



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Θερμότητας

***ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ  
ΦΥΤΕΜΕΝΗ ΟΡΟΦΗ***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Μαρία Γ. Μηλιάδη*

Επιβλέπων : Τζιβανίδης Χρήστος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Θερμότητας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η ανάπτυξη της μεθοδολογίας και ο σχεδιασμός μοντέλου λειτουργίας κτιρίου με φυτεμένη οροφή. Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται διερεύνηση των ενεργειακών καταναλώσεων και των δυνατοτήτων παρέμβασης σε κτίρια, πραγματοποιείται η μελέτη μοντέλου κτιρίου με φυτεμένη οροφή και γίνεται ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του. Τέλος, παρουσιάζεται το όφελος που προκύπτει από την εφαρμογή ενεργειακών τεχνικών, όπως είναι η φυτεμένη οροφή.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Χ. Τζιβανίδης, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την δυνατότητα που μου έδωσε να εξειδικευτώ σε τόσο ενδιαφέροντα θέματα, όπως είναι η ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων, η εξοικονόμηση ενέργειας, η φυτεμένη οροφή και τα «πράσινα κτίρια».

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Τα τελευταία χρόνια, η Ελλάδα συμμετέχει ολοένα και πιο ενεργά στην προσπάθεια που εξελίσσεται διεθνώς για εξοικονόμηση ενέργειας. Τα μέτρα και οι μεταρρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν τα τελευταία χρόνια στον τομέα της ενέργειας έχουν συμβάλει στην προώθηση της εξοικονόμησης ενέργειας για την επίτευξη της αειφόρου ανάπτυξης. Ειδικότερα, ο κτιριακός τομέας, που αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς τομείς κάθε χώρας, έχει σημαντικό δυναμικό στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας με την εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων και τεχνολογιών. Η χρήση πράσινης οροφής, που είναι γνωστή από την αρχαιότητα τόσο σε θερμά, όσο και σε ψυχρά κλίματα, σήμερα αναγνωρίζεται ως ένα από τα σημαντικότερα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η μελέτη θερμικής συμπεριφοράς κτιρίου με φυτεμένη οροφή με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας, τη μείωση δηλαδή των ενεργειακών καταναλώσεων μεγάλων κυρίως κτιρίων. Στο πλαίσιο αυτό, υλοποιείται η προσομοίωση κτιρίου για το ενεργειακό του προφίλ. Αρχικά, εντοπίζονται και παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας κατανεμημένα σύμφωνα με το βαθμό στον οποίο μπορούν να εφαρμοστούν. Στη συνέχεια, ερευνάται και αναλύεται το μοντέλο κτιρίου με φυτεμένη οροφή και το ψυκτικό αποτέλεσμα που προκύπτει από την εφαρμογή του. Το ψυκτικό αποτέλεσμα του φυτεμένου δώματος ερευνάται μέσω προγράμματος προσομοίωσης σε υπολογιστή. Η συλλογή των παραπάνω πληροφοριών καθιστά δυνατή τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, με την οποία επιτυγχάνεται το απόλυτο ζητούμενο, δηλαδή το ενεργειακό και οικονομικό κέρδος που μακροπρόθεσμα υπάρχει από την εφαρμογή της φυτεμένης οροφής στα κτίρια.

### Λέξεις Κλειδιά

Φυτεμένο δώμα / οροφή, πράσινο δώμα / οροφή, ενεργειακή εξοικονόμηση, ενεργειακό κτίριο, εξομοίωση

## ABSTRACT

---

In the past few years, Greece is more and more actively participating in the global effort for energy saving. Through the last years, measures and reformations have occurred in the energy field and have contributed to the promotion of energy saving for sustainable development. More specifically, the building sector, that represents one of the most dynamic sectors of each country, has important potential of reduction of consumed energy with the application of modern methods and technologies. Green roof utilization, which is known since ancient times both in warm and cold climates, is nowadays recognized as issue of energy saving and pollution reduction.

In the present thesis, the study of thermal performance of buildings covered with green roof aiming at the saving of energy is presented, that's to say the reduction of energy consumptions of mainly big buildings. In this context, a simulation of building is chosen for its energy profile. As a first step, the most important measures of energy saving are detected and presented according to the degree that can be applied. In the sequence, the model of building covered with planted roof and the cooling effect from its application are simulated and studied. The cooling effect is coming out via the simulation program. The collection of the above information makes possible the creation of a database according to which it is easy to calculate the economic and energy profit that in the long run comes out from the application of planted roof in the buildings.

### **Words Keys**

Planted loft / roof, green loft / roof, energy saving, green building, simulation.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

Εισαγωγή.....	6
Κεφάλαιο 1 .....	8
<i>Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων.....</i>	<i>8</i>
1.1 Ενέργεια και κτίριο .....	9
1.2 Ενέργεια και τύπος κτιρίου .....	12
1.3 Κτίρια και περιβάλλον .....	14
Κεφάλαιο 2 .....	16
<i>Ενεργειακή εξοικονόμηση.....</i>	<i>16</i>
2.1 Νομικό πλαίσιο .....	17
2.2 Ενεργειακή διαχείριση κτιρίων.....	23
2.2.1 Συστήματα Ενεργειακού Ελέγχου Κτιρίων.....	25
2.2.2 Βιοκλιματικός Σχεδιασμός.....	27
2.3 Τα φυτά στο Βιοκλιματικό Σχεδιασμό .....	30
2.4 Ο ρόλος των Εταιριών Παροχής Ενεργειακών Υπηρεσιών στην εξοικονόμηση ενέργειας... 33	
Κεφάλαιο 3 .....	35
<i>Πράσινες ταράτσες – Πράσινες πόλεις .....</i>	<i>35</i>
3.1 Τα φυτεμένα δώματα και η συμβολή τους στον αστικό χώρο.....	36
3.1.1 Ιστορική αναδρομή .....	36
3.1.2 Σύγχρονα περιβαλλοντικά προβλήματα αστικών κέντρων .....	38
3.1.3 «Πράσινη» αναβάθμιση αστικών κέντρων .....	40
3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά φυτεμένης οροφής .....	43
3.3 Τύποι φυτεμένων οροφών.....	49
3.4 Προϋποθέσεις και απαιτήσεις κατασκευής φυτεμένης οροφής.....	50
3.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτεμένης οροφής.....	52
Κεφάλαιο 4 .....	57
<i>Υπολογιστικό μέρος .....</i>	<i>57</i>
4.1 Πρόβλημα - Δεδομένα .....	58
4.2 Θερμική ανάλυση κτιρίου.....	59

4.3 Μαθηματική επίλυση .....	61
4.3.1 Διακριτοποίηση προβλήματος.....	61
4.3.2 Γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών.....	62
4.3.3 Οριακές συνθήκες .....	63
4.3.3.1α Εξωτερικές οριακές συνθήκες .....	64
4.3.3.1β Μετάδοση θερμότητας στην επιφάνεια της οροφής.....	70
4.3.3.2α Εσωτερικές οριακές συνθήκες.....	72
4.3.3.2β Μετάδοση θερμότητας από την οροφή στο εσωτερικό .....	77
4.4 Τελική διαμόρφωση συστήματος .....	78
4.5 Επίλυση .....	82
4.6 Αποτελέσματα - Συμπεράσματα .....	84
Παράρτημα.....	95
Βιβλιογραφία .....	104

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας, η ανάλυση και ο σχεδιασμός της λειτουργίας του μοντέλου φυτεμένης οροφής σε κτίρια. Στο πλαίσιο αυτό, μελετάται η ενεργειακή απόδοση και η ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων, παρουσιάζεται η μελέτη και η μεθοδολογία κατασκευής φυτεμένου δώματος και εξετάζονται το οφέλη για το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Τις τελευταίες δεκαετίες, στις περισσότερες μεγαλουπόλεις τα πράσινα τοπία τείνουν να εξαλειφθούν, ενώ παράλληλα οι αυτοκινητόδρομοι και τα κτίρια αυξάνονται ανεξέλεγκτα. Οι πιο ανησυχητικές συνέπειες είναι οι έντονες κλιματικές αλλαγές, δηλαδή η αύξηση της μέσης αστικής θερμοκρασίας (το φαινόμενο της «Αστικής Θερμικής Νησίδας») και η μόλυνση του αέρα (νέφος).

«Αστική Θερμική Νησίδα» (Urban Heat Island Effect) είναι το φαινόμενο που παρουσιάζεται στις πόλεις και προκαλείται από υλικά όπως το τσιμέντο και η ασφάλτος, που βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες ιδιαίτερα στις ελληνικές πόλεις. Τα υλικά αυτά απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και την εκλύουν ως θερμότητα τόσο στο εξωτερικό περιβάλλον όσο και στο εσωτερικό του σπιτιού. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία έως και 10°C.

Το αποτέλεσμα, που δημιουργεί η ολοένα και μεγαλύτερη ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και για κατασκευές φιλικότερες προς το περιβάλλον, είναι οι συχνότερες αναφορές στον οικολογικό χαρακτήρα και στα ενεργειακά οφέλη των πράσινων δωματίων στον κατασκευαστικό τομέα. Η κατασκευή πράσινης οροφής μπορεί αφενός να περιορίσει το φαινόμενο της «Αστικής Θερμικής Νησίδας» και αφετέρου η πρασινάδα που υπάρχει στην οροφή μπορεί να μειώσει τη ροή θερμότητας που διαπερνά την οροφή, μειώνοντας έτσι το θερμικό φορτίο στους χαμηλότερους ορόφους.

Η κατασκευή πιο αποδοτικών ενεργειακά σπιτιών είναι ευρέως γνωστή σαν Βιοκλιματική (ή ενεργειακή) αρχιτεκτονική και ορίζεται ως ο σχεδιασμός και η κατασκευή σπιτιών με τρόπο τέτοιο ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι τοπικές κλιματικές συνθήκες, να γίνεται χρήση παθητικών ηλιακών τεχνολογιών (passive solar technologies) με στόχο τη μείωση της χρήσης ενέργειας, όπως για παράδειγμα τεχνολογίες φυσικής θέρμανσης (heating) ή δροσισμού (cooling). Στις συγκεκριμένες τεχνολογίες εντάσσεται και η φυτεμένη οροφή.

Η εφαρμογή των αρχών του βιοκλιματικού σχεδιασμού στον αστικό τομέα είναι περιορισμένη, λόγω της πυκνής δόμησης που δεν επιτρέπει την εφαρμογή παθητικών ηλιακών τεχνολογιών. Ακόμα και οι πιο απλές τεχνικές, όπως αυτή του φυσικού εξαερισμού, δεν είναι πάντα εφαρμόσιμη, αφού η ρύπανση του αέρα και η ηχορύπανση στις αστικές περιοχές οδηγούν στην ανάγκη για αεροστεγή κτίρια. Ωστόσο, στο μεσογειακό κλίμα, οι οριζόντιες κτιριακές επιφάνειες, όπως οι ταράτσες, δέχονται μεγάλη ποσότητα θερμότητας το καλοκαίρι, ενώ αντίστοιχα το χειμώνα απαιτούνται ικανά κριτήρια προκειμένου να αποφευχθούν μεγάλες θερμικές απώλειες, και οι φυτεμένες οροφές έρχονται να δώσουν λύσεις στο πρόβλημα αυτό.

Η πιο καθαρή μορφή ενέργειας είναι αυτή που δεν καταναλώνεται. Ο άνθρωπος έχει πλέον καταφέρει να χρησιμοποιεί φυσικούς πόρους για να εκμεταλλεύεται την ενέργεια σε κτίρια ή παραγωγικές διαδικασίες με μεθόδους που να ανταποκρίνονται στις εκάστοτε ανάγκες της κάθε κατασκευής.

Τα πράσινα δώματα και οι πράσινοι τοίχοι προσφέρουν λύση για την αλλαγή του αστικού τοπίου, τη διατήρηση και δημιουργία νέων ελεύθερων χώρων, αλλά και για τη μείωση ή ακόμα και εξάλειψη του φαινομένου της «Αστικής Θερμικής Νησίδας».

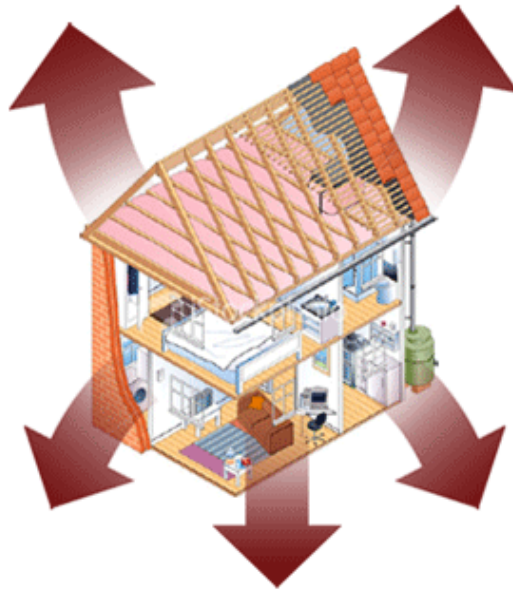
Στα κεφάλαια που ακολουθούν, θα εξεταστεί η ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων, η ενεργειακή εξοικονόμηση και τα μέτρα για την εφαρμογή της, και στη συνέχεια θα μελετηθεί το μοντέλο της φυτεμένης οροφής, και πιο συγκεκριμένα τα γενικά και τεχνικά χαρακτηριστικά, η προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς κτιρίου με φυτεμένη οροφή που αναλύεται στο υπολογιστικό μέρος, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### *ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ*

---



## 1.1 Ενέργεια και κτίριο

Τα τελευταία χρόνια, η Ελλάδα συμμετέχει ολοένα και πιο ενεργά στην προσπάθεια που εξελίσσεται διεθνώς για εξοικονόμηση ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, ο κτιριακός τομέας, που αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς τομείς κάθε χώρας, έχει το δυναμικό σημαντικής μείωσης της καταναλισκόμενης ενέργειας με την εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων και τεχνολογιών.

Ο κτιριακός τομέας, σύμφωνα με το ενεργειακό ισοζύγιο της Ελλάδας, ευθύνεται περίπου για το 40% της συνολικής κατανάλωσης τελικής ενέργειας. Επίσης, η ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων αναλογεί, κατά μέση τιμή, στο 40% της Ευρωπαϊκής ενεργειακής κατανάλωσης, αφού σε ορισμένες χώρες κυμαίνεται στο 20% (Πορτογαλία), και σε κάποιες άλλες φτάνει το 45% (Ιρλανδία).

Δεδομένου ότι η ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων στην Ελλάδα αποτελεί το 40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης, είναι προφανές ότι τα κτίρια ανήκουν στους πιο ρυπογόνους συντελεστές της πόλης. Οι δείκτες διοξειδίου του άνθρακα οφείλουν τα υψηλά ποσοστά τους στη μεγάλη συνεισφορά του κτιριακού αποθέματος.

Από τους διάφορους τύπους κτιρίων της Αθήνας, τη μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση έχουν:

- τα παλιά κτίρια, δεδομένου ότι ο κτιριακός πυρήνας της πόλης έχει ηλικία 40 ετών,
- τα γυάλινα κτίρια που σε θέματα κλιματισμού απαιτούν 2 έως 3 φορές περισσότερη ενέργεια από τα συμβατικά κτίρια και
- τα κτίρια που οικοδομήθηκαν μέχρι το 1980, πριν από την εφαρμογή του κανονισμού θερμομόνωσης.

Τα σημαντικότερα στοιχεία σε ένα κτίριο, που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης, είναι η απουσία μόνωσης στο κέλυφος και την οροφή, η κακή ποιότητα κουφωμάτων και τζαμιών, η μη αεροστεγανότητα, η κακή συντήρηση του λέβητα και η έλλειψη θερμοστατικού ελέγχου. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας (ΕΣΥΕ), το 2001 καταγράφηκαν 4 εκατομμύρια κτίρια, από τα οποία το 10% εκτιμάται ότι διαθέτει πλήρη μόνωση, το 20% ελλιπή και το 70% δε διαθέτει καθόλου μόνωση.

Συγκριτικά με την Ευρώπη:

- Οι ελληνικές κατοικίες παρουσιάζουν την μεγαλύτερη σχετική κατανάλωση, σχεδόν 30% μεγαλύτερη από της Ισπανίας και περίπου διπλάσια από της Πορτογαλίας.
- Οι κατοικίες στην Ελλάδα παράγουν περίπου 12-13 τόνους διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο το χρόνο. Η Αυστρία παράγει 9 ενώ η Νορβηγία και η Γερμανία 11. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από όλες τις άλλες μεσογειακές χώρες (Πορτογαλία: 8 τόνους, Ιταλία & Ισπανία: 9 τόνους) και ίση με της Δανίας.
- Όσον αφορά στα γραφεία, το θερμικό φορτίο των κτιρίων γραφείων στην Ελλάδα (κιλοβατώρες/τ.μ.) είναι το υψηλότερο ανάμεσα σε δέκα Ευρωπαϊκές χώρες.

- Στα ελληνικά νοσοκομεία, η μέση κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση κυμαίνεται από 81-420 κιλοβατώρες/τ.μ./έτος. Το αντίστοιχο εύρος στην Δανία είναι 110-210 και στη Φινλανδία 100-300. Η Ελλάδα εμφανίζει παρόμοιες τιμές με την Τσεχία.

Καταναλώνουμε δηλαδή, περισσότερη ενέργεια από πολύ πιο ψυχρές χώρες, που έχουν πολύ μεγαλύτερες ανάγκες για θέρμανση, όπως η Γερμανία, η Δανία, η Σουηδία και η Αυστρία.

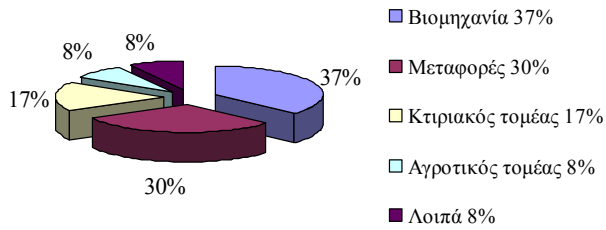
Η τελική ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι της τάξης των 350 Mtoe [Million Tonnes of Oil Equivalent] ανά έτος, χωρίς να υπολογίζεται η συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Το μεγαλύτερο μέρος της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων καλύπτεται από το φυσικό αέριο, που ισοδυναμεί σε 116 Mtoe, το πετρέλαιο - 99 Mtoe, τον ηλεκτρισμό - 91 Mtoe, και τα στερεά καύσιμα με 11 Mtoe.

Οι πραγματικές ενεργειακές ανάγκες των κτιρίων στην Ευρώπη καλύπτονται σε μεγάλο ποσοστό και από την έμμεση χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας και των άλλων ατμοσφαιρικών πηγών. Στην περίπτωση αυτή, το σύνολο της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων υπολογίζεται σε 740 Mtoe πρωτογενούς ενέργειας. Η κατανομή των διαφόρων καυσίμων και πηγών είναι: 43% διάφορα καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, 20% από άμεση χρήση πετρελαίου, 18% από άμεση χρήση φυσικού αερίου, 6% από άλλα στερεά καύσιμα και κατά 15% από ηλιακή ενέργεια.

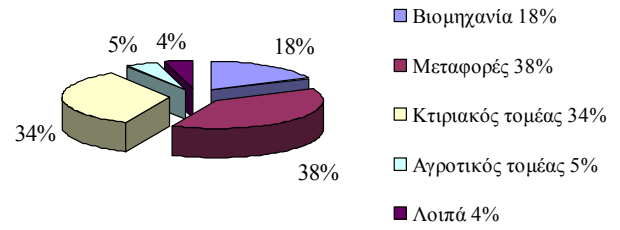
Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι αντιστοιχεί περίπου ένας τόνος ισοδύναμου πετρελαίου ανά έτος και ανά κάτοικο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κτιρίων στην Ευρώπη. Η διαχρονική μεταβολή κατά τα τελευταία χρόνια είναι ελαφρά αυξητική και η ετήσια αύξηση του ρυθμού κατανάλωσης στα κτίρια είναι ίση με ποσοστό 0,7%.

Η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων στην Ελλάδα, είναι της τάξης των 4,6 Mtoe, και αντιστοιχούν 0,55 Mtoe ενέργειας ανά κάτοικο το έτος, δηλαδή περίπου το μισό της αντίστοιχης κατανάλωσης στην υπόλοιπη Ευρώπη. Η διαχρονική μεταβολή της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων στην Ελλάδα είναι καθαρά αυξητική και ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων είναι περίπου 1,8%.

Η αυξητική μεταβολή της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων στην Ελλάδα παρατηρείται στα παρακάτω γραφήματα<sup>41</sup>, στα οποία απεικονίζεται το ενεργειακό ισοζύγιο της Ελλάδας, όπως διαμορφώνεται τις τελευταίες δεκαετίες. Σύμφωνα με τα στοιχεία του Υπουργείου Ανάπτυξης και του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), από το 1980 μέχρι σήμερα, η ενεργειακή κατανάλωση στον τομέα της βιομηχανίας μειώθηκε κατά πολύ, ενώ το ποσοστό της κατανάλωσης στον κτιριακό τομέα έχει διπλασιαστεί και αποτελεί πλέον το μεγαλύτερο ποσοστό.



Γράφημα 1.1α Ενεργειακό Ισοζύγιο 1980



Γράφημα 1.1β Ενεργειακό Ισοζύγιο 2005

Εξίσου σημαντικό είναι το πώς διαμορφώνεται τα τελευταία χρόνια, το ποσοστό εκπομπών των αέριων ρύπων θερμοκηπίου του κτιριακού τομέα σε σχέση τα αντίστοιχα ποσοστά των άλλων σημαντικότερων παραγόντων ενεργειακής κατανάλωσης, δηλαδή της βιομηχανίας και των μεταφορών. Παρατηρούμε ότι οι εκπομπές ισοδύναμου CO<sub>2</sub> στον κτιριακό τομέα από το 1990 κι έπειτα αυξάνονται συνεχώς, ενώ σύμφωνα με προβλέψεις, μέσα στα επόμενα 10 έτη θα έχουν ανέβει στο 44% και θα ξεπερνούν κατά πολύ τα αντίστοιχα ποσοστά που οφείλονται στη βιομηχανία και τις μεταφορές.

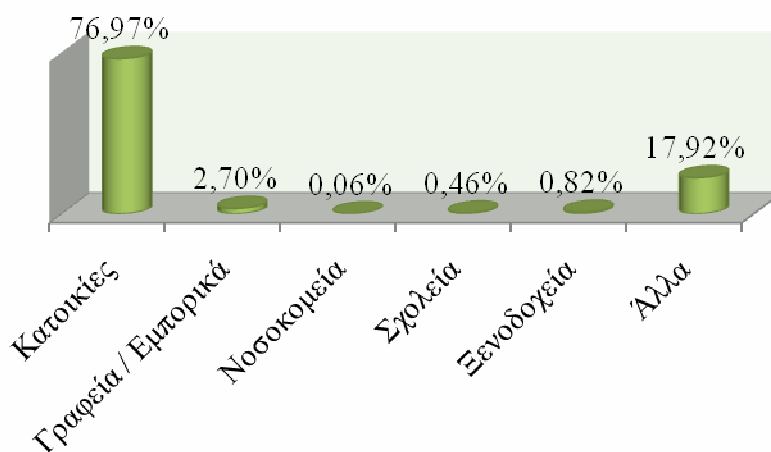
Τελική χρήση	1990	1995	2000	2005	2010	2015*	2020*
Κτιριακός τομέας	34%	37%	41%	44%	42%	43%	44%
Μεταφορές	19%	21%	20%	21%	20%	21%	22%
Βιομηχανία	39%	34%	31%	28%	31%	29%	27%
Λοιπές χρήσεις	8%	8%	7%	7%	7%	7%	7%

Πίνακας 1.1 Κατανομή ρύπων ισοδύναμου CO<sub>2</sub> (%)

\*Προβλέψεις

## 1.2 Ενέργεια και τύπος κτιρίου

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται ο αριθμός των κτιρίων ανάλογα με τη χρήση τους, σύμφωνα με στοιχεία της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας. Το μεγαλύτερο ποσοστό αποτελούν οι κατοικίες, εκεί δηλαδή όπου οι άνθρωποι περνούν και τον περισσότερο χρόνο τους. Οι κατοικίες αποτελούν συνεπώς, τη σημαντικότερη ενεργειακή κατανάλωση στον κτιριακό τομέα και ακολουθούν τα γραφεία.



Γράφημα 1.2 Γραφική απεικόνιση των ποσοστών των κτιρίων ανάλογα με τη χρήση τους<sup>41</sup>

Εξίσου σημαντικό όμως είναι και το πώς διαμορφώνεται η ειδική ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων ανάλογα με το είδος χρήσης. Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η ειδική ενεργειακή κατανάλωση των διαφόρων τύπων κτιρίων στην Ελλάδα ανά χρήση, όπως μετρήθηκε στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος.

Τύπος Κτιρίου	Δροσισμός	Θέρμανση	Φωτισμός	Συσκευές	Σύνολο
Γραφεία	24	95	20	48	187
Εμπορικά	18	74	19	41	152
Σχολεία	2	66	16	8	92
Νοσοκομεία	3	299	52	53	407
Ξενοδοχεία	11	198	24	40	273

Πίνακας 1.2 Μέση ενεργειακή κατανάλωση διαφόρων τύπων κτιρίων ανά είδος χρήσης. Τιμές σε kWh/m<sup>2</sup> το χρόνο<sup>39</sup>

Παρατηρούμε ότι η θέρμανση των χώρων αποτελεί τη σημαντικότερη ειδική ενεργειακή κατανάλωση για όλα τα κτίρια στη χώρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε μια σειρά από παραμέτρους που σχετίζονται με το πλήθος των εγκαταστημένων συστημάτων θέρμανσης και το είδος της προστασίας των κτιρίων κατά την διάρκεια του χειμώνα. Να σημειωθεί ακόμα, ότι όσον αφορά στο δροσισμό των χώρων χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια και συσκευές με συντελεστή απόδοσης κατά πολύ μεγαλύτερο της μονάδας.

Η ουσιαστική σημασία των επιμέρους ειδικών καταναλώσεων φαίνεται αν η σύγκριση περιορισθεί μόνο για τα κτίρια που διαθέτουν ταυτόχρονα σύστημα θέρμανσης και δροσισμού. Στοιχεία μιας τέτοιας σύγκρισης δίνονται στον παρακάτω πίνακα για τα σχολικά κτίρια. Όπως φαίνεται, η ύπαρξη συστημάτων μηχανικού κλιματισμού αυξάνει κατά πολύ την συνολική ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων.

	<b>Δροσισμός</b>	<b>Θέρμανση</b>	<b>Φωτισμός</b>	<b>Συσκευές</b>	<b>Σύνολο</b>
Μέση κατανάλωση σχολείων	2	67	16	8	93
Κατανάλωση σχολείων με θέρμανση και κλιματισμό	42	99	30	9	180

Πίνακας 1.3 Κατανομή της άμεσης ενεργειακής κατανάλωσης των σχολικών κτιρίων, καθώς και των συγκροτημάτων με παράλληλη εγκατάσταση θέρμανσης και κλιματισμού. Τιμές σε kWh/m<sup>2</sup> το χρόνο<sup>39</sup>

Παρατηρούμε δηλαδή, ότι η κατανάλωση των κλιματιστικών συσκευών επιφέρει αύξηση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης κατά 40 kWh ανά τετραγωνικό μέτρο και έτος. Η κατανάλωση αυτή αποτελεί και την μέση ενεργειακή κατανάλωση των κλιματιστικών συσκευών στην χώρα.

### 1.3 Κτίρια και περιβάλλον

Τα κτίρια και οι συσκευές τους αποτελούν τον μεγαλύτερο καταναλωτή ενέργειας στην Ελλάδα και στην Ευρώπη και ο κτιριακός χώρος, σαν πλήρες στοιχείο του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος επηρεάζεται από τα σύγχρονα προβλήματά του και συντελεί στην διαμόρφωσή τους. Η ένταση των προβλημάτων του εξωτερικού περιβάλλοντος έχει διαμορφώσει ένα πλαίσιο προβλημάτων για το κτίριο, όπου τα προβλήματα ποιότητας του εσωτερικού κλίματος και περιβάλλοντος καθώς και τα ποσοτικά προβλήματα κατανάλωσης και εξοικονόμησης ενέργειας, συμπλέουν και απαιτούν κοινή αντιμετώπιση και προοδευτική αντίληψη αντιμετώπισης.

Σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας στα σύγχρονα κτίρια, μπορεί να γίνει με κατάλληλες παρεμβάσεις στα συστήματα και πρακτικές αυτόματου ή χειροκίνητου ελέγχου των διαφόρων λειτουργιών του κτιρίου, όπως με κατάλληλο προγραμματισμό των ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου, με κατάλληλη εκπαίδευση των κατοίκων του κτιρίου, και με καλλιέργεια κουλτούρας εξοικονόμησης ενέργειας μεταξύ τους. Μελέτες κτιριακής αναβάθμισης του ΚΑΠΕ την τελευταία δεκαετία έδειξαν ότι μια μετριοπαθής βελτίωση ενός κτιριακού συνόλου στην Αθήνα θα μείωνε την κατανάλωση ενέργειας κατά 25%.

Ειδικά ο ευρύτερος δημόσιος τομέας, μπορεί να έχει υποδειγματικό ρόλο στην προώθηση της εξοικονόμησης και την ορθολογική χρήση της ενέργειας στον κτιριακό τομέα αφού τα κτίρια του δημόσιου και ευρύτερου δημόσιου τομέα είναι περίπου 200.000 και αντιπροσωπεύουν το 5% του τριτογενή τομέα.

Σύμφωνα με σχετική μελέτη του ΚΑΠΕ, εκτιμάται ότι, οι ετήσιες ενεργειακές δαπάνες των δημόσιων κτιρίων ξεπερνούν τα 450 εκατομμύρια ευρώ. Η ίδια μελέτη του ΚΑΠΕ έδειξε επίσης ότι:

- Η μέση ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με οικονομικά αποδοτικό κόστος, είναι της τάξης του 22% της προβλεπόμενης συμβατικής κατανάλωσης στα νέα ή ανακατασκευαζόμενα δημόσια κτίρια.
- Η εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης στα κτίρια αυτά, θα μειώσει τις μέσες ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 425.000 χιλιάδες τόνους CO<sub>2</sub>/έτος, ενώ θα επιφέρει οικονομικά οφέλη της τάξης των 110 εκατ. €/έτος.

Ο κάτοικος των αστικών κυρίως κέντρων βιώνει το 80% της ζωής του στο εσωτερικό των κτιρίων και ως εκ τούτου είναι προφανής η επίδραση της ποιότητας του εσωτερικού κλίματος τόσο στην υγεία και την άνεση όσο και στην παραγωγικότητά του. Η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων δεν πρέπει να αποσυνδέεται από τα προβλήματα του περιβάλλοντος. Πρέπει να μελετάται σαν μια ενότητα μαζί με το συγκεκριμένο εξωτερικό μικροκλίμα στον χώρο του κτιρίου, καθώς και το διαμορφούμενο εσωτερικό περιβάλλον.

Τα τελευταία χρόνια, σημαντικές έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί, έχουν επιτρέψει την ανάπτυξη επιστημονικών μεθόδων, τεχνικών και τεχνολογιών, που αφενός εξασφαλίζουν βέλτιστο εσωτερικό περιβάλλον καθώς και τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας. Οι τεχνικές αυτές, που κατά βάση κάνουν χρήση ηλιακής ενέργειας καθώς και άλλων πηγών του περιβάλλοντος, όπως των φυτών, έχουν ήδη αποδείξει σε πρακτικό επίπεδο ότι είναι ιδιαίτερα

αποδοτικές τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Η ευρύτερη εφαρμογή τους, που θα μελετηθεί στα επόμενα κεφάλαια, αποτελεί επιτακτική ανάγκη για τη βελτίωση του κτιριακού περιβάλλοντος. Μερικές από τις υπάρχουσες τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια περιλαμβάνουν:

- α) Τεχνολογίες μείωσης των αναγκών θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων.
- β) Τεχνολογίες μείωσης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στα κτίρια.
- γ) Υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων για τη θέρμανση (χώρου και νερού) του κτιρίου με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Renewable Energy Sources), κυρίως ηλιακή ενέργεια και βιομάζα.
- δ) Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα κτίρια από ΑΠΕ (πχ. φωτοβολταϊκά).
- ε) Τεχνολογίες παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας υψηλού βαθμού απόδοσης (πχ. αντλίες θερμότητας, συστήματα συμπαραγωγής).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### *ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ*

---



## 2.1 Νομικό πλαίσιο

Τα τελευταία χρόνια γίνεται διεθνώς τεράστια προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας. Η Ελλάδα συμμετέχει ολοένα και πιο ενεργά στην προσπάθεια αυτή με τη νομοθεσία που έχει θεσπίσει και εντάσσει εναλλακτικούς τρόπους ενέργειας στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου. Ειδικότερα, στον κατασκευαστικό τομέα, που αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς τομείς κάθε χώρας, έχουν αναπτυχθεί σύγχρονες μέθοδοι και τεχνολογίες για τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Όπως έχουμε αναφέρει στην προηγούμενη ενότητα, τα κτίρια απορροφούν το 40% με 45% της κατανάλωσης της ενέργειας και συμβάλλουν τα μέγιστα στους ρύπους στο αστικό περιβάλλον. Στόχος είναι αρχικά ο εντοπισμός και η μελέτη των τρόπων μείωσης των απωλειών ενέργειας. Καταγράφοντας λοιπόν τις χρήσεις της ενέργειας που γίνονται, εντοπίζεται πού γίνεται κακή χρήση ενέργειας. Σε κάθε κτίριο, είτε είναι ήδη υπάρχον, είτε πρόκειται να κατασκευαστεί στο μέλλον, μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, εάν εφαρμοστεί η κατάλληλη μέθοδος.

Ενεργειακή απόδοση κτιρίου ορίζεται ως η ποσότητα ενέργειας που πράγματι καταναλώνεται ή εκτιμάται ότι ικανοποιεί τις διάφορες ανάγκες που συνδέονται με τη συνήθη χρήση του κτιρίου, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τη θέρμανση, την παραγωγή θερμού νερού, την ψύξη, τον εξαερισμό και το φωτισμό. Η ποσότητα αυτή εκφράζεται με έναν ή περισσότερους αριθμητικούς δείκτες, οι οποίοι έχουν υπολογισθεί λαμβάνοντας υπόψη τη μόνωση, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης, το σχεδιασμό και τη θέση του κτιρίου σε σχέση με κλιματολογικούς παράγοντες, την έκθεση στον ήλιο και την επίδραση γειτονικών κατασκευών, την παραγωγή ενέργειας του ίδιου του κτιρίου και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή ζήτηση, στους οποίους περιλαμβάνονται και οι κλιματικές συνθήκες, στο εσωτερικό του κτιρίου.

Ενεργειακή επιθεώρηση ή ενεργειακή αυτοψία ή ενεργειακή διάγνωση ορίζεται η διαδικασία εκτίμησης και καταγραφής των πραγματικών καταναλώσεων ενέργειας, των παραγόντων που τις επηρεάζουν καθώς και των μεθόδων βελτίωσης για εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα.

Από το 1981 (έτος κατά το οποίο έγινε υποχρεωτική η θερμομόνωση) μόνο το 3% των κτιρίων έχουν κατασκευαστεί, επομένως το σύνολο των κτιριακών κατασκευών στην Ελλάδα υφίστανται σημαντικότερες θερμικές απώλειες. Από το 2007 κι έπειτα, η χρήση τεχνικών μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας κατέστη υποχρεωτική για όλες τις κτιριακές κατασκευές.

Σύμφωνα με έρευνες, έχει διαπιστωθεί ότι η κατασκευή πιο ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων μπορεί να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 60%, που ισοδυναμεί με 1,35 δισεκατομμύρια τόνους που καλύπτουν τη μείωση που πρότειναν οι περιβαλλοντικές συνθήκες του Ρίο και του Βερολίνου, όπως επίσης, θα προκύψει και εξοικονόμηση συμβατικών ενεργειακών πόρων ακόμα και μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενο πετρέλαιο.

Στη συνέχεια, παρατίθεται άρθρο από τη «Συνθήκη του Ρίο»:

Μέτρα διατήρησης και αειφορικής χρήσης

«Κάθε Συμβαλλόμενο Μέρος, σύμφωνα με τις ειδικές περιστάσεις και δυνατότητές του:

α) Αναπτύσσει εθνικές στρατηγικές, σχέδια ή προγράμματα για τη διατήρηση και αειφορική χρήση της βιολογικής ποικιλότητας ή προσαρμόζει για το σκοπό αυτό υπάρχουσες στρατηγικές, σχέδια ή προγράμματα, τα οποία πρέπει να αντικατοπτρίζουν, μεταξύ άλλων, τα μέτρα που προβλέπονται στην παρούσα Σύμβαση σε ότι αφορά το ενδιαφερόμενο Συμβαλλόμενο Μέρος και

β) Ενσωματώνει, όσο αυτό είναι δυνατό και ενδεδειγμένο, τη διατήρηση και αειφορική χρήση της βιολογικής ποικιλότητας στα σχετικά τομεακά και διατομεακά σχέδια, προγράμματα και πολιτικές.»

Η εξοικονόμηση ενέργειας καλύπτεται από ένα σημαντικό αριθμό Οδηγιών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, αφού η Ορθολογική Χρήση της Ενέργειας είναι θέμα μεγάλης προτεραιότητας της Ευρωπαϊκής ενεργειακής και περιβαλλοντικής πολιτικής. Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο εξέδωσε την Οδηγία 2002/91/EK για την «ενεργειακή απόδοση των κτιρίων», την οδηγία 2002/31 για τη σήμανση της κατανάλωσης ενέργειας των οικιακών κλιματιστικών, την οδηγία 2003/66/EK που αφορά στη σήμανση της κατανάλωσης ενέργειας για τα οικιακά ηλεκτρικά ψυγεία και τους καταψύκτες, την Οδηγία 2004/8/EK για την προώθηση της «συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας» την Οδηγία 2005/32/EK για την «οικολογική σχεδίαση του εξοπλισμού» και τέλος, την πρόσφατη Οδηγία 2006/32/EK για τη «βελτίωση της Ενεργειακής Απόδοσης κατά την τελική χρήση και τις Ενεργειακές Υπηρεσίες».

