συνιστώσες των παθητικών συστημάτων θέρμανσης και δροσισμού (π.χ. θέσεις ανοιγμάτων για φυσικό αερισμό, αξιοποίηση αποθηκευμένης θερμότητας κ.ά.).

5.1.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

Θερμική ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (Infra-Red, IR ή long-wave radiation), είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που έχει παρατηρηθεί ότι εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός σώματος που έχει θερμανθεί προς όλες τις διευθύνσεις και η οποία, όταν φτάνει σε ένα άλλο σώμα, μέρος της ανακλάται και μέρος της απορροφάται. Ανάμεσα σε δύο σώματα που ακτινοβολούν υπάρχει συνεχής ανταλλαγή ενέργειας από το θερμότερο στο ψυχρότερο. Η ανταλλαγή ενέργειας εξακολουθεί να πραγματοποιείται ακόμα και στην περίπτωση της θερμικής ισορροπίας (Chapman, 1974, σ. 4· Givoni, 1998, σ. 112).

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία από ένα σώμα είναι (Εικόνα 5.5):

$$\frac{q}{A} = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \tag{5.3}$$

όπου:

q : ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας, σε W

A : η επιφάνεια, σε m^2

ε : ο συντελεστής εκπομπής, 0 < ε < 1

σ : η σταθερά Stefan-Boltmann, 5,67 x 10-8 W/m^2K^4

T : η θερμοκρασία της επιφάνειας, σε K

Η μετάδοση θερμικής ακτινοβολίας από ένα θερμό σε ένα ψυχρό σώμα (T1 > T2) δίνεται από τη σχέση (Μαύρος, 2000, σσ. 6-15):

$$Q_{12} = A_1 \times \sigma \times (T_1^4 - T_2^4) \times F_{12} \tag{5.4}$$

όπου:

Q_{12} : η θερμότητα που μεταδίδεται με ακτινοβολία, Wh

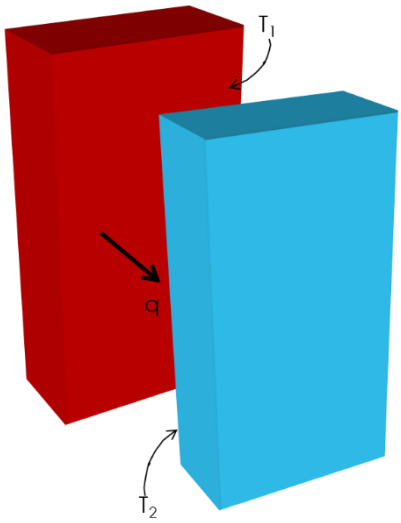
A_1 : η επιφάνεια εκπέμποντος σώματος, σε m2

σ : η σταθερά Stefan-Boltzmann = 5,67x10-8 W/m^2K^4

T_1 : η θερμοκρασία θερμού σώματος

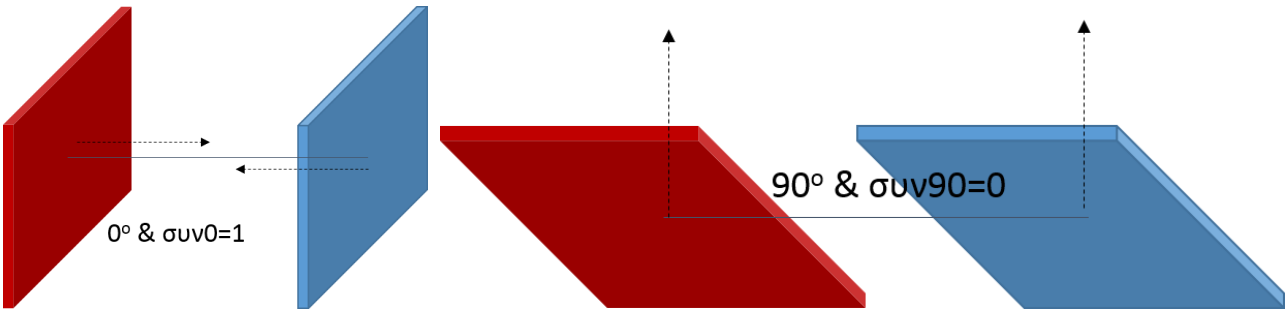
T_2 : η θερμοκρασία ψυχρού σώματος

F_{12} : ο συντελεστής θέας (view factor)



Εικόνα 5.5 *Σχηματική απεικόνιση της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Στην παραπάνω σχέση (5.4), ο συντελεστής θέας εξαρτάται από τη γεωμετρία του συστήματος, δηλαδή το μέγεθος και το σχήμα των επιφανειών και τον προσανατολισμό της θερμής και της ψυχρής επιφάνειας και ο υπολογισμός του είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος (για περισσότερα, βλ. και Κατσαπρακάκης, 2015, σ. 43). Αξιολογείται ότι είναι ανάλογος με το εμβαδό των δύο επιφανειών, αντιστρόφως ανάλογος με το τετράγωνο της απόστασής τους και ανάλογος με το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζουν τα διανύσματα που είναι κάθετα στις επιφάνειες με την ευθεία που τις ενώνει (Εικόνα 5.6). Έτσι, η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία μειώνεται όταν αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των σωμάτων, αλλά και αλλάζοντας τη γωνία με την οποία «βλέπουν» το ένα το άλλο. Πρακτικό παράδειγμα για να γίνει αυτό κατανοητό είναι όταν βάζουμε τα χέρια μας παράλληλα με τη φωτιά ή το καλοριφέρ για να τα ζεστάνουμε. Για επιφάνειες παράλληλες και κάθετες μεταξύ τους, η γωνία θέας μπορεί να βρεθεί γραφικά από διαγράμματα (Κατσαπρακάκης, 2015, σσ. 44-45).

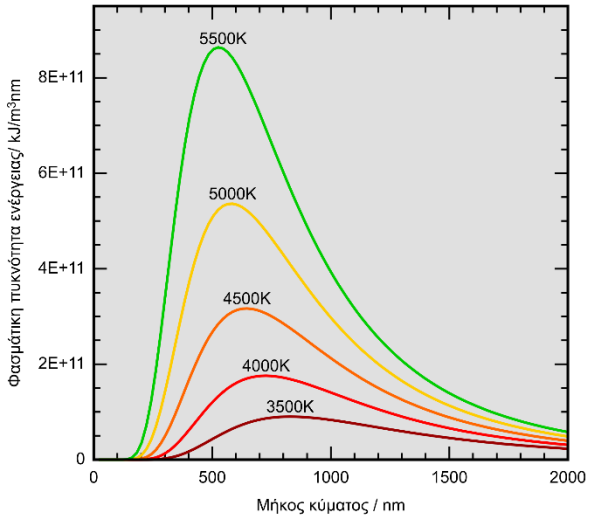


Εικόνα 5.6 *Σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη γωνία θέας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία σε σχέση με τις άλλες δύο διαδικασίες μετάδοσης θερμότητας είναι ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί και χωρίς την ύπαρξη φυσικού μέσου μεταφοράς. Με άλλα λόγια, όταν ένα σώμα που έχει θερμανθεί βρεθεί σε ψυχρότερο περιβάλλον, χάνει ενέργεια με ακτινοβολία, ακόμα και χωρίς την παρουσία ατμόσφαιρας (έστω π.χ. ότι αιωρείται στο κενό) (Chapman, 1974, σ. 14).

Το μήκος κύματος στο οποίο πραγματοποιείται η μέγιστη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία αλλάζει με τη θερμοκρασία και γίνεται μικρότερο, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, γεγονός που εκφράζεται από το Νόμο Μετατόπισης του Wien (*Wien's Displacement Law*) που ορίζει ότι: «η τιμή του μήκους κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας του ακτινοβολούντος μέλανος σώματος»

(Αλεξόπουλος, 1957, σ. 234 και Chapman, 1974, σ. 425). (Βλ. Εικόνα 5.7). Έτσι, μια πηγή υψηλής θερμοκρασίας, όπως είναι για παράδειγμα ο ήλιος, ακτινοβολεί στο μικρό μήκος κύματος, ενώ αντίθετα μία πηγή χαμηλής θερμοκρασίας, όπως ένα κτίριο, ακτινοβολεί στο μεγάλο μήκος κύματος (Markus & Morris, 1980, σ. 311). Πρέπει, εδώ να σημειωθεί ότι οι θερμοκρασίες του κελύφους και γενικά των δομικών υλικών που απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και θερμαίνονται από αυτή σπάνια υπερβαίνουν τους 50°C και συνεπώς πάντα εκπέμπουν σε περιοχές του υπέρυθρου φάσματος.



Εικόνα 5.7 *Σχηματική απεικόνιση της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος στα διάφορα μήκη κύματος. Πηγή: Μετάφραση από Wiens law by 4C via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0*

5.1.4 Εξάτμιση και Συμπύκνωση (Υγροποίηση)

Στη βιβλιογραφία που σχετίζεται με τη Φυσική, τα φαινόμενα της εξάτμισης και της συμπύκνωσης περιλαμβάνονται στις μεταβολές της κατάστασης των σωμάτων και όχι στις διαδικασίες μετάδοσης θερμότητας. Η εξάτμιση δεν αποτελεί τρόπο μετάδοσης θερμότητας, παρά μόνο λόγω της εκλυόμενης ή απορροφώμενης λανθάνουσας θερμότητας, η οποία εμφανίζεται κατά την αλλαγή φάσης του νερού.

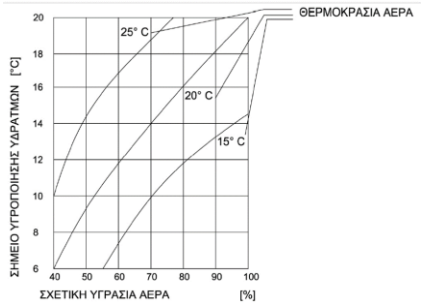
Εξάτμιση είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία κατά την οποία ένα υγρό αλλάζει κατάσταση και μετατρέπεται σε υδρατμούς (μεταβαίνει από την υγρή φάση, στην αέρια). Η αλλαγή αυτή, εφόσον η απαιτούμενη θερμική ενέργεια λαμβάνεται από το περιβάλλον, οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Το φαινόμενο αντιστρέφεται κατά την αλλαγή από την αέρια στην υγρή κατάσταση, με απόδοση θερμότητας στο περιβάλλον. Η απορροφώμενη ή εκλυόμενη θερμότητα κατά τις μεταβολές φάσης καλείται λανθάνουσα θερμότητα (Αλεξόπουλος, 1962, τ. 4, σ. 59).

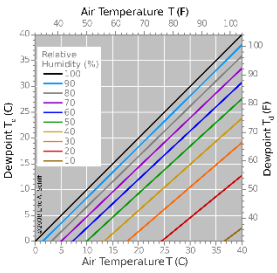
Συμπύκνωση είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία κατά την οποία ένα αέριο ή ατμός μετατρέπεται σε υγρό. Κατά τη συμπύκνωση απελευθερώνεται θερμότητα στο περιβάλλον (Santamouris & Asimakopoulos, 1996, σ. 15).

Το ποσό των υδρατμών που μπορεί να «χωρέσει» ο αέρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Ο ζεστός αέρας «χωράει» περισσότερους υδρατμούς από τον ψυχρό. Για μια ορισμένη θερμοκρασία η περιεκτικότητα του αέρα σε υδρατμούς δεν είναι δυνατόν να ξεπεράσει μια καθορισμένη τιμή. Σε έναν χώρο, για συγκεκριμένη θερμοκρασία του αέρα, το ποσό υγρασίας (νερού) θα εμφανίζεται ως χαμηλή σχετική υγρασία, ενώ αν η θερμοκρασία του αέρα ελαττωθεί, θα εμφανίζεται ως υψηλή. Ο αέρας, ο οποίος για μια καθορισμένη θερμοκρασία περιέχει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα υδρατμών, ονομάζεται κορεσμένος και η τάση των υδρατμών ονομάζεται τάση κορεσμένων υδρατμών (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 71-72).

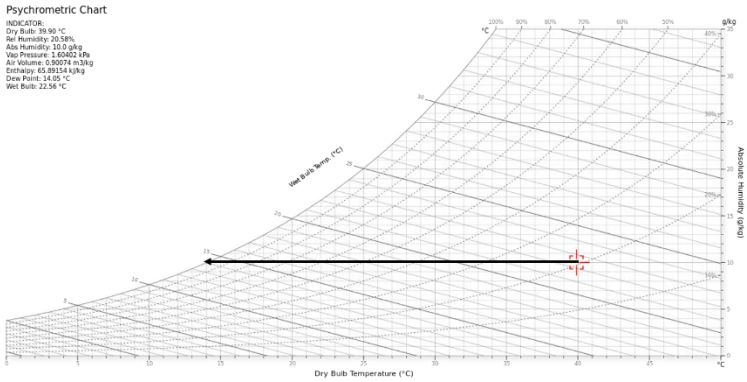
Η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η υγροποίηση των υδρατμών του αέρα, όταν αυτός ψυχθεί, ονομάζεται σημείο υγροποίησης, ts, ή σημείο δρόσου (*dew point*). Το σημείο υγροποίησης των υδρατμών

προσδιορίζεται από τη θερμοκρασία του αέρα και τη σχετική υγρασία, είτε γραφικά μέσω διαγραμμάτων (Εικόνα 5.8.α και β), είτε μέσω πίνακα (Εικόνα 5.8.γ) είτε μέσω του ψυχρομετρικού διαγράμματος, φέρνοντας παράλληλη στον άξονα της θερμοκρασίας ξηρού βολβού (Εικόνα 5.8.δ) ακόμα και με τη βοήθεια διαδικτυακών εργαλείων (π.χ. Calculator.net, n.d.).





	T (°C)										
Rh (%)	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
20	−20	−18	−16	−14	−12	−9,8	−7,7	−5,6	−3,6	−1,5	−0,5
25	−18	−15	−13	−11	−9,1	−6,9	−4,8	−2,7	−0,6	1,5	3,6
30	−15	−13	−11	−8,9	−6,7	−4,5	−2,4	−0,2	1,9	4,1	6,2
35	−14	−11	−9,1	−6,9	−4,7	−2,5	−0,3	1,9	4,1	6,3	8,5
40	−12	−9,7	−7,4	−5,2	−2,9	−0,7	1,5	3,8	6,0	8,2	10,5
45	−10	−8,2	−5,9	−3,6	−1,3	0,9	3,2	5,5	7,7	10,0	12,3
50	−9,1	−6,8	−4,5	−2,2	0,1	2,4	4,7	7,0	9,3	11,6	13,9
55	−7,8	−5,6	−3,3	−0,9	1,4	3,7	6,1	8,4	10,7	13,0	15,3
60	−6,8	−4,4	−2,1	0,3	2,6	5,0	7,3	9,7	12,0	14,4	16,7
65	−5,8	−3,4	−1,0	1,4	3,7	6,1	8,5	10,9	13,2	15,6	18,0
70	−4,8	−2,4	0,0	2,4	4,8	7,2	9,6	12,0	14,4	16,8	19,1
75	−3,9	−1,5	1,0	3,4	5,8	8,2	10,6	13,0	15,4	17,8	20,3
80	−3,0	−0,6	1,9	4,3	6,7	9,2	11,6	14,0	16,4	18,9	21,3
85	−2,2	0,2	2,7	5,1	7,6	10,1	12,5	15,0	17,4	19,9	22,3
90	−1,4	1,0	3,5	6,0	8,4	10,9	13,4	15,8	18,3	20,8	23,2
95	−0,7	1,8	4,3	6,8	9,2	11,7	14,2	16,7	19,2	21,7	24,1
100	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0



Εικόνα 5.8 *Υπολογισμός σημείου υγροποίησης υδρατμών. α. και β. Γραφικά με τη βοήθεια διαγραμμάτων. Πηγές: Πουλάκος & Κορωναίος, 2005, σ. και Dewpoint-RH by Easchiff via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0), γ. Μέσω πίνακα (πηγή: προσαρμογή από: https://ru.wikipedia.org/wiki/Точка_росы) και δ. Γραφικά με τη βοήθεια του ψυχρομετρικού διαγράμματος (πηγή: Psychrometric Chart by © Dr. Andrew J. Marsh, 2020, CC BY-NC-SA 4.0).*

Η εξάτμιση είναι ένα φαινόμενο που μεγιστοποιείται όταν συνδυαστεί με την κίνηση του αέρα. Τα επιφανειακά μόρια του νερού παρασύρονται από τον κινούμενο αέρα και μεταφέρονται σε αυτόν, αυξάνοντας την υγρασία του. Το φαινόμενο αυτό είναι δυνατόν, αν χρησιμοποιηθεί ως στρατηγική δροσισμού ενός χώρου (βλ. Κεφ. 8, παρ. 8.4.2 & 8.4.3), να προκαλέσει υπερβολική αύξηση της σχετικής υγρασίας, με αντίθετα από τα αναμενόμενα αποτελέσματα ως προς τη θερμική άνεση (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 71-72).

Στα κτίρια, η εξάτμιση είναι δυνατό να βοηθήσει σημαντικά στον δροσισμό εκούσια ή και ακούσια. Εκούσια, εφόσον σχεδιαστεί σε συνδυασμό με τη φυσική ή υποβοηθούμενη κίνηση του αέρα, για τη δημιουργία διατάξεων δροσισμού με καθοδική (καταβατική) κίνηση. Ακούσια, εφόσον συμβαίνει σε κάποια υγρή επιφάνεια του κτιρίου, τις περισσότερες φορές όμως, η ύγρανση οφείλεται σε οικοδομική ή άλλη αστοχία (Στο ίδιο).

5.2 Επιφανειακές ιδιότητες υλικών

Οι ιδιότητες των υλικών που καθορίζουν τη συμπεριφορά τους ως προς τη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία ονομάζονται επιφανειακές ή οπτικές ιδιότητες. Διαφοροποιούνται ως προς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η συμπεριφορά ενός υλικού ως προς την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (ηλιακή) ακτινοβολία (400-700 nm / 0,4-0,7 μm) (Akbari et al., 2005, σ. 90) καθορίζεται, για τα συμπαγή υλικά από τον συντελεστή ανακλαστικότητας, r και τον συμπληρωματικό του, συντελεστή απορροφητικότητας, α, ενώ για διαφανή και ημιδιαφανή υλικά ορίζεται και ο συντελεστής διαπερατότητας, τ. Η συμπεριφορά ενός υλικού ως προς τη μεγάλου μήκους κύματος (θερμική) ακτινοβολία, που χωρίζεται σε εγγύς υπέρυθρη (Near Infra-

UltraRed – NIR ή short infra-red), 700-2500 nm / 0,7-2,5 μm και σε υπέρυθρη (Infra-Red – IR ή long infra-red), 2500-100000 nm / 2,5-100 μm) (Szokolay, 1980, σ. 257) καθορίζεται από τον συντελεστή εκπομπής, ε.

5.2.1 Συντελεστές ανακλαστικότητας, r, και απορροφητικότητας, α

Ο συντελεστής ανακλαστικότητας (*reflectivity*) ορίζεται ως το κλάσμα της έντασης ακτινοβολίας που ανακλάται από μια επιφάνεια, προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια αυτή (Givoni, 1998, σ. 117· Santamouris & Asimakopoulos, 1996, σ. 16) (βλ. Εικόνα 5.9.α). Ο συντελεστής ανακλαστικότητας ορίζεται από τον τύπο (Santamouris, Asimakopoulos, 1996, σ. 16):

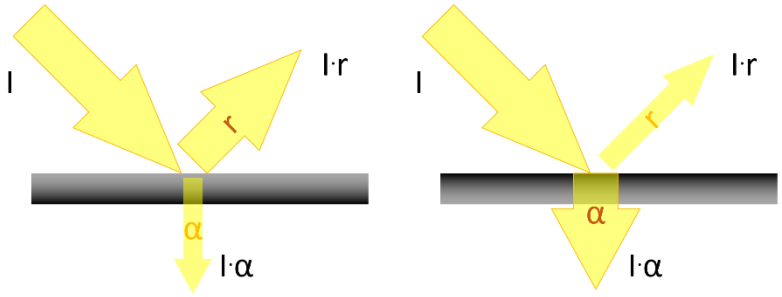
$$r = \frac{Ir}{I} \tag{5.5}$$

όπου:
r : ο συντελεστής ανακλαστικότητας, με 0 < r < 1
Ir : η ανακλώμενη ακτινοβολία, σε W/m^2
I : η προσπίπτουσα ακτινοβολία, σε W/m^2

Αντίστοιχα, ο συντελεστής απορροφητικότητας (*absorptivity*) ορίζεται ως το κλάσμα της ακτινοβολίας που απορροφάται από μια επιφάνεια, προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια αυτή (Givoni, 1998, σ. 117· Santamouris & Asimakopoulos, 1996, σ. 16) (βλ. Εικόνα 5.9.β). Ο συντελεστής απορροφητικότητας ορίζεται από τον τύπο (Santamouris & Asimakopoulos, 1996: 16):

$$a = \frac{I\alpha}{I} \tag{5.6}$$

όπου:
α : ο συντελεστής ανακλαστικότητας, με 0 < α < 1
Iα : η απορροφώμενη ακτινοβολία, σε W/m^2
I : η προσπίπτουσα ακτινοβολία, σε W/m^2
Για συμπαγή υλικά, ισχύει r + a = 1.



Εικόνα 5.9 *Σχηματική απεικόνιση α. του συντελεστή ανακλαστικότητας και β. του συντελεστή απορροφητικότητας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Ο συντελεστής ανακλαστικότητας παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις στα κοινά υλικά, κυρίως ανάλογα με το χρώμα τους (Givoni, 1998, σ. 113) (βλ. Εικόνα 5.10). Έτσι, οι σκουρόχρωμες επιφάνειες (π.χ. η καινούργια άσφαλτος ή οι σκουρόχρωμες σχιστόπλακες) υπερθερμαίνονται σε σχέση με τις ανοιχτόχρωμες (π.χ. τις λευκές πλάκες πεζοδρομίου ή το λευκό μάρμαρο), όταν είναι εκτεθειμένες στην ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 5.10 *Η επίδραση του χρώματος στην απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας. Πηγή εικόνας: Linen Swatches by Sherri Lynn Wood via Flickr, CC BY-NC 2.0. Ο Benjamin Franklin λέγεται ότι ανακάλυψε τη σημασία του χρώματος για την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας τοποθετώντας ένα μαύρο και ένα άσπρο πανί πάνω στο χιόνι, μια χειμωνιάτικη ημέρα με ήλιο. Το χιόνι έλιωσε πολύ γρηγορότερα κάτω από το μαύρο πανί, καθώς αυτό απορροφούσε περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία (Buckley, 1979, σσ. 55-56).*

Πέρα από το χρώμα, ο συντελεστής ανακλαστικότητας εξαρτάται από την υφή της επιφάνειας και την περιεχόμενη υγρασία (Siddiqi, 1984, σσ. 899-907). Έτσι, οι αδρές επιφάνειες τείνουν να απορροφούν μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας απ' ό,τι οι λείες επιφάνειες (Akbari et al., 1992, σ. 45). Ανάλογα, οι βρεγμένες επιφάνειες έχουν μικρότερη ανακλαστικότητα από τις αντίστοιχες στεγνές. Ο Angstrom (1925, σ. 323-342, παραπομπή στο Siddiqi, 1984, σ. 900) παρατήρησε ότι η ανακλαστικότητα της γκρίζας άμμου μειώθηκε από 0,18 σε 0,09 όταν αυτή βράχηκε και ότι η ανακλαστικότητα ψηλού, ανοιχτόχρωμου γρασιδιού παρουσίασε μείωση από 0,32 σε 0,2.

Για τα διαφορετικά δομικά υλικά, τυπικές τιμές ανακλαστικότητας και απορροφητικότητας δίνονται στην ΤΟΤΕΕ 20701-2.

Για τα αδιαφανή τμήματα του κελύφους, η προσπίπτουσα ακτινοβολία κατά ένα ποσοστό θα απορροφηθεί και κατά ένα θα ανακλαστεί. Το παραπάνω γεγονός καθιστά τη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία σημαντική για τον βιοκλιματικό σχεδιασμό. Το τμήμα της ακτινοβολίας που θα απορροφηθεί θα διοχετευθεί προς το εσωτερικό του κελύφους με ταχύτητα (ρυθμό) που εξαρτάται από τον συντελεστή θερμοπερατότητας (K / U-value) και τη θερμοχωρητικότητά του. Ταυτόχρονα, το κέλυφος που έχει θερμανθεί εκπέμπει μεγάλου μήκους κύματος (θερμική) ακτινοβολία προς το περιβάλλον του (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 66-67).

5.2.2 Συντελεστής διαπερατότητας, τ

Ο συντελεστής διαπερατότητας (transmittance) ορίζεται ως το κλάσμα της ηλιακής ενέργειας που διαπερνάει μία διαφανή ή ημιδιαφανή επιφάνεια προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (Givoni, 1998, σ. 117· Santamouris & Asimakopoulos, 1996, σ. 17).

Ο συντελεστής διαπερατότητας ορίζεται από τον τύπο (Santamouris & Asimakopoulos, 1996, σ. 17):

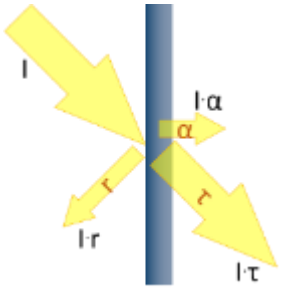
$$I = \frac{I\tau}{I} \tag{5.6}$$

όπου:

τ : ο συντελεστής διαπερατότητας, με $0 < \tau < 1$

Iτ : η ακτινοβολία που διέρχεται από μια επιφάνεια, σε W/m^2

I : η προσπίπτουσα ακτινοβολία, σε W/m^2



Εικόνα 5.11 *Σχηματική απεικόνιση του συντελεστή διαπερατότητας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Για κάθε μήκος κύματος ισχύει: α + r + τ = 1 (Εικόνα 5.11). Προκειμένου να γίνει πιο ξεκάθαρη η προηγούμενη σχέση, μπορεί να αναφερθεί το παράδειγμα των αερίων. Για το μικρό και το μεγάλο μήκος κύματος, ο ατμοσφαιρικός αέρας έχει τ = 1 και α = r = περίπου 0, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να διέρχεται μέσα από αυτόν, όπως διέρχεται από το κενό (Chapman, 1974, σ. 414). Στη διαφοροποίηση των τιμών του συντελεστή διαπερατότητας στα διαφορετικά μήκη κύματος οφείλεται και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, δηλαδή το φαινόμενο κατά το οποίο το γυαλί και αέρια, όπως ο ατμός του νερού και το διοξείδιο του άνθρακα, είναι διαπερατά από τη μικρού μήκους κύματος (ηλιακή) ακτινοβολία (τ = περίπου 1), αλλά αδιαπέραστα από τη μεγάλου μήκους κύματος (θερμική) ακτινοβολία (τ = περίπου 0).

Στους απλούς υαλοπίνακες, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κατά ένα ποσοστό ανακλάται προς το εξωτερικό περιβάλλον, ένα ποσοστό απορροφάται και τέλος ένα διαπερνά το γυαλί και εισέρχεται στον χώρο· οι υαλοπίνακες αυτοί χαρακτηρίζονται, δηλαδή, από μεγάλο συντελεστή διαπερατότητας (τ). Στους απορροφητικούς υαλοπίνακες, δηλαδή στους έγχρωμους, ο συντελεστής απορρόφησης (α) αυξάνεται και έτσι υπάρχει υψηλή απορρόφηση ενέργειας και μείωση του εισερχομένου φωτός. Αντίστοιχα, οι ανακλαστικοί υαλοπίνακες, οι οποίοι έχουν εξωτερική επίστρωση με ειδική μεμβράνη ή οξείδια μετάλλων εμφανίζουν μεγάλη ανάκλαση (r) της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα τη χαμηλή απορρόφηση ενέργειας.

5.2.3 Συντελεστής εκπομπής, ε

Ο συντελεστής εκπομπής (*emissivity*) ορίζεται ως η ικανότητα μιας επιφάνειας να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία σε σχέση με τη θερμική ακτινοβολία, που εκπέμπεται από το ιδανικό μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία (Givoni, 1998, σ. 117· Santamouris & Asimakopoulos, 1996, σ. 16).

Ο συντελεστής εκπομπής ορίζεται από τον τύπο (Markus & Morris, 1980, σ. 311):

$$E = \frac{E}{Eb} \tag{5.8}$$

όπου:

ε : ο συντελεστής εκπομπής, με 0 < ε < 1

E : η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα, σε W/m^2

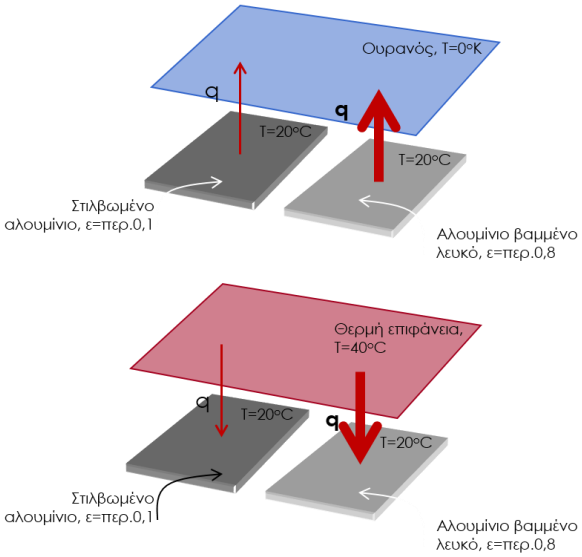
Eb : η ενέργεια που εκπέμπεται από το μέλαν σώμα, σε W/m^2

Ο συντελεστής εκπομπής όλων των κοινών επιφανειών, εκτός από τις μεταλλικές, έχει περίπου την ίδια τιμή ανεξάρτητα από το χρώμα και είναι ίσος με περίπου 0,8-0,9. Αντίθετα, για τα στιλβωμένα μέταλλα, ο συντελεστής εκπομπής είναι πολύ χαμηλότερος (Givoni, 1998, σ. 113).

Η σημασία του συντελεστή εκπομπής μπορεί να γίνει κατανοητή από το παρακάτω πρακτικό παράδειγμα. Έστω ότι εξετάζεται η συμπεριφορά δύο επιφανειών αποκλειστικά ως προς τη μετάδοση θερμότητας με θερμική ακτινοβολία (Εικόνα 5.12). Η πρώτη επιφάνεια είναι από αλουμίνιο βαμμένο με

κάποιο χρώμα (ε = περίπου 0,9) και η δεύτερη από στιλβωμένο αλουμίνιο (ε = περίπου 0,1). Όταν οι επιφάνειες αυτές τοποθετηθούν οριζόντια, στραμμένες προς τον καθαρό ουρανό, θα εκπέμπουν θερμότητα προς τον ανέφελο νυχτερινό ουρανό, ο οποίος αποτελεί στοιχείο συγκέντρωσης θερμότητας με πολύ χαμηλή θερμοκρασία (0°K, -273°C). Η ακτινοβολούμενη ενέργεια που εκπέμπουν οι δύο επιφάνειες είναι ανάλογη προς τον συντελεστή εκπομπής τους (σχέση 5.3). Κατά συνέπεια, η επιφάνεια από βαμμένο αλουμίνιο θα εκπέμπει μεγαλύτερο ποσό ενέργειας και θα είναι ψυχρότερη από την επιφάνεια από στιλβωμένο αλουμίνιο.

Αντίθετα, όταν οι επιφάνειες που προαναφέρθηκαν τοποθετηθούν κατακόρυφα απέναντι από μια πολύ θερμότερη επιφάνεια, θα δέχονται από αυτή θερμική ακτινοβολία. Καθώς η ακτινοβολούμενη ενέργεια που απορροφάει καθεμία από τις εξεταζόμενες επιφάνειες είναι ανάλογη προς τον συντελεστή εκπομπής της, η επιφάνεια από βαμμένο αλουμίνιο θα είναι θερμότερη από την επιφάνεια από στιλβωμένο αλουμίνιο.



Εικόνα 5.12 *Σχηματική απεικόνιση της επίδρασης του συντελεστή εκπομπής ε σε διαδικασίες ανταλλαγής θερμότητας με θερμική ακτινοβολία (μεγάλου μήκους κύματος). Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο, οι στιλβωμένες μεταλλικές επιφάνειες με χαμηλό συντελεστή εκπομπής χρησιμοποιούνται ως φράγμα ακτινοβολίας (*radiant barrier*) στις κτιριακές κατασκευές. (βλ. παρ. 5.4.3). Μια άλλη εφαρμογή της χαμηλής τιμής του συντελεστή εκπομπής των μετάλλων είναι οι υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής (*low-e*) (βλ. παρακάτω παρ. 5.4.5 και Εικόνα 5.21).

5.3 Θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών

Οι βασικές θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Από τις τρεις αυτές βασικές ιδιότητες προκύπτουν η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα (*volumetric heat capacity*), η θερμική διάχυση (*thermal diffusivity*) και η θερμική επίχυση (*thermal admittance*). Για τα διαφορετικά υλικά, οι τιμές των βασικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων (πυκνότητα, συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ειδική θερμοχωρητικότητα) δίνονται στον Πίνακα 1 της Τεχνικής Οδηγίας του ΤΕΕ (ΤΟΤΕΕ) 20701-2.

5.3.1 Πυκνότητα, ρ

Η πυκνότητα ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας (m) προς τον όγκο (V) (ρ = m/V). Η μονάδα μέτρησης της πυκνότητας είναι kg/m^3. Τα οικοδομικά υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την πυκνότητά τους: τα βαριά, τα μεσαία και τα ελαφριά. Αυτός ο διαχωρισμός αναφέρεται επίσης στη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας στα υλικά (Santamouris & Asimakopoulos, 1996, σ. 21). Η πυκνότητα παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις από υλικό σε υλικό. Τα υλικά με τις μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας είναι τα μέταλλα, ενώ εκείνα με τις μικρότερες είναι τα θερμομονωτικά υλικά.

5.3.2 Ειδική θερμότητα (ή ειδική θερμοχωρητικότητα), c

Η ειδική θερμότητα (ή ειδική θερμοχωρητικότητα) ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για να ανέβει η θερμοκρασία μιας μονάδας μάζας (1 kg) ενός υλικού κατά έναν βαθμό Κελσίου (Givoni, 1998, σ. 115). Η μονάδα μέτρησης της ειδικής θερμότητας είναι τα Wh/kg.K ή τα J/kg.K.

$$c = \frac{Q}{m \times \Delta T} \tag{5.9}$$

όπου:

Q : η ενέργεια, σε J

m : η μάζα, σε kg

c : η ειδική θερμότητα, σε J/kg.K

ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας, σε K

Τα κοινά οικοδομικά υλικά παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές ειδικής θερμότητας. Οι υψηλότερες τιμές ειδικής θερμότητας συναντώνται στα προϊόντα ξύλου και στα πλαστικά, ενώ οι χαμηλότερες τιμές συναντώνται στα μέταλλα. Το υλικό με την υψηλότερη τιμή ειδικής θερμότητας είναι το νερό (4187 K/kg.K ή 1160 Wh/kg.K).

5.3.3 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, λ

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή αναφέρεται στη μετάδοση ενέργειας μέσω της κίνησης των μορίων. Η ευκολία με την οποία ένα συγκεκριμένο υλικό μπορεί να επιτύχει αυτή τη μετάδοση εκφράζεται από τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, λ. (Chapman, 1974, σ. 21). Η μονάδα μέτρησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι τα W/m.K.

Είναι η ποσότητα της θερμότητας σε βατώρες, η οποία ρέει σε 1 ώρα μέσα από στρώμα υλικού που έχει επιφάνεια 1 m^2 και πάχος 1 μ., όταν η πτώση της θερμοκρασίας προς την κατεύθυνση της ροής της θερμότητας (διαφορά θερμοκρασίας των δύο επιφανειών) είναι 1°K και το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση, δηλαδή η θερμοκρασία τοπικά παραμένει σταθερή με τον χρόνο. (Εικόνα 5.13)

$$\lambda = \frac{Q \times d}{A \times \Delta T} \tag{5.10}$$

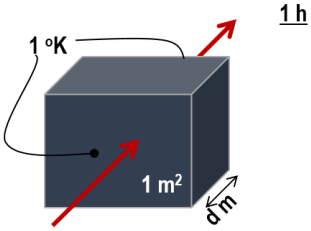
όπου:

Q : η ενέργεια, σε W

d : το πάχος, σε m

A : η επιφάνεια, σε m^2

ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας, σε K



Εικόνα 5.13 *Σχηματική απεικόνιση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, λ. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ενός υλικού εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες (Chapman, 1974, σ. 22):

- Τη χημική σύσταση του υλικού.
- Τη φάση (αέρια, υγρή, στερεή), στην οποία βρίσκεται: τα υγρά είναι καλύτεροι αγωγοί από τα αέρια και, αντίστοιχα, τα στερεά είναι καλύτεροι αγωγοί από τα υγρά, λόγω των αποστάσεων που υπάρχουν μεταξύ των μορίων, που επηρεάζουν τη μεταφορά ενέργειας μέσω μοριακής σύγκρουσης.
- Την κρυσταλλική δομή του αν είναι στερεό: σε υλικά με κρυσταλλική δομή, η μετάδοση της θερμικής ενέργειας είναι αποτέλεσμα της δόνησης της κίνησης που κάνει το κρυσταλλικό πλέγμα ως σύνολο, ενώ στα άμορφα στερεά η ακανόνιστη δομή των μορίων εμποδίζει την αποτελεσματική μετάδοση της θερμότητας.
- Τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης στις οποίες βρίσκεται: παρόλο που οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας μη ομοιογενών υλικών δεν μεταβάλλονται με την πίεση, αλλά με τη θερμοκρασία, το σχετικά μικρό εύρος θερμοκρασιών, που συναντάται στο δομημένο περιβάλλον, καθιστά αποδεκτή τη θεώρηση μιας σταθερής τιμής συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στους υπολογισμούς προβλημάτων μετάδοσης θερμότητας με αγωγή (Santamouris & Asimakopoulos, 1996, σ. 21).
- Το αν είναι ομοιογενές υλικό ή όχι: τα περισσότερα οικοδομικά και μονωτικά υλικά δεν αποτελούνται από ομοιογενείς ή καθαρές ουσίες, μπορεί να παρουσιάζουν ανισότροπη θερμική αγωγιμότητα προς μια διεύθυνση, εξαιτίας της ινώδους μορφής τους ή/και να είναι ανομοιογενή, είτε επειδή έχουν πορώδη δομή είτε επειδή αποτελούνται από διαφορετικά υλικά.
- Την πυκνότητα: ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας επηρεάζεται σημαντικά από την πυκνότητα του υλικού. Η τιμή του αυξάνεται δυσανάλογα ως προς την αυξημένη πυκνότητα (Givoni, 1998, σ. 117) και περιγράφεται από τον εμπειρικό τύπο: $\lambda = 0{,}072 \times e^{[1{,}35\ (\rho/1000)]}$, όπου: λ, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, σε W/m.K και ρ, η πυκνότητα, σε kg/m^3 και e = 2,71828 (αριθμός Euler / σταθερά Napier) (Givoni, 1998, σ. 119).
- Την περιεκτικότητα σε υγρασία: η περιεκτικότητα ενός υλικού σε υγρασία επηρεάζει την τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, γιατί το νερό (λ νερού = 0,57 W/m.K) είναι καλύτερος αγωγός της θερμότητας απ' ό,τι είναι ο αέρας (λ αέρα = 0,025 W/m.K). Έτσι, όταν υγραίνεται ένα υλικό το νερό αντικαθιστά τον αέρα στους πόρους του και, για τον λόγο αυτόν, αυξάνεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (Markus & Morris, 1980: 269).

5.3.4 Ογκομετρική θερμοχωρητικότητα, C

Ως ογκομετρική θερμοχωρητικότητα ορίζεται η ενέργεια που απαιτείται για την άνοδο της θερμοκρασίας μιας μονάδας όγκου (1 m^3) υλικού κατά έναν βαθμό Κελσίου (Givoni, 1998, σ. 115). Η μονάδα μέτρησης της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας είναι Wh/m^3.K.

Ορίζεται από το γινόμενο της μάζας επί την ειδική θερμότητα, δηλαδή από τη σχέση:

$$C = \rho \times c \tag{5.11}$$

όπου:

C : η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα, σε Wh/m^{3}K

ρ : η πυκνότητα, σε kg/m^3

c : η ειδική θερμότητα (ή ειδική θερμοχωρητικότητα) σε Wh/kg.K.

Όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση, η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα εξαρτάται από την πυκνότητα και την ειδική θερμότητα ενός υλικού. Ωστόσο, καθώς τα κοινά οικοδομικά υλικά παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές ειδικής θερμότητας, η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα. Η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα χαρακτηρίζει την ικανότητα ενός υλικού να αποθηκεύει ενέργεια (Santamouris & Asimakopoulos, 1996, σ. 21). Με απλά λόγια, όσο μεγαλύτερη είναι τιμή της θερμοχωρητικότητας, τόσο μεγαλύτερα είναι τα ποσά ενέργειας που χρειάζονται για να αυξηθεί η θερμοκρασία του υλικού. Αντίστοιχα, σε υλικά με μεγάλη θερμοχωρητικότητα, η αφαίρεση ενέργειας δεν προκαλεί την άμεση πτώση της θερμοκρασίας τους και τον άμεσο δροσισμό του υλικού (Oke, 1995, σ. 28).

Το υλικό με τη μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα είναι το νερό (1160 Wh/m^3K), ενώ τα υλικά με τις μικρότερες τιμές θερμοχωρητικότητας είναι τα θερμομονωτικά υλικά. Τα μέταλλα, παρόλο που χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλες τιμές πυκνότητας, έχουν πολύ μικρές τιμές ειδικής θερμότητας, με αποτέλεσμα οι τιμές της θερμοχωρητικότητάς τους να είναι συγκρίσιμες με εκείνες των κοινών οικοδομικών υλικών.

5.3.5 Θερμική διάχυση, κ

Η θερμική διάχυση (*transmissivity*) ορίζεται ως η ικανότητα ενός υλικού να άγει θερμότητα σε σχέση με την ικανότητά του να αποθηκεύει θερμότητα (Santamouris & Asimakopoulos, 1996, σ. 22). Η μονάδα μέτρησης της θερμικής διάχυσης είναι τα m^2/h ή $m^2/s.10^{-6}$. Η θερμική διάχυση ορίζεται από τη σχέση:

$$\kappa = \frac{\lambda}{p \times c} \tag{5.12}$$

όπου:

κ : η θερμική διάχυση, σε m2/h ή m2/s.10^{-6}

λ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, σε W/m.K

ρ : η πυκνότητα, σε kg/m^3

c : η ειδική θερμότητα (ή ειδική θερμοχωρητικότητα), σε Wh/kg.K

Η θερμική διάχυση ενός υλικού χαρακτηρίζει ουσιαστικά την ικανότητά του να διαχέει θερμικές επιδράσεις. Με άλλα λόγια, η διάχυση καθορίζει την ταχύτητα με την οποία τα «κύματα θερμοκρασίας» κινούνται και «απλώνονται», καθώς και το βάθος της μάζας στο οποίο φτάνει μια θερμική επίδραση (Oke, 1995, σ. 43). Μεγάλες τιμές διάχυσης ισοδυναμούν με γρήγορη διάχυση της θερμότητας στη μάζα ενός υλικού (Givoni, 1998, σ. 117), ενώ μικρές τιμές χαρακτηρίζουν υλικά με αργή απόκριση στις αλλαγές θερμοκρασίας (Santamouris & Asimakopoulos, 1996, σ. 22). Η θερμική διάχυση αποτελεί κατά βάση θεωρητική έννοια, η οποία χαρακτηρίζει τη θερμική συμπεριφορά των υλικών και χρησιμοποιείται σε προβλήματα μετάδοσης θερμότητας σε μη μόνιμη κατάσταση (δυναμικές συνθήκες) (Givoni, 1998, σ. 118).

Στα υλικά με μεγάλες τιμές θερμικής διάχυσης, οι αλλαγές στην επιφανειακή θερμοκρασία κατανέμονται σε ένα παχύ στρώμα υλικού. Έτσι, για την ίδια προσθήκη θερμότητας, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν λιγότερο ακραίες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις σε σχέση με υλικά με μειωμένη διάχυση (Oke, 1995, σ. 45). Αντίθετα, στα υλικά με μικρές διαχυτότητες οι διαδικασίες ανταλλαγής θερμότητας συγκεντρώνονται σε ένα λεπτό στρώμα κοντά στην επιφάνεια του υλικού, με αποτέλεσμα οι ημερήσιες διακυμάνσεις των επιφανειακών θερμοκρασιών τους να είναι έντονες (Στο ίδιο). Με λίγα λόγια, όταν η θερμότητα δεν εισχωρεί στη μάζα ενός υλικού (χαμηλή διάχυση), αποβάλλεται ταχύτατα με την αλλαγή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ενώ όταν εισχωρεί στα βαθύτερα στρώματα του υλικού, χρειάζεται πολλαπλάσιος χρόνος για την αποβολή της (υψηλή διάχυση).

Η επίδραση της διαχυτότητας μπορεί να γίνει κατανοητή από το παρακάτω πρακτικό παράδειγμα. Έστω ότι εξετάζεται η συμπεριφορά δύο πλακιδίων, ενός από σκυρόδεμα (0,983 $m^2/sec\ 10^{-6}$) κι ενός από ξύλο (0,141 $m^2/sec\ 10^{-6}$), που τοποθετούνται σε οριζόντια θέση ένα καλοκαιρινό μεσημέρι. Τα πλακίδια έχουν ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις (μήκος, πλάτος, πάχος) και βάφονται με ακριβώς το ίδιο χρώμα, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι έχουν τον ίδιο συντελεστή ανακλαστικότητας (και απορροφητικότητας). Αν, έπειτα από κάποια ώρα, μετρηθούν οι θερμοκρασίες που θα έχουν αναπτυχθεί στην επιφάνειά τους, θα διαπιστωθεί ότι το πλακίδιο από σκυρόδεμα θα είναι ψυχρότερο από το ξύλινο. Ωστόσο, όταν πάψει η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, το ξύλινο πλακίδιο θα κρυώσει πολύ γρηγορότερα.

5.3.6 Θερμική επίχυση, μ

Η θερμική επίχυση (*admittance*) καθορίζει την ευκολία ή τη δυσκολία, με την οποία η επιφάνεια ενός υλικού δέχεται ή αποβάλλει θερμότητα (Oke, 1995, σ. 46). Η μονάδα μέτρησης της θερμικής επίχυσης είναι $Wh^{1/2}/m^2K$ και ορίζεται από τη σχέση (Oke, 1995, σ. 46):

$$\mu = \sqrt{\lambda} \times p \times c \tag{5.13}$$

όπου:

μ : η θερμική επίχυση σε $Wh^{1/2}/m^2.K$

k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, σε W/m.K

p : η πυκνότητα, σε kg/m^3

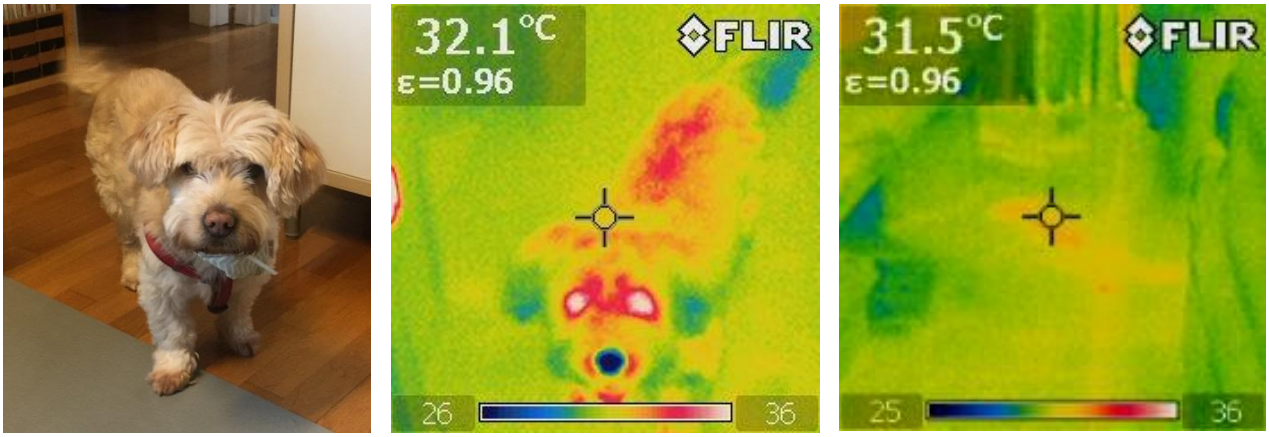
c : η ειδική θερμότητα (ή ειδική θερμοχωρητικότητα), σε Wh/kg.K

Τα υλικά που έχουν υψηλές τιμές θερμικής επίχυσης, όπως για παράδειγμα οι φυσικοί και τεχνητοί λίθοι, απορροφούν θερμότητα με αργό ρυθμό και, για τον λόγο αυτό, η επιφανειακή τους θερμοκρασία αυξάνεται αργά. Ακόμα υψηλότερες είναι οι τιμές θερμικής επίχυσης των μετάλλων. Αντίθετα, τα υλικά που έχουν χαμηλές τιμές θερμικής επίχυσης, όπως τα μονωτικά υλικά, θερμαίνονται γρηγορότερα επιφανειακά και ψύχονται εξίσου γρήγορα (Givoni, 1969, σ. 116). Χαμηλές θεωρούνται και οι τιμές θερμικής επίχυσης των προϊόντων φυσικής και τεχνητής ξυλείας.

Στο μέγεθος της θερμικής επίχυσης οφείλεται η αίσθηση που έχει κανείς όταν αγγίζει διαφορετικά υλικά, τα οποία έχουν την ίδια επιφανειακή θερμοκρασία. Έτσι, τα υλικά που έχουν αυξημένες τιμές θερμικής επίχυσης (π.χ. τα μέταλλα) φαίνονται, ανάλογα με τη θερμοκρασία τους σε σχέση με τη θερμοκρασία του δέρματος, ψυχρότερα ή θερμότερα στο άγγιγμα σε σχέση με τα υλικά που έχουν μειωμένες τιμές (π.χ. το ξύλο) (Oke, 1995, σ. 46).

Η επίδραση της θερμικής επίχυσης μπορεί να γίνει κατανοητή από το παρακάτω πρακτικό παράδειγμα. Έστω ότι τα γυμνά πέλματα των ποδιών ενός ατόμου πατάνε σε διαφορετικά δάπεδα, το ένα σε κεραμικά πλακίδια (π.χ. του διαδρόμου) και το άλλο σε ξύλινο δάπεδο (π.χ. του υπνοδωματίου) μιας κατοικίας. Και έστω ότι οι συνθήκες είναι τέτοιες (ίδια θερμοκρασία αέρα των δύο χώρων και ίδια ροή θερμότητας διαμέσου του δαπέδου) που και οι δύο επιφάνειες έχουν την ίδια θερμοκρασία. Ωστόσο, η αίσθηση στο κάθε γυμνό πέλμα θα είναι διαφορετική, με την επιφάνεια των κεραμικών πλακιδίων να αξιολογείται ως ψυχρότερη. Ο λόγος είναι ότι, εξαιτίας της υψηλότερης θερμικής τους επίχυσης, τα κεραμικά πλακίδια θα απορροφήσουν με αργό ρυθμό θερμότητα από το πέλμα, κατανέμοντάς τη στο σύνολο της μάζας τους και, άρα, η επιφάνειά τους θα αργήσει να θερμανθεί, ενώ το ξύλινο δάπεδο θα απορροφήσει γρήγορα θερμότητα και, μη έχοντας τη δυνατότητα να την αποθηκεύσει στη μάζα του, θα αυξήσει γρήγορα την επιφανειακή του θερμοκρασία.

Εξαιτίας των παραπάνω, η θερμική επίχυση έχει σχέση και με την αίσθηση θερμικής άνεσης, καθώς αφορά τη θέρμανση ή τον δροσισμό του ανθρώπινου σώματος, μέσω της επαφής του γυμνού ποδιού με το δάπεδο, γι' αυτό και αναφέρεται από τον Fanger (1973, σ. 102) με τον όρο συντελεστής επαφής (contact coefficient) (βλ. Κεφ. 4, παρ. 4.2.3).



Εικόνα 5.14 *Υπέρυθρη φωτογραφία (θερμογράφημα) ξαπλωμένου σκύλου (μέσον) και το αποτύπωμά του στο ξύλινο πάτωμα (δεξιά) που ορίζεται από τη θερμή ζώνη. 28/10 @12:15μμ. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*

5.4 Θερμική συμπεριφορά δομικών στοιχείων

Τα δομικά στοιχεία ενός κτιρίου, και ειδικά εκείνα του εξωτερικού κελύφους –οι εξωτερικές τοιχοποιίες, τα κουφώματα, το κατώτατο δάπεδο και οι οροφές– φιλτράρουν τις εξωτερικές συνθήκες και «συνδιαλέγονται» θερμικά με το εξωτερικό περιβάλλον. Η θερμική συμπεριφορά του κελύφους, λοιπόν, εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των θερμοφυσικών χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων, των ιδιοτήτων των υλικών που το απαρτίζουν, των κλιματικών συνθηκών, του προσανατολισμού και της χρήσης του κτιρίου. Ακόμα σχετίζεται άμεσα με τις στρατηγικές θέρμανσης και δροσισμού που καθορίζονται από τον βιοκλιματικό σχεδιασμό του κτιρίου. Συνήθως, τα κτίρια απαρτίζονται από συμπαγή και διάφανα στοιχεία (υαλοπίνακες), τα οποία έχουν τελείως διαφορετική θερμική συμπεριφορά, η οποία βελτιώνεται με τη χρήση κατάλληλων επιστρώσεων που βελτιστοποιούν τις θερμικές τους επιδόσεις. Στις μέρες μας, η τεχνογνωσία και η τεχνολογία των δομικών υλικών εξελίσσονται με ταχείς ρυθμούς έχοντας ως αποτέλεσμα τη μεγάλη ποικιλία υλικών, παραδοσιακών και εξελιγμένων, φυσικών και συνθετικών, τα οποία δίνουν πολλές δυνατότητες στον σχεδιαστή. Για τον λόγο αυτόν, η γνώση και η ανάπτυξη των κατάλληλων κριτηρίων επιλογής είναι πολύ σημαντικές.

Για τα αδιαφανή τμήματα του κελύφους, η προσπίπτουσα ακτινοβολία κατά ένα ποσοστό θα απορροφηθεί και κατά ένα ποσοστό θα ανακλαστεί. Επειδή η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία έχει μεγάλη σημασία για τον βιοκλιματικό σχεδιασμό, στη συνέχεια αναλύεται η συμπεριφορά των αδιαφανών τμημάτων του κελύφους στην ακτινοβολία. Το τμήμα της ακτινοβολίας που θα απορροφηθεί θα διοχετευθεί προς το εσωτερικό του κελύφους με ταχύτητα (ρυθμό) που εξαρτάται από τον συντελεστή θερμοπερατότητας (K / U-value) και τη θερμοχωρητικότητά του. Ταυτόχρονα, το κέλυφος που έχει θερμανθεί εκπέμπει μεγάλου μήκους κύματος (θερμική) ακτινοβολία προς το περιβάλλον του (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 67).

5.4.1 Θερμομόνωση κελύφους

Το κέλυφος των κτιρίων αποτελείται από υλικά μέσω των οποίων υπάρχει ροή θερμότητας από την περιοχή με την υψηλότερη θερμοκρασία προς την περιοχή με τη χαμηλότερη. Η ταχύτητα αυτής της ροής εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας στις επιφάνειες του κελύφους (εξωτερική και εσωτερική) και επιβραδύνεται ανάλογα με τις θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών που το απαρτίζουν, δηλαδή την πυκνότητα, τη θερμική αγωγιμότητα και τη θερμοχωρητικότητα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 61-62).

Αυτή η επιβράδυνση αποτελεί τη θερμομονωτική ικανότητα ή θερμική αντίσταση του κελύφους. Τα συνήθη υλικά του κελύφους δεν έχουν την απαιτούμενη θερμομονωτική ικανότητα. Γι' αυτό χρησιμοποιούνται πρόσθετα υλικά με μεγάλη θερμική αντίσταση, δηλαδή θερμομονωτική ικανότητα, τα θερμομονωτικά υλικά, τα οποία τοποθετούνται σε στρώσεις. Η θερμομονωτική ικανότητα των υλικών οφείλεται στην ιδιότητά τους να κρατούν ακινητοποιημένο ξηρό αέρα σε θύλακες στη μάζα τους. Ο ξηρός αέρας αποτελεί το καλύτερο μονωτικό υλικό, αρκεί να παραμένει ακινητοποιημένος. Τα συνήθη θερμομονωτικά υλικά είναι πορώδη. Με αυτόν τον τρόπο, κρατούν στους πόρους τους ακίνητο τον αέρα και χάνουν τη μονωτική τους ικανότητα αν γεμίσουν οι πόροι τους με νερό (η μονωτική ικανότητα του αέρα είναι εικοσαπλάσια εκείνης του νερού) (Στο ίδιο). Συνήθως, τα θερμονονωτικά υλικά που βασίζονται στον αέρα δεν μπορούν να ξεπεράσουν τη θερμική αντίστασή του (R value). Όμως, στα αφρώδη πλαστικά υλικά (όπως η πολυουρεθάνη και η πολυστερίνη) χρησιμοποιείται ως αφροποιητικός παράγοντας (*foaming agent*) το βουτάνιο ή το πεντάνιο, που είναι βαρύτερα του αέρα και, έτσι, παρέχουν ακόμη μεγαλύτερο μέτρο αντίστασης.

Η θερμομόνωση αυξάνει την προβαλλόμενη αντίσταση των δομικών στοιχείων των κτιρίων, δηλαδή περιορίζει στο ελάχιστο τις ανταλλαγές θερμότητας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στη σταθερότερη εσωτερική θερμοκρασία των χώρων. Με τη σωστή θερμομόνωση επιτυγχάνονται:

- διατήρηση υψηλών εσωτερικών επιφανειακών θερμοκρασιών τον χειμώνα,
- προστασία των δομικών στοιχείων του κελύφους από τις έντονες θερμικές καταπονήσεις,
- αποφυγή και μείωση σχηματισμού εσωτερικών συμπυκνώσεων λόγω διάχυσης των υδρατμών μέσω των δομικών στοιχείων των κατασκευών και
- εκμετάλλευση της θερμοχωρητικότητας των υλικών.

Η θερμική θωράκιση του κελύφους των κτιρίων αποτελεί σημαντικό κεφάλαιο στη βελτίωση της θερμικής και ενεργειακής συμπεριφοράς τους και παρέχει μεγάλες δυνατότητες για εξοικονόμηση της απαιτούμενης ενέργειας λειτουργίας, η οποία μπορεί να υπερβεί το 40%, ενώ το κόστος των θερμομονωτικών υλικών καλύπτει μόλις το 2-4% του συνολικού κόστους κατασκευής. Με την εφαρμογή της κατάλληλης θερμομόνωσης στις κτιριακές κατασκευές μειώνονται οι απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη και, κατά συνέπεια, οι εκπομπές αέριων ρύπων. Έτσι, εξασφαλίζεται η μείωση των δυσμενών επιπτώσεων στο περιβάλλον, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται με οικονομικότερο τρόπο η θερμική άνεση των χρηστών.

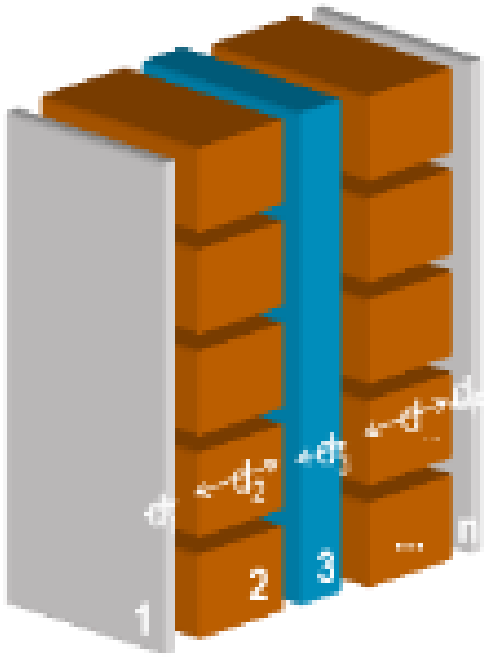
Βασικό κριτήριο για τη θερμική συμπεριφορά ενός δομικού στοιχείου (τοίχου, οροφής, στέγης κ.λπ.) είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας (K ή U-value), που ορίζεται ως η ποσότητα της θερμότητας σε βατώρες, η οποία διέρχεται σε 1 ώρα μέσα από επιφάνεια 1 m^2 της κατασκευής, όταν η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα, που βρίσκεται στη μια και στην άλλη πλευρά της κατασκευής, είναι ένας βαθμός Κέλβιν και το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση (Εικόνα 5.15). Μετριέται σε $W/m^2.K$. Ο υπολογισμός της γίνεται με βάση το αντίστροφό της, δηλαδή την αντίσταση θερμοπερατότητας (1/K) (ΤΟΤΕΕ 20701-2). Ουσιαστικά, η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας εκφράζει το μέτρο της ροής θερμότητας διαμέσου των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους, τα οποία συνήθως απαρτίζονται από περισσότερα από ένα

υλικά. Θα μπορούσαμε με άλλα λόγια να πούμε ότι εκφράζει την αντίσταση του δομικού στοιχείου στη ροή της θερμότητας από το ένα άκρο του στο άλλο.

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_\alpha} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \cdots + \frac{d_\nu}{\lambda_\nu} + \frac{1}{\alpha_i} \tag{5.14}$$

όπου:

K	:	ο συντελεστής θερμοπερατότητας σε W/m2K
α_α	:	ο συντελεστής θερμικής μεταβίβασης του αέρα εξωτερικά, σε W/m^{2}K
α_i	:	ο συντελεστής θερμικής μεταβίβασης του αέρα εσωτερικά, σε W/m^{2}K
d	:	το πάχος κάθε μεμονωμένης στρώσης, σε m
λ	:	ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, σε W/m.K



Εικόνα 5.15 *Συντελεστής θερμοπερατότητας (K, U-value). Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Ο συντελεστής θερμικής μεταβίβασης του αέρα είναι η ποσότητα της θερμότητας σε βατώρες, η οποία μεταβιβάζεται σε 1 ώρα μεταξύ στοιχείου της κατασκευής που έχει επιφάνεια 1 m^2 και του αέρα, ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με αυτό, όταν μεταξύ τους υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας ενός βαθμού Κέλβιν και το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση (*steady state*). Μετριέται σε W/m^2.K και διαφέρει ανάλογα με τη διεύθυνση και τη φορά ροής της θερμότητας. Σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ, οι τιμές που λαμβάνει περιλαμβάνονται στους Πίνακες 2.α και 2.β της ΤΟΤΕΕ 20701-2.

Η διαφορά στη θερμοπερατότητα δύο όμοιων δομικών στοιχείων (που απαρτίζονται από τις ίδιες ακριβώς στρώσεις και πάχη υλικών) καθορίζεται από τη θερμομονωτική στρώση και το πάχος της. Το πάχος των θερμομονωτικών υλικών που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα κτίριο είναι αντικείμενο της Μελέτης Ενεργειακής Απόδοσης του Κτιρίου (πρώην Μελέτη Θερμομόνωσης με βάση τον προϋφιστάμενο Κανονισμό Θερμομόνωσης). Στα κτίρια χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμόζεται αυστηρά ο Κανονισμός, με αύξηση του ελάχιστου απαιτούμενου πάχους του θερμομονωτικού, για περαιτέρω μείωση των θερμικών απωλειών. Το επιπλέον κόστος του υλικού θερμομόνωσης αποσβένεται γρήγορα από την εξοικονόμηση

ενέργειας που αυτό συνεπάγεται. Ειδική φροντίδα πρέπει να καταβάλλεται για την αποφυγή θερμογεφυρών και τη σωστή εφαρμογή (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 62).

5.4.2 Θερμομονωτικά υλικά

Η έρευνα, παραγωγή και εφαρμογές των θερμομονωτικών υλικών εξελίσσονται συνεχώς. Σήμερα υπάρχει μεγάλη ποικιλία υλικών που διαφέρουν στη μορφή και στις ιδιότητές τους. Συνήθως, κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- Ανόργανα
- φυσικά (διογκωμένη άργιλος, διογκωμένος περλίτης, διογκωμένος βερμικουλίτης, κίσσηρη/ελαφρόπετρα),
- ινώδη (υαλοβάμβακας, πετροβάμβακας, ορυκτοβάμβακας),
- κυψελωτής δομής (κυψελωτό γυαλί, αφρώδες γυαλί κ.ά.).
    - Οργανικά
- φυσικά (ξυλόμαλλο, φελλός, κυτταρινικές πλάκες, λινάρι, βαμβάκι, μαλλί προβάτου, αχυρόμπαλες και πλάκες πεπιεσμένου άχυρου, φύκια, kenaf κ.ά.),
- συνθετικά (διογκωμένη πολυστερίνη – EPS, εξηλασμένη πολυστερίνη – XPS, πολυουρεθάνη χυτή ή σε πλάκες, φαινολικός αφρός κ.ά.).
    - Βαριά θερμομονωτικά υλικά (κισσηροδέματα, επιχρίσματα περλίτη, θερμομονωτικά τούβλα, ελαφροβαρείς τσιμεντόλιθοι, κισσηρόλιθοι, ελαφρομπετόν, κυψελωτά σκυροδέματα κ.ά.),
    - Θερμομονωτικά προηγμένης τεχνολογίας (aerogel, nanocellular foam, διαφανή συστήματα θερμομόνωσης TIT/TWD, με υλικά αλλαγής φάσης Switchable Thermal Insulation, πάνελ μόνωσης κενού VIP και αερίου).



Εικόνα 5.16 *Θερμομόνωση κελύφους. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Η. Ζαχαρόπουλος).*

Τα θερμομονωτικά υλικά (Εικόνα 5.16) χαρακτηρίζονται από μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) και αντίστοιχα μεγάλο συντελεστή αντίστασης θερμοδιαφυγής (R) και η επιλογή τους για την εφαρμογή σε επιφάνειες του κτιριακού κελύφους καθορίζεται από τις ιδιότητές τους και τη συμβατότητά τους με τα υπόλοιπα υλικά της δομής ή τα δομικά στοιχεία της κατασκευής. Οι ιδιότητες που αξιολογούνται, ανάλογα με τη θέση εφαρμογής τους στο κτιριακό κέλυφος, είναι οι παρακάτω:

- Υψηλές θερμομονωτικές ιδιότητες:
    - Πυκνότητα (ρ)
    - Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ)
    - Επίδραση της θερμότητας
    - Ειδική θερμοχωρητικότητα (c)
- Συμπεριφορά έναντι διαφορετικών επιδράσεων:
    - Ικανότητα διαχείρισης της υγρασίας
    - Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας
    - Ηχομονωτική ικανότητα
    - Χημική συμπεριφορά
    - Απώλεια οσμών
    - Αντίσταση στη φωτιά
    - Προσβολή από έντομα και τρωκτικά
- Κατασκευαστικές παράμετροι:
    - Μορφή
    - Μηχανική αντοχή
    - Συμβατότητα με άλλα υλικά και κατασκευαστικές απαιτήσεις
    - Μεταβολή των διαστάσεων
    - Μέτρο θερμικής σταθερότητας
    - Σταθερότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής
    - Οικονομικότητα (κόστος υλικού και κατασκευής)

Ακόμα αξιολογούνται και οι περιβαλλοντικές ιδιότητες, δηλαδή:

- Κύκλος ζωής
- Εμπεριεχόμενη ενέργεια
- Περιεκτικότητα σε φυσικά υλικά
- Τρόπος παραγωγής
- Επίδραση στην υγιεινή των χώρων (πιθανή επιβάρυνση της υγείας των τεχνικών εφαρμογής και των ενοίκων)
- Ανακύκλωση και βιοδιάσπαση

Θερμομονωτικά υλικά	Πυκνότητα, ρ, kg/m³	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, λ, W/(m.K)	Μηχανικές αντοχές	Οικολογικές ιδιότητες / Υγιεινή	Ανακύκλωση / Βιοδιάσπαση
Ορυκτοβάμβακας			•	••	•••
Κυψελωτό γυαλί	115-220	0,040-0,060	••••	••	••
Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)	15-30	0,035-0,040	••	•••	•••
Εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS)	25-45	0,030-0,040	•••	••	•
Πολυουρεθάνη (PUR)	30-100	0,024-0,030	•••	••	••
Ξυλόμαλλο	350-600	0,09	••	•••	•
Φελλός	100-220	0,045-0,060	••	•	•••
Ίνες κυτταρίνης	30,8	0,040-0,045	–	•••	•••
Λινάρι	20-80	0,037-0,045	–	••	••
Βαμβάκι	20-60	0,04	–	••	•
Μαλλί προβάτου	25-30	0,040-0,045	–	•	•••
Διογκωμένος περλίτης	90-490	0,045-0,070	••	•••	•••
Θερμομονωτικό τούβλο	500-750	0,080-0,140			

Πίνακας 5.1 *Κυριότερα θερμομονωτικά υλικά και οι ιδιότητές τους. Πηγή: Ίδια επεξεργασία (Ε. Αλεξάνδρου) από διάφορους ερευνητές.*

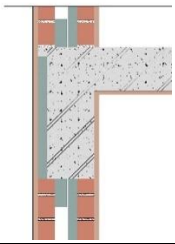
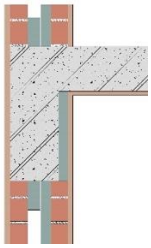
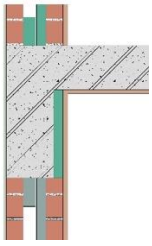
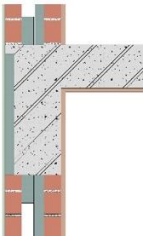
Η σωστή θερμομόνωση του κτιριακού κελύφους είναι σημαντική μιας και αυτό δέχεται τις σημαντικότερες καταπονήσεις των κλιματικών παραγόντων. Για να επιτευχθεί, όμως, πρέπει να ικανοποιούνται μια σειρά από συνθήκες, που αφορούν την επιλογή των υλικών, τον τρόπο δόμησης, την ανταπόκριση στις συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες και, βέβαια, τη σωστή εφαρμογή όλων των προδιαγραφών των υλικών, καθώς και την άρτια εκτέλεση των εργασιών της κατασκευής. Η εφαρμογή του επιλεγμένου τρόπου δόμησης πρέπει να γίνεται με τέτοιον τρόπο, ώστε να ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 62):

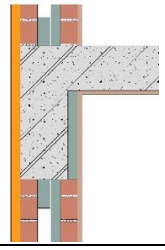
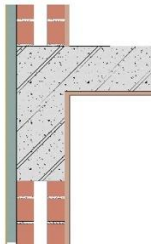
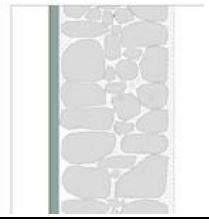
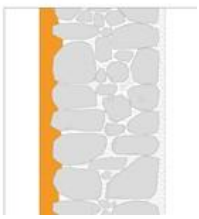
- Η θερμομόνωση να είναι προστατευμένη από την υγρασία (νερό βροχής ή/και υδρατμούς) για την αποφυγή της απορρόφησής της που οδηγεί στη μείωση της θερμικής αντίστασης των υλικών.
- Τα υλικά να είναι συμβατά μεταξύ τους και να τοποθετούνται με τη σωστή σειρά.
- Να αποφεύγονται οι θερμογέφυρες.
- Να εξασφαλίζεται η μακροχρόνια καλή λειτουργία.
- Να γίνεται έλεγχος της θερμικής αδράνειας.

Η θερμική προστασία πρέπει να εφαρμόζεται σε όλα τα δομικά μέλη του κελύφους (τοιχοποιίες, φέροντα στοιχεία, δώματα, ξύλινες στέγες, οροφές υπόστυλων χώρων, δάπεδα επί πλακών εδάφους, υπόγεια κ.λπ.) και η τοποθέτηση των θερμομονωτικών υλικών να γίνεται σε στρώσεις. Η θερμική αντίσταση του κελύφους ενός κτιρίου δεν εξαρτάται από τη θέση που έχουν τα θερμομονωτικά υλικά στο πάχος του κελύφους του (εξίσωση 5.13). Η θέση του θερμομονωτικού υλικού δεν επηρεάζει τη θερμική του αντίσταση, επιδρά όμως σε χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την προστασία του μονωτικού υλικού από διάφορων ειδών καταπονήσεις, όπως η ύγρανσή του, η δημιουργία θερμογεφυρών, η θερμική αδράνεια του θερμομονωμένου στοιχείου, οι λειτουργικές απαιτήσεις και η αρχιτεκτονική έκφραση του κτιρίου.

Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι εφαρμογής θερμομονωτικής στρώσης σε εξωτερικές τοιχοποιίες είναι:

- Θερμομονωτική στρώση στην εξωτερική παρειά του κελύφους
- Θερμομονωτική στρώση στην εσωτερική παρειά του κελύφους
- Θερμομονωτική στρώση στον πυρήνα δικέλυφης τοιχοποιίας με ή χωρίς διάκενο αερισμού
- Χρήση θερμομονωτικών πλίνθων
- Θερμομόνωση με χρήση διαφανούς θερμομόνωσης (Transparent Insulation Materials – TIM, βλ. παρακάτω 5.4.3 & Κεφ. 9, παρ. 9.7.1)

			
α. Θερμομόνωση στον πυρήνα, συμβατική θερμομόνωση στα στοιχεία του φέροντος οργανισμού.	β. Θερμομόνωση στον πυρήνα, εσωτερική θερμομόνωση στα στοιχεία του φέροντος οργανισμού.	γ. Θερμομόνωση στον πυρήνα, εσωτερική θερμομόνωση στα στοιχεία του φέροντος οργανισμού, ανακλαστικό επίχρισμα εξωτερικά.	δ. Θερμομόνωση στον πυρήνα, εξωτερική θερμομόνωση στα στοιχεία του φέροντα οργανισμού, ανακλαστικό επίχρισμα εξωτερικά.

			
ε. Θερμομόνωση στον πυρήνα, εσωτερική θερμομόνωση στα στοιχεία του φέροντα οργανισμού, θερμομονωτικός σοβάς εξωτερικά.	ζ. Εξωτερική θερμομόνωση. Διπλή δρομική τοιχοποιία.	η. Εξωτερική θερμομόνωση. Μπατική τοιχοποιία.	
			
θ. Λιθοδομή με εξωτερική θερμομόνωση.	ι. Λιθοδομή με εσωτερική θερμομόνωση.	κ. Λιθοδομή με εξωτερικό θερμομονωτικό κονίαμα / θερμοσοβά.	

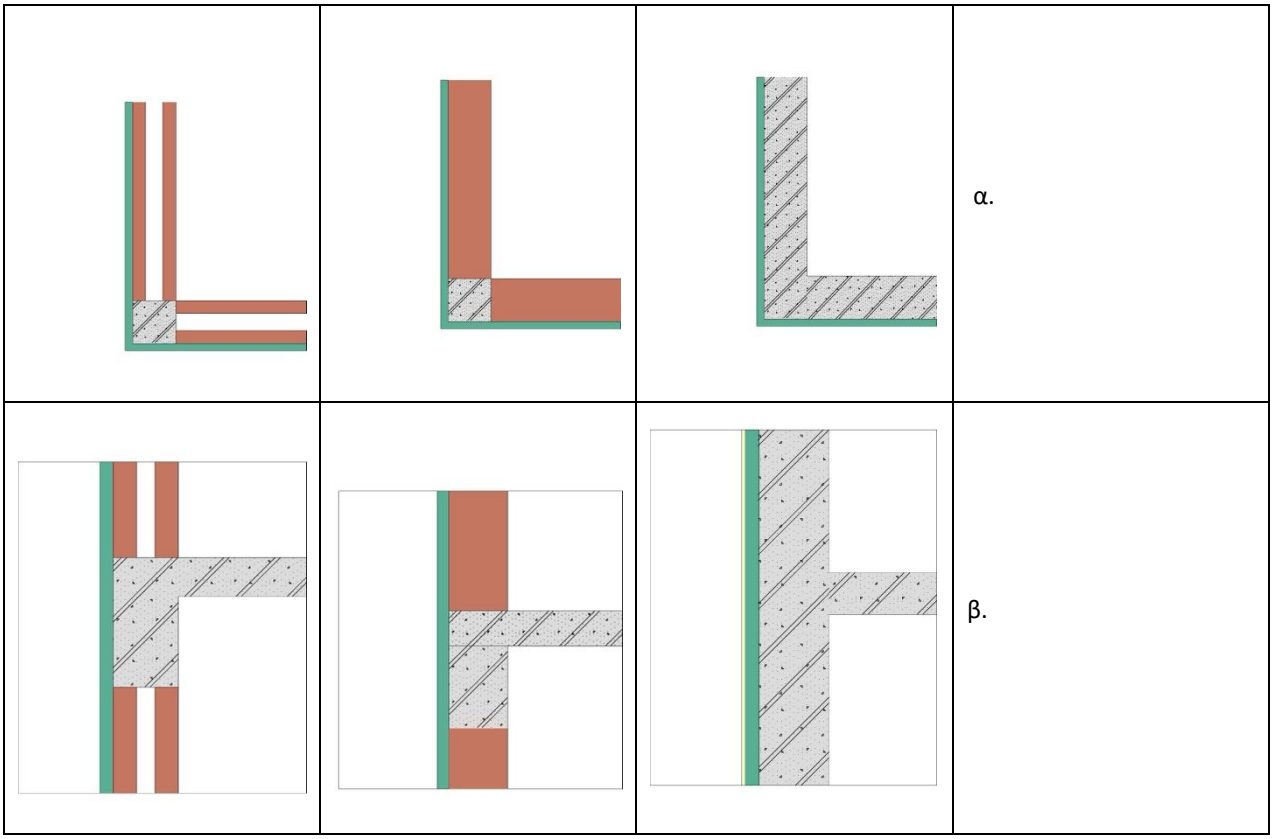
Εικόνα 5.17 *Διαφορετικές δυνατότητες εφαρμογής θερμομόνωσης και θερμομονωτικών επιχρισμάτων σε κατακόρυφες επιφάνειες —τοίχους υφιστάμενων ή/και νέων κατασκευών. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

5.4.3 Εφαρμογές θερμομόνωσης

Εξωτερική θερμομόνωση

Τα πλεονεκτήματα της εξωτερικής θερμομόνωσης είναι:

- Η θερμομόνωση είναι καθολική και έτσι περιορίζονται οι θερμογέφυρες και οι έντονες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις των δομικών στοιχείων του κελύφους.
- Αξιοποιείται η θερμοχωρητικότητα των δομικών στοιχείων (όταν αυτά έχουν την απαραίτητη μάζα) για τη θέρμανση του κτιρίου, κυρίως σε κτίρια συνεχούς χρήσης, στα οποία ζητείται η διατήρηση της θερμότητας.
- Ελαχιστοποιείται η πιθανότητα δημιουργίας συμπύκνωσης στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων λόγω διάχυσης των υδρατμών από το εσωτερικό προς το εξωτερικό.
- Δεν μειώνεται ο ωφέλιμος χώρος των κτιρίων.



Εικόνα 5.18 *Εσωτερική θερμομόνωση κελύφους. α. Εφαρμογή σε κάτοψη. β. Εφαρμογή σε τομή, ροή θερμότητας και βελτιώσεις. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

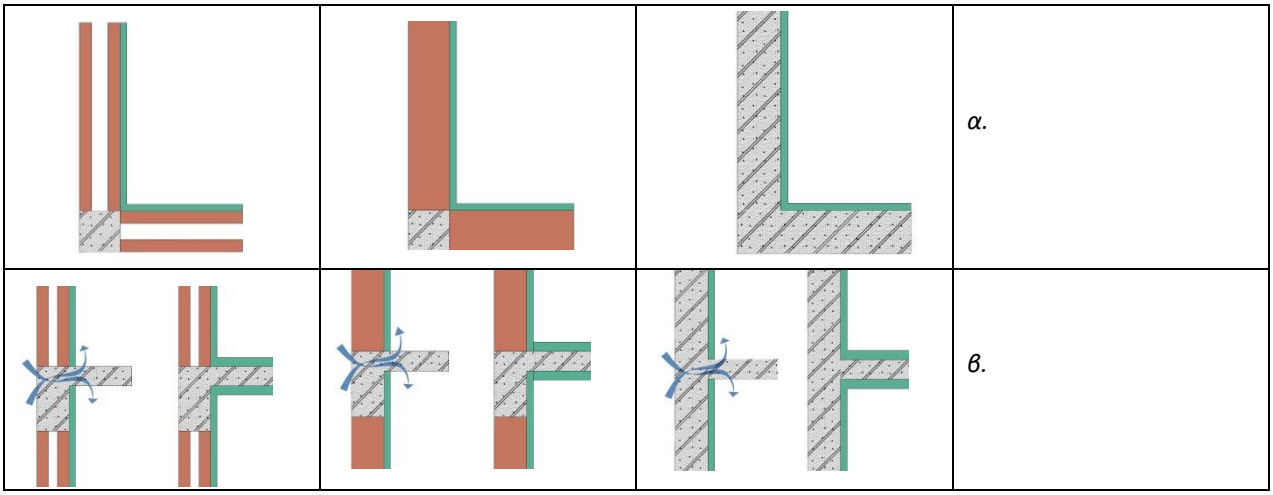
Μειονεκτήματα της εξωτερικής θερμομόνωσης:

- Το βασικότερο μειονέκτημα αυτής της κατασκευής είναι η μειωμένη αντοχή στις μηχανικές καταπονήσεις (χτυπήματα κ.λπ.) λόγω του ανεπαρκούς πάχους του επιχρίσματος. Επίσης, πρέπει όλα τα υλικά (κόλλες και στηρίγματα του θερμομονωτικού υλικού, θερμομονωτικό υλικό, πλέγματα και επιχρίσματα) που εφαρμόζονται να είναι συμβατά μεταξύ τους, αλλά και ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες. Η επιλογή των θερμομονωτικών υλικών για αυτές τις περιπτώσεις είναι περιορισμένη, μιας και πρέπει να έχουν αυξημένες μηχανικές ιδιότητες, αλλά και μειωμένη υδροαπορροφητικότητα. Συνήθως χρησιμοποιείται η διογκωμένη πολυστερίνη. Τέλος, τα επιχρίσματα ενισχύονται με πλέγματα κυρίως υαλοπλέγματα και είναι διαρκούς ελαστικότητας. Παράλληλα, είναι μη υδατοπερατά, ενώ επιτρέπουν τη διέλευση των υδρατμών από το εσωτερικό τους.
- Όσον αφορά τη θερμική συμπεριφορά, απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος για τη θέρμανση του κτιρίου.
- Υπάρχει δυσκολία στις διαμορφώσεις διακοσμητικών αρχιτεκτονικών στοιχείων στο κτίριο.
- Απαιτείται ιδιαίτερος χειρισμός στις περιοχές των κουφωμάτων για την αποφυγή θερμογεφυρών.
- Σε νέες κατασκευές, όπου ο φέροντας οργανισμός είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα, θέλει ιδιαίτερη προσοχή στον χειρισμό και τον σχεδιασμό των τοίχων πλήρωσης για να μην δημιουργούνται ανεπιθύμητες εσοχές και εξοχές των φερόντων στοιχείων στους εσωτερικούς χώρους.
- Δυσκολία στην εποπτεία των δομικών στοιχείων της κατασκευής.
- Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των υλικών του συστήματος, καθώς και στην εφαρμογή του.



Εικόνα 5.19 *Εξωτερική θερμομόνωση κελύφους, τοποθέτηση, φθορές και μηχανικές καταπονήσεις. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*

Εσωτερική θερμομόνωση



Εικόνα 5.20 *Εσωτερική θερμομόνωση κελύφους. α. Εφαρμογή σε κάτοψη. β. Εφαρμογή σε τομή, ροή θερμότητας και βελτιώσεις. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

Τα πλεονεκτήματα της εσωτερικής θερμομόνωσης είναι τα παρακάτω:

- Δεν υπάρχουν ιδιαίτεροι περιορισμοί στην επιλογή των θερμομονωτικών υλικών.
- Δεν απαιτείται ιδιαίτερη προστασία της θερμομόνωσης.
- Οι εσωτερικοί χώροι θερμαίνονται γρήγορα. Το σύστημα αυτό λειτουργεί καλύτερα σε χώρους που δεν είναι συνεχούς χρήσης (εξοχικές κατοικίες μικρής διάρκειας, σχολεία, θέατρα κ.λπ.).
- Η εφαρμογή είναι απλούστερη έναντι της εξωτερικής.

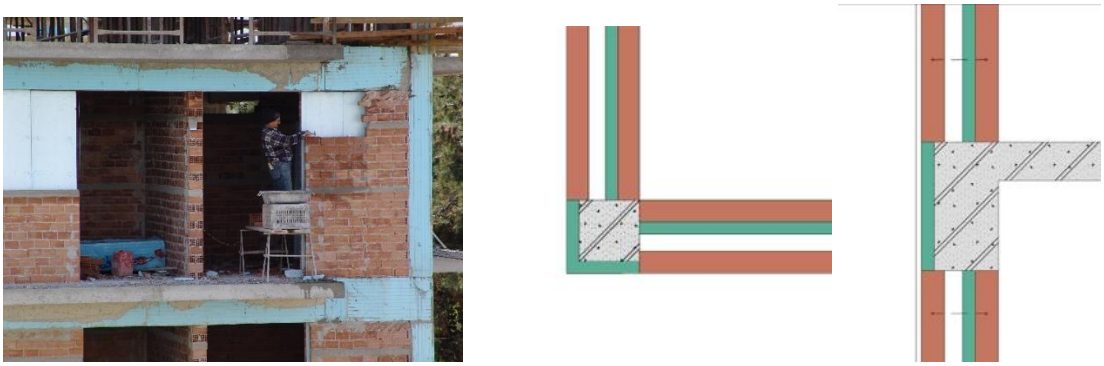
Μειονεκτήματα της εσωτερικής θερμομόνωσης:

- Τα δομικά στοιχεία του κελύφους μένουν εκτεθειμένα στις θερμοκρασιακές μεταβολές.
- Σε νέες κατασκευές, η θερμομόνωση χρειάζεται να επικαλυφθεί είτε με σύστημα ξηρής δόμησης είτε με δρομική οπτοπλινθοδομή, για τη διευκόλυνση των ηλεκτρολογικών κυρίως εγκαταστάσεων. Στην περίπτωση της δεύτερης τοιχοποιίας, αν η θερμομόνωση προσβληθεί από υγρασία, δεν απομακρύνεται εύκολα.
- Η θερμοχωρητικότητα του κελύφους δεν αξιοποιείται και, έτσι, ο χώρος θερμαίνεται και ψύχεται γρήγορα.
- Είναι πιο εύκολο να δημιουργηθούν θερμογέφυρες, κυρίως στα σημεία ένωσης των τοίχων με τις οριζόντιες πλάκες.
- Ευνοούνται οι συμπυκνώσεις λόγω διάχυσης των υδρατμών.

Θερμομόνωση στον πυρήνα δικέλυφης τοιχοποιίας με διάκενο

Τα πλεονεκτήματα της τοποθέτησης της θερμομόνωσης στον πυρήνα δικέλυφης τοιχοποιίας με διάκενο είναι τα ακόλουθα:

- Επιτρέπεται η διαπνοή του τοίχου και μειώνονται οι πιθανότητες δημιουργίας συμπυκνώσεων λόγω διάχυσης των υδρατμών.
- Αξιοποιείται η θερμοχωρητικότητα του κελύφους.
- Το σύστημα αυτό αποδίδει θερμικά εξίσου καλά και τον χειμώνα και το καλοκαίρι.



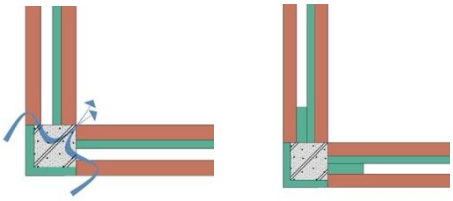
Εικόνα 5.21 *Θερμομόνωση στον πυρήνα δικέλυφης τοιχοποιίας με διάκενο κάτοψη και τομή. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο και Ιδία σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

Μειονεκτήματα της θερμομόνωσης στον πυρήνα δικέλυφης τοιχοποιίας με διάκενο:

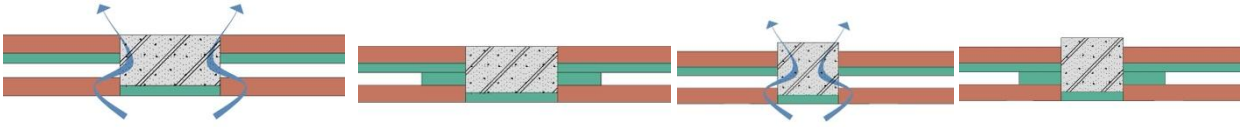
- Απαιτείται σύνδεση των τοιχοποιιών.
- Χρειάζεται ειδικός χειρισμός στις οριζόντιες ενισχυτικές ζώνες (σενάζ) για την αποφυγή θερμογεφυρών, καθώς και στα ανοίγματα των κουφωμάτων.
- Η διαφορετική θερμική συμπεριφορά των υλικών επιδρά στην αντοχή των εξωτερικών επιχρισμάτων.



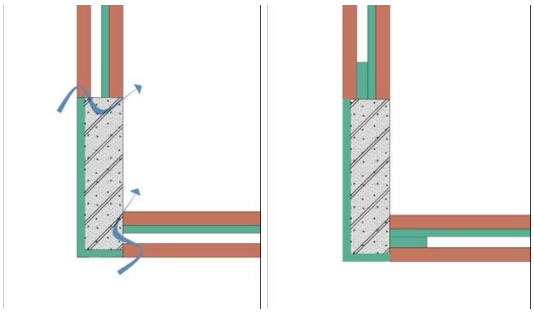
Εικόνα 5.22 *Θερμομόνωση στον πυρήνα δικέλυφης τοιχοποιίας με διάκενο. Επίδραση στην αντοχή των επιχρισμάτων. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*



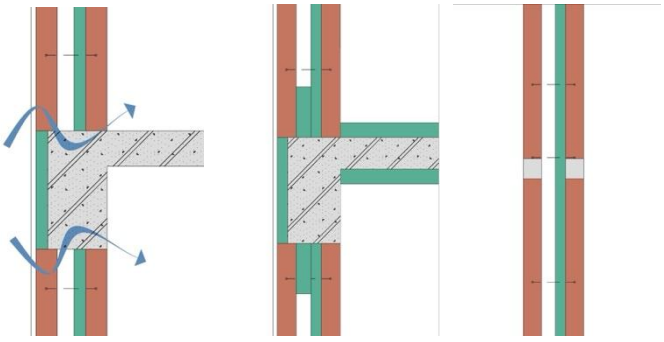
α. Γωνιακό υποστύλωμα κατόψη



β. Ενδιάμεσο υποστύλωμα κάτοψη

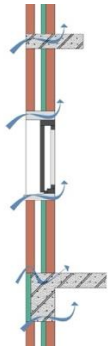


γ. Γωνιακό τοίχωμα κάτοψη



δ. Τομή

Εικόνα 5.23 *Θερμομόνωση στον πυρήνα δικέλυφης τοιχοποιίας με διάκενο. Συνήθεις θερμογέφυρες και αντιμετώπισή τους. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*



Εικόνα 5.24 *Θερμομόνωση στον πυρήνα δικέλυφης τοιχοποιίας με διάκενο. Συνήθεις θερμογέφυρες. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

Πέρα από τα παραπάνω, η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία στα στοιχεία του κελύφους όπου υπάρχουν διάκενα μπορεί να περιοριστεί και με τη χρήση υλικών χαμηλής εκπομπής. Έτσι, στο διάκενο του τοίχου ή σε οροφές και ψευδοροφές, είναι δυνατή η τοποθέτηση μεταλλικών φύλλων χαμηλής θερμικής εκπομπής (*radiant barriers*), με στόχο τη μείωση της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από αυτά προς την αμέσως επόμενη προς τα έξω, ψυχρότερη στρώση τους. Οι επιφάνειες αυτές πρακτικά λειτουργούν ως ανακλαστήρες θερμότητας και πρέπει να έχουν κάποια μικρή απόσταση από την επόμενη στρώση υλικού στην κατεύθυνση από την οποία προέρχεται η θερμική ακτινοβολία. Η θέση και το παρεμβαλλόμενο κενό εμπρός από αυτές τις επιφάνειες ακολουθούν τη λογική της μείωσης της εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας που εποχικά εκπέμπεται από αντίθετες κατευθύνσεις (έχει αντίθετη ροή). Η βελτίωση της θερμομονωτικής ικανότητας ενός σύνθετου τοίχου με στρώσεις θερμομονωτικών υλικών και ανακλαστικών μεμβρανών είναι σημαντική λόγω της χρήσης των ανακλαστικών μεμβρανών. Ο Szokolay (1980, σ. 299) αναφέρει ότι σε συνήθεις συνθήκες η χρήση κάθε ανακλαστικής μεμβράνης αντιστοιχεί με 10 χιλιοστά περίπου πάχος θερμομονωτικού υλικού, όπως ο υαλοβάμβακας (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 68).

Θερμομόνωση στον πυρήνα δικέλυφης τοιχοποιίας χωρίς διάκενο

Πλεονεκτήματα:

- Ευκολότερη τοποθέτηση των θερμομονωτικών πλακών.
- Αξιοποιείται η θερμοχωρητικότητα του κελύφους.
- Το σύστημα αυτό, αποδίδει θερμικά εξίσου καλά και τον χειμώνα και το καλοκαίρι.

Μειονεκτήματα:

- Απαιτείται σύνδεση των τοιχοποιιών.
- Δύσκολη απομάκρυνση της υγρασίας.

Χρήση θερμομονωτικών πλίνθων

Πλεονεκτήματα

- Ευκολία και ταχύτητα στην κατασκευή.
- Εκμετάλλευση της θερμοχωρητικότητας του κελύφους.
- Ελαχιστοποίηση θερμογεφυρών και πιθανοτήτων σχηματισμού συμπυκνώσεων.

Μειονεκτήματα

- Μικρά πάχη τοίχων και κατά συνέπεια μικρότερη θερμοχωρητικότητα.
- Ευκολότερη προσβολή από την υγρασία της βροχής που μειώνει τη θερμική προστασία.

Θερμομόνωση δωμάτων και στεγών

Η θερμομόνωση των δωμάτων χρειάζεται ιδιαίτερη επιμέλεια διότι αποτελούν τη λεγόμενη «πέμπτη όψη», η οποία είναι εκτεθειμένη στη βροχή και κυρίως στην έντονη ηλιακή ακτινοβολία κατά τη θερμή περίοδο. Τα δώματα σύμφωνα με τη θέση της θερμομονωτικής στρώσης και της κατασκευής τους διακρίνονται σε:

- μονοκέλυφα συμπαγή συμβατικά και ανεστραμμένα και
- δικέλυφα αεριζόμενα.

Ταυτόχρονα, τόσο στα δώματα όσο και στις στέγες, είναι πολύ σημαντική η διαχείριση θεμάτων υγρασίας και προστασίας της θερμομονωτικής στρώσης από αυτήν, προκειμένου να διασφαλιστεί η μακρόχρονη επίδοση του υλικού. Στις στέγες, η θέση της θερμομονωτικής στρώσης τις διαχωρίζει σε:

- θερμές, όταν τοποθετείται στις κεκλιμένες επιφάνειές της και
- ψυχρές, όταν τοποθετείται επάνω από την οριζόντια οροφή που απομονώνει τη στέγη από τον υποκείμενο χώρο.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, και ειδικά σε ξύλινες στέγες, η προστασία από υγρασίες και συμπυκνώματα είναι καθοριστική για τη διάρκεια ζωής των υλικών.

Προηγμένα θερμομονωτικά υλικά

Η χρήση προηγμένων θερμομονωτικών υλικών στη σύγχρονη κατασκευαστική πρακτική είναι ακόμη αρκετά περιορισμένη ειδικά στη χώρα μας, λόγω του υψηλού κόστους και, ίσως, της έλλειψης τεχνογνωσίας. Από αυτά αξίζει να γίνει αναφορά στο πυριτιούχο aerogel (ή διαφανή θερμομόνωση, βλ. και Κεφ. 9, παρ. 9.7.1), το οποίο είναι ένα διαφανές, στερεό, συνθετικό, πορώδες υλικό, με εξαιρετικές τιμές συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ = 0,015 W/m.K) και μεγάλη οπτική διαφάνεια. Μια από τις πιο χαρακτηριστικές εφαρμογές του είναι στην πλήρωση γυάλινων δομικών στοιχείων σχήματος U (u-glass) (Εικόνα 5.25), με στόχο την αισθητή βελτίωση της θερμικής τους συμπεριφοράς, με παράλληλη διατήρηση σημαντικού μέρους της οπτικής διαπερατότητάς τους. Τέλος, το υλικό έχει χρησιμοποιηθεί και ως αδρανές σε θερμομονωτικό σοβά για τη βελτίωση του συντελεστή θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων, χωρίς περαιτέρω εφαρμογή θερμομονωτικής στρώσης. Μια τέτοια χρήση μπορεί να βρει ευρύτατες εφαρμογές σε θερμικές αναβαθμίσεις ιστορικών και διατηρητέων κτιρίων, όπως το παράδειγμα του κτιρίου Mariahilferstrasse 182, στη Βιέννη, Αυστρία (Krempl, 2019).

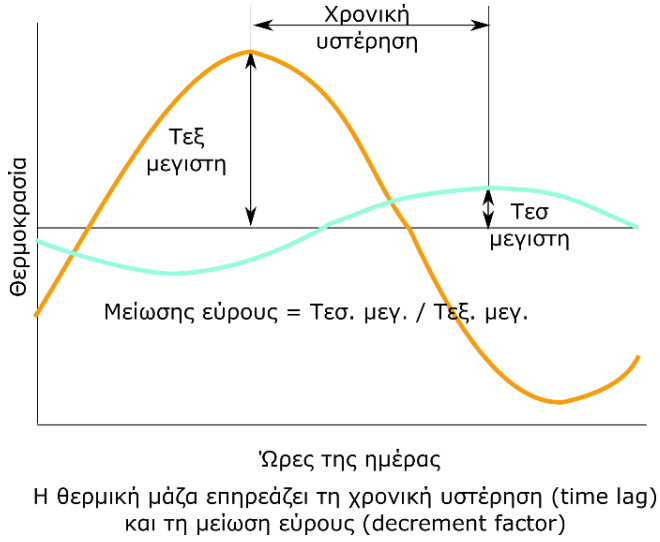
α.  β. 

Εικόνα 5.25 *Εφαρμογή στοιχείων τύπου u glass στο κέλυφος κτιρίων. Πηγή: Ellenrieder-Gymnasium Sporthalle by PROGRAM4FUN, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 & Reglit by Andy Matthews via Flickr, CC BY-NC-ND 2.0 Deed.*

5.4.4 Θερμοχωρητικότητα C – Θερμική αδράνεια κελύφους

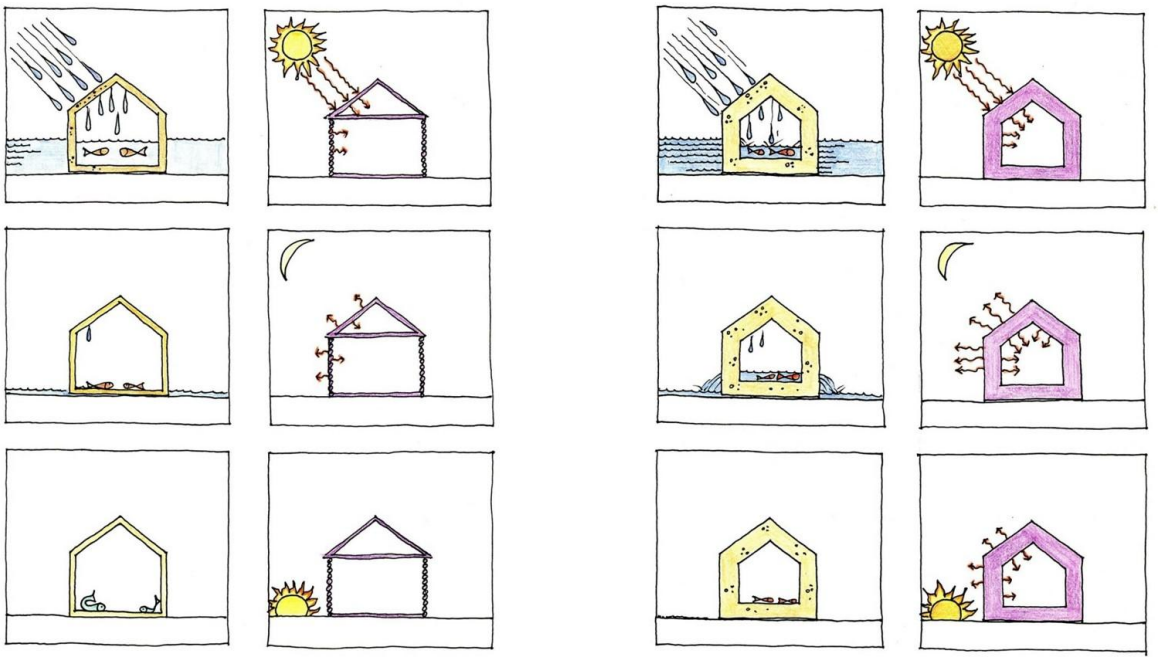
Θερμοχωρητικότητα ενός τοίχου ή γενικώς ενός υλικού καλείται η δυνατότητά του για αποθήκευση ενέργειας στη μάζα του. Η ιδιότητα αυτή εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα (specific heat capacity), την πυκνότητα και τη θερμική αγωγιμότητα του κάθε υλικού (βλ. παραπάνω παρ. 5.3.3 και 5.3.4). Βαριά υλικά όπως η πέτρα, η άργιλος (οπτόπλινθος, ωμόπλινθος) και το σκυρόδεμα, έχουν αυτές τις

ιδιότητες. Το μέτρο της θερμικής αγωγιμότητας δεν πρέπει να είναι πολύ υψηλό, αλλά μεσαίας τάξης, ενώ η πυκνότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα πρέπει να είναι υψηλές (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 63).



Εικόνα 5.26 *Επίδραση της θερμοχωρητικότητας στη διακύμανση των θερμοκρασιών. Πηγή: Μετάφραση στα ελληνικά από Thermal lag introduces time lag decrement factor by ©CLEAR, GFDL.*

Τα υλικά με μεγάλη **θερμοχωρητικότητα** χαρακτηρίζονται από τη λεγόμενη **θερμική αδράνεια**, δηλαδή τη **χρονική υστέρηση** με την οποία αντιδρούν στα εξωτερικά θερμικά ερεθίσματα. (Εικόνα 5.26) Πιο απλά, τα υλικά αυτά χρειάζονται μεγαλύτερο χρόνο για να θερμανθούν ή να ψυχθούν και, για τον λόγο αυτό, έχουν την ικανότητα να απορροφούν τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όταν αυτές παρουσιάζονται με μια περιοδικότητα –για παράδειγμα υψηλή θερμοκρασία την ημέρα και αισθητά χαμηλότερη τη νύχτα– και να συμβάλλουν στη σταθεροποίηση των εσωτερικών θερμοκρασιών. Όταν το εξωτερικό θερμικό ερέθισμα σταθεροποιείται, δηλαδή σταθερά υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες, τότε το δομικό στοιχείο θα αποκτήσει με την απαραίτητη χρονική υστέρηση τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και θα τη διατηρήσει σταθερή.

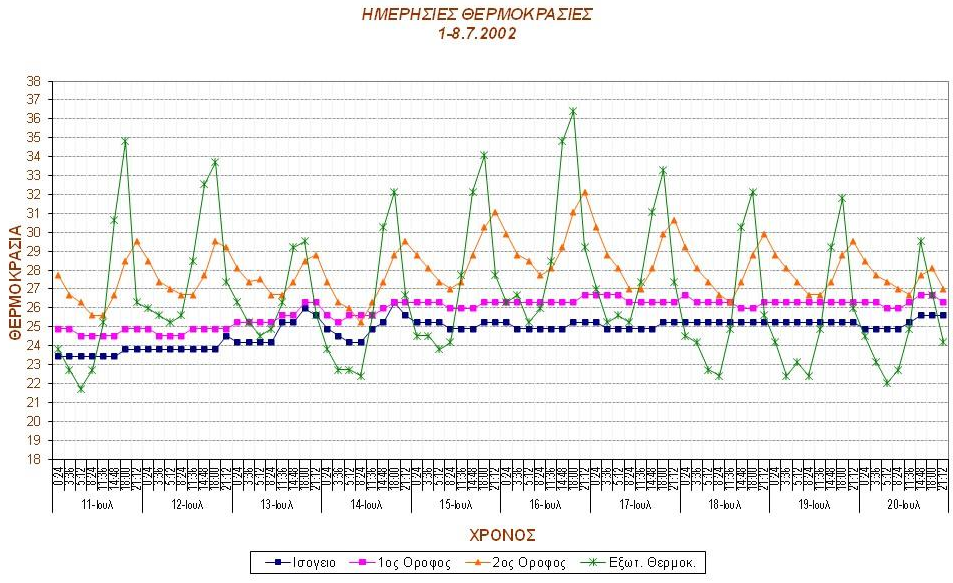


Εικόνα 5.27 *Συμπεριφορά του κελύφους. Ελαφρύ και βαρύ κέλυφος. Επίδραση της θερμοχωρητικότητας στη θερμική συμπεριφορά των κτιρίων. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Ευαγγελινός).*

Η θερμοχωρητικότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον βιοκλιματικό σχεδιασμό, γιατί χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της εισερχόμενης ενέργειας στα κτίρια και την απόδοσή της με κάποια καθυστέρηση στον χώρο (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 63). Τα υλικά με μεγάλη θερμοχωρητικότητα χρησιμοποιούνται επίσης και σε χώρους όπου είναι επιθυμητή η ηλιακή πρόσοδος και αποθήκευση για επανεκπομπή κατά τις νυχτερινές ώρες (βλ. Κεφ. 7).

Τα οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη χώρα μας για την κατασκευή των κτιρίων είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα, τα τούβλα, η πέτρα, το μάρμαρο και τα κεραμικά, και έχουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα, έχουν δηλαδή τη δυνατότητα να απορροφούν μεγάλα ποσά θερμότητας, τα οποία αποθηκεύουν στη μάζα τους. Αν θερμομονωθεί εξωτερικά μια κατασκευή οικοδομικού κελύφους με αυτά τα υλικά, αν δηλαδή μειωθεί η ταχύτητα με την οποία η κατασκευή θα χάσει τη θερμότητα που έχει αποθηκεύσει, επιτυγχάνεται η βέλτιστη λύση διατήρησης της ενέργειας ενός κτιρίου. Η ενέργεια αυτή, ειδικά σε βιοκλιματικά κτίρια, προέρχεται από τον ήλιο σε μεγάλο ποσοστό και από εσωτερικά κέρδη, και ζητούμενη είναι η διατήρησή της (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 63). Πρέπει όμως εδώ να επισημανθεί ότι αν υπάρχουν σταθερές εσωτερικές πηγές θερμότητας εσωτερικά, χωρίς αυτές να εκτονώνονται μέσω του διαμπερούς αερισμού, τότε η θερμότητα του αέρα θα απορροφηθεί από το κέλυφος μέσω της εσωτερικής του παρειάς και θα εγκλωβιστεί, συμβάλλοντας τελικά στην αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας.

Για να γίνει κατανοητή η αξία της θερμοχωρητικότητας των κατασκευών, θα συγκριθούν δύο κατασκευαστικές λύσεις, υποθέτοντας ότι υπάρχουν δύο ίδια κτίρια, με μοναδική διαφορά τα υλικά κατασκευής τους. Το ένα είναι ένα συμβατικό, βαρύ κτίριο και το άλλο ένα ελαφρύ ξύλινο. Ο αέρας πρακτικά δεν έχει θερμοχωρητικότητα, άρα δεν είναι δυνατόν να αποθηκευτεί θερμότητα στη μάζα του αέρα του εσωτερικού χώρου ενός κτιρίου. Έστω ότι η θερμοχωρητικότητα του ξύλινου κτιρίου είναι πέντε φορές μικρότερη από αυτή του συμβατικού. Αυτό σημαίνει ότι για να αποθηκεύσει την ίδια ποσότητα θερμότητας από ηλιακές προσόδους μόνο, με αυτή που αποθηκεύει το συμβατικό όταν η αύξηση της θερμοκρασίας είναι 1°C, θα πρέπει να έχουμε σχετική αύξηση της θερμοκρασίας κατά 5°C. Η θερμότητα Q που αποθηκεύει ένα υλικό είναι ίση με το γινόμενο: ειδική θερμότητα επί μάζα (δηλαδή θερμοχωρητικότητα) επί τη διαφορά θερμοκρασίας ΔΤ (Q = m.c.ΔT) (σχέση 5.9). Εφόσον στο παράδειγμα θεωρείται ότι η αποθηκευμένη θερμότητα στα δύο κτίρια είναι ίση, για να παραμείνει το γινόμενο σταθερό, όταν ελαττώνεται η θερμοχωρητικότητα στο 1/5, η διαφορά θερμοκρασίας θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί επί πέντε. Το πιθανό αποτέλεσμα θα είναι υπερθέρμανση της ελαφριάς ξύλινης κατασκευής, ενώ το βράδυ, όταν παύσουν οι ηλιακές πρόσοδοι, το ξύλινο κτίριο θα ψυχθεί γρηγορότερα από το συμβατικό, γιατί θα έχει αποθηκεύσει πέντε φορές λιγότερη ενέργεια (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 63-64).



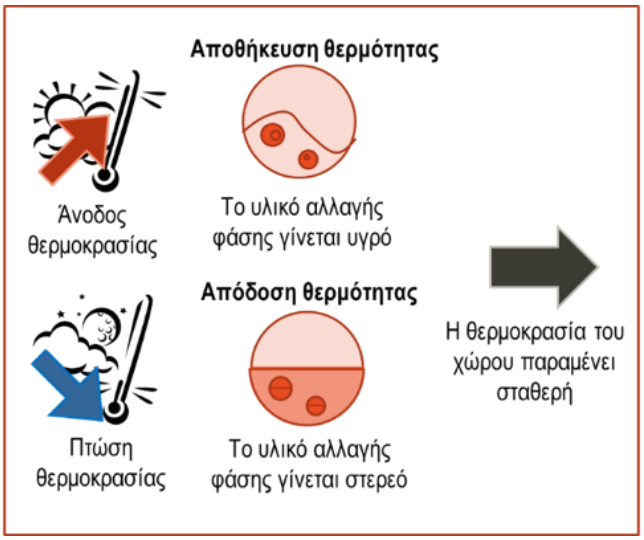
Εικόνα 5.28 *Η διακύμανση των εσωτερικών θερμοκρασιών χώρων με διαφορετικά δομικά στοιχεία / θερμοχωρητικότητα. Πηγή: Υλικό από προσωπικό ερευνητικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*

Το χαρακτηριστικό, λοιπόν, που έχουν οι ελαφριές κατασκευές, λόγω της μικρής τους θερμοχωρητικότητας, είναι οι αυξομειώσεις εσωτερικής θερμοκρασίας, οι οποίες παρακολουθούν την εξωτερική αυξομείωση θερμοκρασίας του αέρα, με μικρή χρονική καθυστέρηση (Εικόνα 5.28). Αντίθετα, οι βαριές κατασκευές, λόγω της μεγάλης τους θερμοχωρητικότητας, έχουν χαρακτηριστικό τη μικρή αυξομείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας που παρουσιάζει χρονική καθυστέρηση ως προς την εξωτερική, έχουν, δηλαδή, μεγάλη θερμική αδράνεια (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 64). Πιο πρακτικά, ένας χώρος που περιβάλλεται από βαρύ κέλυφος (μεγάλης θερμικής αδράνειας) χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να θερμανθεί, αλλά αργεί και να ψυχθεί και αντίστροφα, ενώ ο αντίστοιχος χώρος που περιβάλλεται από ελαφρύ κέλυφος θερμαίνεται και ψύχεται πολύ γρήγορα. Αν και τα δύο αυτά κελύφη θερμομονωθούν εξωτερικά εύκολα, γίνεται κατανοητό ότι, εάν απαιτείται χρήση του χώρου για μικρό χρονικό διάστημα (για παράδειγμα, παραμονή δύο ημερών), προτιμάται εκείνο με τη μικρή μάζα, γιατί το άλλο χρειάζεται, ανάλογα και με τον όγκο του, πολύ μεγαλύτερο χρόνο να ζεσταθεί. Αντίθετα, σε χώρους όπου η διαμονή είναι παρατεταμένη, η βαριά κατασκευή είναι καλύτερη.

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η θερμική αδράνεια, ως αποτέλεσμα της θερμοχωρητικότητας μιας κατασκευής, είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για τη βελτιστοποίηση της εκμετάλλευσης της ηλιακής προσόδου, αλλά και της διατήρησης της θερμοκρασίας σταθερής και με τις κατάλληλες προϋποθέσεις, μέσα στο όρια της θερμοκρασίας θερμικής άνεσης (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 64).

Σε κατασκευές που δεν διαθέτουν λόγω των χρησιμοποιούμενων οικοδομικών υλικών θερμοχωρητικότητα, έχει προταθεί να χρησιμοποιούνται, σε επιλεγμένες θέσεις μέσα σε ειδικές δεξαμενές, υλικά με υψηλότερη θερμοχωρητικότητα από εκείνη των συνηθισμένων δομικών υλικών. Τέτοια κατάλληλα υλικά είναι και διάφορα υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials – PCM).

Τα υλικά αλλαγής φάσης (PCM) αλλάζουν φάση και μετατρέπονται από στερεά σε υγρά σε κάποια θερμοκρασία και αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες θερμότητας στη μονάδα της μάζας τους επειδή δεσμεύεται θερμότητα κατά την αλλαγή της φάσης του υλικού από στερεό σε υγρό (Εικόνα 5.29). Την αποθηκευμένη αυτή θερμότητα την αποδίδουν αργότερα, όταν ψυχθούν. Ένα παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι η παραφίνη, η οποία υγροποιείται στους 55^{o}C στους οποίους και παραμένει σε υγρή κατάσταση, απορροφώντας θερμότητα, την οποία επαναποδίδει στο περιβάλλον όταν στερεοποιείται ψυχόμενη. Τα υλικά PCM προδιαγράφονται ανάλογα με τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και τη θερμοχωρητικότητά τους (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 64 και 99). Η χρήση τους και οι εφαρμογές τους στις κατασκευές είναι ολοένα και αυξανόμενες, λόγω της θετικής συνεισφοράς τους στη θερμική συμπεριφορά των κτιρίων και στην εξοικονόμηση ενέργειας, ειδικά στις περιπτώσεις κτιρίων με ελαφρού τύπου κατασκευές, που χαρακτηρίζονται από μειωμένη θερμική μάζα. Τα υλικά αλλαγής φάσης χωρίζονται σε: οργανικά (παραφινικά και μη παραφινικά), ανόργανα (ένυδρα άλατα και μεταλλικά) και εύτηκτα άλατα (συνδυασμούς οργανικών και ανόργανων PCM). Ενσωματώνονται σε τυποποιημένα πάνελ τοίχων (π.χ. γυψοσανίδες), σε σκυροδέματα και σε επίχρισματα και ανάλογα με το υλικό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις εσωτερικές επιφάνειες των τοίχων, στα δάπεδα και στις οροφές των εσωτερικών χώρων των κτιρίων (Frigione et al. 2019).



Εικόνα 5.29 *Υλικά αλλαγής φάσης. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και μετάφραση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη), με δεδομένα από το Subramanian et al. (2014).*

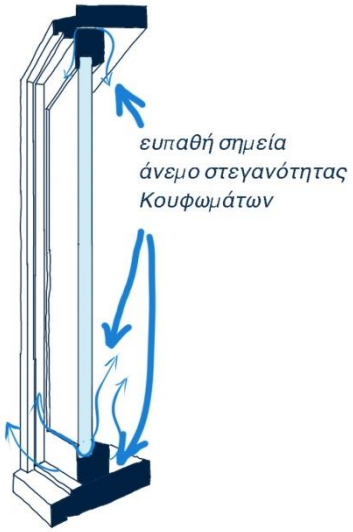
5.4.5 Θερμομόνωση κουφωμάτων ανοιγμάτων

Τα κουφώματα αποτελούν τα θερμικά ασθενή στοιχεία του κελύφους. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους. Πρώτον, διότι τα υλικά κατασκευής τους έχουν συνήθως υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (δηλαδή μικρή αντίσταση θερμοδιαφυγής) και, δεύτερον, διότι λόγω της χρήσης τους (ελεύθερη κίνηση) έχουν αρμούς από όπου διεισδύει ο αέρας. Τα κουφώματα συνιστούν «εξαρτήματα» του κελύφους γιατί ρυθμίζουν τη σχέση του εσωτερικού χώρου με το εξωτερικό περιβάλλον. Είναι, δηλαδή, ρυθμιστές φωτός, ήχου, ηλιακής προσόδου και ανέμου και, για τον λόγο αυτόν, οι προδιαγραφές και απαιτήσεις τους είναι πολύ πιο σύνθετες από εκείνες των συμπαγών στοιχείων.

Αποτελούνται από την κάσα, η οποία συνιστά το σταθερό στοιχείο τους, και από το κινητό φύλλο, το οποίο μπορεί να είναι συμπαγές ή διάφανο. Στην τελευταία περίπτωση το φύλλο αποτελείται από πλαίσιο και υαλοπίνακα. Η μετάδοση της θερμότητας, λοιπόν, πραγματοποιείται μέσω των αδιαφανών στοιχείων του πλαισίου τους (κάσα-φύλλο), των διαφανών στοιχείων (υαλοστάσια), ενώ υπάρχουν και απώλειες θερμότητας από διείσδυση (infiltration) από τους αρμούς ανάμεσα στα σταθερά (κάσα) και τα κινητά (φύλλο) στοιχεία του πλαισίου.

Το υλικό κατασκευής της κάσας και του πλαισίου καθορίζει τη θερμοπερατότητά του (K/U-value). Τα ξύλινα και τα πλαστικά κουφώματα έχουν την καλύτερη θερμική συμπεριφορά. Τα ξύλινα λόγω των θερμικών ιδιοτήτων του υλικού (χαμηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας) και τα πλαστικά λόγω του υλικού και κυρίως των θαλάμων από τα οποία συντίθενται. Τα μεταλλικά κουφώματα (χάλυβας και αλουμίνιο) έχουν τη χειρότερη θερμική συμπεριφορά λόγω της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητάς τους. Η αδυναμία αυτή έχει αποκατασταθεί σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια με την παρεμβολή ειδικού υλικού στο εσωτερικό των μεταλλικών προφίλ αλουμινίου ή χάλυβα που διακόπτει τη ροή της θερμότητας από τη μια τους πλευρά στην άλλη (θερμοδιακοπή, *thermal break*) (Εικόνα 5.30). Ακόμη, το γεγονός ότι οι διατομές των πλαισίων και της κάσας τους είναι πολύ πιο μικρές από εκείνες των ξύλινων και των πλαστικών έχει ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειάς τους να αποτελείται από γυαλί.

Οι απώλειες από διείσδυση για όλους τους τύπους κουφωμάτων αντιμετωπίζονται σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση ειδικών παρεμβυσμάτων που εξασφαλίζουν ανεμοστεγανότητα σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό.



α.





β.

Εικόνα 5.30 *α. Ευπαθη σημεία ανεμοστεγανότητας κουφωμάτων. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*
β. Θερμομόνωση ανοιγμάτων. Πηγές: Plast_okno_Amtek by Mgerbut via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0 και Fusionline94Pure by Dogsom via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.

Τα αντικείμενα ενός χώρου επανεκπέμπουν τη θερμότητα που δέχονται με τη μορφή μεγάλου μήκους υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR). Οι υαλοπίνακες γενικώς δεν επιτρέπουν αυτού του είδους την ακτινοβολία να περάσει μέσα από τη μάζα τους. Την απορροφούν, θερμαίνονται και την επανεκπέμπουν. Έτσι η θερμότητα παγιδεύεται στον χώρο που περιβάλλουν. Τον χειμώνα στους υαλοπίνακες ενός εσωτερικού χώρου η πρόσληψη θερμότητας λαμβάνει χώρα με μεταφορά και με ακτινοβολία:

- Με μεταφορά από τον θερμό αέρα του εσωτερικού χώρου ή του εξωτερικού περιβάλλοντος προς και από την επιφάνεια του υαλοπίνακα, αντίστοιχα.
- Με ακτινοβολία, όπου η εσωτερική επιφάνεια του υαλοστασίου, δέχεται θερμότητα από τις θερμότερες επιφάνειες του εσωτερικού χώρου.

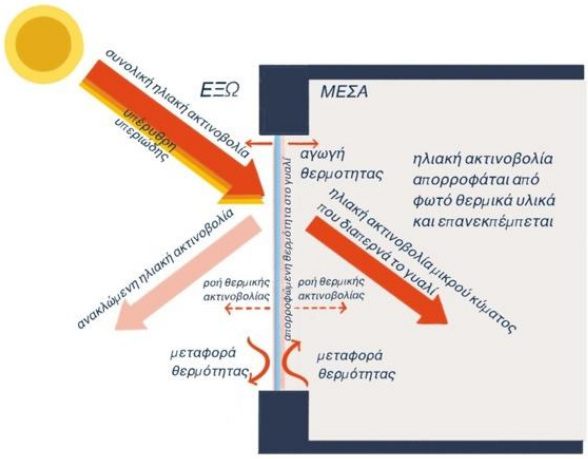
Στην περίπτωση μονού υαλοπίνακα, η θερμότητα μεταφέρεται διαμέσου της μάζας του υαλοπίνακα με αγωγή προς την εξωτερική επιφάνειά του και από εκεί με μεταφορά προς τον ψυχρότερο, εξωτερικό αέρα και με ακτινοβολία προς τις ψυχρότερες επιφάνειες τις οποίες «βλέπει». Η απορροφώμενη από τα υαλοστάσια θερμότητα εκπέμπεται προς τις δύο επιφάνειες του υαλοπίνακα, εξωτερική και εσωτερική. Έτσι, οι απλοί, μονοί υαλοπίνακες αποτελούν το ασθενέστερο θερμικά στοιχείο του κτιριακού κελύφους, γιατί λόγω του υψηλού συντελεστή θερμοπερατότητας (από 3,6-5,2W/m^2.K) (Hegger et al., 2012, σ. 152) χαρακτηρίζονται από μεγάλες θερμικές προσόδους και απώλειες. Με την εισαγωγή στην κατασκευή των διπλών υαλοπινάκων, η θερμομονωτική ικανότητα των κουφωμάτων βελτιώθηκε αισθητά. Ένας απλός υαλοπίνακας (όχι ανακλαστικός) επανεκπέμπει τη θερμότητα προς την ψυχρότερη περιοχή, π.χ. προς τα έξω τον χειμώνα, με αποτέλεσμα να χάνεται ενέργεια. Η τιμή (ε) της δυνατότητας εκπομπής (*emissivity*) ενός κοινού υαλοπίνακα είναι 0,89. Αυτό με άλλα λόγια σημαίνει ότι το 89% της ενέργειας που απορροφάται από τη μάζα του γυαλιού, επανεκπέμπεται προς το περιβάλλον (προς την ψυχρότερη πλευρά του) και μόνο το 11% ανακλάται πίσω στη θερμή περιοχή. Η ικανότητα εκπομπής ενός υαλοπίνακα εκφράζεται και με την απορροφητικότητά του. Όσο μικρότερη είναι η ικανότητα εκπομπής (δηλαδή η απορροφητικότητα), τόσο μεγαλύτερη είναι η ανάκλαση, άρα και η διατηρούμενη στον χώρο θερμότητα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 67-68).

Οι λεγόμενοι θερμομονωτικοί υαλοπίνακες μπορεί να αποτελούνται από δύο ή και τρία φύλλα, το διάκενο των οποίων είναι ερμητικά σφραγισμένο και περιέχει είτε ξηρό αέρα ή κάποιο από τα ευγενή αέρια

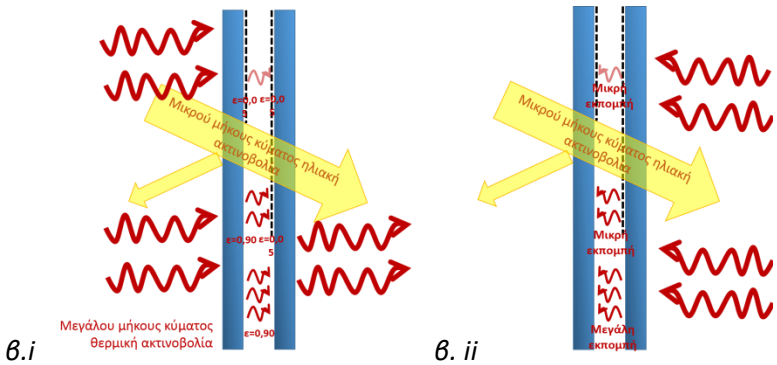
(argon, krypton)· χαρακτηρίζονται από πολύ καλές θερμομονωτικές και ηχομονωτικές επιδόσεις (συνήθεις τιμές ~ 2,8 W/m^2.K). Για να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας λόγω της εκπομπής θερμότητας προς τα έξω κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, ενσωματώνονται στην επιφάνεια του υαλοπίνακα ειδικές μεταλλικές επιστρώσεις, οι οποίες μειώνουν την εκπομπή θερμότητας του γυαλιού προς τα έξω, δημιουργώντας τους υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής (*low-e* ή *low emissivity glass*) (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 67-68).

Σημαντική βελτίωση (μείωση) της τιμής δυνατότητας θερμικής εκπομπής (ε) των υαλοπινάκων επέφερε η εφεύρεση της επίστρωσης της επιφάνειάς τους με ένα μικροσκοπικά λεπτό, θεωρητικά αόρατο στρώμα μετάλλων ή μεταλλικών οξειδίων. Επιπλέον, οι διαρκώς βελτιούμενες τεχνικές επιστρώσεων έχουν επιτρέψει να γίνουν αποφασιστικά βήματα στην ποιότητα της θερμομόνωσης και της διαχείρισης των υαλοστασίων. Οι υαλοπίνακες που φέρουν την επίστρωση χαμηλής εκπομπής (low-e) εμφανίζουν αυξημένη ανάκλαση της απορροφούμενης από το γυαλί θερμότητας προς την πλευρά της πηγής της θερμότητας. Αυτό σημαίνει ότι, αντίθετα με τα κοινά γυαλιά, οι χαμηλής εκπομπής υαλοπίνακες εξασφαλίζουν τη διατήρηση της θερμότητας μέσα σε ένα κτίριο τον χειμώνα. Αντίστοιχα, το καλοκαίρι η θερμότητα του εξωτερικού περιβάλλοντος επανεκπέμπεται προς αυτό, βελτιώνοντας τις συνθήκες θερμικής άνεσης (βλ. Εικόνα 5.31).

Η ικανότητα εκπομπής επιδρά μόνο στη μεγάλου μήκους υπέρυθρη ακτινοβολία, ενώ δεν έχει ουσιαστικά επίπτωση στον έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας. Προκειμένου να συνδυαστεί ο έλεγχος της θερμοπερατότητας με τον έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν γυαλιά με επικαλύψεις που να συνδυάζουν και τις δύο λειτουργίες (π.χ. ανακλαστικοί ή έγχρωμοι υαλοπίνακες).



a.



β.i *β. ii*

Εικόνα 5.31 *α. Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας μονού υαλοπίνακα. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου). β. Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας των υαλοπινάκων χαμηλής εκπομπής (low-e). i. Χειμερινή λειτουργία και ii. Θερινή λειτουργία. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των κουφωμάτων (Uw) αναλύεται στους Uf που είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας του πλαισίου και Ug του υαλοπίνακα. Οι τυπικές τιμές συντελεστών θερμοπερατότητας πλαισίου κουφωμάτων περιλαμβάνονται στην ΤΟΤΕΕ 20701-2.

Στον σχεδιασμό κτιρίων, η επιλογή του τύπου του υαλοπίνακα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως οι κλιματικές συνθήκες, η χρήση του κτιρίου, ο προσανατολισμός και ο ενεργειακός και βιοκλιματικός σχεδιασμός. Τις τελευταίες δεκαετίες, όμως, η τεχνολογία των υαλοπινάκων έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό και υπάρχουν πλέον διάφοροι τύποι υαλοπινάκων. Παράλληλα, οι απαιτήσεις για τη βέλτιστη ενεργειακή, βιοκλιματική συμπεριφορά αλλά και την οπτική άνεση εντός των χώρων έχει ως αποτέλεσμα την πολυπλοκότητα στην προδιαγραφή τους με την επιλογή των κατάλληλων συντελεστών. Οι συντελεστές αυτοί είναι:

1. U-value = συντελεστής θερμοπερατότητας (Uw, Ug, Uf)
2. Solar Heat gain Coefficient (Συντελεστής απολαβής ηλιακής θερμότητας)
3. SC, Shading coefficient (Συντελεστής σκίασης) με κλίμακα 1.00-0.00 όπου όσο χαμηλότερη είναι η τιμή τόσο λιγότερη ηλιακή θερμότητα μεταφέρεται μέσω του υαλοπίνακα. Ο συντελεστής αυτός είναι αντίστοιχος με το συντελεστή g-value
4. VLT Visible light transmittance (Διαπερατότητα ορατού φωτός)

Η επιλογή τους σχετίζεται με τις βιοκλιματικές στρατηγικές, τη χρήση του χώρου, τα επίπεδα φυσικού φωτισμού και άλλους παράγοντες.

Η αίσθηση θερμικής άνεσης σε έναν χώρο δεν εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του αέρα εντός του χώρου, αλλά και από την ενδεχόμενη εγγύτητα σε ψυχρές επιφάνειες. Το ανθρώπινο σώμα, όταν βρεθεί κοντά σε ψυχρές επιφάνειες, για παράδειγμα ένα υαλοστάσιο με μικρή θερμομόνωση, αντιδρά ως θερμαντικό σώμα, αποβάλλοντας θερμότητα. Η διαχεόμενη με αυτόν τον τρόπο ενέργεια έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ενοχλητικής αίσθησης ψύχους (βλ. Κεφ. 4, παρ. 4.2.2).

Για την καλύτερη διημερήσια λειτουργία τους κατά τη διάρκεια της ψυχρής χειμερινής περιόδου, τα υαλοστάσια μπορούν να έχουν και νυχτερινή μόνωση, η οποία πρέπει να εφαρμοστεί εσωτερικά (Εικόνα 5.32). Η νυχτερινή μόνωση αναφέρεται σε ένα κινητό μονωτικό διάφραγμα, το οποίο τοποθετείται τη νύχτα για να περιορίσει τις θερμικές απώλειες του χώρου διαμέσου του υαλοστασίου προς το ψυχρό, εξωτερικό περιβάλλον. Στην παραδοσιακή, αλλά και στην αστική αρχιτεκτονική, γινόταν χρήση βαριάς κουρτίνας ή υφάσματος. Σύγχρονες εφαρμογές περιλαμβάνουν ειδικά ελαφριά ρολά, εσωτερικά σκούρα, ελαφρά πετάσματα από μονωτικές πλάκες και διάφορες άλλες ειδικές κινητές θερμομονωτικές κατασκευές που τοποθετούνται εσωτερικά του υαλοστασίου. Έξω από το υαλοστάσιο, τον ρόλο νυχτερινής μόνωσης μπορούν να αναλάβουν τα παντζούρια, τα σκούρα ή τα ρολά, αρκεί όμως να μην επιτρέπουν την κυκλοφορία του αέρα προς το υαλοστάσιο. Τέτοιες κατασκευές που προσφέρουν ικανοποιητική νυχτερινή μόνωση είναι τα συμπαγή ξύλινα σκούρα, ή τα σύγχρονα ρολά, των οποίων τα πλαστικά ή αλουμινένια φυλλαράκια είναι γεμισμένα εσωτερικά με αφρώδες θερμομονωτικό υλικό. Στην ερώτηση ποια είναι η καταλληλότερη πλευρά του υαλοστασίου για τοποθέτηση νυχτερινής μόνωσης, θα πρέπει να συνυπολογιστεί το γεγονός ότι οι κατασκευές που προσφέρουν εξωτερική νυχτερινή μόνωση μπορούν επιπλέον να προσφέρουν σκιασμό και ηλιοπροστασία του ανοίγματος στη διάρκεια της ημέρας. Δεδομένης της ανάγκης αλλά και της συνήθειας να χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα σκούρα στα υαλοστάσια, μπορούν να επιλεγούν ή να σχεδιαστούν οι τύποι εκείνοι σκούρων που προσφέρουν και νυχτερινή μόνωση. Στην ξένη βιβλιογραφία, ειδικά όταν προέρχεται από χώρες όπου δεν συνηθίζεται να τοποθετούνται σκούρα στα ανοίγματα, η ανάγκη χρήσης νυχτερινής μόνωσης χρεώνεται στα μειονεκτήματα του συστήματος άμεσου ηλιακού οφέλους, λόγω του κόστους της απαιτούμενης επιπλέον κατασκευής, πράγμα το οποίο, όπως εξηγήθηκε, δεν έχει ανάλογη βαρύτητα για τις ελληνικές περιπτώσεις (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 97).



Εικόνα 5.32 *α. Εσωτερικά και εξωτερικά «σκούρα».*
α. Τα εξωτερικά, ρυθμιζόμενα εξωτερικά για σκιασμό και αερισμό και τα εσωτερικά ταμπλαδωτά για αποφυγή της θερμότητας (νυχτερική μόνωση). Palau Güell, Βαρκελώνη. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Εσωτερικά θερμομονωτικά κυψελωτά ρόλερ. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

5.5 Συμπεριφορά δομικών στοιχείων ως προς την υγρασία

Η υγρασία διακινείται μέσα από τα δομικά στοιχεία της κατασκευής με δύο τρόπους (Κορωναίος & Πουλάκος, 2005, σ. 36):

α. Με τη μορφή νερού, η υγρασία διακινείται μέσα από τα μέλη κατασκευής διαμέσου των τριχοειδών αγγείων των υλικών προς την κατεύθυνση, όπου η σχετική υγρασία έχει τη μικρότερη τιμή, οπότε το νερό εξατμίζεται ευκολότερα. Αυτό συμβαίνει σε υλικά τα οποία έχουν τριχοειδείς πόρους, όπως κεραμικά υλικά, γύψος, πλίνθοι κ.ά.

β. Με τη μορφή υδρατμών, η υγρασία διακινείται μέσα από τα μέλη κατασκευής προς την κατεύθυνση, όπου η τιμή της απόλυτης υγρασίας είναι μικρότερη, δηλαδή εκεί όπου η μερική τάση των υδρατμών είναι μικρότερη. Η διακίνηση της υγρασίας με τη μορφή υδρατμών ονομάζεται διαπίδυση ή διάχυση των υδρατμών.

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει αναφορά στη διακίνηση των υδρατμών, καθώς αυτή σχετίζεται με την υγροποίηση υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια και στο εσωτερικό της κατασκευής και επηρεάζει τη θερμομονωτική ικανότητα των υλικών, την κατάσταση των δομικών στοιχείων και τέλος τις συνθήκες θερμικής άνεσης και ποιότητας του εσωτερικού αέρα των χώρων.

5.5.1 Φυσικές ιδιότητες που σχετίζονται με τη συμπεριφορά ως προς την υγρασία και την υγροποίηση υδρατμών

Οι φυσικές ιδιότητες που σχετίζονται με την υγροποίηση υδρατμών είναι (Κορωναίος & Πουλάκος, 2005, σσ. 32-33):

- Η αντίσταση διαπίδυσης (διάχυσης) των υδρατμών, μ.
- Ο συντελεστής αγωγιμότητας των υδρατμών, δ
- Ο συντελεστής διαπερατότητας των υδρατμών, Δ
- Η αντίσταση διαπερατότητας των υδρατμών, 1/Δ

Η **αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών, μ,** είναι ο αριθμός, ο οποίος δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η αντίσταση κατά τη διάχυση των υδρατμών μέσα από ένα στρώμα ομοιογενούς υλικού από την αντίσταση κατά τη διάχυση των υδρατμών μέσα από στρώμα αέρα ίσου πάχους στις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος. Η αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών είναι καθαρός αριθμός (Κορωναίος & Πουλάκος, 2005, σ. 32) και οι τιμές της για τα βασικά οικοδομικά υλικά δίνονται στην ΤΟΤΕΕ 20701-2/2017, Πίνακας 1, σ. 55-61.

Ο **συντελεστής αγωγιμότητας των υδρατμών, δ,** δίνει την ποσότητα των υδρατμών σε Kg, η οποία διέρχεται, λόγω διάχυσης, σε 1 ώρα μέσα από στρώμα υλικού που έχει επιφάνεια 1 m^2 και πάχος 1 μ., όταν η διαφορά των μερικών τάσεων των υδρατμών μεταξύ των δύο επιφανειών είναι 1 χιλιοστό στήλης υδράργυρου (1 mmHg) και το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση, δηλαδή η μερική τάση των υδρατμών τοπικά παραμένει σταθερή με τον χρόνο. Η μονάδα μέτρησης είναι τα χιλιόγραμμα ανά μέτρο, ανά ώρα και χιλιοστό στήλης υδράργυρου (Kg/m*h*mm*QS). Ο συντελεστής αγωγιμότητας των υδρατμών υπολογίζεται από την αντίσταση σε διάχυση των υδρατμών από τη σχέση (Κορωναίος & Πουλάκος, 2005, σ. 33):

$$\delta = \frac{\mu}{0{,}085} \qquad (5.14)$$

όπου:

δ : ο συντελεστής αγωγιμότητας των υδρατμών σε mmHg

μ : η αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών του υλικού

0,085 : η αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών του αέρα σε (g/m^2.h.mmHg)

Ως **συντελεστής αγωγιμότητας των υδρατμών, Δ**, ορίζεται η ποσότητα των υδρατμών σε Kg, η οποία διέρχεται λόγω διαπίδυσης σε 1 ώρα μέσα από στρώμα υλικού που έχει επιφάνεια 1 m^2 και πάχος d μέτρα, όταν η διαφορά των μερικών τάσεων των υδρατμών μεταξύ των δύο επιφανειών είναι 1 χιλιοστό στήλης υδραργύρου και το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση. Η μονάδα μέτρησης είναι τα χιλιόγραμμα ανά τετραγωνικό μέτρο, ανά ώρα και χιλιοστό στήλης υδράργυρου (Kg/m^2.h.mmHg) και για ομοιογενή υλικά είναι (Κορωναίος & Πουλάκος, 2005, σ. 32):

$$\Delta = \frac{d}{\delta} \qquad (5.16)$$

όπου:

d : το πάχος του στρώματος του υλικού σε m

δ : ο συντελεστής αγωγιμότητας των υδρατμών σε mmHg

Τέλος, ορίζεται και η αντίσταση διαπερατότητας των υδρατμών (1/Δ) ως το αντίστροφο του συντελεστή διαπερατότητας των υδρατμών (Δ), με μονάδα μέτρησης τα τετραγωνικά μέτρα επί ώρες και χιλιοστά στήλης υδράργυρου ανά χιλιόγραμμο (m^2.h.mmHg/Kg) (Στο ίδιο).

5.5.2 Υγροποίηση υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια

Υγροποίηση των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια κατασκευής συμβαίνει όταν η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας των μελών της κατασκευής είναι μικρότερη από το σημείο υγροποίησης των υδρατμών του αέρα στον εσωτερικό χώρο. Η υγρασία, η οποία αποτίθεται από τον αέρα στα μέλη της κατασκευής, ονομάζεται νερό συμπύκνωσης (Κορωναίος & Πουλάκος, 2005, σ. 37).

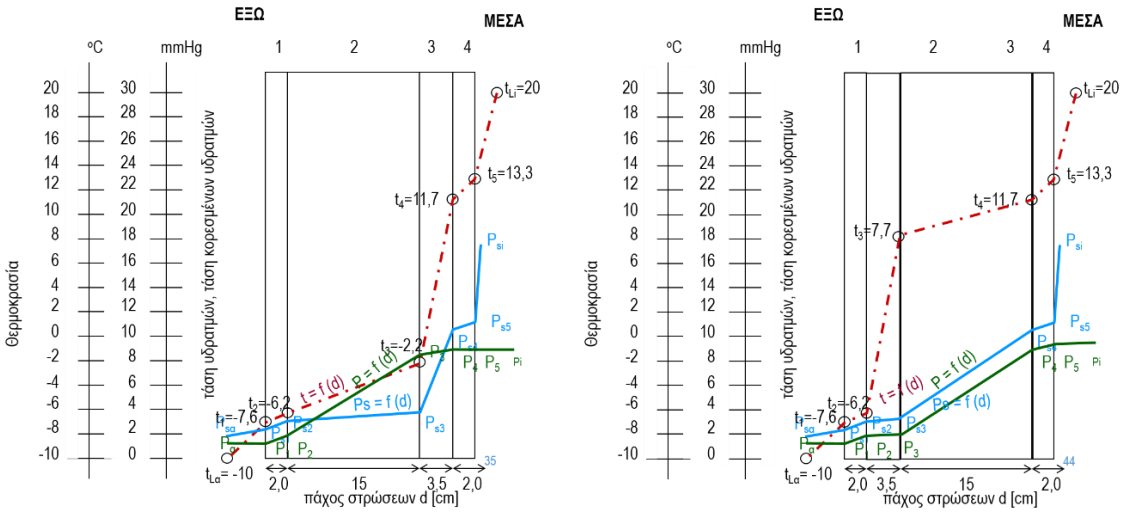
Η υγροποίηση των υδρατμών οφείλεται (Στο ίδιο, σσ. 37-38):

- **Σε ανεπαρκή θερμομόνωση:** Η ανεπαρκής θερμομόνωση έχει ως αποτέλεσμα τη χαμηλή εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία των μελών της κατασκευής.
- **Σε θέρμανση ψυχθέντων χώρων:** Κατά τη θέρμανση ψυχθέντων χώρων, οι επιφάνειες των τοίχων θερμαίνονται με βραδύ ρυθμό σε σχέση με τον αέρα του χώρου, με αποτέλεσμα να γίνεται υγροποίηση των υδρατμών πάνω στην εσωτερική επιφάνεια της κατασκευής για κάποιο χρονικό διάστημα.
- **Σε αυξημένη υγρασία του αέρα του χώρου:** Όταν η υγρασία του αέρα μέσα σε έναν χώρο είναι αυξημένη, τότε γίνεται υγροποίηση των υδρατμών πάνω στην εσωτερική επιφάνεια της κατασκευής. Συνεπώς, πρέπει να γίνεται κατάλληλος εξαερισμός των χώρων, κυρίως στις κουζίνες, στα λουτρά και στα υπνοδωμάτια, ώστε να αποφεύγεται η ανεπιθύμητη αύξηση της υγρασίας μέσα στους χώρους αυτούς.

5.5.3 Υγροποίηση υδρατμών στο εσωτερικό της κατασκευής

Όταν στο εσωτερικό της κατασκευής η θερμοκρασία είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία υγροποίησης των υδρατμών, t_s, τότε γίνεται υγροποίηση των υδρατμών, με αποτέλεσμα να υγρανθεί η κατασκευή και να μειωθεί η θερμομονωτική ικανότητά της. Για τον έλεγχο της υγροποίησης των υδρατμών μέσα στο εσωτερικό της κατασκευής πρέπει να προσδιοριστούν, τόσο οι μερικές τάσεις των υδρατμών, P_n, όσο και οι αντίστοιχες τάσεις των κορεσμένων υδρατμών, P_{sn}, σε συνάρτηση με το πάχος της κατασκευής, δηλαδή οι συναρτήσεις $P_n = f(d)$ και $P_{sn} = f(d)$, αντιστοίχως και να γίνει η γραφική απεικόνισή τους στο ίδιο διάγραμμα (Κορωναίος & Πουλάκος, 2005, σσ. 38-39).

