



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Προσομοίωση θερμικής συμπεριφοράς κτιρίου με
φυτεμένη οροφή κατά τη θερινή περίοδο**



Επιμέλεια: Μιχάλης Σκουτάρης

Επιβλέπων καθηγητής: Χρίστος Τζιβανίδης

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2009

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1. ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΚΤΙΡΙΑ	7
1.1 Το Ενεργειακό Πρόβλημα	7
1.2 Κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια	11
1.3 Βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων.....	15
2. ΠΡΑΣΙΝΟ ΣΤΗ ΠΟΛΗ.....	20
2.1 Αστικά κέντρα σε γκρι απόχρωση	20
2.2 Αναγεννώντας τις πόλεις με πράσινο	23
3. ΦΥΤΕΜΕΝΗ ΟΡΟΦΗ.....	28
3.1 Τι είναι.....	28
3.2 Ιστορική αναδρομή	28
3.3 Αρχές λειτουργίας	29
3.4 Διαστρωμάτωση.....	31
3.5 Τύποι.....	34
3.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα.....	37
3.7 Συντήρηση	41
3.8 Η κατάσταση σήμερα	42
4. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....	45
4.1 Χωροχρόνος.....	45
4.2 Κτίριο.....	47
4.2 Δομική – θερμική ανάλυση κτιρίου	48
5. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	50
5.1 Διακριτοποίηση προβλήματος	50
5.2 Γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών	51

5.3 Οριακές συνθήκες	53
5.3.1α Διαμόρφωση εξωτερικών οριακών συνθηκών.....	55
5.3.1β Μετάδοση θερμότητας στην επιφάνεια της οροφής	70
5.3.2α Διαμόρφωση εσωτερικών οριακών συνθηκών	74
5.3.2β Μετάδοση θερμότητας από το ταβάνι στο εσωτερικό	85
5.4 Τελική διαμόρφωση συστήματος.....	86
5.5 Επίλυση συστήματος.....	90
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	136
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	139

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «**Προσομοίωση θερμικής συμπεριφοράς κτιρίου με φυτεμένη οροφή κατά τη θερινή περίοδο**», αποτελεί το αποτέλεσμα μιας δουλειάς που κράτησε 9 μήνες. Το ενδιαφέρον του αντικειμένου που πραγματεύεται η εργασία αυτή είναι ότι πέραν του αμιγώς μηχανολογικού του χαρακτήρα, εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο οικολογικού ενδιαφέροντος. Για τη συγγραφή της αντλήθηκε υλικό από μια σειρά ποικιλόμορφης βιβλιογραφίας (βιβλία, ιστοσελίδες κτλ), ενώ για τις πληροφορίες που παρουσιάζονται αυτούσια όπως φωτογραφικό υλικό και πίνακες, γίνεται απευθείας αναφορά στην αντίστοιχη βιβλιογραφική πηγή.

Νοιώθω την ανάγκη, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Χρίστο Τζιβανίδη για τις κατά καιρούς υποδείξεις που μου έδινε, αλλά και τον καθηγητή του ΤΕΙ Χαλκίδας κύριο Μιχάλη Βραχόπουλο για την υπερπολύτιμη βοήθειά του στο ξεκίνημα της προσπάθειας αυτής. Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες στην οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων, καθώς και «σε αυτόν τον υπέροχο κόσμο της Ομόνοιας...»

Μιχάλης Σκουτάρης

Ιούλιος 2009

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια έντονη συζήτηση έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια γύρω από το ζήτημα του ενεργειακού προβλήματος και τις οικονομικές και περιβαλλοντικές του προεκτάσεις. Πρόβλημα που με τη πάροδο του χρόνου ολοένα και εντείνεται, με τους εμπειρογνώμονες να κρούουν το κώδωνα του κινδύνου για καταστροφικές στο μέλλον επιπτώσεις. Αξιοσημείωτο δε είναι και το γεγονός ότι τεράστια συμβολή στο πρόβλημα δεν έχει μόνο η βαριά βιομηχανία και οι μεταφορές, αλλά και ο κτηριακός τομέας, ο οποίος ευθύνεται για το 40% περίπου της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και για το 15% περίπου των εκπομπών CO₂. Αν ληφθεί υπόψη ότι ένα ποσοστό της ενέργειας αυτής, κοντά στο 40% καταναλώνεται για την επίτευξη θερμικής άνεσης (θέρμανση και δροσισμός του χώρου), γίνεται πλέον ξεκάθαρο ότι η εφαρμογή και η επέκταση της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής και των διάφορων τεχνικών αυτής, αποτελεί σήμερα μονόδρομο.

Παράλληλα, είναι γεγονός πλέον ότι η ζωή στις σύγχρονες πόλεις έχει υποβαθμιστεί. Η υπερσυγκέντρωση πληθυσμού στα αστικά κέντρα σε συνδυασμό με τη πυκνή δόμηση που έχει φέρει σαν αποτέλεσμα, δημιουργούν τις πλέον αφιλόξενες συνθήκες στους πολίτες. Ρύπανση, ακραίες θερμοκρασίες, πλημμυρικά φαινόμενα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του αστικού σκηνικού. Όλα αυτά δεν είναι τυχαία αν αναλογιστεί κανείς τη συρρίκνωση των χώρων πρασίνου μέσα στις πόλεις. Η ακατάσχετη τσιμεντοποίηση έχει περιορίσει τα συνοικιακά πάρκα, τα αστικά άλση και οποιοδήποτε άλλο ίχνος πρασίνου υπήρχε στις προηγούμενες δεκαετίες. Η επέκταση της παρουσίας της βλάστησης, θα μπορούσε να αναβαθμίσει τη ποιότητα της ζωής στις μεγαλουπόλεις, φιλτράροντας τον αέρα που αναπνέουμε, ρυθμίζοντας με φυσικό τρόπο τις κλιματικές συνθήκες, μειώνοντας την απορροή των υδάτων κτλ.

Οι **φυτεμένες οροφές** στα κτίρια είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης των παραπάνω προβλημάτων, μιας και αφενός αποτελούν μια τεχνική βιοκλιματισμού, αφετέρου συμβάλλουν στην επαναφορά της «φύσης» στο αστικό τοπίο. Σε αντίθεση έτσι με τις υπόλοιπες τεχνικές της οικολογικής δόμησης, το όφελος στην περίπτωση αυτή είναι διπλό και αφορά τόσο το κτίριο αυτό καθ' αυτό, όσο και την ευρύτερη περιοχή στην οποία βρίσκεται. Πρόκειται για μια πολυεπίπεδη κατασκευή, η οποία προστατεύει την οροφή του κτιρίου από ακραίες τιμές της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ η βλάστηση δημιουργεί με τη σειρά της ένα ιδιαίτερο μικροκλίμα στον αέρα που περιβάλλει την οροφή. Η τεχνική αυτή έχει εφαρμόζεται στη σημερινή της μορφή εδώ και 40 περίπου χρόνια σε χώρες

κυρίως της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης, τις Η.Π.Α, τον Καναδά και την Ιαπωνία. Στην Ελλάδα η ανάπτυξη των φυτεμένων οροφών βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο αν και τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να διαδίδεται ευρύτερα στη δομική βιομηχανία.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι να αναδειχθεί το ενεργειακό όφελος από τυχόν εγκατάσταση μιας φυτεμένης οροφής σε ένα κτίριο στην Αθήνα, συγκριτικά με μια συμβατική οροφή με απλή μόνωση. Γίνεται μια προσομοίωση έτσι της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου και στις δυο περιπτώσεις, όπου για τον υπολογισμό των θερμοροών, λύνεται το κτίριο με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Το μαθηματικό μοντέλο που προκύπτει, κωδικοποιείται και επιλύεται σε Matlab με τα αποτελέσματα που προκύπτουν να καταγράφονται σε κατάλληλα διαγράμματα.

1. ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΚΤΙΡΙΑ

1.1 Το Ενεργειακό Πρόβλημα

Το ενεργειακό πρόβλημα αποτελεί ένα ίσως από τα πιο κεφαλαιώδη ζητήματα που αντιμετωπίζει σήμερα η ανθρωπότητα. Αν και η κουβέντα γύρω από το πρόβλημα αυτό έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια, αποτελεί ένα διαχρονικό και πάγιο ζήτημα, μιας και ο άνθρωπος από την πρώτη στιγμή της εμφάνισής του βρίσκεται σε μια διαρκή αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας, ώστε να εξασφαλίζεται η ίδια του η ύπαρξη αλλά και η πρόοδος του. Η διαρκής αυτή αναζήτηση γεννούσε διαρκώς ένα συνεχές ενεργειακό πρόβλημα, που έφτασε σε αρκετές περιπτώσεις τα όρια της κρίσης.

Αρκετές είναι οι ιστορικές αναφορές σε τέτοιες ενεργειακές κρίσεις. Κρίσεις οι οποίες αφενός μεν ξεπεράστηκαν εν τέλει αποτελεσματικά, επώδυνα όμως δε σε κάποιες περιπτώσεις. Για παράδειγμα η έλλειψη καύσιμου ξύλου που παρατηρήθηκε τον 17ο αιώνα, οδήγησε σε μια πραγματική ενεργειακή κρίση, με αποτέλεσμα την αύξηση του πληθωρισμού σε όλες τις τότε ανεπτυγμένες Ευρωπαϊκές χώρες.

Περνώντας στη σύγχρονη εποχή, το ενεργειακό πρόβλημα άρχισε να γίνεται αντικείμενο συζήτησης κατά τη δεκαετία του 1950, περισσότερο όμως σαν φιλοσοφικός στοχασμός. Μέσα στα επόμενα χρόνια το θέμα άρχισε σιγά σιγά να τοποθετείται στην επιστημονική του βάση, με την ενεργειακή κρίση του 1973 να συμβάλλει καταλυτικά στη συνειδητοποίηση του προβλήματος, δίνοντας έτσι την ώθηση στο να αναπτυχθεί μια πλούσια φιλολογία αναφορικά με τα αίτια δημιουργίας, τις επιπτώσεις και τις πιθανές λύσεις του. Πρώτος ο μελετητής Hans Landsberg τότε στο έργο του 'Energy, the next twenty years' (1979) μετακίνησε το ενεργειακό πρόβλημα προς την κατεύθυνση των πάγιων κοινωνικοπολιτικών προβλημάτων, συγκρίνοντάς το με την υγεία και την εκπαίδευση.

Αν και πρωτοποριακή για την εποχή της, η πιο πάνω θεώρηση σήμερα θεωρείται ξεπερασμένη μιας και περιορίζει τη διερεύνηση του ενεργειακού προβλήματος στα πλαίσια μόνο της οικονομίας. Πλέον, για να γίνει μια πιο σφαιρική μελέτη του ενεργειακού προβλήματος, θα πρέπει αυτό να αντιμετωπιστεί σαν μια αυτόνομη επιστημονική ενότητα. Με βάση επομένως τη σύγχρονη προσέγγιση περί του ζητήματος, το ενεργειακό πρόβλημα, ανεξάρτητα από τη χρονική και την τοπική ιδιαιτερότητα που εμφανίζει, προσδιορίζεται κυρίως από τις εξής συνιστώσες:

(α) Η εκμετάλλευση και διαχείριση των κυριότερων ενεργειακών πηγών από ένα πολύ μικρό αριθμό επιχειρήσεων, έχει εγκλωβίσει την ενέργεια στα διάφορα γεωστρατηγικά – οικονομικά συμφέροντα και παιχνίδια.

Τρανότερη απόδειξη αποτελεί η πετρελαϊκή κρίση του 1973, όπου χωρίς την ύπαρξη κάποιας στενότητας πετρελαίου, ο ΟΠΕΚ (Οργανισμός Πετρελαιοπαραγωγών Κρατών) προέβη στο προσωρινό μποϊκοτάρισμα της παγκόσμιας αγοράς. Δεδομένης της σημαντικότητας του πετρελαίου, το γεγονός αυτό εκτόξευσε την τιμή του από \$ 3,011 / βαρέλι τον Οκτώβριο, σε \$ 11,53 τον Δεκέμβριο του ίδιου έτους. Η κρίση αυτή προκάλεσε γενική αύξηση των τιμών και κλονισμό της παγκόσμιας οικονομίας, μιας και όπως φαίνεται από τα παρακάτω στατιστικά στοιχεία υπάρχει πλήρης συμπίεση της αύξησης τιμών ενέργειας με το πληθωρισμό και την ανεργία.

ΧΩΡΑ	ΠΛΗΘΩΡΙΣΜΟΣ (%)		ΑΝΕΡΓΙΑ (%)	
	1963-1972	1980	1963-1972	1980
Η.Π.Α.	3,6	9,5	4,4	6,9
Ιαπωνία	4,9	2,0	1,2	2,0
Γαλλία	4,8	11,25	2,2	4,9
Δυτ. Γερμανία	4,1	4,75	0,7	3,6
Ηνωμ. Βασίλειο	5,1	19,25	3,1	5,8

Πίνακας 1.1-1: Μεταβολή πληθωρισμού και ανεργίας προ και μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973.¹

Στις μέρες μας, διάφορα οικονομικά, γεωπολιτικά, στρατηγικά, κοινωνικά, τοπικά συμφέροντα έχουν εκτοξεύσει τις τιμές των καυσίμων σε πρωτόγνωρα επίπεδα, με το πετρέλαιο να φτάνει στα \$ 147 / βαρέλι στις 11/7/2008! Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι με βάση τις συνεχείς αυθαιρεσίες του μονοπωλίου του ΟΠΕΚ, με τη συνοχή των μεγάλων εταιρειών, αλλά και την αδράνεια μερικών κυβερνήσεων, η ανοδική αυτή τάση της τιμής της ενέργειας θα συνεχιστεί. Το αποτέλεσμα αυτού το βιώνει καθημερινά όλη η ανθρωπότητα με την άνευ προηγουμένου αύξηση της τιμής των πρώτων υλών και μεταφορών, και κατ' επέκταση όλων των βασικών καταναλωτικών αγαθών.

(β) Η αρνητική επίδραση στο περιβάλλον καθ' όλη τη διάρκεια της ενεργειακής ροής, από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι την τελική χρήση τους.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 70 είναι πλέον έκδηλη η περιβαλλοντική κρίση, η οποία ολοένα και εντείνεται. Καταρακτώδεις βροχές, παρατεταμένοι καύσωνες και πυρκαγιές, όξινη βροχή, αφανισμός ειδών χλωρίδας και πανίδας, ανομβρίες κτλ συνθέτουν ένα τρομακτικό σκηνικό, με την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας να συμβάλλουν καταλυτικά.