Στόχοι της Οδηγίας 2002/91/EK για την «Ενεργειακή Απόδοση των κτιρίων» είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, η ορθολογικότερη χρήση της ενέργειας στα κτίρια, η αξιοποίηση των ΑΠΕ, η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και η χρήση υλικών φιλικών προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο, δηλαδή υλικών τα οποία δεν απαιτούν μεγάλη ποσότητα ενέργειας για την παραγωγή τους και δεν εκπέμπουν τοξικές ουσίες στον κύκλο της ζωής τους. Η Οδηγία 2006/32/EK για την Ενεργειακή Απόδοση κατά την τελική χρήση και τις Ενεργειακές Υπηρεσίες, θέτει ενδεικτικό στόχο εξοικονόμησης ενέργειας στα κράτη-μέλη 9% για τα επόμενα εννέα χρόνια και επίσης υποχρεώνει τα κράτη-μέλη να εκπονήσουν σχέδια δράσης ενεργειακής απόδοσης (ΣΔΕΑ) ξεκινώντας από τις 30 Ιουνίου 2007.

Η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την εξοικονόμηση ενέργειας στοχεύει:

- α) Στη βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας και επάρκειας.
- β) Στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>.
- γ) Στην ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της Ευρωπαϊκής οικονομίας.
- δ) Στη δημιουργία μιας μεγάλης αγοράς για τις σύγχρονες τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας και τα αντίστοιχα προϊόντα.
- ε) Στη σύντομη απόσβεση των επενδύόμενων κεφαλαίων στους τομείς αυτούς.

Στην Ελλάδα, το νομοθετικό πλαίσιο σχετικά με το ζήτημα της ενεργειακής απόδοσης του κτιριακού τομέα, καλύπτεται από διάφορα μέτρα (κτιριοδομικούς και άλλους κανονισμούς) που εξελίχθηκαν από το 1975 έως σήμερα, ενώ μέχρι το 2008 ήταν σε ισχύ ο κανονισμός θερμομόνωσης του 1979. Με το νόμο όμως Ν3661/2008 «Μέτρα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων», ΦΕΚ 89/19 Μαΐου 2008, η ελληνική νομοθεσία εναρμονίζεται με την Οδηγία 2002/91/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 16ης Δεκεμβρίου 2002 «Για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων».

Ο Νόμος 3661<sup>3</sup> ενσωματώνει όλες τις διατάξεις της Οδηγίας, προβλέπει την έκδοση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης των κτιρίων και διακρίνει πέντε βασικές θεματικές ενότητες, οι οποίες αφορούν στον καθορισμό των ελάχιστων απαιτήσεων ενεργειακής απόδοσης και στη μέθοδο υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης (άρθρο 3) νέων και υφιστάμενων κτιρίων (άρθρα 4 και 5), στην έκδοση πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης (άρθρο 6), στις επιθεωρήσεις των λεβήτων και των εγκαταστάσεων κλιματισμού (άρθρα 7 και 8) και στην πρόβλεψη ειδικευμένων και διαπιστευμένων ενεργειακών επιθεωρητών (άρθρο 9). Όσον αφορά στις παραπάνω πέντε θεματικές ενότητες προβλέπονται συγκεκριμένα, τα παρακάτω:

### **Άρθρο 3**

1. Με τον Κανονισμό καθορίζεται η μέθοδος υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, οι ελάχιστες απαιτήσεις για την ενεργειακή απόδοσή τους, ο τύπος και το περιεχόμενο της μελέτης ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, τα αρμόδια για την εκπόνησή της πρόσωπα, η διαδικασία και η συχνότητα διενέργειας ενεργειακών επιθεωρήσεων των κτιρίων, των λεβήτων, των εγκαταστάσεων θέρμανσης και των συστημάτων κλιματισμού, ο τύπος και το περιεχόμενο του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης που προβλέπεται στο άρθρο 6, η διαδικασία έκδοσής του, ο έλεγχος αυτής και τα προς τούτο αρμόδια όργανα, το ύψος της δαπάνης έκδοσής του και ο τρόπος υπολογισμού της, τυχόν πρόβλεψη κινήτρων για την εφαρμογή πρόσθετων μέτρων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, καθώς και κάθε άλλο ειδικότερο θέμα ή αναγκαία λεπτομέρεια.

2. Η μέθοδος υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων περιλαμβάνει τουλάχιστον:

- α) τα θερμικά χαρακτηριστικά των στοιχείων του κτιρίου, περιλαμβανομένης και της αεροστεγανότητας,
- β) την εγκατάσταση θέρμανσης και τροφοδοσίας θερμού νερού, περιλαμβανομένων και των χαρακτηριστικών των μονώσεών τους,
- γ) την εγκατάσταση κλιματισμού,
- δ) τον εξαερισμό και το φυσικό αερισμό,
- ε) την ενσωματωμένη εγκατάσταση φωτισμού κτιρίων άλλων χρήσεων, πλην της κατοικίας,
- στ) τη θέση και τον προσανατολισμό των κτιρίων, περιλαμβανομένων και των εξωτερικών κλιματικών συνθηκών,
- ζ) τα παθητικά ηλιακά συστήματα, κατά το άρθρο 1 παράγραφος 7α του Γ.Ο.Κ., και την ηλιακή προστασία,
- η) τις επικρατούσες εσωτερικές κλιματικές συνθήκες, περιλαμβανομένων και των επιδιωκόμενων.

3. Κατά τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων συνεκτιμάται, κατά περίπτωση, η θετική επίδραση:

- α) των ενεργητικών ηλιακών συστημάτων, κατά το άρθρο 1 παράγραφος 7β του Γ.Ο.Κ., και άλλων συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτροπαραγωγής, που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας,
- β) της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται μέσω ΣΗΘ,
- γ) των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, σε κλίμακα περιοχής ή οικοδομικού τετραγώνου (τηλεθέρμανση, τηλεψύξη) και
- δ) του φυσικού φωτισμού.

**Άρθρο 4 - Νέα κτίρια**

1. Τα νέα κτίρια πρέπει να πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης που ορίζονται στον Κανονισμό.

2. Για τα νέα κτίρια συνολικής επιφάνειας άνω των χιλίων (1.000) τ.μ., πριν την έναρξη της ανέγερσης, πρέπει να εκπονείται και να υποβάλλεται στην αρμόδια Πολεοδομική Υπηρεσία μελέτη, που συνοδεύει τη μελέτη της παραγράφου 1 του άρθρου 3 και η οποία περιλαμβάνει την τεχνική, περιβαλλοντική και οικονομική σκοπιμότητα εγκατάστασης τουλάχιστον ενός εκ των εναλλακτικών συστημάτων παροχής ενέργειας, όπως αποκεντρωμένων συστημάτων παροχής ενέργειας που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης σε κλίμακα περιοχής ή οικοδομικού τετραγώνου, καθώς και αντλιών θερμότητας.

**Άρθρο 5 - Υφιστάμενα κτίρια**

1. Στα κτίρια συνολικής επιφάνειας άνω των χιλίων (1.000) τ.μ. που υφίστανται ριζική ανακαίνιση, η ενεργειακή απόδοσή τους αναβαθμίζεται, στο βαθμό που αυτό είναι τεχνικά, λειτουργικά και οικονομικά εφικτό, ώστε να πληροί τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης, όπως αυτές καθορίζονται στον Κανονισμό.

Οι απαιτήσεις αυτές θεσπίζονται είτε για το ανακαινιζόμενο κτίριο ως σύνολο είτε μόνο για τις ανακαινιζόμενες εγκαταστάσεις ή τα δομικά στοιχεία αυτού, εφόσον αποτελούν μέρος ανακαίνισης που πρέπει να ολοκληρωθεί εντός περιορισμένου χρονικού διαστήματος, με στόχο τη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου.

**Άρθρο 6 - Πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης**

1. Μόλις ολοκληρωθεί η κατασκευή νέου κτιρίου ή η ριζική ανακαίνιση υφιστάμενου κτιρίου κατά το άρθρο 5, ο ιδιοκτήτης υποχρεούται να ζητήσει την έκδοση πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης. Κατά την πώληση ή τη μίσθωση κτιρίων διατίθεται από τον ιδιοκτήτη στον αγοραστή ή τον μισθωτή αυτών πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης. Η εφαρμογή των διατάξεων των προηγούμενων εδαφίων δεν μπορεί να αποκλεισθεί με συμφωνία των συμβαλλόμενων μερών. Με κοινή απόφαση των Υπουργών Οικονομίας και Οικονομικών, Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, καθορίζονται οι ειδικότεροι όροι έκδοσης και διάθεσης του ανωτέρω πιστοποιητικού, καθώς και οι διοικητικές κυρώσεις σε βάρος του υπόχρεου, σε περίπτωση μη έκδοσης ή μη διάθεσής του. Με την ίδια απόφαση καθορίζεται, σε περίπτωση επιβολής προστίμου, η διαδικασία είσπραξης αυτού, καθώς και κάθε αναγκαία λεπτομέρεια.

1. Το πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης κτιρίου εκδίδεται από τους επιθεωρητές του άρθρου 9, κατά τα οριζόμενα στον Κανονισμό, και ισχύει, κατά ανώτατο όριο, για δέκα (10) έτη. Εάν στο κτίριο γίνει ριζική ανακαίνιση ή προσθήκη σε έκταση που επηρεάζει την ενεργειακή απόδοσή του, η ισχύς του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης κτιρίου λήγει κατά το χρόνο ολοκλήρωσης της ανακαίνισης ή της προσθήκης, πριν παρέλθει το διάστημα των δέκα (10) ετών.

2. Το πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης κτιρίου περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, τιμές αναφοράς, όπως ισχύουσες νομικές απαιτήσεις και κριτήρια συγκριτικής αξιολόγησης, ώστε να επιτρέπει στους καταναλωτές να συγκρίνουν και να αξιολογούν την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Το πιστοποιητικό συνοδεύεται από συστάσεις για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, σε σχέση με το κόστος που μπορεί αυτή να συνεπάγεται.

3. Η ενεργειακή πιστοποίηση οριζοντίων ιδιοκτησιών κατά την έννοια του άρθρου 1 του ν. 3741/1929 (ΦΕΚ 4 Α') και ιδιοκτησιών κατά την έννοια του άρθρου 1 του ν.δ. 1024/1971 (ΦΕΚ 232 Α') βασίζεται σε κοινή πιστοποίηση ολόκληρου του κτιρίου, εφόσον πρόκειται για συγκροτήματα με κοινόχρηστο σύστημα θέρμανσης. Η δαπάνη έκδοσης του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης κτιρίου βαρύνει, κατά περίπτωση, τον κύριο ή τους συγκυρίους ολόκληρου του κτιρίου, κατά το ποσοστό συγκυριότητας εκάστου.

4. Σε κτίρια τα οποία χρησιμοποιούνται από δημόσιες υπηρεσίες και φορείς του ευρύτερου δημόσιου τομέα, όπως αυτός ορίζεται κάθε φορά, τοποθετείται, σε ευδιάκριτη θέση, πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης κτιρίου, του οποίου η ισχύς δεν μπορεί να υπερβαίνει τα δέκα (10) έτη. Στα

κτίρια αυτά μπορεί να αναρτάται πίνακας, όπου αναγράφονται οι συνιστώμενες και οι επικρατούσες εσωτερικές θερμοκρασίες, καθώς και κάθε κλιματικός παράγων που επηρεάζει τις θερμοκρασίες αυτές.

### **Άρθρο 7 - Επιθεώρηση λεβήτων**

1. Για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και τον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, διενεργείται από τους ενεργειακούς επιθεωρητές επιθεώρηση στους λέβητες κτιρίων που θερμαίνονται με συμβατικά ορυκτά καύσιμα, ως εξής: α) τουλάχιστον κάθε πέντε (5) έτη, στους λέβητες με ωφέλιμη ονομαστική ισχύ από είκοσι (20) έως και εκατό (100) kW, β) τουλάχιστον κάθε δύο (2) έτη, στους λέβητες με ωφέλιμη ονομαστική ισχύ ανώτερη των εκατό (100) kW και, αν αυτοί θερμαίνονται με αέριο καύσιμο, τουλάχιστον κάθε τέσσερα (4) έτη. Οι επιθεωρητές συντάσσουν έκθεση, στην οποία αξιολογείται η αποτελεσματικότητα του λέβητα και διατυπώνονται οδηγίες και συστάσεις για τη ρύθμιση, συντήρηση, επισκευή ή αντικατάστασή του, εφόσον συντρέχει περίπτωση.

2. Εγκαταστάσεις θέρμανσης με λέβητες παλαιότερους των δεκαπέντε (15) ετών και ωφέλιμη ονομαστική ισχύ ανώτερη των είκοσι (20) kW επιθεωρούνται, στο σύνολό τους, από τους ενεργειακούς επιθεωρητές μία μόνο φορά, σε χρόνο και σύμφωνα με τη διαδικασία που ορίζεται στον Κανονισμό. Οι επιθεωρητές συντάσσουν έκθεση, στην οποία αξιολογείται η αποτελεσματικότητα του λέβητα και των διαστάσεων του σε σχέση με τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου και διατυπώνονται οδηγίες και συστάσεις για τυχόν επιβαλλόμενη αντικατάσταση του λέβητα, τροποποιήσεις του συστήματος θέρμανσης και εναλλακτικές λύσεις.

### **Άρθρο 8 - Επιθεώρηση εγκαταστάσεων κλιματισμού**

1. Για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και τον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, διενεργείται από τους ενεργειακούς επιθεωρητές επιθεώρηση στις εγκαταστάσεις κλιματισμού κτιρίων, με ωφέλιμη ονομαστική ισχύ ανώτερη των δώδεκα (12) kW, τουλάχιστον κάθε πέντε (5) έτη. Οι επιθεωρητές συντάσσουν έκθεση, στην οποία αξιολογούνται η αποτελεσματικότητα και οι διαστάσεις της εγκατάστασης κλιματισμού σε σχέση με τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου και διατυπώνονται κατάλληλες οδηγίες και συστάσεις για βελτίωση ή αντικατάσταση της εγκατάστασης του κλιματισμού.

2. Με κοινή απόφαση των Υπουργών Οικονομίας και Οικονομικών, Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, καθορίζονται οι διοικητικές κυρώσεις που επιβάλλονται σε περίπτωση μη συμμόρφωσης προς τις υποχρεώσεις που προκύπτουν από τις διατάξεις των άρθρων 7 και 8.

### **Άρθρο 9 - Επιθεωρητές κτιρίων και επιθεωρητές λεβήτων και εγκαταστάσεων κλιματισμού**

1. 'Η πιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και η επιθεώρηση των λεβήτων και εγκαταστάσεων κλιματισμού διεξάγονται από ειδικευμένους και για το σκοπό αυτόν διαπιστευμένους ενεργειακούς επιθεωρητές'.

2. Με διάταγμα που εκδίδεται κατόπιν πρότασης των Υπουργών Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, εντός έξι (6) μηνών από την έναρξη ισχύος του παρόντος νόμου, καθορίζονται τα προσόντα των επιθεωρητών κτιρίων και των επιθεωρητών λεβήτων και εγκαταστάσεων κλιματισμού κτιρίων, οι κανόνες και οι αρχές που διέπουν την εκτέλεση του έργου τους, η διαδικασία διαπίστευσής τους και χορήγησης αντίστοιχης άδειας, οι ιδιότητες που είναι ασυμβίβαστες με το έργο τους, τα ζητήματα που αφορούν στην εγγραφή τους σε αντίστοιχα μητρώα, η αμοιβή τους και ο τρόπος καθορισμού της, οι εις βάρος τους διοικητικές κυρώσεις, τα όργανα που επιβάλλουν αυτές, οι διοικητικές προσφυγές κατά των κυρώσεων, οι προθεσμίες άσκησής τους, καθώς και κάθε άλλο ειδικότερο θέμα ή αναγκαία λεπτομέρεια. Με το ίδιο διάταγμα μπορεί να προβλέπεται η συγκρότηση επιτροπής, η οποία γνωμοδοτεί για τα ζητήματα που αφορούν στη χορήγηση ή αφαίρεση άδειας ενεργειακού επιθεωρητή και εισηγείται προς τον Υπουργό Ανάπτυξης κάθε αναγκαία πράξη ή ρύθμιση σχετική με τους ενεργειακούς επιθεωρητές και το αντικείμενο των ενεργειακών επιθεωρήσεων.

3. Από την αρμόδια Διεύθυνση του Υπουργείου Ανάπτυξης τηρείται, σε ηλεκτρονική μορφή, Αρχείο Επιθεωρήσεως Κτιρίων, στο οποίο καταχωρίζονται, σε ξεχωριστές μερίδες: α) τα πιστοποιητικά

*ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, β) οι εκθέσεις επιθεώρησης λεβήτων κτιρίων και γ) οι εκθέσεις επιθεώρησης εγκαταστάσεων κλιματισμού κτιρίων.*

Σήμερα, επιβάλλεται να πραγματοποιούνται ενεργειακές επιθεωρήσεις σε όλα τα νέα κτίρια αλλά και στα υφιστάμενα άνω των 1000 τετραγωνικών μέτρων που ανακαινίζονται. Με την προώθηση μέτρων και τη θέσπιση νόμων, η περιβαλλοντική συνείδηση θεμελιώνεται και η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας γίνεται επιτακτική.

## 2.2 Ενεργειακή διαχείριση κτιρίων

Ένας καθοριστικός παράγοντας εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια είναι η ενεργειακή διαχείριση του κτιρίου, μία συστηματική, οργανωμένη και συνεχής δραστηριότητα που αποτελείται από ένα προγραμματισμένο σύνολο διοικητικών, τεχνικών και οικονομικών δράσεων.

Οι επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα κτίριο μπορεί να αφορούν:

- Το κτιριακό κέλυφος (πχ. θερμομόνωση, κατάλληλα συστήματα ανοιγμάτων, παθητικά ηλιακά συστήματα).
- Τον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου (πχ. χρήση βλάστησης).
- Τις εγκαταστάσεις θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού, ζεστού νερού και τις ηλεκτρικές συσκευές.
- Την ορθολογική χρήση του κτιρίου και την αξιοποίηση των δομικών του στοιχείων (πχ. ενεργειακή διαχείριση, φυσικός αερισμός, αξιοποίηση της θερμικής μάζας).

Η εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα κτίριο εξασφαλίζεται με τον κατάλληλο σχεδιασμό του κτιρίου, τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών δομικών στοιχείων και συστημάτων και μέσω της υψηλής αποδοτικότητας των εγκατεστημένων ενεργειακών συστημάτων, η οποία προϋποθέτει την άριστη ποιότητα του σχετικού εξοπλισμού και της εγκατάστασής του καθώς και των σχετικών τεχνικών μελετών που τον προδιαγράφουν.

Η φάση του σχεδιασμού ενός κτιρίου είναι κρίσιμη, γιατί καθορίζει την ενεργειακή συμπεριφορά του. Τα κτίρια καταναλώνουν ενέργεια ανάλογα με τη χρήση τους για την επίτευξη θερμικής και οπτικής άνεσης εντός των χώρων, καθώς και για τη χρήση ειδικών συσκευών. Η έννοια της θερμικής άνεσης σε ένα χώρο σχετίζεται με το ενεργειακό ισοζύγιο των κατοίκων. Η ενεργειακή διαχείριση έχει σαν στόχο την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας με ταυτόχρονη διατήρηση των συνθηκών άνεσης ή ακόμη και με βελτίωση τους.

Η ενεργειακή διαχείριση στηρίζεται σε τέσσερις αρχές:

- Χρήση κατάλληλων συστημάτων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, πχ. τεχνολογίες κτιριακού κελύφους (μονώσεις, βελτιωμένοι υαλοπίνακες, συστήματα σκίασης και ρύθμισης του φωτισμού κλπ) και ενεργειακά αποδοτικές ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις (για θέρμανση, ψύξη, αερισμό, φωτισμό) και συσκευές.
- Αξιοποίηση των διαθέσιμων ΑΠΕ για τη μερική ή ολική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου.
- Ενεργειακός έλεγχος με κατάλληλο σύστημα, που εξασφαλίζει τη διαρκή επιτήρηση και τον έλεγχο των ενεργειακών συστημάτων του κτιρίου. Το σύστημα αυτό, γνωστό ως BEMS (Building Energy Management System), αποτελεί τη μοναδική λύση για τη συντονισμένη και ορθολογική λειτουργία των σύγχρονων εγκαταστάσεων σε μεσαία και μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα.
- Εφαρμογή βιοκλιματικού σχεδιασμού κτιρίων και περιβάλλοντος χώρου.



Από την ενεργειακή διαχείριση προκύπτουν τα παρακάτω οφέλη:

- Εξοικονόμηση ενέργειας με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους λειτουργίας (λιγότερα καύσιμα).
- Μείωση των ρύπων, που προκαλούνται από την καύση των συμβατικών καυσίμων.
- Εξασφάλιση θερμικής και οπτικής άνεσης.

Η επίτευξη θερμικής και οπτικής άνεσης εντός των χώρων είναι ο πρωταρχικός στόχος του ενεργειακού σχεδιασμού. Η οπτική άνεση σε ένα χώρο απαιτεί την επίτευξη των απαραίτητων φωτιστικών επιπέδων για το είδος των εργασιών που επιτελούνται στο χώρο, την εξασφάλιση οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον και την αποφυγή της οπτικής θάμβωσης. Η έννοια της θερμικής άνεσης σε ένα χώρο σχετίζεται με το ενεργειακό ισοζύγιο των ενοίκων. Κάθε οργανισμός παράγει, δέχεται και αποβάλλει θερμότητα κυρίως με διαδικασίες μεταφοράς, εκπομπής και εξάτμισης. Θετικό θερμικό ισοζύγιο αντιστοιχεί σε αίσθημα θερμικής δυσφορίας, ενώ αρνητικό ισοζύγιο προκαλεί το αίσθημα κρύου. Στην περίπτωση που το φυσικό περιβάλλον του κτιρίου δεν εξασφαλίζει την θερμική ουδετερότητα του ατόμου, τότε επιβάλλεται η μεταβολή των παραμέτρων, προσωπικών ή κλιματικών, χωρίς να είναι απαραίτητη κατ' ανάγκη η προσθήκη η αφαίρεση θερμότητας από τον χώρο.

Η επίτευξη των βέλτιστων τιμών των κλιματικών παραμέτρων στο κτίριο και κυρίως της εσωτερικής θερμοκρασίας σχετίζεται πλέον με το ενεργειακό ισοζύγιο του ίδιου του κτιρίου. Μείωση των θερμικών απωλειών του κτιρίου επιτυγχάνεται κυρίως με τη μείωση της μεταφερόμενης θερμότητας μέσω του κελύφους και την ανάκτηση θερμότητας κατά τον αερισμό. Η θερμική προστασία του κελύφους με χρήση θερμομόνωσης εξασφαλίζει τη μείωση των απωλειών, ενώ η χρήση ειδικών εναλλακτών θερμότητας μειώνει δραματικά τις απώλειες μέσω αερισμού.

Η αύξηση της εισερχόμενης στο κτίριο ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ψυχρής περιόδου συντελεί στην βελτίωση του θερμικού ισοζυγίου του και την μείωση των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση. Η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στο κτίριο μέσω των διάφανων ανοιγμάτων και αποθηκεύεται ως θερμότητα στη μάζα του κτιρίου, η οποία επανεκπέμπεται με την μορφή θερμικής ακτινοβολίας που πλέον δε μπορεί να διαφύγει από κτίριο (φαινόμενο θερμοκηπίου). Το φυσικό αυτό φαινόμενο αποτελεί την σχεδιαστική αρχή των λεγόμενων παθητικών ηλιακών κτιρίων.

### 2.2.1 Συστήματα Ενεργειακού Ελέγχου Κτιρίων

Τα Συστήματα Ενεργειακού Ελέγχου Κτιρίων (Building Energy Management Systems), μπορούν να βοηθήσουν στην καταγραφή της τρέχουσας κατανάλωσης ενέργειας και στη σύγκρισή τους με τυποποιημένες καταναλώσεις.

Μελετώντας την υπάρχουσα ενεργειακή κατάσταση αναλύονται όλα τα αναγκαία μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας που πρέπει να ληφθούν, με τεχνοοικονομική ανάλυση αυτών, έτσι ώστε να προκύπτει η μέγιστη οικονομική απολαβή από την εφαρμογή τους. Η κάθε περίπτωση εξοικονόμησης και ανάκτησης ενέργειας σε κτίρια ή παραγωγικές μονάδες πρέπει να μελετηθεί ξεχωριστά ανάλογα με τις ιδιαιτερότητές της. Πριν από οποιαδήποτε προσπάθεια βελτιστοποίησης σχετικά με την ενεργειακή απόδοση είναι απαραίτητη η αξιολόγηση των δυνατοτήτων εξοικονόμησης ενέργειας.

Σε όλες τις ηλεκτρομηχανολογικές μελέτες για νέα κτίρια και εγκαταστάσεις λαμβάνεται υπόψη η ενεργειακή απόδοση, με κριτήρια τόσο εξοικονόμησης ενέργειας αλλά και οικονομικά, έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση σταθμίζοντας τα κόστη κατασκευής και λειτουργίας.

Σε υπό ανέγερση κτίρια και εγκαταστάσεις μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας με τον σωστό ενεργειακό σχεδιασμό αυτών, όπως βιοκλιματική σχεδίαση κτιρίων, σωστή θερμομόνωση κτιρίων και εγκαταστάσεων, θέρμανση με συστήματα χαμηλών θερμοκρασιών (όπως θέρμανση δαπέδου), εφαρμογή ΑΠΕ, ανάκτηση ενέργειας από παραγωγικές διαδικασίες.

Σε υφιστάμενα κτίρια και εγκαταστάσεις μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας με:

- την εφαρμογή απλών μέτρων και ρυθμίσεων χωρίς την κατασκευή ειδικών εγκαταστάσεων ή τροποποίηση των υπαρχόντων,
- την ενεργειακή βελτίωση ή εκσυγχρονισμό των εγκαταστάσεων,
- την κατασκευή εγκαταστάσεων ανάκτησης ενέργειας.

Με τον όρο «ανάκτηση ενέργειας» εννοούμε τη διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται αξιοποίηση μέρους της θερμότητας που αποβάλλεται από κάποια μονάδα παραγωγής θερμότητας ή παραγωγικής διαδικασίας. Η ανάκτηση γίνεται μέσω εναλλαγής θερμότητας με την χρήση εναλλακτών θερμότητας. Εναλλάκτης θερμότητας ονομάζεται η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας μεταξύ δύο ρευστών μέσων (αέρα, νερό, καυσαέρια κλπ) διαφορετικής θερμοκρασίας.

Ο σκοπός ενός συστήματος ανάκτησης θερμότητας είναι η αξιοποίηση της μεγαλύτερης δυνατής ποσότητας απορριπτόμενης θερμότητας με την απλούστερη - οικονομικότερη τεχνικά λύση, που έχει τις δυνατόν μικρότερες επεμβάσεις στο υπάρχον σύστημα. Η ανακτώμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη αναγκών της παραγωγικής διαδικασίας σε θερμό νερό ή θερμό αέρα, για την δημιουργία προκλιματισμένου αέρα συστήματος κλιματισμού ή εξαερισμού, για την παραγωγή ζεστών νερών χρήσης κλπ.

Στη συνέχεια συνοψίζονται οι σημαντικότερες μέθοδοι ενεργειακού ελέγχου κτιριακής κατανάλωσης και εξοικονόμησης ενέργειας:

- Η μόνωση έναντι των καιρικών συνθηκών και της ηλιακής ακτινοβολίας και η μείωση των απωλειών ενέργειας μέσω βελτιωμένης μόνωσης.
- Η ορθολογική παραγωγή ενέργειας για θέρμανση ή/και ψύξη.
- Η αποτελεσματική εκμετάλλευση της θερμότητας από εξωγενείς παράγοντες στο κτίριο ή της υπάρχουσας χαμηλής θερμοκρασίας (για παράδειγμα η φυσιολογική πτώση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας).
- Η αποτελεσματική, με όσο το δυνατό μικρότερες απώλειες, κατανομή της ενέργειας θέρμανσης και ψύξης στο κτίριο.
- Η μεγιστοποίηση εκμετάλλευσης ΑΠΕ και η επίτευξη ενός όσο το δυνατόν υψηλότερου βαθμού ενεργειακής απόδοσης με τη χρήση ορυκτών καυσίμων (λέβητες συμπύκνωσης καυσαερίων ή λέβητες χαμηλών θερμοκρασιών).
- Η βέλτιστη ρύθμιση/παραμετροποίηση των υφισταμένων εγκαταστάσεων θέρμανσης, ψύξης και εξαερισμού.
- Η μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος σε εγκαταστάσεις θέρμανσης, ψύξης και εξαερισμού (αντλίες θερμότητας, ανεμιστήρες κλπ.).

## 2.2.2 Βιοκλιματικός Σχεδιασμός

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός είναι ο σχεδιασμός που επιδιώκει την κατασκευή πιο αποδοτικών ενεργειακά κτιρίων, μέσω της προσαρμογής τους στις ειδικές κλιματολογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων αφορά τον σχεδιασμό κτιρίων και χώρων (εσωτερικών και εξωτερικών – υπαίθριων) με βάση το τοπικό κλίμα, συνήθως αναφερόμενο ως μικροκλίμα, με σκοπό την εξασφάλιση συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης, αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια και άλλες ανανεώσιμες πηγές, αλλά και τα φυσικά φαινόμενα του κλίματος. Το ζητούμενο είναι ουσιαστικά, κατά την ανέγερση των κτιρίων να λαμβάνονται υπόψη οι τοπικές κλιματικές συνθήκες και να γίνεται χρήση παθητικών ηλιακών τεχνολογιών (passive solar technologies) με στόχο τη μείωση της χρήσης ενέργειας, όπως για παράδειγμα τεχνολογίες φυσικής θέρμανσης (heating) ή δροσίσιμου (cooling). Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός εκτός από τις υγιεινές συνθήκες διαβίωσης λόγω χρήσης μη τοξικών υλικών, συμβάλλει και στην ποιότητα του περιβάλλοντος με την εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνει στα κτίρια, στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και στον περιορισμό έως και εξάλειψη μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα κτίρια.

Η βιοκλιματική αρχιτεκτονική είναι συνώνυμη του βιοκλιματικού σχεδιασμού και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες της οικολογικής δόμησης, η οποία ασχολείται με τον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραμέτρων στο επίπεδο των κτιριακών μονάδων μελετώντας τις ακόλουθες κατευθύνσεις:

- τη μελέτη του δομημένου περιβάλλοντος και των προβλημάτων που αυτό δημιουργεί (αύξηση θερμοκρασίας, συγκέντρωση αέριων ρύπων, δυσκολία στην κυκλοφορία αέρα),
- το σχεδιασμό των κτιρίων,
- την επιλογή των δομικών υλικών, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις θερμικές και οπτικές, όσο και τις τοξικολογικές τους ιδιότητες.

Οι βασικές αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού είναι οι ακόλουθες:

- Αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση τον χειμώνα. Με αυτή τη διαδικασία βελτιώνεται το θερμικό ισοζύγιο του κτιρίου και μειώνονται οι ενεργειακές ανάγκες του για θέρμανση.
- Αξιοποίηση των δροσερών ανέμων για τον αερισμό και την ψύξη του κτιρίου το καλοκαίρι.
- Αξιοποίηση του φυσικού φωτός για τον φωτισμό του κτιρίου.
- Αξιοποίηση της βλάστησης για τον σκιασμό του κτιρίου το καλοκαίρι.
- Μείωση των θερμικών απωλειών του κτιρίου, η οποία εξασφαλίζεται με τη θερμομόνωση του κελύφους και με την χρήση εναλλακτών θερμότητας, οι οποίοι περιορίζουν δραστικά τις απώλειες μέσω αερισμού.

Οι βασικές αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την εποχή. Έτσι, το χειμώνα οι βασικές αρχές του είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω έκθεσης σε

χαμηλές θερμοκρασίες και η μεγιστοποίηση του οφέλους λόγω έκθεσης σε ηλιακή ακτινοβολία, ενώ το καλοκαίρι, οι βασικές αρχές του είναι η προστασία από τον ήλιο (σκίαση), η χρήση διαφόρων τεχνολογιών δροσισμού με ενδεχόμενη χρήση ΑΠΕ και η χρήση τοπικά διαθέσιμων υλικών κατασκευής.

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός, αν και είναι ενσωματωμένος στην αρχιτεκτονική που χαρακτηρίζει κάθε τόπο σε ολόκληρη τη γη, θεωρείται από πολλούς μία νέα οπτική στην αρχιτεκτονική και σχετίζεται με την οικολογία περισσότερο, παρά με την ενέργεια και την εξοικονόμηση που μπορεί να επιφέρει. Εντούτοις, η βιοκλιματική αρχιτεκτονική έχει αποτελέσει τις τελευταίες δεκαετίες βασική προσέγγιση στην κατασκευή κτιρίων παγκοσμίως, ενώ στα περισσότερα κράτη πλέον αποτελεί βασικό κριτήριο σχεδιασμού μικρών και μεγάλων κτιρίων, το οποίο λαμβάνεται υπόψη από όλους τους μελετητές, αρχιτέκτονες και μηχανικούς. Κι αυτό, λόγω των χαμηλότερων απαιτήσεων ενέργειας για τη θέρμανση, το δροσισμό και το φωτισμό των κτιρίων που προκύπτουν από την πρακτική της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής και τα πολλαπλά οφέλη που προκύπτουν από αυτήν: ενεργειακά (εξοικονόμηση και θερμική/οπτική άνεση), οικονομικά (μείωση κόστους ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων), περιβαλλοντικά (μείωση ρύπων) και κοινωνικά.

Ειδικότερα, το ενεργειακό όφελος που προκύπτει από την εφαρμογή του βιοκλιματικού σχεδιασμού αποδίδεται με τους παρακάτω τρόπους:

- εξοικονόμηση ενέργειας από την σημαντική μείωση απωλειών λόγω της βελτιωμένης προστασίας του κελύφους και συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων,
- παραγωγή θερμικής ενέργειας (θερμότητας) μέσω των ηλιακών συστημάτων άμεσου ή έμμεσου κέρδους με συμβολή στις θερμικές ανάγκες των χώρων προσάρτησης και μερική κάλυψη των απαιτήσεων θέρμανσης του κτιρίου,
- δημιουργία συνθηκών θερμικής άνεσης και μείωση των απαιτήσεων όσον αφορά στη ρύθμιση θερμοστάτη (σε χαμηλότερες θερμοκρασίες τον χειμώνα και υψηλότερες το καλοκαίρι),
- διατήρηση της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα σε επίπεδα υψηλά τον χειμώνα (και αντίστοιχα χαμηλά το καλοκαίρι) με αποτέλεσμα την μείωση του φορτίου για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων από τα επικουρικά συστήματα κατά την χρήση του κτιρίου.

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας και των περιβαλλοντικών πηγών γενικότερα, όπως προκύπτει από το βιοκλιματικό σχεδιασμό, επιτυγχάνεται στα πλαίσια της συνολικής θερμικής λειτουργίας του κτιρίου και της σχέσης κτιρίου - περιβάλλοντος. Η δε θερμική λειτουργία ενός κτιρίου αποτελεί μία δυναμική κατάσταση, η οποία αφενός εξαρτάται από τις τοπικές κλιματικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους (την ηλιοφάνεια, τη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα, τη σχετική υγρασία, τον άνεμο, τη βλάστηση, το σκιασμό από άλλα κτίρια), αλλά και τις συνθήκες χρήσης του κτιρίου (οικείες, γραφεία, νοσοκομεία κλπ.), αφετέρου βασίζεται στην αντίστοιχη ενεργειακή συμπεριφορά των δομικών του στοιχείων και (κατ' επέκταση) των ενσωματωμένων παθητικών ηλιακών συστημάτων, αλλά και το ενεργειακό προφίλ που προκύπτει από την λειτουργία του κτιρίου.

Η απόδοση του βιοκλιματικού σχεδιασμού εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, γεγονός που τον καθιστά «ευαίσθητο» σε εξωγενείς και μη-τεχνικούς παράγοντες. Για τον λόγο αυτό, τα βασικά κριτήρια για την εφαρμογή του βιοκλιματικού σχεδιασμού πρέπει να είναι τα εξής: η απλότητα χρήσης των εφαρμογών και η αποφυγή πολύπλοκων παθητικών συστημάτων και τεχνικών, η

μικρή συμβολή του χρήστη του κτιρίου στη λειτουργία των συστημάτων, η χρήση ευρέως εφαρμοσμένων συστημάτων και τέλος, η χρήση τεχνικοοικονομικά αποδοτικών ενεργειακών τεχνολογιών.

Ο βαθμός στον οποίο ο βιοκλιματικός σχεδιασμός σήμερα αξιοποιεί το τοπικό κλίμα ποικίλει, γεγονός που παρέχει μία ευελιξία ως προς τους τρόπους αρχιτεκτονικής έκφρασης και δυνατοτήτων εφαρμογής μέσα από πολύ απλές τεχνικές και επεμβάσεις έως και πολύπλοκα παθητικά ηλιακά συστήματα. Είναι ενσωματωμένος στην αρχιτεκτονική των περισσότερων διακεκριμένων αρχιτεκτόνων και μελετητών διεθνώς, με έργα που αποτελούν πρότυπες εφαρμογές βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής, από τις οποίες όχι μόνον μαθαίνουμε σήμερα, αλλά και αποδεικνύουν τα πολλαπλά οφέλη που προκύπτουν από την συμβίωση με το περιβάλλον και το κλίμα.

Εκατοντάδες χιλιάδες κτίρια έχουν ήδη κατασκευασθεί με βάση τις αρχές αυτές σε όλο τον κόσμο και παρουσιάζουν ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στην Ελλάδα, τα υφιστάμενα βιοκλιματικά κτίρια λειτουργούν με εξαιρετική επιτυχία και με βάση τις υπάρχουσες μετρήσεις καταναλώνουν κατά πολύ λιγότερη ενέργεια από ότι τα αντίστοιχα συμβατικά κτίρια. Ήδη, σημαντικά νέα κτίρια όπως το νέο Μουσείο της Ακρόπολης, το νέο Μουσείο των Δελφών, το νέο κτίριο των κεντρικών γραφείων της ΔΕΗ κ.α. έχουν σχεδιασθεί και κατασκευάζονται ώστε να καλύπτουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών αναγκών τους με ηλιακή ενέργεια και άλλες ατμοσφαιρικές πηγές.