Όταν η μερική τάση των υδρατμών σε κάθε σημείο μέσα στην κατασκευή είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τάση των κορεσμένων υδρατμών, τότε οι δύο αυτές καμπύλες δεν τέμνονται. Στην περίπτωση αυτή δεν γίνεται υγροποίηση των υδρατμών στο εσωτερικό της κατασκευής (Εικόνα 5.33.β). Αντίθετα, όταν οι δύο αυτές καμπύλες τέμνονται, τότε γίνεται υγροποίηση των υδρατμών στο εσωτερικό της κατασκευής (Εικόνα 5.33.α). Από το διάγραμμα αυτό δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί η ακριβής θέση του σημείου υγροποίησης μέσα στην κατασκευή. Αφού όμως γίνεται υγροποίηση, οπωσδήποτε πρέπει να ληφθούν όλα τα κατάλληλα μέτρα ώστε το φαινόμενο αυτό να αποφευχθεί (Στο ίδιο). Η μεθοδολογία που ακολουθείται αφορά αρχικά τον υπολογισμό των θερμοκρασιών στις διαφορετικές στρώσεις της κατασκευής, στη συνέχεια, με βάση αυτές, τον υπολογισμό των τάσεων των κορεσμένων υδρατμών και, τέλος, των μερικών τάσεων των υδρατμών, και περιγράφεται αναλυτικά στο Κορωναίος & Πουλάκος (2005, σσ. 38-46).



Εικόνα 5.33 *Διαγράμματα τάσεων υδρατμών και τάσεων κορεσμένων υδρατμών ως μέσο διερεύνησης της δημιουργίας συμπύκνωσης στο εσωτερικό μιας κατασκευής. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Στην περίπτωση όπου γίνεται υγροποίηση των υδρατμών στο εσωτερικό κατασκευής, για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο, υπάρχουν δύο εναλλακτικές:

- η αλλαγή της θέσης του θερμομονωτικού υλικού και η τοποθέτησή του προς το εξωτερικό της κατασκευής ή
- η τοποθέτηση μιας πρόσθετης στρώσης, η οποία ονομάζεται φράγμα υδρατμών (D-Sp).

Τα φράγματα υδρατμών έχουν πολύ υψηλές τιμές της αντίστασης διαπίδυσης των υδρατμών, μ, που είναι δυνατόν να φτάσουν μέχρι και 10^5. Το φράγμα των υδρατμών προκαλεί πτώση της μερικής τάσης των υδρατμών και συμβάλλει ώστε η μερική τάση των υδρατμών να διατηρείται μικρότερη από την αντίστοιχη τάση των κορεσμένων υδρατμών και συνεπώς να μην γίνεται υγροποίηση των υδρατμών στο εσωτερικό της κατασκευής. Το φράγμα υδρατμών τοποθετείται πριν από τη στρώση στην οποία γίνεται η υγροποίηση των υδρατμών, κατά την κατεύθυνση της διαπίδυσης των υδρατμών (Στο ίδιο, σ. 40).

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμομονωτική επάρκεια της κατασκευής, όταν δηλαδή πληρούνται οι απαιτήσεις της νομοθεσίας (ο μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής θερμοπερατότητας Κ), δεν εξασφαλίζει απαραίτητα την προστασία από την υγροποίηση των υδρατμών στο εσωτερικό της κατασκευής, αφού αυτή εξαρτάται, πέρα από τις συνθήκες του εξωτερικού και του εσωτερικού περιβάλλοντος, από τη φύση και τη θέση του θερμομονωτικού υλικού στην κατασκευή. Ταυτόχρονα, υπάρχουν στοιχεία της κατασκευής, όπως τα δώματα, όπου, ανεξάρτητα από τη θέση του θερμομονωτικού υλικού, απαιτείται φράγμα υδρατμών για προστασία του υλικού από τις ανοδικές υγρασίες, καθώς και για τα τυχόν νερά κατά τη φάση της κατασκευής των υπερκείμενων κατασκευών.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Akbari, H. (2005). "Potentials of urban heat island mitigation. In M. Santamouris (Ed.). *1st International Conference. Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment. Palenc 2005. 19-21 May 2005, Santorini, Greece* (vol. II, pp. 11-22). Heliotopos Conferences Ltd..

Akbari, H., Davis, S., Dorsano, S., Huang, J. & Winnett, S. (Eds) (1992). *Cooling Our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing*. U.S. Environmental Protection Agency.

Alexandrou, E. (2015). Thermal Behaviour of Historic and Traditional Post Byzantine Buildings in Greece. In: M. Philokyprou, A. Michael, A. Savvides (Eds). *Biocultural 2015, International Conference on Sustainability in Architectural Cultural Heritage* (pp. 38-47). Biocultural Research Programme, University of Cyprus.

Atsonios, I., Mandilaras, D., Kolaitis, E., Tsakanika-Theohari, E. Alexandrou, E. & Founti, M. (2013). Large scale Measurement campaign to Assess the Thermal behavior of an 18th Century Historic Building in Athens. In *3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation, EWCHP 2013*. Bolzano, Italy, 16-18 September 2013.

Bougiatioti, F. & Oikonomou, A. (2003). Thermal behaviour of materials used in the skin of the city in Greece. In: W. Bustamante & E. Collados (Eds). *20th Int. Conf., PLEA 2003* (G-13). Escuela de Construccion Civil. Pontificia Universidad Catolica de Chile / PLEA International. [CD-ROM].

Bougiatioti, F. (2005). The thermal role of materials in mediterranean cities. In: D. Babalis (Ed.). *ECOPOLIS: Sustainable Planning and Design Principles* (pp. 115-123). Alinea Editrice.

Buckley, S. (1979). *Sun up to Sun down. Understanding solar energy*. McGraw-Hill Book Company.

Calculator.net (n.d.). Dew Point Calculator. Διαθέσιμο στο: https://www.calculator.net/dew-point-calculator.html

Chapman, A. J. (1974). *Heat Transfer*. Collier Macmillan International Editions. [1η έκδοση 1960].

Eurac Research (n.d.). *Historic Building Energy Retrofit Atlas (HIBER Atlas).* https://hiberatlas.eurac.edu/en/welcome-1.html

Fanger, P. O. (1973). Thermal Comfort. Danish Technical Press / McGraw-Hill Book Company.

Fentress, S. (2017, July 18). *Benjamin Franklin and the Swatches on the Snow*. A moment of Science. https://indianapublicmedia.org/amomentofscience/bfranklin-color-snow.php

Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture*. Elsevier Publishing Company Ltd.

Givoni, B. (1994). *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. Van Nostrand Reinhold.

Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Van Nostrand Reinhold.

Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T. & Zeumer, M. (2012). *Energy Manual: Sustainable Architecture*. Birkhäuser. https://doi.org/10.11129/detail.9783034614542

Krempl, M. (2019). Mariahilferstrasse. *HIBER Atlas (Historic Building Energy Retrofit Atlas) by Eurac Research.* https://hiberatlas.eurac.edu/en/mariahilferstrasse--2-62.html

Markus, T. A. & Morris, E. N. (1980). *Buildings, Climate and Energy*. Pitman Publishing Ltd.

Oke, T. R. (1995). *Boundary Layer Climates*. Routledge.

Pfundstein, M., Gellert R., Spitzner, M. & Rudolphi, A., (2007) *Detail Practice, Insulating materials – Principles, Materials, Applications*. Birkhauser.

Subramanian, M. S., Reyes del Rosario, M. Jr. & Ong, J. B. (2014). Using Technology to help the Environment. 10.13140/RG.2.2.16005.04325

Santamouris, M. & Asimakopoulos, D. (Eds) (1996). *Design Sourcebook on Passive Solar Architecture*. CIENE, E. C. D. G. XVII for Energy.

Siddiqi, A. A. (1984). Evaluation of the effect of choice of materials on the surface temperatures of buildings in urban built up areas. In A. Bowen & S. Yannas (Eds). *Passive and Low Energy Ecotechniques applied to Housing. Proceedings of the Third International PLEA Conference, Mexico City, Mexico, August 6-11, 1984* (vol. II, pp. 899-907). Pergamon Press.

Αλεξόπουλος, Κ. Δ. (1957). *Γενική Φυσική. Τόμος Τέταρτος. Θερμότης*. Τύποις Σωτ. Σπυρόπουλου.

Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, Ε. (1999). *Σημειώσεις Δομικής Φυσικής. Ορθολογική Χρήση της Ενέργειας στα Κτίρια*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Αρχιτεκτόνων.

Ευαγγελινός, Ε. & Ζαχαρόπουλος, Η. (2001). *Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό*. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου* (σσ. 21-154). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Κατσαπρακάκης, Δ. (2015). *Σύνθεση ενεργειακών συστημάτων* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-651

Κορωναίος, Α. & Πουλάκος, Γ. (2011). *Τεχνικά υλικά*. Συμμετρία.

Κορωναίος, Α.Γ. & Πουλάκος, Γ.Ι. (2005). *Τεχνικά Υλικά.* Τόμος 2. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μαύρος, Π. (2000). Στοιχεία Μετάδοσης Θερμότητας. Στο: Δ. Ζαμπούλης, Α. Ι. Ζουμπούλης, Κ. Α. Μάτης, Π. Μαύρος, *Εισαγωγή στη Χημική Τεχνολογία* (σ. 6-1-24). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Εκδόσεων, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο.

Μπουγιατιώτη, Φ.-Μ. (2007). *Η θερμική συμπεριφορά και η περιβαλλοντική επίδραση των υλικών που χρησιμοποιούνται στους υπαίθριους χώρους και στο κέλυφος των κτιρίων στην Ελλάδα*. [Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών. https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/17018

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ). (2021). ΤΟΤΕΕ 20701-2/2021. Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων. https://web.tee.gr/wp-content/uploads/TOTEE-20701-2-2021.pdf

Точка росы. (2021, December 6). In: *Wikipedia*. https://ru.wikipedia.org/wiki/Точка_росы

Κεφάλαιο 6

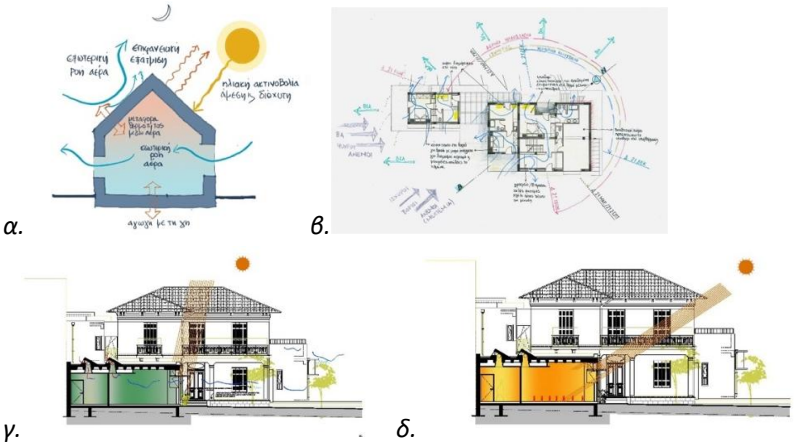
Στοιχεία βιοκλιματικού σχεδιασμού

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό, συγκεντρώνονται, κατηγοριοποιούνται και περιγράφονται τα στοιχεία βιοκλιματικού σχεδιασμού, τα οποία ενσωματώνονται σε κτίρια τόσο της παραδοσιακής όσο και της σύγχρονης αρχιτεκτονικής. Περιγράφονται καταρχήν τα βασικά εργαλεία αλληλεπίδρασης του κτιρίου με τα άμεσα κλιματικά δεδομένα, όπως ο προσανατολισμός, η μορφή και τα στοιχεία του κελύφους του κτιρίου, και στη συνέχεια αναλύονται η βιοκλιματική λειτουργία και η συμβολή της στη θερμική και οπτική άνεση συγκεκριμένων αρχιτεκτονικών χωρικών διατάξεων. Ακόμα, αναφέρονται τα υλικά κατασκευής και οι διατάξεις προστασίας του κελύφους, καθώς και η επίδραση της φύτευσης στη βελτίωση του μικροκλίματος αλλά και στη βιοκλιματική του λειτουργία. Ακολουθεί ανάπτυξη των υπόσκαφων και των διπλοκέλυφων (δικέλυφων) όψεων και, τέλος, παρουσιάζονται οι τυπικές αρχιτεκτονικές μορφές και κτιριακές διατάξεις της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής σε κάθε βασική κλιματική ζώνη.

Προαπαιτούμενη γνώση
Κεφάλαια 1, 3, 4 και 5 του παρόντος.

6.1 Εισαγωγικές παρατηρήσεις

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (Κεφ. 1, παρ. 1.1), ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο το κτιριακό κέλυφος αλληλεπιδρά δυναμικά με το άμεσο κλιματικό του περιβάλλον (μικροκλίμα), ούτως ώστε να αξιοποιούνται ή να απομονώνονται φυσικές πηγές, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, η υγρασία, η θερμοκρασία του αέρα και της γης κ.ο.κ. Στόχος είναι η επίτευξη των βέλτιστων συνθηκών θερμικής άνεσης εντός του κτιρίου και γύρω από αυτό με την κατά το δυνατόν αποδοτικότερη χρήση ενέργειας. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός βασίζεται στην κατανόηση της ροής της ενέργειας που προκαλείται από τις φυσικές πηγές, μέσω του κτιριακού κελύφους και γύρω από αυτό (Watson & Labs, 1983, σ. 3, 4) (Εικόνα 6.1).



α. *β.* *γ.* *δ.*

Εικόνα 6.1 *Διαγραμματική απεικόνιση της ροής θερμότητας σε ένα κτίριο. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και απόδοση (Ε. Αλεξάνδρου) από Watson (2013), σ. 3, β. γ. και δ. βιοκλιματικά διαγράμματα Πηγή: Ίδια σχεδίαση και απόδοση (Ε. Αλεξάνδρου).*

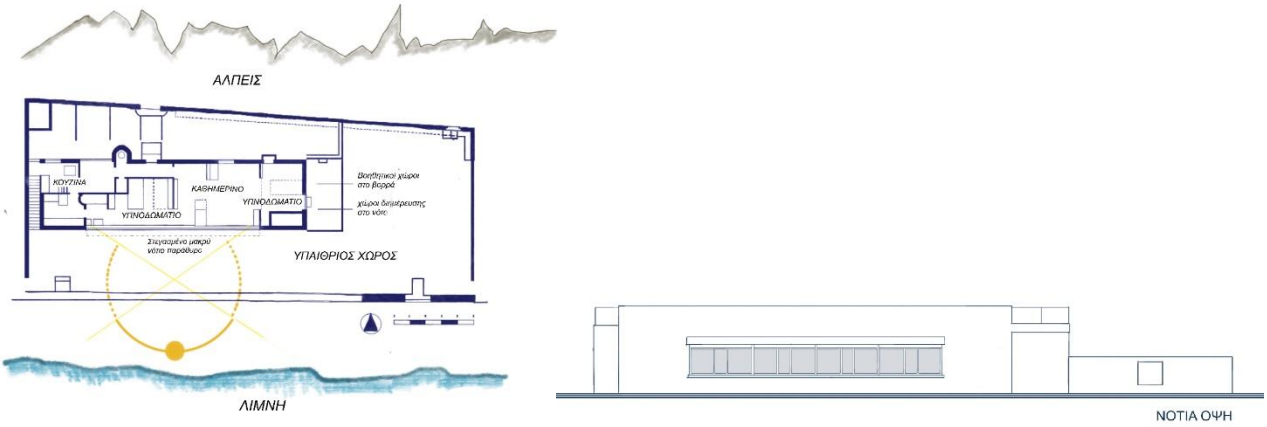
Με λίγα λόγια, το κτιριακό κέλυφος, το οποίο αποτελεί το όριο μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, γίνεται παθητικός δέκτης των μικροκλιματικών συνθηκών «ανοίγοντας» προς αυτές ή «κλείνοντας» όταν αυτές δεν είναι επιθυμητές. Αυτό επιτυγχάνεται με τις σχεδιαστικές επιλογές και την εφαρμογή ειδικών διατάξεων και συστημάτων που ρυθμίζουν τους μηχανισμούς διάδρασης του κτιρίου με τα στοιχεία του τοπικού κλίματος. Για παράδειγμα, η ηλιακή ακτινοβολία που λειτουργεί την ψυχρή περίοδο ως πηγή θερμότητας μπορεί να συλλέγεται από τα διαφανή στοιχεία του κελύφους, δηλαδή παράθυρα και μπαλκονόπορτες. Αντίστροφα, τη θερμή περίοδο, όταν η εισερχόμενη θερμότητα δεν είναι επιθυμητή, ειδικές διατάξεις σκιασμού αποτρέπουν την ηλιακή πρόσοδο στο εσωτερικό του κτιρίου. Αντίστοιχα, ο άνεμος μπορεί να είναι επιθυμητός στο εσωτερικό των κτιρίων το καλοκαίρι για δροσισμό, ενώ τον χειμώνα ειδικές διατάξεις ανακόπτουν τη διεύθυνση και την ταχύτητά του προκειμένου να προφυλάξουν το κτίριο από το ψυχρό μέτωπο και, κατά συνέπεια, να αποτρέψουν τις πιθανές απώλειες. Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι σε περιοχές όπου οι κλιματικές συνθήκες μεταβάλλονται εποχιακά, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός πρέπει να στοχεύει στη μεταβλητότητα του κελύφους ούτως ώστε να προσαρμόζεται σε αυτές. Η ημερήσια και εποχιακή μεταβολή του κλίματος καθορίζουν την πολυπλοκότητα και τη δυσκολία του βιοκλιματικού σχεδιασμού ενός κτιρίου. Ο σχεδιασμός ενός κτιρίου για κλίματα όπου χειμώνα-καλοκαίρι η εξωτερική μέση θερμοκρασία είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας άνεσης είναι απλούστερος από τον σχεδιασμό για κρύους χειμώνες και ζεστά καλοκαίρια. Το κλίμα της χώρας μας έχει αυτά τα χαρακτηριστικά, γεγονός που κάνει τον βιοκλιματικό σχεδιασμό περισσότερο απαιτητικό, αλλά και που ταυτόχρονα τον καθιστά μεγαλύτερη πρόκληση (Στο ίδιο).

Ένας σημαντικός παράγοντας για την επιτυχία του βιοκλιματικού σχεδιασμού είναι ο προσδιορισμός των θερμικών και άλλων απαιτήσεων που αναφέρονται στη λειτουργία του κτιρίου. Όπως αναλύεται στη συνέχεια, η λειτουργία ενός κτιρίου και ο χρονικός προσδιορισμός της θέτουν τις απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιηθούν από τον σχεδιασμό. Εφόσον η ενέργεια που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι κυρίως ανανεώσιμη, καλό είναι να προσδιορίζονται επακριβώς οι απαιτήσεις για να χρησιμοποιείται η ελάχιστη απαιτούμενη. Ένα κτίριο γραφείων λειτουργεί καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, αλλά το ωράριο λειτουργίας του συνήθως περιορίζεται σε κάποιες ώρες τις ημέρας (09:00-17:00). Ένα σχολείο λειτουργεί συνήθως το διάστημα από Σεπτέμβριο μέχρι Ιούνιο και για τις πρωινές μόνον ώρες (08:00-14:00). Αντίθετα, μια κατοικία λειτουργεί συνεχώς όλο τον χρόνο και όλο το εικοσιτετράωρο. Η απαίτηση, λοιπόν, για συνθήκες άνεσης πρέπει να προσδιορίζεται στη χρονική διάρκεια κατοίκησης ή/και χρήσης, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας και να επιλέγεται ο κατάλληλος σχεδιασμός (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 22-23).

Από τα παραπάνω, συνάγεται παραστατικά πως ο βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, η οποία πρέπει να μελετά ισορροπημένα τα θέματα της ενεργειακής αλληλεπίδρασης ενός κτιρίου με το περιβάλλον του. Ανεξάρτητα του εάν επικεντρώνεται η προσοχή του μελετητή στην παθητική θέρμανση, στον φυσικό φωτισμό, στον φυσικό αερισμό ή στον παθητικό δροσισμό, η ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου σε όλες τις ώρες και όλες τις εποχές καθορίζει την επιτυχία του σχεδιασμού (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 24).

Οι πρωτόγονες και παραδοσιακές κατασκευές ανά τον κόσμο κυρίως της προβιομηχανικής περιόδου, οι οποίες δεν συνιστούν δείγματα λόγιας αρχιτεκτονικής, αποτελούν παραδείγματα εμπειρικού βιοκλιματικού σχεδιασμού. Η παρατήρηση και εμπειρική γνώση της συμπεριφοράς των τοπικών υλικών και ακολούθως των κατασκευαστικών συστημάτων στο τοπικό κλίμα απέδωσαν μορφές και κελύφη που ενσωμάτωναν μεν τις κοινωνικοπολιτισμικές επιρροές που αποτελούσαν συνήθως τους καθοριστικούς παράγοντες (Rapoport, 1969, σ. 47), αλλά συγχρόνως εξασφάλιζαν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό – λαμβάνοντας υπόψη τα ελάχιστα διαθέσιμα μέσα– συνθήκες θερμικής άνεσης αντίστοιχες με τις απαιτήσεις της εποχής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η ελληνική κατοικία της αρχαίας Πριήνης (βλ. παρακάτω, παρ. 6.3.2) και το ελληνικό παραδοσιακό σπίτι.

Αντίστοιχη προσέγγιση αναγνωρίζεται και σε κτίρια του πρώιμου μοντερνισμού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το μικρό σπίτι που ο Γαλλο-ελβετός αρχιτέκτονας Le Corbusier σχεδίασε για τους γονείς του, στη λίμνη Leman (λίμνη της Γενεύης) στην Ελβετία (Εικόνα 6.2), όπου ο προσανατολισμός, η θέση του ήλιου σε σχέση με το οικόπεδο κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου, η γειτνίαση με το νερό και τις Ελβετικές Άλπεις αποτέλεσαν παραμέτρους που ενσωματώθηκαν στον σχεδιασμό. Τα στοιχεία αυτά αποτυπώνονται στα διερευνητικά αρχικά σκίτσα του αρχιτέκτονα. Έτσι, το επίμηκες παράθυρο που διατρέχει τη νότια όψη και αντικρίζει τη λίμνη εξασφαλίζει, εκτός από τις θεάσεις στη λίμνη, τον απαραίτητο ηλιασμό τους ψυχρούς μήνες και τον φυσικό φωτισμό, αλλά προστατεύεται επαρκώς από την ηλιακή ακτινοβολία τους καλοκαιρινούς μήνες μέσω του οριζοντίου στεγάστρου (Le Corbusier, 2020).

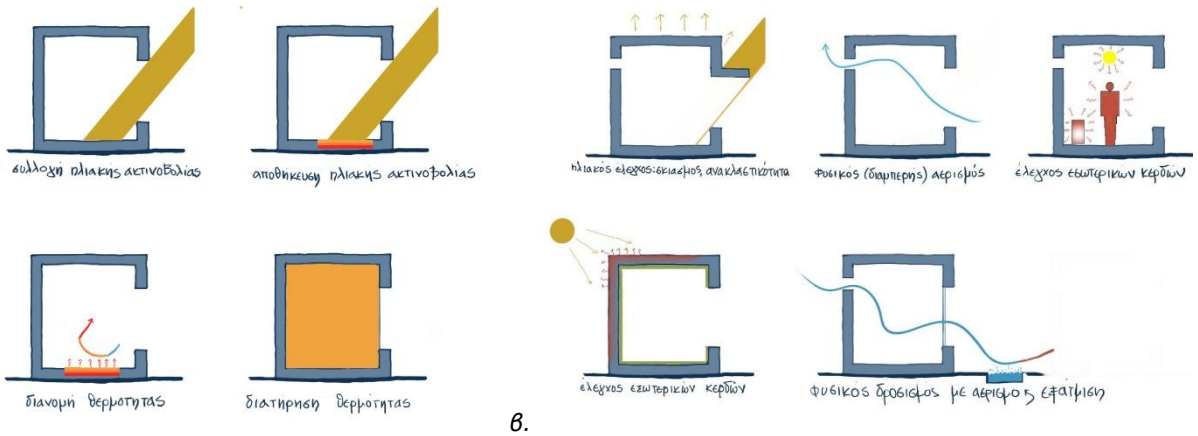


Εικόνα 6.2 *Διαγραμματική κάτοψη και νότια όψη της Villa «Le Lac», Γενεύη, Ελβετία (Le Corbusier, 1923). Πηγή: Ίδια σχεδίαση και προσαρμογή (Ε. Αλεξάνδρου) από Le Corbusier (2020).*

Όμως, η σταδιακή εξάρτηση του ανθρώπου από τα μηχανικά μέσα που παρείχαν τη δυνατότητα απομόνωσης του εσωτερικού περιβάλλοντος από το εξωτερικό, εξασφαλίζοντας συνθήκες άνεσης σε συνδυασμό με το σχετικά χαμηλό κόστος της ενέργειας, οδήγησε σταδιακά στην απομάκρυνση των αρχών του σχεδιασμού από εκείνες της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής. Η πετρελαϊκή κρίση το 1973 (βλ. Κεφ. 1, παρ. 1.2) ανέδειξε τις παθογένειες αυτής της εξάρτησης και επανέφερε τις αρχές του βιοκλιματισμού –κυρίως των «ηλιακών» κτιρίων (*solar houses*)– στον σχεδιασμό και στη λειτουργία των κτιρίων, χωρίς όμως να γίνεται ευρεία εφαρμογή, παρά μόνο τα τελευταία χρόνια.

Μεταξύ των αρχών του βιοκλιματικού σχεδιασμού είναι η διατήρηση και παραγωγή ενέργειας και η μείωση των εκπομπών, που επιτυγχάνονται με την εφαρμογή των κατάλληλων στρατηγικών, παρέχοντας συγχρόνως τις βέλτιστες συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης, αλλά και υγιεινής διαβίωσης. Τα παραπάνω επιτυγχάνονται με την αξιοποίηση φυσικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία, η βροχή και η υγρασία, η θερμοκρασία του αέρα και του εδάφους και η φύτευση. Υπάρχουν στρατηγικές και τεχνικές, για παράδειγμα οι υπόσκαφες κατασκευές, οι οποίες εξασφαλίζουν τη θερμική άνεση όλες τις εποχές (Watson & Labs, 1983). Οι περισσότερες, όμως, έχουν εποχιακή εφαρμογή και συχνά δημιουργούνται αντιφάσεις, όπως οι μεγάλες επιφάνειες υαλοστασίων στον Νότο, οι οποίες λειτουργούν ως ηλιακοί συλλέκτες την ψυχρή περίοδο, αλλά το καλοκαίρι αν δεν σκιαστούν επαρκώς επιβαρύνουν σημαντικά τα φορτία ψύξης. Οι βασικές και πιο συνήθεις στρατηγικές, οι οποίες επιτυγχάνονται με ποικίλους τρόπους, είναι: η παθητική θέρμανση (βλ. Κεφ. 7), ο παθητικός δροσισμός (βλ. Κεφ. 8) και ο φυσικός φωτισμός (βλ. Κεφ. 9). Για την ψυχρή περίοδο (παθητική θέρμανση), απαιτείται η αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας –όταν είναι δυνατόν– για θέρμανση και φυσικό φωτισμό, τα εσωτερικά κέρδη και η ελαχιστοποίηση των απωλειών μέσω του κελύφους (θερμομόνωση). Για τη θερμή περίοδο, θετικά στοιχεία είναι η ελαχιστοποίηση των θερμικών προσόδων, ο σκιασμός των ανοιγμάτων, του κελύφους και του

υπαίθριου χώρου και ο αερισμός για δροσισμό άνεσης και εκτόνωση της συσσωρευμένης θερμότητας στο εξωτερικό περιβάλλον. Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι τα εσωτερικά κέρδη σχετίζονται με την άνοδο της θερμοκρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος από πηγές όπως ο φωτισμός, η λειτουργία μηχανημάτων και ο αριθμός των χρηστών. Σε κτίρια με αυξημένο αριθμό χρηστών και μηχανημάτων, όπως τα μεγάλα κτίρια γραφείων, εστιατόρια κ.λπ., αλλά και σε χώρους όπως οι κουζίνες, το μέγεθος των εσωτερικών κερδών είναι συχνά ικανό να μειώσει αισθητά τα φορτία θέρμανσης και μάλιστα σε σημείο που στρατηγικές παθητικής θέρμανσης, όπως η συλλογή ηλιακής ενέργειας για παθητική θέρμανση, να μην προσθέτουν σημαντικά οφέλη τον χειμώνα, ενώ το καλοκαίρι να αυξάνουν σημαντικά τα ψυκτικά φορτία.



α. β.

Εικόνα 6.3 *Στρατηγικές βιοκλιματικού σχεδιασμού για την ψυχρή και τη θερμή περίοδο. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

Παθητικές στρατηγικές	**Ενεργητικές στρατηγικές**	Αρκτικό	Τούνδρα	Ορεινό	Ηπειρωτικό	Εύκρατο	Μεσογειανό	Υποτροπικό	Τροπικό	Σαβάνας	Στέπας	Ερήμου
Όλο το έτος												
Θερμομόνωση		1	1	1	1	2	3					4
Μεγάλη θερμική μάζα			4	4	2	3	2				3	2
Μικρή θερμική μάζα								3	3	2	4	4
Φυσικός φωτισμός		2	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4
	Τεχνητός φωτισμός	2	2	4	4	4						
Χειμώνας												
Παθητική ηλιακή θέρμανση				2	2	1	2					
	Ενεργητική θέρμανση	1	1	1	1	2	4				4	
Εσωτερικές πρόσοδοι		2	2	2	3	3	4					
Καλοκαίρι												
Σκιασμός / Ηλιοπροστασία					4	3	2	2	2	2	1	1
Φυσικός αερισμός					4	2	2	1	1	1	1	1
	Μηχανικός αερισμός	3	3				4	3	2	2	2	2
Νυχτερινός αερισμός						3	2	1	1	1	1	1
	Κλιματισμός / Ψύξη							3	3	3	3	2
Δροσισμός με εξάτμιση										3	2	1

1 Μέγιστη σημασία
2 Μεγάλη σημασία
3 Σχετική σημασία
4 Μικρή σημασία

Εικόνα 6.4 *Στρατηγικές βιοκλιματικού και ενεργειακά αποδοτικού σχεδιασμού σε συσχέτιση με τις διαφορετικές κλιματικές ζώνες. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου & Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με δεδομένα από Watson (2013).*

Τα βήματα που προηγούνται του βιοκλιματικού σχεδιασμού αφορούν την ανάλυση των δεδομένων του τόπου μελέτης και εφαρμογής του κτιρίου, δηλαδή τα κλιματικά και μικροκλιματικά χαρακτηριστικά του, τη γεωμορφολογία και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του άμεσου φυσικού και δομημένου περιβάλλοντος (βλ. Κεφ. 2. παρ. 2.7 & 2.8). Για την καλύτερη κατανόηση των μικροκλιματικών χαρακτηριστικών που ουσιαστικά θα αποτελέσουν και το πλαίσιο διάδρασης του κτιρίου με το περιβάλλον του, απαιτείται και η καταγραφή των επιφανειακών υλικών της περιοχής, καθώς και της φύτευσης. Για τις πιο εύστοχες εφαρμογές, είναι σημαντικό να είναι απολύτως κατανοητά όλα τα χαρακτηριστικά των κλιματικών πηγών, όπως περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3, οι παράμετροι που επιδρούν στη θερμική και οπτική άνεση (βλ. Κεφ. 4), καθώς και η φυσική των κτιρίων (βλ. Κεφ. 5).

Τα εργαλεία του βιοκλιματικού σχεδιασμού που περιγράφονται στη συνέχεια αποτελούν ισότιμες συνθετικές και αρχιτεκτονικές παραμέτρους που πρέπει να ενσωματώνονται στα πρώτα στάδια του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού.

6.2 Προσανατολισμός

6.2.1 Γενικά στοιχεία

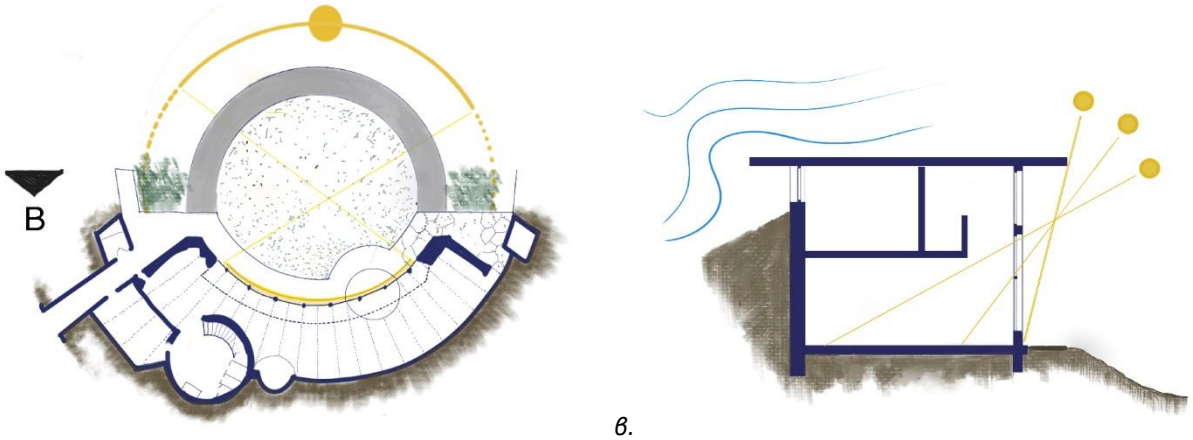
Ο προσανατολισμός αποτελεί βασική –αν όχι τη βασικότερη– στρατηγική αξιοποίησης των στοιχείων του κλίματος. Ήδη από την Αρχαιότητα, ο Βιτρούβιος αναφερόταν στην ανάγκη για συσχετισμό του σχεδιασμού των κτιρίων και της θέσης του ήλιου. «Προϋπόθεση για να διατάξουμε σωστά ένα κτίριο είναι, πρώτα απ' όλα, να λάβουμε υπόψη μας σε ποια περιοχή αυτό θα κατασκευαστεί και ποια κλίση έχει [εκεί] ο κόσμος [δηλαδή το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής]. Δεν πρέπει να κατασκευάζουμε κτίρια του ίδιου τύπου στην Αίγυπτο και στην Ισπανία, στον Πόντο και στη Ρώμη, και σε άλλες, διαφορετικές μεταξύ τους, χώρες και περιοχές. Άλλα μέρη της γης [είναι κοντά] στην τροχιά του ήλιου και βρίσκονται υπό την πίεσή του, άλλα είναι μακριά, άλλα βρίσκονται ενδιάμεσα και είναι εύκρατα» (Vitruvius, Λέφας, μτφ., 1997β, σσ. 17-25 και 35-37-Βιβλίο VI).

Ο προσανατολισμός ενός κτιρίου σχετίζεται με τη διεύθυνση που «αντικρίζουν» οι όψεις του. Αποτελεί σημαντικό στοιχείο του βιοκλιματικού σχεδιασμού διότι ορίζει τη θέση του κτιρίου σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία (ηλιασμός-σκιασμός βλ. Κεφ. 3, παρ. 3.1.3 & 3.1.4) και με την έκθεση στους επικρατούντες ανέμους του πεδίου, καθώς και του κτιρίου (αερισμός-θερμικές απώλειες, βλ. Κεφ. 3, παρ. 3.3.3). Το φυσικό ανάγλυφο και η γεωμετρία του δομημένου περιβάλλοντος αποτελούν τους τελικούς ρυθμιστές των παραπάνω. Δηλαδή ένα κτίριο που βρίσκεται στην ύπαιθρο και σε επίπεδο πεδίο εκτίθεται στον μέγιστο βαθμό και προς όλες τις διευθύνσεις στα κλιματικά στοιχεία. Αντίθετα, όταν βρίσκεται σε περιοχή με έντονη κλίση ή μέσα στον πυκνό αστικό ιστό, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ευρύτερου χώρου καθορίζουν την έκθεσή του στην ηλιακή ακτινοβολία και στον άνεμο, ενώ παράλληλα διαφοροποιούν και τα μικροκλιματικά χαρακτηριστικά.

Όπως προαναφέρθηκε (βλ. Κεφ. 3, παρ. 3.1.3), ο καταλληλότερος προσανατολισμός ως προς τη χειμερινή ηλιακή πρόσοδο είναι ο νότιος. Η αποδεκτή απόκλιση από τον καθαρό Νότο είναι ίση $\pm 30^{o}$, δηλαδή απόκλιση έως 30^{o} προς την Ανατολή ή προς τη Δύση δεν αποφέρει σημαντική μείωση στις ηλιακές προσόδους, σε σχέση με τις αντίστοιχες του νότιου προσανατολισμού (Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, 2017, σ. 67). Ωστόσο, η τελική επιλογή του προσανατολισμού ενός κτιρίου βασίζεται σε μια πληθώρα παραμέτρων, πολλές από τις οποίες, κατά περίπτωση, μπορεί να υπερισχύουν των κλιματικών. Αυτές είναι η τοπογραφία, το άμεσο φυσικό και δομημένο περιβάλλον, η γειτνίαση με οχλούσες λειτουργίες, όπως οδοί με αυξημένο κυκλοφοριακό φόρτο και άρα θόρυβο και ρύπους κ.λπ. (Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, 2017, σ. 65).

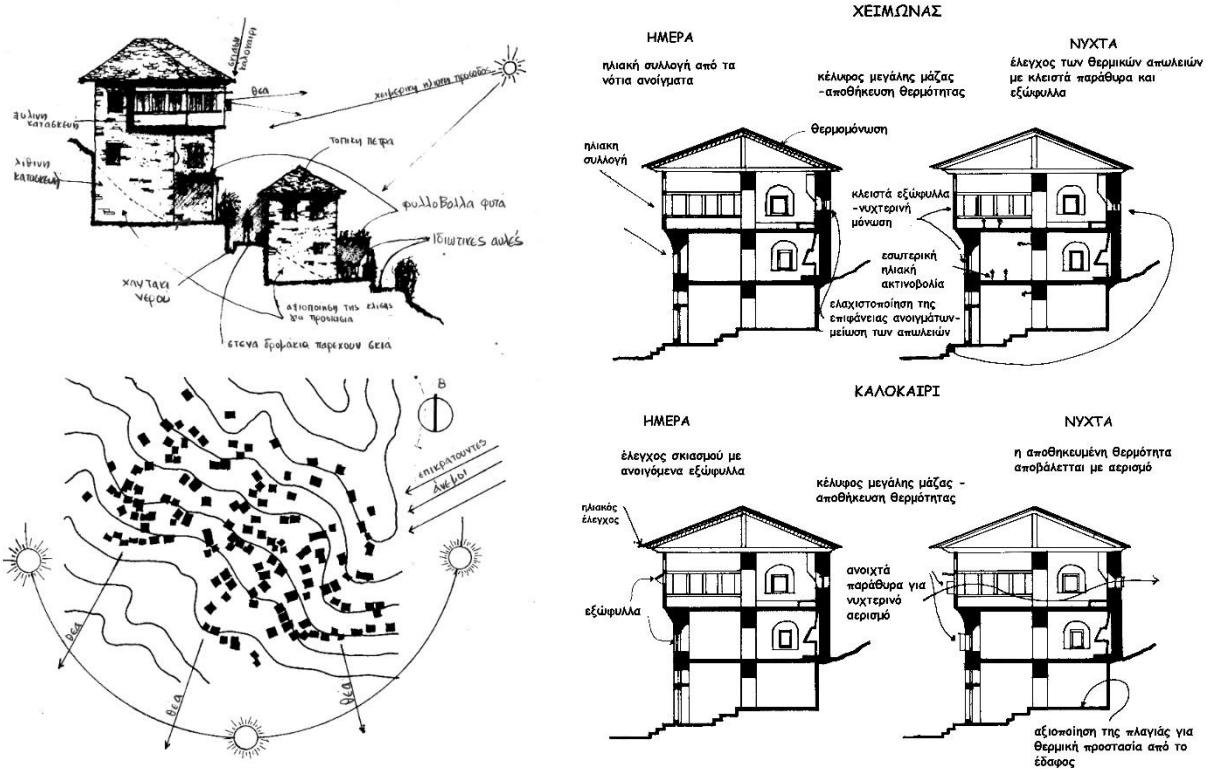
Το Jacobs II house του F.L. Wright (Εικόνα 6.5) αποτελεί πολύ ενδιαφέρον παράδειγμα αξιοποίησης του προσανατολισμού και των τοπογραφικών χαρακτηριστικών. Πρόκειται για ένα ημικύκλιο 180^{o}, στραμμένο

προς τον Νότο, με υπόσκαφη όλη τη βορινή πλευρά του. Η νότια όψη καλύπτεται με υαλοστάσια, ούτως ώστε να συλλέγει στο μέγιστο –λόγω της μορφής της– και να αποθηκεύει θερμική ενέργεια από τον ήλιο, ενώ παράλληλα η υπόσκαφη, βορινή πλευρά προστατεύεται από το ψυχρό μέτωπο, δηλαδή τους ψυχρούς ανέμους. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση των ηλιακών προσόδων και ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών.



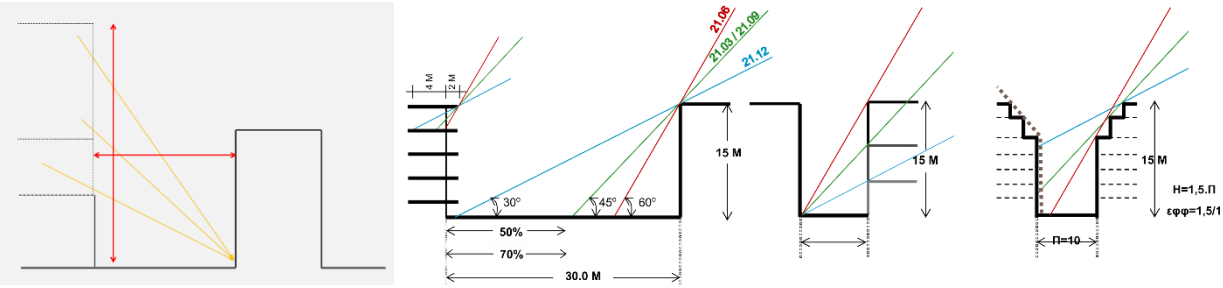
α. *β.*

Εικόνα 6.5 *Jacobs II house (Herbert and Katherine Jacobs Second House), Madison, Wisconsin, ΗΠΑ (F.L. Wright, 1946-1948). α. κάτοψη β. τομή. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*



Εικόνα 6.6 *Βιοκλιματικά χαρακτηριστικά παραδοσιακών κατοικιών στο Πήλιο. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

Μέσα στον πυκνό αστικό όμως, είναι προφανές ότι, ακόμα και αν ο προσανατολισμός είναι ευνοϊκός, η ύπαρξη άλλων κτιρίων μπορεί να εμποδίζει την ηλιακή πρόσοδο ή, αν πρόκειται για κτίριο διαμερισμάτων, κάποια από αυτά να έχουν μικρή εκτεθειμένη επιφάνεια (Εικόνα 6.7).



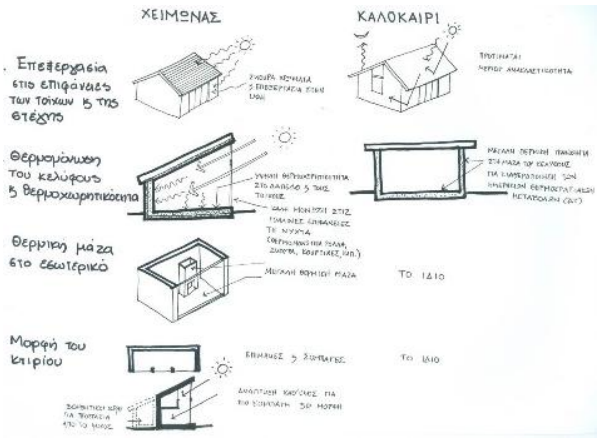
Εικόνα 6.7 *Επίδραση της γεωμετρίας του άμεσου δομημένου περιβάλλοντος στον ηλιασμό των κτιρίων. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου & Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

6.2.2 «Εσωτερικός» προσανατολισμός χώρων

«Κοσμιότητα επιτυγχάνεται επίσης, όταν τα υπνοδωμάτια και οι βιβλιοθήκες φωτίζονται από την ανατολή, τα λουτρά και τα χειμερινά δωμάτια από τη χειμερινή δύση, οι πινακοθήκες και τα άλλα δωμάτια που χρειάζονται ομοιόμορφο φωτισμό από το βορρά αυτή η περιοχή του ουρανού φωτίζεται και σκοτεινιάζει από τη διαδρομή του ήλιου (χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις) και διατηρείται σταθερή και ομοιόμορφη κατά τη διάρκεια της ημέρας» (Vitruvius, Λέφας, μτφ., 1997α, σ. 53 - Βιβλίο Ι). Η σωστή αξιολόγηση του προσανατολισμού καθορίζει την κατάλληλη χωροθέτηση των επιμέρους λειτουργικών χώρων ενός κτιρίου προκειμένου να επιτυγχάνονται οι καλύτερες συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης, με τις λιγότερες θερμικές και ενεργειακές απώλειες και τα μεγαλύτερα θερμικά κέρδη, ανάλογα με την εποχική περίοδο (θερμική ζωνοποίηση). Η χωροθέτηση αυτή συνεκτιμάται με εκείνη που ορίζει ο σχεδιασμός του κτιρίου, όπως οι λειτουργικές απαιτήσεις του προγράμματος, οι θεάσεις, οι προτιμήσεις του χρήστη κ.ο.κ. (Hegger et al., 2012, σ. 69). Για παράδειγμα, σε μία κατοικία, οι βοηθητικοί χώροι, όπως διάδρομοι, αποθήκες, πλυσταριά, λουτρά, κλιμακοστάσια, χώροι στάθμευσης κ.λπ., είναι καλό να τοποθετούνται στον Βορρά προκειμένου να λειτουργούν ως ζώνες ανάσχεσης θερμικών απωλειών (*buffer zones*) από το ψυχρό μέτωπο τον χειμώνα, προστατεύοντας έτσι τους κύριους χώρους. Αντίστοιχα οι τελευταίοι, δηλαδή οι χώροι διημέρευσης (καθιστικό, τραπεζαρία) και τα παιδικά υπνοδωμάτια τοποθετούνται νότια, νοτιοδυτικά και νοτιοανατολικά, με υπολογισμένη επιφάνεια υαλοπινάκων, προκειμένου να επωφελούνται κατά το μέγιστο δυνατόν από τη θερμότητα της ηλιακής προσόδου τον χειμώνα. Το καλοκαίρι, που η γωνία του ήλιου (ύψος) είναι μεγάλη, οι πρόσοδοι είναι αισθητά μειωμένες και μηδενίζονται με τη χρήση σκιάστρων.



α.



β.

Εικόνα 6.8 *Χωροθέτηση χώρων κατοικίας σύμφωνα με τον προσανατολισμό και διαγράμματα βιοκλιματικών στρατηγικών. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

6.2.3 Προσανατολισμός και σχήμα κτιρίου

Η θερμική ζωνοποίηση σχετίζεται βέβαια και με τη γεωμετρία του ίδιου του κτιρίου, δηλαδή αν αυτό αναπτύσσεται κατά την οριζόντιο (επίμηκες), την κατακόρυφο (σε ορόφους) ή αν είναι συμπαγές. Ακόμα αν είναι πανταχόθεν ή μερικώς ελεύθερο ή αν βρίσκεται εν σειρά (σε μεσοτοιχία) με άλλα κτίρια, που σημαίνει ότι οι εκτεθειμένες του πλευρές είναι περιορισμένες. Πιο συγκεκριμένα (Hegger et al., 2012, σ. 69):

- Η **ομόκεντρη ζωνοποίηση** αφορά τα κτίρια με μεγάλο βάθος, όπου οι χώροι που πρέπει να έχουν σταθερές συνθήκες και τη λιγότερη κατά το δυνατόν έκθεση στις κλιματικές συνθήκες, τοποθετούνται στο κέντρο.
- Η **γραμμική ζωνοποίηση**, όπου οι χώροι με τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ηλιασμό για θερμότητα και φυσικό φωτισμό αναπτύσσονται προς τον ευνοϊκό σε σχέση με τον ήλιο προσανατολισμό, δηλαδή νότιο, δυτικό και ανατολικό, ενώ εκείνοι με τις ελάχιστες απαιτήσεις στον Βορρά.
- Η **ζωνοποίηση καθ' ύψος** (όροφο), όπου οι χώροι με τις υψηλές θερμικές απαιτήσεις τοποθετούνται στο μέσον καθ' ύψος.

Το σχήμα και η γεωμετρία του κτιρίου συσχετίζονται άμεσα με τον προσανατολισμό των διαφορετικών επιφανειών του και κατ' επέκταση με την ηλιακή πρόσπτωση διεποχικά (βλ. Κεφ. 3, παρ. 3.1.3), ενώ καθορίζουν και τον λόγο S/V (surface to volume ratio) ή και F/V, που είναι ο λόγος της εκτεθειμένης περιβάλλουσας επιφάνειας κτιρίου προς τον όγκο του (ΤΟΤΕΕ 20701-6 2022, σ. 22). Ο λόγος αυτός αναφέρεται και ως δείκτης συμπαγούς μορφής και όσο μικρότερος είναι, τόσο πιο συμπαγές είναι το κτίριο και άρα τόσο μικρότερες είναι οι θερμικές απώλειές του. Έτσι, στον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης των Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ), αλλά και στον προϋφιστάμενο Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων, ο λόγος S/V συσχετίζεται με τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας του κτιρίου. Οπότε, τα πιο συμπαγή κτίρια με μικρότερη τιμή S/V έχουν μεγαλύτερες επιτρεπόμενες τιμές, και άρα μικρότερες απαιτήσεις θερμομόνωσης σε σχέση με εκείνα που έχουν πιο πολύπλοκο σχήμα, και άρα μεγαλύτερη τιμή S/V. (ΤΟΤΕΕ 20701-2 2021, σ. 56). Γίνεται, δηλαδή, σαφές ότι όταν ένα κτίριο ή διαμέρισμα βρίσκεται σε μεσοτοιχία ή στο μέσον ενός πολυώροφου κτιρίου αντίστοιχα, έχει μειωμένες απώλειες, διότι ελαχιστοποιούνται οι απώλειές του (ειδικά από τη στέγαση στην περίπτωση του διαμερίσματος). Από την άλλη πλευρά, όμως, στη διάταξη αυτή είναι πιθανό να ελαχιστοποιούνται και οι προσβάσεις στην ηλιακή ακτινοβολία και στον άνεμο.



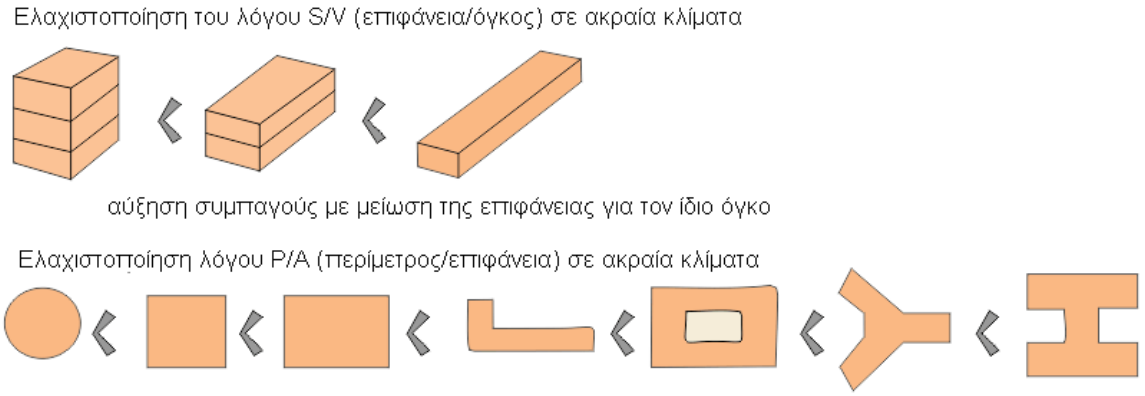
Εικόνα 6.9 *Οι τύποι κατοικίας και η ενεργειακή τους απόδοση σε συνάρτηση με τη γεωμετρία του κελύφους. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου), με δεδομένα από το NHBC (2016, σ. 4).*

Το βέλτιστο σχήμα του κτιρίου αξιολογείται σύμφωνα με το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα (βλ. ενδεικτικά Olgyay, 1963 και Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, 2017, σσ. 64-65 και Εικόνα 6.10):

- Το **κυβικό σχήμα** είναι συμπαγές και έχει μειωμένη συνολική εξωτερική επιφάνεια που εκτίθεται στις κλιματικές συνθήκες και, ως συνέπεια αυτού, μειωμένες θερμικές απώλειες αλλά και

μειωμένα κέρδη. Παράλληλα, δυσχεραίνει τον διαμπερή αερισμό. Η μορφή αυτή μπορεί να είναι η κατάλληλη σε κλίματα με ακραία χαρακτηριστικά, όπως το ερημικό ή το ψυχρό, αλλά όχι για τα εύκρατα.

- Το **ορθογωνικό σχήμα που έχει τον μεγάλο άξονα στη διεύθυνση Βορρά-Νότου** θεωρείται ακόμα δυσμενέστερο και από το κυβικό, για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, καθώς παρέχει ελάχιστες ηλιακές προσόδους τον χειμώνα και μέγιστες το καλοκαίρι από τις κυρίαρχα ανατολικές και δυτικές όψεις του.
- Το **ορθογωνικό σχήμα που έχει τον μεγάλο άξονα στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης** θεωρείται βέλτιστο, καθώς προσφέρει μεγαλύτερες επιφάνειες στον Νότο και στον Βορρά και μικρότερες προς την Ανατολή και τη Δύση, ενώ η «ανοιχτή» κάτοψη (open plan) ευνοεί την κίνηση του αέρα σε όλο το κτίριο για διαμπερή αερισμό.

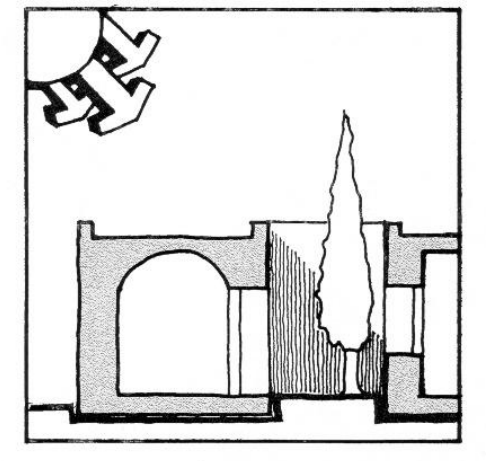


Εικόνα 6.10 *Η επίδραση του σχήματος σε ακραίες κλιματικές συνθήκες. Πηγή: Form and Orientation via USAID PACE-D U.S. Agency for International Development (USAID) Partnership to Advance Clean Energy-Deployment (PACE-D), Public Domain.*

Τέλος, με βάση τον προσανατολισμό και σύμφωνα με τη χρήση και τις στρατηγικές παθητικής θέρμανσης και δροσισμού, καθορίζονται οι αναλογίες και η θέση των ανοιγμάτων και αντίστοιχα των συστημάτων σκιασμού τους, καθώς και η χωροθέτηση των δομικών στοιχείων με θερμική μάζα.

6.3 Χωρικές διατάξεις

6.3.1 Αίθρια



Εικόνα 6.11 *Σχηματική απεικόνιση αιθρίου. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Ευαγγελινός).*

Το αίθριο ή εσωτερική αυλή (Εικόνα 6.11) είναι ο υπαίθριος χώρος στο εσωτερικό ενός κτιρίου. Αποτελεί συνηθισμένη μορφή στις περισσότερες χώρες γύρω από τη Μεσόγειο (Μπούρας & Φιλιππίδης, 2013, σ. 14) από την Αρχαιότητα, κυρίως λόγω κλιματικών αλλά και κοινωνικών παραγόντων. Κατά τον Άρη Κωνσταντινίδη, «το σπίτι με εσωτερική αυλή (αίθριο) αποτελεί ενδημικό τύπο κατοικίας στην Ελλάδα από την Αρχαιότητα, κυρίως λόγω κλιματικών συνθηκών» (Στο ίδιο). Και αυτό διότι το ήπιο κλίμα επιτρέπει την υπαίθρια ζωή για τουλάχιστον 6 μήνες τον χρόνο.

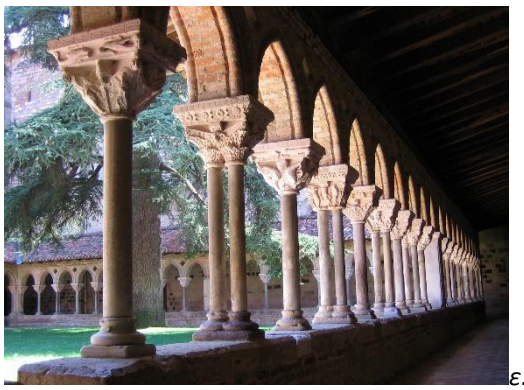
Ο υπαίθριος αυτός χώρος αποτελεί το κέντρο γύρω από το οποίο αναπτύσσονται οι κλειστοί (στεγασμένοι) χώροι και μέσω του οποίου επιτυγχάνονται οι επικοινωνίες, ο αερισμός και ο ηλιασμός αυτών. Σε πιο επιμελημένες κατασκευές αναπτύσσονται και περιμετρικές στοές. Η αρχαία κατοικία στην Πριήνη (Εικόνα 6.12) αποτελεί το κλασσικό παράδειγμα της κατοικίας με αίθριο και περιμετρική στοά. Παρόμοια παραδείγματα ευρίσκονται στις ρωμαϊκές βίλες της Πομπηίας (Εικόνα 6.13.α), του Palladio (Εικόνα 6.13.γ) κ.λπ. Η αρχιτεκτονική μορφή του αιθρίου ή της εσωτερικής αυλής ως πρότυπα τοπικής αρχιτεκτονικής εξελίσσονται και σε νεότερα κτίρια, όπως οι αστικές πολυκατοικίες του Μεσοπολέμου και του πρώιμου μοντερνισμού στην Αθήνα και σε άλλα αστικά κέντρα της Ελλάδας, όπου σταδιακά μορφοποιήθηκαν σε φωταγωγούς, με μειωμένο δηλαδή εμβαδόν, αλλά και σε δημόσια κτίρια παλαιότερα και σύγχρονα με περισσότερους από έναν ορόφους (Εικόνες 6.14 και 6.15).

Οι βιοκλιματικές λειτουργίες των χώρων αυτών είναι πολλαπλές, γεγονός που αποδεικνύεται στη διευρυμένη εφαρμογή τους. Αυτές συνοψίζονται στα ακόλουθα:

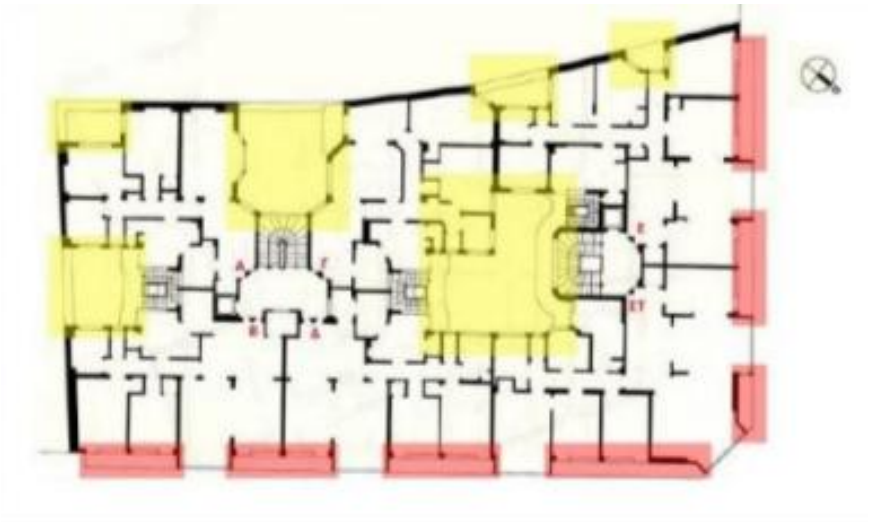
- Κατά τη θερινή περίοδο, στη διάρκεια της ημέρας υπάρχει πάντα μια σκιερή πλευρά και αντίστοιχα τη χειμερινή μια προσήλια για υπαίθρια χρήση.
- Μεγιστοποιούνται οι συνθήκες φυσικού φωτισμού, διότι το φως εισέρχεται στο κέντρο του όγκου του κτιρίου, δημιουργώντας έτσι εσωτερικές όψεις που παρέχουν φυσικό φως στους χώρους που βρίσκονται στην καρδιά του κτιρίου, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό στα κτίρια γραφείων με συμπαγή όγκο (Εικόνα 6.16 – Bateson Building).
- Ευνοείται ο διαμπερής αερισμός, με αντίστοιχο τρόπο με τον φυσικό φωτισμό που περιγράφηκε παραπάνω. Αυτό αποκτά επίσης ιδιαίτερη σημασία στα κτίρια μεγάλου συμπαγούς όγκου και πολλών ορόφων.
- Οι περιμετρικές στοές δημιουργούν ημιυπαίθριους στεγασμένους χώρους για προστασία από την έντονη ηλιακή προστασία και τη βροχή. Επίσης, λειτουργούν ως ζώνες ανάσχεσης ως προς τους υποκείμενους εσωτερικούς χώρους. Κατά τη θερινή περίοδο, παρέχουν σκιερούς υπαίθριους χώρους που σκιάζουν επιπρόσθετα και τους εσωτερικούς χώρους, συμβάλλοντας σε χαμηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες, ενώ κατά τη χειμερινή περίοδο, που η γωνία του ήλιου είναι χαμηλή, η ηλιακή πρόσοδος περνάει μέχρι μέσα στους εσωτερικούς χώρους. Παράλληλα, οι στοές παρέχουν προστασία από τη βροχή.
- Συχνά, τα αίθρια έχουν στοιχεία φύτευσης ή και νερού, γεγονός που βελτιώνει αισθητά το μικροκλίμα και ευνοεί τον αερισμό, καθώς και τον άμεσο δροσισμό με εξάτμιση (Βλ. Κεφ. 8, παρ. 8.4.2) στα ξηρά κλίματα.



Εικόνα 6.12 *Κατοικία στην αρχαία Πριήνη. Πηγή: Ancient Priene model. by Gary Todd from Xinzheng, China, via Wikimedia Commons, CC0.*

α. 
β. 
γ. 
δ. 
ε. 

Εικόνα 6.13 *Ανοιχτά αίθρια σε ιστορικά κτίρια.*
α. Κατοικία στην Πομπηία. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Κτίριο στη Βαρκελώνη. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
γ. Βίλα του Palladio στη Βενετία (Fondazione Giorgio Cini). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
δ. Μονή Moissac, Tarn-et-Garonne, Γαλλία. Πηγή: Moissac, Cloisters of Moissac Abbey, detail by Membeth via Wikimedia Commons, Public domain.
ε. Μονή Αγ. Ιωάννου, Πάτμος. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

α.  β. 

Εικόνα 6.14 *Ανοιχτά αίθρια σε ιστορικά κτίρια.*
α. Η τυπική εσωτερική αυλή των παλιών αθηναϊκών σπιτιών που αναπτύσσονται σε δωμάτια γύρω από αυτήν και η είσοδος σε καθένα από αυτά γίνεται από τις περιμετρικές στοές. Πηγή: Κωνσταντινίδης (1983).
β. Εσωτερικές αυλές και φωταγωγοί στη Μπλε Πολυκατοικία στα Εξάρχεια, Αθήνα (Κ. Παναγιωτάκος, 1932). Πηγή: Υλικό από προσωπικό αρχείο, με παραχώρηση (Α. Χρονοπούλου).

α.  β. 

Εικόνα 6.15 *Ανοιχτά αίθρια σε σύγχρονα κτίρια.*
α. Casa Milà – Pedrera, Antoni Gaudí, Βαρκελώνη. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Κεντρικό κτίριο γραφείων ΓΕΚ ΤΕΡΝΑ, Λεωφ. Μεσογείων, Αθήνα (Hopkins Architects, 2001). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).



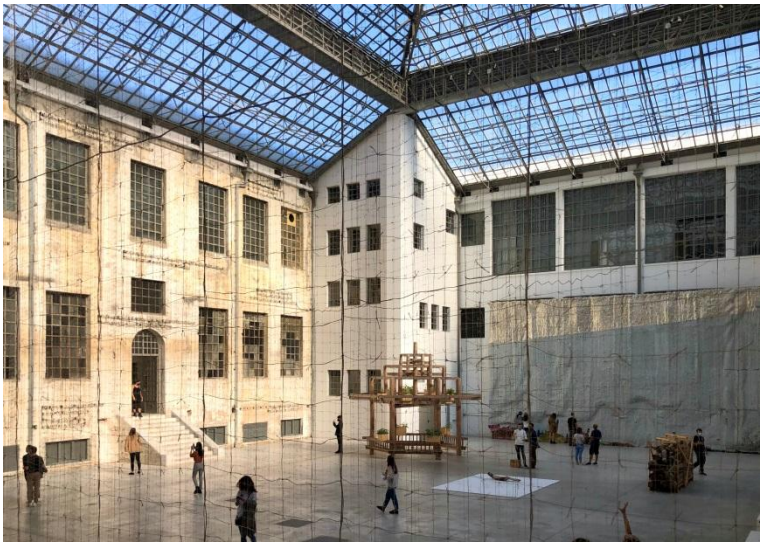
Εικόνα 6.16. *Gregory Bateson Building, Sacramento, ΗΠΑ (Sim Van der Ryn, 1977-1981). α. Άποψη του αιθρίου, β. Άποψη του κτιρίου. Πηγή: Simon, 2024. Photo by courtesy of ©CannonDesign, μετά από σχετική άδεια.*

α.  β. 

Εικόνα 6.17 *Ανοιχτά αίθρια σε δημόσια κτίρια στην Ελλάδα.*
α. Αίθριο Κτιρίου Αβέρωφ, Οδός Πατησίων, Αθήνα, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ (Λύσανδρος Καυταντζόγλου, 1878). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Αίθριο Μουσείου Βυζαντινού Πολιτισμού, Θεσσαλονίκη, Αρχιτέκτονας: Κυριάκος Κρόκος (1994). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

Σε πιο σύγχρονες κατασκευές, και ειδικότερα σε ψυχρές περιοχές, τα αίθρια αποκτούν διάφανη στέγαση, η οποία φέρει μεταβαλλόμενα σκίαστρα. Το στεγασμένο αίθριο έχει επίσης καλή βιοκλιματική λειτουργία, ειδικά εάν υπάρχουν και ανοιγόμενοι φεγγίτες στην οροφή του. Πιο συγκεκριμένα:

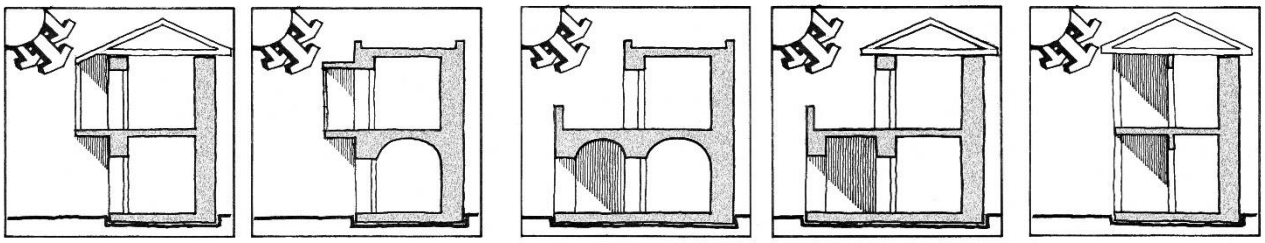
- Παρέχει, όπως και το ανοιχτό αίθριο, φυσικό φωτισμό και διαμπερή αερισμό στους εσωτερικούς χώρους, με ειδικές διατάξεις ανοιγμάτων.
- Την ψυχρή περίοδο, η θερμότητα συσσωρεύεται στην οροφή, από όπου μπορεί να επαναδιοχετευθεί χαμηλά ή στους εσωτερικούς χώρους με τη χρήση ενεργητικών συστημάτων χαμηλής κατανάλωσης (ventilater).
- Φύτευση και στοιχεία νερού βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα και του εσωκλίματος.
- Τη θερμή περίοδο, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, ειδικά στις νότιες χώρες, όπου ο ήλιος είναι «ψηλά» για πολλές ώρες.

α.  β. 

Εικόνα 6.18 *Κλειστά, στεγασμένα αίθρια.*
α. Στοά Σπύρου Μήλιου, Μέγαρο Μετοχικού Ταμείου Στρατού (City Link), Αθήνα (Β. Κασσάνδρας & Λ. Μπόνης, δεκ.1930 και Κίζης & Συνεργάτες, 2004). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Δημόσιο Καπνεργοστάσιο, Αθήνα. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

6.3.2 Στοές – Ημιυπαίθριοι

Οι στοές, δηλαδή οι κιονοστήρικτες δομές (Εικόνα 6.19), αποτελούν κυρίως μεταβατικούς ημιυπαίθριους χώρους κίνησης, αλλά και στάσης, των οποίων η βιοκλιματική λειτουργία ως προς τους χώρους που βρίσκονται πίσω τους αναφέρθηκε εκτενώς στην προηγούμενη παράγραφο (παρ. 6.3.1).

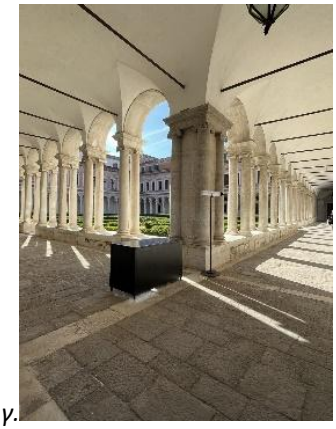


Εικόνα 6.19 *Σχηματική απεικόνιση ημιυπαίθριων χώρων. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Ευαγγελινός).*

Οι δημόσιες στοές έχουν μεγάλο πλάτος και συχνά παραλαμβάνουν και άλλες χρήσεις εκτός από την κίνηση που είναι, όμως, η πιο διαδεδομένη. Με τη στοά, εξασφαλίζεται η προστασία από τα έντονα καιρικά φαινόμενα, όπως η βροχή, ο άνεμος και η έντονη ηλιακή ακτινοβολία. Αποτελούν και μεταβατικούς χώρους μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού, οι οποίοι μετριάζουν τα θερμοκρασιακά δεδομένα και βελτιώνουν το μικροκλίμα γύρω από τους κύριους χώρους.

α.  β. 

Εικόνα 6.20 *Εξώστες.*
α. Εξώστης στον όροφο κατοικίας στον Μαραθώνα. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Ευαγγελινού).
β. Η εξέλιξη της στοάς/εξώστη του παλιού αθηναϊκού σπιτιού στη γνωστή πολυκατοικία της Ε. Βασιλικιώτη στον Ασύρματο/περιφερειακό Φιλοπάππου.

α.  β.  γ. 

δ.  ε.  

Εικόνα 6.21. *Στοές.*
α. Στοά κατοικίας στην Πομπηία. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Αρχοντικό Μπενιζέλων, Πλάκα. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
γ. Fondazione G. Cini, Βενετία, Ιταλία (San Giorgio Maggiore, Andrea Palladio, c.1566). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
δ. Εκατονταπυλιανή Πάρος. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Ευαγγελινού).
ε. Ιστορικό κέντρο Φλωρεντίας. α. Θερινός ηλιασμός. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) και β. Χειμερινός ηλιασμός. Πηγή: Piazza della Libertà (Florence) by Freepenguin via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.

Οι ημιυπαίθριοι διάδρομοι είναι χώροι μικρότερων διαστάσεων, οι οποίοι σχετίζονται άμεσα με τη λειτουργία (κίνηση) ενός κτιρίου. Συχνά, οι χώροι αυτοί μετατρέπονται σε κλειστούς χώρους με την εφαρμογή υαλοστασίων, σταθερών ή ανοιγόμενων. Σε πολλές περιοχές, κυρίως της Μεσογείου και της

Βαλκανικής Χερσονήσου, οι χώροι αυτοί ονομάζονται χαγιάτια. Η βιοκλιματική τους λειτουργία διαφέρει αρκετά από εκείνη της στοάς και διαφοροποιείται σύμφωνα με τον προσανατολισμό του δομικού στοιχείου και τη δομή και γεωμετρία των εσωτερικών χώρων που βρίσκονται πίσω τους. Στην Ελλάδα, τα χαγιάτια ή αλλιώς και λιακωτά βρίσκονται συνήθως σε προσήλιους προσανατολισμούς και σπανιότερα σε βορινούς.

Στην πρώτη περίπτωση, το κλειστό χαγιάτι λειτουργεί ως ηλιακός χώρος που συλλέγει ηλιακή θερμική ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο αέρας στον χώρο αυτόν ζεσταίνεται (φαινόμενο θερμοκηπίου) και μπορεί να διοχετευτεί στους χώρους που είναι πίσω από αυτό άμεσα ή με καθυστέρηση. Εάν ο τοίχος του παρακείμενου χώρου έχει θερμοχωρητικές ιδιότητες, τότε θερμαίνεται σταδιακά κατά τη διάρκεια της ημέρας από την ηλιακή ακτινοβολία, αλλά και τον ζεστό αέρα και συγκρατεί τη θερμότητα στη μάζα του. Η αποθηκευμένη θερμότητα αποδίδεται σταδιακά στον εσωτερικό χώρο, ενώ παράλληλα εκμηδενίζονται οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εντός του εσωτερικού χώρου (Κεφ. 5, παρ. 5.4.4). Κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν η γυάλινη επιφάνεια παρουσιάζει απώλειες προς το εξωτερικό περιβάλλον, το χαγιάτι απομονώνεται χωρικά μέσω των ανοιγμάτων των παρακείμενων χώρων. Επιπρόσθετα, μπορεί να τοποθετηθεί και νυχτερινή μόνωση στα υαλοστάσιά του, προκειμένου να μειωθεί η ροή θερμότητας από μέσα προς τα έξω (Zavitsanou & Brotas, 2011).

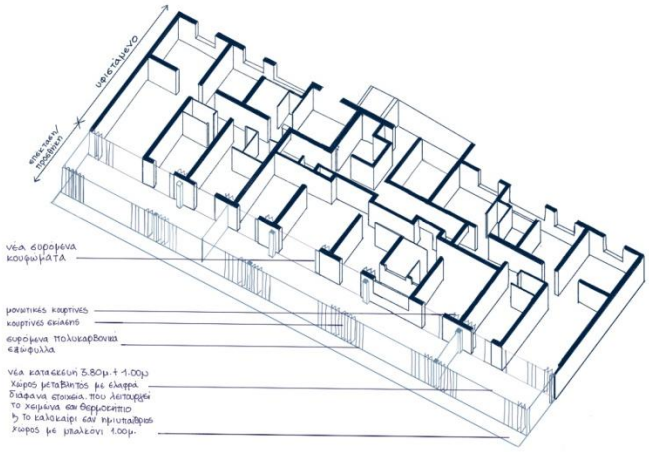
Εξαιρετικό παράδειγμα σύγχρονης τέτοιας εφαρμογής αποτελεί η ολοκληρωτική αναβάθμιση (δομική και ενεργειακή) κτιρίου πολυκατοικίας στο Bordeaux της Γαλλίας, από τους Lacaton & Vassal (n.d.), με την προσθήκη μεταβαλλόμενων ημιυπαίθριων χώρων σε όλα τα διαμερίσματα (Εικόνα 6.24).

α.  *β.* 

Εικόνα 6.22 *Κλειστά χαγιάτια σε παραδοσιακές κατοικίες.*
α. Οικεία στην οδό Τριπόδων, Αθήνα. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Palau Güell, Βαρκελώνη, Ισπανία (Antoni Gaudí, 1888). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).



Εικόνα 6.23 *Κλειστός χώρος κίνησης. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Ευαγγελινού).*

α. 
β. 

Εικόνα 6.24 *α.Δομική και ενεργειακή αναβάθμιση πολυκατοικίας, Bordeaux, Γαλλία (Lacaton & Vassal, 2017). Πηγή: Untitled, by victortsu, via Flickr, CC BY-NC 2.0.*

β. Αξονομετρικό. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).

6.3.3 Στέγαστρα – Πέργκολες

Τα στέγαστρα και οι πέργκολες είναι δομικά χωρικά στοιχεία που μπορούν είτε να είναι προσαρτημένα στο κτίριο (βλ. Εικόνα 6.35) ή να συνιστούν ημιυπαίθριους λειτουργικούς χώρους, ή και να είναι αυτόνομες υπαίθριες κατασκευές. Σε όλες τις περιπτώσεις, η γεωμετρία, η μορφολογία και τα χαρακτηριστικά της στέγασής τους είναι τα βασικά συστατικά τους, δηλαδή αν είναι συμπαγή ή διάτρητα, μεταβλητά ή σταθερά, οριζόντια κεκλιμένα ή κατακόρυφα. Όλα τα παραπάνω σχετίζονται με τη χρήση του χώρου και τις απαιτήσεις αερισμού και προστασίας από τη βροχή. Τα στέγαστρα που είναι προσαρτημένα στις όψεις των κτιρίων και στεγάζουν υπαίθριους χώρους, όπως εξώστες και ισόγειους υπαίθριους χώρους, λειτουργούν βιοκλιματικά όπως οι στοές.

Οι πέργκολες στεγάζουν συνήθως χώρους με μεγαλύτερο εμβαδόν από αυτό ενός εξώστη και τις περισσότερες φορές έχουν μεταβλητή στέγαση. Στις παραδοσιακές κατασκευές αποτελούσαν βασικό χαρακτηριστικό των υπαίθριων χώρων των κτιρίων, διότι παρείχαν προστασία από τα καιρικά φαινόμενα. Συνήθως, η στέγασή τους γινόταν με φυλλοβόλα αναρριχητικά φυτά, όπως η κληματαριά, η οποία εξασφάλιζε αποδοτική σκίαση, δροσισμό λόγω του πλούσιου φυλλώματος, καθώς και βελτίωση των μικροκλιματικών συνθηκών. Κατά τη χειμερινή περίοδο, τα φυτά χάνουν το φύλλωμά τους εξασφαλίζοντας τον ηλιασμό του χώρου. Όταν οι πέργκολες καλύπτονται με υφασμάτινα ή άλλου τύπου συμπαγή στοιχεία, χάνεται η δυνατότητα δροσισμού (από τα στοιχεία φύτευσης) και περιορίζονται οι συνθήκες αερισμού. Αντίθετα, η κάλυψη με καλάμια ή πυκνά ξύλινα πηχάκια παρέχει τα παραπάνω, χωρίς όμως να υπάρχει η δυνατότητα εποχικής μεταβλητότητας.

6.4 Το κτιριακό κέλυφος

6.4.1 Υλικά και κατασκευή κτιριακού κελύφους

Το κτιριακό κέλυφος (συμπαγή και διαφανή στοιχεία) αποτελεί, όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου (παρ. 6.1), το όριο μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού χώρου. Μέσω αυτού πραγματοποιείται η ροή της θερμότητας είτε από είτε προς το εσωτερικό του κτιρίου. Για τον λόγο αυτόν, τα στοιχεία και οι ιδιότητες της δομής του χρειάζονται σωστή αξιολόγηση και αντιμετώπιση. Αυτή γίνεται συσχετίζοντας τις απαιτήσεις του λειτουργικού προγράμματος, τη χρήση του κτιρίου (εποχιακή ή μη) και τα κλιματικά και μικροκλιματικά χαρακτηριστικά του πεδίου εφαρμογής. Οι ιδιότητες της δομής σχετίζονται με τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά (αντίσταση θερμοδιαφυγής, διαπνοή, θερμοχωρητικότητα) των συμπαγών μελών και τη διαπερατότητα, την ανακλαστικότητα και την απορρόφηση των διάφανων μελών του (υαλοπίνακες). Βάσει των παραπάνω καθορίζονται η θέση, το πάχος και η σύνθεση των θερμομονωτικών στρώσεων και οι ιδιότητες των υαλοπινάκων αντίστοιχα (βλ. Κεφ. 5). Η θέση της θερμομονωτικής στρώσης στα συμπαγή στοιχεία, δηλαδή εσωτερικά, εξωτερικά ή στον πυρήνα, σχετίζονται κυρίως με τις αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές αποφάσεις (βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.4). Πιο συγκεκριμένα, αν υπάρχουν εμφανή δομικά στοιχεία στην εξωτερική παρειά του κελύφους, όπως εμφανές σκυρόδεμα, οπτοπλινθοδομές, ωμοπλινθοδομές, λίθινες τοιχοποιίες και επενδύσεις από ξύλο, μέταλλο ή άλλα συνθετικά υλικά, τότε η θερμομονωτική στρώση τοποθετείται είτε στον πυρήνα της τοιχοποιίας είτε εσωτερικά. Στη δεύτερη περίπτωση, πρέπει να υπάρξει αντίστοιχη αντιμετώπιση στα σημεία επαφής των οριζόντιων στοιχείων (πλάκες-πατώματα) με το εξωτερικό περιβάλλον για την αποφυγή θερμογεφυρών (βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.4.3 και 5.4.4). Αντίστοιχα, όταν το κτιριακό κέλυφος αποτελείται από θερμοχωρητικά υλικά και προκειμένου αυτά να συμβάλλουν στην εξισορρόπηση των θερμοκρασιακών συνθηκών των εσωτερικών χώρων, τότε η θερμομονωτική στρώση πρέπει να τοποθετείται εξωτερικά ή και πάλι στον πυρήνα της τοιχοποιίας (βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.4.3 και 5.4.4). Η φύση τώρα των θερμομονωτικών υλικών σχετίζεται με τη φύση των υλικών της δομής του κελύφους. Ιδιαίτερα εάν πρόκειται για διαπνέοντα υλικά, όπως λιθοδομές με φυσικά και διαπνέοντα συνδετικά κονιάματα, χωμάτινες τοιχοποιίες κ.ά., τότε και τα θερμομονωτικά υλικά πρέπει να

έχουν τις ίδιες ιδιότητες, και να δίνεται και η κατάλληλη προσοχή στα ζητήματα που σχετίζονται με τη συμπύκνωση (υγροποίηση) των υδρατμών (βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.5). Τέλος, οι ιδιότητες των θερμομονωτικών υλικών πρέπει να πληρούν και τις υπόλοιπες προδιαγραφές που αφορούν τις μηχανικές ιδιότητές τους, τη χημική τους συνάφεια με τις υπόλοιπες στρώσεις, την αντοχή στη φωτιά και, τέλος, τις περιβαλλοντικές τους ιδιότητες.

Όσον αφορά τον καθορισμό των χαρακτηριστικών των υαλοπινάκων που προδιαγράφονται, αξιολογούνται ο προσανατολισμός, το μέγεθος, η χρήση των χώρων και οι αντίστοιχες απαιτήσεις σε φυσικό φωτισμό, θεάσεις κ.λπ., καθώς και οι παθητικές στρατηγικές βιοκλιματικής συμπεριφοράς του κτιρίου (βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.4.5). Για παράδειγμα, οι υαλοπίνακες που χρησιμοποιούνται για συλλογή ηλιακής ενέργειας (παθητικό σύστημα άμεσου κέρδους), πρέπει να έχουν διαφορετικές προδιαγραφές από εκείνους που τοποθετούνται σε βορινούς προσανατολισμούς, οι οποίοι πρέπει να έχουν τις ελάχιστες απώλειες (υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής).

Η διαχείριση του κελύφους γίνεται ακόμη πιο σύνθετη διαδικασία όταν αφορά υφιστάμενα κελύφη που πρόκειται να αναβαθμιστούν θερμικά. Εκεί αξιολογούνται επιπλέον και η υφιστάμενη κατάσταση, η τυπολογία του κτιρίου, η ιστορική αξία και ο βαθμός διατήρησης της φυσιογνωμίας του που μπορεί να είναι θεσμοθετημένος (χαρακτηρισμός κτιρίου).

6.4.2 Στοιχεία σκιασμού – Χειρισμός της ηλιακής ακτινοβολίας και του φυσικού φωτός

Τα στοιχεία σκιασμού έχουν καθοριστική σημασία στην καλή βιοκλιματική συμπεριφορά των κτιρίων σε θερμά κλίματα για την αποφυγή υπερθέρμανσης των εσωτερικών χώρων (Κεφ. 8, παρ. 8.2.2), ενώ παράλληλα μπορούν να λειτουργήσουν και ως μέσα ρύθμισης του φυσικού φωτισμού (Κεφ. 9, παρ. 9.6). **Οι διατάξεις σκίασης πρέπει πάντα να τοποθετούνται έξω από τους υαλοπίνακες προκειμένου να αποφευχθεί η υπερθέρμανση των εσωτερικών χώρων.** Η εσωτερική τοποθέτησή τους δεν προλαμβάνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Εσωτερικά μπορούν να τοποθετούνται τέτοια στοιχεία μόνο για τη ρύθμιση των φαινομένων θάμβωσης ή και ως νυχτερινή μόνωση. Η νυχτερινή μόνωση συνιστά τη στρώση που μειώνει τη διαρρέουσα θερμότητα από το εσωτερικό προς το εξωτερικό (απώλειες θερμότητας) .

Οι διατάξεις σκίασης αποτελούν σημαντικό μορφολογικό και αρχιτεκτονικό στοιχείο και, ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός τους είναι συνυφασμένος με τις βασικές αρχές και τις προθέσεις του σχεδιασμού. Τα σκίαστρα μπορεί να είναι προσαρτημένα στα κουφώματα (εξώφυλλα, ρολά, ειδικές τέντες) και στις όψεις (πανέλα, περσίδες) ή να αποτελούν χωρικές κατασκευές (π.χ. πέργκολες). Διαχωρίζονται σε σταθερά και μεταβλητά. Στα εύκρατα κλίματα, όπου οι συνθήκες μεταβάλλονται εποχικά, είναι σημαντικό τα στοιχεία σκιασμού να μεταβάλλονται, ώστε να σκιάζουν τα ανοίγματα κατά τη θερμή περίοδο και να επιτρέπουν την ηλιακή πρόσοδο κατά την ψυχρή. Στην περίπτωση που είναι σταθερά, τότε πρέπει να υπολογίζονται ούτως ώστε να εξασφαλίζονται οι παραπάνω συνθήκες. Ακόμα, η μεταβλητότητα και ο σχεδιασμός του σκιάστρου συσχετίζονται και με την οπτική άνεση ή την επιθυμία εξασφάλισης της οπτικής επαφής (θεάσεις) με το εξωτερικό περιβάλλον. Άλλη μια απαίτηση που πρέπει να εξασφαλίζεται σε συνθήκες που η σχετική υγρασία είναι υψηλή είναι οι διατάξεις σκιασμού να είναι διάτρητες προκειμένου να παρέχεται στον εσωτερικό χώρο και αερισμός μαζί με τη σκίαση. Τα στοιχεία σκιασμού παρέχουν κατά περίπτωση:

- Ηλιοπροστασία
- Θερμική άνεση
- Οπτική άνεση
- Ιδιωτικότητα
- Μόνωση (όταν πρόκειται για εξώφυλλα συμπαγή προσαρτημένα στα κουφώματα)
- Ασφάλεια

Τα στοιχεία ηλιοπροστασίας μπορεί να είναι εύκαμπτες και άκαμπτες επιφάνειες, ηλιακά φίλτρα και ηλιακά εμπόδια.

Στις εύκαμπτες επιφάνειες ανήκουν **οι τέντες και τα υφάσματα** (*awnings* και *rollers*) (Εικόνα 6.27), που κατασκευάζονται από συμπαγές ή διαφώτιστο, εύκαμπτο υλικό (ύφασμα ή πλαστικές ίνες). Ανάλογα με την πυκνότητα της ύφανσής τους, επιτυγχάνεται ο αποκλεισμός η διάχυση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.20), ενώ μπορούν να εφαρμοστούν σε ανοίγματα, εξώστες και ημιυπαίθριους χώρους, αλλά και σε ανοιχτά αίθρια.

α.  β. 

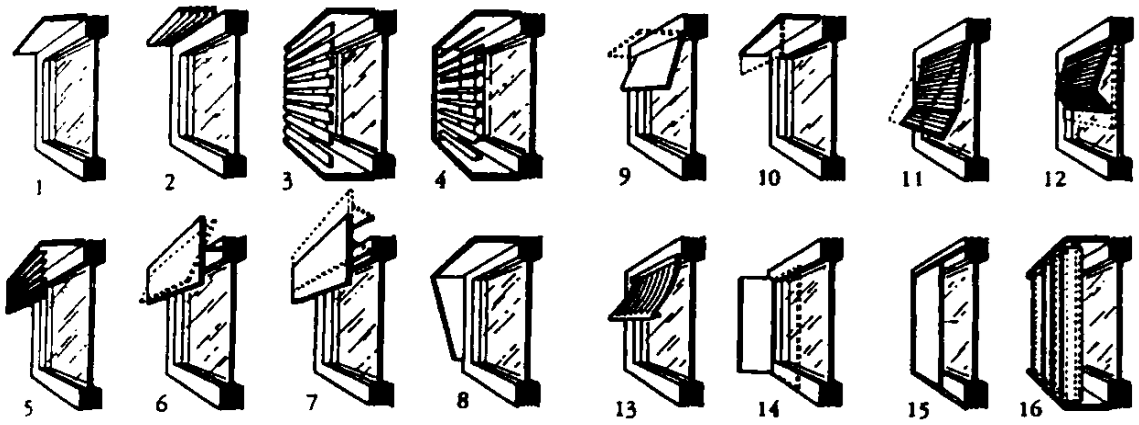
γ. 
δ.  ε.  ζ. 

Εικόνα 6.25 *Εύκαμπτα στοιχεία ηλιοπροστασίας εξωτερικά.*
α. Κέντρο Πολιτισμού Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος, Αθήνα, Ελλάδα (Renzo Piano Building Workshop, 2009-2016. Πηγή: SNFCC_Eingangsbereich by Juergen Weidner via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.
β. Μουσείο Σύγχρονης Τέχνης Astrup Fearnley, Όσλο, Φινλανδία (Renzo Piano Building Workshop, 2006-2012). Πηγή: Astrup Fearnley Museum, designed by Renzo Piano. Tjuvholmen, Oslo by Wojtek Gurak via Flickr, CC BY-NC 2.0.
γ. Εξωτερικές κατακόρυφες τέντες Fondation Cartier (Cartier Foundation for Contemporary Art), Παρίσι, Γαλλία (Jean Nouvel, 1991-1994). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
δ. Μεμονωμένες τέντες και υφάσματα. Πηγή: Photo by Victoire Joncheray on Unsplash.
ε. Εξωτερική τέντα σε κτίριο γραφείων στο Βερολίνο. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
ζ. Κινητικό (kinetic) σύστημα ηλιοπροστασίας, Al Bahr Towers, Abu Dhabi (Atelier Jean Nouvel, 2012). Πηγή: Photo by Karthik B K on Unsplash.

Οι άκαμπτες επιφάνειες κατασκευάζονται από μια πληθώρα υλικών, βαριών ή ελαφριών, φυσικών ή τεχνητών (π.χ. σκυρόδεμα, μέταλλα, ξύλο, καλάμια κ.ά.) και μπορεί να είναι συμπαγείς ή διάτρητες. Σε κάποιες περιπτώσεις, εκτός από την ηλιοπροστασία και τη μείωση των επιπέδων φυσικού φωτισμού, μπορεί να κατασκευάζονται και από ανακλαστικά υλικά, που ανακλούν και ανακατευθύνουν το φυσικό φως προς τον εσωτερικό χώρο, βελτιώνοντας την κατανομή και τα επίπεδα φυσικού φωτισμού. Στις άκαμπτες επιφάνειες περιλαμβάνονται τα προστεγάσματα, τα κατακόρυφα πτερύγια (fins), οι περσίδες (όλων των διευθύνσεων) και οι διάτρητες επιφάνειες (*brise-soleil* ή κλωστρά).

Επιλογή των στοιχείων σκιασμού

Η επιλογή και το είδος των σκιάστρων (βλ. γενικές κατηγορίες στην Εικόνα 6.26) συσχετίζεται και ενσωματώνεται, όπως αναφέρθηκε, στον σχεδιασμό ενός κτιρίου ή χώρου και καθορίζεται από τον **προσανατολισμό** των ανοιγμάτων ή του χώρου που σκιάζουν. Ως γενική αρχή, ο νότιος προσανατολισμός απαιτεί οριζόντια στοιχεία, διότι ο ήλιος βρίσκεται στην ψηλότερη θέση του (Κεφ. 3, παρ. 3.1.2). Ο ανατολικός και δυτικός προσανατολισμός απαιτούν στοιχεία κατακόρυφα, διότι οι γωνίες του ήλιου είναι πολύ μικρές.



Εικόνα 6.26 *Εξωτερικά σκίαστρα: 1 και 8: οριζόντια και κατακόρυφα προστεγάσματα, 2: οριζόντιες περσίδες, σταθερές ή κινητές, 3, 4 και 8: οριζόντιες περσίδες που σκιάζουν το άνοιγμα σε διαφορετικό ποσοστό 6, 7, 9 και 10: πανέλα που σύρονται ή στρέφονται περί οριζόντιο άξονα, 11 και 12: ρολά ανακλινόμενα, 13: τέντα, 14 και 18: σκούρα που στρέφονται ή σύρονται, 16: κατακόρυφες κινητές περσίδες. Πηγή: Stack et al. (2002).*

Ακόμα στην επιλογή των σκιάστρων και των υλικών τους, πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- η χρήση του κτιρίου,
- η ευελιξία και μεταβλητότητα (κινητά ή σταθερά),
- ο μηχανισμός λειτουργίας τους,
- τα υλικά κατασκευής (ανακλαστικά, θερμική συμπεριφορά, συντήρηση, κόστος και περιβαλλοντικές ιδιότητες),
- η δυνατότητα αερισμού.

Η επιλογή των στοιχείων σκιασμού εξαρτάται από τη θέση του ήλιου στον ουρανό και τον προσανατολισμό της επιφάνειας που πρόκειται να σκιαστεί. Από την αρχαιότητα είναι γνωστό πως τα νότια ανοίγματα σκιάζονται καλύτερα με οριζόντια προστεγάσματα. Το βάθος του προστεγάσματος πρέπει να έχει υπολογιστεί έτσι ώστε να εμποδίζει την είσοδο των ηλιακών ακτίνων τους θερμούς μήνες, όταν ο ήλιος είναι ψηλά, ενώ θα επιτρέπει τον ηλιασμό του ανοίγματος τον χειμώνα. Αντίστοιχο σκιασμό με αυτόν του προστεγάσματος μπορεί να προσφέρει συστοιχία οριζόντιων περσίδων τοποθετημένων μπροστά από το άνοιγμα. Το προσόν αυτής της διάταξης σκιασμού είναι ότι έχει μικρότερη προβολή σε σχέση με το προστέγασμα, όμως παρεμβάλλεται στη θέα και στη κίνηση διαμέσου του ανοίγματος (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 126).

Τα ανατολικά και δυτικά ανοίγματα έχουν ανάγκη προστασίας από τη διείσδυση των ακτίνων που προέρχονται από τη χαμηλή θέση του ήλιου στον ουρανό. Στις περιπτώσεις αυτές, πλήρη σκιασμό επιτυγχάνουν κατακόρυφα πετάσματα, που μπορούν να αναλυθούν σε μια συστοιχία κατακόρυφων αλληλοκαλυπτόμενων περσίδων, εάν ενδιαφέρει η εξασφάλιση οπτικής επαφής με τον εξωτερικό χώρο ή από κινητά υφασμάτινα κατακόρυφα ρολά. Για τους ενδιάμεσους προσανατολισμούς, τον επιθυμητό

σκιασμό μπορούν να προσφέρουν εσχάρες, δηλαδή ένας συνδυασμός κατακόρυφων και οριζόντιων περσίδων, το πλάτος, η απόσταση και η κλίση των οποίων εξαρτάται από τη γεωμετρία του ανοίγματος και τη θέση του ήλιου (Στο ίδιο).

Τα στοιχεία σκιασμού που περιγράφηκαν χαρακτηρίζονται ως σταθερά σκίαστρα. Πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να υλοποιηθούν με απλές κατασκευές που δεν χρειάζονται ρυθμίσεις ή συντήρηση. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι οι επιλογές για τη σχεδίασή τους συνεπάγονται έναν συμβιβασμό απαιτήσεων, με συνέπεια να μην προσφέρουν το καταλληλότερο αποτέλεσμα για όλο τον χρόνο λειτουργίας τους, π.χ. ένα οριζόντιο σταθερό σκίαστρο προσφέρει λόγω ηλιακής γεωμετρίας τον ίδιο σκιασμό κατά τον Μάρτη και τον Σεπτέμβρη, έστω και αν την άνοιξη είναι λιγότερο επιθυμητή η προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με το φθινόπωρο (Στο ίδιο).

Καλύτερη προσαρμογή στις ειδικές απαιτήσεις σκιασμού αποτελούν τα κινητά σκίαστρα, όπως παντζούρια, περσιδωτά σκούρα, ρολά, τέντες, κουρτίνες κ.λπ. Η απόδοσή τους είναι μεγαλύτερη όταν τοποθετούνται έξω από τους υαλοπίνακες, επειδή αποτρέπουν την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας και τη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου. Τα κινητά σκίαστρα μπορούν να συνεισφέρουν και στον έλεγχο του φυσικού φωτισμού και αερισμού, πιθανόν στη νυχτερινή μόνωση και στην ασφάλεια του υαλοστασίου. Μειονεκτούν ως προς το κόστος κατασκευής, τη συντήρηση αλλά και το ότι, εάν δεν χρησιμοποιηθούν σωστά, απορρυθμίζουν τη θερμική λειτουργία του κτιρίου (Στο ίδιο).

Για την καλύτερη δυνατή απόδοση των στοιχείων σκιασμού, πρέπει κατά τον σχεδιασμό τους να εξασφαλιστεί ότι δεν θα παγιδεύουν θερμότητα. Περσίδες από υλικά με υψηλή θερμοχωρητικότητα, όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα, μεταδίδουν θερμότητα με αγωγή και με μεταφορά στο κέλυφος του κτιρίου. Τέντες με κλειστά σχήματα παγιδεύουν ποσότητες θερμού αέρα, με κίνδυνο να διοχετευθούν στο κτίριο. Προστεγάσματα και πρόβολοι εμποδίζουν την απομάκρυνση ρευμάτων θερμού αέρα από τις όψεις. Ο εντοπισμός των προβλημάτων είναι αναγκαίος για να οδηγήσει σε λύσεις, όπως την ανεμπόδιστη απομάκρυνση του θερμού αέρα από το κτίριο ή τη θερμικά απομονωμένη σύνδεση των εξωτερικών στοιχείων σκιασμού με το κέλυφος (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 127).

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα φυτά ως στοιχεία σκιασμού. Η τοποθέτηση αναρριχόμενων φυτών σε οριζόντιες ή κατακόρυφες επιφάνειες, όπως σε πέργκολες ή καφασωτά αλλά και σε συρματόσκοινα, εξασφαλίζει τη χαμηλότερη θερμοκρασία αέρα κάτω ή πίσω από τα φυλλώματα σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη διάταξη σκιασμού. Τούτο οφείλεται στην εξάτμιση και διαπνοή των φύλλων, αλλά και στο ότι δεν εμποδίζεται η κυκλοφορία και η διαφυγή του αέρα προς το περιβάλλον. Εάν μάλιστα επιλεγούν φυλλοβόλα αναρριχόμενα φυτά, π.χ. τα κλήματα, τότε προσφέρεται ο κατάλληλος εποχιακός σκιασμός, μια και η ανάπτυξη του φυλλώματος συμπίπτει με τον χρόνο που είναι επιθυμητή η προστασία από τις ακτίνες του ήλιου (Στο ίδιο).

Ακολουθεί κατηγοριοποιημένη παράθεση διατάξεων σκιασμού σύμφωνα με τις παραπάνω διαφοροποιήσεις:

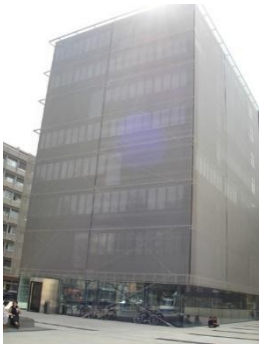
- Οριζόντια προστεγάσματα – αρχιτεκτονικές προεξοχές (για παραδείγματα, βλ. Εικόνα 6.27)
- Σταθερά στοιχεία σκιασμού όψεων (για παραδείγματα, βλ. Εικόνα 6.28)
- Κινητά συστήματα σκιασμού όψεων (για παραδείγματα, βλ. Εικόνα 6.29)
- Σκιασμός με στοιχεία του κελύφους, δηλαδή σταθερή διάταξη που διαμορφώνεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κελύφους (για παραδείγματα, βλ. Εικόνα 6.30)
- Σκιασμός με εξώφυλλα και ρολά προσαρτημένα στο κούφωμα (για παραδείγματα, βλ. Εικόνα 6.31)
- Σκιασμός με στέγαστρα/πέργκολες (για παραδείγματα, βλ. Εικόνα 6.32)
- Σκιασμός με στοιχεία βλάστησης (για παραδείγματα, βλ. Εικόνα 6.33).

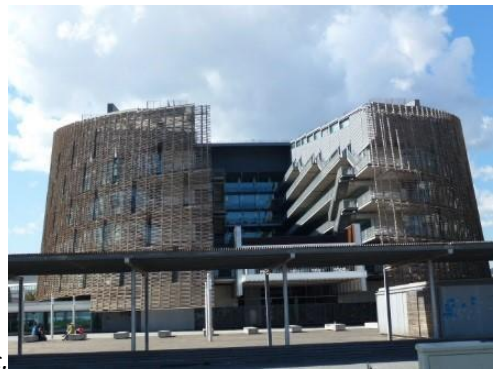
Σκιασμός με οριζόντια προστεγάσματα-αρχιτεκτονικές προεξοχές

α.  β.  γ. 

Εικόνα 6.27 *Σκιασμός με οριζόντια προστεγάσματα-αρχιτεκτονικές προεξοχές. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*
α. Κτίριο γραφείων Πόρτο, Πορτογαλία.
β. Κτίριο εμπορικής χρήσης, Άμστερνταμ Ολλανδία.
γ. Κτίριο γραφείων Βερολίνο, Γερμανία.

Σταθερά στοιχεία σκιασμού όψεων

α.  β.   γ.  δ. 

ε.  ζ.  

Εικόνα 6.28 *Σταθερά στοιχεία σκιασμού όψεων. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*
α. Κτίριο γραφείων στη Λ. Αλεξάνδρας 205, Αθήνα (Α.Ν. Τομπάζης, 1991-1995).
β. Κατακόρυφα στοιχεία Κτίριο γραφείων, Αθήνα (Δ. Ησαΐας, Τ. Παπαϊωάννου, 1997).
γ. Κτίριο γραφείων με επένδυση μεταλλοϋφάσματος (3SK Στυλιανίδης).
δ. Μεταλλικά πλέγματα σε κτίριο γραφείων στο Eidhoven, Ολλανδία.
ε. Οριζόντιες ξύλινες περσίδες Parc Recerca Biomédica Barcelona, Βαρκελώνη, Ισπανία.
ζ. Εξωτερικό κέλυφος από metal deploye.

Κινητά συστήματα σκιασμού όψεων

α.  β.  γ.  δ.  ε. 

ζ.  η.  θ. 

ι.  κ  λ. 

Εικόνα 6.29 *Κινητά συστήματα στοιχεία σκιασμού όψεων.*
α. Πολυκατοικία στην Αθήνα (Δ. Ησαΐας, Τ. Παπαϊωάννου, 2019).
β. Κτίριο γραφείων ΑΒΑΞ στον Λυκαβηττό (Α.Ν. Τομπάζης, 1998). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
γ., δ., ε., ζ., η. Κινητά περσιδωτά σκίαστρα σε κτίρια στη Βαρκελώνη. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
θ. Κτίριο στο Interlaken, Ελβετία. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).
ι.. Συγκρότημα κατοικιών 17 Rue des Suisses, Paris, Social housing (Herzog & de Meuron, 1997-2000). Πηγές: 17 Rue des Suisses, Paris, Social housing by trevor.patt Flickr, CC BY-NC-SA 2.0 & 17 Rue des Suisses, Paris, Social housing by trevor.patt via Flickr, CC BY-NC-SA 2.0.
κ. World Meteorological Organisation (WMO) Building, Γενεύη, Ελβετία. Πηγή: Organisation Meteorologique Mondiale Geneve by MHM55 via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.
λ. Κτίριο γραφείων CH2 Melbourne City Council House 2, Μελβούρνη, Αυστραλία (Mick Pearce/Design Inc, 2006). Πηγή: CH2 (Council House 2) by Wojtek Gurak via Flickr, CC BY-NC 2.0.

Σκιασμός με στοιχεία του κελύφους (σταθερή διάταξη από γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κελύφους)

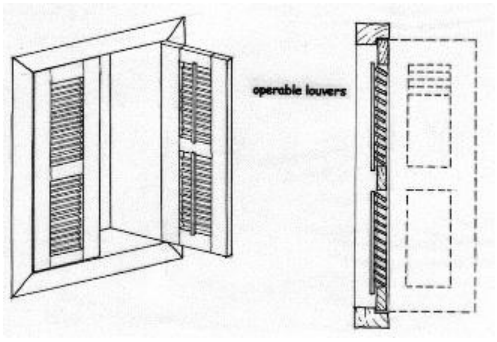
α.  β.  γ. 

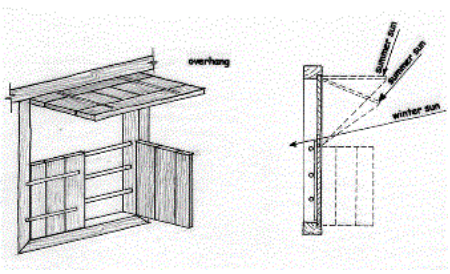
δ.  ε.  ζ. 

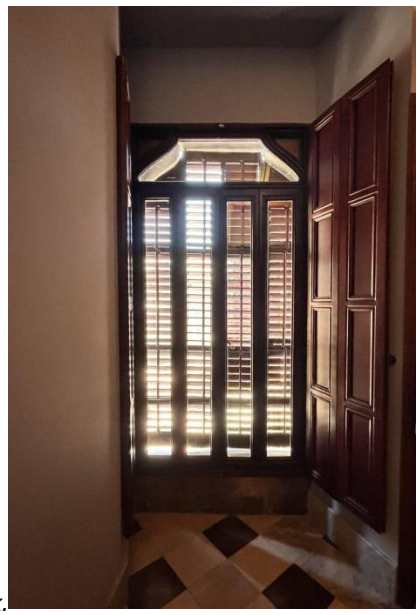
η.  ϑ. 

Εικόνα 6.30 *Σκιασμός με στοιχεία του κελύφους, δηλαδή σταθερή διάταξη που διαμορφώνεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κελύφους. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*
α. Κτίριο γραφείων στην Αθήνα (Ε.Τεχνοδομική) (Τ. και Δ. Μπίρης).
β. Νέο κτίριο γραφείων ΤΣΜΕΔΕ, Αθήνα (ΩΜ Μελετητική, Αθ. Δημοπούλου, Καλ. Σαϊτη , Γ. Σταθόπουλος, Αικ. Χριστοδουλέα, 1995, 1998, 2010-2013).
γ. Κτίριο διοίκησης Glaxo-Smith-Kline, Χαλάνδρι (Κ. Κυριακίδης & Συνεργάτες, Τ. Εξαρχόπουλος, Γ. Αποστολάκος, 1992-1993).
δ. Κατοικία στο Παλαιό Ψυχικό (Π. Νικολακόπουλος).
ε. Κτίριο γραφείων στη Λ. Κηφισίας, Αθήνα, Σκιασμός της Δυτικής όψης.
ζ. Πολυκατοικία στη Μασσαλία (Unite d'Habitation – La cité radieuse), Μασσαλία, Γαλλία (Le Corbusier, 1947-1952).
η. Carpenter Center for the Visual Arts at Harvard University, Cambridge, Massachusetts (Le Corbusier, 1961-64) (Προσανατολισμός: ΝΑ). Πηγή: Carpenter Center, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA by Daderot, via Wikimedia Commons, Public domain.
ϑ. Πολυκατοικία στη Λεωφ. Κηφισίας 252, Σκιασμός δυτικής όψης με χτιστό κλωστρά (Ν. Βαλσαμάκης, 1958).

Σκιασμός με εξώφυλλα και ρολά προσαρτημένα στο κούφωμα

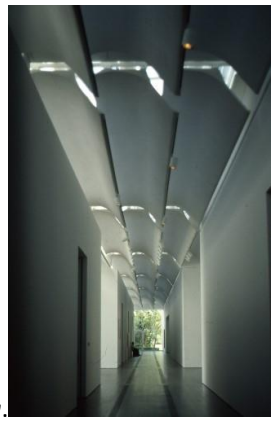
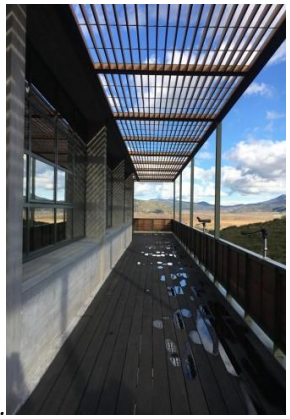
α.  β.  γ. 

δ.  ε.  ζ.  η. 

ϑ.  ι.  κ. 

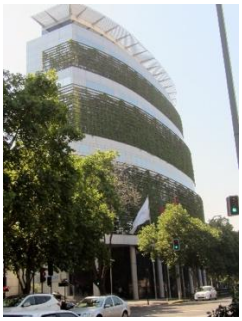
Εικόνα 6.31 *Σκιασμός με εξώφυλλα και ρολά. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*
α. Εξώφυλλα γερμανικού τύπου με περσίδες, Αθήνα.
β. και γ. Εξώφυλλο γερμανικού τύπου με ρυθμιζόμενες περσίδες και ανοιγόμενο κλαπέτο Αθήνα.
δ. και ε. Ανακλινόμενο εξώφυλλο με 1 και 2 τμήματα αντίστοιχα, Αθήνα.
ζ. και η. Εξώφυλλο με 3 τμήματα (οριζόντια και κατακόρυφα), Πήλιο.
ϑ. Ξύλινο ρολό με ανάκλιση και δυνατότητες ρύθμισης, Αθήνα.
ι. Ρολό αλουμινίου, Διπλοκατοικία στου Παπάγου, Αθήνα (Ν. Κτενάς, 2000-2004).
κ. Παράθυρο στο Palau Güell με περσιδωτά εξώφυλλα για σκιασμό και προστασία από τη θερμική ενέργεια του ήλιου το καλοκαίρι και εσωτερικό ταμπλαδωτό στοιχείο για τη μείωση των απωλειών τον χειμώνα.

Σκιασμός με στέγαστρα/πέργκολες

α.  β.  γ.  δ. 

Εικόνα 6.32 *Σκιασμός με στέγαστρα και πέργκολες. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*
α. Πέργολα σκιασμού ανοιγμάτων και εξώστη, κατοικία Αίγινα (Γ. Μακρής και Γ. Καλαβρυτινού).
β. και γ. Πέργολα σκιασμού εξωτερικού και εσωτερικού χώρου, The Menil Collection, Χιούστον, Τέξας, ΗΠΑ (Renzo Piano Building Workshop, 1982-1986).
δ. Στέγαστρο σκιασμού εξώστη και ανοιγμάτων, Μουσείο Περιβάλλοντος Στυμφαλίας (Δ. Ησαΐας και Τ. Παπαϊωάννου).

Σκιασμός με στοιχεία βλάστησης

α.  β.  γ. 

δ. 

Εικόνα 6.33 *Σκιασμός με στοιχεία βλάστησης (αναρριχητικά φυτά). Παραδείγματα.*
α. Caixa Forum Μαδρίτη (Herzog & De Meuron, 2001-2008). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Ομοσπονδιακό Κτίριο Edith Green – Wendell Wyatt, Portland, Oregon, USA (SERA Architects, 2010-2013). Πηγή: Edith Green - Wendell Wyatt Federal front 2012 Building by M.O. Stevens via Wikimedia Commons, GNU Free Documentation License CC BY-SA 3.0 CC BY-SA 2.5, CC BY-SA 2.0, CC BY-SA 1.0.

γ. Κτίριο γραφείων, Santiago, Χιλή (Enrique Browne, 1990). Πηγή: Edificio Consorcio by Rodrigo Fernández via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.
δ. Fondation Cartier σκίαση γυάλινης όψης με ψηλά δέντρα, Παρίσι, Γαλλία (J. Nouvel, 1991-1994). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

6.5 Η φύτευση ως στοιχείο σχεδιασμού

6.5.1 Γενικά στοιχεία

Στον άμεσο περιβάλλοντα χώρο των κτιρίων, αλλά και στο κέλυφός τους (όψεις και στέγαση) (Εικόνα 6.36) μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες μορφές φυτεύσεων, που περιλαμβάνουν στοιχεία όπως δέντρα, θάμνους, εδαφοκαλύψεις ή/και αναρριχητικά φυτά, με πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα. Οι φυτεμένες επιφάνειες συμβάλλουν καθοριστικά στη βελτίωση του μικροκλίματος σε θερμές κυρίως συνθήκες, καθώς ρυθμίζουν τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα μέσω της ρύθμισης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και της διαπνοής (Ευμορφοπούλου, 1994, σ. 256). Μέσω της εξατμισοδιαπνοής επιτυγχάνονται επιφανειακές θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από εκείνες του αέρα. Παράλληλα σκιάζουν τους υπαίθριους χώρους, καθώς και τα κελύφη των κτιρίων (διαφανή και πλήρη στοιχεία) και τα οριζόντια αλλά και τα κατακόρυφα μέρη τους (δώματα, βεράντες, όψεις).

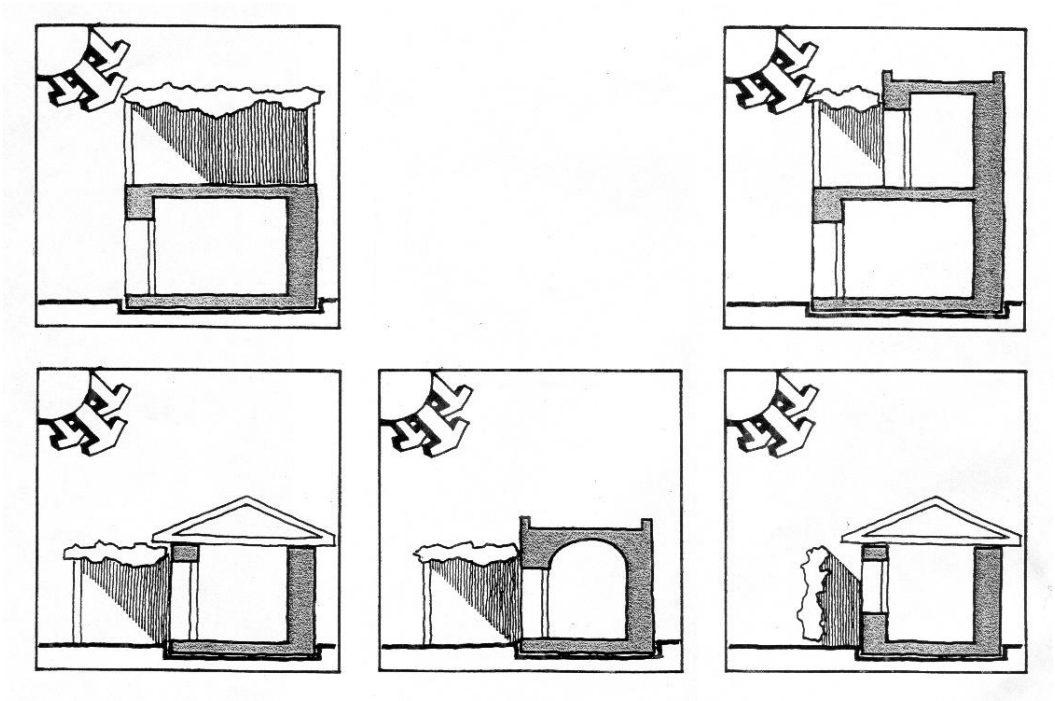
Όσον αφορά τη συμβολή τους στον σχεδιασμό, τα διαφορετικά στοιχεία φύτευσης συμβάλλουν στα εξής:

- Σημαντική μείωση των επιφανειακών θερμοκρασιών. Η επιφανειακή θερμοκρασία μπορεί να είναι και 20°C χαμηλότερη απ' ό,τι μία σκληρή, και μάλιστα αυτή η διαφορά εξαρτάται από το υλικό και το χρώμα της σκληρής επιφάνειας. Με δεδομένο ότι κατά τη θερινή περίοδο ο ήλιος επιβαρύνει κατά το μέγιστο τις οριζόντιες επιφάνειες, η φύτευση συμβάλλει σημαντικά στην ηλιοπροστασία τους.
- Με δεδομένο ότι η θερμοκρασία του αέρα συσχετίζεται με εκείνη των επιφανειών, γίνεται σαφές ότι, περνώντας από μια φυτεμένη επιφάνεια, ο αέρας ψύχεται, σε αντίθεση με μία πυρωμένη από τον ήλιο σκληρή επιφάνεια που θα οδηγούσε στην άνοδο της θερμοκρασίας του.
- Αφαιρούν το διοξείδιο του άνθρακα από τον αέρα: Τα φυτά αφαιρούν από τον αέρα το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και παράγουν οξυγόνο (O_2) κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης.

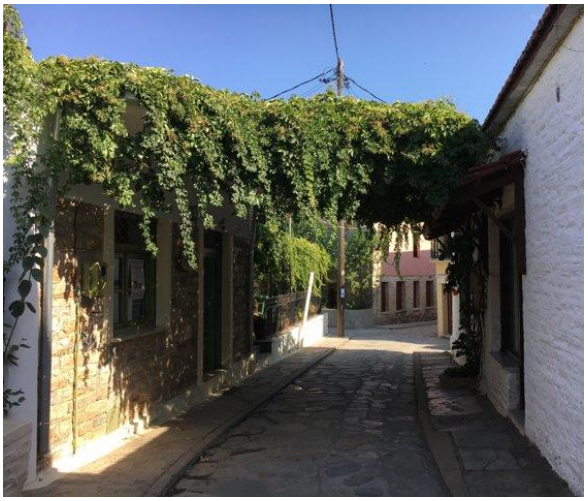
$$6 \times CO_2 + 12 \times H_2O \xrightarrow[\varphi\omega\varsigma]{} C_6H_{12}O_6 + 6 \times O_2 + 6 \times H_2O \quad (6.1)$$

- Αφαιρούν τη σκόνη (αιωρούμενα σωματίδια) από τον αέρα: Όταν βρίσκονται στην πορεία του άνεμου, τα διάφορα στοιχεία της βλάστησης τον «φιλτράρουν» και τον καθαρίζουν από τη σκόνη (Ευμορφοπούλου, 1994, σ. 256). Αυτό συμβαίνει για τους παρακάτω λόγους:
  - Η ελάττωση της θερμότητας του αέρα στην περιοχή των φυτών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατακόρυφης κίνησής του και άρα τη μείωση της δυνατότητας ανύψωσης της σκόνης.
  - Η αυξημένη υγρασία στην περιοχή των φυτών έχει ως αποτέλεσμα τα μόρια της σκόνης να βαραίνουν και να πέφτουν κατευθείαν στο χώμα.
  - Το φύλλωμα δημιουργεί στην ουσία ένα φίλτρο πάνω στο οποίο επικάθεται η σκόνη και παρασύρεται στη συνέχεια κατά κανόνα με τη βροχή στο έδαφος. (Haefeli et al. 1998, σσ. 365-366).
- Επηρεάζουν την κίνηση του αέρα: Όπως τα στοιχεία του δομημένου περιβάλλοντος, έτσι και τα δέντρα και οι θάμνοι επηρεάζουν την κίνηση του αέρα. Μπορούν, λοιπόν, να μειώσουν την ταχύτητα του αέρα ή να οδηγήσουν το ρεύμα του αέρα σε ένα επιθυμητό σημείο.
- Μειώνουν την ηχορύπανση: Οι φυτεύσεις μπορούν να συμβάλουν στη μείωση του θορύβου στα αστικά κέντρα, καθώς τα φυτά ελαττώνουν τον ήχο με απορρόφηση, ανάκλαση και διάχυση (Ευμορφοπούλου, 1994, σ. 259 και Ντάφης, 1994, σ. 113).

- <u>Συνεισφέρουν στον κύκλο του νερού</u>: Οι φυτεύσεις –όταν γίνονται με σωστό τρόπο– συμβάλλουν πολύ θετικά στον κύκλο του νερού, καθώς οι επιφάνειες που καλύπτονται με πράσινο (όχι μόνο χαμηλό, αλλά και δέντρα) είναι διαπερατές από το νερό, επιτρέποντας τη διείσδυσή του στο έδαφος.
- <u>Συμβάλλουν στην ανάκτηση ενός σημαντικού χώρου ζωής</u>: Τα φυτά παρέχουν ένα ζωτικό χώρο για μια ποικιλία εντόμων και, κατά συνέπεια, προσφέρουν τροφή για τα πουλιά (Haefeli et al., 1998, σσ. 365-366), ενισχύοντας την αστική βιοποικιλότητα.



Εικόνα 6.34 *Δυνατότητες εφαρμογής φύτευσης σε σχέση με το κέλυφος των κτιρίων. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Ευαγγελινός).*

α.  β. 

Εικόνα 6.35 *Πέργκολες με αναρριχητικά φυτά. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*
α. Υπαίθρια πέργκολα με κληματαριά σε δημόσιο δρόμο, Λαύκος, Ν. Πήλιο.
β. Πέργκολα με κληματαριά στην εσωτερική αυλή της μονής Κυρα-Παναγιάς Αλοννήσου.

6.5.2 Πράσινες όψεις

Η εφαρμογή βλάστησης στις όψεις των κτιρίων μπορεί να γίνει είτε με αναρριχητικά φυτά είτε με διάφορα είδη βλάστησης που εφαρμόζονται κατευθείαν πάνω στην κατακόρυφη επιφάνεια του κτιρίου.

Στην πρώτη περίπτωση, τα αναρριχητικά φυτά φυτεύονται σε φυσικό χώμα, είτε στο επίπεδο του εδάφους είτε σε φυτοδοχεία (γλάστρες), τοποθετημένες καθ' ύψος στην όψη. Επίσης, ανάλογα με το είδος τους, μπορεί να αναρριχώνται από μόνα τους πάνω στην όψη ή να χρειάζονται κάποιου είδους υποστήριξη. Ως προς το σύστημα υποστήριξης, αυτό μπορεί να είναι άκαμπτη κατασκευή από επιφανειακά στοιχεία (εσχάρες ή καφασωτά) ή γραμμικά στοιχεία (ράβδοι), ή εύκαμπτη κατασκευή από επιφανειακά (πλέγματα) ή γραμμικά στοιχεία (σχοινιά). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση είναι το μέταλλο (εσχάρες, ράβδοι, συρματόσχοινα, πλέγματα), το ξύλο (καφασωτά), αλλά και το πλαστικό (εσχάρες, πλέγματα) (European Federation Green Roofs and Walls, n.d.).

Στη δεύτερη περίπτωση, διάφορα είδη φύτευσης, από χλοοτάπητες έως θάμνους φύονται πάνω σε υδροπονικό σύστημα καλλιέργειας (Εικόνα 6.36). Αυτή η εφαρμογή ονομάζεται ζωντανός τοίχος (*living walls*) ή κατακόρυφος κήπος (*vertical gardens*) και εφευρέθηκαν (1η πατέντα το 1988) και αναπτύχθηκαν από τον βοτανολόγο Patrick Blanc (Patrick Blanc, n.d.). Στους κατακόρυφους τοίχους, το χώμα αντικαθίσταται από κάποιο μέσο υδροπονικής φύτευσης, το οποίο μπορεί να είναι κατά περίπτωση τσόχα ή γεωύφασμα, αφρός, πετροβάμβακας ή ορυκτοβάμβακας (Manso & Castro-Gomes, 2015 και El Menshawy et al., 2022). Απαιτούνται επίσης στεγανωτικές στρώσεις, καθώς και σύστημα άρδευσης, το οποίο παρέχει ταυτόχρονα και λίπανση και θρεπτικά συστατικά στα φυτά (Στο ίδιο).

Και στις δύο περιπτώσεις, η επιλογή των φυτών εξαρτάται από τον προσανατολισμό της όψης, που επηρεάζει τον ηλιασμό, καθώς υπάρχουν φυτά που έχουν αυξημένες ανάγκες σε ηλιακή ακτινοβολία και άλλα που δεν έχουν (ΤΟΤΕΕ 20701-6 2022). Αντίστοιχα, τα διαφορετικά φυτά έχουν διαφορετικές αντοχές στις κλιματικές συνθήκες (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, άνεμος, βροχή), αλλά και στις περιβαλλοντικές επιδράσεις (αέρια ρύπανση) της περιοχής, στην οποία χωροθετείται το κτίριο.



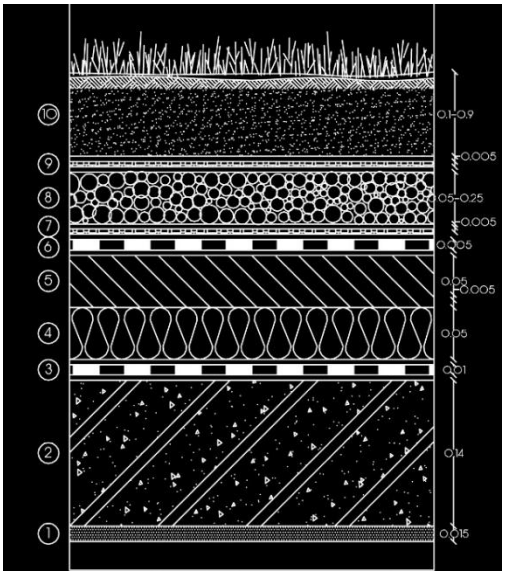
Εικόνα 6.36 *Πράσινες όψεις. Ζωντανός τοίχος στο Μουσείο Quai Branly (Musée du quai Branly – Jacques Chirac), Παρίσι, Γαλλία (Jean Nouvel – Patrick Blanc, 1999-2006). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*

6.5.3 Φυτεμένα δώματα

Η εφαρμογή φυτεμένων δωμάτων σε κτίρια είναι αρκετά κοινή πρακτική σε πολλές χώρες της Ευρώπης. Η φύτευσή τους συμβάλλει σε σημαντική μείωση των θερμικών φορτίων των άμεσα υποκείμενων χώρων, ενώ παράλληλα προστατεύει τα υλικά της κατασκευής τους από τις φθορές που οφείλονται στην παρατεταμένη

έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία. Σε πολλές περιπτώσεις μη βατών δωμάτων, το πράσινο αντικαθιστά κοινά οικοδομικά υλικά, όπως τα χαλίκια ή οι ασφαλτικές μεμβράνες· ενδεικτική οικοδομική (κατασκευαστική) λεπτομέρεια των φυτεμένων δωμάτων, οι βασικές κατηγορίες των οποίων είναι οι παρακάτω (Πετρίδου, 2009 και egreen-ZinCo, n.d.):

- Εκτατικού τύπου: Συντίθενται από στοιχεία βλάστησης μικρού ύψους (φυτά εδαφοκάλυψης, πόες και παχύφυτα – sedum spp). Χαρακτηρίζονται από μικρό πάχος χώματος (2,5-10 εκ.) και συνολικά μικρό πάχος υποστρώματος, γεγονός που συνεπάγεται μικρό βάρος (κορεσμένο φορτίο έως 1400 kg/m^3) και επιτρέπει την εφαρμογή τόσο σε δώματα όσο και σε επικλινείς στεγάσεις με κλίση έως και 35^o. Το σύστημα αυτό έχει μειωμένες ανάγκες συντήρησης και άρδευσης και εφαρμόζεται κυρίως σε μη βατά, επισκέψιμα δώματα νέων, αλλά και υφιστάμενων κτιρίων, τα οποία δεν μπορούν να φέρουν αυξημένα μόνιμα φορτία.
- Εντατικού τύπου: Τα φυτεμένα δώματα εντατικού τύπου μπορούν να φέρουν ποικιλία στοιχείων βλάστησης, π.χ. φυτά εδαφοκάλυψης, θάμνους, αλλά και δέντρα. Χαρακτηρίζονται από σημαντικό πάχος χώματος (15-100 εκ., κατ' ελάχιστο 30 εκ. για θάμνους και μικρά δέντρα), και άρα έχουν αυξημένο βάρος και φορτία για την κατασκευή. Το σύστημα αυτό έχει αυξημένες ανάγκες συντήρησης και άρδευσης, ενώ μπορεί να συνδυαστεί με διαδρόμους κίνησης πεζών (μονοπάτια) ή/και τροχοφόρων, με στοιχεία αστικού εξοπλισμού και νερού κ.λπ.
- Ημιεντατικού τύπου: Τα φυτεμένα δώματα ημιεντατικού τύπου έχουν στοιχεία βλάστησης μικρού ύψους έως χαμηλούς θάμνους, ιδανικά από ξηροφυτική βλάστηση από τοπικά και ενδημικά είδη. Χαρακτηρίζονται από μεσαίο πάχος χώματος (10-25 εκ.). Το σύστημα αυτό έχει ανάγκη από περιοδική συντήρηση και άρδευση.



1. Κονίαμα, 2. Οπλισμένο σκυρόδεμα, 3. Στεγάνωση, 4. Θερμομόνωση, 5. Ελαφροσκυρόδεμα κλίσεων, 6. Στεγάνωση,7. Προστασία από ρίζες, 8. Στρώση αποστράγγισης, 9. Γεωύφασμα, 10. Στρώση φύτευσης.

Εικόνα 6.37 *Βασική λεπτομέρεια φυτεμένου δώματος. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη), με δεδομένα από το περιοδικό ΚΤΙΡΙΟ, τ. 102/1998.*

Στις περιπτώσεις όπου ο κήπος στο δώμα λειτουργεί ως χώρος αναψυχής, τα επιπλέον φορτία των φυτεύσεων και των ατόμων πρέπει να υπολογίζονται στα αρχικά στάδια της κατασκευής.

Η δυνατότητα εφαρμογής φυτεμένων δωμάτων σε υφιστάμενα κτίρια στην Ελλάδα παρουσιάζει δυσκολίες. Η σημαντικότερη δυσκολία αφορά τη στατική επιβάρυνση που επιφέρει στην υφιστάμενη κατασκευή. Το γεγονός αυτό καθιστά την εφαρμογή φυτεμένων δωμάτων με θάμνους ή δέντρα δυνατή μόνο σε νέα κτίρια, καθώς τα φορτία της κατασκευής αυτής είναι σημαντικά και πρέπει να υπολογίζονται από τα αρχικά στάδια της μελέτης. Η λύση που θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε υφιστάμενα κτίρια είναι των

φυτεμένων δωμάτων εκτατικού τύπου. Ακόμα, όμως, και στην περίπτωση αυτή, είναι απαραίτητος ο λεπτομερής υπολογισμός των πρόσθετων φορτίων σε σχέση με τη στατική μελέτη, η αποξήλωση της υπάρχουσας επικάλυψης του δώματος και η χρησιμοποίηση χώματος με μικρό βάρος.

Τέλος, τα φυτεμένα δώματα μπορούν να συμβάλουν θετικά στη μερική αποκατάσταση του κύκλου του νερού στις πόλεις, με τη μείωση του βρόχινου νερού που καταλήγουν στο αστικό δίκτυο απορροής όμβριων υδάτων (Haefeli et al., 1998). Στο σημείο αυτό, τίθεται το ερώτημα γιατί στην Ελλάδα δεν εφαρμόζονται φυτεύσεις στα δώματα υφιστάμενων και καινούργιων κτιρίων, λαμβάνοντας ως δεδομένα τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής για το κτίριο και την πόλη, καθώς και το ότι το βασικό μειονέκτημα –η στατική επιβάρυνση– μπορεί να επιλυθεί. Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα πιθανόν να είναι το γεγονός ότι το φυτεμένο δώμα γίνεται μη βατό, και έτσι αποτρέπεται η πιθανή χρήση του. Συγχρόνως, ως τροχοπέδη στην εφαρμογή φυτεμένων δωμάτων στην Ελλάδα παρουσιάζονται οι πιθανές κακοτεχνίες κατά την κατασκευή, οι οποίες μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υγρασίας στο εσωτερικό των χώρων που βρίσκονται κάτω από το φυτεμένο δώμα.

6.5.4 Φυτοδοχεία

Η εφαρμογή κινητών φυτοδοχείων σε ένα δώμα είναι ιδιαίτερα κοινή πρακτική, η οποία δεν υπόκειται στην αρχιτεκτονική μελέτη, αλλά εφαρμόζεται εκ των υστέρων, από τους ιδιοκτήτες και τους χρήστες των κτιρίων. Για τον λόγο αυτόν, τα σχεδιασμένα παραδείγματα στη βιβλιογραφία είναι περιορισμένα. Η εφαρμογή σταθερών φυτοδοχείων και παρτεριών στα δώματα έχει στόχο τη δημιουργία ενός χώρου πρασίνου για τους χρήστες του κτιρίου, όπου ο χώρος του δώματος χρησιμοποιείται για αναψυχή και για την καλλιέργεια οπωροκηπευτικών φυτών ή ακόμα και για την ανακύκλωση οργανικών υπολειμμάτων (λιπασματοποίηση – composting). Επίσης, σε συνδυασμό με τα φυτοδοχεία στο δώμα, είναι δυνατή η εφαρμογή δοχείων επεξεργασίας και καθαρισμού νερού (Σανταμούρης et al., 2001).

Η εφαρμογή σταθερών φυτοδοχείων ή παρτεριών σε ένα δώμα αποτελεί μόνιμη επέμβαση και, για τον λόγο αυτόν, πρέπει να σχεδιάζεται και να κατασκευάζεται με προσοχή. Επίσης, όταν πρόκειται για επέμβαση σε υπάρχον κτίριο, πρέπει να υπολογίζεται και η στατική επιβάρυνση της κατασκευής. Όταν ο σχεδιασμός των σταθερών φυτοδοχείων συνοδεύεται από τη συνολική αναδιαμόρφωση του δώματος, μπορεί να δημιουργηθεί ένας λειτουργικός και ευχάριστος υπαίθριος χώρος. Στα δώματα των πολυκατοικιών, η δημιουργία παρτεριών για την καλλιέργεια φυτών μπορεί να ενισχύσει την επικοινωνία μεταξύ των κατοίκων. Στα δώματα κτιρίων γραφείων, η εφαρμογή τέτοιων στοιχείων με δέντρα ή θάμνους μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία ενός κοινόχρηστου εξωτερικού χώρου διαλείμματος και αναψυχής.

Η καλλιέργεια φυτών σε δοχεία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στην Ελλάδα, τόσο στις αστικές περιοχές όσο και στην ύπαιθρο. Οι γλάστρες με τα γεράνια και τον βασιλικό είναι κυρίαρχα στοιχεία του υπαίθριου χώρου των κτιρίων, ακόμα και στις πόλεις. Αυτό σημαίνει ότι οι ένοικοι και οι ιδιοκτήτες των κτιρίων μπορεί να είναι περισσότερο δεκτικοί σε μια τέτοια επέμβαση απ’ ό,τι θα ήταν σε σχέση με τη μετατροπή όλης της επιφάνειας του δώματος σε φυτεμένο.

Σχετικό με την εφαρμογή κινητών φυτοδοχείων σε δώματα νέων και υπαρχόντων κτιρίων είναι το παράδειγμα του συστήματος Green GridTM (GreenGrid Roofs, n.d. και Inhabitat, 2006). Μια άλλη εφαρμογή κινητών φυτεμένων στοιχείων αποτελούν τα σακιά φύτευσης, τα λεγόμενα Pocket habitats των Arup (2011). Πρόκειται για μεμονωμένα στοιχεία τα οποία συνθέτονται κατά προτίμηση για τη δημιουργία φυτεμένων καλύψεων. Τα είδη των φυτών, καθώς και τα υλικά των υποστρωμάτων επιλέγονται από μια ευρεία γκάμα χρωμάτων και ειδών, δίνοντας τη δυνατότητα πολλαπλών συνθέσεων. Κάθε σακί ζυγίζει περίπου 20 κιλά, ενώ όλα μαζί συνδέονται μεταξύ τους με ειδικούς συνδέσμους.

6.5.5 Αναρριχητικά φυτά

Στην Ελλάδα, αλλά και σε άλλες μεσογειακές χώρες, οι κατασκευές που φέρουν αναρριχητικά φυτά, και ιδιαίτερα κληματαριές, αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο της διαμόρφωσης των υπαίθριων χώρων. Οι επικρατέστερες μορφές είναι οι πέργκολες. Παρ' όλα αυτά, τα αναριχητικά φυτά συχνά σκιάζουν και κατακόρυφα στοιχεία του κελύφους.

Κατά την εφαρμογή ανάλογων επεμβάσεων σε δώματα νέων ή υφιστάμενων κτιρίων, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η μορφολογία και τα υλικά κατασκευής τους, το είδος των φυτών και η χωροθέτησή τους. Ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά τη μορφολογία και τα υλικά κατασκευής, πρέπει να σημειωθεί ότι η παρουσία μιας πέργκολας με φυτά στο δώμα ενός κτιρίου επιδρά δραστικά στην εικόνα του. Έτσι, πρέπει πραγματοποιείται κατά τρόπο σχεδιασμένο, ώστε να μπορεί να λειτουργήσει οπτικά ως μορφολογικό στοιχείο του κτιρίου και όχι ως μετέπειτα προσθήκη. Η εφαρμογή διατάξεων που φέρουν αναρριχητικά φυτά στα δώματα των υφιστάμενων κτιρίων, με στόχο τον σκιασμό της επιφάνειάς τους, αλλά και τη χρήση τους, αποτελεί πολύ οικείο στοιχείο για τους Έλληνες και λύση που είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις παλαιότερες συνήθειές τους (βλ. Εικόνα 6.35.α και β). Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα προσφυγικών κατοικιών, των οποίων το δώμα διαμορφωνόταν με πέργκολα και χρησίμευε ως χώρος ύπνου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Κωνσταντινίδης, 1987). Επιπλέον, αποτελεί εύκολα υλοποιήσιμη παρέμβαση, της οποίας το κόστος εξαρτάται κυρίως από τα υλικά κατασκευής. Είναι, λοιπόν, δυνατή η εφαρμογή διατάξεων με αναρριχώμενα φυτά στα δώματα των κτιρίων στις ελληνικές πόλεις. Η γενίκευση τέτοιων επεμβάσεων θα συμβάλει στη μετρίαση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας, ενώ συγχρόνως θα έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή των δωμάτων σε ευχάριστους και βιώσιμους χώρους, ευνοώντας τη χρήση τους κατά την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο.

6.6 Διαχείριση υπαίθριων χώρων

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, κάθε κτίριο ή δομημένος χώρος διαδρά θερμικά με το άμεσο περιβάλλον του, δηλαδή με τα μικροκλιματικά του χαρακτηριστικά. Το άμεσο περιβάλλον του, λοιπόν, είναι ένα χωρικό δυναμικό σύστημα, του οποίου τα γεωμετρικά και μικροκλιματικά χαρακτηριστικά επιδρούν στις εσωτερικές συνθήκες κάθε κτιρίου. Η διαχείριση του υπαίθριου χώρου επομένως έχει μεγάλη βαρύτητα στον βιοκλιματικό σχεδιασμό και είναι απόλυτα συνυφασμένη με τα κλιματικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής. Ως εκ τούτου, τα στοιχεία του σχεδιασμού του περιβάλλοντος χώρου πρέπει να ανταποκρίνονται σε όλες τις εποχές.

6.6.1 Φύτευση

Η φύτευση, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, προσφέρει πολλαπλά οφέλη στη βιοκλιματική και περιβαλλοντική συμπεριφορά του κτιρίου. Πιο συγκεκριμένα:

- Βελτιώνει τις μικροκλιματικές συνθήκες (σκιασμός, μείωση των επιφανειακών θερμοκρασιών, δροσισμός και καθαρισμός του αέρα).
- Συμβάλλει στη διαχείριση του ανέμου. Με ειδικές διατάξεις και το επιλεγμένο είδος της φύτευσης δημιουργούνται «ανεμοφράχτες» που εκτρέπουν τη διεύθυνση του ανέμου (Krautheim et al.), προστατεύοντας έτσι από τα ψυχρά μέτωπα το κτίριο. Αντίστοιχα, η κατάλληλη διάταξη και επιλογή της φύτευσης μπορεί να κατευθύνει τον άνεμο προς το επιθυμητό σημείο του οικοπέδου.
- Μειώνει σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα με τη μείωση των χρησιμοποιούμενων συμβατικών δομικών υλικών.
- Μειώνει την ανακλαστικότητα των υπαίθριων χώρων και ρυθμίζει τις συνθήκες σκιασμού.
- Συμβάλλει στη διαχείριση των ομβρίων, μειώνοντας τα πλημμυρικά φαινόμενα.
- Συμβάλλει στην ευζωία των χρηστών.

6.6.2 Επιλογή υλικών κάλυψης υπαίθριων χώρων

Η επιλογή των υλικών εδαφοκάλυψης (Εικόνα 6.38) επηρεάζει σημαντικά τις μικροκλιματικές συνθήκες. Για την αποφυγή της υπερθέρμανσης του περιβάλλοντος χώρου προτιμώνται υλικά με ανακλαστικές ιδιότητες (τιμές albedo δηλ λευκάγειας 0,6-0,9) προκειμένου να αποφεύγονται η απορρόφηση και η συσσώρευση θερμότητας στις επιφάνειές τους. Τέτοια υλικά είναι το ανοιχτόχρωμο σκυρόδεμα, οι ασβεστολιθικές πλάκες, τα ανοιχτόχρωμα μάρμαρα κ.λπ. Παρ' όλα αυτά, προσοχή πρέπει να δίνεται στη χωροθέτηση των πολύ ανοιχτόχρωμων υλικών που βρίσκονται κοντά σε γυάλινες επιφάνειες για την αποφυγή φαινομένων θάμβωσης.

Άλλα υλικά που συμβάλλουν στη βελτίωση των μικροκλιματικών συνθηκών είναι τα απορροφητικά, δηλαδή εκείνα που επιτρέπουν στο νερό να τα διαπερνά (Κεφ. 10, παρ. 10.3.3), εξασφαλίζοντας και πάλι χαμηλές επιφανειακές θερμοκρασίες, καθώς και απορρόφηση ομβρίων.



Εικόνα 6.38 *Βλάστηση για τη βελτίωση του μικροκλίματος. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*

α. Palazzo Querini Stampalia, Βενετία, Ιταλία (Carlo Scarpa, 1963).

β. και γ. Fondation Cartier (Cartier Foundation for Contemporary Art), Παρίσι, Γαλλία (Jean Nouvel, 1991-1994).

δ. Fundació Vila Casas, Βαρκελώνη, Ισπανία.

ε. Bibliothèque Nationale de France, François Mitterand, Παρίσι, Γαλλία (Dominique Perrault, 1996).

6.7 Υπόσκαφες κατασκευές

Υπόσκαφο (υπόσκαφος < υπο- + σκάπτω + -ος) είναι το κτίριο ή το τμήμα κτιρίου που κατασκευάζεται υπό τη στάθμη του φυσικού εδάφους και παρουσιάζει μόνο μια ορατή όψη. Η κατασκευή του γίνεται κάτω από τη στάθμη του φυσικού εδάφους, με επέμβαση σε αυτό και πλήρη επαναφορά στην αρχική του μορφή. Τα υπόσκαφα κτίρια μπορούν να έχουν κύρια ή βοηθητική χρήση (Ν. 4067/2012, Ν. 4759/2020).