Βάσει στατιστικών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, οι εκπομπές CO₂, κύρια αιτία εμφάνισης του φαινόμενο του θερμοκηπίου, προέρχονται κατά 94% από τον ενεργειακό τομέα. Εκπομπές που προέρχονται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων, την κατανάλωση ειδών πετρελαίου και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το πρόβλημα λαμβάνει γιγαντιαίες διαστάσεις, αν αναλογιστεί κανείς και την οικολογική καταστροφή που προκαλείται από τους πυρηνικούς σταθμούς. Τα πυρηνικά απόβλητα και η απελευθέρωση καυτού νερού που χρησιμοποιείται για δροσισμό των αντιδραστήρων σε παρακείμενα ποτάμια και λίμνες, σε συνδυασμό με το απομακρυσμένο έστω ενδεχόμενο ενός νέου Τσέρνομπιλ, φέρνουν τον εφιάλτη μια παγκόσμιας οικολογικής καταστροφής στο προσκήνιο.

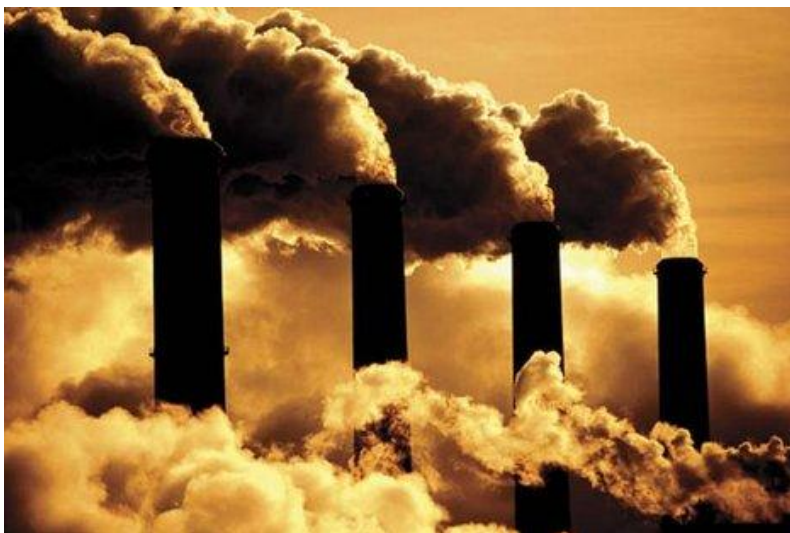
Ενδεικτικά είναι τα παρακάτω στοιχεία που αφορούν την παραγωγή ενέργειας.

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΘΡΑΚΑ ΚΑΙ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ	
ΡΥΠΟΣ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ
CO ₂	Υπερθέρμανση του πλανήτη
NO _x	Αιθαλομίχλη
Σωματίδια και σκόνη	Καρκινικές και άλλες παθήσεις του πνεύμονα

Πίνακας 1.1-2: Ρύποι και επιπτώσεις από εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας άνθρακα και πετρελαίου.

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	
ΡΥΠΟΣ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ
Ραδιενεργά τοξικά απόβλητα	Δύσκολο να εξουδετερωθούν
Διαρροές ακτινοβολίας	Δηλητηριάσεις και αυξανόμενος κίνδυνος καρκίνου
Εκπομπές θερμότητας	Ρύπανση υδάτων – εξόντωση θαλάσσιας ζωής

Πίνακας 1.1-3: Ρύποι και επιπτώσεις από εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας.



Εικόνα 1.1-1: Μόλυνση από ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς.²

(γ) *Η πολιτική αστάθεια σε περιοχές με πλούσιους ενεργειακούς πόρους, καθιστά αβέβαιη την επάρκεια και σταθερότητα της ενεργειακής τροφοδοσίας.*

Ιδιαίτερα ανησυχητικό είναι το γεγονός ότι περίπου το 75% των παγκόσμιων αποθεμάτων πετρελαίου, που αποτελεί σήμερα την κυριότερη ενεργειακή πηγή, βρίσκονται στη νευραλγική περιοχή της Μέσης Ανατολής. Οι κατά καιρούς πολεμικές συρράξεις στην περιοχή αυτή (οκταετής πόλεμος Ιράν-Ιράκ 1980-88, Κουβέιτ 1991 κτλ) προκαλούν μια έντονη ανησυχία σχετικά με την επάρκεια και σταθερότητα της πετρελαϊκής τροφοδοσίας.

Όσον αφορά δε το φυσικό αέριο, η Ρωσία, κατέχει σήμερα τις μεγαλύτερες πηγές αποθέματος φυσικού αερίου με εξαγωγές που φτάνουν το 25% ολόκληρης της δυτικοευρωπαϊκής αγοράς. Δε μπορούμε όμως να παραβλέψουμε τις κατά καιρούς διακοπές της τροφοδοσίας φυσικού αερίου κατόπιν πολιτικών διαφορών προς την Ουκρανία, και μέσω αυτής προς άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, με πρόσφατο παράδειγμα αυτό του Γενάρη του 2009.

Αρνητικό στοιχείο επίσης αποτελεί το γεγονός ότι λοιπές πετρελαιοπαραγωγές χώρες όπως η Νιγηρία και η Βενεζουέλα, καθώς και χώρες με μεγάλη παραγωγή φυσικού αερίου όπως το Ουζμπεκιστάν και το Καζακστάν, δε μπορούν να χαρακτηριστούν πολιτικά αξιόπιστες. Το ζήτημα που αναδύεται εδώ είναι ότι κανένας δε μπορεί κάποιος να εγγυηθεί ότι μέσα στα επόμενα χρόνια αυτές οι χώρες θα είναι πολιτικά πιο αξιόπιστες και σταθερές.

(δ) Την εξάντληση των ενεργειακών πόρων, έστω και αν αυτή τοποθετείται σε μακρινούς χρονικούς ορίζοντες.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 70 και ιδιαίτερα μετά τη πετρελαϊκή κρίση του 1973, ξέσπασε μια διάχυτη αντίληψη σε όλη την υφήλιο ότι το πετρέλαιο τελειώνει και έτσι κατ' επέκταση τελειώνει και η ενέργεια. Βέβαια, η άποψη αυτή αργότερα αναιρέθηκε, χωρίς ωστόσο να εξαφανιστεί εντελώς η ανησυχία αυτή.

Το ζήτημα έχει επανέλθει στις μέρες μας. Η British Petroleum (BP) παρουσίασε στις 13/6/2007 μια στατιστική μελέτη, σύμφωνα με την οποία υπάρχουν “αποδεδειγμένα” αποθέματα πετρελαίου ικανά για να τροφοδοτήσουν τον κόσμο με την ισχύουσα κατανάλωση για 40 χρόνια. Αν αναλογιστεί κανείς ότι η κυριότερη ενεργειακή πηγή σήμερα είναι το πετρέλαιο με ποσοστό κοντά στο 38%, φαίνεται ξεκάθαρα η σοβαρότητα του προβλήματος. Αν και τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής προκάλεσαν διαφωνίες στους κόλπους των εμπειρογνομόνων, όλοι συμφωνούν ότι η ζήτηση του πετρελαίου αυξάνεται με ταχύ ρυθμό, λόγω κυρίως της ραγδαίας ανάπτυξης σε κράτη όπως η Κίνα και η Ινδία. Η αυξημένη ζήτηση υποδεικνύει ακριβώς την ανάγκη για ακόμα περισσότερα αποθέματα.

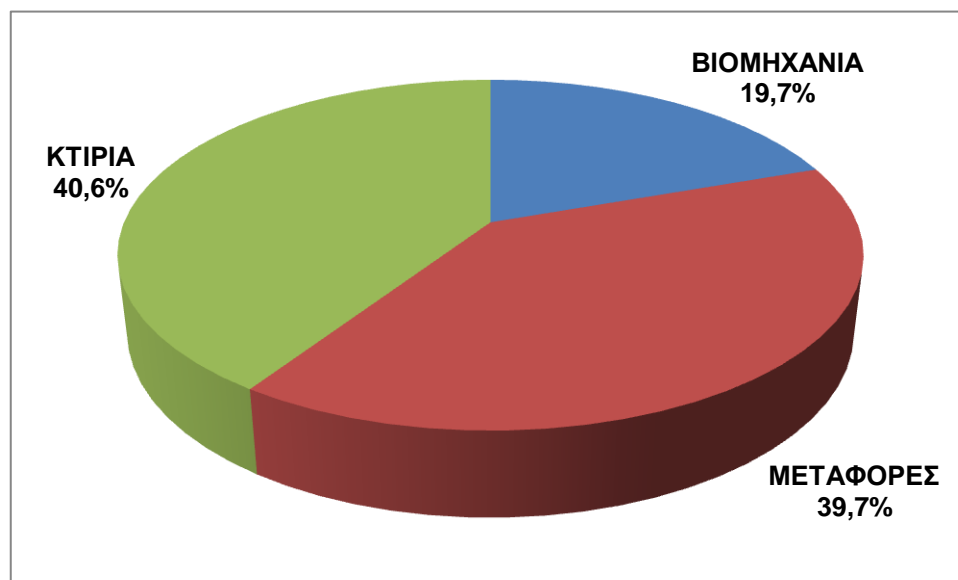
1.2 Κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια

Η ενεργειακή κατανάλωση σε ένα κτίριο, είτε αυτό ανήκει στον οικιστικό τομέα (κατοικίες, διαμερίσματα), είτε στις υπηρεσίες (γραφεία, καταστήματα, δημόσια κτίρια κτλ) είναι αναπόφευκτη. Όλα τα κτίρια, ανεξαρτήτως της γεωγραφικής τους θέσης, χρειάζονται ενέργεια για την επίτευξη θερμικής άνεσης τόσο κατά τη χειμερινή, όσο και κατά τη θερινή περίοδο. Πέραν τούτου, ενέργεια απαιτείται για τη θέρμανση του νερού, το φωτισμό, καθώς και σε μια σειρά από ηλεκτρικές συσκευές.

Ρίχνοντας μια ματιά στα επίσημα στατιστικά που αφορούν την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση κατά το 2006, όπως παρουσιάζονται σε ειδική έκδοση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής³, μπορούμε να εξαγάγουμε μια σειρά από χρήσιμα συμπεράσματα.

ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΑΝΑ ΤΟΜΕΑ (ΜΤΟΕ) – 2006				
	ΟΛΙΚΗ	ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ	ΚΤΙΡΙΑ
ΕΛΛΑΔΑ	21,5	4,2	8,5	8,7
ΕΕ	1176,1	324,3	370,3	481,5
ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ	7911,7	2092,8	2182,9	2933

Πίνακας 1.2-1: Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα το 2006 σε Ελλάδα, ΕΕ και Παγκόσμια.

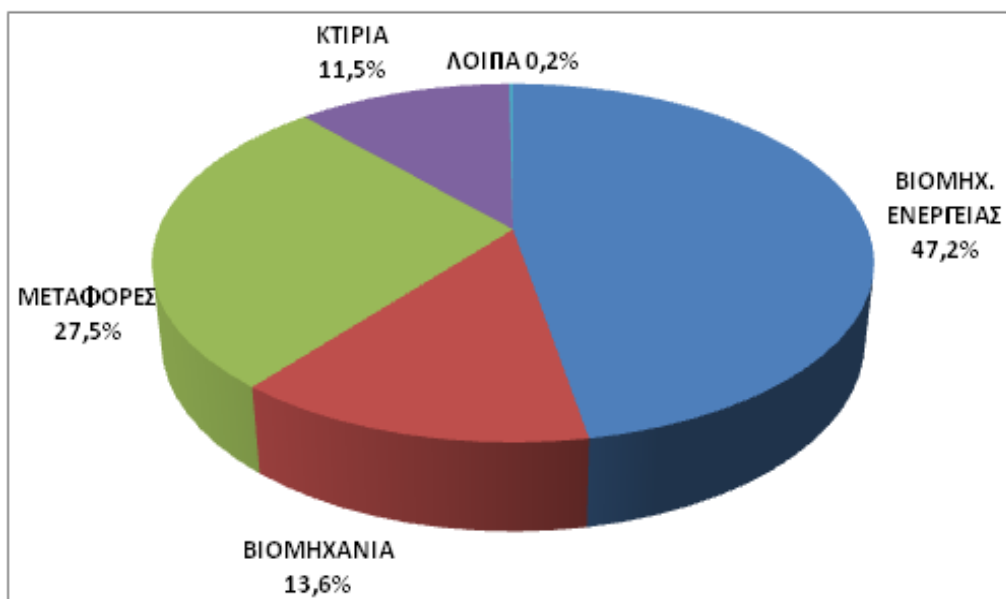


Εικόνα 1.2-1: Διασπορά ενεργειακής κατανάλωσης στην Ελλάδα το 2006.

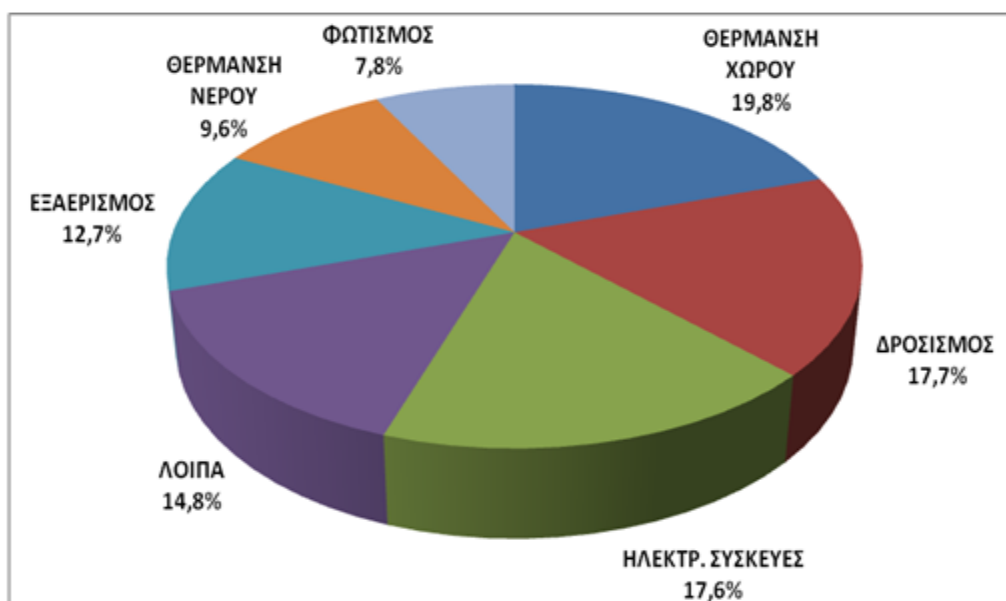
Τα τεράστια ποσά ενέργειας που καταναλώνονται στο κτιριακό τομέα, πέραν του οικονομικού κόστους που φορτώνουν τον καταναλωτή, συμβάλλουν και στην καταστροφή του περιβάλλοντος. Με βάση τα στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (ΙΕΑ), ο κτιριακός τομέας ευθύνεται για εκπομπές 27245 εκατομμυρίων τόνων CO₂ το 2006, ποσό που αποτελεί το 12,9% των παγκόσμιων εκπομπών.

ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ (10 ⁶ ΤΟΝΟΙ) – 2006						
	ΣΥΝΟΛΟ	ΒΙΟΜΗΧ. ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΒΙΟΜΗΧ.	ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ	ΚΤΙΡΙΑ	ΛΟΙΠΑ
ΕΛΛΑΔΑ	123,1	58,2	16,7	33,8	14,2	0,3
ΕΕ	4554,4	1562,1	952,6	1246,9	763,4	29,4
ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ	27245,8	12805,5	5612,6	5231,2	3512,7	81,7

Πίνακας 1.2-2: Εκπομπές CO₂ ανά τομέα το 2006 σε Ελλάδα, ΕΕ και Παγκόσμια.

Εικόνα 1.2-2: Διασπορά εκπομπών CO₂ στην Ελλάδα το 2006.

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας μέσα στα κτίρια, το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. έχει δημοσιεύσει στο ‘2008 Buildings Energy Data Book’, κάποια ενδιαφέροντα στατιστικά στοιχεία, που παρουσιάζονται στην εικόνα 1.2.γ. Βεβαίως τα στοιχεία αυτά ισχύουν για τις Η.Π.Α και δε μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε για να βγάλουμε ακριβή συμπεράσματα για τη χώρα μας. Πέραν τούτου όμως αυτό που έχει σημασία να προσέξουμε είναι το μεγάλο ποσοστό ενέργειας που καταναλώνεται για σκοπούς επίτευξης θερμικής άνεσης, που αν όχι ποσοτικά, τουλάχιστο ποιοτικά μπορεί να δώσει μια εικόνα και για τα ελληνικά δεδομένα.

Εικόνα 1.2-3: Διασπορά ενεργειακής κατανάλωσης στο κτιριακό τομέα στις Η.Π.Α το 2006.⁴

Το πρόβλημα γίνεται ακόμη πιο ανησυχητικό, αν δούμε και την εξέλιξη που έχει η κατανάλωση ενέργειας σε κτίρια τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα. Η εξέλιξη αυτή, όπως φαίνεται και στο πιο κάτω διάγραμμα είναι σταθερά αύξουσα τα τελευταία χρόνια.



Εικόνα 1.2-4: Εξέλιξη ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης στα ελληνικά κτίρια.⁵

Βεβαίως αυτό δεν είναι τυχαίο και δε συμβαίνει μόνο στην Ελλάδα. Πανομοιότυπο σκηνικό εμφανίζεται και σε άλλες Νοτιοευρωπαϊκές χώρες, όπως η Ιταλία και η Ισπανία. Ιδιαίτερα στη περιοχή της Μεσογείου, η σταδιακή άνοδος της μέσης θερμοκρασίας στα αστικά κέντρα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, αυξάνει συνεχώς την απαιτούμενη ενέργεια για τον δροσισμό των κτιρίων. Η υπερθέρμανση αυτή των πόλεων, σε συνδυασμό με τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, έχουν φέρει τα τελευταία χρόνια μια ραγδαία αύξηση στη χρήση συστημάτων κλιματισμού με τις πωλήσεις στην Ελλάδα να αυξάνονται από 44614000 μονάδες το 2002 σε 52288000 μονάδες το 2006. Η αύξηση έτσι στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει αφενός την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και αφετέρου τις εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος, που συνεπάγεται προφανώς με αύξηση στις εκπομπές CO₂.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω στοιχεία είναι ότι τα κτίρια αποτελούν σήμερα έναν κύριο καταναλωτή ενέργειας και έναν πολύ καλό τροφοδότη CO₂ στην ατμόσφαιρα. Νοουμένου ότι το μεγαλύτερο ποσοστό σπατάλης της ενέργειας γίνεται για την επίτευξη θερμικής άνεσης, υποδεικνύεται ξεκάθαρα που πρέπει να κινηθεί η έρευνα τα επόμενα χρόνια ώστε να δοθούν άμεσες και αποτελεσματικές λύσεις. Ήδη η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει σαν στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 9% έως το 2016. Έτσι, με μια σειρά από κοινοτικές οδηγίες ωθεί τις χώρες μέλη προς την ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων και νέων κτιρίων με βασικό στόχο όλων τη βελτίωση της

ενεργειακής τους συμπεριφοράς. Μια τέτοια οδηγία είναι και η Οδηγία 2002/91/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, όπου μεταξύ άλλων θα υποχρεώνει στην έκδοση ενεργειακού πιστοποιητικού για κάθε κτίριο και ταυτόχρονα σε εξαρχής οικοδόμηση «πράσινων κτιρίων» ή σε μέτρα αναβάθμισης. Αυτό θα έπρεπε να είχε εφαρμοστεί στη χώρα μας από τις 4 Ιανουαρίου 2006⁶, κάτι που δεν έγινε και αν λάβουμε επίσης υπόψη το γεγονός ότι στις 19 Οκτωβρίου 2007 η Ελλάδα κλήθηκε –μαζί με 11 άλλα κράτη μέλη- στο Ευρωδικαστήριο επειδή δεν είχε γνωστοποιήσει τι μέτρα προτίθενται να λάβει για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων⁷, αντιλαμβάνεται κανείς πόσο πίσω βρισκόμαστε σε χώρα στον τομέα αυτό.

1.3 Βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων

Το ερώτημα που πρέπει να τίθεται πλέον σήμερα δεν είναι το κατά πόσο τα κτίρια μπορούν να συμβάλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας και στο περιορισμό των εκπομπών CO₂, αλλά στο πως. Την απάντηση σε αυτό το ερώτημα μπορεί να δώσει ο **βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων**.

Με τον όρο βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων εννοούμε το σχεδιασμό κτιρίων με βάση τις ειδικές περιβαλλοντικές και κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής, με σκοπό την εξασφάλιση συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης, καθώς και επαρκούς ποιότητας του αέρα, καταναλώνοντας την ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση των διαφόρων περιβαλλοντικών πηγών (κυρίως τον ήλιο), αλλά και των φυσικών φαινομένων του κλίματος. Η χρήση του όρου «βιοκλιματικός» υποδηλώνει ακριβώς ότι ο σχεδιασμός αυτός εντάσσεται σε μια ευρύτερη αντίληψη οικολογικής δόμησης, που αποβλέπει στο σχεδιασμό κτιρίων με τέτοιο τρόπο ώστε αφενός να καλύπτονται πλήρως οι ενεργειακές τους ανάγκες και αφετέρου η επιβάρυνση του περιβάλλοντος με εκπομπές ρύπων να είναι μηδαμινή.



Εικόνα 1.3-1: Τρεις βασικές αρχές του βιοκλιματισμού: απρόσκοπτη είσοδος της ηλιακής ακτινοβολίας εντός του κτιρίου κατά τη διάρκεια της χειμερινής ημέρας και διατήρηση της θερμότητας αυτής το βράδυ, και επαρκής προστασία από τις ηλιακές ακτίνες το καλοκαίρι.⁸

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων εντάσσει δυο κύριες μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας και περιορισμού εκπομπών ρύπων. Πρόκειται για τα:

1. Ενεργητικά Συστήματα

Τα ενεργητικά συστήματα χρησιμοποιούν μηχανικά μέσα για τη θέρμανση χώρου και νερού, καθώς και για δροσισμό του χώρου, αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια ή τις φυσικές δεξαμενές ψύξης. Τέτοια συστήματα αποτελούν οι ηλιακοί συλλέκτες θέρμανσης, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κ.α. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται επίσης στη βιομηχανία, σε διάφορες αγροτικές εφαρμογές, στην αφαλάτωση κτλ.

2. Παθητικά συστήματα

Τα παθητικά συστήματα αποτελούν δομικά στοιχεία του κτιρίου και λειτουργούν χωρίς μηχανολογικά εξαρτήματα ή πρόσθετη παροχή ενέργειας, αλλά με καθ' όλα φυσικό τρόπο. Αξιοποιούν τις διάφορες περιβαλλοντικές πηγές, (ήλιος, αέρας, νερό, πράσινο κ.α.) για θέρμανση, δροσισμό και φωτισμό του κτιρίου. Όσον αφορά την επίτευξη θερμικής άνεσης, ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

➤ Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης δεσμεύουν μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας θερμότητα και αφού την αποθηκεύσουν, τη διανέμουν στο χώρο. Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια του παθητικού συστήματος, η οποία είναι από διάφανο υλικό (π.χ. γυαλί), και βάσει και του φαινομένου του θερμοκηπίου εγκλωβίζεται στο εσωτερικό της επιφάνειας αυτής. Εφόσον στόχος είναι η συλλογή όσο το δυνατό περισσότερης θερμότητας, τα συστήματα αυτά πρέπει να είναι προσανατολισμένα προς το Νότο, όπου η διάρκεια της ηλιακής πρόσπτωσης σε μια τυπική μέρα του Χειμώνα είναι μεγαλύτερη συγκρίσει με τις υπόλοιπες κατευθύνσεις. Συνηθέστερη πρακτική παθητικής

θέρμανσης αποτελεί η μεγιστοποίηση ανοιγμάτων σε νότιους τοίχους (παθητικό σύστημα άμεσου κέρδους). Άλλες πρακτικές είναι οι ηλιακοί τοίχοι (Trombe, θερμοσιφωνικό πάνελ), οι ηλιακοί χώροι (θερμοκήπια) στο Νότιο τμήμα του κτιριακού κελύφους και τα ηλιακά αίθρια, που όλα αυτά αποτελούν συστήματα έμμεσου κέρδους.

➤ Παθητικά συστήματα και τεχνικές φυσικού δροσισμού

Τα παθητικά συστήματα και τεχνικές φυσικού δροσισμού, σκοπό έχουν να δροσίσουν με φυσικό τρόπο το χώρο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, ώστε να γίνει κατορθωτή η όσο το δυνατό περισσότερη μείωση της χρήσης κλιματιστικού συστήματος. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται εδώ ποικίλουν, ενώ κάποιες είναι εξαιρετικά απλές. Μια τέτοια μέθοδος είναι και η ηλιοπροστασία - σκίαση του κτιρίου με διαφόρων τύπων σκίαστρα (μόνιμα ή κινητά) και με βλάστηση που μπορεί να εξασφαλίσει μείωση του ψυκτικού φορτίου του κτιρίου μέχρι και 30%. Αρκετά αποτελεσματική τεχνική είναι επίσης και ο διαμπερής αερισμός κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπου δροσίζονται τοίχοι και πατώματα με αποτέλεσμα να μειώνεται η μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία των κτιρίων κατά 1 με 2°C. Διάφορες άλλες τεχνικές είναι ο φυσικός εξαερισμός με την απρόσκοπτη κίνηση του αέρα διαμέσου των εσωτερικών χώρων μετά βεβαίως από κατάλληλο σχεδιασμό ανοιγμάτων, ο κατακόρυφος αερισμός, η χρήση ανεμιστήρων οροφής κ.α. Υπάρχουν βέβαια και πιο σύνθετες τεχνικές που είναι όμως και πιο αποτελεσματικές όπως η ενίσχυση του φυσικού εξαερισμού με τη βοήθεια ηλιακών καμινάδων, η απόρριψη θερμότητας από το κτίριο προς στη γη με αγωγή μέσω σωλήνων εδάφους κτλ.

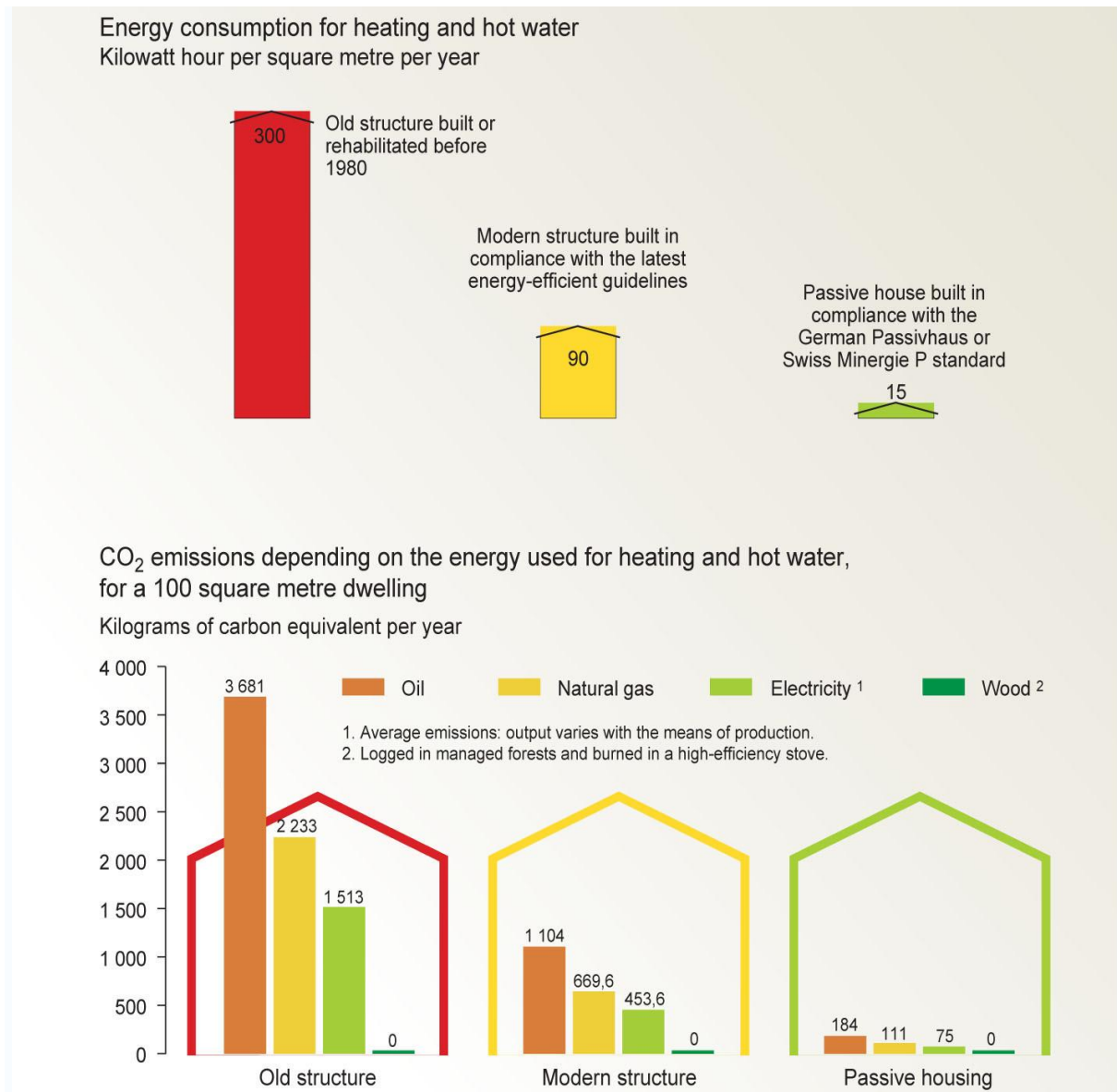
➤ Τεχνικές προστασίας κελύφους

Οι τεχνικές προστασίας κελύφους εξασφαλίζουν τη θερμική προστασία των κτιρίων κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου και αποβλέπουν στην επαρκή θερμομόνωση και αεροστεγάνωση του κτιρίου και των ανοιγμάτων του. Ένα πρόβλημα που εμφανίζεται συχνά σε αυτές τις τεχνικές είναι η μη ολοκληρωμένα καλή μόνωση σε όλα τα σημεία του κελύφους με αποτέλεσμα αυτά τα περιορισμένης μονωτικής ικανότητας σημεία να προκαλούν θερμογέφυρες, οι οποίες με τη σειρά τους μπορεί να προκαλέσουν συμπύκνωση υδρατμών στις εσωτερικές επιφάνειες. Παραδείγματα τέτοιων τεχνικών αποτελούν οι φυτεμένες οροφές και τοίχοι, η εγκατάσταση θερμομονωτικών και αεροστεγανών κουφωμάτων, η εγκατάσταση διπλών υαλοπινάκων, η αεριζόμενη τοιχοποιία κ.α