### 2.3 Τα φυτά στο Βιοκλιματικό Σχεδιασμό

Τα δέντρα και τα φυτά επηρεάζουν σημαντικά το μικροκλίμα μιας περιοχής, επομένως η συνεισφορά τους στον βιοκλιματικό σχεδιασμό είναι πολύ σημαντική. Οι σημαντικότεροι από τους λόγους που τα φυτά συνεισφέρουν σημαντικά στη βιοκλιματική αρχιτεκτονική είναι οι εξής:

- Προσφέρουν ηλιοπροστασία στα κτίρια, η οποία εξασφαλίζεται με το φύτεμα δέντρων σε μικρή απόσταση από τα κτίρια, με τα αναρριχώμενα φυτά σε κατακόρυφους τοίχους και με την κατασκευή κήπων σε δώματα.
- Μειώνουν την ταχύτητα του ανέμου. Η ανεμοπροστασία των κτιρίων εξασφαλίζεται με δέντρα και θάμνους, που θεωρούνται πορώδη εμπόδια, γιατί επιτρέπουν τη διέλευση ενός μέρους του ανέμου, περιορίζοντας έτσι τους στροβιλισμούς και δημιουργώντας μία ευρύτερη ζώνη προστασίας.
- Μειώνουν τον θόρυβο, για παράδειγμα μια συστοιχία δέντρων μήκους 33 μέτρων και πλάτους 15 μέτρων μειώνει τον θόρυβο ενός αυτοκινητοδρόμου έως και κατά 50%.
- Εμποδίζουν την διάβρωση του εδάφους λόγω βροχοπτώσεων.
- Μειώνουν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
- Μειώνουν την ατμοσφαιρική ρύπανση.
- Δημιουργούν γενικότερα ήπιες συνθήκες στους χώρους πάνω στους οποίους που τοποθετούνται.

Οι παραπάνω δυνατότητες των φυτών οφείλονται στον τρόπο λειτουργίας τους. Κάθε φυτό είναι ένα μικρό εργοστάσιο. Στα φύλλα υπάρχουν πόροι (στόματα ή στομάτια), που ανοίγουν την ημέρα και κλείνουν τη νύχτα. Το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), που υπάρχει στην ατμόσφαιρα, διαχέεται στους πόρους των φύλλων και μαζί με το νερό μετασχηματίζονται σε υδατάνθρακες και οξυγόνο ( $\text{O}_2$ ), χρησιμοποιώντας το ηλιακό φως ως πηγή ενέργειας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται φωτοσύνθεση. Στη συνέχεια το οξυγόνο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, ενώ οι υδατάνθρακες μετακινούνται στα διάφορα μέρη του φυτού και παράγουν τις οργανικές ουσίες. Το νερό ανεβαίνει, μέσω των ξυλωδών σωλήνων, από τη ρίζα στα φύλλα και στη συνέχεια αποβάλλεται από αυτά υπό τη μορφή υδρατμών. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται εξατμισοδιαπνοή.

Γνωρίζουμε ότι η απαιτούμενη θερμότητα για τη μετατροπή του νερού σε υδρατμούς είναι περίπου 2324 kJ/kg νερού. Τη θερμότητα αυτή αντλούν τα φυτά από τον αέρα του περιβάλλοντος και έτσι επιτυγχάνουν την τοπική μείωση της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με έρευνα, διαπιστώθηκε ότι ένα μεγάλο δέντρο εξατμίζει 450 κιλά νερού κατά τη διάρκεια μιας καλοκαιρινής ημέρας. Αυτό σημαίνει ότι αντλεί από τον αέρα θερμότητα 1045800 kJ (δηλαδή 2324x450), συνεπώς επιτυγχάνει δροσισμό ισοδύναμο με τη λειτουργία πέντε μικρών κλιματιστικών που λειτουργούν 20 ώρες ημερησίως.

Πολλές έρευνες έδειξαν επίσης, ότι η θερμοκρασία στα αστικά πάρκα είναι έως και 8°C χαμηλότερη από εκείνη στους γειτονικούς δομημένους χώρους και ότι καθώς απομακρυνόμαστε από ένα πάρκο έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0,5°C ανά 100 m.

Αξίζει να αναφερθεί, πως όταν η σχετική υγρασία είναι χαμηλή, έχουμε μεγάλη αύξηση της εξατμισοδιαπνοής, με αποτέλεσμα η ρίζα να αδυνατεί να τροφοδοτήσει με την απαιτούμενη

ποσότητα νερού το φυτό. Έχουμε λοιπόν, αύξηση της θερμοκρασίας του, αντίσταση στην είσοδο του διοξειδίου του άνθρακα (κλείσιμο πόρων), διακοπή της φωτοσύνθεσης και μάρανση του φυτού.

Έχει διαπιστωθεί ότι τα φυτεμένα δώματα μειώνουν τα φορτία κλιματισμού και θέρμανσης στον τελευταίο όροφο των κτιρίων σε ποσοστό έως 30% το καλοκαίρι και 10% τον χειμώνα αντίστοιχα. Παράλληλα, αποτελούν φυσικές μονάδες οξυγόνου γιατί μειώνουν την ατμοσφαιρική ρύπανση λόγω της φωτοσύνθεσης, αλλά ταυτόχρονα δημιουργούν μία ασπίδα προστασίας με οξυγόνο για τους ενοίκους του κτιρίου, καθώς ο οξυγονωμένος αέρας γίνεται βαρύτερος και κατεβαίνει προς τα κάτω. Τέλος, συγκρατούν και καθυστερούν την απορροή του βρόχινου νερού (από μισή έως 2,5 ώρες ανάλογα με την ένταση της βροχής και για πάχος χώματος 15 cm) μειώνοντας τα φαινόμενα πλημμύρας.

Η ιδέα της κατασκευής κήπου στο δώμα ενός κτιρίου, ο οποίος λειτουργεί ως πνεύμονας πρασίνου στο αστικό περιβάλλον και συχνά ονομάζεται ταρατσόκηπος, ξεκίνησε από την Ευρώπη και γνωρίζει ήδη μεγάλη αποδοχή στη Βόρεια Αμερική και την Ιαπωνία.

Η αυξανόμενη κατασκευή κήπων σε δώματα τα τελευταία χρόνια επιβεβαιώνει τα πολλαπλά τους οφέλη. Στην Ελβετία, 100.000 στρέμματα ταρατσών έχουν μετατραπεί σε κήπους. Στο Λονδίνο υπάρχει πρόγραμμα για φύτευση 240.000 στρεμμάτων ταρατσών. Στη Γερμανία, το 10% των ταρατσών είναι φυτεμένες και οι περισσότερες δημοτικές αρχές παρέχουν κίνητρα για την υιοθέτηση του μέτρου από τους πολίτες. Στο Βανκούβερ του Καναδά επιτρέπεται η υπέρβαση του ανώτατου ορίου ύψους των κτιρίων εφόσον κατασκευαστεί κήπος στο δώμα. Στο Τόκιο, είναι υποχρεωτική η φύτευση στο 20% τουλάχιστον του δώματος, αν αυτό είναι μεγαλύτερο των 1000 m<sup>2</sup>.

Στην Ελλάδα εγκαινιάστηκε το Σεπτέμβριο του 2008 ένα από τα πρώτα κτίρια με φυτεμένη οροφή, το κτίριο του Υπουργείου Οικονομίας. Η επιφάνεια, που φυτεύτηκε τον Ιούλιο του ίδιου έτους, είναι περίπου 650 m<sup>2</sup> και αντιστοιχεί στο 52% της οροφής του κτιρίου και καλύπτει την ανατολική και τη βόρεια πλευρά του. Η διαμόρφωση της οροφής του κόστισε περίπου 40.000 ευρώ και το ποσό διατέθηκε από τον προϋπολογισμό του Υπουργείου. Επίσης, η πράσινη στέγη του κτιρίου διοίκησης του ΗΣΑΠ στην πλατεία Ομόνοιας λειτουργεί από το 2008 και αποτελεί μια ανάσα πρασίνου στο κέντρο της Αθήνας.

Η φύτευση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των ετήσιων αναγκών για ψύξη και θέρμανση του κτιρίου κατά 6% και 2% αντίστοιχα αρχικά, ενώ τα ποσοστά αυτά αυξάνονται με την περαιτέρω ανάπτυξη των φυτών. Η ποσοστιαία αυτή μείωση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε απόλυτα μεγέθη, με δεδομένες τις υψηλές καταναλώσεις ενέργειας που απαιτούνται για τον κλιματισμό και τη θέρμανση του κτιρίου.





Εικόνα 2.1 Η πράσινη ταράτσα του κτιρίου του Υπουργείου Οικονομίας, που αποτελεί μια ανάσα στο κέντρο της Αθήνας<sup>11</sup>



Εικόνα 2.2 Η πράσινη στέγη του κτιρίου Διοίκησης ΗΣΑΠ στο κέντρο της Αθήνας<sup>15</sup>

Τα οφέλη της πράσινης οροφής κατατάσσονται στις εξής σημαντικότερες κατηγορίες: ενεργειακά - οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά - αισθητικά. Το σημαντικότερο όμως είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, ειδικά αν αναλογιστούμε ότι σε περίπτωση που η Αθήνα είχε περισσότερα φυτεμένα δώματα θα μπορούσε να εξοικονομήσει έως και 600 MW ηλεκτρική ενέργεια το καλοκαίρι, όση δηλαδή η παραγωγή της μονάδας της ΔΕΗ στη Μεγαλόπολη. Ακόμα, το καλοκαίρι η μέση θερμοκρασία θα ήταν τουλάχιστον κατά 3°C χαμηλότερη κι επίσης, θα υπήρχαν όμορφοι τόποι συνάντησης για τους ένοικους των πολυκατοικιών, που θα τους βοηθούσε να αναπτύξουν κοινωνικές σχέσεις και να καταπολεμηθεί το φαινόμενο της αποξένωσης των κατοίκων των πόλεων.

## 2.4 Ο ρόλος των Εταιριών Παροχής Ενεργειακών Υπηρεσιών στην εξοικονόμηση ενέργειας

Οι Εταιρίες Παροχής Ενεργειακών Υπηρεσιών είναι ένα νέο είδος επιχειρήσεων, που ήδη λειτουργούν με επιτυχία σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες, όπως στην Γερμανία και στην Αυστρία. Προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών, που αφορούν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στις εγκαταστάσεις ή στο κτίριο του χρήστη, στην εξοικονόμηση και στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, αναλαμβάνοντας κάποιο χρηματοοικονομικό κίνδυνο. Οι υπηρεσίες αυτές περιλαμβάνουν από τον αρχικό σχεδιασμό και την μελέτη μέχρι και τη χρηματοδότηση μιας εγκατάστασης ή ενός κτιρίου.

Πιο αναλυτικά, πρόκειται για εξειδικευμένες εταιρίες σε ενεργειακά θέματα με κατάλληλη τεχνογνωσία και εμπειρία. Μια τέτοια εταιρία επενδύει για λογαριασμό του πελάτη/συνεργάτη στο χώρο του σε τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας και είναι ταυτόχρονα υπεύθυνη για τη λειτουργία τους και με τον τρόπο αυτό μειώνονται οι ενεργειακές δαπάνες του πελάτη. Το οικονομικό αντάλλαγμα για την παρεχόμενη υπηρεσία βασίζεται, εξολοκλήρου ή εν μέρει, στην επίτευξη της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και στην τήρηση των λοιπών συμβατικών όρων ενεργειακής απόδοσης.

Ως ενεργειακές υπηρεσίες ορίζονται οι συνθήκες άνεσης για τους τελικούς χρήστες ενέργειας, οι οποίες προκύπτουν ως συνδυασμός της κατανάλωσης ενέργειας και τεχνολογίας που χρησιμοποιεί ενέργεια καθώς επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις, των λειτουργιών και της συντήρησης που απαιτούνται για την παροχή της υπηρεσίας. Οι ενεργειακές υπηρεσίες οι οποίες πληρούν υψηλές απαιτήσεις επιδόσεων και βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση, υπόκεινται σε σύμβαση καθορισμένης χρονικής διάρκειας και πληρώνονται απευθείας από τον πελάτη ή την υπηρεσία που επωφελείται από αυτές.

Η εφαρμογή μέτρων ενεργειακής αποδοτικότητας μπορεί να αποδώσει οφέλη στα τρία παρακάτω διακριτά επίπεδα:

- Οικονομικά οφέλη, τα οποία συμβάλλουν στη μείωση των λειτουργικών εξόδων ή στην αύξηση των κερδών της κτιριακής μονάδας. Τα οφέλη αυτά πρέπει να αξιολογηθούν με βάση το κόστος της εφαρμογής των μέτρων ενεργειακής αποδοτικότητας.
- Λειτουργικά οφέλη, τα οποία βοηθούν τη διαχείριση μιας κτιριακής μονάδας να βελτιώσει τα επίπεδα άνεσης, ασφάλειας και αποδοτικότητας των κατοίκων ή των εργαζομένων της ή διαφορετικά, να βελτιώσει τη γενικότερη λειτουργία της.
- Περιβαλλοντικά οφέλη, τα οποία αφορούν κυρίως στη μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub> ή άλλων ρύπων (αέρια θερμοκηπίου), στη μείωση των ενεργειακών αναγκών σε εθνικό επίπεδο και στη διατήρηση των φυσικών πόρων.

Συνοπτικά, τα πιο σημαντικά βήματα που απαιτούνται και η στρατηγική που πρέπει να ακολουθείται για τη σωστή εφαρμογή των μέτρων εξοικονόμησης στη χώρα μας είναι τα εξής:

- Εκτίμηση της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης του ελληνικού κτιριακού αποθέματος.
- Υπολογισμός της ενεργειακής κατανάλωσης κτιρίων.
- Υπολογισμός του δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια με την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας (ΜΕΕ).
- Οικονομική αξιολόγηση των ΜΕΕ, με βάση το ιδιωτικό και εξωτερικό κόστος.
- Ποσοτική ανάλυση οικονομικών υποστηρικτικών πολιτικών, άμεσων (επιδότησεις) ή έμμεσων (επιβολή φόρων ενέργειας).
- Προτεραιότητες ΜΕΕ.
- Πολιτικές δράσεις για την μείωση των εκλυόμενων ρύπων από τα κτίρια.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

#### *ΠΡΑΣΙΝΕΣ ΤΑΡΑΤΣΕΣ - ΠΡΑΣΙΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ*

---



### 3.1 Τα φυτεμένα δώματα και η συμβολή τους στον αστικό χώρο

Ως φυτοκαλυμμένο δώμα ή κήπος σε δώμα, μπορεί να χαρακτηριστεί κάθε κήπος, μεταξύ του οποίου και του εδάφους υπάρχει ένα κτίριο ή μια δομική κατασκευή. Στον ορισμό αυτό περιλαμβάνονται κήποι σε οποιαδήποτε στάθμη από το φυσικό έδαφος.

Τα φυτά μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στον έλεγχο της θερμοκρασίας των κτιρίων κατά τους θερινούς και τους χειμερινούς μήνες, συνεπώς συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας.

#### 3.1.1 Ιστορική αναδρομή

Οι πράσινες στέγες είναι κυριολεκτικά όσο παλιές όσο κι άνθρωπος και χρησιμοποιούνταν πολύ πριν τη σύλληψη της ιδέας της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής. Ήδη από την αυγή της ανάπτυξης της αγροτικής κοινωνίας στο πρώτο στάδιο του Πολιτισμού, γύρω στο 8.000 π.Χ., οι άνθρωποι άρχισαν να εγκαταλείπουν τις σπηλιές και τα πρόχειρα καταφύγια και να εγκαθίστανται σε οικισμούς, οργανωμένοι σε ομάδες που είχαν ως βάση την εκτεταμένη οικογένεια. Οι οικισμοί αυτοί, που είχαν το μέγεθος και τη δομή των σύγχρονων χωριών, χτίζονταν από υλικά που βρίσκονταν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον, όπως το χώμα με τη μορφή πηλού και οι φυτικές ύλες. Ιδιαίτερα οι φυτικές ύλες, είτε στη ζωντανή είτε στην αποξηραμένη μορφή τους (πχ. φυτά και άχυρο), αποτελούσαν κυρίαρχα υλικά δόμησης καθώς πρόσφεραν πολλαπλά οφέλη στη θερμομόνωση, τη στεγανοποίηση, τη σταθερότητα και την αισθητική αυτών των πρώτων κατοικιών.

Η ανάπτυξη και η άνθηση των αγροτικών κοινωνιών μεταμόρφωσε τα πρώτα χωριά σε κωμοπόλεις πολλών χιλιάδων κατοίκων, όπου η φύτευση των στεγών συνέχισε να είναι δημοφιλής με εξαιρετικά αποτελέσματα. Ένα από αυτά είναι «Οι Κρεμαστοί Κήποι της Βαβυλώνας», γνωστοί ως ένα από τα επτά θαύματα του κόσμου, γύρω στο 652-604 π.Χ. Εξίσου σημαντικές πηγές για τους πρώτους τεχνητούς κήπους, αποτελούν τα Ζιγκουράτ, τα οποία συναντώνται και αυτά στην περιοχή της Μεσοποταμίας, και αποτελούσαν τις φυτοκαλυμμένες κλιμακωτές εξέδρες πάνω στις οποίες έκτιζαν οι Βαβυλώνιοι τους ναούς και τα ιερά για να λατρέψουν τους θεούς τους.

Στα ελληνορωμαϊκά χρόνια, τα φυτεμένα δώματα δεν βρίσκουν πολλές εφαρμογές, παρά μόνο σε ορισμένες περιοχές, όπως η Φοινίκη, η Πομπηία και η Εγγύς Ανατολή, ενώ στην εποχή του Μεσαίωνα και της Αναγέννησης, αρκετά καλά διατηρημένα φυτεμένα δώματα, συναντώνται σε παλάτια και επαύλεις της Ιταλίας (εικόνα 3.1), καθώς επίσης σε εκκλησιαστικά κτίρια και μοναστηριακά συγκροτήματα της βορειοδυτικής Γαλλίας.



Εικόνα 3.1 Παλάτι Piccolomini στην πόλη Pienza της Ιταλίας<sup>40</sup>

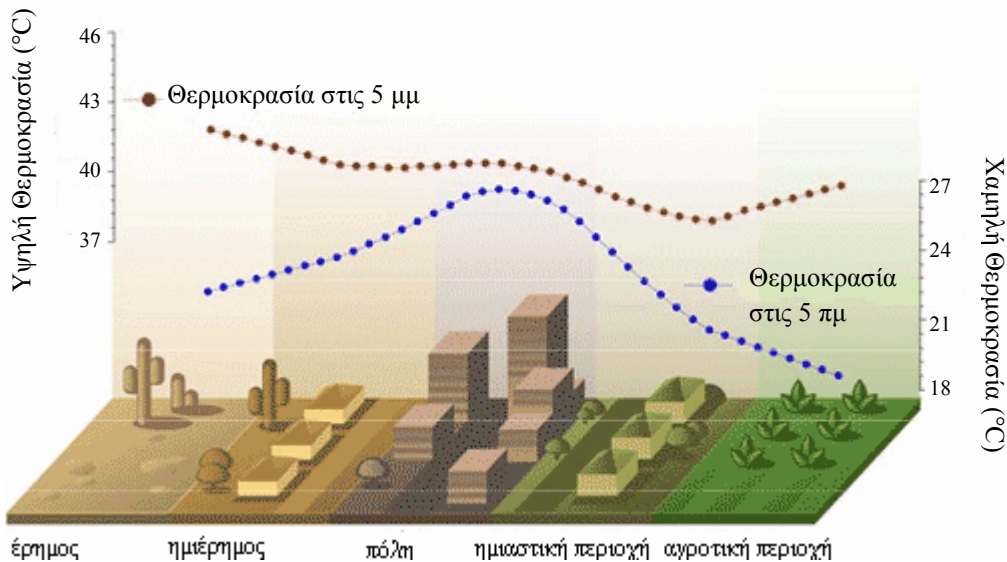
Στα νεότερα χρόνια, στις περισσότερες μεγαλουπόλεις η αλόγιστη ανάπτυξη του δομημένου περιβάλλοντος, η άναρχη και αυθαίρετη δόμηση και ο περιορισμός ή η εξαφάνιση σχεδόν όλων των ελεύθερων αστικών δημόσιων χώρων και χώρων πράσινου, έχουν προκαλέσει υποβάθμιση της ποιότητας ζωής των κατοίκων, μη ανεκτές περιβαλλοντικές συνθήκες και αισθητική υποβάθμιση της εικόνας των πόλεων. Αντίθετα, η αξία και ο ρόλος των φυσικών στοιχείων στον αστικό χώρο έχουν αναγνωριστεί εδώ και πολύ καιρό και αποτελούν αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών, οι οποίοι ασχολούνται με τα στοιχεία του σχεδιασμού της πόλης.

Σήμερα οι κήποι στα δώματα θεωρούνται στοιχείο υψηλής ποιότητας, αισθητικής και πολυτέλειας, ενώ στις αρχές του 20ού αιώνα δεν ήταν λίγοι οι κορυφαίοι αρχιτέκτονες της εποχής οι οποίοι υποστήριζαν θερμά τη δημιουργία τέτοιων κατασκευών. Με την ανάπτυξη του πράσινου κινήματος στις αρχές της δεκαετίας του 1960, με την ηλιακή και βιοκλιματική αρχιτεκτονική, τον παθητικό, ηλιακό και τον ενεργειακό σχεδιασμό, την οικολογική δόμηση και τις Κοινοτικές Οδηγίες που εφαρμόζονται και θα εφαρμόζονται ακόμα περισσότερο, τα σύγχρονα παραδείγματα φυτεμένων ταρατσών, τόσο στον ευρωπαϊκό χώρο, όσο και στην Αμερική, ολοένα και πληθαίνουν.

### 3.1.2 Σύγχρονα περιβαλλοντικά προβλήματα αστικών κέντρων

Η σύγχρονη πόλη έχει μεγάλο μέγεθος, πολύ πυκνή δόμηση, πολλά οχήματα, κυρίως όμως έλλειψη σχεδιασμού, ίσως λόγω της εκρηκτικής αστυφιλίας. Κλασική περίπτωση αποτελούν οι ελληνικές πόλεις, και ιδιαίτερα η Αθήνα, στην οποία έχει συγκεντρωθεί ήδη το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού της χώρας. Τα προβλήματα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Ελλάδα άρχισαν να εμφανίζονται τις τελευταίες δεκαετίες και συνδέονται κυρίως με την αστικοποίηση του πληθυσμού της χώρας σε συνδυασμό με την οικονομική ανάπτυξη της.

Η αύξηση του πληθυσμού και οι τρέχουσες ανάγκες, έχουν οδηγήσει στη δημιουργία μεγάλων πόλεων και πολεοδομικών συστημάτων, όπως η Αθήνα. Η πυκνή δόμηση των αστικών κέντρων θεωρείται ένας από τους κύριους παράγοντες δημιουργίας του φαινομένου της «Αστικής Θερμικής Νησίδας» (Urban Heat Island Effect). Η κτιριακή μάζα λειτουργεί ως αποθήκη θερμότητας και οι όγκοι των κτιρίων εμποδίζουν τον άνεμο μειώνοντας την έντασή του. Τα κτίρια κατά τη διάρκεια της ημέρας αποθηκεύουν θερμότητα κυρίως στις εξωτερικές τους επιφάνειες και τοίχους, αυξάνοντας τη θερμοκρασία τους. Ο αέρας που έρχεται σε επαφή με τις επιφάνειες των κτιρίων αποκτά τη θερμοκρασία τους, μεταφέροντας στη συνέχεια τη θερμότητα αυτή και στις γειτονικές μάζες του αέρα αυξάνοντας τη θερμοκρασία τους. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι εξωτερικές επιφάνειες των κτιρίων εκπέμπουν τη θερμότητά τους με την μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας, εμποδίζοντας τον αέρα να ψυχθεί αποτελεσματικά. Έτσι, οι αστικές περιοχές αποκτούν υψηλότερες θερμοκρασίες από τις γειτονικές μη αστικές περιοχές. Οι συνέπειες του φαινομένου απεικονίζονται στην εικόνα 3.2, σύμφωνα με έρευνα του περιβαλλοντικού κέντρου «Censam» του MIT, στο οποίο φαίνεται η αύξηση της θερμοκρασίας των πόλεων, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Εικόνα 3.2 Το φαινόμενο της «Αστικής Θερμικής Νησίδας» ευθύνεται για την αύξηση της θερμοκρασίας των πόλεων κατά τη διάρκεια της νύχτας<sup>13</sup>

Ένα εξίσου σημαντικό πρόβλημα των αστικών κέντρων είναι το νέφος. Το νέφος παρουσιάζεται με δύο μορφές:



α) Το νέφος αιθαλομίχλης (ή καπνομίχλης), που σχηματίζεται όταν στην ατμόσφαιρα υπάρχει υψηλή συγκέντρωση ρύπων, όπως το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) και αιωρούμενα σωματίδια, σε συνδυασμό με σχετικά χαμηλή θερμοκρασία και υψηλή υγρασία. Το φαινόμενο είναι εντονότερο κατά τους χειμερινούς μήνες και κυρίως τις πρωινές ώρες, κατά τις οποίες επικρατούν οι παραπάνω καιρικές συνθήκες. Ονομάζεται και ατμοσφαιρική ρύπανση «τύπου Λονδίνου», καθώς πρώτη φορά παρουσιάστηκε στην πρωτεύουσα της Αγγλίας, με σοβαρότερο επεισόδιο το 1952, οπότε πέθαναν εκατοντάδες άνθρωποι, λόγω των ακραίων συνθηκών ατμόσφαιρας που δημιουργήθηκαν.

β) Το φωτοχημικό νέφος, που παρουσιάζεται όταν επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, μεγάλη ηλιοφάνεια, μικρή σχετικά υγρασία και υψηλή συγκέντρωση συγκεκριμένων αέριων ρύπων, όπως τα οξείδια του αζώτου, το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ), οι υδρογονάνθρακες και τα προϊόντα των αντιδράσεών τους. Ονομάζεται και ρύπανση «τύπου Λος Άντζελες», καθώς εκεί εμφανίστηκε πρώτη φορά το 1943.

Το κλίμα της Ελλάδας χαρακτηρίζεται από υψηλή ηλιοφάνεια και θερμοκρασία, συνθήκες που ευνοούν ιδιαίτερα την εμφάνιση της φωτοχημικής ρύπανσης. Επίσης, η έλλειψη βροχοπτώσεων δεν επιτρέπει την έκπλυση της ατμόσφαιρας, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από σωματίδια. Πιο συγκεκριμένα, η έλλειψη βροχοπτώσεων δεν επιτρέπει στις περιοχές όπου υπάρχουν ελεύθερα εδάφη τη φυσική αποκάλυψη τους, που δρα ως φυσικό φίλτρο για τα σωματίδια, με αποτέλεσμα την υπαναχώρηση σκόνης από το έδαφος. Υπαναχώρηση σκόνης από το έδαφος λόγω έλλειψης βροχοπτώσεων υπάρχει και σε δρόμους αστικών περιοχών.



Εικόνα 3.3 Απεικόνιση φωτοχημικού νέφους στο Λεκανοπέδιο Αττικής<sup>14</sup>

Οι πηγές ρύπανσης αναπτύσσονται ραγδαία ακολουθώντας την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη της χώρας μας. Τα περιβαλλοντικά προβλήματα επιδεινώνονται λόγω της κακής ρυμοτομίας των περισσότερων ελληνικών πόλεων, που χαρακτηρίζεται από την έλλειψη πρασίνου και ανοικτών χώρων και την ύπαρξη υψηλών κτιρίων σε δρόμους μικρού πλάτους. Το αποτέλεσμα, είναι η ολοένα και μεγαλύτερη ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και για κατασκευές φιλικότερες στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα οι αναφορές στον οικολογικό χαρακτήρα και στα ενεργειακά οφέλη των πράσινων δωματίων να γίνονται ολοένα και συχνότερες.



### 3.1.3 «Πράσινη» αναβάθμιση αστικών κέντρων

Στη σημερινή εποχή, η έλλειψη ολοκληρωμένου πολεοδομικού σχεδιασμού και οι χωρίς προγραμματισμό επεκτάσεις των πόλεων έχουν δημιουργήσει πάρα πολλά προβλήματα, τα οποία οδηγούν στην υποβάθμιση της ποιότητας ζωής των κατοίκων και στην ολοκληρωτική καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος.

Η επαναφορά της φύσης στα σημερινά αστικά κέντρα, αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα, καθώς η εικόνα τους είναι δύσκολο να αλλαχθεί και να αναστραφεί, όχι όμως ακατόρθωτο. Ένας από τους λιγιστούς πλέον τρόπους παρέμβασης με σκοπό την επαναφορά των «χαμένων» φυσικών στοιχείων στις σημερινές μεγαλουπόλεις, είναι η δημιουργία φυτεμένων ταρατσών.

Η φυτεμένη οροφή, είναι μία τεχνολογία μείωσης ψυκτικών και θερμικών φορτίων και η εγκατάστασή της συμβάλλει στη θεαματική ελάττωση της απαιτούμενης ενέργειας για τον κλιματισμό του κτιρίου και στη βελτίωση του μικροκλίματος της γειτονιάς του φυτεμένου δώματος. Τα φυτεμένα δώματα αποτελούν σήμερα αναπόσπαστο στοιχείο του βιοκλιματικής σχεδιασμού και είναι ο καλύτερος τρόπος αξιοποίησης του ελεύθερου χώρου στα δώματα των κτιρίων. Η κατασκευή φυτεμένων δωματίων δημιουργεί νέους χώρους πράσινου οι οποίοι μπορούν να αλλάξουν το αστικό τοπίο και να ορίσουν τη νέα εικόνα των σύγχρονων πόλεων.

Στις εικόνες 3.4-3.10, παρουσιάζονται φωτογραφίες σύγχρονων ταρατσόκηπων, από διάφορα μέρη του κόσμου, στις οποίες φαίνεται ότι πέραν των ενεργειακών πλεονεκτημάτων, μια πράσινη στέγη προσφέρει και τεράστια αισθητική αναβάθμιση του κτιρίου στο οποίο τοποθετείται.



Εικόνα 3.4

Φυτεμένη στέγη σε κτίριο της Νέας Υόρκης  
Κτίριο Solaire, Νέα Υόρκη<sup>17</sup>



Εικόνα 3.5  
Πράσινη στέγη κτιρίου  
Πεκίνο<sup>17</sup>



Εικόνα 3.6  
Πράσινη οροφή κτιρίου Art and Exhibition  
Hall στη Βόννη της Γερμανίας<sup>17</sup>



Εικόνα 3.7  
Η πράσινη οροφή του School of Art and  
Design στη Σιγκαπούρη<sup>17</sup>



Εικόνα 3.8  
Οριζόντιος πράσινος τοίχος  
Αεροδρόμιο Σύδνεϋ στην Αυστραλία<sup>18</sup>



Εικόνα 3.9  
Απεικόνιση της φυτεμένης οροφής του  
κτιρίου City Hall στο Σικάγο<sup>8</sup>



Εικόνα 3.10  
Κλιμακωτή φυτεμένη οροφή του κτιρίου  
ACROS Fukouka στην Ιαπωνία<sup>8</sup>

### 3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά φυτεμένης οροφής

Οι φυτεμένες οροφές αποτελούνται από ένα στρώμα βλάστησης, το οποίο αναπτύσσεται σε ειδικά διαμορφωμένο επίπεδο, συνήθως επάνω σε μια επίπεδη οροφή (δώμα). Ένα φυτεμένο δώμα αποτελείται από τρία επιμέρους τμήματα:

- το δομικό τμήμα, το οποίο αποτελεί το υπόβαθρο της κατασκευής,
- το κηπευτικό τμήμα, το οποίο είναι ουσιαστικά ο κήπος της στέγης και
- το φυτικό τμήμα, το οποίο περιλαμβάνει τα φυτά.

Τα τρία αυτά τμήματα μπορεί να είναι ανεξάρτητα και να αποτελούνται από τελείως διαφορετικά υλικά και σύσταση, στην ουσία όμως εξαρτώνται άμεσα το ένα από το άλλο.

Κατά το σχεδιασμό και την εγκατάσταση ενός φυτεμένου δώματος στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα περιβάλλον που θα πλησιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο το φυσικό. Βασικός φυσικός παράγοντας που απουσιάζει είναι το έδαφος, η απουσία του οποίου αντισταθμίζεται με την εγκατάσταση υποστρώματος, το οποίο παίζει το ρόλο του εδάφους. Τα ποικίλα στρώματα της πράσινης οροφής εκτελούν τις διαφορετικές λειτουργίες του φυσικού εδάφους, δηλαδή δίνουν τα θρεπτικά συστατικά, αποθηκεύουν νερό, και επιτρέπουν παράλληλα την διαπνοή και την εξάτμιση.

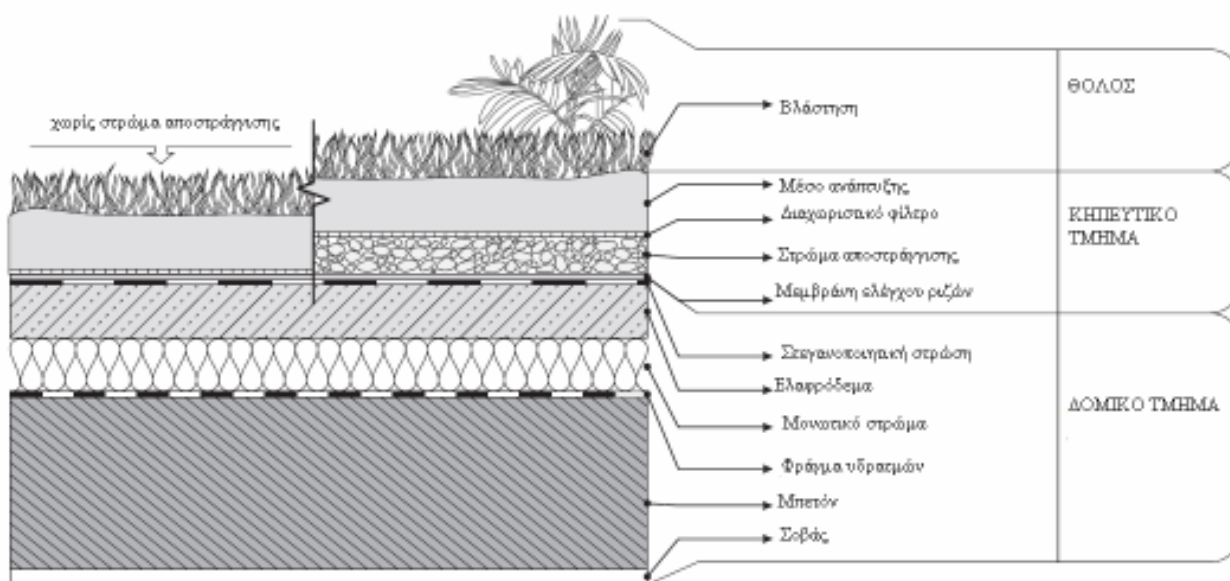
Γενικά, το υπόστρωμα μέσω της διαστρωμάτωσης και της σύστασής του, πρέπει να πληροί κάποια κριτήρια έτσι ώστε να ενισχύει την ανάπτυξη των φυτών, να προσφέρει ένα καλό μέσο στήριξης για τα φυτά, να διατηρεί μια ικανοποιητική ποσότητα νερού και ένα ικανοποιητικό πορώδες, ενώ συγχρόνως πρέπει να είναι ελαφρύ για να μην επιβαρύνει τις φορτίσεις του κτιρίου και να διασφαλίζει τη στεγανότητα του δώματος και την προστασία του από διαβρώσεις και φθορές που μπορεί να προκαλέσει η φύτευση.

Είναι φανερό, ότι η επιλογή του υποστρώματος είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχία ενός πράσινου δώματος, αφού καλείται να παίζει ένα τριπλό ρόλο: να λειτουργήσει ως ένα επιπλέον μονωτικό στρώμα, να προστατεύσει τα ευαίσθητα μέρη της κατασκευής του κτιρίου, όπως τις μεμβράνες προστασίας του δώματος, και να αποτελέσει το μέσο που θα υποστηρίξει την ανάπτυξη και τη στήριξη των φυτών, καθώς θα αντικαταστήσει τις λειτουργίες του εδάφους που αναφέραμε παραπάνω, δηλαδή παροχή στα φυτά των θρεπτικών στοιχείων που χρειάζονται, αποθήκευση νερού, επιτρέποντας παράλληλα την αναπνοή και την αποστράγγιση.