Στη βιβλιογραφία, γίνεται μια κατηγοριοποίηση των δύο βασικών τύπων υπόσκαφων κτισμάτων, η οποία βασίζεται κυρίως στον τρόπο ανάπτυξης μέσα στο έδαφος που είναι (Jingwen, 1998 και Κατσούλη, 2018):

- Σε επικλινές έδαφος (*Cliff-face*): Ο τύπος υπόσκαφου κτίσματος σε επικλινές έδαφος συναντάται σε ορεινές περιοχές. Η εκσκαφή γίνεται κάθετα στο ανάγλυφο του εδάφους, δηλαδή οριζόντια, παράλληλα με τις υψομετρικές καμπύλες. Τα κτίρια αυτά έχουν μία στενή όψη με ανοίγματα, μέσω των οποίων πραγματοποιείται ο φυσικός φωτισμός και αερισμός των εσωτερικών χώρων τους. Εσωτερικά, η κατασκευή είναι συνήθως θολωτή, όταν καταλαμβάνει ένα επίπεδο, ενώ μπορεί να αναπτύσσεται και σε δύο ή περισσότερα επίπεδα, το ένα πάνω στο άλλο, π.χ. Matera, οικισμοί Καππαδοκίας, οικισμοί Θήρας κ.λπ.
- Κάτω από επίπεδο έδαφος με αίθριο (*Underground courtyard*): Ο τύπος του υπόσκαφου κτιρίου κάτω από επίπεδο έδαφος συναντάται σε πεδιάδες ή οροπέδια. Η εκσκαφή γίνεται κάθετα στο επίπεδο του εδάφους, δηλαδή κατακόρυφα, και το κενό αποτελεί στην ουσία το αίθριο του κτιρίου. Η κατάβαση στο επίπεδο του αιθρίου γίνεται συνήθως με ράμπα, η οποία μπορεί να είναι υπόσκαφη ή υπαίθρια. Περιμετρικά στο αίθριο και παράλληλα, πλέον, με το έδαφος γίνεται η εκσκαφή των χώρων του κτιρίου, των οποίων οι όψεις και τα ανοίγματα «βλέπουν» προς το αίθριο, μέσω του οποίου γίνεται και ο φυσικός φωτισμός και αερισμός τους. Εσωτερικά, η κατασκευή χωρίζεται σε επιμέρους χώρους, ενώ το ελεύθερο έδαφος πάνω από τους χώρους αξιοποιείται για γεωργικές ή άλλες χρήσεις, π.χ. Matmata Τυνησία, Οικισμοί Οροπεδίου Huangtu (Loess) κ.λπ..

Οι τύποι αυτοί εμφανίζονται στα παραδοσιακά υπόσκαφα κτίσματα που αναπτύχθηκαν σε διαφορετικές περιοχές του κόσμου (Εικόνα 6.39), με παραλλαγές, βέβαια, που έχουν να κάνουν με τη διαφορετικότητα της κάθε τοποθεσίας, το κλίμα, κυρίως τη σύσταση του εδάφους, αλλά και πολιτιστικές, κοινωνικές και θρησκευτικές παραμέτρους.

Η κατασκευή κτιρίων υπό το έδαφος έχει θετικές και αρνητικές επιπτώσεις στις εσωτερικές συνθήκες, οι οποίες αφορούν (Jideofor, 2012):

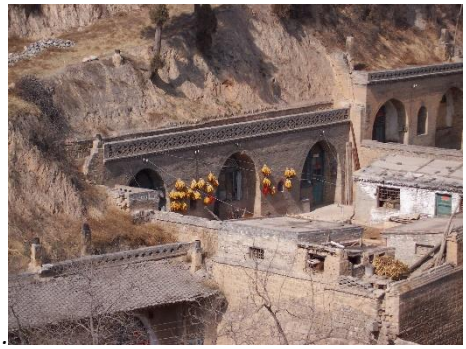
- τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή, με μεταφορά και με ακτινοβολία,
- την αυξημένη θερμοχωρητικότητα και θερμική αδράνεια,
- τον φυσικό φωτισμό,
- τον φυσικό αερισμό.

Η ροή θερμότητας είναι μειωμένη λόγω της επαφής με το έδαφος, του οποίου η θερμοκρασία, ανάλογα με το βάθος και τη σύστασή του (διαφορετικά είδη χώματος ή πετρώματος), έχει μικρότερη διακύμανση σε σχέση με τη θερμοκρασία του αέρα. Η μετάδοση θερμότητας με μεταφορά αφορά, στην ουσία, την ανεμοστεγανότητα, η οποία στις υπόσκαφες κατασκευές επιτυγχάνεται λόγω της προστασίας των επιφανειών του εξωτερικού κελύφους του κτιρίου από τους ψυχρούς ανέμους της χειμερινής περιόδου (Jideofor, 2012). Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία αφορά κυρίως την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, από την οποία τα υπόσκαφα κτίρια προστατεύονται (Jideofor, 2012), λόγω της επαφής τους με το έδαφος, των μειωμένων εξωτερικών επιφανειών, που συνήθως είναι μία και μόνο όψη, αλλά και του εν

γένει σχεδιασμού τους, στις περιπτώσεις με αίθριο. Το είδος και η σύσταση του εδάφους επηρεάζουν τις θερμοφυσικές ιδιότητές του, οι οποίες με τη σειρά τους συμβάλλουν στη θερμοχωρητικότητα και στη θερμική αδράνεια του υπόσκαφου κτιρίου, επιτυγχάνοντας σταθερές θερμοκρασίες, δηλαδή πολύ μικρές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Έτσι, τον χειμώνα, όταν ο καιρός είναι κρύος, η επαφή του κτιρίου με το έδαφος συνεπάγεται μειωμένες θερμικές απώλειες, ενώ αντίστοιχα το καλοκαίρι συμβάλλει στον δροσισμό του. Έτσι, περιορίζεται η απαιτούμενη ενέργεια για θέρμανση και για δροσισμό, αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό εκφράζεται και στις θερμομονωτικές απαιτήσεις με βάση τον ΚΕΝΑΚ, όπου τα στοιχεία σε επαφή με το έδαφος έχουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές (σχεδόν διπλάσια τιμή) του μέγιστου επιτρεπόμενου συντελεστή θερμοπερατότητας (K / U-value) για όλες τις κλιματικές ζώνες της Ελλάδας (ΤΟΤΕΕ 20701-2/2021, Πίνακας 5.α).

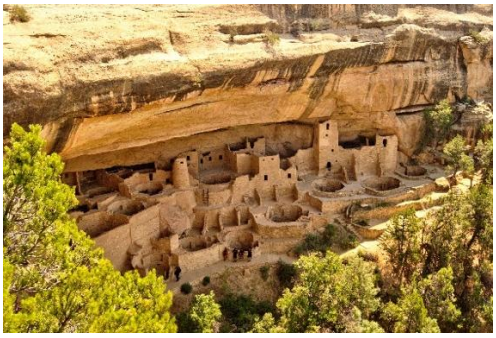
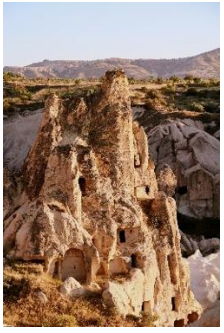
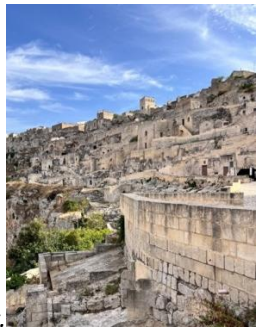
Ως προς τις συνθήκες φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των υπόσκαφων κτιρίων, αυτές εξαρτώνται από το βάθος των χώρων, σε συνδυασμό με τα ανοίγματα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ανοίγματα υπάρχουν μόνο στη μοναδική εξωτερική όψη και, ως εκ τούτου, όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος του χώρου (Κεφ. 9, παρ. 9.5), τόσο χαμηλότερα είναι τα επίπεδα φυσικού φωτισμού στο βάθος. Το μειονέκτημα αυτό είναι δυνατόν να διορθωθεί με φεγγίτες οροφής, όταν ο σχεδιασμός και η σύσταση του εδάφους το επιτρέπουν.

Αντίστοιχα προβληματικές μπορεί να είναι και οι συνθήκες φυσικού αερισμού στο εσωτερικό των υπόσκαφων κτιρίων, εξαιτίας του βάθους των χώρων σε συνδυασμό με την αδυναμία διαμπερούς αερισμού. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε προβλήματα ποιότητας εσωτερικού αέρα (λόγω αδυναμίας ανανέωσης και σε κάποιες περιπτώσεις εκπομπών ραδονίου) και αυξημένης εσωτερικής υγρασίας (λόγω επαφής με το έδαφος). Λύση στα παραπάνω δίνουν ανοίγματα οροφής, όπως οι παραθύρες στις παραδοσιακές κατοικίες της Σαντορίνης, οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα διαμπερούς αερισμού σε συνδυασμό με τα ανοίγματα της όψης. Σε ξηρά-ερημικά κλίματα, όπου η υγρασία του αέρα αλλά και της γης είναι πολύ χαμηλή, οι συνθήκες εσωτερικής σχετικής υγρασίας είναι πολύ καλές.

α .  β. 

γ.  

δ.  ε. 

ζ.  η.  ϑ. 

Εικόνα 6.39 *Παραδείγματα υπόσκαφων κατοικιών.*
α. Οικισμοί Οροπεδίου Huangtu (Loess), Κίνα. Πηγή: Traditional cave houses, alongside Wang Family Grand Courtyard in Lingshi County, Province Shanxi, China by Meier & Poehlmann via Wikimedia Commons, CC BY 3.0.
β. Εκκλησίες στη Lalibela, Αιθιοπία. Πηγή: Bete Giyorgis 01 by Bernard Gagnon, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
γ. Οικισμοί Matmata, Τυνησία. Πηγές: Tunisia matmata pacio by Sarah Murray from Palo Alto, CA, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 2.0 & Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
δ. Αγροτικές κατοικίες στην περιοχή Keldur στην Ισλανδία. Πηγή: Iceland Keldur Earth covered homes by Chris 73 via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
ε. Σπήλαιο Ajanta, Ινδία. Πηγή: Ajanta Caves (452434892) by Danial Chitnis from London, UK, via Wikimedia Commons, CC BY 2.0.
ζ. Mesa Verde Cliff Palace, Colorado. Πηγή: Green trees near brown rock formation, Photo by Wallace Bentt on Unsplash.
η. Οικισμοί στην Καπαδοκία. Πηγή: Beige rock, Photo by Utku Özen | @theutkuozen on Unsplash.
ϑ. Matera, Basilicata, νότια Ιταλία. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

6.8 Διπλοκέλυφες (δικέλυφες) προσόψεις (double-skin facades)

Πρόκειται για ένα σύστημα κελύφους που αποτελείται από δύο επιφάνειες, οι οποίες βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους και τις περισσότερες φορές είναι γυάλινες. Το κενό είναι απαραίτητο προκειμένου να κυκλοφορεί αέρας καθ' όλο το ύψος και να ενσωματώνονται σε αυτό διάφορα συστήματα, σκίασης κ.ά. Βάσει του προτύπου ΕΛΟΤ ΕΝ 13830, διπλοκέλυφο υαλοπέτασμα ορίζεται ως: «ο τύπος των υαλοπετασμάτων που αποτελούνται από μια εσωτερική και μια εξωτερική επιφάνεια (διαφορετικά στοιχεία πλήρωσης) και ένα διάκενο αέρα, το σύνολο του οποίου έχει σχεδιαστεί ως ένα ολόκληρο σύστημα ικανό να καλύπτει τις λειτουργίες ως τοίχος».

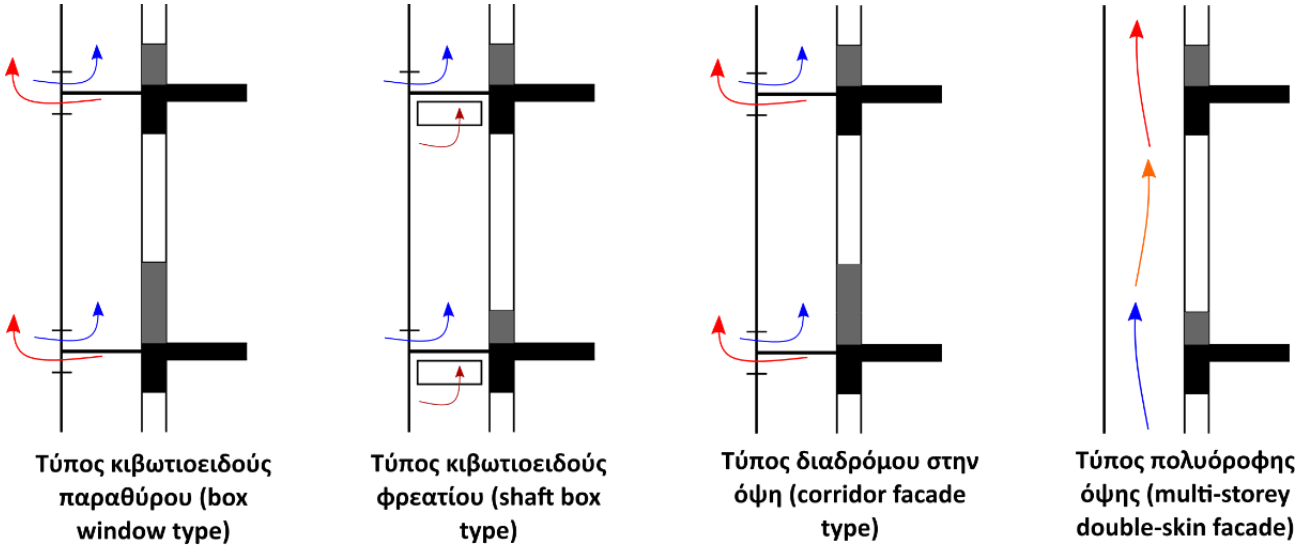
Το κενό μεταξύ των δύο επιφανειών κυμαίνεται από 20 εκατοστά και μπορεί να φτάσει και τα 2 μέτρα. Λειτουργεί ουσιαστικά ως ρυθμιστής των εσωκλιματικών συνθηκών, είτε παρέχοντας επιπλέον μόνωση από τις ακραίες κλιματικές συνθήκες και τον θόρυβο είτε παρέχοντας σκιασμό και αερισμό ή εκτόνωση του ζεστού αέρα, ή και τα δύο. Ο κατακόρυφος αερισμός του συστήματος μπορεί να είναι είτε φυσικός (απευθείας εισαγωγή και εξαγωγή αέρα) είτε μηχανικός. Το διάκενο –ανάλογα με τον προσανατολισμό– λειτουργεί ως θερμοκήπιο, ο ζεστός αέρας του οποίου αξιοποιείται στους υποκείμενους χώρους. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία αυξάνεται ή κατά τη ζεστή περίοδο, το διάκενο αξιοποιείται για την εκτόνωση του θερμού αέρα από το εσωτερικό στο εξωτερικό μέσω της κατακόρυφης κίνησης. Συχνά, στο διάκενο ενσωματώνεται και το σύστημα σκιασμού, ενώ η εξωτερική όψη μπορεί να αποτελείται και από ανοιγόμενα στοιχεία.

Οι δικέλυφες κατασκευές εφαρμόστηκαν πρώτη φορά σε ψυχρά κλίματα (βλ. παραδείγματα στην Εικόνα 6.41), όπου προέχει η θέρμανση των κτιρίων και το σύστημα παρείχε την απαραίτητη επιπλέον μόνωση (Boake, 2003). Σε περιοχές με θερμό και ξηρό κλίμα, όπως είναι οι πόλεις της Σαουδικής Αραβίας, η εφαρμογή τέτοιων συστημάτων αποδείχτηκε προβληματική, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, που έχουν ως συνέπεια υψηλές καταναλώσεις ενέργειας για ψύξη, αλλά και της σκόνης της ερήμου, η οποία παγιδευόταν στο διάκενο (Boake, n.d.).

Οι δικέλυφες κατασκευές διαφοροποιούνται από τις αεριζόμενες όψεις στα εξής σημεία. Οι αεριζόμενες όψεις αποτελούν ουσιαστικά μία εξωτερική επένδυση, η οποία απέχει κατά πολύ λιγότερο απ' ό,τι η δικέλυφη από την όψη του κτιρίου, επιτρέποντας έτσι στον αέρα να περνά και καλύπτεται από συμπαγή υλικά. Παρέχει θερμική προστασία στο εσωτερικό κέλυφος αποσβένοντας τις έντονες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, προστατεύει τα υλικά από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις και συστολοδιαστολές και, τέλος, αποτρέπει τα φαινόμενα συμπύκνωσης των υδρατμών.

Οι διπλοκέλυφες προσόψεις διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες (Oesterle, 2001· Poirazis, 2006 και Εικόνα 6.40):

- **Τύπος κιβωτιοειδούς παραθύρου** (*box window type*): Υπάρχει οριζόντιος και κατακόρυφος διαχωρισμός της όψης σε μικρότερα και ανεξάρτητα μεταξύ τους «κουτιά».
- **Τύπος κιβωτιοειδούς φρεατίου** (*shaft box type*): Περιλαμβάνει σειρά (ή σειρές) από κιβωτιοειδή παράθυρα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κατακόρυφα φρεάτια, που ενισχύουν το φαινόμενο του φυσικού ελκυσμού.
- **Τύπος διαδρόμου στην όψη** (*corridor facade type*): Υπάρχει οριζόντιος διαχωρισμός της όψης, για λόγους ακουστικής άνεσης, πυροπροστασίας ή/και αερισμού.
- **Τύπος πολυώροφης όψης** (*multi-storey double skin facade*): Δεν υφίσταται κανένας οριζόντιος ή κατακόρυφος διαχωρισμός ανάμεσα στα δύο κελύφη και ο αερισμός του διάκενου επιτυγχάνεται με μεγάλα ανοίγματα κοντά στο έδαφος και στο ανώτερο τμήμα του κτιρίου (στέγαση).



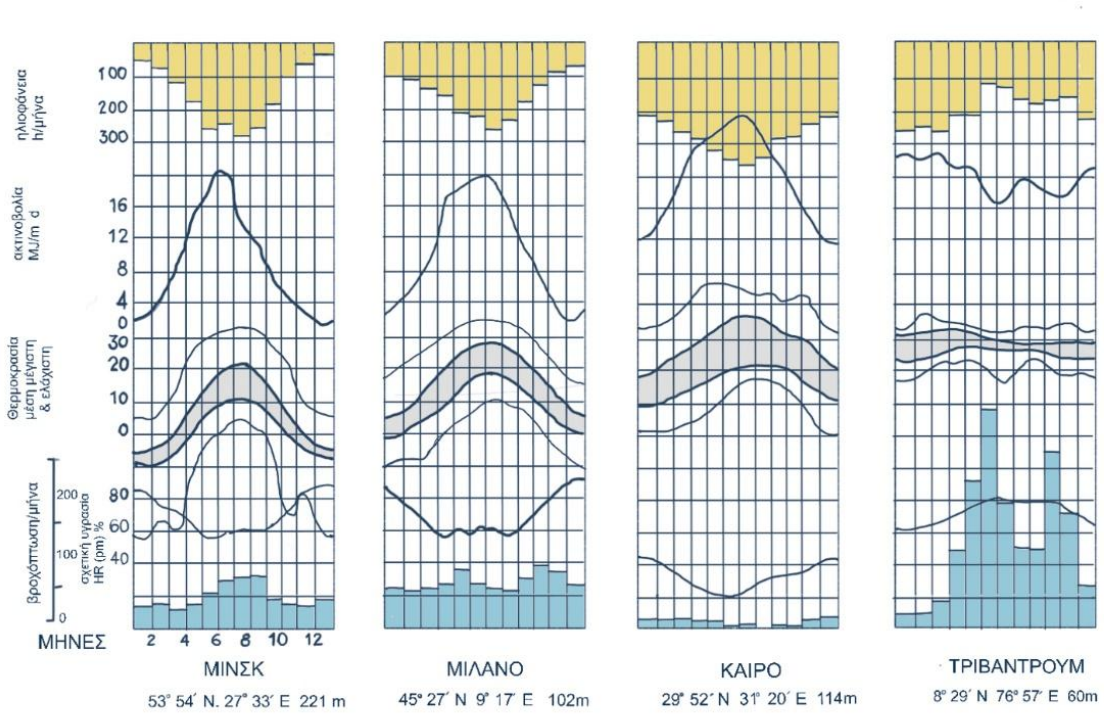
Εικόνα 6.40 *Διαφορετικοί τύποι διπλοκέλυφων προσόψεων (double-skin facades). Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατώτη) με βάση Oesterle et al. (2001) & Poirazis (2006).*

α.  β. 

Εικόνα 6.41 *Δικέλυφες προσόψεις. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*
α. GSW Building, Βερολίνο, Γερμανία (Sauerbruch Hutton, 1995-1998).
β. Office and commercial building Triangel Building, Βερολίνο, Γερμανία (J.P. Kleihues).

6.9. Παραδείγματα βιοκλιματικών εφαρμογών από την παραδοσιακή αρχιτεκτονική

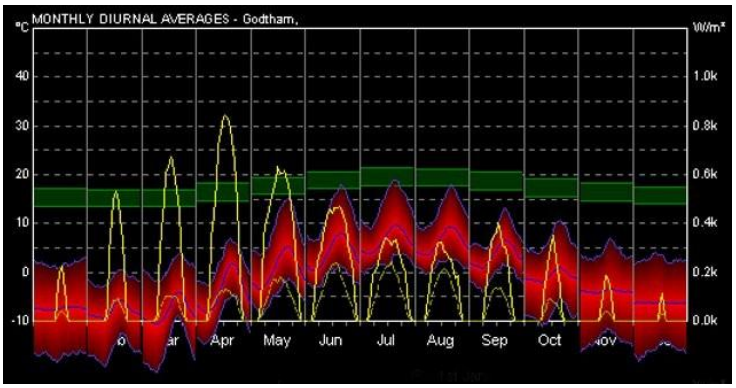
Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή αυτού του κεφαλαίου, η παραδοσιακή και κυρίως η προβιομηχανική και πρωτόγονη αρχιτεκτονική προσφέρουν μια σειρά κατασκευών που ανταποκρίνονται με τον καλύτερο τρόπο στα τοπικά κλιματικά χαρακτηριστικά. Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι ότι σε όμοιες κλιματικές ζώνες ανά τον κόσμο, οι αρχιτεκτονικές και δομικές χειρονομίες ταυτίζονται ως προς τα βιοκλιματικά τους χαρακτηριστικά, ακόμα και αν οι μορφές τους υπαγορεύονται πρωτίστως από κοινωνικοθρησκευτικές και οικονομικές παραμέτρους. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τυπολογίες σε καθεμία από τις γενικότερες κλιματικές ζώνες της Γης: το ψυχρό κλίμα (παρ. 6.9.1), το εύκρατο (παρ. 6.9.2), το θερμό και ξηρό (ερημικό κλίμα) (παρ. 6.9.3) και το υγρό και θερμό (τροπικό κλίμα) (παρ. 6.9.4).



Εικόνα 6.42 *Διαγραμματική απεικόνιση βασικών κλιματικών δεδομένων για τους 4 κύριους κλιματικούς τύπους. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).*

6.9.1 Ψυχρό κλίμα

Το ψυχρό κλίμα χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες όλο τον χρόνο (από 6^{o} έως -40^{o}), μέτριες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις (ημερήσιες και ετήσιες) περιορισμένη ηλιοφάνεια και τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 6.43), μέτρια προς χαμηλή σχετική υγρασία και περιορισμένες βροχοπτώσεις (για περισσότερα, βλ. Κεφ. 2, παρ. 2.5.1).



Εικόνα 6.43 *Ψυχρό κλίμα. Ετήσια διακύμανση θερμοκρασίας αέρα και ηλιακής ακτινοβολίας. Πηγή: Λογισμικό Ecotect Analysis, Weather Tool (μη διαθέσιμο από το 2015).*

Οι μορφές των κτιρίων είναι συμπαγείς με δυνατότητα απομόνωσης συγκεκριμένων εσωτερικών χώρων, κυρίως των χώρων ύπνου, για περιορισμό των απωλειών. Άρα η βασική στρατηγική είναι η καλή μόνωση του κελύφους. Πιο χαρακτηριστική μορφή του πολύ ψυχρού κλίματος είναι η κατοικία των Εσκιμώων (*igloo*) (Βλ. Εικόνα 6.44). Οι βασικές αρχές της τυπολογίας αυτής είναι η προστασία από τους παγωμένους ανέμους, μέσω ειδικών χωρικών διατάξεων και προστατευμένης υποβαθμισμένης εισόδου για τον περιορισμό του ανοίγματος και τέλος η ανύψωση του εσωτερικού κυρίως χώρου διαμονής. Η οροφή του

χώρου αυτού είναι καλυμμένη με δέρματα ζώων για θερμομόνωση. Τέλος, σημαντικότερο όλων είναι η συμπαγής και μικρή κτιριακή μορφή. Άλλα παραδείγματα αναγνωρίζονται στα ξύλινα καλύβια των σκανδιναβικών χωρών (Βλ. Εικόνα 6.45), όπου ο χλοοτάπητας (*turf*) ευνοεί τη συγκράτηση του χιονιού, δημιουργώντας ένα επιπλέον στρώμα που συμβάλλει στη μείωση των θερμικών απωλειών με αγωγή (Οικονόμου, 2007).





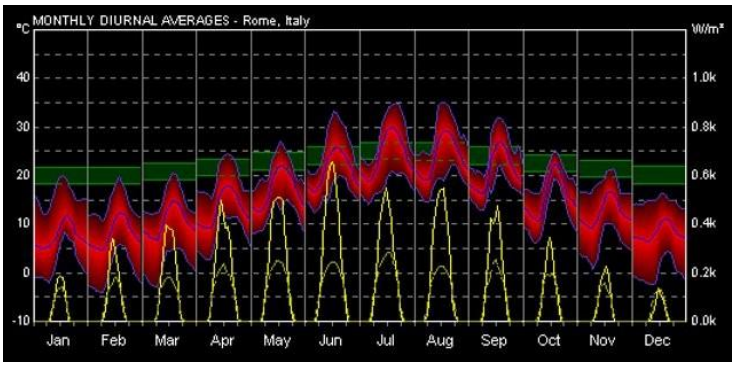
Εικόνα 6.44 *Igloo Εσκιμώων.*
α. Φωτογραφία. Πηγή: Inuit igloo by Library of Congress Prints and Photographs Division, Washington, DC, via Wikimedia Commons, Public Domain.
β. Διάγραμμα βιοκλιματικής λειτουργίας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).

α.  β. 

Εικόνα 6.45 *Στέγες χλοοτάπητα (Turf roofs).*
α. Θερινή όψη. Πηγή: Faroese grass roof house, Photo by Annie Spratt on Unsplash
β. Χειμερινή όψη, με συγκράτηση χιονιού. Πηγή: Brown wooden house (…) , Photo by eberhard grossgasteiger on Unsplash

6.9.2 Εύκρατο μεσογειακό κλίμα

Βασικό χαρακτηριστικό είναι οι κλιματολογικές εποχικές διαφοροποιήσεις δηλαδή τους κρύους χειμώνες, τα θερμά καλοκαίρια και τις μικρής διάρκειας ενδιάμεσες εποχές (Εικόνα 6.46), που δημιουργεί την απαίτηση για διαφορετικά στοιχεία σχεδιασμού στις διάφορες εποχές. Το εύρος των θερμοκρασιών κυμαίνεται από 5^{o} έως 25^{o} (μέσες τιμές). Γενικότερα, τα χαρακτηριστικά είναι το αξιόλογο εύρος της ηλιακής ακτινοβολίας και των ετήσιων θερμοκρασιών, ενώ η ημερήσια θερμοκρασιακή διακύμανση είναι μέτρια. Οι τιμές της σχετικής υγρασίας είναι επίσης κυμαινόμενες από μέτριες έως υψηλές ανάλογα με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Τέλος, το ύψος της βροχόπτωσης είναι μέτριο, ενώ βροχοπτώσεις παρατηρούνται όλο τον χρόνο και χιονοπτώσεις τον χειμώνα.

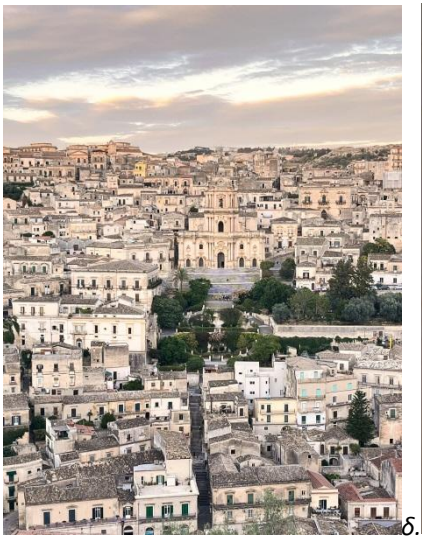


Εικόνα 6.46 *Εύκρατο μεσογειακό κλίμα. Ετήσια διακύμανση θερμοκρασίας αέρα και ηλιακής ακτινοβολίας. Πηγή: Λογισμικό Ecotect Analysis, Weather Tool (μη διαθέσιμο από το 2015).*

Οι κτιριακές μορφές σε αυτή τη ζώνη εμφανίζουν ποικιλομορφία λόγω των πιο ήπιων συνθηκών που δίνουν τη δυνατότητα για μεγαλύτερο εύρος κτιριοδομικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών. Σε αυτές τις περιοχές, οι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες είναι πιο καθοριστικοί για τον προσδιορισμό της μορφής απ' ό,τι το κλίμα.


α


β.


γ.

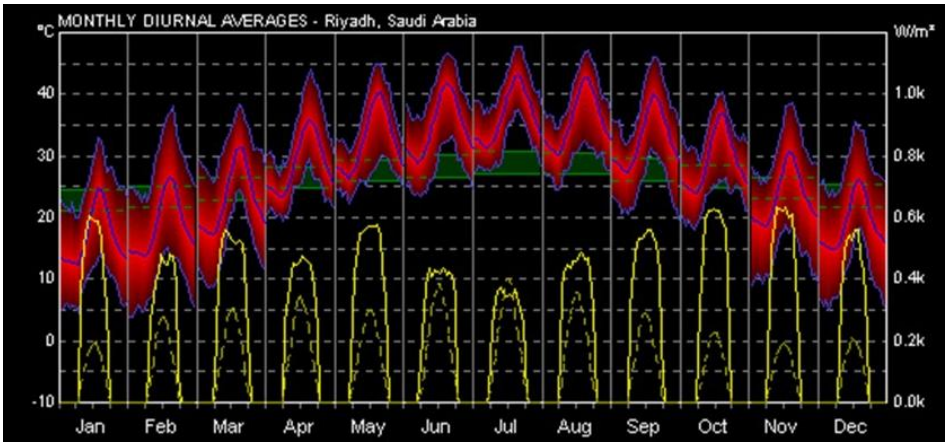

δ.


ε.

Εικόνα 6.47 *Οικισμοί στη Μεσόγειο. α. Ναύπλιο, β. Λισαβόνα, γ. Modica Σικελία, δ.Πάτμος, Δωδεκάνησα ε. Alberobello Απουλία. Πηγή: Φωτογραφίες από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*

6.9.3 Θερμό και ξηρό (ερημικό) κλίμα

Βασικό χαρακτηριστικό η έντονη ηλιακή ακτινοβολία (οι περιοχές με το κλίμα αυτό είναι πολύ κοντά στον Ισημερινό), η πολύ χαμηλή σχετική υγρασία και ύψος βροχής και οι υψηλές θερμοκρασίες για επτά περίπου μήνες. Οι μέσες τιμές θερμοκρασίας είναι 25°C και οι ακρότατες τιμές 10 °C και 40 °C (Εικόνα 6.48).



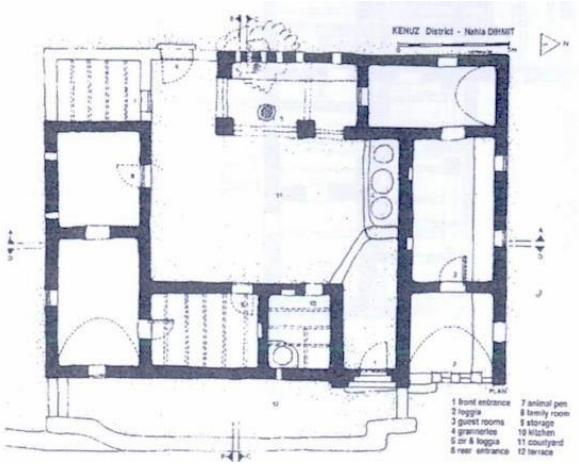
Εικόνα 6.48 *Θερμό και ξηρό (ερημικό) κλίμα. Ετήσια διακύμανση θερμοκρασίας αέρα και ηλιακής ακτινοβολίας. Πηγή: Λογισμικό Ecotect Analysis, Weather Tool (μη διαθέσιμο από το 2015).*

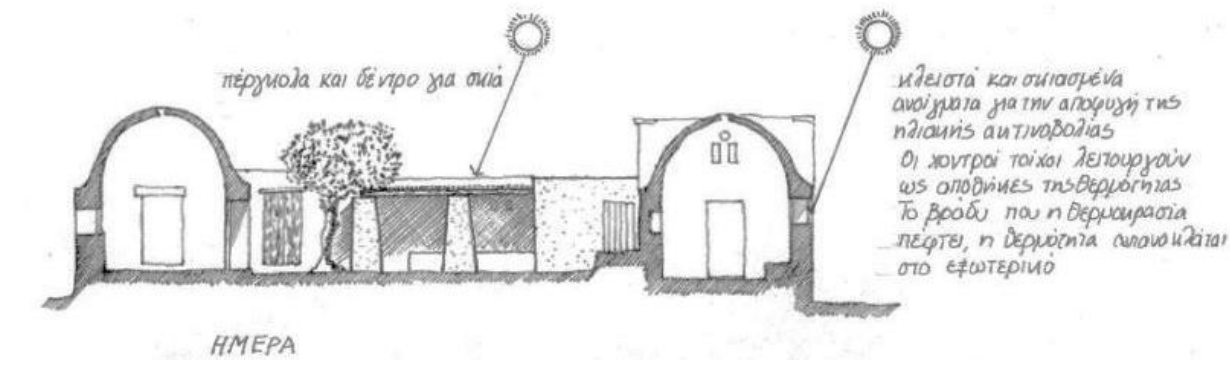
Η τυπολογία των κτιρίων σε αυτή την κλιματική ζώνη καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση των κλιματικών χαρακτηριστικών. Η κτιριακή γεωμετρία είναι και εδώ συμπαγής (Εικόνα 6.49.α). Τα ανοίγματα είναι μικρά και λιγοστά και συνήθως ψηλά σε στάθμη, ούτως ώστε να μειώνεται η ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας από το έδαφος προς το εσωτερικό. Χαρακτηριστικό αρχιτεκτονικό στοιχείο σε αυτή τη ζώνη είναι και η εσωτερική αυλή-αίθριο (Εικονα 6.49.β). Το βασικό ζητούμενο είναι το κτίριο να προφυλάσσεται όσο το δυνατόν από την έντονη ηλιακή ακτινοβολία και τη ζέστη. Ως εκ τούτου, ο σκιασμός είναι πολύ σημαντικό στοιχείο. Ακόμη, με δεδομένη την πολύ χαμηλή σχετική υγρασία, η εφαρμογή υγρών στοιχείων για δροσισμό με εξάτμιση είναι ιδιαίτερα επιθυμητή, όπως και τα στοιχεία φύτευσης –όταν αυτό είναι δυνατόν– για σκιασμό και εξατμιστικό δροσισμό. Τέλος, η μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας βοηθά στην αξιοποίηση των στοιχείων υψηλής θερμικής μάζας.

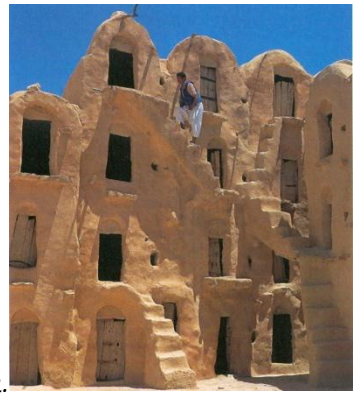
α. 

β 

γ.  δ. 

ε.  ζ, 

η. 

θ.  ι. 

ε.

Εικόνα 6.49 *α. Προβιομηχανικές κατοικίες, Taos, New Mexico, ΗΠΑ. Πηγή: Taos Pueblo, New Mexico, by MARELBU, via Wikimedia Commons, CC BY 3.0.*

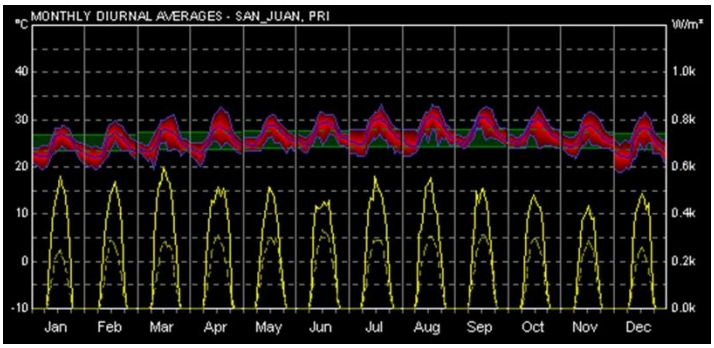
β. Κατοικία στην Τοζέρ (Tozeur), Τυνησία Πηγή: Φωτογραφία από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

γ. και δ. Σύμπλεγμα κτιρίων και δρόμος στην Τοζέρ (Tozeur), Τυνησία Πηγή: Φωτογραφία από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

ε. Κατοικία στη Νέα Γκούρνα (New Gourna), Αίγυπτος (Hassan Fathy, 1945). Πηγή: Φωτογραφία από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
ζ. και η. Παραδοσιακή κατοικία στη Νουβία, κάτοψη και τομή βιοκλιματικής λειτουργίας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου).
θ. Κατοικίες στο Harran. Πηγή: Harran-Şanlıurfa Province, Turkey, by Ben Bender, via Wikimedia Commons, CC-BY-SA.
ι. The Ksour, αγροτικοί χώροι, Τυνησία. Πηγή: Φωτογραφία από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

6.9.4 Θερμό και υγρό (τροπικό) κλίμα

Βασικό χαρακτηριστικό είναι οι σταθερά υψηλές θερμοκρασίες (25°C-30°C), οι έντονες βροχοπτώσεις και η πολύ υψηλή σχετική υγρασία που επιτείνει το αίσθημα ζέστης (Εικόνα 6.50). Οι μέσες τιμές της σχετικής υγρασίας είναι 80%, ενώ το μέσο ύψος βροχής είναι της τάξης των 100 χιλιοστών.



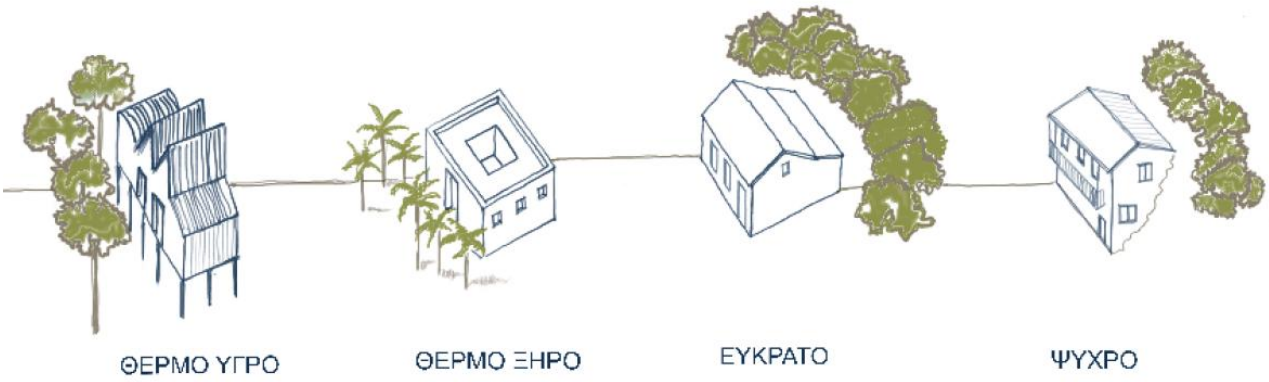
Εικόνα 6.50 *Θερμό και υγρό (τροπικό) κλίμα. Ετήσια διακύμανση θερμοκρασίας αέρα και ηλιακής ακτινοβολίας. Πηγή: Λογισμικό Ecotect Analysis, Weather Tool (μη διαθέσιμο από το 2015).*

Βασική απαίτηση για την επίτευξη της θερμικής άνεσης σε αυτό το ιδιαίτερα υγρό και ζεστό κλίμα είναι η κίνηση του αέρα που, μέσω της εξάτμισης, προκαλεί αίσθημα δροσισμού. Τα βασικά τυπολογικά χαρακτηριστικά των παραδοσιακών κατασκευών σε αυτή την κλιματική ζώνη είναι:

- Υπερύψωση των κτιρίων για την προστασία από τα πλημμυρικά φαινόμενα αλλά και την ανεμπόδιστη κίνηση του αέρα που είναι πολύτιμη.
- Ανοιχτή κάτοψη και ελαφρύ κέλυφος για να μεγιστοποιείται η κίνηση του αέρα.
- Υψηλή απαίτηση σκιασμού.
- Οι στέγες έχουν μεγάλη κλίση για τη γρήγορη απομάκρυνση των υδάτων και η μορφή τους είναι τέτοια που διευκολύνει και αυξάνει την κίνηση του αέρα.

α.  β. 

Εικόνα 6.51 *Παραδείγματα παραδοσιακής αρχιτεκτονικής σε τροπικό κλίμα.*
α. Πόλη Yawnghwe στη Λίμνη Inle (Heho, Burma). Πηγή: Inle-Yawnghwe, by 3coma14, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
β. Οικισμός Tana Toraja, South Sulawesi Province of Indonesia. Πηγή: Tana Toraja, Palawa, by Kondephy, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.



Εικόνα 6.52 *Συγκεντρωτικό διάγραμμα βασικών στοιχείων βιοκλιματικού σχεδιασμού στους βασικούς τύπους κλίματος. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Ε. Αλεξάνδρου), μετάφραση και απόδοση από Pearson (1989).*

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Alexandrou, E. & Chronopoulou, A. (2023). An investigation on climate responsive design strategies of apartment buildings in Athens of the period 1920-1960s. *World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 197, International Journal of Architectural and Environmental Engineering, 17*(5), 200-214.

Alexandrou, E. & Tsouras, V. (2009). Implementation of environmental issues in the design process. In: Voyatzaki M. & ? Spyridonidis, K. (Eds). *ENHSA-EAAE Architectural Design Teachers' and Construction Teachers' Networks, Joint Workshop. Architectural Design and Construction Education*. Genoa.

Alexandrou, E. (1997). *The revitalization of the traditional settlements in Pelion, Greece. Strategies for economic and tourism development in the context of preservation of the natural and human Environment* [Master Thesis, UCLA].

Ander, G. (1995). *Daylighting performance and design*. Van Nostrand Reinhold.

Araji, M. T. (2019). Surface-to-volume ratio: How building geometry impacts solar energy production and heat gain through envelopes. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 323 012034. DOI: 10.1088/1755-1315/323/1/012034

Arup. (n.d.). *Pocket Habitat - Nature in the Urban Environment.* https://www.arup.com/projects/pocket-habitat

Arup. (2011). *Corporate Report 2011.* https://www.arup.com/globalassets/downloads/corporate-documents/annual-report/arup-corporate-report-2011.pdf

Boake, T. M. (2003). *Understanding the General Principles of the Double Skin Façade System*. University of Waterloo.

Boake, T. M. (n.d.). Hot Climate Double Facades: Avoiding Solar Gain. *Facade Tectonics, 14*. https://www.tboake.com/bio/facadetectonics2014boake-rev.pdf

Cartier-Bresson, H. /Magnum Photos (1968). FRANCE. Languedoc-Roussillon. Lozere. Town of Mende.

egreen-ZinCo. (n.d.) *Φυτεμένα δώματα: Συστήματα Εντατικού Τύπου.* https://www.egreen.gr/system-build-ups/intensive-build-ups.html

El Menshawy, A. S., Mohamed, A. F. & Fathy, N. M. (2022). A comparative study on green wall construction systems, case study: South valley campus of AASTMT. *Case Studies in Construction Materials*, 16. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00808

ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program) (2014). *Planning Energy Efficient and Livable Cities.* https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/DocumentLibrary/ESMAP_CEETI_MayoralNote_6_PlanningEE%20Livable%20Cities_optimized.pdf

European Federation Green Roofs and Walls. (n.d.) *Types of green walls*. https://efb-greenroof.eu/green-wall-basics/

Fathy, H. (1973). *Architecture for the Poor. An Experiment in Rural Egypt*. The University of Chicago Press [1st edition 1963].

Fathy, H. (1986). *Natural Energy and Vernacular Architecture. Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*. The University of Chicago Press.

Fitch, J. M. & Siple, P. (Eds) (1952). *AIA/house beautiful regional climate study*. Originally published in AIA bulletin 1949-1952. Ann Arbor, Michigan: University Microfiche.

Gehl, J. (2010). *Cities for people*. London: Island Press.

Gill, B. (1998). *Many masks: A life of Frank Lloyd* Wright. New York: Da Capo Press.

Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture*. Amsterdam, London, Elsevier Publishing Company Ltd.

Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Van Nostrand Reinhold.

Global Footprint Network (2003-2023). *Glossary. Ecological footprint.* https://www.footprintnetwork.org

GreenGrid Roofs. (n.d.). *GreenGrid Vegetative Green Roof System.* https://www.greengridroofs.com/products/greengrid-system/

Haefeli, P., Lachal, B. & Weber, W. (1998). Experiences with green roofs in Switzerland. In E. Maldonado Eduardo & S. Yannas (Eds). *Environmentally Friendly Cities. Proceedings of PLEA 98, Passive and Low Energy Architecture* (pp. 365-368). James & James Science Publishers Ltd.

Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T. & Zeumer, M. (2012). Energy Manual: Sustainable Architecture. Birkhäuser. https://doi.org/10.11129/detail.9783034614542

Inhabitat (2006, September 4). GreenGrid Roofs. *Inhabitat*. https://inhabitat.com/greengrid-roofs/

Jideofor, A. (2012). Earth Shelters; A Review of Energy Conservation Properties in Earth Sheltered Housing. In A. Zain Ahmed (Ed.). *Energy Conservation*. doi: 10.5772/51873

Jingwen, X. (1998). *A comparative study between excavated dwellings in China and Greece*. [Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών]. http://hdl.handle.net/10442/hedi/11796

Krautheim, M., Pasel, R., Pfeiffer, S. & Schultz-Granberg, J. (2014). *City and Wind – Climate as an Architectural Instrument*. A Dom Publishers.

Lacaton & Vassal (n.d.). *Transformation de 530 logements, bâtiments G, H, I, quartier du Grand Parc / Transformation of 530 dwellings, block G, H, I*. https://www.lacatonvassal.com/index.php?idp=80

Le Corbusier (2020). *A little house*. Germany: Walter de Gruyter GmbH.

Lynch, K. (1960). *The Image of the City*. The MIT Press.

Manso, M. & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *41*, 863-871. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203.

Milne, M. & Li, Y.-H. (1994). Climate consultant 2.0: a new design tool for visualizing climate. In: *Proceedings of the 1994 ACSA architectural technology conference.* Washington, DC, U.S.A.: Association of Collegiate Schools of Architecture Publications.

National House Building Council (NHBC) Foundation (2016). *The challenge of shape and form. Understanding the benefits of efficient design*. Milton Keynes. UK: NHBC Foundation. https://www.nhbc.co.uk/foundation/the-challenge-of-shape-and-form

Oesterle, E. (2001). *Double-skin facades: integrated planning: building physics, construction, aerophysics, air-conditioning, economic viability*. Munich, Germany: Prestel.

Olgyay, V. & Olgyay, A. (1963). *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.

Owen, D. (2010). *Green Metropolis.* New York, U.S.A.: Riverhead Books.

Patrick Blanc (n.d.). Vertical Garden. https://www.verticalgardenpatrickblanc.com/

Pearson, D. (1989). *The Natural Book (A Gaia Original)*. Australia: Angus & Robertson.

Poirazis, H. (2006). *Double-skin facades. A literature review. A report of IEA SHC Task 34 ECBCS Annex 43*. Lund, Sweden: Lund University, Lund Institute of Technology. https://annex53.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_43_Task34-Double_Skin_Facades_A_Literature_Review.pdf

Qubad, S. H., Sumbul, M. Y., Anas, A. A. S. & Adil, I. A. (2023). A study of the optimal form and orientation for more energy efficiency to mass model multi-storey buildings of Kirkuk city, Iraq. *Alexandria Engineering Journal, 71.* 731-741. https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.020

Rapoport, A. (1969). *House Form and Culture*. Prentice-Hall Inc.

Rudofsky, B. (1987). *Architecture Without Architects A Short Introduction to Non Pedigreed Architecture*. University of New Mexico Press.

Simon, H. (2024, February 8). The revival of the Gregory Bateson Building. *CannonDesign*. https://www.cannondesign.com/perspectives/the-revival-of-the-gregory-bateson-building

Serghides, D. K. (2010). The Wisdom of Mediterranean Traditional Architecture Versus Contemporary Architecture – The Energy Challenge. *The Open Construction and Building Technology Journal, 4*. 29-38. http://dx.doi.org/10.2174/1874836801004010029

Shashua-Bar, L. & E. Hoffman, M. (2000). Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon street with trees. In: K. Steemers & S. Yannas (Eds). *Architecture - City - Environment. Proceedings of the 17th PLEA Conference* (pp. 483-488). James & James Science Publishers Ltd.

Stack, A., Goulding, J. & Owen Lewis, J. O. (2002). *Shading Systems. Solar Shading for the European climates.* Energy. European Commission. Directorate-General Energy & Transport. https://build-up.ec.europa.eu/sites/default/files/content/EurCommOnSolarShading.pdf

Straube, J. (2012). The Function of Form: Building Shape and Energy. In: J. Straube. *High Performance Enclosures*. Building Science Press.

UCLA Energy Design Tools Group (2020). *Climate Consultant* (Version 6.0) [Computer software]. https://www.sbse.org/resources/climate-consultant

Watson, D. & Labs, K. (1983). *Climatic building design*. New York: McGraw-Hill.

Watson, D. (2013). Bioclimatic Design. In: Loftness, V., Haase, D. (Eds). *Sustainable Built Environments*. New York, New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5828-9_225

Zavitsanou, I. & Brotas, L. (2011). Vernacular architecture in Greece: the contribution of the glazed hayat to the building's thermal performance. In: *People and Buildings held at the offices of Arup UK*. London, UK: Network for Comfort and Energy Use in Buildings. Buildings. http://nceub.org.uk

Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, Ε. (2017) *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός. Κλιματική αλλαγή, Περιβάλλον, Βιωσιμότητα*. University Studio Press.

Βιτρούβιος (Λέφας, Π., μτφ.) (1997). *Περί Αρχιτεκτονικής (De Architectura)*. τ. 1 (Βιβλία I-V) Αθήνα: Πλέθρον.

Βιτρούβιος (Λέφας, Π., μτφ.) (1997). *Περί Αρχιτεκτονικής (De Architectura)*. τ. 2 (Βιβλία VI-X) Αθήνα: Πλέθρον.

Ευαγγελινός, Ε. & Ζαχαρόπουλος, Η. (2001). Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου* (σσ. 175-234). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Ευμορφοπούλου, Α. (1994).Οικολογική Παρέμβαση στο Δομημένο Περιβάλλον με Διαμόρφωση Κήπων στα Δώματα των Κτιρίων. *Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, Επιστημονική Περιοχή Α, 4* (3), 249-265.

Κατσούλη, Α.-Ν. (2018). *Υπόσκαφη αρχιτεκτονική: Σύγχρονες εφαρμογές*. [Διάλεξη 9ου εξαμήνου, ΕΜΠ, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών]. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.2290

Κωνσταντινίδης, Α. (1983). *Τα παλιά αθηναϊκά σπίτια*. Αθήνας: Εκδόσεις Πολύτυπο.

Μπούρας, Χ. & Φιλιππίδης, Δ. (επιμ.) (2013). *Αρχιτεκτονική*. Αθήνα: Μέλισσα.

Ν. 4067/2012 (ΦΕΚ τ. Α 79/09.04.2012). *Νέος Οικοδομικός Κανονισμός*.

Ν. 4759/2020 (ΦΕΚ τ. Α 245/9.4.2020). *Εκσυγχρονισμός της Χωροταξικής και Πολεοδομικής Νομοθεσίας και άλλες διατάξεις.*

Ντάφης, Σ. (1994). Οικολογικά αποτελέσματα της αστικής και περιαστικής δασοκομίας. Στο: Μ. Ανανιάδου-Τζημοπούλου (Επιμ.). *Συμπόσιο: Αρχιτεκτονική Τοπίου Αστικών Υπαίθριων Χώρων. Η Προκήρυξη της Θεσσαλονίκης* (σσ. 97-113). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Αρχιτεκτόνων.

Οικονόμου, Α. (2007). *Συγκριτική διερεύνηση της αρχιτεκτονικής συγκρότησης και της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των παραδοσιακών κατοικιών του 19ου αιώνα στη Φλώρινα* [Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών. DOI 10.12681/eadd/19960 & http://hdl.handle.net/10442/hedi/19960

Πετρίδου, Κ. (2009). Πράσινα δώματα. Επαναφέροντας τη χαμένη φύση. *Τεχνογράφημα, 377*, 6-8. http://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2019/01/ΤΕΧΝΟ377.pdf

Σανταμούρης, Μ. κ.ά. (2000). *Οικολογική Δόμηση*. Ελληνικά Γράμματα, Διεπιστημονικό Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Ερευνών, ΥΠΕΧΩΔΕ Δ/νση Οικιστικής Πολιτικής και Κατοικίας.

ΤΟΤΕΕ 20701-2/2021. *Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων*. ΥΠΕΚΑ & ΤΕΕ. https://web.tee.gr/wp-content/uploads/TOTEE-20701-2-2021.pdf

ΤΟΤΕΕ 20701−6/2022. *Βιοκλιματικός σχεδιασμός στον ελλαδικό χώρο*. ΥΠΕΚΑ & ΤΕΕ. https://web.tee.gr/wp-content/uploads/TOTEE-20701-6-Βιοκλιματικός-Σχεδιασμος.pdf

Φεζάν, Ι. (2018). *Why density?: το μοντέλο της πυκνής και συμπαγούς πόλης* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου, ΕΜΠ, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών]. DSpace@NTUA. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.2339

Κεφάλαιο 7

Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης

Σύνοψη
Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία για τη θέρμανση των εσωτερικών χώρων των κτιρίων, με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας και κατ' επέκταση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για θέρμανση. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης ομαδοποιημένα με βάση το ηλιακό κέρδος (άμεσο, έμμεσο και απομονωμένο).

Προαπαιτούμενη γνώση
Βασικές γνώσεις Φυσικής. Κεφάλαια 2, 3, 4 και 5 του παρόντος.

7.1 Εισαγωγικές παρατηρήσεις

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας για τη θέρμανση των κτιρίων, στον βαθμό στον οποίο αυτό είναι δυνατόν, ήταν μια αυτονόητη επιλογή σε καιρούς που η χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας περιοριζόταν, είτε για τεχνικούς είτε για και οικονομικούς λόγους. Σύμφωνα με όσα αναπτύχθηκαν, η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να θερμάνει άμεσα κάθε κέλυφος στο οποίο έχει τη δυνατότητα να εισχωρήσει. Κτίρια της προβιομηχανικής περιόδου, όταν δηλαδή δεν υπήρχε δυνατότητα χρήσης μηχανικών μέσων, αποτελούν παραδείγματα αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας για θέρμανση των χώρων. Σήμερα, το αίτημα για εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας επανήλθε επιτακτικότερο κυρίως λόγω της ανάγκης να περιοριστεί η κατανάλωση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της αντιμετώπισης των οξύτατων περιβαλλοντικών προβλημάτων (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 92).

Οι σύγχρονες μέθοδοι εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση κτιρίων έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τη συστηματικότητα και τον οργανωμένο τρόπο, με τον οποίο επιδιώκεται η προσέγγιση του στόχου τους. Η ανάλυση και η κατανόηση της διαδικασίας συλλογής και αποθήκευσης της ηλιακής θερμότητας, όπως και της μετάδοσής της στους χώρους όπου απαιτείται, επιτρέπουν στον σύγχρονο μελετητή να σχεδιάζει την ηλιακή-θερμική λειτουργία του κτιρίου. Επιπλέον, χάρη στην ανάπτυξη νέων υλικών και μεθόδων κατασκευής, ο σχεδιασμός αυτός μπορεί να επιτύχει υψηλές αποδόσεις, μη εφικτές στο παρελθόν (Στο ίδιο).

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης (passive solar heating systems) αναφέρονται σε σύγχρονες μεθόδους εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας με σκοπό τη θέρμανση κτιρίων. Εξετάζοντας προσεκτικά την ονομασία που τους έχει δοθεί, διαπιστώνεται ότι περιλαμβάνει δύο βασικούς χαρακτηρισμούς: «σύστημα» και «παθητικό», που πρέπει να εξηγηθούν για να γίνουν αντιληπτά τα βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων αυτών (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 93).

Ο χαρακτηρισμός ως σύστημα χρησιμοποιείται επειδή η λειτουργία της κάθε μεθόδου στηρίζεται στην οργάνωση δομικών στοιχείων και κατασκευών του κελύφους με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται συλλογή της ηλιακής ενέργειας (*solar collection*), αποθήκευση της θερμότητας (*heat storage*) που συλλέχθηκε και μετάδοση της θερμότητας (*heat transfer*) στους χώρους που προβλέπεται να θερμανθούν. Όπως θα διαπιστωθεί, τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης ενσωματώνονται μορφολογικά και κατασκευαστικά στη δομή του κτιρίου που εξυπηρετούν. Εντάσσονται, δηλαδή, στον σχεδιασμό (Στο ίδιο).

Το επίθετο παθητικό προσδιορίζει το γεγονός ότι η ροή θερμότητας στο σύστημα γίνεται με φυσικό τρόπο, χωρίς μηχανική υποβοήθηση, δηλαδή με αγωγή, με μεταφορά και με ακτινοβολία (Στο ίδιο). Σε αντιδιαστολή προς τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα (βλ. Κεφ. 11, παρ. 11.2.2) χρησιμοποιούν μηχανολογικό εξοπλισμό για λειτουργία αντίστοιχη με εκείνη των παθητικών και μηχανική υποβοήθηση για τη μετάδοση της θερμότητας στον χώρο. Τα ενεργητικά συστήματα ως επί το πλείστον δεν ενσωματώνονται στη δομή του κτιρίου, γεγονός που πρακτικά επιτρέπει την τοποθέτηση ή την αντικατάστασή τους σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Η κατανόηση του τρόπου προσέγγισης στον σχεδιασμό και τη λειτουργία των παθητικών ηλιακών συστημάτων θέρμανσης θα γίνει καλύτερα αντιληπτή εάν εξεταστούν ορισμένα βασικά κοινά στοιχεία που τα αφορούν (Στο ίδιο).

1. Ο σχεδιασμός ενός παθητικού ηλιακού συστήματος θέρμανσης διαφέρει ριζικά από τον σχεδιασμό μιας μηχανολογικής εγκατάστασης θέρμανσης. Τούτο συμβαίνει επειδή τα στοιχεία ενός παθητικού συστήματος που συλλέγουν, αποθηκεύουν και μεταδίδουν τη θερμότητα αποτελούν αναπόσπαστα συστατικά μέρη του κτιρίου και έχουν ειδικές απαιτήσεις όσον αφορά τη θέση, τον προσανατολισμό, τη διαστασιολόγηση και τα υλικά. Με άλλα λόγια, η ένταξη ενός παθητικού ηλιακού συστήματος σε ένα κτίριο θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μια επιπλέον κύρια παράμετρος σχεδιασμού που αφορά τη μορφή, τη λειτουργία και την κατασκευή του κτιρίου. Αυτός, εξάλλου, είναι και ο λόγος που καθιστά σχεδιαστικά και κατασκευαστικά δύσκολη την εκ των υστέρων ένταξη (*retrofit*) παθητικών ηλιακών συστημάτων. Αντίθετα, είναι γνωστή η ευκολία με την οποία προσαρμόζονται στα δεδομένα του κτιρίου οι μηχανολογικές εγκαταστάσεις θέρμανσης (Στο ίδιο).

2. Ο καθορισμός των χαρακτηριστικών ενός παθητικού συστήματος θέρμανσης, όπως η θέση, ο προσανατολισμός, η διαστασιολόγηση, τα υλικά, προκύπτει από μια διερευνητική διαδικασία στην οποία πρέπει να αξιολογείται η λειτουργία του συστήματος για όλη τη διάρκεια του έτους. Ο έλεγχος της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος, οπωσδήποτε την περίοδο θέρμανσης, αλλά και σε ετήσιο κύκλο, είναι απαραίτητος για να εξασφαλιστεί ότι δεν δημιουργούνται παρενέργειες, όπως υπερθέρμανση το καλοκαίρι, που μπορεί να ακυρώσουν ή και να ανατρέψουν το όφελος της εφαρμογής. Με βάση αυτό το σκεπτικό, δεν πρέπει να ακολουθείται τυφλά η συμβουλή σχεδιασμού που δίνουν τα βιβλία για «μεγιστοποίηση ηλιακής προσόδου και ελαχιστοποίηση θερμικών απωλειών» επειδή το απόλυτο μέγεθος αυτών των δύο παραμέτρων δεν εξασφαλίζει απαραίτητα την ενεργειακά ωφέλιμη λειτουργία του συστήματος σε ετήσιο κύκλο. Έχει αποδειχθεί ότι κρίσιμη για την περίπτωση είναι η δυναμική (δηλαδή μη στατική, μεταβαλλόμενη) σχέση ηλιακής προσόδου προς θερμικές απώλειες του κτιρίου, η οποία αποτελεί κριτήριο καθορισμού της απόδοσης του συστήματος (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 94).

3. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη θερμομόνωση του κελύφους, αλλά και των επιμέρους στοιχείων του συστήματος που συλλέγουν ή/και αποθηκεύουν θερμότητα. Δεδομένου ότι η ενεργειακή πρόσοδος ακολουθεί τον κύκλο του ηλίου, η θερμομόνωση συμβάλλει ώστε να επεκτείνεται η απόδοση του συστήματος σε όλο το εικοσιτετράωρο. Για να επιτευχθεί ευκολότερα μια ευνοϊκή σχέση της ηλιακής προσόδου προς τις θερμικές απώλειες, συνιστάται να περιοριστούν τη νύχτα οι θερμικές απώλειες από τις επιφάνειες συλλογής. Εάν χρησιμοποιηθούν κινητά θερμομονωτικά στοιχεία με χειροκίνητη λειτουργία, θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι ο ένοικος θα κάνει έγκαιρα τους σωστούς χειρισμούς (*passive buildings need active users*). Διαφορετικά θα πρέπει να εξεταστεί η περίπτωση χρήσης απλής αυτοματοποιημένης λειτουργίας. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η αποδοτική λειτουργία του συστήματος εξαρτάται και από ρυθμίσεις (*controls*) που πρέπει να εκτελούνται σύμφωνα με τον προγραμματισμό (Στο ίδιο).

Η επικρατέστερη μέθοδος ταξινόμησης των παθητικών ηλιακών συστημάτων στηρίζεται στη σχέση της θέσης των στοιχείων συλλογής και αποθήκευσης της ενέργειας προς τη θέση του χώρου που θερμαίνεται. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι κατηγορίες που προκύπτουν είναι οι ακόλουθες (Στο ίδιο):

- **Παθητικά ηλιακά συστήματα άμεσου ηλιακού οφέλους/κέρδους** (*direct gain*), στα οποία η συλλογή, αποθήκευση και μετάδοση θερμότητας γίνεται μέσα στον χώρο για τον οποίο έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί το σύστημα.
- **Παθητικά ηλιακά συστήματα έμμεσου ηλιακού οφέλους/κέρδους** (*indirect gain*), στα οποία η συλλογή και αποθήκευση θερμότητας γίνεται σε ειδικά διαμορφωμένο τμήμα του κελύφους, εφαπτόμενο του χώρου που προβλέπεται να θερμανθεί.
- **Παθητικά ηλιακά συστήματα απομονωμένου ηλιακού οφέλους/κέρδους** (*isolated gain*), στα οποία το στοιχείο είναι απομακρυσμένο από την αποθήκη θερμότητας και τον χώρο που υπολογίζεται να θερμανθεί από το σύστημα, οπότε δημιουργείται ένας ειδικός μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας μεταξύ του στοιχείου συλλογής-αποθήκης θερμότητας-χώρου.

	Λόγος εμβαδού παθητικού ηλιακού συστήματος προς το εμβαδόν του δαπέδου του θερμαινόμενου χώρου		
Μέση εξωτερική θερμοκρασία τον χειμώνα (°C)	Νότιο υαλοστάσιο, με μονό υαλοπίνακα	Τοίχος θερμικής αποθήκευσης, με διπλό υαλοπίνακα	Νότιο υαλοστάσιο προσαρτημένου θερμοκηπίου (μονοί υαλοπίνακες)
1,7	0,16	0,38	0,53
4,4	0,13	0,28	0,42
7,2	0,11	0,22	0,33
Παραδοχές:	Γεωγραφικά πλάτη της Ελλάδας, από 38-40°. Οι υαλοπίνακες έχουν ανεμπόδιστο ηλιασμό σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, ενώ δεν έχουν νυχτερινή μόνωση.		

Πίνακας 7.1 *Αρχική εκτίμηση λόγου εμβαδού υαλοστασίου προς εμβαδό δαπέδου θερμαινόμενου χώρου για τα διαφορετικά συστήματα άμεσου και έμμεσου ηλιακού κέρδους. Πηγή: Μετάφραση στα ελληνικά και προσαρμογή από Mazria (1979).*

Καθεμία από τις παραπάνω κατηγορίες περιλαμβάνει διάφορους τύπους παθητικών ηλιακών συστημάτων που διαφοροποιούνται ως προς βασικά χαρακτηριστικά, όπως τη θέση και τη μορφή της συλλεκτικής επιφάνειας, το υλικό θερμικής αποθήκευσης, τον μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας. Οι προσφερόμενες επιλογές δεν είναι κλειστές, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να συνδυαστούν χαρακτηριστικά από διάφορα συστήματα για να επιτευχθούν οι στόχοι του παθητικού σχεδιασμού. Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά μόνο στους βασικούς τύπους παθητικών ηλιακών συστημάτων, δίνοντας έμφαση σε αυτούς που προσφέρονται για εφαρμογή στις ελληνικές κλιματικές συνθήκες και κατασκευαστικές πρακτικές (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 95).

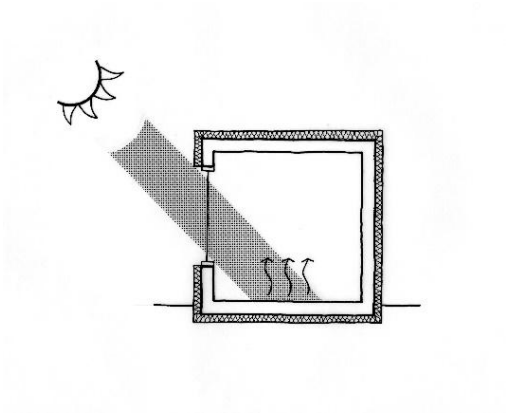
7.2 Άμεσο ηλιακό κέρδος

Το σύστημα άμεσου ηλιακού οφέλους είναι το πιο απλό στη δομή και λειτουργία του. Συγκροτείται από έναν κλειστό χώρο που εξυπηρετεί ανάγκες διαβίωσης ή εργασίας, από το νότιο ή τα νότια υαλοστάσια, του οποίου συλλέγεται η ηλιακή ακτινοβολία και στη μάζα του οποίου αποθηκεύεται η θερμότητα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 95) (Εικόνα 7.1).

Για να λειτουργήσει το σύστημα του άμεσου ηλιακού οφέλους πρέπει να υπάρχει μια σωστά διαρθρωμένη σύνθεση των στοιχείων που το αποτελούν. Αρχικά, ο χώρος πρέπει να έχει διαστάσεις και αναλογίες που να επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία να διεισδύσει σε σημαντικό τμήμα του. Τα υαλοστάσια πρέπει να έχουν χαρακτηριστικά που να επιτρέπουν την αναγκαία ηλιακή πρόσοδο κατά τη διάρκεια της ημέρας τον χειμώνα, να περιορίζουν τις θερμικές απώλειες κατά τη διάρκεια της νύχτας και οπωσδήποτε να μην οδηγούν σε υπερθέρμανση του χώρου το καλοκαίρι. Η μάζα θερμικής αποθήκευσης

πρέπει να είναι τόση, ώστε να απορροφά την περίσσεια θερμότητας την ημέρα και να την αποδίδει στον χώρο τη νύχτα ή όταν υπάρχει νέφωση (Στο ίδιο).

Οι παράγοντες, λοιπόν, που καθορίζουν την αποδοτική λειτουργία του συστήματος άμεσου ηλιακού οφέλους ομαδοποιούνται συστηματικά στη συνέχεια.



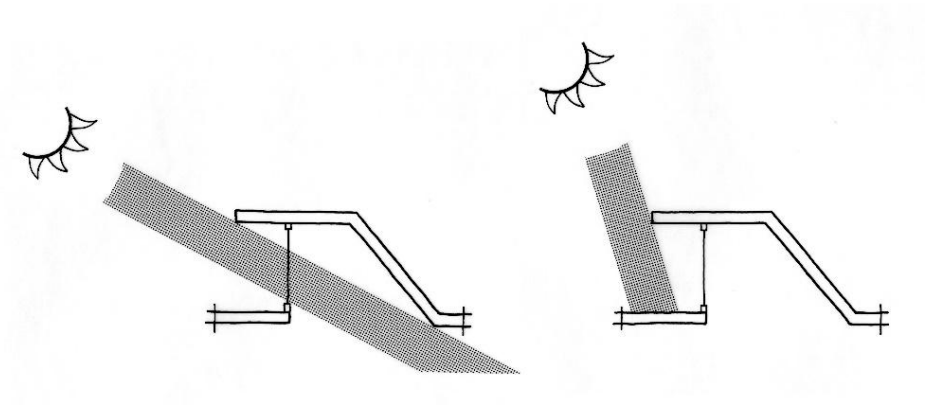
Εικόνα 7.1 *Σχηματική απεικόνιση συστήματος άμεσου ηλιακού οφέλους. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος)*



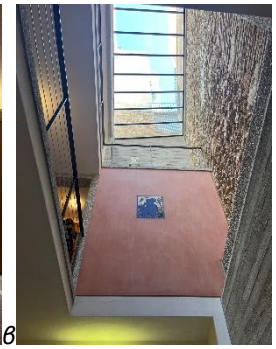
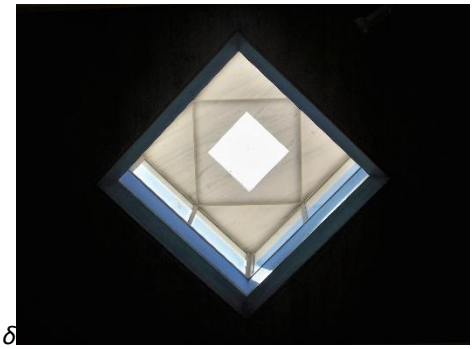
Εικόνα 7.2 *Παράδειγμα νότιων υαλοσταστίων. Πηγή: South facing windows, by Michael Pittman, via Flickr, CC BY-SA.*

Ο προσανατολισμός και η θέση των υαλοστασίων. Τα υαλοστάσια είναι τα στοιχεία συλλογής ηλιακής ενέργειας στο σύστημα άμεσου ηλιακού οφέλους. Για να μεγιστοποιηθεί η έκθεσή τους στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία τους χειμερινούς μήνες πρέπει να έχουν νότιο προσανατολισμό. Στην πράξη, όμως, ο προσανατολισμός των υαλοστασίων καθορίζεται από τον γενικό προσανατολισμό του κτιρίου (βλ. Κεφ. 6, παρ. 6.2), που μπορεί να αποκλίνει από τον επιθυμητό. Αποκλίσεις έως 30° εκατέρωθεν του Νότου είναι αποδεκτές για τη λειτουργία του συστήματος καθότι δεν ελαττώνεται σημαντικά η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο υαλοστάσιο (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 96).

Τα υαλοστάσια πρέπει να τοποθετούνται στη νότια πλευρά του χώρου, παράλληλα ή με κλίση προς την τοιχοποιία, ώστε να αποκτήσουν νότιο προσανατολισμό, μέσα στα όρια των αποδεκτών αποκλίσεων. Στα μονώροφα κτίρια ή στο τελευταίο επίπεδο πολυώροφων κτιρίων υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν κατακόρυφα υαλοστάσια στη στέγαση για να εισέλθει η ηλιακή ακτινοβολία σε χώρους που δεν συνορεύουν με τη νότια όψη του κτιρίου (Εικόνα 7.3). Τα κατακόρυφα υαλοστάσια της στέγασης αναφέρονται στην ελληνική βιβλιογραφία ως φεγγίτες οροφής (clerestories ή roof monitors) (Στο ίδιο).



Εικόνα 7.3 *Σχηματική διάταξη λειτουργίας φεγγίτη στέγασης. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*

α  β  γ  δ 

Εικόνα 7.4 *Παραδείγματα διατάξεων φεγγίτη στέγασης α, β, γ Μουσείο Φασιανού Κ. Κρόκος. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου) δ. Κατοικία στην Αίγινα, Γ.Καλαβρυτινού και Γ. Μακρής. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*

Το μέγεθος και ο τύπος των υαλοστασίων. Είναι προφανές ότι η αύξηση του εμβαδού των υαλοστασίων αυξάνει αναλογικά και την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται, το οποίο και αποτελεί θετικό κατ' αρχήν στοιχείο για τη θερμική λειτουργία του συστήματος. Αρνητική είναι όμως η επίπτωση από τη μεγαλύτερη πιθανότητα δημιουργίας οπτικής θάμβωσης κατά τη διάρκεια της ημέρας και από τον κίνδυνο υπερθέρμανσης του χώρου το καλοκαίρι (Στο ίδιο).

Οι δυνατότητες παρέμβασης που προσφέρονται για να μειωθούν οι επιπτώσεις του μεγέθους του υαλοστασίου είναι:

α. επιλογή ειδικού τύπου υαλοπίνακα,

β. τοποθέτηση διπλών ή τριπλών υαλοπινάκων (βλ. Κεφ. 5., παρ. 5.4.5.),

γ. εξωτερικός σκιασμός του υαλοστασίου,

δ. εσωτερικός σκιασμός του υαλοστασίου,

ε. νυχτερινή μόνωση του υαλοστασίου (βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.4.5).

Η θέση και ποσότητα της μάζας θερμικής αποθήκευσης. Ο ρόλος της μάζας θερμικής αποθήκευσης είναι να αποθηκεύσει θερμότητα κατά τις ώρες ηλιοφάνειας για να την αποδώσει στον χώρο κυρίως τη νύχτα ή όταν υπάρχει νέφωση. Η λειτουργία της συμβάλλει στην απόσβεση της έντονης διακύμανσης της θερμοκρασίας του χώρου, τόσο στη διάρκεια της ημέρας, εφόσον φορτιζόμενη θερμικά καθυστερεί την άνοδο της θερμοκρασίας του αέρα, όσο και κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν, αποφορτιζόμενη από τη θερμότητα που συνέλεξε, συμβάλλει στην καθυστέρηση πτώσης της θερμοκρασίας του αέρα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 97-98).

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να προσπίπτει στο πάτωμα και τους τοίχους ή να κατευθύνεται με ειδικές διατάξεις (π.χ. ανακλαστήρες) προς την οροφή του χώρου. Ακόμη μπορεί να διαχέεται με τη χρήση ειδικών υαλοπινάκων (π.χ. ματ, πρισματικών) σε όλες τις επιφάνειες του χώρου. Τα στοιχεία θερμικής αποθήκευσης που φορτίζονται από την πρόσπτωση άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας λέγονται κύριες θερμικές αποθήκες, ενώ αυτές που φορτίζονται έμμεσα λέγονται δευτερεύουσες θερμικές αποθήκες. Εξ ορισμού λοιπόν, οι κύριες θερμικές αποθήκες του συστήματος πρέπει να τοποθετούνται σε θέσεις όπου έχει επιλεγεί να κατευθύνεται η ηλιακή ακτινοβολία. Για την καταλληλότητα της θέσης της αποθήκης θερμότητας πρέπει να εξετάζεται ταυτόχρονα η φορά ροής της θερμότητας, σύμφωνα με τους νόμους της φυσικής, από τη θερμική αποθήκη στον χώρο. Για παράδειγμα, εάν η θέση της θερμικής αποθήκης είναι στο πάτωμα, η θερμότητα που θα μεταδίδεται προς τα άνω με ακτινοβολία και με μεταφορά θα συμβάλλει ιδιαίτερα στη δημιουργία αίσθησης θερμικής άνεσης (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 98).

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για αποθήκευση θερμότητας είναι τα οικοδομικά υλικά με υψηλή θερμοχωρητικότητα, όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα, τα τούβλα, το μάρμαρο, τα κεραμικά πλακίδια κ.ά. Στην περίπτωση που η κύρια θερμική αποθήκη τοποθετείται στο πάτωμα συνιστάται να επιλεγεί υλικό με σκούρο χρώμα, επειδή επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το μαύρο χρώμα, αν και προσφέρει τη μεγαλύτερη απορροφητικότητα, μπορεί να αποδειχθεί ακατάλληλο στην περίπτωση που προκαλεί την υπερθέρμανση της θερμικής αποθήκης. Οι θερμικές αποθήκες στους τοίχους και στην οροφή συνιστάται να είναι ανοιχτόχρωμες επειδή μέσω των πολλαπλών ανακλάσεων επιτυγχάνεται η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τις επιφάνειες του χώρου και με αυτόν τον τρόπο η ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας (Στο ίδιο).

Η αρχική εκτίμηση της ελάχιστης επιφάνειας των θερμικών αποθηκών –ανεξαρτήτως του πάχους τους– που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος άμεσου ηλιακού οφέλους θα πρέπει να υπολογίζεται τουλάχιστον ίση με έξι φορές την επιφάνεια των υαλοστασίων του χώρου (Givoni, 1998, σ. 186).

Οι συμβατικές ελληνικές οικοδομικές κατασκευές, με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα, τοίχους από τούβλα και δάπεδα από μάρμαρο, μωσαϊκό ή κεραμικά πλακίδια, προσφέρουν αμέσως και χωρίς επιπλέον οικονομική επιβάρυνση τα κατάλληλα υλικά για αποθήκευση θερμότητας. Βασική προϋπόθεση, όμως, για τη λειτουργία της αποθήκευσης είναι ότι δεν θα εμποδιστεί η είσοδος της ηλιακής ακτινοβολίας με κουρτίνες ή άλλα κινητά διαχωριστικά και δεν θα καλυφθεί το δάπεδο εκεί όπου προσπίπτει ο ήλιος με χαλιά και έπιπλα. Στα εμπορικά κτίρια και στα κτίρια γραφείων, η κατάσταση είναι δυσμενέστερη, αφού στον φέροντα οργανισμό από σκυρόδεμα συνήθως αναρτάται ψευδοροφή, το δάπεδο διαστρώνεται με μοκέτα και οι διαχωριστικοί τοίχοι κατασκευάζονται από γυψοσανίδα και υαλοβάμβακα, δηλαδή εμποδίζονται τα κατεξοχήν κατάλληλα δομικά στοιχεία του κτιρίου από το να λειτουργήσουν ως θερμική αποθήκη (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 98).

Σε κτίρια που έχουν κατασκευαστεί με ελαφρά υλικά, π.χ. ξύλο, εκεί όπου δεν είναι επιθυμητή η χρήση βαριών οικοδομικών υλικών ή δεν υπάρχει ανάγκη αυξημένης αποθήκευσης θερμότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά με υψηλότερη θερμοχωρητικότητα από εκείνη των συνηθισμένων δομικών υλικών, όπως είναι το νερό (Εικόνα 7.5) και τα διάφορα υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials – PCM) (Κεφ. 5, παρ. 5.4.3 & Εικόνα 5.30).



Εικόνα 7.5 *Νερό σε μεταλλικά βαρέλια ως στοιχείο θερμικής αποθήκευσης σε εσωτερικό χώρο κτιρίου. Πηγή: Interior detail of 55-galon water filled drums (…), by Boyd Norton, Public domain, via Wikimedia Commons.*

Η θερμομόνωση του κτιρίου. Βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία του συστήματος άμεσου ηλιακού οφέλους, όπως και των άλλων παθητικών ηλιακών συστημάτων θέρμανσης, είναι ότι το δομικό κέλυφος του κτιρίου θα έχει επαρκώς θερμομονωθεί (βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.4.1, 5.4.2 και 5.4.3). Η απαίτηση αυτή εξασφαλίζει ότι η θερμότητα που συλλέγεται δεν θα διαφύγει στο περιβάλλον, αλλά θα παραμείνει για να χρησιμοποιηθεί. Όπως είναι αντιληπτό, για τον ίδιο λόγο είναι ιδιαίτερα σημαντική η επιμελημένη μόνωση των θερμικών αποθηκών και κυρίως η θέση της θερμομονωτικής στρώσης, δηλαδή προς την εξωτερική παρειά του δομικού στοιχείου θερμικής αποθήκευσης. Στον γενικό στόχο, πρέπει να ενταχθεί και η νυχτερινή μόνωση των υαλοστασίων, αφού έχει μεγάλη συμβολή στον περιορισμό της απώλειας θερμότητας προς το περιβάλλον (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 99).

Ρυθμίσεις του συστήματος άμεσου ηλιακού οφέλους

Για να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος άμεσου ηλιακού οφέλους πρέπει να μελετηθεί η λειτουργία μιας σειράς ρυθμίσεων που αποσκοπούν στη μείωση των απωλειών θερμότητας τον χειμώνα και στην αποφυγή της υπερθέρμανσης το καλοκαίρι (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 99).

Πολύ σημαντικός για τη μείωση των απωλειών θερμότητας είναι ο έλεγχος του ρυθμού αλλαγής αέρα του κτιρίου, αφού με την έξοδο του εσωτερικού αέρα διαφεύγει σημαντικό ποσοστό της θερμότητας που συλλέγεται. Οι αλλαγές αέρα του χώρου θα πρέπει να περιοριστούν στις απαραίτητες για την επίτευξη των συνθηκών υγιεινής, και αυτό μπορεί να γίνει με τρόπους όπως η βελτίωση της ανεμοστεγανότητας των κουφωμάτων ή η προσεκτική –κατά το δυνατόν περιορισμένη– χρήση των ανοιγμάτων, ιδιαίτερα όταν υπάρχει μεγάλη διαφορά εσωτερικής-εξωτερικής θερμοκρασίας (Στο ίδιο).

Στη μείωση των απωλειών θερμότητας συντελεί η εγκατάσταση και σωστή λειτουργία νυχτερινής μόνωσης των υαλοστασίων, όπως έχει προαναφερθεί, κατά τις νυχτερινές ώρες και η αφαίρεσή της το πρωί. Εάν για κάποιον λόγο αυτοί οι χειρισμοί παραληφθούν, διαταράσσεται, όπως είναι αντιληπτό, η καλή λειτουργία του συστήματος (Στο ίδιο).

Στην αποφυγή της υπερθέρμανσης το καλοκαίρι συμβάλλουν σημαντικά οι διατάξεις σκιασμού των υαλοστασίων (βλ. Κεφ. 8 και Κεφ. 9), σταθερές ή κινητές όταν χρησιμοποιούνται σωστά. Άλλη δυνατότητα που προσφέρεται για την αποφυγή υπερθέρμανσης του χώρου, «πυροσβεστική» θα μπορούσε να χαρακτηριστεί, είναι η απόρριψη θερμού αέρα από θυρίδες εξαερισμού ή η ενεργοποίηση ηλεκτρικών εξαεριστήρων (Στο ίδιο).

Οι ρυθμίσεις που αναφέρθηκαν προϋποθέτουν την άμεση συνεργασία του ενοίκου για να λειτουργήσει το σύστημα. Θα πρέπει, για παράδειγμα, να τοποθετεί συστηματικά τη νυχτερινή μόνωση ή να ανοίγει τις θυρίδες εξαερισμού όταν υπάρχει πιθανότητα υπερθέρμανσης. Στην περίπτωση που διαπιστωθεί ότι δεν υπάρχουν καλές προοπτικές χειροκίνητης λειτουργίας των ρυθμίσεων, μπορεί να εξεταστεί η δυνατότητα χρήσης απλών αυτοματισμών. Κατάλληλοι τέτοιοι αυτοματισμοί για τη νυχτερινή μόνωση είναι τα ηλεκτροκίνητα θερμομονωτικά ρολά που ελέγχονται από χρονοδιακόπτη ή φωτοκύτταρα, ενώ για την απαγωγή θερμού αέρα, οι ηλεκτροκίνητοι εξαεριστήρες τοίχου ή οροφής που ελέγχονται από θερμοστάτες. Η χρήση των απαραίτητων αυτοματισμών δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ότι αναιρεί τον παθητικό χαρακτήρα του συστήματος, δεδομένου ότι η εξωτερική ενέργεια που χρησιμοποιείται είναι ασήμαντη σε σχέση με αυτήν που εξοικονομείται (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 100).

Πλεονεκτήματα του συστήματος άμεσου ηλιακού οφέλους

- Είναι το απλούστερο παθητικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης ως προς τη δομή και λειτουργία του. Εάν το κτίριο στο οποίο εφαρμόζεται έχει φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα, το κόστος εφαρμογής του μπορεί να είναι πολύ μικρό έως αμελητέο. Τα υλικά και οι τεχνικές που απαιτούνται για την εφαρμογή και τον έλεγχο του συστήματος είναι κατά κανόνα συμβατικά, δηλαδή τρέχουσας οικοδομικής τεχνολογίας.
- Οι επιφάνειες υαλοστασίων που απαιτούνται για τη θέρμανση συνεισφέρουν και στον φυσικό φωτισμό των χώρων, όπως και στην οπτική επαφή με το περιβάλλον, αρκεί για το τελευταίο να είναι ευνοϊκός ο προσανατολισμός των ανοιγμάτων.
- Ο σχεδιασμός του συστήματος επιτρέπει μεγάλο βαθμό ελευθερίας μορφής και υλικών στη σύνθεση του κτιρίου.
- Παρουσιάζει την υψηλότερη απόδοση από όλα τα άλλα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 100).

Μειονεκτήματα του συστήματος άμεσου ηλιακού οφέλους

- Οι ακάλυπτες επιφάνειες υαλοστασίων μπορούν να προκαλέσουν οπτική θάμβωση και περιορισμό της ιδιωτικότητας των χρηστών του κτιρίου.
- Το υπεριώδες τμήμα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας φθείρει τα χρώματα ευαίσθητων υλικών και υφασμάτων.
- Πρέπει να ληφθούν μέτρα για την ασφάλεια των υαλοστασίων (π.χ. από κίνδυνο διαρρήξεων), με τρόπο όμως που δεν θα περιορίζει την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Η απαίτηση να χρησιμοποιούνται «σκληρά» δάπεδα, όπως από μάρμαρο ή κεραμικά πλακίδια, για λόγους θερμικής αποθήκευσης δεν είναι πάντοτε λειτουργικά αποδεκτή.
- Εάν δεν γίνουν οι κατάλληλοι χειρισμοί ρυθμίσεων του συστήματος, υπάρχει πιθανότητα να δημιουργηθεί σοβαρή απόκλιση από τις συνθήκες θερμικής άνεσης (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 100).

Μορφολογική έκφραση του συστήματος άμεσου ηλιακού οφέλους

Η εφαρμογή του παθητικού συστήματος άμεσου ηλιακού οφέλους επισημαίνεται από την τοποθέτηση του κτιρίου στο οικόπεδο, τον προσανατολισμό του και τη διάπλαση του όγκου του, με τρόπο ώστε τα ανοίγματά του να δέχονται, όσο το δυνατό, ανεμπόδιστα την ηλιακή ακτινοβολία, όταν αυτό είναι εφικτό (θέση οικοπέδου, γειτονικά κτίρια κ.λπ.). Διακρίνεται, επίσης, από την ανάπτυξη του μεγαλύτερου εμβαδού υαλοστασίων στις νότιες όψεις του κτιρίου και από τα στοιχεία σκιασμού/νυχτερινής μόνωσης που τα προστατεύουν. Τα στοιχεία σκιασμού/νυχτερινής μόνωσης είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τη διαφοροποίηση του συστήματος από συμβατικές κατασκευές, στις οποίες τα θερμικά μειονεκτήματα των μεγάλων υαλοστασίων αντιμετωπίζονται με τη χρήση κλιματιστικών συσκευών (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 100-101).

Η παρουσία νότιων φεγγιτών στέγης εκφράζει με ένταση την εφαρμογή του συστήματος άμεσου ηλιακού οφέλους σε ένα κτίριο. Επίσης, ανάλογη εντύπωση μπορούν να δώσουν υαλοστάσια που αποκλίνουν από την όψη του κτιρίου προκειμένου να αποκτήσουν νότιο προσανατολισμό (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 101).

7.3 Έμμεσο ηλιακό κέρδος

Στα συστήματα έμμεσου ηλιακού οφέλους, η ηλιακή ακτινοβολία δεν εισέρχεται στον χώρο που προβλέπεται να θερμανθεί, αλλά η θερμότητα συλλέγεται και μεταδίδεται από κατασκευές που εφάπτονται σε αυτόν. Θα εξεταστούν τρεις τύποι συστημάτων έμμεσου ηλιακού οφέλους (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 101):

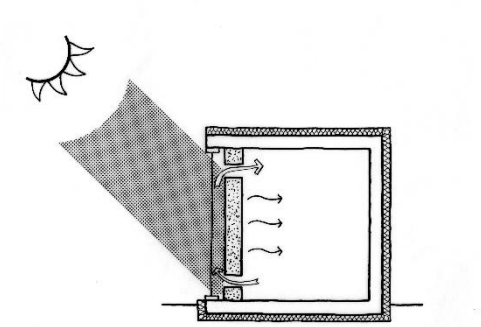
α) ο τοίχος Trombe-Michel και ο τοίχος μάζας,

β) το προσαρτημένο θερμοκήπιο και ο ηλιακός χώρος,

γ) το σύστημα δεξαμενής δώματος (*roof pond*).

7.3.1 Τοίχος Trombe-Michel και τοίχος μάζας

Το σύστημα τοίχου Trombe-Michel εφαρμόστηκε πρώτη φορά από τον φυσικό Félix Trombe και τον αρχιτέκτονα Jacques Michel στο Odeillo της Γαλλίας το 1967. Αποτελείται από ένα υαλοστάσιο τοποθετημένο σε μικρή απόσταση (περ. 10 εκ.) μπροστά από έναν συμπαγή, θερμικά αγώγιμο νότιο τοίχο, του οποίου η εξωτερική επιφάνεια βάφεται με σκούρο χρώμα, για να αυξηθεί η απορροφητικότητά του (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 101) (Εικόνα 7.6).



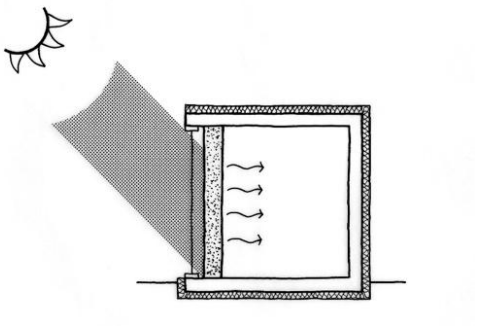
Εικόνα 7.6 *Σχηματική διάταξη λειτουργίας τοίχου Trombe-Michel. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*



Εικόνα 7.7 *Παράδειγμα κτιρίου με τοίχο Trombe-Michel. Κατοικία στο Αττικό Άλσος, Αθήνα (Μιχάλης Σουβατζίδης, 1985). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Η. Ζαχαρόπουλος).*

Η ηλιακή ακτινοβολία, διαπερνώντας το υαλοστάσιο, προσπίπτει στον σκουρόχρωμο τοίχο, με συνέπεια την άνοδο της επιφανειακής του θερμοκρασίας, η οποία με τη σειρά της θερμαίνει τον αέρα στο διάκενο υαλοστασίου-τοίχου. Ποσοστό της θερμότητας που απορροφήθηκε από τον τοίχο μεταδίδεται διαμέσου της μάζας του με αγωγή στην εσωτερική του επιφάνεια και από εκεί, με ακτινοβολία και μεταφορά, προς τον χώρο. Ο θερμός αέρας του διάκενου είναι ελαφρύτερος και οδεύει προς τον χώρο από θυρίδες στην κορυφή του τοίχου και ανακυκλώνεται με αέρα από θυρίδες στη βάση του τοίχου. Η θερμοσιφωνική ροή που δημιουργείται μεταβιβάζει στον χώρο θερμότητα με μεταφορά, επιπλέον εκείνης που μεταδίδεται με αγωγή από το σώμα του τοίχου (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 102).

Ο τοίχος μάζας διαφέρει από τον τοίχο Trombe-Michel ως προς το ότι δεν διαθέτει θυρίδες για την κυκλοφορία του αέρα, που στην περίπτωση αυτή παραμένει στάσιμος στο διάκενο (Εικόνα 7.8). Η μετάδοση θερμότητας από τον τοίχο μάζας προς τον χώρο γίνεται μόνο με αγωγή έως την εσωτερική επιφάνεια του τοίχου και από εκεί με ακτινοβολία και με μεταφορά (Στο ίδιο).



Εικόνα 7.8 *Σχηματική διάταξη λειτουργίας τοίχου μάζας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*



Εικόνα 7.9 *Παράδειγμα κτιρίου με τοίχο μάζας. Βιοκλιματική Κατοικία στα Κουνουπιδιανά Ακρωτηρίου, Χανιά, Κρήτη (Ι. Καλλιγέρης, 1981). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Η. Ζαχαρόπουλου).*

Στα συστήματα τοίχου Trombe-Michel και τοίχου μάζας, το υαλοστάσιο αποτελεί το στοιχείο συλλογής ηλιακής ενέργειας του συστήματος, στον συμπαγή τοίχο αποθηκεύεται η θερμότητα, η οποία κατόπιν μεταδίδεται, κατά περίπτωση, με ακτινοβολία και μεταφορά στον χώρο όπου εντάσσεται το σύστημα (Στο ίδιο).

Η ορθή και αποδοτική λειτουργία των συστημάτων τοίχου Trombe-Michel και τοίχου μάζας καθορίζεται από μια σειρά παραγόντων που ομαδοποιούνται συστηματικά ως εξής (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 102-103):

- **Ο προσανατολισμός του τοίχου.** Για να μεγιστοποιείται η συλλογή ηλιακής ενέργειας, τον χειμώνα το υαλοστάσιο πρέπει να έχει νότιο προσανατολισμό. Για πρακτικούς λόγους, είναι αποδεκτή απόκλιση έως 30ο από τον Νότο, ισχύει δηλαδή ό,τι έχει αναφερθεί για τον προσανατολισμό των υαλοστασίων στο σύστημα του άμεσου ηλιακού οφέλους.
- **Το υλικό του τοίχου.** Για να επιτυγχάνεται αποδοτικά η μετάδοση θερμότητας διαμέσου του τοίχου, το υλικό δομής του πρέπει να έχει σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Επιπλέον, για να εξασφαλίζεται η λειτουργία της θερμικής αποθήκευσης, πρέπει να διαθέτει υψηλή θερμοχωρητικότητα. Κατάλληλα οικοδομικά υλικά για τοίχους Trombe-Michel και τοίχους μάζας είναι κυρίως το οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως επίσης οι λιθοδομές με λιθοσώματα υψηλής πυκνότητας, οι συμπαγείς τσιμεντόλιθοι και τα συμπαγή κεραμικά τούβλα.
- **Το πάχος του τοίχου**. Η ηλιακή ακτινοβολία, προσπίπτοντας στον τοίχο, απορροφάται και αυξάνει την επιφανειακή του θερμοκρασία. Η μετάδοση θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια του τοίχου στην εσωτερική δεν γίνεται αμέσως, αλλά με χρονική υστέρηση και ταυτόχρονη μερική απόσβεση της αύξησης θερμοκρασίας, φαινόμενο που εξαρτάται από το είδος και το πάχος του υλικού δομής του τοίχου. Σε τοίχους, π.χ. από οπλισμένο σκυρόδεμα, παρατηρείται χρονική υστέρηση 2 έως 2,8 ωρών για κάθε 10 εκ. πάχους υλικού, μεταξύ της μέγιστης ηλιακής απορρόφησης και μετάδοσης της θερμότητας εσωτερικά, λόγω της χρονικής υστέρησης που χαρακτηρίζει τα θερμοχωρητικά υλικά (Κεφ. 5, παρ. 5.4.4). Με την επιλογή, δηλαδή, πάχους του τοίχου προσφέρεται η δυνατότητα να ρυθμιστεί ο χρόνος μετάδοσης της θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια, όπως και να ελεγχθεί η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Εάν, για παράδειγμα, επιλεγεί τοίχος από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 30 εκ., τότε υπολογίζεται ότι η μέγιστη θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου θα γίνει αισθητή 6 έως 7,8 ώρες αφότου καταγραφεί στην εξωτερική του επιφάνεια. Μια τέτοια εφαρμογή του συστήματος θα ήταν πιθανότατα κατάλληλη για κτίρια κατοικίας, ενώ δεν θα εξυπηρετούσε σχολικό κτίριο αποκλειστικά πρωινής λειτουργίας.
- **Το χρώμα του τοίχου.** Για να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος πρέπει να αυξηθεί κατά το δυνατόν περισσότερο η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τον τοίχο. Σε τούτο συντελεί το χρώμα της εξωτερικής επιφάνειας του τοίχου, το οποίο πρέπει να είναι σκούρο και για μεγαλύτερη απόδοση μαύρο.

  Τα κοινά σκούρα χρώματα διακρίνονται για την υψηλή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και για την υψηλή εκπομπή της μακροκύματης ακτινοβολίας, δηλαδή της θερμότητας. Η κατάσταση μπορεί να βελτιωθεί με την επικόλληση μιας επιλεκτικής επιφάνειας (selective surface) στην εξωτερική πλευρά του τοίχου. Το λεπτό αυτό σκούρο μεταλλικό φύλλο έχει ως χαρακτηριστική ιδιότητα την υψηλή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και ταυτόχρονα τη μειωμένη εκπομπή θερμότητας. Η χρήση επιλεκτικής επιφάνειας αποδίδει βελτιωμένο θερμικό ισοζύγιο σε σχέση με τα κοινά χρώματα.
- **Οι θυρίδες κυκλοφορίας θερμού αέρα.** Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο τοίχος Trombe-Michel διαφέρει από τον τοίχο μάζας ως προς το ότι διαθέτει θυρίδες στην κορυφή και στη βάση του για να

επιτυγχάνεται θερμοσιφωνική κυκλοφορία του αέρα. Έχει υπολογιστεί ότι, υπό βέλτιστες συνθήκες κυκλοφορίας του αέρα σε έναν τοίχο Trombe-Michel από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 30 εκ., το 30% της συνολικής ροής ενέργειας γίνεται με θερμοσιφωνισμό και το υπόλοιπο 70% με αγωγή διαμέσου του τοίχου (Givoni, 1998, σ. 163).

> Η μετάδοση θερμότητας και με θερμοσιφωνική ροή επιτρέπει στον τοίχο Trombe-Michel να έχει ταχύτερη απόκριση σε σχέση με εκείνη του τοίχου μάζας. Αυτό οφείλεται στο ότι ο αέρας του διάκενου μόλις θερμανθεί εισέρχεται αμέσως στον χώρο από τις επάνω θυρίδες του τοίχου. Το ποσοστό της θερμότητας που μεταδίδεται διαμέσου της μάζας του τοίχου καθυστερεί χρονικά, ανάλογα με το υλικό και το πάχος του, επειδή, όπως εξηγήθηκε, κινείται με αγωγή από την εξωτερική επιφάνεια προς την εσωτερική. Η ταχύτερη απαγωγή ηλιακής θερμότητας από τον τοίχο Trombe-Michel, λόγω θερμοσιφωνισμού, συμβάλλει επιπλέον και στη διατήρηση χαμηλότερων θερμοκρασιών στην εξωτερική του επιφάνεια, με συνέπεια την αύξηση της απόδοσής του κατά 10% περίπου σε σχέση με τον τοίχο μάζας (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 103).

Βασική προϋπόθεση για την επίτευξη υψηλής απόδοσης στη λειτουργία τοίχου Trombe-Michel είναι ότι δεν θα επιτραπεί τη νύχτα η αντίστροφη κυκλοφορία του αέρα στο διάκενο. Η προσφορότερη μέθοδος για την αποτροπή της αντίστροφης κυκλοφορίας του αέρα είναι η τοποθέτηση διαφραγμάτων στις κάτω θυρίδες. Χωρίς το διάφραγμα, ο θερμότερος αέρας του χώρου θα περάσει από την άνω θυρίδα στο διάκενο, θα ψυχθεί και θα εξέλθει από την κάτω θυρίδα, δημιουργώντας ένα κύκλωμα ψύξης του εσωτερικού χώρου. Τον ρόλο του διαφράγματος μπορεί να παίξει ένα λεπτό πλαστικό φύλλο (π.χ. από πολυαιθυλένιο, PE) τοποθετημένο στην πλευρά της θυρίδας που βλέπει προς το υαλοστάσιο, έτσι ώστε να ανασηκώνεται από την κυκλοφορία του αέρα την ημέρα και να εμποδίζει την αντίστροφη τη νύχτα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 104).

- **Ο τύπος των υαλοπινάκων και του πλαισίου τους.** Όταν υπάρχει ηλιοφάνεια, οι υαλοπίνακες συνεισφέρουν θετικά στη λειτουργία του συστήματος λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Τη νύχτα, όμως, ή στη διάρκεια συννεφιάς τον χειμώνα παρατηρούνται σημαντικές απώλειες θερμότητας από τον τοίχο Trombe-Michel ή τον τοίχο μάζας μέσω των υαλοπινάκων. Για τον περιορισμό των θερμικών απωλειών μπορεί να γίνει χρήση ειδικών τύπων υαλοπινάκων ή να χρησιμοποιηθούν κινητά συστήματα μονώσεων (νυχτερινή μόνωση) (Στο ίδιο).

  > Το πλαίσιο των υαλοπινάκων στα συστήματα τοίχου Trombe-Michel και τοίχου μάζας πρέπει να είναι κατασκευασμένο κατά τρόπο που να περιορίζει τις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Αυτό εξαρτάται (Στο ίδιο):

  α. Από τις θερμομονωτικές ιδιότητες των διατομών που χρησιμοποιούνται. Κατάλληλες είναι οι διατομές με υψηλή αντίσταση θερμοδιαφυγής, όπως οι ξύλινες, οι πλαστικές, αλλά και λιγότερο οι μεταλλικές (αλουμινίου ή χάλυβα), με την προϋπόθεση να διαθέτουν ζώνη θερμοδιακοπής.

  β. Από τον τρόπο λειτουργίας του. Το σταθερό, δηλαδή το μη ανοιγόμενο, είναι το πλαίσιο με τις μικρότερες θερμικές απώλειες από τους αρμούς του. Επίσης, επιλέγεται και για το μικρότερό του κόστος σε σχέση με τα ανοιγόμενα.

  Στους τοίχους Trombe-Michel η επιλογή σταθερού υαλοστασίου δεν επιτρέπει τον καθαρισμό του υαλοπίνακα εσωτερικά από τη σκόνη που μεταφέρει ο θερμοσιφωνισμός. Η συσσώρευση σκόνης μπορεί να μειώσει την απόδοση του συστήματος, πέρα από την

αισθητική επίπτωση. Οι εναλλακτικές λύσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος είναι συνήθως τόσο πολύπλοκες και δαπανηρές, ώστε να προτιμάται σε πολλές περιπτώσεις η εφαρμογή του λειτουργικά απλούστερου τοίχου μάζας.

Ο σκιασμός του υαλοστασίου. Η λειτουργία του τοίχου Trombe-Michel και του τοίχου μάζας πρέπει να αποτραπεί τη διάρκεια του καλοκαιριού για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του χώρου. Έχει παρατηρηθεί ότι το ποσοστό της θερμικής ενέργειας που μεταδίδεται εσωτερικά είναι μεγαλύτερο το καλοκαίρι από εκείνο του χειμώνα, λόγω της διαφορετικής σχέσης θερμοκρασίας μεταξύ του τοίχου και των θερμοκρασιών εσωτερικού χώρου και εξωτερικού περιβάλλοντος. Ενώ η εσωτερική θερμοκρασία δεν διαφέρει σημαντικά κατά τη διάρκεια του έτους, το καλοκαίρι οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι πολύ υψηλότερες, με συνέπεια μεγαλύτερο ποσοστό της απορροφούμενης θερμότητας να μεταδίδεται προς τον χώρο. Παρά τη μείωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο υαλοστάσιο, λόγω του ύψους του ήλιου στον Νότο, ο παράγοντας αυτός αυξάνει την πιθανότητα υπερθέρμανσης του χώρου (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 104).

Ο πλήρης σκιασμός του υαλοστασίου είναι ο μόνος τρόπος για να αποτραπεί η λειτουργία του συστήματος το καλοκαίρι. Η χρήση προστεγασμάτων είναι αναποτελεσματική επειδή δεν εμποδίζεται η πρόσπτωση της ανακλώμενης και της διάχυτης ακτινοβολίας στο υαλοστάσιο. Κατάλληλα είναι κινητά στοιχεία σκιασμού διαφόρων τύπων που τοποθετούνται μπροστά (εξωτερικά) από το υαλοστάσιο, όπως κατακόρυφη τέντα, ρολό και συμπαγή σκούρα (Στο ίδιο).

- **Η νυχτερινή μόνωση του τοίχου.** Τον χειμώνα πρέπει να ληφθούν μέτρα για τον περιορισμό της απώλειας θερμότητας με ακτινοβολία από τον τοίχο προς το περιβάλλον. Δεδομένης της μεγαλύτερης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας τοίχου-περιβάλλοντος σε σχέση με τη διαφορά θερμοκρασίας επιφάνειας τοίχου-εσωτερικού χώρου, εάν δεν θερμομονωθεί το υαλοστάσιο, σημαντικό ποσοστό της θερμότητας που συλλέχθηκε θα διαφύγει στο περιβάλλον. Η χρήση νυχτερινής μόνωσης γίνεται απαραίτητη στους τοίχους Trombe-Michel και μάζας, ιδιαίτερα εάν επιδιώκεται υψηλή απόδοση του συστήματος. Η ανάγκη θερινού σκιασμού και νυχτερινής μόνωσης του υαλοστασίου μπορεί να καλυφθεί από το ίδιο πέτασμα, με την προϋπόθεση ότι ικανοποιεί και τις δύο απαιτήσεις, π.χ. ένα εξωτερικό ρολό με θερμομονωτικά φυλλαράκια μπορεί να προσφέρει νυχτερινή μόνωση και άριστο σκιασμό των υαλοστασίων (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 105).

Ρυθμίσεις των συστημάτων τοίχου Trombe-Michel και τοίχου μάζας

Η αποδοτική λειτουργία του τοίχου Trombe-Michel και του τοίχου μάζας εξαρτάται από μια σειρά ρυθμίσεων που πρέπει να εκτελούνται προγραμματισμένα. Τον χειμώνα πρέπει να τοποθετείται συστηματικά το στοιχείο νυχτερινής μόνωσης, στην περίπτωση, βέβαια, που έχει προβλεφθεί. Το καλοκαίρι είναι απαραίτητος ο πλήρης σκιασμός του υαλοστασίου, ώστε να αποκλειστεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας και η συνεπαγόμενη υπερθέρμανση του χώρου (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 105). Στην περίπτωση του τοίχου Trombe-Michel, πρέπει επιπλέον να ελέγχεται η καλή λειτουργία των διαφραγμάτων στις κάτω θυρίδες (Στο ίδιο).

Πλεονεκτήματα των συστημάτων τοίχου Trombe-Michel και τοίχου μάζας

- Χρονική υστέρηση της μετάδοσης θερμότητας, ιδιαίτερα στην περίπτωση του τοίχου μάζας, η οποία προσφέρει τη δυνατότητα να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες θέρμανσης κτιρίων με ευρύ ωράριο λειτουργίας.

- Η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μικρότερη σε σύγκριση με τα περισσότερα άλλα παθητικά συστήματα.
- Η ηλιακή ακτινοβολία δεν εισέρχεται στον χώρο, οπότε δεν δημιουργείται οπτική θάμβωση και φθορά χρωμάτων ευαίσθητων υλικών.
- Δεν δημιουργούνται προβλήματα ασφάλειας του χώρου, επειδή δεν υπάρχει άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον.
- Το σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί και σε κτίρια με χαμηλή θερμοχωρητικότητα, όπως είναι τα ξύλινα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 106).

Μειονεκτήματα των συστημάτων τοίχου Trombe-Michel και τοίχου μάζας

- Η αποθήκευση θερμότητας στον τοίχο, στη ζώνη του εξωτερικού περιβλήματος του κτιρίου και με το υαλοστάσιο ως το μόνο στοιχείο που τον διαχωρίζει από το περιβάλλον, μπορεί να προκαλέσει σημαντικές απώλειες θερμότητας, εάν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα.
- Η μετάδοση θερμότητας είναι αισθητή σε βάθος από 1 έως 1½ φορά το ύψος του τοίχου. Τούτο οφείλεται στην εμβέλεια εκπομπής της θερμικής ακτινοβολίας από τον τοίχο, όπως και στο περιορισμένο βάθος των ρευμάτων μεταφοράς θερμότητας.
- Το καλοκαίρι, εάν δεν σκιαστεί πλήρως το υαλοστάσιο, υπάρχει αυξημένος κίνδυνος υπερθέρμανσης του χώρου.
- Έχει μεγαλύτερο κόστος κατασκευής και καταλαμβάνει ωφέλιμο χώρο στο κτίριο, σε σύγκριση με το σύστημα του άμεσου ηλιακού οφέλους (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 106).

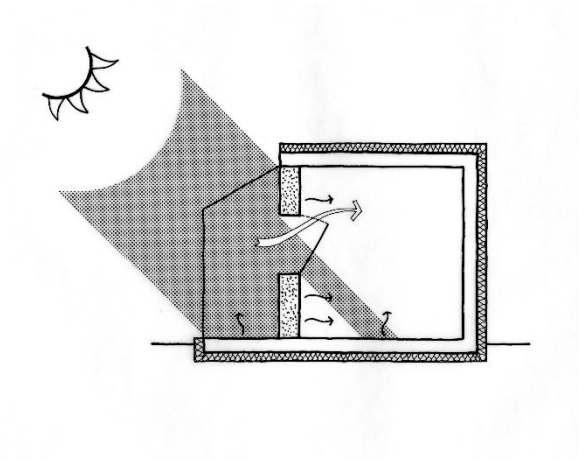
Μορφολογική έκφραση των συστημάτων τοίχου Trombe-Michel και τοίχου μάζας

Η εφαρμογή των συστημάτων τοίχου Trombe-Michel και τοίχου μάζας επισημαίνεται από την παρουσία μεγάλων νότιων υαλοστασίων, πίσω από τα οποία διακρίνεται μια σκούρα, τυφλή επιφάνεια. Η εικόνα αυτή δεν είναι οικεία στο ευρύ κοινό, μπορεί όμως με την ευρύτερη εφαρμογή του συστήματος να αποτελέσει κριτήριο για την αναγνώριση της παθητικής λειτουργίας του κτιρίου (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 106). Η κατασκευή των τοίχων με άλλα υλικά, όπως σκουρόχρωμη πέτρα ή συμπιεσμένη άργιλο (rammed earth), μπορεί να μειώνει την απόδοση του συστήματος, αλλά βελτιώνει σημαντικά την αισθητική του.

7.3.2 Προσαρτημένο θερμοκήπιο και ηλιακός χώρος

Ένα νότια προσανατολισμένο θερμοκήπιο σε επαφή με το κτίριο αποτελεί την κύρια κατασκευή για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας σε αυτό το σύστημα. Θερμοκήπιο (greenhouse ή sunspace), στη συγκεκριμένη περίπτωση, ονομάζεται ένας χώρος που στεγάζεται με υαλοπίνακες, του οποίου μία ή περισσότερες περιμετρικές πλευρές κλείνουν επίσης με γυαλί (Εικόνα 7.10). Το πρότυπο των βοτανικών θερμοκηπίων, που έρχεται από τη Βικτωριανή Αγγλία, έχει γυάλινη στέγαση επειδή αποβλέπει στη μέγιστη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας και είναι προσαρμοσμένο στις εκεί κλιματικές συνθήκες. Όσον αφορά τα γεωγραφικά πλάτη της Ελλάδας και τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες, οι κεκλιμένοι υαλοπίνακες της στέγασης του θερμοκηπίου δημιουργούν σοβαρό πρόβλημα θερμικού ισοζυγίου στο σύστημα. Για παράδειγμα, στο γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας, τον Δεκέμβρη, η ηλιακή ενέργεια που μεταδίδεται κάθε ημέρα από μονό κατακόρυφο υαλοπίνακα υπολογίζεται σε 2,27 kW/m^2, ενώ εκείνη από μονό υαλοπίνακα με κλίση 30^o σε 2,16 kW/m^2. Τα αντίστοιχα στοιχεία για τον Ιούνιο υπολογίζονται: σε 1,68 kW/m^2 (90^o) και σε 8,28 kW/m^2 (30^o). Από τα στοιχεία αυτά προκύπτει ότι, ενώ τον χειμώνα η γυάλινη οροφή συνεισφέρει ώστε να εισέρχεται συνολικά περισσότερη ηλιακή ενέργεια στο θερμοκήπιο, το καλοκαίρι οι πολύ υψηλότερες ηλιακές πρόσοδοι από τα κεκλιμένα υαλοστάσια θα προκαλέσουν υπερθέρμανση. Επιπλέον, πρέπει να συνυπολογιστεί το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια του χειμώνα σημειώνονται μεγάλες απώλειες θερμότητας

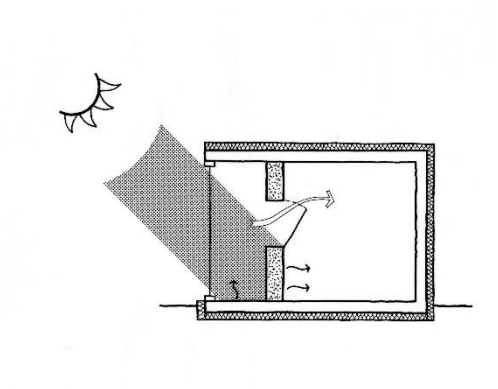
με ακτινοβολία από τη γυάλινη οροφή προς τον νυχτερινό ουρανό (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 107).



Εικόνα 7.10 *Σχηματική διάταξη λειτουργίας προσαρτημένου θερμοκηπίου. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*



Εικόνα 7.11 *Παράδειγμα κτιρίων με προσαρτημένο θερμοκήπιο στο Ολυμπιακό Χωριό, Πεύκη, Αττική (Γραφείο Μελετών Α. Ν. Τομπάζη, 1984). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Η. Ζαχαρόπουλου).*



Εικόνα 7.12 *Σχηματική διάταξη λειτουργίας ηλιακού χώρου. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*



Εικόνα 7.13 *Παράδειγμα κτιρίου με ηλιακό χώρο. Beddington Zero Energy Development (BedZED), Hackbridge, London (2000-2002). Πηγή: BedZED by Tom Chance via Wikimedia Commons, CC-BY.*

Ο ηλιακός χώρος (*sunporch*) διαφέρει από το θερμοκήπιο κατά το ότι η στέγασή του (κεκλιμένη ή οριζόντια) είναι αδιαφανής και θερμομονωμένη (Εικόνα 7.12). Η αντικατάσταση της γυάλινης οροφής με αδιαφανή οροφή αντιμετωπίζει ριζικά το πρόβλημα της μετάδοσης μεγάλων ποσών ενέργειας από τη στέγαση (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 107).

Το θερμοκήπιο ή ο ηλιακός χώρος προσαρτώνται στο κτίριο διαμέσου ενός θερμικά αγώγιμου τοίχου, ο ρόλος του οποίου είναι να αποθηκεύει θερμότητα και να τη μεταδίδει με αγωγή, αλλά και με μεταφορά από τα ανοίγματά του προς το κτίριο. Με τον τρόπο αυτόν, θα μπορούσε να πει κανείς ότι, όσον αφορά τη συλλογή ενέργειας, το σύστημα λειτουργεί όπως το άμεσο όφελος, ενώ όσον αφορά την αποθήκευση και μετάδοση της θερμότητας ομοιάζει προς τον τοίχο Trombe-Michel, στον οποίο ο χώρος μεταξύ υαλοστασίου και τοίχου είναι προσβάσιμος (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 108).

Εάν το θερμοκήπιο/ηλιακός χώρος επιλεγεί να χρησιμοποιείται ως βιώσιμη επέκταση των χώρων του κτιρίου όλες τις εποχές του έτους, πρέπει να τοποθετηθεί επιπλέον μάζα αποθήκευσης θερμότητας, με καταλληλότερη θέση στο πάτωμα, ώστε να μετριάζεται η μεγάλη διακύμανση της εσωτερικής του θερμοκρασίας (Στο ίδιο).

Ο ενδιάμεσος τοίχος συλλογής-μετάδοσης της θερμότητας κατασκευάζεται από δομικά υλικά θερμικά αγώγιμα, υψηλής θερμοχωρητικότητας και με ανοίγματα που επιτρέπουν την επικοινωνία ανάμεσα στο θερμοκήπιο/ηλιακό χώρο και το κτίριο. Η θερμότητα που συλλέγεται από τον τοίχο μεταδίδεται με αγωγή διαμέσου της μάζας του και, σε μεγαλύτερο ποσοστό, με μεταφορά θερμού αέρα από τα ανοίγματα, που είναι συνήθως παράθυρα ή πόρτες, προς το κτίριο. Τις νύχτες του χειμώνα πρέπει να κλείνονται τα ανοίγματα για να απομονωθεί το θερμοκήπιο/ηλιακός χώρος από το υπόλοιπο κτίριο. Στην περίπτωση κατά την οποία έχει προβλεφθεί νυχτερινή μόνωση της επιφάνειας του τοίχου στην πλευρά που βλέπει προς το θερμοκήπιο/ηλιακό χώρο, εξασφαλίζεται ότι μεγαλύτερο ποσοστό της αποθηκευμένης στον τοίχο θερμότητας θα μεταδοθεί στο κτίριο (Στο ίδιο).

Μια παραλλαγή της λειτουργίας του συστήματος αντιμετωπίζει το θερμοκήπιο/ηλιακό χώρο ως συλλέκτη θερμού αέρα που θα διοχετευθεί στο κτίριο από τα ανοίγματα του ενδιάμεσου τοίχου ή από αεραγωγούς. Στην περίπτωση αυτή, προτιμάται να χρησιμοποιηθούν δομικά υλικά με μικρή θερμοχωρητικότητα για να ελαχιστοποιηθεί η δέσμευση θερμότητας από το κέλυφος του θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου (Στο ίδιο).

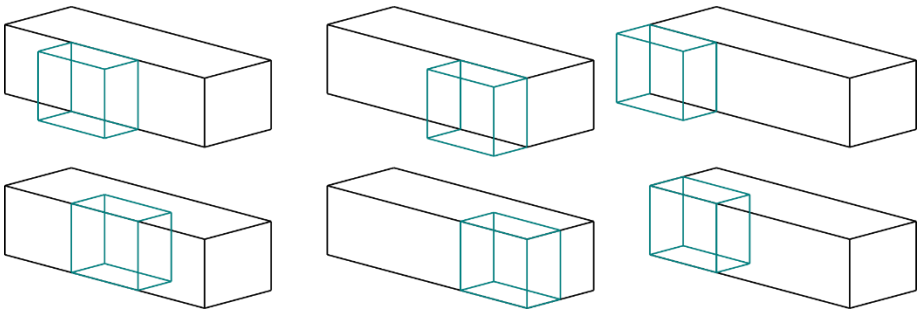
Η διακύμανση των θερμοκρασιών μέσα στο θερμοκήπιο/ηλιακό χώρο σε αυτή την εφαρμογή είναι μεγαλύτερη παρά σε κάθε άλλο παθητικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης. Κατά συνέπεια, ο ενδιάμεσος τοίχος πρέπει να μονώνεται, ώστε να είναι δυνατή η πλήρης θερμική απομόνωση του θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου, όταν παύσει η κυκλοφορία του ζεστού αέρα (Στο ίδιο).

Οι παράγοντες που καθορίζουν την αποδοτική λειτουργία του συστήματος θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου ομαδοποιούνται συστηματικά ως εξής (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 108):

- **Η θέση του θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου ως προς το κτίριο.** Η επαφή ενός θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου στη νότια όψη κτιρίου είναι εξ ορισμού απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία του συστήματος. Ο τρόπος επαφής επιδέχεται διάφορες παραλλαγές.

Στη βασική περίπτωση, επαφή υπάρχει μόνο κατά μήκος της νότιας πλευράς του κτιρίου. Η ανατολική και δυτική πλευρά του θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου παραμένουν ελεύθερες, με δυνατότητα στις θέσεις αυτές να τοποθετηθούν υαλοπίνακες. Η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να συλλέγει ηλιακή ενέργεια από τον πρωινό ή απογευματινό ήλιο και να προσφέρει ευρύτερη οπτική επαφή με το περιβάλλον· μειονεκτεί, όμως, επειδή αυξάνουν οι θερμικές απώλειες τη νύχτα και οι –μη επιθυμητές– ηλιακές πρόσοδοι το καλοκαίρι, κυρίως από τη δυτική πλευρά.

Στις άλλες παραλλαγές, το θερμοκήπιο/ηλιακός χώρος εφάπτεται κατά μήκος δύο πλευρών του στο κτίριο, που έχει σχήμα κάτοψης Γ, ή κατά μήκος των τριών πλευρών τους, οπότε το κτίριο αναπτύσσεται σε σχήμα Π γύρω από αυτό. Οι διατάξεις αυτές, ιδιαίτερα η δεύτερη, εξασφαλίζουν καλύτερη θερμική επαφή με το κτίριο και περιορίζουν τις απώλειες προς το περιβάλλον, με συνέπεια την αύξηση της απόδοσης του συστήματος.



Εικόνα 7.14 *Περιπτώσεις χωροθέτησης θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου σε σχέση με τον όγκο του κτιρίου. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

- **Η δυνατότητα θερμικής απομόνωσης από το κτίριο.** Το θερμοκήπιο/ηλιακός χώρος αποτελεί τμήμα του κτιρίου στο οποίο σημειώνονται μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως χώρος διαβίωσης, όταν οι συνθήκες θερμοκρασίας είναι κατάλληλες, πρέπει όμως να απομονώνεται από το υπόλοιπο κτίριο, όταν οι συνθήκες θερμοκρασίας γίνονται ακραίες, όπως τις νύχτες του χειμώνα.

Η θερμική απομόνωση του θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου από το κτίριο στο οποίο είναι προσαρτημένο μπορεί να γίνει με το κλείσιμο των εσωτερικών ανοιγμάτων ή και με τη θερμομόνωση του ενδιάμεσου τοίχου. Πρωτύτερα, αναφέρθηκε και η περίπτωση τοποθέτησης νυχτερινής μόνωσης στην εξωτερική επιφάνεια του ενδιάμεσου τοίχου.

Η κάτοψη του κτιρίου θα πρέπει να έχει μελετηθεί έτσι ώστε η απομόνωση του θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου να μην επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του, π.χ. να μην είναι απαραίτητη η διέλευση μέσα από τους χώρους αυτούς για τη μετάβαση από μια θέση του κτιρίου σε άλλη.

- **Η δυνατότητα αντιμετώπισης της υπερθέρμανσης.** Οι εκτεταμένες γυάλινες επιφάνειες του θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου μπορούν να οδηγήσουν σε υπερθέρμανση του εσωτερικού τους, κυρίως το καλοκαίρι, αλλά και την άνοιξη ή το φθινόπωρο, όταν οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι υψηλές και υπάρχει έντονη ηλιακή ακτινοβολία.

Ο πλήρης σκιασμός των υαλοστασίων του θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου είναι βασικός τρόπος για τον περιορισμό της πιθανότητας υπερθέρμανσης του εσωτερικού του. Στην πράξη όμως, η τοποθέτηση κινητού εξωτερικού συστήματος σκιασμού, ιδίως στις κεκλιμένες επιφάνειες, δημιουργεί σοβαρές τεχνικές δυσκολίες και απαιτεί υψηλή δαπάνη.

Η χρήση ανοιγόμενων/αποσυρόμενων υαλοστασίων είναι ο άλλος ριζικός τρόπος για τον περιορισμό της πιθανότητας υπερθέρμανσης του θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου. Με τον τρόπο αυτόν, αφενός μειώνονται οι επιφάνειες συλλογής ηλιακής ενέργειας, αφετέρου δημιουργούνται μεγάλα ανοίγματα για να διαφύγει ο θερμός αέρας. Στην περίπτωση του ηλιακού χώρου, το άνοιγμα των υαλοστασίων μπορεί να προσφέρει έναν ευχάριστο ημιυπαίθριο χώρο, που σκιάζεται από την αδιαφανή οροφή του.

Άλλα μέτρα που μπορούν να αντιμετωπίσουν ηπιότερες περιπτώσεις υπερθέρμανσης είναι τα εσωτερικά σκίαστρα, όπως ρολά ή κουρτίνες, καθώς και ανοίγματα ή αεραγωγοί για την απόρριψη του θερμού αέρα στο περιβάλλον.

Ρυθμίσεις του συστήματος θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου

Η αποδοτική λειτουργία του συστήματος θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου εξαρτάται από ορισμένες ρυθμίσεις. Τον χειμώνα, κατά τη διάρκεια της ημέρας, πρέπει να ανοίγονται τα παράθυρα ή οι πόρτες στον ενδιάμεσο τοίχο με το κτίριο, για να κυκλοφορεί ο θερμός αέρας. Εάν επιλεγεί η χρήση αεραγωγών για τη διοχέτευση θερμού αέρα με μηχανική υποβοήθηση, μπορεί να εφαρμοστεί ένας απλός αυτοματισμός με θερμοστάτες

που θα ελέγχει τη ροή. Τη νύχτα, πρέπει να απομονώνεται το θερμοκήπιο/ηλιακός χώρος από το κτίριο με το κλείσιμο των εσωτερικών ανοιγμάτων ή των αεραγωγών και να τοποθετείται η νυχτερινή μόνωση του ενδιάμεσου τοίχου, εφόσον έχει προβλεφθεί (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 110).

Το καλοκαίρι, στόχος είναι να αποτραπεί η θερμική λειτουργία του συστήματος. Ο πλήρης σκιασμός των υαλοστασίων είναι αποτελεσματική μέθοδος, παρά τις τεχνικές δυσκολίες και τον περιορισμό της θέας που προκαλεί. Εφαρμόσιμη αποτελεσματική μέθοδος, ιδίως για τους ηλιακούς χώρους, είναι το άνοιγμα των υαλοστασίων. Στην περίπτωση, μάλιστα, που αποσυρθούν όλα τα υαλοστάσια, εξαφανιστεί, δηλαδή, ο συλλέκτης, πρακτικά καταργείται το σύστημα (Στο ίδιο).

Πλεονεκτήματα του συστήματος θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου

- Η τοποθέτηση θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου κατά μήκος της νότιας όψης κτιρίου προστατεύει τους εσωτερικούς χώρους από την είσοδο έντονης ηλιακής ακτινοβολίας και περιορίζει τις πιθανότητες υψηλής διακύμανσης θερμοκρασιών, θάμβωσης, φθοράς χρωμάτων και ευαίσθητων υλικών. Επιπλέον, το θερμοκήπιο/ηλιακός χώρος λειτουργεί και ως χώρος ανάσχεσης θερμικών απωλειών του κτιρίου προς το περιβάλλον.
- Όταν οι κλιματικές συνθήκες το επιτρέπουν, το θερμοκήπιο/ηλιακός χώρος μπορεί να λειτουργήσει ως ιδιαίτερα ευχάριστος χώρος παραμονής.
- Είναι δυνατή η προσθήκη του συστήματος σε υπάρχοντα κτίρια. Θερμοκήπια/ηλιακοί χώροι μπορούν να κατασκευαστούν σε αυλές, εξώστες, ημιυπαίθριους χώρους και όποια άλλη θέση του κτιρίου έχει ανεμπόδιστο νότιο ηλιασμό (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 110-111).

Μειονεκτήματα του συστήματος θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου

- Η έντονη διακύμανση θερμοκρασιών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου.
- Το πρόβλημα υπερθέρμανσης κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.
- Το σχετικά υψηλό κόστος κατασκευής, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το θερμοκήπιο ή ο ηλιακός χώρος μπορεί να μην είναι βιώσιμοι όλη τη διάρκεια του έτους.
- Το πιθανό πρόβλημα ασφάλειας που δημιουργείται από τις μεγάλες γυάλινες επιφάνειες (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 111).

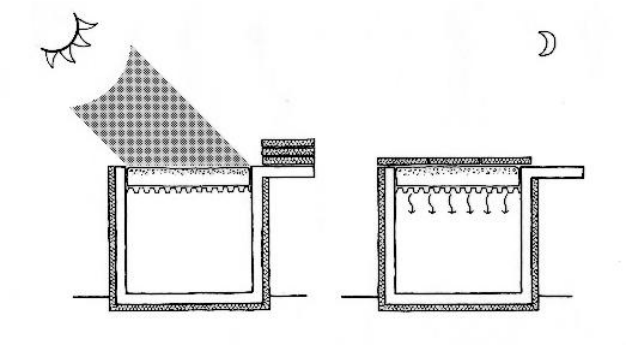
Μορφολογικήέκφραση του συστήματος θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου

Η παρουσία θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου προσαρτημένου σε νότιες όψεις εκφράζει παραστατικά την εφαρμογή του παθητικού αυτού συστήματος θέρμανσης σε ένα κτίριο. Το θερμοκήπιο αναγνωρίζεται από το ευρύ κοινό, περισσότερο από κάθε άλλη κατασκευή, ως στοιχείο που προορίζεται για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Ο ηλιακός χώρος πλεονεκτεί θερμικά στις ελληνικές κλιματικές συνθήκες, σε σχέση όμως με το θερμοκήπιο είναι λιγότερο αναγνωρίσιμη η θερμική του λειτουργία από το κοινό (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 111).

7.3.3 Σύστημα «roof pond»

Το παθητικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης «roof pond» χρησιμοποιεί ποσότητα νερού τοποθετημένη στο δώμα για τη συλλογή, αποθήκευση και μετάδοση θερμότητας στο κτίριο. Η ονομασία του, roof pond, δηλαδή δεξαμενή δώματος, δεν έχει δόκιμη ελληνική απόδοση, γι' αυτό χρησιμοποιείται η αγγλική ονομασία (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 111). Η σημαντικότερη εφαρμογή του συστήματος είναι το σύστημα Skytherm® του Harold Hay (Hay & Yellot, 1969) (βλ. Εικόνα 7.14).

Βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία του συστήματος είναι ότι πρέπει να επιτυγχάνεται γρήγορη μετάδοση θερμότητας. Για τον λόγο αυτόν, στο σύστημα Skytherm® η κατασκευή κάλυψης του δώματος είναι μεταλλική, συνήθως με κυματοειδείς λαμαρίνες που γεφυρώνουν τα ανοίγματα του φέροντος οργανισμού. Επάνω στη θερμικά αγώγιμη κατασκευή του δώματος τοποθετείται νερό ύψους 18-30 εκ. μέσα σε πλαστικούς σάκους, ώστε να περιορίζεται η εξάτμιση του νερού και η συνεπαγόμενη απώλεια θερμότητας. Απαραίτητη είναι η θερμομόνωση του δώματος, η οποία, όμως, πρέπει να γίνεται με κινητά στοιχεία επάνω από τον χώρο που καταλαμβάνουν οι σάκοι με το νερό (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 112).



Εικόνα 7.15 *Σχηματική διάταξη λειτουργίας δεξαμενής οροφής (roof pond). Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*

Όσον αφορά τη λειτουργία του συστήματος τον χειμώνα, την ημέρα απομακρύνονται τα στοιχεία θερμομόνωσης για να θερμανθεί το νερό από την ηλιακή ακτινοβολία· το βράδυ, τα στοιχεία θερμομόνωσης κλείνουν για να μεταδοθεί η θερμότητα που είχε συλλεχθεί στη μάζα του νερού στους χώρους κάτω από το δώμα, κυρίως με ακτινοβολία (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 112).

Το σύστημα έχει τη δυνατότητα να προσφέρει και δροσισμό με αναστροφή της λειτουργίας του. Το καλοκαίρι, στη διάρκεια της ημέρας, τα θερμομονωτικά στοιχεία παραμένουν κλειστά για να αποφευχθεί η θέρμανση του νερού από τον ήλιο, αλλά και για να απορροφηθεί από τη μάζα του νερού, διαμέσου του δώματος, η περίσσεια θερμότητας του κτιρίου. Τη νύχτα, απομακρύνονται τα θερμομονωτικά στοιχεία για να μειωθεί η θερμοκρασία του νερού με μεταφορά θερμότητας από τον άνεμο και με ακτινοβολία προς τον ουρανό (Στο ίδιο).

Η έκταση της υδάτινης επιφάνειες υπολογίζεται πρακτικά ίση με το εμβαδόν του χώρου που καλύπτει το σύστημα, έτσι δηλαδή ώστε επάνω από κάθε τετραγωνικό εξυπηρετούμενου χώρου να αντιστοιχεί ίση επιφάνεια θερμικά αγώγιμης οροφής (Στο ίδιο).

Ρυθμίσεις του συστήματος

Η μόνη απαραίτητη ρύθμιση για τη λειτουργία του συστήματος είναι η κίνηση των θερμομονωτικών στοιχείων, ανάλογα με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Μπορεί να γίνει χειροκίνητα ή να αυτοματοποιηθεί (Στο ίδιο).

Πλεονεκτήματα του συστήματος roof pond

- Η εφαρμογή δεν εξαρτάται από τον προσανατολισμό του κτιρίου, αλλά από τη δυνατότητα να ηλιάζεται ανεμπόδιστα το δώμα του.
- Προσφέρει ομοιόμορφη θερμική κάλυψη στο κτίριο.
- Η διακύμανση των εσωτερικών θερμοκρασιών είναι μικρή.
- Μπορεί να λειτουργήσει και ως παθητικό σύστημα δροσισμού (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 113).

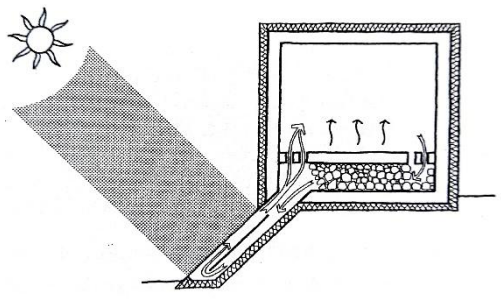
Μειονεκτήματα του συστήματος roof pond

- Δεν μπορεί να λειτουργήσει παρά μόνο σε μονώροφα κτίρια ή στον τελευταίο όροφο πολυώροφου κτιρίου.
- Η έκταση της υδάτινης επιφάνειας είναι αναλογικά μεγάλη.
- Απαιτείται μεταλλική κατασκευή του δώματος.
- Η τοποθέτηση μεγάλης μάζας νερού στο δώμα έχει στατική, κατασκευαστική και κατ' επέκταση οικονομική επιβάρυνση.
- Το σύστημα, με τη μορφή που περιγράφηκε, δεν μπορεί να λειτουργήσει σε περιοχές όπου παρατηρείται παγετός, δηλαδή όπου οι θερμοκρασίες τον χειμώνα πέφτουν κάτω από το μηδέν (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 113).

7.4 Απομονωμένο ηλιακό κέρδος

Το σύστημα απομονωμένου ηλιακού οφέλους αξιοποιεί το φαινόμενο του θερμοσιφωνισμού για να θερμάνει νερό ή αέρα και να μεταφέρει τη θερμότητα σε περιοχές του κτιρίου που απέχουν από τη θέση συλλογής της ηλιακής ενέργειας (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 113) (Εικόνα 7.16).

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή του θερμοσιφωνισμού χρησιμοποιεί τον αέρα ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας, επειδή προσφέρει τη δυνατότητα απλούστερης και ασφαλέστερης υλοποίησης. Ένας ελαφρύς, επίπεδος συλλέκτης αέρα τοποθετείται συνήθως με κλίση σε θέση που εξασφαλίζει πλήρη ηλιασμό και βρίσκεται κάτω από το επίπεδο της αποθήκης θερμότητας. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από τη μαύρη μεταλλική επιφάνεια του συλλέκτη, θερμαίνεται ο εσώκλειστος αέρας και ανεβαίνει για να διοχετευθεί μέσω αεραγωγών στο εσωτερικό του κτιρίου. Ο θερμός αέρας φορτίζει, επίσης, τη θερμική αποθήκη του χώρου, αφού στη διαδρομή του οδηγείται ανάμεσα από στρώμα χαλικιών που τοποθετούνται κάτω από το δάπεδο. Ο ψυχρότερος αέρας έλκεται προς τον συλλέκτη, θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία και έτσι δημιουργείται ένα φυσικό κύκλωμα μεταφοράς θερμότητας (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 113-114).



Εικόνα 7.16 *Σχηματική διάταξη λειτουργίας απομονωμένου ηλιακού κέρδους. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*



Εικόνα 7.17 *Παράδειγμα κτιρίου με σύστημα απομονωμένου ηλιακού κέρδους. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Ευαγγελινός).*

Ρυθμίσεις του συστήματος

Βασική ρύθμιση του συστήματος αφορά τη ροή θερμότητας από τον συλλέκτη προς την αποθήκη θερμότητας. Επειδή ο θερμός αέρας διοχετεύεται μέσω αεραγωγού, προσφέρεται η δυνατότητα ελέγχου της

ροής αέρα με απλά τεχνικά μέσα, ώστε να αντιμετωπιστεί, για παράδειγμα, η περίπτωση υπερθέρμανσης του χώρου (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 114).

Μεγαλύτερη πολυπλοκότητα παρουσιάζει η ρύθμιση της ροής θερμότητας από τη θερμική αποθήκη προς τον χώρο. Εάν η αποθήκη θερμότητας έχει εκτεταμένη αγώγιμη επιφάνεια επαφής με τον εσωτερικό χώρο, επιτυγχάνεται ταχύτερη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, αλλά παρουσιάζεται τεχνική δυσκολία στη διακοπή της μετάδοσης αυτής, όταν επιβάλλεται να αποτραπεί η υπερθέρμανση του χώρου. Στην περίπτωση, όμως, που η θερμότητα μεταδίδεται με φυσική ή υποβοηθούμενη από ανεμιστήρες ροή αέρα από την αποθήκη προς τον χώρο, υπάρχει τεχνική δυνατότητα αποτελεσματικού ελέγχου του ρεύματος θερμού αέρα (Στο ίδιο).

Το καλοκαίρι μπορεί να διακοπεί η λειτουργία του συλλέκτη με τον πλήρη εξωτερικό σκιασμό του ή με την άμεση απόρριψη του θερμού αέρα στο εξωτερικό περιβάλλον (Στο ίδιο).

Μια παραλλαγή του συστήματος θερμοσιφωνισμού χρησιμοποιεί τη διεποχική αποθήκευση (seasonal thermal energy storage – STES), η οποία φορτίζει το καλοκαίρι μεγάλη θερμική αποθήκη, ικανή να λειτουργήσει αποδοτικά την επόμενη ψυχρή εποχή του έτους. Η αποθήκη αυτή, οπωσδήποτε μεγάλου όγκου, τοποθετείται σε θέσεις από όπου οι θερμικές της απώλειες δεν θα επιβαρύνουν το κτίριο, ενώ οι απαιτήσεις θερμομόνωσής της αποτελούν τεχνική πρόκληση (Στο ίδιο).

Πλεονεκτήματα του συστήματος θερμοσιφωνισμού με αέρα

- Οι συλλέκτες μπορούν να τοποθετηθούν σε απόσταση από το κτίριο, οπότε δεν είναι δεσμευτικός ο προσανατολισμός του κτιρίου για τη λειτουργία του συστήματος.
- Η θερμότητα μπορεί να διανεμηθεί και σε χώρους απομακρυσμένους από τις θέσεις συλλογής της ηλιακής ενέργειας.
- Επειδή ο συλλέκτης μπορεί να απομονωθεί θερμικά από τον εσωτερικό χώρο, ο θερμοσιφωνισμός παρουσιάζει μικρότερες απώλειες θερμότητας από άλλα παθητικά συστήματα.
- Προσφέρεται η δυνατότητα διακοπής της θερμοσιφωνικής ροής αέρα με απλά τεχνικά μέσα για την αντιμετώπιση της υπερθέρμανσης (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 114).

Μειονεκτήματα του συστήματος θερμοσιφωνισμού με αέρα

- Ο θερμός αέρας είναι λιγότερο αποτελεσματικός σε σύγκριση με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία για τη φόρτιση των θερμικών αποθηκών.
- Απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός και επιμελημένη κατασκευή για να εξασφαλιστούν απρόσκοπτη θερμοσιφωνική ροή και περιορισμός των θερμικών απωλειών.
- Οι εκτεταμένες επιφάνειες των συλλεκτών μπορεί να μη γίνουν αισθητικά αποδεκτές (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 115).

7.5 Συγκριτική εξέταση των παθητικών ηλιακών συστημάτων θέρμανσης

Παραπάνω παρουσιάστηκε το περίγραμμα των χαρακτηριστικών των επικρατέστερων παθητικών ηλιακών συστημάτων θέρμανσης. Η εικόνα του κάθε συστήματος θα γίνει σαφέστερη εάν εξεταστούν συγκριτικά, εστιάζοντας σε εκείνα τα χαρακτηριστικά που είναι τα πλέον σημαντικά για την επιλογή του καταλληλότερου συστήματος σε συγκεκριμένη εφαρμογή (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 115).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να εξεταστεί συγκριτικά είναι η θερμική απόδοση των παθητικών συστημάτων. Από μελέτες προκύπτει ότι για ίσες θερμικές προσόδους αντιστοιχούν, σε πρώτη

εκτίμηση, μία (1) μονάδα εμβαδού υαλοπίνακα άμεσου οφέλους προς δύο (2) μονάδες εμβαδού τοίχου Trombe-Michel/μάζας προς τρεις (3) μονάδες εμβαδού ενδιάμεσου τοίχου σε θερμοκήπιο. Ταυτόσημη είναι η διαπίστωση ότι το άμεσο όφελος προσφέρει περίπου διπλάσιες θερμικές προσόδους από το σύστημα τοίχου Trombe-Michel/μάζας, ή περίπου τριπλάσιες από το προσαρτημένο θερμοκήπιο/ηλιακό χώρο (Στο ίδιο).

Το άμεσο όφελος οφείλει την υψηλή απόδοσή του στο γεγονός ότι το σύνολο της ενέργειας που δεσμεύεται από το υαλοστάσιο συμβάλλει στη θέρμανση του χώρου. Στο σύστημα τοίχου Trombe-Michel/μάζας, ένα σημαντικό μέρος της δεσμευόμενης θερμότητας χάνεται προς το περιβάλλον, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου. Το προσαρτημένο θερμοκήπιο/ηλιακός χώρος είναι ουσιαστικά ένα σύστημα τοίχου αποθήκευσης, το οποίο, λόγω της μεγαλύτερης αναλογικά επιφάνειας υαλοπινάκων, έχει αυξημένες θερμικές απώλειες. Επιπλέον, τμήμα της θερμότητας που δεσμεύεται καταναλώνεται για τη θέρμανση του θερμοκηπίου, οπότε μικρότερο ποσοστό μεταδίδεται προς τον εσωτερικό χώρο (Στο ίδιο).

Η επιλογή ενός συγκεκριμένου παθητικού ηλιακού συστήματος θέρμανσης πρέπει να εξασφαλίζει ότι το σύστημα θα ανταποκρίνεται στις λειτουργικές ανάγκες του κτιρίου. Εξετάζοντας τα παθητικά συστήματα από την άποψη αυτή, διαπιστώνεται ότι ορισμένα διαθέτουν συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα υπόλοιπα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Η εικόνα αυτή γίνεται σαφέστερη από τη συσχέτιση τύπων κτιρίων και παθητικών ηλιακών συστημάτων θέρμανσης που επιχειρείται στη συνέχεια (Στο ίδιο).