Τα οφέλη που μπορούμε να αποκομίσουμε από την εφαρμογή του βιοκλιματικού σχεδιασμού είναι πολλά. Σύμφωνα με μελέτη του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, μια καλή θερμομόνωση των εξωτερικών τοίχων θα μπορούσε να εξοικονομήσει θερμική ενέργεια μέχρι και 42% και ηλεκτρική ενέργεια για δροσισμό 24% αντίστοιχα. Αν σκεφτεί κανείς πόσες άλλες τεχνικές μπορούμε να εφαρμόσουμε στα πλαίσια του βιοκλιματικού σχεδιασμού, γίνεται αντιληπτό πόσο μεγάλη μπορεί να είναι η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας. Η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης αποτελεί από μόνη της όφελος, μιας και συμβάλλει στην άμβλυνση του ενεργειακού προβλήματος. Ταυτόχρονα η μείωση αυτή σημαίνει επίσης και ελάττωση των εκπεμπόμενων ρύπων που οφείλονται στο κτιριακό τομέα, όπου σε συνδυασμό με την αυξημένη χρήση βλάστησης που επιβάλλει ο βιοκλιματικός σχεδιασμός, αποτελούν ένα άκρως σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος. Όσον αφορά τον οικονομικό τομέα, η βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου, μειώνει αφενός το κόστος εγκαταστάσεων θέρμανσης, ψύξης και αερισμού, και αφετέρου την κατανάλωση καυσίμων αλλά και ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, ένα βιοκλιματικό κτίριο είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσφέρει ένα ποιοτικά αναβαθμισμένο και πιο υγιές περιβάλλον, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του βιοκλιματικού σχεδιασμού είναι ότι μπορούν πολλές τεχνικές του να εφαρμοστούν και σε υφιστάμενα κτίρια. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αν ληφθεί υπόψη η υπέρκορη κτιριακά κατάσταση στην οποία βρίσκονται σήμερα τα μεγάλα αστικά κέντρα και ιδιαίτερα η Αθήνα. Μπορούν να γίνουν από απλές επεμβάσεις μηδενικού κόστους, όπως η αλλαγή της συμπεριφοράς των χρηστών του κτιρίου (ορθή χρήση ανοιγμάτων κτλ), μέχρι και επεμβάσεις ανακατασκευής του κτιρίου μεγάλου κόστους με βεβαίως θεαματικά αποτελέσματα. Υπάρχουν βέβαια και ενδιάμεσες λύσεις με επεμβάσεις στο κτίριο χαμηλού κόστους (διάνοιξη ορθά προσανατολισμένων ανοιγμάτων, αυξημένη χρήση βλάστησης κτλ), οι οποίες αποσβένονται σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Η κατάσταση στην Ελλάδα σήμερα δε θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και η καλύτερη. Σύμφωνα με το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), μέχρι το 2007 υπήρχαν 176 εφαρμογές βιοκλιματικών κτιρίων, εκ των οποίων οι 2 αποτελούν οικιστικά σύνολα. Από αυτά, ο μεγαλύτερος αριθμός των κτηρίων βρίσκεται στην περιοχή της Αττικής (58) και στη Μακεδονία (41). Οι υπόλοιπες περιοχές μοιράζονται τα καταγεγραμμένα βιοκλιματικά κτήρια με ένα μέσο αριθμό (Στερεά Ελλάδα και Εύβοια 17, Κρήτη 17, Πελοπόννησος 14). Ακόμα πιο ανησυχητικά είναι τα στοιχεία του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, σύμφωνα με τα οποία από το σύνολο των κατοικιών στην Ελλάδα το 2001, μόνο το 5,1% είχαν μόνωση εξωτερικών τοίχων και μόλις το 2,1% διπλά τζάμια!



Εικόνα 1.3-3: Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO₂ μεταξύ ενός παλιού, ενός νέου και ενός παθητικού κτιρίου.⁹

2. ΠΡΑΣΙΝΟ ΣΤΗ ΠΟΛΗ

2.1 Αστικά κέντρα σε γκρι απόχρωση

Κύριο χαρακτηριστικό των τελευταίων δεκαετιών, αποτελεί η ολοένα και αυξανόμενη αστικοποίηση, η συγκέντρωση δηλαδή όλο και περισσότερου πληθυσμού στα αστικά κέντρα. Ιδιαίτερα στην Ελλάδα το φαινόμενο αυτό έχει πάρει τρομακτικές διαστάσεις, αφού με βάση την απογραφή του 2001 στην Αθήνα κατοικούν 3 361 806 άνθρωποι (το 30,75% του συνολικού πληθυσμού της Ελλάδας), σε έκταση μόλις 412 000 στρεμμάτων. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε τετραγωνικό χιλιόμετρο αντιστοιχούν περίπου 8 160 κάτοικοι!

Το φαινόμενο της συγκέντρωσης του πληθυσμού στις πόλεις, έχει οδηγήσει σε μια πυκνή, και σε μεγάλο βαθμό άναρχη οικοδομική ανάπτυξη, με αποτέλεσμα να διαμορφωθούν σήμερα πυκνοδομημένα αστικά κέντρα. Κτίρια και δρόμοι, τσιμέντο και άσφαλτος είναι πλέον κυρίαρχοι στο αστικό τοπίο, με τους ανοικτούς χώρους να έχουν συρρικνωθεί σε τεράστιο βαθμό. Το δε φυσικό περιβάλλον έχει σχεδόν εξαφανιστεί, με αποτέλεσμα οι πόλεις σήμερα να καταστούν αφιλόξενες για κάθε οικοσύστημα, ασφυκτιώντας από την έλλειψη πρασίνου. Όλα αυτά δεν είναι καθόλου υπερβολικά αν σκεφτεί κανείς ότι **στην Αθήνα σήμερα αναλογούν 2-3 τετρ. μέτρα υπαίθριου χώρου πρασίνου για κάθε κάτοικο, τη στιγμή που η αναλογία αυτή με βάσει τα διεθνή πρότυπα θα έπρεπε να ήταν 8-12 τετρ. μέτρα ανά κάτοικο!**

Το σκηνικό αυτό οδηγεί όπως είναι φυσιολογικό στην εντατικοποίηση του φαινομένου της **αστικής θερμνησίδας** (urban heat island). Βάσει του φαινομένου αυτού, η θερμοκρασία στο κέντρο μιας πόλης είναι μεγαλύτερη απ' αυτή των προαστίων και της αγροτικής περιοχής που την περιβάλλει και παρατηρείται κυρίως μετά τη δύση του ήλιου, όταν δεν υπάρχουν ισχυροί άνεμοι. Αυτό συμβαίνει για τους πιο πάνω λόγους:

1. Οι τεράστιοι όγκοι τσιμέντου που είναι απλωμένοι στις πόλεις σήμερα (κτίρια, πεζοδρόμια, δρόμοι), έχοντας μεγάλη θερμοχωρητικότητα, απορροφούν και αποθηκεύουν τεράστια ποσά ηλιακής ακτινοβολίας, την οποία αποδίδουν μετά στο περιβάλλον ως θερμότητα.
2. Τα μεγάλα ποσά θερμότητας που απορροφούν τα κτίρια αποδίδονται και στο εσωτερικό τους, με αποτέλεσμα να δημιουργούν ιδιαίτερα στους τελευταίους ορόφους συνθήκες θερμοκηπίου. Αυτό αυξάνει τις ανάγκες κλιματισμού και επομένως και τα θερμικά

απόβλητα από τις κλιματιστικές μονάδες και ως εκ τούτου αυξάνεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

3. Η παρουσία πολλών ψηλών κτιρίων δυσχεραίνει την απρόσκοπτη κίνηση του αέρα, γεγονός που αυξάνει τη θερμική δυσφορία. Η κίνηση του αέρα υπό κανονικές συνθήκες θα μπορούσε να δροσίσει τη πόλη.

Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με τις διάφορες έντονες ανθρωπογενείς δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στις πόλεις (π.χ. θερμότητα που εκπέμπεται από τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων κ.α) συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας στις πόλεις σε σχέση με τα προάστια. Η διαφορά αυτή σε μικρές πόλεις είναι μεταξύ 2-3° C, ενώ σε μεγαλύτερες πόλεις με εντονότερα φαινόμενα νησίδας, όπως η Αθήνα μπορεί να φτάσει τους 10-12° C.



Εικόνα 2.1-1: Αποτύπωση του φαινομένου της αστικής θερμνησίδας – η πορτοκαλί γραμμή παρουσιάζει τη διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα.¹⁰

Η συσσώρευση του πληθυσμού στα αστικά κέντρα με την ακατάσχετη «τσιμεντοποίηση» και συρρίκνωση του πρασίνου που έχει επιφέρει, δε θα μπορούσε να αφήσει ανεπηρέαστο τον ατμοσφαιρικό αέρα. Το **φαινόμενο του θερμοκηπίου** είναι ιδιαίτερα έντονο πάνω από τις πόλεις με αποτέλεσμα η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα που αναπνέουμε να έχει υποβαθμιστεί σε μεγάλο βαθμό. Και αυτό γιατί:

1. Οι επίπεδες γυμνές ταράτσες κυρίως, καθώς επίσης και τα πεζοδρόμια και οι δρόμοι δημιουργούν συνθήκες έντονης ηλιακής αντανάκλασης.
2. Η συγκέντρωση τεράστιου αριθμού οχημάτων αυξάνει τις εκπομπές ρύπων.
3. Υπάρχει έλλειψη πρασίνου που θα μπορούσε να φιλτράρει τον ατμοσφαιρικό αέρα, δεσμεύοντας CO₂ και απελευθερώνοντας O₂.
4. Η παρεμπόδιση της ελεύθερης κίνησης του αέρα λόγω της πυκνής και υψηλής δόμησης, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, δυσχεραίνει την ανανέωση του αέρα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συγκέντρωση των ρύπων.

Ένα άλλο φαινόμενο που εμφανίζεται στις πόλεις είναι και οι συχνές πλημμύρες. Μια μικρή βροχή είναι ικανή σε αρκετές περιπτώσεις να δημιουργήσει πλημμυρικά φαινόμενα, προκαλώντας προβλήματα στη καθημερινότητα της πόλης. Σύμφωνα με μελέτη του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών, όσοι υπόνομοι όμβριων υδάτων και αν

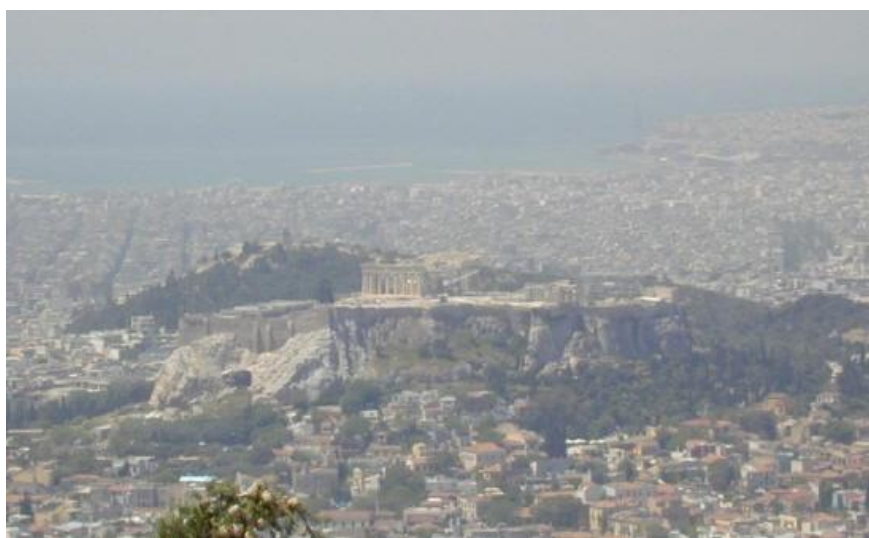
κατασκευαστούν δεν πρόκειται να λυθούν τα πλημμυρικά φαινόμενα της Αθήνας γιατί η πόλη αποτελεί σήμερα μια επίπεδη τσιμεντένια λεκάνη (αδιαπέραστη επιφάνεια) χωρίς χώρους απορρόφησης υδάτων (ρέματα, ακάλυπτους χώρους, ζώνες πρασίνου κ.α.). Μετά δε και από το «μπάζωμα» των ποταμών της πόλης, του Κηφισού και του Ιλισού, το πρόβλημα αυτό έχει οξυνθεί ακόμη πιο πολύ.

Ίδιαίτερα στην Αθήνα, όλα τα παραπάνω προβλήματα εμφανίζονται σε μια ακραία μορφή, μετά και από τις πυρκαγιές των τελευταίων χρόνων που έχουν απογυμνώσει τους ορεινούς όγκους του Λεκανοπεδίου. Η απανθράκωση ιδιαίτερα του Εθνικού Δρυμού της Πάρνηθας έχει οδηγήσει κατ' αρχάς στην αύξηση των θερμοκρασιών στην Αττική, μιας και ο αέρας που έπνεε στο Λεκανοπέδιο προερχόταν από το δάσος και για αυτό ήταν 8-10°C δροσερότερος σε σχέση με τον υπαίθριο χώρο. Το καμένο δάσος επίσης έχει χάσει την ικανότητά του στην απορρόπηση του ατμοσφαιρικού αέρα και πλέον η Πάρνηθα δεν είναι σε θέση να φιλτράρει το νέφος του Λεκανοπεδίου. Τέλος, οι πυρκαγιές έχουν συντελέσει στην διάβρωση του εδάφους και λόγω της επιφανειακής απορροής, η Αθήνα πλέον είναι πολύ πιο ευάλωτη σε πλημμύρες.