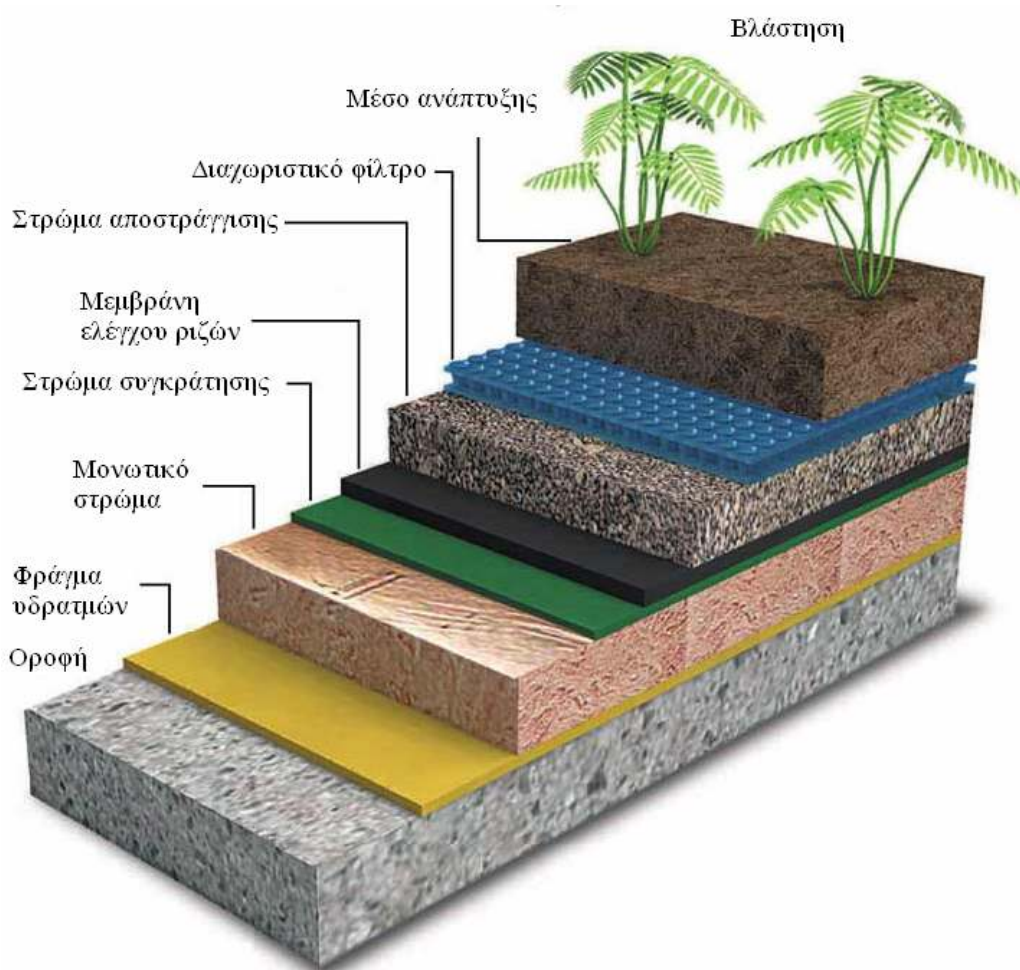
Το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιείται σε μια πράσινη οροφή έχει χαμηλή ογκομετρική μάζα (800-900 kg/m<sup>3</sup>) και έχει εμπλουτιστεί με μέταλλα και χούμο. Το ύψος μπορεί να κυμαίνεται από 10 έως 100 εκατοστά και είναι το κύριο χαρακτηριστικό που επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ των λεγόμενων πράσινων στεγών εκτατικού τύπου από τις πράσινες στέγες εντατικού τύπου.

Στις εικόνες 3.11 και 3.12, παρουσιάζονται τα στρώματα από τα οποία αποτελείται μια τυπική φυτεμένη οροφή και στη συνέχεια αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε στρώματος.





Εικόνα 3.11 Τα διάφορα στρώματα μιας τυπικής πράσινης στέγης<sup>24</sup>



Εικόνα 3.12 Τα διάφορα στρώματα του πράσινου δώματος σε 3-D<sup>44</sup>

## Βλάστηση

Η βλάστηση αποτελεί το ανώτερο μέρος της φυτεμένης οροφής και ορίζεται ως η απόσταση από την ανώτερη επιφάνεια του μέσου ανάπτυξης μέχρι το ύψος των φυτών. Οι σημαντικότερες λειτουργίες της φυτεμένης οροφής, δηλαδή η σκίαση και η εξατμισοδιαπνοή, καθορίζονται από τη βλάστηση και εξαρτώνται από τους εξής παράγοντες:

- το ύψος της βλάστησης  $L$ ,
- τον δείκτη έκτασης φύλλων (LAI- Leaf Area Index), δηλαδή την πυκνότητα της βλάστησης, με τιμές από 0.5 έως 5.0,
- την κλασματική φυτοκάλυψη, δηλαδή το τμήμα της επιφάνειας που καλύπτεται από φύλλα προς όλη την έκταση της οροφής,
- το λόγο ανακλώμενης ακτινοβολίας προς την εισερχόμενη  $\rho$  (albedo) και
- την αντίσταση στομάτων (stomatal resistance), δηλαδή τη βιοφυσική παράμετρο που αντιπροσωπεύει το ποσοστό υγρασίας που αποβάλλεται από τους πόρους των φύλλων μέσω της διαπνοής, για δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η ποικιλία φυτικού υλικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι αρκετά μεγάλη και εξαρτάται από τον τύπο της πράσινης στέγης, τις κλιματολογικές συνθήκες και άλλους παράγοντες όπως το ύψος και η θέση του κτιρίου. Οι φυτεμένες οροφές διακρίνονται σε δύο τύπους, τον εκτατικό και τον εντατικό, όπως αναλύονται στην επόμενη ενότητα.

## Μέσο ανάπτυξης (εδαφικό μίγμα)

Το μέσο ανάπτυξης των φυτών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την κατασκευή και λειτουργία ενός φυτεμένου δώματος. Η επιλογή κατάλληλου μίγματος εξασφαλίζει μεγάλη διάρκεια ζωής στο φυτικό υλικό.

Το μέσο ανάπτυξης πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- α. Να εξασφαλίζει επαρκή αερισμό του ριζικού συστήματος των φυτών ακόμη κι αν είναι κορεσμένο.
- β. Να μη συμπιέζεται εύκολα προκειμένου να μην εμποδίζεται η αποστράγγιση του νερού.
- γ. Να έχει μεγάλη ικανότητα συγκράτησης υγρασίας.
- δ. Να αποδεσμεύει τα θρεπτικά στοιχεία με βραδύ ρυθμό.
- ε. Να αποτελεί σταθερή βάση για τα φυτά, προκειμένου να αυξηθεί η ανθεκτικότητά τους στους ισχυρούς ανέμους και να αποφευχθεί η διάβρωσή του.
- στ. Να είναι απαλλαγμένο από σπόρους ζιζανίων και ασθένειες.
- ζ. Να μην έχει μεγάλο βάρος.

Επειδή τα φυσικά εδάφη είναι βαριά, ειδικά σε συνθήκες κορεσμού, στα πράσινα δώματα συνήθως χρησιμοποιούνται ελαφρά εδαφικά μίγματα που αποτελούνται από υψηλής ποιότητας λίπασμα και ανακυκλωμένα υλικά. Ένα απλό μίγμα αποτελείται από: 1/3 επιφανειακό χώμα, 1/3 λίπασμα, 1/3 περλίτη και μπορεί να είναι ικανοποιητικό για πολλές εφαρμογές. Άλλα μίγματα μπορεί να περιλαμβάνουν χούμο, άργιλο, ελαφρόπετρα, λάβα.

Τα πιο φιλικά για το περιβάλλον υλικά είναι ανακυκλωμένα προϊόντα, όπως θραύσματα κεραμιδιών ή τούβλων, ή υλικά κατεδάφισης. Τα παραπάνω υλικά, πέραν του ότι είναι

ανακυκλωμένα, έχουν κάποιες ιδιότητες πολύ σημαντικές. Είναι πορώδη, μπορούν να αποθηκεύσουν νερό και θρεπτικά στοιχεία περισσότερο από την πέτρα. Χάρη σε αυτές τους τις ιδιότητες συμβάλλουν στην ανάπτυξη των φυτών και επιπλέον συγκρατούν μεγάλο ποσοστό των ρύπων που περιέχει το νερό της βροχής. Επιπλέον, είναι ελαφρά και από οικολογικής άποψης, μπορούν να αποτελέσουν το βιότοπο οργανισμών, όπως ασπόνδυλων και εντόμων μέσα στο αστικό περιβάλλον.

Έρευνες που έχουν γίνει στη Γερμανία και στη Σουηδία, δείχνουν τη σημασία συμμετοχής οργανικού υλικού στο εδαφικό μίγμα, ώστε να συμβάλλει στη συγκράτηση της υγρασίας. Από την άλλη πλευρά, εδαφικά μίγματα με μεγάλη περιεκτικότητα τύρφης παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευφλεκτότητα.

Το εδαφικό υλικό θα πρέπει να περιλαμβάνει μεταλλικά στοιχεία που ποικίλουν από 70-90% για ένα πράσινο δώμα εντατικού τύπου και από 60-80% για ένα πράσινο δώμα εκτατικού τύπου.

Ο πετροβάμβακας είναι ένα υλικό που εκτός από μονωτικό, χρησιμοποιείται και ως συστατικό του εδαφικού μίγματος. Οι ρίζες των φυτών μπορούν να το διαπεράσουν, μπορεί να συγκρατήσει μεγάλη ποσότητα νερού, την οποία απελευθερώνει στα φυτά, ενώ επιτρέπει την αποστράγγιση του πλεονάζοντος. Σε πολύ ελαφρές κατασκευές, ο πετροβάμβακας χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο του υποστρώματος, και τα φυτά αναπτύσσονται πάνω σε αυτόν. Στην επιφάνειά του διασπείρονται χαλίκια προκειμένου να αποτρέψουν τη μετακίνηση του χλοοτάπητα από τον αέρα. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι αυτή η λύση δεν έχει τη δυνατότητα συγκράτησης θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά και χρειάζεται λίπανση. Επίσης, θα πρέπει κανείς να λάβει υπόψη την ενέργεια που χρειάζεται για την κατασκευή του πετροβάμβακα.

### **Διαχωριστικό φίλτρο**

Το διαχωριστικό φίλτρο είναι απαραίτητο ώστε να μην επιτρέπει την είσοδο του εδαφικού υλικού, στο στρώμα της αποστράγγισης. Υφάσματα με κρυσταλλικές ίνες ή ίνες από πολυπροπυλένιο και πολυαιθυλένιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό.

### **Στρώμα αποστράγγισης**

Ένα φυτεμένο δώμα πρέπει να έχει ένα αποστραγγιστικό στρώμα προκειμένου να απομακρύνει ή να αποθηκεύει το νερό που δεν απορροφάται από το μέσο ανάπτυξης των φυτών και δεν χρησιμοποιείται από τα φυτά. Αν δεν μπορεί να επιτευχθεί η απομάκρυνση του πλεονάζοντος νερού, αφενός αυξάνεται το βάρος του συστήματος και αφετέρου μπορεί να προκληθεί σάπισμα των ριζών. Το στρώμα αποστράγγισης έχει τη λειτουργία της εκ νέου δημιουργίας μιας φυσικής κατάστασης για την ανάπτυξη της βλάστησης: συσσωρεύει το νερό με τη βοήθεια μικρών δεξαμενών της άνω πλευράς, αλλά ταυτόχρονα επιτρέπει την αποστράγγιση του πλεονάζοντος νερού μέσω μερικών οπών. Μπορεί επίσης να προσφέρει μια πρόσθετη θερμική μόνωση.

Για να την εξασφάλιση της απορροής των νερών, μια ελάχιστη κλίση των 2° συστήνεται για τα επίπεδα δώματα. Στην περίπτωση των εκτατικών δωματίων, που μπορούν επιτυχώς να εγκατασταθούν σε κεκλιμένες επιφάνειες, η μέγιστη γωνία που συστήνεται είναι 30°. Τα περισσότερα πράσινα δώματα πρέπει να μπορούν να χρησιμοποιούν το υπάρχον σύστημα απορροής του κτιρίου, μόνο με μερικές μετατροπές σε αυτό. Τα τυπικά συστήματα απορροής περιλαμβάνουν υδρορροές, αποχετεύσεις και φίλτρα ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση του υλικού ανάπτυξης και το φράξιμο των σωληνώσεων. Μικρή κλίση του δώματος της τάξης του 10-15°

συντελεί στη φυσική αποστράγγιση του συστήματος. Επιθυμητή είναι η επαναχρησιμοποίηση του νερού, και ειδικά του όμβριου. Για το σκοπό αυτό, το σύστημα αποστράγγισης μπορεί να συνδεθεί με κάποια δεξαμενή.

Το στρώμα αποστράγγισης μπορεί να δομηθεί από διάφορα υλικά ανάλογα με την ζητούμενη λειτουργία. Τα υλικά αυτά, μπορεί να είναι φυσικά χαλίκια, ή θρυμματισμένες πέτρες, λάβα, σπασμένα κεραμίδια, πετροβάμβακας, αφρώδη υλικά και πλαστικά υφάσματα με κυψέλες. Το απλούστερο απ' αυτά, τα φυσικά χαλίκια (κατά προτίμηση όχι στρογγυλά ώστε να μην κατακυλούν στις στέγες με κλίση) και οι θρυμματισμένες πέτρες, είναι παραδείγματα αποστραγγιστικού υλικού φυσικής προέλευσης το οποίο λειτουργεί ικανοποιητικά. Είναι φθηνά, και όταν τοπικά υλικά από την περιοχή όπου βρίσκεται το κτίριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν, έχουν και οικονομικό όφελος αλλά και συμβολή στη διατήρηση της βιοποικιλότητας, επαναφέροντας το βιότοπο των ασπόνδυλων και των εντόμων που ζούσαν στο έδαφος, την επιφάνεια του οποίου κατέλαβε το κτίριο. Το μειονέκτημα αυτών των υλικών είναι το μεγάλο βάρος τους. Επίσης, δεν μπορούν να συγκρατήσουν την ποσότητα διαλυμένων θρεπτικών στοιχείων που χρειάζεται για τα φυτά.

Η λάβα έχει κι αυτή φυσική προέλευση. Τα τούβλα είναι κατασκευασμένα, όμως σε αυτή τη χρήση είναι ανακυκλωμένα. Παρά τη διαφορετική προέλευσή τους, αυτά τα υλικά έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Είναι πορώδη και μπορούν να αποθηκεύσουν νερό και θρεπτικά συστατικά σε μεγαλύτερη ποσότητα από την πέτρα. Αυτά τα υλικά που μπορούν να συγκρατήσουν θρεπτικά συστατικά, συντελούν στην ελάττωση των θρεπτικών συστατικών που παροχετεύονται από ένα πράσινο δώμα στους υπονόμους, τα οποία λειτουργούν ως ρυπαντές των υδάτινων αποδεκτών. Επίσης, αυτά τα πορώδη υλικά είναι σχετικά ελαφρά και μπορούν να λειτουργήσουν ως βιότοπος για τα ασπόνδυλα.

Τα αφρώδη υλικά μπορούν να προέλθουν ακόμη και από ανακυκλωμένα καθίσματα αυτοκινήτων. Έχουν την ιδιότητα να αποστραγγίζουν το νερό, αλλά δεν μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλη ποσότητα θρεπτικών στοιχείων.

Τέλος, τα πλαστικά αποστραγγιστικά υφάσματα με κυψέλες, κυκλοφορούν σε διάφορες εκδόσεις και τύπους. Άλλα είναι κατασκευασμένα για πράσινα δώματα εντατικού τύπου με υπόστρωμα μεγάλου πάχους και κάποια για πράσινα δώματα εκτατικού τύπου. Η ιδέα της λειτουργίας τους είναι η εξής: το νερό γεμίζει τις κυψέλες και απλώνεται σε όλη την επιφάνεια. Όταν οι πλαστικές κυψέλες γεμίσουν, το νερό που περισσεύει αποστραγγίζεται μέσω των οπών του υφάσματος. Αυτά τα υλικά είναι πολύ εύκολο να μεταφερθούν και να τοποθετηθούν. Το μειονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να γίνουν πολύ στεγνά. Τα πορώδη υλικά στεγνώνουν με πιο αργό ρυθμό, επιτρέποντας έτσι στα φυτά να μπορέσουν να προσαρμοστούν στη υπάρχουσα διαθεσιμότητα νερού. Επίσης, τα πλαστικά υφάσματα δεν αποθηκεύουν θρεπτικά συστατικά και μπορούν να αποτελούν μια πιο ακριβή λύση, ειδικά αν υπολογιστεί η εμπεριεχόμενη ενέργεια στην κατασκευή τους, και το γεγονός ότι το πλαστικό προέρχεται από μη ανανεώσιμη πηγή.

### **Μεμβράνη ελέγχου ριζών**

Τα φράγματα ριζών είναι κατασκευασμένα από υλικά με πυκνή δομή τα οποία εμποδίζουν τη διείσδυση των ριζών και προστατεύουν την ακεραιότητα της στεγανοποιητικής στρώσης. Η ανάγκη ύπαρξής τους εξαρτάται από το είδος της στεγανοποιητικής μεμβράνης. Οι συνθετικές μεμβράνες συνήθως δεν απαιτούν την ύπαρξη φράγματος ριζών. Σε μια υφιστάμενη στέγη



καλυμμένη με μονωτικό στρώμα, είναι αρκετά συνηθισμένο να τοποθετείται μια μεμβράνη ελέγχου ριζών για να εμποδίζει τη φθορά της δομής.

### **Στεγανοποιητική στρώση**

Η στρώση αυτή προστατεύει από τη διείσδυση νερού και διαρροές και αποτελείται από ασφαλτικές μεμβράνες (ασφαλτόπανα) ή συνθετικές μεμβράνες.

### **Ελαφρόδεμα**

Το στρώμα αυτό τοποθετείται μόνο στην περίπτωση που η στεγανοποιητική στρώση αποτελείται από ασφαλτικές μεμβράνες και χρησιμεύει ως σταθερό υπόστρωμα για τη συγκόλλησή τους.

### **Μονωτικό στρώμα**

Η στρώση αυτή συμβάλλει στη θερμική προστασία του κτιρίου.

### **Φράγμα υδρατμών**

Το φράγμα υδρατμών είναι ένα φύλλο πλαστικού ή φύλλα αλουμινίου και προστατεύει από τη διείσδυση υγρασίας.

### 3.3 Τύποι φυτεμένων οροφών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι φυτεμένες οροφές διακρίνονται σε δύο κύριους τύπους, τον εκτατικό (extensive) και τον εντατικό (intensive). Η επιλογή τύπου φυτεμένης οροφής είναι ιδιαίτερα σημαντική και πρέπει να γίνει όσο το δυνατό νωρίτερα, δηλαδή κατά τη φάση του σχεδιασμού.

Τα παρακάτω κριτήρια χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό των τύπων φυτεμένων οροφών:

	Εκτατικός Τύπος	Εντατικός Τύπος	Ημιεντατικός Τύπος
Συντήρηση	Ελάχιστη	Συχνή	Περιοδική
Άρδευση	Ελάχιστη	Συχνή	Περιοδική
Είδος Φυτών	Μικρή Ποικιλία	Μεγάλη Ποικιλία	Ενδιάμεση Ποικιλία
Βάρος Κατασκευής	60-150 kg/m <sup>2</sup>	180-500 kg/m <sup>2</sup>	120-200 kg/m <sup>2</sup>
Εφαρμογές	Επίπεδες, Κεκλιμένες	Επίπεδες	Επίπεδες, Κεκλιμένες
Ενδεικτικό κόστος	60-80 €/m <sup>2</sup>	100-120 €/m <sup>2</sup>	80-100 €/m <sup>2</sup>

Σε φυτεμένο δώμα **εκτατικού** τύπου τα φυτά χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση, είναι ανθεκτικά στη ξηρασία, αναβλαστάνουν εύκολα, ενώ το ύψος τους φτάνει τα 30 cm. Το σύστημα αποτελείται από πολυεπίπεδη διαστρωμάτωση υλικών με ελαφρύ μέσο ανάπτυξης φυτών συνήθους ύψους 8 έως 15 cm και το ριζικό σύστημα των φυτών είναι επιφανειακό. Για τη φυτική κάλυψη χρησιμοποιούνται φυτά τύπου Sedum, δηλαδή χαμηλής βλάστησης, όπως φυτά εδαφοκάλυψης, αγριολούλουδα κλπ. Η εκτατική λύση είναι κατάλληλη για ελαφριά και χαμηλά κτίρια.

Σε φυτεμένο δώμα **εντατικού** τύπου υπάρχει η δυνατότητα επιλογής φυτικού υλικού μέσα από μεγαλύτερη ποικιλία ειδών. Το σύστημα εντατικού τύπου συνίσταται στη δημιουργία ενός κήπου με μέγιστο ύψος φυτών 5 m, σε μέσο ανάπτυξης πάχους 12 έως 100 cm. Το εντατικό τοπίο, που είναι κατάλληλο για υπόγεια γκαράζ και βαριά κτίρια, είναι ένας κοινός ταρατσόκηπος, που περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία καλλωπιστικών φυτών, δέντρων και θάμνων και απαιτεί τακτική συντήρηση των φυτών (άρδευση, λίπανση κλπ). Επίσης, μπορούν να δημιουργηθούν καθιστικά, πέργκολες, παιδότοποι και να γίνουν κατασκευές όπως μονοπάτια, στοιχεία νερού και άλλα.

Τα ημιεντατικά φυτεμένα δώματα, όσον αφορά στις απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά τους, βρίσκονται μεταξύ εκτατικού και εντατικού τύπου. Πιο συγκεκριμένα, περισσότερες εργασίες συντήρησης, υψηλότερο κόστος και μεγαλύτερο φορτίο κατασκευής είναι κάποια χαρακτηριστικά για τις ημιεντατικές πράσινες στέγες σε σχέση με τις εκτατικού τύπου φυτεμένες οροφές.

### 3.4 Προϋποθέσεις και απαιτήσεις κατασκευής φυτεμένης οροφής

Οι φυτεμένες οροφές αποτελούνται από ένα στρώμα βλάστησης, το οποίο αναπτύσσεται σε ένα ειδικά διαμορφωμένο επίπεδο, συνήθως επάνω σε μια επίπεδα κατασκευασμένη οροφή. Προϋπόθεση για την κατασκευή και το σχεδιασμό του δώματος αποτελεί η κατανόηση ότι το δώμα συνδέεται με το κτίριο και ασκεί επιδράσεις σε αυτό, ενώ δεν έχει καμία σύνδεση με το έδαφος. Επίσης, βασική προϋπόθεση για την κατασκευή δώματος που να επιτρέπει την εγκατάσταση κήπου είναι η ικανότητα του κτιρίου να αντέχει τα φορτία του κήπου, δηλαδή η κατασκευαστική επικάλυψη του δώματος να είναι ικανή να δεχτεί την κατασκευή κήπου, κι έτσι εξασφαλίζεται η προστασία της από τις χημικές και μηχανικές επιδράσεις του κήπου όσο και από τη διείσδυση των ριζών των φυτών σε αυτή.

Τόσο η κατασκευή του κήπου, όσο και η επιλογή των φυτών πρέπει να εξαρτάται από το είδος της οροφής, αλλά και από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Έτσι, για την επιλογή κατάλληλης βλάστησης, πρέπει να ληφθεί υπόψη το τοπικό κλίμα, το είδος του χώματος και η κατασκευή της οροφής. Για παράδειγμα, στις μεσογειακές περιοχές όπως είναι η Ελλάδα, επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες, επομένως θα πρέπει να προτιμούνται φυτά πιο ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες και που απαιτούν λιγότερη φροντίδα. Ακόμα, σε οροφές με κλίση μεγαλύτερη των 8° συνίσταται η χρήση γρασιδιού. Το χώμα πρέπει να επιτρέπει την ανάπτυξη των ριζών, να έχει ικανότητα συγκράτησης νερού και αέρα και να έχει καλή υδροπερατότητα.

Σε μια εκτατικού τύπου οροφή το υπόστρωμα είναι μικρότερο των 20 cm. Οι εκτατικού τύπου φυτεμένες οροφές απαιτούν λιγότερη φροντίδα. Η ελάχιστη ανάπτυξη των φυτών μπορεί να γίνει σε υπόστρωμα με πάχος 5 cm και μπορεί να υπάρξει σε οποιαδήποτε οροφή, καθώς δεν απαιτείται ειδική κατασκευαστική υποστήριξη σαν δόμηση. Η βλάστηση επιλέγεται σε σχέση με την ικανότητα να αντέχει σε ακραίες θερμοκρασίες, την ικανότητα να αναπτύσσεται οριζόντια (διασφαλίζοντας την πλήρη κάλυψη της οροφής) και την ικανότητα να αντέχει σε μεγάλες περιόδους χωρίς τροφοδοσία νερού. Γι' αυτό και οι εκτατικού τύπου οροφές είναι κατάλληλες για ξενοδοχεία της Μεσογείου όπου επικρατούν υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες, ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες.

Στις εντατικού τύπου οροφές μπορούν να αναπτυχθούν δέντρα, γρασίδι και άλλα φυτά που απαιτούν εντατική φροντίδα. Τυπικά, το υπόστρωμα περιέχει χώμα πάχους μεγαλύτερο των 20 cm και ένα σύστημα αυτόματου ποτίσματος. Γι' αυτό το λόγο υπάρχει ανάγκη για ιδιαίτερη υποστήριξη της κατασκευής. Έτσι, προκύπτει το συμπέρασμα, ότι οι εκτατικού τύπου φυτεμένες οροφές δε συνίσταται να τοποθετούνται σε υπάρχοντα κτίρια αλλά σε νέες κατασκευές.

Η εγκατάσταση κήπου στο δώμα ενός κτιρίου απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή τόσο κατά τον σχεδιασμό, όσο και κατά την κατασκευή του. Πριν την κατασκευή απαιτείται έλεγχος της φέρουσας κατασκευής, που πρόκειται να δεχτεί τα πρόσθετα φορτία του κήπου. Στα περισσότερα νεόκτιστα κτίρια δεν απαιτούνται προσαρμογές καθώς το βάρος του τεχνητού κήπου είναι συνήθως 70 kg/m<sup>2</sup> για πάχος χώματος 30 cm. Σε υφιστάμενα δώματα τοποθετείται λεπτή στρώση χώματος πάχους 3 cm και φυτεύονται παχύφυτα, οπότε το βάρος του τεχνητού κήπου είναι μόνον 15 kg/m<sup>2</sup>.

Οι απαιτήσεις για ένα επιτυχές σύστημα μόνωσης φυτεμένης οροφής είναι:

- Ένας υπεύθυνος για την κατασκευή της μόνωσης, την επιχωμάτωση, τη φύτευση αλλά και τη συντήρηση των φυτών.
- Δύο στεγανές στρώσεις σε διαφορετικό επίπεδο, ώστε να παραμένει στεγανή η οροφή ακόμη κι αν παρουσιάσει διαρροές η ανώτερη ως προς το επίπεδο διάστρωσης στεγανή στρώση.
- Η αντοχή των στεγανών στρώσεων στην επίθεση των ριζών.
- Η σωστή μελέτη για αποφυγή υδρογεφυρών.
- Η ύπαρξη συστήματος αποστράγγισης.
- Η πυροπροστασία.
- Η ποιότητα του χώματος.
- Η επιλογή κατάλληλων φυτών που δείχνουν αντοχή σε ξηρασία, μη μετάδοση της φωτιάς, υψηλή απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα και απελευθέρωση οξυγόνου.
- Σύστημα κατακράτησης νερού για οικονομία ως προς τις ανάγκες ποτίσματος.
- Μικρό πάχος και βάρος χώματος για περιορισμό κόστους αλλά και στατικής καταπόνησης της κατασκευής.
- Η μακροβιότητα τόσο της μόνωσης όσο και των φυτών.

Τέλος, η συντήρηση της κατασκευής αποτελεί μια απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία της τεχνικής της φυτεμένης οροφής. Η παρακολούθηση των φυτών και των στρωμάτων της φυτεμένης οροφής είναι ιδιαίτερα σημαντική και όπως έχει ήδη αναφερθεί, το είδος και η συχνότητα της συντήρησης εξαρτώνται από τον τύπο της φυτεμένης οροφής. Οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη συντήρηση είναι οι εξής:

- Λίπανση του μέσου ανάπτυξης ώστε να αποφεύγεται η οξύτητα του χώματος.
- Επαναφύτευση ή προσθήκη μέσου ανάπτυξης μετά την πάροδο ορισμένου χρονικού διαστήματος.
- Άρδευση, που εξαρτάται από το είδος των φυτών, δηλαδή από τον τύπο της φυτεμένης οροφής.

### 3.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτεμένης οροφής

Τα πλεονεκτήματα της φυτεμένης οροφής κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες: ενεργειακά – οικονομικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά και κατασκευαστικά.

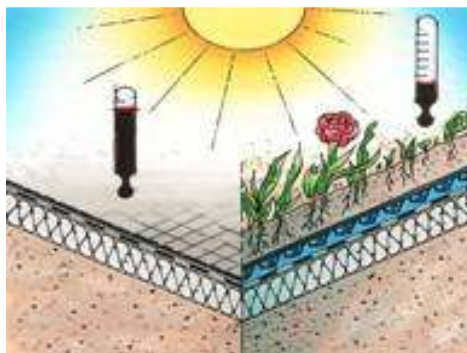
**Τα πλεονεκτήματα που αφορούν την εξοικονόμηση ενέργειας είναι τα εξής:**

- Μείωση κατανάλωσης για θέρμανση και ψύξη

Με τα φυτεμένα δώματα επιτυγχάνεται η απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ηλιακής ενέργειας, η οποία σε άλλες περιπτώσεις θα αποδιδόταν στο περιβάλλον. Σε ένα καλά μονωμένο κτίριο, η χρήση του κλιματιστικού και του καλοριφέρ μειώνεται. Η μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου θέρμανσης υπολογίζεται σε 2 λίτρα για κάθε τετραγωνικό μέτρο πράσινης ταράτσας κάθε χρόνο.

- Αύξηση θερμομόνωσης

Η θερμοχωρητικότητα του φυτεμένου δώματος είναι ιδιαίτερα αυξημένη σε σχέση με αυτήν ενός συμβατικού δώματος, εξαιτίας της μεγάλης θερμικής μάζας των κηπευτικών στρώσεων και του γεγονότος ότι μεταξύ του ατμοσφαιρικού αέρα και της ανώτατης επιφάνειας της διατομής των φυτεμένων δωματίων (χώματος) παρατηρείται ένα στρώμα ακίνητου αέρα, το οποίο προσφέρει προστασία από την έντονη ηλιακή ακτινοβολία το καλοκαίρι και προστασία έναντι των θερμικών απωλειών το χειμώνα. Το φυτεμένο δώμα λειτουργεί λοιπόν ως μια επιπλέον θερμομονωτική στρώση, ελαττώνοντας τα απαιτούμενα ψυκτικά ή θερμικά φορτία το καλοκαίρι και το χειμώνα αντίστοιχα (εικόνα 3.13). Έτσι, μειώνονται αντίστοιχα η κατανάλωση για θέρμανση το χειμώνα και για ψύξη το καλοκαίρι.



Εικόνα 3.13 Σχηματική απεικόνιση της αυξημένης θερμομόνωσης των πράσινων δωματίων σε σύγκριση με συμβατικά<sup>6</sup>

- Σκίαση από το φύλλωμα

Τα φυτά παρέχουν πλήρη σκίαση στην επιφάνεια του δώματος και εξασφαλίζουν με τον τρόπο αυτό τη μειωμένη θερμαντική επιβάρυνση του κτιρίου.

- Εξατμισοδιαπνοή

Με τη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής, τα φυτά προσφέρουν ψυκτικά φορτία, τα οποία με τη σειρά τους συμβάλλουν στην εξατμιστική ψύξη της οροφής παρέχοντας έτσι δροσισμό.

- Αύξηση θερμικής προστασίας

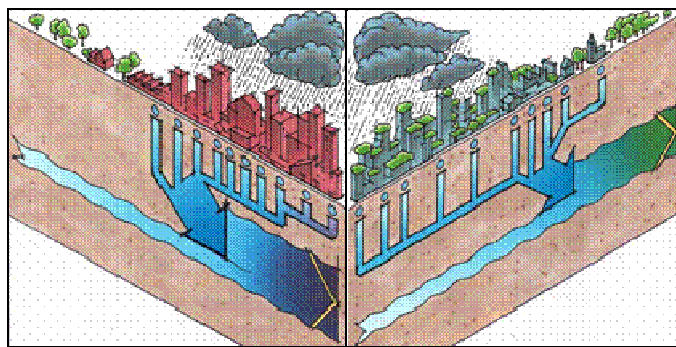
Τα φυτά προστατεύουν το δώμα και δεν επιτρέπουν τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ παράλληλα μειώνουν τις μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του περιβάλλοντος. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, μειώνεται κατά πολύ η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τη στέγη με αποτέλεσμα τη μείωση της διείσδυσης της θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον προς το κτίριο. Πρακτικά, μπορούμε να πούμε ότι ελαχιστοποιεί την επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην οροφή του κτιρίου, η οποία αποτελεί σημαντική πηγή θερμικής επιβάρυνσης του κτιρίου.

### Τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- Μείωση φόρτισης αστικού δικτύου απορροής υδάτων με την κατακράτηση νερού από το φυτεμένο δώμα (εικόνα 3.14)

Το φυτεμένο δώμα κατακρατεί το βρόχινο νερό στο στρώμα αποστράγγισης, στο μέσο ανάπτυξης φυτών και τη βλάστηση και αυξάνει τα ποσοστά εξάτμισης με αποτέλεσμα την αποφόρτιση του αστικού δικτύου απορροής υδάτων, ειδικά σε ραγδαίες καταιγίδες. Επιπλέον, τα βαριά μέταλλα και στοιχεία που μεταφέρονται από τη βροχή απορροφούνται από τους ταρατσόκηπους και δεν αποδεσμεύονται, με αποτέλεσμα το νερό που απορρέει να είναι πιο καθαρό από το βρόχινο. Η ποσότητα βέβαια του νερού που κατακρατείται σ' ένα φυτεμένο δώμα εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες, όπως:

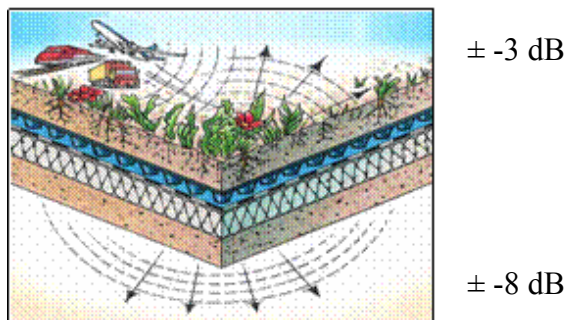
- το ποσοστό κορεσμού του δώματος σε νερό πριν τη βροχή
- το πάχος του μέσου ανάπτυξης
- την κλίση του δώματος
- το είδος των φυτών



Εικόνα 3.14 Σχηματική αναπαράσταση αστικού δικτύου απορροής υδάτων κτιρίου με φυτεμένη οροφή σε σχέση με συμβατικό κτίριο<sup>6</sup>

- Μείωση Ηχορύπανσης

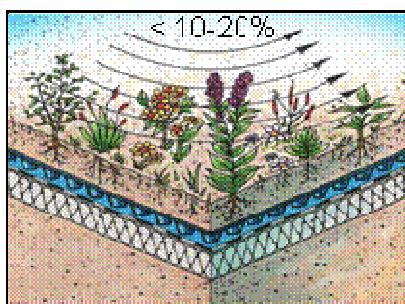
Στα φυτεμένα δώματα, ο συνδυασμός του χώματος, των φυτών και των παγιδευμένων στρωμάτων του αέρα μπορεί να λειτουργήσει ως φίλτρο απομόνωσης του ήχου (εικόνα 3.15).



Εικόνα 3.15 Τα φυτεμένα δώματα συμβάλλουν στη μείωση του θορύβου στο κτίριο <sup>6</sup>

- Δέσμευση σκόνης και ρύπων

Ένα μεγάλο ποσοστό των σωματιδίων της ατμόσφαιρας δεσμεύεται από το φύλλωμα των φυτών, τα οποία λειτουργούν με τον τρόπο αυτό ως φίλτρο συγκράτησης πολλών επιβλαβών συστατικών του αέρα, με αποτέλεσμα τη μείωση της σκόνης και του νέφους της ατμόσφαιρας (εικόνα 3.16).



Εικόνα 3.16 Το φύλλωμα των φυτών της πράσινης στέγης δεσμεύει τη σκόνη και συμβάλλει στη μείωση του νέφους<sup>6</sup>

- Βελτίωση μικροκλίματος περιοχής

Τα φυτά εμπλουτίζουν την ατμόσφαιρα με οξυγόνο και την αποδεσμεύουν από το διοξείδιο του άνθρακα μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. Με τον τρόπο αυτό, δροσίζουν και αυξάνουν την υγρασία της ατμόσφαιρας, δημιουργούν ευχάριστο μικροκλίμα και βοηθάνε στη μείωση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου.

- Φυσικό καταφύγιο για την τοπική πανίδα και χλωρίδα

Με την κατασκευή κήπων στα δώματα και την επαναφορά της «χαμένης» φύσης μέσα στο πυκνοδομημένο περιβάλλον των αστικών κέντρων δημιουργούνται αυτόνομα οικοσυστήματα και είναι δυνατόν να πολλαπλασιαστούν πολλά είδη χλωρίδας, τα οποία στη στάθμη του εδάφους δε μπορούσαν να αναπτυχθούν.

- Επανάκτηση περιοχών πρασίνου

Τα φυτεμένα δώματα αποτελούν έναν από τους λιγιστούς εναπομείναντες τρόπους επαναφοράς της βλάστησης στον αστικό χώρο.

- Μείωση του φαινομένου της «Αστικής Θερμικής Νησίδας»

Η «Αστική Θερμική Νησίδα», όπως έχει ήδη αναφερθεί, ανεβάζει διαχρονικά τη μέση τιμή των θερμοκρασιών στα αστικά κέντρα. Στο φαινόμενο αυτό, επικρατούν αυξημένες μέγιστες

θερμοκρασίες, αλλά κυρίως, σημειώνεται άνοδος στις ελάχιστες θερμοκρασίες, δηλαδή κατά τη διάρκεια της νύχτας δε μειώνεται η ελάχιστη θερμοκρασία, εξαιτίας των κτιρίων που εκπέμπουν μεγάλα ποσά θερμότητας. Τα φυτά, με την ανακλαστική τους ικανότητα και με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, της εξάτμισης και της διαπνοής, μπορούν να απορροφήσουν μεγάλες ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, αποτρέποντας την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στο αστικό περιβάλλον και συμβάλλοντας σημαντικά στη μείωση του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας.

### **Τα κοινωνικά πλεονεκτήματα της πράσινης οροφής είναι τα εξής:**

- Αξιοποίηση χώρου

Με τη δημιουργία βατών φυτεμένων δωματίων μπορούν να αξιοποιηθούν πολλοί ανεκμετάλλευτοι χώροι, οι οποίοι στις μέρες μας συντελούν στην αισθητική υποβάθμιση του δομημένου περιβάλλοντος.

- Αύξηση αξίας της ιδιοκτησίας

Τα φυτεμένα δώματα εκτός από τα κοινωνικά, κατασκευαστικά, ενεργειακά, περιβαλλοντικά και αισθητικά οφέλη που προσφέρουν, αποτελούν στοιχεία υψηλής ποιότητας και προσδίδουν στο κτίριο ιδιαίτερη αξία και κέρδος. Έτσι, αυξάνεται η αντικειμενική αξία των ακινήτων, αλλά και ολόκληρων περιοχών όταν αυτές «πρασινίζουν».