Το σύστημα άμεσου ηλιακού οφέλους διακρίνεται για την απλότητα της δομής του και την υψηλή του απόδοση. Για να λειτουργήσει αποδοτικά, πρέπει η ηλιακή ακτινοβολία να εισχωρήσει ανεμπόδιστα στους χώρους διαβίωσης, ενώ τη νύχτα πρέπει να ενεργοποιηθούν ρυθμίσεις που αποσκοπούν στη μείωση των θερμικών απωλειών από τα υαλοστάσια. Οι απαιτήσεις αυτές μπορούν να ικανοποιηθούν με επιτυχία σε κτίρια κατοικίας που είναι και ο τύπος του κτιρίου στον οποίο εφαρμόζεται ιδιαίτερα το σύστημα αυτό. Η άμεση είσοδος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι λιγότερο ανεκτή σε σχολικές τάξεις, γραφειακούς ή εμπορικούς χώρους, ιδιαίτερα όταν προσπίπτει σε θέσεις εργασίας. Η εφαρμογή του άμεσου ηλιακού οφέλους σε τέτοιες περιπτώσεις προϋποθέτει ότι η ηλιακή ακτινοβολία θα κατευθυνθεί σε θέσεις που δεν ενοχλεί, οι θερμικές πρόσοδοι θα διανεμηθούν ανεμπόδιστα όπου χρειάζεται και θα βρεθεί τρόπος να περιορίζονται συστηματικά οι θερμικές απώλειες τη νύχτα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 116).

Το σύστημα τοίχου Trombe-Michel/μάζας έχει την ιδιαιτερότητα ότι η συλλογή της ηλιακής ενέργειας γίνεται έξω από τον χώρο που προορίζεται να θερμανθεί, ενώ επιπλέον παρατηρείται χρονική υστέρηση στη μετάδοση της θερμότητας (ιδιαίτερα όσον αφορά τον τοίχο μάζας). Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν για να εξυπηρετήσουν χώρους, των οποίων η λειτουργία εκτείνεται έως αργά την ημέρα, όπως γραφεία, χώροι απογευματινής συνάθροισης κ.ά. Κατά το στάδιο μελέτης για την εφαρμογή του συστήματος πρέπει να διερευνηθεί η επίπτωση στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου, ιδιαίτερα όσον αφορά μεγάλο αριθμό τοίχων σε πολυώροφο κτίσμα (Στο ίδιο).

Τα θερμοκήπια/ηλιακοί χώροι πλεονεκτούν τόσο επειδή η προσάρτηση τους σε ένα κτίριο συνήθως έχει μορφολογικά θετικό αποτέλεσμα όσο και επειδή ο εσωτερικός τους χώρος θεωρείται ευχάριστος στη χρήση του. Με βάση τη διαπίστωση αυτή, το σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί πρακτικά σε κτίριο οποιασδήποτε λειτουργίας, μονώροφο ή πολυώροφο. Ιδιαίτερα θετικός είναι ο ρόλος του θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ως ενδιάμεσης θερμικής ζώνης μεταξύ του κτιρίου και του περιβάλλοντος. Το καλοκαίρι είναι απαραίτητη η λήψη μέτρων για τον σκιασμό των γυάλινων επιφανειών του θερμοκηπίου/ηλιακού χώρου, με εναλλακτική λύση την απόσυρσή τους, ώστε να εξουδετερώνεται –κυριολεκτικά– το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Στο ίδιο).

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Brophy, V. & Owen Lewis, J. (2011). *A Green Vitruvius. Principles and practices of sustainable architectural design*. Earthscan.

Goulding, J. R., Lewis, J. O. & Steemers, T. C. (1994). *Ενεργειακός Σχεδιασμός. Εισαγωγή για Αρχιτέκτονες*. Μαλλιάρης Α. Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy Conscious Design-A Primer for Architects].

Goulding, J. R., Lewis, J. O. & Steemers, T. C. (1996). *Ενέργεια στην Αρχιτεκτονική. Το Ευρωπαϊκό Εγχειρίδιο για τα Παθητικά Ηλιακά Κτίρια*. Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook].

Hay, H. R. & Yellott, J. I. (1969). International aspects of air conditioning with movable insulation. *Solar Energy, 12*(4), 427-438. https://doi.org/10.1016/0038-092X(69)90065-6.

Markus, T. A. & Morris, E. N. (1980). *Buildings, Climate and Energy*Pitman Publishing Ltd.

Mazria, E. (1979). *The Passive Solar Energy Book*. Rodale Press.

Olgyay, V. & Olgyay, A. (1963). *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.

Szokolay, S. V. (1980). *Environmental Science Handbook for Architects and Builders*: The Construction Press.

Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, Ε. (2017) *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός. Κλιματική αλλαγή, Περιβάλλον, Βιωσιμότητα*. University Studio Press.

Ευαγγελινός, Ε. & Ζαχαρόπουλος, Η. (2001). Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου* (σσ. 21-154). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Παπαδόπουλος, Μ. & Αξαρλή, Κ. (1995). *Ενεργειακός Σχεδιασμός & Παθητικά Ηλιακά Συστήματα Κτιρίων. Δομική Φυσική ΙΙ*. Εκδοτικός Οίκος Αδερφών Κυριακίδη ΑΕ.

Κεφάλαιο 8

Παθητικά συστήματα δροσισμού

Σύνοψη
Τα παθητικά ηλιακά συστήματα δροσισμού εκμεταλλεύονται φυσικά στοιχεία συγκέντρωσης θερμότητας (heat sinks) για τον δροσισμό των εσωτερικών χώρων των κτιρίων, με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας και κατ' επέκταση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για ψύξη. Στο κεφάλαιο αυτό, διακρίνονται αρχικά οι έννοιες του φυσικού και του παθητικού δροσισμού και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα παθητικά συστήματα δροσισμού, ομαδοποιημένα κυρίως με βάση το στοιχείο συγκέντρωσης θερμότητας που αυτά εκμεταλλεύονται.

Προαπαιτούμενη γνώση
Βασικές γνώσεις Φυσικής. Κεφάλαια 2, 3, 4, 5 και συμπληρωματικές γνώσεις στο Κεφάλαιο 9 του παρόντος.

8.1 Εισαγωγικές παρατηρήσεις

Η μελέτη δροσισμού κτιρίων πραγματεύεται τον σχεδιασμό και τις δράσεις που αποσκοπούν στη διατήρηση της εσωτερικής τους θερμοκρασίας μέσα στα όρια της ζώνης θερμικής άνεσης, όταν παρατηρείται υπέρβαση των ορίων αυτών στο εξωτερικό περιβάλλον (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 121).

Ανάλογα με τους τρόπους με τους οποίους επιτυγχάνεται το αποτέλεσμα, διακρίνονται τρεις (3) κατηγορίες δροσισμού (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 121):

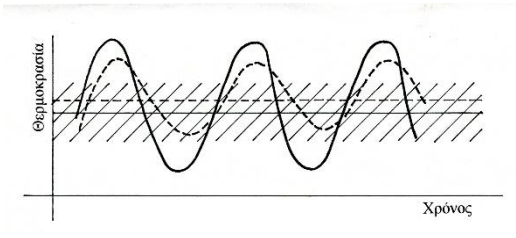
- **Ο φυσικός δροσισμός** (*natural cooling*), ο οποίος βασίζεται στον έλεγχο ή/και την εκμετάλλευση των φυσικών φαινομένων που δρουν στο περιβάλλον του κτιρίου με σκοπό τη μείωση της θερμοκρασίας των εσωτερικών του χώρων.
- **Ο παθητικός δροσισμός** (*passive cooling*), η λειτουργία του οποίου στηρίζεται στη διοχέτευση της πλεονάζουσας θερμότητας του κτιρίου με φυσικούς τρόπους σε στοιχεία συγκέντρωσης θερμότητας (heat sinks) του περιβάλλοντος.
- **Ο τεχνητός δροσισμός** (*mechanical cooling*), ο οποίος χρησιμοποιεί μηχανικά μέσα για τη μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει αναφορά μόνο στον φυσικό και τον παθητικό δροσισμό, επειδή εντάσσονται στο πλαίσιο του βιοκλιματικού σχεδιασμού. Οι στρατηγικές αυτές χρησιμοποιούν το κέλυφος και άλλα δομικά στοιχεία του κτιρίου για να επιτευχθούν συνθήκες θερμικής άνεσης με μικρή κατανάλωση ενέργειας, όταν στο εξωτερικό περιβάλλον επικρατούν συνθήκες που είναι θερμικά δυσάρεστες.

8.2 Φυσικός δροσισμός

Κάθε κτίριο θερμαίνεται την ημέρα από τη δράση της ηλιακής ακτινοβολίας και ψύχεται τη νύχτα αποβάλλοντας θερμότητα. Το φυσικό αυτό φαινόμενο παρατηρείται σε οποιοδήποτε κτίριο, ανεξάρτητα από τον τρόπο διαμόρφωσης του κελύφους του και την επιλογή των υλικών που το συνθέτουν. Κατά τον 24ωρο κύκλο θέρμανσης-ψύξης, η θερμότητα που απορροφάται από το κέλυφος δεν αποβάλλεται πλήρως, με αποτέλεσμα η μέση θερμοκρασία αέρα του κτιρίου να είναι υψηλότερη από τη μέση θερμοκρασία του αέρα

του εξωτερικού περιβάλλοντος. Διευκρινίζεται ότι αυτή η σχέση μέσων όρων θερμοκρασιών παρατηρείται υπό σταθερές μετεωρολογικές συνθήκες, δηλαδή όταν υπάρχει ομαλή διακύμανση εξωτερικών θερμοκρασιών για συνεχόμενα 24ωρα και δεν παρατηρείται απότομη μεταβολή του καιρού. Οι εξωτερικές και οι εσωτερικές θερμικές πρόσοδοι, σε συνάρτηση με τις θερμικές απώλειες κάθε κτιρίου ορίζουν το πόσο υψηλότερη θα είναι η μέση εσωτερική του θερμοκρασία από τη μέση θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 122).



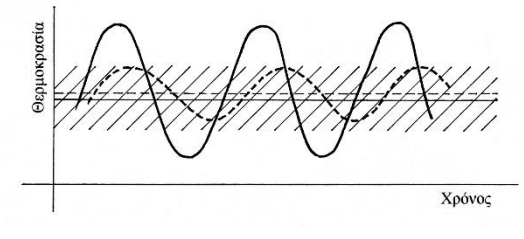
- - - - - εσωτερικός αέρας _____ εξωτερικός αέρας

Εικόνα 8.1 *Διακύμανση θερμοκρασιών εξωτερικού αέρα και εσωτερικού αέρα κτιρίου στη διάρκεια συνεχόμενων 24ώρων χωρίς εφαρμογή παθητικών στρατηγικών δροσισμού. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*

Στην Εικόνα 8.1 παρουσιάζεται γραφικά το φαινόμενο που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο. Η θερμοκρασία εξωτερικού αέρα (με συνεχή γραμμή) έχει ομαλή επαναλαμβανόμενη διακύμανση, δηλαδή θεωρείται ότι υπάρχει συνθήκη σταθερού κλίματος. Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα του κτιρίου (με διακεκομμένη γραμμή) έχει επίσης ομαλή επαναλαμβανόμενη διακύμανση, μεγάλου σχετικά πλάτους και με μικρή χρονική υστέρηση στην εκδήλωση των ακραίων τιμών της, πράγμα που δηλώνει ότι το κτίριο επηρεάζεται σημαντικά από τη μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας. Από τη μελέτη του γραφήματος, προκύπτει ότι (Στο ίδιο):

α) ο μέσος όρος της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (διακεκομμένη ευθεία) είναι υψηλότερος από τον μέσο όρο της θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα (συνεχής ευθεία),

β) τμήματα της καμπύλης θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα που αντιστοιχούν στις περιοχές των υψηλότερων τιμών βρίσκονται έξω από το ανώτερο όριο της ζώνης θερμικής άνεσης (διαγραμμισμένη ζώνη), που σημαίνει ότι τις χρονικές εκείνες περιόδους επικρατούν συνθήκες υπερθέρμανσης.



- - - - - εσωτερικός αέρας _____ εξωτερικός αέρας

Εικόνα 8.2 *Τροποποίηση διακύμανσης θερμοκρασιών εξωτερικού αέρα και εσωτερικού αέρα κτιρίου, ώστε να παραμένει στα όρια της ζώνης θερμικής άνεσης στη διάρκεια συνεχόμενων 24ώρων. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*

Στρατηγικός στόχος του φυσικού δροσισμού είναι να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες ώστε η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου να βρίσκεται μέσα στα όρια της ζώνης θερμικής άνεσης. Στην Εικόνα 8.2, παρουσιάζονται γραφικά οι προϋποθέσεις με τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί ο στόχος με φυσικό δροσισμό, που αφορά την περίπτωση του παραδείγματος που μελετήθηκε στο προηγούμενο σχήμα (Εικόνα 8.1). Για να βρεθεί, λοιπόν, η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου μέσα στα όρια της ζώνης θερμικής άνεσης, θα πρέπει (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 123):

α) Ο μέσος όρος της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα να πλησιάζει τον μέσο όρο της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα.

β) Να μειωθεί το πλάτος της διακύμανσης της εσωτερικής θερμοκρασίας, ώστε να προσαρμοστεί στο πλάτος της ζώνης θερμικής άνεσης.

Πρακτικά, η μείωση της μέσης θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα του κτιρίου και η τροποποίηση της 24ωρης διακύμανσής της μπορεί να γίνει με τον περιορισμό των θερμικών προσόδων, εξωτερικών και εσωτερικών, και με τη διοχέτευση της πλεονάζουσας θερμότητας προς στο περιβάλλον. Ο περιορισμός των θερμικών προσόδων, που, όπως αναφέρθηκε, είναι απαραίτητη συνθήκη για να λειτουργήσει ο φυσικός δροσισμός, μπορεί να γίνει με τον έλεγχο παραγόντων που ομαδοποιούνται στις ακόλουθες κατηγορίες (Στο ίδιο):

- Μικροκλίμα οικοπέδου.
- Αυτοσκιασμός του κτιριακού όγκου.
- Περιορισμός μετάδοσης θερμικών προσόδων από στοιχεία του κελύφους – θερμομόνωση κελύφους (συμπαγή και διάφανα στοιχεία).
- Περιορισμός εσωτερικών θερμικών προσόδων.

Η ταχύτερη διοχέτευση της πλεονάζουσας θερμότητας που απορροφήθηκε από το κτίριο προς το περιβάλλον μπορεί να πραγματοποιηθεί με τον φυσικό αερισμό. Όπως θα γίνει αντιληπτό από την αναλυτική παρουσίαση που ακολουθεί, υπάρχουν πολλοί παράγοντες, με πληθώρα παραλλαγών, που συνεισφέρουν στον δροσισμό ενός κτιρίου. Ακόμα στις στρατηγικές παθητικού δροσισμού αξιοποιούνται:

- Οι ιδιότητες των δομικών υλικών:
    - θερμοχωρητικότητα
    - ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας
- Οι διαδικασίες μετάδοσης θερμότητας:
    - μείωση της θερμοκρασίας του αέρα μέσω του φαινομένου της εξάτμισης
    - εκπομπή μακροκύματης υπέρυθρης (θερμικής) ακτινοβολίας προς τον ανέφελο νυχτερινό ουρανό

Υπάρχει, συνεπώς, ελευθερία σχεδιαστικών επιλογών για να δημιουργηθούν συνθήκες φυσικού δροσισμού στα κτίρια. Η τελική πρόταση θα πρέπει να προέλθει από μια διερευνητική διαδικασία, στην οποία θα συνεκτιμηθούν και οι υπόλοιποι μορφολογικοί και λειτουργικοί παράγοντες του σχεδιασμού, μια και ο φυσικός δροσισμός εξαρτάται άμεσα από τη διαμόρφωση και επεξεργασία των χαρακτηριστικών του κτιριακού κελύφους (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 123).

8.2.1 Μικροκλίμα οικοπέδου

Η μελέτη του μικροκλίματος του οικοπέδου αποτελεί την αφετηρία για την κατανόηση των κλιματικών δεδομένων και της ανάγκης που προκύπτει για φυσικό δροσισμό. Στοιχεία που πρέπει να εξεταστούν είναι:

- η θέση και
- ο προσανατολισμός του οικοπέδου.

Ως προς τη **θέση του** οικοπέδου, εάν αυτό εντάσσεται σε αστικό ιστό, πρέπει να μελετηθούν ο σκιασμός του χώρου από τα γειτονικά κτίρια, η επίδραση των γειτονικών όγκων στη ροή του ανέμου, το είδος και η έκταση της φύτευσης που συναντάται στην περιοχή. Ακόμη πρέπει να εξεταστεί εάν παρατηρείται στην

πόλη το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (*urban heat island*) (βλ. Κεφ.2, παρ. 2.8.2) και κατά πόσο επηρεάζει τον συγκεκριμένο χώρο (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 124).

Εάν το οικόπεδο βρίσκεται εκτός αστικής περιοχής, απομονωμένο, συνήθως ο σκιασμός του χώρου καθορίζεται περισσότερο από τοπογραφικούς παράγοντες, όπως οι γειτονικοί λόφοι ή η κορυφογραμμή του ορίζοντα. Επίσης, τοπικοί άνεμοι, όπως θαλάσσιες αύρες ή καταβατικά ορεινά ρεύματα, πρέπει να μελετηθούν, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την απαγωγή θερμότητας. Η φύτευση της περιοχής ή οι μεγάλοι υδάτινοι όγκοι συνεισφέρουν στον μετριασμό των υψηλών θερμοκρασιών και στη δυνατότητα εφαρμογής συστημάτων παθητικού δροσισμού (Στο ίδιο). Όλα τα παραπάνω διαμορφώνουν και τα μικροκλιματικά χαρακτηριστικά, τα οποία πρέπει είτε να αξιοποιηθούν είτε να υπάρξει προστασία από αυτά, για τον βέλτιστο βιοκλιματικό σχεδιασμό.

Σε σχέση με **τον προσανατολισμό του οικοπέδου**, ο κύριος προσανατολισμός και ιδιαίτερα αυτός που συμπίπτει με την κατεύθυνση της θέας, είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που καθορίζουν τον βαθμό στον οποίο δύναται να επιβαρυνθεί το κτίριο από την ηλιακή ακτινοβολία. Θεωρητικά, προβληματικοί προσανατολισμοί για τη θερινή λειτουργία είναι ο ανατολικός και ο δυτικός, επειδή τους θερινούς μήνες από τις κατευθύνσεις αυτές προσπίπτουν οι ηλιακές ακτίνες στις κατακόρυφες επιφάνειες για πολλές ώρες υπό γωνίες χαμηλού ύψους. Στην πράξη, ο δυτικός προσανατολισμός αποδεικνύεται δυσμενέστερος, λόγω του ότι η θερμότητα από την απευθείας πρόσπτωση των ηλιακών ακτίνων προστίθεται σε αυτήν που έχει συσσωρευτεί από την πρωινή δράση του ήλιου (Στο ίδιο).

Ενώ στους δύο παράγοντες που αναπτύχθηκαν προηγουμένως δεν μπορεί να επέμβει ο μελετητής, εάν δεν διατίθεται χώρος στο οικόπεδο, υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης του μικροκλίματος. Για παράδειγμα, με τη φύτευση (βλ. παραδείγματα της Εικόνας 8.3) μπορεί να επιτευχθεί σκιασμός του εδάφους και των κτιρίων, και κατ΄ επέκταση μείωση των επιφανειακών θερμοκρασιών και του αέρα του άμεσου περιβάλλοντος, μείωση της θερμοκρασίας αέρα λόγω της εξατμισοδιαπνοής (*evapotranspiration*) των φυλλωμάτων, καθώς και αλλαγή της κατεύθυνσης ροής του ανέμου (Στο ίδιο) (βλ. και Κεφ. 6, παρ. 6.5, καθώς και Κεφ. 10, παρ. 10.6).

Προϋπόθεση για την επιλογή του είδους και της θέσης της φύτευσης είναι ότι δεν θα εμποδίζει τον επιθυμητό ηλιασμό του κτιρίου τον χειμώνα. Συνήθως, τα φυλλοβόλα δέντρα ικανοποιούν τις απαιτήσεις τόσο της καλοκαιρινής όσο και της χειμερινής θερμικής λειτουργίας του κτιρίου (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 125).



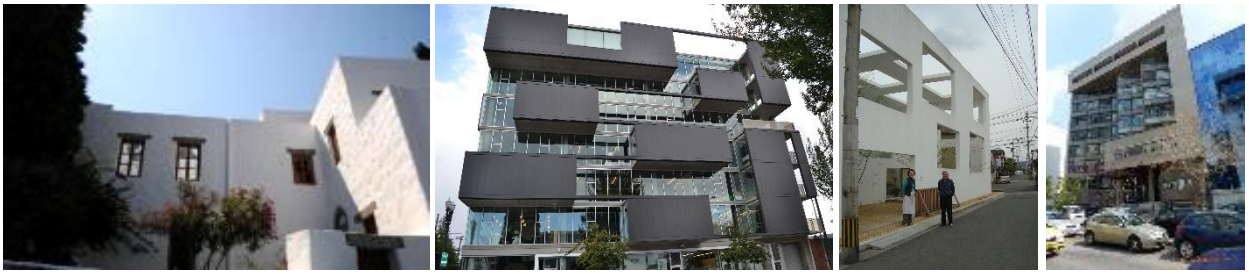
Εικόνα 8.3 *Μικροκλίμα οικοπέδου.*
α. Rue de Meaux Housing, Παρίσι, Γαλλία (Renzo Piano Building Workshop, 1988-91). Πηγή: rue Meaux housing, Renzo Piano by Tim Brown Architecture via Flickr, CC BY 2.0.
β. Fondation Cartier, Παρίσι, Γαλλία (Jean Nouvel, 1991-94). Πηγή: Fondation Cartier, Paris, Jean Nouvel by Tim Brown Architecture via Flickr, CC-BY.

8.2.2 Αυτοσκιασμός του κτιριακού όγκου

Εκτός από τα στοιχεία που είναι συναρτημένα με το οικόπεδο και στα οποία έγινε αναφορά πρωτύτερα, σκιασμό στον κτιριακό όγκο προσφέρει και η διάπλαση του κελύφους του. Ο αυτοσκιασμός, λοιπόν, του κτιριακού όγκου αναφέρεται στον σκιασμό που προκύπτει από την ογκοπλαστική διαμόρφωση της ίδιας της κατασκευής (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 125).

Σε αρχική φάση επεξεργασίας, η ανάπτυξη της κάτοψης προσφέρει τη δυνατότητα να διαμορφωθεί ο όγκος του κτιρίου, έτσι ώστε τμήματά του να σκιάζουν τα διπλανά, κατά την έννοια της οριζόντιας συνιστώσας της κίνησης του ήλιου. Επίσης, μπορούν να σχεδιαστούν εσωτερικά αίθρια ή να τοποθετηθούν σε κατάλληλες θέσεις ημιυπαίθριοι στεγασμένοι χώροι για να επιτευχθεί σκιασμός τμημάτων του κτιριακού όγκου. Το όφελος μιας τέτοιας διαμόρφωσης γίνεται μεγαλύτερο εάν η χωροθέτηση των λειτουργιών συναρτηθεί και με τον χρόνο που ηλιάζεται η κάθε περιοχή της κάτοψης. Για παράδειγμα, σε μια κατοικία, η τοποθέτηση υπνοδωματίων στα ανατολικά εξασφαλίζει ότι θα έχουν χαμηλότερη εσωτερική θερμοκρασία το βράδυ, παρά εάν τοποθετηθούν δυτικά (Στο ίδιο).

Στη φάση ογκοπλαστικής επεξεργασίας διαπιστώνεται ότι αυτοσκιασμό στο κτίριο μπορούν να προσφέρουν κάθε είδους προεξοχές από το επίπεδο της όψης, όπως είναι προεξέχοντες κλειστοί όγκοι, εξώστες, πρόβολοι, γείσα (Εικόνα 8.4). Η επιλογή, λοιπόν, της θέσης ενός προεξέχοντος στοιχείου πρέπει να εξετάζεται και από την άποψη του σκιασμού των επιφανειών που βρίσκονται κάτω από το επίπεδο αυτό (Στο ίδιο).



Εικόνα 8.4 *Αυτοσκιασμός κτιριακού όγκου.*
α. Σύμπλεγμα κατοικιών στη Χώρα της Πάτμου. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Κτίριο bSIDE6, 523 East Burnside St., Portland, Oregon, ΗΠΑ (Works Partnership Architecture LLC, 2009). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).
γ. N House, Oita, Ιαπωνία (Sou Fujimoto, 2008). Πηγή: N House by Eduardo Pintos via Wikimedia Commons, CC BY 2.0.
δ. Κτίριο γραφείων στους Αμπελόκηπους, Αθήνα. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

8.2.3 Περιορισμός μετάδοσης θερμικών προσόδων από στοιχεία του κελύφους

Για τον περιορισμό της μετάδοσης θερμικών προσόδων από το εξωτερικό περίβλημα του κτιρίου, υπάρχουν δυνατότητες ειδικού σχεδιασμού των στοιχείων του κελύφους, όπως και επιλογής των κατάλληλων υλικών δόμησης. Οι δυνατότητες αυτές παρουσιάζονται κατά κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 125).

Σκιασμός ανοιγμάτων και αδιαφανών στοιχείων του κελύφους

Η προστασία από την πρόσπτωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στις επιφάνειες του κελύφους, που επιτυγχάνεται με τον σκιασμό (Εικόνα 8.5), είναι βασικό μέτρο για να περιοριστούν οι θερμικές πρόσοδοι. Προτεραιότητα έχει ο σκιασμός των ανοιγμάτων (για περισσότερα, βλ. Κεφ. 6, παρ. 6.4.2), εφόσον από αυτά διεισδύει αναλογικά η περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία και θερμική ενέργεια. Τούτο δεν σημαίνει ότι ο σκιασμός των αδιαφανών στοιχείων του κελύφους, δηλαδή της τοιχοποιίας ή του δώματος, έχει

περιορισμένες επιπτώσεις. Συνήθως δεν επιδιώκεται, επειδή στις θέσεις αυτές η ανεπιθύμητη είσοδος θερμότητας μπορεί να αντιμετωπιστεί εναλλακτικά μέσω της ανακλαστικότητας των επιφανειών, της θερμομόνωσης και της θερμοχωρητικότητας της κατασκευής (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 125).

α.  β. 

Εικόνα 8.5 *Σκιασμός αδιαφανών στοιχείων του κελύφους.*
α. Ramada House, Arizona, USA (Judith Chafee, 1975). Πηγή: Ramada house (Tucson, Arizona) by Ammodramus via Wikimedia Commons, CC0.
β. Νέα Πτέρυγα, Chicago Art Institute (Renzo Piano Building Workshop, 2009). Πηγή: Modern Wing, Chicago Art Institute, Renzo Piano, 2009 by Timothy Brown via Flickr, CC BY 2.0.

Ανακλαστικότητα των εξωτερικών επιφανειών

Η τοποθέτηση υλικών που έχουν υψηλή ανακλαστικότητα (ή το ταυτόσημο, χαμηλή απορροφητικότητα) (Εικόνα 8.6) της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό περίβλημα του κτιρίου συμβάλλει στο να περιορισεί η άνοδος της θερμοκρασίας του κελύφους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ανακλαστική ιδιότητα των υλικών και ως δεύτερη γραμμή άμυνας, για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα των διατάξεων σκιασμού με την ανάκλαση της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που δεν ελέγχθηκε (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 127).



Εικόνα 8.6 *Χρήση ανοιχτόχρωμων υλικών. Πηγή: Green-leafed plant, Photo by Apostolos Vamvouras on Unsplash.*

Στα αδιαφανή τμήματα του κελύφους, η ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνεται με την επιλογή υλικών που έχουν λεία επιφάνεια και ανοιχτό χρώμα. Για την ανάσχεση της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο της στέγασης χρησιμοποιούνται ακόμα και στιλπνές μεταλλικές επιφάνειες, όπως οι διάφορες στεγανωτικές μεμβράνες με επικάλυψη λεπτού φύλλου αλουμινίου (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 126-127).

Τα οριζόντια δώματα δέχονται το μεγαλύτερο θερμικό φορτίο στη χώρα μας, αυξάνοντας σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις για δροσισμό, και συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στην πόλη. Τα ψυχρά δώματα (*cool roofs*) μειώνουν τα θερμικά κέρδη στην επιφάνειά τους διατηρώντας χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ανακλούν ή απορροφούν ανάλογα με το χρώμα τους την ηλιακή ακτινοβολία (μικρού μήκους κύματος), αλλά ανακλούν την εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία (NIR ή IR-A) του ηλιακού φάσματος (βλ. Κεφ. 3, παρ. 3.1) και εκπέμπουν τη θερμότητα προς το περιβάλλον (υψηλός συντελεστής εκπομπής, Κεφ. 5, παρ. 5.2.3). Με τον τρόπο αυτόν, όχι μόνο μειώνονται σημαντικά τα ψυκτικά φορτία μέσα στα κτίρια, αλλά προστατεύονται και τα υλικά της κατασκευής του δώματος από τις θερμικές καταπονήσεις, επιμηκύνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής τους. Σε πειραματικό έργο στο Tuscon της Arizona (ΗΠΑ), με την τοποθέτηση λευκού ελαστομερούς υλικού σε υφιστάμενο δώμα 2,600 τ.μ. σε κτίριο διοίκησης, εξοικονομήθηκαν 117.228 kWh (περίπου 400 εκατομμύρια btu) τον χρόνο σε ενέργεια και περίπου 50-65% ενέργεια για ψύξη, που μεταφράζεται σε 4000$ (περ. 3700€, ισοτιμία 2023) τον χρόνο (Αλεξάνδρου, 2013β).

Πλέον, υπάρχει μια σειρά από νέα υλικά, τα λεγόμενα ψυχρά (*cool materials*) (βλ. Κεφ. 10, παρ. 10.3.2), τα οποία έχουν παρόμοιες επιδόσεις. Τα υλικά αυτά περιέχουν στη μάζα τους χρωστικές, οι οποίες ενισχύουν την ανακλαστικότητά τους στην περιοχή της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας (Near Infra-Red – NIR), με αποτέλεσμα να μπορούν να έχουν ακόμη και σκούρο χρώμα χωρίς να αναπτύσσονται υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες, ενώ διατηρούν τις υψηλές τιμές θερμικής εκπομπής τους. Τέτοια υλικά όχι μόνο προστατεύουν τις υπερκείμενες κατασκευές από υπερθέρμανση, αλλά συμβάλλουν και στη βελτίωση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας (Akbari et al., 1992).

Όσον αφορά τα υαλοστάσια, οι ανακλαστικοί υαλοπίνακες (με επιφανειακή επίστρωση μεταλλικών οξειδίων που τους προσδίδουν έντονα ανακλαστικές ιδιότητες) επιδρούν με τον ίδιο τρόπο. Παρ’ όλα αυτά, πρέπει να χρησιμοποιούνται με περίσκεψη. Η μειωμένη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσφέρουν αντιστρατεύεται τη χειμερινή λειτουργία του υαλοστασίου ως συλλέκτη ενέργειας. Επίσης, στην περίπτωση κατά την οποία γίνει εκτεταμένη χρήση τους, π.χ. σε υαλοπετάσματα, είναι πιθανό να επιβαρύνουν τα γειτονικά κτίρια με την ακτινοβολία που ανακλάται από την επιφάνειά τους (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 128).

Θερμομόνωση των στοιχείων του κελύφους

Το κέλυφος του κτιρίου θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται στην επιφάνειά του ή/και από τη θερμότητα που μεταδίδει ο αέρας του περιβάλλοντος. Για να περιοριστεί η ροή της συσσωρευμένης θερμότητας με αγωγή προς την εσωτερική επιφάνεια του κελύφους, επιβάλλεται η τοποθέτηση θερμομονωτικής στρώσης, η οποία αυξάνει την αντίσταση του κελύφους στη μεταφορά της θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια προς την εσωτερική. Η αντιστροφή των συνθηκών το καλοκαίρι, όμως, δεν επηρεάζει τη λειτουργία της θερμομονωτικής στρώσης, αφού είναι ανεξάρτητη της φοράς ροής της θερμότητας (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 126-128).

Η σχετική θέση της θερμομονωτικής στρώσης επηρεάζει τη θερμική συμπεριφορά του κελύφους (βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.4.2). Η θέση της σχετίζεται με το κατασκευαστικό σύστημα. Σε «βαριές» κατασκευές και για τη σωστή λειτουργία του κελύφους κατά τη θερμή περίοδο, είναι προτιμότερο να τοποθετείται εξωτερικά, διότι η θερμική αδράνεια των δομικών υλικών αξιοποιείται στον εσωτερικό χώρο. Παράλληλα, η απουσία θερμοχωρητικών υλικών από το εξωτερικό κέλυφος του κτιρίου μειώνει την αποθήκευση θερμότητας στον αστικό ιστό και βελτιώνει τις συνθήκες μικροκλίματος· αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη βραδύτερη απόκριση στις ηλιακές προσόδους και τη μειωμένη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Εάν η στρώση τοποθετηθεί εσωτερικά, διαπιστώνονται στα εξωτερικά στρώματα του κελύφους υψηλότερες θερμοκρασίες την ημέρα, αλλά και χαμηλότερες τη νύχτα, επειδή δεν περιορίζεται η θερμική ροή προς το ψυχρότερο περιβάλλον, ενώ ο εσωτερικός χώρος στερείται της θερμοχωρητικότητας του κελύφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την

ταχύτερη απόκριση στις θερμικές προσόδους και αυξημένη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Η ενδιάμεση τοποθέτηση, που αφορά τη δικέλυφη τοιχοποιία, έχει κατασκευαστικά προτερήματα και προσφέρει διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας που κυμαίνεται ανάμεσα στις δύο άλλες (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 128).

Θερμική αδράνεια της κατασκευής

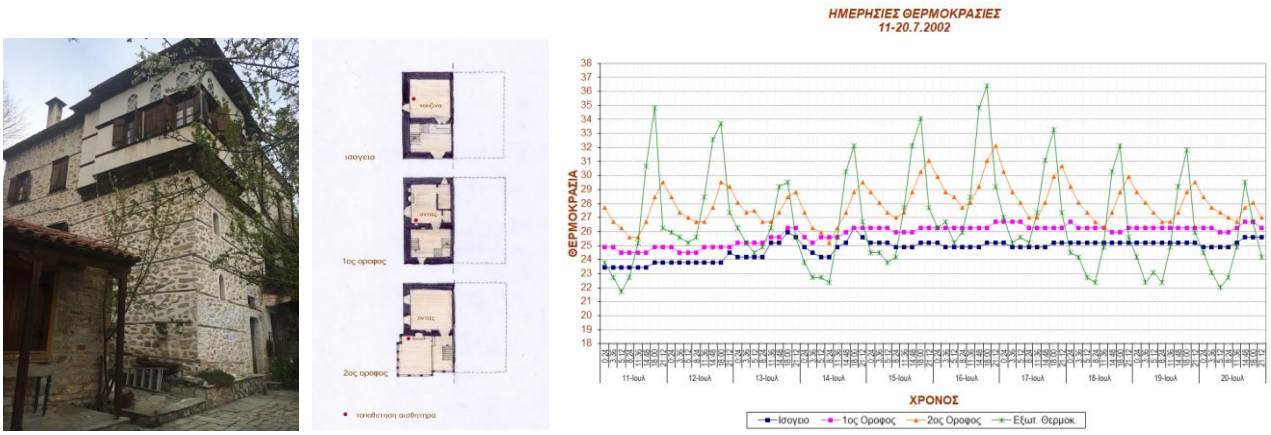
Για την κατανόηση της επίδρασης της θερμικής αδράνειας των στοιχείων του κελύφους στη μείωση μετάδοσης των θερμικών προσόδων, εξετάζονται δύο περιπτώσεις. Η πρώτη αφορά τις κατασκευές μεγάλης θερμικής αδράνειας που δεν έχουν θερμομονωθεί, τυπικά παραδείγματα των οποίων συναντώνται στα παραδοσιακά κτίρια. Η άλλη αφορά θερμομονωμένες κατασκευές με μεγάλη θερμική αδράνεια. Υπενθυμίζεται ότι η θερμική αδράνεια είναι έκφραση της αντίστασης ενός σώματος στην αλλαγή της θερμοκρασίας του και εξαρτάται από τη θερμοχωρητικότητα και τη θερμική αγωγιμότητά του (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 128).

Στις κατασκευές της πρώτης περίπτωσης, π.χ. σε έναν πέτρινο τοίχο (Εικόνα 8.7), την ημέρα η θερμότητα διαχέεται προς το εσωτερικό με ταχύτητα που εξαρτάται από τη θερμική αδράνεια των υλικών δόμησης. Η κατασκευή, ανάλογα με τη θερμοχωρητικότητά της, δεσμεύει θερμότητα. Όταν η σχέση θερμοκρασιών στις δύο πλευρές του κελύφους αντιστρέφεται, όπως στην περίπτωση που το βράδυ η θερμοκρασία περιβάλλοντος γίνεται μικρότερη της εσωτερικής, αλλάζει προς τα έξω η φορά διάχυσης θερμότητας. Αποτέλεσμα της αντιστροφής της φοράς ροής είναι μόνον ένα τμήμα της ενέργειας που απορροφήθηκε συνολικά από την εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής να μεταδίδεται στο εσωτερικό. Τα παραδοσιακά αιγαιοπελαγίτικα κτίσματα, για παράδειγμα, οφείλουν τη μειωμένη μετάδοση των ηλιακών προσόδων στην υψηλή θερμική αδράνεια του κελύφους τους (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 128-129).

Όσον αφορά τις κατασκευές με υψηλή θερμική αδράνεια που έχουν θερμομονωθεί εξωτερικά, παρατηρείται η ίδια διαδικασία φόρτισης-αποφόρτισης της θερμικής μάζας του κελύφους, σε περιορισμένο, όμως, βαθμό, λόγω της παρεμβολής της θερμομονωτικής στρώσης. Η θερμομόνωση, στις περιπτώσεις αυτές, περιορίζει σημαντικά τη ροή θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον, αλλά παρεμβαίνει και κατά την αντιστροφή των θερμοκρασιών, επιβραδύνοντας τον δροσισμό της κατασκευής μέσω του κελύφους. Δεδομένου ότι η θερμομονωτική στρώση έχει τη μεγαλύτερη συμβολή στον περιορισμό μετάδοσης της θερμότητας, η θερμική αδράνεια των κατασκευών αυτού του τύπου πρέπει να θεωρείται ότι λειτουργεί κυρίως ως στοιχείο που εξομαλύνει τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 126-129).



Εικόνα 8.7 *Θερμική αδράνεια κατασκευής. Πηγή: Photo by Despina Galani on Unsplash.*



Εικόνα 8.8 *Θερμική αδράνεια παραδοσιακής κατοικίας στο Πήλιο. α. Φωτογραφία κτιρίου, β. Θέσεις καταγραφικών θερμομέτρων, γ. Μετρήσεις θερμοκρασιών αέρα-ημερήσια διακύμανση. Πηγή: Alexandrou (2015).*

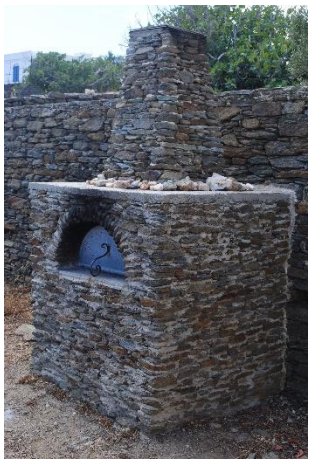
8.2.4 Περιορισμός εσωτερικών θερμικών προσόδων

Ο περιορισμός των εσωτερικών θερμικών προσόδων συμβάλλει θετικά στην αποτροπή της υπερθέρμανσης ενός χώρου. Τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν προς αυτή την κατεύθυνση εξαρτώνται από τις εσωτερικές πηγές θερμότητας. Έτσι, όσον αφορά τη θερμότητα που παράγουν οι χρήστες του χώρου, μπορεί να περιοριστεί με την ελάττωση του αριθμού των ατόμων που χρησιμοποιούν τον χώρο, τη μείωση ή τη μεταφορά των δραστηριοτήτων σε υπαίθριο χώρο. Παράδειγμα μιας τέτοιας επιτυχημένης αντιμετώπισης στην Ελλάδα είναι οι θερινοί, υπαίθριοι κινηματογράφοι και τα ανοιχτά θέατρα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 129).

Η αυξημένη διάρκεια της ημέρας το καλοκαίρι περιορίζει θεωρητικά την ανάγκη χρήσης τεχνητού φωτισμού, ελαττώνοντας έτσι την ενεργειακή επιβάρυνση του κτιρίου, με την εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού και με την επιλογή λαμπτήρων υψηλής απόδοσης για τον χρόνο που απαιτείται τεχνητός φωτισμός (Στο ίδιο).

Για τον περιορισμό της θερμότητας που παράγεται από συσκευές, οι προσφερόμενες λύσεις είναι, εκτός της αρχικής επιλογής συσκευών με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, η λειτουργία των συσκευών για τον απολύτως απαραίτητο χρόνο ή/και η τοποθέτησή τους σε χώρους από όπου απάγεται γρήγορα η θερμότητα με φυσικό ή τεχνητό τρόπο. Επίσης, υπάρχει και το παράδειγμα εξωτερικών φούρνων στην ελληνική παραδοσιακή αρχιτεκτονική, για το μαγείρεμα εκτός των χώρων της κατοικίας (Εικόνα 8.9) (Στο ίδιο).

Όσον αφορά το ζεστό νερό χρήσης, όπως έχει επισημανθεί και σε άλλη ενότητα (Κεφ. 11 και Κεφ. 13), η χρήση ηλιακών θερμοσιφώνων ή συλλεκτών τοποθετημένων στο δώμα επιβαρύνει τον εσωτερικό χώρο μόνο με τη θερμότητα που διαφεύγει κατά τη μεταφορά και τη χρήση του (Στο ίδιο). Η ελαχιστοποίηση των εσωτερικών προσόδων σε χώρους που περιβάλλονται από θερμοχωρητικά δομικά στοιχεία είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι, όπως αναφέρθηκε, η θερμότητα που θα αποθηκευτεί στη μάζα τους χρειάζεται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για να απομακρυνθεί.

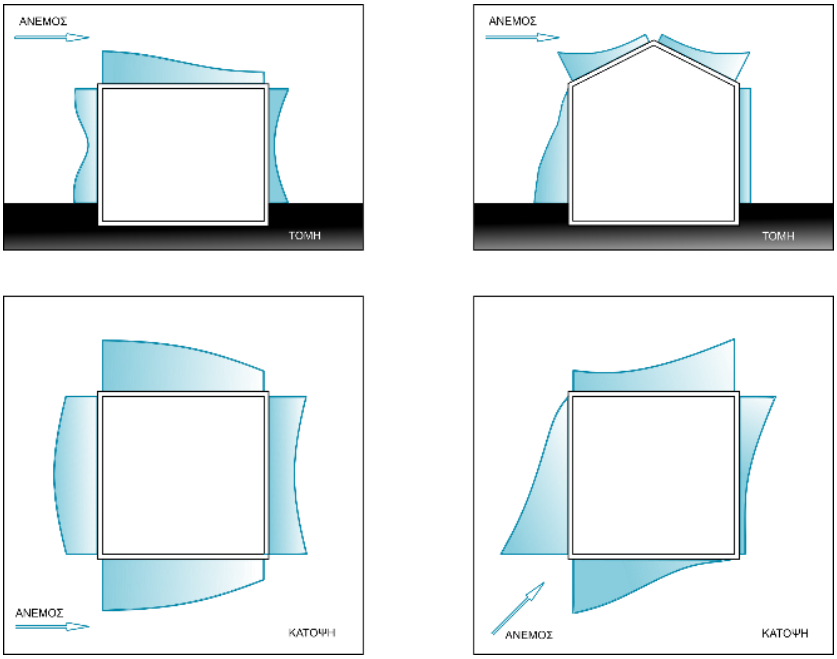
Εικόνα 8.9 *Μεταφορά δραστηριοτήτων στην ύπαιθρο.*
α. Μαγείρεμα στην ύπαιθρο. Πηγή: Two kettles and one pot ontop of fire, Photo by Clem Onojeghuo on Unsplash.
β. Υπαίθριος ξυλόφουρνος. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο, με παραχώρηση (Αιν. Οικονόμου).

8.3 Φυσικός αερισμός

Η κίνηση του αέρα μέσα σε ένα κτίριο απάγει θερμότητα με μεταφορά από τους ανθρώπους, τον εσωτερικό αέρα και το κέλυφος. Ανάλογα με τον μηχανισμό που προκαλεί την κίνηση του αέρα, διακρίνονται οι κατηγορίες του φυσικού και του μηχανικού αερισμού. Ο φυσικός αερισμός, στον οποίο θα γίνει αναφορά παρακάτω, προϋποθέτει άνοιγμα του κτιρίου προς το περιβάλλον και η λειτουργία του συνεπάγεται την αντικατάσταση του εσωτερικού αέρα. Ο μηχανικός αερισμός έχει δύο βασικές δυνατότητες: να αντικαθιστά τον εσωτερικό αέρα με τη χρήση εξαεριστήρων ή να τον ανακυκλοφορεί με ελεγχόμενη ταχύτητα, όπως π.χ. κάνει ένας ανεμιστήρας, ώστε να προσφέρεται η αίσθηση θερμικής άνεσης στους χρήστες του κτιρίου. Στις μελέτες βιοκλιματικού σχεδιασμού δίνεται προτεραιότητα στον φυσικό αερισμό, μια και η λειτουργία του δεν προϋποθέτει ενεργειακή δαπάνη. Όμως, συχνά προβλέπεται και η χρήση μηχανικού αερισμού για να αντιμετωπιστούν περιπτώσεις όπως αυτές της άπνοιας. Έχει γίνει αποδεκτό ότι ο μηχανικός αερισμός βοηθητικού χαρακτήρα συμβαδίζει με τη λογική του βιοκλιματικού σχεδιασμού, αφού δημιουργούνται στις περισσότερες περιπτώσεις συνθήκες θερμικής άνεσης με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση (ηλεκτρικής) ενέργειας (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 130). Παράλληλα, η κίνηση του αέρα δημιουργεί αίσθημα δροσισμού στους χρήστες του κτιρίου και, για τον λόγο αυτόν, λέγεται και αερισμός άνεσης (*comfort ventilation*).

Ο φυσικός διαμπερής αερισμός προσφέρει ταχεία αποβολή θερμότητας από έναν χώρο, επειδή παρακάμπτεται το κέλυφος του κτιρίου στη διαδικασία απόρριψης της θερμότητας στο εξωτερικό περιβάλλον. Στην περίπτωση, για παράδειγμα, ενός κτιρίου με κλειστά παράθυρα, η θερμότητα που συσσωρεύτηκε κατά τη διάρκεια της ημέρας αποβάλλεται τη νύχτα, ακολουθώντας την αργή διαδικασία της μετάδοσης διαμέσου του κελύφους και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Εάν ανοιχτούν τα παράθυρα, ο θερμός εσωτερικός αέρας μπορεί να διαφύγει γρήγορα στο περιβάλλον. Ταυτόχρονα, προσφέρεται η δυνατότητα πληρέστερης αποφόρτισης της θερμικής μάζας του κτιρίου με τη διείσδυση και κυκλοφορία ψυχρότερου εξωτερικού αέρα (Στο ίδιο).

Φυσικός αερισμός προκαλείται είτε λόγω διαφοράς θερμοκρασίας στα στρώματα του αέρα είτε λόγω ανεμοπίεσης στις θέσεις όπου υπάρχουν ανοίγματα του κτιρίου. Στην πραγματικότητα, είναι πιθανό να υπάρχει συνδυασμός των δύο αιτιών (Στο ίδιο).



Εικόνα 8.10 *Διάγραμμα πιέσεων ανέμου σε όγκους κτιρίων. Τομή επάνω/Κάτοψη κάτω. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη από Goulding J. R., Lewis J. O. & Steemers T. C., 1994).*

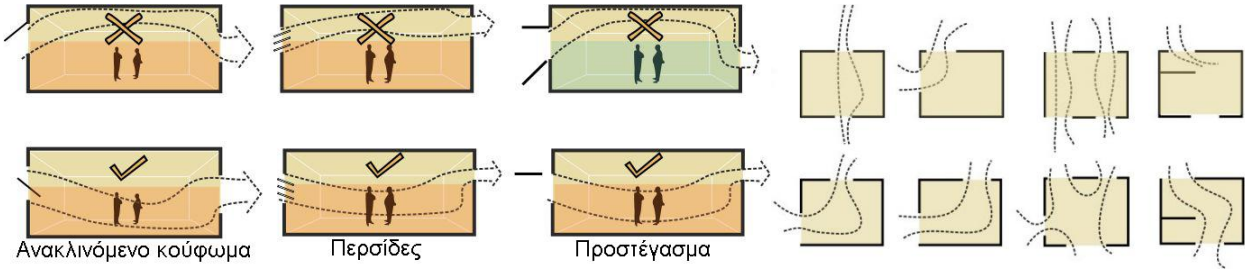
8.3.1 Οριζόντια κίνηση – Διαμπερής φυσικός αερισμός

Όταν προσπίπτει άνεμος στις πλευρές ενός κτιρίου, δημιουργείται πίεση. Στην προσήνεμη πλευρά η πίεση του ανέμου είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στην υπήνεμη, με αποτέλεσμα, εάν υπάρχουν ανοικτά κουφώματα στις δύο αυτές πλευρές, να προκαλείται αερισμός λόγω διαφοράς πίεσης (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 131).

Ο μελετητής, για να επιτύχει τον επιθυμητό φυσικό αερισμό που παράγεται από ανεμοπίεση, πρέπει να εξετάσει την κίνηση του αέρα σε δύο επίπεδα: το πρώτο επίπεδο αφορά τη δυνατότητα που προσφέρεται στον άνεμο να προσπέσει στο κέλυφος, ενώ το δεύτερο αφορά τη διάπλαση του κτιριακού όγκου και τη διαμόρφωση των ανοιγμάτων ώστε να αερίζονται οι χώροι που έχουν επιλεγεί (Στο ίδιο).

Σε προηγούμενες παραγράφους (βλ. Κεφ. 3, παρ. 3.3.3 και 3.3.4) έχει αναφερθεί ότι η μελέτη των χαρακτηριστικών του οικοπέδου πρέπει να περιλαμβάνει και την εξέταση των ανέμων που επικρατούν στην περιοχή. Για την περίπτωση του δροσισμού, ενδιαφέρει η κατεύθυνση και η ένταση των ανέμων που επικρατούν τη θερμή περίοδο του χρόνου, όπως επίσης και η υγρασία που πιθανόν μεταφέρουν. Προσφέρεται η δυνατότητα να μειωθεί η ταχύτητα του ανέμου ή να αλλάξει η κατεύθυνσή του πριν προσπέσει στο κτίριο, με στοιχεία διαμόρφωσης του περιβάλλοντος χώρου, όπως είναι οι φράχτες ή η υψηλή και πυκνή φύτευση (Στο ίδιο).

Ο αερισμός των εσωτερικών χώρων εξαρτάται από τη γωνία με την οποία προσπίπτει ο άνεμος στις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου, όπως και από τη θέση των ανοιγμάτων σε αυτές (Εικόνα 8.11). Έχει διαπιστωθεί ότι οι καλύτερες συνθήκες αερισμού προσφέρονται όταν ο άνεμος προσπίπτει στο κτίριο υπό γωνία έως 45°. Ακόμη, μελέτες έδειξαν πως το μέγεθος και η θέση των ανοιγμάτων καθορίζουν την κατεύθυνση και τη ροή του αέρα μέσα στο κτίριο. Συγκεκριμένα, έχει βρεθεί πως ένας χώρος αερίζεται αποτελεσματικά όταν η κίνηση του αέρα είναι ανεμπόδιστα διαμπερής ανάμεσα σε δύο ανοίγματα τοποθετημένα αντιδιαμετρικά και σε διαφορετική υψομετρική στάθμη. Σε περίπτωση που τα ανοίγματα έχουν διαφορετικά μεγέθη, η ταχύτητα του ανέμου θα είναι μεγαλύτερη κοντά στο άνοιγμα (εισόδου ή εξόδου) με το μικρότερο εμβαδόν. Για να μεγιστοποιηθεί ο διαμπερής αερισμός, πρέπει τα μεγέθη των δύο ανοιγμάτων να είναι ίσα (Στο ίδιο).



Εικόνα 8.11 *Φυσικός αερισμός. Πηγή: Μετάφραση στα ελληνικά από Natural ventilation via USAID PACE-D, U.S. Agency for International Development (USAID) Partnership to Advance Clean Energy-Deployment (PACE-D), Public Domain).*

Η ροή του ανέμου μπορεί να αξιοποιηθεί και με τη λειτουργία του φαινομένου Ventouri στις περιπτώσεις που επιδιώκεται αερισμός του χώρου μέσω αεραγωγού. Συνήθως ο μελετητής καταφεύγει στη χρήση αεραγωγών αυτού του τύπου όταν δεν έχει τη δυνατότητα να τοποθετήσει τα κατάλληλα ανοίγματα στον χώρο που επιδιώκει να αερίσει (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 132).

Τα κριτήρια αξιολόγησης συνθηκών φυσικού αερισμού είναι τα ακόλουθα:

- ταχύτητα του αέρα στο άνοιγμα εισόδου,
- μέγιστη ταχύτητα αέρα σε κάθε σημείο στο εσωτερικό,
- μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα στον χώρο,
- μέση ταχύτητα στο ύψος εργασίας (~ 1 μ. από το δάπεδο).

Ο φυσικός αερισμός άνεσης είναι αποδοτικός όταν συντονίζεται ο χρόνος δράσης του με τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, την ημέρα, ο φυσικός αερισμός είναι επιθυμητός για όσο χρόνο ο εξωτερικός αέρας έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από εκείνη του εσωτερικού και το ρεύμα που δημιουργείται μέσα στους χώρους του κτιρίου έχει μικρή ταχύτητα (έως 2 m/sec). Υπό αυτές τις συνθήκες, ο φυσικός αερισμός δροσίζει τους ανθρώπους που παρευρίσκονται στους χώρους, εντείνοντας την αποβολή θερμότητας με μεταφορά από το σώμα και αυξάνοντας τον ρυθμό εξάτμισης του ιδρώτα από την επιδερμίδα τους. Επίσης, ο φυσικός αερισμός μειώνει τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα στο επίπεδο του εξωτερικού και συμβάλλει στη γρηγορότερη αποβολή θερμότητας από το κέλυφος. Το υπόλοιπο χρονικό διάστημα της ημέρας, όταν δηλαδή ο εξωτερικός αέρας είναι θερμότερος, τα κουφώματα επιβάλλεται να είναι κλειστά, οπότε πιθανόν πρέπει να αναζητηθεί άλλος τρόπος δροσισμού των χώρων. Τη νύχτα ισχύουν οι ίδιες προϋποθέσεις για τη λειτουργία του φυσικού αερισμού, με τη δυνατότητα να είναι αποδεκτή και μεγαλύτερη ταχύτητα ρευμάτων αέρα, στην περίπτωση που το κτίριο δεν χρησιμοποιείται (π.χ. σε γραφεία, σχολεία, καταστήματα). Ο νυχτερινός αερισμός προσφέρεται για να απομακρυνθούν οι ημερήσιες θερμικές πρόσοδοι, ενώ υπό ορισμένες προϋποθέσεις για να αποφορτιστεί η θερμική μάζα του κτιρίου και από θερμικές προσόδους προηγούμενων ημερών. Με μειωμένη κατ' αυτόν τον τρόπο τη θερμοκρασία του κελύφους του, το κτίριο είναι έτοιμο από την αυγή να προσφέρει για περισσότερο χρόνο θερμική άνεση στους χρήστες του (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 132-133).

Τα στοιχεία του κτιρίου που επιδρούν στις συνθήκες αερισμού είναι:

- Η γεωμετρία του κελύφους: σχήμα, εσοχές και προεξοχές.
- Η θέση ανοιγμάτων σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου.
- Η συνολική επιφάνεια ανοιγμάτων στις περιοχές πίεσης και υποπίεσης του κελύφους.
- Ο τύπος κουφωμάτων και οι λεπτομέρειες λειτουργίας τους.
- Η θέση των ανοιγμάτων κατά την κατακόρυφο.

- Τα εσωτερικά εμπόδια στη ροή του αέρα μεταξύ εισόδου και εξόδου, ειδικά σε περιπτώσεις που η ροή διαπερνά περισσότερους από έναν χώρους. Επίσης, το μέγεθος και η θέση των ανοιγμάτων (πόρτες) που συνδέουν τους χώρους.
- Η παρουσία ή απουσία προστατευτικών σητών.

8.3.2 Κατακόρυφη ανοδική κίνηση – Φαινόμενο της καμινάδας

Η περίπτωση δημιουργίας φυσικού αερισμού λόγω διαφοράς θερμοκρασίας στα στρώματα του αέρα αναφέρεται στα βιβλία βιοκλιματικού σχεδιασμού ως «φαινόμενο της καμινάδας» (*stack effect*). Το φαινόμενο οφείλεται στο ότι όταν ο αέρας θερμανθεί διαστέλλεται, μειώνεται η πυκνότητά του και συνεπώς κινείται ανοδικά. Εάν προσφερθεί διέξοδος στο ανερχόμενο ρεύμα, εισέρχεται αέρας από το εξωτερικό περιβάλλον για να αναπληρώσει αυτόν που διέφυγε. Ουσιαστικά, δηλαδή, πρόκειται για κατακόρυφη κίνηση, που οδηγεί έξω από το κτίριο τις θερμότερες μάζες του αέρα. Για να μπορεί να προσφέρει δροσισμό η λειτουργία του φαινομένου της καμινάδας, πρέπει ο εισερχόμενος αέρας να είναι ψυχρότερος από εκείνον που εξέρχεται. Ο μελετητής μπορεί να αναζητήσει και να οδηγήσει στο κτίριο αέρα κατάλληλης θερμοκρασίας από θέσεις, όπως π.χ. είναι τα υπόγεια ή περιοχές της διαμόρφωσης του εξωτερικού περιβάλλοντος που περιλαμβάνει χαμηλή φύτευση ή/και επιφάνειες νερού (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 130).

Μελέτες έχουν δείξει πως οι συμβατικές καπνοδόχοι, όταν είναι ανοικτές, συμβάλλουν στον αερισμό του χώρου που εξυπηρετούν με τη λειτουργία του φαινομένου της καμινάδας (κυριολεκτικά σε αυτή την περίπτωση). Έχει μάλιστα διαπιστωθεί πως η θέρμανση των τοιχωμάτων της καπνοδόχου από την ηλιακή ακτινοβολία ενισχύει το ανοδικό ρεύμα. Στην παρατήρηση αυτή στηρίχθηκε η δημιουργία των ηλιακών καμινάδων (*solar chimneys*) ως στοιχείων για την ενίσχυση της κατακόρυφης κυκλοφορίας του αέρα. Οι ηλιακές καμινάδες (βλ. ενδεικτικά παραδείγματα στην Εικόνα 8.12) σχεδιάζονται με τρόπο ώστε τα τοιχώματά τους να έχουν αυξημένες ηλιακές προσόδους, π.χ. εάν κατασκευαστούν με σκουρόχρωμα μεταλλικά τοιχώματα για να προκαλούν μεγαλύτερο ελκυσμό (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 130-131).

α.  *β.* 

γ.

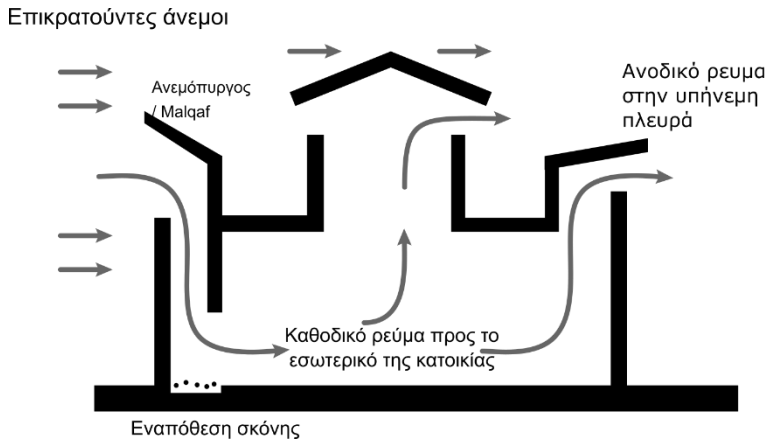


Εικόνα 8.12 *Κατακόρυφη ανοδική κίνηση. Παραδείγματα.*
α. Κτίριο γραφείων BRE, Garston, Μεγ. Βρετανία. Πηγή: The Building Research Station by ©John Webb via Geograph, CC BY-SA 2.0.
β. Inland Revenue Centre, Nottingham, Μεγ. Βρετανία (Michael Hopkins and Partners, 1992-1995). Πηγή: Inland Revenue Centre, Nottingham by ©John Sutton via Geograph, CC BY-SA 2.0.
γ. Queen's Building, De Montfort University, Leicester (1991-1993). Πηγή: Queen's Building by Steve Cadman via Flickr, CC BY-SA 2.0

8.3.3 Κατακόρυφη καθοδική κίνηση – Ανεμόπυργοι και ψυκτικοί πύργοι

Φυσικός δροσισμός μπορεί να επιτευχθεί στα κτίρια και με κατακόρυφη καθοδική κίνηση του αέρα, που βασίζεται στην πλευστότητα (*buoyancy*) για την κυκλοφορία του αέρα διαμέσου των εσωτερικών χώρων (Ford, 2012). Στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική, η στρατηγική αυτή υπάρχει στους ανεμόπυργους (*wind catchers*) που συναντώνται στη Μέση Ανατολή. Πρόκειται για διατάξεις οι οποίες στρέφονται προς την πλευρά των επικρατούντων ανέμων με στόχο να τους καθοδηγήσουν προς το εσωτερικό.

Σε έναν ανεμόπυργο, ο εξωτερικός αέρας εισέρχεται από ανοίγματα στο ανώτερο τμήμα του, ψύχεται, και έτσι γίνεται βαρύτερος και κατεβαίνει προς τα κάτω. Τα δωμάτια έχουν ανοίγματα εισόδου (*inlet*) και εξόδου (*outlet*) με στόχο την κίνηση του αέρα. Όταν σε ένα δωμάτιο υπάρχει άνοιγμα εισόδου και άνοιγμα εξόδου στην άλλη μεριά, δημιουργείται ένα ρεύμα δροσερού αέρα (Εικόνες 8.13 και 8.14). Ο ανεμόπυργος μοιάζει με καμινάδα, που ξεκινά από το υπόγειο ή το κατώτερο πάτωμα και καταλήγει στο δώμα ή τη στέγαση. Το ανώτερο τμήμα είναι χωρισμένο σε δύο ή περισσότερα κατακόρυφα διαμερίσματα, τα οποία ξεκινούν από τα ανοίγματα στις διαφορετικές πλευρές του πύργου (Εικόνα 8.15). Όταν υπάρχουν αυξημένες ταχύτητες ανέμου, ο αέρας δροσίζεται πιο αποτελεσματικά και ρέει γρηγορότερα διαμέσου του πύργου προς τους χώρους διαβίωσης. Το σύστημα λειτουργεί αποτελεσματικά σε ζεστά και ξηρά κλίματα, με μεγάλη διημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας (Kamal, 2012, σ. 91).

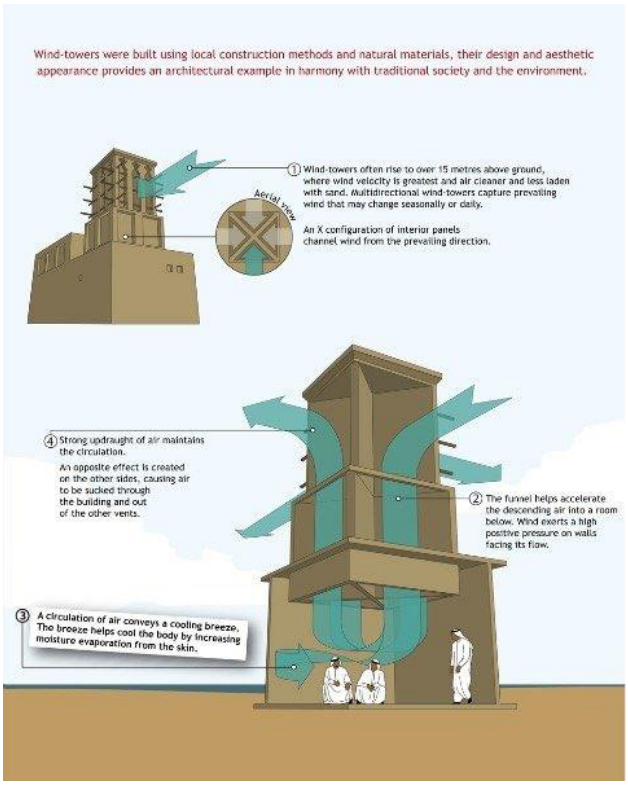


Εικόνα 8.13 *Κατακόρυφη ανοδική κίνηση. Πηγή: Μετάφραση στα ελληνικά από Malqaf by Fred the Oyster via Wikimedia Commons, GNU Free Documentation License CC BY-SA 3.0 CC BY-SA 2.5, CC BY-SA 2.0, CC BY-SA 1.0.*

Σε πολλές περιπτώσεις, και όπου ο συνδυασμός θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας το επιτρέπει, η κατακόρυφη καθοδική κίνηση του αέρα συνδυάζεται και με στοιχεία νερού με στόχο την επίτευξη δροσισμού με εξάτμιση (*evaporative cooling*) (βλ. παρακάτω παρ. 8.4.2). Αντίστοιχα παραδείγματα υπάρχουν στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική των χωρών της Βόρειας Αφρικής, της Μέσης Ανατολής και της Ανατολικής Μεσογείου, αλλά και σε σύγχρονα παραδείγματα.

Κατά τον Givoni, υπάρχουν δύο τύποι ψυκτικών πύργων, ο πρώτος είναι αυτός που αναπτύχθηκε από τους Cunningham & Thompson (1986) στο Ερευνητικό Κέντρο του Πανεπιστημίου της Arizona στο Tucson και ο δεύτερος είναι ο ψυκτικός πύργος καταιονισμού-διαμερισμού σταγονιδίων, που αναπτύχθηκε από τον ίδιο (Givoni, 1998). Το σύστημα αποτελείται από έναν πύργο καθοδικού ρεύματος αέρα, που έχει στο πάνω μέρος κατακόρυφες υγρές επιφάνειες κυτταρίνης διαποτισμένες με άλατα κατά της αποσύνθεσης και ουσίες κορεσμού για ακαμψία. Το νερό διανέμεται στο πάνω μέρος των επιφανειών, συλλέγεται στον πυθμένα σε μια λεκάνη αποστράγγισης και επανακυκλοφορεί με μια αντλία. Το ολοκληρωμένο σύστημα στο Tucson συμπεριλάμβανε επίσης μια ηλιακή καμινάδα στην απέναντι πλευρά του κτιρίου, για να αυξήσει τον ρυθμό ροής του αέρα μέσα στον ψυκτικό πύργο και στο κτίριο (Givoni, 1998). Ελέγχθηκαν και άλλες πορώδεις επιφάνειες, όπως πορώδη κεραμικά, που όμως απορρίφθηκαν, καθώς απαιτούν μεγάλη επιφάνεια για την επίτευξη σημαντικού δροσισμού. Ο καταιονισμός (σπρέυ) σταγονιδίων νερού έχει αποδειχθεί ότι είναι ίσως η πιο αποτελεσματική τεχνική για τη δημιουργία ψυχρού καθοδικού ρεύματος (Ford, 2012). Αποδείχθηκε ότι ο παθητικός δροσισμός με εξάτμιση καθοδικού ρεύματος (Passive Downdraught Evaporative Cooling – PDEC)

συμβάλλει στην επίτευξη τόσο συνθηκών άνεσης όσο και πολύ αυξημένων εναλλαγών αέρα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθεί κίνηση αέρα διαμέσου του κτιρίου. Στη Διεθνή Έκθεση της Σεβίλλης το 1992, χρησιμοποιήθηκαν ψυκτικοί πύργοι με επιφάνειες κυτταρίνης στον εξωτερικό χώρο του Περιπτέρου των ΗΠΑ (Οικονόμου, 2007· Yoklic et al., 1991).



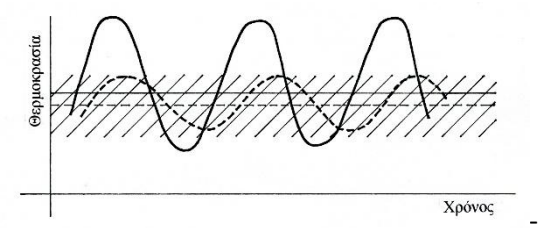
Εικόνα 8.14 *Κατακόρυφη καθοδική κίνηση. Πηγή: Rubboli, M. Le «Torri del Vento»: i Climatizzatori Naturali dell'Antica Persia, Vanilla Magazine, https://www.vanillamagazine.it/le-torri-del-vento-i-climatizzatori-naturali-dell-antica-persia/, CC BY-NC-ND 2.5 IT.*



Εικόνα 8.15 *Κατακόρυφη καθοδική κίνηση. Ανεμόπυργοι (wind-catchers/badgir) στην πόλη Yard, Iran. Πηγές: Badgir by Aneta Ribarska via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0, Yazd-Badgir-Windcatcher by Alireza Javaheri via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0, Looking up Iran's Tallest Badgir (Wind Catcher) by Alan Cordova via Flickr, CC BY-NC-ND 2.0).*

8.4 Παθητικός δροσισμός

Όταν το καλοκαίρι, σε συνθήκες σταθερού κλίματος, ο μέσος όρος της εξωτερικής θερμοκρασίας πλησιάζει το άνω όριο της ζώνης θερμικής άνεσης, οι τεχνικές του φυσικού δροσισμού δεν επαρκούν πάντα για να διακυμανθεί η εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου μέσα στη ζώνη θερμικής άνεσης. Στις περιπτώσεις αυτές, πρέπει ο μέσος όρος της εσωτερικής θερμοκρασίας να υποχωρήσει κάτω από τον μέσο όρο της θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα, ώστε να υπάρχει πιθανότητα να διακυμανθεί η εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου μέσα στη ζώνη θερμικής άνεσης (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 133).

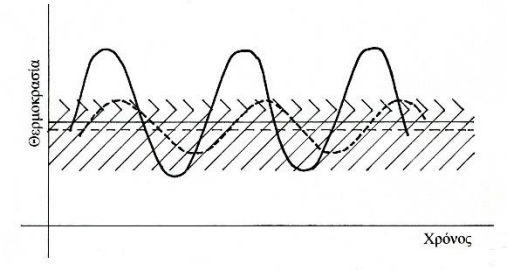


- - - - εσωτερικός αέρας _____ εξωτερικός αέρας

Εικόνα 8.16 *Εφαρμογή συστημάτων παθητικού δροσισμού: Τροποποίηση της διακύμανσης της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα του κτιρίου κατά τη διάρκεια του καλοκαιρού, ώστε αυτή να παραμένει στα όρια της ζώνης θερμικής άνεσης και να εξασφαλίζεται επαρκής δροσισμός. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*

Στην Εικόνα 8.16 παρουσιάζεται γραφικά η συνθήκη για να βρεθεί η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας (διακεκομμένη γραμμή) μέσα στη ζώνη θερμικής άνεσης (διαγραμμισμένη ζώνη): ο μέσος όρος της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα του κτιρίου πρέπει να κινηθεί προς το κέντρο της ζώνης θερμικής άνεσης και κάτω από τον μέσο όρο της θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα (συνεχής γραμμή) (Στο ίδιο).

Στην πράξη, η μείωση της μέσης θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα του κτιρίου κάτω από τη στάθμη της μέσης θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος, υπό συνθήκες σταθερού κλίματος, μπορεί να γίνει με την εφαρμογή συστημάτων παθητικού δροσισμού (Εικόνα 8.17). Για την επίτευξη του στόχου, ενεργοποιείται η απορρόφηση πλεονάζουσας θερμότητας του κτιρίου από στοιχεία συγκέντρωσης της θερμότητας του περιβάλλοντος (*environmental heat sinks*), όπως είναι ο αέρας, το νερό, το υπόγειο έδαφος, η ανώτερη ατμόσφαιρα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σσ. 133-134).



- - - - εσωτερικός αέρας _____ εξωτερικός αέρας

Εικόνα 8.17 *Όρια εφαρμογής συστημάτων παθητικού δροσισμού κατά τη διάρκεια ιδιαίτερα θερμών χρονικών διαστημάτων του καλοκαιριού. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*

Για τα ιδιαίτερα θερμά χρονικά διαστήματα του καλοκαιριού, υπάρχει πιθανότητα η εφαρμογή μόνο συστημάτων παθητικού δροσισμού να μην εξασφαλίζει θερμική άνεση για τις πιο ζεστές ώρες της ημέρας. Στις περιπτώσεις αυτές, πριν από την εφαρμογή ενεργητικών συστημάτων δροσισμού, μπορεί να εξεταστεί η περίπτωση διεύρυνσης προς τα άνω του πλάτους της ζώνης θερμικής άνεσης, ώστε να περιληφθεί σε αυτήν όλο το εύρος των εσωτερικών θερμοκρασιών. Η χρήση ανεμιστήρων, η επιλογή ελαφρύτερης ενδυμασίας ή ο περιορισμός της σωματικής δραστηριότητας υπενθυμίζεται ότι είναι μερικοί από τους τρόπους που επιτρέπουν την παροχή θερμικής άνεσης σε υψηλότερες θερμοκρασίας (Κεφ. 4, παρ. 4.2.6). Στο Σχήμα 8.1 του παρόντος, παρουσιάζεται γραφικά η περίπτωση που περιγράφεται. Παρά το ότι ο μέσος όρος της εσωτερικής θερμοκρασίας βρίσκεται κάτω από τον μέσο όρο της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα, τα ανώτερα τμήματα της καμπύλης διακύμανσης εσωτερικής θερμοκρασίας εντοπίζονται έξω από τη ζώνη θερμικής άνεσης. Εάν, όμως, διευρυνθεί προς τα άνω η ζώνη θερμικής άνεσης (αντίστροφα διαγραμμισμένη ζώνη), φαίνεται πως ικανοποιείται το αίτημα παροχής θερμικής άνεσης για όλο το διάστημα του 24ώρου (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 134).

Ο παθητικός δροσισμός λειτουργεί σύμφωνα με τις αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού: χρησιμοποιεί το κέλυφος του κτιρίου για να μεταδώσει θερμότητα σε απορροφητές θερμότητας με φυσική

κυκλοφορία ή σε ορισμένες περιπτώσεις με μηχανική υποβοήθηση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Στη μηδενική ή περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας οφείλει, άλλωστε, τον προσδιορισμό παθητικός (Στο ίδιο).

Για να δροσιστεί ένα κτίριο με παθητικές μεθόδους εφαρμόζεται ένα ή περισσότερα από τα διάφορα συστήματα παθητικού δροσισμού. Κάθε σύστημα παθητικού δροσισμού χαρακτηρίζεται από τον περιβαλλοντικό απορροφητή που χρησιμοποιεί και τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται η απορρόφηση θερμότητας. Με βάση τα κριτήρια αυτά, διακρίνονται τα ακόλουθα συστήματα παθητικού δροσισμού (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 135).

8.4.1 Σύστημα νυχτερινού δροσισμού με αερισμό

Αρχή λειτουργίας του συστήματος είναι η άμεση απαγωγή της θερμότητας που έχει αποθηκευτεί στη θερμική μάζα του κτιρίου με τον έντονο αερισμό του τη νύχτα, ώστε την επόμενη ημέρα να λειτουργήσει ξανά ως απορροφητής θερμότητας. Προϋπόθεση για να λειτουργήσει το σύστημα με φυσικό τρόπο είναι να υπάρχει 24ωρο εύρος διακύμανσης εξωτερικής θερμοκρασίας 12-15^{o}C, με ελάχιστη θερμοκρασία κάτω από τους 20^{o}C, και ικανή ταχύτητα νυχτερινού ανέμου. Επειδή οι συνθήκες αυτές δεν είναι συνηθισμένες για τα ελληνικά καλοκαίρια, η εφαρμογή του συστήματος απαιτεί μηχανικό νυχτερινό αερισμό, με αυξημένο αριθμό εναλλαγών αέρα ανά ώρα (έως 4 αλλαγές αέρα ανά ώρα). Εάν το επόμενο πρωί παραμείνουν τα ανοίγματα κλειστά, έχει παρατηρηθεί ότι, ανάλογα με τις εσωτερικές προσόδους, παρέχονται συνθήκες θερμικής άνεσης που, συνήθως όμως, δεν καλύπτουν όλη τη διάρκεια της ημέρας. Για το χρονικό διάστημα που δεν εξυπηρετεί ο νυκτερινός δροσισμός με αερισμό θα πρέπει να προβλεφθεί η εφαρμογή άλλου συστήματος παθητικού ή μηχανικού δροσισμού (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 135).

Η απόδοση του συστήματος εξαρτάται από την ποσότητα και τα χαρακτηριστικά της θερμικής μάζας του κελύφους, τη διαφορά θερμοκρασίας περιβάλλοντος ημέρας και νύχτας, την ελάχιστη νυχτερινή θερμοκρασία και τον ρυθμό αλλαγών αέρα ανά ώρα. Νοείται ότι στο κτίριο όπου εφαρμόζεται το σύστημα, όπως και για όλα τα υπόλοιπα συστήματα, θα έχουν ληφθεί μέτρα για τον περιορισμό των εξωτερικών και εσωτερικών θερμικών προσόδων (Στο ίδιο).

Βασικό πλεονέκτημα του συστήματος νυχτερινού δροσισμού με αερισμό είναι ότι παρέχεται ευκολία εφαρμογής του στα τυπικά ελληνικά κτίρια, που χαρακτηρίζονται από βαριά κατασκευή και αντίστοιχα μεγάλη θερμοχωρητικότητα. Εκεί όπου παρατηρείται μικρή διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη διάρκεια του 24ώρου, συνδυαζόμενη με άπνοια, απαιτείται η χρήση μηχανικού αερισμού για να γίνει δυνατή η νυχτερινή απαγωγή θερμότητας (Στο ίδιο).

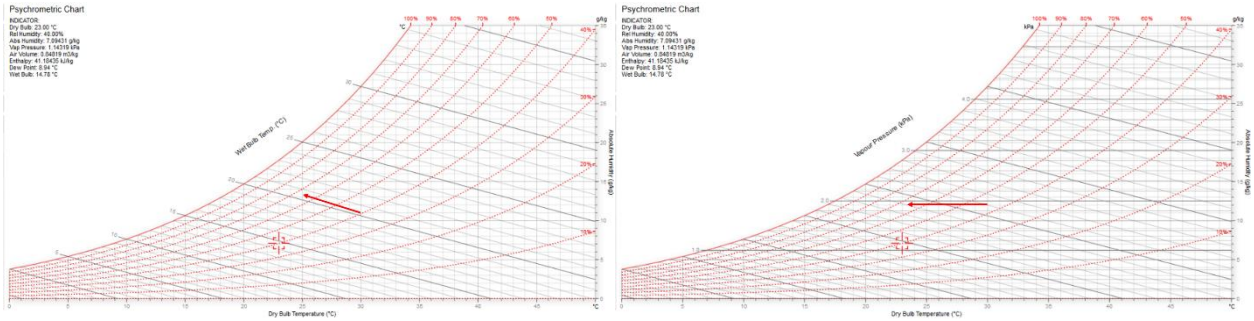
Μειονέκτημα του συστήματος είναι ότι ο νυχτερινός αερισμός, φυσικός ή μηχανικός, μπορεί να ενοχλήσει τους χρήστες του κτιρίου. Στις κατοικίες, για παράδειγμα, συνήθως δεν είναι ανεκτό το ρεύμα αέρα, αλλά και πρέπει να αντιμετωπισθούν πιθανά προβλήματα που συνδέονται με το άνοιγμα των παραθύρων, όπως είναι ο θόρυβος του περιβάλλοντος, η ατμοσφαιρική ρύπανση, τα έντομα και η ασφάλεια των χώρων. Η εφαρμογή μηχανικού αερισμού επιλύει πολλά από τα προβλήματα, παραμένει όμως το θέμα της ενόχλησης από το ρεύμα του αέρα, όπως επίσης και του θορύβου που πιθανόν δημιουργούν οι εξαεριστήρες. Για τους λόγους αυτούς, το σύστημα δροσισμού με νυχτερινό αερισμό, κυρίως μηχανικό, ταιριάζει περισσότερο σε κτίρια που δεν λειτουργούν τη νύχτα, όπως τα κτίρια γραφείων, καταστημάτων ή τα σχολεία (Στο ίδιο).

8.4.2 Σύστημα άμεσου δροσισμού με εξάτμιση (*direct evaporative cooling*)

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στη μεγάλη απορρόφηση αισθητής θερμότητας που παρατηρείται κατά την εξάτμιση του νερού, την αλλαγή δηλαδή της φάσης του από υγρό σε ατμό (Κεφ. 5, παρ. 5.1.4). Ο εξωτερικός αέρας ψύχεται άμεσα με εξάτμιση νερού και κατόπιν εισάγεται στο κτίριο με φυσική ροή ή μηχανική υποβοήθηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απαγωγή θερμότητας από τον χώρο, με παράλληλη όμως αύξηση της εσωτερικής υγρασίας (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 136).

Το θεωρητικό όριο δροσισμού που μπορεί να επιτύχει το σύστημα είναι η θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα περιβάλλοντος, αφού το θερμόμετρο υγρού βολβού σημειώνει τη θερμοκρασία που προκύπτει από ελεύθερη εξάτμιση νερού. Στην πράξη, επειδή δεν επιτυγχάνεται η πλήρης ύγρανση του αέρα, η θερμοκρασία του αέρα είναι υψηλότερη από εκείνη του θερμόμετρου υγρού βολβού. Άλλωστε, η πλήρης ύγρανση του εισερχόμενου ρεύματος αέρα δεν είναι επιθυμητή, επειδή τα υψηλά ποσοστά υγρασίας μπορεί να δημιουργήσουν δυσάρεστη ατμόσφαιρα (Στο ίδιο).

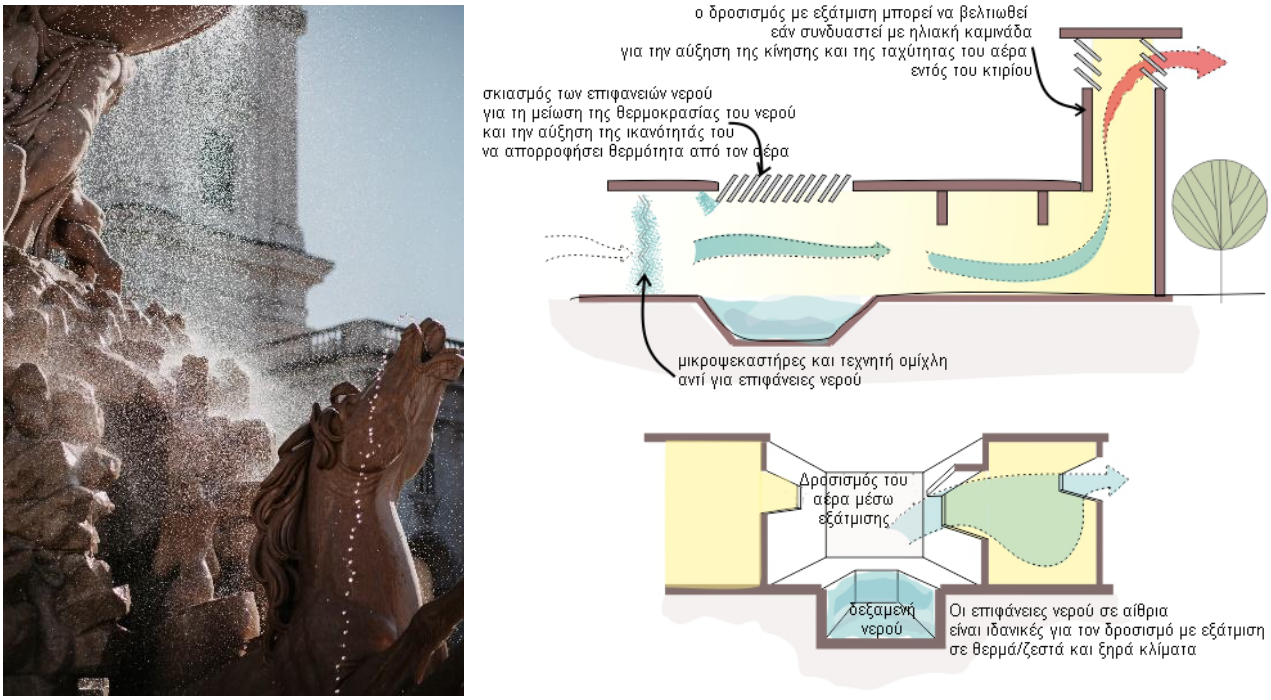
Τα κριτήρια, συνεπώς, για την ικανοποιητική εφαρμογή του συστήματος είναι δύο: η θερμοκρασία υγρού βολβού του εξωτερικού αέρα για το διάστημα που προβλέπεται η λειτουργία του συστήματος και η αντίστοιχη εσωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού, αφού μέσα από τη συσχέτιση των δύο θερμοκρασιών υπολογίζεται η δυνατότητα να δημιουργηθεί ικανοποιητικός δροσισμός (Εικόνα 8.18). Επιπλέον, μπορεί να εξεταστεί η περίπτωση χρήσης ανεμιστήρων στον εσωτερικό χώρο για να διευρυνθούν τα θερμικά όρια εφαρμογής του συστήματος (Στο ίδιο).



Εικόνα 8.18 *Άμεσος και έμμεσος δροσισμός με εξάτμιση. Επίδραση στις συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Πηγή: Psychrometric chart by © Dr. Andrew J. Marsh, 2020, CC BY-NC-SA 4.0.*

Η ύγρανση του εισερχόμενου αέρα μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη διέλευσή του πάνω από επιφάνειες νερού, μέσα από φυλλώματα χαμηλής φύτευσης ή διαμέσου πλέγματος ινών που διαβρέχονται. Καλύτερα παραδείγματα επιτυγχάνονται όταν η μάζα του νερού διασκορπάται σε σταγονίδια, όπως γίνεται στα σιντριβάνια ή με ειδικές συσκευές δημιουργίας νέφους νερού/τεχνητής ομίχλης (*micronisers*) (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 136).

Το σύστημα άμεσου εξατμιστικού δροσισμού μειονεκτεί κατά ότι είναι πολύ πιθανόν να δημιουργηθούν βλαπτικές συμπυκνώσεις υδρατμών στο εσωτερικό του κτιρίου όταν σημειωθεί πτώση της θερμοκρασίας. Αρνητικό στοιχείο είναι επίσης η ανάγκη κατανάλωσης νερού, το οποίο σε περιπτώσεις κλιματικά κατάλληλες για την εφαρμογή του συστήματος μπορεί να μην είναι διαθέσιμο (Στο ίδιο).



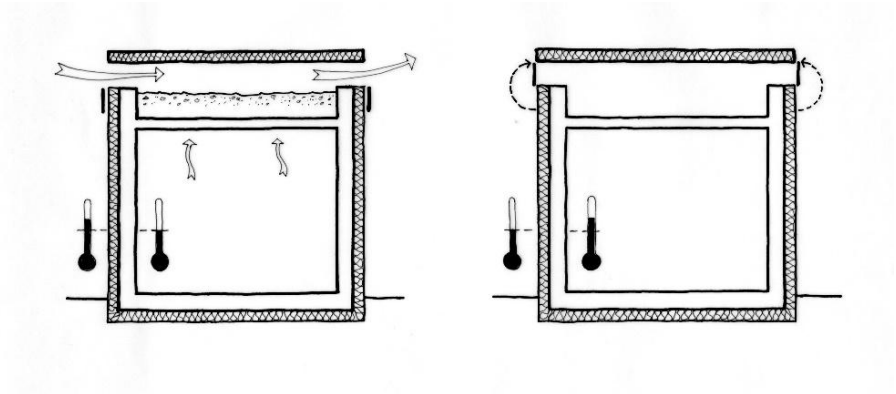
Εικόνα 8.19 *Άμεσος δροσισμός με εξάτμιση. Πηγές: Brown and white water fountain, Photo by Patrick Langwallner on Unsplash. και Evaporative Cooling via USAID PACE-D, U.S. Agency for International Development (USAID) Partnership to Advance Clean Energy-Deployment (PACE-D), Public Domain.*

8.4.3 Σύστημα έμμεσου δροσισμού με εξάτμιση (*indirect evaporative cooling*)

Τα συστήματα έμμεσου εξατμιστικού δροσισμού εκμεταλλεύονται την απαγωγή θερμότητας που παρατηρείται κατά την εξάτμιση του νερού για να ψυχθεί το κέλυφος του κτιρίου από έξω. Έτσι, παρακάμπτεται η ανάγκη να κυκλοφορήσει μέσα στο κτίριο αέρας που έχει υγρανθεί (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 136).

Οι πιο επιτυχημένες εφαρμογές έμμεσου δροσισμού με εξάτμιση αφορούν το δώμα του κτιρίου, τόσο επειδή το καλοκαίρι δέχεται μεγάλο ποσοστό των ηλιακών προσόδων όσο και για πρακτικούς λόγους: σε όλο ή μέρος του δώματος είναι εφικτό να κατασκευαστούν δεξαμενές νερού. Οι δεξαμενές δώματος (*roof ponds*) προσφέρουν δροσισμό εάν συντρέχουν δύο προϋποθέσεις: να σκιάζονται (Εικόνα 8.20), ώστε να μη θερμαίνονται από την ηλιακή ακτινοβολία, και να μην είναι θερμομονωμένη η πλάκα του δώματος για να υπάρχει θερμική επαφή/ροή θερμότητας δεξαμενής-πλάκας-εσωτερικού χώρου. Υπό τις προϋποθέσεις αυτές, η θερμοκρασία της δεξαμενής κυμαίνεται κοντά στη θερμοκρασία υγρού βολβού περιβάλλοντος, ενώ η κάτω επιφάνεια της πλάκας του δώματος λειτουργεί ως απορροφητής θερμότητας του εσωτερικού χώρου (Στο ίδιο).

Για τον σκιασμό της δεξαμενής έχουν προταθεί διάφορες λύσεις. Μία πρόταση θέλει την κατασκευή δεύτερης, ελαφριάς και θερμομονωμένης πλάκας επάνω από τη φέρουσα, με περιμετρικά ανοίγματα μεταξύ των πλακών. Το καλοκαίρι, τα ανοίγματα επιτρέπουν τη διείσδυση του αέρα και την ελεύθερη εξάτμιση νερού. Τον χειμώνα, το νερό αποστραγγίζεται και τα περιμετρικά ανοίγματα σφραγίζονται για να προκύψει δικέλυφη θερμομονωμένη στέγαση (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 137).



Εικόνα 8.20 *Σχηματική διάταξη λειτουργίας του έμμεσου δροσισμού με εξάτμιση. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*

Μια δεύτερη πρόταση χρησιμοποιεί θερμομονωτικές πλάκες που επιπλέουν σε λεπτό στρώμα νερού. Το καλοκαίρι, την ημέρα, οι θερμομονωτικές πλάκες αποτρέπουν τη θέρμανση του νερού. Τη νύχτα, αντλίες ψεκάζουν την επάνω επιφάνεια των θερμομονωτικών πλακών για να επιτύχουν ψύξη του νερού με εξάτμιση, μεταφορά και ακτινοβολία. Η πλάκα του δώματος ψύχεται λόγω της θερμικής επαφής με το νερό και λειτουργεί ως στοιχείο που δροσίζει τον εσωτερικό χώρο με μεταφορά και με ακτινοβολία. Τον χειμώνα, το νερό αποστραγγίζεται και η πλάκα αποκτά θερμομόνωση τύπου ανεστραμμένου δώματος (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 137).



Εικόνα 8.21. *Έμμεσος δροσισμός με εξάτμιση. Παραδείγματα.*
α. Περίπτερο Ηνωμένου Βασιλείου, Expo'92 Σεβίλλη, Ισπανία (Nicholas Grimshaw, 1992). Πηγή: British Pavilion Expo, Spain Powered by Graph Commons, CC BY-SA 4.0 International.
β. Εθνική Πινακοθήκη της Βικτώρια (National Gallery of Victoria), Μελβούρνη, Αυστραλία. Πηγή: The Water Wall, National Gallery of Victoria, Melbourne, Australia, 15 Aug. 2010 by Phillip Capper from Wellington, New Zealand via Wikimedia Commons, CC BY 2.0.

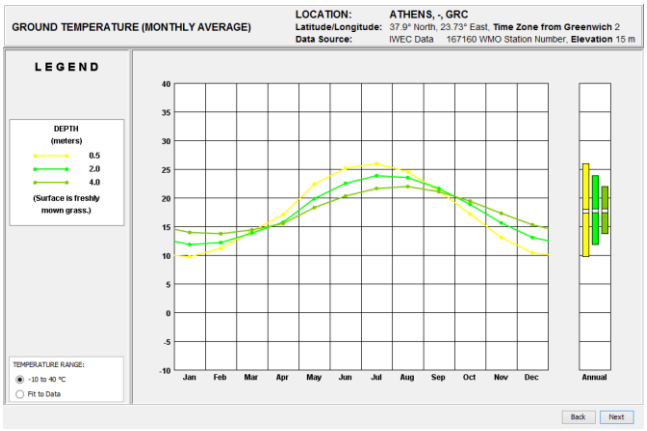
Πλεονέκτημα των συστημάτων έμμεσου δροσισμού με εξάτμιση, του τύπου της δεξαμενής δώματος, είναι ότι δεν εισάγουν στον χώρο αέρα που μεταφέρει υδρατμούς. Μειονέκτημά τους είναι ότι εξυπηρετούν μόνο τους χώρους κάτω από τη δεξαμενή, δηλαδή μονώροφα κτίρια ή τον άνω όροφο πολυώροφων κτιρίων. Επίσης, στα αρνητικά τους χρεώνονται η στατική επιβάρυνση του κτιρίου και ο κίνδυνος ζημιών από τη διαρροή νερού (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 138). Μια άλλη εφαρμογή έμμεσου δροσισμού με εξάτμιση είναι οι νερότοιχοι (Εικόνα 8.21), που είναι κατακόρυφες επιφάνειες του κτιρίου κατασκευασμένες από υλικά με μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (π.χ. σκυρόδεμα, γυαλί, χάλυβας), στην εξωτερική πλευρά των οποίων υπάρχει συνεχής ροή νερού, που παράγει δροσισμό της επιφάνειας (Οικονόμου, 2007, σ. 394).

8.4.4 Σύστημα άμεσου δροσισμού από το έδαφος

Το σύστημα βασίζει τη λειτουργία του στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του εδάφους σε μικρό βάθος κάτω από την επιφάνεια είναι το καλοκαίρι σημαντικά χαμηλότερη από τη θερμοκρασία αέρα του περιβάλλοντος (Εικόνα 8.22). Υπό αυτή τη συνθήκη, ένα στρώμα εδάφους που περιβάλλει το κέλυφος μπορεί να λειτουργήσει ως απορροφητής θερμότητας (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 138). Πρόκειται ουσιαστικά για υπόσκαφες ή ημιυπόσκαφες κατασκευές, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφ. 6, παρ. 6.4. Μελέτες έχουν δείξει πως η θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος περίπου ενός μέτρου είναι σχεδόν σταθερή και ίση με τον ετήσιο μέσο όρο της επιφανειακής θερμοκρασίας. Μικρές αποκλίσεις θερμοκρασιών εξαρτώνται από τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους, την κυκλοφορία νερού στη μάζα του και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειάς του (φύτευση, λευκάγεια, υγρασία) (Στο ίδιο).

Τύπος εδάφους	**πυκνότητα [kg/m^3]**	**συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [W/m.K]**	**ειδική θερμότητα [J/kg.K]**	**θερμική διάχυση [x10^{-6}.m^2.s^{-1}]**
Γρανίτης	2500-2700	2.8	1000	0,49-0,70
Ασβεστόλιθος	2000-2600	1.4 – 2.3	1000	0,80-1,83
Μάρμαρο	2800	3.5	1000	1,39
Ψαμμίτης	2600	2.3	1000	1,06-1,26
Άργιλος	1200-1800	1.5	1670-2500	0,139

Πίνακας 8.1 *Χαρακτηριστικοί δείκτες για υπολογισμό θερμοκρασιών διαφορετικών τύπων εδαφών. Πηγή: ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010 «Κλιματικά δεδομένα Ελληνικών πόλεων» και ΤΟΤΕΕ 20701-2/2017 «Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών».*



Εικόνα 8.22 *Διακύμανση θερμοκρασιών εδάφους σε διαφορετικό βάθος. Πηγή: Climate Consultant.*

Το εύρος της ετήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους σε διαφορετικά βάθη δίνεται από μετεωρολογικά δεδομένα. Για τον ελληνικό χώρο, οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν ως εξής: από την ετήσια μέση μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος αφαιρείται η αντίστοιχη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος, και η τιμή που προκύπτει διπλασιάζεται. Κατά προσέγγιση, το αποτέλεσμα μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το εύρος της ετήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους (ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010 & ΤΟΤΕΕ 20701-2/2017).

Η εφαρμογή του συστήματος δροσισμού από το έδαφος για άμεση απορρόφηση θερμότητας απαιτεί την κάλυψη τμήματος ή και όλου του κελύφους με χώμα. Τα τμήματα του κελύφους σε επαφή με το έδαφος δεν πρέπει να θερμομονώνονται για να διευκολυνθεί η διάχυση θερμότητας από το κτίριο προς το έδαφος με αγωγή. Ως εκ τούτου, πρέπει να ελεγχθεί ότι τον χειμώνα δεν θα παρατηρηθούν μεγάλες απώλειες θερμότητας προς το έδαφος ή να βρεθεί τρόπος για τον περιορισμό των απωλειών, π.χ. με τοποθέτηση κινητής μόνωσης. Επίσης, θα πρέπει να εξασφαλιστεί ο φυσικός φωτισμός και αερισμός των τμημάτων του κτιρίου που έχουν καλυφθεί με χώμα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 138).

8.4.5 Σύστημα έμμεσου δροσισμού από το έδαφος

Τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από την κάλυψη του κτιρίου με χώμα αποφεύγει το σύστημα έμμεσου δροσισμού από το έδαφος. Για να λειτουργήσει το σύστημα, θάβεται στο έδαφος ένα πλέγμα από σωλήνες (εναλλάκτες) (βλ. ενδεικτικά στην Εικόνα 8.23), μέσα στους οποίους διοχετεύεται με μηχανικό τρόπο αέρας (αβαθής γεωθερμία, βλ. Κεφ. 11, παρ. 11.4). Ο αέρας ψύχεται από την επαφή του με τα τοιχώματα των σωλήνων και μετά εισέρχεται στο κτίριο, το οποίο δεν είναι αναγκαίο πλέον να καλύπτεται από χώμα. Η απόδοση του συστήματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία του εδάφους, τα θερμικά χαρακτηριστικά των σωλήνων και του εδάφους, τη διάμετρο και το μήκος των σωλήνων, τη θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα και την ταχύτητά του μέσα στους σωλήνες (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 138).

Τα προβλήματα που παρουσιάζει το σύστημα είναι κυρίως τεχνικά, όπως το μεγάλο μήκος και, για κάποια συστήματα, η διάμετρος σωλήνων (της τάξης Φ20 εκ.) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, οι περιορισμένες δυνατότητες ελέγχου και συντήρησης του πλέγματος σωλήνων, η πιθανότητα να συμπυκνωθούν υδρατμοί μέσα στους σωλήνες, όπως και ο κίνδυνος δυσοσμίας από πιθανή ανάπτυξη μούχλας (Στο ίδιο).

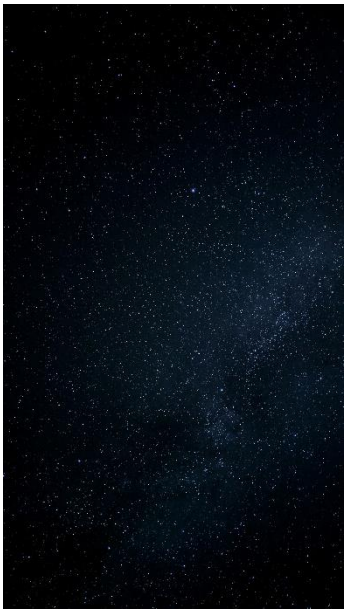


Εικόνα 8.23 *Έμμεσος δροσισμός από το έδαφος. Εναλλάκτες εδάφους. πηγή: 3-ton slinky loop by Mark Johnson (Marktj at English Wikipedia), via Wikimedia Commons. Public domain.*

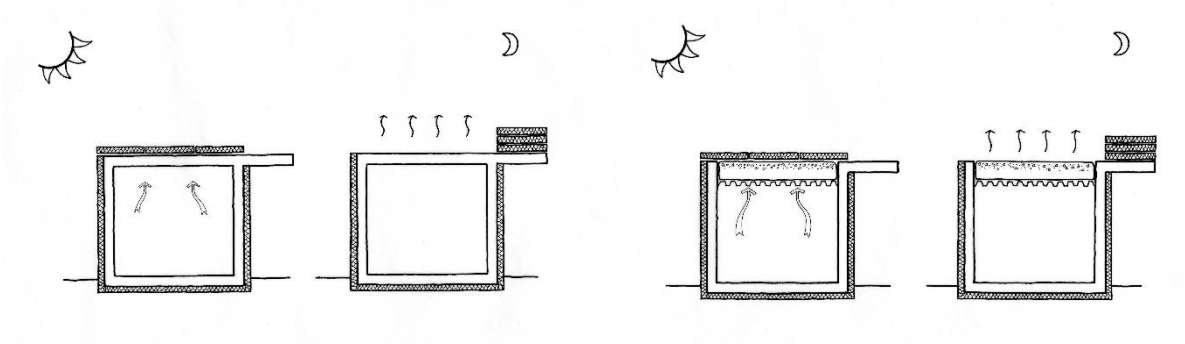
8.4.6 Σύστημα νυχτερινού δροσισμού με ακτινοβολία (*radiant/radiative cooling*)

Οι δομικές κατασκευές, σύμφωνα με τον φυσικό κανόνα που ισχύει για όλα τα σώματα, εκπέμπουν συνεχώς ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Για να ψυχθεί μια επιφάνεια λόγω αποβολής θερμότητας που πραγματοποιείται με εκπομπή ακτινοβολίας, πρέπει να αντικρίζει κάποια άλλη με σημαντικά χαμηλότερη θερμοκρασία. Στα κτίρια, η στέγαση είναι η επιφάνεια που έχει τη δυνατότητα να αντικρίζει απευθείας τον νυχτερινό ουρανό (Εικόνα 8.24), ο οποίος όταν δεν έχει σύννεφα αποτελεί το ψυχρότερο σώμα στο περιβάλλον προς το οποίο μπορεί να ακτινοβοληθεί θερμότητα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 139).

Για την εκμετάλλευση του φαινομένου της αποβολής θερμότητας τη νύχτα με ακτινοβολία, έχουν αναπτυχθεί διάφορες σχεδιαστικές παραλλαγές του συστήματος νυχτερινού δροσισμού με ακτινοβολία, οι οποίες ανήκουν σε δύο βασικές κατηγορίες: η μια χρησιμοποιεί βαρύ δώμα με κινητή θερμομόνωση ως πομπός θερμότητας, αλλά και ως στοιχείο αποθήκευσης δροσιάς, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιεί ελαφριά, συνήθως μεταλλική, επιφάνεια εκπομπής για να ψύξει τον αέρα (Στο ίδιο).



Εικόνα 8.24 *Νυχτερινός δροσισμός με ακτινοβολία. Πηγή: Blue sky during night time, Photo by Olena Sergienko on Unsplash.*

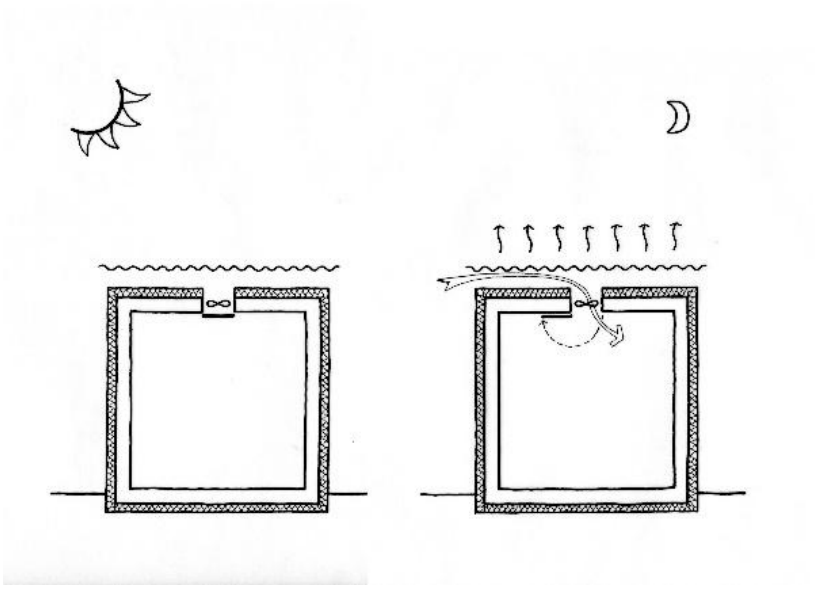


Εικόνα 8.25 *Σχηματική διάταξη λειτουργίας του νυχτερινού δροσισμού με ακτινοβολία την ημέρα και τη νύχτα.*
α. Περίπτωση βαρέος δώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).
β. Περίπτωση δώματος από σάκους με νερό επί επιπέδου δώματος μεταλλικής κατασκευής. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).

Εάν σε ένα βαρύ δώμα προσφερθεί η δυνατότητα ανεμπόδιστης έκθεσης σε νυχτερινό καθαρό ουρανό, η μεγάλη θερμική μάζα του δώματος θα ψυχθεί με εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, αλλά και με μεταφορά από τον ψυχρό αέρα του περιβάλλοντος (Εικόνα 8.25). Κατόπιν, στην περίπτωση κατά την οποία την ημέρα θερμομονωθεί η επιφάνεια του δώματος, για να αποτραπεί η θέρμανσή του από την ηλιακή ακτινοβολία και τον θερμό αέρα του περιβάλλοντος, η μάζα του δώματος μπορεί να λειτουργήσει ως απορροφητής θερμότητας του υποκείμενου/αποκάτω χώρου, αρκεί βέβαια να υπάρχει θερμική επαφή του δώματος με τον εσωτερικό χώρο. Για την εφαρμογή του συστήματος απαιτείται συνεπώς κινητή θερμομόνωση επάνω από το δώμα, που θα το προστατεύει την ημέρα και θα το αποκαλύπτει τη νύχτα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 139).

Μια πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα με κινητή θερμομόνωση από επάνω θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή του συστήματος, με την προϋπόθεση ότι θα επιλυθούν τα σοβαρά τεχνικά προβλήματα που παρουσιάζει η κινητή θερμομόνωση. Στην πράξη έχει εφαρμοστεί μια άλλη ιδέα, το σύστημα Skytherm® του Harold Hay, στο οποίο έγινε αναφορά στην ενότητα των παθητικών συστημάτων θέρμανσης (Κεφ. 7, παρ. 7.3.3). Επάνω σε επίπεδο δώμα με μεταλλική κατασκευή τοποθετούνται σάκοι με νερό, το οποίο αποτελεί τη θερμική μάζα του συστήματος. Τη νύχτα, όταν σύρεται η κινητή θερμομόνωση, το νερό ψύχεται σε χαμηλότερη στάθμη από εκείνη του αέρα περιβάλλοντος διά της αποβολής θερμότητας

με ακτινοβολία στον ουρανό. Για το διάστημα της νύχτας που η θερμοκρασία του νερού είναι υψηλότερη από εκείνη του αέρα περιβάλλοντος, απάγεται θερμότητα και με μεταφορά. Την ημέρα, όταν κλείσουν τα θερμομονωτικά φύλλα, το νερό απορροφά θερμότητα από τον εσωτερικό χώρο διαμέσου της μεταλλικής οροφής. Υπενθυμίζεται ότι η χειμερινή λειτουργία του συστήματος είναι αντίστροφη της καλοκαιρινής. Την ημέρα, η θερμομόνωση παραμένει ανοιχτή για να θερμανθεί το νερό από την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ το βράδυ κλείνει, έτσι ώστε να περιοριστούν οι θερμικές απώλειες και να διοχετευθεί η θερμότητα που συλλέχθηκε στον εσωτερικό χώρο (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 140).



Εικόνα 8.26 *Σχηματική διάταξη λειτουργίας του νυχτερινού δροσισμού με ακτινοβολία. Περίπτωση ελαφριάς μεταλλικής κατασκευής σε συνδυασμό με μηχανική κυκλοφορία του αέρα. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Η. Ζαχαρόπουλος).*

Μια άλλη παραλλαγή του συστήματος νυχτερινού δροσισμού με ακτινοβολία χρησιμοποιεί έναν ελαφρύ πομπό θερμότητας/ακτινοβολητή σε απόσταση πάνω από θερμομονωμένο δώμα (Εικόνα 8.26). Συνήθως, ο ακτινοβολητής αποτελείται από βαμμένη κυματοειδή λαμαρίνα. Επειδή η λαμαρίνα, όπως και όλα τα στιλβωμένα μέταλλα, είναι κακός πομπός θερμότητας (χαμηλός συντελεστής εκπομπής ε – Κεφ. 5, παρ. 5.2.3), πρέπει να είναι βαμμένη, ώστε η στρώση της βαφής να λειτουργήσει ως πομπός. Η θερμοκρασία της λαμαρίνας ισορροπεί σε στάθμη χαμηλότερη από εκείνη του αέρα περιβάλλοντος, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου κοντά στην επιφάνεια εκπομπής. Για να επιτευχθεί δροσισμός, προκαλείται μηχανική κυκλοφορία του αέρα στον χώρο ανάμεσα στη λαμαρίνα και στη θερμομονωτική στρώση του δώματος, που ακολούθως διοχετεύεται στο εσωτερικό του κτιρίου. Το ψυχρό ρεύμα αέρα δροσίζει τον εσωτερικό χώρο, αλλά και τη θερμική μάζα του κτιρίου, η οποία μπορεί να λειτουργήσει ως απορροφητής θερμότητας για την επόμενη ημέρα (Ευαγγελινός & Ζαχαρόπουλος, 2001, σ. 141).

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Akbari Hashem et al. (Eds) (1992). *Cooling Our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing.* Washington: U.S. Environmental Protection Agency. http://tinyurl.com/ye8cefxy

Brophy, V. & Owen Lewis, J. (2011). *A Green Vitruvius. Principles and practices of sustainable architectural design*. Earthscan.

Ford, B. (2012) Downdraught cooling: an overview of current research and practice. *Architectural Science Review*, *55* (4), 237-240. https://doi.org/10.1080/00038628.2012.724953

Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture*. Elsevier Publishing Company Ltd.

Givoni, B. (1994). *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. Van Nostrand Reinhold.

Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Van Nostrand Reinhold.

Goulding, J. R., Lewis, J. O. & Steemers, T. C. (1994*). Ενεργειακός Σχεδιασμός. Εισαγωγή για Αρχιτέκτονες*. Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy Conscious Design-A Primer for Architects].

Goulding, J. R., Lewis, J. O. & Steemers, T.C. (1996). *Ενέργεια στην Αρχιτεκτονική. Το Ευρωπαϊκό Εγχειρίδιο για τα Παθητικά Ηλιακά Κτίρια.* Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook].

Kamal, M. A. (2012). An overview of passive cooling techniques in buildings: Design concepts and architectural interventions. *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*. *55*. 84-97. Available from: https://www.researchgate.net/publication/312432251_An_overview_of_passive_cooling_techniques_in_buildings_Design_concepts_and_architectural_interventions [accessed Dec 08 2021].

Markus, T. A. & Morris, E. N. (1980). *Buildings, Climate and Energy*. Pitman Publishing Ltd.

Olgyay, V. & Olgyay, A. (1963). *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.

Santamouris, M. & Asimakopoulos, D. (Eds) (1996). *Passive Cooling of Buildings*. James & James Science Publishers Ltd.

Stack, A., Goulding, J. & Lewis, J.O. (2002). *Shading Systems. Solar Shading for the European climates*. European Commission, Directorate-General Energy & Transport. Retrieved from: https://www.buildup.eu/sites/default/files/content/EurCommOnSolarShading.pdf

Sustainable Building Design at Autodesk Sustainable Building Design (2018, April 18). *Stack Ventilation and Bernoulli's Principle Part-1.* https://knowledge.autodesk.com/support/revit/getting-started/caas/simplecontent/content/stack-ventilation-and-bernoullis-principle-part-1.html

Szokolay, S. V. (1980). *Environmental Science Handbook for Architects and Builders*. The Construction Press.

Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, Ε. (2017) *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός. Κλιματική αλλαγή, Περιβάλλον, Βιωσιμότητα*. University Studio Press.

Ευαγγελινός, Ε. & Ζαχαρόπουλος, Η. (2001). Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό. Στο Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου* (σσ. 21-154). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Οικονόμου, Α. (2002). *Χρήση συστημάτων δροσισμού με εξάτμιση και με ακτινοβολία για τη βελτίωση του μικροκλίματος σε υπαίθριους χώρους και σε κτίρια* [Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ].

Οικονόμου, Α. (2007). Χρήση συστημάτων δροσισμού με εξάτμιση και με ακτινοβολία για τη βελτίωση του μικροκλίματος σε υπαίθριους χώρους και σε κτίρια. Γ. Μαρνελάκης (Επιμ.). *Έρευνα στην Αρχιτεκτονική. Σχεδιασμός-Χώρος-Πολιτισμός*. Εκδόσεις Αλεξάνδρεια.

Παπαδόπουλος, Μ. & Αξαρλή, Κ. (1995). *Ενεργειακός Σχεδιασμός & Παθητικά Ηλιακά Συστήματα Κτιρίων. Δομική Φυσική ΙΙ*. Εκδοτικός Οίκος Αδερφών Κυριακίδη ΑΕ.

Κεφάλαιο 9

Φυσικός φωτισμός

Σύνοψη
Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στον φυσικό φωτισμό, που αποτελεί σημαντική παράμετρο του βιοκλιματικού σχεδιασμού και μπορεί να συμβάλει στην εξοικονόμηση συμβατικής ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ανάλογα δε με το είδος και τη χρήση του κτιρίου, αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να είναι σημαντική. Ο σχεδιασμός του φυσικού φωτισμού σχετίζεται πρωτίστως με τα ανοίγματα του κτιρίου, την επιφάνεια, τη θέση, τον σχεδιασμό και την κατασκευή τους, καθώς και με το σχήμα του κτιρίου, τον προσανατολισμό του, τη διάταξη των εσωτερικών χώρων του κτιρίου, αλλά και του άμεσου περιβάλλοντος χώρου. Αρχικά, αναλύονται τα διαφορετικά στοιχεία φυσικού φωτισμού, με έμφαση στα ανοίγματα που αποτελούν και την κύρια είσοδο του φυσικού φωτός και της ηλιακής ακτινοβολίας στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα συστήματα ρύθμισης του φυσικού φωτισμού. Τέλος, γίνεται αναφορά σε εξελιγμένα συστήματα φυσικού φωτισμού, όπως είναι οι καινοτόμοι υαλοπίνακες, τα ηλιακά ράφια –light shelves– κ.λπ.

Προαπαιτούμενη γνώση
Το ζήτημα του φυσικού φωτισμού αναλύεται με πληρότητα στο σύγγραμμα Κάλλιπος του Α. Τσαγκρασούλη (2015), Φυσικός Φωτισμός. Τα βασικά στοιχεία της φυσικής του φωτός και των μεγεθών που σχετίζονται με αυτά περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3 του παρόντος συγγράμματος.

9.1 Εισαγωγικές παρατηρήσεις

Η μελέτη του φυσικού φωτισμού κτιρίων πραγματεύεται όλα εκείνα τα ζητήματα που σχετίζονται με το φυσικό φως. Αναφέρεται στον σχεδιασμό και τη διαχείριση των στοιχείων εκείνων που αποσκοπούν στην αξιοποίησή του για τη βελτίωση της οπτικής άνεσης στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων και στην εξοικονόμηση συμβατικής ενέργειας για φωτισμό, που επιτυγχάνεται με τον περιορισμό της χρήσης του τεχνητού φωτισμού. Η μελέτη φυσικού φωτισμού εντάσσεται στα πλαίσιο του βιοκλιματικού σχεδιασμού.

Σε ένα κτίριο, ο φυσικός φωτισμός παρέχεται από τα ανοίγματα (διαφανείς ή ημιδιαφανείς επιφάνειες), ενώ εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους που σχετίζονται τόσο με τον σχεδιασμό τους όσο και με τον σχεδιασμό των εσωτερικών χώρων του κτιρίου, του άμεσου περιβάλλοντος χώρου του, αλλά και της εν γένει χωροθέτησής του, ως προς το ανάγλυφο του εδάφους, τη θέση εντός ή εκτός του αστικού ιστού, τα χαρακτηριστικά του εδάφους ή του φυσικού περιβάλλοντος κ.ο.κ.

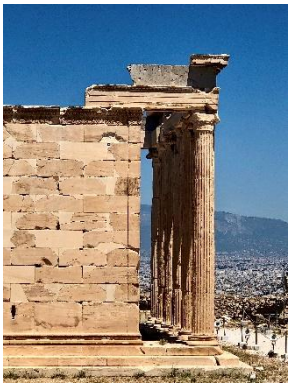
Οι στρατηγικές που περιγράφονται αφορούν πρωτίστως τα ανοίγματα και τα χαρακτηριστικά τους, το κέλυφος και τη διαμόρφωση των εσωτερικών χώρων του κτιρίου, καθώς και συστήματα ρύθμισης και αξιοποίησης, από τα πιο απλά και συμβατικά μέχρι τα πιο σύγχρονα κι εξελιγμένα. Ο συνδυασμός των παραπάνω και η ενσωμάτωσή τους στον σχεδιασμό των κτιρίων έχει στόχο, ανάλογα πάντα με τη χρήση τους, την επίτευξη συνθηκών οπτικής άνεσης με μικρή κατανάλωση ενέργειας κατά το μεγαλύτερο διάστημα του έτους. Ο συσχετισμός του φυσικού φωτός με την οπτική άνεση αξιολογείται (βλ. Κεφ. 4, παρ. 4.3), από τον τρόπο με τον οποίο ένας χώρος (κυρίως εσωτερικός) γίνεται εύκολα αντιληπτός, και συγχρόνως συμβάλλει και στην αίσθηση προσανατολισμού, ασφάλειας και ευζωίας. Έτσι, για παράδειγμα, σε εργασιακούς χώρους, ο σωστός φωτισμός και ειδικά στο επίπεδο εργασίας (*working plane*) είναι καθοριστικός παράγοντας για τη βελτίωση της παραγωγικότητας και της γενικής άνεσης και υγείας των εργαζομένων. Αυτό επιτυγχάνεται με

φυσικό φωτισμό ή τεχνητό φωτισμό, ή με συνδυασμό και των δύο. Σε κάθε περίπτωση, η αξιοποίηση του φυσικού φωτός με τον κατάλληλο σχεδιασμό δημιουργεί πιο άνετο, αλλά και ευχάριστο περιβάλλον διότι περιέχει όλα τα χρώματα του φάσματος και βέβαια συμβάλλει στην εξοικονόμηση της ενέργειας που απαιτείται για τον τεχνητό φωτισμό (Μερέση, 2010).

Τέλος, έρευνες έχουν δείξει ότι ο οργανισμός χρησιμοποιεί τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και κυρίως τον φωτισμό για να επαναρρυθμίσει τους κύκλους των περιοδικών του λειτουργιών ώστε να έχουν 24ωρη διάρκεια, όπως αυτοί της ημέρας (κιρκαδιανός ρυθμός). Η έκθεση σε υψηλές τιμές φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας βελτιώνει τη διάρκεια και την ποιότητα του ύπνου και μειώνει τα συμπτώματα της εποχιακής κατάθλιψης. Οι εργαζόμενοι σε γραφεία με αρκετό φυσικό φως είναι αποδοτικότεροι σε σχέση με συναδέλφους τους σε γραφεία με λίγο φυσικό φως, γεγονός που πιθανόν σχετίζεται με τους κιρκαδιανούς ρυθμούς (Boyce et al., 2003· Μερέση, 2010)

9.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Τα ζητήματα φωτισμού συνδέονταν για αιώνες με την ανάγκη να βλέπει κανείς τη νύχτα, όταν δεν υπήρχε διαθέσιμο φυσικό φως, ενώ όλες οι δραστηριότητες λάμβαναν χώρα στην ύπαιθρο ή σε εσωτερικούς, καλά φωτιζόμενους χώρους. Εξαίρεση αποτελούσαν τα θρησκευτικά και τελετουργικά κτίρια, όπου ο σχεδιασμός με βάση τον ήλιο και το φως γινόταν, από τα πρώτα κιόλας χρόνια, συνειδητά (Baker et al., 1993, σ. 1.1) (Εικόνα 9.1).

α.  β.  γ. 

Εικόνα 9.1 *Φυσικός φωτισμός σε μνημεία της Αρχαιότητας. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου). α., β. Παιχνίδι φωτός και σκιάς στην Ακρόπολη και γ. Οι ακτίνες του ήλιου όπως εισέρχονται από τη φωτιστική οπή (oculus) του Πάνθεου στη Ρώμη.*

Το γυαλί εμφανίζεται πρώτη φορά κατά τη Ρωμαϊκή περίοδο, για θερμική προστασία και όχι για λόγους διακόσμησης (Baker et al., 1993, σ. 1.1 και Velo-Gala & Garriguet Mata, 2017). Κατά τον Μεσαίωνα, τα ανοίγματα δεν είχαν τζάμι και η βασική τους λειτουργία ήταν ο ο φωτισμός, ο αερισμός και η βελτίωση της ποιότητας του αέρα από τις εκπομπές ρύπων λόγω των ανοιχτών τζακιών (φωτιάς), τα οποία προσέφεραν θέρμανση, κυρίως μέσω ακτινοβολίας (Στο ίδιο, σ. 1.2). Οι Baker et al. (2003, σ. 1.2) αναφέρουν χαρακτηριστικά ότι η ετυμολογία της αγγλικής λέξης «window» είναι από τις λέξεις «wind» και «eye» και έχει άμεση σχέση με τον αερισμό και την υγιεινή και όχι με τον ήλιο και το φως. Τα ανοίγματα είχαν παντζούρια χωρίς γυαλί, με αποτέλεσμα να υπάρχουν υψηλές απώλειες θερμότητας από διείσδυση (*infiltration*). Ωστόσο, όπως και στις προηγούμενες ιστορικές περιόδους, στα θρησκευτικά κτίρια, ο φυσικός φωτισμός εξακολουθεί να παίζει σημαντικό ρόλο, με τα βιτρώ να έχουν ευρύτατη χρήση στους καθεδρικούς ναούς από τον 12ο αιώνα (Στο ίδιο, σ. 1.2).

Κατά την προβιομηχανική περίοδο, η έμφαση δινόταν στην προστασία από τις καιρικές συνθήκες και όχι στον φυσικό φωτισμό. Οι δραστηριότητες στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων δεν είχαν αυξημένες

απαιτήσεις για φωτισμό (Baker et al., 1993, σ. 1.1). Παρ' όλα αυτά, η αλλαγή στα κατασκευαστικά συστήματα και η επικράτηση ξυλόπηκτων (τσατμάς) και ξυλόπλεκτων (μπαγδατί) τοιχοποιιών στους ανώτερους ορόφους επέτρεψε τη δημιουργία πολλών και μεγαλύτερων ανοιγμάτων (Baker et al., 1993, σ. 1.3) στις παραδοσιακές κατοικίες της Οθωμανικής περιόδου (Εικόνα 9.2.α) που εμφανίζονται στη Μικρά Ασία και στα Βαλκάνια κατά τον 18ο και τον 19ο αιώνα. Στην τοπική και παραδοσιακή αρχιτεκτονική σε περιοχές του πλανήτη με αυξημένα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας και κυρίαρχα θερμό ή ζεστό και υγρό κλίμα, παρατηρούνται στοιχεία όπως μεγάλες προεξοχές της στέγης, διάτρητο ελαφρύ κέλυφος (τοίχοι/πετάσματα) και καφασωτά στα ανοίγματα (*mashrabiya*) (Εικόνα 9.2.β), τα οποία στοχεύουν στη ρύθμιση του εισερχόμενου φωτός, στη μείωση της θάμβωσης και στην ταυτόχρονη παροχή φυσικού αερισμού (Baker & Steemers, 2002, σ. 6). Από την άλλη μεριά, σε περιοχές με κυρίαρχα θερμό ή ζεστό και ξηρό κλίμα, η ρύθμιση της ηλιακής ακτινοβολίας και του φυσικού φωτός επιτυγχάνεται με τη συμπαγή μορφή των οικισμών με κυρίαρχα στενούς δρόμους, τη συμπαγή μορφή των κατοικιών με λίγα και μικρά ανοίγματα και την επικράτηση του στοιχείου του αιθρίου (*courtyard houses*) (Εικόνα 9.2.γ) (Στο ίδιο, σ. 7).



Εικόνα 9.2 *Στοιχεία στην κατά τόπους παραδοσιακή αρχιτεκτονική που σχετίζονται με τον φυσικό φωτισμό.*
α. Παράθυρα και φεγγίτες στον «καλό» οντά του Αρχοντικού της Πούλκως (Πουλκίδη) στη Σιάτιστα (18ος αι.) και Παράθυρο σε οντά του Αρχοντικού Σκούταρη στην Καστοριά (18ος αι., μετασκευή 19ος αι.). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Αιν. Οικονόμου) με παραχώρηση.
β. Καφασωτά (musharabiya) στην παραδοσιακή κατοικία Bayt Al-Suhaymi του 17ου αιώνα στο Κάιρο της Αιγύπτου. Πηγή: Mashrabiya- Bayt Al-Suhaymi - Cairo – Egypt, by Ahmed Al.Badawy from Cairo, Egypt, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 2.0
γ. Αίθριο στο Τζαμί Ben Youssef, Marrakesh, Μαρόκο. Πηγή: Ben Youssef Mosque, Marrakesh, Marokko, Photo by Kees Kortmulder on Unsplash.

Σταθμό στην ιστορία των ανοιγμάτων αποτέλεσαν η ανακάλυψη και η γενίκευση της χρήσης του γυαλιού και των υαλοπινάκων. Ιδιαίτερα στα ψυχρότερα κλίματα, το γυαλί συνέβαλε στον καλύτερο φωτισμό των χώρων, με ταυτόχρονη προστασία από το ψύχος (Baker et al., 1993, σ. 1.1), με αφετηρία τις καλλιέργειες (*horticulture*) σε θερμοκήπια (Εικόνα 9.3.α), ενώ η τεχνολογία αυτή επεκτάθηκε σε κτίρια, όπως σταθμοί τρένου, βιβλιοθήκες και εμπορικές στοές (*galleries*) (Εικόνα 9.3.β) (Στο ίδιο, σ. 1.4).

α.  β. 

Εικόνα 9.3 *Εκτεταμένη χρήση του γυαλιού σε κτίρια του 19ου αιώνα.*
α. Βασιλικά Θερμοκήπια του Laeken, Βρυξέλλες, Βέλγιο (1880). Πηγή: Royal Greenhouses of Laeken, Brussels, Belgium, Photo by Alex Vasey on Unsplash.
β. Galleria Vittorio Emanuele II, Μιλάνο, Ιταλία (1877). Πηγή: Low angle view Galleria Vittorio Emanuele II shoping mall, Photo by Paolo Conversano on Unsplash.

Από τη Βιομηχανική Επανάσταση κι έπειτα, η ζωή, η εργασία και οι δραστηριότητες των ανθρώπων μεταφέρθηκαν σε κλειστούς χώρους και βασίζονταν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό στον τεχνητό φωτισμό (Baker et al., 1993, σ. 1.1). Μεγάλη μερίδα του πληθυσμού μετακινήθηκε από την ύπαιθρο στις πόλεις και ξεκίνησε να εργάζεται σε κτίρια. Έως την ανακάλυψη και τη γενικευμένη χρήση του ηλεκτρικού λαμπτήρα (τέλος 19ου αι.), τα κτίρια βασίζονταν στον φυσικό φωτισμό, με αποτέλεσμα να έχουν ρηχή κάτοψη (Η = περ. 2 x Βάθος), με στόχο την κατά το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού με πλευρικά ανοίγματα. Τα βιοτεχνικά ή βιομηχανικά κτίρια, που είχαν βαθιά κάτοψη εξαιτίας της λειτουργίας τους, ήταν αναγκαστικά μονώροφα για να μπορούν να φωτίζονται από την οροφή (Στο ίδιο, σ. 1.5), η οποία σε πολλές περιπτώσεις ήταν πριονωτή (*saw tooth roof*) (Εικόνα 9.4.α). Σε πολυώροφα κτίρια με βαθιά κάτοψη εισάγονται στον σχεδιασμό φωταγωγοί και στοιχεία, των οποίων η μορφή αποτελεί πρόδρομο των σύγχρονων αιθρίων (Εικόνα 9.4.β) (Στο ίδιο, σ. 1.5).

α.  β. 

Εικόνα 9.4 *Σχεδιασμός βιοτεχνικών ή βιομηχανικών κτιρίων.*
α Παράδειγμα κτιρίου με πριονωτή οροφή (shaw tooth roof). Πηγή: Ett sågtandat tak by Holger.Ellgaard via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
β. Larkin Administration Building, Buffalo, NY, ΗΠΑ (Frank Lloyd Wright, 1903). Πηγή: Larkin Administration Building / Frank Lloyd Wright / Buffalo, New York / 1904-06 by Hooked On The Past David Romero via Flickr, CC BY-NC-SA 2.0.

Στην ιστορία του φυσικού φωτισμού, ξεχωριστή θέση και σημασία κατέχουν τα κτίρια τέχνης και τα μουσεία. Από τον 18ο αιώνα κι έπειτα, τα κτίρια αυτά διέθεταν φεγγίτες οροφής, με στόχο την παροχή ομοιόμορφου φωτισμού σε όλους τους τοίχους, στους οποίους ήταν αναρτημένα τα έργα τέχνης (Εικόνα 9.5.α), τη μείωση της θάμβωσης και τη βελτίωση της θέασης (Baker et al., 1993, σ. 1.7). Στα μέσα του 20ού αιώνα, έγινε κατανοητή η αντιφατική σχέση του φωτισμού σε σχέση με τα έργα τέχνης: από τη μια μεριά ήταν απαραίτητος για τη θέαση και τη σωστή αντίληψη των λεπτομερειών, ενώ από την άλλη έπρεπε να ελαχιστοποιείται η έκθεση στην υπεριώδη (UV) ακτινοβολία που προκαλεί αλλοιώσεις. Το γεγονός αυτό οδήγησε στη σχεδόν αποκλειστική χρήση τεχνητού φωτισμού. Στις μέρες μας, υπάρχει διαβάθμιση, με τα ευαίσθητα έργα τέχνης (π.χ. ταπετσαρίες και υδατοχρώματα) να εκτίθενται σε συνθήκες απολύτως ελεγχόμενου τεχνητού φωτισμού, ενώ τα γλυπτά και τα έργα τέχνης χωρίς ευαισθησία και ανάγκη προστασίας να εκτίθενται σε χώρους με φυσικό φωτισμό από φεγγίτες οροφής ή/και πλευρικά ανοίγματα (Εικόνα 9.5.β) (Στο ίδιο, σ. 1.8).



Εικόνα 9.5 *Φυσικός φωτισμός σε μουσεία και κτίρια τέχνης.*
α. Sir John Soanes Museum, Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο. Πηγή: Soane museum gallery by Acroterion, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
β. Louisiana Museum of Modern Art, Κοπεγχάγη, Δανία. Πηγή: Louisiana Museum of Modern Art by Maria Eklind via Flickr, CC BY-NC-SA 2.0.

Στα μέσα του 20ού αιώνα, η ανάπτυξη των ηλεκτρολογικών και μηχανολογικών συστημάτων και εγκαταστάσεων αποσύνδεσε τον ηλιασμό, τον φωτισμό και τον αερισμό των κτιρίων από τα ανοίγματα. Το κτιριακό κέλυφος παύει να λειτουργεί ως φίλτρο ανάμεσα στο εσωτερικό των κτιρίων και το εξωτερικό περιβάλλον και μετατρέπεται σε φράγμα/όριο που απομονώνει τους τεχνητά φωτιζόμενους, θερμαινόμενους και αεριζόμενους εσωτερικούς χώρους. Ταυτόχρονα, στα γυάλινα κτίρια εφαρμόζονται έγχρωμοι ή ανακλαστικοί υαλοπίνακες, με στόχο τη μείωση των θερμικών προσόδων κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου. Τα φωτιστικά φθορισμού, που είχαν σχεδόν τετραπλάσια απόδοση, σημαντικά μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση και συμβολή στα εσωτερικά κέρδη σε σχέση με τους λαμπτήρες πυράκτωσης, έδωσαν το άλλοθι στους μελετητές να εγκαταλείψουν τον φυσικό φωτισμό (Baker et al., 1993, σ. 1.15), η συζήτηση για τον οποίο επανήλθε δυναμικά στο προσκήνιο περί το τέλος του 20ού αιώνα. Αυτό συνέβη γιατί ο τεχνητός φωτισμός συνδέθηκε με την κατανάλωση συμβατικής ενέργειας, και άρα με τα κυρίαρχα παγκόσμια περιβαλλοντικά προβλήματα, δηλαδή την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και τις εκπομπές αέριων ρύπων, με κυρίαρχες αυτές του διοξειδίου του άνθρακα και των αερίων του θερμοκηπίου.

Η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας, σε συνδυασμό με αισθητικές και αρχιτεκτονικές παραμέτρους, αλλά και με τις αρνητικές συνέπειες της έλλειψης φυσικού φωτισμού στη φυσιολογία και την ψυχολογία των ανθρώπων, κατέστησαν τον σχεδιασμό και την εκτίμησή του σημαντικές παραμέτρους για τον σχεδιασμό των κτιρίων (Baker et al., 1993, σ. 1.1). Η διαθεσιμότητα του φυσικού φωτός εξαρτάται πρωτίστως από τη γεωγραφική θέση του κτιρίου (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος και υψόμετρο), το κλίμα και τα χαρακτηριστικά του οικοπέδου. Ωστόσο, ο φυσικός φωτισμός δεν αποτελεί απλώς ένα ποσοτικό μέγεθος, καθώς διαθέτει και ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως η μεταβλητότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά και του έτους, η φασματική κατανομή, και η οπτική επαφή και η θέα, που είναι στοιχεία εξίσου σημαντικά και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη (Baker & Steemers, 2002, σ. 38).

9.3 Στοιχεία φυσικού φωτισμού

Ο σχεδιασμός του φυσικού φωτισμού (*daylighting design*) αφορά την αξιολόγηση του φωτισμού που προέρχεται από φυσικές πηγές (τον ήλιο και τον ουρανό) σε ένα συγκεκριμένο σημείο αναφοράς. Πέρα από την καθαρά γεωμετρική σχέση που υπάρχει ανάμεσα στην πηγή και το σημείο, ο φυσικός φωτισμός εξαρτάται από την ίδια τη φωτεινότητα της πηγής. Έτσι, η φωτεινότητά του ουρανού διαφέρει βάσει μετεωρολογικών, εποχιακών και γεωμετρικών παραμέτρων που δύσκολα κωδικοποιούνται (Baker et al., 1993, σ. 2.1).

Τα αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά στοιχεία που μπορούν να αξιοποιηθούν στον σχεδιασμό του φυσικού φωτισμού είναι: (Baker et al., 1993, σ. 5.1):

- **Στοιχεία αγωγής** (*conduction components*): Είναι οι χώροι που κατευθύνουν ή/και διανέμουν το φως προς το εσωτερικό του κτιρίου.
- **Στοιχεία εισόδου** (*pass-through components*): Είναι τα στοιχεία διαμέσου των οποίων διέρχεται το φυσικό φως, με σημαντικότερα τα ανοίγματα.
- **Στοιχεία ελέγχου/ρύθμισης** (*control components*): Είναι οι διατάξεις που επιτρέπουν ή/και ελέγχουν ή ακόμα και αποτρέπουν την είσοδο του φωτός στους χώρους του κτιρίου.

Σε κάθε κτίριο, η ενσωμάτωση ενός ή περισσότερων από τα παραπάνω στοιχεία εξαρτάται πρωτίστως από τη χρήση και τον σχεδιασμό του, ενώ η απόδοσή τους σε σχέση με τον φυσικό φωτισμό εξαρτάται από παραμέτρους που αφορούν τα γεωμορφολογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά του οικοπέδου, τον προσανατολισμό και τα εξωτερικά εμπόδια που εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φυσικού και του δομημένου περιβάλλοντος (Ander, 1995, σσ. 5-6).

Η παρουσίαση των στοιχείων φυσικού φωτισμού γίνεται στις παραγράφους που ακολουθούν, ξεκινώντας από τα ανοίγματα που αποτελούν το πιο κοινό, αλλά και το σημαντικότερο εργαλείο του φυσικού φωτισμού.

9.4 Σχεδιασμός ανοιγμάτων

9.4.1 Γενικά στοιχεία

Όπως προαναφέρθηκε (Κεφ. 3, παρ. 3.1.3), τα ανοίγματα του κτιρίου και ειδικότερα τα κουφώματά τους αποτελούν το κύριο σημείο εισόδου της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του, ενώ η ποσότητα που εισέρχεται τελικά εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων που παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια (εμβαδόν υαλοπίνακα, στοιχεία εσωτερικού ή και εξωτερικού σκιασμού, είδος και πολλαπλότητα υαλοπινάκων κ.λπ.). Τα ανοίγματα και κατ' επέκταση τα κουφώματά τους αποτελούν δομικά μέλη και εξαρτήματα αντίστοιχα των κτιρίων, τα οποία, πέρα από τον φυσικό φωτισμό, πρέπει να ικανοποιούν και μια σειρά από άλλες απαιτήσεις, ενώ η μορφή τους επηρεάζεται και από άλλα ζητήματα (Majoros, 1998, σ. 16), όπως είναι η λειτουργία και ο σχεδιασμός του κτιρίου, η θέση του (εντός ή εκτός αστικού ιστού), η θέα και περιβαλλοντικοί παράγοντες (ηλιασμός, αερισμός κ.λπ.). Ως προς τον φυσικό φωτισμό, τα κουφώματα χαρακτηρίζονται από μια σειρά ιδιοτήτων, που είναι (Majoros, 1998, σ. 16):

- η θέση,
- οι ονομαστικές διαστάσεις τους,
- η κλίση,
- ο προσανατολισμός,
- η διαπερατότητα (είδος και πολλαπλότητα υαλοπίνακων),
- η κατανομή του φωτός στον χώρο,
- η αποδοτικότητα και
- η γήρανση/η επίδραση του χρόνου.

Πέρα από τα παραπάνω, πρωταρχικός ρόλος των κουφωμάτων είναι η παροχή θέας και οπτικής σύνδεσης των εσωτερικών χώρων με το εξωτερικό περιβάλλον (Στο ίδιο). Σε σχέση με τον βιοκλιματικό σχεδιασμό και ανάλογα με την κλίση και τον προσανατολισμό τους, τα ανοίγματα μπορούν να συμβάλλουν τον χειμώνα στην παθητική ηλιακή θέρμανση (Κεφ. 7) και το καλοκαίρι στον φυσικό αερισμό και παθητικό δροσισμό (Κεφ. 8), ενώ κατά περίπτωση θα πρέπει να σκιάζονται για την αποφυγή της υπερθέρμανσης. Ως προς τον φυσικό

φωτισμό, τα νότια παράθυρα παρέχουν υψηλά επίπεδα και σχετικά μεταβλητό φωτισμό. Τα ανατολικά και τα δυτικά ανοίγματα παρέχουν μέτρια επίπεδα φυσικού φωτισμού με εντάσεις νωρίς το πρωί και κατά τη δύση του ηλίου και αρκετά μεταβλητό φωτισμό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τέλος, τα βόρεια παράθυρα παρέχουν χαμηλά επίπεδα φυσικού φωτισμού, αλλά συνεχή και σταθερό φωτισμό σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Αντίστοιχα, ως προς τις ηλιακές προσόδους, στα νότια ανοίγματα αυτές είναι υψηλές κατά τους χειμερινούς μήνες και μέτριες κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, τα ανατολικά και τα δυτικά ανοίγματα χαρακτηρίζονται από χαμηλές ηλιακές προσόδους κατά τους χειμερινούς μήνες και υψηλές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ, τέλος, τα βόρεια ανοίγματα έχουν χαμηλές ηλιακές προσόδους σε όλη τη διάρκεια του έτους (Baker et al., 1993, σ. 5.8).

Ο φυσικός φωτισμός που παρέχουν τα κουφώματα επηρεάζεται και από την κατασκευή τους, η οποία περιλαμβάνει την κάσα, το πλαίσιο και τον υαλοπίνακα. Το πλαίσιο μπορεί να είναι από ξύλο, από μέταλλο (αλουμίνιο ή χάλυβα, με ή χωρίς θερμοδιακοπή) ή συνθετικά υλικά (PVC). Το υλικό κατασκευής καθορίζει τη διάσταση διατομής των επιμέρους στοιχείων και, κατά συνέπεια, τα καθαρά ποσοστά του πλαισίου και της υάλωσης από όπου εισέρχεται το φυσικό φως. Οι υαλοπίνακες μπορεί να είναι μονοί ή πολλαπλοί (με αέρα ή ευγενή αέρια –αργό ή κρυπτό– στο διάκενο), από απλό γυαλί ή από άλλα διαφανή ή ημιδιαφανή υλικά, ή από εξελιγμένους υαλοπίνακες (βλ. παρακάτω παρ. 9.7.1). Η πολλαπλότητα και το είδος των υαλοπινάκων επηρεάζουν τη διαπερατότητά τους και, άρα, τη διερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και το διερχόμενο φυσικό φως. Ως προς τον βιοκλιματικό σχεδιασμό, τα υλικά κατασκευής των ανοιγμάτων επηρεάζουν κυρίως τον συνολικό συντελεστή θερμοπερατότητάς τους (U-value), αλλά και την ανεμοστεγανότητά τους (από διείσδυση – infiltration) που σχετίζονται με τη συμμετοχή τους στη μετάδοση θερμότητας (με αγωγή, μεταφορά και ακτινοβολία) τον χειμώνα και το καλοκαίρι, και με τις απώλειες ή τα κέρδη αντίστοιχα, ενώ συγκεκριμένα τα υλικά υάλωσης επηρεάζουν την ποσότητα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

Ως προς τον φυσικό φωτισμό, τα ανοίγματα εξετάζονται χωριστά ως προς τη θέση τους στο κέλυφος ως εξής:

- Πλευρικά ανοίγματα (*sidelight*s)/Ανοίγματα σε κατακόρυφες επιφάνειες (*lateral*).
- Οριζόντια ανοίγματα/Ανοίγματα στην οροφή.

Για καθεμία από αυτές τις θέσεις, εξετάζονται στη συνέχεια ξεχωριστά τα μεμονωμένα ανοίγματα και οι επιφάνειες. Οι Baker et al. (1993, σ. 5.1) διακρίνουν μια επιπλέον κατηγορία κελύφους με καμπύλη ή πρισματική γεωμετρία που επιτρέπει την ολική (global) είσοδο του φωτός και άρα περιλαμβάνει συνδυασμό πλευρικών και οριζόντιων ανοιγμάτων.