Όσον αφορά δε τις προσπάθειες που γίνονται για βιοκλιματικό σχεδιασμό των κτιρίων για την αποφόρτιση των πόλεων από τα προβλήματα που έχουν αναφερθεί, αυτές δε μπορούν να προσφέρουν θεαματικά αποτελέσματα. Αυτό κατ' αρχάς οφείλεται στο γεγονός ότι οι πόλεις σήμερα έχουν φτάσει σε ένα κορεσμένο επίπεδο δόμησης. Έτσι δε χτίζονται νέα κτίρια που θα μπορούσαν εξ αρχής να σχεδιαστούν βάσει της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής, με αποτέλεσμα όλες πλέον οι ενέργειες να περιορίζονται σε επεμβάσεις στα υφιστάμενα κτίρια. Ανασταλτικός παράγοντας επίσης στην εφαρμογή τεχνικών βιοκλιματικού σχεδιασμού αποτελεί και η ίδια η πυκνή δόμηση. Συγκεκριμένα, η πολύ πυκνή αυτή δόμηση δεν επιτρέπει την αξιοποίηση των κάθετων επιφανειών των κτιρίων για παθητικές ηλιακές τεχνικές. Ακόμη και η απλούστερη τεχνική, αυτή του φυσικού εξαερισμού, δεν είναι πάντα εφαρμόσιμη δεδομένου ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση και ο θόρυβος σε ένα αστικό περιβάλλον οδηγούν δημιουργούν την ανάγκη για αεροστεγή κτίρια.

Γίνεται ξεκάθαρο ότι η ποιότητα ζωής στις περισσότερες πόλεις σήμερα έχει υποβαθμιστεί αρκετά. Πόλεις άσχημες και ασύμμετρες, πόλεις με πυκνή δόμηση, ψηλά κτίρια, στενούς δρόμους, χωρίς πλατείες και ελεύθερους χώρους συνθέτουν μια αποκρουστική εικόνα. Κι αν όλα τα παραπάνω ακούγονται υπερβολικά για τις πόλεις της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης των πάρκων και των ποδηλατοδρόμων, σίγουρα δε μπορούμε να ισχυριστούμε κάτι τέτοιο και για τις ελληνικές πόλεις. Οι επιπτώσεις της κατάστασης αυτής καταστροφικές. Η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, η ρύπανση και οι

πλημμύρες έχουν το δικό τους μερίδιο ευθύνης στην έξαρση των διαφόρων ασθενειών στις τάξεις των κατοίκων των πόλεων. Αναπνευστικές παθήσεις (άσθμα κτλ), κόπωση, αδιαθεσίες, πονοκέφαλοι, νευρική κατάσταση είναι μερικά από τα προβλήματα που βιώνουν εντονότερα οι κάτοικοι στις πόλεις. Προβλήματα που πλήττουν ιδιαίτερα τα μικρομεσαία στρώματα της κοινωνίας, αφού λόγω χαμηλού εισοδήματος κατοικούν σε ακατάλληλα κτίρια, χωρίς θερμική προστασία και αερισμό. Η υιοθέτηση μέτρων και η ανάληψη ενεργειών, τέτοιων ώστε να δοθούν αποτελεσματικές λύσεις είναι πλέον επιτακτική ανάγκη. Είτε βραχυπρόθεσμα, είτε μακροπρόθεσμα τα μέτρα και οι ενέργειες αυτές δε μπορούν και δε γίνεται να μην στοχεύουν και στην επέκταση των χώρων πρασίνου με κάθε τρόπο.



Εικόνα 2.1-2: Νέφος πάνω από το πυκνοδομημένη Αθήνα.

2.2 Αναγεννώντας τις πόλεις με πράσινο

Όσα άλματα και αν έχει κάνει τα τελευταία χρόνια η επιστήμη, όσα επιτεύγματα κι αν έχει επινοήσει ο ανθρώπινος νους, τίποτε δε πρόκειται ποτέ να καταφέρει να υποκαταστήσει τη βλάστηση. Τα οφέλη ειδικά που μπορούν να αποκομίσουν από το πράσινο τα σύγχρονα αστικά κέντρα, έτσι όπως αυτά έχουν οικοδομηθεί με βάση και με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.1, είναι χωρίς υπερβολή ζωτικής σημασίας. Αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

Α. Περιβαλλοντικά

(1) Μια σειρά από φυσικές λειτουργίες και γενικά ιδιότητες των φυτών συμβάλλουν αποτελεσματικά στο άμβλυνση του φαινομένου της αστικής θερμνησίδας κυρίως, αλλά και στη γενικότερη ρύθμιση του αστικού κλίματος καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

- Σπουδαία λειτουργία αποτελεί η **εξατμισοδιαπνοή** (evapotranspiration), όπου υδρατμοί αποβάλλονται από τους πόρους των φύλλων κατά τη διαπνοή των φυτών και στη συνέχεια εξατμίζονται στον αέρα. Με τη διαδικασία αυτή μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα, δροσίζοντας έτσι τα φύλλα και τον περιβάλλοντα αέρα. Ένα ώριμο δέντρο φυτοκάλυψης 9m^2 διαπνέει περίπου 150 λίτρα νερό τη ημέρα. Η εξατμισοδιαπνοή του μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της περιβάλλουσας του θερμοκρασίας από 1°C μέχρι 5°C .



Εικόνα 2.2-1: Η λειτουργία της διαπνοής.¹¹

- Μεγάλη προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία προσφέρεται στις διάφορες επιφάνειες (τοιχοί, πεζοδρόμια, χώροι στάθμευσης) από τη **σκίαση**. Έτσι αποτρέπεται κατά μεγάλο βαθμό η θέρμανσή τους, αλλά και η ηλιακή αντανάκλαση και επομένως και η επανακτινοβολία. Με βάση το Υπουργείο Γεωργίας των Η.Π.Α., κάθε αύξηση της φυτικής κάλυψης κατά 1% οδηγεί στη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας κατά τις μεσημβρινές ώρες κατά 0.04°C μέχρι 0.2°C .

- Η ελάττωση της θερμοκρασίας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, μειώνουν τις ώρες και την ένταση λειτουργίας των κλιματιστικών μονάδων με αποτέλεσμα να μειώνονται και τα θερμικά απόβλητα.

- Τα δέντρα, έπειτα από κατάλληλη χωροταξικά φύτευση μπορούν να λειτουργήσουν σαν ανεμοφράκτες, μειώνοντας τη ταχύτητα του ανέμου. Έτσι αποδυναμώνεται ένας σημαντικός ψυκτικός παράγοντας κατά τους χειμερινούς μήνες.

(2) Η αστική βλάστηση είναι η πιο αξιόπιστη λύση στην αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, συμβάλλοντας στον καθαρισμό και βελτίωση της ποιότητας του αέρα που αναπνέουμε. Συγκεκριμένα:

- Αέριοι ρύποι, όπως τα οξειδία αζώτου (NO_x), το διοξείδιο του θείου (SO_2), το μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα (CO και CO_2) και το όζον (O_3), απορροφούνται από τους πόρους των φύλλων (stomata) κατά τη φυσική λειτουργία της αναπνοής. Μόνο το 1994, τα δέντρα της Νέας Υόρκης δέσμευσαν περίπου 1.821 τόνους της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της πόλης.
- Τα φυτά παρεμποδίζουν και επιβραδύνουν την κίνηση των αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ όταν τα σωματίδια αυτά κατακαθίσουν στις επιφάνειες των φύλλων «ξεπλένονται» με τη βροχή με αποτέλεσμα να καταλήγουν στο χώμα.
- Απελευθέρωση οξυγόνου μέσω της φωτοσύνθεσης. Είναι ενδεικτικό ότι ένα στρέμμα δέντρων παράγει το απαιτούμενο για 18 ανθρώπους ημερήσιο οξυγόνο.
- Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται με τη βλάστηση όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα γιατί η εκπομπή αρκετών ρύπων, καθώς και τα επίπεδα του όζοντος είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενα.
- Η μειωμένη θερμοκρασία μειώνει τη κατανάλωση ενέργειας για σκοπούς ψύξης λόγω μειωμένων ψυκτικών αναγκών με αποτέλεσμα να ελαττώνονται και οι εκπομπές των ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών.

(3) Η βλάστηση στις πόλεις βοηθά στο περιορισμό των πλημμυρικών φαινομένων, αλλά και στη βελτίωση της ποιότητας του νερού.

- Τα φύλλα κυρίως, αλλά και οι υπόλοιπες επιφάνειες των δέντρων αποτελούν μικρές δεξαμενές αποθήκευσης του νερού της βροχής, ενώ μεγάλες ποσότητες νερού δεσμεύονται από τα φυτά για τις βιολογικές τους ανάγκες. Έτσι μειώνεται ο όγκος απορροής και ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος πλημμύρας. Μελέτη στη Μεγάλη Βρετανία έχει υποδείξει ότι για κάθε αύξηση 5% της περιοχής φυτικής κάλυψης σε μια πόλη, η απορροή μειώνεται κατά 2%.
- Οι ρίζες των φυτών μειώνουν την διάβρωση του εδάφους.
- Η παρουσία του φυλλώματος αφενός παρεμποδίζει τη πτώση της βροχής και αφετέρου παρέχοντας σκίαση αποτρέπει τη ξήρανση του εδάφους. Έτσι, το νερό της βροχής πέφτει με μειωμένη ταχύτητα σε ένα πλούσιο χώμα χωρίς διακενώσεις και ρήγματα, με αποτέλεσμα να υπόκειται σε καλύτερη διήθηση. Το γεγονός αυτό συμβάλλει στη προστασία της ποιότητας του νερού.

(4) Τα φυτά μπορούν να αποτελέσουν ένα καλό φυσικό ηχομονωτή, περιορίζοντας έτσι την ηχορύπανση που ταλαιπωρεί τις πόλεις. Τα φύλλα και τα κλαδιά των φυτών έχουν την ικανότητα να αντανακλούν και να απορροφούν τα ηχητικά κύματα. Κάθε 33 τετρ. μέτρα φυτοκάλυψης μπορούν μειώσουν την ένταση του μέχρι και 7dB.

(5) Οι εστίες πρασίνου μέσα σε μια πόλη αποτελούν καταφύγιο για πτηνά και έντομα, βοηθώντας έτσι στη προστασία του οικοσυστήματος.

Β. Οικονομικά

(1) Η άμβλυση του φαινομένου της αστικής θερμονησίδας το καλοκαίρι και η προστασία από τους ισχυρούς ψυχρούς ανέμους το χειμώνα, μειώνουν τις ενεργειακές ανάγκες για επίτευξη θερμικής άνεσης. Μελέτη του LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory – εργαστήριο του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α.) αναφέρει ότι με την αύξηση της φυτοκάλυψης κατά 20%, επιτυγχάνεται ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη από 8% ως 18% και για θέρμανση 2% με 8%. Η μείωση αυτή συνεπάγεται με μια μεγάλη οικονομική ανακούφιση τόσο για τον άμεσο καταναλωτή, όσο και για το κράτος.

(2) Η κάλυψη ενός κτιρίου με βλάστηση ή ακόμα και η παρουσία και μόνο ενός αστικού πάρκου κοντά στο κτίριο, αυξάνει την αγοραστική αξία του ακινήτου. Έρευνα στις Η.Π.Α αναφέρει ότι η αξία μιας οικίας που βρίσκεται σε συνοικία με παρουσία πρασίνου μπορεί να είναι και κατά 6% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε κάποια άλλη περιοχή χωρίς πράσινο.

(3) Οι καταναλωτές προτιμούν για τις αγορές τους εξωραϊσμένους με δέντρα δρόμους και καλυμμένους με πράσινο χώρους στάθμευσης. Η παρουσία λοιπόν των δέντρων σε τέτοια μέρη φαίνεται να είναι μια καλή επένδυση.

Γ. Κοινωνικά

(1) Η αποφόρτιση της έντασης του φαινομένου της αστικής θερμονησίδας, σε συνδυασμό με την αναβάθμιση της ποιότητας του αέρα, βελτιώνουν την ποιότητα της ζωής των κατοίκων. Ελαττώνονται έτσι παθήσεις που σχετίζονται με τις ακραίες καιρικές συνθήκες (θερμοπληξίες, δυσφορία κτλ), καθώς και αναπνευστικά προβλήματα που εμφανίζονται περισσότερο στις πόλεις.

(2) Η παρουσία του πρασίνου αναζωογονεί σώμα και πνεύμα, τονώνοντας τις σωματικές και πνευματικές δυνάμεις. Σύμφωνα με τον Αμερικανό ψυχίατρο Δρ Rachel Kaplan οι εργαζόμενοι γραφείων που μπορούν να δουν τη φύση από τα γραφεία τους είναι πιο αποδοτικοί και απουσιάζουν λόγω ασθένειας 23% λιγότερο χρόνο από αυτούς που δεν μπορούν. Ο δε Γερμανός επιστήμονας Ulrich ισχυρίζεται ότι οι ασθενείς οι οποίοι από το δωμάτιο του νοσοκομείου που νοσηλεύονται βλέπουν πράσινο, αναρρώνουν ταχύτερα έπειτα από μια εγχείρηση από αυτούς που βλέπουν ένα τοίχο. Άγχος, πίεση, νεύρα, εντάσεις μπορούν να περιοριστούν μέσα σε μια πράσινη και βιώσιμη πόλη.

(3) Οι χώροι πρασίνου στις πόλεις αποτελούν σημείο συνάντησης και συνεπώς και κοινωνικοποίησης των αποξενωμένων κατοίκων μιας πόλης, καθώς και χώρος ψυχαγωγίας και εκτόνωσης για τα παιδιά.

Γίνεται αντιληπτό ότι η παρουσία της βλάστησης μέσα στα αστικά κέντρα είναι κάτι παραπάνω από απαραίτητη. Οι πόλεις ασφυκτιούν, οι κάτοικοί τους απλά επιβιώνουν και καθημερινά ξοδεύονται τεράστια ποσά ενέργειας για να κάνουν τη κατάσταση πιο υποφερτή. Διέξοδο αποτελεί η επέκταση των χώρων πρασίνου μέσα στις πόλεις. Για να γίνει όμως αυτό, χρειάζονται από τη μια τολμηρές πολιτικές και από την άλλη έξυπνες και αποτελεσματικές λύσεις, μιας και η «επαναφορά» της φύσης στα σημερινά αστικά κέντρα, αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα. Ένας από τους λιγοστούς πλέον τρόπους παρέμβασης, είναι η **φυτεμένης οροφή** στα κτίρια.