- Αισθητική αναβάθμιση αστικού τοπίου

Με την κατασκευή πράσινων στεγών, εκτός από τη δυνατότητα δημιουργίας λειτουργικών χώρων πρασίνου και αναψυχής, επιτυγχάνεται και η αισθητική αναβάθμιση του περιβάλλοντος του αστικού χώρου.

- Αύξηση παραγωγικότητας κατοίκων

Έχει παρατηρηθεί ότι η παραγωγικότητα των ατόμων που ζουν σ' ένα πράσινο περιβάλλον αυξάνεται κατά 15% έως και 20%.

- Αειφόρος ανάπτυξη

Η κατασκευή πράσινων στεγών ανοίγει ένα σημαντικό τομέα ανάπτυξης της πράσινης οικονομίας που αφορά από το κράτος και τον ιδιώτη, μέχρι τον πολίτη και το περιβάλλον.

Τέλος, το κατασκευαστικό κέρδος μιας τέτοιας κατασκευής, είναι η αύξηση της διάρκειας ζωής υλικών διατομής, καθώς τα φυτεμένα δώματα προστατεύουν τις υποκείμενες στρώσεις των δομικών υλικών ενός δώματος (πχ. στοιχεία υγρομονωτικά, θερμομονωτικά υλικά) από τη θερμική επιβάρυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμα, μια πράσινη στέγη προστατεύει την ταράτσα από εξωτερικούς φθοροποιούς παράγοντες (ηλιακές ακτίνες UV, απότομες μεταβολές θερμοκρασίας, χαλάζι, ρύποι κλπ) και επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής της κατά τουλάχιστον 40 χρόνια.



Παρά τα τεράστια οφέλη της, η φυτεμένη οροφή έχει και ορισμένα **μειονεκτήματα**:

- Οικονομική επιβάρυνση

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των φυτεμένων δωματίων είναι το κόστος σχεδιασμού και κατασκευής, καθώς μία φυτεμένη οροφή είναι ακριβότερη μίας συμβατικής. Η διαφορά αυτή όμως, αποσβένεται συνήθως εντός δύο ετών και από εκεί κι έπειτα αποτελεί κερδοφόρο επένδυση αφού εξοικονομεί χρήματα για τον ιδιοκτήτη, εάν εξαιρέσουμε το κόστος συντήρησης, ιδιαίτερα των φυτεμένων οροφών εντατικού τύπου.

- Στατική επιβάρυνση φυτεμένων οροφών

Η δημιουργία ή η απαγόρευση της κατασκευής ενός φυτεμένου δώματος, στηρίζεται αρχικά και μόνο σε αυτόν τον παράγοντα. Σε περίπτωση που η υπάρχουσα φέρουσα κατασκευή δε μπορεί να δεχτεί την πρόσθετη στατική επιβάρυνση, τότε η κατασκευή του κήπου στο δώμα, πρέπει να θεωρείται εξαρχής απαγορευτική.

- Κίνδυνος υγρασίας

Ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα των φυτεμένων δωματίων είναι ο κίνδυνος υγρασίας και τα προβλήματα που μπορούν να προκληθούν από αυτήν σε μια τέτοια περίπτωση, λόγω της δύσκολης και σημαντικού κόστους επισκευής που απαιτείται στην περίπτωση βλάβης των στεγανωτικών στρώσεων.

- Δυσκολία επισκευής σε περίπτωση βλάβης των στεγανωτικών στρώσεων

Σε περιπτώσεις βλάβης των στεγανωτικών στρώσεων, απαιτείται άμεση αντιμετώπιση του προβλήματος. Παρόλο που μπορεί να υπάρξει τοπική αποξήλωση των προβληματικών στρώσεων της κατασκευής και πάλι η διαδικασία δεν παύει να είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.

- Συντήρηση κήπου

Είναι αναμενόμενο ότι ένα φυτεμένο δώμα χρειάζεται μεγαλύτερη προσοχή και φροντίδα από ότι ένας κήπος στη στάθμη του εδάφους, εξαιτίας κυρίως της διείδυσης των ριζών, της ύπαρξης του νερού και των πιθανών αστοχιών της κατασκευής.

Αναμφίβολα η κατασκευή ενός φυτεμένου δώματος, παρά την οικονομική επιβάρυνση, είναι αποδεδειγμένο ότι μπορεί να συμβάλει και να προσφέρει πολλά στο δομημένο περιβάλλον των μεγαλουπόλεων. Τόσο στην Ευρώπη, όσο και στην Ελλάδα, θα πρέπει να μελετηθούν προτάσεις και να δοθούν κίνητρα που να προτρέπουν τις κατασκευαστικές εταιρίες και τους κατοίκους για την εφαρμογή μέτρων. Να προτρέψουν δηλαδή τους πολίτες, τόσο οι Δήμοι όσο και η Πολιτεία, να φυτέψουν τα δώματα και τους τοίχους τους και να δοθούν κίνητρα και επιδοτήσεις για τη μετατροπή ενός συμβατικού δώματος σε φυτεμένο κήπο. Επίσης, μπορεί να επιβληθεί ως μέτρο στις καινούργιες κατοικίες η φύτευση των δωματίων, σε συνδυασμό με δεξαμενές συγκέντρωσης όμβριων για το πότισμά τους, ξεκινώντας από όλα τα δημόσια κτίρια και σχολεία αλλά και από κάθε μεγάλο κτίριο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---



## 4.1 Πρόβλημα - Δεδομένα

Στόχος του υπολογιστικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας αρχικά, είναι η προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός κτιρίου στο οποίο έχει εγκατασταθεί φυτεμένη οροφή και η σύγκρισή του με κτίριο συμβατικής οροφής απλής μόνωσης. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζεται η οροφή κτιρίου που βρίσκεται στα προάστια της Αττικής, μια τυπική μέρα του Ιουλίου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η 21<sup>η</sup> Ιουλίου, ημέρα για την οποία η ASHRAE δίνει κλιματικά δεδομένα. Η εξωτερική θερμοκρασία μιας τυπικής μέρας του Ιουλίου στα προάστια των Αθηνών είναι  $+33^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

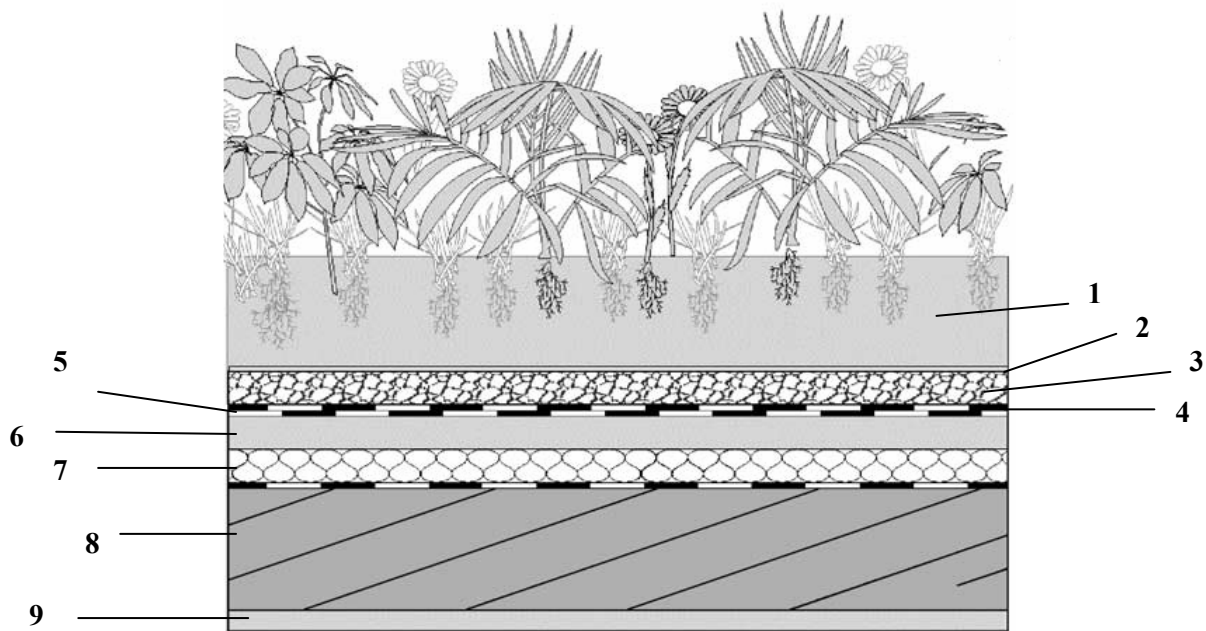
Το κτίριο που θα εξεταστεί είναι μια τυπική κατασκευή της δεκαετίας του 1980, ενός ορόφου, με συμβατική οροφή και τέσσερις αυτόνομους τοίχους χωρίς μόνωση, δηλαδή η θερμότητα συναλλάσσεται απευθείας με το περιβάλλον και όχι με τα γειτονικά κτίρια. Το κτίριο έχει συνολικό εμβαδό  $120\text{ m}^2$ , ενώ οι διαστάσεις του είναι 12 m μήκος x 10 m πλάτος x 3 m ύψος. Το υπό μελέτη κτίριο βρίσκεται στα νότια προάστια της Αττικής, όπου η κίνηση είναι μικρή συγκριτικά με το πυκνοκατοικημένο κέντρο και επικρατεί αίθριο μεσογειακό κλίμα με υψηλές θερμοκρασίες, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες.

Θα χρησιμοποιηθούν επομένως διάφορες πειραματικές σχέσεις προκειμένου να μελετηθεί η θερμότητα που μεταφέρεται μέσω της θερμοκρασίας του αέρα και της ηλιακής ακτινοβολίας στο κτίριο που βρίσκεται στα νότια προάστια της Αττικής, κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου και το θερμικό κέρδος που προκύπτει στην περίπτωση που το κτίριο έχει φυτεμένη οροφή.

## 4.2 Θερμική ανάλυση κτιρίου

- Οροφή

Η οροφή του κτιρίου είναι μια συμβατική οροφή και μπορεί να θεωρηθεί σαν μια πολυεπίπεδη κάτοψη, στην οποία τα επίπεδα βρίσκονται σε τέλεια θερμική επαφή. Η συμβατική οροφή αποτελείται από στρώματα τυπικών κατασκευαστικών υλικών, ενώ στο φυτεμένο δώμα τα επιπρόσθετα στρώματα τοποθετούνται πάνω από τα υφιστάμενα. Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η διαστρωμάτωση της φυτεμένης οροφής εκτατικού τύπου, ενώ στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι θερμικές ιδιότητες των υλικών συμβατικής και φυτεμένης οροφής.



Εικόνα 4.1 Στρώματα δώματος

Στρώμα	Πάχος $L$ (m)	Θερμική Αγωγιμότητα $k$ (W/mK)	Ποκνότητα $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Ειδική Θερμοχωρητικότητα $c$ (J/kgK)	
1 Μέσο Ανάπτυξης	0.120	1.160	600	800	Φυτεμένη Οροφή
2 Ίνες πολυπροπυλενίου	0.003	0.220	700	800	
3 Ελαφρόπετρα	0.060	0.500	250	700	
4 Ασφαλτόπανο	0.004	0.190	1100	1800	
5 Ασφαλτόφυλλο	0.007	0.190	1100	1800	Συμβατική Οροφή
6 Ελαφρομπετόν	0.050	1.100	1200	840	
7 Μόνωση	0.050	0.041	50	1000	
8 Μπετόν	0.150	2.030	2300	880	
9 Σοβάς	0.015	0.870	1800	1000	

Πίνακας 4.1 Θερμικές ιδιότητες υλικών συμβατικής και φυτεμένης οροφής

- **Εξωτερικοί και Εσωτερικοί τοίχοι**

Εφόσον το κτίριο έχει κατασκευαστεί τη δεκαετία του 1980, είναι προφανές ότι δε διαθέτει μόνωση στους εξωτερικούς τοίχους. Οι εξωτερικοί τοίχοι αποτελούνται από τρυπητό τούβλο (200x300x100) πάχους 20 cm και ένα λεπτό στρώμα σοβά πάχους 2.5 cm τόσο στην εξωτερική όσο και στην εσωτερική επιφάνειά τους. Οι εσωτερικοί τοίχοι αποτελούνται επίσης από τρυπητό τούβλο πάχους 10 cm και ένα λεπτό στρώμα σοβά πάχους 2.5 cm τόσο στην εξωτερική όσο και στην εσωτερική επιφάνειά τους. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι θερμικές ιδιότητες των υλικών των τοίχων.

<i>Στρώμα</i>	<i>Πάχος L (m)</i>	<i>Θερμική Αγωγιμότητα k (W/mK)</i>	<i>Ποκνότητα ρ (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Ειδική Θερμοχωρητικότητα c (J/kgK)</i>
Σοβάς	0.025	0.87	1800	1000
Τούβλο <sub>εξ.</sub>	0.2	0.25	1000	840
Τούβλο <sub>εσ.</sub>	0.1	0.25	1000	840

Πίνακας 4.2 Θερμικές ιδιότητες υλικών εξωτερικών και εσωτερικών τοίχων

### 4.3 Μαθηματική επίλυση

Η μαθηματική επίλυση του προβλήματος θα γίνει με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Το ζητούμενο του προβλήματος είναι η εύρεση της θερμότητας που μεταφέρεται από το περιβάλλον στο κτίριο και αντίστροφα. Το πρόβλημα είναι μεταβατικό με μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες. Για λόγους απλούστευσης, θεωρείται μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας μέσω της οροφής.

Η θερμική ισορροπία της πολυεπίπεδης οροφής περιγράφεται από την εξίσωση μονοδιάστατης θερμικής ροής:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4.1)$$

όπου:  $\rho c$  : η πυκνότητα [ $\text{kg/m}^3$ ] επί την ειδική θερμοχωρητικότητα [ $\text{J/kgK}$ ]

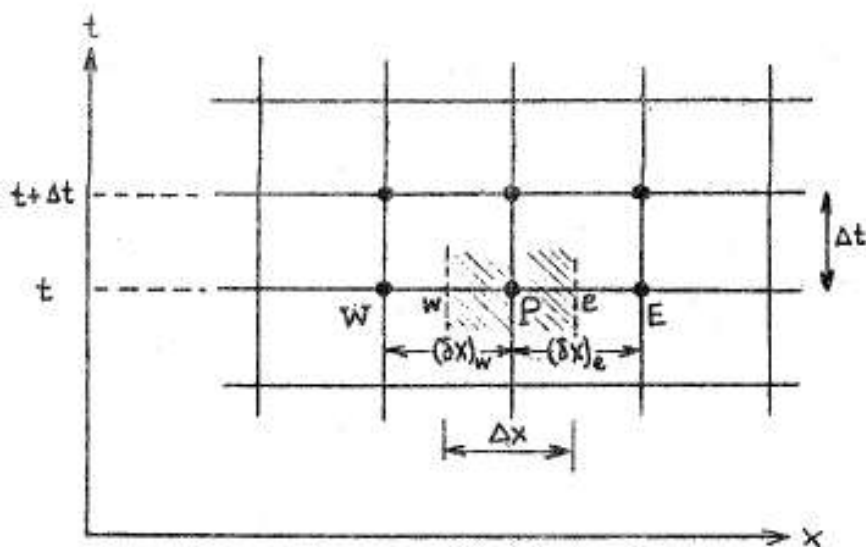
$\frac{\partial T}{\partial t}$  : Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας [ $\text{K}$ ] με το χρόνο [ $\text{s}$ ]

$k$  : Θερμική αγωγιμότητα επιπέδου [ $\text{W/mK}$ ]

$\frac{\partial T}{\partial x}$  : Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας [ $\text{K}$ ] με το χώρο [ $\text{m}$ ]

#### 4.3.1 Διακριτοποίηση προβλήματος

Για την επίλυση της παραπάνω εξίσωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, θα πρέπει να γίνει διακριτοποίηση στο κατάλληλο υπολογιστικό πλέγμα (εικόνα 4.2). Πιο συγκεκριμένα, το ολικό πάχος της κατασκευής της φυτεμένης οροφής χωρίζεται σε  $N$  κόμβους. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των κόμβων τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια στο αποτέλεσμα. Θεωρούμε την απόσταση μεταξύ των γειτονικών κόμβων  $\Delta x = x_{i+1} - x_i$  σταθερή.



Εικόνα 4.2 Υπολογιστικό πλέγμα συντεταγμένων  $x-t$  για την επίλυση της μεταβατικής μονοδιάστατης εξίσωσης διάχυσης<sup>37</sup>

### 4.3.2 Γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών

Το πρόβλημα έγκειται στον υπολογισμό των τιμών της θερμοκρασίας επί των κόμβων του υπολογιστικού πλέγματος κατά τη χρονική στιγμή  $t+\Delta t$ , με γνωστές τις τιμές της θερμοκρασίας κατά την προηγούμενη χρονική στιγμή  $t$ , όπου  $\Delta t$  είναι το χρονικό βήμα.

Για την κατάστρωση της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών ακολουθείται η μέθοδος του όγκου αναφοράς. Υποθέτοντας (για λόγους απλούστευσης)  $\rho c = \text{σταθερό}$ , όπου  $\rho$  η πυκνότητα και  $c$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού του επιπέδου που βρίσκεται ο κόμβος που εξετάζεται, η ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης 4.1 στον όγκο αναφοράς που περιβάλλει τον κόμβο P και στο χρονικό διάστημα  $t+\Delta t$  δίνει:

$$\rho c \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial T}{\partial t} = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad (4.2)$$

Με την υπόθεση σταθερής θερμοκρασίας  $T_P$  σε όλο τον όγκο αναφοράς, το πρώτο μέλος της εξίσωσης γίνεται:

$$\rho c \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial T}{\partial t} = \rho c \Delta x (T_P^1 - T_P^0) \quad (4.3)$$

όπου  $T_P^1$  και  $T_P^0$  η θερμοκρασία στον κόμβο P τη χρονική στιγμή  $t+\Delta t$  και  $t$  αντίστοιχα.

Αντίστοιχα, το χωρικό μέρος του ολοκληρώματος του δεύτερου μέλους της εξίσωσης δίνει:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right] dt \quad (4.4)$$

Έτσι, η εξίσωση (4.1) γράφεται:

$$\rho c \Delta x (T_P^1 - T_P^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right] dt \quad (4.5)$$

Εφόσον η  $T_P$  μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο, το χρονικό ολοκλήρωμα εκφράζεται:

$$\int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [f T_P^1 + (1-f) T_P^0] \Delta t \quad (4.6)$$

Χρησιμοποιώντας για τις θερμοκρασίες  $T_W$  και  $T_E$  όμοιες σχέσεις με την εξίσωση (4.6), η εξίσωση (4.5) γίνεται:

$$\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_P^1 - T_P^0) = f \left[ \frac{k_e (T_E^1 - T_P^1)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_P^1 - T_W^1)}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[ \frac{k_e (T_E^0 - T_P^0)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_P^0 - T_W^0)}{(\delta x)_w} \right] \quad (4.7)$$

Παραλείποντας τους δείκτες 1 για απλότητα και εκτελώντας τις πράξεις, η παραπάνω σχέση φέρεται στην τυπική μορφή εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών:

$$A_P T_P = A_E [f T_E + (1-f) T_E^0] + A_W [f T_W + (1-f) T_W^0] + [A_P^0 - (1-f) A_E - (1-f) A_W] T_P^0 \quad (4.8)$$

Η διατύπωση Crank – Nicolson ( $f=0,5$ ) μας δίνει:

$$A_P T_P = \frac{A_E}{2} (T_E + T_E^0) + \frac{A_W}{2} (T_W + T_W^0) + (A_P^0 - \frac{A_E}{2} - \frac{A_W}{2}) T_P^0 \quad (4.9)$$

Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία  $T_i$  κατά τη χρονική στιγμή  $t+\Delta t$  στον τυχαίο κόμβο εκφράζεται συναρτήσει των άγνωστων θερμοκρασιών των γειτονικών κόμβων  $T_{i-1}$  και  $T_{i+1}$ . Πρόκειται δηλαδή, για ένα σύστημα εξισώσεων τριδιαγώνιας μορφής (TDMA) και η διαδικασία επίλυσης περιγράφεται στις επόμενες ενότητες.

### 4.3.3 Οριακές συνθήκες

Με τη βοήθεια των οριακών συνθηκών του προβλήματος βρίσκονται οι εξισώσεις που μας δίνουν τη θερμοκρασία στους οριακούς κόμβους  $T_1$  και  $T_N$ . Στο πρόβλημά είναι γνωστές οι συναγωγιότητες  $h_{in}$ ,  $h_{out}$ , μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας κατασκευής και εσωτερικού αέρα και της εξωτερικής επιφάνειας κατασκευής και εξωτερικού αέρα αντίστοιχα, ενώ οι θερμοκρασίες  $T_{in}$ ,  $T_{out}$  μπορούν να υπολογιστούν. Επομένως, οι οριακές συνθήκες είναι:

$$\dot{q}_{in} = h_{in} (T_{in} - T_N) \quad (4.10)$$

$$\dot{q}_{out} = h_{out} (T_{out} - T_1) \quad (4.11)$$

Η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών στο εξωτερικό όριο ( $1^{ος}$  κόμβος) είναι:

$$\rho c \frac{\Delta x}{2} (T_1^1 - T_1^0) = 0.5 \left[ \left( k_e \frac{T_2^1 - T_1^1}{(\Delta x)_e} \right) - (h_{out} (T_1^1 - T_{out}^1)) \right] + 0.5 \left[ \left( k_e \frac{T_2^0 - T_1^0}{(\Delta x)_e} \right) - (h_{out} (T_1^0 - T_{out}^0)) \right] \quad (4.12)$$

$$A_1 T_1 = \frac{A_2}{2} (T_2 + T_2^0) + \frac{h_{out}}{2} (T_{out} + T_{out}^0) + T_1^0 \left( A_1^0 - \frac{A_2}{2} - \frac{h_{out}}{2} \right) \quad (4.13)$$

όπου:  $A_2 = \frac{k_e}{(\Delta x)_e}$ ,  $A_1^0 = \frac{\rho c \Delta x}{2 \Delta t}$  και  $A_1 = A_P^0 + \frac{A_2}{2} + \frac{h_{out}}{2}$

Οι δύο παραπάνω εξισώσεις ισχύουν αντίστοιχα και για το εσωτερικό όριο ( $N$  κόμβος) κάνοντας τις ακόλουθες αντικαταστάσεις:

$$A_1 \rightarrow A_N, A_1^0 \rightarrow A_N^0, T_1 \rightarrow T_N$$

$$A_2 \rightarrow A_{N-1}, T_2 \rightarrow T_{N-1}$$

$$T_{out} \rightarrow T_{in}, h_{out} \rightarrow h_{in}$$

Παρατηρούμε δηλαδή ότι οι οριακές συνθήκες που πρέπει να καθοριστούν είναι οι θερμοκρασίες  $T_{out}$ ,  $T_{in}$  - εξωτερικού και εσωτερικού αέρα αντίστοιχα, και οι αντίστοιχοι συντελεστές συναγωγής  $h_{out}$ ,  $h_{in}$ .



### 4.3.3.1α Εξωτερικές οριακές συνθήκες

Η εύρεση των εξωτερικών οριακών συνθηκών στην περίπτωση φυτεμένης οροφής είναι μια περίπλοκη διαδικασία. Το ανώτερο μέρος της φυτεμένης οροφής, ο θόλος, ορίζεται ως ο χώρος μεταξύ του μέσου ανάπτυξης και του ύψους βλάστησης, και αποτελείται από τα φύλλα και τον αέρα που βρίσκεται μεταξύ τους. Στο θόλο λαμβάνουν χώρα διάφορα φαινόμενα και επικρατούν συνθήκες που οφείλονται στις φυσικές λειτουργίες των φυτών. Επομένως, σκοπός είναι μέσα από τη μελέτη των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο θόλο, να υπολογιστεί η θερμοκρασία του αέρα στο χώρο αυτό, καθώς και η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της οροφής σε κάθε χρονική στιγμή του 24ωρου.

#### A. Στην Περίπτωση Φυτεμένης Οροφής

##### Ενεργειακός ισολογισμός στο φύλλωμα:

$$(\rho c)_f dLAI \frac{dT_f}{dt} = [1 - \tau_s - (1 - \tau_s)\rho_\infty] (1 + \tau_s \rho_g) I_s + (1 - \tau_l) [\sigma T_{sky}^4 + \sigma T_{gr}^4 - 2\sigma T_f^4] - 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{r_e} (T_f - T_{ca}) - 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{\gamma(r_e + r_i)} (e_f - e_{ca}) \quad (4.3.3.1-1)$$

Αναλύοντας τους όρους του αριστερού μέλους για το φύλλωμα (foliage), έχουμε:

- πυκνότητα:  $\rho=950 \text{ kg/m}^3$
- ειδική θερμοχωρητικότητα:  $c=3750 \text{ J/kgK}$
- πάχος:  $d=0.0005 \text{ m}$
- Leaf Area Index με τυπική τιμή:  $LAI=4$
- Μεταβολή της θερμοκρασίας  $T_f \text{ [K]}$  στην επιφάνεια φυλλώματος σε χρόνο  $dt \text{ [s]}$ :  $\frac{dT_f}{dt}$

Αναλύοντας τους όρους του δεξιού μέλους, έχουμε:

i. Ο όρος  $\phi_{rad,soil} = [1 - \tau_s - (1 - \tau_s)\rho_\infty] (1 + \tau_s \rho_g) I_s \text{ [W/m}^2\text{]}$  εκφράζει την ηλιακή ακτινοβολία (ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος) που απορροφάται από τα φύλλα και ισούται με το άθροισμα της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται απευθείας από τα φύλλα και της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από το έδαφος και απορροφάται από τα φύλλα, αφού προηγουμένως είχε περάσει από τα φύλλα αλλά δεν έχει απορροφηθεί.

Η ηλιακή ακτινοβολία  $I_s$  όμως που μεταδίδεται, δεν απορροφάται εξ' ολοκλήρου από τα φύλλα. Ο όρος  $(\tau_s I_s)$  αντιπροσωπεύει το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που διαχέεται στο θόλο και μπορεί να υπολογιστεί αν γνωρίζουμε το συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος του φυλλώματος  $\tau_s$ , ο οποίος ισούται με:

$$\tau_s = \exp(-k_s LAI)$$

όπου  $k_s=0.74k_1$  είναι ο συντελεστής εξάλειψης φύλλων. Ο συντελεστής εξάλειψης φύλλων για ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος ισούται με  $k_1=0,829$  (πίνακας 4.3) για κωνική φυλλωσιά, και συνεπώς  $k_s=0,6135$ . Γνωρίζοντας ακόμη ότι  $LAI=4$ , προκύπτει  $\tau_s=0.086$ .

Κατανομή Φυλλώματος	$k_l$
Οριζόντια	1-1.05
Κωνική	0.829
Κάθετη	0.436
Σφαιρική	0.684-0.81

Πίνακας 4.3 Τιμές συντελεστή  $k_l$  συναρτήσει της κατανομής φυλλώματος<sup>22</sup>

Επιπλέον, εκτός από την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που διαχέεται, ανακλάται και το ποσό  $(1 - \tau_s) \rho_\infty I_s$ , όπου  $\rho_\infty$  ο λόγος ανάκλασης (albedo) των φύλλων και κυμαίνεται από 0.1 έως 0.25. Για τις πράξεις, θα θεωρηθεί η μέση τιμή  $\rho_\infty = 0.175$ .

Τέλος, στο σύνολο της απορροφούμενης από τα φυτά ηλιακής ακτινοβολίας, προστίθεται το ποσό που ανακλάται από το έδαφος και ισούται με  $(\tau_s \rho_g I_s)$ , όπου  $\rho_g$  είναι ο λόγος ανάκλασης του χρώματος φύτευσης με τιμές 0.15-0.25. Για τις πράξεις, θα θεωρηθεί η μέση τιμή  $\rho_g = 0.2$ .

ii. Ο όρος  $\phi_{\text{rad,TIR}} = (1 - \tau_l) [\sigma T_{\text{sky}}^4 + \sigma T_{\text{gr}}^4 - 2\sigma T_f^4]$  [W/m<sup>2</sup>] εκφράζει τη θερμική ακτινοβολία από και προς τα φύλλα. Η συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας (ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος) γίνεται μεταξύ φύλλων και ουρανού, μεταξύ φύλλων και μέσου ανάπτυξης και μεταξύ φύλλων.

Το φύλλωμα απορροφά το ποσό  $(1 - \tau_l)$  της συνολικής θερμικής ακτινοβολίας που δέχεται. Ο συντελεστής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους του φυλλώματος  $\tau_l$  υπολογίζεται από τη σχέση  $\tau_l(LAI) = \exp(-k_l LAI)$  και θέτοντας  $k_l = 0.684$  και  $LAI = 4$ , βρίσκουμε  $\tau_l = 0.0091$ .

Η θερμοκρασία του ουρανού, ισούται με:  $T_{\text{sky}} = 0,554 \cdot T_0^{1.5}$ , όπου  $T_0$  είναι η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος, ενώ η θερμοκρασία  $T_{\text{gr}}$  είναι η θερμοκρασία της ανώτερης επιφάνειας του μέσου ανάπτυξης και ισούται με την  $T_1$  που ζητάμε μέσα από την εξίσωση του υπολογιστικού πλέγματος της φυτεμένης οροφής.

Η σταθερά Stefan-Boltzmann ισούται με:  $\sigma = 5.699 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>.

iii. Ο όρος  $\phi_{\text{conv,f-ca}} = -2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{r_e} (T_f - T_{ca})$  [W/m<sup>2</sup>] εκφράζει τη θερμική συναγωγή του αισθητού φορτίου μεταξύ της επιφάνειας των φύλλων και του αέρα θόλου (canopy air).

Για την πυκνότητα και την ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα του θόλου ισχύει:  $\rho = 1.18$  kg/m<sup>3</sup> και  $C_p = 1006$  J/kgK.

Ο όρος  $r_e$  είναι η μέση αντίσταση του φυλλώματος στη μετάδοση αισθητού θερμικού φορτίου, γνωστός και ως «εξωτερική αντίσταση» και υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$r_e = \frac{al^m}{\left( |T_f - T_{ca}| + bu_{ca}^2 \right)^n} \text{ [sm}^{-1}\text{]} \quad (4.3.3.1-2)$$

όπου  $l=0.15$  m είναι το χαρακτηριστικό μήκος των φύλλων (με συνήθεις τιμές 0.05-0.3 m) και  $u_{ca}$  είναι η μέση ταχύτητα του αέρα εντός του θόλου. Οι συντελεστές  $a, b, m, n$  είναι εμπειρικοί και σύμφωνα με σχετική δημοσίευση<sup>22</sup> για ντοματοκαλλιέργεια ισχύει:  $a=1174$ ,  $b=207$ ,  $m=0.5$ ,  $n=0.25$  και αποδεχόμαστε ότι οι τιμές αυτές δεν αποκλίνουν αισθητά από τις αντίστοιχες των φυτών της φυτεμένης οροφής.

Για τον προσδιορισμό της  $r_e$ , θα χρειαστεί να υπολογιστεί η ταχύτητα του αέρα του θόλου  $u_{ca}$ , η οποία προσεγγιστικά δίνεται από τη σχέση<sup>21</sup>:

$$u_{ca} = 0.83\sigma_f u_0 \sqrt{c_{hm}^f} + (1 - \sigma_f) u_0 \quad [\text{m/s}] \quad (4.3.3.1-3)$$

όπου:

-  $\sigma_f = LAI/7$ , η κλασματική φυτοκάλυψη,

-  $C_{hm}^f = K_v^2 \left[ \ln \left( \frac{z_f - z_d}{z_{0f}} \right) \right]^{-2}$ , ο συντελεστής μετάδοσης σε ουδέτερες συνθήκες ατμοσφαιρικής

σταθερότητας, με  $K_v=0.4$  (σταθερά Von Karmen),  $Z_f=0.6$ m,  $Z_d=0.701 \cdot Z_f^{0.979}$ ,  $Z_{0f}=0.131 \cdot Z_f^{0.979}$

-  $u_0$  είναι η ταχύτητα του ανέμου στο περιβάλλον. Η ημερήσια διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου υπολογίζεται με βάση της μετρήσεις που γίνονται στο μετεωρολογικό σταθμό που είναι εγκατεστημένος στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου 2004, και στη συνέχεια με βάση την εξίσωση (4.3.3.1-3) υπολογίζεται η ημερήσια διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου εντός του θόλου.

iv. Ο όρος  $\Phi_{\text{trans},f-ca} = -2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{\gamma(r_e + r_i)} (e_f - e_{ca})$  [W/m<sup>2</sup>] εκφράζει το ποσό της λανθάνουσας θερμότητας που μεταφέρεται από τα φυτά, λόγω της εξατμισοδιαπνοής των φύλλων και αποτελεί μια προσεγγιστική σχέση για την εύρεση του φορτίου αυτού.

Ο όρος  $r_i$  αντιπροσωπεύει την αντίσταση των στομάτων ή «εσωτερική» αντίσταση του φυλλώματος στη μετάδοση λανθάνουσας θερμότητας και υπολογίζεται ως εξής<sup>22</sup>:

$$r_i = r_{\min} \tilde{r}_i(I_s) \tilde{r}_i(T_f) \tilde{r}_i(CO_2) \tilde{r}_i(e_f - e_{ca}) \quad (4.3.3.1-4)$$

$$\begin{cases} \tilde{r}_i(I_s) = \frac{\bar{I}_s + C_1}{\bar{I}_s + C_2}, C_1 > C_2, \bar{I}_s = \frac{I_s}{2LAI} \\ \tilde{r}_i(T_f) = 1 + C_3(T_f - T_m)^2 \\ \tilde{r}_i(CO_2) = 1 + C_4(CO_2 - 200)^2 \\ \tilde{r}_i(e_f - e_{ca}) = 1 + C_5(e_f - e_{ca})^2 \end{cases}$$

όπου  $r_{\min}=82$  s/m είναι η ελάχιστη δυνατή αντίσταση και  $\tilde{r}_i$  αδιάστατες συναρτήσεις που ποσοτικοποιούν τη σχετική αύξηση της  $r_i$  ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου που εκφράζουν. Οι τιμές αυτές των παραμέτρων είναι οι εξής:  $CO_2=300$  είναι η τιμή της συγκέντρωσης  $CO_2$  εντός του θόλου,  $I_s$  είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο θόλο,  $T_m=24.5^\circ\text{C}$  και  $C_i$  είναι οι διάφορες παράμετροι που εξαρτώνται από το θόλο. Οι τιμές αυτών για ντοματοκαλλιέργεια ορίζονται<sup>22</sup>:  $C_1=4.3$ ,  $C_2=0.54$ ,  $C_3=2.3 \cdot 10^{-2}$ ,  $C_4=6.1 \cdot 10^{-7}$ ,  $C_5=4.3$ . Για μεγαλύτερη ακρίβεια, τίθεται:

$r_i = f r_{i, \text{tom}}$ , όπου  $f=1.25$  (τυπικές τιμές  $f=0.5-2$  και πιο συγκεκριμένα,  $f > 1$  αν στα φυτά το φαινόμενο της διαπνοής εμφανίζεται πιο ασθενές σε σχέση με της ντοματοκαλλιέργειας και  $f < 1$  αν εμφανίζεται πιο έντονο).

Στην εξίσωση αυτή συναντάται όμως η τάση ατμού του αέρα εντός του θόλου  $e_{ca}$  και η τάση ατμού του αέρα στην επιφάνεια του φύλλου  $e_f$ . Η τάση ατμού υπολογίζεται από το γινόμενο της τάσης κορεσμένου ατμού  $e_s$  επί τη σχετική υγρασία  $w$  του αέρα, δηλαδή:

$$e = e_s \cdot w \quad (4.3.3.1-5)$$

Η τάση κορεσμένου ατμού  $e_s$  υπολογίζεται προσεγγιστικά συναρτήσει της θερμοκρασίας του αέρα από τη σχέση:

$$e_s = 610.78 \exp^{\frac{17.2694T}{T+238.3}} \quad (4.3.3.1-6)$$

όπου  $T$  είναι η θερμοκρασία του αέρα.

Η τάση ατμού  $e_f$  του αέρα στην επιφάνεια του φυλλώματος ταυτίζεται με την τάση κορεσμένου ατμού ( $e_f = e_{sf}$ ) αφού στα φύλλα έχουμε υδρατμό ( $w=100\%$ ) και βρίσκεται με τη βοήθεια της θερμοκρασίας  $T_f$ .

Επιπλέον, η τάση ατμού  $e_{ca}$  του αέρα εντός του θόλου βρίσκεται από τη σχέση:

$$e_{ca} = \frac{\vartheta p_0}{0.62198 + \vartheta} \quad (4.3.3.1-7)$$

όπου  $p_0 = 101.325 \cdot 10^3$  Pa είναι η πίεση του ατμοσφαιρικού αέρα και  $\vartheta$ : η ειδική υγρασία του αέρα.

Για την εύρεση της ειδικής υγρασίας θα γίνει ενεργειακός ισολογισμός της ειδικής υγρασίας του αέρα εντός του θόλου.

**Ο ενεργειακός ισολογισμός για την ειδική υγρασία του αέρα δίνει:**

$$(\rho c)_{ca} L \left( \frac{d\theta}{dt} \right)_{ca} = 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{\gamma \Lambda (r_e + r_i)} (e_f - e_{ca}) + \frac{h_{veg}}{\gamma \Lambda} (e_{gr} - e_{ca}) - \frac{h_{ca\infty}}{\gamma \Lambda} (e_{ca} - e_{\infty}) \quad (4.3.3.1-8)$$

όπου:

$L=0.3$  m είναι το ύψος της βλάστησης

$\left( \frac{d\theta}{dt} \right)_{ca}$  η μεταβολή της ειδικής υγρασίας  $\theta_{ca}$  του αέρα θόλου με το χρόνο  $dt$  [s]

Αναλύοντας τους όρους του δεξιού μέλους, έχουμε:

**i.** ο όρος  $\varphi_{\text{vap,ca-f}} = 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{\gamma \Lambda (r_e + r_i)} (e_f - e_{ca})$  [kg/m<sup>2</sup>] εκφράζει τη ροή υγρασίας μεταξύ αέρα θόλου και φύλλων,

όπου  $\Lambda$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης:

$$\Lambda = (2.501 - 0.002361T) \cdot 10^6 \text{ [J/kg]}$$

και  $\gamma$  η θερμοδυναμική ψυχομετρική σταθερά:

$$\gamma = (\rho c_p)_{ca} / 0.622 \Lambda \text{ [Pa/K]}$$

ii. ο όρος  $\phi_{\text{vap,ca-g}} = \frac{h_{\text{veg}}}{\gamma \Lambda} (e_{gr} - e_{ca}) \text{ [kg/m}^2\text{]}$  εκφράζει τη ροή υγρασίας μεταξύ αέρα θόλου και χώματος.