9.4.2 Πλευρικά ανοίγματα

Στις κατακόρυφες επιφάνειες του κτιρίου, τα ανοίγματα είναι τις περισσότερες φορές κατακόρυφα (έχουν δηλαδή κλίση 90^{o}), με διαφορετικό προσανατολισμό. Η θέση τους στο κέλυφος περιορίζει σε κάποιον βαθμό τη μορφή τους. Τα πλευρικά ανοίγματα μπορεί να είναι μεμονωμένα ανοίγματα (παράθυρα, πόρτες, μπαλκονόπορτες) ή μεγάλα υαλοστάσια, σταθερά ή ανοιγόμενα (Majoros, 1998, σ. 18). Παρέχουν φωτισμό με ισχυρή κατευθυντικότητα, είναι ιδανικά για εργασίες που λαμβάνουν χώρα σε οριζόντιο επίπεδο εργασίας, ωστόσο μπορεί να προκαλούν θάμβωση εξαιτίας της αντίθεσης μεταξύ του ανοίγματος και της επιφάνειας του τοίχου του (Ander, 1995, σ. 15). Το βασικό μειονέκτημα των πλευρικών ανοιγμάτων είναι ότι τα επίπεδα φυσικού φωτισμού μειώνονται απότομα, καθώς αυξάνεται η απόσταση από αυτά προς το βάθος του χώρου (Baker et al., 1993, σ. 5.12).

Μεμονωμένα ανοίγματα

Τα μεμονωμένα ανοίγματα μπορεί να είναι παράθυρα (βλ. για παράδειγμα Εικόνα 9.6) ή μπαλκονόπορτες (Baker et al., 1993, σσ. 5.12-5.13) και οι καθοριστικοί παράγοντες για τον φυσικό φωτισμό που παρέχουν είναι:

α. Το μέγεθος: Ως προς το μέγεθός τους, τα ανοίγματα αξιολογούνται από την απόλυτη επιφάνειά τους (σε τ.μ.) και από τη συνολική επιφάνειά τους προς την επιφάνεια του χώρου που αντιστοιχεί σε αυτά (σε %) (Baker et al., 1993, σ. 5.7), που ονομάζεται ποσοστό ανοιγμάτων επί του δαπέδου (Window to Floor ratio – WFR) (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 68). Ως προς την απόλυτη επιφάνεια, διακρίνονται ανοίγματα μικρού (<0,5 τ.μ.), μεσαίου (0,5< έως < 2 τ.μ.) και μεγάλου μεγέθους (>2,0 τ.μ.), ενώ ως προς το ποσοστό ανοιγμάτων επί του δαπέδου, διακρίνεται σε πολύ χαμηλό (<1%), χαμηλό (1-4%), μεσαίο (4-10%), υψηλό (10-25%) και πολύ υψηλό (>25%). Τα πολύ υψηλά ποσοστά οδηγούν σε θάμβωση και απώλεια θερμικής άνεσης (αυξημένες θερμικές απώλειες τον χειμώνα και θερμικά φορτία το καλοκαίρι), ενώ τα πολύ χαμηλά ποσοστά οδηγούν σε πολύ χαμηλά επίπεδα φυσικού φωτισμού (Baker et al., 1993, σ. 5.7). Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι το ποσοστό αυτό πρέπει να είναι ιδανικά ίσο με το 20% της επιφάνειας του χώρου (Αξαρλή, 2001, σ. 226), ενώ στον Κτιριοδομικό Κανονισμό (ΦΕΚ 59/03.02.1989, τ.Δ', Άρθρο 11, σ. 532) ορίζεται το ελάχιστο ποσοστό σε 10%, αλλά όχι το μέγιστο, ενώ στην επιφάνεια των ανοιγμάτων προσμετράται μόνο εκείνη που βρίσκεται πάνω από τα 1,20 μ. από το δάπεδο του χώρου.



Εικόνα 9.6 *Μεμονωμένα ανοίγματα. Παραδείγματα από κτίρια του Le Corbusier.*
α. Μοναστήρι La Tourette, Λυόν, Γαλλία (Le Corbusier, 1956). Πηγή: minimal windows for a desired light in a church, by Rosmarie Voegtli via Flickr, CC BY 2.0.
β. Κτίριο εισόδου στη Villa Savoy, Poissy, Παρίσι, Γαλλία (Le Corbusier & Pierre Jeanneret, 1931). Πηγή: Le Corbusier-Villa Savoye, 1928-30. The gatehouse. Mini-Savoye, by Rory Hyde via Flickr, CC BY-SA 2.0.

β. Το σχήμα: Ως προς το σχήμα τους, δηλαδή σε όψη τη σχέση του μήκους (L), με το ύψος (H), τα ανοίγματα μπορεί να είναι οριζόντια (L/H = 2/1), κατακόρυφα (L/H = 1/2) ή ενδιάμεσα (1/2 < L/H < 2). Το σχήμα των ανοιγμάτων επηρεάζει τη διανομή του φυσικού φωτός, την ποιότητα της θέας και τη δυνατότητα φυσικού αερισμού (Baker et al., 1993, σ. 5.7). Τα οριζόντια ανοίγματα παρέχουν φωτισμό σε μια ζώνη παράλληλη προς τον τοίχο του παραθύρου, με μικρή διαφοροποίηση στην κατανομή του φωτός καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και περιορισμένη θάμβωση. Αντίθετα, τα κατακόρυφα ανοίγματα παρέχουν φωτισμό σε μια ζώνη κάθετα προς τον τοίχο του παραθύρου, δημιουργώντας έτσι μια πολύ μεταβλητή κατανομή του φωτισμού καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, παρέχοντας υψηλότερα επίπεδα φυσικού φωτισμού στο βάθος του χώρου, με μεγαλύτερη, όμως, πιθανότητα θάμβωσης (Στο ίδιο, σ. 5.8).

γ. Ο αριθμός: Ο αριθμός των ανοιγμάτων (1 μοναδικό, μεγάλο άνοιγμα ή περισσότερα μικρότερα με την ίδια συνολική επιφάνεια) δεν επηρεάζει την ποσότητα του εισερχόμενου φυσικού φωτός, γιατί η σχέση ανάμεσα

στο ποσοστό ανοιγμάτων επί του δαπέδου –WFR– (βλ. Κεφ. 4, παρ. 4.3.3) και του μέσου φυσικού φωτισμού σε ένα δωμάτιο είναι περίπου γραμμική, αλλά την κατανομή του φυσικού φωτισμού, τη θέα και τη δυνατότητα φυσικού αερισμού. Πολλά μικρότερα ανοίγματα προσφέρουν καλύτερη κατανομή του φυσικού φωτισμού στον χώρο και καλύτερο φυσικό αερισμό, μειώνοντας ωστόσο τη θέα προς το εξωτερικό περιβάλλον (Baker et al., 1993, σ. 5.7). Η διανομή των ανοιγμάτων σε περισσότερους τοίχους ενός χώρου, ανάλογα πάντα με τη θέση του στον όγκο του κτιρίου, βελτιώνει την κατανομή του φυσικού φωτισμού, ενώ ταυτόχρονα, συμβάλλει και στη βελτίωση του φυσικού αερισμού (Στο ίδιο). Στην περίπτωση χώρων με μεγάλο βάθος, καλό είναι να υπάρχουν ανοίγματα σε περισσότερους τοίχους ή/και στην οροφή (Αξαρλή, 2001, σ. 225).

δ. Η θέση καθ' ύψος στον τοίχο: Το ύψος του πρεκιού του ανοίγματος επηρεάζει το βάθος του χώρου στο οποίο διεισδύει ο φυσικός φωτισμός, με βάση τον γενικό κανόνα ότι το βάθος διείσδυσης είναι ίσο με περίπου 2,5 φορές το ύψος του πρεκιού του ανοίγματος. Όταν το πρέκι του ανοίγματος είναι ψηλά, το φυσικό φως ανακλάται από την οροφή προς το βάθος του χώρου (Ander, 1995, σ. 14), συμβάλλοντας στην καλύτερη και πιο ομοιόμορφη κατανομή του (Αξαρλή, 2001, σ. 225). Εάν η οροφή είναι κεκλιμένη, με κλίση που μειώνεται από το άνοιγμα ή από τη ζώνη ανοιγμάτων προς το βάθος του χώρου, η κατανομή είναι ακόμα καλύτερη, ειδικά όταν συνδυάζεται και με διατάξεις όπως τα ηλιακά ράφια (*light-shelves*) (βλ. παρακάτω παρ. 9.7.2), σε χώρους στους οποίους για τις εργασίες ή τις δραστηριότητες δεν ενδείκνυται ο άμεσος φωτισμός (Ander, 1995, σ. 8). Αντίθετα, όσο χαμηλότερα βρίσκεται το άνοιγμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η δυνατότητα της άμεσης οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον. Τέλος, με την τοποθέτηση των παραθύρων σε μέσο ύψος, συνδυάζεται η χρήση του άμεσου και του έμμεσου/ανακλώμενου φωτός από το εξωτερικό έδαφος. Ταυτόχρονα, η θέση των ανοιγμάτων επηρεάζει τον φυσικό αερισμό και τη θέαση. Για παράδειγμα, με την τοποθέτηση ανοιγμάτων σε μεγάλο ύψος, βελτιώνεται ο φυσικός ελκυσμός και αερισμός του χώρου, ενώ η τοποθέτησή τους σε μέσο ύψος έχει ως αποτέλεσμα τον αποτελεσματικό αερισμό στο επίπεδο χρήσης (Baker et al., 1993, σσ. 5.7-5.8).

ε. Η θέση σε σχέση με διαχωριστικούς τοίχους ή πετάσματα: Η τοποθέτηση ανοιγμάτων κοντά σε διαχωριστικούς τοίχους ή πετάσματα προσφέρει καλύτερη κατανομή του φυσικού φωτισμού λόγω ανακλάσεων, αυξάνει τον φωτισμό τους και, με αυτόν τον τρόπο, μειώνονται οι διαφορές λαμπρότητας και η θάμβωση (Αξαρλή, 2001, σ. 226).

Διαφανείς τοίχοι

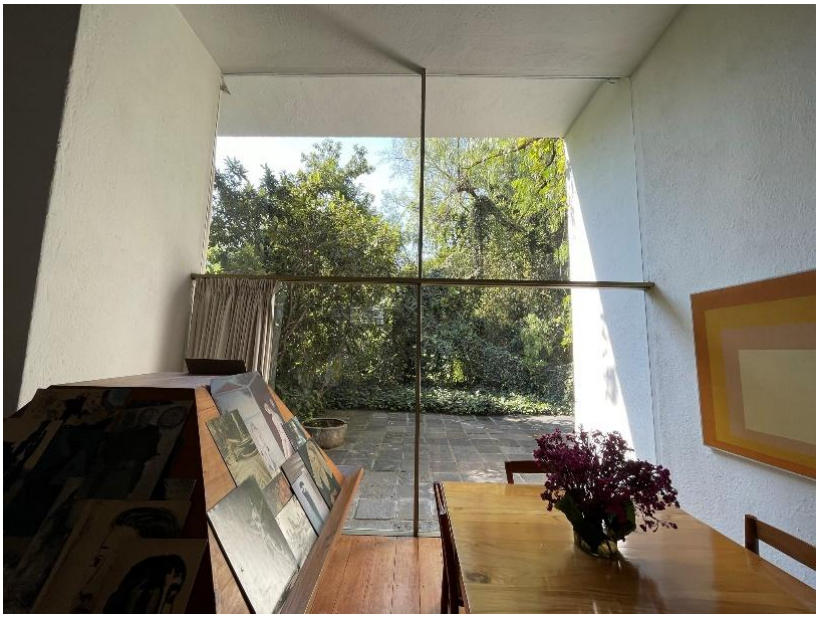
Οι διαφανείς τοίχοι είναι κατακόρυφες επιφάνειες που εκτείνονται από το πάτωμα έως την οροφή (Baker et al., 1993, σ. 5.13) και διαμορφώνονται από υαλοστάσια με διαφορετικά είδη υαλοπινάκων (υαλοπετάσματα) (Εικόνα 9.7), διαφανή θερμομόνωση (*transparent insulation materials*), υαλότουβλα, πλαστικά (πολυκαρβονικά, ακρυλικά κ.λπ.) ή εξελιγμένα υαλοστάσια (θερμοχρωμικά, φωτοχρωμικά ή ηλεκτροχρωμικά, αυτοσκιαζόμενα κ.λπ.). Ανάλογα με το υλικό, διαφοροποιούνται οι οπτικές ιδιότητες (διαπερατότητα, ανακλαστικότητα, απορροφητικότητα – βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.2), και άρα η κατανομή και η ποιότητα του φυσικού φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους.

Οι Baker et al. (1993, σσ. 5.13-5.14) διακρίνουν δύο κατηγορίες:

- Τους **διαφώτιστους τοίχους** (*translucent walls*), που αναφέρονται σε πετάσματα από υαλότουβλα, γυάλινα δομικά στοιχεία σχήματος U (u-glass, βλ. παρ. 5.4.3, Προηγμένα θερμομονωτικά υλικά και Εικόνα 5.27), ακρυλικά υλικά κ.λπ., με πάχος ανάμεσα σε 5 και 30 εκ. και οι οποίοι διαφοροποιούν το φυσικό φως που εισέρχεται σε έναν χώρο παρέχοντας ομοιογενή, διάχυτο φυσικό φωτισμό.
- Τα **υαλοπετάσματα** (*curtain walls*), που αναφέρονται σε πετάσματα υαλοπινάκων με μεταλλικό (συνήθως) φέροντα οργανισμό και οι οποίοι ανάλογα με τις ιδιότητές τους αυξάνουν σημαντικά

τα επίπεδα του φυσικού φωτισμού στους παρακείμενους χώρους. Ως προς τον βιοκλιματικό σχεδιασμό, έχουν σημασία οι θερμοφυσικές και οπτικές ιδιότητες των υαλοπινάκων, η πιθανή απαίτηση σκίασης, καθώς και η κατασκευή του υαλοπετάσματος, καθώς εάν δεν διαθέτει ανοιγόμενα τμήματα, αποκλείεται η χρήση φυσικού αερισμού για δροσισμό και για τη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα.

Στην κατηγορία αυτή θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν και οι **διπλοκέλυφες όψεις** (*double-skin facades*) (βλ. Κεφ. 6, παρ. 6.5), στις οποίες οι συνθήκες φυσικού φωτισμού εξαρτώνται από τα υλικά που διαμορφώνουν τα δύο κελύφη.



Εικόνα 9.7 *Διαφανής τοίχος/παράθυρο στο σπίτι του Luis Barragán στο Μεξικό. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*

9.4.3 Φεγγίτες οροφής

Οι φεγγίτες οροφής προσφέρουν φυσικό φωτισμό σε ισόγεια κτίρια, στον ανώτερο όροφο πολυώροφων κτιρίων ή στην οροφή εσωτερικών αιθρίων. Ο σχεδιασμός, η διαρρύθμιση και οι μεταξύ τους αποστάσεις καθορίζουν την κατανομή του φυσικού φωτισμού στο επίπεδο εργασίας (Ander, 1995, σ. 18). Μπορεί να είναι περισσότερα μικρά ανοίγματα κατανεμημένα στην επιφάνεια της στέγασης ή ένα μεγάλο (επιφάνεια) (Στο ίδιο, σ. 19). Σχετίζονται με τη θέα του ουρανού και όχι του γύρω φυσικού και δομημένου περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτόν, πρέπει να μελετώνται κατά προτεραιότητα ως προς τον φυσικό φωτισμό, αλλά και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία το καλοκαίρι –που λόγω των μεγάλων γωνιών ηλιακού ύψους προκαλεί υπερθέρμανση στις οριζόντιες επιφάνειες–, καθώς και ως προς τους επικρατούντες ανέμους και τις ανάγκες αερισμού (Αξαρλή, 2001, σ. 230).

Οι φεγγίτες οροφής διακρίνονται σε μεμονωμένα ανοίγματα (φεγγίτες) και επιφάνειες (στεγάσεις), ενώ ανάλογα με την κλίση τους διακρίνονται σε οριζόντια, σε κατακόρυφα και σε κεκλιμένα. Ανάλογα με τη μορφή τους επίσης, διακρίνονται σε επίπεδα, καμπύλα, πρισματικά και, τέλος, ανάλογα με τη θέση τους ως προς τη στέγαση σε συνεπίπεδα και σε υπερυψωμένα.

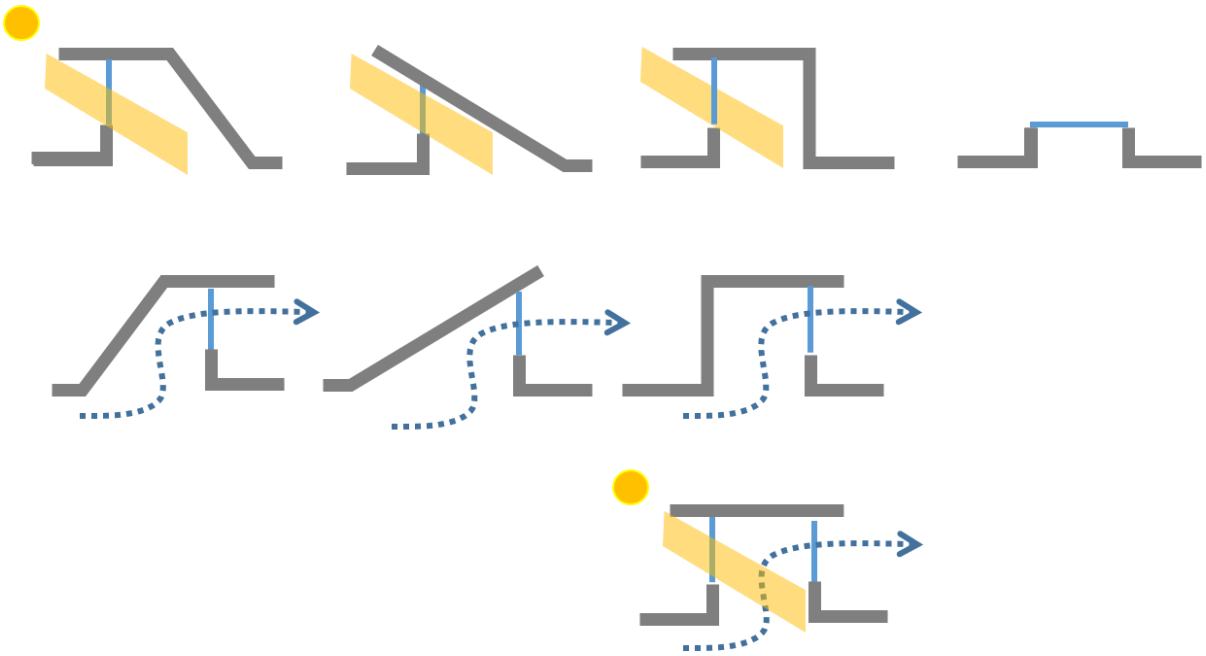
Φεγγίτες

Οι φεγγίτες οροφής διακρίνονται με βάση το σχήμα τους σε (Majoros, 1998, σ. 19):

- Σημειακούς (*localised*), που αναφέρονται σε μεμονωμένους φεγγίτες οροφής με τετράγωνο, κυκλικό, πολυγωνικό ή άλλο μη επίμηκες σχήμα.
- Γραμμικούς (*linear*), που έχουν επίμηκες σχήμα με μήκος σημαντικά μεγαλύτερο από το πλάτος τους και σταθερή τομή σε όλο τους το μήκος.

Στην ελληνική βιβλιογραφία, οι φεγγίτες οροφής αναφέρονται με τον γενικό όρο *φεγγίτες*, ενώ στην αγγλική έχουν διακριτούς όρους ανάλογα με τη γεωμετρία, τη θέση, το σχήμα και, κάποιες φορές, τον προσανατολισμό τους σε (Ander, 1995, σσ. 16, 18, 19· Baker et al., 1993, σσ. 5.14-5.17· Majoros, 1998, σ. 19):

- *Clerestories*, δηλαδή τα κατακόρυφα ανοίγματα που βρίσκονται κάτω από το επίπεδο της στέγασης. Τυπικά, αυτού του είδους οι φεγγίτες ανήκουν στις κατακόρυφες επιφάνειες του κτιρίου και, άρα, στα πλευρικά ανοίγματα· ωστόσο, λόγω της θέσης τους πάνω από το επίπεδο του ματιού και ακριβώς κάτω από τη στέγαση, αλλά και της κατασκευής τους, με τα ίδια υλικά, συγκαταλέγονται στα ανοίγματα οροφής.
- *Skylights* ή *toplights*, που περιγράφουν ανοίγματα παράλληλα με το επίπεδο ενός οριζόντιου δώματος ή μιας κεκλιμένης στέγασης, ενώ μπορεί να είναι και μεμονωμένα ανοίγματα σε συμπαγή θόλο (*dome*).
- *Roof monitors*, που περιγράφουν υπερυψωμένα τμήματα της στέγασης με κατακόρυφες ή κεκλιμένες διαφανείς επιφάνειες, σε μία ή δύο πλευρές τους και μαζί με το συμπαγές πάνω μέρος τους (κορφιά). Για την περίπτωση της υπερύψωσης σε ημισφαιρικό θόλο, αναφέρεται και ο όρος *lantern*.
- *Saw-tooth,* δηλαδή πριονωτές οροφές, που αποτελούνται από μια σειρά από διαδοχικά, παράλληλα κεκλιμένα τμήματα οροφής με κατακόρυφα ή κεκλιμένα γραμμικά ανοίγματα. Όταν τα ανοίγματα είναι προς τον βορρά αναφέρονται ως *north-light roof*.



Εικόνα 9.8 *Φυσικός φωτισμός και φεγγίτες οροφής. Αλληλεπίδραση με ηλιακή ακτινοβολία και φυσικό αερισμό. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Σε σχέση με την κλίση της διαφανούς επιφάνειάς τους, οι φεγγίτες διακρίνονται σε οριζόντιους (κλίση 0^o) και σε κατακόρυφους (κλίση 90^o), ενώ μπορεί να έχουν και ενδιάμεση κλίση.

Οι οριζόντιοι φεγγίτες προσφέρουν ομοιόμορφο φωτισμό, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για εστιασμένο ή δραματικό φωτισμό σε στρατηγικές θέσης της κάτοψης (Baker & Steemers, 2002, σ. 44). Η κάλυψή τους μπορεί να είναι οριζόντια, ημισφαιρική, πυραμιδοειδής ή πρισματική (Majoros, 1998, σ. 19). Σε βόρεια γεωγραφικά πλάτη και σε συνθήκες κυρίαρχα νεφοσκεπούς ουρανού, το πιο φωτεινό τμήμα του ουράνιου θόλου είναι ψηλά στο ζενίθ και άρα οι οριζόντιοι φεγγίτες είναι προτιμότεροι (Baker & Steemers, 2002, σ. 44). Αντίθετα, σε νότια γεωγραφικά πλάτη καλό είναι να αποφεύγονται, καθώς, λόγω των μεγάλων γωνιών ηλιακού ύψους κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η αυξημένη εισερχόμενη άμεση ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση και απώλεια θερμικής άνεσης (Ander, 1995, σ. 18). Επίσης, ανάλογα με τον προσανατολισμό και την ηλιακή γεωμετρία (ώρα της ημέρας και εποχή του έτους), μπορεί να προκληθεί και θάμβωση από ανάκλαση (βλ. Κεφ. 4, παρ. 4.3).



Εικόνα 9.9 *Φεγγίτες, μεμονωμένα ανοίγματα.*
α. Φεγγίτες στο Μοναστήρι La Tourette (Le Corbusier, 1956). Πηγή: Skylights at Couvent de La Tourette by Kamalpassi2102, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
β. Οριζόντιος φεγγίτης οροφής. Πηγή: Skylight in a Washington, D.C. home by AgnosticPreachersKid via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
γ. Οριζόντια ανοίγματα οροφής. Βιβλιοθήκη του Gando Primary School, Gando, Burkina Faso (Diébédo Francis Kéré, 1991). Πηγή: Kere library gando, GandoIT via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.

Οι κατακόρυφοι φεγγίτες (βλ. παραδείγματα της Εικόνας 9.9) έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα ως προς τον φυσικό φωτισμό και τον βιοκλιματικό σχεδιασμό σε σχέση με τους οριζόντιους. Παρόλο που σε νεφοσκεπείς συνθήκες έχουν μικρότερη ποσότητα φωτισμού σε σχέση με τους οριζόντιους φεγγίτες (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 128), εισάγουν το φως από ψηλά, προσφέροντας περισσότερο και πιο ομοιόμορφο φωτισμό ακόμα και στο βάθος του χώρου, και μειώνοντας, ταυτόχρονα, τη θάμβωση στο επίπεδο εργασίας (Ander, 1995, σσ. 16-17). Ωστόσο, ο κίνδυνος πρόκλησης θάμβωσης παραμένει είτε από την απευθείας θέα του ουρανού είτε από την άμεση ή την ανακλώμενη ακτινοβολία (Αξαρλή, 2001, σ. 235). Τέλος, ανάλογα με τον προσανατολισμό τους, έχουν και πρόσθετα βιοκλιματικά οφέλη. Στην περίπτωση του νότιου προσανατολισμού συνεισφέρουν κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου στην παθητική θέρμανση (βλ. Κεφ. 7, παρ. 7.2), ενώ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ο σκιασμός τους είναι σχετικά εύκολος, με οριζόντια προεξοχή ή ενσωματωμένα στοιχεία σκιασμού (περσίδες, *rollers*), ενώ προσφέρουν και φυσικό αερισμό με κατακόρυφη κίνηση και εύκολη αποβολή του θερμού αέρα (βλ. Κεφ. 8, παρ. 8.3.2 και 8.3.3). Όταν έχουν βόρειο προσανατολισμό, παρέχουν σταθερής έντασης ομοιόμορφο φυσικό φωτισμό, που είναι απαραίτητος για συγκεκριμένες χρήσεις ή λειτουργίες (π.χ. γραφεία, βιβλιοθήκες, μουσεία, εργοστάσια κ.λπ.).

Για τους φεγγίτες οροφής, ισχύουν κάποιοι γενικοί κανόνες. Σε χώρο χωρίς ανοίγματα στις κατακόρυφες επιφάνειες/περιμετρικούς τοίχους, οι φεγγίτες οροφής καλό είναι να βρίσκονται κοντά στους περιμετρικούς τοίχους και σε κοντινότερες αποστάσεις μεταξύ τους. Επίσης, καλό είναι τα ανοίγματα να είναι κοντά στον βορινό τοίχο, με στόχο την ανάκλαση και διάχυση της προσπίπτουσας σε αυτόν ηλιακής

ακτινοβολίας. Σε χώρο με περιμετρικά ανοίγματα, οι φεγγίτες οροφής καλό είναι να βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τους περιμετρικούς τοίχους, με στόχο τη βελτίωση της κατανομής και την αύξηση των επιπέδων φυσικού φωτισμού στο κέντρο (Αξαρλή, 2001, σ. 231). Έτσι, όταν υπάρχουν νότια ανοίγματα κοντά σε βορινό εξωτερικό ή διαχωριστικό τοίχο, ανάλογα με την υφή, το χρώμα και τα υλικά κατασκευής του, λειτουργεί θετικά ως προς τον φυσικό φωτισμό (και τη διάχυση του φωτός) και ως προς την παθητική ηλιακή θέρμανση (με απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας και αποθήκευση θερμότητας) (Στο ίδιο, σ. 236).

Διαφανείς στεγάσεις

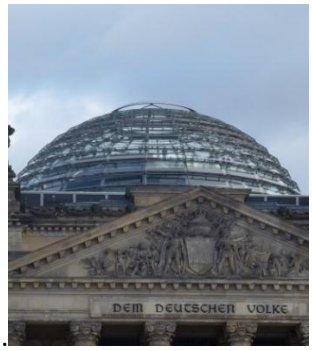
Οι διαφανείς στεγάσεις διακρίνονται συνήθως με βάση το σχήμα τους και μπορεί να είναι (Baker et al., 1993, σσ. 5.16-5.18 και Αξαρλή, 2001, σ. 238):

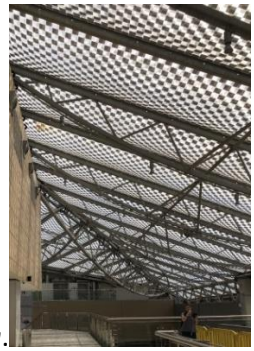
- **Διαφώτιστη οροφή** *(translucent roof)*, που αναφέρεται σε ένα οριζόντιο άνοιγμα που κατασκευάζεται εν μέρει από ημιδιαφανή υλικά και διαχωρίζει έναν εσωτερικό χώρο από το εξωτερικό περιβάλλον ή δύο εσωτερικούς διαδοχικούς καθ' ύψος χώρους. Πρόκειται για συμβατικούς ή εξελιγμένους υαλοπίνακες, ή για υαλόπλακες σε φέροντα οργανισμό από μεταλλική κατασκευή ή από σκυρόδεμα.
- **Ημισφαιρικός θόλος,** που κατασκευάζεται εξ ολοκλήρου από διαφανή ή διαφώτιστα υλικά.
- **Μεμβράνη** (*membrane*), που αναφέρεται σε ένα κέλυφος από διαφανή ή ημιδιαφανή υλικά, που καλύπτουν εν μέρει ή εξ ολοκλήρου έναν χώρο. Επιτρέπει την ημισφαιρική είσοδο του φυσικού φωτισμού. Τα υλικά μπορεί να είναι πολυκαρβονικό, γυαλί, ακρυλικό, πολυεστέρας και πλαστικές μεμβράνες (π.χ. PTFE ή ETFE).

Οι οπτικές ιδιότητες των διαφανών στεγάσεων (ανακλαστικότητα, απορροφητικότητα, διαπερατότητα) διαφοροποιούνται ανάλογα με το υλικό κατασκευής, και άρα διαφοροποιείται και ο φυσικός φωτισμός που προσφέρουν. Για τις διαφανείς ή ημιδιαφανείς στεγάσεις, πρέπει, πέραν του φυσικού φωτισμού, να λαμβάνονται υπόψη και η ημερήσια και διεποχική συμπεριφορά και η συνεισφορά τους στις συνθήκες θερμικής άνεσης και στην ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου, δηλαδή οι θερμικές απώλειες τον χειμώνα και οι θερμικές πρόσοδοι/φορτία το καλοκαίρι, η δυνατότητα ανοίγματος για την παροχή φυσικού αερισμού ή/και δροσισμού το καλοκαίρι κ.λπ.

Οι διαφανείς καλύψεις είναι προτιμότερες σε μεταβατικούς, εσωτερικούς χώρους (βλ. παρακάτω, παρ. 9.5.2) που δεν απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες για θερμική άνεση τον χειμώνα είτε λόγω κατάλληλης ένδυσης των χρηστών είτε λόγω δραστηριότητας, όπως είναι π.χ. τα κλειστά αίθρια, οι εκθεσιακοί χώροι, οι αθλητικές εγκαταστάσεις κ.λπ. (Αξαρλή, 2001, σ. 239). Ακόμα, όμως, και σε αυτές τις περιπτώσεις χρήσης/λειτουργίας, για το Μεσογειακό κλίμα και τη θερμή, θερινή περίοδο, οφείλουν να λαμβάνονται μέτρα αποφυγής της υπερθέρμανσης (σκιασμός) και δροσισμού (ανοιγόμενα τμήματα).

Τα τελευταία χρόνια, εφαρμογές διαφανών ή ημιδιαφανών στεγάσεων συνδυάζονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκά (PV) στοιχεία ενσωματωμένα είτε στους υαλοπίνακες είτε σε μεμβράνες ETFE (Εικόνα 9.10.γ).

α.  β. 

γ.  δ. 

Εικόνα 9.10 *Διαφανείς στεγάσεις. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*
α. Οριζόντια διαφώτιστη οροφή στο Neuess Museum, Βερολίνο.
β. Ο θόλος του Νέου Γερμανικού Κοινοβουλίου (Reichstag) (Foster+Partners, 1995).
γ. και δ. Οροφή από ETFE, εμπορικό- ψυχαγωγικό κέντρο The Mall Athens Μαρούσι, Αττική (Σπύρος Τσαγκαράτος, ΑΣΠΑ, 2005).

9.5 Σχεδιασμός κτιρίου

Ο σχεδιασμός του κτιρίου αναφέρεται στον σχεδιασμό του περιγράμματος της κάτοψης και των επιμέρους στοιχείων της, δηλαδή των χώρων, αλλά και των υλικών των επιφανειών των τοίχων, του δαπέδου και της οροφής.

9.5.1 Περίγραμμα/Σχήμα κτιρίου

Όπως προαναφέρθηκε (Κεφ. 6, παρ. 6.1.1), το σχήμα του κτιρίου επηρεάζει δραστικά τον προσανατολισμό των διαφορετικών κατακόρυφων επιφανειών του και συνεπώς την ηλιακή πρόσπτωση διεποχικά (βλ. Κεφ. 3, παρ. 3.1.3) και τις ανάγκες θέρμανσης, δροσισμού και φωτισμού. Ως προς τον φυσικό φωτισμό και ειδικά σε κτίρια στα οποία έχει σημασία όχι μόνον ως παράμετρος εξοικονόμησης ενέργειας, αλλά και για την εν γένει λειτουργία τους (π.χ. σχολεία, νοσοκομεία, μουσεία κ.λπ.), ο σχεδιασμός της κάτοψης και τους σχήματός της αποκτά βαρύνουσα σημασία (Bakers & Steemers, 2002, σ. 43).

Όταν το φυσικό φως εισέρχεται στους εσωτερικούς χώρους από πλευρικά ανοίγματα (παρ. 9.4.1) –για τα οποία ισχύει ο γενικός κανόνας ότι το βάθος διείσδυσης του φυσικού φωτός είναι ίσο με περίπου δύο φορές το ύψος του χώρου (τυπικά 2,5 φορές το ύψος του πρεκιού του ανοίγματος)–, είναι σαφές ότι η βασική παράμετρος για τον σχεδιασμό είναι το βάθος της κτιριακής κάτοψης (Στο ίδιο). Αντίθετα, όταν πρόκειται για ισόγεια κτίρια ή για τον ανώτερο όροφο πολυώροφων κτιρίων με φεγγίτες οροφής (παρ. 9.4.2), το βάθος της κτιριακής κάτοψης δεν παίζει ρόλο, αφού το φυσικό φως προέρχεται από πάνω (Στο ίδιο, σ. 44).

Για πολυώροφα κτίρια με πλευρικά ανοίγματα και για το σύνηθες καθαρό ύψος χώρων των 3,0 μ., προκύπτει ότι το βάθος της κάτοψης μπορεί να είναι έως 6,0 μ., όταν ο φωτισμός είναι μονόπλευρος και έως 12,0 μ., όταν και οι δύο όψεις έχουν απρόσκοπτη πρόσβαση στο φυσικό φως (Στο ίδιο). Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ρηχές, ορθογωνικές κατόψεις με λόγο μήκους προς πλάτος από 2:1 και πάνω ή/και στην ενσωμάτωση επιμέρους, ενδιάμεσων χώρων, για παράδειγμα ανοιχτά ή κλειστά αίθρια (βλ. παρακάτω παρ. 9.5.2), ή ακόμα και σε πολύπλοκη γεωμετρία/περίγραμμα κτιρίου (βλ. Εικόνα 9.11).



Εικόνα 9.11 *Σχεδιασμός περιγράμματος με στόχο –μεταξύ άλλων– τη μέγιστη αξιοποίηση φυσικού φωτισμού, στα κεντρικά γραφεία ING (πρώην NMB) στο Άμστερνταμ, Ολλανδία (Ton Alperts, 1978). Πηγή: ING Hoofdkantoor, Amsterdam, by Jan Derwig via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.*

9.5.2 Σχεδιασμός κάτοψης – Μεταβατικοί χώροι

Στο εσωτερικό του κτιρίου, το φυσικό φως μπορεί να εισέρχεται κατευθείαν από τα ανοίγματα ή διαμέσου μεταβατικών χώρων, που το οδηγούν ή/και το διανέμουν και τους οποίους οι Baker et al. (1993, σ. 5.1) ονομάζουν στοιχεία αγωγής/διόδου (σσ. του φωτός) (conduction components) και τους διακρίνουν σε:

- **Ενδιάμεσους χώρους** (*intermediate light spaces*), που βρίσκονται στην περίμετρο του κτιρίου και οδηγούν και διανέμουν το φυσικό φως προς τους εσωτερικούς χώρους που είναι σε επαφή με αυτούς.
- **Εσωτερικούς χώρους** (*interior light spaces*), που βρίσκονται στον πυρήνα του κτιρίου, δηλαδή αποτελούν τμήμα των εσωτερικών ζωνών του κτιρίου και οδηγούν και διανέμουν το φως προς συγκεκριμένες ζώνες του κτιρίου που δεν είναι σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον.

Στους μεταβατικούς, ενδιάμεσους χώρους ανήκουν (Baker et al., 1993, σ. 5.9):

Η στοά (*gallery*) (Εικόνα 9.12.α), που είναι ανοιχτή (ημιυπαίθριος χώρος) ή κλειστή με υαλοστάσια και παρέχει φωτισμό με σχετικά μειωμένα επίπεδα, αλλά και με λιγότερες αντιθέσεις (Baker et al., 1993, σ. 5.9).

Η στεγασμένη αυλή (*porch*) (Εικόνα 9.12.β), που είναι καλυμμένος, ισόγειος, υπαίθριος χώρος, ανοιχτός προς το εξωτερικό περιβάλλον, με παρόμοια χαρακτηριστικά φυσικού φωτισμού με τη στοά (μειωμένα επίπεδα και μικρές αντιθέσεις) (Στο ίδιο).

Το θερμοκήπιο (*greenhouse*) (Εικόνα 9.12.γ), που είναι προσαρτημένος χώρος σε μία ή περισσότερες όψεις του κτιρίου. Η όψη ή οι όψεις του μπορεί να είναι κατακόρυφες ή κεκλιμένες και η κάλυψή τους οριζόντια, καμπύλη ή πρισματική, και διαμορφώνονται με διαφανείς ή ημιδιαφανείς επιφάνειες που επιτρέπουν την είσοδο του φυσικό φωτός και της ηλιακής ακτινοβολίας (Στο ίδιο, σ. 5.10). Ανάλογα με τον προσανατολισμό του, όταν αυτός είναι νότιος μπορεί να αποτελεί ταυτόχρονα και παθητικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης (βλ. Κεφ. 7, παρ. 7.3.2) ή/και χώρο ανάσχεσης, προστατευμένο από το ψύχος, τον άνεμο και τη βροχή.



Εικόνα 9.12 *Μεταβατικοί ενδιάμεσοι χώροι.*
α. Στοά. Πηγή: Photo by Yu Chen Lin on Unsplash.
β. Αυλή. Πηγή: Photo by Nadia Cortellesi on Unsplash.
γ. Θερμοκήπιο. Πηγή: Photo by Hamish Duncan on Unsplash.

Στους μεταβατικούς, εσωτερικούς χώρους ανήκουν (Baker et al., 1993, σ. 5.9):

Το ανοιχτό αίθριο ή αυλή (*courtyard*) **και το κλειστό αίθριο** (*atrium*) (Εικόνα 9.13.α), που είναι περίκλειστος χώρος από τους τοίχους ενός ή περισσότερων κτιρίων, ανοιχτός προς τα πάνω και κάποιες φορές και από τη μία του πλευρά. Τα αίθρια έχουν αντίστοιχες οπτικές ιδιότητες με το εξωτερικό περιβάλλον, ωστόσο ο φυσικός φωτισμός και ο αερισμός τους είναι μειωμένοι (Στο ίδιο, σ. 5.10) και εξαρτώνται από τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και τον προσανατολισμό τους. Το κλειστό αίθριο (Εικόνα 9.13.β) καλύπτεται με οροφή διαφανή ή ημιδιαφανή, η οποία φέρεται από ελαφρού τύπου, μεταλλική ή ξύλινη κατασκευή (Στο ίδιο, σ. 5.11).

Ο φωταγωγός (*light-duct*), που είναι φρεάτιο μειωμένων διαστάσεων (από 0,5 x 0,5 μ. έως 2,0 x 2,0 μ.) μέσα στη μάζα του κτιρίου που παρέχει φυσικό φωτισμό (και αερισμό) σε χώρους του κτιρίου που δεν είναι σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον (Εικόνα 9.13.γ). Οι επιφάνειές του διαμορφώνονται συνήθως με υλικά υψηλής ανακλαστικότητας, με στόχο την ανάκλαση και διάχυση του φυσικού φωτός στα κατώτερα επίπεδα, που όμως δύσκολα μπορεί να είναι περισσότερα από 10 μ. (περ. 3 όροφοι). Το πάνω μέρος μπορεί να είναι ανοιχτό ή κλειστό με σταθερά ή ανοιγόμενα τμήματα, με διαφανή ή διαφώτιστη κάλυψη (Στο ίδιο, σ. 5.11). Όταν ο στόχος δεν είναι μόνο η παροχή φυσικού φωτισμού και αερισμού, αλλά και η ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας, ο φωταγωγός καλείται *sun-duct* και τα υλικά που διαμορφώνουν τις επιφάνειές του είναι συνήθως κάτοπτρα, επιφάνειες αλουμινίου ή στιλβωμένες επιφάνειες, με στόχο την ακόμα πιο αποτελεσματική ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας προς τα κατώτερα τμήματα του κτιρίου, που μπορούν να υπερβούν τα 15 μ. (πάνω από 5 όροφοι) (Στο ίδιο, σ. 5.12).



Εικόνα 9.13 *Μεταβατικοί εσωτερικοί χώροι.*
α. Ανοιχτό αίθριο. Μουσείο Βυζαντινού Πολιτισμού, Θεσσαλονίκη (Κ. Κρόκος, 1994). Πηγή: Museum of Byzantine Culture, Thessaloniki, Greece, by Tilemahos Efthimiadis from Athens, Greece, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 2.0.
β. Κλειστό αίθριο. Metropolitan Museum of Art, Νέα Υόρκη. Πηγή: Photo by Robert Bye on Unsplash.
γ. Φωταγωγός. Casa Batlló, Βαρκελώνη (Antoni Gaudí, 1906). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

Η εφαρμογή ενός ή περισσότερων από τους παραπάνω μεταβατικούς χώρους σε ένα κτίριο, αλλά και η κάλυψη ή μη του ανώτερου τμήματός τους εξαρτάται έως έναν βαθμό και από το κλίμα της περιοχής μελέτης. Έτσι, στα ψυχρά κλίματα, τείνουν να επικρατήσουν οι κλειστές στοές και τα κλειστά αίθρια, με στόχο την προστασία από τη βροχή και τους ψυχρούς ανέμους, ενώ στα νότια, θερμότερα γεωγραφικά πλάτη επικρατούν, τόσο στην κατά τόπους παραδοσιακή αρχιτεκτονική όσο και στη σύγχρονη, οι ανοιχτές στοές, οι ημιυπαίθριοι χώροι και τα ανοιχτά αίθρια/αυλές (Bakers & Steemers, 2002, σ. 47). Παράλληλα τα παραπάνω μεταφράζονται και σε καλύτερη βιοκλιματική απόδοση, μιας και στην πρώτη περίπτωση υπάρχει υψηλή απαίτηση φυσικού φωτισμού και μικρότερος κίνδυνος υπερθέρμανσης, ενώ αντίθετα στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει υψηλή απαίτηση σκιασμού και μεγάλος κίνδυνος υπερθέρμανσης, που θα μπορούσε να συμβεί από ένα κλειστό αίθριο.

Οι ενδιάμεσοι και οι εσωτερικοί χώροι χαρακτηρίζονται από τη γεωμετρία τους, δηλαδή το σχήμα τους (*shape factor*) και το πόσο υψίκορμοι είναι (*slenderness*), δηλαδή τη διάσταση κατά τη φορά διείσδυσης του φυσικού φωτός σε σχέση με το πλάτος (Baker et al., 1993, σ. 5.2). Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος του μεταβατικού χώρου προς την επιφάνειά του, τόσο μικρότερη είναι η απόσταση στην οποία διεισδύει το φυσικό φως. Ως προς την αγωγή του φυσικού φωτός προς το εσωτερικό του κτιρίου, σημασία έχουν και οι οπτικές ιδιότητές τους, δηλαδή η ανακλαστικότητα, ως προς την τιμή της (μεγάλη ή μικρή) και η ποιότητά της (κατοπτρική, μεικτή, διάχυτη) (Baker et al., 1993, σ. 5.2). Έτσι, τα υλικά που διαμορφώνουν τις επιφάνειες των μεταβατικών χώρων και τα χαρακτηριστικά τους, δηλαδή το χρώμα, η υφή και η ανακλαστικότητα, σε συνδυασμό με τη γωνία πρόσπτωσης του φωτός, επηρεάζουν την ποσότητα, αλλά και την ποιότητα του φυσικού φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους του κτιρίου που είναι σε επαφή με αυτούς.

9.5.3 Σχεδιασμός επιμέρους στοιχείων εσωτερικών χώρων

Στους επιμέρους χώρους ενός κτιρίου, τα επίπεδα και η κατανομή του φυσικού φωτισμού εξαρτώνται, πέρα από τα ανοίγματα και τον σχεδιασμό τους, που αναλύθηκε παραπάνω (παρ. 9.4), και από την ανακλαστικότητα των επιφανειών. Από το σύνολο των επιφανειών ενός χώρου, η οροφή (ταβάνι) έχει τη μεγαλύτερη σημασία για την ανάκλαση του εισερχόμενου φυσικού φωτός, ιδιαίτερα στο επίπεδο εργασίας. Επόμενος στη σειρά προτεραιότητας σε σημασία είναι ο πίσω τοίχος, στη συνέχεια οι πλευρικοί τοίχοι και τελευταίο το δάπεδο (Ander, 1995, σ. 15). Όπως έχει προαναφερθεί (Κεφ. 5, παρ. 5.2), οι οπτικές ιδιότητες των υλικών αναφέρονται στην ανακλαστικότητα, στην απορροφητικότητα και στη διαπερατότητα. Η ανάκλαση του φωτός στις εσωτερικές επιφάνειες μπορεί να είναι κατοπτρική ή διάχυτη, ή συνδυασμός των δύο (Baker et al., 1993, σ. 4.3).

Παρόλο που τα υλικά που διαμορφώνουν τις εσωτερικές επιφάνειες των χώρων αποτελούν σημαντική παράμετρο για τον φυσικό φωτισμό, οι οπτικές (φωτομετρικές) ιδιότητές τους δεν μπορούν να εξετάζονται ανεξάρτητα από άλλες εξίσου ή περισσότερο σημαντικές παραμέτρους, όπως η ασφάλεια (π.χ. έναντι της πυρκαγιάς), οι τρόποι εφαρμογής, οι ανάγκες συντήρησης, η επίδραση σε άλλες συνθήκες άνεσης (θερμικής, ακουστικής κ.λπ.), η αισθητική κ.λπ. (Baker et al., 1993, σ. 4.7).

9.5.4 Σχεδιασμός του περιβάλλοντος χώρου

Όπως προαναφέρθηκε (Κεφ. 3, παρ. 3.2.4 & Εικόνα 3.20), σημαντικό μέρος του φυσικού φωτός που εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου προέρχεται από εξωτερικές ανακλάσεις. Η επίδραση των επιφανειών του εδάφους είναι σημαντική ιδιαίτερα σε συνθήκες καθαρού ουρανού, καθώς ένα σημαντικό ποσοστό του φωτός που προσπίπτει πάνω στις όψεις και ειδικότερα σε όσες δεν δέχονται άμεσο ηλιασμό προέρχεται από ανάκλαση (Baker et al., 1993, σ. 2.10).

Ως προς την εξωτερική ανακλώμενη συνιστώσα, έχει καταρχήν σημασία η ανακλαστικότητα των επιφανειών του εξωτερικού χώρου, και άρα των υλικών (χρώμα και υφή) που διαμορφώνουν τις εξωτερικές

οριζόντιες επιφάνειες, καθώς και η ύπαρξη βλάστησης και το είδος της (φυτοκάλυψη, θαμνώδης, δέντρα, πέργκολες με αναρριχητικά φυτά). Ταυτόχρονα, τα υλικά δεν διαμορφώνουν μόνο την ποσότητα του ανακλώμενου φυσικού φωτός, αλλά και τα χαρακτηριστικά του (άμεσο ή διάχυτο) και το χρώμα του, που εξαρτάται από το χρώμα της επιφάνειας στην οποία προσπίπτει και ανακλάται (Baker et al., 1993, σσ. 2.11-2.12) Έτσι, για παράδειγμα, τα γαιώδη υλικά (χώμα, κεραμικά) ανακλούν περισσότερο κόκκινο φως (όχι πράσινο ή μπλε), προσθέτοντας «ζεστασιά» στο χρώμα του ανακλώμενου φωτός. Η βλάστηση έχει σχετικά χαμηλή ανακλαστικότητα –αφού τα φυτά απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία για τις βιολογικές τους λειτουργίες–, η οποία, όμως, αυξάνεται όταν η βλάστηση ξηραίνεται (Baker et al., 1993, σ. 2.10). Η βλάστηση επηρεάζει τον φυσικό φωτισμό και ως στοιχείο σκίασης, καθώς τα δέντρα ή οι φυτεμένες πέργκολες αποκόπτουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, όχι όμως και την ανακλώμενη. Ταυτόχρονα, κατά τη διάρκεια της θερμής, θερινής περιόδου, έχει θετική συνεισφορά στις συνθήκες θερμικής άνεσης που επικρατούν και στον εξωτερικό χώρο, αλλά και στο εσωτερικό του κτιρίου μέσω του σκιασμού (Αξαρλή, 2004, σ. 223). Τέλος, το νερό παρουσιάζει μεγαλύτερη ανακλαστικότητα όταν ο ήλιος είναι χαμηλά στον ορίζοντα. Το κινούμενο νερό δίνει δυναμικές ποιότητες στο φως που μπορούν να αξιοποιηθούν στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, ωστόσο, για κάποιες χρήσεις, οι ποιότητες αυτές μπορεί να προκαλέσουν όχληση (Baker et al., 1993, σ. 2.10).

Η εξωτερική ανακλώμενη συνιστώσα εξαρτάται και από τις εξωτερικές επιφάνειες των κτιρίων, οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με θετικό ή αρνητικό τρόπο. Σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού και ανάλογα με τον προσανατολισμό, τα απέναντι κτίρια είναι πάντα σκοτεινότερα από τον ουρανό, ενώ σε συνθήκες καθαρού ουρανού μπορεί να είναι πιο φωτεινά (Baker et al., 1993, σ. 2.12).

9.6 Στοιχεία ελέγχου/ρύθμισης

Τα στοιχεία ελέγχου/ρύθμισης (*control components*) είναι οι διατάξεις που επιτρέπουν ή/και ελέγχουν ή ακόμα και αποτρέπουν την είσοδο του φωτός στους χώρους του κτιρίου και χωρίζονται σε (Baker et al., 1993, σ. 5.3):

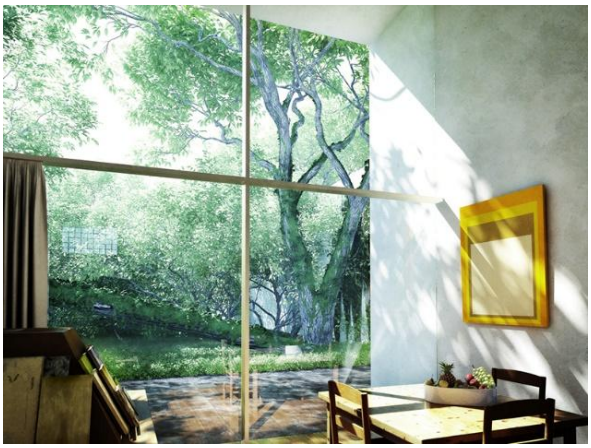
- **Διαχωριστικές επιφάνειες (διαφανείς ή ημιδιαφανείς)** (*separator surfaces*), που επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός και κατά περίπτωση τη θέα, ενώ επιτρέπουν τον αερισμό όταν είναι ανοιγόμενες. Ανάλογα με το υλικό της επιφάνειας, μπορεί να υπάρχει ή όχι πλαίσιο (φορέας).
- **Εύκαμπτες επιφάνειες** (*flexible screens*), που παρεμποδίζουν εν μέρει ή πλήρως τη διέλευση του άμεσου και του διάχυτου φωτισμού, επιτρέποντας παράλληλα και τον φυσικό αερισμό. Είναι κινητές και μπορούν να ρυθμίζονται (π.χ. να ανοίγουν και να κλείνουν), επιτρέποντας ή όχι τη θέα προς το εξωτερικό περιβάλλον.
- **Άκαμπτες επιφάνειες** (*rigid screens*), που είναι ταυτόχρονα συμπαγείς και ανακατευθύνουν ή/και παρεμποδίζουν την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στα ανοίγματα. Συνήθως, πρόκειται για σταθερές διατάξεις, χωρίς δυνατότητα ρύθμισης· μπορούν όμως να είναι και κινητές.
- **Ηλιακά φίλτρα** (*solar filters*), που καλύπτουν όλη την επιφάνεια του ανοίγματος και προστατεύουν τους εσωτερικούς χώρους από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (σκιάζουν), επιτρέποντας ταυτόχρονα τον φυσικό αερισμό. Μπορεί να είναι σταθερά ή κινητά.
- **Ηλιακά εμπόδια** (*solar obstructors*), που καλύπτουν όλη την επιφάνεια του ανοίγματος και είναι συμπαγή, αλλά και κινητά/ρυθμιζόμενα.

Είναι προφανές ότι στα ανοίγματα των κτιρίων (παρ. 9.4), αλλά και στους μεταβατικούς ενδιάμεσους και εσωτερικούς χώρους (παρ. 9.5.2) τα στοιχεία ελέγχου και ρύθμισης μπορούν να υπάρχουν μεμονωμένα ή σε διάφορους συνδυασμούς μεταξύ τους (π.χ. διαχωριστική επιφάνεια –συμβατικός υαλοπίνακας–, με άκαμπτη επιφάνεια εξωτερικά –παντζούρι– και εύκαμπτη εσωτερικά – κουρτίνα). Για τον λόγο αυτόν, στη συνέχεια οι διαχωριστικές επιφάνειες αναλύονται αυτόνομα, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία χωρίζονται σε στοιχεία ηλιοπροστασίας, που τοποθετούνται στην εξωτερική πλευρά των ανοιγμάτων ή/και των επιφανειών, και σε

στοιχεία ρύθμισης, που τοποθετούνται εσωτερικά. Η λογική είναι ότι τα στοιχεία που τοποθετούνται εξωτερικά των υαλοστασίων συμβάλλουν ταυτόχρονα και στη μείωση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της θερμής, θερινής περιόδου, και άρα στον σκιασμό και στον παθητικό δροσισμό.

9.6.1 Διαχωριστικές επιφάνειες

Όπως προαναφέρθηκε, στις διαχωριστικές επιφάνειες εντάσσονται πρακτικά οι διάφοροι υαλοπίνακες και τα υαλοπετάσματα που διαμορφώνουν ένα μεμονωμένο πλευρικό άνοιγμα ή φεγγίτη οροφής ή μια κατακόρυφη ή οριζόντια επιφάνεια.

α.  β. 

γ.  δ. 

Εικόνα 9.14 *Διαχωριστικές επιφάνειες.*
α. Συμβατικά διαχωριστικά. Casa Luis Barragan (Luis Barragán, 1948). Πηγή: Luís Barragán house, by Poet Architecture, via Flickr, Public Domain.
β. Οπτικά διαχωριστικά. Nagasaki Museum of History and Culture, Ναγκασάκι, Ιαπωνία (Kisho Kurokawa, 2005). Πηγή: Nagasaki Museum of History and Culture, Nagasaki city, by ANAKA Juuyoh, via PxHere, CC BY 2.0.
γ. Πρισματικά διαχωριστικά. Hotel Baccarat, Νέα Υόρκη. Πηγή: Baccarat NYC, by Roger W. Haworth, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.
δ. Ενεργητικά διαχωριστικά. Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες στο Argonne's Advanced Protein Characterization Facility Πηγή: Advanced Protein Characterization Facility, by Argonne National Laboratory, via Flickr, CC BY-NC-SA 2.0.

Πρόκειται κυρίως για:

- **Συμβατικά διαχωριστικά** (*conventional division*) με φέροντα οργανισμό από ξύλο ή μέταλλο, που στηρίζουν διαφανή υλικά (Εικόνα 9.14.α). Μπορεί να είναι σταθερά ή ανοιγόμενα για φυσικό αερισμό (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.17).
- **Οπτικά διαχωριστικά** (*optical division*), τα οποία διαφοροποιούν τα χαρακτηριστικά της διερχόμενης ακτινοβολίας, με διάχυση, ανακατεύθυνση ή έλεγχο της έντασης, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υλικού, που μπορεί να είναι έγχρωμοι υαλοπίνακες, ανακλαστικοί υαλοπίνακες, γαλακτώδεις ή χυτοί υαλοπίνακες, θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες ή ολογραφικά φιλμ (Εικόνα 9.14.β). Η διαφοροποίηση του φωτός μπορεί να είναι σταθερή ή διαφοροποιούμενη, ή και δυναμική (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.19).
- **Πρισματικά διαχωριστικά** (*prismatic division*), που περιλαμβάνουν πρισματικά πάνελ (από γυαλί, πολυκαρβονικό, ακρυλικό ή πολυεστέρα) (Εικόνα 9.14.γ), τα οποία με βάση τα οπτικά και γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά ανακατευθύνουν, ανακλούν ή/και διαχέουν το φυσικό φως (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.19).
- **Ενεργητικά διαχωριστικά** (*active division*), που είναι ενεργά στοιχεία ελέγχου και αναφέρονται αποκλειστικά στους ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες (Εικόνα 9.14.δ), των οποίων η διαπερατότητα αλλάζει με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου. Ελέγχονται τα επίπεδα φυσικού φωτισμού σε σχέση με τις απαιτήσεις της χρήσης του χώρου (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.20). Τα ενεργητικά διαχωριστικά είναι πρακτικά οπτικά διαχωριστικά, στα οποία όμως η διαφοροποίηση αλλάζει ενεργητικά και όχι παθητικά.

Οι περισσότερες από τις παραπάνω διαχωριστικές επιφάνειες αναφέρονται σε καινοτόμα συστήματα υαλοστασίων, τα οποία παρουσιάζονται σε επόμενη ενότητα (παρ. 9.7.1).

9.6.2 Στοιχεία ηλιοπροστασίας – Εξωτερικά

Τα στοιχεία ηλιοπροστασίας ρυθμίζουν τις συνθήκες φυσικού φωτισμού, καθώς μειώνουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, παρέχοντας συγχρόνως σκιασμό και μείωση των εσωτερικών θερμικών φορτίων κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου (βλ. Κεφ. 6, παρ. 6.4.2). Ως στοιχεία ηλιοπροστασίας, που τοποθετούνται στην εξωτερική επιφάνεια ανοιγμάτων ή επιφανειών, πλευρικών ή στη στέγαση του κτιρίου, αλλά και μεταβατικών χώρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκαμπτες και άκαμπτες επιφάνειες, ηλιακά φίλτρα και ηλιακά εμπόδια. Επειδή σε πολλές περιπτώσεις η ηλιακή πρόσοδος που είναι επιθυμητή για λόγους παθητικής θέρμανσης προκαλεί συνθήκες δυσφορίας ως προς την οπτική άνεση, τότε είναι δυνατή η εσωτερική τοποθέτηση ελαφρών διάτρητων στοιχείων σκίασης, όπως κουρτίνες ή ρολοκουρτίνες, για τη ρύθμιση της οπτικής άνεσης, χωρίς τη μείωση των ηλιακών προσόδων.

9.6.3 Στοιχεία ρύθμισης – Εσωτερικά

Το πιο κοινό και απλό εσωτερικό στοιχείο ρύθμισης είναι **οι κουρτίνες** (βλ. ενδεικτικά Εικόνα 9.15.α και β) που μαζεύονται πλευρικά ή τα υφασμάτινα ρολά που ανασύρονται. Ανήκουν στις μεταβαλλόμενες **εύκαμπτες επιφάνειες** από ύφασμα ή συνθετικές ίνες. Ανάλογα με το υλικό, το χρώμα και την ύφανση, μπορούν να αποκλείουν πλήρως ή εν μέρει ή να διαχέουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.21).

α.  β.  γ. 

Εικόνα 9.15 *Εσωτερικά στοιχεία ρύθμισης.*
α. Curtain Wall House4147237237Τόκιο, Ιαπωνία (Shigeru Ban, 1994-1995). Πηγή: Curtain Wall House2, by Forgemind ArchiMedia, via Wikimedia Commons, CC BY 2.0.
β. Κουρτίνες. Photo by Sergi Dolcet Escrig on Unsplash γ. Βενέτικα. Πηγή: Photo by Nong on Unsplash.

Από τις **άκαμπτες επιφάνειες**, αυτές που τοποθετούνται εσωτερικά είναι κυρίως στοιχεία ανακατεύθυνσης του φυσικού φωτισμού. Κατασκευάζονται από διάφορα υλικά, με μόνη προϋπόθεση η ανώτερη επιφάνεια να είναι ισχυρά ανακλαστική, π.χ. καθρέφτης, αλουμίνιο ή άλλο πολύ στιλβωμένο μέταλλο· στόχος είναι η ανακατεύθυνση του φυσικού φωτός προς την οροφή του χώρου και μέσω αυτής προς το βάθος του, με αποτέλεσμα να μειώνονται τα επίπεδα φυσικού φωτισμού στην άμεση περιοχή του ανοίγματος, αλλά να βελτιώνεται η κατανομή στο βάθος του χώρου (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.22).

Το ηλιακό ράφι (*light-shelf*), το οποίο αναλύεται λεπτομερώς παρακάτω (παρ. 9.7.2), είναι οριζόντιο στοιχείο που συνήθως τοποθετείται πάνω από το επίπεδο του ματιού σε νότια πλευρικά ανοίγματα και λειτουργεί ως ανακλαστική επιφάνεια για την ανακατεύθυνση του φυσικού φωτός· δύναται στις περιπτώσεις που προεξέχει προς από την επιφάνεια του υαλοπίνακα προς τα έξω να λειτουργήσει και ως στοιχείο σκιασμού τους θερινούς μήνες (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.22).

Αντίστοιχα, **το περβάζι ή ποδιά** (*sill*) είναι στοιχείο που τοποθετείται στο κάτω μέρος του ανοίγματος και αντανακλά και ανακατευθύνει το φυσικό φως που πέφτει πάνω του. Πρακτικά είναι σαν ηλιακό ράφι, απλώς στο κάτω μέρος του ανοίγματος και, ως εκ τούτου, ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων, μπορεί να προκαλέσει θάμβωση (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.22).

Τέλος, από τα ηλιακά φίλτρα, εσωτερικά μπορεί να τοποθετηθούν οι **κινητές γρίλλιες, περσίδες** (*jalousies*) (Εικόνα 9.15.γ), ενώ από τα ηλιακά εμπόδια τα παντζούρια.

9.7 Εξελιγμένα συστήματα φυσικού φωτισμού

Τα εξελιγμένα συστήματα φυσικού φωτισμού αναφέρονται σε εφαρμογές, συστήματα και στοιχεία που τυπικά ανήκουν στις προηγούμενες ενότητες και κυρίως στις διαχωριστικές επιφάνειες (παρ. 9.6.1). Ωστόσο, επιλέγεται να παρουσιαστούν σε ξεχωριστή ενότητα, καθώς είναι τεχνολογικά, κατασκευαστικά και σε κάποιες περιπτώσεις και λειτουργικά πιο περίπλοκα.

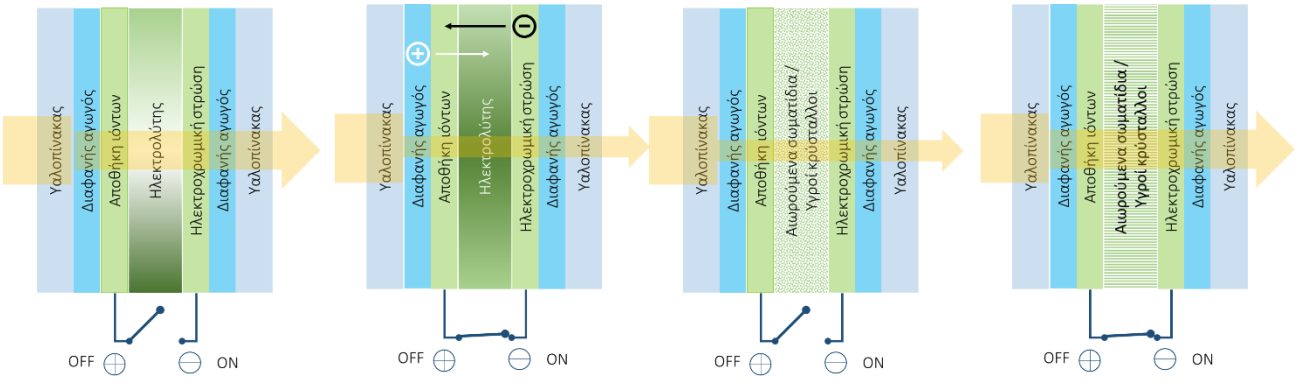
9.7.1 Καινοτόμοι υαλοπίνακες

Οι καινοτόμοι υαλοπίνακες ανήκουν, με βάση την ταξινόμηση που προηγήθηκε, στις διαχωριστικές επιφάνειες (παρ. 9.6.1). Περιλαμβάνουν κυρίως εφαρμογές υαλοπινάκων μεταβλητών ιδιοτήτων, οι οποίοι

συνήθως αναφέρονται και ως «έξυπνοι υαλοπίνακες» (*smart glass*), αλλά και υαλοπίνακες με ειδικά χαρακτηριστικά ως προς τον φυσικό φωτισμό ή τη θερμομονωτική τους ικανότητα.

Οι «έξυπνοι» υαλοπίνακες (*smart glass*) έχουν τη δυνατότητα δυναμικής μεταβολής των ιδιοτήτων τους ως προς τη διαπερατότητα από την ορατή, την υπέρυθρη (IR) και την υπεριώδη (UV) ακτινοβολία, με στόχο τον έλεγχο της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και, άρα, των ηλιακών προσόδων και της έντασης φυσικού φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων. Χωρίζονται σε ενεργητικούς και παθητικούς, με βάση το εάν η δυνατότητα μεταβολής της εμφάνισης και της λειτουργικότητάς τους απαιτεί ή όχι ηλεκτρικό ρεύμα. Ωστόσο, σημειώνεται ότι συνήθως οι έξυπνοι υαλοπίνακες αναφέρονται μόνο τα ενεργητικά συστήματα, τα οποία ενεργοποιούνται με ηλεκτρικό ρεύμα (Gauzy, 2023). Πρόκειται για τρεις βασικές κατηγορίες που περιλαμβάνουν (Gauzy, 2023 και Εικόνα 9.16):

- **Ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες (Electrochromic glazing – EC)** (ενεργητικά διαχωριστικά): Οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες θεωρούνται ενεργητικά συστήματα, αφού για τη λειτουργία τους απαιτείται εξωτερική πηγή ενέργειας (ηλεκτρισμός). Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο γεγονός ότι η απορροφητικότητα συγκεκριμένων υλικών μεταβάλλεται, όταν σε αυτά εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο. Όταν το κύκλωμα είναι κλειστό (εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος), οι υαλοπίνακες σκουραίνουν και η διαπερατότητά τους μειώνεται σε ποσοστά ανάμεσα στο 70% και το 15% (Baker et al., 1993, σ. 4.16) (για περισσότερα, βλ. και Δέτση, 2019 και Στυλιανού, 2023).
- Υαλοπίνακες αιωρούμενων σωματιδίων (Suspended Particle Device – SPD) και Υαλοπίνακες υγρών κρυστάλλων (Polymer Dispersed Liquid Crystal – PDLC): Σε αυτή την περίπτωση, τα μόρια ή τα σωματίδια διαχέονται ή ευθυγραμμίζονται με την εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος, επιτρέποντας τη διέλευση ή όχι του φωτός, καθώς και διαφορετικού μήκους κύματος ακτινοβολίας (ορατής, υπέρυθρης, υπεριώδους). Τα σωματίδια ή οι υγροί κρύσταλλοι περιλαμβάνονται ανάμεσα σε δύο στρώσεις διαφανούς υλικού που διαθέτει αγώγιμη επίστρωση ITO (Indium Tin Oxide – οξείδιο ινδίου-κασσιτέρου). Με την εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος, η επίστρωση αυτή προκαλεί την ευθυγράμμιση των μορίων ή των σωματιδίων, επιτρέποντας τη διαφάνεια, καθώς και τη δυνατότητα ρύθμισης (*dimming*) και με μόνη διαφορά ότι οι SPD δεν αποκτούν πλήρη αδιαφάνεια (Gauzy, 2023) (για περισσότερα, βλ. και Δέτση, 2019 και Στυλιανού, 2023).



Εικόνα 9.16 *Έξυπνοι υαλοπίνακες (smart glass). Αρχή λειτουργίας α. ηλεκτροχρωμικών (EC) υαλοπινάκων και β. υαλοπινάκων αιωρούμενων σωματιδίων (SPD) και υγρών κρυστάλλων (PDLC). Πηγή: Ίδια σχεδίαση, απόδοση και μετάφραση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) από Gauyzy (2023).*

Οι έξυπνοι υαλοπίνακες παθητικής λειτουργίας περιλαμβάνουν:

- **Θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες** (*Thermochromic glazing*): Οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες μεταβάλλουν τη διαπερατότητά τους (διαφάνεια) με παθητικό τρόπο σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες. (Baker et al., 1993, σ. 4.17). Με την αύξηση της θερμοκρασίας μετατρέπονται από διαφανείς σε γαλακτόχρωμους, περιορίζοντας την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και τον άμεσο φυσικό φωτισμό. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή στους υαλοπίνακες ειδικής θερμοτροπικής στρώσης (π.χ. hydrogel και πολυμερές), τα συστατικά της οποίας διαχωρίζονται πάνω από μία κρίσιμη θερμοκρασία (Ts, transition/switching temperature) καθιστώντας τη γαλακτόχρωμη και τη διαπερατότητα ημισφαιρική (διάχυτος φωτισμός) (βλ. Κεφ. 3, παρ. 3.2.2). Κάτω από τη δεδομένη θερμοκρασία, τα συστατικά αναμειγνύονται ομοιόμορφα, με αποτέλεσμα η επίστρωση και, κατά συνέπεια, το σύστημα υαλοπινάκων να είναι διαφανή (Allen et al., 2017).
- **Φωτοχρωμικούς υαλοπίνακες** (*Photochromic glazing*): Οι φωτοχρωμικοί υαλοπίνακες μεταβάλλουν τη διαπερατότητά τους (χρώμα ή διαφάνεια) ανάλογα με την ένταση του φωτός που προσπίπτει στην επιφάνειά τους. Πιο συγκεκριμένα, η διαπερατότητά τους μειώνεται όταν εκτίθενται σε υπεριώδη ακτινοβολία λόγω χημικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα, ενώ επανέρχεται στην αρχική της τιμή υπό συνθήκες σκότους. Αυτό επιτυγχάνεται με βαφές που περιέχουν οξείδια αλογόνων και διάφορα οργανικά ή ανόργανα συνθετικά υλικά (Δέτση, 2019 και Στυλιανού, 2023).

Βασική διαφορά μεταξύ των παθητικών και των ενεργητικών συστημάτων έξυπνων υαλοπινάκων είναι ο παράγοντας ενεργοποίησής τους. Τόσο οι θερμοχρωμικοί όσο και οι φωτοχρωμικοί υαλοπίνακες έχουν μειωμένη διαπερατότητα με την αύξηση της θερμοκρασίας και με την ποσότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, αντίστοιχα. Ανάλογα με το είδος και τη χρήση του κτιρίου, το γεγονός αυτό μπορεί να έρθει σε αντίθεση με τους στόχους του βιοκλιματικού σχεδιασμού για τις δύο βασικές περιόδους του έτους (την ψυχρή περίοδο –θέρμανσης– και τη θερμή περίοδο – δροσισμού). Έτσι, για παράδειγμα, ένα θερμοχρωμικό ή φωτοχρωμικό υαλοστάσιο με νότιο προσανατολισμό μπορεί κατά τους χειμερινούς μήνες να έχει μειωμένη διαπερατότητα, όταν, αντιθέτως, η εισροή ηλιακής ακτινοβολίας είναι επιθυμητή. Αυτό συμβαίνει λόγω της σχεδόν κάθετης πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών (μικρές γωνίες ηλιακού ύψους), οι οποίες αυξάνουν την επιφανειακή θερμοκρασία του υαλοπίνακα, καθώς και την προσπίπτουσα υπεριώδη ακτινοβολία. Αντίθετα, το ίδιο νότιο υαλοστάσιο θα δέχεται μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της θερμής, θερινής περιόδου λόγω μεγάλων γωνιών ηλιακού ύψους (βλ. και Κεφ. 2, παρ. 3.1.3). Συνεπώς, η επιλογή έξυπνων υαλοπινάκων παθητικής λειτουργίας πρέπει να μελετάται αρχικά σε σχέση με τον προσανατολισμό και στη συνέχεια με βάση τη λειτουργία και τις βιοκλιματικές απαιτήσεις του χώρου. Ταυτόχρονα, έχει τεκμηριωθεί ότι ειδικά οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες έχουν καλύτερα ενεργειακή απόδοση σε θερμότερα κλίματα, με κυρίαρχη περίοδο δροσισμού (Allen et al., 2017).

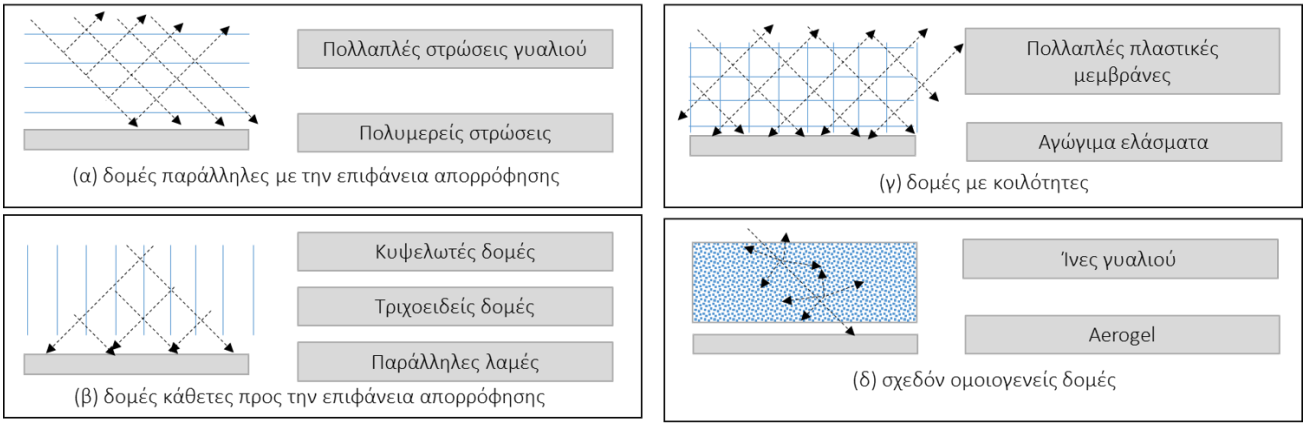
Τέλος, υαλοπίνακες με επαυξημένα χαρακτηριστικά ως προς τον φυσικό φωτισμό ή τη θερμομονωτική ικανότητα είναι οι παρακάτω:

- **Πρισματικοί υαλοπίνακες**: Οι πρισματικοί υαλοπίνακες κατασκευάζονται από γυαλί ή ακρυλικό (Εικόνα 9.14.γ). Στοχεύουν στην αλλαγή της διεύθυνσης τμήματος των ηλιακών ακτινών (μέσω διάθλασης και ανάκλασης), κι έτσι εξασφαλίζουν κυρίως διάχυτο φυσικό φωτισμό, εμποδίζοντας ταυτόχρονα τη θάμβωση (Baker et al., 1993, σ. 4.15). Στους πρισματικούς υαλοπίνακες, η διεύθυνση του εισερχόμενου φυσικού φωτός αλλάζει, καθώς διέρχεται από πρίσματα ή τριγωνικές σφήνες. Συνήθως, οι πρισματικοί υαλοπίνακες που ανακατευθύνουν το φως προς την οροφή έχουν δύο επιφάνειες πρισματικών πανέλων, τα οποία τοποθετούνται εσωτερικά με στόχο την προστασία τους από τη σκόνη (Στο ίδιο, σ. 5.57). Οι πρισματικοί υαλοπίνακες βελτιώνουν την κατανομή του φυσικού φωτισμού και μειώνουν τη θάμβωση, ενώ έχουν και παράπλευρα

πλεονεκτήματα από την εξοικονόμηση ενέργειας λόγω ηλιοπροστασίας· όταν όμως είναι σταθεροί, αποκλείουν τη θέα (Στο ίδιο).

- **Υαλοπίνακες με διαφανή θερμομόνωση (transparent insulation materials – TIMs)**: Οι υαλοπίνακες με διαφανή θερμομόνωση αποτελούνται συνήθως από υαλοπίνακες, μεταξύ των οποίων υπάρχουν διαφανή θερμομονωτικά υλικά (TIMs). Τα διαφανή θερμομονωτικά υλικά (TIMs) κατασκευάζονται συνήθως από πλαστικό, γυαλί και aerogel και κατηγοριοποιούνται με βάση τη γεωμετρία των στοιχείων τους σε σχέση με το σύστημα υαλοπινάκων (γυάλινες επιφάνειες/επιφάνειες απορρόφησης) σε (Wong et al., 2007):

    - (α) *Δομές παράλληλες με την επιφάνεια απορρόφησης*, που περιλαμβάνουν πολλαπλές στρώσεις από γυάλινα στοιχεία ή διαφανείς πλαστικές μεμβράνες (*films*). Η αύξηση του αριθμού των στρώσεων μειώνει τις απώλειες θερμότητας, αλλά ταυτόχρονα και τη διαπερατότητα και την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία (ηλιακή πρόσοδος).
    - (β) *Δομές κάθετες στην επιφάνεια απορρόφησης*, που περιλαμβάνουν συστοιχίες παράλληλων οριζόντιων στοιχείων (*slat arrays*), κυψελωτές ή τριχοειδείς, οι οποίες ανακλούν και διοχετεύουν την προσπίπτουσα άμεση ακτινοβολία προς την εσωτερική επιφάνεια.
    - (γ) *Δομές με κοιλότητες*, που αποτελούν συνδυασμό παράλληλων και κάθετων δομών και περιλαμβάνουν αγώγιμα διαπερατά ελάσματα ή πολλαπλές πλαστικές μεμβράνες, οι οποίες μειώνουν τις απώλειες θερμότητας με μεταφορά, ενώ διατηρούν περίπου την ίδια διαπερατότητα με ένα κάλυμμα πολλαπλών μεμβρανών.
    - (δ) *Σχεδόν ομοιογενείς δομές TIMs (Εικόνα 9.17),* οι οποίες κατασκευάζονται από ίνες γυαλιού ή aerogel και παρέχουν τόσο σκέδαση, όσο και απορρόφηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στην περίπτωση του aerogel, το σύστημα υαλοπινάκων είναι διαφανές, αφού η διάμετρος των πόρων του aerogel (περίπου 10-30 nm) είναι μικρότερο από το μήκος κύματος του φωτός (Baker et al., 1993, σ. 4.16).



Εικόνα 9.17 *Υαλοπίνακες με διαφανή θερμομονωτικά υλικά (TIMs) (smart glass). Πηγή: Ίδια σχεδίαση, απόδοση και μετάφραση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) από Wong et al. (2007) & Types of transparent insulation.jpg. (n.d.).*

Η εφαρμογή TIM στην εξωτερική θερμομόνωση του κελύφους των κτιρίων ξεκίνησε στα τέλη του 20ού αιώνα, λόγω των συνδυαστικών πλεονεκτημάτων της, που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της θερμομόνωσης (μείωση των θερμικών απωλειών) και της συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας (Wong et al., 2007· για περισσότερα, βλ. και IEA, 1998 και IEA, 1999). Σε αντίθεση με τα συμβατικά θερμομονωτικά υλικά, τα TIM διαθέτουν οπτικές ιδιότητες (ανακλαστικότητα, διαπερατότητα), οι οποίες συμβάλλουν στη μετάδοση της ηλιακής ενέργειας και στην εκμετάλλευσή της, τόσο για τον φυσικό φωτισμό (επαρκής ένταση και

ταυτόχρονη μείωση της θάμβωσης) όσο και την παθητική ηλιακή θέρμανση, με αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας για θέρμανση και φωτισμό χώρων στα κτίρια (Wong et al., 2007).

9.7.2 Ράφια φωτισμού (*light shelves*) και ανακλαστικές περσίδες

Τα ράφια φωτισμού (ή ηλιακά ράφια) ανήκουν, με βάση την ταξινόμηση που προηγήθηκε, στα στοιχεία ρύθμισης (βλ. παρ. 9.6). Αποτελούν ένα από τα πλέον απλά συστήματα διαχείρισης του φυσικού φωτισμού (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 156). Είναι επίπεδα ή καμπύλα στοιχεία που τοποθετούνται στα ανοίγματα πάνω από το επίπεδο του ματιού. Είναι σταθερά ή κινητά στοιχεία, επίπεδα ή καμπύλης γεωμετρίας, που μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα υλικά (μέταλλο, γυαλί κ.λπ.). Το βασικό τους στοιχείο είναι η ανώτερη, υψηλά ανακλαστική επιφάνεια, η οποία ανακλά κατοπτρικά ή διαχυτικά την προσπίπτουσα ακτινοβολία (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 157) στην επίσης υψηλής ανακλαστικότητας οροφή και μέσω αυτής προς το βάθος του χώρου. Ανακατευθύνουν το φυσικό φως με ανάκλαση, προστατεύοντας τους χρήστες από την άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.50). Με τον τρόπο αυτόν, εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή του φωτισμού, αυξάνοντας τη στάθμη του φωτισμού σε απομακρυσμένες από τα παράθυρα ζώνες, μειώνοντας παράλληλα τη στάθμη φωτισμού στη ζώνη των παραθύρων (ΚΑΠΕ, χ.ε.).

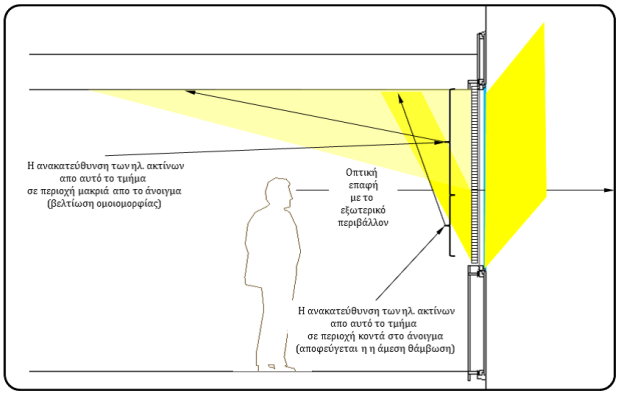
Ως προς τη σχέση τους με το άνοιγμα, τα ράφια φωτισμού μπορούν να είναι είτε εξωτερικά (Εικόνα 9.18.α) είτε εσωτερικά (Εικόνα 9.18.β), ή συνδυασμός των δύο. Τα εσωτερικά εκτείνονται από το επίπεδο του ανοίγματος προς το εσωτερικό του χώρου, ενώ τα εξωτερικά προς τα έξω. Χωρίζουν το άνοιγμα σε πλευρικό (βλ. παρ. 9.4.2) και φεγγίτη (βλ. παρ. 9.4.3), διαχωρίζοντας έτσι και τις λειτουργίες τους, με το κατώτερο τμήμα να προσφέρει θέα και επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και τον ανώτερο φυσικό φωτισμό και αερισμό (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.50). Το εξωτερικό τμήμα ενός ραφιού φωτισμού αυξάνει τα επίπεδα του φυσικού φωτισμού στον χώρο, ενώ το εσωτερικό μειώνει το φως που προέρχεται απευθείας από τον ουρανό (Sky Component – SC) και, άρα, βελτιώνει την ποιότητα του φυσικού φωτισμού. Ταυτόχρονα, η συνεισφορά των φωτιστικών ραφιών στις συνθήκες φυσικού φωτισμού ενός χώρου εξαρτάται και από ανάκλαση σε εσωτερικές επιφάνειες (Internally Reflected Component – IRC) και έχει μεγαλύτερη επίδραση σε χώρους με χαμηλή ανακλαστικότητα τοίχων (λόγω χρώματος ή παρουσίας επίπλων) (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.54). Ως προς την ηλιοπροστασία, λειτουργεί για τις μεγάλες γωνίες ηλιακού ύψους και άρα στον Νότο. Αντίθετα, δεν λειτουργούν για χαμηλές γωνίες ηλιακού ύψους και, άρα, για ανοίγματα με ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό, ενώ στον νότιο προσανατολισμό καλό είναι να μπορούν να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες γωνίες ηλιακού ύψους, αλλάζοντας την κλίση τους (Baker & Steemers, 2002, σ. 5.54).

Τα ράφια φωτισμού εφαρμόζονται κυρίως σε κτίρια όπου απαιτείται ομοιόμορφη κατανομή του φωτισμού και μείωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας κοντά στα ανοίγματα, όπως γραφεία και κτίρια εκπαίδευσης. Για την καλύτερη διεπoχική εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού, είναι προτιμότερο τα ράφια φωτισμού να έχουν τη δυνατότητα κίνησης. Έχουν δοκιμαστεί επίσης ανειδωλικά ράφια φωτισμού, των οποίων το προφίλ είναι τμήμα παραβολής και είναι ικανά να αυξήσουν τα επίπεδα φυσικού φωτισμού μακριά από το άνοιγμα, ιδίως σε περιπτώσεις που τοποθετούνται σε πυκνό αστικό περιβάλλον (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 159).



Εικόνα 9.18 *Ηλιακά ράφια.*
α. Εξωτερικά. Πηγή: Center for Sustainable Landscapes at Phipps Conservatory, Pittsburgh, Pennsylvania by Sage Ross, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
β. Εσωτερικά. Πηγή: Bronx Library Center, by Julian A. Henderson, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.

Οι ανακλαστικές περσίδες είναι κινητά ανακλαστικά στοιχεία, μικρού μεγέθους, που τοποθετούνται στην εσωτερική ή στην εξωτερική επιφάνεια του κουφώματος ή και μεταξύ διπλών κουφωμάτων. Ως σύστημα φυσικού φωτισμού λειτουργούν όπως και τα ράφια φωτισμού, ανακατευθύνοντας τις ηλιακές ακτίνες προς την επιθυμητή κατεύθυνση στον χώρο (κατά προτίμηση στην οροφή) (ΚΑΠΕ, χ.ε.). Εάν οι περσίδες είναι σταθερές, το σύστημα έχει μια εποχική επιλεκτικότητα (δηλαδή μεγαλύτερη είσοδο ηλιακής ενέργειας τον χειμώνα από το καλοκαίρι) (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 161). Οι κινητές περσίδες είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές, καθώς επιτρέπουν εύκολα τη ρύθμιση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (ΚΑΠΕ, χ.ε.). Η προαναφερθείσα απαίτηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση στατικών ανακλαστικών περσίδων και συγκεκριμένου προφίλ (καμπύλη τομής) (Τσαγκρασούλης, 2015, σ. 161).

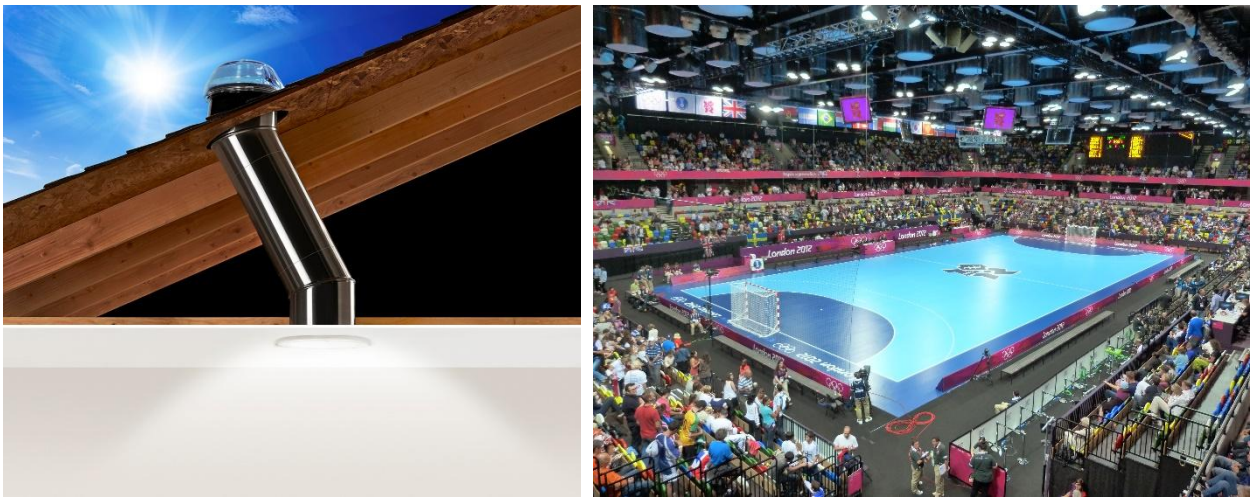


Εικόνα 9.19 *Διαχείριση ηλιακής ακτινοβολίας από το σύστημα σκίασης/φυσικού φωτισμού. Πηγή: Τσαγκρασούλης (2015, σ. 161).*

9.7.3 Φωταγωγοί και φωτοσωλήνες (*light ducts*)

Οι φωταγωγοί ανήκουν στους μεταβατικούς χώρους (παρ. 9.5.2) και συγκεκριμένα στους εσωτερικούς μεταβατικούς χώρους (*interior light spaces*). Πρόκειται για διατάξεις στην οροφή του κτιρίου που συλλέγουν το φυσικό φως και το ανακατευθύνουν προς το εσωτερικό του κτιρίου, συνήθως παθητικά (Εικόνα 9.20). Τα βασικά τους στοιχεία είναι ένας διαφανής θόλος ή πρίσμα (*cupola*), όπου πραγματοποιείται η συλλογή του ηλιακού φωτός, ο φωτοσωλήνας που κατασκευάζεται από εξαιρετικά ανακλαστικό υλικό (r = έως και 99,5%) και επιτυγχάνει την ανάκλαση ηλιακού φωτός προς το εσωτερικό του κτιρίου και μια επιφάνεια διάχυσης, που προσφέρει ομοιόμορφη κατανομή ηλιακού φωτός στο εσωτερικό (Ander, 1995, σ. 19).

Οι φωτοσωλήνες έχουν στόχο τον φυσικό φωτισμό των κατώτερων ορόφων πολυώροφων κτιρίων ή της κεντρικής περιοχής κτιρίων με βαθιά κάτοψη. Έχουν συνήθως μικρή, τετράγωνη ή κυκλική διατομή (με πλευρά ή διάμετρο από 0,50 μ. έως 2,0 μ.) και εσωτερικά φέρουν στιλπνή και ισχυρά ανακλαστική επικάλυψη (π.χ. καθρέπτη, στιλβωμένες μεταλλικές επιφάνειες ή πολύ στιλπνές βαφές), με στόχο την επίτευξη της υψηλότερης δυνατής ανακλαστικότητας. Το μήκος τους μπορεί να είναι έως 10-15 μ. (Lechner, 1991 στο Αξαρλή, 2001, σ. 233).



Εικόνα 9.20 *Φωτοσωλήνες.*
α. Σχηματική απεικόνιση. Πηγή: Solatube Daylighting System by Mimi Kotter via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
β. Εφαρμογή στο Copper Box Arena, Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο. Πηγή: Copper Box interior by Delusion23 via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.

9.8 Φυσικός φωτισμός και κατανάλωση ενέργειας

Με βάση όλα τα στοιχεία που προαναφέρθηκαν, είναι σαφές ότι ο φυσικός φωτισμός επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας, άμεσα και έμμεσα. Άμεσα, καθαρά ως προς τον φωτισμό, καθώς το φυσικό φως αντικαθιστά τμήμα της ηλεκτρικής ενέργειας που δαπανάται για τον τεχνητό φωτισμό των χώρων. Η έμμεση επίδραση αφορά τον βιοκλιματικό σχεδιασμό κατά τη διάρκεια του έτους. Ως προς τη θερμομονωτική ικανότητα του κελύφους, οι μεγαλύτερες επιφάνειες υαλοστασίων που έχουν στόχο την εκμετάλλευση του φυσικού φωτός συνήθως έχουν υψηλότερο συντελεστή θερμοπερατότητας (K/U-value) και, άρα, συνεπάγονται περισσότερες θερμικές απώλειες τον χειμώνα και θερμικές προσόδους το καλοκαίρι. Ως προς την ηλιακή ακτινοβολία, μέσω των μεγαλύτερων επιφανειών των υαλοστασίων αυξάνεται η άμεση ηλιακή ακτινοβολία, η οποία τον χειμώνα είναι επιθυμητή, καθώς συμβάλλει στην παθητική ηλιακή θέρμανση των χώρων και άρα στην εξοικονόμηση ενέργειας, ενώ το καλοκαίρι είναι ανεπιθύμητη, καθώς προκαλεί υπερθέρμανση και, συνεπώς, αύξηση των ψυκτικών φορτίων και της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας για ψύξη.

Ο τεχνητός φωτισμός μπορεί να σχεδιαστεί για μια συγκεκριμένη τιμή φωτισμού και ποιότητα, όμως ο φυσικός φωτισμός έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα (Majoros, 1998, σ. 3):

- Η ποιότητα του φυσικού φωτισμού είναι καλύτερη, παρόλο που είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη, καθώς η όραση έχει αναπτυχθεί σε συνθήκες φυσικού φωτισμού.
- Η ποσότητα του φυσικού φωτισμού παρέχει υψηλότερες τιμές φωτισμού σε σχέση με αυτές που επιτυγχάνονται με τον τεχνητό, τουλάχιστον κατά τη διάρκεια της ημέρας, για ένα σημαντικό μέρος του χρόνου. Σε ένα δωμάτιο μπορεί να υπάρχουν επίπεδα της τάξης των 1000

lux ή περισσότερο, εκεί όπου ο φωτισμός από τον ηλεκτρισμό μπορεί να φτάσει μέχρι 200-300 lux.

- Ο φυσικός φωτισμός παρέχεται από μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, τον ήλιο και είναι η πιο προφανής και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική.
- Καλά σχεδιασμένος φυσικός φωτισμός μπορεί να καλύψει τις απαραίτητες ανάγκες φωτισμού στο 80-90% των ωρών της ημέρας, επιτρέποντας έτσι την εξοικονόμηση σημαντικών ποσών συμβατικής ενέργειας για τεχνητό φωτισμό.
- Η συνεχής μεταβολή της ποσότητας του φυσικού φωτισμού (αρκεί να μην είναι πολύ αυξημένη) είναι επιθυμητή, καθώς έχει αναζωογονητικό αποτέλεσμα.
- Επαρκής ή γενναιόδωρη παροχή φυσικού φωτισμού στα κτίρια μπορεί να αυξήσει την εμπορική τους αξία.

9.8.1 Τεχνητός φωτισμός

Ο τεχνητός φωτισμός παίζει σημαντικό ρόλο στις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό των κτιρίων. Η επιλογή του συστήματος τεχνητού φωτισμού και η σχέση του με τον φυσικό φωτισμό σχετίζονται άμεσα με την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου (Baker et al., 1993, σ. 6.1) και την κατανάλωση συμβατικής ενέργειας όχι μόνο για τον φωτισμό, αλλά εμμέσως, όπως προαναφέρθηκε, και για τη θέρμανση ή τον δροσισμό. Ο σχεδιασμός του τεχνητού φωτισμού αφορά (Baker et al., 1993, σ. 6.1):

- τη στρατηγική που αναφέρεται σε γενικό φωτισμό (*general*), τοπικό φωτισμό (*localised*) και εστιασμένο φωτισμό (*task lighting*),
- τον τύπο των λαμπτήρων που μπορεί να είναι πυράκτωσης, φθορισμού ή LED και περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά τους (χρώμα, απόδοση, κύκλος λειτουργίας, έλεγχος, κόστος, συντήρηση κ.λπ.),
- τον τύπο των φωτιστικών που επηρεάζουν την κατανομή του φωτός, την απόδοση του συστήματος, την ασφάλεια, τη στιβαρότητα, την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής.

Στη συνέχεια, λαμβάνονται πιο συγκεκριμένες αποφάσεις και πραγματοποιούνται λεπτομερείς υπολογισμοί που αφορούν τους λαμπτήρες και τον μηχανισμό ελέγχου τους, τα φωτιστικά και τον τρόπο στερέωσης και τοποθέτησής τους και τον εξοπλισμό ελέγχου του τεχνητού φωτισμού (Baker et al., 1993, σ. 6.1).

9.8.2 Σύζευξη φυσικού και τεχνητού φωτισμού

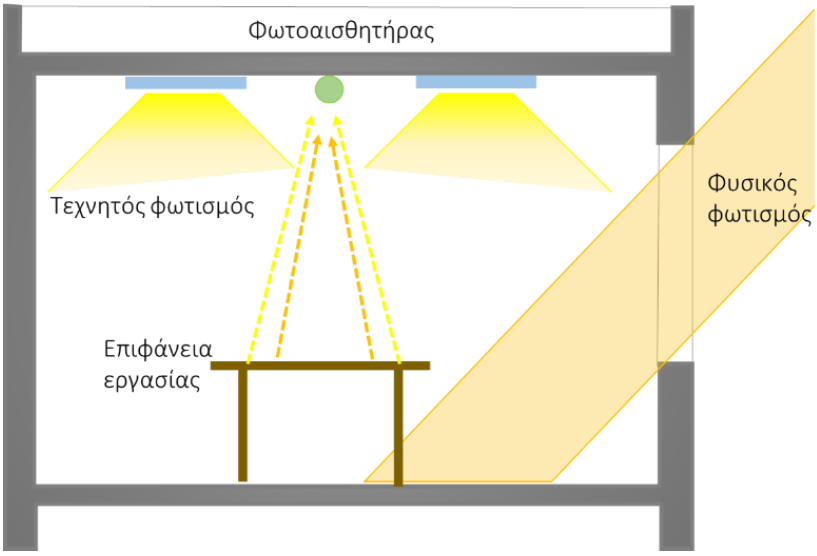
Η αντικατάσταση του τεχνητού φωτισμού από τον φυσικό μπορεί να αποφέρει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας (της τάξης του 30-70%) όταν η ένταση των λαμπτήρων αυξομειώνεται σε σχέση με τα διαθέσιμα επίπεδα φυσικού φωτισμού στον χώρο (Μερέση, 2010, σ. 32). Κάθε χώρος του οποίου τουλάχιστον ο μισός φωτισμός οφείλεται στο φυσικό φως για αρκετές ώρες της ημέρας, συμφέρει να ελέγχεται από σύστημα σύζευξης φυσικού/τεχνητού φωτισμού (βλ. ενδεικτικά Εικόνα 9.21) (Μερέση, 2010, σ. 33). Τα συστήματα ελέγχου που βασίζονται σε αυτή τη σύζευξη λειτουργούν με φωτοκύτταρο (φωτο-αισθητήρα), που ανιχνεύει τα επίπεδα φυσικού φωτισμού και στέλνει το ανάλογο σήμα στη μονάδα ελέγχου (*controller*), η οποία αυξομειώνει την ένταση των λαμπτήρων ή τους αναβοσβήνει (Μερέση, 2010, σ. 32).

Η σύζευξη φυσικού και τεχνητού φωτισμού μπορεί να επιτευχθεί με τα παρακάτω συστήματα (ΚΑΠΕ, χ.ε. (β):

- *Συστήματα έναυσης/σβέσης (on/off)*: Είναι συστήματα που ανάβουν και σβήνουν τα φώτα, ανάλογα με την προκαθορισμένη απαιτούμενη ποσότητα φωτισμού. Σε χώρους που δεν έχουν επαρκή φυσικό φωτισμό, το σύστημα αυτό δεν ενδείκνυται, καθώς μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα συχνή έναυση/σβέση. Ταυτόχρονα, καλό είναι, όταν εφαρμόζεται, να

προβλέπεται κάποια χρονική υστέρηση, στις περιπτώσεις ενδιάμεσου ουρανού (ηλιοφάνειας με περαστικά σύννεφα).

- *Βηματικά συστήματα*: Είναι ίδια με τα συστήματα έναυσης/σβέσης, αλλά με μία ή δύο ενδιάμεσες θέσεις μεταξύ των θέσεων έναυσης και σβέσης.
- *Συστήματα ρύθμισης φωτεινής ροής (dimming)*: Τα συστήματα αυτά εξασφαλίζουν ότι η συνολική ποσότητα φυσικού και τεχνητού φωτισμού θα είναι ίση με την προκαθορισμένη απαιτούμενη ποσότητα φωτισμού και, όταν υπάρχει επάρκεια φυσικού φωτισμού, η συνεισφορά του τεχνητού φωτισμού θα μηδενίζεται.



Εικόνα 9.21 *Σύζευξη φυσικού και τεχνητού φωτισμού. Πηγή: Απόδοση και ανασχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) από Μερέση (2010, σ. 32).*

Τα συστήματα σύζευξης φυσικού και τεχνητού φωτισμού λειτουργούν με φωτοκύτταρο, το οποίο τοποθετείται είτε εξωτερικά είτε σε θέση που να βλέπει έξω από το παράθυρο, ώστε να δέχεται μόνο φυσικό φως. Μπορεί να τοποθετηθεί και μέσα στον χώρο, ώστε να μετρά τον συνολικό φωτισμό (φυσικό και τεχνητό). Σε αυτή την περίπτωση, ένας φωτοηλεκτρικός αισθητήρας μπορεί να ελέγχει ομάδα φωτιστικών ή να είναι τοποθετημένος σε μεμονωμένο φωτιστικό και να ελέγχει μόνο αυτό.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Allen, K., Connelly, K., Rutherford, P. & Wu, Y. (2017). Smart windows—Dynamic control of building energy performance. *Energy and Buildings, 139*, 535-546. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.093

Ander, G. (1995). *Daylighting performance and design*. Van Nostrand Reinhold.

Baker, N. & Steemers, K. (2002). *Daylight design of buildings*. London: James & James (Science Publishers) Ltd.

Baker, N. Fanchiotti, A. & Steemers, K. (Eds). (1993). *Daylighting in Architecture. A European Reference Book*. Brussels and Luxemburg: Commission of the European Communities, Directorate-General XII for Science, Research and Development.

Boyce, P., Hunter, C. & Howlett, O. (2003). *The Benefits of Daylight through Windows*. Lighting Research Center. Rensselaer Polytechnic Institute.

CIE Sky Generator by © Dr. Andrew J. Marsh, 2020, CC BY-NC-SA 4.0

CLEAR, Comfortable Low Energy Architecture (2004). *Sky types.* Διαθέσιμο στο: https://www.new-learn.info/packages/clear/visual/daylight/sun_sky/sky_types.html, GFDL

Commission International d' Eclairage – CIE. http://www.cie.co.at/

Fontoynont, M. (2002). Perceived performance of daylighting systems: lighting efficacy and agreeableness. *Solar Energy. 73*(2). 83-94. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00035-X

Gauzy. (2023, February 17). Smart Glass - Everything you want to know. https://www.gauzy.com/smart-glass-everything-you-want-to-know/

Hartman, P., Maňková, L. & Hanuliak, P. (2016). The Effect of Colored Surfaces and Tinted Window Glazing on Daylight Spectral Characteristics and Illuminance Levels in Deep Space Rooms and its Evaluation for Human Visual and Biological Response. *Applied Mechanics and Materials* (824). 715-723. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.824.715

International Energy Agency (IEA) (1998). *Solar Renovation Concepts and Systems. A Report of Task 20 Subtask F. Improvement of Solar Renovation Concepts and Systems* https://task20.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/task20-solar_renovation_concepts_and_systems-full.pdf

International Energy Agency (IEA) (1999). *Solar Renovation Demonstration Projects. A Technical Report of IEA Solar Heating and Cooling. Task 20 Subtask C. Design of Solar Renovation Project.* https://task20.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/task20-Solar_Renovation_Demonstration_Projects.pdf

Majoros, A. (1998). *PLEA Note 4: Daylighting.* Διαθέσιμο στο: http://www.plea-arch.org/wp-content/uploads/PLEA-Note-4-Daylighting-lowre.pdf

McNicholl, A. & Lewis, J. O. (1994). *Daylighting in Buildings.* The European Commission. Directorate-General for Energy (DGXVII).

Sun, Y. (2017). *Glazing system with transparent insulation material for building energy saving and daylight comfort.* [PhD thesis, University of Nottingham]. https://www.researchgate.net/publication/316086402_Glazing_system_with_transparent_insulation_material_for_building_energy_saving_and_daylight_comfort

Surface Reflectance by © Dr. Andrew J. Marsh, 2020, CC BY-NC-SA 4.0

Types of transparent insulation.jpg. (n.d.). https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/File:Types_of_transparent_insulation.jpg#filehistory

Wong, I. L., Eames, P. C. & Perera, R. S. (2007). A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications. Solar Energy, *81*(9), 1058-1071. https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.004

Αξαρλή, Κ. (2001). Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης της ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό – Η συμβολή του φυσικού φωτισμού. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου* (σσ. 155-252). Πάτρα: Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Αραβαντινός, Α. (2015). «Φυσική Οπτική (Ε). Ενότητα 5: Φωτομετρικά μεγέθη – πολική κατανομή φωτοβολίας». Έκδοση: 1.0. Διαθέσιμο στο: https://tinyurl.com/2eauwytb, CC BY-NC-SA 4.0

Δέτση, Μ.-Π. (2019). *Ενεργειακή προσομοίωση θερμοχρωμικών και ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων σε κτίριο γραφείων με μεγάλη εξωτερική γυάλινη επιφάνεια* [Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ]. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.17387

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), (χ.ε.). Τεχνητός φωτισμός. Συστήματα ελέγχου. Διαθέσιμο στο: http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/texnitos_fotismos_systymata_elegxou.htm

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), (χ.ε.). Φυσικός φωτισμός. Ράφια φωτισμού – Ανακλαστήρες, περσίδες. Διαθέσιμο στο: http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/fysikos_fotismos_rafia_fotismou.htm

Μερέση, Α. (2010). Εξοικονόμηση ενέργειας στη σχολική αίθουσα μέσω του φυσικού φωτισμού. [Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών]. Aristotle University of Thessaloniki – ΙΚΕΕ. https://ikee.lib.auth.gr/record/124686/files/GRI-2010-5866%20.pdf

Στυλιανού, Μ. (2023). *Έξυπνα υλικά: το μέλλον της βιώσιμης αρχιτεκτονικής*. [Διάλεξη 9ου εξαμήνου, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ]. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.25917

Τσαγκρασούλης, Ά. (2015). *Φυσικός Φωτισμός* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-443

Κεφάλαιο 10

Βιοκλιματικός σχεδιασμός και διαχείριση υπαίθριων χώρων

Σύνοψη
Οι πόλεις τροποποιούν τις συνθήκες του μακροκλίματος και μεσοκλίματος, σε έναν ιδιαίτερο τύπο που αναφέρεται ως αστικό μικροκλίμα και σε συνδυασμό με τις συνθήκες ρύπανσης και το σύνολο των περιβαλλοντικών παραμέτρων συντελούν στη δημιουργία του αστικού οικοσυστήματος. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι στρατηγικές βιοκλιματικού σχεδιασμού υπαίθριων χώρων και αναλύονται οι βασικότερες, που είναι η χρήση ανοιχτόχρωμων υλικών, ο σκιασμός και ο δροσισμός με εξάτμιση.

Προαπαιτούμενη γνώση
Κεφάλαια 2, 4, 5 και 8 του παρόντος συγγράμματος και βασικές γνώσεις Φυσικής.

10.1 Αστικό οικοσύστημα

Η μόλυνση, οι αρρώστιες και η πόλη είναι συνδεδεμένες από τα αρχαία χρόνια. Αυτοκίνητα, εργοστάσια και μονάδες παραγωγής ενέργειας, καυστήρες και βιομηχανίες μολύνουν και θερμαίνουν τον αέρα. Η πυκνή δόμηση παρεμποδίζει τον άνεμο και αποτρέπει τον διασκορπισμό των ρύπων και της ζέστης. Από την άλλη, οι «κοιλάδες» και τα «φαράγγια» που δημιουργούν οι δρόμοι παγιδεύουν τους ρύπους. Η πέτρα και το μπετόν απορροφούν τη θερμότητα την ημέρα και την επανεκπέμπουν το βράδυ. Όλες αυτές οι παράμετροι παράγουν το αστικό κλίμα που διαφέρει σημαντικά από αυτό της εξοχής. Οι αστικές λειτουργίες, η μορφή, τα υλικά και ο τρόπος με τον οποίο συνδυάζονται είναι υπεύθυνοι για τη μεγάλη ποικιλία μικροκλιμάτων (μωσαϊκά μικροκλιμάτων) και για τον βαθμό της μόλυνσης από σημείο σε σημείο μέσα στην πόλη (Αλεξάνδρου, 2013β).

Ακόμα και σε ημέρες με καλές συνθήκες και καθαρό ουρανό, οι αέριοι ρύποι και η σκόνη (αιωρούμενα σωματίδια), στα πεζοδρόμια και στις παιδικές χαρές μέσα στην πόλη, μπορεί να φτάσουν σε υψηλά επίπεδα. Το καλοκαίρι η ζέστη προστίθεται σε αυτή την κατάσταση και, σε συνδυασμό με τον ανεπαρκή αερισμό, δημιουργεί συνθήκες ιδιαίτερα επιβαρυντικές για την υγεία των κατοίκων. Είναι γνωστό ότι ειδικά οι πυκνοκατοικημένες περιοχές έχουν πιο ψηλές θερμοκρασίες και ανεπαρκή φυσικό αερισμό απ’ ό,τι η ύπαιθρος που περιβάλλει την πόλη. Ο επαρκής αερισμός, οι κατάλληλοι χειρισμοί κίνησης των οχημάτων και, τέλος, η διαμόρφωση των δρόμων σε συνδυασμό με τη φύτευση μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις συνθήκες αυτές (Στο ίδιο).

Η διείσδυση των τοπικών ανέμων στο εσωτερικό και στα χαμηλότερα επίπεδα μιας πόλης εξαρτάται από τον προσανατολισμό και τη συνέχεια των ανοιχτών χώρων και των δρόμων. Οι άνεμοι επιταχύνονται στους δρόμους που έχουν διεύθυνση παράλληλη με τη δική τους. Στους δρόμους με μεγάλη και αργή κίνηση παράγεται περισσότερη μόλυνση απ’ ό,τι σε έναν δρόμο με συνεχή ροή. Ένας μακρύς και όχι ιδιαίτερα πλατύς δρόμος (street canyon) που ορίζεται από ψηλά κτίρια παράγει υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων και, επιπλέον, αποτρέπει τον διασκορπισμό τους (βλ. Κεφ. 2, παρ. 2.8.1). Η απόσταση των κτιρίων, λοιπόν, από τον δρόμο και ο αερισμός καθορίζουν τον βαθμό μόλυνσης. Οι κάθετοι προς τις μεγάλες κεντρικές αρτηρίες δρόμοι έχουν περιορισμένο αερισμό λόγω της σχέσης τους με αυτές. Για τον λόγο αυτόν, η φύτευσή τους μπορεί να ενισχύσει τον αερισμό τους. Αντίθετα, οι μεγάλες σε πλάτος και μικρές σε μήκος οδικές αρτηρίες βοηθούν στον διασκορπισμό των ρύπων και στην καλή κίνηση του αέρα (Στο ίδιο).

Η πόλη αποτελεί ένα σύστημα που συνίσταται από γη, νερό, φυτά, αλλά και ανθρώπινες κατασκευές, δομημένες με φυσικά και τεχνητά υλικά (Εικόνα 10.1). Η διαδραστική σχέση ανάμεσα στις ανθρώπινες δραστηριότητες και στο φυσικό περιβάλλον διαμορφώνει το αστικό οικοσύστημα, ένα ανοιχτό σύστημα πολύ διαφορετικό από αυτό που υπήρχε πριν από την ανθρώπινη παρέμβαση και το οποίο διατηρείται με τη συνεχή εισαγωγή ενέργειας και υλικών, ενώ παράγει τόνους αποβλήτων. Η άτακτη και συνεχής επέκταση της πόλης, καθώς και η αύξηση της πυκνότητάς της επιφέρουν αλλαγές στον αέρα, στη γη, στο νερό, στη χλωρίδα και στην πανίδα της, και δημιουργούν περιβαλλοντικά προβλήματα που επιδρούν στην υγεία, στην ευεξία και στην άνεση (θερμική, οπτική, ακουστική) των κατοίκων της. Πιο ειδικά, η δράση των κατοίκων, η λειτουργία των κτιρίων (θέρμανση-ψύξη) και η καύση υγρών και στερεών καυσίμων αλλάζουν δραστικά το κλίμα μιας περιοχής και μολύνουν την ατμόσφαιρά της. Οι βασικές αλλαγές είναι ορατές στη γεωμορφολογία, στον υδρολογικό κύκλο (ρέματα, ποτάμια κ.λπ., μόλυνση των υδάτων, του υδροφόρου ορίζοντα και του εδάφους), αλλαγές στη χλωρίδα κ.λπ. Ο τόπος, δηλαδή, χάνει τα φυσικά χαρακτηριστικά του (Αλεξάνδρου, 2013α).



Εικόνα 10.1 *Το αστικό οικοσύστημα. Πηγή: Aerial photography of concrete roads, Photo by Denys Nevozhai on Unsplash.*

10.2 Βιοκλιματικός σχεδιασμός υπαίθριων χώρων

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός υπαίθριων χώρων πρέπει να έχει, μεταξύ άλλων, και τους παρακάτω στόχους (Αλεξάνδρου, 2013α):

- τη βελτίωση του μικροκλίματος,
- τον περιορισμό της μόλυνσης (μείωση των αποβλήτων εκπομπών και ρύπων),
- τη μείωση της καταναλισκόμενης μη ανανεώσιμης ενέργειας,
- τη βιωσιμότητα των παρεμβάσεων αυτών και την ευζωία των κατοίκων.

Οι επεμβάσεις προς αυτή την κατεύθυνση πρέπει να γίνονται με χειρονομίες που βελτιώνουν παραπάνω από μία καταστάσεις (π.χ. ρύπανση, υπερθέρμανση κ.λπ.). Όταν τμήματα του αστικού οικοσυστήματος σχεδιάζονται για να καλύψουν πάνω από μία λειτουργία, μπορεί να εξοικονομηθεί και να διατηρηθεί ενέργεια. Επίσης, η ομαδοποίηση περιοχών με κοινά δομικά χαρακτηριστικά και περιβαλλοντικά ή λειτουργικά προβλήματα βοηθά στη συστηματοποίηση επεμβάσεων σε αυτές.

Οι επεμβάσεις αυτές σχετίζονται με τα παρακάτω στοιχεία, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- τα υλικά επικάλυψης των επιφανειών,
- τον σκιασμό,
- τα στοιχεία νερού (δροσισμός με εξάτμιση),
- τις φυτεύσεις/πράσινο.

10.3 Υλικά επικάλυψης επιφανειών

Τα υλικά επικάλυψης των όψεων και των στεγάσεων των κτιρίων, καθώς και των υπαίθριων χώρων αποτελούν την επιδερμίδα της πόλης. Η σωστή επιλογή τους μπορεί να βελτιώσει σημαντικά το φαινόμενο της αστικής νησίδας θερμότητας και τη θερμική άνεση των κατοίκων της πόλης (Αλεξάνδρου, 2013β).

Βασικό κριτήριο επιλογής υλικών για επικαλύψεις υπαίθριων χώρων (όπως πεζοδρόμια, ποδηλατόδρομοι, πλατείες, χώροι στάθμευσης, πρασιές κ.λπ.) πρέπει να είναι η χρήση και οι μηχανικές καταπονήσεις που δέχονται, καθώς και η γεωμετρία του δομημένου περιβάλλοντος. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες (Στο ίδιο):

- Τα ψυχρά (*cool pavements*), με μεγάλη ανακλαστικότητα (ανοιχτόχρωμα υλικά) ή μεγάλης ανακλαστικότητας και με υψηλό συντελεστή εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας.
- Τα διαπερατά (*permeable pavements*), που επιτρέπουν τη διείσδυση του νερού, μειώνοντας έτσι την επιφανειακή τους θερμοκρασία, ενώ απορροφούν μεγάλη ποσότητα όμβριων υδάτων.

10.3.1 Ανοιχτόχρωμα υλικά

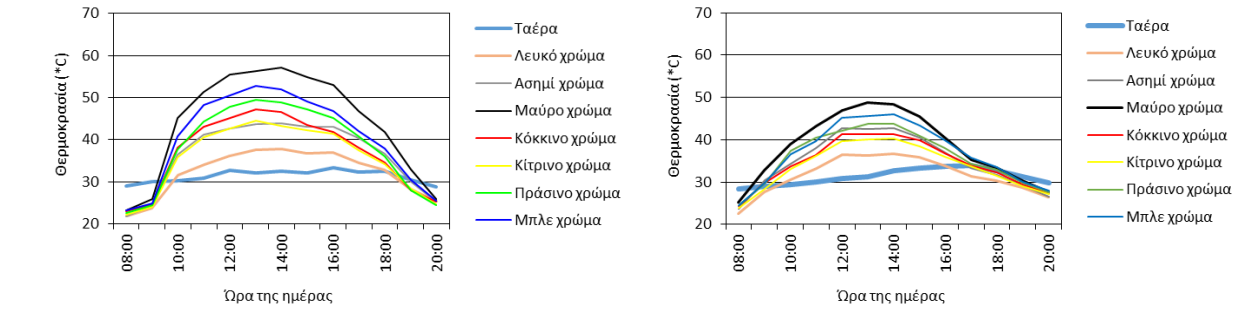
Η χρήση ανοιχτόχρωμων υλικών στους υπαίθριους χώρους και στο κέλυφος των κτιρίων μειώνει την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από αυτά. Η αύξηση της ανακλαστικότητας μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή ανοιχτόχρωμων υλικών στις υφιστάμενες επιφάνειες των όψεων των κτιρίων. Η χρήση του χρώματος για τη μείωση των θερμοκρασιών στις επιφάνειες των υλικών που είναι εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί μια από τις πιο συνηθισμένες πρακτικές (Εικόνα 10.3.α). Λόγω της αυξημένης ανακλαστικότητάς τους, τα ανοιχτόχρωμα υλικά παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες σε σχέση με τα αντίστοιχα σκουρόχρωμα. Οι διαφορές αυτές μπορεί να φτάνουν έως και τους 20^{o} C για κάποιες ομάδες υλικών (Εικόνα 10.2) (Μπουγιατιώτη, 2007).

Η εφαρμογή ανοιχτόχρωμων υλικών στους αστικούς υπαίθριους χώρους έχει παράλληλα πλεονεκτήματα. Έτσι, σε στενούς δρόμους, όπου η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται για περιορισμένες ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας, η χρήση ανοιχτόχρωμων υλικών σε όψεις κτιρίων, οδόστρωμα και πεζοδρόμια μπορεί να αυξήσει τα επίπεδα φυσικού φωτισμού, τόσο στον ίδιο τον δρόμο/αστική χαράδρα όσο και στο εσωτερικό των κτιρίων που τον ορίζουν (Εικόνα 10.3). Το γεγονός αυτό μπορεί να έχει και πιθανά ψυχολογικά οφέλη (Γιάννας, 2001).

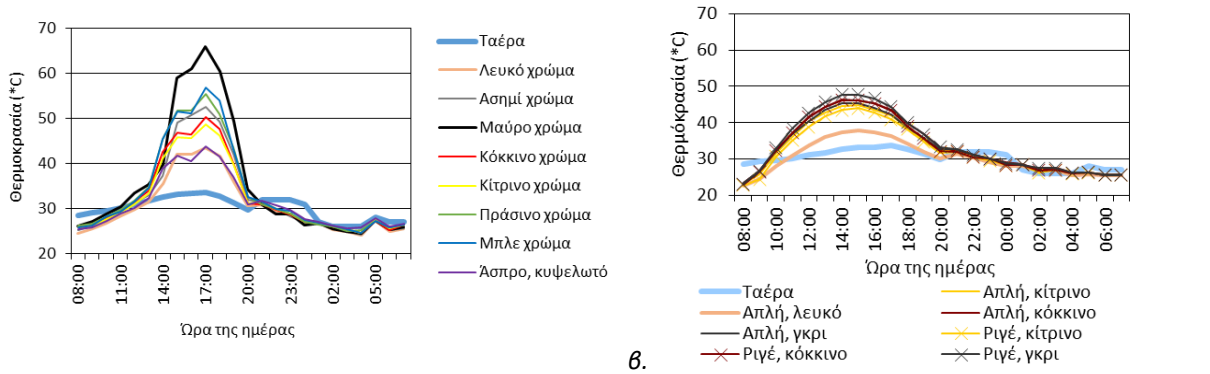
Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή ανοιχτόχρωμων υλικών υπόκειται σε περιορισμούς, οι οποίοι είναι κυρίως οικονομικοί και περιβαλλοντικοί, όταν πρόκειται για υφιστάμενες κατασκευές. Η απλή εφαρμογή βαφής είναι σχετικά εύκολη (νέο στρώμα χρώματος), σε αντίθεση με την αντικατάσταση των υλικών από νέα ανοιχτόχρωμα, που συνεπάγεται και σημαντική παραγωγή οικοδομικών απορριμμάτων.

Στα πιθανά μειονεκτήματα της εφαρμογής ανοιχτόχρωμων υλικών περιλαμβάνεται η πρόκληση θάμβωσης, ιδιαίτερα σε χώρους όπου δεν υπάρχει σκιασμός. Ωστόσο, το πρόβλημα της θάμβωσης μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση διατάξεων σκιασμού ή τη χρήση υλικών με αδρή επιφάνεια. Από την άλλη μεριά, ιδιαίτερα σε δάπεδα με μεγάλη χρήση και συνεπαγόμενη φθορά, όπως πεζοδρόμια, πεζόδρομους ή πλατείες, μπορεί να επέλθει απώλεια ανακλαστικότητας. Η απώλεια της ανακλαστικότητας των ανοιχτόχρωμων υλικών είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αύξηση των επιφανειακών θερμοκρασιών τους, ωστόσο, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, τα φθαρμένα ανοιχτόχρωμα υλικά παρουσιάζουν χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες από εκείνα που ήταν εξαρχής σκουρόχρωμα.

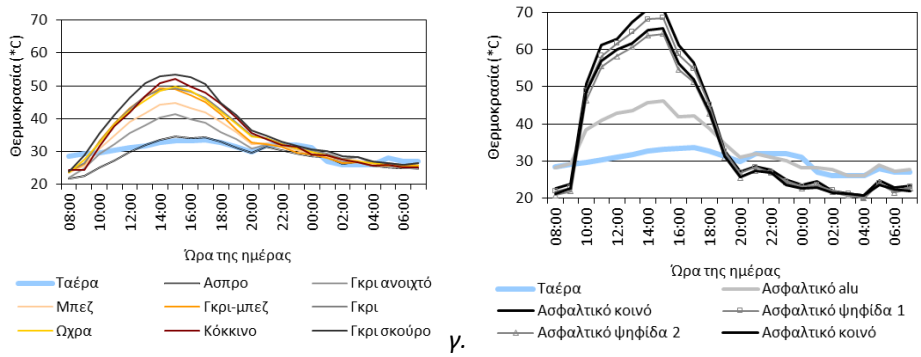
Τέλος, σημαντικά στοιχεία ως προς την εφαρμογή των ανοιχτόχρωμων υλικών αποτελούν τα κριτήρια και οι αρχές σχεδιασμού που καθορίζουν και την αρχιτεκτονική έκφραση, στο πλαίσιο του αρχιτεκτονικού και αστικού σχεδιασμού.



α.



β.



γ.

Εικόνα 10.2 *Το χρώμα ως καθοριστική παράμετρος των επιφανειακών θερμοκρασιών των υλικών. Μετρήσεις σε δείγματα υλικών. α. Πάνελ αλουμινίου – οριζόντια θέση, νότιος προσανατολισμός, δυτικός προσανατολισμός β. Πλάκες πεζοδρομίου από τσιμέντο και γ. Ασφαλτικές μεμβράνες. Πηγή: Μπουγιατιώτη (2007).*



α. β. γ.

Εικόνα 10.3 *Παραδείγματα υπαίθριων χώρων με κυρίαρχη χρήση ανοιχτών χρωμάτων. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (α. Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη, β. & γ. Ε. Αλεξάνδρου).*
α. Παραδοσιακοί οικισμοί. Πύργος, Σαντορίνη.
β. Πλατεία Κορυζή, Φιλοθέη.
γ. Τούνελ με λευκό χρώμα στο οδόστρωμα και τα τοιχώματα, για την αύξηση της φωτεινότητας.

10.3.2 Ψυχρά υλικά (*cool materials*)

Τις τελευταίες δεκαετίες, εναλλακτική λύση στη χρήση των ανοιχτόχρωμων υλικών αποτελούν τα ψυχρά υλικά. Ως ψυχρά, ορίζονται «υλικά λευκά ή έγχρωμα τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν τόσο στο κέλυφος του κτιρίου όσο και σε άλλες επιφάνειες του αστικού δομημένου περιβάλλοντος (π.χ. σε χώρους στάθμευσης, πεζοδρόμια) για τη μείωση της αναπτυσσόμενης επ' αυτών θερμοκρασίας. Τα ψυχρά υλικά χαρακτηρίζονται από υψηλή ανακλαστικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία και από υψηλό συντελεστή εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας (εκλύουν γρηγορότερα τα ποσά θερμότητας που έχουν απορροφήσει). Με την εφαρμογή τους εξασφαλίζονται χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες συγκριτικά με άλλα υλικά επιστρώσεων» (ΠΕΤΕΠ 03-11-20-00).

Με βάση τα παραπάνω, τα ψυχρά υλικά θεωρούνται ότι έχουν (Santamouris et al., 2011):

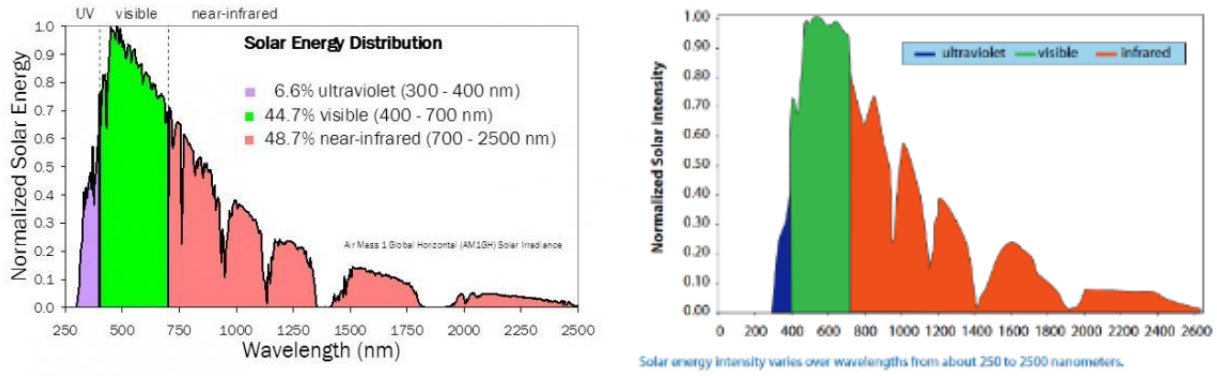
- υψηλό συντελεστή ανακλαστικότητας στην ηλιακή ακτινοβολία (βλ. Κεφ.5, παρ. 5.2),
- υψηλή ανακλαστικότητα στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου (Near Infra-Red – NIR) του ηλιακού φάσματος,
- υψηλή εκπομπή στην περιοχή του υπέρυθρου (μεγάλο μήκος κύματος),
- συνδυάζουν και τις δύο παραπάνω ιδιότητες.

Για τα ψυχρά υλικά ορίζεται κι ένας επιπλέον συντελεστής, που είναι ο συντελεστής ανακλαστικότητας στην ηλιακή ακτινοβολία (Solar Reflectance Index – SRI), που εκφράζει «την ικανότητα μιας επιφάνειας να ανακλά την ηλιακή ακτινοβολία και να αποβάλλει υπό μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας την ενέργεια που έχει απορροφήσει, συναρτήσει της αύξησης που παρουσιάζει η θερμοκρασία της σε σύγκριση με μια πρότυπη λευκή (ανακλαστικότητα 0,80 και εκπομπή 0,90), της οποίας ο SRI είναι 100 και μαύρη επιφάνεια (ανακλαστικότητα 0,05 και εκπομπή 0,90), με SRI 0» (ΠΕΤΕΠ 03-11-20-00 και «Solar reflectance», 2021).

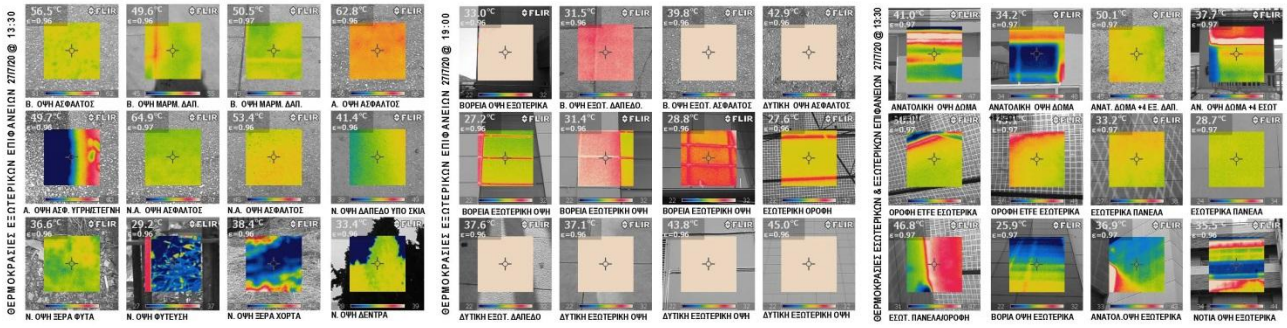
Τα υλικά αυτά είναι συνήθως σκληρά με βάση την άσφαλτο, το τσιμέντο ή τις φυσικές ρητίνες και παράγονται είτε σε χυτή μορφή είτε σε μορφή πλακών, κυβόλιθων κ.λπ. Επίσης, υπάρχουν με τη μορφή χρωστικών (*pigments*), που εφαρμόζονται ως σφραγιστικά σε λεπτή στρώση πάνω σε κοινά και συνθετικά υλικά (*microsurfacing*). Έτσι μπορούν να εφαρμοστούν και σε υφιστάμενες επιφάνειες με τη μορφή ψυχρών βαφών (*cool paints*) (Αλεξάνδρου, 2013β).

Αντίστοιχα με την εφαρμογή ανοιχτόχρωμων υλικών, η εφαρμογή ψυχρών υλικών σε υφιστάμενους χώρους ή/και κατασκευές θέτει οικονομικά και περιβαλλοντικά ζητήματα. Ωστόσο, μπορεί να ενταχθεί σε προγράμματα περιοδικής συντήρησης ή σε εργασίες ανασχεδιασμού/ανακατασκευής.

Πέρα από τη μείωση των επιφανειακών θερμοκρασιών των υλικών υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας το καλοκαίρι, η εφαρμογή ψυχρών υλικών έχει και σημαντικά αρχιτεκτονικά παράπλευρα πλεονεκτήματα, καθώς αποσυνδέεται πρακτικά το χρώμα από την ανάγκη για υψηλή ανακλαστικότητα κι έτσι αποτρέπονται προβλήματα θάμβωσης, ενώ υπάρχει μεγαλύτερη ελευθερία σε χρώματα, υφές κ.λπ.



Εικόνα 10.4 *Σχηματική αρχή λειτουργίας ψυχρών υλικών ως προς τα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Πηγή: Solar energy distribution by ©The Regents of the University of California, Lawrence Berkeley National Laboratory, CC BY-NC-ND και U.S. Environmental Protection Agency. 2008."Urban Heat Island Basics" In: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Draft. https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium, CC BY-NC-ND*



Εικόνα 10.5 *Μετρήσεις στην επιφάνεια διαφορετικών συμβατικών υλικών (ασφαλτος, τσιμεντόπλακες, επιχρισμένες επιφάνειες σκυροδέματος, χώμα και φύτευση) στο κέλυφος και στον περιβάλλοντα χώρο κτιρίου στο Μαρούσι σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές της ημέρας και μήνα Ιούλιο. Επίδραση νερού, σκιασμού και φύτευσης στην επιφανειακή επιφάνεια. Πηγή: Προσωπικό ερευνητικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*



Εικόνα 10.6 *Παραδείγματα υπαίθριων χώρων με ψυχρά υλικά.*
α. Υπαίθριος χώρος στάθμευσης στο Robert L. Duffy High School (Career Success Schools), Phoenix, Arizona, όπου έχει εφαρμοστεί ψυχρά υλικά Emerald Cities™ "Cool pavement coatings". Πηγή: © 2021 Google Earth και
β. Υπαίθριος χώρος στάθμευσης στο Phoenix, Arizona, ΗΠΑ. Πηγή: Emerald Cities reflective coating, ©The Regents of the University of California, Lawrence Berkeley National Laboratory, CC BY-NC-ND.

10.3.3 Διαπερατά υλικά

Τα διαπερατά υλικά δαπέδων (*permeable pavements*) επιτρέπουν τη διείσδυση του νερού, μειώνοντας έτσι την επιφανειακή τους θερμοκρασία, ενώ απορροφούν μεγάλη ποσότητα όμβριων υδάτων (Εικόνα 10.7). Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν εφαρμογές με πορώδη άσφαλτο ή διαπερατό σκυρόδεμα. Πιο εξελιγμένες εφαρμογές αυτού του τύπου περιλαμβάνουν και μια δεύτερη στρώση με υλικό που συγκρατεί και απορροφά το νερό, ούτως ώστε αυτό να εξατμιστεί όταν η υπερκείμενη στρώση θερμανθεί, μειώνοντας την επιφανειακή θερμοκρασία (Αλεξάνδρου, 2013β).

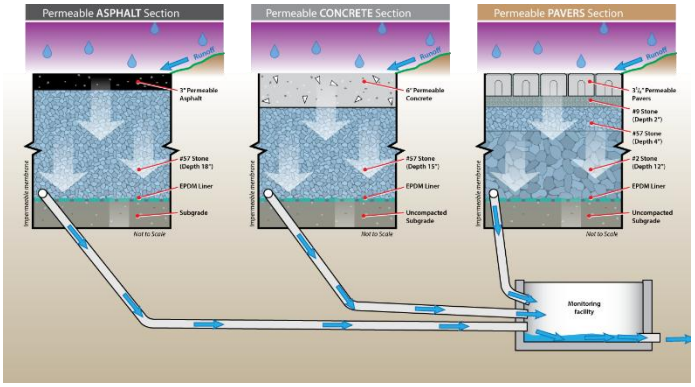
Ένας άλλος τύπος διαπερατής εφαρμογής (πορώδες υλικό) κατασκευάζεται από ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων και αδρανών από πέτρα με ειδικά συνδετικά υλικά (π.χ. Ecopave, Climate Tile). Τα υλικά αυτά με τον ιδιαίτερα οικολογικό χαρακτήρα τους είναι ιδανικά για την εφαρμογή τους σε χώρους πρόσβασης κτιρίων, διαδρόμους ακόμα και σε υπαίθριους χώρους στάθμευσης (Στο ίδιο).

Τέλος, σε χώρους στάθμευσης μπορούν να εφαρμοστούν προκατασκευασμένα πλέγματα από τσιμέντο ή πλαστικό, με ή χωρίς φύτευση (Στο ίδιο), αλλά και τυποποιημένα στοιχεία (ανοικτού τύπου πλάκες ή/και κυβόλιθοι) εν ξηρώ τοποθετημένα σε υδατοπερατό υπόστρωμα (π.χ. σε χαλίκι, άμμο, χώμα).

Συνοψίζοντας, οι πιο συχνοί τύποι υδατοπερατών δαπέδων περιλαμβάνουν τα παρακάτω υλικά («Permeable paving», 2021):

- διαπερατό σκυρόδεμα (Εικόνα 10.8.β),
- πλαστικά πλέγματα (*plastic grids*),
- πορώδη άσφαλτο,
- αδρανή σταθερής κοκκομετρίας (*single-sized aggregate*),
- χλοοτάπητα (*turf*),
- ανοιχτού τύπου κυβόλιθους από σκυρόδεμα (*interlocking concrete pavements*) (Εικόνα 10.8.α),
- διαπερατά δάπεδα από αργιλικά τούβλα (*brick pavements*),
- δάπεδο με ρητίνη (*resin-bound paving*),
- σταθεροποιημένο (*decomposed*) γρανίτη,
- σταθεροποιημένο πορώδες δάπεδο από ανακυκλωμένο γυαλί (*bound recycled glass porous pavement*),
- υδατοπερατό δάπεδο από ξύλινα (*wood permeable pavement*) (Εικόνα 10.8.γ),
- ταθεροποιημένο χωμάτινο δάπεδο.

Τα τελευταία χρόνια και με βάση τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής και των ακραίων καιρικών φαινομένων που την ακολουθούν, σχεδιάζονται και υλοποιούνται πολλά σχετικά έργα σχεδιασμού και ανασχεδιασμού υπαίθριων χώρων που δίνουν έμφαση σε αυτή την παράμετρο (Εικόνα 10.9).



Εικόνα 10.7 *Σχηματική λειτουργία διαπερατών υλικών. Πηγή: Evaluating the potential benefits of permeable pavement on the quantity and quality of stormwater runoff by U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior, Public Domain.*



Εικόνα 10.8 *Παραδείγματα διαπερατών υλικών.*
α. Ανοιχτού τύπου κυβόλιθοι. Πηγή: Rasenpflasterstein by Immanuel Giel via Wikimedia Commons, Public Domain.
β. Διέλευση νερού μέσα από υδατοπερατή πλάκα. Πηγή: Permeable paver demonstration by JJ Harrison via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
γ. Πλάκες από ξύλο ροβίνιας ψευδοακακίας (black locust) εν ξηρώ τοποθετημένες σε υδατοπερατό υπόστρωμα. Πηγή: Permeable wood pavers made of Black Locust by SzilviaSz via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.

α.



β.



Εικόνα 10.9 *Παραδείγματα σύγχρονα σχεδιασμένων υπαίθριων χώρων με υδατοπερατά υλικά.*
α. Climate tile, Κοπεγχάγη, Δανία (Tredje Natur. 2014). Πηγή: ©Tredje Natur έπειτα από σχετική άδεια.
β. Ανασχεδιασμός οδού Bryggervangen & πλατείας St.Kjelds, Κοπεγχάγη, Δανία (SLA, 2025-2019). Πηγή: ©SLA, έπειτα από σχετική άδεια.

10.4 Σκιασμός υπαίθριων χώρων

Ο σκιασμός μειώνει την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στους υπαίθριους χώρους της πόλης και στο κέλυφος των κτιρίων. Στην ουσία αποτρέπεται η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στις αστικές επιφάνειες, ειδικά στις οριζόντιες, που είναι οι περισσότερο επιβαρυμένες κατά τη διάρκεια της θερμής, θερινής περιόδου λόγω των μεγάλων γωνιών ηλιακού ύψους (π.χ. 75^{o} για την Αθήνα στις 21 Ιουνίου, στις 12:00). Η μειωμένη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα τα υλικά να μην αναπτύσσουν υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες. Η σκίαση των επιφανειών στους υπαίθριους χώρους της πόλης και των κτιρίων μπορεί να γίνει με πληθώρα τρόπων:

- Σταθερές/μόνιμες «βαριές» κατασκευές (π.χ. στοές, προστεγάσματα και ημιυπαίθριοι χώροι (βλ. Κεφ. 6, παρ. 6.3.2, Κεφ.8, παρ. 8.2.3 και Κεφ. 9, παρ. 9.5.2).
- Μόνιμες ελαφρού τύπου κατασκευές (μεταλλικές ή ξύλινες) (Εικόνα 10.10).
- Στοιχεία βλάστησης (δενδροστοιχίες ή πέργκολες με αναρριχητικά φυτά).
- Εφήμερες ελαφρού τύπου κατασκευές (πέργκολες, υφάσματα κ.λπ.) (Εικόνα 10.11).
- Κινητικές κατασκευές (βλ. π.χ. Εικόνα 10.12).
- Άλλα, μη συμβατικά μέσα (βλ. Εικόνα 10.13 για ενδεικτικά παραδείγματα).

Σε κάθε περίπτωση, καλό είναι να επιτυγχάνεται η καλή κυκλοφορία του αέρα.



Εικόνα 10.10 *Σκιασμός υπαίθριων χώρων. Μόνιμες ελαφρού τύπου κατασκευές. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη και Ε. Ευαγγελινός).*

α.  *β.* 

γ.



Εικόνα 10.11 *Σκιασμός υπαίθριων χώρων με εφήμερες κατασκευές-υφάσματα.*
α. Toldos στη Σεβίλλη, Ισπανία. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο, με παραχώρηση (Α. Κουκουλά).
β. Εφελκυόμενα υφάσματα σε υπαίθριο χώρο στο Παρίσι, Γαλλία. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο, με παραχώρηση (Αικ. Μπουγιατιώτη).
γ. Εφελκυόμενα υφάσματα στο αίθριο του Cincin Hani, Safranbolu, Τουρκία. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο, με παραχώρηση (Αιν. Οικονόμου).



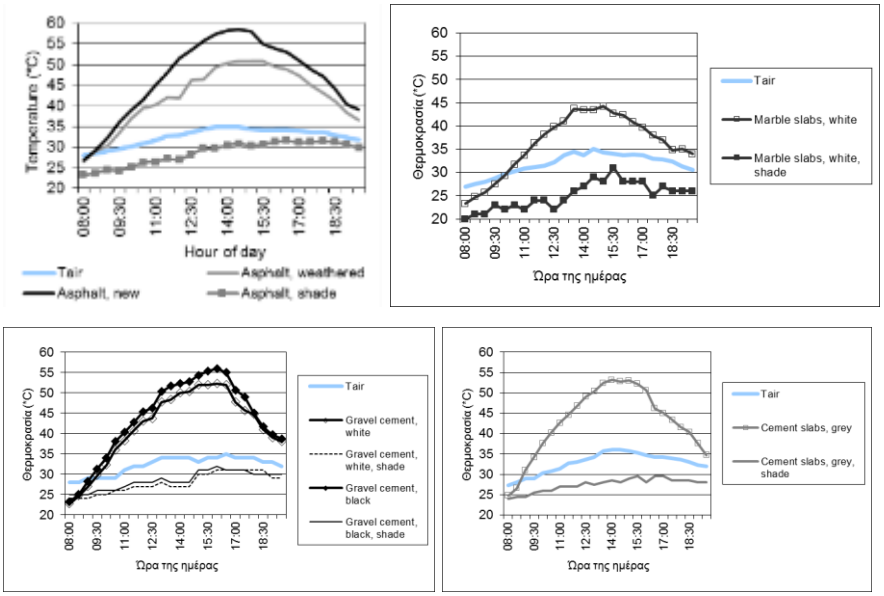
Εικόνα 10.12 *Κινητά στοιχεία σκιασμού. Οι ομπρέλες του Bodo Rasch (2010) στο Τζαμί του Προφήτη στη Μεδίνα. Πηγή: Medina Piazza Umbrella by Sekretärin via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.*

Στην κατά τόπους αρχιτεκτονική εντοπίζονται και μεμονωμένα ενδιαφέροντα παραδείγματα δροσισμού. Έτσι, για παράδειγμα, στην Κέρκυρα, τοπικός τρόπος δροσισμού των εσωτερικών χώρων ήταν (και είναι) το κρέμασμα της μπουγάδας κοντά στην κατοικία (Εικόνα 10.13.β), κατά τρόπο τέτοιον ώστε να εξασφαλίζεται το ότι οι άνεμοι που πνέουν στα υγρά ρούχα συμβάλλουν στον δροσισμό του δωματίου.

α.  β. 

Εικόνα 10.13 *Άλλα (μη συμβατικά) στοιχεία σκιασμού.*
α. Ομπρέλες σε υπαίθριο χώρο στη Λευκωσία, Κύπρο. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Π. Κομπιλάκου και Κ. Κρεμιζή).
β. Σοκάκι με κρεμασμένα ρούχα στην Κέρκυρα. Πηγή: Clothesline between buildings, Photo by Alexandra on Unsplash.