Εικόνα 2.2-2: Μόνη διέξοδος για να αναπνεύσουν οι πόλεις σήμερα είναι η επέκταση του πρασίνου, ακόμα και στις οροφές των κτιρίων.¹²

3. ΦΥΤΕΜΕΝΗ ΟΡΟΦΗ

3.1 Τι είναι

Οι φυτεμένες ή πράσινες οροφές ή δώματα (**green** ή **planted roof**) είναι μια τεχνική παθητικής προστασίας κελύφους, βάσει της οποίας η ταράτσα ενός κτιρίου καλύπτεται πλήρως ή μερικώς από χώμα και βλάστηση. Εκμεταλλευόμενοι έτσι τις δυο σπουδαίες ικανότητες της βλάστησης, τη σκίαση και την εξατμισοδιαπνοή, επιτυγχάνεται η θερμική προστασία του κτιρίου. Η τεχνική αυτή δεν περιλαμβάνει τους κοινούς διακοσμητικούς ταρατσόκηπους (roof garden) και γενικά την τοποθέτηση γλαστρών στη ταράτσα για σκοπούς αισθητικής, μιας και τα θερμικά οφέλη σε αυτές τις περιπτώσεις είναι μηδαμινά. Οι φυτεμένες οροφές μπορούν να εγκατασταθούν σε ένα ευρύ φάσμα κτιρίων, συμπεριλαμβανομένων βιομηχανικών, δημόσιων, εμπορικών, καθώς και σε κατοικίες. Σήμερα αποτελεί μια διαδεδομένη τεχνική, κυρίως στις Η.Π.Α, την Ιαπωνία, τη Γερμανία και τη Σουηδία.

3.2 Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη ιστορική αναφορά για φυτεμένα δώματα μας μεταφέρει 1500 περίπου χρόνια πριν, όταν ο τότε βασιλιάς της Βαβυλωνίας Ναβουχοδονόσορ ΙΙ (600-562 π.Χ.) κατασκεύασε τους κρεμαστούς κήπους της Βαβυλώνας. Ιστορικοί επιστήμονες υποστηρίζουν ότι ο σκοπός του έργου αυτού ήταν η λύση στο πρόβλημα της δραματικής ετήσιας πλημμύρας στην κοιλάδα μεταξύ των ποταμών Τίγρη και Ευφράτη. Κάλυπταν έκταση 1-1,5 εκταρίου και ήταν κτισμένοι σε αναβαθμίδες οι οποίες είχαν 3,5m πλάτος και 5m ύψος, περιλαμβάνοντας θάμνους και δέντρα.

Κατά τα χρόνια της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, φυτεμένες οροφές συναντούμε στη Villa Diomedes στην Πομπηία και στο σπίτι του Αυγούστου (28 π.Χ.) στη Ρώμη, ενώ κάποιους αιώνες αργότερα γύρω στο 500 μ., ο Βυζαντινός Αυτοκράτορας Ιουστινιανός είχε τοποθετήσει φυτά σε εξώστες. Κατά περίοδο της Αναγέννησης η χρήση φυτών αναζωογονείται. Αναφέρεται χαρακτηριστικά το παράδειγμα του Δούκα της Τοσκάνης Cosimo de Medici, ο οποίος κοντά στο 1400 έκτισε έναν οροφόκηπο στην βίλα του στη Φλωρεντία. Σιγά σιγά η τεχνική (μάλλον μόδα για την εποχή) επεκτάθηκε στην Κεντρική

Ευρώπη, όπου αναφέρεται η κατασκευή οροφώκηπου στη κατοικία του Γερμανού Καρδινάλιου Johann van Lamberg (1689-1712).

Το 1867 αποτελεί χρονιά ορόσημο στην ιστορία των φυτεμένων οροφών. Ο Γερμανός κατασκευαστής Carl Rabbitz (1825-91) παρουσίασε στην Παγκόσμια Έκθεση του Παρισιού ένα μοντέλο φυτεμένης οροφής που είχε στο σπίτι του στο Βερολίνο. Για πρώτη φορά έτσι παρουσιάζεται εφαρμογή της τεχνικής αυτής σε οικιστικό κτίριο, σε περιοχή μάλιστα με παγερούς και υγρούς χειμώνες. Τοποθετώντας βουλκανισμένη άσφαλτο, πέτυχε η επίπεδη αυτή οροφή να είναι απόλυτα υδατοστεγανή. Μετά και από την εξέλιξη αυτή, Γερμανοί αρχίζουν να φτιάχνουν φυτεμένες οροφές στις κατοικίες τους για λόγους πυροπροστασίας.

Η τεχνική της φυτεμένης οροφής επανήλθε σε μια πιο επιστημονική βάση στις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα από τους αρχιτέκτονες Le Corbusier (1887-1965) και Frank Lloyd Wright (1867-1959). Μετά την έξαρση του οικολογικού ρεύματος στις αρχές της δεκαετίας του 1960, με το βιοκλιματικό σχεδιασμό κτιρίων και την οικολογική δόμηση, οι φυτεμένες οροφές έχουν μπει για τα καλά στο κτιριακό σχεδιασμό. Στις μέρες, τα παραδείγματα φυτεμένων δωματίων σε Ευρώπη, Βόρεια Αμερική και Ιαπωνία κυρίως ολοένα και πληθαίνουν.

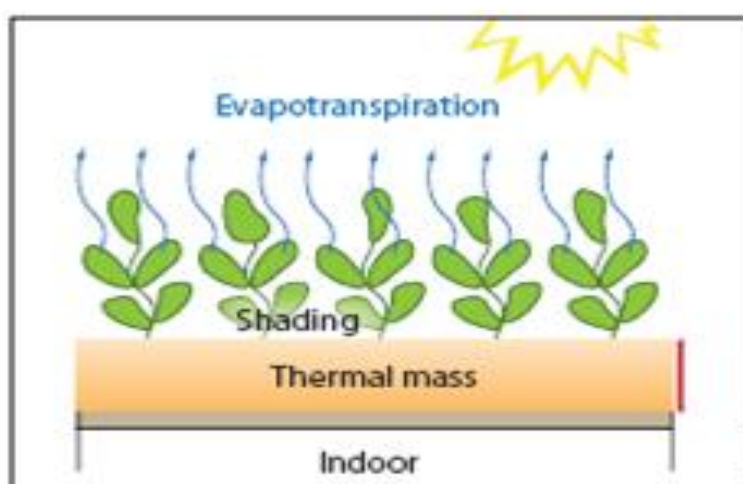
3.3 Αρχές λειτουργίας

Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 3.1 οι φυτεμένες οροφές είναι μια τεχνική παθητικής προστασίας κελύφους. Η εφαρμογή έτσι της τεχνικής αυτής προσφέρει στο κτίριο θερμική προστασία, κυρίως κατά του καλοκαιρινούς μήνες. Κατά τη περίοδο αυτή, η σκίαση και η εξατμισοδιαπνοή μπορούν υπό προϋπόθεση να προσφέρουν όχι μόνο καλύτερη θερμική μόνωση, αλλά και παθητική ψύξη.

Μέσω της σκίασης ένα δέντρο επιτρέπει μόνο ένα ποσοστό 10% με 30% της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας να φτάσει στην περιοχή του εδάφους που καλύπτει. Έτσι σε μια φυτεμένη οροφή, η θερμοκρασία στο ανώτερο στρώμα της κατασκευής είναι αρκετά μειωμένη από ότι θα ήταν σε μια γυμνή ταράτσα. Από την άλλη, η λειτουργία της εξατμισοδιαπνοής δημιουργεί συνθήκες εξατμιστικής ψύξης με αποτέλεσμα να δροσίζεται ο αέρας που περιβάλλει την οροφή του κτιρίου και να βελτιώνεται έτσι το μικροκλίμα της περιοχή που περιβάλλει την οροφή. Αν ληφθεί υπόψη και η αύξηση της θερμοχωρητικότητας της οροφής σε σχέση με μια συμβατική, λόγω της μεγάλης θερμικής μάζας των κηπευτικών

στρώσεων, ο συνδυασμός αυτός οδηγεί σε μια μεγάλη μείωση, ακόμα και μηδενισμό της θερμότητας που μεταδίδεται μέσω της οροφής εντός του κτιρίου.

Τι γίνεται όμως το χειμώνα όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι επιθυμητή; Κατ' αρχάς, η πτώση του φυλλώματος των δέντρων κατά τους χειμερινούς μήνες εξασθενεί τη σκίαση, επιτρέποντας την ηλιακή ακτινοβολία να περάσει μέχρι και κατά 80%. Παράλληλα, αρνητικά επηρεάζεται και η εξατμισοδιαπνοή, αφού αφενός η διαπνοή διενεργείται από τους πόρους των φύλλων και αφετέρου η εξάτμιση γίνεται με λιγότερη ένταση λόγω μειωμένης έντασης και χρόνου ακτινοβολίας. Πέραν τούτου, η παρουσία φυτών στην οροφή του κτιρίου μειώνει όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2 την ταχύτητα των ψυχρών ανέμων, ενώ η ίδια η κατασκευή με τις ιδιότητες των στρωμάτων της (αναφορά παρακάτω) αυξάνει τη μονωτική ικανότητα της οροφής, κυρίως όμως σε περιοχές με έντονους παγερούς χειμώνες όπου για μεγάλο διάστημα οι οροφές είναι απλωμένες με χιόνι.

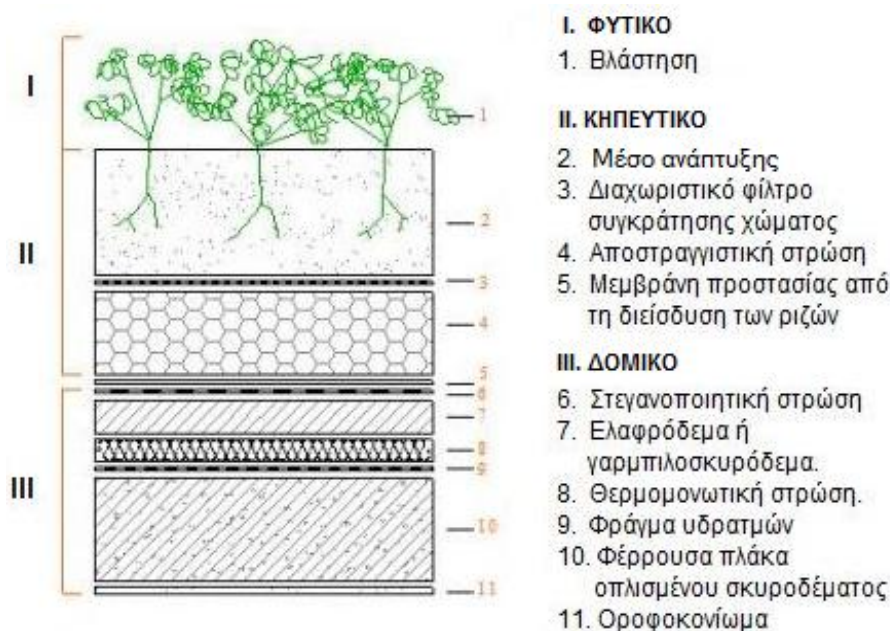


Εικόνα 3.3-1: Η σκίαση προστατεύει την οροφή από την ηλιακή ακτινοβολία και η εξατμισοδιαπνοή δροσίζει το στρώμα αέρα πάνω από την κατασκευή.

Γενικά οι μονωτικές ιδιότητες μια πράσινης στέγης ποικίλουν κατά τη διάρκεια του χρόνου μιας και πρόκειται για παθητικά συστήματα, των οποίων η συμπεριφορά και απόδοση εξαρτάται άμεσα από τις κλιματολογικές συνθήκες της κάθε εποχής.

3.4 Διαστρωμάτωση

Η κατασκευή μιας φυτεμένης οροφής ποικίλει, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις ανάγκες του κτιρίου, το τοπικό κλίμα και το ποσό που είναι διατεθειμένος να επενδύσει ο ιδιοκτήτης. Ωστόσο, όπως και να είναι η τελική μορφή μιας κατασκευής, μια φυτεμένη οροφή χωρίζεται σε τρία κύρια τμήματα, το **φυτικό**, το **κηπευτικό** και το **δομικό** τμήμα. Πιο κάτω παρουσιάζεται αναλυτικότερα μια συνήθης επιμέρους διαστρωμάτωση μιας τυπικής φυτεμένης οροφής:



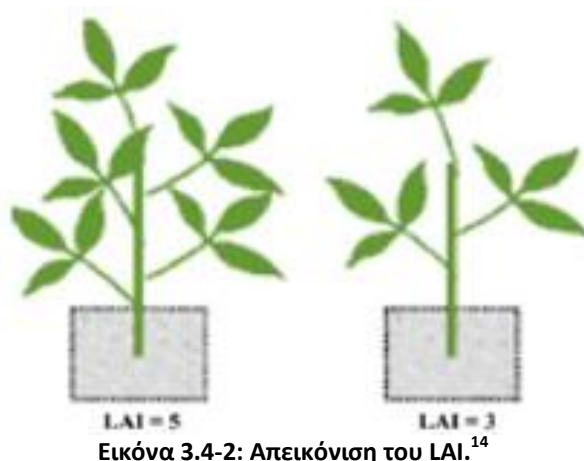
Εικόνα 3.4-1: Τυπική διαστρωμάτωση μια φυτεμένης οροφής.¹³

I. Φυτικό

Αποτελεί το ανώτερο τμήμα της κατασκευής και δεν είναι τίποτα άλλο παρά η ίδια η **βλάστηση**. Το είδος των φυτών που χρησιμοποιούνται εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον τύπο της κατασκευής, εκτενούς ή εντατικού τύπου (αναφορά παρακάτω) και τις τοπικές κλιματολογικές και καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία, βροχόπτωση, υγρασία ταχύτητα ανέμων κ.α.), καθώς επίσης και από διάφορους άλλους παράγοντες όπως η θέση και το ύψος του κτιρίου, η ατμοσφαιρική ρύπανση κτλ. Όπως έχει αναφερθεί, οι σημαντικότερες λειτουργίες που στηρίζει την αποτελεσματικότητά της η τεχνική της φυτεμένης οροφής είναι η σκίαση και η εξατμισοδιαπνοή. Οι δυο αυτές λειτουργίες εξαρτώνται κυρίως από τις ακόλουθες πέντε παραμέτρους:

- Ύψος της βλάστησης.