Στη σχέση αυτή, σύμφωνα με τις περισσότερες σχετικές δημοσιεύσεις, γίνεται η παραδοχή ότι μελετάται «ξηρό» φυτεμένο δώμα, όπου  $w_{gr} = 0$ . Να σημειωθεί ότι αυτό είναι θεωρητικό, καθώς στην πράξη στο μέσο ανάπτυξης υπάρχει υγρασία λόγω της άρδευσης. Επειδή λοιπόν,  $w_{gr} = 0$ , η τάση ατμού επί της επιφάνειας του χώματος  $e_{gr}$  είναι μηδέν και ο αέρας του θόλου χάνει υγρασία προς το χώμα ανάλογα με το συντελεστή συναγωγής αέρα θόλου-χώματος, ο οποίος λόγω περιορισμένης ταχύτητας ανέμου εντός του θόλου είναι χαμηλός και εκτιμάται:  $h_{\text{veg}} = 1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

iii. ο όρος  $\phi_{\text{vap,ca-}\infty} = \frac{h_{\text{ca}\infty}}{\gamma \Lambda} (e_{ca} - e_0) \text{ [kg/m}^2\text{]}$  εκφράζει τη ροή υγρασίας μεταξύ αέρα θόλου και αέρα περιβάλλοντος.

Ο συντελεστής συναγωγής αέρα θόλου και αέρα περιβάλλοντος υπολογίζεται:  $h_{\text{ca}\infty} = RL(\rho c_p)_{ca}$ , όπου R: οι ανανεώσεις του αέρα εντός του θόλου με τιμές 0.033-0.25. Υποθέτουμε  $R = 0.1 \text{ s}^{-1}$ .

Η τάση ατμού του αέρα περιβάλλοντος  $e_0$  υπολογίζεται αφού βρεθεί η τάση κορεσμένου ατμού  $e_{s0}$  από τη σχέση (4.3.3.1-6), με βάση τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα περιβάλλοντος κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου 2004, μεγέθη τα οποία λαμβάνονται από μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού που είναι εγκατεστημένος στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

Έτσι, υπολογίζοντας την ειδική υγρασία  $\theta$  του αέρα εντός του θόλου και προσδιορίζοντας την τάση ατμών του αέρα εντός του θόλου  $e_{ca}$  από τη σχέση (4.3.3.1-7) και την τάση κορεσμένου ατμού  $e_{sca}$  (σχέση 4.3.3.1-6), μπορεί να προσδιοριστεί η σχετική υγρασία  $w$  του αέρα εντός του θόλου (σχέση 4.3.3.1-5) και να συγκριθεί με τη σχετική υγρασία του αέρα περιβάλλοντος.

**Ενεργειακός ισολογισμός στον αέρα εντός του θόλου:**

$$(\rho c)_{ca} L \frac{dT_{ca}}{dt} = 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{r_e} (T_f - T_{ca}) + h_{\text{veg}} (T_{gr} - T_{ca}) + h_{\text{ca}\infty} (T_{\infty} - T_0) \quad (4.3.3.1-9)$$

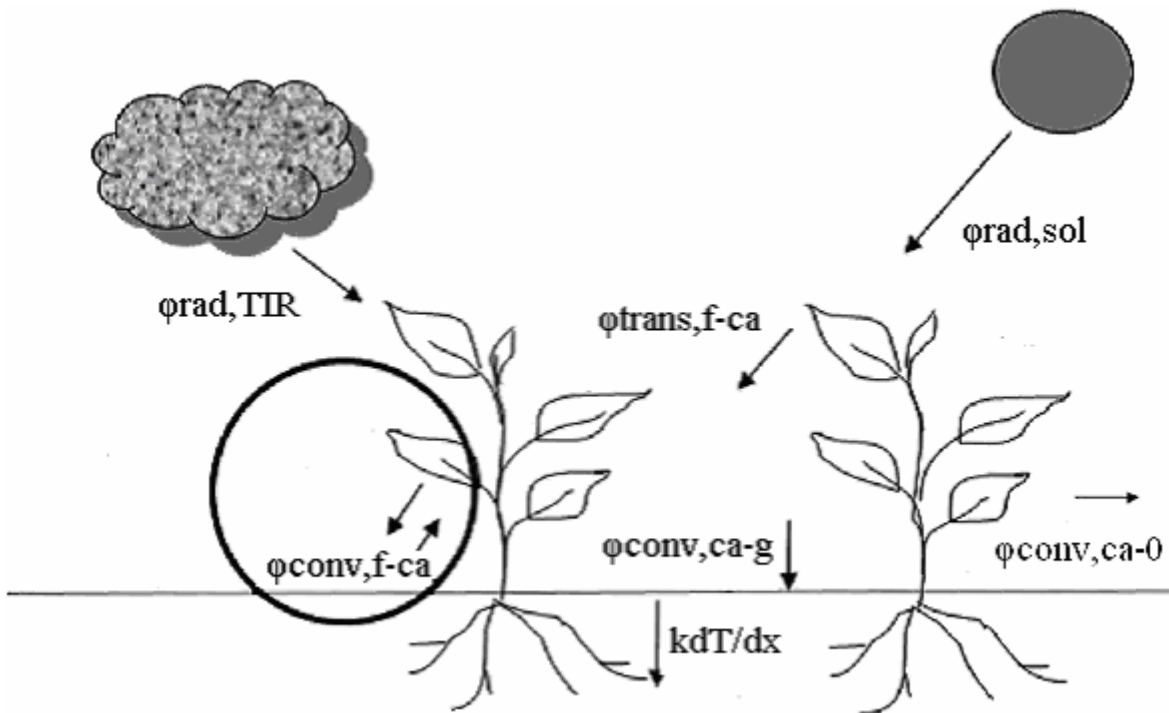
όπου στο αριστερό μέλος:

$\frac{dT_{ca}}{dt}$  ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας  $T_{ca}$  [K] του αέρα εντός του θόλου με το χρόνο  $dt$  [s].

Αναλύοντας τους όρους του δεξιού μέλους:

- i. ο όρος  $\phi_{\text{conv,ca-f}} = 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{r_e} (T_f - T_{ca})$  [W/m<sup>2</sup>] εκφράζει τη συναγωγή θερμότητας μεταξύ των φύλλων και του αέρα θόλου
- ii. ο όρος  $\phi_{\text{conv,ca-g}} = h_{\text{veg}} (T_{gr} - T_a)$  [W/m<sup>2</sup>] εκφράζει τη συναγωγή θερμότητας μεταξύ αέρα θόλου και χώματος
- iii. ο όρος  $\phi_{\text{conv,ca-0}} = h_{\text{cas}} (T_{ca} - T_0)$  [W/m<sup>2</sup>] εκφράζει τη συναγωγή θερμότητας μεταξύ αέρα θόλου και περιβάλλοντος

Τέλος, για την περίπτωση της φυτεμένης οροφής, στην εικόνα 4.3 απεικονίζεται το ενεργειακό ισοζύγιο εντός του θόλου της.



Εικόνα 4.3 Απεικόνιση του ενεργειακού ισοζυγίου στο θόλου της φυτεμένης οροφής<sup>21</sup>

### B. Στην περίπτωση συμβατικής οροφής

Στην περίπτωση της συμβατικής οροφής, στην οποία δεν υπάρχει θόλος, ο προσδιορισμός των εξωτερικών οριακών συνθηκών είναι απλούστερος, καθώς η θερμοκρασία του αέρα με την οποία συνάγει θερμότητα η εξωτερική επιφάνεια της οροφής και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι οι αντίστοιχες τιμές περιβάλλοντος.

### 4.3.3.1β Μετάδοση θερμότητας στην επιφάνεια της οροφής

Αφού έχουν οριστεί οι οριακές συνθήκες, πρέπει τώρα να προσδιοριστεί η συναγωγή θερμότητας του αέρα με την εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής.

A. Στην περίπτωση φυτεμένης οροφής

$$\dot{q}_{ca-gr} = (1-\rho_g)I_g - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{e_l} (T_g^4 - T_f^4) + h_{veg}(T_{ca} - T_{gr}) \quad (4.3.3.1-10)$$

i. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ένα μικρό τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας  $I_s$  δεν απορροφάται από τη βλάστηση και προσπίπτει στην οροφή. Από αυτή την ακτινοβολία ένα μέρος απορροφάται από την κατασκευή και ισούται με  $\phi_{rad,sol-gr} = (1-\rho_g)I_g$  [ $W/m^2$ ], όπου  $\rho_g = 0.2$  και  $I_g$  το ποσό της ακτινοβολίας που διαπερνά το φύλλωμα και προσπίπτει στην οροφή, ίσο με:  $I_g = \tau_s I_s$  [ $W/m^2$ ].

ii. Ο όρος  $\phi_{rad,TIR-gr} = - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{e_l} (T_{gr}^4 - T_f^4)$  [ $W/m^2$ ] εκφράζει τη θερμική ακτινοβολία από και προς την επιφάνεια της κατασκευής.

Για τη διαχυτικότητα του μέσου ανάπτυξης  $\varepsilon_g$ , με συνήθεις τιμές 0.92-0.98, τίθεται  $\varepsilon_g = 0.95$  και για τη διαχυτικότητα του φυλλώματος  $\varepsilon_f$ , με συνήθεις τιμές 0.94-0.99, τίθεται  $\varepsilon_f = 0.965$ , ενώ επιπλέον ισχύει:  $e_l = \varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_g \varepsilon_f$

iii. Τέλος, κατά την κίνηση του αέρα του θόλου προς την επιφάνεια της κατασκευής μεταδίδεται, λόγω της θερμοκρασιακής τους διαφοράς, θερμότητα δια συναγωγής που ισούται με:  $\phi_{conv,ca-gr} = h_{veg} (T_{ca} - T_{gr})$  [ $W/m^2$ ], όπου ο συντελεστής συναγωγής ισούται με:  $h_{veg} = 1.5$   $W/m^2K$

B. Στην περίπτωση συμβατικής οροφής

Ομοίως με την περίπτωση της φυτεμένης οροφής:

$$\dot{q}_{0-r} = (1-\rho_r)I_s + \varepsilon \Delta R + h_{roof}(T_0 - T_r) \quad (4.3.3.1-11)$$

i. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην οροφή, απορροφάται τώρα από το σύνολο της επιφάνειας της οροφής. Και σε αυτή την περίπτωση όμως, ένα μέρος της ανακλάται. Έτσι, για την εύρεση της απορροφούμενης ακτινοβολίας χρησιμοποιείται η εξίσωση  $\phi_{rad,sol-r} = (1-\rho_r)I_s$  [ $W/m^2$ ], όπου  $I_s$  η ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία και  $\rho_r = 1-\alpha$ , ο λόγος ανάκλασης. Υποθέτοντας το λόγο απορρόφησης  $\alpha = 0.42$ , όπως δίνεται από την ASHRAE για ανοιχτόχρωμη επιφάνεια, προκύπτει ο λόγος ανάκλασης  $\rho_r = 0.58$ .

ii. Η θερμική ακτινοβολία από την οροφή εκφράζεται με τη μορφή του διορθωτικού συντελεστή για μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, δηλαδή  $\phi_{rad,TIR-r} = \varepsilon \Delta R = -63$   $W/m^2K$ .

iii. Η θερμότητα που μεταδίδεται δια συναγωγής λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος και της οροφής, ισούται με:  $\phi_{conv,0-r} = h_{roof}(T_0 - T_r)$  [ $W/m^2$ ], όπου  $h_{roof} = 16.3$   $W/m^2K$ .

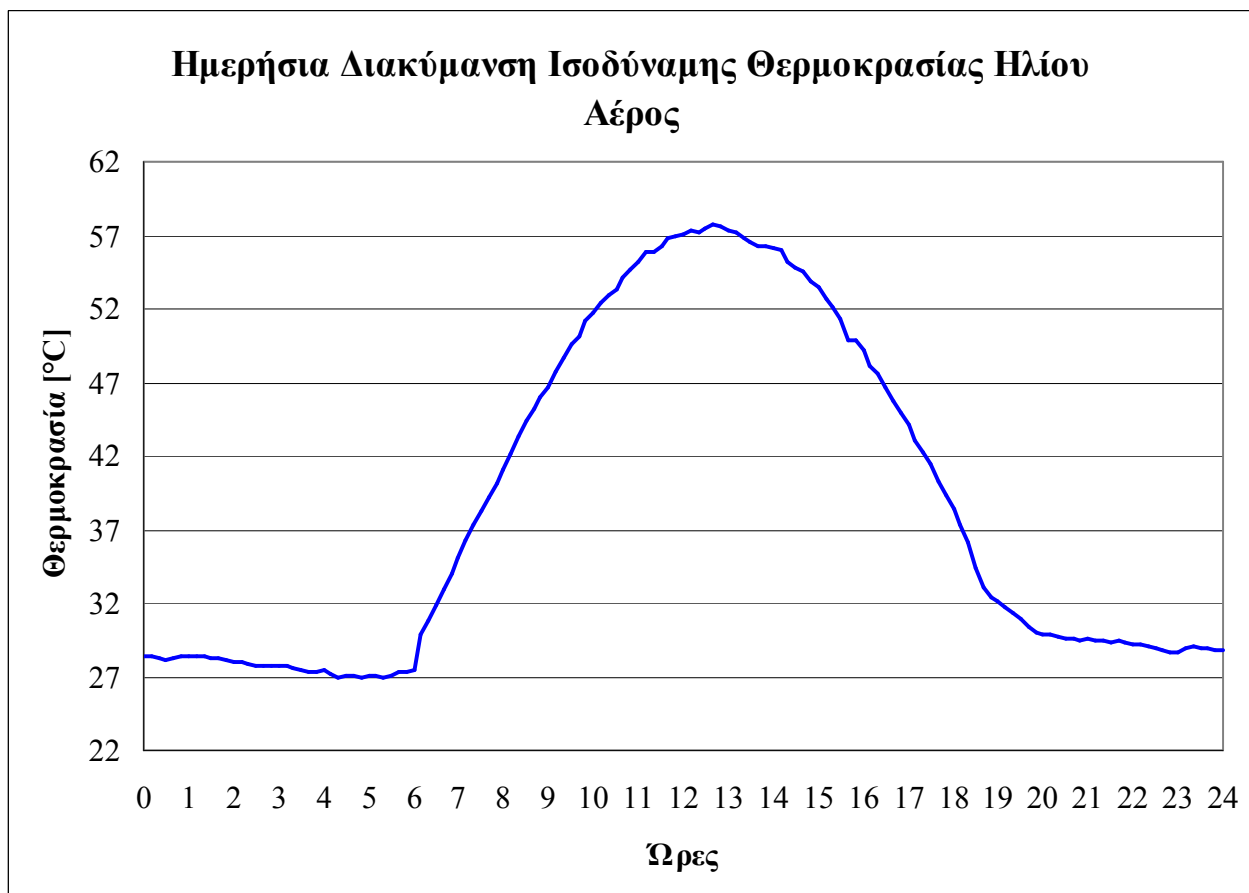
Η εισερχόμενη ροή θερμότητας στην οροφή, είναι:

$$\dot{q}_{0-r} = h_{roof}(T_e - T_r) \quad (4.3.3.1-12)$$

όπου  $T_e$  η ισοδύναμη θερμοκρασία ηλίου αέρος, ισούται σύμφωνα με την ASHRAE:

$$T_e = T_0 + \frac{a}{h_{roof}} I_t - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_{roof}} \quad [K] \quad (4.3.3.1-13)$$

και η ημερήσια διακύμανση της ισοδύναμης θερμοκρασίας ηλίου αέρος παρουσιάζεται στο γράφημα 4.1:



Γράφημα 4.1 Ισοδύναμη θερμοκρασία ηλίου αέρος κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου<sup>36</sup>

Επομένως, μπορεί να υπολογιστεί η αντίστοιχη ισοδύναμη θερμοκρασία ηλίου αέρος στο θόλο, στην περίπτωση φυτεμένης οροφής:

$$T_{e,ca} = T_{ca} + \frac{1}{h_{veg}} \left[ (1 - \rho_g) I_g - \frac{\sigma_f \varepsilon_{gr} \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) \right] \quad (4.3.3.1-14)$$



### 4.3.3.2α Εσωτερικές οριακές συνθήκες

Σκοπός είναι να υπολογιστεί η θερμοκρασία του αέρα  $T_{in}$  στο εσωτερικό του κτιρίου για κάθε χρονική στιγμή του 24ωρου, με τον οποίο συναλλάσσει θερμότητα δια συναγωγής η εσωτερική επιφάνεια της οροφής. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει να μελετηθούν οι παράγοντες που συμμετέχουν στη διαμόρφωση της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου, δηλαδή τα θερμικά φορτία που προκαλούν μεταβολή της θερμοκρασίας εντός του χώρου του κτιρίου κατά τη διάρκεια του 24ωρου. Πιο συγκεκριμένα, η διαμόρφωση της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου του κτιρίου καθορίζεται από την οροφή, τους τοίχους, τους υαλοπίνακες και τη διείσδυση του αέρα καθώς θεωρείται αμελητέο το θερμικό κέρδος λόγω εσωτερικών πηγών θερμότητας (φωτισμός, άνθρωποι, συσκευές).

Έτσι, αναλυτικά έχουμε:

#### I. Ροή Θερμότητας μέσω εξωτερικών τοίχων

Η εξωτερική επιφάνεια κάθε τοίχου αφενός συναλλάσσει θερμότητα με τον αέρα περιβάλλοντος (σταθερής θερμοκρασίας) και αφετέρου υπόκειται σε ηλιακή ακτινοβολία  $I_t$ , που εξαρτάται από τον προσανατολισμό του τοίχου. Η αντίστοιχη θερμοκρασία ηλίου αέρος ισούται με:

$$T_{e,i} = T_0 + \frac{\alpha I_{t,i}}{h_{ex,wall}} \quad [K] \quad (4.3.3.2-1)$$

όπου:

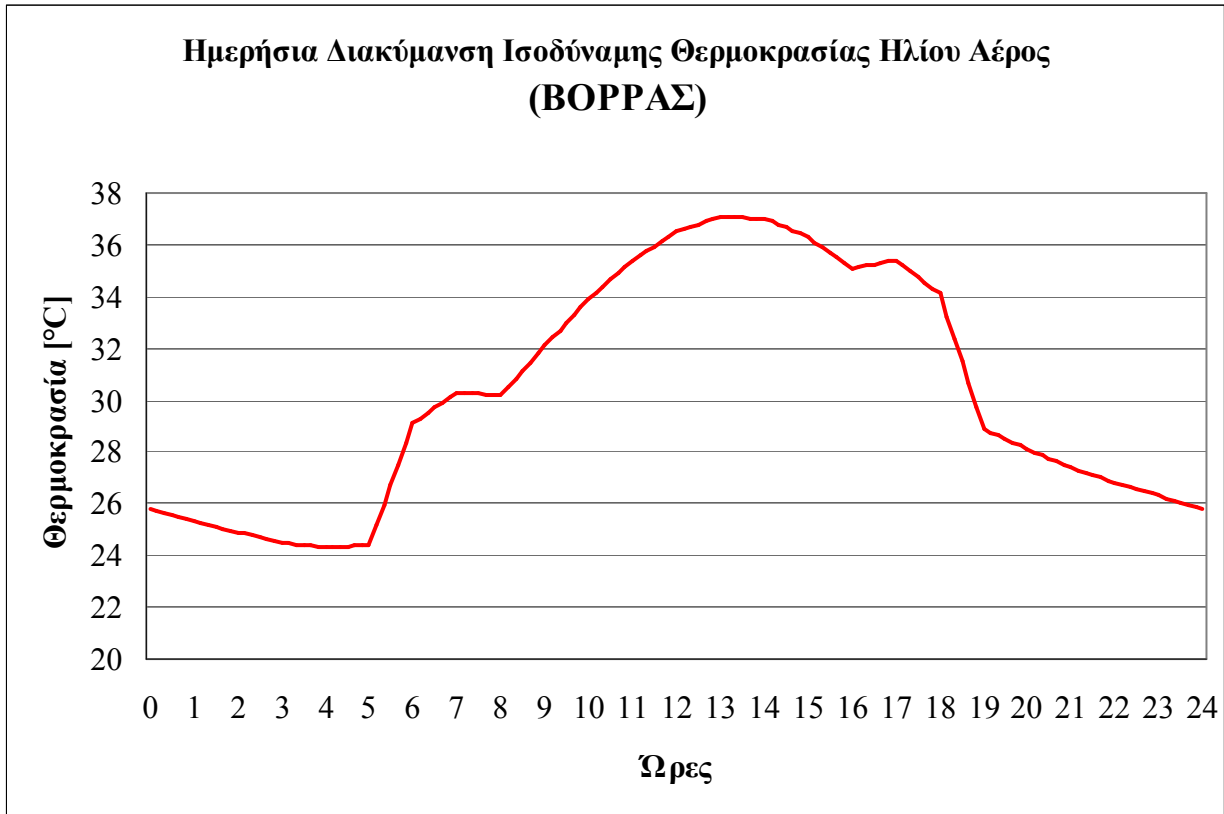
$\alpha=0.42$ : ο συντελεστής απορρόφησης του τοίχου

$h_{ex,wall}=16.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ : ο συντελεστής συναγωγής αέρα περιβάλλοντος με τον εξωτερικό τοίχο

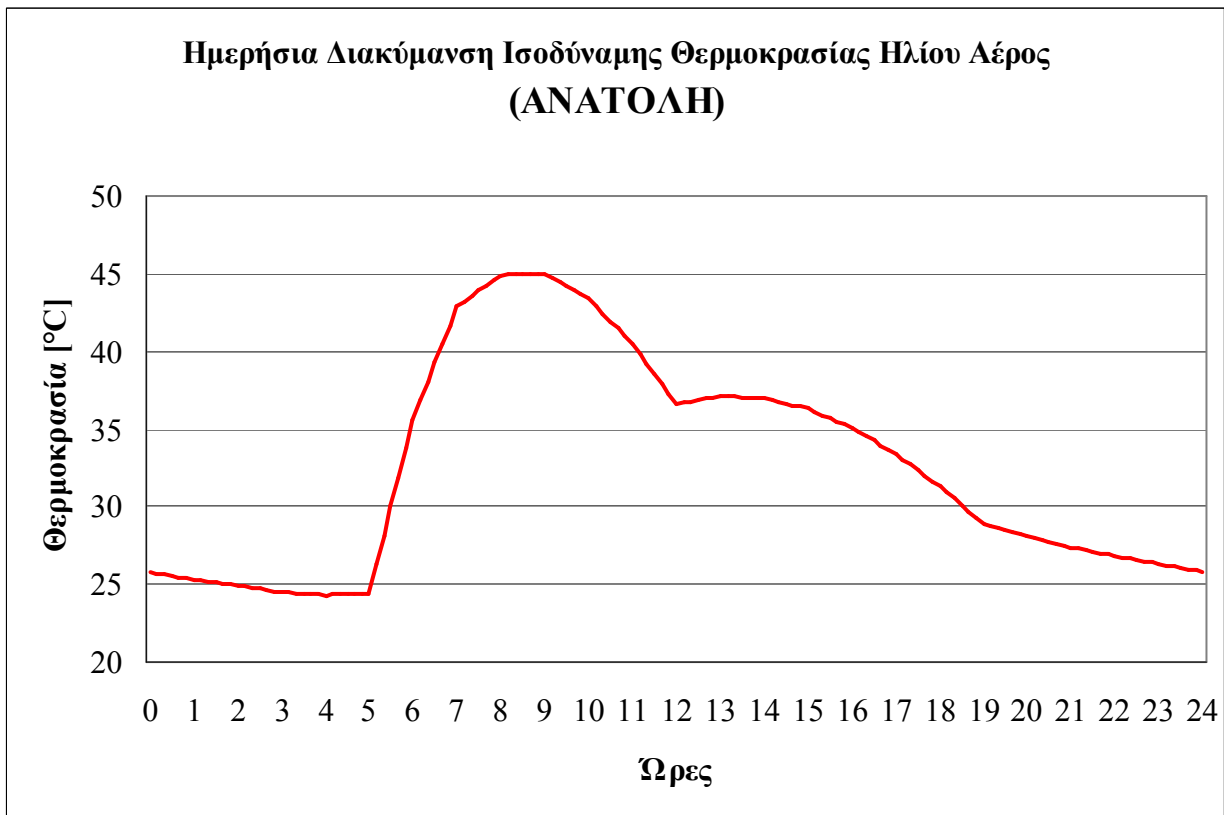
$I_{t,i} [\text{W/m}^2]$ : ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάθε τοίχο

Να σημειωθεί ότι η ποσότητα  $\varepsilon \Delta R/h_0$ , που εκφράζει την εκπεμπόμενη ακτινοβολία ανά επιφάνεια είναι μηδενική (κατακόρυφη επιφάνεια), γι' αυτό και παραλείπεται από την παραπάνω σχέση.

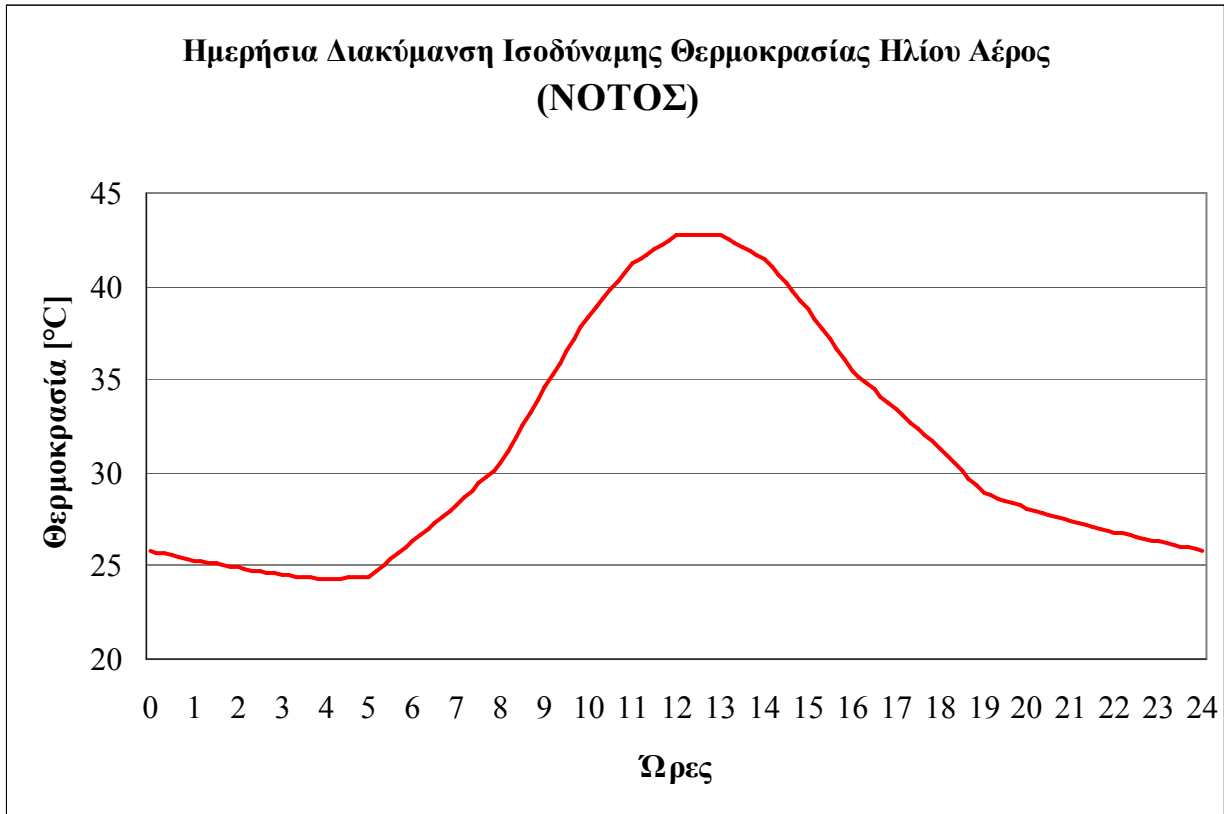
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα 4.2-4.5 της ημερήσιας διακύμανσης ισοδύναμης θερμοκρασίας ηλίου αέρος με την οποία συνάγει θερμότητα η εξωτερική επιφάνεια κάθε τοίχου (ανοιχτού χρώματος) ανάλογα με τον προσανατολισμό του.



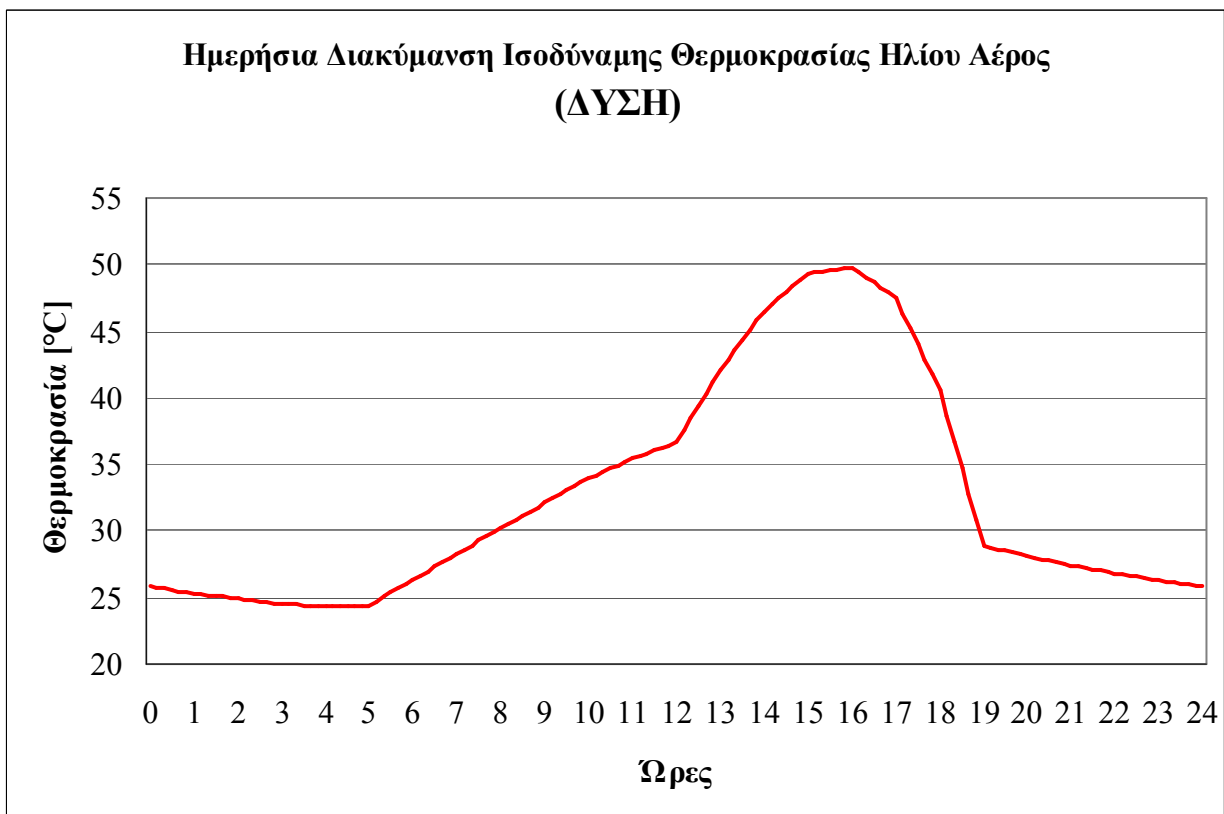
Γράφημα 4.2 Ημερήσια διακύμανση ισοδύναμης θερμοκρασίας ηλίου αέρος κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου για βόρια προσανατολισμένο τοίχο<sup>36</sup>



Γράφημα 4.3 Ημερήσια διακύμανση ισοδύναμης θερμοκρασίας ηλίου αέρος κατά την 21η Ιουλίου για ανατολικά προσανατολισμένο τοίχο<sup>36</sup>



Γράφημα 4.4 Ημερήσια διακύμανση ισοδύναμης θερμοκρασίας ηλίου αέρος κατά την 21η Ιουλίου για νότια προσανατολισμένο τοίχο<sup>36</sup>



Γράφημα 4.5 Ημερήσια διακύμανση ισοδύναμης θερμοκρασίας ηλίου αέρος κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου για δυτικά προσανατολισμένο τοίχο<sup>36</sup>

Η ροή θερμότητας μέσω του κάθε τοίχου από και προς τον εσωτερικό χώρο είναι:

$$\dot{q}_{i,wall-in} = h_{in,wall} (T_{N,i} - T_{in}) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (4.3.3.2-2)$$

με  $h_{in,wall}=7.8 \text{ W/m}^2\text{K}$  και

$T_{N,i}$  η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του κάθε τοίχου (κόμβος N)

Βρίσκεται λοιπόν, τη θερμότητα που αποδίδει ο κάθε τοίχος στο εσωτερικό του κτιρίου:

$$Q_{i,wall-in} = \dot{q}_{i,wall-in} A_{i,wall} \text{ [W]} \quad (4.3.3.2-3)$$

όπου  $A_{i,wall}$  είναι το εμβαδόν της επιφάνειας κάθε τοίχου ανάλογα με τον προσανατολισμό του:

$$A_{N,wall}=A_{S,wall}=32 \text{ m}^2 \text{ και } A_{W,wall}=A_{E,wall}=26 \text{ m}^2$$

$$\text{Επομένως: } Q_{walls} = Q_{N,wall} + Q_{E,wall} + Q_{S,wall} + Q_{W,wall} \text{ [W]} \quad (4.3.3.2-4)$$

## II. Ροή θερμότητας μέσω υαλοπινάκων

Το συνολικό θερμικό κέρδος μέσω υαλοπινάκων είναι το άθροισμα του θερμικού κέρδους υαλοπίνακα δια αγωγής και του ηλιακού θερμικού κέρδους. Έτσι, η ροή θερμότητας μέσω υαλοπίνακα στο εσωτερικό του κτιρίου είναι:

$$\dot{q}_{i,glass} = U(T_{out} - T_{in}) + (SC)SHGF \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (4.3.3.2-5)$$

όπου:

- SHGF (Solar Heat Gain Factor) είναι ο παράγοντας ηλιακού θερμικού κέρδους  $[\text{W/m}^2]$  για τον προσανατολισμό του υαλοπίνακα. Οι τιμές της ημερήσιας διακύμανσης του SHGF προκύπτουν από πίνακες<sup>36</sup> για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου και το βόρειο γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας.
- SC (Shading Coefficient) είναι ο λόγος του ηλιακού θερμικού κέρδους μέσω ενός δεδομένου υαλοπίνακα υπό δεδομένες συνθήκες, προς το ηλιακό θερμικό κέρδος μέσω υαλοπίνακα αναφοράς, DSA, υπό τις ίδιες συνθήκες. Ο υαλοπίνακας αναφοράς της ASHRAE, DSA, έχει οπτική διαπερατότητα, αντανakλαστικότητα και απορροφητικότητα κάθετου πρόσπτωσης 0.86, 0.08 και 0.06 αντιστοίχως. Οι υαλοπίνακες είναι διπλοί με αδιαφανή ρολά σκίασης και από πίνακες<sup>36</sup> δίνεται  $SC=0.25$ .
- Από πίνακες<sup>36</sup> δίνεται επίσης η ολική θερμική διαπερατότητα  $U=3.3 \text{ W/m}^2\text{C}$  για εξωτερικούς κατακόρυφους διπλούς υαλοπίνακες με διάκενο 5 mm.

Έτσι, η θερμότητα που αποδίδει ο κάθε υαλοπίνακας στο εσωτερικό του κτιρίου είναι:

$$Q_{i,glass} = \dot{q}_{i,glass} A_{i,glass} \text{ [W]} \quad (4.3.3.5-6)$$

όπου,  $A_{glass}=2\text{m}\times2\text{m}$ , το εμβαδόν της επιφάνειας υαλοπινάκων ανάλογα με τον προσανατολισμό τους:

$$A_{S,glass}=A_{N,glass}=A_{W,glass}=A_{E,glass}=4 \text{ m}^2$$

$$\text{Έτσι, προκύπτει: } Q_{glass} = Q_{N,glass} + Q_{E,glass} + Q_{S,glass} + Q_{W,glass} \text{ [W]} \quad (4.3.3.6-7)$$

### III. Διείσδυση αέρος

Διείσδυση αέρος είναι η είσοδος του εξωτερικού αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου μέσα από τα διάκενα ή τα διάφορα ανοίγματα. Για υπολογισμούς υπό συνήθεις συνθήκες και θεωρώντας την υγρασία του αέρα περιβάλλοντος ίση με την υγρασία του εσωτερικού αέρα, το ολικό ψυκτικό φορτίο λόγω ανανέωσης και διείσδυσης αέρα βρίσκεται από τη προσεγγιστική σχέση:

$$\dot{q}_{air} = 1.23 Q_{air} (T_{out} - T_{in}) \text{ [W]} \quad (4.3.3.2-8)$$

όπου  $Q_{air}$  η απαιτούμενη ποσότητα ανανέωσης του εσωτερικού αέρα με εξωτερικό και ισούται με:

$$Q_{air} = \frac{1000}{3600} V_b \cdot ACH \text{ [l/s]} \quad (4.3.3.2-9)$$

όπου:

$V_b = L \cdot W \cdot H = 360 \text{ m}^3$ : ο όγκος του κτιρίου,

$ACH = 1 \text{ h}^{-1}$ : η ωριαία ανανέωση αέρα.