Η επίδραση του σκιασμού στις επιφανειακές θερμοκρασίες των υλικών είναι πολύ εμφανέστερη στην περίπτωση των σκουρόχρωμων υλικών (π.χ. άσφαλτος, σκουρόχρωμη πέτρα κ.λπ.). Οι διαφορές ανάμεσα στις επιφανειακές θερμοκρασίες εκτεθειμένων και σκιασμένων σκουρόχρωμων υλικών είναι πολύ μεγάλες, της τάξης των 19 με 28°C για τις απόλυτες μέγιστες θερμοκρασίες και της τάξης των 13 με 20°C για τις μέσες θερμοκρασίες. Σε σύγκριση με τις μέσες θερμοκρασίες του αέρα, οι μέσες επιφανειακές θερμοκρασίες των εκτεθειμένων υλικών είναι περίπου 10 με 18°C υψηλότερες, ενώ των σκιασμένων είναι σχεδόν πάντα χαμηλότερες. Σημαντικό είναι και το γεγονός ότι κατά τη δύση του ήλιου (περίπου 19:30) τα εκτεθειμένα υλικά είναι 5 με 9°C θερμότερα από την αντίστοιχη θερμοκρασία του αέρα, ενώ τα σκιασμένα είναι πολύ ψυχρότερα (Εικόνα 10.14) (Μπουγιατιώτη, 2007).



Εικόνα 10.14 *Διακύμανση επιφανειακών θερμοκρασιών σκιασμένων και εκτεθειμένων υλικών. Πηγή: Μπουγιατιώτη (2007).*

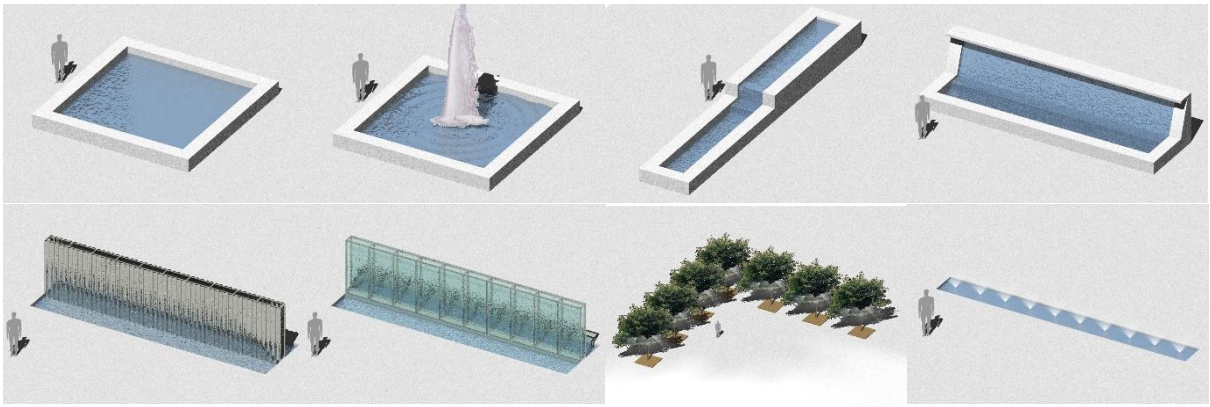
Σχετικά με τις διατάξεις σκιασμού, οι περιορισμοί εφαρμογής αφορούν κυρίως τη φύτευση δέντρων για σκιασμό υφιστάμενων δρόμων και πλατειών, λόγω κατασκευαστικών περιορισμών ή/και περιορισμών χώρου. Η εφαρμογή συστημάτων σκίασης, πέρα από τη μείωση των επιφανειακών θερμοκρασιών των αστικών επιφανειών, έχει και σημαντικά παράλληλα πλεονεκτήματα, όπως είναι η βελτίωση των συνθηκών οπτικής άνεσης και η μείωση της θάμβωσης, ενώ, όταν επιτυγχάνεται με στοιχεία βλάστησης, συνδυάζεται με όλα τα πλεονεκτήματα της βλάστησης (βλ. Κεφ. 10, παρ. 10.6.).

Ο σκιασμός των αστικών επιφανειών έχει κάποια πιθανά μειονεκτήματα, με σημαντικότερο την πιθανή μείωση του δροσισμού των επιφανειών με ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν πρόκειται για σταθερές διατάξεις σκιασμού. Παράλληλα, κάποιοι ερευνητές αναφέρουν και την εκπομπή βιογενών πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) από ορισμένα φυτικά είδη (Benjamin et al., 1992· Corchnoy et al., 1992).

Τέλος, καθώς η χρήση διατάξεων σκιασμού μπορεί να επηρεάσει δραματικά την εικόνα των αστικών υπαίθριων χώρων, ο σκιασμός πρέπει να αποτελεί αντικείμενο σχεδιασμού, στον οποίο αξιολογούνται ποικίλοι παράγοντες. Δεν μπορεί να εφαρμοστεί συνολικά και με τον ίδιο τρόπο σε όλους τους ανοιχτούς χώρους των πόλεων. Αντίθετα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποδοθούν διαφορετικές ποιότητες και χαρακτήρας σε συγκεκριμένες περιοχές υπαίθριων χώρων, να αυξηθεί η χωρική διαφοροποίησή τους με τη δημιουργία σκιασμένων και εκτεθειμένων περιοχών, αλλά και για να βελτιωθεί η ποιότητα των ελεύθερων χώρων σε συγκεκριμένες γειτονιές.

10.5 Δροσισμός με εξάτμιση – Στοιχεία νερού

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός υπαίθριων χώρων μπορεί να ενσωματώνει στοιχεία νερού με στόχο τον δροσισμό με εξάτμιση κατά τη διάρκεια της θερμής, θερινής περιόδου. Το νερό προσφέρει δροσισμό στους υπαίθριους χώρους της πόλης με δύο τρόπους: είτε ως υλικό επικάλυψης, που παρουσιάζει χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες σε σχέση με τα συμβατικά οικοδομικά υλικά, είτε, κυρίως, λόγω του δροσισμού με εξάτμιση. Ωστόσο, για να πραγματοποιηθεί ο δροσισμός με εξάτμιση, πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις που σχετίζονται με τον συνδυασμό των τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας (Οικονόμου, 2007).



Εικόνα 10.15 *Στοιχεία νερού. Πηγή: © Αινείας Οικονόμου (2007), με παραχώρηση.*

Τα συστήματα δροσισμού που βασίζονται στην άμεση εξάτμιση του νερού και μπορούν να εφαρμοστούν στον βιοκλιματικό σχεδιασμό υπαίθριων χώρων είναι (Οικονόμου, 2007) (Εικόνα 10.15):

- οι οριζόντιες επιφάνειες νερού,
- οι κατακόρυφες επιφάνειες νερού,
- η τοποθέτηση μικροψεκαστήρων (*micronisers*) στο φύλλωμα των δέντρων,
- η δημιουργία τεχνητής ομίχλης με παροχή υψηλής πίεσης,
- οι ψυκτικοί πύργοι καθοδικού ρεύματος.

10.5.1 Οριζόντιες επιφάνειες νερού

Γενική περιγραφή: Σε υπαίθριους χώρους, είναι δυνατόν ο σχεδιασμός τοπίου να περιλαμβάνει οριζόντιες επιφάνειες νερού, όπως δεξαμενές (Εικόνα 10.16), πίδακες, κανάλια και υδατοπτώσεις, οι οποίες επιπρόσθετα μπορεί να περιβάλλονται από φυτεύσεις και να είναι επαρκώς σκιασμένες. Μια σκιασμένη επιφάνεια νερού έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από μια μη σκιασμένη. Επίσης, η μέση θερμοκρασία του νερού μπορεί να διατηρηθεί πολύ κοντά στη μέση ημερήσια θερμοκρασία υγρού βολβού. Μια ψυχρή επιφάνεια νερού έχει από μόνη της μικρή επίδραση στη θερμοκρασία του αέρα στον υπαίθριο χώρο. Αυτό συμβαίνει επειδή υπάρχει περιορισμένη ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του ψυχρού νερού και του θερμότερου αέρα που βρίσκεται από πάνω. Αυτή η ανταλλαγή θερμότητας μπορεί να αυξηθεί σημαντικά εάν το νερό της δεξαμενής κυκλοφορήσει μέσω ενός πίδακα σταγονιδίων. Κατά αυτόν τον τρόπο, ο ημιπεριορισμένος αέρας του υπαίθριου χώρου ή της αυλής μπορεί να δροσιστεί, κυρίως με μεταφορά θερμότητας, από τη μεγάλη επιφάνεια των λεπτών σταγονιδίων (Givoni, 1994 και Οικονόμου, 2007).



Εικόνα 10.16 *Οριζόντιες επιφάνειες νερού. Επιφάνεια νερού γύρω από την Πυραμίδα του Λούβρου, Παρίσι, Γαλλία (I.M. Pei, 1988). Πηγές: Louvre Museum France, Photo by Gloria Villa on Unsplash.*

Αξιολόγηση: Σε πολλές αστικές πλατείες υπάρχει το υγρό στοιχείο με τη μορφή επιφανειών νερού και πιδάκων. Το πρόβλημα που παρατηρείται είναι ότι οι περισσότερες επιφάνειες νερού είναι μη σκιασμένες κατά τις μεσημεριανές ώρες του καλοκαιριού και πολλές φορές οι πίδακες είναι ανενεργοί. Για τη σωστή συμβολή στον δροσισμό των ελεύθερων επιφανειών νερού, απαιτείται ο αποτελεσματικός σκιασμός τους από φυλλοβόλα δέντρα ή άλλα στοιχεία φυτεύσεων. Όταν αυτό δεν είναι δυνατό, και για να αποφεύγεται η υπερθέρμανση του νερού και κατά συνέπεια η ταχεία εξάτμισή του, απαιτείται η συνεχής λειτουργία πιδάκων, ώστε να δημιουργείται μια διαρκής κίνηση του νερού και δροσισμός του περιβάλλοντος αέρα από τα σταγονίδια. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των επιφανειών νερού είναι ότι μπορούν να λειτουργούν και με νερό που δεν προέρχεται από το δίκτυο ύδρευσης ή να χρησιμοποιούν το νερό του δικτύου συμπληρωματικά και για την αναπλήρωση του νερού που εξατμίζεται. Στις επιφάνειες νερού υπάρχει ένα μέτριο κόστος κατασκευής, που δεν θεωρείται σημαντικό από τη στιγμή που το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι μικρό. Σίγουρα, όμως, απαιτείται μια στοιχειώδης συντήρησή τους προκειμένου να διασφαλίζεται η συνεχής και σωστή λειτουργία τους. Οι επιφάνειες νερού μπορούν να ενσωματωθούν τόσο στους υπαίθριους χώρους όσο και σε εσωτερικά αίθρια ή υπαίθριους χώρους κτιρίων, ενώ μικρές επιφάνειες νερού μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα στις υπάρχουσες κατασκευές (Οικονόμου, 2007).

10.5.2 Κανάλια νερού

Γενική περιγραφή: Εκτός από τα υφιστάμενα σιντριβάνια, το υγρό στοιχείο μπορεί να ενσωματωθεί στις αστικές πλατείες με τη μορφή καναλιών και μικρών υδατοπτώσεων. Η συνεχής κίνηση του νερού σε αυτές τις επιφάνειες βελτιώνει σημαντικά την ψυκτική τους συμπεριφορά και αποτρέπει την υπερθέρμανση του νερού από την ηλιακή ακτινοβολία. Με τη βοήθεια μικρών αντλιών, το νερό μπορεί να κινηθεί σε ένα κλειστό κύκλωμα. Αναφορές τέτοιων συστημάτων υπάρχουν και στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική (Οικονόμου, 2007).

Αξιολόγηση: Το βασικό πλεονέκτημα των καναλιών νερού είναι ότι, αντίστοιχα με τις επιφάνειες νερού, το νερό μπορεί να μην προέρχεται από το δίκτυο ύδρευσης ή να χρησιμοποιείται συμπληρωματικά. Υπάρχει μέτριο κόστος κατασκευής, αλλά το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι μικρό. Υπάρχει δυνατότητα ενσωμάτωσης σε υφιστάμενους υπαίθριους χώρους, κάτω από κάποιες προϋποθέσεις, όμως ένα μεγάλο δίκτυο από κανάλια και υδατοπτώσεις απαιτεί σχεδιασμό εξαρχής (Οικονόμου, 2007).



Εικόνα 10.17 *Κανάλια νερού σε οικισμούς του Πηλίου. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).*

10.5.3 Πίδακες ενσωματωμένοι στα αστικά δάπεδα – Διαβροχή υλικών

Γενική περιγραφή: Τα τελευταία χρόνια πληθαίνουν τα παραδείγματα εφαρμογής πιδάκων ενσωματωμένων σε αστικά δάπεδα (Εικόνα 10.18). Το σύστημα αυτό στοχεύει στη διαβροχή των υλικών διάστρωσης των δαπέδων, με στόχο τη μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας τους και τη διατήρησή της σε χαμηλά επίπεδα. Η διαβροχή των υλικών είναι καλό να χρησιμοποιείται για να «καθυστερήσει» την εμφάνιση των υψηλών επιφανειακών θερμοκρασιών, διατηρώντας τις χαμηλές πρωινές θερμοκρασίες για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέσα στην ημέρα. Στις περιπτώσεις όπου η διαβροχή χρησιμοποιήθηκε για να μειώσει τις μέγιστες επιφανειακές θερμοκρασίες των υλικών –που σημειώνονται κατά τις μεσημεριανές ώρες (13:30-16:30)–, τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά. Το πορώδες και η υδατοπερατότητα των υλικών έχουν σημαντική επίδραση στην αποτελεσματικότητα της διαβροχής, ιδιαίτερα στις μέσες επιφανειακές θερμοκρασίες, αλλά και στη διατήρηση της επίδρασης της διαβροχής χρονικά. Τα αποτελέσματα της διαβροχής είναι αντίστοιχα στα ανοιχτόχρωμα και στα σκουρόχρωμα υλικά. Ωστόσο, ακόμα και η μέγιστη μείωση, που επιτεύχθηκε με την πρωινή διαβροχή, δεν μπορεί να θεωρηθεί αποτελεσματική για τα σκουρόχρωμα υλικά, των οποίων οι απόλυτες μέγιστες θερμοκρασίες ξεπέρασαν, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, τους 50°C (Μπουγιατιώτη, 2007).

Αξιολόγηση: Στους περιορισμούς εφαρμογής του συστήματος διαβροχής των υλικών ανήκει η περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού στις περισσότερες ελληνικές πόλεις, καθώς και, ανάλογα με τα υλικά επίστρωσης των αστικών δαπέδων, η δυνατότητα ή μη χρήσης μη πόσιμου νερού, επεξεργασμένου νερού ή θαλασσινού νερού. Ειδικά σχετικά με το θαλασσινό νερό, η χρήση του δεν ενδείκνυται πάντα, καθώς το αλάτι μπορεί να προκαλέσει αλλοιώσεις (άνθηση) σε συγκεκριμένες ομάδες υλικών και ιδιαίτερα σε υλικά από τσιμέντο και από φυσικά πετρώματα.

α.


β.


γ.


δ.


Εικόνα 10.18 *Πίδακες ενσωματωμένοι στα αστικά δάπεδα.*
α. Federal Square – Bundesplatz, Βέρνη, Ελβετία. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).
β. Custom House Square, Belfast, Ιρλανδία (The Paul Hogarth Company, 2005). Πηγή: Dancing water fountain, Photo by K. Mitch Hodge on Unsplash.
γ. Ψεκαστήρες υπαίθριων χώρων, Bois de Boulogne, Παρίσι. Πηγή:Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
δ. Place des Terraux, Λυόν, Γαλλία (Dominique Perrault, 1994). Πηγή: Musée des Beaux-Arts de Lyon, place des Terreaux by Auguste Morisot via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0

Η λειτουργία ενσωματωμένων πιδάκων σε δάπεδα αστικών υπαίθριων χώρων ενδέχεται να προκαλέσει αύξηση της σχετικής υγρασίας του αέρα, η οποία όμως δεν συνοδεύεται από πτώση της θερμοκρασίας του αέρα όπως συμβαίνει με τη χρήση micronisers (βλ. παρ. 10.5.5 και 10.5.6). Στις περιπτώσεις όπου οι πίδακες νερού ενσωματώνονται σε δάπεδα κατασκευασμένα από υδατοπερατά υλικά ή σε υδατοπερατό υπόστρωμα (εν ξηρώ επίστρωση) (βλ. παρ.10.3.3), είναι πιθανό να συμβάλλουν στην αποκατάσταση του κύκλου του νερού στην πόλη, αλλά και στη μείωση των αρνητικών συνεπειών των έντονων βροχοπτώσεων με την πιο άμεση διαχείριση των ομβρίων.

Η χρήση μέσων διαβροχής των αστικών δαπέδων σε πλατείες επηρεάζει δραστικά τον χαρακτήρα τους. Για τον λόγο αυτόν, η διαβροχή πρέπει να αποτελεί στοιχείο της αρχιτεκτονικής έκφρασης από την αρχή, π.χ. ενσωμάτωση πιδάκων ή μικροψεκαστήρων (*micronisers*) σε δάπεδα αστικών πλατειών χωρίς φυτεύσεις και διατάξεις σκιασμού.

10.5.4 Κατακόρυφες επιφάνειες νερού

Γενική περιγραφή: Πέρα από τις οριζόντιες επιφάνειες νερού, ένας υπαίθριος χώρος μπορεί να περιλαμβάνει και κατακόρυφες επιφάνειες νερού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εάν τα στοιχεία που περιβάλλουν έναν υπαίθριο χώρο, δηλαδή οι τοίχοι ή τα πρανή του εδάφους που είναι καλυμμένα με μπετόν ή λίθους, διαβρέχονται ή έχουν ένα λεπτό στρώμα κινούμενου νερού πάνω από την επιφάνειά τους (για παράδειγμα με τη μορφή υδατόπτωσης), παρέχοντας έτσι συνεχώς υγρές και ψυχρές επιφάνειες γύρω από την περιοχή δροσισμού (Givoni, 1994). Ο αέρας δίπλα στις ψυχρές επιφάνειες των τοίχων που περιβάλλουν τον χώρο ψύχεται επίσης και κινείται καθοδικά λόγω ελεύθερης μεταφοράς. Η επίδραση αυτού του συστήματος στη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα είναι περιορισμένη, λόγω του μικρού πάχους του καθοδικού ρεύματος ψυχρού αέρα. Ωστόσο, είναι σημαντική η συνεισφορά του στη μείωση της ακτινοβολούμενης θερμότητας, λόγω της μείωσης των επιφανειακών θερμοκρασιών των διαβρεγμένων επιφανειών (Givoni, 1994· Lopez de Asiain J. et al., 1993· Οικονόμου, 2007).



Εικόνα 10.19 *Κατακόρυφες επιφάνειες νερού.*
α. Τοίχος από σκυρόδεμα με αδρανή μεγάλης κοκκομετρίας, Paley Park, Νέα Υόρκη, ΗΠΑ (Robert Zion, 1967). Πηγή: Paley Park by Jim.henderson at en.wikipedia via Wikimedia Commons, Public domain.
β. Τοίχοι από «χτενισμένο» μάρμαρο, Πλατεία Συντάγματος, Αθήνα. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο, με παραχώρηση (Α. Οικονόμου).
γ. Τοίχοι από ανοξείδωτο χάλυβα, (Crumpled Water Walls, Walter Jack Studio, 2011), Regent Street, Swindon, Ηνωμένο Βασίλειο. Πηγή: Crumpled Water Walls, Regent Street, Swindon by ©Brian Robert Marshal via Geograph, CC BY-SA.

Αξιολόγηση: Το νερό που κυλάει πάνω στις κατακόρυφες επιφάνειες νερού στους υπαίθριους χώρους και εξατμίζεται μπορεί να είναι οποιασδήποτε ποιότητας, από τη στιγμή που η κλίση των στοιχείων αυτών και ο μεγάλος ρυθμός ροής του νερού αποτρέπουν την εναπόθεση αλάτων. Κατά συνέπεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί βρόχινο ή και υφάλμυρο νερό. Οι τοίχοι αυτοί μπορούν να είναι κατασκευασμένοι από οπλισμένο σκυρόδεμα, φυσικούς λίθους, μέταλλο ή γυαλί (βλ. παραδείγματα στην Εικόνα 10.19). Στην

περίπτωση της κατασκευής από γυαλί, πρέπει να υπάρχει προστασία από τις πιθανές φθορές. Το γυαλί είναι ίσως προτιμότερο από αισθητικής πλευράς, λόγω της διαφάνειας που προσφέρει, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες. Είναι καλύτερη η χρήση του γυαλιού στην περίπτωση στοιχείων που βρίσκονται σε κάποια απόσταση από τους πεζούς. Αντίθετα, το οπλισμένο σκυρόδεμα και οι μεταλλικές επιφάνειες από ανοξείδωτο χάλυβα έχουν μεγαλύτερη αντοχή και απαιτούν μικρότερη συντήρηση. Όσον αφορά το κόστος της κατασκευής των νερότοιχων, κρίνεται ως αυξημένο και εξαρτάται από την επιλογή του υλικού. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης θεωρείται επίσης αυξημένο, λόγω της συνεχούς λειτουργίας, και εξαρτάται πάντοτε από το μέγεθος της κατασκευής. Γραμμικά στοιχεία, όπως είναι οι νερότοιχοι, μπορούν να ενσωματωθούν στον σχεδιασμό ή στον επανασχεδιασμό των αστικών πλατειών και να αποτελέσουν στοιχεία φυσικού δροσισμού κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Βέβαια, η εφαρμογή αυτή δεν θα μπορούσε να γίνει σε πολύ μεγάλη κλίμακα (Οικονόμου, 2007).

10.5.5 Δημιουργία τεχνητής ομίχλης

Γενική περιγραφή: Η δημιουργία τεχνητής ομίχλης χρησιμοποιεί μικροψεκαστήρες ή ακροφύσια για την παραγωγή σταγονιδίων. Βασίζεται στη διαδικασία της παραγωγής σταγονιδίων, πιο γνωστή ως *atomization* (ή micronization-ψεκασμός), η οποία συνίσταται στη διάλυση ενός πίδακα ή ενός στρώματος νερού είτε από την κινητική ενέργεια του ίδιου του υγρού είτε με την έκθεση σε ένα ρεύμα αέρα υψηλής ταχύτητας είτε ως αποτέλεσμα εφαρμογής εξωτερικής μηχανικής ενέργειας μέσω ενός μηχανισμού περιστροφής ή δόνησης. Αυτό που απαιτείται βασικά είναι μια υψηλή σχετική ταχύτητα ανάμεσα στο υγρό και στον περιβάλλοντα αέρα (Rodriguez et al., 1991). Εάν τα σταγονίδια του νερού είναι αρκετά μικρά και η διαφορά της θερμοκρασίας υγρού βολβού από τη θερμοκρασία ξηρού βολβού του αέρα είναι αρκετά μεγάλη, τότε τα σταγονίδια εξατμίζονται σχεδόν στιγμιαία. Η εξάτμιση των σταγονιδίων μειώνει τη θερμοκρασία του αέρα χωρίς να σχηματίζεται υγροποιημένο νερό πάνω στα άτομα που βρίσκονται κοντά, ακόμα και όταν η τεχνητή ομίχλη είναι ορατή (Givoni, 1994· Expo'92, 1992· Οικονόμου, 2007).

Αξιολόγηση: Τα συστήματα παραγωγής τεχνητής ομίχλης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αυτόνομα ή ενσωματωμένα σε ζώνες, στον σχεδιασμό των υπαίθριων χώρων (βλ. παραδείγματα στην Εικόνα 10.20). Οι ζώνες αυτές βοηθούν στη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα και μπορούν να σχεδιαστούν γραμμικά και σε σχέση με τη διεύθυνση των επικρατούντων ανέμων. Ένα μειονέκτημα των συστημάτων παραγωγής τεχνητής ομίχλης είναι το γεγονός ότι χρησιμοποιούν, όπως και οι μικροψεκαστήρες, μόνο καθαρό νερό με χαμηλή περιεκτικότητα σε μεταλλικά ιόντα. Η μεγάλη όμως ψυκτική τους απόδοση τα κάνει πολύ πλεονεκτικά σε σχέση με άλλες μεθόδους δροσισμού, που χρησιμοποιούν και μη καθαρό νερό. Επίσης, η λειτουργία αυτών των συστημάτων περιορίζεται στις μεσημεριανές ώρες των καλοκαιρινών μηνών, όταν η σχετική υγρασία είναι χαμηλή. Το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησής τους είναι σχετικά μεγάλο και εξαρτάται από την κλίμακα εφαρμογής τους. Γενικά, τα συστήματα παραγωγής τεχνητής ομίχλης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε υπαίθριους χώρους. Υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής αυτών των συστημάτων σε υφιστάμενους υπαίθριους χώρους κάτω από προϋποθέσεις. Η απλή εγκατάσταση ακροφυσίων έχει σχετικά μέτριο κόστος, ενώ η δημιουργία ενός πυκνού καννάβου πιδάκων με μεγάλο δίκτυο παροχής απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό εξαρχής (Οικονόμου, 2007).

α. 

β. 

γ. 

Εικόνα 10.20 *Συστήματα τεχνητής ομίχλης.*
α. Floodable Square – Mirroir d'Eau, Bordeaux, Γαλλία (JML Arquitectura del Agua, 2006). Πηγές: Le miroir d'eau à Bordeaux en septembre 2017 by AlineRockstud68 via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0 και Bordeaux water level square, Image par Göran Waldt de Pixabay.
β. Tanner Fountain, Cambridge, Μασσαχουσέτη, ΗΠΑ. (Peter Walker, 1985). Πηγή: Tanner Fountain Harvard University by Daderot via Wikimedia Commons, Public domain και Tanner Fountain by © Elizabeth Thomsen via Flickr, CC-BY-NC-SA 2.0
γ. Bois de Boulogne, Παρίσι, Γαλλία. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

10.5.6 Μικροψεκαστήρες (*micronisers*) στο φύλλωμα στοιχείων βλάστησης

Γενική περιγραφή: Αντίστοιχα με τη δημιουργία τεχνητής ομίχλης που περιγράφηκε αμέσως προηγουμένως, η τοποθέτηση μικροψεκαστήρων στο φύλλωμα των δέντρων (Εικόνα 10.21) ή στο κάτω μέρος της βλάστησης σε πέργκολες παράγει επίσης τεχνητή ομίχλη. Τα σταγονίδια εξατμίζονται όταν έρχονται σε επαφή με τον περιβάλλοντα θερμό αέρα, ο οποίος γίνεται ψυχρότερος και κατά συνέπεια βαρύτερος, εξασφαλίζοντας ένα συνεχές καθοδικό ρεύμα ψυχρού αέρα (Alvarez et al., 1991b· Οικονόμου, 2007).



Εικόνα 10.21 *Micronisers στο φύλλωμα των δέντρων. Πηγή: Sunlight and flowers in a greenhouse, Photo by Florian GIORGIO on Unsplash.*

Αξιολόγηση: Η εφαρμογή μικροψεκαστήρων και η αποτελεσματικότητα της ψυκτικής λειτουργίας τους εξαρτώνται από τη σχετική υγρασία και, για τον λόγο αυτόν, θα πρέπει να εξετάζονται πάντα με βάση το ψυχρομετρικό διάγραμμα των συνδυαστικών δεδομένων θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας για τους καλοκαιρινούς μήνες. Είναι σαφές ότι η χρήση των μικροψεκαστήρων περιορίζεται από τα υψηλά ποσοστά σχετικής υγρασίας, αφού δεν πραγματοποιείται πλήρης εξάτμιση των σταγονιδίων στον αέρα. Η εγκατάσταση των μικροψεκαστήρων περιορίζεται από τη χρήση καθαρού νερού υψηλής ποιότητας. Το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης αυτών των συστημάτων είναι αυξημένο, ιδιαίτερα όταν εφαρμόζονται σε ευρεία κλίμακα. Το γεγονός ότι απαιτείται τακτική συντήρηση και αντικατάσταση των ακροφυσίων θέτει σοβαρά προβλήματα για τη γενικευμένη εφαρμογή μικροψεκαστήρων στο φύλλωμα των δέντρων σε υπαίθριους χώρους. Με βάση τα παραπάνω, προτείνεται η εφαρμογή συστημάτων με μικροψεκαστήρες μόνο σε τοπική κλίμακα, σε σημεία στάσης πεζών, όπου υπάρχουν φυτεύσεις για σκιασμό (Οικονόμου, 2007).

10.5.7 Πύργοι δροσισμού καθοδικού ρεύματος (PDEC)

Γενική περιγραφή: Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα συστήματα άμεσου δροσισμού με εξάτμιση είναι οι ψυκτικοί πύργοι εξάτμισης που παράγουν ρεύμα ψυχρού αέρα. Κατά τον Givoni, υπάρχουν δύο τύποι ψυκτικών πύργων, ο πρώτος είναι αυτός που αναπτύχθηκε από τους Cunningham και Thompson στο Ερευνητικό Κέντρο του Πανεπιστημίου της Arizona στο Tucson (βλ. Κεφ. 8, παρ. 8.3.3) και ο δεύτερος είναι ο ψυκτικός πύργος καταιονισμού –διαμερισμού– σταγονιδίων, που αναπτύχθηκε από τον Givoni (Givoni, 1998).

Ο ψυκτικός πύργος καταιονισμού αναπτύχθηκε αρχικά από τον Givoni, όταν ήταν σύμβουλος για τον δροσισμό των υπαίθριων χώρων στάσης και ανάπαυσης στην Παγκόσμια Έκθεση του 1992, στη Σεβίλλη της

Ισπανίας. Το πρωτότυπο κατασκευάστηκε για την Rotunda στον χώρο της Expo'92, που ήταν μια εγκατάσταση επίδειξης των διαφορετικών συστημάτων δροσισμού των υπαίθριων χώρων. Αυτό το σύστημα μπορεί επίσης να εφαρμοστεί, και έχει δοκιμαστεί, ως ένα σύστημα δροσισμού για κτίρια. Όταν λεπτά σταγονίδια νερού ψεκάζονται κατακόρυφα και καθοδικά από το επάνω μέρος ενός ανοιχτού φρεατίου, ως καταιονισμός, τότε το νερό που πέφτει, παρασύρει μια μεγάλη ποσότητα αέρα. Η εξάτμιση των λεπτών σταγονιδίων μειώνει τη θερμοκρασία του νερού μαζί με τον αέρα στο φρεάτιο, σε σημείο κοντά στη θερμοκρασία υγρού βολβού του περιβάλλοντος (Givoni, 1998· Οικονόμου, 2007). Στη Διεθνή Έκθεση της Σεβίλλης το 1992, χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχοι πύργοι με επιφάνειες κυτταρίνης στον εξωτερικό χώρο του Περιπτέρου των ΗΠΑ (Yoklic et al., 1991· Οικονόμου, 2007). Η λειτουργία ενός πύργου δροσισμού είναι δυνατό να βελτιωθεί με τη βοήθεια μηχανικών μέσων, για παράδειγμα ανεμιστήρων. Στη 2η Λεωφόρο της Expo'92 στη Σεβίλλη κατασκευάστηκαν 12 πύργοι δροσισμού που λειτουργούσαν με ψεκασμό σταγονιδίων (Alvarez et al., 1991b· Εικόνα 10.22). Η συμβολή τους στον δροσισμό κρίθηκε ως το ικανοποιητικότερο από όλα τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην Expo'92 (Οικονόμου, 2007).



Εικόνα 10.22 *PDEC towers 2nd Avenue, Seville, Ισπανία (Baruch Givoni, 1992). Πηγές:*
α. Plaza de Europa, Expo'92, Sevilla, España by @Pollodelsimago via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.
β. Expo Sevilla by Smiley.toerist via Wikimedia Commons, GNU Free Documentation License CC BY-SA 3.0 CC BY-SA 2.5, CC BY-SA 2.0, CC BY-SA 1.0.
γ. Photo by Cristina de los Santos on Unsplash.

Αξιολόγηση: Οι πύργοι δροσισμού καθοδικού ρεύματος με επιφάνειες κυτταρίνης και με μικροψεκαστήρες έχουν αυξημένο κόστος κατασκευής λόγω ειδικού σχεδιασμού και σχετικά μεγάλο κόστος και ενεργειακή απαίτηση λειτουργίας, αλλά και αυξημένη ανάγκη συντήρησης σε σχέση με τους πύργους ψεκασμού σταγονιδίων. Όπως και σε όλα τα συστήματα άμεσου δροσισμού με εξάτμιση, έτσι και στους πύργους δροσισμού το κύριο μειονέκτημα είναι η υψηλή σχετική υγρασία του ψυχρού αέρα της εξόδου του πύργου. Ωστόσο, στους υπαίθριους χώρους της πόλης αυτή η αύξηση της σχετικής υγρασίας δεν επηρεάζει τις συνθήκες άνεσης σε μεγάλο βαθμό. Οι ψυκτικοί πύργοι μπορούν να ενσωματωθούν σε υφιστάμενους υπαίθριους χώρους χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα. Δεν ισχύει το ίδιο για την ενσωμάτωσή τους σε υφιστάμενα κτίρια. Στα κτίρια απαιτείται ο σχεδιασμός των στοιχείων αυτών από την αρχή. Η αυξημένη πολυπλοκότητα του σχεδιασμού των συστημάτων αυτών, καθώς και το κόστος τους κάνουν, βέβαια, προβληματική την εφαρμογή τους σε μεγάλη κλίμακα στους υπαίθριους χώρους. Το μεγάλο ύψος των πύργων, στοιχείο απαραίτητο για τη σωστή τους λειτουργία, είναι επίσης ένα προβληματικό σημείο. Η προτιμότερη, ίσως, εφαρμογή των ψυκτικών πύργων είναι η προσωρινή τους εγκατάσταση και λειτουργία σε χώρους όπου πραγματοποιούνται κάποιες εκδηλώσεις και όχι η μόνιμη εφαρμογή τους σε αστικούς υπαίθριους χώρους. Κατά αυτόν τον τρόπο, θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως χωρόσημα, αλλά και ως μέσο ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης των πολιτών πάνω σε θέματα εξοικονόμησης ενέργειας και προστασίας του περιβάλλοντος (Οικονόμου, 2007).

10.6 Χρήση πρασίνου

Η χρήση πρασίνου σε ανοιχτούς χώρους, δρόμους, ιδιωτικούς ακάλυπτους, ταράτσες και κατακόρυφες επιφάνειες μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα του αστικού μικροκλίματος, αρκεί να γίνεται με σωστό τρόπο. Πρέπει να χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα για τις κλιματικές συνθήκες φυτά που απαιτούν τη μικρότερη συντήρηση, η οποία πρέπει να μπορεί να εξασφαλιστεί εκ των προτέρων. Η χρήση της κατάλληλης χλωρίδας μπορεί να επιδράσει στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και στη μείωση ρύπων, όπως το όζον (O_3) και τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter – PM). Η χαμηλή βλάστηση διατηρεί τις επιφανειακές θερμοκρασίες χαμηλές το καλοκαίρι, συμβάλλει στον δροσισμό με εξάτμιση, καθαρίζει τον αέρα, ενώ συμβάλλει και στη σωστή διαχείριση των ομβρίων. Η ψηλή βλάστηση σκιάζει τις γειτονικές οριζόντιες και κατακόρυφες επιφάνειες και μπορεί με τους κατάλληλους σχηματισμούς είτε να δημιουργήσει προστατευτικό μέτωπο κατά των ισχυρών και ψυχρών ανέμων είτε να κατευθύνει τον άνεμο προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα, μπορούν να επιλεγούν είτε φυλλοβόλα είτε αειθαλή φυτά (Αλεξάνδρου, 2013β· Εικόνα 10.23).

Τα πλεονεκτήματα της βλάστησης είναι σημαντικά, καθώς το πράσινο επηρεάζει σημαντικά τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στα κέντρα των πόλεων συμβάλλοντας (Μπουγιατιώτη, 2007):

- στην αποφυγή φαινομένων υπερθέρμανσης (μέσω του σκιασμού),
- στην αποφυγή της θάμβωσης (μέσω του σκιασμού),
- στη ρύθμιση της θερμοκρασίας και της υγρασίας (μέσω των λειτουργιών της εξάτμισης και της διαπνοής),
- στη βελτίωση της κίνησης του αέρα,
- στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα (μέσω της λειτουργίας της φωτοσύνθεσης),
- στη μείωση της ηχορύπανσης,
- στην αύξηση της υδατοπερατότητας του εδάφους.



Εικόνα 10.23 *Αστικό πράσινο. Πηγή: A motor scooter parked on the side of a road, Photo by Nick Night on Unsplash.*

Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (Κεφ. 2, παρ. 2.8.1), που δημιουργείται από την υπερθέρμανση των πυκνών αστικών ιστών, οφείλεται στην αποθήκευση της ηλιακής ακτινοβολίας στους δρόμους, στα πεζοδρόμια, στις στέγες και στα δώματα του πυκνοδομημένου αστικού ιστού, που ουσιαστικά έχουν αντικαταστήσει την προϋπάρχουσα χλωρίδα, αποτελούν δηλαδή την επιδερμίδα της πόλης. Τα φυτά και το νερό απορροφούν επίσης την ηλιακή ακτινοβολία, όμως η μεγαλύτερη ενέργειά τους αποβάλλεται με την εξάτμιση και τη διαπνοή, με αποτέλεσμα να έχουν μεγαλύτερη θερμική απώλεια από ό,τι κέρδος. (Αλεξάνδρου, 2013β).

Η καταγραφή της ποιότητας της χλωρίδας του αστικού οικοσυστήματος και ο καθορισμός των ανθεκτικότερων και καταλληλότερων φυτών, ως προς την αντοχή τους στις συνθήκες μικροκλίματος, τις περιορισμένες απαιτήσεις συντήρησης και την ποιότητα του εδάφους/χώματος, θα οδηγήσουν στον

καθορισμό των κατάλληλων τύπων φύτευσης σε κάθε περιοχή. Παράλληλα, θα αξιολογηθεί η ανάγκη ψηλής ή χαμηλής βλάστησης (ανάλογα με τις ανάγκες ηλιασμού, σκιασμού και αερισμού που προκύπτουν από τη γεωμετρία του δομημένου χώρου) (Στο ίδιο).

Η κάλυψη των ελεύθερων επιφανειών με πράσινο ή με υλικά που επιτρέπουν την ανάπτυξη φυτών (π.χ. κυβόλιθοι ανοιχτού τύπου) αποτρέπει την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και κατά συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα. Παράλληλα, συμβάλλει στη συγκράτηση των υδάτων και στην αποφόρτιση των δικτύων αποχέτευσης, μειώνοντας τις πιθανότητες πλημύρας. Τέλος, όταν το έδαφος καλύπτεται από φύλλα και φυτά αντί για πλακοστρώσεις, αποφεύγεται η μόλυνσή του. Η φύτευση των δρόμων που προήλθαν από επιχωματώσεις ρεμάτων ενδείκνυται, μιας και με τον τρόπο αυτόν πιθανόν να διευκολύνεται η άρδευσή τους (Στο ίδιο).

10.6.1 Φύτευση δημόσιων αστικών χώρων (πλατείες – πάρκα)

Οι πράσινες ζώνες και τα πάρκα λειτουργούν ως δοχεία διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και εξουδετερώνουν το φαινόμενο της αστικής νησίδας στις μεγάλες και πυκνοκατοικημένες περιοχές. Ακόμα με κατάλληλους χειρισμούς μπορούν να αποφορτίσουν από τους ρύπους τις προβληματικές περιοχές, ενώ παράλληλα προσφέρουν τον απαραίτητο σκιασμό στους κατοίκους, αλλά και στο δομημένο περιβάλλον (Αλεξάνδρου, 2013β).



Εικόνα 10.24 *Στοιχεία βλάστησης σε αστικές πλατείες.*
α. Δέντρα στην Πλατεία Κουμουνδούρου και στην Πλατεία Κλαυθμώνος. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).
β. Πέργκολα με βουκαμβίλιες σε πάρκο στη Santa Cruz de Tenerife, Κανάριοι Νήσοι, Ισπανία. Πηγή: Pergola canaria, by Cuyaya, via Wikimedia Commons, CC BY 3.0.

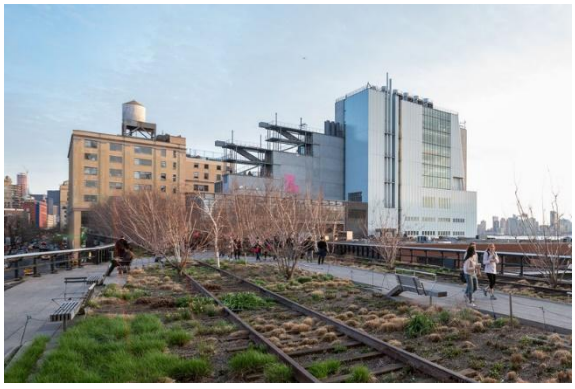
Τα πάρκα αποτελούν τον αναγκαίο βιοτικό ανοιχτό χώρο για τους κατοίκους, τη χλωρίδα και την πανίδα, και βελτιώνουν τη βιωσιμότητα και την υγιεινή της πόλης, ενώ ο κλιματικός τους αντίκτυπος επηρεάζει την ευρύτερη αστική περιοχή που τον περιβάλλει. Ο σχεδιασμός ενός πάρκου, που θα προσφέρει δροσερό αέρα μέσα στην πόλη, θα συγκρατεί τα νερά της βροχής από τους γύρω δρόμους και θα εξουδετερώνει τη ρύπανση και την ηχορύπανση των δρόμων ως προς τις γειτονικές τους κατοικημένες περιοχές, αποτελεί μια οικολογική λύση, που είναι συνήθως πιο αποδοτική απ’ ό,τι αν τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπιστούν με επιμέρους χειρισμούς. Η φύτευση των ανοιχτών χώρων (βλ. παραδείγματα Εικόνας 10.24) συνιστά προτιμότερη λύση από τον σχεδιασμό μιας ανοιχτής πλατείας: μια πλατεία αποτελεί μια ακόμη δομική παρέμβαση, της οποίας ο σχεδιασμός και τα υλικά επιβαρύνουν το περιβάλλον και συνήθως δημιουργούν αφιλόξενους χώρους με δυσχερές μικροκλίμα (ανεπιθύμητη ένταση ανέμων, υπερθέρμανση, διαχείριση ομβρίων κ.λπ.). Προτείνεται, λοιπόν, η καταγραφή και διαχείριση του ανεκμετάλλευτου δυναμικού ανοιχτών χώρων μικρής και μεγάλης έκτασης (άδεια οικόπεδα, ανοιχτοί χώροι στάθμευσης, μικρές πλατείες) μέσα στον αστικό ιστό για τη δημιουργία φυτεύσεων ή πάρκων τσέπης (Αλεξάνδρου, 2013β).

10.6.2 Φύτευση δρόμων – αστικών λεωφόρων

Η σωστή φύτευση στα όρια των δρόμων, ειδικά εκείνων που έχουν αυξημένη κίνηση, βοηθά τον διασκορπισμό των συσσωρευμένων ρύπων πάνω και γύρω από αυτούς, προστατεύοντας έτσι τις γειτονικές κατοικημένες περιοχές (Εικόνα 10.25). Έχει διαπιστωθεί ότι οι ρύποι σε οδικές αρτηρίες με μεγάλη κυκλοφορία αλλά συνεχή ροή είναι λιγότεροι απ' ό,τι σε δρόμους με ιδιαίτερα αυξημένη κίνηση, όπου τα αυτοκίνητα κινούνται με πολύ μικρές ταχύτητες σταματώντας και ξεκινώντας συνέχεια. Ειδικοί χειρισμοί πρέπει να γίνονται και στα σημεία εισόδων και εξόδων μεγάλων οδικών αρτηριών που συνορεύουν με κατοικημένες περιοχές. Είναι επιθυμητό να έχουν μεταβατικούς χώρους με πράσινο και, όπου αυτό δεν είναι δυνατόν, συνιστάται φύτευση με δέντρα πυκνού φυλλώματος προκειμένου να αποφορτιστούν αυτές οι περιοχές από ρύπους και ηχορύπανση. Ο επαναπροσδιορισμός της κίνησης των αυτοκινήτων μέσα στις υπό μελέτη περιοχές πρέπει να αξιολογήσει και τους μικρούς τοπικούς δρόμους που οι Άγγλοι αποκαλούν «rat-runs» και χρησιμοποιούνται συστηματικά από πλήθος οδηγών που θέλουν να αποφύγουν τους δρόμους με φανάρια που μποτιλιάρονται σε ώρες αιχμής. Επίσης, κρίνεται απαραίτητο οι ποδηλατοδρόμοι να βρίσκονται γειτονικά σε πράσινες ζώνες. Τέλος, η κατά μήκος φύτευση μακριών δρόμων ή σιδηροδρομικών γραμμών συμβάλλει στη δημιουργία πράσινων δικτυακών διαδρομών που αναπτύσσουν το φυσικό περιβάλλον στον αστικό χώρο και τον συνδέουν κατά κάποιον τρόπο με την εξοχή (Αλεξάνδρου, 2013β).

α. 

β. 

γ. 

Εικόνα 10.25 *Στοιχεία βλάστησης σε αστικούς δρόμους. α & β Φυλλοβόλα δέντρα στη Λεωφόρο Champs Elysées, Παρίσι, Γαλλία. Πηγές: Vehicles passing on road between trees, Photo by J Shim on Unsplash & Avenue des Champs-Élysées, Paris, France. (...). Photo by Mark Lawson on Unsplash.*
γ. The High Line, Νέα Υόρκη, ΗΠΑ. (Diller Scofidio + Renfro, 2009). Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

Η δενδροφύτευση στα όρια των οδικών αξόνων ταχείας κυκλοφορίας, όπως ο Κηφισός στην Αττική, με δέντρα που έχουν πυκνό φύλλωμα βοηθά σημαντικά στο φιλτράρισμα από τη ρύπανση και την ηχορύπανση και καθαρίζει τον αέρα από το μονοξείδιο του άνθρακα. Αντίθετα, η φύτευση στις αστικές λεωφόρους όπου υπάρχουν μεικτές κινήσεις ΙΧ, ΜΜΜ, ποδηλάτων και πεζών πρέπει να γίνεται με φυλλοβόλα δέντρα που θα σκιάζουν επαρκώς τους χώρους κίνησης των πεζών και ποδηλάτων το καλοκαίρι, ενώ τον χειμώνα θα επιτρέπουν την πρόσβαση του ήλιου σε αυτές, καθώς και στα γύρω κτίρια. Οι χώροι κίνησης πεζών και ποδηλάτων πρέπει επίσης να περιβάλλονται από ζώνες με χαμηλή βλάστηση (πράσινες ζώνες) (Αλεξάνδρου, 2013β).

10.6.3 Φύτευση υπαίθριων δημόσιων και ιδιωτικών χώρων

Η φύτευση ανοιχτών υπαίθριων χώρων, όπως χώροι στάθμευσης, ακάλυπτοι χώροι πολυκατοικιών, πρασιές κ.λπ., συμβάλλει στη βελτίωση των τοπικών κλιματικών συνθηκών και των συνθηκών άνεσης σε αυτούς. Η φύτευση ακόμα και μικρών τμημάτων σε ιδιοκτησίες με τοπικά φυτά που έχουν βαθιές ρίζες και φιλτράρουν καλύτερα το νερό είναι πολύ δραστικό μέτρο για την απορρόφηση των νερών της βροχής, καθότι μειώνουν αισθητά και την ποσότητα που απορρέει μέσω των πεζοδρομίων και των δρόμων στα αποχετευτικά δίκτυα. Τα φυτά απορροφούν περίπου 30% περισσότερο νερό απ' ό,τι το γρασίδι (Αλεξάνδρου, 2013β).

Η επιλογή των φυτών και δέντρων πρέπει να είναι ανάλογη της χρήσης, της γεωμετρίας του δομημένου περιβάλλοντος και των κλιματικών συνθηκών. Ενδιαφέρον παρουσιάζει πιλοτικό πρόγραμμα στη Βαλτιμόρη (2010), στο οποίο η πολιτεία παρείχε σε ιδιοκτήτες κατοικιών κουπόνια των $10 για την αγορά φυτών και δέντρων από τοπικά φυτώρια, με την προϋπόθεση να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τον τύπο των φυτών και την τοποθεσία, ούτως ώστε να συγκεντρωθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για μελλοντικές ομαδικές φυτεύσεις στην πόλη. Αντίστοιχα προγράμματα εφαρμόστηκαν και σε άλλες πόλεις με στόχο τη βελτίωση του αστικού μικροκλίματος (Αλεξάνδρου, 2013β). Στην Ελλάδα, ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί ο ετήσιος διαγωνισμός για το πιο «Πράσινο Μπαλκόνι» του Δήμου Χανιών.

10.6.4 Φύτευση σε δώματα, εξώστες και κατακόρυφες επιφάνειες

Η παρουσία πρασίνου στους ανοιχτούς χώρους των κτιριακών κελυφών συμβάλλει στη μείωση των επιφανειακών θερμοκρασιών, καθώς και των θερμοκρασιών του αέρα, μειώνει τον θόρυβο, βελτιώνει την ποιότητα του αέρα και σκιάζει τις επιφάνειες του κελύφους. Ειδικά η φύτευση σε δώματα μπορεί να μειώσει σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη, καθώς και την ποσότητα των απορρεόντων ομβρίων. Τα οφέλη δηλαδή αφορούν όχι μόνο το κτίριο, αλλά και το άμεσο αστικό περιβάλλον του (βλ. παράδειγμα Εικόνας 10.26). Η εγκατάσταση φυτών και συστημάτων φύτευσης σε δώματα μπορεί να λειτουργήσει και πιλοτικά, ούτως ώστε να δοκιμαστούν διαφορετικά συστήματα φυτεμένων δωμάτων (Κεφ. 6, παρ. 6.3.2), καθώς και τύποι φυτών τοπικών και μη, σε διάφορες περιοχές, δίνοντας πληροφορίες για την καταλληλότερη εφαρμογή. Στο πλαίσιο ειδικού ερευνητικού προγράμματος ολόκληρο το δώμα του δημαρχείου πόλης του Σικάγο των ΗΠΑ φυτεύτηκε με διάφορα είδη φυτών με προσδοκώμενο όφελος 9,270kWh τον χρόνο, που αντιστοιχεί σε μείωση του ενεργειακού κόστους κατά $3600 (3300 €, ισοτιμία 2024). Μετά την επιτυχία του προγράμματος, η πολιτεία καθιέρωσε προγράμματα χρηματοδότησης πράσινων και ψυχρών στεγών (Αλεξάνδρου, 2013β).

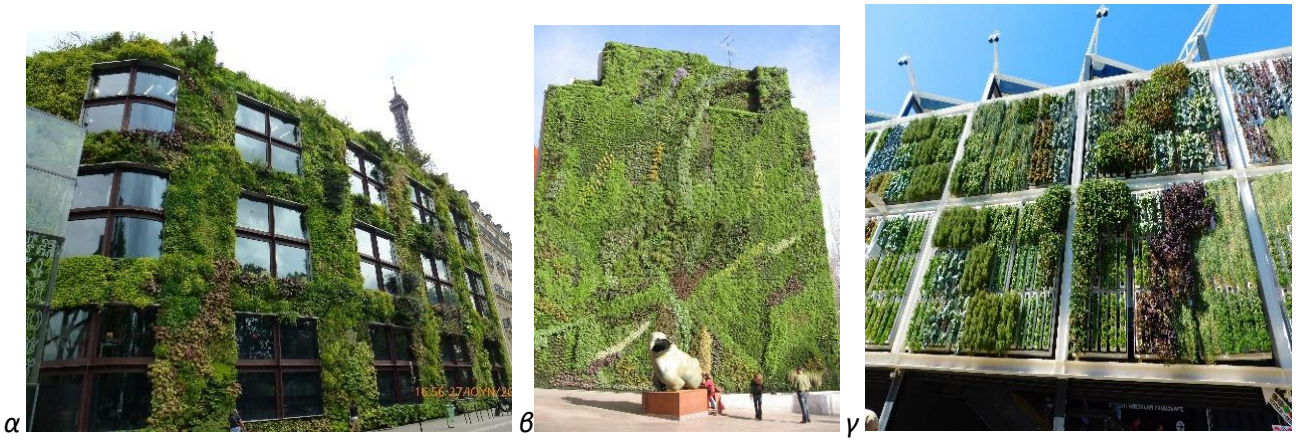


Εικόνα 10.26 *Φυτεμένα δώματα. The Marcel Sembat High School, Sotteville-lès-Rouen, Γαλλία (archi5, 2011). Πηγή: archi5 - Marcel Sembat High School by Thomas Jorion by Flickr, CC BY 2.0.*



Εικόνα 10.27 *Φυτεμένα δώματα. Κήπος στο δώμα κτιρίου στη 417 Lafayette St (Sylvia Wald & Po Kim Gallery & Residence), Νέα Υόρκη, ΗΠΑ. Πηγές: Rooftop garden and water tower, by AnneRuthmann via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0 και Rooftop Waterfall Sculpture of 419 Lafayette St Sylvia Wald & Po Kim Gallery by AnneRuthmann via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.*

Η φύτευση κατακόρυφων επιφανειών του κτιριακού κελύφους μπορεί επίσης να αποτελέσει ρυθμιστή του αστικού μικροκλίματος λόγω εξατμισοδιαπνοής και σκίασης μεγάλων επιφανειών του κελύφους (για περισσότερα, βλ. Κεφ. 6, παρ. 6.5.2 και τα παραδείγματα της Εικόνας 10.28). Ιδιαίτερα θετική είναι η συμβολή της σε επιφάνειες με δυτικό προσανατολισμό. Με τον τρόπο αυτόν βελτιώνεται σημαντικά το αισθητικό αποτέλεσμα, ιδιαίτερα όταν τέτοια συστήματα εφαρμόζονται σε τυφλές όψεις. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην επιλογή του συστήματος και του είδους των φυτών, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απαιτήσεις συντήρησης. Στο Χιούστον, με πρωτοβουλία της Διαχείρισης του Κέντρου της πόλης διατέθηκαν επιχορηγήσεις για τη φύτευση κατακόρυφων επιφανειών σε τοίχους κτιρίων και χώρων στάθμευσης (*Vertical Gardens Matching Grant)* (EPA, 2008), με στόχο τη βελτίωση των συνθήκων άνεσης των πεζών, την αισθητική αναβάθμιση της πόλης, τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, καθώς και τη μείωση του φαινομένου της αστικής νησίδας θερμότητας (Chicago city hall greenroof) (Αλεξάνδρου, 2013β).



α *β* *γ*

Εικόνα 10.28 *Πράσινες όψεις.*
α. Μουσείο Ανθρωπολογίας Musée du Quai Branly – Jacques Chirac, Παρίσι, Γαλλία. (Jean Nouvel, 1999-2006 + Patrick Blanc). Πηγή:Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).
β. Μουσείο και Πολιτιστικό Κέντρο Caixa Forum, Μαδρίτη, Ισπανία. (Herzog & De Meuron, 2010-2013 + Patrick Blanc). Πηγή: Caixa Forum, by Cillas via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.
γ. Περίπτερο των ΗΠΑ (U.S. Pavilion), στην Expo 2015, Μιλάνο, Ιταλία. (Biber Architects, 2015). Πηγή: DMCA on pxfuel.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Akbari, H. et al. (Eds) (1992). *Cooling Our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing*. U.S. Environmental Protection Agency.

Alvarez, S., Guerra, J. & Velásquez, R. (1991). Climatic Control Applications in Outdoor Spaces at EXPO '92. In: S. Alvarez et al. (Eds), *PLEA '91. Architecture and Urban Space. Proceedings of the Ninth International PLEA Conference* (pp. 189-193), Seville, Spain, September 24-27. Kluwer.

Benjamin, M. T., Sudol, M., Bloch, L. & Winer, A. M. (1992). Low emitting urban forests: a taxonomic methodology for assigning isoprene and monoterpene emission rates. Atmospheric Environment, 30(9), 1437-1452. https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00439-4

Bougiatioti, F., Evangelinos, E., Poulakos, G. & Zacharopoulos, E. (2009). The summer thermal behaviour of "skin" materials for vertical surfaces in Athens, Greece as a decisive parameter for their selection. *Solar Energy*, *83*(4), 582-598. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.06.012

Corchnoy, S. B., Arey, J. & Atkinson, R. (1992). Hydrocarbon emissions from twelve urban shade trees of the Los Angeles, California, Air Basin. Atmospheric Environment, 26(3), pp. 339-348. https://doi.org/10.1016/0957-1272(92)90009-H

EPA (2008). *Vertical Gardens Grant Initiative.* https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-07/documents/vert_gardens-epa.pdf

Garreau, J. (1991). *Edge city – Life on the new frontier*. Anchor book.

Givoni, B. (1994). *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. Van Nostrand Reinhold.

Goulding, J. R., Lewis, J. O. & Steemers, T. C. (1994). *Ενεργειακός Σχεδιασμός. Εισαγωγή για Αρχιτέκτονες*. Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy Conscious Design-A Primer for Architects].

Goulding, J. R., Lewis, J. O. & Steemers, T. C. (1996). *Ενέργεια στην Αρχιτεκτονική. Το Ευρωπαϊκό Εγχειρίδιο για τα Παθητικά Ηλιακά Κτίρια*. Μαλλιάρης Α.-Παιδεία Α.Ε. [τίτλος πρωτότυπου: Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook].

Lopez de Asiain, J. et al. (1993). Performance of Bioclimatic Architecture. Users Responce to the Open Spaces of EXPO '92". In N. Foster and Partners & H. Scheer (Eds). *Solar Energy in Architecture and Urban Planning. Third European Conference on Architecture. Commission of the European Communities. Proceedings of an International Conference* (pp. 622-625). H.S. Stephens & Associates.

Mc Harg, I. (1992). *Design with Nature*. John Wiley and Sons Inc.

Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. Routledge – Taylor & Francis Group.

Permeable paving. (2021, December 22). In: *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Permeable_paving

Rispa, R., Alonso de los Rios, C. & Maria Jose Aguaza, M. J. (Eds) (1992). *Expo '92. Seville Architecture et Design*. Sociedad Estatal para la Exposicion Universal Sevilla 92, Gallimard/Electa.

Rodríguez, E. A., Alvarez, S. & Martín, R. (1991). Direct Air Cooling from Water Drop Evaporation", In: S. Alvarez et al. (Eds). *PLEA '91. Architecture and Urban Space. Proceedings of the Ninth International PLEA Conference* (pp. 619-624). Kluwer.

Santamouris, M., Synnefa, A. & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy, 85*(12), 3085-3102. https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023

Solar Reflectance. (2021, December 22). In *Science Direct*. https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-reflectance

U.S. Environmental Protection Agency. 2012. "Cool Pavements." In: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Draft. https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium

UCLA Energy Design Tools Group (2020). *Climate Consultant* (Version 6.0) [Computer software]. https://www.sbse.org/resources/climate-consultant

Whiston Spirn, A. (1984). *The granite garden - urban nature and human design*. Basic Books.

Yoklic, M. R., Chalfoun, N. V., Thompson, T. L., Macloed, D. & Myers, B. (1991) Planning for Visitor Comfort, Outdoors, at the United States Pavilion, EXPO '92, Seville, Spain. In: S. Alvarez et al. (Eds). *PLEA '91. Architecture and Urban Space. Proceedings of the Ninth International PLEA Conference* (pp. 153-158). Kluwer.

Αλεξάνδρου, Ε. (2013α). Γενικό περίγραμμα δικτυακών παρεμβάσεων με στόχο την αναβάθμιση της πόλης και τη βιωσιμότητα του αστικού οικοσυστήματος. Στο: Γ. Παρμενίδης, Γ. κ.ά. (2013). *Διερεύνηση στρατηγικών για τη δικτύωση των αστικών παρεμβάσεων στο Μητροπολιτικό Κέντρο Αθηνών*. Ερευνητικό Πρόγραμμα, Α΄ Φάση: Σύνταξη προδιαγραφών για δικτυακές/κομβικές επεμβάσεις. Περιφέρεια Αττικής, Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ. http://oldwww.arch.ntua.gr/sites/default/files/resource/13958_/a_phase.pdf

Αλεξάνδρου, Ε. (2013β). Γενικό περίγραμμα δικτυακών παρεμβάσεων με στόχο την αναβάθμιση της πόλης και τη βιωσιμότητα του αστικού οικοσυστήματος. Στο: Γ. Παρμενίδης, Γ. κ.ά. (2013). *Διερεύνηση στρατηγικών για τη δικτύωση των αστικών παρεμβάσεων στο Μητροπολιτικό Κέντρο Αθηνών*. Ερευνητικό Πρόγραμμα, Β΄ Φάση: Σύνταξη προδιαγραφών για δικτυακές/κομβικές επεμβάσεις. Περιφέρεια Αττικής, Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ. http://oldwww.arch.ntua.gr/sites/default/files/resource/13959_/b_phase.pdf

Γιάννας, Σ. (2001). Βιοκλιματικές αρχές πολεοδομικού σχεδιασμού. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Ανοικτών Χώρων*. *Τόμος Α. Περιβαλλοντική Τεχνολογία* (σσ. 175-234). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Ευαγγελινός, Ε. & Ζαχαρόπουλος, Η. (2001). *Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό*. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου* (σσ. 21-154). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Μπουγιατιώτη, Φ.-Μ. (2007). *Η θερμική συμπεριφορά και η περιβαλλοντική επίδραση των υλικών που χρησιμοποιούνται στους υπαίθριους χώρους και στο κέλυφος των κτιρίων στην Ελλάδα* [Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών. DOI: 10.12681/eadd/17018 & http://hdl.handle.net/10442/hedi/17018

Οικονόμου, Α. (2002). *Χρήση συστημάτων δροσισμού με εξάτμιση και με ακτινοβολία για τη βελτίωση του μικροκλίματος σε υπαίθριους χώρους και σε κτίρια* [Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ].

Οικονόμου, Α. (2007). Χρήση συστημάτων δροσισμού με εξάτμιση και με ακτινοβολία για τη βελτίωση του μικροκλίματος σε υπαίθριους χώρους και σε κτίρια. Στο: Γ. Μαρνελάκης (Επιμ.). *Έρευνα στην Αρχιτεκτονική. Σχεδιασμός-Χώρος-Πολιτισμός* (τ.1, σσ. 390-405). Εκδόσεις Αλεξάνδρεια.

ΠΕΤΕΠ 03-11-20-00. *Δομικές Εργασίες Κτιρίων, Λοιπές Οικοδομικές Εργασίες, Εφαρμογές Ψυχρών Υλικών (cool materials)*. Ελληνική Δημοκρατία. ΥΠΕΧΩΔΕ. https://www.ggde.gr/dmdocuments/2008-10_03-11-20-00.pdf

Σανταμούρης, Μ. κ.ά. (2000). *Οικολογική Δόμηση*. Ελληνικά Γράμματα, Διεπιστημονικό Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Ερευνών, ΥΠΕΧΩΔΕ Δ/νση Οικιστικής Πολιτικής και Κατοικίας.

Κεφάλαιο 11

Εξοικονόμηση ενέργειας – Αρχιτεκτονική ένταξη ΑΠΕ

Σύνοψη
Η συνεχής μείωση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων, σε συνδυασμό με την καταστροφή του περιβάλλοντος και την επιτακτική, πλέον, ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και για κτίρια (σχεδόν) Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (Net ή Near Zero Energy Buildings – NZEB), καθιστά πλέον απαραίτητη την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στην αρχιτεκτονική ένταξη συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα κτίρια και τους υπαίθριους χώρους των πόλεων. Ως εκ τούτου, γίνεται αναφορά μόνο σε εκείνες τις ΑΠΕ που σχετίζονται άμεσα με το δομημένο περιβάλλον, δηλαδή με την ηλιακή ενέργεια, την αιολική ενέργεια, τη γεωθερμία και τη βιομάζα.

Προαπαιτούμενη γνώση
Για την καλύτερη κατανόηση κάποιων σημείων του κεφαλαίου, χρειάζονται στοιχεία από τα Κεφάλαια 2 και 3 του παρόντος συγγράμματος. Σχετικά στοιχεία παρέχονται και από την ιστοσελίδα του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ). Τέλος, εκδόσεις από την προηγούμενη Δράση «Κάλλιπος», όπως το βιβλίο του Κατσαπρακάκη (2015), παρέχουν γενικές γνώσεις γύρω από τις ΑΠΕ και τα ενεργειακά συστήματα.

11.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

Οι σύγχρονες πόλεις αποτελούν ζωντανούς οργανισμούς που απορροφούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, νερού και φυσικών πόρων από το άμεσο και ευρύτερο περιβάλλον τους, ενώ ταυτόχρονα απορρίπτουν εξίσου μεγάλες ποσότητες αποβλήτων στον αέρα, στο έδαφος καισ τα νερά. Η απαιτούμενη ενέργεια μπορεί να παρέχεται από συμβατικές ή/και ανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι συμβατικές, μη ανανεώσιμες, πηγές ενέργειας είναι εκείνες «οι οποίες δεν αναπληρώνονται από φυσικές διαδικασίες ή αναπληρώνονται εξαιρετικά αργά για τα ανθρώπινα μέτρα» (Κατσαπρακάκης, 2015, σ. 16). Σε αυτές περιλαμβάνονται κυρίως τα ορυκτά καύσιμα (*fossil fuels*), δηλαδή ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο (Στο ίδιο, σ. 16). Στον αντίποδα βρίσκονται οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), που είναι εκείνες «οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον και ανανεώνονται ετησίως, με ρυθμούς υψηλότερους από την κατανάλωση ενέργειας από τον άνθρωπο. Είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, πριν στραφεί με εντατικούς ρυθμούς στη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Οι ΑΠΕ είναι πρακτικά ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν ρυπαίνει το περιβάλλον, ενώ η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνον από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών, που θα έχουν σκοπό τη δέσμευση του δυναμικού τους» (Κατσαπρακάκης, 2015, σ. 20).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, με βάση τους στόχους «20-20-20», η ενέργεια που προερχόταν από ΑΠΕ όφειλε να αυξηθεί κατά 20% έως το 2020 (Εικόνα 11.1). Τα κράτη μέλη διασφαλίζουν συλλογικά ότι έως το 2030 το μερίδιο της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα ανέρχεται σε τουλάχιστον 32% (*On the promotion of the use of energy from renewable sources*, Directive 2018/2001). Η νέα Οδηγία προβλέπει αύξηση αυτού του ποσοστού σε 38-40% και μείωση των εκπομπών αεριών του θερμοκηπίου κατά 55% μέχρι το 2030 (*Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council*, Document 52021PC0557). Ταυτόχρονα, η ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία που αφορά τα κτίρια (σχεδόν) Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (NZEB) (βλ. Κεφ. 13) στην ουσία προϋποθέτει την ένταξη ΑΠΕ στα κτίρια. Τέλος, η επιταγή για αξιοποίηση των ΑΠΕ είναι εμφανής και στους

Στόχους Βιωσιμότητας των Ηνωμένων Εθνών (UNSDGs), με τον στόχο 7 να αναφέρεται σε «Φθηνή και Καθαρή Ενέργεια» (*Affordable and Clean Energy*) (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development, n.d.). Ως εκ τούτου, είναι πλέον επιτακτική η ανάγκη εκμετάλλευσης των ΑΠΕ στα υφιστάμενα κέντρα των πόλεων, όχι μόνο με τη μορφή παθητικών ηλιακών συστημάτων, αλλά και με τη μορφή ενεργητικών συστημάτων ΑΠΕ.



Εικόνα 11.1 *Μερίδιο (%) διαφορετικών πηγών ενέργειας για το σύνολο της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 2019. Πηγή: Based on IEA data from the IEA (2019) World Energy Balances, https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances All rights reserved; as modified by [Alexandrou, et al., 2024].*

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2018/2001 (*On the promotion of the use of energy from renewable sources*, Directive 2018/2001), ως «ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ή ανανεώσιμη ενέργεια είναι η ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές ήτοι (Εικόνα 11.2):

- η αιολική,
- η ηλιακή (ηλιακή θερμική και ηλιακή φωτοβολταϊκή),
- η γεωθερμική ενέργεια,
- η ενέργεια του περιβάλλοντος,
- η παλιρροϊκή, κυματική και λοιπές μορφές ενέργειας των ωκεανών,
- η υδροηλεκτρική,
- η ενέργεια από βιομάζα,
- η ενέργεια από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από τα αέρια που παράγονται σε σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων και τα βιοαέρια».

Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στην αρχιτεκτονική ένταξη συστημάτων ΑΠΕ στα κτίρια. Ως εκ τούτου, γίνεται αναφορά μόνο σε εκείνες τις ΑΠΕ που σχετίζονται άμεσα και σχεδιαστικά με το κτιριακό περιβάλλον, δηλαδή την ηλιακή ενέργεια, που είναι και η σημαντικότερη και έχει το μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών, την αιολική ενέργεια, τη γεωθερμία και τη βιομάζα. Αξίζει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι τα τελευταία χρόνια υπάρχουν παραδείγματα κτιρίων και εφαρμογών που σχετίζονται με τις «λιγότερο» αρχιτεκτονικές ΑΠΕ (βλ. παρ. 11.7).



Εικόνα 11.2 *Συμβατικές και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Πηγή: Energy Sources by j4p4n via OpenClipart, CC0 1.0.*

Για τον ίδιο λόγο, δεν θα γίνει αναφορά σε μεγάλες (*mega*) υποδομές ηλιακών (π.χ. Εικόνα 11.3.α) και αιολικών (π.χ. Εικόνες 11.3.β και 11.3.γ) πάρκων, των οποίων η εγκατάσταση, καλώς ή κακώς, υπακούει μόνο σε οικονομικά/ενεργειακά κριτήρια και, παρόλο που αξιοποιούνται στον μέγιστο δυνατό βαθμό οι ΑΠΕ, η κλίμακά τους και η συνεπακόλουθη επίδρασή τους στο φυσικό περιβάλλον και το τοπίο τίθενται, σε κάποιες περιπτώσεις, υπό αμφισβήτηση.



Εικόνα 11.3 *α. Bhadla Solar Park, Ινδία. Πηγή: 2020-05-20, Sentinel-2A L1C, True color (1).jpg, by Copernicus Sentinel-2, ESA, Attribution: Contains modified Copernicus Sentinel data 2020, via Wikimedia Commons.*
β. Αιολικό πάρκο. Πηγή: Alta Wind Energy Center from Oak Creek Road, by Z22, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
γ. Υπεράκτιο (Off-shore) αιολικό πάρκο. Πηγή: Middelgrunden wind farm. Photo by Kim Hansen. Postprocessing (crop, rotation, color adjustment, dust spot removal and noise reduction) by Richard Bartz and Kim Hansen, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.

11.2 Ηλιακή ενέργεια

11.2.1 Γενικά στοιχεία

Η ηλιακή ενέργεια είναι ουσιαστικά η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον Ήλιο (βλ. Κεφ. 3, παρ. 3.1). Ενώ πρακτικά κάποιες από τις ΑΠΕ (π.χ. η βιομάζα) σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με την ηλιακή ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται παθητικά, σε παθητικά ηλιακά συστήματα για τη θέρμανση των κτιρίων (βλ. Κεφ. 7) και ενεργητικά σε διατάξεις:

- ηλιακών θερμικών συστημάτων και
- φωτοβολταϊκών (PV) συστημάτων.

11.2.2 Συστήματα – Τεχνολογία

Ηλιακά θερμικά συστήματα

Στα ηλιακά θερμικά συστήματα, η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα που συλλέγεται και μεταφέρεται με τη μορφή θερμότητας σε νερό, σε αέρα ή σε κάποιο άλλο ρευστό, που χρησιμοποιείται απευθείας ή μεταφέρεται στην τελική χρήση μέσω ενός εναλλάκτη. Η τεχνολογία που εφαρμόζεται είναι αρκετά απλή και υπάρχουν πολλές δυνατότητες εφαρμογής της σε χρήσεις όπου απαιτείται θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών. Η συνήθης διάταξη-εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος επιτρέπει τη φυσική ροή του νερού χρήσης, χωρίς τη χρήση αντλιών ή άλλων μέσων υποβοήθησης. Η πιο διαδεδομένη εφαρμογή των συστημάτων αυτών είναι ηλιακοί θερμοσίφωνες για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ΖΝΧ) (ΚΑΠΕ, χ.ε.-γ). Πέρα από αυτό, τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη θέρμανση χώρων, τη θέρμανση νερού κολυμβητικών δεξαμενών, τη θερμότητα βιομηχανικών διεργασιών, την ξήρανση γεωργικών προϊόντων και, τα τελευταία χρόνια, για την ψύξη/κλιματισμό των εσωτερικών χώρων των κτιρίων (ηλιακός κλιματισμός).

Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής ζεστού νερού αποτελείται από επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, ένα δοχείο αποθήκευσης της θερμότητας και σωληνώσεις (Εικόνα 11.4.α). Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από τον συλλέκτη και η συλλεγόμενη θερμότητα μεταφέρεται στο δοχείο αποθήκευσης. Ο συλλέκτης είναι μια σκουρόχρωμη επιφάνεια με απλή μαύρη βαφή, ημι-επιλεκτική ή επιλεκτική (Χριστοδουλάκη, 2008, σ. 8). Οι διαφορετικές αυτές επιλογές σχετίζονται με την απορρόφηση της ηλιακής (μικρού μήκους κύματος) ακτινοβολίας και την εκπομπή μεγάλου μήκους κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας (Βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.2.1 και 5.2.3). Η επιλεκτική επιφάνεια διακρίνεται από μεγάλη απορροφητικότητα (90-95%) στα μικρά μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας και από ελάχιστη ανάκλαση (5-15%) στα μεγαλύτερα μήκη κύματος (Χριστοδουλάκη, 2008, σ. 8), γεγονός που σημαίνει ότι απορροφά ηλιακή ενέργεια χωρίς να εκπέμπει θερμότητα. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως στη στέγαση του κτιρίου, με νότιο προσανατολισμό και κλίση η οποία εξαρτάται από τη γεωγραφική περιοχή και τη λειτουργία του κτιρίου. Έτσι, η βέλτιστη κλίση για ετήσια λειτουργία είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος, ενώ για χειμερινή λειτουργία είναι ίση με το γ.π.+15^{o} (μεγαλύτερη κλίση λόγω μικρότερων γωνιών ηλιακού ύψους) και για θερινή είναι ίση με το γ.π.-15^{o} (μικρότερη κλίση λόγω μεγαλύτερων γωνιών ηλιακού ύψους) (Χριστοδουλάκη, 2008, σ. 6). Τα ηλιακά θερμικά συστήματα, πέρα από την απλότητά τους, έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως αυξημένη απόδοση, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ το αρχικό κόστος τους είναι σχετικά χαμηλό και αποσβένεται σε μικρό χρονικό διάστημα.

Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται και εφαρμόζεται η τεχνολογία των ηλιακών συλλεκτών κενού (*evacuated or vacuum tube solar collectors*) (Εικόνα 11.4.β). Η θερμότητα συλλέγεται σε μεταλλικό σωλήνα που τοποθετείται στο κέντρο γυάλινου σωλήνα σφραγισμένου στο κενό, με στόχο την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών. Ένας αριθμός από γυάλινους σωλήνες τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους και συνδέονται στο πάνω μέρος του συλλέκτη. Η διαφορά τους με τους επίπεδους συλλέκτες είναι ότι έχουν μειωμένες απώλειες θερμότητας λόγω μεταφοράς και υψηλή θερμοκρασία και για τους λόγους αυτούς δεν συνιστώνται για ΖΝΧ, αλλά για ηλιακό κλιματισμό, βιομηχανικές εφαρμογές και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα, έχουν πολύπλοκη εγκατάσταση και μεγαλύτερο κόστος (Χριστοδουλάκη, 2008, σ. 9).



Εικόνα 11.4 *Ηλιακά θερμικά συστήματα.*
α. Ηλιακοί συλλέκτες (θερμοσίφωνες). Πηγή: Solar panels, Santorini by 23x2 via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
β. Ηλιακοί συλλέκτες κενού. Πηγή: Col·lectors solars de tub de buit by Chixoy via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.

Φωτοβολταϊκά (Photovoltaics – PV)

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία πραγματοποιείται απευθείας μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς δηλαδή την ενδιάμεση εμφάνιση κάποιας άλλης μορφής ενέργειας, σε ηλεκτρική (Κατσαπρακάκης, 2015, σ. 56). Η ηλιακή ακτινοβολία δημιουργεί ηλεκτρική τάση και με την κατάλληλη σύνδεση σε φορτίο παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Το βασικό μέρος, το ηλιακό στοιχείο (*solar cell*), είναι ένας κατάλληλα επεξεργασμένος ημιαγωγός μικρού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ομαδοποιούνται κατάλληλα και

συγκροτούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ή γεννήτριες (*modules*), που με τη σειρά τους συνδέονται ηλεκτρολογικά μεταξύ τους, δημιουργώντας φωτοβολταϊκές συστοιχίες (*arrays*) («Φωτοβολταϊκά», 2022) Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορεί να είναι:

- διασυνδεδεμένα με το δίκτυο και
- αυτόνομα.

Ένα τυπικό σύστημα αποτελείται από: τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, τη σύνδεση με το υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτροδότησης ή τις μπαταρίες στην περίπτωση αυτόνομου συστήματος, τον καθορισμό ισχύος και τη συσκευή ελέγχου, που περιλαμβάνει φροντίδα για μέτρηση και παρατήρηση και, τέλος, την εφεδρική γεννήτρια. Η φωτοβολταϊκή συστοιχία μπορεί να περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά:

- μονοκρυσταλλικά (*monocrystalline*),
- πολυκρυσταλλικά (*polycrystalline*),
- άμορφα (*amorphous*),
- λεπτά (*thin film*),
- οργανικά (*organic*).

Από τα παραπάνω, τα μονοκρυσταλλικά και τα πολυκρυσταλλικά είναι βαριά και δύσκαμπτα, ενώ τα τελευταία δύο είναι εύκαμπτα και ελαφριά. Τα άμορφα είναι αυτά με τη μεγαλύτερη απόδοση.

11.2.3 Αρχιτεκτονική ένταξη – Ζητήματα που τίθενται

Η αρχιτεκτονική ένταξη ενεργητικών ηλιακών συστημάτων στο κέλυφος υφιστάμενων κτιρίων παρέχει μια σημαντική δυνατότητα εκμετάλλευσης των ΑΠΕ, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να συμβάλει και στη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται. Αυτά τα δύο μέτρα σημειώνονται και στην Ευρωπαϊκή Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD, Energy Performance of Buildings Directive recast, Directive 2010/31/EU) ως σημαντικά για τη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης της ΕΕ, τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τη συμμόρφωση με το Πρωτόκολλο του Κιότο (European Parliament and Council, 2010). Τα κτίρια και ιδιαίτερα τα δώματά τους στα υφιστάμενα κέντρα των πόλεων καλύπτουν εκτεταμένες επιφάνειες, στις οποίες θα μπορούσαν να ενταχθούν ενεργητικά ηλιακά συστήματα. Σε όλες τις χώρες γύρω από τη Μεσόγειο και ιδιαίτερα στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου, η εφαρμογή ηλιακών θερμοσιφώνων για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ΖΝΧ) αποτελεί κοινή πρακτική ήδη από τη δεκαετία του 1980 (Bougiatioti & Michael, 2015).

Στο μεγαλύτερο μέρος της, η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από ήπιο κλίμα. Η διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας (πολλές ώρες ηλιοφάνειας, χαμηλά ποσοστά νέφωσης και αυξημένα ποσά προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας) (Michael et al., 2010) καθιστά την εφαρμογή ενεργητικών ηλιακών συστημάτων οικονομικά και οικολογικά αποδοτική. Η μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο είναι πολύ υψηλή, με τις μέσες τιμές να κυμαίνονται ανάμεσα στις 500 και 600 kWh/m^2 (Michael et al., 2010). Ταυτόχρονα, κατά τη θερινή περίοδο, οι περισσότερες ημέρες χαρακτηρίζονται από κυρίαρχα καθαρούς ουρανούς, γεγονός που φαίνεται από τις πολλές ώρες ηλιοφάνειας (περ. 11-12 ώρες/ημέρα για την Αθήνα κατά τη διάρκεια των μηνών του καλοκαιριού). Πολύ απλά, μεγάλα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας φτάνουν στις επιφάνειες των κτιρίων για τον μέγιστο αριθμό ωρών. Για τον λόγο αυτόν, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου λόγω της αρχιτεκτονικής ένταξης απαιτείται απόκλιση από τον βέλτιστο, νότιο προσανατολισμό και τη βέλτιστη κλίση (ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής για ετήσια λειτουργία), η προσπίπτουσα ακτινοβολία και η παραγωγή ενέργειας παραμένουν σε αποδεκτά με βάση τη βιβλιογραφία όρια (Bougiatioti & Michael, 2015).

Η αρχιτεκτονική ποιότητα και ένταξη ενεργητικών ηλιακών συστημάτων έχει αποτελέσει αντικείμενο πολυάριθμων μελετών, οι οποίες εστιάζουν κυρίως στην αρχιτεκτονική ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών

συστημάτων (building-integrated photovoltaics – BIPV) (Hagemann, 1996, 2004· Nofuentes & Almonacid, 1998· Kaan & Reijenga, 2004· Ohno, 2004· Prasad & Snow, 2004), ηλιακών-θερμικών συστημάτων (Munari & Roecker, 2007) και συγκεντρωτικών συστημάτων (Chemisana et al., 2013 και Chemisana, 2011). Οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες εστιάζουν σε νέα κτίρια ή σε υφιστάμενα κτίρια, στα οποία πραγματοποιείται δραστική ανακαίνιση (*deep renovation*), καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις επιτρέπεται η πλήρης εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που προσφέρονται για καινοτόμο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, ενώ παρέχεται η δυνατότητα για βέλτιστη τοποθέτηση ως προς τον προσανατολισμό και την κλίση. Από την άλλη μεριά, η εφαρμογή ενεργητικών ηλιακών συστημάτων σε υφιστάμενα κτίρια, ιδιαίτερα σε σύγχρονα, υπόκειται σε πολλούς περιορισμούς σε ό,τι αφορά την ένταξη σε συγκεκριμένα κτίρια και το περιβάλλον τους.

Στη διάρκεια της ιστορίας της βιοκλιματικής και ενεργειακά αποδοτικής αρχιτεκτονικής, από το 1970 έως σήμερα, είναι σαφές ότι ο καλός αρχιτεκτονικός σχεδιασμός αποτελεί σημαντικό κριτήριο για τη γενίκευση της εφαρμογής ενός ή περισσότερων συστημάτων, αλλά και για τη θετική αποτίμησή τους από το ευρύ κοινό. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων, που δεν είναι απλά αποδοτικά, αλλά και αισθητικά ελκυστικά (*stimulating*), απαιτούν μια ολιστική προσέγγιση (Prasad & Snow, 2005). Στο πλαίσιο αυτής της ολιστικής προσέγγισης, η εισαγωγή της ενσωμάτωσης ΑΠΕ είναι ακόμα πιο σημαντική, καθώς συνεισφέρει στην παραγωγή καθαρής ενέργειας, με συνεπακόλουθο τη μείωση των εκπομπών CO_2 (Prasad & Snow, 2005) και οδηγώντας σε κτίρια NZEB (Net ή Near Zero Energy Buildings) —Κτίρια (Σχεδόν) Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (βλ. Κεφ. 13).

Σε ό,τι αφορά τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, η αρχιτεκτονική ένταξη φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει διερευνηθεί εκτενώς από τους Kaan και Reijenga (2004), οι οποίοι και έχουν διατυπώσει συγκεκριμένες σχεδιαστικές προσεγγίσεις, που περιλαμβάνουν:

- «αόρατη» εφαρμογή (*Invisible application*),
- προσθήκη στον σχεδιασμό (*Addition to the design*),
- προσθήκη στην αρχιτεκτονική εικόνα (*Addition to the architectural image*),
- καθορισμό της αρχιτεκτονικής εικόνας (*Determination of the architectural image*) και
- καθοδήγηση προς νέες αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις (*Direction towards new architectural concepts*).

Το ίδιο ισχύει και για τα αισθητικά κριτήρια, τα οποία οι ίδιοι συγγραφείς (Kaan & Reijenga, 2004) προτείνουν να αφορούν:

- την αρχιτεκτονική ποιότητα στο πλαίσιο του κτιρίου (Architectural quality, within the context of the building),
- την καλή σύνθεση χρωμάτων και υλικών (*Good composition of colours and materials*),
- τον σεβασμό στον αρχιτεκτονικό κάνναβο, στην αρμονία με το κτίριο και συνολικά στην καλή σύνθεση (*Respect of the gridula, harmony with the building and joint good composition*),
- τη συμφωνία με το πλαίσιο του κτιρίου (Accordance with the building context —contextuality),
- την καλή μηχανολογική εφαρμογή (*Good engineering*) και
- την καθοδήγηση προς έναν καινοτόμο σχεδιασμό (*Direction to an innovative design*).

Με βάση τα παραπάνω, το ζήτημα της αρχιτεκτονικής ένταξης ενεργητικών ηλιακών συστημάτων στο κέλυφος των κτιρίων μπορεί να βασιστεί σε δύο θεωρητικές παραδοχές. Η πρώτη αφορά το γεγονός ότι τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα ανάγονται αρχιτεκτονικά σε επιφάνειες ή/και όγκους. Ως εκ τούτου, οι αρχές για τα PV και τα ηλιακά θερμικά συστήματα παραμένουν ίδιες και η αρχιτεκτονική τους ένταξη αφορά τις

διαφορετικές εναλλακτικές τοποθέτησής τους στο κέλυφος των κτιρίων. Η δεύτερη παραδοχή αφορά τη γενίκευση των αισθητικών κριτηρίων που προαναφέρθηκαν συνολικά για τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα.

Στις όψεις των κτιρίων, η αρχιτεκτονική ένταξη ενεργητικών ηλιακών συστημάτων αφορά κυρίως:

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία ως τελική επιφάνεια (κατασκευή αεριζόμενης ή υβριδικής πρόσοψης), αντικαθιστώντας συμβατικά υλικά (π.χ. πέτρα, κεραμικά, αλουμίνιο, ξύλο, κ.λπ.).
- Υαλοπίνακες με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία.
- Φωτοβολταϊκά πάνελ ως στοιχεία ηλιοπροστασίας.
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία και ηλιακούς συλλέκτες ως πάνελ στηθαίων μπαλκονιών.

α. 

β. 

γ. 

δ. 

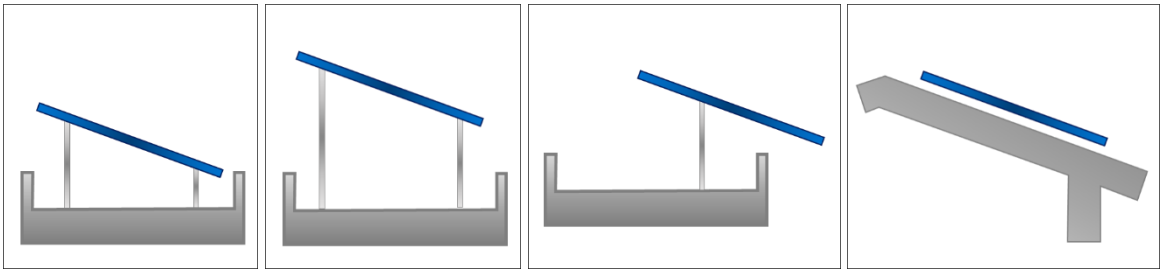
ε. 

Εικόνα 11.5 *Αρχιτεκτονική ένταξη ενεργητικών ηλιακών συστημάτων.*
α. PV ως τελική επιφάνεια. Βιβλιοθήκη Pompeu Fabra, Mataro, Ισπανία (Miquel Brullet i Tenas, 1998). Πηγή: Biblioteca Pompeu Fabra, by Vàngelis Villar via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0 ή Mataró - Biblioteca Pompeu Fabra, by Zarateman via Wikimedia Commons, CC0.
β. Υαλοπίνακες με ενσωματωμένα PV. Hôtel industriel Le Losserand (Emmanuel Saadi, 2008). Πηγή: Le Losserand, by Doalex via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.
γ. PV ως στοιχεία ηλιοπροστασίας. Πηγή: PV external shading device in zero energy building of Singapore, by Esmail7 via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.
δ. Ηλιακοί συλλέκτες κενού ως ηλιακοί συλλέκτες σε όψη. Κοινωνικές κατοικίες, Rue La Chapelle, Παρίσι, Γαλλία (Philippon-Kalt Architects, 2014). Πηγή: Photo by courtesy of Philippon-Kalt Architectes-Urbanistes.
ε. PV ως κατακόρυφη επένδυση εξωτερικού τοίχου κτιρίου σε χιονοδρομικό κέντρο στην κεντρική Ευρώπη. Πηγή: Φωτογραφικό υλικό από προσωπικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

Στα δώματα των κτιρίων, η εφαρμογή ηλιακών συλλεκτών ή/και φωτοβολταϊκών στοιχείων μπορεί να γίνει με τρεις (3) διαφορετικούς τρόπους (Μπουγιατιώτη, 2007) (Εικόνα 11.6):

- σε επαφή με την επιφάνεια του δώματος,
- σε απόσταση από αυτήν και
- στο όριο.

Στις επικλινείς στέγες, η εφαρμογή ενεργητικών ηλιακών συστημάτων καλό είναι να ακολουθεί και να προσαρμόζεται στην επιφάνεια και την κλίση της στέγης, ακόμα και εάν αυτή δεν είναι η βέλτιστη με όρους απόδοσης, δηλαδή αποκλίνει από τον καθαρό Νότο ή/και από τη βέλτιστη κλίση.



Εικόνα 11.6 *Εφαρμογή – Αρχιτεκτονική ένταξη ηλιακών συστημάτων στα δώματα και στις στέγες κτιρίων. Πηγή: Ιδία σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Τέλος, τα τελευταία χρόνια, υπάρχει και έντονο ενδιαφέρον στην ένταξη συστημάτων ΑΠΕ (κυρίως PV) σε στοιχεία αστικού εξοπλισμού, όπως είναι τα στέγαστρα υπαίθριων χώρων στάθμευσης και τα φωτιστικά σώματα (Εικόνα 11.7).



Εικόνα 11.7 *Εφαρμογή – Αρχιτεκτονική ένταξη PV σε στοιχεία αστικού εξοπλισμού.*
α. Πέργκολα με PV σε υπαίθριο χώρο στάθμευσης. Πηγή: Solar panels at the Springs Reserve, by J. N. Stuart via Flickr, CC BY-NC-ND 2.0.
β. Solar Tree, Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο (Ross Lovegrove, 2012). Πηγή: Solar tree, by ricrossi via Wikimedia Commons, CC BY-SA.

Ένα από τα βασικά ζητήματα που τίθενται ειδικά στα κέντρα των πόλεων είναι ο σκιασμός από τα στοιχεία του άμεσου δομημένου και φυσικού περιβάλλοντος. Το πρόβλημα αυτό αφορά κυρίως τις όψεις των κτιρίων και δευτερευόντως τις στεγάσεις (δώματα και στέγες) που έχουν απρόσκοπτη ηλιακή πρόσβαση, ιδίως όταν πρόκειται για κτίρια με το ίδιο ύψος, κάτι που συνήθως ισχύει στα υφιστάμενα κέντρα των πόλεων· εκεί, τα ύψη των κτιρίων συχνά εξαντλούν τον εκάστοτε συντελεστή δόμησης και το μέγιστο ύψος. Στο σύνολο της πόλης, τα δώματα αποτελούν εκτάσεις χωρίς ουσιαστική χρήση, οι οποίες έχουν πολύ καλή ηλιακή πρόσβαση. Για τους λόγους αυτούς, θεωρείται ότι η εφαρμογή σε αυτά ηλιακών συστημάτων μπορεί να συμβάλει στην εξοικονόμηση συμβατικής ενέργειας για την παροχή ζεστού νερού για χρήση ή/και τη θέρμανση των χώρων (ηλιακοί συλλέκτες), ή/και για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (φωτοβολταϊκά στοιχεία). Αντίθετα, στις όψεις των κτιρίων, και ειδικά στους κατώτερους ορόφους, η επίδραση του σκιασμού από τα απέναντι και τα γύρω κτίρια μπορεί να είναι σημαντική, ανάλογα πάντα με τα γεωμετρικά

χαρακτηριστικά του δρόμου (λόγο H/W, βλ. και Κεφ.2, παρ. 2.8.1) και την εποχή του έτους, που επηρεάζει τις γωνίες ηλιακού ύψους και αζιμουθίου (Bougiatioti & Michael, 2015).

Η αρχιτεκτονική ένταξη ενεργητικών ηλιακών συστημάτων σε υφιστάμενα κτίρια είναι ιδιαίτερα σημαντική, όπου ο προσεκτικός και σωστός σχεδιασμός μιας τέτοιας επέμβασης μπορεί να τους προσδώσει νέες αρχιτεκτονικές ποιότητες. Συγχρόνως, μια τέτοια παρέμβαση αντικατοπτρίζει το πνεύμα της εποχής και την ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας σε κτίρια τα οποία κτίστηκαν σε παλαιότερες εποχές, όταν τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων θεωρούνταν ανεξάντλητα. Τέλος, σε σχέση με την ενσωμάτωση ηλιακών συστημάτων στα κτίρια, πρέπει να αναφερθεί ότι είναι δυνατό να λειτουργήσει ως μέσο ενημέρωσης και εκπαίδευσης του κοινού γύρω από την εξοικονόμηση ενέργειας και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Στο ίδιο).

Η εφαρμογή ηλιακών συλλεκτών σε δώματα καινούργιων ή υπαρχόντων κτιρίων στην Ελλάδα παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Το βασικότερο είναι ότι η παραγωγή ηλιακών συλλεκτών αποτελεί ανεπτυγμένο κλάδο της βιομηχανίας και, κατά συνέπεια, υπάρχει μεγάλη τεχνογνωσία γύρω από αυτόν τον τομέα παραγωγής ενέργειας. Σημαντικό είναι και το γεγονός ότι η τοποθέτηση ενός ηλιακού θερμοσίφωνα σε ένα δώμα γίνεται αρκετά εύκολα και γρήγορα. Ειδικά, όμως, το στοιχείο αυτό έχει αρνητικές συνέπειες για την εικόνα των δωμάτων και της πόλης γενικότερα. Αυτό συμβαίνει γιατί η εγκατάσταση των ηλιακών συλλεκτών στα δώματα γίνεται κατά τρόπο μη προγραμματισμένο και άναρχο. Η εφαρμογή διατάξεων ηλιακών συλλεκτών αντί μεμονωμένων θερμοσιφώνων σε ένα δώμα παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Το βασικό πλεονέκτημα είναι η καλύτερη αισθητική εικόνα. Σε σχέση με τη χωροθέτηση των ηλιακών συλλεκτών, παρατηρείται ότι, όταν η εφαρμογή τους αναπτύσσεται σε ολόκληρη την επιφάνεια του δώματος, αποκλείεται η πρόσβαση σε αυτό και η χρήση του από τους ενοίκους. Συγχρόνως, όμως, ο μεγάλος αριθμός ηλιακών συλλεκτών συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας για θέρμανση ζεστού νερού οικιακής χρήσης και για θέρμανση χώρων (Στο ίδιο).

Αντίθετα, η ένταξη των ηλιακών συλλεκτών σε κατασκευές σε απόσταση από την επιφάνεια του δώματος επιτρέπει τη χρήση του δώματος από τους χρήστες του κτιρίου, ενώ συγχρόνως συμβάλλει και στον σκιασμό της επιφάνειάς του κατά τη θερμή, θερινή περίοδο. Πολύ θετικό στοιχείο για την εφαρμογή ηλιακών συλλεκτών στα δώματα των υπαρχόντων κτιρίων αποτελεί το γεγονός ότι για την πλειονότητα των Ελλήνων ο ηλιακός θερμοσίφωνας δεν αποτελεί μια άγνωστη και δαπανηρή καινοτομία (όπως, αντίθετα, συμβαίνει με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία), αλλά ένα γνωστό στοιχείο που εφαρμόζεται πάρα πολύ συχνά στα κτίρια. Στην Ελλάδα, είναι όχι μόνο δυνατή, αλλά και εύκολη η χρησιμοποίηση της θέλησης του κοινού και της τεχνογνωσίας που έχει αναπτυχθεί για την εφαρμογή ολοκληρωμένων εγκαταστάσεων ηλιακών συλλεκτών στα δώματα των κτιρίων. Έτσι, μπορεί πλέον να δοθεί βαρύτητα στην ενημέρωση των πολιτών και των εταιρειών, σε σχέση με την αρχιτεκτονική ένταξη των ηλιακών συλλεκτών στα δώματα των κτιρίων. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να υπάρξει βελτίωση της εικόνας των πόλεων και καλύτερη χρήση των δωμάτων (Στο ίδιο).

Για τις ελληνικές πόλεις, ένα επιπλέον επιχείρημα για την αρχιτεκτονική ένταξη φωτοβολταϊκών στοιχείων στις ελεύθερες επιφάνειες των δωμάτων είναι ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες το μέγιστο της παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία συμπίπτει με τις ώρες αιχμής στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της λειτουργίας των κλιματιστικών μηχανημάτων. Κατά συνέπεια, είναι δυνατό αυτή η ενέργεια να διατίθεται στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, συμβάλλοντας, έτσι, στην κάλυψη του ελλείμματος και απαλείφοντας τις ανάγκες για κατασκευή νέων σταθμών παραγωγής ενέργειας (Γιάννας, 2001).

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα που τίθεται ως προς τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα είναι η χρήση κυρίως των ηλιακών θερμοσιφώνων σε παραδοσιακούς ηπειρωτικούς και νησιωτικούς οικισμούς ανά την Ελλάδα, ακόμα και όταν η εφαρμογή τους απαγορεύεται από τον ισχύοντα βαθμό προστασίας τους (απόλυτη, σημαντική και περιορισμένη) (Παπαγεωργίου & Ποζουκίδου, 2014). Στις περισσότερες περιπτώσεις, η τοποθέτηση του ηλιακού θερμοσίφωνα στο δώμα ή στη στέγη γίνεται μόνο με βάση τον

βέλτιστο προσανατολισμό και τη βέλτιστη κλίση, ανεξάρτητα από τη γεωμετρία του κτιρίου. Ταυτόχρονα, στα δώματα τοποθετούνται στην περίμετρο, με στόχο την εκμετάλλευση της επιφάνειας του δώματος για άλλες χρήσεις. Τέλος, σημαντικά αρνητικά στοιχεία που συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στην εικόνα υποβάθμισης είναι ο κυρίαρχος τύπος με το δοχείο συλλογής πάνω από την επιφάνεια συλλογής, οι ανακλαστικές επιφάνειες και οι εμφανείς σωληνώσεις (Ευαγγελινός κ.ά., 2007). Τα παραπάνω καθιστούν την εφαρμογή ηλιακών θερμοσιφώνων ασύμβατη με τον παραδοσιακό χαρακτήρα των οικισμών (Bougiatioti & Michael, 2015).

Στην περίπτωση οικισμού με απόλυτο βαθμό προστασίας, η σχετική σχεδιαστική προσέγγιση των Kaan και Reijenga (2004) (βλ. παραπάνω) οφείλει να είναι εκείνη της «αόρατης» εφαρμογής. Ωστόσο, αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, εξαιτίας της τοπογραφίας τους και της σχέσης μεταξύ των κτιρίων, στοιχεία που έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικές θεάσεις από διαφορετικά σημεία/θέσεις (Ευαγγελινός κ.ά., 2007). Στην περίπτωση αυτή, η εφαρμογή πρέπει να αποφεύγεται ή να επιτρέπεται μόνο με την προϋπόθεση της βέλτιστης γεωμετρικής και χρωματικής ένταξης, καθώς και με τον αποκλεισμό των δοχείων και την ελαχιστοποίηση σωληνώσεων και καλωδιώσεων.

Στην περίπτωση οικισμών με σημαντικό βαθμό προστασίας απαιτείται και πάλι η «αόρατη» εφαρμογή, όμως μπορούν να εφαρμοστούν και προτάσεις που σέβονται ή προσαρμόζονται στα αρχιτεκτονικά, γεωμετρικά και αισθητικά στοιχεία των κτιρίων, διατηρώντας ταυτόχρονα την ταυτότητα και την ιδιαιτερότητα των ενεργητικών ηλιακών συστημάτων. Οι Ευαγγελινός κ.ά. (2007) καταλήγουν σε μια σειρά από σχετικές γενικές οδηγίες/αρχές για τους νησιωτικούς παραδοσιακούς οικισμούς των Κυκλάδων, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- τη χρήση λευκού χρώματος έναντι ανακλαστικών μεταλλικών χρωμάτων σε όλα τα μέρη του συστήματος πέραν της επιφάνειας ηλιακής συλλογής,
- τη συμπαγή γεωμετρία και τις πρισματικές μορφές έναντι στοιχείων με τη μορφή πλάκας και, όπου αυτό είναι δυνατόν, την αποφυγή ή την απόκρυψη του δοχείου συλλογής,
- την απόσταση από την περίμετρο του δώματος,
- την κλίση η οποία να καθορίζεται από το ύψος και τη μορφή του στηθαίου,
- το συγκεκριμένο ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας του δώματος από ενεργητικά ηλιακά συστήματα (7-25%),
- την προσεκτική διευθέτηση των σωληνώσεων και των καλωδιώσεων.

Τέλος, στην περίπτωση οικισμών με περιορισμένο βαθμό προστασίας, η εφαρμογή ενεργητικών ηλιακών συστημάτων μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση ή στον εμπλουτισμό της εικόνας των κτιρίων, αρκεί να είναι σε συμφωνία με τα αισθητικά κριτήρια των Kaan & Reijenga (2004) που προαναφέρθηκαν και η τοποθέτηση των συστημάτων να σέβεται τα γεωμετρικά και άλλα στοιχεία των κτιρίων.

11.3 Αιολική ενέργεια

11.3.1 Γενικά στοιχεία

Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου υπήρξε από την αρχαιότητα μια λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του ανθρώπου, σε κατασκευές όπως τα ιστιοφόρα, οι ανεμόμυλοι κ.λπ. (βλ. ενδεικτικά παραδείγματα στην Εικόνα 11.8). Σήμερα, για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι ανεμογεννήτριες, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Οι νησιωτικές περιοχές της Ελλάδας είναι από τις ευνοϊκότερες γεωγραφικές θέσεις παγκοσμίως για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας (ΚΑΠΕ, χ.ε.-α).

α.  β.  γ. 

δ.  

Εικόνα 11.8 *Παραδοσιακοί ανεμόμυλοι.*

α. Παραδοσιακός ανεμόμυλος στη Ρουμανία (Dobrogea, Tulcea Country). Πηγή: Windmill in Astra museum, by Maria Bostenaru Dan via imaggeo.egu.eu, CC BY-NC-ND 3.0.

β. Μεταλλικός ανεμόμυλος άντλησης νερού (water pumping windmill). Πηγή: brown windmill under blue sky during daytime, Photo by Stephanie Klepacki on Unsplash.

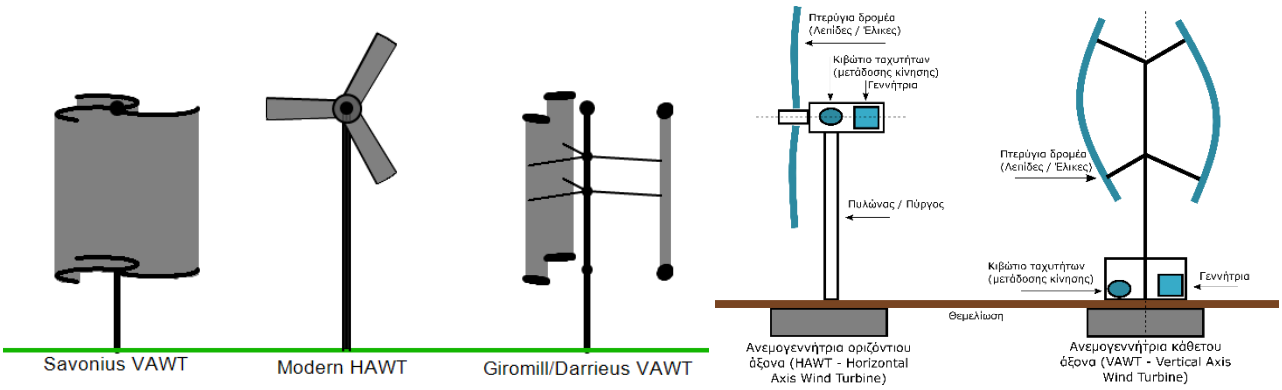
γ. Ανεμόμυλοι άντλησης νερού στο Οροπέδιο Λασιθίου, Κρήτη. Πηγή: A windmill in the middle of a frozen lake, Photo by Evangelos Mpikakis on Unsplash.

δ. Παραδοσιακός ανεμόμυλος στη Μύκονο. Πηγή: White and black windmill, Photo by Jason Blackeye on Unsplash και Παραδοσιακός ανεμόμυλος στη Μύκονο. Πηγή: Windmill, Photo by Pierre Pavlovic on Unsplash.

11.3.2 Συστήματα – Τεχνολογία

Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές, οι οποίες διακρίνονται ως προς τον άξονά τους σε (Εικόνα 11.9):

- οριζόντιου άξονα ανεμογεννήτριες (Horizontal Axis Wind Turbines – HAWT) και
- κάθετου άξονα ανεμογεννήτριες (Vertical Axis Wind Turbines – VAWT).



Εικόνα 11.9 *Σχηματική απεικόνιση ανεμογεννητριών οριζόντιου (HAWT) και κάθετου (VAWT) άξονα.*
α. Ενδεικτικές μορφές. Πηγή: HAWT and VAWTs in operation, by Ssgxnh via Wikimedia Commons, Public domain.
β. Βασικά μέρη/τμήματα. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη), με δεδομένα από American Wind Energy Association στο Abdi (2020).

Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, ο δρομέας/έλικας (*rotor*) έχει τον άξονα παράλληλο με το έδαφος και με την κατεύθυνση του ανέμου και η κατασκευή στηρίζεται σε ένα κατακόρυφο στοιχείο (πύργο). Αντίθετα, σε εκείνες με κάθετο άξονα, ο δρομέας/έλικας περιστρέφεται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα, ο οποίος είναι κάθετος στην επιφάνεια του εδάφους και σταθερός, αφού πρακτικά συμπίπτει με το κατακόρυφο στοιχείο στήριξης της κατασκευής (ΚΑΠΕ, χ.ε.-β). Μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα αποτελείται από τα εξής μέρη: τον δρομέα, που έχει δύο ή τρία πτερύγια, το σύστημα μετάδοσης κίνησης, την ηλεκτρική γεννήτρια, το σύστημα προσανατολισμού, τον πύργο που στηρίζει όλα τα παραπάνω, τον ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου (ΚΑΠΕ, χ.ε.-β). Βασική διαφορά ανάμεσα στους δύο τύπους, HAWT και VAWT, αποτελεί η χωροθέτηση του συστήματος μετάδοσης κίνησης και της γεννήτριας, στην κορυφή και στη βάση του πύργου στήριξης, αντίστοιχα.

Τα πλεονεκτήματα των VAWT αφορούν κυρίως ζητήματα λειτουργίας και κλίμακας. Στα λειτουργικά πλεονεκτήματα ανήκει το γεγονός ότι το σύστημα μετάδοσης κίνησης και η γεννήτρια βρίσκονται κοντά στο έδαφος και άρα η κατασκευή, αλλά και η συντήρηση και αντικατάστασή τους είναι σαφώς ασφαλέστερες για τους εργαζομένους. Οι HAWT πρέπει να προσανατολίζονται προς την κατεύθυνση των επικρατούντων ανέμων, σε αντίθεση με τις VAWT των οποίων η χωροθέτηση και ο προσανατολισμός είναι ανεξάρτητα. Ως προς τα υλικά και τα μέρη τους (*components*), στις VAWT, ο πύργος στην ουσία συμπίπτει με τον άξονα/ρότορα, οδηγώντας σε λιγότερα τμήματα/μέρη και, άρα, σε εξοικονόμηση πρώτων υλών και υλικών. Τέλος, ως προς την κλίμακα, ο σχεδιασμός των VAWT επιτρέπει την εκμετάλλευση μικρότερης ταχύτητας ανέμων και, άρα, μπορούν να εφαρμοστούν σε μικρότερη κλίμακα και να ενταχθούν στον αστικό ιστό ή/και στα δώματα των κτιρίων. Ο σχεδιασμός των VAWT είναι εν γένει πιο «ελεύθερος». Ανάλογα με το είδος, μπορεί το κόστος κατασκευής να είναι χαμηλότερο («Wind turbine», 2022 και «Vertical-axis wind turbine», 2022). Το κυριότερο μειονέκτημα των VAWT είναι η χαμηλότερη απόδοσή τους.

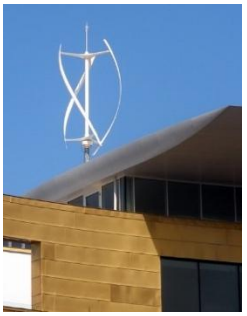
11.3.3 Αρχιτεκτονική ένταξη – Ζητήματα που τίθενται

Μικρού μεγέθους και ισχύος (έως 100 kW) ανεμογεννήτριες, τόσο οριζόντιου (HAWT) όσο και κατακόρυφου άξονα (VAWT), είναι δυνατόν να ενσωματωθούν στα κτίρια (κυρίως στη στέγαση), στον άμεσο περιβάλλοντα χώρο τους ή και στον αστικό ιστό (Παπαμανώλης, 2015, σ. 101). Χαρακτηριστικά παραδείγματα ενσωμάτωσης σε κτίρια είναι το Περίπτερο της Ολλανδίας στην Παγκόσμια Έκθεση (Expo 2000) (Αρχιτέκτονες: MVRDV) στο Ανόβερο της Γερμανίας (Εικόνα 11.10.α), αλλά και μεγάλα κτίρια, όπως το Παγκόσμιο Κέντρο Εμπορίου (Bahrain World Trade Center, 2008) στη Manama (Bahrain) και το κτίριο κατοικιών Strata SE1, κατασκευασμένο το 2010 στο Southwark του Λονδίνου, Ηνωμένο Βασίλειο. Το ζήτημα που τίθεται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ο θόρυβος και οι κραδασμοί που παράγονται από τις ανεμογεννήτριες και αποτελούν παράγοντα όχλησης για τους ενοίκους των κτιρίων (Παπαμανώλης, 2015, σ. 101). Ταυτόχρονα, υπάρχει και μια συζήτηση που αφορά το *greenwashing* («Greenwash», 2024), δηλαδή ότι η εφαρμογή ανεμογεννητριών σε τόσο μεγάλης κλίμακας κτίρια δεν είναι παρά μια προσπάθεια να φανούν πιο περιβαλλοντικά φιλικά απ' ό,τι είναι στην πραγματικότητα.

Τα τελευταία χρόνια έχει ξεκινήσει η εφαρμογή μικρής κλίμακας ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα και στους υπαίθριους χώρους των πόλεων, με πιο γνωστό παράδειγμα εκείνο του Ολυμπιακού Πάρκου του Λονδίνου στους Ολυμπιακούς Αγώνες του 2012 (Εικόνα 11.10.γ), ενώ αντίστοιχες, μικρότερης κλίμακας μπορούν να εφαρμοστούν και στη στέγαση των κτιρίων. Ταυτόχρονα, υπάρχει έρευνα για την ενσωμάτωση μικρότερης κλίμακας ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα (VAWT) τύπου savonius σε κτίρια όπως το Greenway Self-Park (Αρχιτέκτονες: HOK, 2010) στο Chicago του Illinois των ΗΠΑ.

α.



β.

γ.


Εικόνα 11.10 *Αρχιτεκτονική ένταξη ανεμογεννητριών σε κτίρια και αστικούς υπαίθριους χώρους.*
α. Περίπτερο Ολλανδίας, Expo 2000, Ανόβερο, Γερμανία (MVRDV, 1997-2000). Πηγή: Photos ©Rob 't Hart, ©Van Reeken & ©MVRD, Courtesy MVRDV.
β. Μικρή ανεμογεννήτρια στη στέγαση κτιρίου στο Bristol, Ηνωμένο Βασίλειο. (Διάμετρος 3 μ., ύψος 5 μ. και ονομαστική ισχύς 6,5 kW —διασυνδεδεμένη). Πηγή: Vertical axis wind turbine, by Anders Sandberg via Flickr, CC BY 2.0.
γ. Ανεμογεννήτριες στο Ολυμπιακό Πάρκο των Ολυμπιακών Αγώνων του 2012 στο Λονδίνο. (Ύψος 18 μ., ονομαστική ισχύς 8kW). Πηγή: Quietrevolution wind turbine at the London Olympic Stadium, by FunkyCanute via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0

11.4 Γεωθερμία

11.4.1 Γενικά στοιχεία

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2018/2000 (Directive 2018/2001), γεωθερμία «είναι η ενέργεια αποθηκευόμενη υπό μορφή θερμότητας κάτω από τη στερεή επιφάνεια της γης». (*On the promotion of the use of energy from renewable sources*, Directive 2018/2001).

Η γεωθερμία είναι μια ήπια και ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή που μπορεί, με τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες, να καλύψει ενεργειακές ανάγκες θέρμανσης, δροσισμού και ζεστού νερού χρήσης, αλλά και να παράγει ηλεκτρική ενέργεια σε ορισμένες περιπτώσεις. Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού ή ατμού ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή και μπορεί να έχει τιμές από 25°C μέχρι 350°C. Στις περιπτώσεις που τα γεωθερμικά ρευστά έχουν υψηλή θερμοκρασία (πάνω από 150°C), η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη, η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται για τη θέρμανση κατοικιών, θερμοκηπίων, κτηνοτροφικών μονάδων, ιχθυοκαλλιεργειών κ.λπ. (ΚΑΠΕ, χ.ε.-α).

11.4.2 Συστήματα – Τεχνολογία

Στη γεωθερμία, η θέρμανση, η ψύξη και το ζεστό νερό χρήσης (ΖΝΧ) των κτιρίων παρέχονται από Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (ΓΑΘ), οι οποίες είναι αντλίες θερμότητας κυρίως νερού-νερού (Βραχόπουλος κ.ά., 2015, σ. 58). Ένα σύστημα γεωθερμίας αποτελείται από (Στο ίδιο):

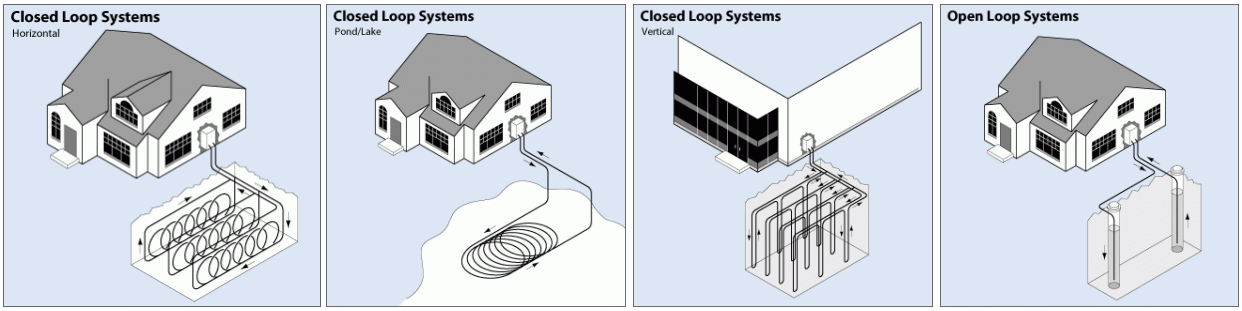
- Σύστημα εναλλαγής θερμότητας εντός του εδάφους, το οποίο είναι είτε γεωεναλλάκτης θερμότητας είτε υδρογεώτρηση.
- Αντλία θερμότητας.
- Σύστημα θέρμανσης/ψύξης και ΖΝΧ του κτιρίου.

Τα συστήματα εναλλαγής θερμότητας (γεωεναλλάκτες) εντός του εδάφους χωρίζονται σε (Στο ίδιο) (Εικόνα 11.11):

- οριζόντια συστήματα, δηλαδή σωλήνες ή σπείρες σε οριζόντια διάταξη μέσα σε τάφρους, σε βάθος 1,2-2,0 μ., ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες και
- κατακόρυφα συστήματα, δηλαδή σωλήνες σε κατακόρυφη διάταξη μέσα σε γεωτρήσεις (*boreholes*).

και μέσα στο έδαφος μπορεί να είναι (Στο ίδιο):

- ανοικτά, όπου το νερό αντλείται από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα από την παραγωγική γεώτρηση και επανεισάγεται στη γεώτρηση επανεισαγωγής, ή
- κλειστά.



Εικόνα 11.11 *Σχηματική αναπαράσταση των διαφορετικών συστημάτων γεωθερμίας. α. Κλειστά οριζόντια συστήματα, β. Κλειστά οριζόντια συστήματα σε λίμνη, γ. Κλειστά κατακόρυφα συστήματα και δ. Ανοικτά κατακόρυφα συστήματα. Πηγή: Types of Geothermal Heat Pump Systems, by U.S. Department of Energy, Public Domain.*

Τα κατακόρυφα γεωθερμικά συστήματα εφαρμόζονται συνήθως στα οικόπεδα όπου δεν υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα χώρου, γιατί δεν απαιτούν μεγάλες εκτάσεις κάλυψης. Σε αυτά τα συστήματα, ο γεωθερμικός εναλλάκτης βυθίζεται κατακόρυφα στο υπέδαφος από 5 μ. έως (συνήθως) 100 μ., μέσα σε κατάλληλες γεωτρήσεις και λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς θερμότητας από και προς τη γη (Βραχόπουλος κ.ά., σσ. 67-68).

Στα οριζόντια συστήματα κανονικής (αβαθούς) γεωθερμίας, ο γεωθερμικός εναλλάκτης τοποθετείται οριζόντια και σχετικά επιφανειακά (σε βάθος από 0,5 μ. έως και 5 μ.). Λόγω της επιφανειακής τοποθέτησης, επηρεάζεται από τη σύσταση του εδάφους, την τελική επιφάνεια (π.χ. εάν είναι χώμα ή άλλα υλικά), αλλά και από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (Βραχόπουλος κ.ά., σσ. 94-95).

Τα οριζόντια συστήματα επηρεάζονται σημαντικά από τις επιφανειακές εκδηλώσεις και ιδιαίτερα από την ηλιακή ακτινοβολία και τις βροχοπτώσεις. Οι συνθήκες αυτές κυρίως επιδρούν θετικά σε ό,τι αφορά την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία αποθηκεύεται κατά τη θερινή περίοδο και αξιοποιείται κατά τη χειμερινή περίοδο. Την ίδια θετική επίδραση έχουν και στην περίπτωση των βροχοπτώσεων, οι οποίες βελτιώνουν τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών –την ειδική θερμική αγωγιμότητα, τη θερμική διάχυση και την ειδική θερμότητα– που είναι σημαντικά σε ό,τι αφορά την απόδοση ενός συστήματος κανονικής γεωθερμίας. Στην περίπτωση που ο εναλλάκτης τοποθετείται κάτω από το κτίριο, τότε η επίδραση του περιβάλλοντος μειώνεται σημαντικά και μερικές φορές μηδενίζεται (Βραχόπουλος κ.ά., σσ. 94-95).

11.4.3 Αρχιτεκτονική ένταξη – Ζητήματα που τίθενται

Στα συστήματα γεωθερμίας πρακτικά δεν τίθενται ζητήματα αρχιτεκτονικής ένταξης, καθώς πρόκειται κυρίως για εγκατάσταση αντλίας θερμότητας σε μηχανοστάσιο/λεβητοστάσιο, ενώ οι γεωεναλλάκτες τοποθετούνται πάντα εντός του εδάφους. Το κύριο ζήτημα που τίθεται αφορά την επιλογή του συστήματος (οριζόντιου/κατακόρυφου γεωεναλλάκτη) σε σχέση με τη διαθέσιμη επιφάνεια του οικοπέδου, αλλά και με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης τον χειμώνα και το καλοκαίρι.

Ένα από τα λίγα παραδείγματα όπου η χρήση της γεωθερμίας επέδρασε στον σχεδιασμό και στην κατασκευή του κτιρίου είναι το Zollverein School of Management and Design (Αρχιτέκτονες: SANAA, 2006) στο Essen της Γερμανίας (Εικόνα 11.12). Στις όψεις και τα πατώματα του κτιρίου ενσωματώθηκαν στο στάδιο των ξυλοτύπων σωλήνες στις οποίες κυκλοφορεί προθερμασμένο νερό (30°C) που προέρχεται από πηγή κοντινού ορυχείου. Με τον τρόπο αυτόν, τα δομικά στοιχεία του κελύφους λειτουργούν ως στοιχεία θέρμανσης με ακτινοβολία, παρέχοντας ταυτόχρονα στο κτίριο ενεργή θερμομόνωση (*active thermal insulation*) (Ziger/Snead Architects, 2008).



Εικόνα 11.12 *Zollverein School of Management and Design, Essen, Γερμανία (SANAA, 2006). Πηγή: Zeche Zollverein, Essen/Germany, School of Management and Design, by Hpschaefer http://www.reserv-art.de via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.*

11.5 Βιομάζα

11.5.1 Γενικά στοιχεία

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2018/2000, «βιομάζα είναι το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και υπολειμμάτων βιολογικής προέλευσης από τη γεωργία, συμπεριλαμβανομένων των φυτικών και των ζωικών ουσιών, από τη δασοκομία και τους συναφείς κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων και απορριμμάτων, βιολογικής προέλευσης» (*On the promotion of the use of energy from renewable sources*, Directive 2018/2001) (Εικόνα 11.13).



Εικόνα 11.13 *Διαφορετικά είδη βιομάζας. α. αχυρόμπαλες (γεωργικά απόβλητα) (πηγή: Photo by Lucas van Oort on Unsplash), β. δασικά υπολείμματα (πηγή: Sunlight filtering through the trees with log pile in foreground, Photo by Annie Spratt on Unsplash), γ. πέλλετ (πηγή: Binderholz Pellets by böhringer friedrich via Wikimedia Commons, CC BY-SA 2.5) και δ. κτηνοτροφικά απόβλητα (πηγή: Chickens foraging on the farm, Photo by Kim Gorga on Unsplash).*

Η βιομάζα αποτελεί μια δεσμευμένη και αποθηκευμένη μορφή της ηλιακής ενέργειας και είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών. Κατά τη διαδικασία αυτή, η χλωροφύλλη των φυτών μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια με μια σειρά διεργασιών, χρησιμοποιώντας ως βασικές πρώτες ύλες το CO_2 από την ατμόσφαιρα, καθώς και το νερό και τα ανόργανα συστατικά από το έδαφος

(ΚΑΠΕ, χ.ε.). Για τα φυτικά και δασικά υπολείμματα, η ανανεωσιμότητα της βιομάζας οφείλεται στο γεγονός ότι οι εκπομπές CO_2 που εκλύονται κατά την καύση έχουν ήδη δεσμευθεί από τα φυτά κατά τη διάρκεια ζωής τους μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης (Κουντούρη, 2018).

Η βιομάζα αποτελεί μια από τις παλαιότερες μορφές ενέργειας, αφού οι άνθρωποι πάντα έκαιγαν ή αξιοποιούσαν και με άλλους τρόπους τα παραπροϊόντα των γεωργικών και κτηνοτροφικών διαδικασιών. Σήμερα, στον όρο βιομάζα περιλαμβάνονται τα καυσόξυλα, τα φυτικά και δασικά υπολείμματα (κλαδοδέματα, άχυρα, πριονίδια, ελαιοπυρήνες, κουκούτσια), τα ζωικά απόβλητα (κοπριά, άχρηστα αλιεύματα), τα φυτά που καλλιεργούνται στις ενεργειακές φυτείες ειδικά για να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ενέργειας, καθώς επίσης και τα αστικά απορρίμματα και τα υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων και της αγροτικής βιομηχανίας (ΚΑΠΕ, χ.ε.).

11.5.2 Συστήματα – Τεχνολογία

Η βιομάζα, είτε με τη μορφή καυσόξυλων είτε με τη μορφή επεξεργασμένων φυτικών, αλλά και ζωικών παράγωγων (πέλετ), αξιοποιείται στα κτίρια σε εστίες καύσης, για θέρμανση των χώρων και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Τυπικές εστίες καύσης σε κτίρια είναι τα τζάκια και οι θερμάστρες ξύλων. Πιο εξελιγμένα συστήματα περιλαμβάνουν ειδικούς λέβητες για θέρμανση νερού είτε για τη θέρμανση των χώρων του κτιρίου μέσω συστήματος κεντρικής θέρμανσης είτε για απευθείας χρήση (Παπαμανώλης, 2015, σ. 102).

11.5.3 Αρχιτεκτονική ένταξη – Ζητήματα που τίθενται

Όπως και για τη γεωθερμία, έτσι και για τη βιομάζα, πρακτικά δεν τίθενται ζητήματα αρχιτεκτονικής ένταξης, καθώς πρόκειται κυρίως για την ένταξη εστιών καύσης ή λεβήτων σε μηχανοστάσιο/λεβητοστάσιο. Εξαίρεση αποτελεί το κτίριο του Hotchkiss School στο Connecticut των ΗΠΑ, όπου η εγκατάσταση του λέβητα βιομάζας στεγάζεται σε κτίριο ιδιαίτερου αρχιτεκτονικού ενδιαφέροντος, προσβάσιμο και από το ευρύ κοινό (Alperovich-O'Brien, 2013). Τα ζητήματα που τίθενται αφορούν κυρίως το είδος της βιομάζας και την προμήθειά του, κυρίως σε ό,τι αφορά την απόσταση. Τέλος, το μόνο ζήτημα που τίθεται είναι η έκλυση CO_2 και πιθανόν και άλλων ρύπων, ανάλογα με το είδος και την προέλευση της βιομάζας (Κουντούρη, 2018).

11.6 Άλλες ΑΠΕ και Αρχιτεκτονική

Τα τελευταία χρόνια, σε ΑΠΕ που δεν σχετίζονται άμεσα με την αρχιτεκτονική επιλέγεται η μελέτη και η κατασκευή κτιρίων ιδιαίτερης αρχιτεκτονικής αξίας, πιθανόν για να γίνει φιλικότερη και πιο ενδιαφέρουσα στους κατοίκους η εικόνα της εγκατάστασης. Πρόκειται, κυρίως, για παραδείγματα υδροηλεκτρικών σταθμών στη Νορβηγία, καθώς και για τη βραβευμένη και δημοσιευμένη μονάδα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (Combined Heat Power – CHP) από αστικά απόβλητα Amager Bakke στην Κοπεγχάγη (Αρχιτέκτονες: BIG, 2017) (Εικόνα 11.14.α).



Εικόνα 11.14 *Άλλες ΑΠΕ.*
α. Μονάδα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας από αστικά απόβλητα Amager Bakke (Amager Hill), Amager Slope or Copenhill, Amager, Κοπεγχάγη, Δανία (BIG, Bjarke Ingels Group, 2017). Πηγή: 2019-11-27_Amager Bakke_Copenhagen Hill, by News Oresund via Flickr, CC BY 2.0.
β. Σταθμός παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας Øvre Forsland, Νορβηγία (Stein Hamre Arkitektkontor, 2015). Πηγή: Øvre Forsland kraftverk, by PeltonMan via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Abdi, A. O. (2020). *Feasibility analysis and economic impact assessment of hybrid system in Kismayo, Somalia* [Bachelor Thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, International Islamic University Chittagon]. DOI: 10.13140/RG.2.2.17051.39208.

Alperovich-O'Brien, A. L. (2013). Connecticut's Hotchkiss School Boasts an Undulating Green Roof and a Biomass Power Plant. *Inhabitat*. https://inhabitat.com/connecticuts-hotchkiss-school-boasts-an-undulating-green-roof-and-in-house-biomass-power-plant/

Bougiatioti, F. & Michael, A. (2015). The architectural integration of active solar systems. Building applications in the Eastern Mediterranean region. *J. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *47*(3). 966-982 DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.030

Chemisana, D. (2011). Building Integrated Concentrating Photovoltaics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15,* 603-611. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.017

Chemisana, D., López-Villada, J., Coronas, A., Rosell, J. I. & Lodi, C. (2013). Building integration of concentrating systems for solar cooling applications. *Applied Thermal Engineering, 50,* 1472-1479. http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.005

Directive 2018/2001. *On the promotion of the use of energy from renewable sources.* European Parliament, Council of the European Union. http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj

Document 52021PC0557. *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council.* European Parliament, Council of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0557

Greenwash. (2024). In *Cambridge University Press & Assessment.* https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/greenwash

Hagemann, I. (1996). Special Architectural Considerations for Building-integrated Photovoltaics *Progress in Photovoltaics Research and Applications, 4*, 247-258.

Hagemann, I. B. (2004). Examples of Successful Architectural Integration of PV: Germany. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, *12*, 461-470. https://doi.org/10.1002/pip.561

Kaan, H. & Reijenga, T. (2004). Photovoltaics in an Architectural Context. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, *12,* 395-408. https://doi.org/10.1002/pip.554

Michael, A., Bougiatioti, F. & Oikonomou, A. (2010). Less could be more: Architectural integration of active solar systems in existing urban centres. In: *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010)*. http://dx.doi.org/10.1049/cp.2010.0917

Munari Probst, M. C. & Roecker, C. (2007). Towards an improved architectural quality of building integrated solar thermal systems (BIST). *Solar Energy*, *81*, 1104-1116. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2007.02.009

Nofuentes, G. & Almonacid, G. (1998). An approach to the selection of the inverter for architecturally integrated photovoltaic grid-connected systems. *Renewable Energy*, *15*, 487-490. https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00210-9

Ohno, J. (2004). Examples of Successful Architectural Integration of PV: Japan. *Progress in Photovoltaics Research and Applications, 12*, 471476. DOI: 10.1002/pip.565

Prasad, D. & Snow, M. (Eds) (2005). *Designing with solar power: a source book for building integrated photovoltaics (BiPV)*. Australia: The Images Publishing Group PTY Ltd and Earthscan.

Prasad, D. K. & Snow, M. (2004). Examples of Successful Architectural Integration of PV: Australia. *Progress in Photovoltaics Research and Applications, 12,* 477–483. DOI: 10.1002/pip.572

Sick, F. & Erge, T. (Eds) (1996). *Photovoltaics in Buildings. A Design Handbook for Architects and Engineers*. James & James Science Publishers Ltd.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development (n.d.). *The 17 Goals (Sustainable Design Goals).* https://sdgs.un.org/goals

Vertical-axis wind turbine. (2022, 06 Απριλίου). In: *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical-axis_wind_turbine

Wind turbine. (2022, 06 Απριλίου). In: *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine

Ziger / Snead Architects. (2008, February 9). Zollverein School Building: Active Thermal Insulation. *Blog Ziger/Snead Architects*. https://www.zigersnead.com/current/blog/post/zollverein-school-building-active-thermal-insulation/02%E2%80%9309-2008/769/

Αμπελιώτης, Κ. (2015). Παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Στο: Αμπελιώτης, Κ., & Σδράλη, Δ. (2015). *Οικιακή τεχνολογία* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-730

Βραχόπουλος, Μ., Κούκου, Μ. & Καρύτσας, Κ. (2015). *Κανονική γεωθερμία - αρχές σχεδιασμού γεωθερμικών συστημάτων και εφαρμογές* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-553

Γιάννας, Σ. (2001). Βιοκλιματικές αρχές πολεοδομικού σχεδιασμού. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Ανοικτών Χώρων*. *Τόμος Α. Περιβαλλοντική Τεχνολογία* (σσ. 175-234). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Ευαγγελινός, Ε. κ.ά. (1997). *Μορφολογική ένταξη ενεργητικών ηλιακών συστημάτων σε παραδοσιακούς οικισμούς του Βόρειου, Κεντρικού και Νότιου Αιγαίου*. Ερευνητικό Πρόγραμμα. Αθήνα: Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ και ΥΠΕΧΩΔΕ.

Κατσαπρακάκης, Δ. (2015). *Σύνθεση ενεργειακών συστημάτων* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-651

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) (χ.ε.-α). *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*. http://www.cres.gr/energy-saving/technologies_technologies_ape.htm

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) (χ.ε.-β). *Ανεμογεννήτριες*. http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) (χ.ε.-γ). *Ενεργητικά ηλιακά*. http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_active_solar.htm

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) (χ.ε.-δ). *Φωτοβολταϊκά Συστήματα*. http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_photovol.htm

Κουντούρη, Γ. (2018). *Αρχιτεκτονική ένταξη μηχανισμών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε υφιστάμενες και νέες κατασκευές* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. DSpace@NTUA. https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/46624

Μουσιόπουλος, Ν., Ντζιαχρήστος, Λ. & Σλίνη, Θ. (2015). Αειφορία στην Παραγωγή Ενέργειας. Στο: Μουσιόπουλος, Ν., Ντζιαχρήστος, Λ., & Σλίνη, Θ. (2015). *Τεχνική Προστασία*

Περιβάλλοντος [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-944 Μπουγιατιώτη, Φ. (2007). Η συμβολή των δωμάτων στη βελτίωση του περιβάλλοντος και στην εξοικονόμηση ενέργειας στα κέντρα των ελληνικών πόλεων. Στο: Γ. Μαρνελάκης (Επιμ.). *Έρευνα στην Αρχιτεκτονική. Σχεδιασμός-Χώρος-Πολιτισμός* (τ. 1, σσ. 375-389). Αθήνα: Εκδόσεις Αλεξάνδρεια.

Παπαγεωργίου, Μ. & Ποζουκίδου, Γ. (2014). Οι παραδοσιακοί οικισμοί της Ελλάδας: ζητήματα χωροταξίας και προστασίας. *Γεωγραφίες, 24*, 107-125.

Παπαμανώλης, Ν. (2015). *Δομική Φυσική και Αρχές Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού Κτιρίων* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-498

Φωτοβολταϊκά. (2022, 05 Απριλίου). In: *Wikipedia*. https://el.wikipedia.org/wiki/ Φωτοβολταϊκά

Χριστοδουλάκης, Ρ. (2008). *Ηλιακός κλιματισμός*.http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/Building_green/2a_christodoulaki.pdf

Κεφάλαιο 12

Περιβαλλοντικά φιλικά υλικά και στρατηγικές

Σύνοψη
Σε αυτό κεφάλαιο, και στο πλαίσιο του βιώσιμου σχεδιασμού που απαιτεί τη συνολική/ολιστική θεώρηση του κτιριακού περιβάλλοντος, σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των κτιρίων, αναλύεται μια σειρά περιβαλλοντικά φιλικών στρατηγικών. Έτσι, γίνεται αναφορά στην περιβαλλοντική επίδραση των οικοδομικών υλικών, σε οικολογικά οικοδομικά υλικά και συστήματα, αλλά και σε ζητήματα που αφορούν τη διαχείριση του νερού (αποθήκευση και αξιοποίηση όμβριων υδάτων και διαχείριση υγρών αποβλήτων), πάντα μέσω της προσέγγισης του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και της ενσωμάτωσης στα κτίρια.

Προαπαιτούμενη γνώση
Το γενικό πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται η προβληματική του κεφαλαίου περιλαμβάνεται στο Κεφάλαιο 1 του παρόντος συγγράμματος. Επιμέρους στοιχεία μπορούν να αναζητηθούν και σε άλλα κεφάλαια, όπως τα Κεφάλαια 4, 5, 7 και 8, για τα οποία υπάρχουν εντός κειμένου αναφορές.

12.1 Περιβαλλοντική επίδραση των υλικών

Ο Μάρκο Πόλο περιγράφει μια γέφυρα, πέτρα την πέτρα.

«Μα ποια είναι η πέτρα που στηρίζει τη γέφυρα;», ρωτάει ο Κουμπλάι Χαν.

«Η γέφυρα δεν στηρίζεται σ' αυτήν ή σ' εκείνην την πέτρα», απαντάει ο Μάρκο, «αλλά στη γραμμή του τόξου που σχηματίζουν όλες μαζί».

Ο Κουμπλάι Χαν μένει σιωπηλός και σκέφτεται. Ύστερα προσθέτει: «Γιατί μου μιλάς για πέτρες, εμένα μόνο το τόξο με ενδιαφέρει».

Ο Πόλο απαντάει: «Χωρίς πέτρες, δεν υπάρχει τόξο».

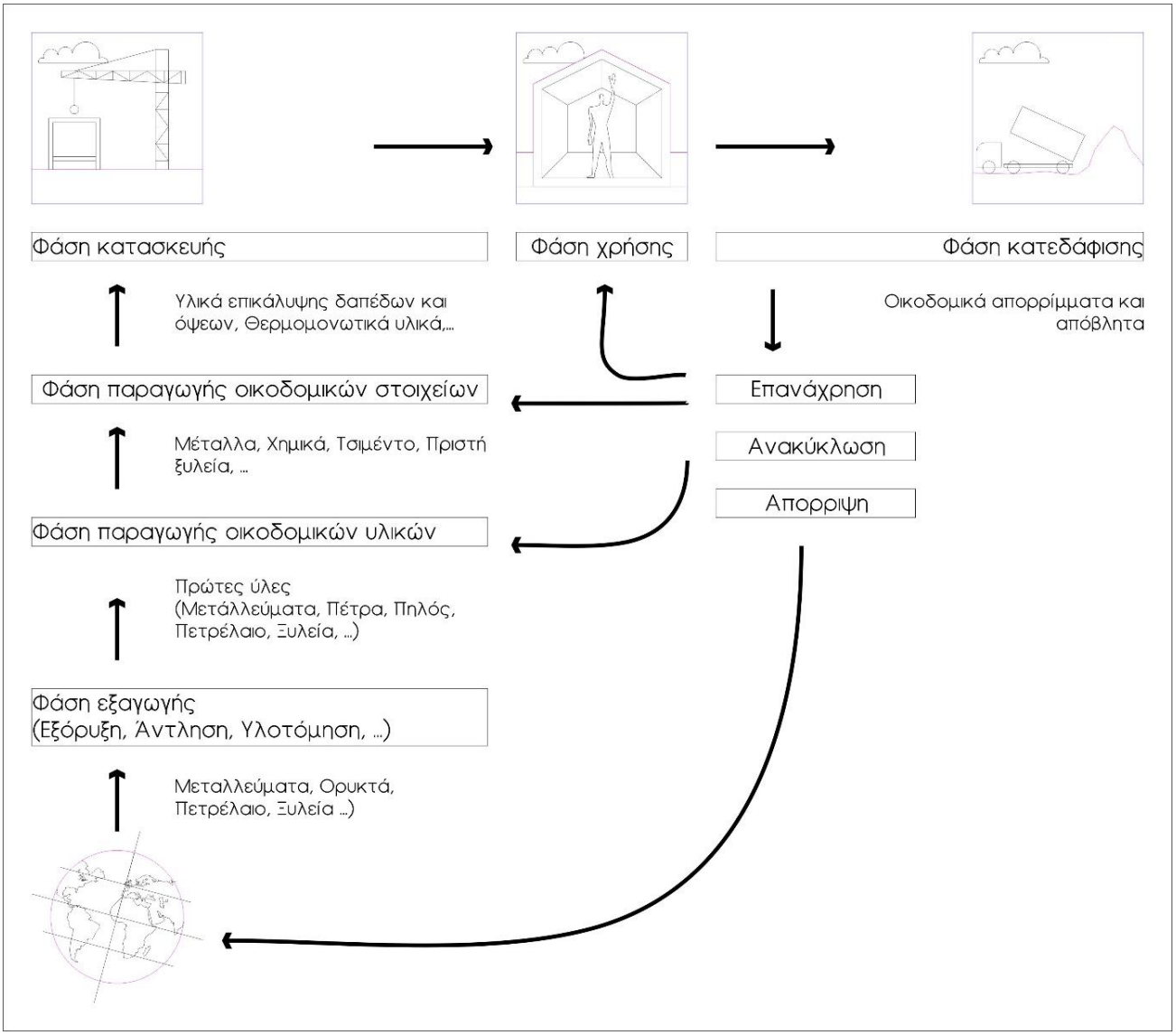
(Καλβίνο, 2004)

12.1.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1 (παρ. 1.3.2), ανάμεσα στο σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, ο κτιριακός τομέας είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας και φυσικών πόρων, ενώ, συγχρόνως, από τα κτίρια αποβάλλονται σημαντικές ποσότητες στερεών, υγρών και αέριων αποβλήτων. Στο πλαίσιο αυτής της προβληματικής, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κτιρίων αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, καθώς σε κάθε φάση του κύκλου ζωής τους (βλ. Κεφ. 1, παρ. 1.4) –είτε ως ακατέργαστες πρώτες ύλες είτε ως επεξεργασμένα προϊόντα ή σύνθετα στοιχεία, ή, τέλος, ως οικοδομικά απορρίμματα/απόβλητα– καταναλώνουν, σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, ενέργεια και φυσικούς πόρους και παράγουν αέριους ρύπους, επιδρώντας στο φυσικό περιβάλλον.

12.1.2 Ανάλυση των φάσεων του κύκλου ζωής ενός υλικού

Ο κύκλος ζωής ενός υλικού περιλαμβάνει τις εξής φάσεις: την εξαγωγή, την παραγωγή, την κατασκευή, τη χρήση και την απόρριψη (Anink et al., 1996, σσ. 12-13) και παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 12.1.



Εικόνα 12.1 *Σχηματική αναπαράσταση του κύκλου ζωής των υλικών. Πηγή: Ίδια σχεδίαση βασισμένη στο Berge (2003, σ. 7).*

Φάση εξαγωγής

Η εξαγωγή αποτελεί, στην ουσία, την αρχή του κύκλου ζωής ενός υλικού, όταν λαμβάνονται από τη φύση οι πρώτες ύλες για την παραγωγή του. Στη φάση αυτή περιλαμβάνονται οι διαδικασίες της εξόρυξης[8] (για τα μεταλλεύματα ή τα πετρώματα), της υλοτόμησης[9] (για την ξυλεία) και της άντλησης[10] (κυρίως για μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο) (Εικόνα 12.2).



Εικόνα 12.2 *Φάση εξαγωγής.*
α. Εξόρυξη σε ορυχείο χαλκού. Πηγή: Chuquicamata copper mine, Chile by Martyn Unsworth via imaggeo.egu.eu, CC BY-NC-ND 3.0.
β. Λατόμευση μαρμάρου. Πηγή: Marble quarry west of Alicante, Spain by Christoph Mayr via imaggeo.egu.eu, CC BY-NC-ND 3.0.
γ. Λατόμευση και αποψίλωση δασών. Πηγή: Deforestation in Borneo by IndoMet in the Heart of Borneo via Wikimedia Commons, CC BY 2.0.

Η εξαγωγή πρώτων υλών για την παραγωγή οικοδομικών υλικών ή ενέργειας θίγει πρωταρχικά τα αποθέματα των διαθέσιμων φυσικών πόρων, ενώ έχει και σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στο τοπίο και στα οικοσυστήματα. Επίσης, ανάλογα με τους τρόπους με τους οποίους πραγματοποιείται η εξαγωγή των πρώτων υλών, καταναλώνεται ενέργεια και εκλύονται στην ατμόσφαιρα αέριοι ρύποι (Anink et al., 1996, σ. 12). Τέλος, ιδιαίτερη σημασία έχουν τα ζητήματα που σχετίζονται με την υγεία όσων εργάζονται στη φάση της εξαγωγής (Fox & Murrell, 1989, σ. 5), είτε λόγω μακροχρόνιας έκθεσης είτε λόγω ατυχημάτων.

Φάση παραγωγής

Κατά τη φάση της παραγωγής, πραγματοποιείται η επεξεργασία των πρώτων υλών της προηγούμενης φάσης, με στόχο την παραγωγή ενός οικοδομικού υλικού ή στοιχείου (Anink et al., 1996, σ. 12) (Εικόνα 12.3). Η φάση αυτή περιλαμβάνει δύο διακριτά στάδια, το στάδιο της επεξεργασίας των πρώτων υλών σε υλικά και το στάδιο της σχηματοποίησης σε τελικά προϊόντα ή της συναρμολόγησής τους σε σύνθετα προϊόντα (Berge, 2003, σ. 6· Gulisano et al., 1998, σ. 521). Στη φάση αυτή εντάσσεται και το στάδιο της μεταφοράς των οικοδομικών υλικών ή στοιχείων από τον χώρο παραγωγής τους στο εργοτάξιο (Margani et al., 1998, σ. 527).