- Δείκτης έκτασης φύλλων (leaf area index – LAI). Παρουσιάζει τη πυκνότητα της βλάστησης. Αν για παράδειγμα το μέσο τεμάχιο της ταράτσας καλύπτεται από δύο φύλλα η τιμή του LAI είναι 2. Γενικά, οι τιμές του για φυτεμένες οροφές κυμαίνονται μεταξύ 0.5 - 5.
- Κλασματική φυτοκάλυψη. Αντιπροσωπεύει το μέρος της επιφάνειας της οροφής που καλύπτεται άμεσα από ένα ή περισσότερα φύλλα, προς την ολική έκταση της ταράτσας.
- Albedo. Είναι ο βαθμός ανακλαστικότητας μιας επιφάνειας στην ηλιακή ακτινοβολία. Η τιμή του για τα φυτά κυμαίνεται από 0.1 μέχρι 0.25.
- Αντίσταση στομάτων (stomatal resistance). Είναι μια βιοφυσική παράμετρος των φύλλων και αντιπροσωπεύει το ποσοστό υγρασίας που αποβάλλεται από τους πόρους του φύλλο μέσω της διαπνοής για συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος.



II. Κηπευτικό

Είναι ουσιαστικά ο κήπος της κατασκευής και περιλαμβάνει:

1. Μέσο ανάπτυξης.

Αποτελεί έναν ελαφρύ σε μάζα συνδυασμό άμμου, αδρανούς και ενόργανης ύλης. Συγκεκριμένα, αποτελείται συνήθως από ένα ποσοστό κοντά στο 80% από ελαφρά σε μάζα ανόργανα ορυκτά υλικά και 20% οργανικά υλικά. Οι βασικές προδιαγραφές που πρέπει να τηρεί το χώμα φύτευσης είναι να παρέχει την καλύτερη δυνατή υποστήριξη στα φυτά επιτρέποντας την ανάπτυξη ριζών, με την μικρότερη δυνατή μάζα, να μπορεί να προσαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε ενώ μεγιστοποιείται η διατήρηση νερού, να μην εμφανίζονται πλημμυρικά φαινόμενα (καλή υδατοπερατότητα) και τέλος να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, ικανή να αντέξει για όσο επιθυμείται η φυτοκάλυψη της οροφής. Η ποιότητα

του χώματος φύτευσης και εν γένει η συμπεριφορά του καθορίζεται κυρίως από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Θερμική αγωγιμότητα k , με τυπική τιμή για το χώμα είναι $k=1,2 \text{ W/m}^\circ\text{K}$.
- Ειδική θερμοχωρητικότητα c_p με τυπική τιμή για το χώμα κοντά στο $c_p=0.8 \text{ J/g}^\circ\text{K}$.
- Πυκνότητα με τυπική τιμή για το χώμα κοντά στο $\rho=600 \text{ kg/m}^3$.
- Πάχος. Και εδώ ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από τον τύπο της κατασκευής μιας και το πάχος του χώματος το καθορίζει μεταξύ άλλων και το είδος των φυτών. Γενικά η τιμή του κυμαίνεται από 8-100cm.

2. Διαχωριστικό φίλτρο συγκράτησης χώματος.

Είναι μια μεμβράνη, συνήθως από υαλώδεις ίνες (υαλουφάσματα) ή ίνες πολυπροπυλενίου (γεωυφάσματα) που σκοπό έχει να εμποδίσει το χώμα να περάσει στην αποστραγγιστική στρώση, δυσχεραίνοντας έτσι τη λειτουργία της. Ωστόσο η μεμβράνη αυτή επιτρέπει τη ροή του επιπλέον νερού που βρίσκεται στο χώμα να περάσει.

3. Αποστραγγιστική στρώση.

Αποτελείται συνήθως από διογκωμένη άργιλο, χαλίκια, ελαφρόπετρα ή κόκκους περλίτη και έχει πάχος 5-25cm, ανάλογα με τον τύπο της κατασκευής. Βοηθά το πλεονάζων νερό που βρίσκεται στο χώμα να ρεύσει προς τις υδρορροές της στέγης. Ο ρόλος της είναι ιδιαίτερα σημαντικός μιας και αποτρέπει με τον τρόπο αυτό την υπερφόρτωση της στέγης και τη πρόκληση προβλημάτων στις ρίζες λόγω της υπερβολικής παρουσίας του νερού, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την επιθυμητή περιεκτικότητα του χώματος σε υγρασία.

4. Μεμβράνη προστασίας από τη διείσδυση των ριζών.

Η μεμβράνη αυτή εμποδίζει τη διείσδυση των ριζών στα κατώτερα στρώματα της κατασκευής, οι οποίες μπορούν να διαπεράσουν τη στεγανοποιητική στρώση και να προκαλέσουν διαρροές.

III. Δομικό

Αποτελεί το υπόβαθρο της κατασκευής και περιλαμβάνει:

1. Στεγανοποιητική στρώση.

Προστατεύει το κτίριο από τη διείσδυση νερού και αποτελείται από ασφαλικές μεμβράνες (ασφαλτόπανα), οι οποίες είναι επικολημένες πάνω σε ένα σταθερό υπόστρωμα ή από συνθετικές μεμβράνες που απλώς τοποθετούνται και είναι κολλημένες μεταξύ τους.

2. Ελαφρόδεμα ή γαρμπιλοσκυρόδεμα.

Είναι λεπτό, ημισυμπαγές στρώμα που χρησιμεύει ως στρώση κλίσεων και ως σταθερό υπόστρωμα για τη συγκόλληση των ασφαλτόπανων. Τοποθετείται μόνο εάν η στεγανοποιητική στρώση είναι από ασφατικές μεμβράνες.

3. Θερμομονωτική στρώση.

Είναι πάχους 5cm και συμβάλλει και αυτή στην θερμική προστασία. Η αξία της αυξάνεται με την μείωση της υγρασίας στο χώμα.

4. Φράγμα υδρατμών.

Είναι ένα φύλλο πλαστικού ή φύλλα αλουμινίου που εμποδίζει την διείσδυση της υγρασίας στο ταβάνι.

5. Φέρρουσα πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος.

Εδώ χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, μιας και η μάζα μιας φυτεμένης οροφής μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 550 kg/m². Επομένως απαραίτητη προϋπόθεση πριν την εγκατάσταση μιας φυτεμένης οροφής είναι η στατική μελέτη και ο έλεγχος αντοχής της οροφής του κτιρίου στα πρόσθετα φορτία.

6. Οροφοκονίαμα.

3.5 Τύποι

Οι φυτεμένες οροφές διακρίνονται κυρίως σε δυο τύπους, τον **εκτατικό** (extensive) και **εντατικό** (intensive) τύπο.

I. Εκτατικός τύπος

Ο εκτατικός τύπος φυτεμένης οροφής αποτελεί την απλούστερη εφαρμογή της τεχνικής αυτής. Βασική επιδίωξη είναι ο σχεδιασμός μιας απλής και οικονομικής κατασκευής, με όσο το δυνατό μειωμένη συντήρηση.

Λόγω του γεγονότος ότι τα φυτά που χρησιμοποιούνται δεν έχουν μεγάλες ανάγκες συντήρησης (λίπασμα, ψεκασμοί, κλάδεμα), ο εκτατικός τύπος προορίζεται σε μη προσβάσιμες στέγες. Επίσης, δεν έχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις άρδευσης και για αυτό σε ορισμένες περιπτώσεις παραλείπεται η τοποθέτηση αρδευτικού συστήματος. Έτσι, για τους δυο παραπάνω λόγους, ο εκτατικός τύπος μπορεί να χαρακτηριστεί και ως

«αυτοϋποστηριζόμενος». Ένα άλλο χαρακτηριστικό των φυτών που χρησιμοποιούνται είναι ότι είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ακραία καιρικά φαινόμενα (ξηρασία, ψύχος), καθιστώντας τις εκτατικές στέγες ιδανικές για τη περιοχή μας. Τέλος, όπως φαίνεται από τον πιο πάνω πίνακα δεν είναι ιδιαίτερα βαριά κατασκευή σε βαθμό που να απαιτείται επιπλέον δομική υποστήριξη και για αυτό ο τύπος αυτός είναι ιδανικός για υφιστάμενα κτίρια.

Ύψος φυτών	Μέχρι 30cm
Είδος φυτών	Μικρή ποικιλία - οπωδή φυτά, άγρια παχύφυτα, αγριολούλουδα, γρασίδι
Πάχος μέσου ανάπτυξης	8-15cm
Σύσταση μέσου ανάπτυξης	Μίγμα από άμμο, αμμοχάλικο, θραύσματα τούβλου, τύρφη, ενόργανη ύλη και άργιλο.
Πάχος αποστραγγ. στρώσης	5cm
Εφαρμογές	Επίπεδες και κεκλιμένες μέχρι 30° οροφές.
Φορτίο κατασκευής	80 - 160 kg/m ³ (κορεσμένο)
Ενδεικτικό κόστος	70-80 €/m ²

Πίνακας 3.5-1: Τεχνικά και άλλα χαρακτηριστικά του εκτατικού τύπου.



Εικόνα 3.5-1: Κεκλιμένη οροφή με εκτατική κατασκευή στις Η.Π.Α.¹⁵

II. Εντατικός τύπος

Ο εντατικός τύπος μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μια εγκατάσταση ενός συμβατικού κήπου ή πάρκου στην οροφή, χωρίς σχεδόν κανένα περιορισμό στην εκλογή των φυτών. Είναι βεβαίως μια πιο σύνθετη και βαριά κατασκευή υψηλών απαιτήσεων, επηρεάζοντας εξαιρετικά τόσο τη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου, όσο και το μικροκλίμα της περιοχής.

Ύψος φυτών	Μέχρι 5m
Είδος φυτών	Μεγάλη ποικιλία – δέντρα, θάμνοι και άλλα
Πάχος μέσου ανάπτυξης	12-100cm
Σύσταση μέσου ανάπτυξης	Χώμα
Πάχος αποστραγγ. στρώσης	25cm
Εφαρμογές	Επίπεδες οροφές.
Φορτίο κατασκευής	250 - 550 kg/m ³ (κορεσμένο)
Ενδεικτικό κόστος	100-120 €/m ²

Πίνακας 3.5-2: Τεχνικά και άλλα χαρακτηριστικά του εκτατικού τύπου.

Σε αυτή την περίπτωση οι ανάγκες συντήρησης είναι αυξημένες, όπως επίσης και η άρδευση για αυτό και είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ειδικού αρδευτικού συστήματος. Το μεγάλο φορτίο με το οποίο επιβαρύνουν την οροφή, καθιστά απαραίτητη τη δομική υποστήριξη του κτιρίου, ή τον κατάλληλο σχεδιασμό του αν πρόκειται για υπό ανέγερση κτίριο. Τέλος, στις εντατικές οροφές μπορούν να γίνουν κατασκευές όπως μονοπάτια, στοιχεία νερού, πέργκολες και καθιστικά, μετατρέποντας την οροφή σε χώρο αναψυχής.



Εικόνα 3.5-2: Φυτεμένη οροφή εντατικού τύπου στην Αθήνα.¹⁶

Ο πιο πάνω διαχωρισμός των φυτεμένων οροφών δεν είναι απόλυτος. Είναι δυνατή η κατασκευή μιας οροφής με ενδιάμεσα τεχνικά χαρακτηριστικά, **ημιεντατικού** τύπου (semi-intensive), όπως επίσης και ένας **συνδυασμένος** τύπος κατασκευής.

3.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

I. Πλεονεκτήματα

Οι φυτεμένες οροφές στα αστικά κτίρια, όντας μικρές εστίες πρασίνου, μπορούν να μας προσφέρουν όλα εκείνα για τα οποία γίνεται αναφορά στην παράγραφο 2.2, περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά. Με την εφαρμογή έτσι της τεχνικής αυτής, τα κτίρια στις πόλεις μπορούν να συμβάλλουν στην άμβλυνση του φαινομένου των αστικών θερμνηνίδων, το καθαρισμό του ατμοσφαιρικού αέρα, τον περιορισμό των πλημμυρικών φαινομένων και γενικά να προσφέρουν, σε μικρότερο βαθμό βέβαια, όλα εκείνα τα δημόσια οφέλη που αποκομίζουμε από τα μικρά συνοικιακά πάρκα, χωρίς προφανώς να μπορούν να τα υποκαταστήσουν. Πιο κάτω παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα που έχει η εγκατάσταση μιας φυτεμένης οροφής στο ίδιο το κτίριο και τους χρήστες του.



Εικόνα 3.6-1: Οφέλη φυτεμένων οροφών σαν μικρές εστίες πρασίνου μέσα στις πόλεις.¹⁷

1. Μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης

Έχει γίνει αναφορά στη παράγραφο 3.3 πως μια φυτεμένη οροφή συμβάλλει στη θερμική προστασία του κτιρίου κατά τη διάρκεια του έτους, κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Αυτό έχει σαν άμεσο αποτέλεσμα την μείωση της ενέργειας που απαιτεί ένα κτίριο για την επίτευξη θερμικής άνεσης. Η μείωση αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος της κατασκευής (εκτατικός ή εντατικός), το μέγεθος, η αρχιτεκτονική και η τοποθεσία του κτιρίου, το κλίμα της περιοχής κτλ. Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται πολλά παραδείγματα εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια μετά από εγκατάσταση φυτών στην οροφή:

- Η εγκατάσταση εντατικού τύπου πράσινης οροφής στο ξενοδοχείο El Greco στο Ρέθυμνο με πάχος μέσου ανάπτυξης 55cm, περιόρισε τα ψυκτικά φορτία από 25,29 KWh/m² που ήταν σε μια συμβατική οροφή σε 16,78 KWh/m² (33,63% μείωση) και αντίστοιχα τα θερμικά από 4,49 KWh/m² σε 0,72 KWh/m² (83,91% μείωση).
- Χρησιμοποιώντας το μοντέλο TRNSYS, υπολογίστηκε ότι η εγκατάσταση πράσινης οροφής σε παιδικό σταθμό κοντά στο κέντρο της Αθήνας μείωσε το ψυκτικό φορτίο το καλοκαίρι μέχρι και 87% στο ρετιρέ το κτιρίου, αυξάνοντας ωστόσο ελαφρώς το θερμικό φορτίο το χειμώνα.¹⁸
- Υπολογιστικό πείραμα που εφαρμόστηκε σε κτίριο 10000m² στην πόλη Βιτσέντζα της ΒΑ Ιταλίας το 2003, έδειξε ότι εγκατάσταση φυτεμένης οροφής με πάχος μέσου ανάπτυξης 20cm, θα μείωνε το θερμικό κέρδος κατά 60% το καλοκαίρι σε σύγκριση με μια συμβατική οροφή. Αν τώρα το μέσο ανάπτυξης ήταν υγρό καθ' όλη τη διάρκεια του καλοκαιριού με αυξημένη άρδευση, τότε η οροφή θα δούλευε πλέον σαν παθητικό στοιχείο ψύξης. Αντίθετα όμως το χειμώνα σε αυτή την περίπτωση έχουμε απώλειες θερμότητας 40% μεγαλύτερες από ότι έχουμε σε μια συμβατική οροφή.¹⁹
- Σε μετρήσεις που έγιναν σε μια συμβατική και μια πράσινη εκτενούς τύπου οροφή στην Οτάβα του Καναδά, διαπιστώθηκε ότι μεταξύ Μαΐου και Σεπτεμβρίου (θερινή περίοδος) του 2001, ενώ το συμβατικό σπίτι απαιτούσε ενέργεια ψύξης μεταξύ 6-8 KWh τη μέρα, το πράσινο απαιτούσε λιγότερο από 1,5 KWh (μείωση μέχρι και 75%). Κατά τους χειμερινούς μήνες αντίστοιχα, Νοέμβριος του 2000 μέχρι Μάρτιο του 2001 οι ανάγκες των δυο σπιτιών για ενέργεια θέρμανσης ήταν πανομοιότυπες.²⁰
- Στο κτίριο που στεγάζεται το Δημαρχείο του Σικάγο έκτασης 150000m², από την εγκατάσταση πράσινης οροφής υπολογίζεται ότι εξοικονομείτε ενέργεια ψύξης ίση με 9270 KWh και θέρμανσης 740 MBtus το χρόνο. Με βάσει τα δεδομένα των Η.Π.Α. αυτό μεταφράζεται σε εξοικονόμηση περίπου \$3,600 το χρόνο.²¹

2. Προστασία της στέγης.