### IV. Ροή θερμότητας μέσω εσωτερικών τοίχων

Στην περίπτωση αυτή, προκύπτει η ροή θερμότητας εργαζόμενοι ομοίως με την περίπτωση των εξωτερικών τοίχων θεωρώντας  $T_{out} = T_{in}$  και  $h_{out} = h_{int} = 7.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Έτσι, η θερμότητα που αποδίδεται μέσω εσωτερικών τοίχων είναι:

$$Q_{int,wall} = \dot{q}_{int,wall} HL_w \text{ [W]} \quad (4.3.3.2-10)$$

όπου  $L_w = 50 \text{ m}$  το συνολικό μήκος των εσωτερικών τοίχων

Συνεπώς, το συνολικό θερμικό κέρδος από τους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους, τους υαλοπίνακες, τη διείσδυση αέρα και την οροφή (βλέπε 4.3.3.2β) είναι:

$$Q_{tot} = Q_{walls} + Q_{glass} + Q_{air} + Q_{int,walls} + Q_{roof} \text{ [W]} \quad (4.3.3.2-11)$$

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα είναι:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{Q_{tot}}{C_{tot}} \quad (4.3.3.2-12)$$

όπου:

$C_{tot} = (\rho c_p)_{air} V_{b-in} \text{ [J/K]}$  είναι η ισοδύναμη θερμοχωρητικότητα του εσωτερικού χώρου

και  $V_{b-in} = V_b - (L_w \cdot H \cdot T_w) \text{ [m}^3\text{]}$  ο όγκος του εσωτερικού χώρου του κτιρίου με  $T_w = 0.1 \text{ m}$  το πάχος των τοίχων.

Επομένως, η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου  $T_{in}$  [K] υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_{in} = \frac{Q_{tot}}{C_{tot}} \Delta t + T_{in}^0 \text{ [K]} \quad (4.3.3.2-13)$$

#### 4.3.3.2β Μετάδοση θερμότητας από την οροφή στο εσωτερικό

Η ροή θερμότητας από την εσωτερική επιφάνεια της οροφής στον εσωτερικό του κτιρίου είναι:

$$\dot{q}_{r-in} = h_{in} (T_N - T_{in}) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (4.3.3.2-14)$$

με  $h_{in}=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,

και το θερμικό φορτίο που αποδίδεται από την οροφή στον εσωτερικό χώρο:

$$Q_{roof} = \dot{q}_{r-in} A_{roof} \text{ [W]} \quad (4.3.3.2-15)$$

όπου  $A_{roof}=L \cdot W=120 \text{ m}^2$  είναι το εμβαδόν της εσωτερικής επιφάνειας της οροφής.

#### 4.4 Τελική διαμόρφωση συστήματος

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, αναλύονται στη συνέχεια οι εξισώσεις που θα αποτελέσουν το τελικό σύστημα, από το οποίο προκύπτουν οι θερμοκρασίες στους  $N$  κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος.

##### A. Στην περίπτωση της φυτεμένης οροφής

- **Εσωτερικοί κόμβοι**

Για  $i=2, \dots, (N-1)$ , η εξίσωση είναι:

$$A_i T_i = \frac{A_{i-1}}{2} (T_{i-1} + T_{i-1}^0) + \frac{A_{i+1}}{2} (T_{i+1} + T_{i+1}^0) + T_i^0 \left( A_i^0 - \frac{A_{i-1}}{2} - \frac{A_{i+1}}{2} \right) \quad (4.4-1)$$

όπου:

$$A_{i-1} = \frac{k_{i-1}}{\delta x}$$

$$A_{i+1} = \frac{k_{i+1}}{\delta x}$$

$$A_i^0 = \frac{(\rho c)_i \Delta x}{\Delta t}$$

$$A_i = A_i^0 + \frac{A_{i-1}}{2} + \frac{A_{i+1}}{2}$$

- **Εξωτερικό όριο**

Για  $i=1$  η εξίσωση είναι:

$$A_1 T_1 = \frac{A_2}{2} (T_2 + T_2^0) + \frac{h_{out}}{2} (T_{out} + T_{out}^0) + T_1^0 \left( A_1^0 - \frac{A_2}{2} - \frac{h_{out}}{2} \right) \quad (4.4-2)$$

όπου:

$$A_2 = \frac{k_2}{\delta x}$$

$$A_1^0 = \frac{(\rho c)_1 \Delta x}{2 \Delta t}$$

$$A_1 = A_1^0 + \frac{A_2}{2} + \frac{h_{out}}{2}$$

$$h_{out}=1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$T_{out}=T_{e,ca}$ , όπου από την εξίσωση (4.3.3.1-14) έχω:

$$T_{e,ca} = T_{ca} + \frac{1}{h_{veg}} \left[ (1 - \rho_g) I_g - \frac{\sigma_f \varepsilon_{gr} \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) \right]$$

Η  $T_{e,ca}$  δίνεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα εντός του θόλου  $T_{ca}$ , η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τη θερμοκρασία στο φύλλωμα  $T_f$ . Έτσι, οι διαφορικές εξισώσεις εισάγονται στο σύστημα ως εξής:

$$T_f = T_f^0 + \frac{\Delta t}{(\rho c)_f dLAI} \left[ \begin{aligned} & \left[ (1 - \tau_s - (1 - \tau_s) \rho_\infty) (1 + \tau_s \rho_g) I_s + (1 - \tau_l) (\sigma T_{sky}^4 + \sigma T_g^{04} - 2\sigma T_f^{04}) \right] \\ & - 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{r_e} (T_f^0 - T_{ca}^0) - 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{\gamma(r_e + r_i)} (e_{fs} - e_{ca}) \end{aligned} \right] \quad (4.4-3)$$

$$T_{ca} = T_{ca}^0 + \frac{\Delta t}{(\rho c)_{ca} L} \left[ 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{r_e} (T_f^0 - T_{ca}^0) + h_{veg} (T_g^0 - T_{ca}^0) + h_{ca\infty} (T_{ca}^0 - T_0) \right] \quad (4.4-4)$$

Τέλος, ο ενεργειακός ισολογισμός της ειδικής υγρασίας του αέρα του θόλου δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_{ca} = \theta_{ca}^0 + \frac{\Delta t}{(\rho c)_{ca} L} \left[ 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{\gamma \Lambda (r_e + r_i)} (e_{fs} - e_{ca}) + \frac{h_{veg}}{\gamma \Lambda} (e_{gr} - e_{ca}) + \frac{h_{ca\infty}}{\gamma \Lambda} (e_{ca} - e_0) \right] \quad (4.4-5)$$

- **Εσωτερικό όριο**

Για  $i=N$ , η εξίσωση είναι:

$$A_N T_N = \frac{A_{N-1}}{2} (T_{N-1} + T_{N-1}^0) + \frac{h_{in}}{2} (T_{in} + T_{in}^0) + T_N^0 (A_N^0 - \frac{A_{N-1}}{2} - \frac{h_{in}}{2}) \quad (4.4-6)$$

όπου:

$$A_{N-1} = \frac{k_{N-1}}{\delta x}$$

$$A_N^0 = \frac{(\rho c)_N \Delta x}{2 \Delta t}$$

$$A_N = A_N^0 + \frac{A_{N-1}}{2} + \frac{h_{in}}{2}$$

$$h_{in}=10 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$T_{in} = T_{in}$$



Στο σύστημα εισάγονται άλλα 2 υποσυστήματα N εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση των εξωτερικών και εσωτερικών τοίχων, σύμφωνα με τα δεδομένα που δόθηκαν στην ενότητα 4.3.3.2α. Προκύπτει έτσι, σύστημα με  $(N_{\text{roof}}+4N_{\text{ex.walls}}+N_{\text{int.walls}}+2)$  εξισώσεις με ισάριθμους +1 αγνώστους.

Για την επίλυση του συστήματος θα πρέπει να εισαχθούν αρχικές υποθετικές τιμές των αγνώστων (πίνακας 4.4) για τη χρονική στιγμή  $t=t_0$  (ώρα 00:00).

Παράμετρος	Αρχική τιμή
Θερμοκρασία αέρα στο θόλο	$T_{ca} = 298.2 \text{ K}$
Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα	$T_{in} = 293.9 \text{ K}$
Ειδική υγρασία του αέρα στο θόλο	$\theta_{ca} = 0.0165 \text{ kg υδρ/ kg αέρα}$

Πίνακας 4.4 Αρχικές τιμές παραμέτρων για  $t=t_0$

Για να ορίσω τις αρχικές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος θεωρώ τη μόνιμη κατάσταση, κατά την οποία δεν αποθηκεύεται θερμότητα στο εσωτερικό του χώρου και στο φύλλωμα, άρα  $Q_{\text{συναγωγής}} = Q_{\text{αγωγής}}$ . Από την επίλυση για  $T_{in}^0$  και  $T_{ca}^0$  προκύπτουν οι τιμές της θερμοκρασίας στους εσωτερικούς κόμβους της οροφής.

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει το μόνιμο πρόβλημα είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (4.4-7)$$

Έτσι, οι εξισώσεις στους κόμβους είναι:

$$A_i T_i = A_{i-1} T_{i-1} + A_{i+1} T_{i+1} \quad (4.4-8)$$

$$A_1 T_1 = A_2 T_2 + h_{out} T_{out} \quad (4.4-9)$$

$$A_N T_N = A_{N-1} T_{N-1} + h_{in} T_{in} \quad (4.4-10)$$

όπου:

$$A_i = A_{i-1} + A_{i+1}$$

$$A_1 = A_2 + h_{out}$$

$$A_N = A_{N-1} + h_{in}$$

Για  $t=t_0+\Delta t$ , επιλύεται το σύστημα πεπερασμένων διαφορών (4.4-1), (4.4-2) και (4.4-6), έχοντας υπολογίσει τα διάφορα φορτία για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και χρησιμοποιώντας τις οριακές συνθήκες για την εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια της οροφής που προσδιορίζονται από τις σχέσεις (4.4-3), (4.4-4), (4.4-5) και την (4.3.3.2-13).

Έτσι, με την ολοκλήρωση των υπολογισμών για κάθε χρονική στιγμή του 24ωρου, τίθενται οι θερμοκρασίες της χρονικής στιγμής  $t=t_{ολ}$  (ώρα 24:00) στις αντίστοιχες της  $t=t_0$  (ώρα 00:00) και επαναλαμβάνεται η διαδικασία υπολογισμών με νέες τιμές εκκίνησης. Η επανάληψη γίνεται μέχρι συγκλίσεως των θερμοκρασιών για  $t=t_{ολ}$  και για  $t=t_0$ .

#### B. Στην περίπτωση της συμβατικής οροφής

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια με προηγουμένως, με τις εξής διαφορές:

$$h_{out}=16.3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$T_{out}=T_e, \text{ όπου από την εξίσωση (4.3.3.1-13), ισχύει: } T_e = T_0 + \frac{a}{h_{roof}} I_t - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_{roof}}$$

## 4.5 Επίλυση

Για την επίλυση του συστήματος, μετατρέπονται τις εξισώσεις της προηγούμενης παραγράφου στη μορφή:

$$a_{j,i} T_i = a_{j,i+1} T_{i+1} + a_{j,i-1} T_{i-1} + b_{j,i} \quad (4.5-1)$$

όπου:

a: ο συντελεστής θερμοκρασιών

b: ανεξάρτητη τιμή

i ο κόμβος

j: ο κόμβος στον οποίο γίνεται ο ισολογισμός

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (4.5-1) σε κάθε κόμβο  $i=1,\dots,N$  προκύπτει ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων και για την επίλυσή του καταστρώνονται οι πίνακες που ακολουθούν.

Ο  $N \times N$  πίνακας  $[a]$  με γνωστές τις τιμές  $a_{j,i}$  είναι τριδιαγώνιας μορφής, δηλαδή οι μη μηδενικοί συντελεστές του κείνται επί τριών διαδοχικών διαγωνίων.

$$[a] = \begin{bmatrix} -a_{1,1} & a_{1,2} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ a_{2,1} & -a_{2,2} & a_{2,3} & 0 & \dots & \vdots \\ 0 & a_{3,2} & -a_{3,3} & a_{3,4} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & a_{N-1,N} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & a_{N,N-1} & -a_{N,N} \end{bmatrix}$$

$N \times 1$  Πίνακας  $[T]$  με τις άγνωστες θερμοκρασίες στους κόμβους  $T_i$ :

$$[T] = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ T_{N-1} \\ T_N \end{bmatrix}$$

$N \times 1$  Πίνακας  $[b]$  με τους γνωστούς όρους  $b_{j,i}$ :

$$[b] = \begin{bmatrix} -b_1 \\ -b_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ -b_{N-1} \\ -b_N \end{bmatrix}$$

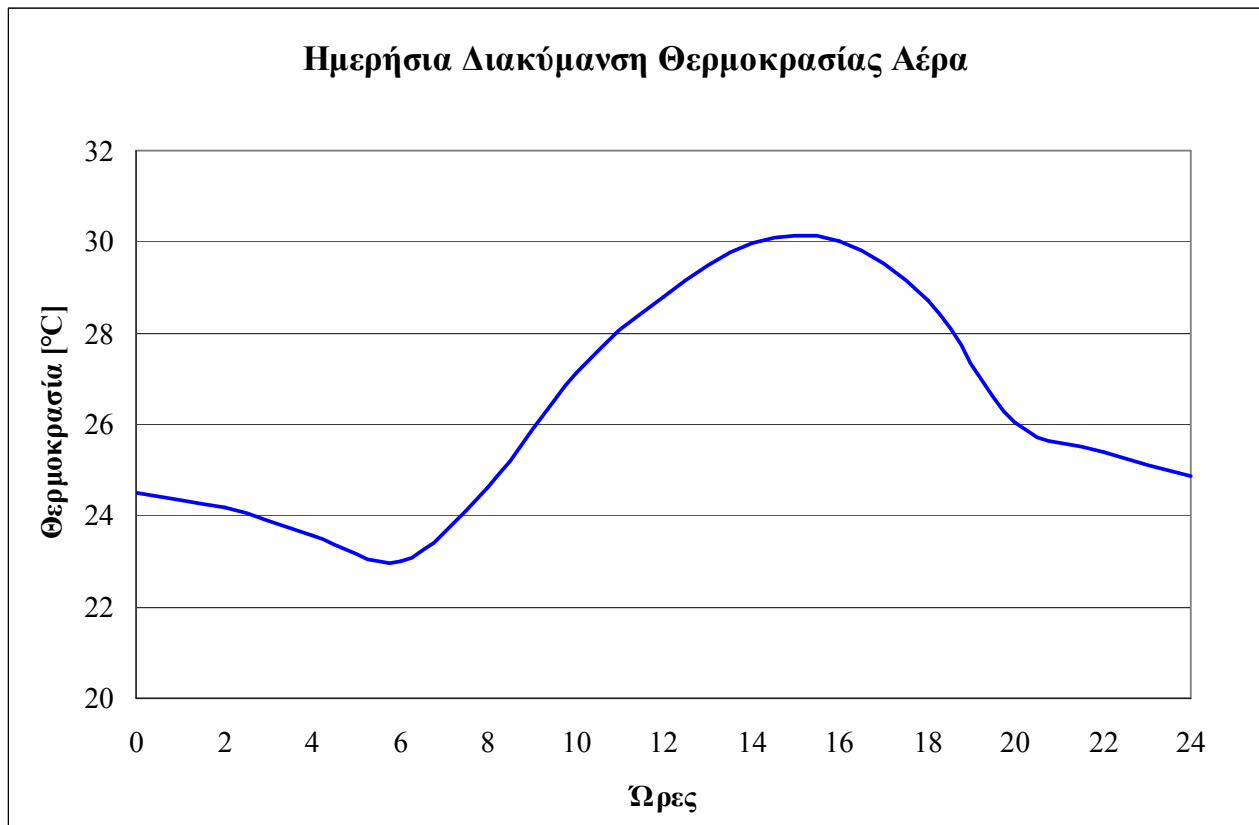
δηλαδή είναι πίνακας:  $[T] = [a]^{-1}[b]$ .

Έτσι, υπολογίζονται οι θερμοκρασίες στους κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος για κάθε χρονική στιγμή του 24ωρου.

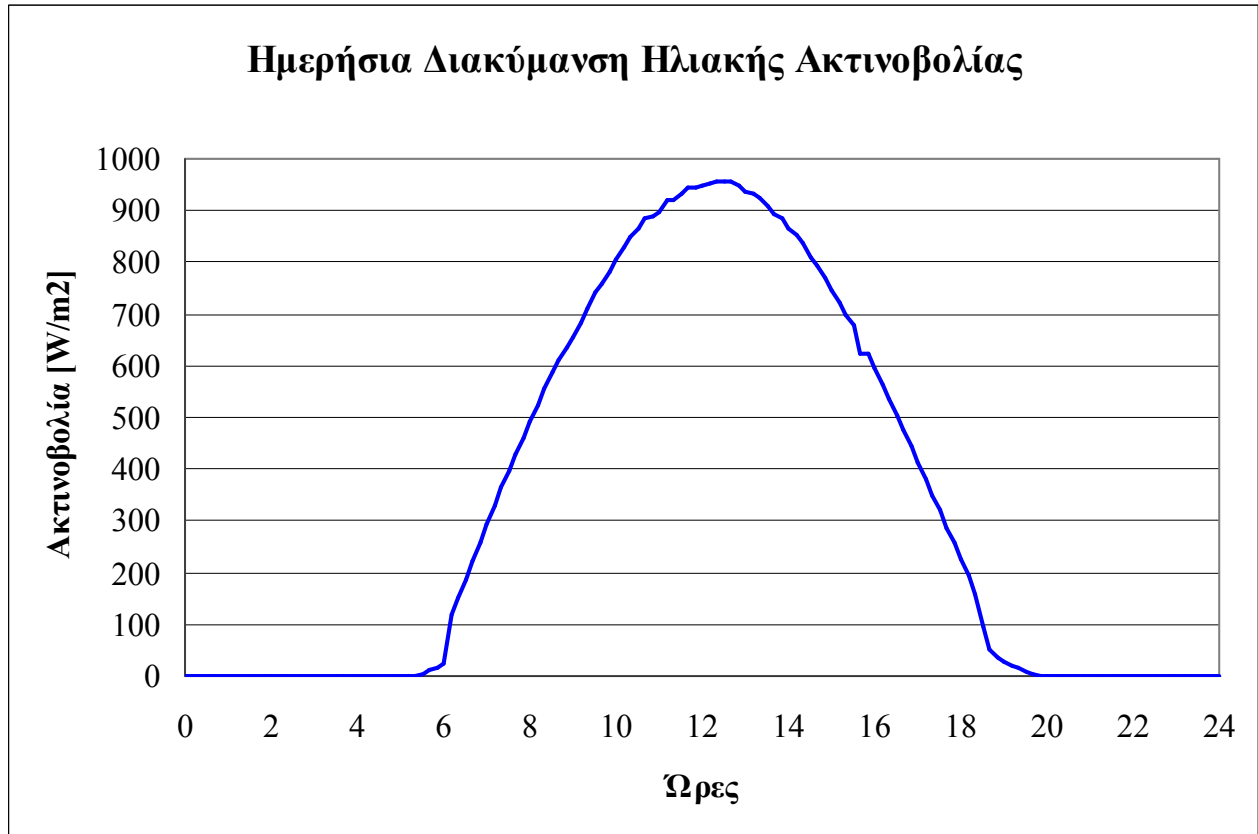
#### 4.6 Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Επιλύοντας το σύστημα προσομοιώνεται σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό η θερμική συμπεριφορά κτιρίου με φυτεμένη οροφή. Έτσι, στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή φυτεμένης οροφής, αλλά και τα πιθανά μειονεκτήματα.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα διαγράμματα 4.6 και 4.7 της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος και της ημερήσιας διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε να συγκριθούν στη συνέχεια οι τιμές αυτές με τις αντίστοιχες για την περίπτωση της φυτεμένης οροφής.



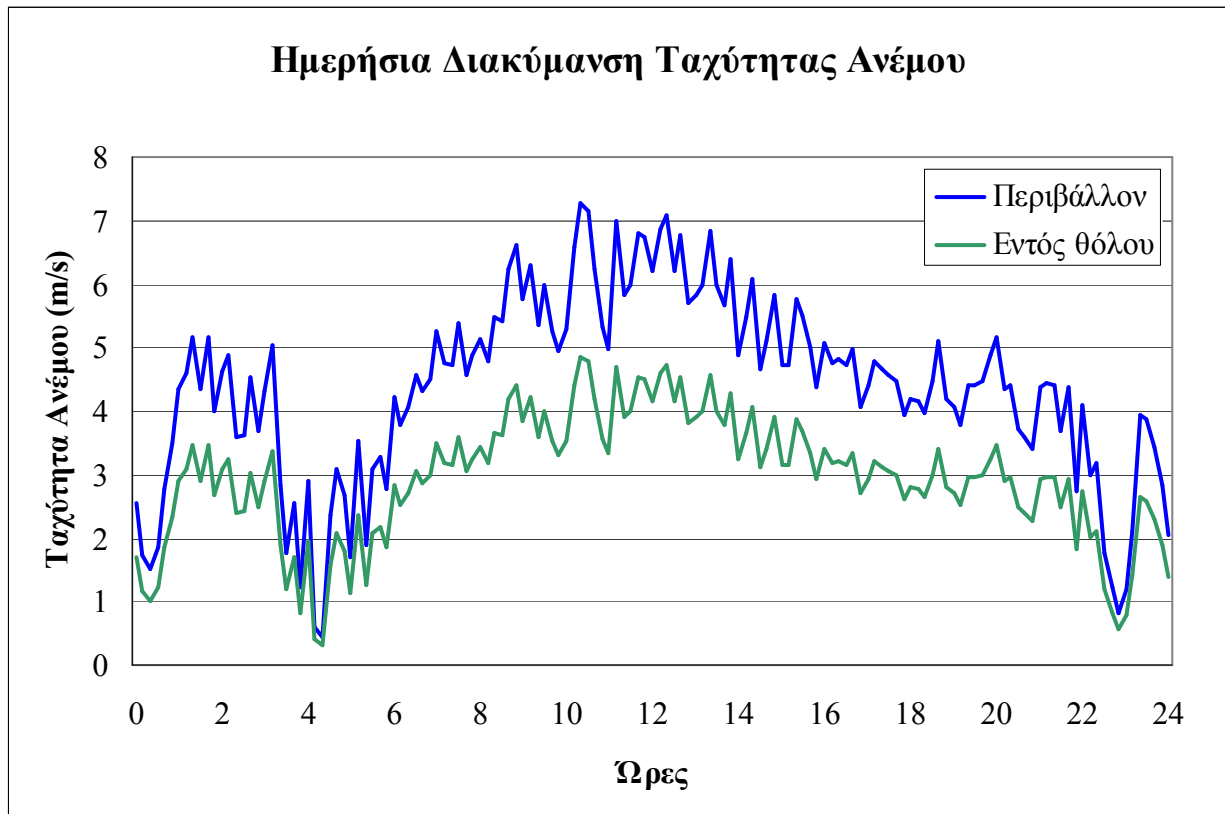
Γράφημα 4.6 Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας περιβάλλοντος για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου<sup>49</sup>



Γράφημα 4.7 Ημερήσια διακύμανση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου<sup>49</sup>

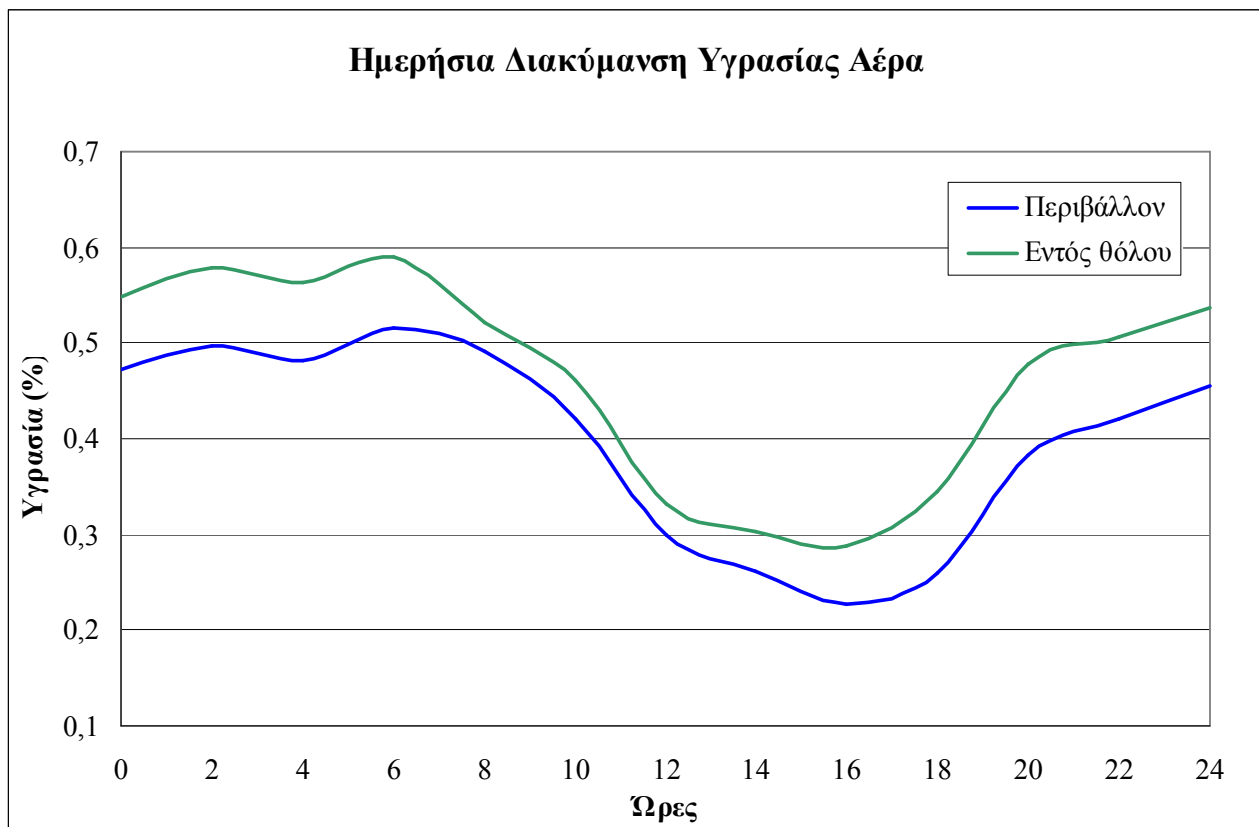
Τα δεδομένα θερμοκρασίας, ακτινοβολίας, υγρασίας και ταχύτητας ανέμου προκύπτουν από τις μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού που είναι εγκατεστημένος στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου 2004, ενώ όπου υπάρχει απαίτηση για μικρότερο χρονικό βήμα, οι ενδιάμεσες τιμές υπολογίστηκαν με γραμμική παρεμβολή. Οι σχέσεις από τις οποίες προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα βρίσκονται αναλυτικά στις προηγούμενες ενότητες.

Στο γράφημα 4.8 παρουσιάζεται η διαφοροποίηση της ημερήσιας διακύμανσης ταχύτητας ανέμου εντός και εκτός του θόλου. Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του ανέμου μέσα στο θόλο ελαττώνεται αρκετά, ιδιαίτερα όσο οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου περιβάλλοντος αυξάνονται. Έτσι, η φυτεμένη οροφή είναι πιο ανθεκτική στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κατά τους θερινούς μήνες. Η ανεμοπροστασία των κτιρίων εξασφαλίζεται με δέντρα και θάμνους, που θεωρούνται πορώδη εμπόδια, γιατί επιτρέπουν τη διέλευση ενός μέρους του ανέμου, περιορίζοντας έτσι τους στροβιλισμούς και δημιουργώντας μία ευρύτερη ζώνη προστασίας στα κατόντη.



Γράφημα 4.8 Ημερήσια διακύμανση ταχύτητας ανέμου εντός και εκτός του θόλου κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

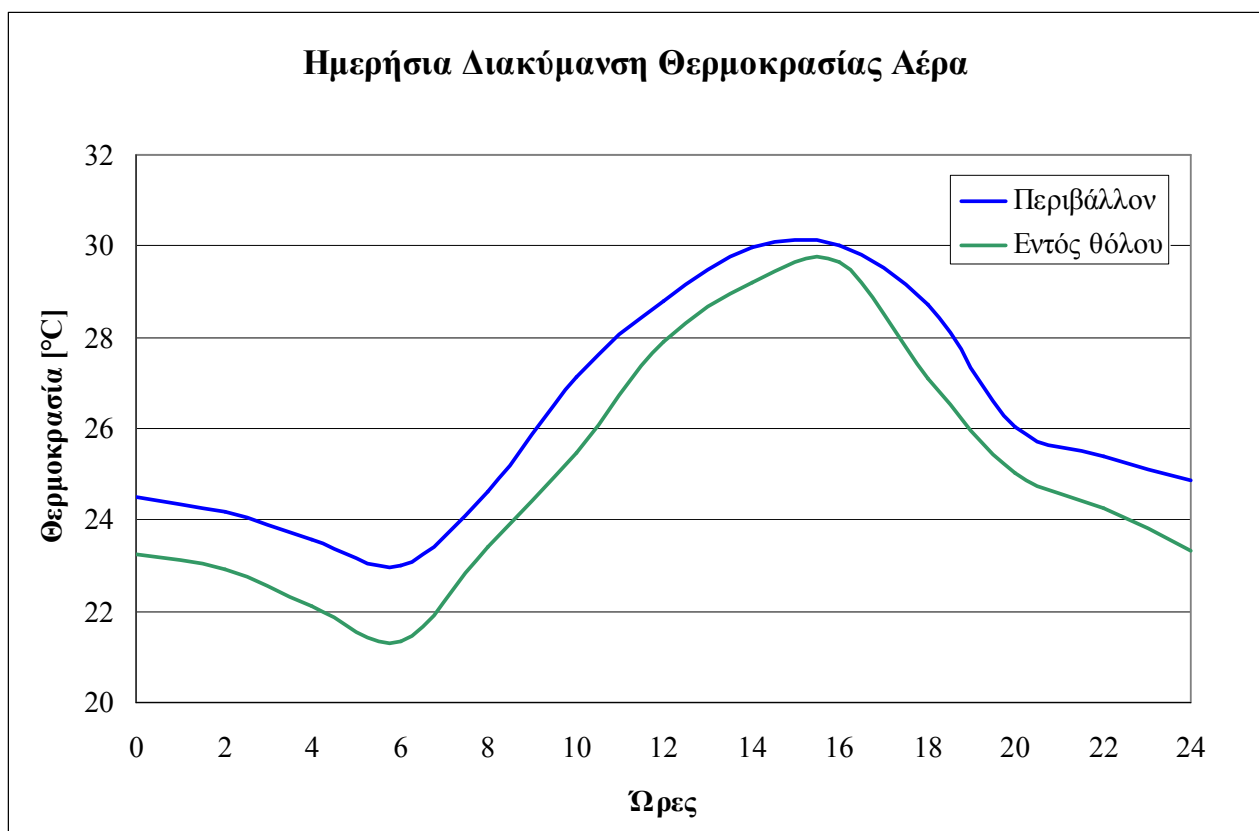
Στο γράφημα 4.9 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση της σχετικής υγρασίας του αέρα περιβάλλοντος και του αέρα εντός του θόλου της φυτεμένης οροφής. Η σχετική υγρασία του αέρα εντός του θόλου παίρνει μεγαλύτερες τιμές, δηλαδή ο αέρος εντός του θόλου είναι αρκετά πιο υγρός από τον αέρα περιβάλλοντος, γεγονός που οφείλεται στην υγρασία που προσδίδουν τα φυτά από τα στόματα των φύλλων μέσω της διαπνοής. Η εξάτμιση των υδρατμών (εξατμισοδιαπνοή) αποτελεί ένα φαινόμενο εξατμιστικής ψύξης και συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα εντός του θόλου ακόμα και κατά τις θερμές και ξηρές μεσημβρινές ώρες. Εντούτοις, οι υψηλές τιμές της υγρασίας μπορεί να αποτελέσουν επιπλέον επιβάρυνση για την οροφή.



Γράφημα 4.9 Ημερήσια διακύμανση της σχετικής υγρασίας του αέρα περιβάλλοντος και του αέρα εντός του θόλου κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

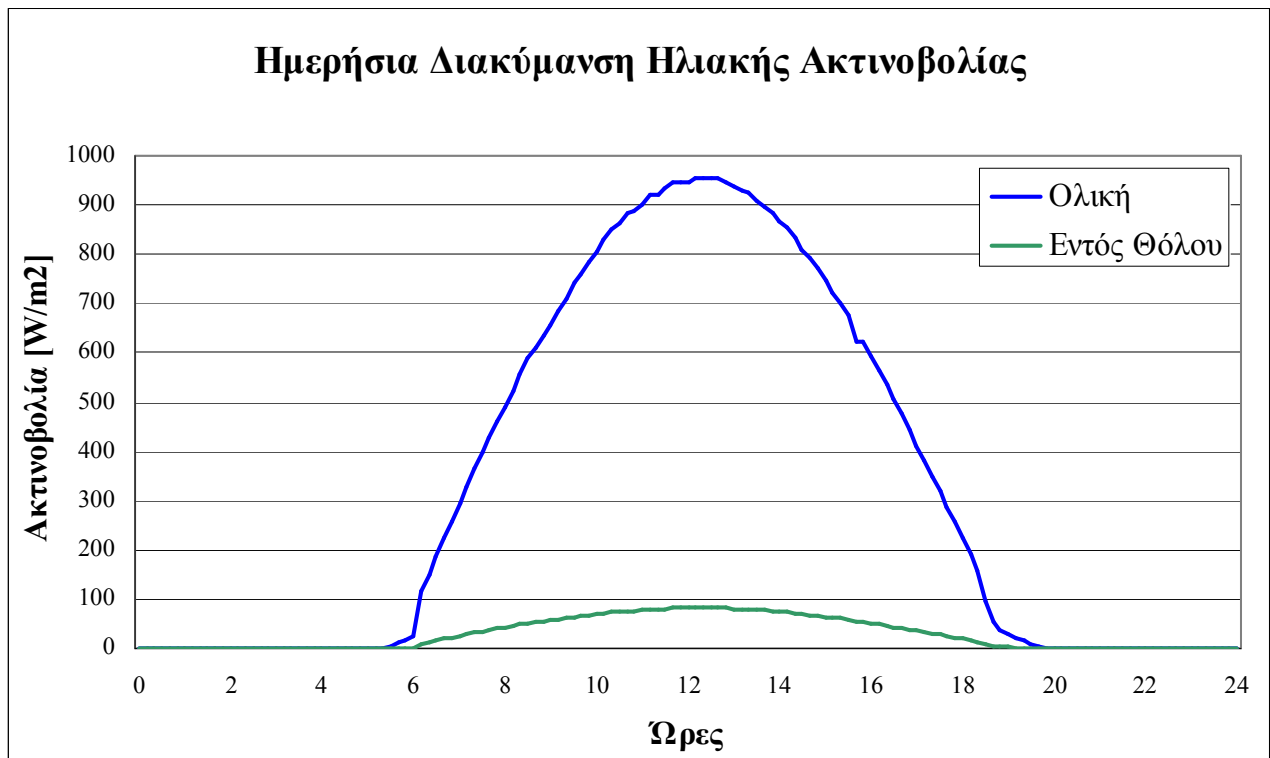


Στο γράφημα 4.10 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα εντός του θόλου σε σύγκριση με την αντίστοιχη του αέρα περιβάλλοντος. Όπως φαίνεται στο γράφημα, η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο θόλο είναι μικρότερη της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος και συνεπώς, στην περίπτωση του φυτεμένου δώματος η οροφή συναλλάσσει θερμότητα με στρώμα αέρα μικρότερης θερμοκρασίας, δηλαδή πιο δροσερό, καθόλη τη διάρκεια του 24ωρου. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Αξίζει να σημειωθεί ότι έγινε παραδοχή μηδενικής υγρασίας στο μέσο ανάπτυξης, δηλαδή «ξηρού» φυτεμένου δώματος, στην πράξη όμως το μέσο ανάπτυξης είναι υγρό, εντείνοντας έτσι την εξατμιστική ψύξη και συμβάλλοντας σε μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας.



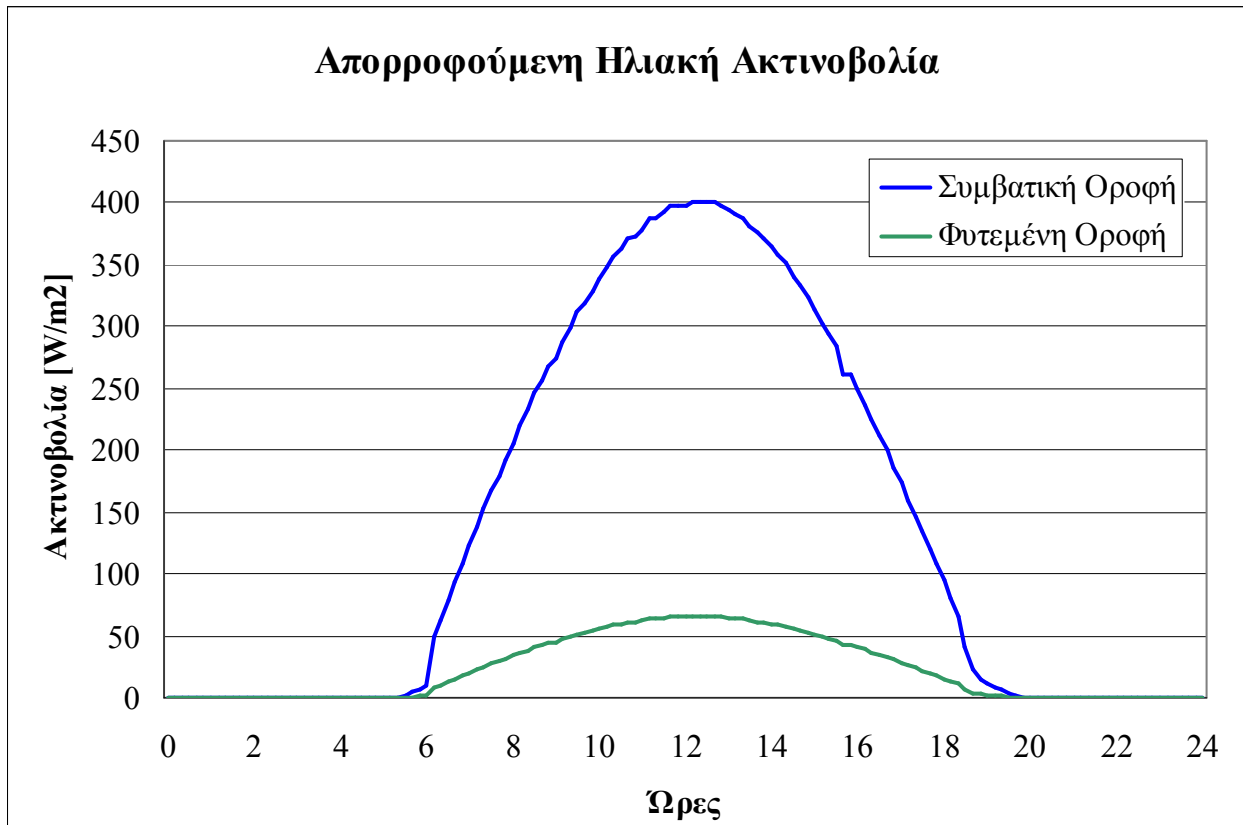
Γράφημα 4.10 Ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος και του αέρα εντός του θόλου κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

Στο γράφημα 4.11 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε συμβατική οροφή με την αντίστοιχη εντός του θόλου. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της φυτεμένης οροφής, η ηλιακή ακτινοβολία που διαπερνά το φύλλωμα και προσπίπτει στην οροφή είναι κατά πολύ μικρότερη από την ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια συμβατική οροφή, ακόμα και κατά τις μεσημβρινές ώρες που κυριαρχεί έντονη ηλιοφάνεια. Η μείωση αυτή στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην οροφή, στην περίπτωση που είναι φυτεμένη, οφείλεται στα φυτά, τα οποία μέσω του φυλλώματος την προστατεύουν παρέχοντας σκίαση.