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με αυτήν τη φάση είναι κυρίως η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές αέριων ρύπων και στερεά και υγρά και απόβλητα κ.λπ. που αυτή προκαλεί (Anink et al., 1996, σ. 12). Ένας γενικός κανόνας που ισχύει είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός επεξεργασίας ενός υλικού, κατά το στάδιο παραγωγής του, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον (Vale,

[8] Ως εξόρυξη ορίζεται «το σύνολο των εργασιών με τις οποίες εξάγονται από το υπέδαφος μεταλλεύματα ή χρήσιμα πετρώματα». (Λεξικό της Κοινής Νεοελληνικής, 1998, σ. 488).
[9] Η υλοτόμηση ή υλοτομία αφορά «τη συστηματική κοπή δέντρων με στόχο την παραγωγή ξυλείας» (Λεξικό της Κοινής Νεοελληνικής, 1998, σ. 1388).
[10] Η διαδικασία της άντλησης αφορά την «εξαγωγή νερού ή άλλου υγρού με αντλία ή με άλλο μέσο» (Λεξικό της Κοινής Νεοελληνικής, 1998, σ. 147). Η άντληση αναφέρεται κυρίως σε μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

1995, σ. 21). Συγχρόνως, σε αυτή τη φάση, όπως και στην προηγούμενη, τίθενται ζητήματα που αφορούν την υγεία των ανθρώπων που εργάζονται για την παραγωγή των διαφόρων οικοδομικών υλικών ή στοιχείων. Τέλος, στη φάση της παραγωγής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η συσκευασία των υλικών (Margani et al., 1998, σ. 527), η οποία επίσης αφορά την κατανάλωση φυσικών πόρων, αλλά και την παραγωγή απορριμμάτων. Για τη συσκευασία οικοδομικών προϊόντων χρησιμοποιούνται υλικά όπως το μέταλλο, το γυαλί, το πλαστικό, το χαρτί και το ξύλο (ολόσωμη ξυλεία ή προϊόντα ξύλου). Η χρήση υλικών συσκευασίας από χαρτί και προϊόντα ξύλου είναι περιβαλλοντικά προτιμότερη, καθώς βασίζεται στη συνεχή ανακύκλωση των υλικών αυτών. Αντίθετα, η χρήση διαφόρων πλαστικών έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Fox & Murrell, 1989, σ. 79).

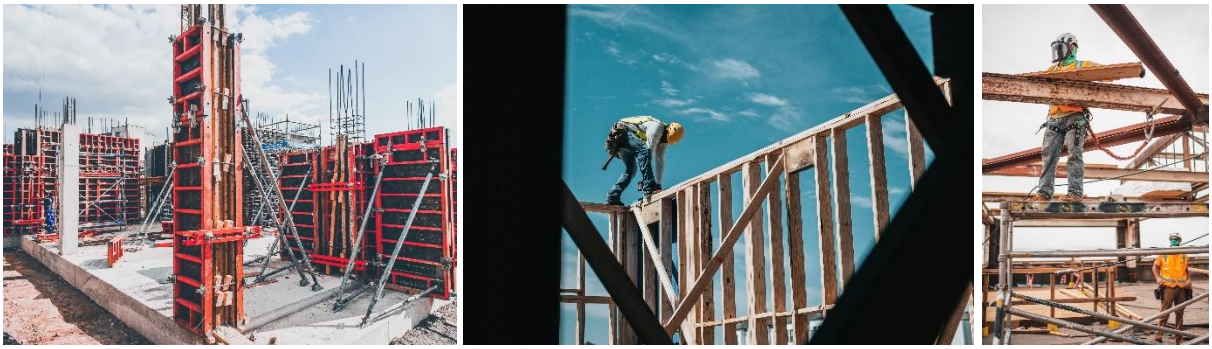


Εικόνα 12.3 *Φάση παραγωγής.*
α. Μέταλλα από μετάλλευμα. Πηγή: Black and grey metal pipe, Photo by yasin hm on Unsplash.
β. Ξύλινα στοιχεία από κορμούς δέντρων. Πηγή: Closeup photo of beige wooden stands, Photo by Sarah Worth on Unsplash.

Φάση κατασκευής

Η φάση της κατασκευής αφορά τη χρησιμοποίηση οικοδομικών υλικών και στοιχείων για τη δημιουργία των κτιρίων και του περιβάλλοντος χώρου τους (Εικόνα 12.4). Οι αποφάσεις σχετικά με τα υλικά και τον τρόπο με τον οποίο αυτά θα εφαρμοστούν στις κατασκευές επιδρούν και στις επόμενες φάσεις ζωής, δηλαδή τη χρήση και την απόρριψη (Anink et al., 1996, σ. 13). Πιο συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός και η κατασκευή κτιρίων και υπαίθριων χώρων με στόχο την αποσυναρμολόγηση (βλ. Κεφ. 1, παρ. 1.4.4) και όχι την κατεδάφιση μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη δυνατότητα των οικοδομικών υλικών και στοιχείων να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν (Κεφ. 1, παρ. 1.4.2-1.4.3) κατά το τελευταίο στάδιο του κύκλου ζωής τους (απόρριψη) (Boonstra, 1996, σ. 24 και Evangelinos, 2004, σ. 75).

Κατά τη φάση της κατασκευής ενός κτιρίου ή ενός υπαίθριου χώρου καταναλώνεται ενέργεια και παράγονται ποσότητες οικοδομικών απορριμμάτων. Ωστόσο, οι κύριες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της φάσης αυτής σχετίζονται κυρίως με την όχληση που προκαλείται και η οποία περιλαμβάνει την ηχορύπανση και τη δημιουργία κραδασμών από τη χρήση μηχανημάτων, καθώς και την παραγωγή σκόνης και άλλων αέριων εκπομπών (Anink et al., 1996, σ. 13). Τέλος, η τοποθέτηση κάποιων υλικών (π.χ. ινωδών θερμομονωτικών, όπως ο υαλοβάμβακας) μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα υγείας στους ανθρώπους που εργάζονται στο στάδιο της κατασκευής.



Εικόνα 12.4 *Φάση κατασκευής.*
α. Κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πηγή: Red metal structure with beam, Photo by Di on Unsplash.
β. Ξύλινη κατασκευή. Πηγή: Construction, Photo by Josh Olalde on Unsplash.
γ. Μεταλλική κατασκευή. Πηγή: Man (…) standing on orange metal bar (…), Photo by Jeriden Villegas on Unsplash.

Φάση χρήσης

Η φάση της χρήσης αποτελεί την «ωφέλιμη» περίοδο της ζωής των υλικών, όταν αυτά αποτελούν τμήμα ενός κτιρίου (Εικόνα 12.5) ή ενός υπαίθριου χώρου. Σε αυτή τη φάση, η περιβαλλοντική συμπεριφορά των οικοδομικών υλικών και στοιχείων εξετάζεται κυρίως σε σχέση με τους ανθρώπους που χρησιμοποιούν τους χώρους στους οποίους αυτά εντάσσονται. Οι στόχοι που τίθενται αφορούν πρωταρχικά την υγεία των χρηστών, αλλά και την επίτευξη συνθηκών θερμικής, οπτικής και ακουστικής άνεσης (Σανταμούρης κ.ά., 2000, σσ. 160-161). Η υγεία των χρηστών ενός εσωτερικού χώρου επηρεάζεται δραστικά από τις εκπομπές χημικών ουσιών που προέρχονται από τα διάφορα υλικά (Anink et al., 1996, σ. 13) και επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα (βλ. Κεφ. 4, παρ. 4.5). Ως προς την άνεση, η επίδραση των υλικών εξαρτάται από τις διαφορετικές ιδιότητές τους, σε συνδυασμό με τις επικρατούσες συνθήκες (θερμικό, οπτικό, ακουστικό περιβάλλον).

Πέρα από τα παραπάνω, κατά την περίοδο της χρήσης ενός χώρου καταναλώνεται ενέργεια και νερό, ενώ παράγονται απορρίμματα και απόβλητα (Anink et al., 1996, σ. 13). Η κατανάλωση συμβατικής ενέργειας για θέρμανση, δροσισμό και φωτισμό των εσωτερικών χώρων των κτιρίων εξαρτάται από τον γενικότερο σχεδιασμό (βλ. Κεφ. 7, 8 και 9), αλλά και από τις ιδιότητες των υλικών και των δομικών στοιχείων που διαμορφώνουν το κέλυφός τους (βλ. Κεφ. 5).



Εικόνα 12.5 *Φάση χρήσης. Πηγές: Brown wooden parquet floor (…), Photo by Miguel Luis on Unsplash, My workspace (…), Photo by Hamza Shaikh on Unsplash και Empty white and brown hallway interior, Photo by siyuan LI on Unsplash.*

Φάση απόρριψης

Η απόρριψη αποτελεί το τέλος του κύκλου ζωής των υλικών, όταν αυτά, μετά την κατεδάφιση του κτιρίου ή της κατασκευής στην οποία ήταν ενταγμένα, μετατρέπονται σε οικοδομικά απορρίμματα και αποτίθενται στο περιβάλλον (Εικόνα 12.6). Η πορεία ενός υλικού από την εξαγωγή του, ως πρώτη ύλη από το περιβάλλον, έως την απόθεσή του ως οικοδομικό απόρριμμα πάλι στο περιβάλλον, είναι γραμμική. Ωστόσο, είναι δυνατό αυτή η πορεία να μετατραπεί σε κυκλική. Σε αυτή την περίπτωση, η φάση της απόρριψης δεν αποτελεί το τέλος του κύκλου ζωής ενός υλικού, αλλά την αρχή ενός νέου κύκλου ζωής, όπου αυτό χρησιμοποιείται σε νέες κατασκευές είτε αυτούσιο είτε έπειτα από κάποια επεξεργασία (Anink et al., 1996, σ. 13). Επίσης, είναι δυνατό το στάδιο της απόρριψης ενός υλικού να μετατοπιστεί χρονικά. Αυτό συμβαίνει όταν το στάδιο της χρήσης του χώρου στον οποίο είναι ενσωματωμένο επεκταθεί χρονικά με τις διαδικασίες της επανάχρησης, της ανακαίνισης ή της συντήρησης (Anink et al., 1996, σ. 13). Τέλος, όταν η φάση της απόρριψης αφορά την ταφή ή την καύση, μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα από την πιθανή έκλυση επικίνδυνων εκπομπών στον αέρα, τον υδροφόρο ορίζοντα, τις υδάτινες εκτάσεις και το έδαφος, καθώς και από την πρόκληση μόνιμων ή παροδικών βλαβών στο τοπίο και στα οικοσυστήματα (Anink et al., 1996, σ. 13).



Εικόνα 12.6 *Φάση απόρριψης. Πηγές: The facade of an office block removed to expose office spaces, cables, rooms and the structure, Photo by Crawford Jolly on Unsplash και Destruction bâtiment, Joigny, 89 Yonne France, Photo by Denis LORAIN on Unsplash.*

12.1.3 Παράμετροι αξιολόγησης της περιβαλλοντικής επίδρασης των υλικών

12.1.3.1 Γενικά

Η εκτίμηση της περιβαλλοντικής επίδρασης ενός οικοδομικού υλικού δεν μπορεί ποτέ να είναι απόλυτη, καθώς εξαρτάται από την κριτική αξιολόγηση πολλών και συχνά αντικρουόμενων μεταξύ τους παραμέτρων. Έτσι, ο καθορισμός του περιβαλλοντικά φιλικότερου υλικού αποτελεί, σε πολλές περιπτώσεις, μια υποκειμενική απόφαση, η οποία καθορίζεται κυρίως από τη θέση του υλικού στο κέλυφος του κτιρίου. Σε κάποιες περιπτώσεις, μάλιστα, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην περίπτωση των οικοδομικών υλικών και στοιχείων, που τοποθετούνται στους εσωτερικούς χώρους κτιρίων, μία και μοναδική περιβαλλοντική παράμετρος –η εκπομπή επιβλαβών για την ανθρώπινη υγεία χημικών ουσιών– αναδεικνύεται σε κύρια (Anink et al., 1996, σ. 13) (βλ. Κεφ. 4, παρ. 4.5).

Στις διαφορετικές φάσεις του κύκλου ζωής των υλικών είναι απαραίτητη η ποσοτική ή η ποιοτική εκτίμηση διαφόρων παραμέτρων, καθεμιά από τις οποίες μπορεί να έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε παγκόσμια, περιφερειακή, τοπική ή ατομική κλίμακα, ή και σε συνδυασμό τους (Vale, 1995, σ. 51). Έτσι, η περιβαλλοντική επίδραση των υλικών μπορεί να περιγραφεί με ποσοτικές και ποιοτικές παραμέτρους. Οι ποσοτικές παράμετροι αφορούν (Boonstra, 1995, σ. 46· Woolley et al., 1997):

- Την κατανάλωση ενέργειας.
- Τις εκπομπές αέριων ρύπων:
    - διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), που συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη,
    - διοξειδίου του θείου (SO_2), που προκαλεί όξινη βροχή και
    - οξειδίων του αζώτου (NO_x), που συμβάλλουν στον σχηματισμό φωτοχημικού νέφους και στον ευτροφισμό των νερών.
- Την κατανάλωση νερού.

Αντίστοιχα, οι περιβαλλοντικές παράμετροι που μπορούν να περιγραφούν κυρίως με ποιοτικά δεδομένα είναι (Boonstra, 1995, σ. 46· Woolley et al., 1997):

- Η οικολογική υποβάθμιση, που αναφέρεται:
    - στην εξάντληση των φυσικών πόρων,
    - στην καταστροφή του τοπίου και των οικοσυστημάτων,
    - στην παραγωγή σκόνης, ηχορύπανσης και κραδασμών και
    - στον κίνδυνο πρόκλησης καταστροφής.
- Οι τοξικές ουσίες, που επηρεάζουν το περιβάλλον, την ανθρώπινη υγεία ή και τα δύο.
- Ζητήματα που αφορούν το τέλος του κύκλου ζωής, όπως είναι:
    - η δυνατότητα συντήρησης και επισκευής,
    - η δυνατότητα επανάχρησης/ανακύκλωσης και
    - τα απόβλητα και τα οικοδομικά απορρίμματα.

12.1.3.2 Ποσοτικές παράμετροι

Κατανάλωση ενέργειας
Η ενέργεια που δαπανάται στα διαφορετικά στάδια του κύκλου ζωής ενός υλικού εκφράζεται με την έννοια της εμπεριεχόμενης (ή ενσωματωμένης) ενέργειας (*embodied energy*). Η εμπεριεχόμενη ενέργεια ορίζεται ως «η ενέργεια που χρησιμοποιείται στην παραγωγή των δομικών υλικών (από την εξαγωγή των πρώτων υλών από τη φύση έως τη μεταφορά τους στο εργοτάξιο)» (Gulisano et al., 1998, σ. 522) και υπολογίζεται συνήθως σε μονάδες ενέργειας (κιλοβατώρες – kWh ή megajoule – mJ) ανά μονάδα μάζας (κιλά – kg ή τόνους – ton) ή όγκου (κυβικά μέτρα – m^3) (Smith et al., 1998, σ. 71). Στο σημείο αυτό, σημειώνεται ότι αυτός ο τρόπος υπολογισμού της εμπεριεχόμενης ενέργειας των υλικών είναι προβληματικός εξαιτίας των διαφορών που υπάρχουν στην πυκνότητά τους, αλλά και στον βαθμό (ποσότητα) στον οποίο αυτά χρησιμοποιούνται στις κατασκευές (Smith et al., 1998, σ. 71).

Η ακριβής αξιολόγηση της εμπεριεχόμενης ενέργειας των υλικών δεν είναι πάντα δυνατή για διάφορους λόγους. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι διαδικασίες παραγωγής και η ενεργειακή αποδοτικότητά τους διαφέρουν από βιομηχανία σε βιομηχανία (Gulisano et al., 1998, σ. 522), αλλά και στο ότι δεν υπάρχει ένα ανεξάρτητο διεθνώς αποδεκτό σύστημα με το οποίο να μπορούν να ελεγχθούν οι πληροφορίες σχετικά με την εμπεριεχόμενη ενέργεια που παρέχονται από τους κατασκευαστές και τις βιομηχανίες (Woolley et al., 1997, σ. 7).

Σε ό,τι αφορά τις τιμές της εμπεριεχόμενης ενέργειας, σε γενικές γραμμές ισχύει ο απλός κανόνας ότι όσο πιο κοντά στη φυσική του κατάσταση είναι ένα υλικό ή όσο απλούστερη είναι η διαδικασία παραγωγής του, τόσο χαμηλότερη είναι και η εμπεριεχόμενη ενέργειά του (Vale & Vale, 1991, σ. 41· Vale, 1995, σσ. 51-52· Μπίκας, 2001,σ σ. 13-21).

Οι τιμές εμπεριεχόμενης ενέργειας διαφόρων οικοδομικών υλικών παρέχονται από τη βιβλιογραφία (βλ. ενδεικτικά Berge, 2013), κυρίως όμως από τη βάση δεδομένων Inventory of Carbon and Energy (ICE

database) (Circular Ecology, 2024) στην οποία αναλυτικά περιλαμβάνονται και πλήρη στοιχεία για μια πληθώρα υλικών.

Material/υλικό	Embodied Energy/Ενσωμ. ενέργεια – MJ/Kg	Embodied Carbon/ Ενσωμ. άνθρακας – Kg CO2e/Kg	Boundaries/ όρια	Lowest EE Range/χαμηλότερη τιμή Ενσωμ. Ενεργειας – MJ/Kg	Highest EE Range/υψηλότερη τιμή Ενσωμ. Ενεργειας – MJ/Kg
ΑΔΡΑΝΗ	0,083	0,052	Cradle to Gate	0,05	0,25
ΑΛΟΥΜΙΝΙΙΟ			Cradle to Gate		
ΚΕΡΑΜΙΚΑ	10	0,70	Cradle to Gate	2,5	29,1

Εικόνα 12.7 *Γραφική παράσταση με εμπεριεχόμενη ενέργεια βασικών ομάδων υλικών. Πηγή: Βάση δεδομένων Inventory of Carbon and Energy (ICE database).*

Η εμπεριεχόμενη ενέργεια ενός υλικού εξαρτάται και από το ποσό ενέργειας που δαπανάται για τη μεταφορά του υλικού από τον τόπο παραγωγής του στο εργοτάξιο. Η σημασία της ενέργειας μεταφοράς είναι μεγάλη και μπορεί, στην περίπτωση βαρέων υλικών, να υπερβεί την ενέργεια που δαπανήθηκε για την εξαγωγή και την παραγωγή τους (Berge, 2003, σ. 17). Παρ' όλα αυτά, στις μέρες μας, το γεγονός αυτό ελάχιστα επηρεάζει τη διαδικασία επιλογής των υλικών. Αντίθετα, παλαιότερα, αλλά ακόμα και κατά το πρώτο μισό του 20ού αιώνα, η απόσταση που χώριζε τον τόπο παραγωγής ενός υλικού από τον τόπο εφαρμογής του ήταν καθοριστική για την τελική επιλογή του. Χαρακτηριστική αυτού του γεγονότος είναι η παρατήρηση του Παπαθεοδώρου (1939, σ. 5), σύμφωνα με τον οποίο: «Παρά την εξαιρετική ποιότητα των μαρμάρων της Μάνης, η διάδοσις αυτών εις την αγοράν μας χωλαίνει ένεκα των μεγάλων εξόδων μεταφοράς και άλλων αιτίων». Σε άλλο σημείο, ο Παπαθεοδώρου (1939, σ. 3) σημειώνει ότι: «συνηθέστερον εν Αθήναις χρησιμοποιούνται (...) πορώδεις ασβεστόλιθοι προελεύσεως Καπανδριτίου, Χαρβατίου, Πειραιώς, (...) και Αιγίνης». Χαρακτηριστική είναι η χρήση τοπικών υλικών και στην ελληνική παραδοσιακή αρχιτεκτονική. Ακόμα παλαιότερα, χαρακτηριστικά είναι τα σχόλια που γίνονται από τον Βιτρούβιο και συνδέουν τη χρήση υλικών με την απόσταση και κατ' επέκταση με τη μεταφορά τους. Για παράδειγμα, αναφέρει για τα Ανικιανά πετρώματα, «(...) αν τα ορυχεία αυτά ήταν κοντά στην Πόλη [Ρώμη], θα άξιζε πραγματικά να γίνονται όλα τα έργα από τέτοια πέτρα. (...) όμως, λόγω της γειτνίασης προς την Πόλη των λατομείων των Ερυθρών, της Πάλλα και άλλων που βρίσκονται κοντά, η ανάγκη επιβάλλει τη χρήση του προϊόντος τους. (...)» (Βιτρούβιου, 1997, σ. 133) Επίσης, αναφέρεται και στην ξυλεία της λάριξ (λάρτζινο) (Larix europea, κωνοφόρο φυλλοβόλο δέντρο με βαρύ, σκληρό και πολύ ανθεκτικό ξύλο). «(...) Μεταφέρεται μέσω το Πάδου ποταμού στη Ραβέννα, και διατίθεται στην αποικία Φανό, στον Πίσαυρον, στον Αγνιώνα και σε άλλες πόλεις της περιοχής. Αν ήταν δυνατή η μεταφορά του στην Πόλη, αυτό το ξύλο θα πρόσφερε τα μέγιστα στην οικοδομική. (...)». (Βιτρούβιου, 1997, σ. 159)

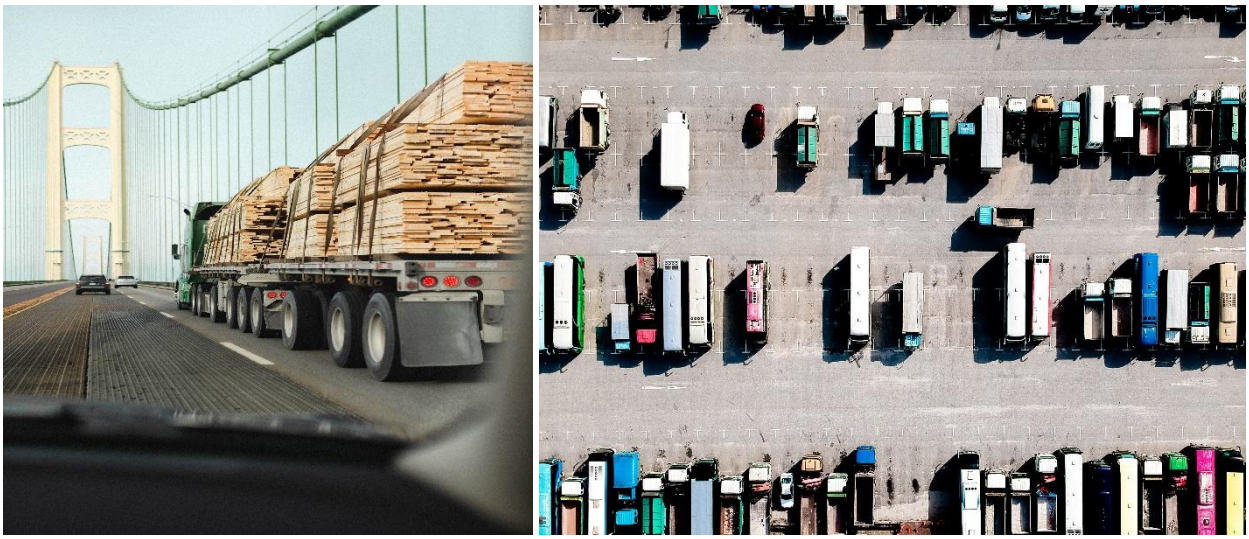
Στον Πίνακα 12.1 δίνονται οι τιμές κατανάλωσης ενέργειας και εκπεμπόμενων ρύπων διαφορετικών μέσων μεταφοράς ανά τόνο και ανά χιλιόμετρο. Σημειώνεται ότι στις οδικές, αλλά και στις θαλάσσιες μεταφορές η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές ρύπων διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του οχήματος (Εικόνα 12.9) ή του πλοίου, αντίστοιχα, με το οποίο αυτές πραγματοποιούνται (Ευαγγελινός, 1997, σ. 13).

	Ενέργεια	Εκπομπές αέριων ρύπων		
Ενέργεια και Μέσο μεταφοράς	**MJ /ton km**	**g CO2 / ton km**	**g SO2 / ton km**	**g NOx / ton km**
Diesel: Οδική (φορτηγό 14 tn)	0,8-2,2	175	0,04	1,8
Diesel: Οδική (φορτηγό 40 tn)		50	0,03	0,55
Diesel: Θαλάσσια (πλοίο <3000 tn	0,3-0,9	50	0,4	0,7
Diesel: Θαλάσσια (πλοίο >8000 tn		15	0,26	0,43
Diesel: Τρένο	0,6-0,9	50	0,005	0,36

Πίνακας 12.1 *Κατανάλωση ενέργειας και παραγωγή CO_2, SO_2 και NO_x σε σχέση με τα διαφορετικά μέσα μεταφοράς. Πηγή: Απόδοση Berge (2009, σ. 20 και 30).*



Εικόνα 12.8 *Εκτάσεις άντλησης πετρελαίου. Πηγή: The San Ardo Oil Field From The Coast Starlight by Loco Steve from Orpington, UK, via Wikimedia Commons, CC BY 2.0 ή πηγή: California Oil and Gas by Bureau of Land Management California via Flickr, Public Domain.*



Εικόνα 12.9 *Φορτηγά και οχήματα βαρέως τύπου, που χρησιμοποιούνται για τις μεταφορές. Πηγές: White truck on grey road (…), Photo by Riley Crawford on Unsplash και Tetris from the sky, Photo by Christian Chen on Unsplash.*

Τέλος, τα αυξημένα ποσά ενέργειας που έχουν καταναλωθεί για την παραγωγή ενός υλικού δεν είναι πάντα απαγορευτικά για την εφαρμογή του, καθώς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή και τη χρήση του (Margani et al., 1998, σ. 525). Το γεγονός αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα διάφορα θερμομονωτικά υλικά, που προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας από θέρμανση και δροσισμό κατά την ωφέλιμη περίοδο χρήσης των κτιρίων. Ωστόσο, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, και με δεδομένο το γεγονός ότι η χρήση θερμομόνωσης είναι πλέον υποχρεωτική για όλα τα

κτίρια, τίθεται το ζήτημα της χρήσης θερμομονωτικών υλικών με μικρότερη εμπεριεχόμενη ενέργεια (Woolley et al., 1997, σ. 44· Vale & Vale, 1991, σ. 32).

Υπερθέρμανση του πλανήτη, τρύπα του όζοντος, όξινη βροχή και φωτοχημικό νέφος
Όπως προαναφέρθηκε (Κεφ. 1, παρ. 1.3.1), όλα τα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα σχετίζονται με τις εκπομπές αέριων ρύπων (CO2, SO2 και NOx). Για τα δομικά υλικά, οι εκπομπές αέριων ρύπων προέρχονται από την παραγωγή ενέργειας που δαπανάται σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των υλικών, καθώς και από την ενέργεια μεταφοράς. Όταν αυτή προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων, εκλύονται στην ατμόσφαιρα εκπομπές των διαφόρων αέριων ρύπων (Πίνακας 12.1). Η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα εκφράζεται σε δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP – Global Warming Potential, g CO2/kg), η παραγωγή διοξειδίου του θείου σε Acid Potential – AP (g SO2/kg), ενώ των οξειδίων του αζώτου σε Photochemical Ozone Creation Potential – POCP (g NOx/kg) (Berge, 2009, σ. 32). Οι ρύποι που εκπέμπονται από τη μεταφορά εξαρτώνται από την απόσταση, το βάρος των υλικών, καθώς και από το μέσο μεταφοράς και τα καύσιμά του.

Κατανάλωση νερού
Το νερό αποτελεί ίσως τον σημαντικότερο φυσικό πόρο για τη ζωή στον πλανήτη. Σε αυτό βασίζονται σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό όλες οι ανθρώπινες δραστηριότητες, από τις πιο βασικές για τον άνθρωπο (βιολογικές, ατομικές) έως τις αναγκαίες για την οικονομική δραστηριότητα (π.χ. γεωργία, βιομηχανία). Κατά το στάδιο της παραγωγής και της επεξεργασίας πολλών οικοδομικών υλικών καταναλώνονται σημαντικές ποσότητες νερού (βλ. Πίνακα 12.2). Ανάλογα με τα υλικά, το νερό πρέπει να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (σκληρότητα, pH, χημική σύσταση κ.λπ.). Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητη η χρήση πόσιμου νερού, καθώς τα άλατα, οι μικροοργανισμοί και οι χημικές ουσίες που περιέχονται στο μη πόσιμο νερό (θαλασσινό νερό, νερό από λίμνες, γκρίζο νερό κ.λπ.) είναι δυνατό να αλλοιώσουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος (Berge, 2003, σ. 65). Τέλος, το νερό μετά τη χρήση του στην παραγωγή και στην επεξεργασία διαφόρων υλικών είναι, τις περισσότερες φορές, ιδιαίτερα μολυσμένο (π.χ. περιέχει βαρέα μέταλλα) και εξαιρετικά επικίνδυνο, τόσο για το φυσικό περιβάλλον όσο και για τον άνθρωπο, και άρα είναι απαραίτητη η απορρύπανσή του πριν από την απόρριψή του.

Υλικό	**lt νερού / kg υλικού**
Φυσικοί λίθοι	10
Ασβέστης	50
Κυβόλιθοι τσιμέντου	190
Μη επεξεργασμένη ξυλεία	330
Κεραμικά πλακίδια	400
Κεραμικά τούβλα	520
Κεραμικά κεραμίδια	640
Γυαλί	680
Μοριοσανίδα	1000
Υαλοβάμβακας	1360
Μόλυβδος	1960
Χάλυβας	3400
Χαλκός	15900
Πολυουρεθάνη	18900
Αλουμίνιο	29000

Πίνακας 12.2 *Κατανάλωση νερού (lt/kg) κατά την παραγωγή οικοδομικών υλικών. Πηγή: Απόδοση Berge (2009, σσ. 23-26).*

Στον αντίποδα των παραπάνω, είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι «στην αρχή της νέας χιλιετίας, τα τρία τέταρτα του πληθυσμού της Γης δεν διέθεταν παροχή πόσιμου νερού και 1,6 δισεκατομμύριο άνθρωποι δεν είχαν πόσιμο νερό» (Arthus-Bertrand, 2001) (Εικόνα 12.10). Το 2021 σχεδόν ο μισός πληθυσμός του πλανήτη ζούσε σε περιοχές με πιθανή έλλειψη νερού για τουλάχιστον 1 μήνα του έτους, ενώ τα 2/3 (4 δισεκατομμύρια) σε περιοχές που είχαν ήδη σοβαρή έλλειψη νερού για την ίδια περίοδο· παράλληλα, 1,4

σχεδόν δισεκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε περιοχές με υψηλή ή εξαιρετικά υψηλή ευαλωτότητα νερού (United Nations. Un Water, 2021). Επίσης, σημειώνεται ότι «στις αναπτυσσόμενες χώρες της Αφρικής, οι άνθρωποι περπατούν έως και δέκα (10) χιλιόμετρα κάθε μέρα για να βρουν πόσιμο νερό» (Γαιόραμα-Experiment, 1998, σ. 37). Για τους παραπάνω λόγους, το νερό αποτελεί τον SDG 6 – Ύδατα (Water and Sanitation) από τους 17 στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης του ΟΗΕ (Sustainable Development Goals – SDGs) (United Nations Environment Programme, 2021).



Εικόνα 12.10 *Η σημασία του πόσιμου νερού σε περιοχές με έλλειψη ή ευαλωτότητα. Πηγή: Daily Journey for Water. Daily Absence from School. (Tanzania) by Joel Gill via imaggeo.egu.eu, CC BY-NC-SA 3.0.*

Εξάντληση φυσικών πόρων

Ως φυσικοί πόροι ορίζονται «τα προϊόντα που είναι χρήσιμα για τη ζωή και τις δραστηριότητες του ανθρώπου και προέρχονται από τη φύση». Διακρίνονται σε μη ανανεώσιμους και ανανεώσιμους, σε μη βιολογικούς (π.χ. μέταλλα, πετρώματα), σε πρώην βιολογικούς (π.χ. πετρέλαιο, κάρβουνο και φυσικό αέριο) (Εικόνα 12.12) και σε βιολογικούς (γεωργικές καλλιέργειες και δάση) (Εικόνα 12.11) (Σγαρδέλης κ.ά., 1998-1999, σ. 104). Μόνο οι βιολογικοί φυσικοί πόροι, δηλαδή αυτοί που παράγονται από ζωντανούς οργανισμούς, είναι ανανεώσιμοι, ενώ οι μη βιολογικοί και οι πρώην βιολογικοί είναι μη ανανεώσιμοι. Εξαίρεση αποτελούν ο αέρας και το νερό, που θεωρούνται μη βιολογικοί, ανανεώσιμοι φυσικοί πόροι (Σγαρδέλης κ.ά., 1998-1999, σ. 105· Berge, 2003, σσ. 65-67).



Εικόνα 12.11 *Ανανεώσιμος φυσικός πόρος.*
α. Φυσικό δάσος. Πηγή: The Heavenly road of Asalem to Khalkhal by Roshanak Tootoonchi via imaggeo.egu.eu, CC BY- 3.0
β. Διαχειριζόμενο δάσος/φυτεία. Πηγή: The green desert - forestry plantation by Leanne Hughes via imaggeo.egu.eu, CC BY- 3.0

α.  β. 

Εικόνα 12.12 *Μη ανανεώσιμοι, πρώην βιολογικοί πόροι.*
α. Το πετρέλαιο. Πηγή: Master Progettazione di Impianti Oil & Gas, by Eni via Flickr, CC BY-NC 2.0.
β. Ο λιγνίτης. Πηγή: Lignite Mine Megalopolis, by Dr Peter Tzeferis via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.

Η εξάντληση ενός μη ανανεώσιμου φυσικού πόρου είναι επικείμενη όταν το διαθέσιμο απόθεμα υπερβαίνει την κατανάλωση (Anink et al., 1996, σ. 17). Στοιχεία για τα διαθέσιμα αποθέματα (reserves) για τους κυριότερους φυσικούς πόρους και τις πρώτες ύλες δίνονται από διάφορους ερευνητές, όπως οι Ehrlich & Ehrlich (1972), ο McHale (1971), η Γεωργιάδου (1996) και ο Berge (2009). Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι το υπολογιζόμενο διαθέσιμο απόθεμα διαφέρει πολλές φορές από το πραγματικό, για περιβαλλοντικούς, οικονομικούς ή τεχνικούς λόγους (Anink et al., 1996, σ. 17 και Berge, 2003, σσ. 3-5), αλλά και ανάλογα με τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους και τις θεωρούμενες σταθερές (Meadows et al., 1972, παραπομπή στο Ehrlich & Ehrlich, 1972, σ. 295). Τέλος, τονίζεται ότι ακόμα και οι ανανεώσιμοι φυσικοί πόροι είναι δυνατό να κινδυνεύουν να εξαντληθούν, όταν ο ρυθμός κατανάλωσής τους υπερβαίνει τον ρυθμό ανάπτυξής τους (Smith et al., 1998, σ. 68 και Anink et al., 1996, σ. 17).

12.1.3.3 Ποιοτικές παράμετροι

Καταστροφή του τοπίου και των οικοσυστημάτων

Τα οικοσυστήματα και το φυσικό τοπίο μπορούν να υποστούν μόνιμες ή παροδικές βλάβες από την εξαγωγή πρώτων υλών (Εικόνα 12.13), αλλά και από την απόθεση απορριμμάτων (Anink et al., 1996, σ. 17). Ως οικοσύστημα ορίζεται «μια οργανωμένη ενότητα έμβιων όντων και αβιοτικών στοιχείων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και μέσα στην οποία ανταλλάσσονται υλικά και πληροφορίες με κινητήρια δύναμη μια πηγή ενέργειας» (Σγαρδέλης κ.ά., 1998-9, σ. 47). Πέρα από τους ζωντανούς οργανισμούς, η έννοια του οικοσυστήματος περιλαμβάνει και το σύνολο των στοιχείων που τους περιβάλλει και τους επηρεάζει, δηλαδή το περιβάλλον μέσα στο οποίο ζουν και αναπτύσσονται, καθώς και τις μεταξύ τους σχέσεις (Σγαρδέλης κ.ά., 1998-9, σ. 47).



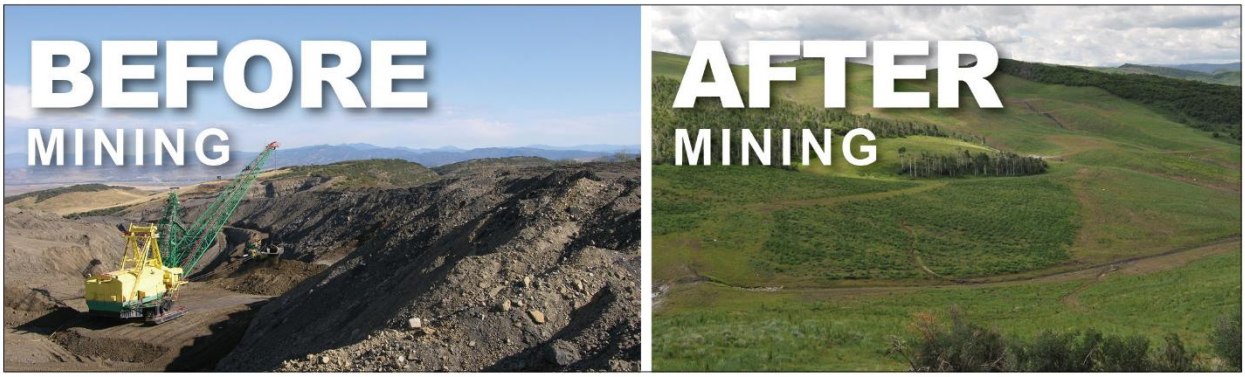
Εικόνα 12.13 *Καταστροφή τοπίου και οικοσυστημάτων.*
α. Απόβλητα από ορυχείο χαλκού. Πηγή: Quarry Bear stream, Norilsk by Nikolay Zhukov via imaggeo.egu.eu, CC BY 3.0.
β. Λατομείο μαρμάρου. Πηγή: Marble quarries in the Apuan Alps by Mariasilvia Giamberini via imaggeo.egu.eu, CC BY-NC-ND 3.0.

Η καταστροφή στο τοπίο ή/και στα οικοσυστήματα είναι πάντα ανάλογη της έκτασης και της έντασης της δραστηριότητας εξαγωγής πρώτων υλών σε λατομεία, ορυχεία ή χώρους λήψης αδρανών και είναι δυνατόν να αποκατασταθεί, μετά το τέλος της λειτουργίας τους, με επεμβάσεις αρχιτεκτονικής τοπίου. Ωστόσο, παρόλο που οι εργασίες αποκατάστασης ενός τοπίου μπορούν να πραγματοποιηθούν σχετικά γρήγορα (Εικόνα 12.14.α και β.), η ουσιαστική αποκατάσταση ή επαναφορά της ισορροπίας των οικοσυστημάτων που διαταράχθηκαν μπορεί να γίνει σε δεκαετίες ή και σε αιώνες (Fox & Murrell, 1989, σ. 7 και Anink et al., 1996, σ. 17). Σχετικά με αυτό, αναφέρονται τρεις (3) κλίμακες επέμβασης στη γη ή στο έδαφος (Bradshaw & Chadwick, 1980 παραπομπή στο Ξυπολυτάκου, 2019, σ. 46):

- Η επαναχρησιμοποίηση (*reclamation*), που περιλαμβάνει κάποιες νέες χρήσεις.
- Η επιφανειακή αποκατάσταση (*rehabilitatio*n), που αφορά κυρίως βελτιώσεις στην εικόνα του τοπίου.
- Η αναβλάστηση (*revegetation*), που περιλαμβάνει την προώθηση της εκ νέου ανάπτυξης της αρχικής βλάστησης.

Ενδεικτικά παραδείγματα ανασχεδιασμού με νέες χρήσεις αποτελούν το Quarry Garden (2010) στη Σανγκάη της Κίνας (Εικόνα 12.14.γ) και το Quarry Falls (2009), στο Σαν Ντιέγκο των ΗΠΑ. Ταυτόχρονα, τα τελευταία χρόνια, η έμφαση δεν δίνεται μόνο στην αποκατάσταση του τοπίου, αλλά και στην ουσιαστική αποκατάσταση των οικοσυστημάτων και της βιοποικιλότητας, σε συνδυασμό με χρήσεις ήπιας αναψυχής, καλλιέργειας και ενδυνάμωσης των σχέσεων με τις τοπικές κοινότητες και τα ενδιαφερόμενα μέρη (*stakeholders*) (Nature After Minerals, n.d.).

α.



β.



γ.



Εικόνα 12.14 *Αποκατάσταση λατομείου.*
α. Με δημιουργία πρανών και βλάστηση. Πηγή: Coal Mine Land Reclamation, by Peabody Energy, Inc. via Wikimedia Commons, CC BY 3.0.
β. Με δημιουργία τεχνητής λίμνης. Πηγή: Artificial lagoon on an old restored quarry in the Green Corridor of Guadiamar, near the Doñana National Park by Antonio Jordán via imaggeo.egu.eu, CC BY-NC-ND 3.0.
γ. Quarry Garden, Shanghai, Κίνα (2010). Πηγή: Chenshanzhiwuyuan by Brookqi, via Wikimedia Commons, CC BY-SA.

Παραγωγή σκόνης, ηχορύπανσης και κραδασμών

Η παραγωγή σκόνης, ηχορύπανσης και κραδασμών χαρακτηρίζουν κυρίως τις πρώτες φάσεις του κύκλου ζωής των υλικών (εξαγωγή, παραγωγή και κατασκευή), καθώς και την τελευταία φάση (κατεδάφιση). Ηχορύπανση και κραδασμοί προκαλούνται από κάποιες διαδικασίες εξαγωγής πρώτων υλών και κυρίως από λατομεία και μεταλλεία. Συγχρόνως, όμως, είναι και το αποτέλεσμα της μεταφοράς υλικών μεγάλου βάρους από οχήματα βαρέως τύπου.

Η παραγωγή σκόνης πραγματοποιείται κατά τη φάση της εξαγωγής και της επεξεργασίας οικοδομικών υλικών και στοιχείων, αλλά και κατά την ατελή καύση στερεών καυσίμων και πετρελαίου (Berge, 2003, σ. 28). Στον άνθρωπο, η σκόνη μπορεί να προκαλέσει αλλεργίες, ενώ στο αστικό περιβάλλον προκαλεί διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας και συμμετέχει στο φωτοχημικό νέφος (Berge, 2003, σ. 30).

Ο θόρυβος που προκαλείται σε χώρους εξαγωγής πρώτων υλών και σε εγκαταστάσεις παραγωγής υλικών (βιομηχανικός θόρυβος) επηρεάζει πρωταρχικά τους εργαζομένους και σε δεύτερο επίπεδο τις περιοχές που βρίσκονται γύρω από αυτές τις εγκαταστάσεις (Szokolay, 1980, σ. 194), ανάλογα με τις τιμές έντασης (βλ. Κεφ. 4, παρ. 4.4.2). Συγχρόνως, άμεση σχέση με προβλήματα ηχορύπανσης έχουν και τα στάδια μεταφοράς των υλικών, από τον χώρο εξαγωγής στον χώρο παραγωγής και από εκεί στο εργοτάξιο, όπου χρησιμοποιούνται συνήθως φορτηγά οχήματα.

Οι κραδασμοί ή δονήσεις είναι ήχοι πέρα από την ακουστική συχνότητα, οι οποίοι παράγονται από διάφορα εργαλεία και μεταδίδονται μέσω του εδάφους ή άλλων στερεών επιφανειών (Szokolay, 1980, σ. 189). Οι δονήσεις που σχετίζονται με τα οικοδομικά υλικά αφορούν κυρίως τις διαδικασίες εξαγωγής (εκσκαφές, ανατινάξεις) και μεταφοράς (κυκλοφορία βαρέως τύπου οχημάτων). Οι κραδασμοί χαμηλής

συχνότητας (χαμηλότερης του 1 Hz) έχουν κυρίως ψυχολογικές, αλλά και φυσιολογικές συνέπειες στους ανθρώπους (Szokolay, 1980, σ. 189).

Κίνδυνος πρόκλησης καταστροφών
Ο κίνδυνος πρόκλησης καταστροφών αναφέρεται κυρίως σε ατυχήματα που συμβαίνουν στη βιομηχανία πετρελαίου (Εικόνα 12.15), σε χημικές βιομηχανίες και σε πυρηνικά εργοστάσια και παλαιότερα, σε ορυχεία. Οι Anink et al. (1996, σ. 17) σημειώνουν ότι «ακόμα και αν ο κίνδυνος πρόκλησης τέτοιων καταστροφών είναι πολύ μικρός, αν [αυτές] συμβούν, οι συνέπειες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον μπορεί να είναι κολοσσιαίες και, για τον λόγο αυτόν, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ως μια σημαντική περιβαλλοντική παράμετρος».

Οι διαδικασίες εξαγωγής, παραγωγής και μεταφοράς των περισσότερων κοινών οικοδομικών υλικών δεν προκαλούν τέτοιες σημαντικές καταστροφές. Εξαίρεση αποτελούν τα υλικά που παράγονται από πετροχημικά προϊόντα (π.χ. προϊόντα ασφάλτου, πλαστικά προϊόντα, χρώματα και ορισμένα μονωτικά υλικά), τα οποία συνδέονται άμεσα με τις καταστροφές που μπορούν να προκληθούν από τις διαδικασίες εξαγωγής, μεταφοράς και επεξεργασίας του αργού πετρελαίου.

Ανάλογος μπορεί να είναι και ο κίνδυνος από τα υλικά στην παραγωγή των οποίων χρησιμοποιούνται χημικές ουσίες, όπως είναι το χλώριο (π.χ. στο PVC). Τέλος, καθώς σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των οικοδομικών υλικών, και ιδιαίτερα κατά το στάδιο της μεταφοράς τους, καταναλώνεται ενέργεια, η οποία προέρχεται κυρίως από την καύση του πετρελαίου ή των παραγώγων του, μπορεί να ειπωθεί ότι υπάρχει μια έστω και μικρή σχέση με τις καταστροφές που αυτά προκαλούν στη φύση.



Εικόνα 12.15 *Κίνδυνος πρόκλησης καταστροφών.*
α. Πετρελαιοκηλίδα μετά από ατύχημα σε πλατφόρμα άντλησης πετρελαίου. Πηγή: Oil Spill, by Remus Shepherd via Flickr, CC BY 2.0.
α. Βύθιση πετρελαιοφόρου. Πηγή: IMO helping to mitigate the impacts of MV Wakashio oil spill in Mauritius, by International Maritime Organization via Flickr, CC BY.

Τοξικές ουσίες
Ένα υλικό μπορεί να εκλύει επιβλαβείς στερεές, υγρές και αέριες ουσίες στο έδαφος, στο νερό και στον αέρα σε ένα ή περισσότερα στάδια του κύκλου ζωής του (Anink et al., 1996, σ. 17). Οι ουσίες αυτές αναφέρονται κυρίως στα βαρέα μέταλλα, αλλά και σε διάφορες οργανικές ενώσεις, όπως οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (Berge, 2003, σ. 28, 31). Το βασικό χαρακτηριστικό των παραπάνω τοξικών ουσιών είναι ότι, καθώς δεν αποικοδομούνται, παραμένουν στη φύση και συσσωρεύονται στην τροφική αλυσίδα, για να καταλήξουν μέσω αυτής στον άνθρωπο (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 233). Είναι προφανές ότι οι ουσίες αυτές είναι ιδιαίτερα βλαπτικές και για τη χλωρίδα και την πανίδα, και κατ' επέκταση για τα οικοσυστήματα.

Τα βαρέα μέταλλα ορίζονται ως «χημικά στοιχεία, πολλά από τα οποία είναι τοξικά για τον άνθρωπο» (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 233). Τα κυριότερα βαρέα μέταλλα είναι ο υδράργυρος, ο μόλυβδος, το κάδμιο, το

αρσενικό και ο κασσίτερος (οργανοκασσιτερούχες ενώσεις) (βλ. και Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 238-259). Τα στοιχεία αυτά συναντώνται στις φάσεις της εξαγωγής και της παραγωγής πολλών οικοδομικών υλικών, και εκλύονται κατά τη χρήση διάφορων οικοδομικών υλικών (π.χ. διάβρωση του ψευδάργυρου από το νερό της βροχής) και την απόρριψή τους (Anink et al., 1996, σ. 17). Οι επιδράσεις των βαρέων μετάλλων στον άνθρωπο μπορεί να είναι οξείες (π.χ. δηλητηριάσεις) ή χρόνιες (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 233).

Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (polycyclic/polynucluar aromatic hydrocarbons – PAH) είναι ενώσεις που «έχουν στο μόριό τους συμπυκνωμένους αρωματικούς δακτυλίους και χαρακτηρίζονται από μεταλλαξιογόνες και καρκινογόνες ιδιότητες» (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σσ. 293-294). Οι ενώσεις αυτές τείνουν να συσσωρεύονται σε λιπώδεις ιστούς, στο γάλα και στο ήπαρ (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 298). Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες εκλύονται στην ατμόσφαιρα από την καύση ορυκτών καυσίμων (πετρελαίου και άνθρακα) για την παραγωγή ενέργειας, καθώς και από την καύση στερεών απορριμμάτων· στα νερά, εμφανίζονται κυρίως από τις διάφορες διαδικασίες που σχετίζονται με το πετρέλαιο, καθώς και από τα υγρά απόβλητα βιομηχανιών, πολλές από τις οποίες σχετίζονται άμεσα με την παραγωγή οικοδομικών υλικών (π.χ. βιομηχανίες διαλυτικών, χρωμάτων κ.ά.) (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σσ. 295-298).

Οι διοξίνες[11] και τα φουράνια[12] ανήκουν στην κατηγορία των υδρογονανθράκων (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 285) και εκλύονται στην ατμόσφαιρα κυρίως από την καύση πλαστικών προϊόντων ή προϊόντων που φέρουν πλαστικές επιστρώσεις και κατά τη διαδικασία παραγωγής πλαστικών προϊόντων (Κουιμτζής, κ.ά., 1998, σ. 285· Woolley et al., 1997, σ. 177). Οι ενώσεις αυτές χαρακτηρίζονται από μεγάλη τοξικότητα και δυνατότητα βιοσυσσώρευσης εξαιτίας της παραμονής τους στο έδαφος για μεγάλο χρονικό διάστημα (άνω του ενός χρόνου) (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 286). Οι διοξίνες και τα φουράνια έχουν την τάση να διαλύονται στη λιπαρή ύλη, γι' αυτό και εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό κυρίως μέσω της τροφικής αλυσίδας (κρέατα, ψάρια και γαλακτοκομικά) και προκαλούν ορμονικές διαταραχές (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 288· Woolley et al., 1997, σσ. 156, 177).

Πέρα από τις παραπάνω επιβλαβείς για τον άνθρωπο και τα οικοσυστήματα ουσίες, σημαντική αρνητική επίδραση κυρίως για την ανθρώπινη υγεία έχουν ουσίες όπως ο αμίαντος και το ραδόνιο.

Ο αμίαντος (*asbestos*) παράγεται από πυριτικά πετρώματα, τα οποία έχουν ινώδη μορφή και παρουσιάζουν μεγάλη θλιπτική αντοχή και πυραντοχή. (Fox & Murrell, 1989, σ. 20) Η εισπνοή ινών αμιάντου μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ασθένειες, όπως είναι η αμιάντωση, το μεσοθηλίωμα και ο καρκίνος των πνευμόνων. (Κουϊμτζής, κ.ά., 1998, σ. 93) Πέρα από τη χρήση του σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις πυρασφάλειας, που έχει απαγορευτεί, ο αμίαντος συναντάται και στα θραυστά αδρανή πετρωμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, όπως η παραγωγή σκυροδέματος, ασφαλτικών σκυροδεμάτων, αλλά και η διάστρωση σιδηροδρομικών γραμμών (Μπουγάτσου, 2005, σ. 3). Στην Ελλάδα, με τον αμίαντο σχετίζεται ο «πνεύμονας του Μετσόβου» (*Metsovo lung*) (για περισσότερα βλ. και «Metsovo lung» & Constantopoulos et al., 1985).

Το ραδόνιο (*radon gas*) είναι ένα αέριο που περιέχει ραδιενεργά ισότοπα του πολωνίου, του μολύβδου και του βισμουθίου και είναι χημικά αδρανές, άοσμο και άγευστο (Berge, 2003, σ. 31). Η έκθεση στο ραδόνιο γίνεται μέσω της εισπνοής σκόνης (αιωρούμενων σωματιδίων), όπου έχουν προσκολληθεί τα παραπάνω ραδιενεργά ισότοπα (ASHRAE, 1993). Παρόλο που το ραδόνιο έχει οριστεί από την WHO (World Health Organisation) ως σημαντικό αίτιο πρόκλησης καρκίνου, οι ακριβείς επιπτώσεις του δεν είναι πλήρως γνωστές,

[11] Ο όρος διοξίνες αναφέρεται κυρίως στην ένωση τετραχλωρο διβενζο-π-διοξίνη (tetrachlorinated dibenzo-p-dioxine – TCDD) και σε πολυχλωριωμένες διβενζο-π-διοξίνες (polychlorinated dibenzo-p-dioxines – PCDDs), που ανήκουν στην κατηγορία των υδρογονανθράκων (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 285).

[12] Ο όρος φουράνια αναφέρεται στις ενώσεις πολυχλωριωμένα διβενζο-φουράνια (polychlorinated dibenzo-furans – PCDFs) (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 286).

καθώς εξαρτώνται τόσο από τις συγκεντρώσεις του στους εσωτερικούς χώρους όσο και από τον χρόνο έκθεσης σε αυτό (Caponetto et al., 1998, σ. 532).

Ζητήματα που αφορούν την υγεία

Στα ζητήματα που αφορούν την ανθρώπινη υγεία περιλαμβάνεται η υγεία τόσο των χρηστών των χώρων όσο και των ανθρώπων που εργάζονται στα αρχικά στάδια του κύκλου ζωής των υλικών, δηλαδή στην εξαγωγή, στην παραγωγή και στην κατασκευή. Η υγεία των ανθρώπων, ιδιαίτερα στους εσωτερικούς χώρους, σχετίζεται με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα (βλ. Κεφ. 4, παρ. 4.5). Αντίθετα, στους εξωτερικούς χώρους, τα ζητήματα που αφορούν την υγεία αναφέρονται κυρίως στα φυσικά και χημικά αποτελέσματα της αέριας ρύπανσης (Berge, 2003, σ. 25). Αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων σε χώρους κατοικίας και εργασίας έχουν και η σκόνη, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (π.χ. από την ύπαρξη χάλυβα στον οπλισμό του σκυροδέματος (Berge, 2003, σ. 72), η ηλεκτρομίχλη (electrosmog), που προκαλείται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (κινητά, κεραίες κ.ά.), και η ραδιενέργεια (ραδόνιο, βλ. και ΑΑ. VV., 1999).

Οι επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων που εργάζονται κατά την εξαγωγή των πρώτων υλών, την παραγωγή των τελικών προϊόντων και την κατασκευή διαφέρουν ανάλογα με τα διαφορετικά υλικά. Αφορούν κυρίως την εισπνοή σκόνης και επικίνδυνων χημικών ενώσεων, αλλά και τα εργατικά ατυχήματα (Fox & Murrell, 1989, σ. 5). Το πρόβλημα με τα αιωρούμενα σωματίδια είναι ιδιαίτερα σύνθετο, καθώς πολλές φορές οι βλάβες που προκαλούν στην ανθρώπινη υγεία δεν οφείλεται σε αυτά καθαυτά, αλλά στις επικίνδυνες ουσίες που προσροφώνται σε αυτά (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 297). Έτσι, ανάλογα με το είδος των ουσιών αυτών, η εισπνοή σκόνης μπορεί να προκαλέσει από αλλεργικές αντιδράσεις έως και καρκίνο (Κουιμτζής κ.ά., 1998, σ. 93).

Δυνατότητα συντήρησης και επισκευής

Η δυνατότητα συντήρησης και επισκευής ενός οικοδομικού υλικού ή στοιχείου έχει άμεση σχέση με την αντοχή του. Όσο μικρότερες είναι οι απαιτήσεις για συντήρησή του ή όσο ευκολότερη είναι επισκευή του, τόσο μεγαλύτερη είναι και η διάρκεια ζωής του (Anink et al., 1996, σ. 18). Η επέκταση του κύκλου ζωής ενός υλικού, και κατά συνέπεια της κατασκευής στην οποία αυτό εντάσσεται, έχει μεγάλη περιβαλλοντική αξία, καθώς μετατοπίζει χρονικά την απόρριψη των υλικών και την ανάγκη για παραγωγή νέων υλικών (Smith et al., 1998, σ. 60). Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι, πέρα από τα περιβαλλοντικά οφέλη, η αντοχή ενός υλικού έχει και οικονομική σημασία (O'Brien & Sobearto, 2000, σ. 178).

α.   β. 

Εικόνα 12.16. *Συντήρηση & επισκευή.*
α. Ιαπωνική τεχνική kintsugi. Πηγές: Hand Pinted Kintsugi Pottery Bowl, by Ruthann Hurwitz, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0 και Kintugi, by Haragayato via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.
β. Επισκευή του κατώτατου σημείου εξωφύλλου που φθείρεται από τα καιρικά φαινόμενα. Πηγή: Φωτογραφικό αρχείο (Ε. Αλεξάνδρου).

Η αντοχή ενός υλικού εξαρτάται από τη φυσική δομή και τη χημική σύστασή του, τον τρόπο εφαρμογής του στις κτιριακές κατασκευές, τις περιβαλλοντικές επιδράσεις (κλιματικές, φυσικές και χημικές)

και τη συντήρησή του (Berge, 2003, σ. 9). Δυστυχώς, όμως, η αντικατάσταση ενός υλικού ή ενός στοιχείου, και σε μεγαλύτερη κλίμακα ενός κτιρίου, δεν εξαρτάται πάντα από λειτουργικά κριτήρια. Πολλές φορές αυτά αντικαθίστανται με βάση οικονομικά αλλά και αισθητικά κριτήρια, ακόμα και εάν η αντοχή και η ποιότητά τους δεν έχουν υποστεί φθορές (Coch et al., 1998, σ. 513). Η αισθητική παράμετρος είναι πολύ στενά συνυφασμένη με την αξία που έχει «το καινούργιο» (Hagan, 1998, σ. 78 και Rapoport, 1969, σ. 78), ενώ η οικονομική παράμετρος αφορά συνήθως την υψηλότερη τιμή των περιβαλλοντικά φιλικότερων υλικών. Έτσι, οι ανακυκλωμένες πρώτες ύλες είναι πολλές φορές ακριβότερες από εκείνες που προέρχονται από φυσικούς πόρους (Smith et al., 1998, σ. 68), τα περιβαλλοντικά φιλικά υλικά κοστίζουν ακριβότερα από τα περιβαλλοντικά βλαπτικά (Woolley et al., 1997, σ. 14 και Gulisano et al., 1998, σ. 521), ενώ το ίδιο ισχύει και για τα τοπικά υλικά (Smith,et al., 1998, σ. 80).

Δυνατότητα επανάχρησης/ανακύκλωσης

Οι δυνατότητες ανακύκλωσης ενός οικοδομικού υλικού ή προϊόντος είναι τρεις: η επανάχρηση, η ανακύκλωση και η ανάκτηση ενέργειας (Berge, 2003, σ. 11). Η επανάχρηση συνεπάγεται τη χρήση του υλικού ή του προϊόντος αυτούσιου ή έπειτα από μικρή επεξεργασία σε μια νέα κατασκευή (π.χ. η επανάχρηση κεραμικών, ξύλινων ή αλουμινένιων πάνελ σε νέα κτίρια). Η ανακύκλωση ενός υλικού ή προϊόντος συνεπάγεται την επανάχρησή του ως πρώτη ύλη μετά την κατεδάφιση (δευτερογενείς πρώτες ύλες – *second-hand aggregate*) (Anink et al., 1996, σ. 18 και Gulisano et al., 1998, σ. 523) (π.χ. η θραύση προϊόντων τσιμέντου, οπλισμένου σκυροδέματος, αλλά και οδοστρωμάτων από άσφαλτο με στόχο την παραγωγή αδρανών). Το γεγονός αυτό εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον τρόπο με τον οποίο το υλικό ή το προϊόν έχει ενσωματωθεί στις κατασκευές. Υλικά τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κονιάματα που έχουν ως βάση το τσιμέντο είναι αδύνατο να διαχωριστούν κατά το στάδιο της κατεδάφισης και να επαναχρησιμοποιηθούν (Ευαγγελινός, 2001, σ. 265 και Vale & Vale, 1991, σ. 42). Τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον και πολλές εφαρμογές δημιουργικής επαναχρησιμοποίησης (*upcycling*) υλικών και απορριμμάτων, όχι μόνο σε κτιριακές εφαρμογές (βλ. Κεφ. 1, παρ. 1.7.3 & 1.7.4), αλλά και σε εικαστικές εγκαταστάσεις (*installations*) (Εικόνα 12.17.β).

α.  β.  

Εικόνα 12.17*. Επανάχρηση και ανακύκλωση.*

α. Scrap μετάλλων. Πηγή: Recycle Or Die, Photo by v2osk on Unsplash

β. Επανάχρηση πλαστικών στο Skyscraper (Bruges Whale), 2018 Bruges Triennial, Βέλγιο (StudioKCA, 2018). Πηγές: Skyscraper (the Bruges Whale by Studio KCA), by J.M. Muller via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0 και Walvis op Catharijnesingel, by Robin van der Vliet via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.

Υλικό	Αρχική ενσωματωμένη ενέργεια		Παραγωγή ενέργειας κατά την καύση		% αρχικής ενέργειας
	MJ/kg	kWh/kg	MJ/kg	kWh/kg	%
Ξυλεία	19	5,27	16	4,44	84
Αντικολλητή ξυλεία	25	6,94	16 - X	4,44 - X	64
Μοριοσανίδα	22	6,11	14 - X	3,88 - X	64
EPS	125	34,72	48 - X	13,33 - X	38
XPS	130	36,11	48 - X	13,33 - X	37
Πολυουρεθάνη (PUR)	135	37,5	30 – X	8,33 - X	22
Πολυαιθυλένιο (PE)	110	30,55	43 - X	11,94 - X	39
Πολυπροπυλένιο (PP)	115	31,94	43 - X	11,94 - X	37
Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	85	23,61	20 - X	5,55	24
Σημείωση: Η ένδειξη X σημαίνει ότι η καύση του υλικού δεν ενδείκνυται.					

Πίνακας 12.3 *Δυνατότητα παραγωγής/ανάκτησης ενέργειας (kWh/kg) κατά την καύση οικοδομικών υλικών. Πηγή: απόδοση (Berge, 2003, σσ. 20-23).*

Η τελευταία δυνατότητα ανακύκλωσης, η ανάκτηση ενέργειας, αφορά την καύση των υλικών μετά την απόρριψή τους (Πίνακας 12.3), με στόχο την παραγωγή ενέργειας ή/και τη θέρμανση (Εικόνα 12.18).



Εικόνα 12.18. *Ανάκτηση ενέργειας. Μονάδα αποτέφρωσης απορριμμάτων και συμπαραγωγής ενέργειας Amager Bakke, Κοπεγχάγη, Δανία (BIG, Bjarke Ingels Group, 2017). Πηγή: Margretheholm - CopenHill (Amager Bakke; 2019) by Ann Priestley via Flickr, CC BY-NC-SA 2.0.*

Παρόλο που η διαδικασία αυτή επιτρέπει την ανάκτηση σημαντικού μέρους της εμπεριεχόμενης ενέργειας των υλικών (βλ. Πίνακα 12.3), ενδείκνυται μόνο στην περίπτωση υλικών κατά την καύση των οποίων δεν παράγονται επικίνδυνες εκπομπές για το περιβάλλον και τον άνθρωπο (Berge, 2003, σ. 11) Έτσι, για παράδειγμα, πλαστικά και μονωτικά υλικά, αλλά και προϊόντα ξύλου, τα οποία έχουν υποστεί χημική επεξεργασία με συντηρητικά και χρώματα, δεν είναι δυνατό να καούν παρά μόνο σε ειδικές, ιδιαίτερα ακριβές εγκαταστάσεις.

Η επανάχρηση και η ανακύκλωση των οικοδομικών υλικών έχουν μεγάλη περιβαλλοντική αξία, καθώς με αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται η εξάντληση των φυσικών πόρων, μειώνεται σημαντικά ο όγκος των υλικών που απορρίπτονται στη φύση, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται τμήμα της εμπεριεχόμενης ενέργειας των υλικών (Gulisano et al., 1998, σ. 523 και Smith et al., 1998, σ. 60). Τα κύρια μειονεκτήματα των διαδικασιών επανάχρησης και ανακύκλωσης οικοδομικών υλικών είναι η χρονική επέκταση της φάσης της κατεδάφισης ή αποδόμησης του κτιρίου, η ανάγκη ύπαρξης ειδικά εκπαιδευμένου προσωπικού και ειδικών μηχανημάτων, καθώς και η κατάρτιση ενός ακριβούς προγράμματος κατεδάφισης (Gulisano et al., 1998, σ. 523). Τέλος, σε πολλές περιπτώσεις (π.χ. γυαλί, πλαστικά προϊόντα), η ανακύκλωση έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή προϊόντων κατώτερης ποιότητας (*down-cycling*).

Απόβλητα και οικοδομικά απορρίμματα

Η απόθεση οικοδομικών υλικών και στοιχείων στη φύση μετά το τέλος της περιόδου χρήσης τους ως απορριμμάτων μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικά προβλήματα, τα οποία εξαρτώνται κυρίως από τον τρόπο απόρριψής τους (Εικόνα 2.19). Έτσι, στην περίπτωση της ταφής, είναι πιθανό η αποσύνθεση των υλικών να προκαλέσει την έκλυση επικίνδυνων ουσιών στο έδαφος και τα νερά (π.χ. βαρέα μέταλλα).

Τα οικοδομικά απορρίμματα που αποτίθενται στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για τις λειτουργικές ανάγκες των χώρων αυτών, για παράδειγμα στη διαμόρφωση πρανών και εσωτερικών δρόμων, αλλά και στην καθημερινή κάλυψη των απορριμμάτων. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, ο όγκος τους είναι τόσο μεγάλος, που καταλαμβάνουν πολύτιμο χώρο για μεγάλο χρονικό διάστημα, επιβαρύνοντας σημαντικά τη λειτουργία των χώρων στους οποίους αποτίθενται. Το χρονικό διάστημα για το οποίο ένα οικοδομικό απόρριμμα καταλαμβάνει χώρο μειώνεται σημαντικά όταν αυτό έχει τη δυνατότητα να αποσυντίθεται. Όμως κατά την αποσύνθεσή του είναι πιθανή η έκλυση επικίνδυνων ουσιών στο περιβάλλον (Anink et al., 1996, σ. 17).

Η ορθολογικότερη διαχείριση των οικοδομικών απορριμμάτων μπορεί να επιτευχθεί με την απόθεσή τους σε αποκλειστικούς χώρους (ΧΥΤΑ αδρανών), των οποίων η δημιουργία προβλέπεται τόσο από την Ευρωπαϊκή όσο και από την Ελληνική Νομοθεσία (Σανταμούρης κ.ά., 2000, σ. 148). Τέτοιοι είναι οι νόμοι και οι υπουργικές αποφάσεις που αφορούν την εναλλακτική διαχείριση αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ). Οι χώροι αυτοί παρέχουν τη δυνατότητα διαχωρισμού ή της θραύσης των οικοδομικών απορριμμάτων και της εισαγωγής τους ξανά στην οικοδομική δραστηριότητα με τη μορφή ανακυκλωμένων πρώτων υλών ή αδρανών δεύτερης διαλογής. Το κύριο αρνητικό στοιχείο είναι ότι πολλές φορές τέτοιοι εξειδικευμένοι χώροι είναι λίγοι και χωροθετούνται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το περιβαλλοντικό, αλλά και το πιθανό οικονομικό, κέρδος της ανακύκλωσης να αντισταθμίζονται από την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας που χρειάζεται για τη μεταφορά των υλικών (Gulisano et al., 1998, σ. 523).



Εικόνα 12.19 *Χώρος απόθεσης απόβλητων οικοδομών (κατασκευής και κατεδάφισης). πηγή: Construction and Demolition landfill, by MPCA Photos via Flickr, CC BY-NC 2.0.*

Τέλος, μια ριζοσπαστική, οικολογική άποψη για τη διαχείριση των οικοδομικών απορριμμάτων, και κυρίως εκείνων που έχουν οργανική προέλευση, αποτελεί η κομποστοποίηση (Berge, 2003, σσ. 14-15). Η διαδικασία αυτή δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί με όλα τα υλικά, στις περιπτώσεις, όμως, που είναι δυνατή, «κλείνει» τον κύκλο της ζωής των υλικών, αφού τα επαναφέρει, με τη μορφή ανόργανων και οργανικών ενώσεων, στη φύση από όπου και προήλθαν.

12.2 Οικολογικά υλικά και συστήματα

Τα οικολογικά υλικά και συστήματα δόμησης έχουν χαμηλή περιβαλλοντική επίδραση και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ως προς τις παραμέτρους αξιολόγησης της περιβαλλοντικής επίδρασης στα βασικά στάδια του κύκλου ζωής τους, ως εξής:

- Αρχή κύκλου ζωής / Προέλευση:
- παραγωγή από ανανεώσιμες πρώτες ύλες,
- παραγωγή από υποπροϊόντα ή παραπροϊόντα άλλων διαδικασιών.
- Χρήση:
- διαπνέοντα (χαμηλή αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών – βλ. Κεφ. 5, παρ. 5.5.3)
- μη τοξικά.
- Τέλος κύκλου ζωής:
    - μεγάλος κύκλος ζωής,
    - επαναχρησιμοποιούμενα,
    - ανακυκλώσιμα,
    - βιοδιασπώμενα.

Κυρίαρχη θέση στα οικολογικά υλικά και συστήματα έχουν τα φυσικά υλικά δόμησης (Κεφ. 1., παρ. 1.5). Τα οικολογικά υλικά και συστήματα προέρχονται, σε πολλές περιπτώσεις, από επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση (πρωτογενή ή δευτερογενή) και μπορούν να διακριθούν σε (Μπασιαδάκη & Παπαγεωργίου, 2020):

- επαναχρησιμοποιημένα: αυτούσια,
- επαναχρησιμοποιημένα: αναδιαμορφωμένα,
- ανακυκλωμένα: μετασχηματισμένα,
- ανακυκλωμένα: εξαρχής σχεδιασμένα,
- καλλιεργημένα.

Τα τελευταία χρόνια, η συνεχής και αυξανόμενη ευαισθητοποίηση γύρω από τα ζητήματα της προστασίας του περιβάλλοντος έχει ως αποτέλεσμα να παράγονται και να «σχεδιάζονται» όλο και περισσότερα υλικά και συστήματα που εμπίπτουν στην κατηγορία αυτή. Ως εκ τούτου, στο παρόν σύγγραμμα επιλέγεται η ενδεικτική αναφορά κάποιων από αυτά (Πίνακας 12.4), με βάση τη θέση τους στο δομημένο περιβάλλον (κτίρια και υπαίθριοι χώροι), ως εξής:

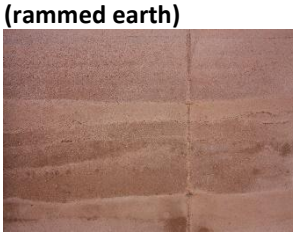
- φέροντα στοιχεία,
- στοιχεία πλήρωσης – μοναδιαία τυποποιημένα και μη στοιχεία (*block* και *panel*),
- θερμομονωτικά υλικά,
- κονιάματα και επιχρίσματα,
- βαφές και βερνίκια,
- επικαλύψεις δαπέδων,
- δάπεδα υπαίθριων χώρων,
- διάφορα/miscellaneous.

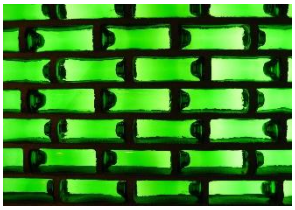
Ανάλογα με τη θέση και τη χρήση του κάθε υλικού, διαφοροποιούνται και οι απαιτήσεις σε σχέση τόσο με τις διαφορετικές τους ιδιότητες (π.χ. μηχανικές, φυσικές, θερμικές) και τη συνάφεια με άλλα υλικά όσο και η έμφαση που δίνεται στην παράμετρο περιβαλλοντικής επίδρασης που έχει κάθε φορά βαρύνουσα σημασία. Έτσι, για παράδειγμα, σε υλικά που εφαρμόζονται στο εσωτερικό των κτιρίων, υπερισχύει η συμπεριφορά

στο στάδιο της χρήσης και, άρα, η ανάγκη για μη τοξικότητα, διαπνοή κ.λπ., και, επιπλέον, στα δημόσια κτίρια η ανάγκη για πυροπροστασία. Αντιθέτως, για τον φέροντα οργανισμό των κτιρίων, επιλέγονται υλικά, στοιχεία και συστήματα με κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες και αντοχές, μεγάλη διάρκεια ζωής και δυνατότητα επανάχρησης.

Είναι πολλοί οι σύγχρονοι αρχιτέκτονες των οποίων η φιλοσοφία βασίζεται στη χρήση οικολογικών ή περιβαλλοντικά φιλικών υλικών και συστημάτων δόμησης. Πολύ ενδεικτικά, μπορούν να αναφερθούν ο Diébédo Francis Kéré, ο Renzo Piano, ο Shigeru Ban, ο Kengo Kuma, ο Jean Nouvel, ο Mario Cuccinella κ.ά.

Ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια η χρήση οικολογικών υλικών έχει αρχίσει να υιοθετείται και να προβάλλεται και σε κτίρια δημόσιων χρήσεων. Έτσι, για παράδειγμα, στους εσωτερικούς χώρους του πύργου (*Tower*) του κτιρίου τεχνών του Ιδρύματος Luma στην Arles της Γαλλίας (Frank O. Gehry, 2021), χρησιμοποιήθηκαν οικολογικά υλικά χαμηλού ενεργειακού αποτυπώματος, όπως πάνελ από τοπικό αλάτι, τελικές επιφάνειες από άλγη από τον ποταμό Ροδανό και ακουστικά πάνελ από στελέχη ηλιοτροπίων (Fairs, 2021). Μεγάλη σημασία στην έμφαση σε οικολογικά υλικά τόσο στο παραπάνω όσο και σε άλλα αντίστοιχης προβολής και επισκεψιμότητας δημόσια κτίρια φαίνεται να δίνεται από το ίδρυμα ή τον οργανισμό που στεγάζεται.

Φέροντα στοιχεία			
COR-TEN®	**Ξύλο – Φυσική ξυλεία**	**Ξύλο – CLT**	**Χαρτί – Σωλήνες από χαρτί**
 Photo by Greg Rosenke on Unsplash	 Photo by kindfolk on Unsplash	 CLT, by Райн Александр Дмитриевич via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0	 Photo by Kier In Sight on Unsplash
Bamboo	**Πέτρα**	**Χώμα – Ωμόπλινθοι**	**Χώμα – Συμπιεσμένη γη (rammed earth)**
 Photo by Maksim Shutov on Unsplash	 Photo by Andy Makely on Unsplash	 Photo by Larry Costales on Unsplash	 Rammed Earth Surface, by Moshirah via Wikimedia Commons, CC BY 3.0

Στοιχεία πλήρωσης – Μοναδιαία τυποποιημένα και μη στοιχεία			
Αχυρόμπαλες (straw-bale)	**Μπουκάλια PET, Τούβλα και μοναδιαία στοιχεία**	**WOBO**	**RE3 Glass**
			
Photo by Lluis Bazan on Unsplash	Photo by Jonathan Chng on Unsplash	WOBO, by Fotero via Flickr, CC BY-NC 2.0	© Courtesy of Re^3 Glass, TU Delft

Στοιχεία επένδυσης			
OSB (Oriented Strand Board)	**Συσκευασίες Tetra Pak® ως α΄ ύλη για πάνελ όψης και στεγάσεων**	**Μπουκάλια PET (ολόκληρα ή συμπιεσμένα) σε πάνελ ή ως κεραμίδια (shingles)**	**Πάνελ από κουτάκια αλουμινίου ή από λιωμένο ανακυκλωμένο αλουμίνιο**
			
Photo by engin akyurt on Unsplash	The Tetra Pak® package portfolio, by Tetra Pak via Flickr, CC BY-SA 2.0	Photo by Teslariu Mihai on Unsplash	Photo by Studio Blackthorns on Unsplash
Ελαστικά αυτοκινήτων	**Πλαστικά καφάσια**	**Βιο-σκυρόδεμα από θαλάσσια όστρακα για πλακάκια και πλάκες**	**Πάνελ αλατιού (salt panels)**
			
Photo by Imthaz Ahamed on Unsplash	Photo by Romain HUNEAU on Unsplash	Photo by Mandy Henry on Unsplash	Photo by Christian Bass on Unsplash

Θερμομονωτικά υλικά

Κίσσηρη (Ελαφρόπετρα)



Pumice on the shore of Okinawa, by Kugel~commonswiki via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0

Περλίτης



Perlite1, by KENPEI via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0

Αφρώδες γυαλί (foamglass)



Photo by Nicolas Horn on Unsplash

Ξυλόμαλλο



Holzafaserbeton groß, by Florian Gerlach (Nawaro); improved by WinfriedSchneider (talk) via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0

Πετροβάμβακας



Rockwool, by Achim Hering via Wikimedia Commons, CC BY 3.0

Φελλός



Photo by Rob Evel on Unsplash

Μαλλί προβάτου (sheep wool)



Photo by Philipp Pilz on Unsplash

Φύκια (posidonia oceanica plant balls)



Photo by Benjamin L. Jones on Unsplash

Πάπλωμα από ανακυκλωμένο denim



Photo by Claire Abdo on Unsplash

Kenaf (Κάνναβη)



Kenaf-Fasern, by Elke Wetzig (elya) via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0

Κυτταρίνη (Paper wool / Cellulose Insulation)

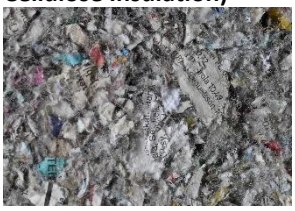


Photo by Anne Nygård on Unsplash

Κονιάματα και Επιχρίσματα

Πηλοκονιάματα



Photo by engin akyurt on Unsplash

Ασβεστοκονιάματα



Photo by Wesley Tingey on Unsplash

Ποζολανικά κονιάματα



Puzzolane stones from Vesuvius Italy, by Jebulon, CC0, via Wikimeia Commons

Βαφές και βερνίκια

Ασβεστοχρώματα (lime paints)



Photo by Mona Eendra on Unsplash

Πράσινο σαπούνι



horsetail green [cropped], by kahvikisu via Flickr, CC BY 2.0

Κερί μέλισσας



Photo by Meggyn Pomerleau on Unsplash

Πηλοχρώματα (clay and loam paints)



Photo by Nina Luong on Unsplash

Χρώματα κιμωλίας (chalk paints)



Photo by Jason Leung on Unsplash

Ορυκτά χρώματα (silicate paints)



Photo by Sharon McCutcheon on Unsplash

Χρώματα καζεΐνης (casein paints)



Photo by russn_fckr on Unsplash

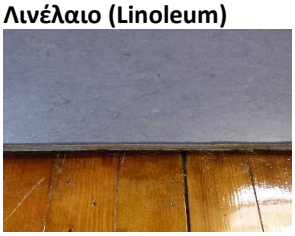
Χρώματα αλευριού (flour paints)



Photo by Jasmin Ne on Unsplash

Επικαλύψεις δαπέδων

Λινέλαιο (Linoleum)



Linoleum edge, by blahedo via Wikimedia Commons, CC BY-SA 2.5

Sisal



Abstract, by PublicDomainPictures via pixabay

Κοκοφοίνικας (coir)



Coir, by -SV- via pixabay

Φελλός (cork)



Photo by Rob Evel on Unsplash

Πλακίδια από φελλούς



Photo by Elisha Terada on Unsplash

Πλακίδια από λιωμένο/ανακυκλωμένο πλαστικό (LDPE – HDPE)



Photo by Killari Hotaru on Unsplash

Πλακίδια από ανακυκλωμένα ελαστικά



Photo by courtesy of Genan

Δάπεδα υπαίθριων χώρων

Κυβόλιθοι από πέτρα



Photo by Etienne Girardet on Unsplash

Χαλίκια



Photo by Joshua Fernandez on Unsplash

Άμμος



Photo by jim gade on Unsplash

Ξυλοτρίμμα + Ροκανίδια	Πλάκες από καουτσούκ	Πλαστικό δάπεδο από ανακυκλωμένα αθλητικά παπούτσια
 Photo by Dim Hou on Unsplash	 Photo by courtesy of Genan	 Photo by Ján Vlačuha on Unsplash

Διάφορα/Miscellaneous	
Παλλέτες από κελύφη καρύδας (©Coco Pallet)	**Καπλαμάς από ανακυκλωμένες εφημερίδες (©Newspaper wood)**
 Photo by Sri Lanka on Unsplash	 Photo by Mr Cup / Fabien Barral on Unsplash

Πίνακας 12.4 *Ενδεικτική επιλογή οικολογικών υλικών και πρώτων υλών. Πηγή: Ίδια επεξεργασία (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) από διάφορες πηγές που αναγράφονται εντός του πίνακα.*

12.3 Διαχείριση νερού

Το νερό αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα και απαραίτητα στοιχεία για τη ζωή στον πλανήτη. Η ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού στα περισσότερα σημεία της Γης συνδεόταν πάντα με την παρουσία επιφανειών νερού (ποταμών, λιμνών, θάλασσας) για την παροχή τροφής, για τις καλλιέργειες και την κτηνοτροφία και για το εμπόριο και τη ναυτιλία. Από αυτό εξαρτώνται σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό όλες οι ανθρώπινες δραστηριότητες από τις πιο βασικές για τον άνθρωπο (βιολογικές ανάγκες και προσωπική υγιεινή) έως τις αναγκαίες για την οικονομική δραστηριότητα (π.χ. γεωργία, βιομηχανία, ναυτιλία) (Μπουγιατιώτη & Οικονόμου, 2013). Το ζήτημα της συλλογής, διαχείρισης και διανομής του πόσιμου νερού ήταν πάντοτε κεφαλαιώδες στις ανθρώπινες κοινωνίες (Σανταμούρης κ.ά., 2000), με παραδείγματα όπως τα πηγάδια (stepwells) στην Έρημο Thar, στο Rajasthan της Ινδίας (Singh, 2018) (Εικόνα 12.20), οι κατοικίες Trulli στο Alberobello της Ιταλίας (UNESCO World Heritage Centre, n.d.) και πολλά άλλα.




Εικόνα 12.20 *Πηγάδια (stepwells), Rajastan, Ινδία. Πηγή: Detail of a stepwell in India., Photo by Wim Arys on Unsplash & Stepwell, Jodhpur, Rajasthan, India, Photo by Pradheep Rajendirane on Unsplash.*

Στις σύγχρονες ελληνικές πόλεις, ο κύκλος του νερού παρουσιάζεται σημαντικά διαταραγμένος, κυρίως εξαιτίας του τρόπου διαμόρφωσης των επιφανειών των ελεύθερων χώρων τους. Το κυριότερο αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι η αύξηση των αρνητικών επιπτώσεων των βροχοπτώσεων, δηλαδή των πλημμυρών και των υπερχειλίσεων των ρεμάτων. Συγχρόνως, όμως, η σημαντική μείωση της υδατοπερατότητας του εδάφους έχει ως συνέπεια τη μείωση της ποσότητας νερού που διεισδύει στο έδαφος και, άρα, την ελάττωση της στάθμης του υδάτινου ορίζοντα (Αλεξάνδρου, 2013β).

Η διαχείριση του νερού, ένα σημείο στο οποίο η χώρα μας υστερεί, μπορεί να βοηθήσει στην εξοικονόμηση νερού για την άρδευση των κήπων και των υπαίθριων χώρων, καθώς και για την καθαριότητα των ανοιχτών και κοινόχρηστων χώρων (Αλεξάνδρου, 2013β).

Η επανάχρηση του νερού που προέρχεται από πηγές, όπως είναι τα όμβρια ύδατα και τα επεξεργασμένα απόβλητα, προσφέρει πολλά περιβαλλοντικά οφέλη. Καταρχήν μειώνονται τα όμβρια που καταλήγουν σε δρόμους και υπονόμους, βελτιώνοντας το πρόβλημα των πλημμυρών, ενώ παράλληλα μειώνεται η ζήτηση σε νερό –πόσιμο κατά κανόνα–, που χρησιμοποιείται σε δευτερεύουσες χρήσεις. Ειδικά το επεξεργασμένο ανακυκλωμένο υγρό απόβλητο αποτελεί μια αξιόπιστη πηγή νερού. Με την κατάλληλη επεξεργασία, τα υγρά απόβλητα και κυρίως το νερό της βροχής μπορούν να καλύψουν πολλές ανάγκες και χρήσεις, όπως άρδευση κήπων, πλύσιμο εξωτερικών χώρων κ.λπ. Τέλος, αυτή η διαδικασία προσφέρει και οικονομικά οφέλη γιατί αποφεύγεται η επεξεργασία του πόσιμου νερού. Επίσης, μειώνεται και η ποσότητα των υγρών αποβλήτων που θα διατεθούν σε επεξεργασία, και έτσι μειώνεται η απαίτηση σε κατασκευή συγκεντρωτικών υποδομών μεγάλης κλίμακας. Στα μεγάλα αστικά κέντρα, η εφαρμογή επαναχρησιμοποίησης είναι αναγκαία γιατί έτσι επιτυγχάνεται έλεγχος της κατανάλωσης του νερού και μείωση του ρυπαντικού φορτίου, του οποίου αποδέκτης είναι το περιβάλλον. Σε μεγάλο ποσοστό νερού που χρησιμοποιείται σε αστικές χρήσεις δεν απαιτείται ποιότητα του νερού αντίστοιχη με αυτήν του πόσιμου νερού (Αλεξάνδρου, 2013β). Πρόβλημα αποτελεί το ότι το επαναχρησιμοποιημένο νερό πρέπει να διατίθεται από διαφορετικό δίκτυο από εκείνο του πόσιμου, ανάλογα με την ισχύουσα νομοθεσία.

12.3.1 Όμβρια

Σε χώρες με χαμηλή διαθεσιμότητα νερού, όπως είναι η Ελλάδα, η πρακτική της συλλογής του νερού της βροχής αποτυπώνεται όχι μόνο σε μεγάλης κλίμακας ιστορικές κατασκευές, αλλά και στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική (Μπουγιατιώτη & Οικονόμου, 2013).

Σε ό,τι αφορά τη συλλογή και αξιοποίηση των όμβριων υδάτων, οι Μινωίτες ανέπτυξαν εντυπωσιακή τεχνολογία για τη συλλογή και τη μεταφορά νερού στους οικισμούς. Εξαιτίας των πολύ ξηρών και άνομβρων καλοκαιριών, η συλλογή του νερού της βροχής επιτυγχανόταν τόσο από τα δώματα των κτιρίων όσο και από τις ανοιχτές αυλές (Angelakis et al., 2012, p. 236). Οι επιφάνειες αυτές καθαρίζονταν καλά, με στόχο τη διατήρηση της καθαρότητας και της ποιότητας του συλλεγόμενου νερού, ενώ, ταυτόχρονα, αναπτύχθηκαν τεχνικές φιλτραρίσματος, π.χ. φίλτρα άμμου. Το νερό της βροχής από τις κινστέρνες χρησιμοποιόταν κυρίως στις τέχνες (π.χ. κεραμική, μεταλλουργία), σε οικιακές δραστηριότητες και στην άρδευση. Το έπιναν μόνο σε περιπτώσεις ανομβρίας ή πολιορκίας (Angelakis et al., 2012, p. 239), ενώ χρησιμοποιόταν και για να καθαρίζουν αγωγούς αποχέτευσης και τουαλέτες (Αγγελάκης, 2008· Jefferson et al., 2000).

Ταυτόχρονα, σε όλη την ιστορία της Ελλάδας, υπάρχουν πολλά και σημαντικά μνημεία της Ρωμαϊκής και Βυζαντινής περιόδου, όπως υδραγωγεία και κινστέρνες, που σχετίζονται άμεσα με τη συλλογή και τη διανομή πόσιμου νερού, ιδιαίτερα σε περιοχές με ξηρασία. Τέτοιες ιστορικές κατασκευές υπάρχουν σε πολλές ελληνικές πόλεις, όπως η Αθήνα, η Χαλκίδα, η Καβάλα κ.ά. Συγχρόνως, η ανάγκη για εξοικονόμηση νερού είναι εμφανής στην ανώνυμη, παραδοσιακή αρχιτεκτονική κωμοπόλεων και χωριών, τόσο στην ηπειρωτική όσο και στη νησιωτική χώρα.



Εικόνα 12.21 *Στοιχεία συλλογής βρόχινου νερού στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική της Σίφνου. Πηγή: Φωτογραφικό αρχείο (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη).*

Η σημασία της συλλογής και διαχείρισης της μέγιστης δυνατής ποσότητας βρόχινου νερού είναι ιδιαίτερα αισθητή στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική των νησιών του Αιγαίου. Εκεί παρουσιάζεται πληθώρα μορφολογικών στοιχείων (αυλάκια, υδρορρόες, υπερύψωση/στηθαίο στα δώματα) (Εικόνα 12.21), που είχαν πρωταρχικό στόχο τη συλλογή του βρόχινου νερού. Η πολύ στενή σχέση της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής με το κλίμα και τους διαθέσιμους φυσικούς πόρους είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία στερνών και δεξαμενών στα κτίρια, καθώς και την ανάπτυξη παραδοσιακών τρόπων συντήρησης και καθαρισμού του νερού που συλλεγόταν (π.χ. με την προσθήκη χελιών στις δεξαμενές για τον καθαρισμό των βιολογικών ρύπων) (Μπουγιατιώτη & Οικονόμου, 2013). Η σημασία της αξιοποίησης του βρόχινου νερού υπάρχει και σε έργα της αρχιτεκτονικής του προηγούμενου αιώνα, ειδικά σε περιοχές με μικρή διαθεσιμότητα. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της πλατείας του Park Güell, η οποία διαστρώνεται με αμμοχάλικο με στόχο την απορρόφηση και το φιλτράρισμα του βρόχινου νερού. Μέσα από τις 86 δωρικές κολόνες που στηρίζουν την πλατεία (Sala Hipstila), το νερό της βροχής οδηγείται σε μια υπόγεια υδατοδεξαμενή χωρητικότητας 1200 m^3. Ο δράκος στην είσοδο αποτελεί στην ουσία την υπερχείλιση αυτής της δεξαμενής (Cuchi et al., 2005) (Εικόνα 12.22). Ενδεικτικά παραδείγματα είναι το Government Canyon Visitor Center, Helotes, Τέξας, ΗΠΑ και το Omega Center for Sustainable Living, Rhinebeck, Νέα Υόρκη, ΗΠΑ.



Εικόνα 12.22 *Συλλογή βρόχινου νερού στην Πλατεία (Plaza) του Park Güell (Antoni Gaudí, 1900-1914). Πηγές: Park Güell - Plaza de la Naturaleza (obras en 2018), by Iván Melenchón Serrano via Wikimedia Commons, CC0) και Parc Güell Dragon Restored, by William Avery via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.*

Εκτός όμως από τα μεγάλης κλίμακας έργα που αφορούν την υπαναχώρηση του νερού, υπάρχουν και συστήματα που μπορούν να εγκατασταθούν σε μικρότερη κλίμακα, κατοικίας ή συνοικίας, με στόχο τη συλλογή και επανάχρηση των όμβριων κυρίως υδάτων, για την άρδευση κήπων και πάρκων και για τον καθαρισμό. Τα ευέλικτα αυτά συστήματα είναι πολύ απλά στη λειτουργία τους και έχουν μικρές απαιτήσεις συντήρησης, τοποθετούνται εύκολα σε ακάλυπτους πολυκατοικιών στην καρδιά οικοδομικών τετραγώνων ή σε ιδιοκτησίες, με την εγκατάσταση δεξαμενών συλλογής όμβριων υδάτων. Η χρήση τους σε αποκεντρωμένη κλίμακα είναι προτιμότερη από τα μεγάλης κλίμακας σχέδια διαχείρισης. Με τον τρόπο αυτόν δημιουργείται

μια εναλλακτική πηγή νερού και δεν επιβαρύνονται οι υδάτινοι πόροι· παράλληλα, μειώνονται οι παροχές της απορροής όμβριων υδάτων και αντίστοιχα ο κίνδυνος πλημμύρας, ενώ τελικά τα νοικοκυριά ή οι συνοικίες γίνονται οι βασικοί αποδέκτες της εξοικονόμησης νερού. Σε χώρες της Ευρώπης και στην Αμερική, οι εγκαταστάσεις αυτές έχουν ήδη εφαρμοστεί με επιτυχία (Αλεξάνδρου, 2013β).

Στην κλίμακα του αστικού σχεδιασμού, ενδιαφέρον είναι το παράδειγμα της SW 12th Avenue, στο Portland, Όρεγκον. ΗΠΑ (Kevin Robert Perry, ASLA, 2006) (Εικόνα 12.23). Το Green Street Project αποτελεί πρόταση ανασχεδιασμού αστικού δρόμου, με στόχο τη διατήρηση, τη διαχείριση και τον καθαρισμό του βρόχινου νερού, την καθυστέρηση της διοχέτευσης στο δίκτυο ομβρίων και την αύξηση του πρασίνου (ASLA, 2006). Βασικό στοιχείο της επέμβασης είναι τα *bioswales*, που είναι διαμορφωμένα παρτέρια, στα οποία συλλέγονται τα απορρέοντα νερά της βροχής, παραμένουν, φιλτράρονται από ρύπους από κατάλληλα φυτά και απορροφούνται από διαφορετικά στρώματα εδάφους και αδρανών (Milwaukee Metropolitan Sewerage District – MMST, 2023).

Ένα πιο σύγχρονο παράδειγμα είναι ο ανασχεδιασμός της οδού Bryggervangen και της Πλατείας St. Kjelds στην Κοπεγχάγη (Δανία) από το αρχιτεκτονικό γραφείο SLA (2015-2019) (Εικόνα 12.24). Σε ό,τι αφορά τη διαχείριση των νερών της βροχής, προτείνονται: η κατασκευή, κάτω από τον δρόμο, αγωγών ομβρίων, η ανακατασκευή του δρόμου με κλίση προς το εσωτερικό (πλατεία) και ο ανασχεδιασμός πλατείας με πράσινο και μικρές δεξαμενές, που έχουν περιβαλλοντική, αισθητική, αλλά και αντιπλημμυρική λειτουργία (SLA, n.d.).



Εικόνα 12.23 *Ανασχεδιασμός δρόμων στο Portland, Όρεγκον, ΗΠΑ. Πηγές: © City of Portland, courtesy Bureau of Environmental Services, SE 57th and Taylor, Green street planter after a rain in Portland, Oregon, NE Wygant and Cully, by BES Portland via Flickr, CC BY-NC-SA 2.0.*



Εικόνα 12.24 *Ανασχεδιασμός της οδού Bryggervangen και της Πλατείας St. Kjelds, Κοπεγχάγη, Δανία (SLA Coch, H., Cuchi, A., Isalgue, T., Lancini, L. & Roset, J., 1998). Πηγή: © SLA, Courtesy of SLA.*

Η παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι τα όμβρια που συλλέγονται από τις στεγάσεις και τα καταστρώματα των οδών ενδέχεται να περιέχουν σκόνη, υδρογονάνθρακες και σωματίδια από ελαστικά και βαρέα μέταλλα από μεταλλικές επικαλύψεις στεγών (Wilderer, 2004).

12.3.2 Υγρά απόβλητα

Τα υγρά απόβλητα των κτιρίων χωρίζονται σε γκρίζα και μαύρα νερά (grey and black water, αντίστοιχα). Τα γκρίζα νερά προέρχονται από διαδικασίες πλυσίματος ή καθαριότητας, και άρα περιλαμβάνουν απόβλητα από τους νιπτήρες, το ντους, την μπανιέρα, τον νεροχύτη της κουζίνας και τα πλυντήρια (ρούχων και πιάτων). Στη βιβλιογραφία (Al-Jayyousi, 2003· Αργυρόπουλος, 2020, σ. 9· Παναγιώτου-Αβράμη, 2011, σ. 32, 41· Jefferson et al., 2000· Wilderer, 2004) προτείνονται και περαιτέρω διαχωρισμοί, που όμως δεν αναφέρονται, καθώς ξεφεύγουν από τα όρια του παρόντος συγγράμματος. Τα μαύρα νερά είναι ιδιαίτερα επιβαρυμένα λόγω της υψηλής τους περιεκτικότητας σε οργανικό φορτίο, αλλά και από τις μεγάλες συγκεντρώσεις παθογόνων μικροοργανισμών και αζώτου (Στο ίδιο). Από τα παραπάνω, το μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνουν τα γκρίζα νερά (περ. 60%), έναντι 10-15% των υπόλοιπων (Fane & Reardon, 2009 και Milne, 2013).



Εικόνα 12.25 *Βιολογικός καθαρισμός υγρών αποβλήτων. Πηγή: Filtration ponds, Photo by Ivan Bandura on Unsplash.*

Όπως προαναφέρθηκε, η συλλογή και επανάχρηση των όμβριων υδάτων χάνεται στα βάθη της ιστορίας, ενώ ταυτόχρονα και το νερό από το μπάνιο χρησιμοποιόταν για άρδευση των ιδιωτικών κήπων επίσης εδώ και αιώνες (Jefferson et al., 2000). Ωστόσο, η έρευνα και ανάπτυξη μηχανολογικών εγκαταστάσεων για την εσωτερική επανάχρηση των γκρίζων νερών έχει ξεκινήσει σχετικά πρόσφατα. Η πρώτη καταγεγραμμένη έρευνα έγινε από τη NASA στα μέσα της δεκαετίας του 1970 και αφορούσε την επανάχρηση των νερών από το μπάνιο και το πλυντήριο ρούχων στα καζανάκια, έπειτα από διέλευση από φίλτρο γης διατομών (*diatomaceous earth*) και ενεργού άνθρακα (Στο ίδιο). Με άλλα λόγια, τα υγρά απόβλητα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, ωστόσο, εξαιτίας της προαναφερθείσας επιβάρυνσής τους, πρέπει να προηγείται η επεξεργασία τους σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό (π.χ. βιολογικός καθαρισμός) (Εικόνα 12.25).

Η έλλειψη προτύπων ανακύκλωσης νερού έχει συμβάλει στην ανάπτυξη μιας πληθώρας τεχνολογιών και συστημάτων, που ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό, τόσο σε πολυπλοκότητα όσο και σε απόδοση (Jefferson et al., 2000). Οι περιβαλλοντικά φιλικές στρατηγικές επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων απαιτούν συνήθως πρωτογενή επεξεργασία (π.χ. σηπτική δεξαμενή ή/και λιποσυλλέκτη) και στη συνέχεια εκμεταλλεύονται την ικανότητα συγκεκριμένων υλικών (π.χ. άμμος, χαλίκια, κόμποστ) και φυτών να δεσμεύουν κάποια από τα επιβαρυντικά στοιχεία. Ως προς τα γκρίζα νερά, περαιτέρω πληροφορίες για τα διαθέσιμα συστήματα που κυμαίνονται από απλά συστήματα με εφαρμογή στη μικρή κλίμακα των μεμονωμένων κατοικιών, σε πιο σύνθετα για την ενδιάμεση της γειτονιάς έως πολύ προηγμένα με εφαρμογή στην κλίμακα της πόλης (Jefferson et al., 2000), καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους μπορούν να αναζητηθούν στη σχετική βιβλιογραφία (Lindstrom, 2000· SSWM, n.d.). Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα συστήματα επεξεργασίας γκρίζων ή/και μαύρων νερών πρέπει καταρχήν να είναι σύννομα με την ισχύουσα νομοθεσία κάθε χώρας. Έτσι, για παράδειγμα, το πεδίο έκπλυσης ή αποστράγγισης και ο λάκκος εμποτισμού ή έκπλυσης για την Ελλάδα αντιστοιχούν με το σύστημα του απορροφητικού βόθρου που απαγορεύεται ή επιτρέπεται υπό προϋποθέσεις (βλ. Άρθρο 26, παρ. 3, Εγκαταστάσεις αποχέτευσης λυμάτων ή αποβλήτων στην Έγκριση Κτιριοδομικού Κανονισμού, ΦΕΚ 3985 τ.Β’/22.06.2023), ενώ παλαιότερα ΓΟΚ΄73, Ν. 8/1973) γιατί ρυπαίνει το έδαφος.

Στη Μαδρίτη της Ισπανίας σχεδιάζεται στρατηγική μεγάλης κλίμακας (Córdova, 2011 και Navarro, 2018) για τη χρήση ανακυκλωμένων υδάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την άρδευση πάρκων και για τον καθαρισμό των δρόμων. Μεγάλος όγκος νερού θα ανακυκλώνεται στο πρόγραμμα του νοτιοανατολικού δικτύου ανακύκλωσης με στόχο να αντικαταστήσει το μεταφερόμενο νερό που χρησιμοποιείται αυτή τη στιγμή για την άρδευση των πάρκων και τον καθαρισμό των δρόμων και πεζοδρομίων. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα αποτελεί μέρος του σχεδίου για επανάχρηση ύδατος στην πόλη της Μαδρίτης, και περιέχει μια σειρά από δράσεις που θα εφαρμοσθούν σε βάση ζωνών σε όλη την πόλη και θα ωφελήσει περίπου 3 εκατομμύρια κατοίκους (Αλεξάνδρου, 2013β).

Τέλος, ως προς τα μαύρα νερά, πέρα από τον βιολογικό καθαρισμό, μια περιβαλλοντικά φιλική εναλλακτική για τη διαχείρισή τους είναι οι τουαλέτες κόμποστ (*composting toilets*). Πρόκειται για έναν τύπο «στεγνής» τουαλέτας, που χρησιμοποιεί κυρίως αερόβιες διαδικασίες για την επεξεργασία των λυμάτων. Οι τουαλέτες αυτές συνήθως χρησιμοποιούν λίγο ή καθόλου νερό και συνήθως συναντώνται σε εθνικά πάρκα (Σουηδία, Καναδάς, ΗΠΑ, Ηνωμένο Βασίλειο, Αυστραλία) ή σε εγκαταστάσεις μακριά από οικισμούς, καθώς και σε αγροτικά σπίτια διακοπών στη Σκανδιναβία. Τα λύματα συνήθως αναμειγνύονται με πριονίδια, ίνες κοκοφοίνικα ή βρύα, με στόχο τη διευκόλυνση της αερόβιας επεξεργασίας, την απορρόφηση υγρών και την απομάκρυνση των οσμών. Τα παράγωγα είναι κόμποστ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα, εφόσον επιτρέπεται από τη νομοθεσία. Υπάρχει πάντα η ανάγκη για ένα στάδιο ωρίμανσης με στόχο τη μείωση των πιθανών φυτοτοξινών («Composting toilet», n.d.).

12.4 Κομποστοποίηση

Η κομποστοποίηση είναι μια φυσική διαδικασία κατά την οποία τα οργανικά υλικά μετατρέπονται σε μια πλούσια σκούρα ουσία, το κόμποστ ή εδαφοβελτιωτικό («Κομποστοποίηση», 2022). Σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία (*Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων*) κομποστοποίηση είναι η ελεγχόμενη βιοξείδωση ετερογενών οργανικών υλικών, από ετερογενείς και κυρίως ετερότροφους μικροοργανισμούς, που είναι βακτήρια, μύκητες και άλλα μικρόβια που υποβοηθούνται κι από πολλούς άλλους μεγαλύτερους οργανισμούς («Κομποστοποίηση», 2022). Το προϊόν της κομποστοποίησης είναι το κομπόστ, το οποίο είναι πλούσιο σε οργανική ουσία με υψηλό χουμικό περιεχόμενο και χρησιμοποιείται κυρίως ως εδαφοβελτιωτικό υλικό, αλλά και ως υπόστρωμα (*Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων*).

Τα απόβλητα/απορρίμματα που μπορούν να κομποστοποιηθούν είναι κυρίως αυτά που προέρχονται από τα οικιακά απορρίμματα και φτάνουν έως το 35% του συνόλου τους («Κομποστοποίηση», 2022). Πέρα, όμως, από τα οργανικά απορρίμματα κουζίνας, μπορούν να κομποστοποιηθούν και οργανικά απορρίμματα κήπων και πάρκων, κοπριές, γεωργικά κατάλοιπα και λάσπη βιομηχανικών αποβλήτων (Νυδριώτη, 2010). Ταυτόχρονα, υπό προϋποθέσεις μπορούν να κομποστοποιηθούν και κάποια δομικά υλικά, ιδιαίτερα αυτά που είναι φυσικής προέλευσης (βλ. παραπάνω, 12.2 Οικολογικά υλικά). Οι προϋποθέσεις κομποστοποίησης των δομικών υλικών αφορούν καταρχήν τη δυνατότητά τους για βιο-αποικοδόμηση. Εξίσου σημαντική είναι και η ενδεχόμενη αυξημένη περιεκτικότητά τους σε τοξικές ουσίας και κυρίως βαρέα μέταλλα (βλ. παραπάνω παρ. 12.1.3), η οποία μπορεί να είναι περιοριστικός παράγοντας στην εκμετάλλευσή τους ως εδαφοβελτιωτικά. Σε μικρές ποσότητες, πολλά από τα στοιχεία αυτά μπορεί να είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη και τη φυτοπροστασία των φυτών, ωστόσο υψηλότερες συγκεντρώσεις μπορεί να είναι καταστροφικές τόσο για την ανάπτυξη των φυτών όσο και για το περιβάλλον (Νυδριώτη, 2010).

Τέλος, μια ακόμα πιο καινοτόμα πρόταση στα πλαίσια της Κυκλικής Οικονομίας αναπτύχθηκε από το γραφείο Arup (2017). Προτείνεται η αξιοποίηση οργανικών απορριμμάτων (π.χ. κελύφη από φιστίκια, φλοιός ρυζιού, φύλλα από μπανάνες, φλούδες από πατάτες) για τη δημιουργία δομικών υλικών, την ενσωμάτωσή τους στις κατασκευές και τη μετέπειτα κομποστοποίησή τους, διευρύνοντας έτσι ακόμα περισσότερο τον κύκλο ζωής τους (Arup, 2017).

Βιβλιογραφία/Αναφορές

AA. VV. (1999). *Radon in the Living Environment.* Book of Abstracts. E.C.D.G. for Science, Research and Development, Radiation Unit Research / N.T.U.A. Nuclear Engineering Section.

Al-Jayyousi, O. R. (2003). Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination, 156*(1-3), 181-192. https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00340-0

American Society of Landscape Architects (ASLA). (2006). *ASLA 2006 Professional Awards. General design award of honor.* http://www.asla.org/awards/2006/06winners/341.html

Angelakis, A. N., Dialynas, E. G. & Despotakis V. (2012). Evolution of water supply technologies through the centuries in Crete, Greece. In: A. N. Angelakis, L. W. Mays, D. Koutsoyiannis & N. Mamassis, *Evolution of Water Supply Through the Millennia* (pp. 227-258). IWA Publishing, 11. https://doi.org/10.2166/9781780401041

Angelakis, A. N., Mays, L. W., Koutsoyiannis, D. & Mamassis, N. (2012). *Evolution of Water Supply Through the Millennia.* IWA Publishing, 11. https://doi.org/10.2166/9781780401041

Anink, D., Boonstra, C. & Mak, J. (1996). *Handbook of Sustainable Building*. James & James Science Publishers Ltd.

Arthus-Bertrand, Y. (2001). *The Earth from the Air 365 Days.* Thames & Hudson.

Arthus-Bertrand, Y. (2003). *The Earth from the Air 366 Days.* Thames & Hudson.

Arup (2017). *The Urban Bio*-Loop. https://www.arup.com/-/media/arup/files/publications/u/the-urban-bioloop.pdf

ASHRAE (1993). *ASHRAE Fundamentals Handbook*. ASHRAE.

Baird, G., Alcorn, A. & Haslam, P. (1997). The energy embodied in building materials- updated. New Zealand coefficients and their significance. *IPENZ Transactions*, *24*(1/CE), 46-54.

Bamar Biological Treatment. (n.d.). Εγκαταστάσεις φυτοβιολογικής διαδικασίας. https://www.bamar.gr/

Berge, B. (2003). *The Ecology of Building Materials*. The Architectural Press.

Boonstra, C. (1996). Choice of Building Materials. The Environmental Preference Method. In: O. Lewis & J. Goulding (Eds). *European Directory of Sustainable Energy Efficient Building 1996. Components. Services. Materials* (pp. 46-49). James & James Science Publishers Ltd.

Boonstra, C. (1996). Sustainable Choice of Building Materials. The Environmental Preference Method. In: O. Lewis & J. Goulding (Eds). *European Directory of Sustainable Energy Efficient Building 1996. Components. Services. Materials* (pp. 24-27). James & James Science Publishers Ltd.

Bountouva, I. & Alexandrou, E. (2017). Thermal and Environmental evaluation of buildings built with straw. In: F. Vavili-Tsinika, K. Axarli, K. Ioannidis (Eds), *Emerging Complexities, Transparency and Architecture, 4th Interntational Conference in Transparency and Architecture*. Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki.

Brusseau. (n.d.). *Ilots d' eau*. https://brusseau.be/approches/ilots-deau/

Caponetto, R., Cascone Santi, M. & Marletta, L. (1998). Environmental issues of building material. Pollutant emissions from old and new materials. In: E. Maldonado & S. Yannas (Eds) *Environmentally Friendly Cities. Proceedings of PLEA 98* (pp. 529-532). James & James Science Publishers Ltd.

Circular Ecology. (2024, September 2). *Embodied Carbon – The ICE Database. Circular Ecology*. https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html

Coch, H., Cuchi, A., Isalgue, T., Lancini, L. & Roset, J. (1998). An application of a method for analyzing the environmental impact of construction elements. In: E. Maldonado & S. Yannas (Eds) *Environmentally Friendly Cities. Proceedings of PLEA 98* (pp. 513-516). James & James Science Publishers Ltd.

Composting toilet (2022, 21 Μαρτίου). In: *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Composting_toilet

Constantopoulos, S. H. Goudevenos, J. A., Saratzis, N., Langer, A. M., Selikoff, I. J. & Moutsopoulos, H. M. (1985). Metsovo lung: pleural calcification and restrictive lung function in northwestern Greece. Environmental exposure to mineral fiber as etiology. *Environ Res. 38*(2), 319-31. doi: 10.1016/0013-9351(85)90096-9.

Córdova, J. Y. (2011). Water reuse to rise significantly in Spain. *World Water: Water Reuse & Desalination*. https://www.asersagua.es/Asersa/Documentos/World_Water_Reuse_and_Desalination_Spring_2011_Jesus%20Yague.PDF

Cuchi, A. (2003). Traditional technologies for a sustainable approach to urban renewal. In: D. Babalis (Ed.). *Bioclimatic Design and Urban Regeneration for Sustainable Development* (pp. 39-46). Edizioni Polistampa.

Cuchi, A., Da Silva, C. & Lopez Caballero, I. (2005). Sustainable Public Spaces from the Past. The Hydraulic System of Park Güell. In: D. Babalis (Ed.). *IP Ecopolis: Sustainable Planning and Design Principles.* Alinea Editrice.

Ehrlich, P. R. & Ehrlich A. H. (1972). *Population. Resources. Environment. Issues in Human Ecology.* W. H. Freeman & Co.

Evangelinos, E. (2004). Sustainable building. Evaluating building techniques according to their environmental impacts. In: D. Babalis (Ed.). *Ecological Design for an Effective Urban Regeneration* (pp. 71-77). Edizioni Polistampa.

Fairs, M. (2021). Salt panels made using "only sun and wind" used to clad interior of Frank Gehry's Arles tower. *Dezeen*. https://www.dezeen.com/2021/07/09/carbon-salt-panels-interior-frank-gehrys-arles-tower-luma/?li_source=LI&li_medium=bottom_block_1/

Fane, S. & Reardon C. (2009) & Milne, G. (2013). *Waste-water reuse*. Your Home: Australia's guide to environmentally sustainable homes.. https://www.yourhome.gov.au/water/wastewater-reuse

Fox, A. & Murrell, R. (1989). *Green Design. A Guide to Environmental Impact of Building Materials.* Architecture Design and Technology Press.

Gulisano, G., Marletta, L. & Sapienza Vincenzo (1998). Energy cost of building materials and life-cycle assessment. In: E. Maldonado & S. Yannas (Eds) *Environmentally Friendly Cities. Proceedings of PLEA 98* (pp. 521-524). James & James Science Publishers Ltd.

Hagan, S. (1998). The New and the ethics of materials. In: E. Maldonado & S. Yannas (Eds) *Environmentally Friendly Cities. Proceedings of PLEA 98* (pp. 509-512). James & James Science Publishers Ltd.

Hao, L. (2005). The role of construction materials in life-cycle embodied energy of buildings: a case study of China. In: D. K. Raydan & H. H. Melki (2005). *PLEA 2005. 22nd International Conference. Environmental Sustainability. The Challenge of Awareness in Developing Societies* (pp. 69-74). Notre-Dame University Publishing.

Jefferson, B., Laine, A., Parsons, S., Stephenson, T. & Judd, S. (2000). *Technologies for domestic wastewater recycling. Urban Water, 1*(4), 285-292. https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00030-3

Katsaros, M., Sideris, K., Anastasiadis, I. & Skarlatos, E. (2007). Sustainable architectural design presupposes the capability of sustainable building construction. *EurekaBuild - Workshop & Brokerage Event: "Towards a Sustainable Built Environment & a Living Cultural Heritage*. TEE-EUREKABUILD-HCTP-ECTP, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών.

Lindstrom, C. (2000). *Greywater. Treatment technologies*. http://www.greywater.com/treatment.htm

McHale, J. (1971). *The Ecological Context.* Studio Vista Ltd.

Meadows, D., Randers, J. & Meadows, D. (1972). *Limits to Growth. A Potomac Associates Book.* https://www.library.dartmouth.edu/digital/digital-collections/limits-growth

Milwaukee Metropolitan Sewerage District –MMST (2023). *Bioswales.* https://www.mmsd.com/what-we-do/green-infrastructure/bioswales

Nature after minerals (n.d.). Case studies. https://afterminerals.com/

Navarro, T. (2018). Water reuse and desalination in Spain – challenges and opportunities. *Journal of Water Reuse and Desalination*, *8* (2), 153–168. doi: https://doi.org/10.2166/wrd.2018.043

O' Brien, C. B. & Sobearto, V. I. (2000). The environmental impacts of making a home. In: K. Steemers Koen & S. Yannas (Eds). *Architecture - City - Environment. Proceedings of the 17th PLEA Conference. Cambridge, 2000* (pp. 176-181). James & James Science Publishers Ltd.

Rapoport, A. (1969). *House Form and Culture*. Prentice-Hall Inc.

Roaf, S., Fuentes, M. & Thomas-Rees, S. (2013). *Ecohouse*. Routledge.

Singh, S. (2018, February 9). *Traditional methods of Rain-Water harvesting in Rajasthan*. RajRAS | RAS Exam Preparation. https://www.rajras.in/traditional-methods-rain-water-harvesting-rajasthan/

SLA (n.d.). *Sankt Kjeld's Square and Bryggervangen*. https://www.sla.dk/cases/sankt-kjelds-square-and-bryggervangen/

Smith, M., Whiteleg, J. & Williams, N. (1998). *Greening the Built Environment.* Earthscan Publications Ltd.

Stein, R. R. & Serber, D. (1979). Energy required for building construction. In: D. Watson (Ed.). *Energy Conservation through Building Design* (pp. 182-203). McGraw-Hill Book Company.

Sustainable Sanitation and Water Management (SSWM) Toolbox. (n.d.). *Wastewater Treatment.* https://sswm.info/water-nutrient-cycle/wastewater-treatment

SW 12th Avenue Green Street Project. https://www.portlandoregon.gov/bes/article/167503

Szokolay, S. V. (1980). *Environmental Science Handbook for Architects and Builders*. The Construction Press.

UNESCO World Heritage Centre. (n.d.). *The Trulli of Alberobello*. https://whc.unesco.org/en/list/787/

United Nations Environment Programme (2021). *Progress on freshwater ecosystems: tracking SDG 6 series – global indicator 6.6.1 updates and acceleration needs.* https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/36691/PFE6.6.1.pdf

United Nations. UN Water (2021). *Water facts. Scarcity*. https://www.unwater.org/water-facts/scarcity/

Vale, B. & Vale, R. (1991). *Green Architecture. Design for an Energy Conscious Future.* Thames and Hudson Ltd.

Vale, R. (1995). Selecting materials for construction. In: O. Lewis & J. Goulding (Eds). *European Directory of Sustainable Energy Efficient Building 1996. Components. Services. Materials* (pp. 50-53). James & James Science Publishers Ltd.

Wilderer, P. A. (2004). Applying sustainable water management concepts in rural and urban areas: some thoughts about reasons, means and needs. *Water Science Technology, 49*(7), 8-16. https://doi.org/10.2166/wst.2004.0403

Woolley, T., Kimmins, S., Harrisson, P. & Harrison, R. (1997). *Green Building Handbook. Volume 1. A guide to products and their impact on the environment.* E & FN Spon.

Woolley, T. (2022). *Natural building Techniques. A guide to ecological methods and materials.* The Crowood Press.

Αγγελάκης, Α. (2008). Οι Μινωίτες και οι υδατικοί πόροι. *Το Βήμα*. https://www.tovima.gr/2008/11/24/culture/oi-minwites-kai-oi-ydatikoi-poroi/

Αργυρόπουλος, Μ. (2000). *Σχεδιασμός project για την πρωτοβάθμια εκπαίδευση, με θέμα την επαναχρησιμοποίηση του γκρίζου νερού. Σχεδιασμός δραστηριοτήτων για την εισαγωγή εννοιών που σχετίζονται με τη βύθιση- πλεύση* [Ερευνητική Εργασία. ΠΜΣ «Διεπιστημονική Προσέγγιση της Επιστήμης, της Τεχνολογίας, της Μηχανικής και των Μαθηματικών – STEM στην Εκπαίδευση». Πανεπιστήμιο Πατρών, Παιδαγωγικό Τμήμα Εκπαίδευσης]. Νημερτής-Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστημίου Πατρών. https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/13666/1/ΓΚΡΙΖΟΝΕΡΟ.pdf

Βιτρούβιου (1997). *Περί Αρχιτεκτονικής. Βιβλία Ι-V.* Εκδόσεις Πλέθρον.

Γεωργιάδου, Έ. (1996). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός. Καθαρές Τεχνολογίες Δόμησης*. Παρατηρητής.

Ευαγγελινός, Ε. (1997). *Περιβαλλοντικά ήπιες οικοδομικές συνθέσεις και τεχνικές*. Σημειωσεις. ΕΜΠ, Σχολή Αρχιτεκτόνων.

Ευαγγελινός, Ε. (2001). Περιβαλλοντικά φιλικά υλικά και κατασκευές. Στο: Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Ανοικτών Χώρων. Τόμος Α. Περιβαλλοντική Τεχνολογία* (σσ. 235-286). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Ευσταθίου, Α. & Χρήστου, Μ.-Μ. (2019). *Σχεδιάζοντας με άξονα την κυκλική οικονομία. Η κυκλική οικονομία στη σύγχρονη κατασκευή* [Διάλεξη 9ου Εξαμήνου, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ]. DSpace@NTUA. https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/48505

ΚΥΑ 114218 (ΦΕΚ 1016/Β/17-11-97). *Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων*.

Κακιώνης, Π. (2012). *Αποτίμηση χαρακτηριστικών γκρίζου νερού και συστημάτων διαχείρισής του προς επαναχρησιμοποίηση* [Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ]. DSpace@NTUA. https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/7576

Καλβίνο, Ι. (2004). *Οι αόρατες πόλεις*. Εκδόσεις Καστανιώτη.

Κομποστοποίηση (2022, 21 Μαρτίου). In: *Wikipedia*. http://el.wikipedia.org/wiki/Κομποστοποίηση

Κορωναίος, Α. Γ. & Πουλάκος, Γ. Ι. (2005). *Τεχνικά Υλικά. τ.2.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κουιμτζής Θ., Φυτιάνος, Κ. & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, Κ. (1998). *Χημεία Περιβάλλοντος*. University Studio Press.

Ίδρυμα Τριανταφυλλίδη (1998). *Λεξικό της Κοινής Νεοελληνικής*.

Μουτάφης, Ε. (2018). *Διαχείριση οργανικών αποβλήτων με κομποστοποίηση και επιλογή κατάλληλων δομικών υλικών* [Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΠΜΣ «Γεωπληροφορική», Κατεύθυνση «Υδατικοί Πόροι», Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ]. ΙΚΕΕ/ΑΠΘ. https://ikee.lib.auth.gr/record/297593/files/GRI-2018-21426.pdf

Μπασιαδάκη, Ε. & Παπαγεωργίου, Σ. (2020). *Σχεδιασμός με άξονα τα απόβλητα* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. DSpace@NTUA. https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/53444

Μπίκας, Δ. Κ. (2001). Περιβαλλοντικές Παράμετροι στον Κύκλο Ζωής των Κτιρίων. *Κτίριο, Επιστημονική Έκδοση*. Α/2001, 13-21.

Μπουγιατιώτη, Φ.-Μ. & Οικονόμου, Α. (2013). Τεχνικές εξοικονόμησης νερού στο παραδοσιακό περιβάλλον της Σίφνου. Στο: *Πρακτικά Δ' Διεθνούς Σιφναϊκού Συμποσίου* (σσ. 173-186). Σύνδεσμος Σιφναϊκών Μελετών.

Νυδριώτη, Ε. (2010). *Διερεύνηση της δυνατότητας αποκατάστασης ΧΥΤΑ με χρήση αυτοπαραγόμενου κομπόστ αστικών απορριμμάτων και μελέτη της επίδρασής του σε ποώδη φυτά και χλοοτάπητες* [Μεταπτυχιακή Μελέτη. Εργαστήριο Ανθοκομίας & Αρχιτεκτονικής Τοπίου. Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών]. DSpace@AUA. http://hdl.handle.net/10329/204

Ξυπολυτάκου, Ε. (2019). *Διαχρονική εξέλιξη και προτάσεις ανάπλασης της περιοχής των αρχαίων λατομείων Πεντέλης Αττικής με χρήση νέων τεχνολογιών* [Μεταπτυχιακή Διατριβή. ΠΜΣ Φυσικοί πόροι, Γεωπεριβάλλον & Γεωργική Μηχανική, 3η Κατεύθυνση Σπουδών: Γεωπληροφορική & Χωρική Ανάλυση. Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών]. DSpace@AUA. http://hdl.handle.net/10329/7135

Παναγιώτου-Αβράμη, Α. (2011). *Εξοικονόμηση νερού σε ξενοδοχειακές* μονάδες [Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. ΠΜΣ «Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή ΑΠΘ]. ΙΚΕΕ/ΑΠΘ. https://ikee.lib.auth.gr/record/128235/files/GRI-2011-7764.pdf

Παπαθεοδώρου, Θ. Κ. (1939). *Οικοδομική.* Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Σανταμούρης, Μ. κ.ά. (2000). *Οικολογική Δόμηση*. Ελληνικά Γράμματα, Διεπιστημονικό Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Ερευνών, ΥΠΕΧΩΔΕ Δ/νση Οικιστικής Πολιτικής και Κατοικίας.

Σγαρδέλης, Σ., Παντής, Ι., Βώκου, Δ., Στάμος, Γ., Πυροβέτση, Μ. & Παρασκευόπουλος, Σ. (1998-1999). *Εισαγωγή στην Οικολογία. Σημειώσεις για τους φοιτητές του Τμήματος Χημείας*. ΑΠΘ, Τμήμα Εκδόσεων, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο.

Σγαρδέλης, Σ. Π. (2004). *Οικολογία. Για τους φοιτητές του Τμήματος Χημείας*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Τμήμα Βιολογίας. Τομέας Οικολογίας. Διαθέσιμο στο: https://users.auth.gr/sgardeli/Oikologia%20FinalPrint04.pdf

ΥΑ ΥΠΕΝ/ΔΑΟΚΑ/66006/2360/2023 (ΦΕΚ 3985/Β/22-6-2023). *Έγκριση Κτιριοδομικού Κανονισμός*. Ελληνική Δημοκρατία. https://www.elinyae.gr/sites/default/files/2023-06/3985%CE%B2_2023.pdf

Κεφάλαιο 13

ΝΖΕΒ – Πράσινα κτίρια

Σύνοψη
Το παρόν κεφάλαιο επιχειρεί να συνοψίσει και να συγκεντρώσει τα στοιχεία που έχουν παρουσιαστεί στα προηγούμενα, ενσωματώνοντάς τα σε ένα συνολικό πλαίσιο και λογική σχεδιασμού κτιρίων μηδενικού ενεργειακού ισοζυγίου (NZEB, Near Zero Energy Buildings). Η κλιματική αλλαγή που εξελίχθηκε σε κρίση έχει ισχυρή επίδραση και προεκτάσεις στην αρχιτεκτονική πράξη και ειδικότερα στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται τα κτίρια σε όλη τη διάρκεια του κύκλου της ζωής τους. Αρχικά, παρουσιάζεται συνοπτικά το ισχύον θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο στην Ευρώπη και στη χώρα μας με βάση το οποίο καθορίζονται βασικές αρχές σχεδιασμού και απαιτήσεις για την κατασκευή όλων των νέων κτιρίων, αλλά και για την ανακαίνιση-αναβάθμιση των όσων υφίστανται. Τα κτίρια μηδενικού ενεργειακού ισοζυγίου δεν αντιμετωπίζουν μόνο τα ζητήματα εξοικονόμησης ενέργειας αλλά θέτουν στόχους προς ένα νέο πνεύμα στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό των κτιρίων, όπου η ενεργειακή και η περιβαλλοντική απόδοση συναποτελούν, με τη λειτουργικότητα, τη χρηστικότητα, την αντοχή και την υψηλή αισθητική βασικές παραμέτρους του σχεδιασμού.

Προαπαιτούμενη γνώση
Κεφάλαιο 1 του παρόντος, καθώς και σχετική Εθνική και Ευρωπαϊκή Νομοθεσία.

13.1 Παραδοχές

13.1.1 Διαχρονικές παραδοχές

Όλα τα συστήματα του αντιληπτού φυσικού κόσμου για την επιβίωσή τους έχουν ως προϋπόθεση την πρόσληψη και κατανάλωση κάποιας μορφής ενέργειας, ανεξαρτήτως του πόσο μικρή ή μεγάλη είναι αυτή η ανάγκη. Τα κτίρια αποτελούν, κατά μία έννοια, τεχνητούς οργανισμούς, οι οποίοι συντίθενται από πολλά διακριτά μεταξύ τους συστήματα και υποσυστήματα· χάρη σε αυτά, τα κτίρια, γίνονται και παραμένουν λειτουργικά, βιώσιμα και ανθεκτικά απέναντι στις φυσιολογικές φθορές ή και στις δυνάμει καταστρεπτικές μεταβολές. Τα κτίρια, ως το κύριο αντικείμενο του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, φέρουν σημασίες και συμβολισμούς που εκπροσωπούν πολιτισμικές παραδοχές και πρότυπα και ταυτόχρονα σχηματοποιούν σε χωρικά σταθερότυπα πολιτικά και κοινωνικά επιχειρήματα της κάθε εποχής και του κάθε τόπου.

Τα παραπάνω διατυπώνονται με διαχρονική σαφήνεια ως «αρετές» που η αρχιτεκτονική οφείλει να προικοδοτεί σε κάθε κτίριο και σε κάθε κατασκευή, και τις οποίες αναγνώρισε και κατέγραψε αρχικά στο *De architectura* ο Βιτρούβιος, με το επικάλυμμα τριών λατινικών όρων: «Firmitas, Utilitas, Venustas» [σε ελληνική μετάφραση: σταθερότητα, λειτουργικότητα, τέρψη]. Η καταγραφή αυτή αποτέλεσε τον θεωρητικό οδηγό για την πρακτική της κατασκευής για πολλούς αιώνες στη Δυτική αρχιτεκτονική παράδοση, ενώ υπήρξε η θεωρητική βάση και ιστορική κληρονομιά στην οποία κτίστηκε η αρχιτεκτονική σπουδή, θεωρία και πρακτική αρχικά από τον J. B. Alberti, αλλά και η αφετηριακή βάση για όλες σχεδόν τις επόμενες θεωρητικές αρχιτεκτονικές αφηγήσεις, έως και πολύ πρόσφατα.

Μέχρι και τις αρχές του 21ου αιώνα, η αρχιτεκτονική πράξη και η αποδοχή της βασίστηκαν σε μια κοινή –συλλογική– κατανόηση των καθιερωμένων παραδοχών, συνεπικουρούμενη από την καθοδηγητική επιρροή των κατ’ ομολογία ή και κατ’ επάγγελμα εμπειρογνωμόνων. Παράλληλα, ως βασικό μέσο για την προώθηση

του «κανονικού» και του «επιθυμητού» χρησιμοποιήθηκε σχεδόν αποκλειστικά το κτιριακό παράδειγμα, οπτικοποιημένο ή δομημένο, σε όλες τις διαφορετικές εκδοχές του, οι οποίες αποτύπωσαν εύγλωττα και όλη την εξελικτική του πορεία από την (Ανα)γέννηση της σύγχρονης αρχιτεκτονικής έως τις μέρες μας.

Η εποχή μας βιώνει μια σημαντική διαφοροποίηση σε σχέση με τις προηγούμενες. Η νομιμοποιητική επίδραση του μέσου που χρησιμοποιήθηκε έως τώρα αμφισβητείται ως προς την αποτελεσματικότητά του, διότι η συλλογική ευφυΐα και νόηση αντικαθίσταται ραγδαία από μια νέα αντικειμενικότητα· αυτή απαρτίζεται από τεχνολογικούς αυτοματισμούς και διαμεσολαβητές –με τη μορφή νέων κανόνων και κανονισμών, και απαιτούμενων επιδόσεων– και από μια νέα εργαλειοποίηση των μεθόδων σχεδιασμού, στοιχεία όλα τους που, σε συνάρτηση με ανατροφοδοτούμενες διαδικασίες ελέγχων, αλληλοεπιδρούν με το τελικό αποτέλεσμα. Σε αυτή τη σημερινή (νέα) κατάσταση, οι καθιερωμένες παραδοχές της αρχιτεκτονικής πράξης βρίσκονται υπό επαναδιαπραγμάτευση.

Ταυτοχρόνως, τις τελευταίες δεκαετίες, το περιβάλλον στο οποίο εκδηλώνεται η κτιριακή δραστηριότητα (η αρχιτεκτονική πράξη) μεταβάλλεται, με πρωτόγνωρη ένταση και σε απρόσμενη κλίμακα, με αποτέλεσμα οι βασικές φυσικές σταθερές να αποδεικνύονται ανεπαρκείς. Η βιωσιμότητα των κτιριακών οργανισμών απαιτεί τη διάθεση όλο και περισσότερων πόρων για να παραμείνει ανθεκτική και λειτουργική στις ολοένα και πιο συχνές και εντατικές αλλαγές.

Η αναφορά στις τρεις «βιτρουβιανές αρετές» για την καθοδήγηση της αρχιτεκτονικής πράξης, όπως εμπλουτίστηκαν ή επανερμηνεύτηκαν έως τις μέρες μας, φαίνεται ελλειμματική, εφόσον αδυνατεί να καταγράψει την αναγκαιότητα της αποτελεσματικής διαχείρισης των πόρων που εκλείπουν. Ο κτιριακός οργανισμός μπορεί να παραμείνει σταθερός, λειτουργικός και απολαυστικός, αλλά η ζωή του θα εκλείψει, καθώς θα σβήνει η «ενεργειακή του αύρα». Σε αυτό το στάδιο της εξελικτικής πορείας της αρχιτεκτονικής, η «ενεργειακή αύρα» του κτιριακού οργανισμού και η περιβαλλοντική του επίδραση οφείλουν να προστεθούν ως μια νέα τέταρτη «αρετή», ώστε τα κτίρια και οι χρήστες τους να ελπίζουν σε ένα ανθεκτικό και βιώσιμο μέλλον.

13.1.2 Νέα εποχή – Κίνδυνοι

Διανύουμε μια «Νέα Εποχή»· μια εποχή αλλαγών, έντονων μεταβολών που διακόπτουν τη συνέχεια του μοντέρνου και μεταμοντέρνου κόσμου που γνωρίσαμε· μια εποχή που χαρακτηρίζεται από τη ρευστότητα. Η αισιοδοξία του «νέου» συγκρούεται με την ανησυχία και τον φόβο του άγνωστου δρόμου, που είναι εμπρός μας. Σε κάθε μεταβατικό στάδιο, το σίγουρο είναι ότι δεν υπάρχουν βεβαιότητες και μοναδικές αλήθειες και η νέα αντικειμενικότητα που κυοφορείται είναι αυτή που θα προκύψει μέσα από μια διαδικασία ανασύνθεσης των συστημάτων και αναδιαμόρφωσης των σημασιών και των νοημάτων.

Οι κίνδυνοι στις αλλαγές είναι συνήθως πολλαπλοί και πολυδιάστατοι. Για την αρχιτεκτονική και για τον σχεδιασμό των κτιρίων, η μεγαλύτερη ανησυχία προέρχεται από την αδυναμία της αρχιτεκτονικής πράξης αφενός να συλλάβει το εύρος και την οξύτητα των αλλαγών, ιδιαίτερα εκείνων που συντελούνται στο πεδίο όπου αναπτύσσεται η αρχιτεκτονική δράση –δηλαδή το περιβάλλον–, αφετέρου να «εξημερώσει» την τεχνολογία, η οποία πορεύεται αυτόνομα και προηγείται των εξελίξεων της αρχιτεκτονικής.

Η αρχιτεκτονική πάντα αποτελούσε ένα πεδίο που χαρακτηριζόταν από έναν μέγιστο βαθμό αδράνειας απέναντι στις όποιες μεταβολές, λειτουργώντας αμυντικά και ως το αποθετήριο της συλλογικής μνήμης και σκέψης. Από αυτή την άποψη, η αρχιτεκτονική πάντα προσαρμοζόταν στην εκάστοτε διαμορφούμενη κατάσταση, άλλοτε συμμετέχοντας ενεργά και άλλοτε προσαρμοζόμενη στα τετελεσμένα.

13.1.3 Νέα εποχή – Πεδία αλλαγών, ευκαιρίες

Η κατανόηση της (νέας) εποχής, οι τάσεις μεταβολής, τα πεδία στα οποία εξελίσσεται και διαμορφώνεται η νέα κατάσταση και οι πόροι που απαιτούνται ή θα απαιτηθούν για την επιτυχία της προσαρμογής είναι οι αναγκαίες και ικανές συνθήκες για να συμμετάσχει (ισότιμα – μένει να αποδειχθεί) η αρχιτεκτονική σκέψη και πρακτική στη διαμόρφωση της νέας εποχής.

Οι αλλαγές που εκδηλώνονται ή/και που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί μπορούν ομαδοποιηθούν σε τρία διακριτά πεδία:

- στο κανονιστικό και νομοθετικό πεδίο,
- στο επιστημονικό και τεχνολογικό πεδίο,
- στο επιχειρηματικό και το επιτελεστικό πεδίο.

13.1.4 Βασικά χαρακτηριστικά της νέας εποχής

Πιο συγκεκριμένα, στο **κανονιστικό και νομοθετικό πεδίο**, ήδη από τις αρχές του 21ου αιώνα, ίσως και πιο πριν, τέθηκε σε ισχύ μια σειρά από εξειδικευμένους νόμους, με κανονιστικές διατάξεις και οδηγίες, με σκοπό την αντιμετώπιση των κινδύνων που προκαλεί η ανεξέλεγκτη αναπτυξιακή διαδικασία, σε παγκόσμια κλίμακα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση πρωτοστατεί σε αυτή την προσπάθεια εκδίδοντας μια σημαντική παλέτα από Ευρωπαϊκές Οδηγίες, μέσω των οποίων προτείνεται μια σειρά από στρατηγικές ανασχεδιασμού κρίσιμων οικονομικών-παραγωγικών τομέων και πρακτικών μέτρων και εργαλείων που εξειδικεύουν τις στρατηγικές και προσφέρουν τη δυνατότητα στους υπεύθυνους φορείς για την εφαρμογή τους στην πραγματική οικονομία και στην κοινωνία.

Η επιτυχία του ευρωπαϊκού εγχειρήματος έγκειται στην ταυτόχρονη και συντονισμένη δράση όλων των κρατών μελών, ώστε η εφαρμογή των μέτρων –δυσάρεστων σε αρκετές περιπτώσεις και από πολλές απόψεις– να έχει πραγματικό και μετρήσιμο αποτέλεσμα. Η συνεπής παρακολούθηση της (καλής ή κακής) εφαρμογής των μέτρων που προτείνονται είναι μέρος της πολιτικής που εφαρμόζεται και έχει στόχο να διασφαλίσει την επιδιωκόμενη ποιότητα και πιστότητα του αποτελέσματος, καθώς επίσης να εντοπίσει έγκαιρα τις τυχόν αστοχίες και ελλείψεις που χρειάζεται να επιλυθούν σε επόμενα βήματα και να προτείνει βελτιώσεις για την καλύτερη αποτελεσματικότητα των μέτρων και των πολιτικών που εφαρμόζονται εν γένει.

Στο **επιστημονικό και τεχνολογικό πεδίο**, οι αλλαγές είναι ραγδαίες, διαρκείς και με αυξητική δυναμική σε τέτοιον βαθμό ώστε να τίθεται σε αμφιβολία το κατά πόσο οι κανονιστικές διευθετήσεις και οι πρόνοιες που θεσμοθετούνται είναι ικανές να οργανώσουν ή και να ελέγξουν με κάποιον συντεταγμένο τρόπο τις μεταβολές και μεταμορφώσεις της τεχνολογίας. Ωστόσο, αυτό που πρέπει να διακριθεί από το νέφος της τεχνολογικής πανδαισίας της νέας εποχής είναι ορισμένες από τις εκφάνσεις της, οι οποίες, απ' ό,τι φαίνεται, έχουν αναλάβει σημαντικό ρόλο στην προσαρμογή της αρχιτεκτονικής στη νέα εποχή και στη συμμετοχή και συνεισφορά της στα ζητήματα της κλιματικής κρίσης, της υποβάθμισης του περιβάλλοντος και της εξάντλησης των φυσικών πόρων. Οι εκφάνσεις της τεχνολογίας δεν αφορούν μόνο τα τεχνήματα ή τα νέα καινοτόμα προϊόντα της, αλλά και τις διαφορετικές προσεγγίσεις επιστημονικής σκέψης και πρακτικής που συγκροτούνται είτε εξαρχής είτε ενσωματώνοντας θεωρήσεις που υπάρχουν και οι οποίες, υπό τις παρούσες συνθήκες, αδυνατούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της νέας εποχής.

Συγκεκριμένα, αυτό που ίσως καλύτερα από οτιδήποτε άλλο χαρακτηρίζει τη νέα κατάσταση είναι η λεγόμενη «**ολιστική προσέγγιση**», δηλαδή μια μεθοδολογία σκέψης που αντιμετωπίζει τα συστήματα ως σύνολα και όχι απλώς ως το άθροισμα των επιμέρους μερών τους. Ο χειρισμός των ζητημάτων, και ειδικότερα όσων αφορούν τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και την κατασκευή των κτιρίων (νέων ή και υφισταμένων), με την ολιστική προσέγγιση ανατρέπει την πεπατημένη σειρά και μέθοδο ανάπτυξης ενός έργου σε ό,τι αφορά όχι μόνο την εμπλοκή των συμμετεχόντων σε αυτό, αλλά και την αλληλουχία των ενεργειών που καθορίζουν

τις αποφάσεις για ένα έργο. Η μεγαλύτερη καινοτομία, ωστόσο, είναι η καθολική συμμετοχή και η διαδραστικότητα σε πραγματικό χρόνο όλων των εμπλεκομένων σε όλα τα στάδια του σχεδιασμού, της κατασκευής και της διαχείρισης ενός (κτιριακού) έργου, όπου η έμφαση δίνεται στη σύνθεση και στη συνολική κατανόηση, στοχεύοντας στην επίτευξη ισορροπίας και αρμονίας σε όλα τα επίπεδα.

Παρόλο που έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια (βλ. Κεφ. 1 και Κεφ. 12), η έννοια της «κυκλικότητας» στον τρόπο της θεώρησης που διαμορφώνεται για τα κτίρια και στον τρόπο με τον οποίο αυτά αξιοποιούνται ως προς τη χρήση τους, για τη νέα εποχή, η κυκλικότητα αποκτά ένα νέο ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί η συνεχώς αυξανόμενη χρήση των BIM (Building Information Modelling, βλ. Εικόνα 13.2), με τα οποία δίνεται η δυνατότητα πολυδιάστατης (3d, 4d, 5d κ.ο.κ.) μοντελοποίησης και προσομοίωσης της συμπεριφοράς και απόδοσης του κτιρίου, για μεγάλο –ίσως απεριόριστο– εύρος απαιτήσεων, και για οποιοδήποτε στάδιο του κύκλου ζωής του. Αυτού του είδους η μοντελοποίηση δίνει τη δυνατότητα καλύτερου προγραμματισμού των επόμενων σταδίων ανάπτυξης ενός έργου και την έγκαιρη διόρθωση ή/και βελτίωση των σφαλμάτων και των αντιφάσεων-συγκρούσεων που συνήθως προκύπτουν ανάμεσα στα διάφορα συστήματα που διαρθρώνουν ένα κτίριο, ακόμη και από το στάδιο του προγραμματισμού.

Ταυτόχρονα, ένα πλήθος από **νέες ευφυείς τεχνολογίες και εργαλεία** (π.χ. παραμετρικός σχεδιασμός, μηχανική μάθηση, συστήματα τεχνητής νοημοσύνης κ.λπ.) αξιοποιούνται πλέον κατά το στάδιο του σχεδιασμού και ενισχύουν την επίδραση και την αποτελεσματικότητα των μοντελοποιήσεων και της παραμετροποιημένης ανάλυσης των προσομοιώσεων, ώστε να βελτιστοποιηθεί στο μέγιστο δυνατόν το τελικό αποτέλεσμα.

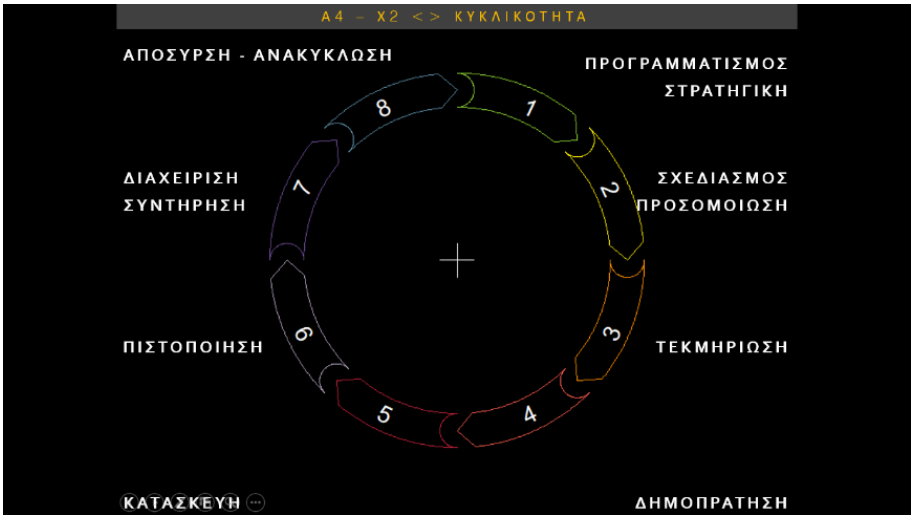
Παράλληλα, σημαντικές καινοτομίες και αναβαθμίσεις σε ηλεκτρολογικά και μηχανολογικά συστήματα (π.χ. τεχνολογίες LED, Smart συστήματα διασύνδεσης και διαχείρισης συστημάτων και κτιρίων μέσω της τεχνολογίας IoT, πλατφόρμες νέφους, έλεγχος από απόσταση, οπτική αναγνώριση αντικειμένων, κ.λπ.) έχουν επιφέρει μια πραγματική νέα κατάσταση στην τεχνολογία διαχείρισης των κτιρίων.

Στο **επιχειρηματικό και επιτελεστικό πεδίο,** οι αλλαγές επίσης δεν είναι καθόλου αμελητέες, συμβαδίζουν δε σε καινοτομία με τα προαναφερόμενα πεδία. Η τεχνολογική επέκταση σε κάθε άκρο του πλανήτη, η διαδικτύωση μέσω του διαδικτύου (internet), η υψηλών ταχυτήτων «ασυρματοποίηση» των επικοινωνιών (4G, 5G, 6G) και η διασυνδεσιμότητα των συστημάτων σχεδιασμού και παραγωγής δίνουν τη δυνατότητα συνεργειών που σε παλιότερες εποχές ήταν αδύνατη και διευρύνουν στον μέγιστο βαθμό τη γεωγραφική κλίμακα της κτιριακής παραγωγικής διαδικασίας (βλ. νέα παγκοσμιοποίηση/σε ένα σύγχρονο κτίριο τα περισσότερα δομικά μέρη, ακόμη και αν σχεδιάζονται επιτόπου, κατασκευάζονται όπου το κόστος παραγωγής είναι το βέλτιστο και μεταφέρονται μαζικά από τη μια άκρη του κόσμου στην άλλη).

13.1.5 Επιλεγμένα χαρακτηριστικά της νέας εποχής

Κυκλικότητα

Το πρώτο κύριο χαρακτηριστικό της νέας εποχής είναι η προαναφερόμενη «**ολιστική προσέγγιση**» στον σχεδιασμό και στην κατασκευή των κτιρίων. Πρωταρχικής σημασίας σε αυτή την ολιστική προσέγγιση είναι η ιδέα της **κυκλικότητας**, δηλαδή η εξέταση όλων των σταδίων του κύκλου ζωής των κτιρίων (βλ. Εικόνα 13.1 και Κεφ. 1, παρ. 1.7) από την αρχή, με στόχο την ανθεκτικότητα και τη δυνατότητα να επανχρησιμοπιηθούν ή να ανακυκλωθούν όταν φτάσουν στο τέλος της ζωής τους ώστε να μειωθεί η σπατάλη και να ενισχυθεί η βιωσιμότητά τους.



Εικόνα 13.1 *Σχηματική απεικόνιση της κυκλικής αντίληψης της κατασκευής των κτιρίων. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Μ. Κατσαρός).*

Πιο αναλυτικά, ο κυκλικός σχεδιασμός προυποθέτει έναν συγκεκριμένο βηματισμό για τον τρόπο σχεδιασμού, υλοποίησης και λειτουργίας των κτηρίων ο οποίος συνοπτικά μπορεί να αναλυθεί στα ακόλουθα στάδια (βλ. Εικόνα 13.1):

1. Τον προγραμματισμό και τη στρατηγική ανάπτυξης του έργου, το οικονομοτεχνικό σχέδιο την ανάλυση της επαγγελματική ευθύνης, την ανάλυση ρίσκου, τη χρηματοδότηση κ.λπ.

2. Την προμελέτη και την οριστικοποίηση της αρχιτεκτονικής πρότασης, καθώς και τηνπροκαταρκτική εκτίμηση του προϋπολογισμού και των προδιαγραφών του έργου.

3. Την τελική μελέτη (γενικά και ειδικά αντικείμενα):

    Α. Σχέδια εφαρμογής & συντονισμός μελετών

    Β. Προδιαγραφές

    Γ. Σχέδιο και Φάκελος Ασφάλειας και Υγείας (ΣΑΥ/ΦΑΥ)

4. Τη σύνταξη των Τευχών Δημοπράτησης Έργου:

    Α. Μετρήσεις ποσοτήτων

    Β. Σχέδιο προϋπολογισμού

    Γ. Έγγραφα προσφορών, όροι συμβολαίων κ.λπ.

    Δ. Διαγωνιστική διαδικασία

5. Την κατασκευή του έργου:

    Α. Διαχείριση σύμβασης

    Β. Διαχείριση έργου

    Γ. Επίβλεψη

    Δ. Σχέδια του πώς κατασκευάστηκε το έργο (*as-built*)

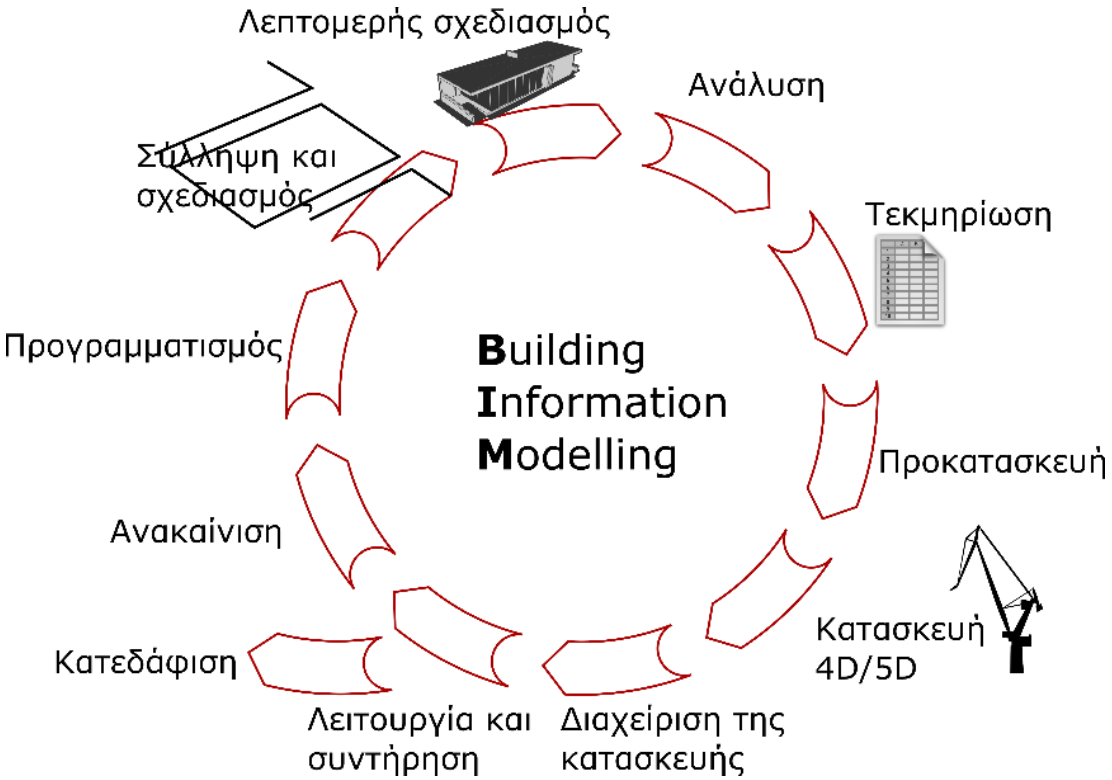
6. Τον έλεγχο, την παραλαβή και την πιστοποίηση του έργου.

7. Τη διαχείριση, λειτουργία και συντήρηση του έργου.

8. Την επανάχρηση έργου ή την ανακύκλωσή του.

Νέες τεχνολογίες – Νέα εργαλεία

Το δεύτερο χαρακτηριστικό της νέας εποχής είναι οι διαθέσιμες «**νέες τεχνολογίες και εργαλεία»** που έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται και η αξιοποίησή τους στα διαφορετικά στάδια του κύκλου ζωής των κτιρίων, κυρίως όμως στη γένεσή τους. Το κυριότερο από αυτά τα εργαλεία είναι το BIM, που αποτελεί αρχικά των αγγλικών όρων Building Information Modelling.



Εικόνα 13.2 *Σχηματική απεικόνιση της αξιοποίησης των εργαλείων BIM στον κυκλικό σχεδιασμό και την κατασκευή των κτιρίων. Πηγή: Ίδια σχεδίαση και μετάφραση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με αντικείμενα από https://publicdomainvectors.org και δεδομένα από https://www.buildingthefuture.gr/?p=2168*

Η μεθοδολογία BIM χρησιμοποιεί ένα ψηφιακό μοντέλο που ενσωματώνει πληροφορίες και παραμέτρους που σχετίζονται με τη μορφή, τη δομή και τα συστήματα του πραγματικού κτιρίου. Μετά την ολοκλήρωση της σχεδίασης, το BIM ψηφιακό μοντέλο αντιπροσωπεύει την ακριβή γεωμετρία και τα δεδομένα που απαιτούνται για τον σχεδιασμό, την οργάνωση και την αξιοποίηση του κτιρίου. Επιπλέον, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, το ψηφιακό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαχείριση και τη συντήρηση του πραγματικού κτιρίου. Το BIM θεωρείται ένα σημαντικό εργαλείο που εισχωρεί σταδιακά στον κατασκευαστικό κλάδο και επηρεάζει όλους τους τομείς των μηχανικών, τους κατασκευαστές και τους ιδιοκτήτες. Από τα πιο σημαντικά οφέλη του BIM είναι η μείωση του κόστους κατασκευής του έργου και ο χρόνος παράδοσης, η αύξηση της παραγωγικότητας και της ποιότητας, ο έλεγχος του κόστους και η διαχείριση του κύκλου ζωής του κτιρίου.

Ενσωμάτωση συστημάτων

Το τρίτο επιλεγμένο χαρακτηριστικό της νέας εποχής περιγράφεται από την «εκ των πραγμάτων» υλοποιούμενη διεργασία για την «**ενσωμάτωση συστημάτων**» στα κτίρια, αλλά και αναμεταξύ τους. Ως «ενσωμάτωση» ορίζεται η τάση διασύνδεσης και συγχρονισμένης λειτουργίας διαφορετικών (ή και ασύμβατων) έως σήμερα συστημάτων, μεθόδων και προγραμμάτων «μοντελοποίησης» και η οργανική ενσωμάτωσή τους στα δομικά μέρη ενός κτιρίου και στη λειτουργία του.



Εικόνα 13.3 *Ενσωμάτωση. Πηγή: Amanda Kitt's Bionic Arm - National Geographic, by Amber Case, via Flickr, CC BY-NC 2.0.*

Η «ενσωμάτωση συστημάτων» συνήθως συνοδεύεται ή και προκαλείται από την αξιοποίηση νέων τεχνολογιών που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια, συνήθως για να εφαρμοστούν σε άλλες επιστημονικές περιοχές, αλλά που γρήγορα αξιοποιούνται στον σχεδιασμό και την κατασκευή-λειτουργία των κτιρίων. Ορισμένες τέτοιες τεχνολογίες-συστήματα που έχουν ήδη αξιοποιηθεί για τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία των κτιρίων είναι ενδεικτικά οι ακόλουθες (Εικόνα 13.3.):

- Διαχείριση εγκαταστάσεων κτιρίων: Συστήματα διαχείρισης εγκαταστάσεων που στρέφονται γύρω από κυκλικά επιχειρηματικά μοντέλα θα οδηγήσουν την παραγωγικότητα των επιχειρήσεων και την κερδοφορία των πελατών.
- Διασυνδεσιμότητα συστημάτων κτιρίων μέσω Cloud: Τα υβριδικά μοντέλα νέφους μπορούν να επιτρέψουν ολοκληρωμένες λύσεις που είναι οικονομικά αποδοτικές, ευέλικτες και επεκτάσιμες για να υιοθετήσουν οι καταναλωτές.
- Διασύνδεση κτιρίων, π.χ. κατοικιών: Οι έξυπνες τηλεοράσεις μπορούν να χρησιμεύουν ως κεντρικός κόμβος για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των συνδεδεμένων συσκευών προωθώντας λύσεις διαχείρισης οικιακής ενέργειας.
- Αξιοποίηση τεχνολογιών LED: Με γνώμονα τη βελτίωση της δυνατότητας ελέγχου και της ενεργειακής απόδοσης, ο φωτισμός LED μπορεί να παρέχει συνδεδεμένο και αναπροσαρμοζόμενο φωτισμό.
- Σχεδιασμός – διαχείριση κτιρίων μέσω νέων επιχειρηματικών μοντέλων: «Πελατοκεντρικά» επιχειρηματικά μοντέλα και στρατηγικές ενισχύουν τα ερείσματα των ενδιαφερόμενων μερών (*stakeholders*).
- Έξυπνα κτίρια και IoT: Ο έξυπνος φωτισμός LED σε συνδυασμό με τη διασύνδεση cloud συμβάλλει στην ενεργοποίηση του Internet of Things σε έξυπνα κτίρια.
- Υπηρεσίες εξ αποστάσεως: Οι αυτοματισμοί στα κτίρια μπορούν να παρέχουν εξαιρετικά ευέλικτες και ελκυστικές προσφορές υπηρεσιών στους ενοίκους.
- Έξυπνοι θερμοστάτες: Οι έξυπνοι θερμοστάτες θα αλλάξουν το παιχνίδι για συνδεδεμένες οικιακές εταιρείες που υιοθετούν επιχειρηματικά μοντέλα που βασίζονται σε προϊόντα.

Πέρα όμως από τις παραπάνω εφαρμογές, η διαδικασία της ενσωμάτωσης των συστημάτων σε ένα *υπερσύστημα*, βλ. κτιριακό οργανισμό, αποτελεί το πλέον δυνατό χαρακτηριστικό της «νέας εποχής», το οποίο χαρακτηρίζεται αφενός από μια νεωτερική υβριδικότητα, δηλαδή τη συνδυαστική ενσωμάτωση στοιχείων από διαφορετικές πηγές, συστήματα ή μεθόδους με στόχο τη δημιουργία κάτι καινούργιου, το οποίο αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα όλων των πλευρών, αφετέρου από «διαδραστικότητα» των νέων τεχνολογιών με τους χρήστες και το περιβάλλον.

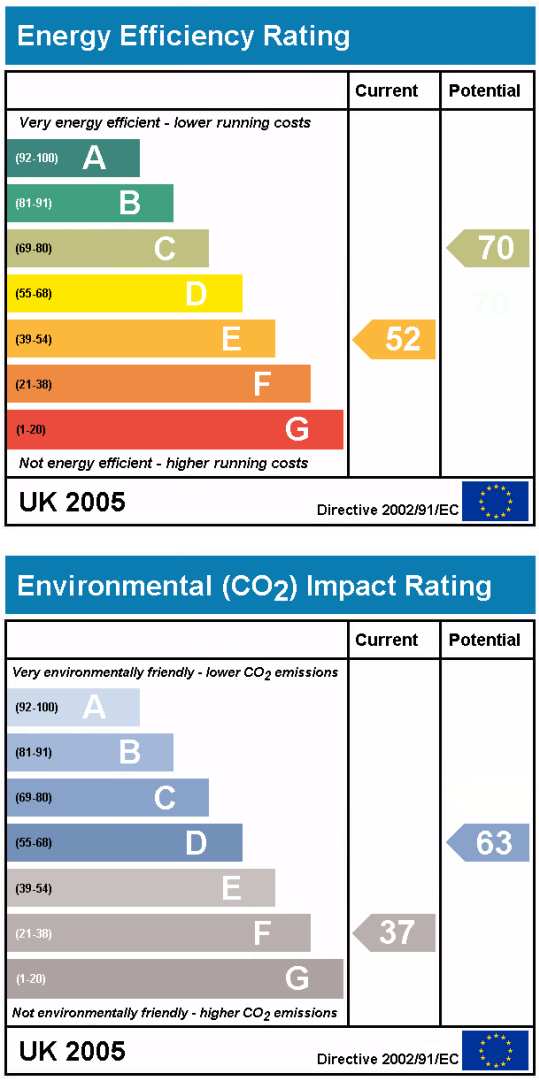
Προσομοίωση, αποτίμηση, βαθμονόμηση

Το τέταρτο επιλεγμένο χαρακτηριστικό της «νέας εποχής» αφορά την κανονιστική υποχρέωση –σε ισχύ ήδη από το 2010– για την **προσομοίωση, αποτίμηση και βαθμονόμηση-πιστοποίηση**, για παράδειγμα, της ενεργειακής απόδοσης όλων των κτιρίων· ως απόρροια αυτής, προκύπτει η «εξ-αντικειμενικοποιημένη ταξινόμησή» τους σε κατηγορίες αξιολόγησης, από το A+ (μέγιστη βαθμολόγηση) έως το H (ελάχιστη βαθμολόγηση). Η εξέλιξη αυτή, για την αρχιτεκτονική, συνιστά μια «απροσδόκητη ανατροπή» στον τρόπο χαρακτηρισμού του σχεδιασμού των κτιρίων, η οποία στην πραγματικότητα σχετίζεται άμεσα με τον ενεργειακό σχεδιασμό τους, όπως αυτός προκύπτει από την αρχιτεκτονική τους, και τη σε μικρό ή μεγάλο βαθμό υιοθέτηση των αρχών του αειφόρου σχεδιασμού και της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής. Επομένως, συσχετίζεται απευθείας με την ουσία του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού.

Η εφαρμογή αυτής της νέας πραγματικότητας στον σχεδιασμό των κτιρίων εγείρει ορισμένα σοβαρά «ταυτοτικά ζητήματα» για την αρχιτεκτονική θεωρία και πρακτική· αυτή φαίνεται να μη συμβαδίζει όπως θα θέλαμε με τους στόχους που έχουν τεθεί από τους Κανονισμούς και επιβεβαιώνει την προαναφερθείσα υστέρηση της αρχιτεκτονικής (έναντι άλλων συντελεστών της κτιριακής παραγωγής) στο να ανταποκριθεί προσαρμοζόμενη στις τεχνολογικές εξελίξεις.

Όπως αρκετά εύγλωττα «ομολογείται» στον Ευρωπαϊκό Κανονισμό 244/2012 ΕΕ, «ο στόχος ικανοποιητικών ή βέλτιστου κόστους επιπέδων ενεργειακής απόδοσης ενδέχεται, υπό ορισμένες συνθήκες, να δικαιολογεί τον καθορισμό από τα κράτη μέλη ικανοποιητικού ή βέλτιστου κόστους απαιτήσεων για τα δομικά στοιχεία, **οι οποίες είναι δυνατόν να δημιουργήσουν, στην πράξη, εμπόδια σε ορισμένες αρχιτεκτονικές ή τεχνικές επιλογές**, καθώς επίσης να ενθαρρύνουν τη χρήση συνδεόμενων με την ενέργεια προϊόντων με καλύτερη ενεργειακή απόδοση». Η επίτευξη των στόχων που θέτει η ΕΕ υπερτερεί έναντι των αρχών του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, οι οποίες είναι διασπασμένες ακολουθώντας συνήθως εξατομικευμένες στρατηγικές. Άλλωστε, η απομάκρυνση της αρχιτεκτονικής σκέψης από τον «μπανάλ κόσμο» της κοινωνικής πρακτικής με την ταυτόχρονη «αυτο-απομόνωσή της στο βασίλειο της τέχνης» έχει καταγραφεί ήδη από το 1960 (Ghirardo, 1991). Επιπλέον, είναι καταγεγραμμένη (Bahnam, 1984) η παραδοχή ότι η αλματώδης τεχνολογική πρόοδος στον χώρο των κτιριακών έργων και ειδικά σε ό,τι αφορά την περιοχή του περιβαλλοντικού ελέγχου και σχεδιασμού φέρνει την αρχιτεκτονική σε ένα «δίστρατο» όπου είτε θα «απελευθερωθεί» οριστικά από την ευθύνη του συν-σχεδιασμού και της ενσωμάτωσης των συστημάτων είτε θα «υποταχθεί» στους στόχους των ηλεκτρο-μηχανολογικών υπηρεσιών. Όπως, άλλωστε επιβεβαιώνει και η Ευρωπαϊκή Οδηγία, πρέπει να συνειδητοποιήσουμε το γεγονός ότι ο/η αρχιτέκτονας όπως τον/τη γνωρίζουμε επί του παρόντος, δηλαδή ο δημιουργός πρωτίστως δομικών λύσεων, είναι πια ένας/μία από έναν ολοένα αυξανόμενο αριθμό ανταγωνιζόμενων «σχεδιαστών δομημένου περιβάλλοντος» και ότι αυτό που έχει να προσφέρει (ο αρχιτέκτονας) δεν φέρει πλέον την εξουσία της «αναγκαιότητας».

Πέραν, των παραπάνω, η τεχνολογική έξαρση στον τομέα αυτόν έχει δημιουργήσει ως προϋπόθεση συμμετοχής ένα σχεδόν αυτόνομο περιβάλλον σχεδιαστικής προσομοίωσης και ανάλυσης των κτιρίων –και της αρχιτεκτονικής τους–, όπου τα συστήματα συμβόλων που παρέχονται τόσο καλά από τα αντίστοιχα λογισμικά και τα αποτελέσματά τους γίνονται πιο σημαντικά από το ηλεκτρολογικό και μηχανολογικό ή και το αρχιτεκτονικό περιεχόμενο τους.



Εικόνα 13.4 *Παράδειγμα ενεργειακού πιστοποιητικού. Πηγή: UKHomePerformanceRatingCharts, by User:Gralo, via Wikimedia Commons, Public domain.*

Ανθεκτικότητα

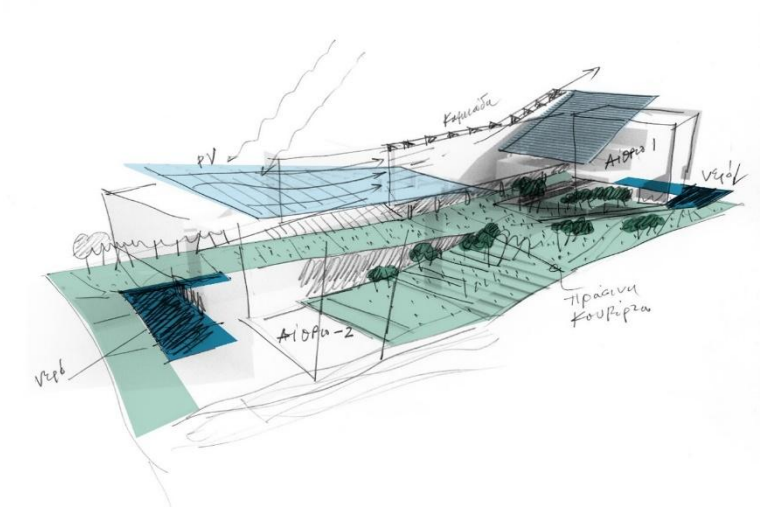
Το πέμπτο επιλεγμένο χαρακτηριστικό της «νέας εποχής» αναφέρεται στην έννοια της «**ανθεκτικότητας**» (resilience), η οποία ορίζεται ως «η μηχανική ή η υλική ιδιότητα ενός συστήματος να ανακτά την αρχική του μορφή ή λειτουργία όταν έχει πάψει η διαταραχή στην οποία έχει υποβληθεί, χωρίς να παραμορφώνεται. Σε αντίθεση με την έννοια της «αντίστασης», η οποία χαρακτηρίζεται από εκδηλωμένη παραμόρφωση που ακολουθείται από θραύση εάν η διαταραχή είναι πολύ μεγάλη, η «ανθεκτικότητα» επιτρέπει στην ενέργεια να περάσει γύρω της, αποτρέποντας την κατάρρευση» (Martínez Euklidiadas, 2022). Η ανθεκτικότητα στην αρχιτεκτονική αφορά την ικανότητα των κτιρίων και των υποδομών (και των δομημένων περιβαλλόντων που διαμορφώνουν) να αντέχουν και να προσαρμόζονται στις αλλαγές και τις διαταραχές που προκαλούνται από φυσικά ή ανθρωπογενή αίτια (π.χ. κλιματική αλλαγή/κλιματική κρίση). Βασική συνθήκη προς μια «ανθεκτική αρχιτεκτονική» είναι η αναγνώριση κατά τον σχεδιασμό των κύριων υποστηρικτικών συστημάτων που είναι κρίσιμα για τη βιωσιμότητα του κτιριακού οργανισμού στις περιπτώσεις που επιδρούν σε αυτά μεταβολικά φαινόμενα ανεξαρτήτως της έντασης τους. Απαιτεί επίσης τον σχεδιασμό συστημάτων που να μπορούν να προσαρμόζονται σε νέες συνθήκες, καθώς και την ενσωμάτωση στρατηγικών για την αποκατάσταση και την επανάκτηση της λειτουργικότητας του οργανισμού μετά τις διαταραχές. Η ανθεκτική αρχιτεκτονική δεν επιδιώκει μόνο την προστασία των κτιρίων, αλλά και τη διασφάλιση της συνεχούς παροχής βασικών υπηρεσιών και της προστασίας των ανθρώπινων ζωών. (Ανδριανού & Αντωνιάδη, 2024).



Εικόνα 13.5*. Ανθεκτικότητα. Photo by Gary Walker-Jones on Unsplash.*

Κτίρια ΝΖΕΒ

Το έκτο (και τελευταίο) επιλεγμένο χαρακτηριστικό της «νέας εποχής», που μας εισάγει στο κυρίως αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου, είναι τα κτίρια με υψηλή ενεργειακή (και περιβαλλοντική εντέλει) απόδοση ή, όπως ορίστηκαν κατά τον Κανονισμό: **«σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (ΣΜΚΕ)**» κτίρια (Nearly Zero Energy Buildings – NZEB).



Εικόνα 13.6 *Παράδειγμα σχεδιασμού της κεντρικής ιδέας κτιρίου ΣΜΚΕ. Πηγή: Σχέδιο από προσωπικό αρχείο (Μ. Κατσαρός).*

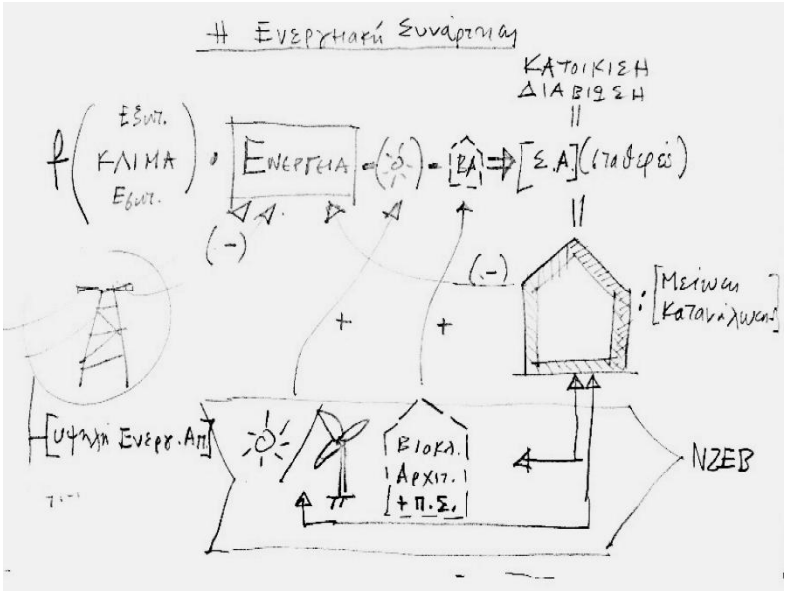
Η υποχρεωτική παραγωγή κτιρίων ΣΜΚΕ δεν αποτέλεσε προϊόν κάποιας ενδογενούς αρχιτεκτονικής συζήτησης, αλλά είναι η αναγκαστική κανονιστική προσαρμογή του κτιριακού τομέα στις απαιτήσεις διαδοχικών Ευρωπαϊκών Οδηγιών (την 2002/91/ΕΚ όπως τροποποιήθηκε με την 2010/31/ΕΕ) με σκοπό την «αποτελεσματική, συνετή, ορθολογική και βιώσιμη χρησιμοποίηση της ενέργειας που εφαρμόζεται μεταξύ άλλων στα προϊόντα πετρελαίου, το φυσικό αέριο και τα στερεά καύσιμα, που αποτελούν τις ουσιώδεις πηγές ενέργειας, αλλά επίσης και τις κύριες πηγές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο κτιριακός τομέας ευθύνεται για το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Ο τομέας αυτός διευρύνεται διαρκώς, πράγμα που μετά βεβαιότητας θα αυξήσει την ενεργειακή του κατανάλωση. Συνεπώς, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στον κτιριακό τομέα και η χρήση ενέργειας

παραγόμενης από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ) αποτελούν σημαντικά απαραίτητα μέτρα που απαιτούνται για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου».

13.2 Κτίρια ΣΜΚΕ/NZEB

13.2.1 Η ενεργειακή εξίσωση

Από τις αναφορές της προηγούμενης παραγράφου (13.1), διαφαίνεται ότι η αναζήτηση της ουσίας στον ενεργειακό και περιβαλλοντικό σχεδιασμό των νέων κτιρίων είναι μια διεργασία που βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη και αναζήτηση, στο επιστημονικό, τεχνολογικό και κανονιστικό πεδίο και, παρόλο που έχουν ήδη περάσει περισσότερα από 10 έτη από τότε που νομοθετήθηκε η πρώτη σχετική Ευρωπαϊκή Οδηγία (ΕΟ).



Εικόνα 13.7 *Η ενεργειακή συνάρτηση. Πηγή: Σχέδιο από προσωπικό αρχείο (Μ. Κατσαρός).*

…….πρόσοδοι……. **…….απώλειες…….**

συμβατική θέρμανση	ηλιακές πρόσοδοι	εσωτερικές πρόσοδοι	θερμικές απώλειες

ανάλυση τυπικού θερμικού ισοζυγίου για τον χειμώνα

ηλιακές πρόσοδοι	εσωτερικές πρόσοδοι	θερμικές απώλειες

ανάλυση τυπικού θερμικού ισοζυγίου για την άνοιξη και το φθινόπωρο

ηλιακές πρόσοδοι	εσωτερικές πρόσοδοι	θερμικές απώλειες	απόρριψη θερμότητας

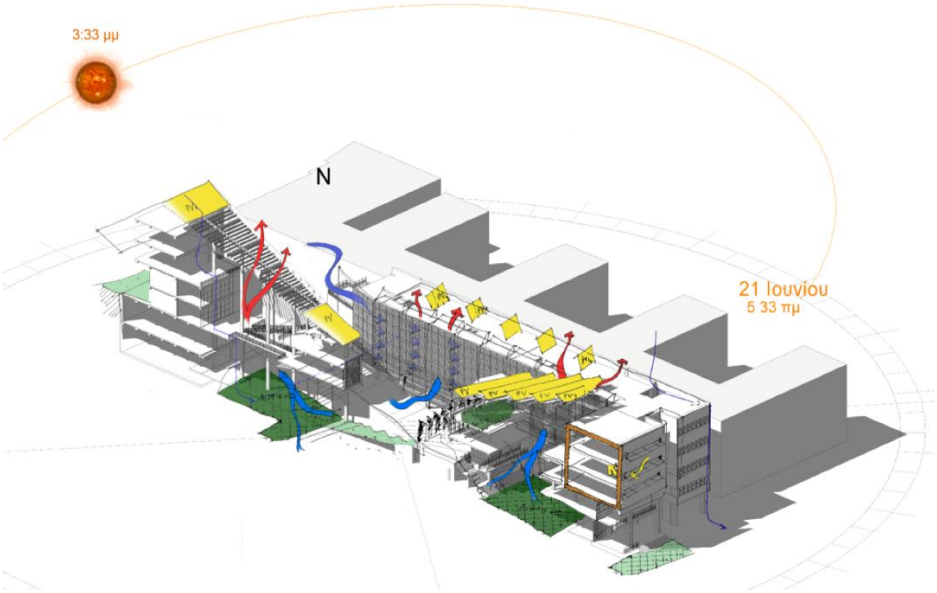
ανάλυση τυπικού θερμικού ισοζυγίου για το καλοκαίρι

Εικόνα 13.8 *Ανάλυση θερμικού ισοζυγίου με τη μορφή ιστογράμματος.*
Σημ.: Οι συνολικές θερμικές πρόσοδοι και οι συνολικές θερμικές απώλειες ενός κτιρίου αναλύονται στους επιμέρους παράγοντες που διαμορφώνουν το θερμικό ισοζύγιο για τις τέσσερις εποχές του χρόνου. Τα μεγέθη δεν είναι υπό κλίμακα, δηλαδή δεν αποδίδουν την πραγματική σχέση μεγέθους μεταξύ των διαφόρων παραγόντων στις προσόδους και τις απώλειες. Επίσης, δεν υπάρχει αντιστοιχία μεγέθους ανάμεσα στα τρία ισοζύγια.

Καθίσταται, επίσης, κατανοητό ότι η πρόοδος της τεχνολογίας στον τομέα αυτόν τελικά ετεροκαθορίζει τους στόχους των ΕΟ (και των κανονισμών), καθώς και την ουσία τους, εφόσον τα κελύφη των κτιρίων και τα τεχνικά συστήματα που αναπτύσσονται και κατασκευάζονται και οι βελτιώσεις που επιτυγχάνονται είναι τέτοιες που όχι μόνον υπερβαίνουν τον αρχικό προγραμματισμό και τους στόχους των ΕΟ αλλά θέτουν νέα θεωρητικά και τεχνικά διλήμματα προς επίλυση. Πώς επομένως προσεγγίζονται οι στόχοι και ποιες αναγκαιότητες ικανοποιούν στον σχεδιασμό και την κατασκευή των νέων κτιρίων με χαρακτηριστικά ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ;

Τα κτίρια, όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου (βλ. παρ. 13.1), υπηρετούν έναν σύνθετο σκοπό στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Ως οι κατεξοχήν χώροι διαβίωσης-διαμονής για οποιαδήποτε χρήση ή λειτουργία, τα κτίρια οφείλουν –απαιτείται– πριν από όλα να παρέχουν τις συνθήκες εκείνες που καθιστούν την παρουσία και τη διαμονή των ανθρώπων σε αυτά, ασφαλή, άνετη και ευχάριστη-απολαυστική. Ο ακριβής καθορισμός και η εξειδίκευση των απαιτήσεων αυτών είναι αντικείμενο-καθήκον που για ευνόητους λόγους ελέγχεται και αποφασίζεται «κανονιστικά» (π.χ. για την Ελλάδα, βλ. Κτιριοδομικό Κανονισμό, ειδικούς θεματικούς κανονισμούς, ΤΟΤΕΕ κ.λπ.), ώστε να διασφαλίζεται συμβατικά, η ορθή και καθολική εφαρμογή των ίδιων κανόνων.

Η διασφάλιση των «συνθηκών διαβίωσης»: ασφάλεια, άνεση, ευεξία και απόλαυση, εντός και εκτός των κτιρίων είναι το καθήκον κάθε σχεδιασμού και επομένως και των κτιρίων ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ και αντιστοιχίζεται με συγκεκριμένες τιμές-στόχους για τις παραμέτρους και τα κριτήρια του σχεδιασμού. Οι τιμές αυτές για τα κτίρια ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ ελέγχονται ως προς την επιρροή τους στην ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση των κτιρίων και το αντίστροφο: ο ενεργειακός και περιβαλλοντικός σχεδιασμός οφείλει να διασφαλίζει πρώτα από όλα τις απαιτούμενες «συνθήκες διαβίωσης». Το ισοζύγιο[13] μεταξύ τιμών-στόχων και ενεργειακής-περιβαλλοντικής επίδοσης διαμορφώνεται από τη λεγόμενη «ενεργειακή εξίσωση» (ή αλγόριθμο), η οποία ρυθμίζει τις μαθηματικές-υπολογιστικές σχέσεις μεταξύ των συντελεστών του σχεδιασμού.



Εικόνα 13.9 *Βιοκλιματικό διάγραμμα κτιρίου ΝΖΕΒ. Πηγή: Σχέδιο από προσωπικό αρχείο (Μ. Κατσαρός).*

[13] «Οι χρήσεις των κτιρίων περιλαμβάνουν τόσο τη λειτουργία του κτιρίου όσο και την κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με τον χρήστη. Το θετικό ισοζύγιο επιτυγχάνεται με ταυτόχρονη εξασφάλιση των χαμηλότερων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και καλή δυναμική αντιστοίχιση μεταξύ φορτίου και παραγωγής, σύμφωνα με την οικονομική προσιτότητα και την τεχνική βιωσιμότητα» (What Is a PEB? – Cultural-E, n.d.).

13.2.2 Η βασική νομοθεσία

Ένα ήδη εκτεταμένο κανονιστικό πλαίσιο διέπει τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και τη λειτουργία των κτιρίων ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ. Όπως συνήθως συμβαίνει, αποτελείται από ένα πλέγμα αλληλοσυμπληρούμενων βασικών ή/και κατευθυντήριων Ευρωπαϊκών Οδηγιών, ερμηνευτικών κανονισμών, εξειδικευμένων εθνικών νόμων και ερμηνευτικών ή/και εφαρμοστικών εγκυκλίων κ.λπ. σε δενδροειδή ανάπτυξη. Στην Ευρωπαϊκή Νομοθεσία, οι βασικοί ορισμοί και οι προϋποθέσεις για τα κτίρια ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ περιλαμβάνονται στις ακόλουθες νομικές διατάξεις:

- στην Ευρωπαϊκή Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD, *Energy Performance of Buildings Directive recast*) 2010/31/ΕΕ,
- στην Ευρωπαϊκή Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση (τροποποιήσεις) 2012/27/ΕΕ και
- στον κατ' εξουσιοδότηση, συμπληρωματικό της 2010/31/ΕΕ, Κανονισμό αρ. 244/2012 ΕΕ και στις «κατευθυντήριες γραμμές» 2012/C 115/01,

καθώς και σε μεταγενέστερες οδηγίες και τροποποιήσεις όπως:

- στη σύσταση (*recommendation*) 2016/1318/EU on guidelines for the promotion of nearly zero-energy buildings and best practices, και
- στην Ευρωπαϊκή Οδηγία που τροποποιεί τις 2010/31/ΕΕ & 2012/27/ΕΕ, τη με αρ. 2018/844/ΕΕ.

Στην Ελληνική Νομοθεσία, ο καθορισμός των βασικών αρχών και απαιτήσεων σχεδιασμού, υλοποίησης και λειτουργίας κτιρίων ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ γίνεται κυρίως μέσω των ακόλουθων νομικών διατάξεων:

- στον ΚΕΝΑΚ («Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων» ΦΕΚ 181 τ.Β'/26.1.2018),
- στον Νέο Οικοδομικό Κανονισμό (ΝΟΚ) (Ν. 4067/2012, ΦΕΚ 79 τ.Α'/09.04.2012), όπως αυτός τροποποιήθηκε και ισχύει,
- στον Νόμο για την «Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ (...)» (Ν. 4122/2013, ΦΕΚ 42, τ.Α'/19.2.2013,
- στην Υπουργική Απόφαση «Έγκριση Εθνικού Σχεδίου αύξησης του αριθμού των κτιρίων με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας» (ΥΠΕΝ/ΔΕΠΕΑ/85251/242/27.11.2018, ΦΕΚ 5447 τ.Β'/05.12.2018),
- στον Ν. 4759/2020 «Εκσυγχρονισμός της Χωροταξικής και Πολεοδομικής Νομοθεσίας και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ 245 τ.Α'/9.4.2020),

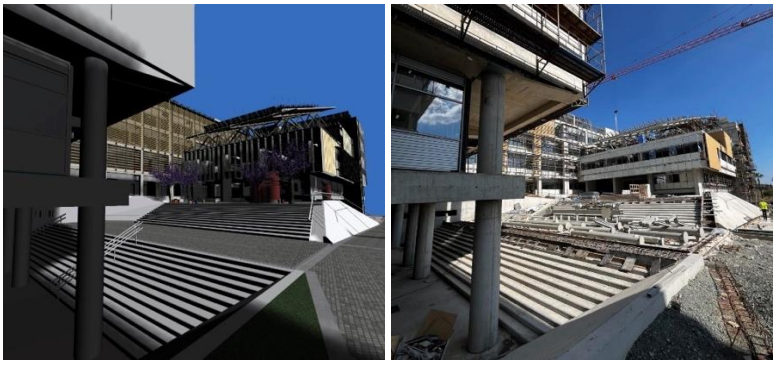
καθώς και σε άλλους νόμους και υπουργικές αποφάσεις, όπως η Στρατηγική για την «Πράσινη Μετάβαση», Σχέδιο 2024.

Βεβαίως, σημαντικά στοιχεία για τη διευκρίνηση των αρχών σχεδιασμού, την κωδικοποίηση των απαιτήσεων σχεδιασμού και των λοιπών παραμέτρων και δεικτών για την υλοποίηση και λειτουργία των κτιρίων ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ παρέχονται και από άλλους εθνικούς ή/και υπερεθνικούς κανονισμούς και οδηγίες, όπως είναι:

- οι Τεχνικές Οδηγίες του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (ΤΟΤΕΕ),
- οι αντίστοιχοι κανονισμοί διεθνών οργανισμών, όπως η ASHRAE κ.λπ.,
- τα σχετικά διεθνή πρότυπα (*standards*), όπως τα ISO, EN κ.λπ.,
- τα διεθνώς αναγνωρισμένα συστήματα πιστοποίησης για τον βιώσιμο σχεδιασμό και την ενεργειακή και περιβαλλοντική επίδοση των κτιρίων, όπως είναι τα LEED, BREAAM κ.λπ.

13.2.3 Ορισμός ΣΜΚΕ/NZEB

Τα κτίρια Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας (ΣΜΚΕ/NZEB), ή Σχεδόν Μηδενικών Εκπομπών (Near Zero Energy/Emissions Buildings) ορίζονται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους και ανάλογα με την περιοχή του κόσμου στην οποία αναφέρονται. Παρά το γεγονός αυτό, είναι κοινώς αποδεκτό ότι ένα «Κτίριο Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας» είναι γενικά ένα κτίριο με πολύ χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις, οι οποίες απαιτείται να μπορούν να καλυφθούν από ανανεώσιμες πηγές – ΑΠΕ (= καθαρή ενέργεια) (Torcellini et al., 2006). Κατ' αντιστοιχία, «Κτίριο Σχεδόν Μηδενικών Εκπομπών» είναι ένα κτίριο υψηλής ενεργειακής απόδοσης, του οποίου η εναπομείνασα ενεργειακή ανάγκη καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές, με σκοπό την επίτευξη σχεδόν μηδενικών εκπομπών ετησίως κατά τη λειτουργία του κτιρίου και στη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Η ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές παράγεται κατά προτίμηση εντός του οικοπέδου, αλλά μπορεί να προέρχεται και από παραγωγή εκτός του οικοπέδου (Laski & Burrows, 2017).

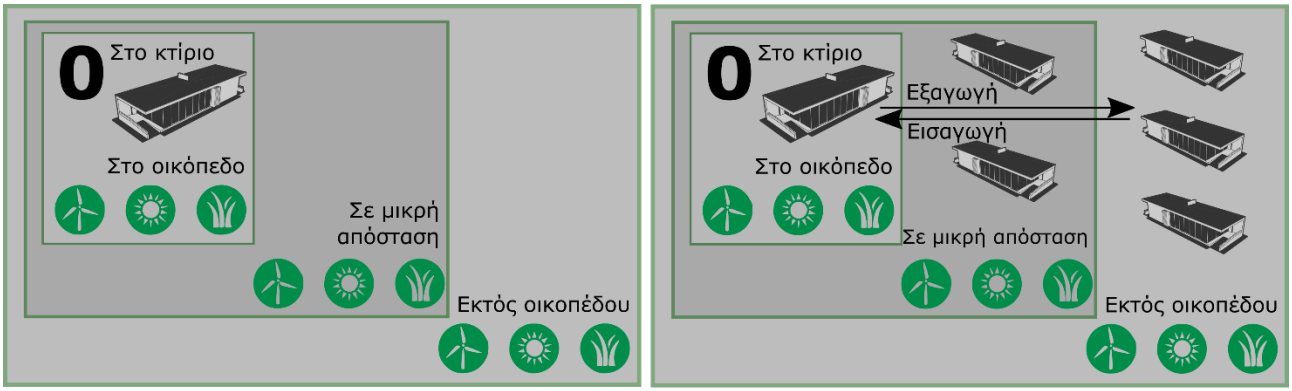


Εικόνα 13.10. *Παράδειγμα κτιρίου NZEB. Πηγή: Φωτορεαλιστική απεικόνιση και φωτογραφία από προσωπικό αρχείο (Μ. Κατσαρός).*

Στην EPBD recast (2010/31/EU), ως κτίριο με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας (ΣΜΚΕ) ορίζεται το κτίριο με πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση. Η ενεργειακή απόδοση κτιρίου εκφράζεται με αριθμητικό δείκτη χρήσης πρωτογενούς ενέργειας σε kWh/(m^2.y) με σκοπό τόσο την πιστοποίηση της ενεργειακής του απόδοσης όσο και τη συμμόρφωσή του με τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης. Η σχεδόν μηδενική ή πολύ χαμηλή ποσότητα ενέργειας που απαιτείται θα πρέπει να συνίσταται σε πολύ μεγάλο βαθμό σε ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, περιλαμβανομένης της παραγομένης επιτόπου ή πλησίον του κτιρίου.

Μια αρχική, βασική κατηγοριοποίηση των κτιρίων NZEB, που έχει δοθεί από το Department of Energy (DoE) των ΗΠΑ, αφορά καταρχήν την πρωτογενή ενεργειακή του κατανάλωση και περιλαμβάνει τις παρακάτω κατηγορίες (Torcellini et al., 2006, σσ. 4-5) (Εικόνα 13.10):

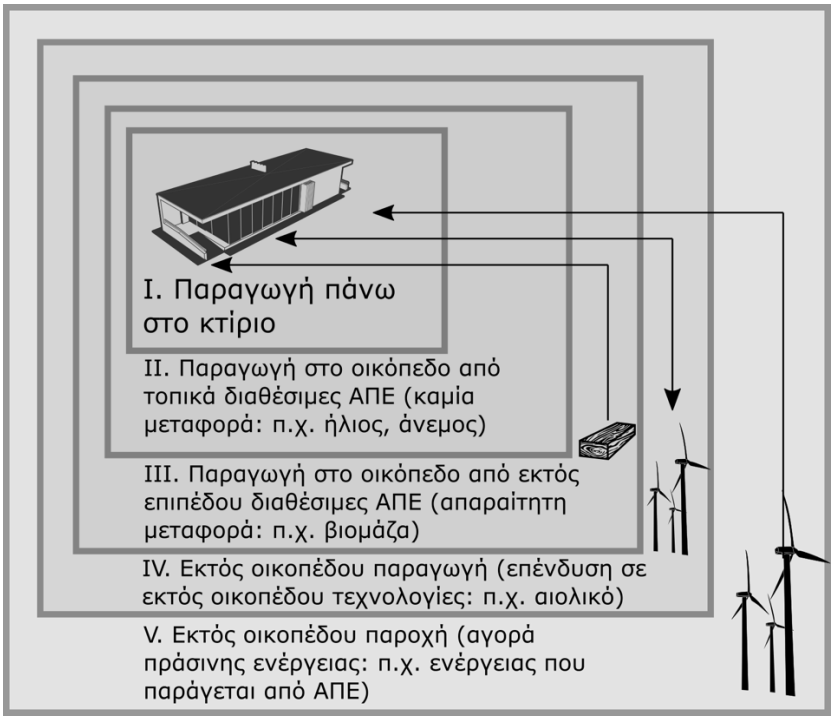
- **Καθαρά μηδενική ενέργεια στο οικόπεδο** (*Net Zero Site Energy*): Το κτίριο παράγει επιτόπου στο οικόπεδο την απαιτούμενη πρωτογενή του ενέργεια κατά έτος.
- **Καθαρά μηδενική ενέργεια στην πηγή** (*Net Zero Source Energy*): Το κτίριο παράγει και προμηθεύεται, κατά περίπτωση, την ετήσια απαραίτητη πρωτογενή ενέργεια. Η ενέργεια αναφέρεται στην πρωτογενή ενέργεια που χρειάζεται για την εξαγωγή, την επεξεργασία, την παραγωγή και την παράδοσή της στο οικόπεδο, δηλαδή στη συνολική ενέργεια.
- **Καθαρά μηδενικό ενεργειακό κόστος** (*Net Zero Energy Costs*): Για το κτίριο, το κόστος της ενέργειας που παράγεται στο οικόπεδο και εξάγεται προς το δίκτυο είναι τουλάχιστον ισάξιο με το κόστος της προμηθευόμενης ενέργειας.
- **Καθαρά μηδενικές ενεργειακές εκπομπές** (*Net Zero Energy Emissions*): Το κτίριο παράγει από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τουλάχιστον όση ενέργεια εισάγει και παράγεται από ρυπογόνες πηγές.



Εικόνα 13.11 *Σχηματική απεικόνιση διαφορετικών κατηγοριών NZEB. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με αντικείμενα από https://publicdomainvectors.org και δεδομένα από Hermelink (2014).*

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των κτιρίων NZEB αφορά την παραγωγή και παροχή της παραγόμενης ενέργειας και περιλαμβάνει τις παρακάτω κατηγορίες (Marszal et al., 2011) (Εικόνα 13.11):

- **Επιτόπου, στο κτίριο ή/και στο οικόπεδο** (*on-site generation/renewables*): Η ενέργεια παράγεται από συστήματα ΑΠΕ (παθητικά ή ενεργητικά) συστήματα που ενσωματώνονται στο κτίριο ή/και στο κέλυφός του από επιτόπου διαθέσιμες πηγές, όπως ο ήλιος και ο άνεμος.
- **Επιτόπου παραγωγή από εξωτερικές ΑΠΕ** (*on-site generation/off-site renewables*): Η ενέργεια παράγεται από συστήματα ΑΠΕ που εφαρμόζονται στο κτίριο ή στο οικόπεδο, από πηγές οι οποίες μεταφέρονται από άλλη τοποθεσία, όπως η βιομάζα.
- **Εκτός του οικοπέδου** (*off-site generation*): Η ενέργεια παράγεται από συστήματα ΑΠΕ εκτός οικοπέδου και μεταφέρεται.
- **Εκτός οικοπέδου παροχή ενέργειας** (*off-site supply*): Η ανανεώσιμη ενέργεια παράγεται και παρέχεται από κάποιον εξωτερικό πάροχο.



Εικόνα 13.12 *Επισκόπηση διαφορετικών δυνατοτήτων παροχής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πηγή: Ίδια σχεδίαση (Φ.-Μ. Μπουγιατιώτη) με αντικείμενα από https://publicdomainvectors.org και δεδομένα από Marszal et al. (2011).*

Αναλυτικότερα, ως προς τις διαφορετικές δυνατότητες παροχής ΑΠΕ στα κτίρια ΝΖΕΒ, αναφέρονται τα εξής παραδείγματα (Marszal et al., 2011):

- **Επιλογή 0:** Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης με στρατηγικές βιοκλιματικού σχεδιασμού (παθητικές), όπως για παράδειγμα παθητικά συστήματα θέρμανσης και δροσισμού, φυσικό φωτισμό, καθώς και με υψηλής απόδοσης συστήματα θέρμανσης-ψύξης-αερισμού (HVAC).
- **Επιλογή 1 (επιτόπου):** Χρήση ΑΠΕ σε επίπεδο κτιρίου, δηλαδή αρχιτεκτονική ένταξη (αναλυτικότερα, βλ. Κεφ. 11), όπως για παράδειγμα ηλιακούς συλλέκτες για παροχή ΖΝΧ ή/και θέρμανσης, PV για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και, εφόσον επιτρέπεται από τη σχετική νομοθεσία, μικρές ανεμογεννήτριες.
- **Επιλογή 2 (επιτόπου):** Χρήση ΑΠΕ σε επίπεδο οικοπέδου, αλλά όχι πάνω στο κτίριο, όπως για παράδειγμα ηλιακούς συλλέκτες για παροχή θέρμανσης και ΖΝΧ, PV για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, εφόσον επιτρέπεται από τη σχετική νομοθεσία, μικρές ανεμογεννήτριες, εφόσον υπάρχει η δυνατότητα, μικρά υδροηλεκτρικά, ακόμα και επιτόπου διαθέσιμη βιομάζα (σε γεωργικές ή κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις, π.χ. ελαιοτριβεία) κ.λπ.
- **Επιλογή 3 (εκτός οικοπέδου):** Χρήση ΑΠΕ που είναι διαθέσιμες εκτός του οικοπέδου, για παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας – συνήθως με συμπαραγωγή θερμότητας-ενέργειας (CHP) εντός του οικοπέδου, όπως για παράδειγμα βιομάζα, pellet, βιοκαύσιμα κ.λπ.
- **Επιλογή 4 (εκτός οικοπέδου):** Αγορά «πράσινου» ηλεκτρικού ρεύματος, που παράγεται από ΑΠΕ (π.χ. αιολικά ή φωτοβολταϊκά πάρκα ή και υδροηλεκτρικά εργοστάσια) από πιστοποιημένο πάροχο.

Η ποικιλία και η διαφοροποίηση των περιγραφών των κτιρίων ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ, που σημειώνονται παραπάνω, επίσης φανερώνουν ότι ο σχεδιασμός των κτιρίων ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ βρίσκεται σε μια έντονα δυναμική εξελικτική διεργασία, η οποία ωστόσο καθορίζεται κυρίως, από τις αλλαγές στην τεχνολογία των τεχνικών συστημάτων και στην επιστήμη των υλικών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η συντελευμένη πρόοδος στην παραγωγικότητα και αποδοτικότητα των συστημάτων παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πανέλα – PV (συστήματα που κυρίως έχουν αξιοποιηθεί για την «επιτόπου παραγωγή ΑΠΕ» στα κτίρια ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ): το 2019-2020, κατά τα πρώτα έτη της υποχρεωτικής εφαρμογής της νομοθεσίας για τα πολύ υψηλής ενεργειακής απόδοσης κτίρια ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ, ένα μέρος της πολύ χαμηλής ποσότητας ενέργειας που απαιτούνταν θα έπρεπε να καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ) και να παράγεται επιτόπου ή κοντά, κάτι το οποίο κατέστη εφικτό με την ανάπτυξη των πρώτων συστημάτων PV. Στα έτη που ακολούθησαν, με την ίδια ανεπτυγμένη έκταση συστημάτων PV για την παραγωγή ΑΠΕ επιτόπου στο κτίριο, περάσαμε αρχικά:

- σε κτίρια **netZEB** (Net Zero Energy Building), δηλαδή σε ένα κτίριο με πολύ μειωμένη ζήτηση ενέργειας που επιτρέπει την εξισορρόπηση της ενεργειακής ζήτησης με ισοδύναμη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ή άλλων φορέων ενέργειας) από ανανεώσιμες πηγές, ακολούθως,
- σε κτίρια **ZEB** (Zero Energy Building), δηλαδή σε ένα κτίριο στο οποίο η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αντισταθμίζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη λειτουργία του, και τέλος σήμερα μπορούμε με άνεση να στοχεύουμε
- σε κτίρια **PEB** (Plus and/or Positive Energy Building), δηλαδή σε ένα ενεργειακά αποδοτικό κτίριο που παράγει περισσότερη τελική ενέργεια από αυτή που χρησιμοποιεί μέσω τοπικά διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών σε χρονικό διάστημα ενός έτους.

13.3 Σχεδιάζοντας ένα κτίριο ΣΜΚΕ/NZEB

Γενική παραδοχή στην αρχιτεκτονική είναι ότι ο σχεδιασμός αφορά μια διαδικασία η οποία διαρκώς αναζητά και διαπραγματεύεται σταθερές και αρχές που θα μας καθοδηγήσουν και βοηθήσουν στις επιλογές μας· οι τελευταίες, ωστόσο, είναι δύσκολο να περιγραφούν με ένα κοινά αντιληπτό και διαχρονικό τρόπο και είναι ακόμη δυσκολότερο να αντικειμενικοποιηθούν με μαθηματικούς όρους και, άρα, να μεταδοθούν ως «μάθημα». Για αυτόν τον λόγο, όπως ειπώθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός καταφεύγει συχνά στη μίμηση ενός, κάποιου, «τελειοποιημένου και οραματικού» παραδείγματος.

Στην περίπτωση του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού των κτιρίων ΣΜΚΕ/NZEB, συμβαίνει κάτι διαφορετικό. Η γένεση και η εξέλιξη των κτιρίων ΣΜΚΕ/NZEB, στο πεδίο της αρχιτεκτονικής, βασίζεται στην επιτελεστικότητα των ενεργειών μας για τη δημιουργία ενός «νέου τύπου» κτιρίου. Παραφράζοντας τον J. L. Austin, θα λέγαμε ότι η αρχιτεκτονική (των ΣΜΚΕ/NZEB) οφείλει να είναι ο τρόπος για να επιτευχθούν πράγματα-αποτελέσματα στον κόσμο και όχι ένα μέσο για την περιγραφή τους.

Ο σχεδιασμός ενός κτιρίου ΣΜΚΕ δεν περιγράφει απλώς μια επιθυμητή κατάσταση, αλλά επιτελεί μια πράξη, η οποία δεν αφορά το εάν είναι αληθής ή ψευδής αλλά το εάν είναι επιτυχής ή αποτυχημένη σε σχέση με το αν πληρεί τις αντίστοιχες συνθήκες και στόχους. Για να είναι επιτυχής η επιτελεστική πράξη του σχεδιασμού ενός κτιρίου ΣΜΚΕ, πρέπει να πληρούνται ορισμένες συνθήκες αποδοτικότητας:

- Ο σχεδιασμός γίνεται εντός ενός συγκεκριμένου, κατάλληλου, (κανονιστικού) πλαισίου.
- Η πράξη πρέπει να συνοδεύεται από συγκεκριμένες προθέσεις σε ό,τι αφορά την επίτευξη των στόχων και να υπάρχει αμοιβαία κατανόηση για τους κανόνες από τους εμπλεκομένους.
- Οι εμπλεκόμενοι στον σχεδιασμό πρέπει να επιδεικνύουν τη δέσμευση που συνεπάγεται η επιτελεστική πράξη προς τον σχεδιασμό ενός κτιρίου ΣΜΚΕ.

Με βάση τα παραπάνω, η επιτυχία στον σχεδιασμό κτιρίων ΣΜΚΕ κρίνεται όχι από την υπόσχεσή τους προς μια αειφόρο, βιοκλιματική αρχιτεκτονική, αλλά από τη δυναμική που έχουν τα κτίρια ΣΜΚΕ να ανταποκρίνονται σε αυτές τις αρχές στο μέλλον και να παρεαμένουν «υποσχόμενα» σε διάρκεια.

13.3.1 Μεθοδολογία

Η αρχιτεκτονική των κτιρίων ΣΜΚΕ/NZEB, επιβάλλεται να πορευτεί προς αυτό που θα τιτλοφορούσαμε ως «**σχεδιασμό βάσει της επίδοσης**» (*performance based design*), δηλαδή προς μια σχεδιαστική και ταυτόχρονα υπολογιστική (*computational*) προσέγγιση – συνήθη σε άλλους κλάδους της μηχανικής. Η προσέγγιση αυτή θέτει ένα διαφορετικό πλαίσιο τρόπων λήψης αποφάσεων και αξιολόγησης και ελέγχου των επιλογών, εφόσον η διαδικασία του σχεδιασμού καθοδηγείται από επιθυμητούς ή/και απαιτούμενους στόχους επιδόσεων και δεν ακολουθεί απλώς κανονιστικές προδιαγραφές και πρότυπα. Ειδικότερα, αντί να τηρείται περιγραφικά και ονομαστικά ένα σύνολο προκαθορισμένων κανόνων (που πολλές φορές δεν καλύπτουν το σύνολο των περιπτώσεων), ο σχεδιασμός καθορίζεται από την επίτευξη συγκεκριμένων αποτελεσμάτων επίδοσης του σχεδιαστικού αντικειμένου υπό συγκεκριμένες συνθήκες (όπως είναι η φωτιά, ο σεισμός, οι κλιματικές συνθήκες, η συμφόρηση) ή και άλλες καταπονήσεις και καταστάσεις κρίσης. Η ίδια προσέγγιση ενδείκνυται και για τις περιπτώσεις όπου ο σχεδιασμός διερευνά σενάρια βελτιστοποίησης βάσει πάλι προκαθορισμένων στόχων αναγκαίων ή επιθυμητών επιδόσεων.

Βασικές πτυχές του «σχεδιασμού βάσει της επίδοσης» είναι:

1. Ο **καθορισμός των στόχων** της επίδοσης που αφορά ζωτικής σημασίας απαιτήσεις, τις περισσότερες φορές «διερυμένος» στη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου, και ειδικά όταν αφορούν περιβαλλοντικές ή ενεργειακές απαιτήσεις.

2. Η **ανάλυση**, π.χ. των συνθηκών που επιδρούν στο περιβάλλον εντός του οποίου αξιολογείται το σχεδιαστικό αντικείμενο. Η χρήση προηγμένων εργαλείων ανάλυσης και προσομοίωσης μπορεί να προβλέψει την επίδοση του κτιρίου όταν επιδρούν σε αυτό οι διαφορετικές συνθήκες-καταστάσεις που εξετάζονται.
3. Η **δυνατότητα διαμόρφωσης ευέλικτων** –εναλλακτικών και υβριδικών– **λύσεων** που μπορεί να είναι ασύμβατες με τις παραδοσιακές κανονιστικές προδιαγραφές σχεδιασμού ή και αντίθετες με τη νομοτελειακή λογική του επίσημου ή του «δημοφιλούς» παραδείγματος.
4. Η **παραμετροποίηση** της σχεδιαστικής διαδικασίας βάσει μετρήσιμων κριτηρίων και δεικτών, αντί του να στηρίζεται σε απλούς υποκειμενικούς κανόνες «επιτυχίας/αποτυχίας» ή στον βαθμό πιστότητας της μίμησης του «καλού/κακού παραδείγματος».
5. Η **ανάλυση και αξιολόγηση των ευκαιριών και των κινδύνων**, διεργασίες οι οποίες επαναλαμβάνονται συχνά κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ώστε να εξασφαλιστεί αφενός η αποτελεσματικότητα ως προς τους στόχους (ασφάλειας, απόδοσης κ.λπ.) που τέθηκαν, αφετέρου να εντοπιστούν κενά και αβεβαιότητες που μπορούν να δημιουργηθούν υπό αντίξοες και μη προβλέψιμες συνθήκες.
6. Η διαδικασία διαμόρφωσης επαναληπτικών αναλύσεων, δοκιμών, ελέγχων και βελτιστοποιήσεων έως ότου διασφαλιστεί η επίτευξη των στόχων των επιδόσεων.
7. Ο «σχεδιασμός βάσει των επιδόσεων» είναι μια προοδευτική και προσανατολισμένη στα αποτελέσματα προσέγγιση που δίνει έμφαση στην επίτευξη συγκεκριμένων κριτηρίων απόδοσης, που στη περίπτωση των κτιρίων ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, η βελτιστοποίηση της ενεργειακή αποδοτικότητα, η κάλυψη της μικρής ενεργειακής ζήτησης από ΑΠΕ, ο περιορισμένος περιβαλλοντικός αντίκτυπος, η ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή κ.λπ., μέσω ανάλυσης, ευελιξίας και καινοτομίας, αντί της συμβατικής συμμόρφωσης σε κοινούς προκαθορισμένους κανόνες. Αναλυτικότερα, ο σχεδιασμός των κτιρίων ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα:

Στόχοι και απαιτήσεις

Τα κτίρια ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ (και συνολικά ο κτιριακός τομέας) έχουν βασικό στόχο τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, σε ποσοστό που καθορίζεται κάθε φορά από τις κεντρικές πολιτικές της ΕΕ και των κρατών μελών εντός συγκεκριμένων χρονικών διαστημάτων (2030, 2040, 2050, κ.λπ.),[14] μέσω της

[14] Ελληνική Δημοκρατία, Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα, Αναθ. Αυγ. 2024, σσ. 69-71.
«Κατά την περίοδο από το έτος 2020 έως σήμερα, η ΕΕ έθεσε πιο φιλόδοξους στόχους για το έτος 2030 και ενσωμάτωσε τον στόχο της κλιματικής ουδετερότητας έως το έτος 2050 στα Εθνικά Σχέδια για την Ενέργεια και το Κλίμα όλων των κρατών μελών». Συγκεκριμένα προβλέπεται,

- «Μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου: Μείωση κατά 55% έως το έτος 2030 σε σχέση με το επίπεδο εκπομπών του έτους 1990, και επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το έτος 2050.
- Διείσδυση των ΑΠΕ: Ο δείκτης για τις ΑΠΕ ως ποσοστό της ακαθάριστης τελικής κατανάλωσης ενέργειας το έτος 2030, θα ανέρχεται σε τουλάχιστον 42,5% (το οποίο μπορεί να αυξηθεί σε 45%), συνοδευόμενος από επιμέρους στόχους ανά τομέα κατανάλωσης (ηλεκτρική ενέργεια, θέρμανση-ψύξη και μεταφορές).
- Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης το έτος 2030 ίση με 11,7%, μετρούμενη ως ποσοστιαία μεταβολή της τελικής κατανάλωσης ενέργειας συγκριτικά με την προβλεπόμενη για το έτος 2030 εκδοχή του Σεναρίου Αναφοράς του έτους 2020».

Σε συνέχεια του Ευρωπαϊκού Κλιματικού Νόμου (Κανονισμός (ΕΕ) 2021/1119 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 30ής Ιουνίου 2021 για τη θέσπιση πλαισίου με στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας και για την τροποποίηση των κανονισμών (ΕΚ) 2009/401 και (ΕΕ) 2018/1999), η Ελλάδα θέσπισε πρώτη φορά τον Εθνικό Κλιματικό Νόμο (Ν. 4936/2022, Α΄ 105), ο οποίος καθορίζει συγκεκριμένους στόχους, περιλαμβανομένης της μείωσης των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% έως το έτος 2030 και κατά 80% έως το έτος 2040 (σε σύγκριση

βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας και παράλληλα την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος (κάτι που εξετάζεται ξεχωριστά και με διαφορετική μεθοδολογία) και τη διασφάλιση της ανθεκτικότητάς τους και του δομημένου περιβάλλοντος που συνθέτουν, στις συνθήκες της κλιματικής αλλαγής και κρίσης.

ΟΙ βασικές απαιτήσεις και τα μέτρα που πρέπει να εφαρμοστούν για την επίτευξη των στόχων εξειδικεύονται από τη βασική νομοθεσία και ελέγχονται τακτικά ως προς την αποτελεσματικότητά τους. Οι βασικοί στόχοι και απαιτήσεις μπορεί να εξειδικεύονται περαιτέρω ανάλογα τη χρήση, τον τρόπο λειτουργίας, τη γεωγραφική θέση ή/και τον χαρακτήρα (π.χ. ιστορικό, διατηρητέο, παραδοσιακό, κ.λπ.) των κτιρίων. Για παράδειγμα, σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Απόδοσης Κτιρίων (Buildings Performance Institute Europe – BPIE) καθιερώνονται τρεις βασικές στοχεύσεις-αρχές για τα κτίρια ΣΜΚΕ/NZEB ενδεικτικά (BPIE, 2011):

- **Αρχή 1η – Ενεργειακές απαιτήσεις:** Πρέπει να υπάρχει ένα καθορισμένο όριο στη ροή ενέργειας του κτιρίου, που να ορίζει την ποιότητα των ενεργειακών απαιτήσεων, με σαφείς οδηγίες για την καταγραφή των ποσών.
- **Αρχή 2η – Μερίδιο ανανεώσιμης ενέργειας:** Πρέπει να υπάρχει ένα συγκεκριμένο ενεργειακό όριο για τη λειτουργία του κτιρίου, που θα καθορίζει τους κατάλληλους τρόπους υπολογισμού και συγκέντρωσης του ενεργειακού μεριδίου που κατέχει η ανανεώσιμη παραγόμενη ενέργεια.
- **Αρχή 3η – Πρωτογενής ενέργεια και ρύποι CO2:** Πρέπει να καθοριστεί το όριο δαπάνης πρωτογενούς ενέργειας και ρύπων που προκύπτουν λόγω του κτιρίου και να υπολογιστούν με βάση συγκεκριμένα πρότυπα.

Όλα τα παραπάνω βασίζονται στην προϋπόθεση της τήρησης των ελάχιστων υποχρεωτικών απαιτήσεων και συνθηκών άνεσης ως προς θέρμανση, ψύξη, αερισμό, φυσικό φωτισμό, ποιότητα αέρα, ακουστική κ.λπ.

Ανάλυση

Η «ανάλυση των συνθηκών» είναι η διεργασία που μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε τα βασικά κριτήρια και τις βασικές παραδοχές για τον σχεδιασμό των κτιρίων ΣΜΚΕ/NZEB. Είναι επίσης το στάδιο κατά το οποίο σχηματοποιείται η παραμετροποίηση των παραγόντων που λαμβάνονται υπόψη για την προσομοίωση –υπολογισμό– και αποτίμηση της απόδοσης/επίδοσης, αρχικά των συστημάτων και τελικά του ίδιου του κτιρίου στην ολότητά του. Παρόμοια με τη μεθοδολογία σχεδιασμού ενός βιοκλιματικού κτιρίου, όπως αυτή αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, το στάδιο της ανάλυσης περιλαμβάνει:

- την ανάλυση του κλίματος ανά γεωγραφική ζώνη (για την Ελλάδα έχουν καθοριστεί τέσσερις διακριτές κλιματικές ζώνες: Α, Β, Γ και Δ, βλ. σχετικό χάρτη, Κεφ. 2, Εικόνα 2.4),
- την ανάλυση του μικρολίματος στην τοπική κλίμακα του γηπέδου ανέγερσης του κτιρίου και σε σχέση με το πώς αυτό (το μικροκλίμα) επηρεάζεται από τη μορφολογία του άμεσου δομημένου ή φυσικού περιβάλλοντος του κτιρίου, με χαρακτηριστικό παράγοντα επιρροής τον τρόπο ηλιασμού, σκίασης ή/και φυσικού αερισμού (υπολογιζόμενο με τη χρήση μοντελοποιήσεων Computational Fluid Dynamics – CFD) του γηπέδου του σχεδιαζόμενου κτιρίου σε σχέση και με το πώς είναι προσανατολισμένο το κτίριο στο συγκεκριμένο γήπεδο,
- την ανάλυση του είδους της χρήσης ή/και της σύνθετης χρήσης (αυτής που αποτελείται από πολλές επιμέρους) του κτιρίου, του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί η συγκεκριμένη χρήση (π.χ.

με τα επίπεδα του έτους 1990), και επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας (δηλαδή μηδενικές καθαρές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου) έως το έτος 2050. Συνεπώς, το τρέχον ΕΣΕΚ ενσωματώνει τους στόχους του Εθνικού Κλιματικού Νόμου (Ν. 4936/2022, Α΄ 105), τους στόχους στο πλαίσιο της πολιτικής της ΕΕ (RE-Power EU και Fit-for-55 στο πλαίσιο του Green Deal) και τις υπό τελική διαμόρφωση Οδηγίες της ΕΕ για τις ΑΠΕ, την ενεργειακή αποδοτικότητα κ.ά.».

ωράριο λειτουργίας κ.λπ.) αλλά και του βαθμού αυτοτέλειας και βαρύτητας της κάθε χρήσης/λειτουργίας, όταν αυτές «ανοίγονται» στο σύνολο του εξεταζόμενου-σχεδιαζόμενου κτιρίου,[15]

- σε ορισμένες περιπτώσεις, την αξιολόγηση του εάν πρόκειται για μεμονωμένο κτίριο ή εάν αποτελεί μέρος αδιάσπαστου συνόλου κτιρίων,
- την ανάλυση της ηλικίας του κτιρίου (εάν πρόκειται για υφιστάμενο) και στη συνέχεια την ανάλυση και τον καθορισμό των τυπολογικών, γεωμετρικών, μορφολογικών και οικοδομικών χαρακτηριστικών του, που αποτελούν τις παραμέτρους και τα κριτήρια του σχεδιασμού του, με άμεση ή έμμεση επιρροή στην ενεργειακή και περιβαλλοντική του απόδοση,
- την ανάλυση των τεχνικών συστημάτων του κτιρίου και τον τρόπο ενσωμάτωσής τους σε αυτό.

Η διαφορά του σταδίου της ανάλυσης σύμφωνα με την παραπάνω προσέγγιση σε σχέση με το τι γινόταν προηγουμένως έγκειται στο ότι ο σχεδιασμός του νέου κτιρίου συναρτάται (με τη μαθηματική έννοια του όρου) σε μια αλγοριθμική σχέση με το δομημένο και το φυσικό περιβάλλον του, τις κλιματικές συνθήκες, τη χρήση του, καθώς και με τα βασικά γεωμετρικά, μορφολογικά και οικοδομικά χαρακτηριστικά του (υλικά και τρόπο κατασκευής), στη διάρκεια της λειτουργείας του. Για παράδειγμα, η εμπειρική αντίληψη για τις κλιματικές συνθήκες και την ενδεχόμενη επιρροή τους στη λειτουργία ενός κτιρίου τώρα αντικαθίσταται με το «ψυχρομετρικό διάγραμμα» και τη στατιστική απεικόνιση της επιθυμητής κατάστασης (βλ. Κεφ. 2, Εικόνες 2.20 και 2.21).

Επίσης, με την εφαρμογή των νέων κανονισμών, η σχέση αυτή παύει να είναι προαιρετική και γίνεται υποχρεωτική. Το κριτήριο της ανάλυσης των εκάστοτε συνθηκών δεν αφορά μόνο την επιρροή τους στις επιδόσεις και τα χαρακτηριστικά των τεχνικών συστημάτων των κτιρίων και στον υπολογισμό των ενεργειακών αναγκών τους, αλλά τις συσχετίζει πρωτίστως με τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζεται και κατασκευάζεται το κέλυφος των κτιρίων, κάτι το οποίο έχει άμεση επίδραση στο σχήμα, στη δομή ή/και στη γενική μόρφωση των κτιρίων ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ.

Διαμόρφωση

Καθώς η μελέτη εξελίσσεται, η ανάλυση επαναλαμβάνεται με πιο πολύπλοκους υπολογισμούς. Ο συνδυασμός των παραμέτρων και κριτηρίων που εμπλέκονται στον σχεδιασμό, η μόρφωσή τους σε σχήμα, μορφή, υλικότητες, δομή κ.λπ., δηλαδή στους παράγοντες που καθορίζουν την αρχιτεκτονική έκφραση (και το αρχιτεκτονικό λεξιλόγιο) ενός κτιρίου ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ, είναι ευθύνη του αρχιτέκτονα. Ωστόσο, όπως ειπώθηκε, όλες οι εναλλακτικές προσεγγίσεις του σχεδιασμού ελέγχονται και μετριούνται, υπολογίζονται και αξιολογούνται ως προς την ενεργειακή/περιβαλλοντική απόδοσή τους σε ταυτόχρονη συνεργασία με όλες τις εμπλεκόμενες στον σχεδιασμό των κτιρίων ειδικότητες· τα δε αποτελέσματα καθορίζουν τελικά το εύρος των επιλογών. Ο σχεδιασμός των κτιρίων ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ είναι συνεργατική και διεπιστημονική πράξη, η οποία δεν αυτονομείται ανά ειδικότητα, αλλά η κάθε ειδικότητα έχει λόγο στο αντικείμενο της άλλης, συνδιαμορφώνοντας το αποτέλεσμα από την αρχή – βλ. ΚΕΝΑΚ και συνεργασία μεταξύ αρχιτέκτονα και λοιπών συμβούλων. Η διαμόρφωση πολλαπλών επιλύσεων είναι αναπόφευκτη και εμπεριέχει σε μεγάλο βαθμό τη λογική και τον χαρακτήρα κατασκευής ενός νέου «υβριδικού τύπου» κτιριακού οργανισμού, με την έννοια ότι καλείται να συγκεράσει και να συσσωματώσει ετερόκλητες τεχνολογικά και επιστημονικά απαιτήσεις και συστήματα.

Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται επίσης από δύο βασικές καινοτομίες στη διαδικασία του σχεδιασμού: αφενός στην υιοθέτηση του μεθοδολογικού εργαλείου του «**κτιρίου αναφοράς**» (ή αλλιώς «τυπικού κτιρίου»), αφετέρου στη χρήση προκαθορισμένης δομής και λειτουργίας λογισμικών υπολογιστικού

[15] Μελέτη ΥΠΕΝ, 2017, Π2, σελ. 9. Η παραμετροποίηση του μοντέλου βασίζεται στο ποσοστό βαρύτητας που έχει η κάθε επιμέρους χρήση (αυτοτελής ή σύνθετη) στο κτίριο με βάση την επιφάνεια και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του.

σχεδιασμού, θεσμοθετημένων ή μη (όπως ενδεικτικά είναι το ΤΕΕ-ΚΕΝΑΚ, το Energy Plus κ.ά.),[16] για τη μοντελοποίηση/προσομοίωση και την πιστοποίηση των αποδόσεων (*performances*).[17] Η μεθοδολογία του σχεδιασμού των κτιρίων, τουλάχιστον σε ό,τι αφορά τον έλεγχο της ενεργειακής απόδοσης, είναι προσδιορισμένη νομοθετικά (βλ. παρ. 13.2.2 – Ευρωπαϊκές Οδηγίες, Ελληνική Νομοθεσία κ.λπ.) και εξειδικεύεται στον σχετικό Ελληνικό Κανονισμό (ΚΕΝΑΚ). Επίσης ισχύει και εφαρμόζεται και ο Ν. 4122/2013 (ΦΕΚ Α΄42/19.2.2013) που καθορίζει τα κριτήρια που πρέπει να τηρούνται για τη δημιουργία των ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ.

Παράμετροι και κριτήρια σχεδιασμού

Κρίσιμα στοιχεία (κρίσιμα δομικά μέρη και συστήματα)[18] για την ενεργειακή και περιβαλλοντική συμπεριφορά των κτιρίων ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ επιλέγονται αρχικά με αρχιτεκτονικά κριτήρια (αντοχής, λειτουργικότητας, αισθητικής,κ.λπ.), αλλά ελέγχονται και εγκρίνονται στη συνέχεια με βάση τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά τους χαρακτηριστικά. Όσα δεν είναι στην «κρίσιμη λίστα» δεν υπολογίζονται.

Παράμετροι-κριτήρια του σχεδιασμού είναι:

1. Η **παλαιότητα** των κτιρίων (στις περιπτώσεις παρεμβάσεων σε υφιστάμενα κτίρια). Σημειώνεται ότι, παρόλο που κατά τον Κτιριοδομικό Κανονισμό η διάρκεια ζωής υπολογίζεται για τις συνήθεις περιπτώσεις στα 50 χρόνια, για πολλές περιπτώσεις το διάστημα αυτό μπορεί να επεκτείνεται σε 70 ή και περισσότερα χρόνια. Η διάρκεια ζωής των κτιρίων δεν καλύπτει όλα τα επιμέρους δομικά μέρη από τα οποία αποτελείται ο οργανισμός του κτιρίου (βλ. σχετικά Κεφ. 1, Εικόνα 1.16), αλλά αφορά τα βασικά δομικά μέρη, π.χ. τον φέροντα οργανισμό, τις τοιχοποιίες, τα επιχρίσματα κ.λπ., και για μια κανονική συντήρηση του κτιρίου στη διάρκεια της ζωής του. Για τα τεχνικά συστήματα ή άλλα δομικά στοιχεία, η διάρκεια ζωής είναι πολύ μικρότερη και καθορίζεται ξεχωριστά σύμφωνα με το είδος της χρήσης, τις οδηγίες των κατασκευαστών τους και τους ειδικούς τεχνικούς κανονισμούς.

[16] Τα εργαλεία υπολογισμού της ενεργειακής και της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων είναι στις μέρες μας πάρα πολλά και με μεγάλο εύρος, από απλοποιημένα μέχρι πολύ εξειδικευμένα, ελεύθερα ή εμπορικά. Ταυτόχρονα, καθώς η (υψηλή) ενεργειακή απόδοση οφείλει να πιστοποιείται με κάποιον τρόπο (πιστοποιητικό ή πρότυπο) από κάποιον δημόσιο ή ιδιωτικό φορέα ή οργανισμό, υπάρχουν κανόνες στους οποίους πρέπει να υπακούει ο σχεδιασμός από τα πρώτα κιόλας στάδια της σύλληψης ενός κτιρίου. Αυτοί οι κανόνες και οι αρχές σχεδιασμού παρέχονται συνήθως με τη μορφή λιστών ελέγχου (checklist), στις οποίες όλες οι διαφορετικές παράμετροι που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση και την περιβαλλοντική επίδραση ενός κτιρίου κατηγοριοποιούνται και αναλύονται σε επιμέρους υπο-παραμέτρους. Εξέχοντα ρόλο στην ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου παίζει το ενεργειακό του ισοζύγιο.

[17] Καθώς τα κτίρια (σχεδόν) μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης βασίζονται αναγκαστικά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σημαντικό τμήμα του σχεδιασμού τους πρέπει να σχετίζεται με αυτές τις τεχνολογίες. Κατά συνέχεια, η ενσωμάτωση τεχνολογιών ΑΠΕ (βλ. Κεφ. 11) στα κτίρια ή/και στον περιβάλλοντα χώρο τους παύει να αποτελεί μια εκ των υστέρων προσθήκη, αλλά πρέπει και οφείλει να αποτελεί παράμετρο του σχεδιασμού από τα πρώτα κιόλας στάδια. Αντίστοιχα, οι τεχνολογίες ΑΠΕ και άλλες επιλεγμένες τεχνολογίες που ενισχύουν την περιβαλλοντικά φιλική εικόνα του κτιρίου ενσωματώνονται στον σχεδιασμό και την κατασκευή, ενώ η λειτουργία, η συντήρηση και η πιθανή αντικατάστασή τους πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για επόμενα στάδια του κύκλου ζωής του κτιρίου μέχρι την κατεδάφιση/ανακύκλωσή του.

[18] Τα κρίσιμα δομικά συστήματα (φέρων οργανισμός και πληρώσεις) έχουν σημαντικό ρόλο και στη συνολική περιβαλλοντική επίδραση ενός κτιρίου κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Μάλιστα, αφού αφορούν την κατασκευή, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την αρχική ενσωματωμένη ενέργεια και τον ενσωματωμένο άνθρακα (*embodied carbon*) (βλ. Κεφ. 1). Συστήματα δόμησης και υλικά, όπως αυτά έχουν παρουσιαστεί στο Κεφ. 1, με χαρακτηριστικά όπως η χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και ο σχεδιασμός και η κατασκευή με στόχο την αποσυναρμολόγηση διαμορφώνουν σε μεγάλο βαθμό την περιβαλλοντική επίδραση του κτιρίου κυρίως στην αρχή του κύκλου ζωής του, αλλά και –σε μικρότερο βαθμό– στα επόμενα στάδια, μέχρι το τέλος του.

2. Η **γεωγραφική θέση**, η οποία εξετάζεται ως προς,

   α) Την **κλιματική ζώνη** (για την Ελλάδα υπάρχουν 4 κατηγορίες: Α, Β, Γ, ή Δ) (βλ. Κεφ. 2, Εικόνα 2.4), στην οποία βρίσκεται το γήπεδο του κτιρίου και επομένως τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν εκεί.

   β) Το **υψόμετρο** του γηπέδου (μετρούμενο από τη στάθμη της θάλασσας) και κυρίως το εάν βρίσκεται σε υψόμετρο άνω των 500 μ., διότι στην περίπτωση αυτή το γήπεδο «αλλάζει κατηγορία κλιματικής ζώνης» προς το δυσμενέστερο βάσει του κανονισμού.

3. Η κύρια **χρήση**. Σε περίπτωση κτιρίων με σύνθετη χρήση (πολλές διαφορετικές χρήσεις στο ίδιο κτίριο) απαιτείται η διάκρισή τους στη μοναδική «κύρια» και σε μία ή περισσότερες «δευτερεύουσες» χρήσεις, καθώς και η αποτίμηση της βαρύτητας που έχει η κάθεμία από τις χρήσεις, σε «ποσοστιαία (%) μεγέθη» επί της συνολικής επιφάνειας του κτιρίου.
4. Τα «**τυπικά χαρακτηριστικά**» του υφιστάμενου ή του νέου κτιρίου, τα οποία προσδιορίζονται από την ανάλυση και τεκμηρίωση των ακόλουθων παραμέτρων:

   α) τον «**τύπο**» του κτιρίου. Εξετάζεται η τυπολογία του σχεδιασμού, συγκρινόμενη με άλλες αντίστοιχες ή ανάλογες τυπολογίες, σε συνδυασμό με την κύρια χρήση του και καθορίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της επιλεγμένης διάρθρωσης/διάταξης (π.χ. κτίριο σε πτέρυγες, με αίθρια, το ψηλό/χαμηλό του ύψους, την εσωτερική οργάνωση των χώρων και των κυκλοφοριακών ροών κ.λπ.),

   β) τις «**ζώνες**» λειτουργίας, οι οποίες συνήθως ορίζουν και τις «ενεργειακές-θερμικές ζώνες», στις οποίες οργανώνεται (διαχωρίζεται) το κτίριο καθ' ύψος και κατά πλάτος, σε συνδυασμό με τα όσα προβλέπονται βάσει των χρήσεων και της τυπολογίας του, που προηγούνται (βλ. 4.1.),

      (i) η ωφέλιμη επιφάνεια για κάθε επιμέρους χρήση/ζώνη (βλ. επίσης σημείο 3),

      (ii) το μήκος των εξωτερικών επιφανειών για κάθε επιμέρους χρήση/ζώνη (ψυχόμενη επιφάνεια),

      (iii) το μήκος των διαχωριστικών επιφανειών (τοίχοι) για κάθε επιμέρους χρήση/ζώνη,

      (iv) τις μη θερμαινόμενες ζώνες (μη θερμαινόμενοι χώροι – ΜΘΧ) και την επιφάνεια αυτών.

   γ) τις **ειδικές διαμορφώσεις** (και προσαρτήματα) στο κελύφους, δηλαδή:

      (i) το εάν το κτίριο διαθέτει στέγη και το είδος αυτής (ανοικτού/κλειστού τύπου κ.λπ.),

      (ii) το εάν το κτίριο βρίσκεται πάνω σε pilotis ή

      (iii) το εάν το κτίριο διαθέτει υπόγειο, ή είναι τοποθετημένο επί του εδάφους,

      (iv) το εάν το κτίριο διαθέτει προεξοχές (οριζόντιες ή και κατακόρυφες) που να επηρεάζουν την έκθεση του στην ηλιακή ακτινοβολία.

5. Ξένα στοιχεία (π.χ. καμινάδες ή και ψηλά κτίρια, ή μεγάλες αντανακλαστικές επιφάνειες κ.λπ.) που βρίσκονται κοντά στο κτίριο και τα οποία δύνανται, στη διάρκεια της ημέρας, να επηρεάσουν έμμεσα/άμεσα την ενεργειακή κατάσταση του κτιρίου.

   α) Τον αριθμό των ορατών **όψεων** του κτιρίου (αρ. 4, 3, 2, 1), δείκτης που καθορίζει τον τρόπο έκθεσης του κτιρίου προς το άμεσο περιβάλλον του είτε πρόκειται για εφαπτόμενα

(οικοδομικό σύστημα = συνεχές) ή γειτονικά (οικοδομικό σύστημα = πανταχόθεν ελεύθερο) σε αυτό οικοδομήματα είτε πρόκειται για ανοικτούς χώρους. Στο σημείο αυτό τεκμηριώνεται και η επιρροή του περιβάλλοντος υπαίθριου χώρου του κτιρίου σε συνδυασμό με τους υφιστάμενους ανοικτούς χώρους στον άμεσο περίγυρο του.

β) τον **προσανατολισμό** του κτιρίου, για τον καθορισμό:

- του τρόπου έκθεσης –ηλιασμού/σκίασης– των επιφανειών του κελύφους, υπολογιζόμενου ως συνολικό εμβαδόν, ξεχωριστά για κάθε διαφορετικά προσανατολισμένη όψη, αφαιρουμένου του εμβαδού των ανοιγμάτων,
- του τρόπου έκθεσης –ηλιασμού/σκίασης– των ανοιγμάτων, υπολογιζόμενων αφενός ως συνολικό εμβαδόν ανοιγμάτων ξεχωριστά για κάθε διαφορετικά προσανατολισμένη όψη, αφετέρου ως ποσοστό επί τοις εκατό (%) ανοιγμένο στο σύνολο της αντίστοιχης επιφάνειας κελύφους.

6. Τα «**γεωμετρικά χαρακτηριστικά**» του κτιρίου τα οποία αφορούν τόσο τον τρόπο με τον οποίο διαπλάθεται ο όγκος του κτιρίου όσο και τα επιμέρους γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κελύφους του κτιρίου που αποτελεί το κατεξοχήν δομικό μέρος του κτιριακού οργανισμού με επιρροή στην ενεργειακή και περιβαλλοντική συμπεριφορά που μας ενδιαφέρει. Συγκεκριμένα εξετάζονται:

   α) το **εμβαδόν** (μεικτό) του κτιρίου στο σύνολο του και ανά επίπεδο (όροφος),

   β) το **ύψος** (μεικτό) του κτιρίου –εάν πρόκειται για έναν ενιαίο όγκο– ή το ύψος για κάθε επιμέρους τμήμα, ο αριθμός των ορόφων του και το μέσο ύψος ανά όροφο,

   γ) η **διάπλαση του όγκου** [V], μετρούμενος σε m^3. (V = Μήκος x Πλάτος x Ύψος), στο σύνολο του και στα τυχόν επιμέρους μέρη του,

   δ) η αναλογία [**S/V**], όπου S είναι το εμβαδόν του αναπτύγματος του κελύφους του κτιρίου και V είναι ο όγκος του κτιρίου,

   ε) Το «**συμπαγές**» του κτιρίου, το οποίο καθορίζεται από την αναλογία του εμβαδού των ανοιγμάτων [S] εκφρασμένο ως ποσοστό επί τοις εκατό (%) προς το εμβαδόν του κελύφους του κτιρίου [S] – ποσοστό διαφανούς/αδιαφανούς κελύφους.

7. Τα κατασκευαστικά-**οικοδομικά χαρακτηριστικά**. Τα στοιχεία που αναλύονται είναι κυρίως τα μέρη του κτιριακού οργανισμού που απαρτίζουν το κέλυφος του και περιλαμβάνουν:

   - όλους τους εξωτερικούς τοίχους και τα προσαρτήματα τους (προεξοχές –γείσα, προστεγάσματα και εξώστες–, εσοχές – ημιυπαίθριους, στοιχεία ή/και συστήματα σκίασης κ.λπ.), καθώς και τα εμφανή ή καλυμμένα μέρη του φέροντα οργανισμού,
   - όλα τα ανοίγματα με τα αντίστοιχα συστήματα κουφωμάτων,
   - τη στέγη ή το δώμα,
   - το κατώτερο πάτωμα είτε αυτό είναι σε υπόγειο είτε επί εδάφους είτε επί pilotis.

Όλα τα παραπάνω δομικά μέρη αναλύονται πλήρως ως προς τον τρόπο κατασκευής τους, δηλαδή για όλα τα υλικά από τα οποία αποτελείται το κάθε επιμέρους δομικό μέρος καταγράφονται οι θερμικές και φυσικές τους ιδιότητες (βλ. Κεφ. 5). Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο συντελεστής θερμοπερατότητας [U] (σε $W/(m^2.K)$yearly) για κάθε δομικό μέρος του κελύφους, καθώς και επιμέρους δείκτες, όπως η αντίσταση θερμική μετάβασης εσωτερικά [R_i] / εξωτερικά [R_a], η αντίσταση θερμογέφυρας [R_Λ] και η αντίσταση θερμοπερατότητας [1/U]. Στην περίπτωση σύνθετων συστημάτων, τα οποία βρίσκονται σε τουλάχιστον δύο

διαφορετικές καταστάσεις, όπως τα κουφώματα (ανοικτά/κλειστά), ελέγχονται και άλλες παράμετροι, όπως η αεροστεγανότητα, η φωτοπερατότητα, η ικανότητα εκπομπής κ.λπ., που επηρεάζουν σε κάποιον βαθμό την ενεργειακή λειτουργία των συτημάτων.

8. Τα τυχόν **παθητικά συστήματα** (βλ. Κεφ. 7 και 8), ενσωματωμένα ή και προσαρτημένα στο κτίριο, που αξιοποιούνται για την ενεργειακή και περιβαλλοντική βελτίωση-αναβάθμιση του κτιρίου συνολικά ή και των επιμέρους μερών του (π.χ. κέλυφος, στέγαση κ.λπ.).

Τα **τεχνικά συστήματα** (ΤΣ) που επιλέγονται κυρίως για την παροχή θέρμανσης, ψύξης, αερισμού, φωτισμού και παραγωγής ΖΝΧ. Η παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών των τεχνικών συστημάτων και ειδικά εκείνων που συντελούν και επηρεάζουν στην ενεργειακή και περιβαλλοντική συμπεριφορά των κτιρίων ΣΜΚΕ/NZEB περιλαμβάνονται στις αντίστοιχες μελέτες σχεδιασμού των ηλεκτρολογικών και μηχανολογικών υπηρεσιών και ενσωματώνονται στη διαδικασία προσομοίωσης και αποτίμηση της απόδοσης του κτιρίου λειτουργώντας συμπληρωματικά με τα προαναφερθέντα.

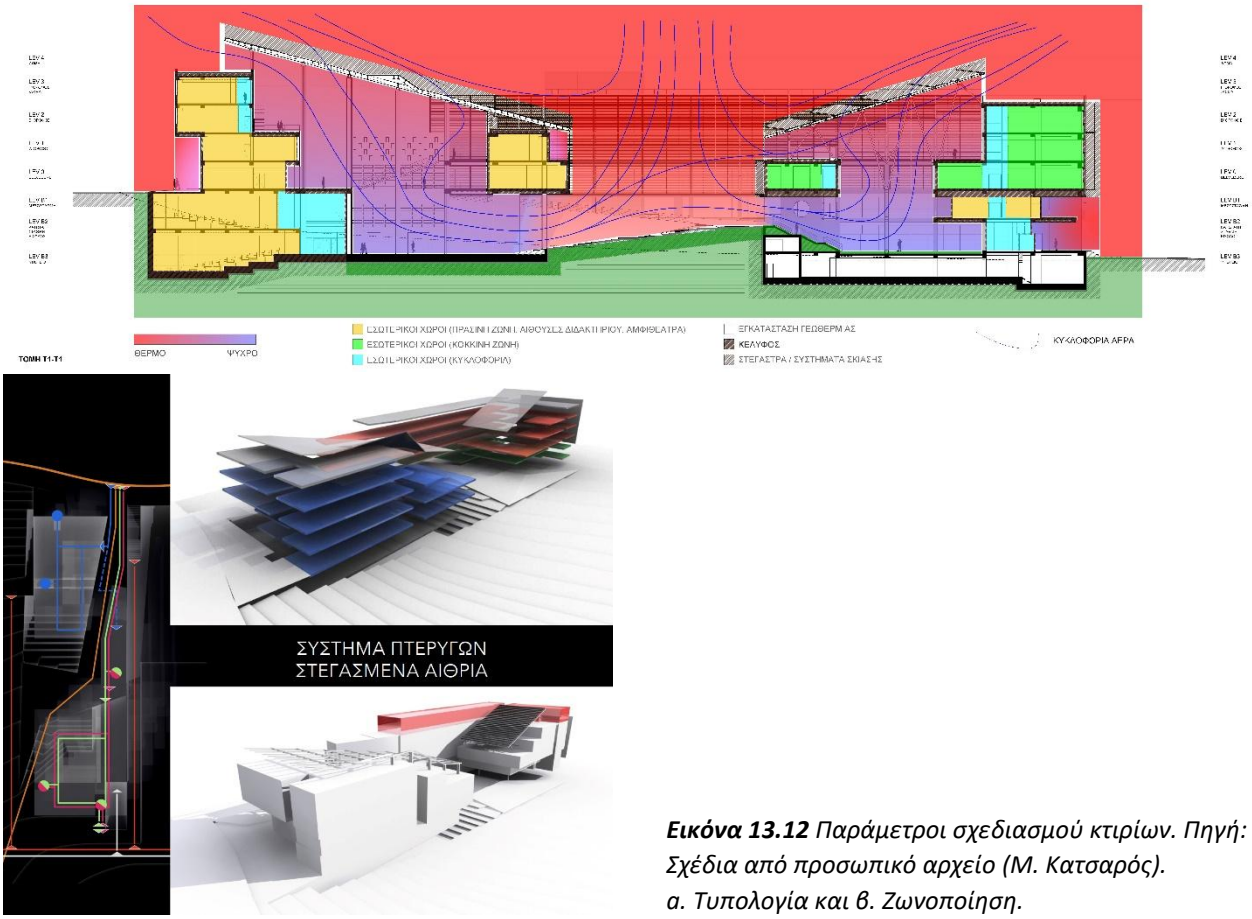
Στα τεχνικά συστήματα των κτιρίων ΣΜΚΕ/NZEB περιλαμβάνονται και τα συστήματα παραγωγής-αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (βλ. Κεφ. 11) είτε συνεργάζονται με τα (ΤΣ) παρέχοντας την απαραίτητη ενέργεια λειτουργίας είτε όχι.

Ευκαιρίες και κίνδυνοι

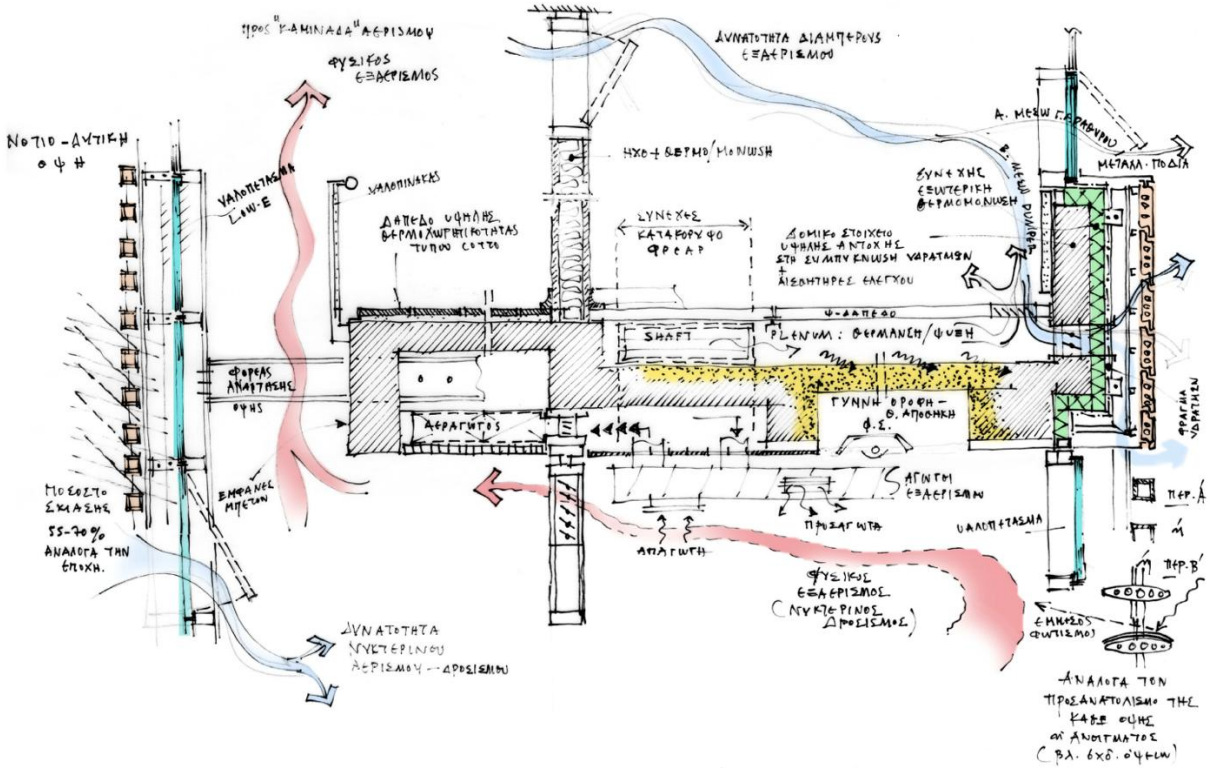
Σε καθένα από τα παραπάνω στάδια, σημαντικό εργαλείο αποτελεί η ανάλυση SWOT, αρκτικόλεξο που προκύπτει από τις αγγλικές λέξεις Strengths, Weaknesses, Opportunities Threats) («Ανάλυση SWOT», 2024). Στον σχεδιασμό, κατά την ανάλυση SWOT μελετώνται τα δυνατά (Strengths) και αδύνατα (Weaknesses) σημεία, καθώς και οι ευκαιρίες (Opportunities) και οι απειλές (Threats) που υπάρχουν.

Οι αρχές σχεδιασμού των κτιρίων ΣΜΚΕ/NZEB δεν είναι κάτι το αυτόνομο-αυτοτελές, αλλά εξαρτώνται άμεσα από τις διάφορες προκλήσεις του παρόντος και του μέλλοντος και πρέπει να οριστούν σε ένα ευρύτερο σύνολο. Σύμφωνα με το Buildings Performance Institute Europe, τα κτίρια NZEB πρέπει να έχουν τα εξής χαρακτηριστικά (BPIE, 2011):

- Να έχουν ξεκάθαρους στόχους και όρους, αποφεύγοντας παρεξηγήσεις και λάθη ενσωμάτωσης.
- Να είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτές προτάσεις.
- Να είναι επαρκώς ευέλικτα και προσαρμόσιμα σε τοπικές κλιματικές συνθήκες, κτιριακές παραδόσεις κ.λπ., χωρίς να διακινδυνεύουν τον γενικό στόχο.
- Να χτίζονται με βάση τα ήδη υπάρχοντα πρότυπα χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.
- Να επιτρέπουν τον «διαγωνισμό» μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών ή ακόμα και να φιλοξενούν διαφορετικές τεχνολογίες.
- Να είναι φιλόδοξα σε θέματα περιβαλλοντικών επιδράσεων και να υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας τους ανάλογα με τον ρυθμό ανάπτυξης των τεχνολογικών απαιτήσεων.
- Να έχουν μελετηθεί με βάση τις απαιτήσεις όλων των φορέων (πολιτικοί, σχεδιαστές, βιομηχανία, επενδυτές, χρήστες κ.λπ.).
- Να είναι πηγή έμπνευσης και να ωθούν τη γρήγορη ενσωμάτωσή τους στο κοινωνικό και δομημένο περιβάλλον τους.



Εικόνα 13.12 *Παράμετροι σχεδιασμού κτιρίων. Πηγή: Σχέδια από προσωπικό αρχείο (Μ. Κατσαρός).*
α. Τυπολογία και β. Ζωνοποίηση.



Εικόνα 13.13 *Λεπτομερής σχεδιασμός του κελύφους. Πηγή: Σχέδιο από προσωπικό αρχείο (Μ. Κατσαρός).*

13.4 Η ελληνική περίπτωση

13.4.1 Ελληνική ιδιαιτερότητα

Σύμφωνα με το άρθρο 9 του Ν. 4122 του 2013, «από την 1-1-2021, όλα τα νέα κτίρια πρέπει να είναι σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας» (ΣΜΚΕ). Το εθνικό σχέδιο για την απόδοση χαρακτηρισμού «ΣΜΚΕ» σε όλα τα νέα κτίρια προϋποθέτει τον καθορισμό των τεχνικών χαρακτηριστικών και προδιαγραφών, τόσο για τα στάδια του σχεδιασμού και της κατασκευής τους όσο και για το στάδιο της λειτουργίας των κτιρίων αυτών.

Άλλες πρόνοιες του ίδιου άρθρου αφορούν άλλες σημαντικές προϋποθέσεις που εξετάζουν τη σχέση κόστους-οφέλους για τον οικονομικό κύκλο ζωής των συγκεκριμένων κτιρίων, ώστε να διασφαλίζονται η οικονομική αποτελεσματικότητα των επενδύσεων στον κτιριακό τομέα, η διαφοροποίηση των στόχων ανάλογα με την κύρια χρήση του κάθε νέου κτιρίου –η οποία δύναται να διαφοροποιεί εν μέρει τα απαιτούμενα τεχνικά χαρακτηριστικά–, καθώς και επιμέρους κίνητρα και μέτρα για την ενθάρρυνση της παραγωγής νέων κτιρίων με τα εν λόγω χαρακτηριστικά (βλ. άρθρο ΝΟΚ, 2012,15 κ.λπ.).

Από τη διατύπωση του τίτλου του άρθρου 9: «Κτίρια με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας», παρατηρείται ότι κατά το πρώιμο στάδιο αυτής της συζήτησης, η έμφαση δίνεται στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του κτηριακού τομέα –κατασκευή, λειτουργία–, που είναι πολύ σημαντικό μέρος της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (όπως έχει αναφερθεί στο Κεφ. 1, περίπου στο ±40%, κατά το έτος 2013). Αυτό υποδεικνύει και το αρχικό κίνητρο του νομοθέτη να περιορίσει το κόστος που προκαλείται, το οποίο είναι ταυτόχρονα οικονομικό και περιβαλλοντικό, και υπεύθυνο κατά ένα αντίστοιχα μεγάλο ποσοστό για την ετήσια παραγωγή ρύπων στις χώρες της ΕΕ.

Παρακάτω θα εξεταστεί και μια άλλη σημαντική πτυχή –η ουσιαστικότερη– που προκύπτει από τον τίτλο του εν λόγω άρθρου, όπου το ερώτημα που τίθεται δεδομένου ότι στην πράξη η κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή και λειτουργία των κτιρίων δεν είναι δυνατόν να μηδενιστεί. Ούτε μπορεί να προσδιοριστεί με σαφήνεια και ευρεία εφαρμογή το ποια είναι η αριθμητική τιμή της απαίτησης του «σχεδόν μηδενική», κάτι που γίνεται ακόμη περισσότερο σχετικό εάν συγκριθούν οι διαφορετικές χρήσεις των κτιρίων μεταξύ τους, π.χ. την αριθμητική τιμή που θα αντιστοιχεί σε ένα κτίριο με χρήση την κατοικία σε σχέση με ένα κτίριο με χρήση νοσοκομείου.

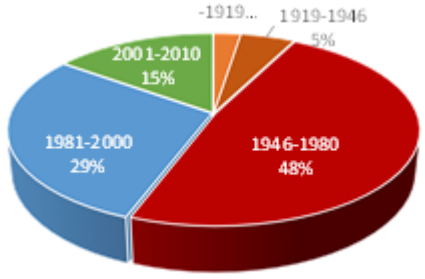
Η απόδοση συγκεκριμένων γενικευμένων τιμών στην απαίτηση «σχεδόν μηδενική» είναι αδύνατη και για άλλους λόγους, όπως η δημιουργία εμποδίων για την επανάχρηση των κτιρίων και ειδικά όταν θα υπάρχει ανάγκη για αλλαγή στην αρχική χρήση του κτιρίου και, άρα, αλλαγή στην απόλυτη αριθμητική τιμή του «σχεδόν μηδενική».

Όπως τελικά φάνηκε στην πορεία της εφαρμογής της νομοθεσίας για τα κτίρια ΣΜΚΕ, ο τίτλος που χαρακτηρίζει τα εν λόγω κτίρια έχει πολλές και διαφορετικές εκδοχές, ανάλογα με τη διαφοροποίηση των επιδιωκόμενων στόχων, και εκφράζει ακριβώς το ότι βρισκόμαστε ακόμη σε μια μεταβατική περίοδο –στην αρχή μιας νέας εποχής– ως προς τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται τα κτίρια. Μια εποχή που παραφράζοντας το κάποτε νεωτεριστικό σύνθημα του Mies van der Rohe θα λέγαμε ότι έχει ως νέο σύνθημα το «form follows performance» – σε ελληνική μετάφραση, «η μορφή ακολουθεί την απόδοση».

13.4.2 Το υφιστάμενο κτιριακό απόθεμα

Το υφιστάμενο κτιριακό δυναμικό (απόθεμα) στην Ελλάδα είναι πολύ μεγάλο και στην περίπτωση των κτιρίων κατοικίας (μονοκατοικιών και πολυκατοικιών) ένα ποσοστό αυτών, μεγαλύτερο του 50%, δεν διαθέτει θερμομόνωση (Ελληνική Στατιστική Αρχή, χ.ε.), καθώς έχουν κατασκευαστεί πριν από την εφαρμογή του Κανονισμού Θερμομόνωσης (1981). Από τα κτίρια αυτά, το ποσοστό αυτών που κατασκευάστηκαν πριν

από το 1946 (έως το 1919 και μεταξύ του 1919 και του 1945) αγγίζουν το 7,5% και αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία ιστορικών ή/και παραδοσιακών κτιρίων λόγω των αρχιτεκτονικών και των κατασκευαστικών τους χαρακτηριστικών (Pallis et al., 2019 και Alexandrou et al., 2019). Οι κατασκευές της δεκαετίας 1980-1990 (1η δεκαετία εφαρμογής του Κανονισμού Θερμομόνωσης) χαρακτηρίζονται από προβληματική θερμομονωτική ικανότητα και, πιο συγκεκριμένα, ανεπαρκή θερμομόνωση στις όψεις και στη στέγαση, απουσία διπλών υαλοπινάκων (στο 10% επί του συνόλου) και μειωμένη ανεμοστεγανότητα των κουφωμάτων (Balaras et al., 2007).



Π1 -1919: 2,5%

Π2 1919-1945: 5,0%

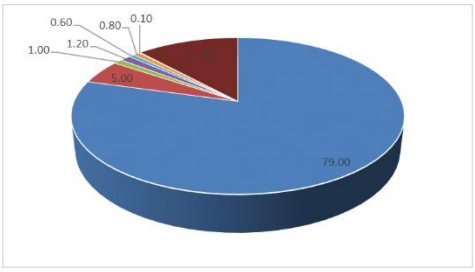
Π3 1946-80: 48,0%

Π4 1981-2000: 29,0%

Π5 2001-2010: 15,0%

Εικόνα 13.14. *Ποσοστά κτιρίων κατοικίας για τις διαφορετικές περιόδους κατασκευής (Π1, 2, 3, 4, 5). Πηγή: Προσαρμογή από την Ελληνική Στατιστική Αρχή (χ.ε.).*

79%	Κατοικίες αποκλειστικής ή μεικτής χρήσης
5%	Γραφεία
1%	Ξενοδοχεία
1,2%	Μοναστήρια ή εκκλησίες
0,6%	Σχολεία
0,8%	Βιομηχανικά κτίρια (εργοστάσια, εργαστήρια)
0,1%	Κτίρια περίθαλψης και υγείας
11,8%	Άλλης χρήσης, επαγγελματικά κ.λπ.



Εικόνα 13.15. *Ποσοστά χρήσεων κτιρίων. Πηγή: Προσαρμογή από την Ελληνική Στατιστική Αρχή (χ.ε.).*

Με δεδομένο το μέγεθος του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος, είναι σαφές ότι ο βιώσιμος ανασχεδιασμός και η ενεργειακή αναβάθμισή του μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας για θέρμανση και ψύξη και, κατά συνέπεια, στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Ji et al., 2019). Το γεγονός αυτό είναι σε συμφωνία με τους στόχους της ΕΕ για το 2020 και το 2030, καθώς και τους μακροπρόθεσμους στόχους που θέτει ο low carbon economy roadmap 2050 (Pallis et al., 2019), αλλά και με τις έννοιες των κτιρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (NZEB, Nearly Zero Energy Buildings) και μηδενικού άνθρακα (Zero Carbon), όπως αυτά τίθενται στην Ευρωπαϊκή Οδηγία EPBD για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (EPBD – Directive 2002/91/EC, EPBD recast – Directive 2010/31/EU, revised EPBD – Directive 2018/844/EU). Παράλληλα, η βελτίωση της ενεργειακής και βιοκλιματικής επίδοσης των κτιρίων μπορεί να συμβάλει σημαντικά και στη μείωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων που παρατηρούνται στο αστικό μικροκλίμα.

Η ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων κτιρίων είναι σημαντική, καθώς η κατεδάφιση υφιστάμενων κτιρίων και η αντικατάστασή τους με νέα, ενεργειακά αποδοτικότερα και πιο περιβαλλοντικά φιλικά δεν αποτελεί πάντα την πιο ενδεδειγμένη οικονομικά, οικολογικά ή κοινωνικά εναλλακτική λύση, ενώ είναι χρονικά απροσδιόριστη, δεδομένου του χαμηλού ρυθμού ανέγερσης νέων κατασκευών.

Για το ελληνικό κτιριακό απόθεμα, οι πιο κοινές επεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης αναφέρονται κυρίως σε επεμβάσεις στο κέλυφος, δηλαδή στη θερμική θωράκιση του κελύφους (π.χ. θερμομόνωση τοιχοποιίας, δωμάτων ή/και στέγασης, αντικατάσταση μονών υαλοπινάκων με διπλούς, στεγανοποίηση των

αρμών των κουφωμάτων), ωστόσο κατά κύριο λόγο εστιάζουν στην αναβάθμιση των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων (συντήρηση ή/και αντικατάσταση εγκαταστάσεων θέρμανσης/ψύξης, εγκατάσταση θερμοστατών, ανεμιστήρων οροφής, ηλιακών συλλεκτών για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ΖΝΧ), ενεργειακά αποδοτικών λαμπτήρων, συστημάτων διαχείρισης κτιρίου –BMS– κ.λπ.) (Pallis et al., 2019· Balaras et al., 2007· Greek Ministry of Environment and Energy). Στις αρχικές επεμβάσεις, προηγούμενες μελέτες (Balaras et al., 2007· Gaglia et al., 2007· Morbiducci & Vite, 2017· Pallis et al., 2019· Xing et al., 2011) σημειώνουν ότι μακράν η πιο αποτελεσματική στρατηγική μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας (Energy Conservation Measures – ECM) είναι η προσθήκη θερμομόνωσης στους εξωτερικούς τοίχους, ενώ και η αύξηση της ανεμοστεγανότητας των κουφωμάτων, με στόχο τη μείωση της διείσδυσης (infiltration), και η προσθήκη διπλών υαλοστασίων είναι εξίσου αποτελεσματικές (Balaras et al., 2007).

13.5 Προϋποθέσεις και επεκτάσεις

13.5.1 Βελτιστοποίηση κόστους

Η βελτιστοποίηση του κόστους (*cost optimality/cost efficiency*) στα κτίρια ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ αποτελεί μια σημαντική παράμετρο στην προσπάθεια μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η βελτιστοποίηση κόστους αναφέρεται στην εξεύρεση του σημείου όπου η συνδυασμένη δαπάνη για την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση του κτιρίου είναι η χαμηλότερη δυνατή, λαμβάνοντας υπόψη τις επενδύσεις σε ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες και πρακτικές. Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει την αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων κατασκευής και τεχνολογιών, ώστε να προσδιοριστεί η βέλτιστη λύση που επιτυγχάνει την απαιτούμενη ενεργειακή απόδοση με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Για τα κτίρια ΝΖΕΒ, η βελτιστοποίηση κόστους είναι κρίσιμη, καθώς περιλαμβάνει την ισορροπία μεταξύ του αρχικού κόστους για την εγκατάσταση ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών και της εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του κτιρίου. Η βελτιστοποίηση του κόστους στοχεύει στην επίτευξη ενός ιδανικού σημείου, όπου το κόστος του κύκλου ζωής του κτιρίου, δηλαδή το άθροισμα των αρχικών επενδύσεων και του κόστους λειτουργίας, είναι ελάχιστο.

Η βελτιστοποίηση του κόστους στα κτίρια ΝΖΕΒ είναι πολύπλοκη, διότι εμπλέκει διαφορετικούς παράγοντες, όπως η τοπική κλιματική ζώνη, οι τιμές ενέργειας, η διάρκεια ζωής των υλικών και η εξέλιξη των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, υπάρχει πάντα η πρόκληση της αρχικής επένδυσης, η οποία μπορεί να είναι υψηλότερη σε σύγκριση με τα συμβατικά κτίρια, αλλά να αντισταθμίζεται από τις μακροπρόθεσμες εξοικονομήσεις.

Η έννοια της βελτιστοποίησης κόστους (*cost-optimal*) στα κτίρια ΝΖΕΒ (Nearly Zero Energy Buildings) είναι κεντρική στις πολιτικές για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και συνδέεται άμεσα με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Η προσέγγιση αυτή αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος του κτιρίου κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του με στόχο η επένδυση στην ενεργειακή απόδοση να είναι ανταποδοτική σε ένα εύλογο χρονικό εύρος.

Σύμφωνα με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ, τα κράτη μέλη της ΕΕ είναι υποχρεωμένα να καθορίζουν τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης για τα κτίρια με βάση τη βελτιστοποίηση κόστους (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2012). Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη βελτιστοποίηση του κόστους είναι οι παρακάτω:

- **Αρχικό κόστος επένδυσης:** Το αρχικό κόστος επένδυσης οφείλεται κυρίως στις δαπάνες για την αγορά υλικών υψηλής απόδοσης, την εγκατάσταση συστημάτων ΑΠΕ και τις υψηλές τιμές θερμομόνωσης. Μελέτες δείχνουν ότι οι αρχικές επενδύσεις είναι συχνά υψηλότερες για τα κτίρια

ΝΖΕΒ, αλλά αντισταθμίζονται στα επόμενα στάδια του κύκλου ζωής τους και, κυρίως, στο στάδιο της χρήσης που αποτελεί και το μεγαλύτερο σε χρονική διάρκεια, από την εξοικονόμηση ενέργειας από λειτουργικά κόστη και από την κατανάλωση συμβατικής ενέργειας για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό (Ferrara et al., 2018). Μείζονα ρόλο στις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου και συνεπώς στην ενεργειακή ζήτηση παίζουν τα χαρακτηριστικά του κλίματος και του μικροκλίματος της περιοχής μελέτης (βλ. Κεφ. 2). Συνεπώς, οι στρατηγικές για την επίτευξη της βέλτιστης σχέσης κόστους-απόδοσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με το κλίμα και τις καταλληλότερες, για κάθε περίπτωση, στρατηγικές βιοκλιματικού σχεδιασμού, αλλά και ενεργητικών συστημάτων και τεχνολογιών ΑΠΕ (Ascione et al., 2016).

- **Λειτουργικό κόστος και εξοικονόμηση συμβατικής ενέργειας:** Η χρήση ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και φωτισμού μειώνει την κατανάλωση συμβατικής ενέργειας και, άρα, τις δαπάνες που προκύπτουν από αυτή, και μακροπρόθεσμα μειώνει το συνολικό κόστος λειτουργίας του κτιρίου (Johansson et al., 2014).
- **Κύκλος Ζωής του Κτιρίου:** Η ανάλυση του κύκλου ζωής (Life Cycle Costing – LCC) είναι κρίσιμη για την κατανόηση της βελτιστοποίησης κόστους. Η μέθοδος LCC λαμβάνει υπόψη το αρχικό κόστος, τα κόστη συντήρησης και το ενεργειακό κόστος κατά τη διάρκεια της ζωής του κτιρίου (D'Oca et al., 2017).

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει εκδώσει οδηγίες για την εφαρμογή της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης κόστους, οι οποίες καλύπτουν διάφορες κατηγορίες κτιρίων, όπως νέα κτίρια, κτίρια υπό ανακαίνιση και συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Τα κράτη μέλη είναι υποχρεωμένα να χρησιμοποιούν αυτή τη μεθοδολογία για να καθορίζουν τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης και να διασφαλίζουν ότι οι απαιτήσεις αυτές είναι οικονομικά βιώσιμες (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2012).

13.5.2 Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (βλ. Κεφ. 1, παρ. 1.6) και η ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) σχετίζονται στενά με τα κτίρια ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ, καθώς αποτελούν βασικά εργαλεία για την εκτίμηση της συνολικής περιβαλλοντικής επίπτωσης ενός κτιρίου σε όλη τη διάρκεια της ζωής του. Στόχος αυτών των εργαλείων είναι η ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνονται τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης που ορίζουν τα κτίρια ΝΖΕΒ.

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα ενός κτιρίου αναφέρεται στις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (κυρίως CO_2) και σε άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη χρήση των υλικών, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση του κτιρίου, καθώς και από τη διάθεσή του στο τέλος της ζωής του. Τα κτίρια ΝΖΕΒ έχουν κύριο στόχο την ελαχιστοποίηση των εκπομπών κατά τη λειτουργική τους φάση, αλλά η συνολική περιβαλλοντική επίπτωση εξαρτάται επίσης και από τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζονται και ανακυκλώνονται τα υλικά τους.

Η ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) είναι μια συστηματική μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με όλα τα στάδια της ζωής ενός κτιρίου, από την παραγωγή των υλικών και την κατασκευή, μέχρι τη λειτουργία, τη συντήρηση και την απόρριψη ή ανακύκλωση των υλικών στο τέλος της ζωής του.

Στα κτίρια ΣΜΚΕ/ΝΖΕΒ, η LCA παίζει κρίσιμο ρόλο για διάφορους λόγους:

- **Συνολική Περιβαλλοντική Αξιολόγηση:** Ενώ τα κτίρια ΝΖΕΒ επιδιώκουν τη μηδενική κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, η LCA εξετάζει επίσης τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υλικών κατασκευής, της ενέργειας που καταναλώνεται στην παραγωγή αυτών των

υλικών, και των εκπομπών που συνδέονται με την κατασκευή και συντήρηση του κτιρίου (Ramesh, Prakash & Shukla, 2010).

- **Βελτιστοποίηση Υλικών και Τεχνολογιών:** Η LCA βοηθά τους σχεδιαστές να επιλέξουν υλικά και τεχνολογίες με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση των συνολικών εκπομπών του κτιρίου (Cabeza et al., 2014). Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών, υλικών με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις για την παραγωγή τους και τεχνολογιών που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας.
- **Εκτίμηση του Κύκλου Ζωής:** Η LCA επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών σχεδιασμού και κατασκευής για την επιλογή της βέλτιστης λύσης που συνδυάζει χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και υψηλή ενεργειακή απόδοση (Thomark, 2002).
- **Στρατηγική Μηδενικού Ενεργειακού Ισοζυγίου:** Για να επιτευχθεί το μηδενικό ενεργειακό ισοζύγιο, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων του κύκλου ζωής του κτιρίου. Η LCA παρέχει την απαραίτητη πληροφορία για την επίτευξη αυτής της στρατηγικής, συμβάλλοντας στην αειφορία του κτιρίου (Marszal et al., 2011).

13.5.3 Ο ρόλος του αρχιτέκτονα

Ο ρόλος του αρχιτέκτονα στον σχεδιασμό κτιρίων ΣΜΚΕ/NZEB είναι κρίσιμος και πολυδιάστατος, καθώς ο αρχιτέκτονας πρέπει να ενσωματώσει ποικίλες τεχνικές, αισθητικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους για να επιτύχει τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση, αλλά ταυτόχρονα να εξασφαλίζει και την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα, την άνεση και την αισθητική του κτιρίου.

Ο ρόλος του αρχιτέκτονα στον σχεδιασμό κτιρίων ΣΜΚΕ/NZEB περιλαμβάνει τις παρακάτω αρμοδιότητες:

- **Ολοκληρωμένος (ολιστικός) σχεδιασμός:** Ο αρχιτέκτονας είναι υπεύθυνος για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό του κτιρίου, ο οποίος περιλαμβάνει τη λειτουργία και τη μορφή, τον προσανατολισμό και τη χωροθέτηση. Σημαντικό κομμάτι του ολοκληρωμένου σχεδιασμού αφορά και την ενσωμάτωση παραμέτρων βιοκλιματικού και παθητικού σχεδιασμού (βλ. Κεφ. 5 και 6), με στόχο τη βέλτιστη εκμετάλλευση των κλιματικών παραμέτρων, με στόχο την ελαχιστοποίηση των αναγκών θέρμανσης, δροσισμού και φωτισμού. Ταυτόχρονα, ο σχεδιασμός του κελύφους του κτιρίου επηρεάζει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση και είναι ένας από τους κύριους τομείς όπου ο αρχιτέκτονας μπορεί να κάνει τη διαφορά (Attia et al., 2012). Ο σχεδιασμός με βάση το κλίμα και τις τοπικές συνθήκες αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τα κτίρια ΣΜΚΕ/NZEB, καθώς συμβάλλει στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και στην ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων (Jin et al., 2017).
- **Συντονισμός Μεταξύ Ειδικοτήτων:** Ο αρχιτέκτονας λειτουργεί ως ο συντονιστής μεταξύ των διαφόρων ειδικοτήτων που συμμετέχουν στον σχεδιασμό και στην κατασκευή ενός κτιρίου ΣΜΚΕ/NZEB. Η συνεργασία αυτή είναι απαραίτητη για την ενοποίηση και ενσωμάτωση των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και αερισμού στον συνολικό σχεδιασμό του κτιρίου (Hamdy, Hasan & Sirén, 2013).
- **Επιλογή Υλικών και Τεχνολογιών:** Η επιλογή των κατάλληλων υλικών και τεχνολογιών αποτελεί βασική ευθύνη του αρχιτέκτονα. Επιπλέον, ο αρχιτέκτονας πρέπει να ενσωματώσει συστήματα ενεργειακής παραγωγής και διαχείρισης από ανανεώσιμες πηγές (όπως φωτοβολταϊκά πάνελ) στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό με τρόπο που να είναι τόσο λειτουργικός όσο και αισθητικά αποδεκτός (Hernandez & Kenny, 2010).
- **Συμβουλευτική:** Ο αρχιτέκτονας συχνά λειτουργεί ως σύμβουλος για άλλες ειδικότητες, αλλά και για τους ιδιοκτήτες και τους χρήστες των κτιρίων, ενημερώνοντάς τους για διάφορα ζητήματα που αφορούν τον σχεδιασμό και την κατασκευή, αλλά και για τις δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας, με παθητικά και ενεργητικά μέσα (π.χ. ΑΠΕ και ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες).

Επίσης, οι αρχιτέκτονες εμπλέκονται ενεργά με τον ανασχεδιαμό υφιστάμενων κτιρίων, αλλά και στη διαδικασία αξιολόγησης της απόδοσης του κτιρίου (Jradi, Riffat & Yoo, 2017).

Σε μια νέα εποχή που όλα αλλάζουν, οι κίνδυνοι για το περιβάλλον είναι συνεχώς μεγαλύτεροι, ενώ η κλιματική κρίση οξύνεται και επιδεινώνεται συνεχώς, καταρρίπτοντας, το ένα μετά το άλλο, ιστορικά όρια και ακρότατα προηγούμενων δεκαετιών, ο αρχιτέκτονας καλείται να ανταποκριθεί σε όλες τις παραπάνω προκλήσεις, σχεδιάζοντας, κατασκευάζοντας και νουθετώντας. Στη νεότερη ιστορία, οι αρχιτέκτονες έχουν διανύσει μια μεγάλη πορεία στους τομείς που σχετίζονται με το περιβάλλον και το κλίμα. Αυτή η πορεία ξεκίνησε από τις πρώτες ενεργειακές κρίσεις του προηγούμενου αιώνα (δεκαετία 1970-1980), όπου η έμφαση δινόταν στην ενεργειακή κρίση και στην προσπάθεια ανεύρεσης εναλλακτικών μορφών ενέργειας, και κυρίως στην ηλιακή αρχιτεκτονική και τις στρατηγικές βιοκλιματικού σχεδιασμού. Σήμερα, στη δεύτερη πλέον δεκαετία του 21ου αιώνα, καλούνται να εφαρμόσουν μια ολιστική προσέγγιση στον σχεδιασμό και ανασχεδιασμό των κτιρίων, η οποία θα βασίζεται στη βιωσιμότητα σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους. Τα κτίρια ΣΜΚΕ/NZEB, νέα και υφιστάμενα, καλούνται να απαντήσουν στις σύγχρονες προκλήσεις και να αναστρέψουν –έστω και στην εκπνοή του χρόνου– την αρνητική τους επίδραση στο περιβάλλον και στο κλίμα.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Alexandrou, E., Katsaros, M., Aravantinos, D. & Axarli, K. (2019), Energy Efficiency in Historic Buildings 2018 Technical guidelines for energy efficiency interventions in buildings constructed before 1955 in Greece, In: Energy Efficiency in Historic Buildings 2018 Conf. Proc.

Alexandrou, E., Katsaros, M., Aravantinos, D., Axarli, K., Chadzidimitriou, A., Gotoudis, A., Theodosiou, T. & Tsikaloudaki, K. (2018). Energy Efficiency in Historic Buildings 2018 - Technical guidelines for energy efficiency interventions in buildings constructed before 1955 in Greece. In: T. Broström, L. Nilsen & S. Carlsten (Eds), *Conference Report. The 3rd International Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings International Conference, Visby, Sweden* (pp. 294-301). Uppsala University, Department of Art History. http://eehb2018.com/wp-content/uploads/2018/09/Conference-Report-The-3rd-International-Conference-on-Energy-Efficiency-in-Historic-Buildings.pdf

Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M. & Vanoli, G. P. (2016). Multi-stage and multi-objective optimization for energy retrofitting a developed hospital reference building: A new approach to assess cost-optimality. *Applied Energy*, *174*, pp. 37-68. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.078

Attia, S., Hamdy, M., O'Brien, W. & Carlucci, S. (2013). Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. *Energy and Buildings, 60*, pp. 110-124. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.016

Bahnam, R. (1969). *The Architecture of the Well-Tempered Environment*. Chicago, U.S.A., The University of Chicago Press (2nd edition 1984).

Balaras, C. A., Gaglia, A. G., Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y. & Lalas, D. P. (2007). European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings, Journal of Building and Environment, Vol. 42, No. 3, pp. 1298-1314, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.001

Bougiatioti, F., Alexandrou, E. & Katsaros, M. (2023), Sustainable refurbishment of existing, typical single-family residential buildings in Greece. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. https://doi.org/10.1108/IJBPA-09-2022-015

Buildings Performance Institute Europe (BPIE) (2011). *Nearly Zero-energy Buildings. Paving the way for effective implementation of policy requirements*. BPIE. https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_nZEB-study.pdf

Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G. & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29,* pp. 394-416. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037

Climate-resilient architecture: this is how we will protect cities. (2022, August 24). Tomorrow.City - the Biggest Platform About Urban Innovation. https://www.tomorrow.city/what-is-climate-resilient-architecture/

Directive 2002/91/EC. *EPBD (Energy Performance of Buildings Directive)*. European Parliament, Council of the European Union. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:001:0065:0071:EN:PDF

Directive 2010/31/EC. *EPBD RECAST*. European Parliament, Council of the European Union. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF

D'Oca, S., Ferrante, A., Ferrer, C., Pernetti, R., Gralka, A., Sebastian, R. & Veld, P. O. (2018). Technical, financial, and social barriers and challenges in deep building renovation: Integration of lessons learned from the H2020 cluster projects. *Buildings, 8*(12), 174. https://doi.org/10.3390/buildings8120174

Elefante, C. (2012). The Greenest Building Is... One That Is Already Built, Forum Journal, 27, pp. 62-72.

EPA United States Environmental Protection Agency. (2020). Life Cycle Assessment (LCA) Overview.

European Commission, Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency.

Ferrara, M., Monetti, V. & Fabrizio, E. (2018). Cost-optimal analysis for nearly zero energy buildings design and optimization: A critical review. *Energies, 11*(10), 1478. https://doi.org/10.3390/en11061478

Fuller, S. (2016), *Life-Cycle Cost Analysis (LCCA).* National Institute of Building Sciences. https://www.wbdg.org/resources/life-cycle-cost-analysis-lcca

Gaglia, A. G., Balaras, C. A., Mirasgedis, S., Georgopoulou, E., Sarafidis, Y. & Lalas, D. P. (2007). Empirical assessment of the Hellenic non-residential building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings, Journal of Energy Conversion and Management, Vol. 48, No. 4, pp. 1160-1175, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.10.008

Ghirardo, D. (Ed.) (1991). *Out of Site – A Social Criticism of Architecture*. U.S.A., Bay Press.

Gohardani, N. & Björk, F. (2012), Sustainable refurbishment in building technology, Journal of and Sustainable Built Environment, Vol. 1, No. 3, pp. 241-252. http://dx.doi.org/10.1108/20466091211287128

Greek Ministry of Environment and Energy, (2016), Report on the Determination of Cost Optimal Levels of Minimum Energy Efficiency Requirements for Buildings and Structural Elements. https://energy.ec.europa.eu/eu-countries-2018-cost-optimal-reports_en

Guzowski, M. (2012). *Towards Zero Energy Architecture.* Laurence King Publishing Ltd.

Hall, C. A. S., Lambert, J. G. & Balogh, S. B. (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy, 64,* pp. 141-152. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049

Hamdy, M., Hasan, A. & Sirén, K. (2011). Applying a multi-objective optimization approach for design of low-emission cost-effective dwellings. *Building and Environment, 46*(1), pp. 109-123. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.006

Hamida, M. B., Jylhä, T., Remøy, H. & Gruis, V. (2022). Circular building adaptability and its determinants – A literature review. International Journal of Building Pathology and Adaptation, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. https://doi.org/10.1108/IJBPA-11-2021-0150

Hammond, G. & Jones, C. (2011, 2019). Inventory of Carbon and Energy (ICE database). v.2.0 & v.3.0. https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html

Hermelink, A, Schimschar, S., Boermans, T. et al. (2013). Towards nearly zero energy buildings: Definition of common principles under the EPBD. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb_full_report.pdf

Hermelink, A., Surmeli, N. & Schimschar, S. (2013). Guidance document for national plans for increasing the number of nearly zero-energy buildings. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb_ecofys_guidance.pdf

Hernandez, P. & Kenny, P. (2010). From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). *Energy and Buildings, 42*(6), pp. 815-821. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.001

Ji, Y., Lee, A. & Swan, W. (2019), Retrofit modelling of existing dwellings in the UK: the Salford Energy House case study, International Journal of Building Pathology and Adaptation, Vol. 37 No. 3, pp. 344-360. https://doi.org/10.1108/IJBPA-12-2018-0106

Jin, Q., Overend, M. & Thompson, P. (2012). Towards productivity indicators for performance-based façade design in commercial buildings. *Building and Environment*, *57*, pp. 107-118. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.05.009

Johansson, J., Bagge, H. & Wahlström, Å. (2014). Cost-optimal energy performance for Swedish multifamily buildings. *Energy Procedia, 61*, pp. 1380-1383.

Jradi, M., Riffat, S. & Yoo, S. (2017). Building energy consumption, CO_2 emissions and occupant behavior: Uncertainty and sensitivity analysis of window shading and blind control systems in low energy buildings. *Journal of Building Engineering, 12,* pp. 108-116.

Katsaros, M., Sideris, K., Anastasiadis, I. & Skarlatos, E. (2007). Sustainable architectural design presupposes the capability of sustainable building construction. In: *EurekaBuild – Workshop & Brokerage Event: "Towards a Sustainable Built Environment & a Living Cultural Heritage*. TEE-EUREKABUILD-HCTP-ECTP, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών.

Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I. & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings, 43*(4), pp. 971-979. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022

Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S. et al. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings, 43*(4). 971-979. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022

Martínez Euklidiadas, M. (2022, August 24). Climate-resilient architecture: this is how we will protect cities. *Tomorrow.City - the Biggest Platform About Urban Innovation*. https://www.tomorrow.city/what-is-climate-resilient-architecture/

Morbiducci, R. & Vite, C., (2017). Applications of an Integrated Design Methodology for Regenerative Process of the Existing Buildings, Journal of Energy Procedia, Vol. 140, pp. 303-313, https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.144

Pagliano, L., Hermelink, A., Schimschar, S., Boermans, T., Zangheri, P., Armani, R., Voss, K. & Musall, E.. (2013). *Towards nearly zero- energy buildings. Definition of common principles under the EPBD* (Technical Report). 10.13140/RG.2.1.1170.4482.

Pallis, P., Gkonis, N., Varvagiannis, E., Braimakis, K., Karellas, S., Katsaros, M. & Vourliotis, P. (2019). Cost effectiveness assessment and beyond: A study on energy efficiency interventions in Greek residential building stock, *Journal of Energy and Buildings*, Vol. 182, pp. 1-18. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.024

Pallis, P., Gkonis, N., Varvagiannis, E., Braimakis, K., Karellas, S., Katsaros, M., Vourliotis, P. & Sarafianos, D. (2019). Towards NZEB in Greece: A comparative study between cost optimality and energy efficiency for newly constructed residential buildings. *Energy & Buildings*, *198,* 115-137. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.005

Pallis, P., Gkonis, N., Varvagiannis, E., Braimakis, K., Karellas, S., Katsaros, M. & Vourliotis, P. (2019). Cost effectiveness assessment and beyond: A study on energy efficiency interventions in Greek residential building stock. *Energy & Buildings*, *182*, 1-18. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.024

Pless, S. & Torcellini, P. (2010). *Net-Zero Energy Buildings: A Classification System Based on Renewable Energy Supply Options* (Technical Report NREL/TP-550- 44586). NREL.

Ramesh, T., Prakash, R. & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings, 42*(10), pp. 1592-1600. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007

Sesana, M. M. & Salvalai, G. (2013). Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for nZEBs, Journal of Building and Environment, Vol. 67, pp. 211-216, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.022

Steinberg, S. & Steinberg, S. (2021). *Resilient Communities Across Geographies*. California, Esri Press.

The European Parliament and the Council of the European Union (2002).Directive 2002/31/EC of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings, Off. J. Eur. Union.

The European Parliament and the Council of the European Union (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast), Off. J. Eur. Union.

Thomark, C. (2002). A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment, 37*(4), pp. 429-435. https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00033-6

Torcellini, P., Pless, S., Deru, M. & Crawley, D. (2006). *Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition* (Conference Paper NREL/CP-550-39833. ACEEE Summer Study). https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf

What is a PEB? – Cultural-E. (n.d.). Cultural-E. https://www.cultural-e.eu/peb-definitio

Xing, Y., Hewitt, N. & Griffiths, P. (2011). Zero carbon buildings refurbishment—A Hierarchical pathway. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15*(6), pp. 3229-3236. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.020

Αναλυση SWOT (2024, May 20). In: Wikipedia. https://el.wikipedia.org/wiki/Ανάλυση_SWOT

Ανδριανού, Ε. & Αντωνιάδη, Χ. (2024). *Βιοκλιματικός σχεδιασμός – Πράσινες επιφάνειες σε σχολεία* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. DSpace@NTUA. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.27712

Εθνικό Σχέδιο αύξησης του αριθμού των κτιρίων με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας, άρθρο 9, Οδηγίας 2010/31/ΕΕ για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων, ΥΠΕΝ.

Ελληνική Στατιστική Αρχή. (χ.ε.). http://www.statistics.gr/

Ευαγγελινός, Ε. & Ζαχαρόπουλος, Η. (2001). Μέθοδοι και συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας με βιοκλιματικό σχεδιασμό. Στο Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.). *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου* (σσ. 21-154). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2012). Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements.

Θέου-Τσαφαρά, Α. (2018). *Μηδενική ενέργεια και μηδενικές εκπομπές: Μελέτη του κύκλου ζωής της κατασκευής* [Διάλεξη 9ου εξαμήνου. Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ]. DSpace@NTUA. http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.2170

Νέος Κτιριοδομικός Κανονισμός, ΦΕΚ 3985 Β΄/ 2023.

ΤΟΤΕΕ 20701-2/2021. Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων. ΥΠΕΚΑ & ΤΕΕ. https://web.tee.gr/wp-content/uploads/TOTEE-20701-2-2021.pdf

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (2018). Έκθεση προσδιορισμού των βέλτιστων από πλευράς κόστους επιπέδων ελάχιστων απαιτήσεων ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και δομικών στοιχείων (Άρθρο 5, παρ. 2 της Οδηγίας 2010/31/ΕΕ και του Ν. 4122/2013). Χρήση: ΜΟΝΟΚΑΤΟΙΚΙΕΣ. Στο: CIRCABC. https://circabc.europa.eu/ui/group/092d1141-bdbc-4dbe-9740-aa72b045e8b3/library/015359db-a9c0-43cb-a3b2-002e2a831543/details

Το σύγγραμμα παρουσιάζει τις βασικές αρχές που διέπουν τον αρχιτεκτονικό και οικοδομικό σχεδιασμό βιώσιμων κτιρίων. Στόχος είναι να ταξινομηθούν και να αναλυθούν τα στοιχεία βιοκλιματικού και βιώσιμου σχεδιασμού τα οποία είναι απαραίτητο να εντάσσονται στον σχεδιασμό και στον ανασχεδιασμό κτιρίων σήμερα. Το βιοκλιματικό κτίριο, σύμφωνα με τον ορισμό του, τροποποιεί το κλίμα του περιβάλλοντός του, με κατάλληλο σχεδιασμό των στοιχείων του. Επειδή το κέλυφος του κτιρίου παρεμβάλλεται μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού χώρου, αυτό κυρίως καλείται να παίξει τον κύριο ρόλο μετατροπέα των βιοκλιματικών συνθηκών. Το κέλυφος, δηλαδή, καλείται να παίξει τον ρόλο μετατροπέα των κλιματικών συνθηκών, επειδή το κλίμα είναι μεταβλητό, για να παρέχει τις σταθερές εκείνες συνθήκες που περιγράφουμε ως συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης. Ένα βιοκλιματικό κτίριο, λοιπόν, πρέπει να διακρίνεται για τον δυναμικό χαρακτήρα της τροποποίησης του κλίματος και της προσαρμογής του σε αυτό, και τούτο πρέπει να εκφράζει. Πέρα από τα παραπάνω, και στο πλαίσιο μιας συνολικής βιώσιμης θεώρησης της αρχιτεκτονικής, το βιβλίο αναφέρεται και σε άλλες περιβαλλοντικά φιλικές στρατηγικές σχεδιασμού, που περιλαμβάνουν τα υλικά και τα οικοδομικά συστήματα, τα δίκτυα και τις εγκαταστάσεις, αλλά και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, πάντα από τη σκοπιά του αρχιτέκτονα. Τονίζεται ότι η ποιότητα του αρχιτεκτονικού αποτελέσματος που παράγεται από οποιαδήποτε βιοκλιματική ή κατασκευαστική επιλογή είναι εξαιρετικά σημαντική, κι αυτό διότι οι εφαρμοζόμενες βιοκλιματικές τεχνικές, όπως και η Οικοδομική, δηλαδή η τέχνη της κατασκευής, δεν είναι μόνον ένα άθροισμα επιστημονικών και τεχνικών γνώσεων, αλλά κυρίως ο τρόπος με τον οποίο αυτές συγκροτούνται και αξιοποιούνται για να συμβάλουν στη δημιουργία ενός αξιόλογου αρχιτεκτονήματος. Τελικός στόχος είναι η καλλιέργεια οικολογικής και περιβαλλοντικής γνώσης, καθώς και η συνειδητοποίηση του γεγονότος ότι η βιωσιμότητα πρέπει να αντιμετωπίζεται από τα πρώτα βήματα του σχεδιασμού ενός κτιρίου ως αναπόσπαστο τμήμα του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού.

Το παρόν σύγγραμμα δημιουργήθηκε στο πλαίσιο του Έργου ΚΑΛΛΙΠΟΣ+	
Χρηματοδότης	Υπουργείο Παιδείας και Θρησκευμάτων, Προγράμματα ΠΔΕ, ΕΠΑ 2020-2025
Φορέας υλοποίησης	ΕΛΚΕ ΕΜΠ
Φορέας λειτουργίας	ΣΕΑΒ/Παράρτημα ΕΜΠ/Μονάδα Εκδόσεων
Διάρκεια 2ης Φάσης	2020-2023
Σκοπός	Η δημιουργία ακαδημαϊκών ψηφιακών συγγραμμάτων ανοικτής πρόσβασης (περισσότερων από 700) • Προπτυχιακών και μεταπτυχιακών εγχειριδίων • Μονογραφιών • Μεταφράσεων ανοικτών textbooks • Βιβλιογραφικών Οδηγών
Επιστημονικά Υπεύθυνος	Νικόλαος Μήτρου, Καθηγητής ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ
ISBN: 978-618-228-308-0	**DOI**: http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-1059

Το παρόν σύγγραμμα χρηματοδοτήθηκε από το Πρόγραμμα Δημοσίων Επενδύσεων του Υπουργείου Παιδείας.