Γράφημα 4.11 Ημερήσια διακύμανση ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και της ακτινοβολίας εντός του θόλου

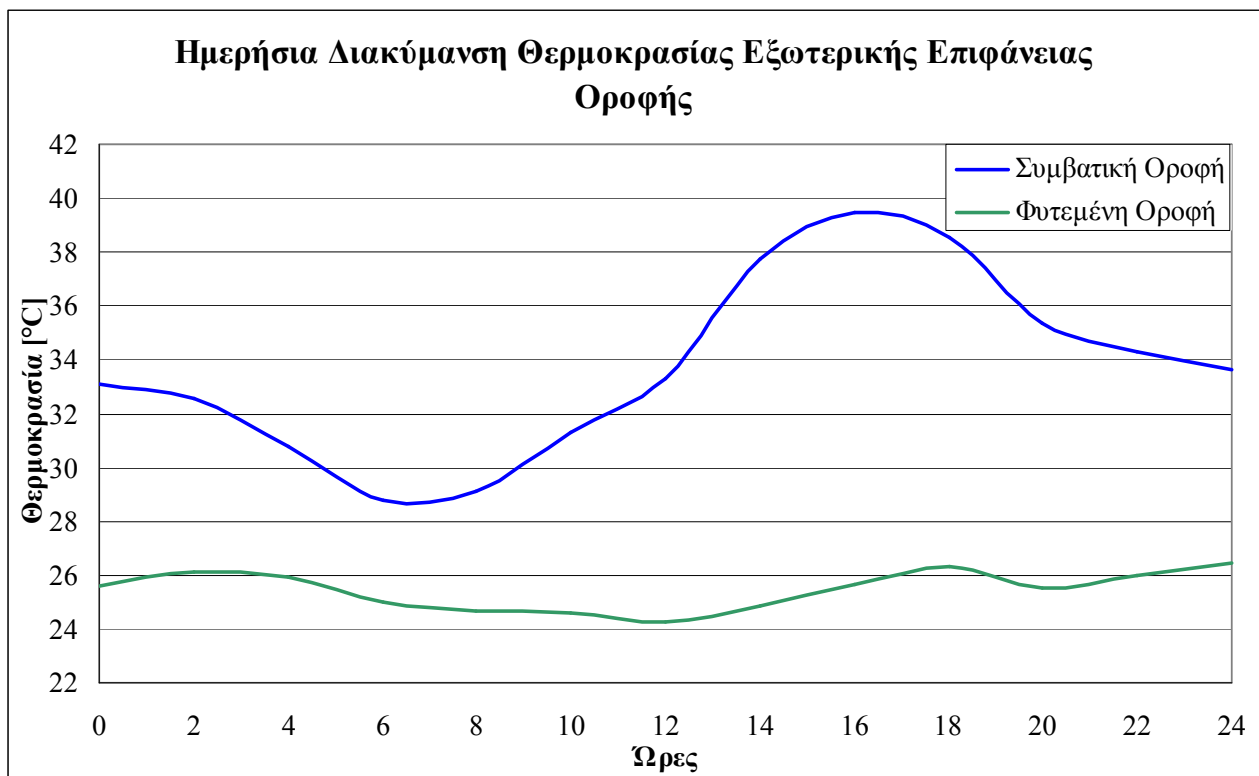
Επιπλέον, στο γράφημα 4.12 παρουσιάζεται η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από μια συμβατική οροφή σε σύγκριση με την αντίστοιχη που απορροφάται από μια φυτεμένη οροφή. Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται είναι και πάλι κατά πολύ μικρότερη στην περίπτωση της φυτεμένης οροφής. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε πολύ μεγάλο βαθμό τις μεσημβρινές ώρες, όπου η θερμοκρασία είναι υψηλή και η ηλιακή ακτινοβολία έντονη, και αποτελεί ένα επιπλέον πλεονέκτημα της φυτεμένης οροφής.



Γράφημα 4.12 Ημερήσια διακύμανση της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από φυτεμένη και συμβατική οροφή

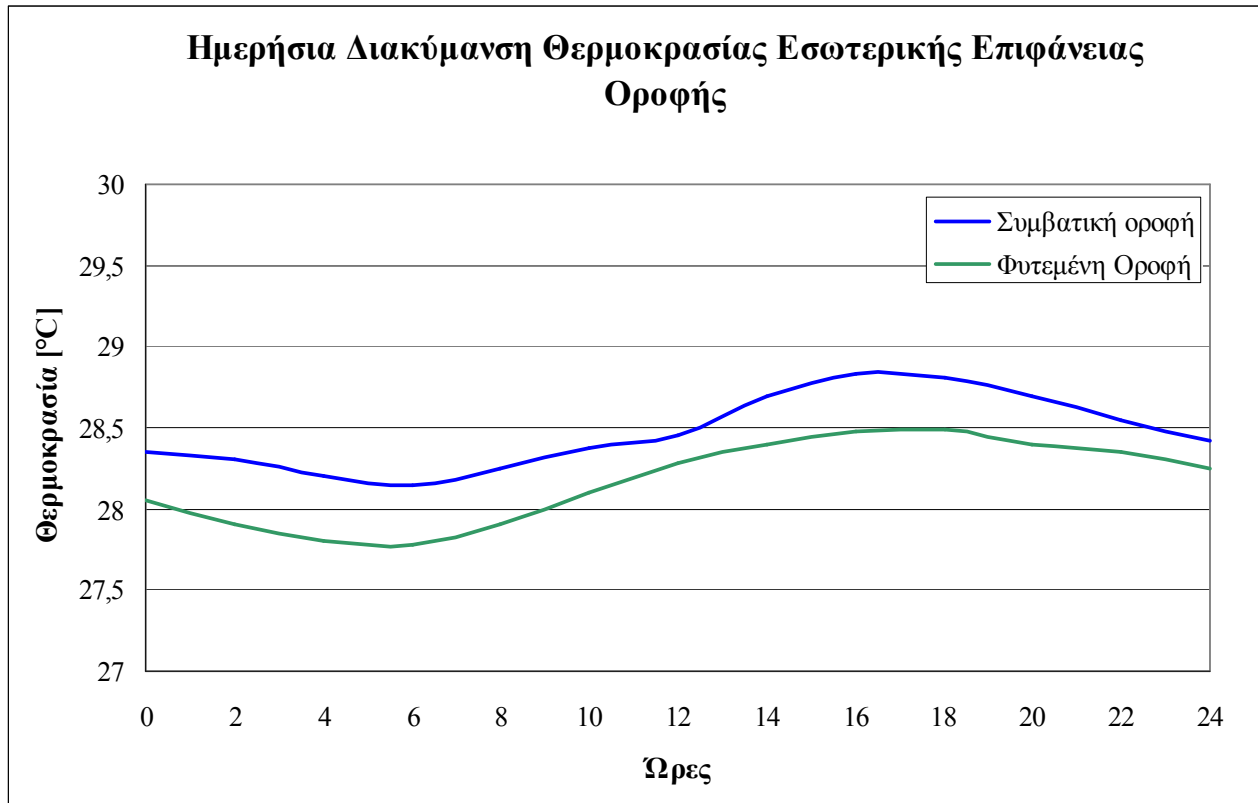
Αξίζει να αναφερθεί, ότι στις παραδοχές μας έχουμε θεωρήσει φυτεμένη οροφή εκτατικού τύπου με μέση φυτοκάλυψη ( $LAI=4$ ). Το όφελος θα ήταν ακόμα μεγαλύτερο στην περίπτωση που είχαμε φυτεμένη οροφή εντατικού τύπου, με πυκνότερη βλάστηση και μεγαλύτερη φυτοκάλυψη.

Στο γράφημα 4.13 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής (δηλαδή στην ανώτερη επιφάνεια δομικού στοιχείου) για την περίπτωση συμβατικής και φυτεμένης οροφής. Παρατηρούμε αφενός, ότι στην περίπτωση της φυτεμένης οροφής η θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής είναι αρκετά μικρότερη καθόλη τη διάρκεια του 24ωρου και αφετέρου ότι η θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής έχει ομαλή διακύμανση και δεν παίρνει ακραίες τιμές, ακόμα και τις μεσημβρινές ώρες, σε αντίθεση με την περίπτωση της συμβατικής, στην οποία η θερμοκρασία αυξάνεται σημαντικά κατά τις μεσημβρινές ώρες.



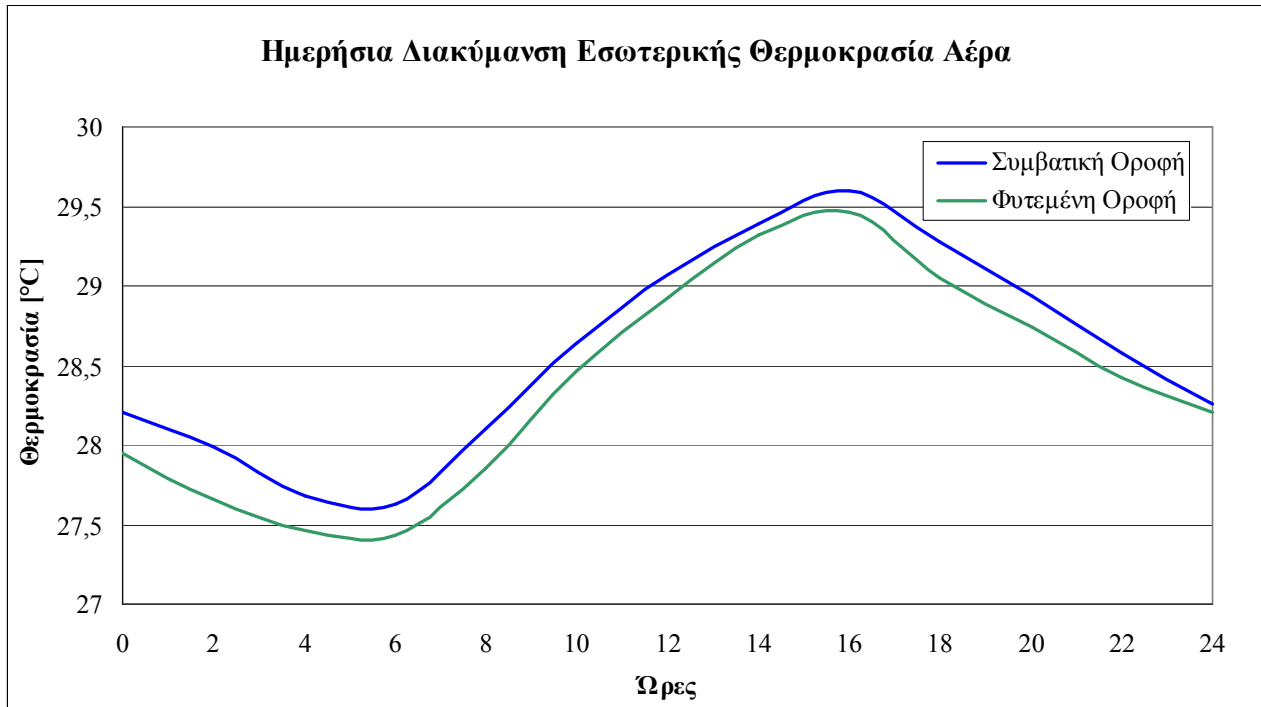
Γράφημα 4.13 Ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής για την περίπτωση συμβατικής και φυτεμένης οροφής

Ιδιαίτερα σημαντική είναι όμως και η μελέτη της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου. Στο γράφημα 4.14 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας της οροφής. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια της οροφής είναι μικρότερη καθόλη τη διάρκεια του 24ωρου (έως και κατά  $0.4^{\circ}\text{C}$ ) στην περίπτωση της φυτεμένης οροφής, γεγονός που οφείλεται στη μικρότερη θερμοκρασία που επικρατεί στην εξωτερική επιφάνεια της.



Γράφημα 4.14 Ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια της κατασκευής για την περίπτωση συμβατικής και φυτεμένης οροφής

Τέλος, στο γράφημα 4.15 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου του κτιρίου για την περίπτωση κτιρίου με συμβατική και με φυτεμένη οροφή. Σύμφωνα με τις τιμές του γραφήματος, η θερμοκρασία του αέρα στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου είναι μικρότερη καθόλη τη διάρκεια του 24ωρου στην περίπτωση που στο κτίριο έχει εγκατασταθεί φυτεμένη οροφή.



Γράφημα 4.15 Ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου

Με βάση τη μελέτη που διεξάχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία και την προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς κτιρίου με φυτεμένη οροφή εκτατικού τύπου σε σύγκριση με κτίριο συμβατικής οροφής, καταλήγουμε στην εξαγωγή ορισμένων χρήσιμων συμπερασμάτων. Τα συμπεράσματα αυτά συνοψίζονται παρακάτω:

**Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με της εφαρμογής της φυτεμένης οροφής. Ως εκ τούτου, η φυτεμένη οροφή αποτελεί ένα μέσο μείωσης του κόστους ψύξης και θέρμανσης του κτιρίου, αφού συντελεί στο φυσικό δροσισμό του το καλοκαίρι και σε προστασία έναντι των θερμικών απωλειών το χειμώνα. Η ενεργειακή εξοικονόμηση που προσφέρει είναι ιδιαίτερα αισθητή σε θερμά κλίματα, όπως το μεσογειακό, όπου η ψύξη των κτιρίων είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα.**

Επιπροσθέτως, η φυτεμένη οροφή είναι μια κατασκευή «φιλική» προς το περιβάλλον με πολλά περιβαλλοντικά οφέλη. Με τη βλάστηση περιορίζει το φαινόμενο της «Αστικής Θερμικής Νησίδας», που κυριαρχεί σε μεγαλουπόλεις όπως η Αθήνα, δημιουργεί βιότοπους στα πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα, μειώνει τα πλημμυρικά φαινόμενα και βελτιώνει την ποιότητα του αέρα και την ατμόσφαιρα των πόλεων με το οξυγόνο που παράγουν τα φυτά δεσμεύοντας το διοξείδιο του άνθρακα.

Η φυτεμένη οροφή συμβάλλει όμως και στην αναβάθμιση του κτιρίου, καθώς αυξάνει την αξία του με σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως ο δροσισμός του κτιρίου και η προστασία του από τις υψηλές θερμοκρασίες, την ηλιακή ακτινοβολία και τη φθορά της οροφής.

Συμπερασματικά, η κατασκευή φυτεμένων δωματίων είναι μια απαραίτητη τεχνική στις μέρες μας. Σήμερα, τα φυτεμένα δώματα θεωρούνται στοιχείο υψηλής ποιότητας, αισθητικής και ένας από τους λιγιστούς τρόπους επαναφοράς του χαμένου πρασίνου στις μεγαλουπόλεις, ενώ δεν είναι λίγοι οι κορυφαίοι αρχιτέκτονες της εποχής, οι οποίοι υποστηρίζουν θερμά τη δημιουργία τέτοιων κατασκευών. Με την προσπάθεια για ενεργειακή εξοικονόμηση, την ανάπτυξη του πράσινου κινήματος και των ενεργειακών κτιρίων, με την ηλιακή και βιοκλιματική αρχιτεκτονική, τον παθητικό, ηλιακό και τον ενεργειακό σχεδιασμό, την οικολογική δόμηση, τα μέτρα και τους Νόμους που θεσπίζονται και τις Κοινοτικές Οδηγίες που εφαρμόζονται και θα εφαρμόζονται ακόμα περισσότερο, τα σύγχρονα παραδείγματα κατασκευών φυτεμένων δωματίων ολοένα και πληθαίνουν. Σημαντικός είναι ο ρόλος του κράτους που πρέπει να προωθήσει την κατασκευή τους, αλλά και των πολιτών, που πρέπει να συνειδητοποιήσουν ότι η καθημερινότητα και η διαβίωση συνδέονται με το περιβάλλον και τις συνθήκες που επικρατούν, τόσο εντός όσο και εκτός των κτιρίων. Τέλος, ιδιαίτερα σημαντικός είναι και ο ρόλος των μηχανικών, που θέτουν τις σταθερές και τα πρότυπα, αλλά και προωθούν διαρκώς την αιεφόρο ανάπτυξη μέσα από το σχεδιασμό και την κατασκευή φιλικών προς το περιβάλλον τεχνικών.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

---

Στο παράρτημα παρατίθεται ο κώδικας σε Compaq Visual Fortran 6.6, ο οποίος δημιουργήθηκε για την αναλυτική επίλυση του προβλήματος και τη δημιουργία των διαγραμμάτων. Τα δεδομένα θερμοκρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας, υγρασίας και ταχύτητας ανέμου εισάγονται από τα αρχεία data1, data2, data\_monima.

### ΚΩΔΙΚΑΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

```
PROGRAM OROFH
PARAMETER(KK=1000, LL=1000 )
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
DIMENSION X(LL), A(LL), B(LL), C(LL), D(LL)
DIMENSION AK(LL), RHO(LL), CP(LL), SH(11)
DIMENSION Ta(LL), TE(LL), uca(LL), aysl(LL), aigl(LL)
DIMENSION SHGF(LL), Tw(LL), RW(11)
DIMENSION TF(LL), TCA(LL), TIN(LL), THITA(LL), TECA(LL)
DIMENSION T(KK,LL), TOUT(LL), QTOT(LL)
CHARACTER*9 FNAME1, FNAME2
C
OPEN(1, FILE='data1.txt')
OPEN(2, FILE='data2.txt')
OPEN(5, FILE='data_monima.txt')
C
1 WRITE(*,*)
1 'GIA FYTEMENH OROFH, PRESS (1) GIA APLH OROFH, PRESS (2), (0) STOP
'
READ (*,*) KOROFHS

IF (KOROFHS.EQ.0) STOP

IF (KOROFHS.EQ.1) THEN
FNAME1='RES_Q_F'
FNAME2='RES_T_F'
ENDIF

IF (KOROFHS.EQ.2) THEN
FNAME1='RES_Q_S'
FNAME2='RES_T_S'
ENDIF
```



```

C
C
      NI=1000
      NN=24*6+1
C
C EPILOGH IDIOTHTWN OROFHS
C
C
      AK1=0.87
      AK2=2.03
      AK3=0.041
      AK4=1.1
      AK5=0.190
      AK6=0.190
      AK7=0.5
      AK8=0.22
      AK9=1.16

      C1=1000.0
      C2=880.0
      C3=1000.0
      C4=840.0
      C5=1800.0
      C6=1800.0
      C7=700.0
      C8=800.0
      C9=800.0

      RHO1=1800.0
      RHO2=2300.0
      RHO3=50.0
      RHO4=1200.0
      RHO5=1100.0
      RHO6=1100.0
      RHO7=250.0
      RHO8=700.0
      RHO9=600.0

      AL1=0.015
      AL2=0.15
      AL3=0.05
      AL4=0.05
      AL5=0.007
      AL6=0.004
      AL7=0.06
      AL8=0.003
      AL9=0.12

      read(1,*)
      read(1,*)

```

```

do n=1,NN

read(1,*) hh,Ta(n),TE(n),uca(n),ais1(n),aig1(n),RW(N)
TE(N)= TE(N) +273.0
enddo

read(2,*)
do i=1,NN
  read(2,*)hh, WT, SHGF(i)
  Tw(i)= WT+273.0
enddo

  IF( KOROFHS.EQ.1 ) THEN
  AHOUT= 1.5
  AL= AL1+AL2+AL3+AL4+AL5+AL6+AL7+AL8+AL9
  ALL2= AL1+AL2
  ALL3= AL1+AL2+AL3
  ALL4= AL1+AL2+AL3+AL4
  ALL5= AL1+AL2+AL3+AL4+AL5
  ALL6= AL1+AL2+AL3+AL4+AL5+AL6
  ALL7= AL1+AL2+AL3+AL4+AL5+AL6+AL7
  ALL8= AL1+AL2+AL3+AL4+AL5+AL6+AL7+AL8
  ALL9= AL
  ENDIF

  IF( KOROFHS.EQ.2 ) THEN
  AHOUT= 16.3
  AL= AL1+AL2+AL3+AL4+AL5
  ALL2= AL1+AL2
  ALL3= AL1+AL2+AL3
  ALL4= AL1+AL2+AL3+AL4
  ALL5= AL1+AL2+AL3+AL4+AL5
  ENDIF

  DX= AL/DFLOAT(NI-1)
  DT=10.0*60.0

c
DO I=1,NI

  X(I)=(I-1)*DX

  IF ( X(I).LE.AL1 ) THEN
  AK(I) = AK1
  RHO(I)= RHO1
  CP(I) = C1
  ENDIF

  IF ( X(I).LE.AL12 .AND. X(I).GT.AL1 ) THEN
  AK(I) = AK2
  RHO(I)= RHO2
  CP(I) = C2

```

```

ENDIF

  IF ( X(I).LE.AL13 .AND. X(I).GT.AL12 ) THEN
AK(I) = AK3
RHO(I)= RHO3
CP(I)  = C3
ENDIF

  IF ( X(I).LE.AL14 .AND. X(I).GT.AL13 ) THEN
AK(I) = AK4
RHO(I)= RHO4
CP(I)  = C4
ENDIF

  IF ( X(I).LE.AL15 .AND. X(I).GT.AL14 ) THEN
AK(I) = AK5
RHO(I)= RHO5
CP(I)  = C5
ENDIF

  IF ( X(I).LE.AL16 .AND. X(I).GT.AL15 ) THEN
AK(I) = AK6
RHO(I)= RHO6
CP(I)  = C6
ENDIF

  IF ( X(I).LE.AL17 .AND. X(I).GT.AL16 ) THEN
AK(I) = AK7
RHO(I)= RHO7
CP(I)  = C7
ENDIF

  IF ( X(I).LE.AL18 .AND. X(I).GT.AL17 ) THEN
AK(I) = AK8
RHO(I)= RHO8
CP(I)  = C8
ENDIF

  IF ( X(I).LE.AL19 .AND. X(I).GT.AL18 ) THEN
AK(I) = AK9
RHO(I)= RHO9
CP(I)  = C9
ENDIF

  END DO
c
c- dedomena
c
  ALAI=4.0
  TS=EXP(-0.6135*ALAI)
  R00=0.175
  RHOG=0.2
  TT1=0.0091
  SIGMA=5.67*10.0**(-8)
  SIGMAF=ALAI/7.0

```

```

RHOC=1.18
CPc=1006.0
AHVEG=1.5
ALL=0.15
DD=0.0005
GAMA=RHOc*CPc/0.622
AHIN=10.0
AHINT=7.7
AHINW=7.8
eg=0.95
ef=0.98
el=eg+ef-ef*eg
ROG=0.2
RHOF=950.0
Cf=3750.0
CPAIR =1000.3
RHOAIR=1.15
AL0=0.3
AHCA=0.1*AL0*RHOc*CPc
  aa=1174.0
  bb=207.0
  am=0.5
  an=0.25
C
  pair=101325.0
c
  AWW=26.0
  AEW=26.0
  ASW=32.0
  ANW=32.0
  uu=3.3
  AG=2.0*2.0
  SC=0.25
  ach=1.0
  Vb= 12.0*10.0*3.0
  Vbin=Vb-(50*3.0*0.1)
  Vair= 12.0*10.0*3.0*ACH/3.6
  CTOT= RHOair*CPair*Vbin
c
c  ARXIKES SINTHIKES GIA t=0 SEC
c
  THITA(1)=0.0165
  TOUT(1) =298.2
  Tin(1)= 293.9
  SH(1)=0.0165
c
  TF(1)=TOUT(1)
  TCA(1)=TOUT(1)
c
c  SINTELESTES TRIDIAGONIOU
c
  N=1
c
c  GIA TON ESWTERIKO KOMBO I=NI

```

```

C
  B(1)= AK(1)/DX+ahin
  C(1)= -ak(1)/dx
  D(1)= aHin*Tin(1)
C
C GIA TON EKSWTERIKO KOMBO I=NI
C
  A(NI)=-ak(ni)/dx
  B(NI)= (ak(ni)/dx+ahout)
  D(NI)= aHout*Tout(1)
C
C GIA TOUS ESOTERIKOUS KOMBOUS
C
  DO I=2,NI-1
C
  A(I)= ak(i-1)/dx
  B(I)= -(ak(i-1)+ak(i+1))/dx
  C(I)= ak(i+1)/dx
  D(I)=0.0
C
  ENDDO
C
C
C LYSH SYSTHMATOS GIA YPOLOGISMO THS T(I,1)
C
C
  call trdiag (LL,NI,A,B,C,D)
C
  DO I=1,NI
  T(I,1)=D(I)
  WRITE(5,*)i, X(I),T(I,1)
  ENDDO
C
  DO N=1,NN-1
  Tair = Ta(N)+273.0
  ais = ais1(n)
  aig = aig1(n)
C
  TSKY=0.0554*TAIR**1.5
  TG=T(NI,N)
C
  RE= aa*alL**am/ (abs(Tf(N)-Tca(N))+bb*uca(n)**2)**an
  efs=610.78*exp(17.2694*(Tf(N)-273.0)/(Tf(N)-273.0+238.3))
  egr=0.0 !610.78*exp(17.2694*(TG- 273.0)/(TG-273.0+238.3))
  e0=RW(N)*610.78*exp(17.2694*(Tair-273.0)/(Tair-273.0+238.3))
  eca= SH(N)*pair/(0.62198+SH(N))
C
  aim=ais/(2.0*ALAI)
  r1=(aim+4.3)/(aim+0.54)
  r2=1.0+0.023*(TF(N)-273.0-24.5)**2
  r3=1.0+6.1*10**(-7)*100.0**2
  r4=1.0+4.3*(efs-eca)**2
  ri=82.0*r1*r2*r3*r4

```

```

C
X1=(1.0- TS - (1.0- TS)*R00)*(1.0+TS*RHOG)*AIS
X2=(1.0-TT1)*SIGMA*(TSKY**4+TG**4-2.0*TF(N)**4)
X3=-2.0*ALAI*RHOc*CPc*(TF(N)-TCA(N))/RE
X4=-2.0*ALAI*RHOc*CPc*(EFS-ECA)/(GAMA*(RE+RI))
XA=X1+X2+X3+X4
C
TF(N+1)= TF(N) + DT*XA/(RHOF*CF*DD*ALAI)
C
XB= -X3 + AHVEG*(TG - TCA(N)) + AHCA*(TCA(N)-Tair)
C
TCA(N+1) =TCA(N)+DT*XB/(RHOc*CPc*AL0)
C
C
TECA(N+1) = TCA(N+1) + ((1.0- ROG)*AIg-
1 SIGMAF*EGR*EF*SIGMA*(TG**4-Tf(N)**4)/E1)/AHVEG
C
XC= 2.0*ALAI*RHOc*CPc*(EFS-ECA)/(RE+RI) +AHVEG*(EGR-ECA)
1 +AHCA*(ECA-E0)
C
ALAMDA= (2.501-0.002361*(TF(N)-273.0))*10.0**(6)
SH(N+1)= SH(N) + DT*XC/(RHOc*CPc*AL0*GAMA*ALAMDA)
C
IF( KOROFHS.EQ.1 ) THEN
TOUT(N+1)=TECA(N+1)
ENDIF

IF( KOROFHS.EQ.2 ) THEN
TOUT(N+1)=TE(n+1)
ENDIF
C
qw=AHinw*(Tw(n) - Tin(N))*(AWW+AEW+ANW+ASW)
qg=4.0*Ag*( UU*(Tout(N)-Tin(N))+ SC*SHGF(n))
qair= 1.23*Vair*(Tout(N) - Tin(N))
qr=12.0*10.0*AHin*(T(1,N)-Tin(N))
QTOT(N)= QW+QG+QAIR+QR
C
TIN(N+1)=QTOT(N)*DT/CTOT+TIN(N)

ENDIF
C
C GIA TON ESWTERIKO KOMBO I=1
C
A0=0.5*RHO(1)*Cp(1)*DX/DT
A2=AK(2)/DX
A1=A0+0.5*(A2+AHIN)
C
B(1)= -A1
C(1)= 0.5*A2
D(1)= -(0.5*A2*T(2,N) + 0.5*AHin*(Tin(N+1)+Tin(N)) +
1 T(1,N)*(A0-0.5*(A2+AHin)))
C
C GIA TON EKSWTERIKO KOMBO I=NI

```

```

C
  A2=AK(NI-1)/DX
  A0=0.5*RHO(NI)*Cp(NI)*DX/DT
  A1=A0+0.5*(A2+AHOUT)
C
  A(NI)=0.5*A2
  B(NI)=-A1
  D(NI)=- (0.5*A2*T(NI-1,N) + 0.5*AHout*(Tout(N+1)+Tout(N)) +
1      T(NI,N)*(A0-0.5*(A2+AHout)))
C
C GIA TOUS ESOTERIKOUS KOMBOUS
C
  DO I=2,NI-1
C
  A1=AK(I-1)/DX
  A3=AK(I+1)/DX
  A0=RHO(I)*CP(I)*DX/DT
  A2=A0+0.5*(A1+A3)
C
  A(I)=0.5*A1
  B(I)=-A2
  C(I)=0.5*A3
  D(I)=- (0.5*A1*T(I-1,N)+0.5*A3*T(I+1,N)+
1      T(I,N)*(A0-0.5*(A1+A3)))
C
  ENDDO
C
C
C LYSH SYSTHMATOS GIA YPOLOGISMO THS T(I,N+1) SE KATHE STIGMH NEA
STIGMH N+1
C
c
  call trdiag (LL,NI,A,B,C,D)
c
  DO I=1,NI
  T(I,N+1)=D(I)
  WRITE(4,*) n+1, X(I),T(I,N+1)
  ENDDO
c
  ENDDO
c
c apothikeusi results
c
  DO N=1,NN
  WRITE(3,*) (N-1)*DT, Qtot(N)*DT
  WRITE(4,*) (N-1)*DT
  DO I=1,NI
  WRITE(4,*) X(I),T(I,N)
  ENDDO
  ENDDO
C
  CLOSE(1)
  CLOSE(2)
  CLOSE(3)
  CLOSE(4)

```

```

CLOSE (5)

GO TO 1

C
STOP
END

C
C
C#####c
subroutine trdiag (kdim,n,bef,diag,aft,rhsol)
C#####c
C solution of a tridiagonal matrix
implicit double precision (a-h,o-z)
dimension bef(kdim),aft(kdim),rhsol(kdim),diag(kdim)

C
eps=1.d-8
do 10 i=2,n
if(dabs(diag(i-1)).lt.eps) stop 'Divide by zero'
r = bef(i)/diag(i-1)
diag(i) = diag(i) - r* aft(i-1)
rhsol(i) = rhsol(i) - r* rhsol(i-1)
10 continue
C
rhsol(n) = rhsol(n)/diag(n)
do 20 i=n-1,1,-1
rhsol(i) = (rhsol(i)-aft(i)*rhsol(i+1)) / diag(i)
20 continue
C
return
end
C

```



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

### ΙΣΤΟΣ:

1. [www.greenroofs.gr](http://www.greenroofs.gr)
2. [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
3. [www.et.gr](http://www.et.gr)
4. [www.tee.gr](http://www.tee.gr)
5. [www.egreen.gr](http://www.egreen.gr)
6. [www.esha.gr](http://www.esha.gr)
7. [www.greenrooftops.com](http://www.greenrooftops.com)
8. [www.roofportland.com](http://www.roofportland.com)
9. [www.oikologio.gr](http://www.oikologio.gr)
10. [www.igra-world.com](http://www.igra-world.com)
11. [www.in.gr](http://www.in.gr)
12. [el.wikipedia.org](http://el.wikipedia.org)
13. [censam.mit.edu](http://censam.mit.edu)
14. [www.avgi.gr](http://www.avgi.gr)
15. [www.prasinistegi.gr](http://www.prasinistegi.gr)
16. [www.solon.org.gr](http://www.solon.org.gr)
17. [greenroofs.wordpress.com](http://greenroofs.wordpress.com)
18. [fourgreensteps.com](http://fourgreensteps.com)
19. [www.inhabitat.com](http://www.inhabitat.com)
20. [www.mcit.gov.cy](http://www.mcit.gov.cy)

## ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ – ΣΥΓΓΡΑΜΜΑΤΑ

21. D.J. Sailor, «*A green roof model for building energy simulation programs*», Energy and Buildings 40 (2008) 1466–147
22. Elena Palomo Del Barrio, «*Analysis of the green roofs cooling potential in buildings*», Energy and Buildings 27 (1998) 179-193
23. Renato M. Lazzarin, Francesco Castellotti, Filippo Busato, «*Experimental measurements and numerical modelling of a green roof*», Italy, Energy and Buildings 37 (2005) 1260–1267
24. Theodore Theodosiou, «*Green roofs in buildings, Thermal and Environmental Behaviour*», Advances in Building energy research (2009), Vol 3, Pages 271-288
25. Theodore G. Theodosiou, «*Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique*», Energy and Buildings 35 (2003) 909–917
26. H.F. Castletona, V. Stovin, S.B.M. Beck, J.B.Davison, «*Green Roofs; Building Energy Savings and the Potential for Retrofit*», UK 2010
27. Rakesh Kumar, S.C. Kaushik, «*Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings*», Building and Environment 40 (2005) 1505–1511
28. Eleftheria Alexandri, Phil Jones, «*Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results*», Building and Environment 42 (2007) 2835–2849
29. Elena Palomo Del Barrio, «*Roof components models simplification via statistical linearisation and model reduction techniques*», Energy and Buildings 29 (1999) 259–281
30. T. Van Renterghem, D. Botteldooren, «*Numerical evaluation of sound propagating over green roofs*», Journal of Sound and Vibration 317 (2008) 781–799
31. A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A Tsangrassoulis, G. Mihalakakou, «*Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance*», Energy and Buildings 33 (2001) 719-729
32. A. Spala, H.S. Bagiorgas, M.N. Assimakopoulos, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos, G. Mihalakakou, «*On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece*», Renewable Energy 33 (2008) 173–177
33. Ekaterini Eumorfopoulou, Dimitris Aravantinos, «*The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece*», Energy and Buildings 27 (1998) 29-36

34. Lee. K. Bahlck, Randy K. Scoggins, Lewis E. Link, «*Inclusion of a simple vegetation layer in terrain temperature models for thermal infrared (IR) signature prediction*», Environmental Laboratory, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981
35. Βραχόπουλος Μ. Γρ., Φιλίος Α.Ε., Κωτσιόβελος Γ. Τρ., «*Εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια με φυτεμένο δώμα*», ΤΕΙ Χαλκίδας
36. Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, «*Κλιματισμός, Μέρος Ι*», Αθήνα, 2007
37. Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, «*Υπολογιστικές Μέθοδοι Φαινομένων Μεταφοράς, Μέρος Ι*», Αθήνα, 2005
38. Ξενοφών Κ. Κακάτσιος, «*Μετάδοση Θερμότητας*», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2002

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

39. «*Ενέργεια και Κτίριο*», Matheos Santamouris
40. «*Η συμβολή των φυτεμένων δωματίων στην εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια*», Μιχαλάκη Τσαμπίκα
41. «*Δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας – Υπολογιστικές μέθοδοι ενεργειακών επιθεωρήσεων στα κτίρια*», Αθηνά Γαγλία
42. «*Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων και Κατασκευή Κήπων σε Δώματα*», Σταμάτης Δ. Πέρδιος
43. «*Κίνητρα για την εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης στα κτίρια*», Κτίριο & Ενέργεια, Χαραλαμπίδης Νίκος
44. [blogs.trb.com](http://blogs.trb.com)
45. [www.inhabitat.com/files/calroof3.jpg](http://www.inhabitat.com/files/calroof3.jpg)
46. [www.jetsongreen.com/images/2008/12/16/h2hotel.jpg](http://www.jetsongreen.com/images/2008/12/16/h2hotel.jpg)
47. «*Φυτεμένο δώμα σε κτίριο γραφείων και σε διπλοκατοικία*», Καρτέρης Μαρίνος, Θεοδωρίδου Ιφιγένεια, Μανώλης Ηλιάκης
48. [buildingsdatabook.eren.doe.gov](http://buildingsdatabook.eren.doe.gov)
49. [www.meteo.ntua.gr](http://www.meteo.ntua.gr)
50. [www.greekarchitects.gr/gr/τεχνικα-θεματα/τα-φυτεμενα-δωματα-και-η-συμβολη-τους-στον-αστικο-χωρο-id1114](http://www.greekarchitects.gr/gr/τεχνικα-θεματα/τα-φυτεμενα-δωματα-και-η-συμβολη-τους-στον-αστικο-χωρο-id1114)
51. [www.ghp-ma.gr/image/ghpoikologia%20\(3\).jpg](http://www.ghp-ma.gr/image/ghpoikologia%20(3).jpg)
52. [http://2.bp.blogspot.com/\\_V3qZyA0juTY/S4NkB45NfwI/AAAAAAAAAC7g/fSQrrv0eZa8/s1600-h/house2.gif](http://2.bp.blogspot.com/_V3qZyA0juTY/S4NkB45NfwI/AAAAAAAAAC7g/fSQrrv0eZa8/s1600-h/house2.gif)