Η τοποθέτηση πρασίνου στις οροφές προστατεύει τις επιφάνειες τους από τις ακραίες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, οι οποίες μπορούν να φτάσουν σε ακραίες περιπτώσεις μέχρι και 60°C κατά τη διάρκεια του έτους ή 30°C μέσα σε μια μέρα. Η εγκατάσταση φυτών μπορεί να μειώσει τη διακύμανση αυτή σε 30°C και 10°C αντίστοιχα. Μεγάλη φθορά στις γυμνές ταράτσες προκαλεί επίσης η υπεριώδης ακτινοβολία, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής της στεγανοποιητικής στρώσης. Με την εφαρμογή του κηπευτικού τμήματος, δημιουργείται ένα πολύ καλό προστατευτικό στρώμα της ταράτσας απέναντι στην ακτινοβολία αυτή. Όλα τα παραπάνω οδηγούν στο διπλασιασμό της διάρκειας ζωής μιας οροφής και επομένως στην ελάττωση των αναγκών συντήρησης τους, κάτι που σημαίνει και όφελος στον οικονομικό τομέα.

3. Μόνωση του ήχου.

Τα ηχητικά κύματα μπορούν να απορροφηθούν, να ανακληθούν και να εκτραπούν από μια φυτεμένη οροφή, προσφέροντας ένα βελτιωμένο ηχητικό περιβάλλον εντός του κτιρίου. Το μέσο ανάπτυξης έχει την ικανότητα να αποκρούει τις χαμηλές συχνότητες, τη στιγμή που η βλάστηση μπορεί να μπλοκάρει τις υψηλές. Πειράματα απέδειξαν ότι 12cm μέσου ανάπτυξης μπορούν να μειώσουν την ένταση του ήχου κατά 40 db, ενώ 20cm κατά 46-50 db.

II. Μειονεκτήματα

1. Στατική επιβάρυνση.

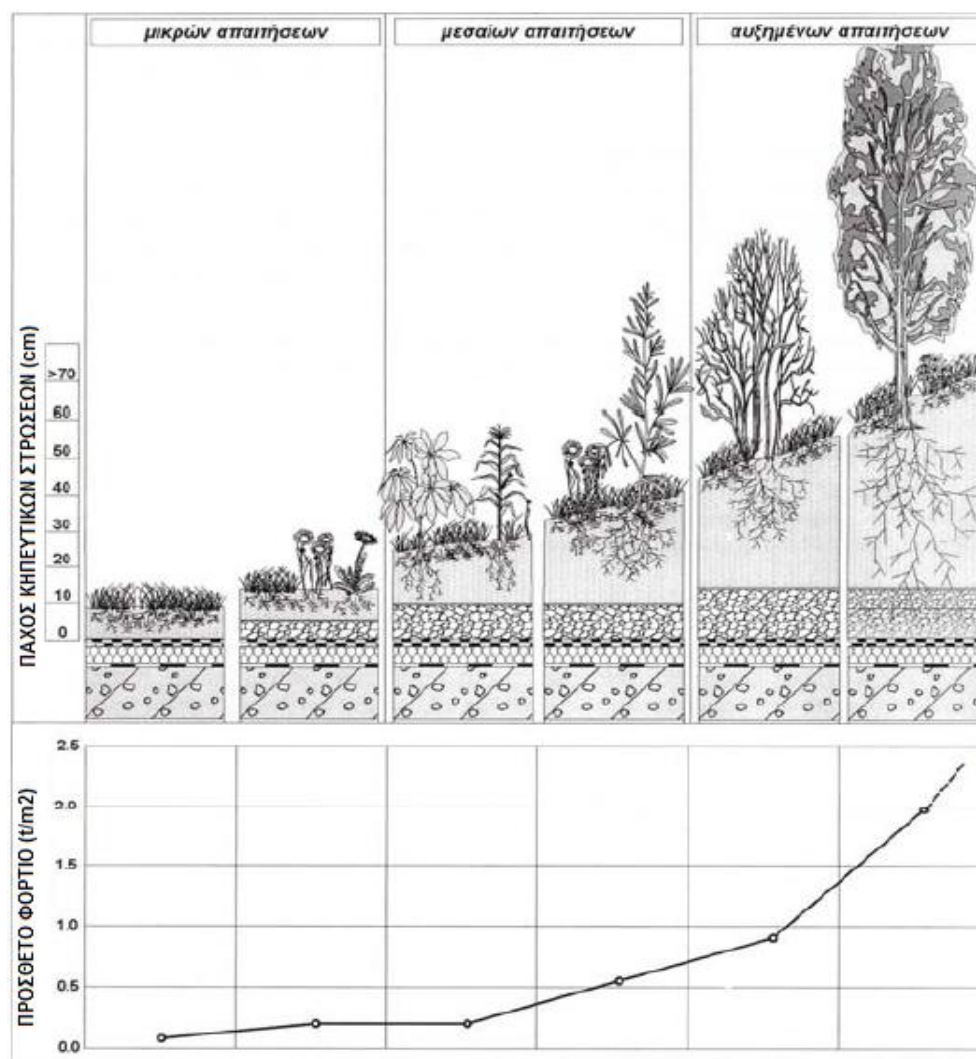
Η εγκατάσταση μια τέτοιας κατασκευής επιβαρύνει την οροφή με επιπλέον φορτία. Το βάρος όπως αναφέρθηκε μιας φυτεμένης οροφής, όταν το μέσο ανάπτυξης είναι σε κορεσμένη κατάσταση ως προς την περιεκτικότητά του σε υγρασία, μπορεί να φτάσει μέχρι και στα 550 kg/m³. Επιβάλλεται επομένως πριν την εγκατάσταση της κατασκευής να γίνει ολοκληρωμένη στατική μελέτη, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις απαιτούνται έργα δομικής υποστήριξης του κτιρίου ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη στατική επάρκεια.

2. Οικονομική επιβάρυνση.

Πέραν του αρχικού κόστους σχεδιασμού και κατασκευής, το οποίο συνολικά κυμαίνεται μεταξύ 0,1 – 2 % της συνολικής δαπάνης του κτιρίου, ο επενδυτής επωμίζεται στη συνέχεια και ένα επιπλέον κόστος συντήρησης, ιδιαίτερα αν πρόκειται για φυτεμένη οροφή εντατικού τύπου. Το κόστος αυτό μπορεί να φτάσει το πρώτο χρόνο μέχρι και στα € 3.50 το τετραγωνικό μέτρο.

3. Κίνδυνος φθοράς της οροφής.

Τυχόν κακή ή ελλιπή κατασκευή όσον αφορά τη διαστρωμάτωση και ειδικά στο δομικό τμήμα, μπορεί να εμφανίσει διάφορους κινδύνους με καταστροφικές συνέπειες στην ίδια την οροφή. Σαν τέτοιοι κίνδυνοι αναφέρονται η ανεπαρκής υδατοστεγάνωση της κατασκευής με αποτέλεσμα την εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό της οροφής, καθώς και η διεύδυση ριζών στα κατώτερα στρώματα της διαστρωμάτωσης. Το πρόβλημα αυτό παίρνει μεγαλύτερες διαστάσεις, αν αναλογιστούμε την πολυπλοκότητα της κατασκευής. Έτσι, σε περίπτωση εμφάνισης βλάβης όπου απαιτείται άμεση αντιμετώπιση του προβλήματος, η διαδικασία επιδιόρθωσης συχνά είναι ιδιαίτερα σύνθετη και δαπανηρή.



Εικόνα 3.6-2: Πρόσθετη στατική επιβάρυνση της οροφής ανάλογα με το πάχος των κηπευτικών στρώσεων.⁸

3.7 Συντήρηση

Η συντήρηση της κατασκευής είναι μια απαραίτητη διαδικασία για την εύρυθμη λειτουργία της τεχνικής των φυτεμένων ταρατσών. Τόσο το είδος της συντήρησης, όσο και η συχνότητα της ποικίλει και εξαρτάται κατά βάση από το είδος της κατασκευής, με τις εντατικές οροφές να χρειάζονται προφανώς μεγαλύτερη συντήρηση, λόγω της ποικιλόμορφης βλάστησης υψηλότερων αναγκών. Διενεργείται κυρίως στα φυτά, αλλά και στα υπόλοιπα στρώματα της κατασκευής. Ιδιαίτερη παρακολούθηση χρειάζονται τα στρώματα του δομικού τμήματος για εμφάνιση τυχόν διαρροών. Για αυτό το λόγο, ενσωματώνονται συχνά στα στρώματα αυτά ηλεκτρικά συστήματα ανίχνευσης διαρροών, τα οποία επισημαίνουν την ακριβή θέση εμφάνισης των διαρροών αυτών.

➤ Άρδευση

Ιδανικές κατασκευές εκτατικού τύπου μπορούν να στηριχθούν στη φυσική άρδευση, με τα φυτά να αρκούνται στο νερό της βροχής. Σε αυτή τη περίπτωση όμως λαμβάνονται ειδικά μέτρα ώστε να συγκρατείται όσο το μεγαλύτερη ποσότητα νερού, όπως χρήση παχύτερης αποστραγγιστικής στρώσης. Αντίθετα, οι εντατικές οροφές χρειάζονται σχεδόν στο σύνολό τεχνητή άρδευση, χρησιμοποιώντας ειδικά συστήματα. Τέτοια συστήματα είναι το πότισμα με λάστιχο, η τεχνητή βροχή, το σύστημα στάγδην και το υπόγειο σύστημα. Η ποσότητα του νερού που απαιτείται για την τροφοδοσία της βλάστησης εξαρτάται από το είδος των φυτών, το τοπικό κλίμα της περιοχής, καθώς επίσης και από το στάδιο ανάπτυξης που βρίσκονται τα φυτά. Τέλος, επιπλέον άρδευση ενδείκνυται όταν επιδιώκεται αυξημένη εξατμιστική ψύξη ή ακόμα και αύξηση της πυροπροστασίας.

➤ Λίπανση

Χρειάζεται συνήθως εμπλουτισμός του μέσου ανάπτυξης με λίπασμα μια φορά το χρόνο, ώστε να αποφεύγεται η οξύτητα του χώματος.

➤ Επαναφύτευση

Είναι απαραίτητη με τη πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος η επαναφύτευση ή ακόμα και η προσθήκη επιπλέον μέσου ανάπτυξης.

Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην καθαριότητα των υδρορροών, ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων και διαρροών.

3.8 Η κατάσταση σήμερα

Η ιδέα της φύτευσης των ταρατσών, με βάσει και με όσα έχουν αναφερθεί, αποτελεί σήμερα μια αξιόπιστη τεχνική παθητικής προστασίας του κτιριακού κελύφους, πέρα βέβαια και από τη λειτουργία τους σαν φίλτρα μέσα στον αστικό ιστό. Τα πολλαπλά οφέλη, είτε αυτά αφορούν το ίδιο το κτίριο, είτε ευρύτερα το αστικό περιβάλλον, έχουν οδηγήσει μια σειρά από κράτη στη θέσπιση νόμων και γενικά στην υιοθέτηση μέτρων ώστε να εξαπλωθεί η τεχνική αυτή σε όσο το δυνατό περισσότερα κτίρια. Έτσι, οι εφαρμογές φυτεμένων οροφών ολοένα και πληθαίνουν σε διάφορες χώρες του κόσμου, κυρίως στη βόρεια Αμερική, τη κεντρική και βόρεια Ευρώπη και την Ιαπωνία. Ενδεικτικά:

- Στη Γερμανία, στη χώρα όπου το 7% των οροφών των νέων κτιρίων είναι πράσινες, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 80 σημειώθηκε μια ετήσια αύξηση στην εγκατάσταση φυτεμένων οροφών κατά 15 – 20%, επεκτείνοντας τη φυτοκαλυμμένη έκταση στις οροφές από 1 στα 10 εκατ. m². Στη Στουτγκάρδη είναι υποχρεωτική η εφαρμογή της τεχνικής σε όλα τα νέα βιομηχανικά κτίρια με επίπεδη οροφή, ενώ στη πόλη Σιντελφίνγκεν είναι επίσης υποχρεωτική σε όλα τα υπό ανακαίνιση δημόσια κτίρια. Στο Βερολίνο παρέχεται επιδότηση ίση με 3,5 € ανά τετραγωνικό μέτρο για εφαρμογή φυτεμένης οροφής, την στιγμή που η επιδότηση αυτή στη Βεστφαλία μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 7 € ανά τετραγωνικό μέτρο!
- Ο δήμος του Βανκούβερ στο Καναδά προσφέρει αυξημένο συντελεστή δόμησης στα νέα κτίρια σε περίπτωση κατασκευής φυτεμένης οροφής, ενώ είναι σε ισχύ προγράμματα εξάπλωσης των φυτεμένων οροφών σε αρκετές άλλες πόλεις της Βόρειας Αμερικής όπως το Σικάγο, το Πόρτλαντ, το Τορόντο κ.α.
- Στο Τόκιο, όλες οι οροφές κτιρίων με έκταση πέρα τα 1.000 m² θα πρέπει να φυτεύονται κατά τουλάχιστον το 20% επιφάνειάς τους.

Κάποια από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα φυτεμένης οροφής σήμερα είναι τα ακόλουθα:

- (i) Οι εγκαταστάσεις της αυτοκινητοβιομηχανίας Ford στο Ντιτρόιτ των Η.Π.Α, με 42000m² εκτενούς φυτοκάλυψης της οροφής.
- (ii) Στην έδρα του Διεθνούς Ινστιτούτου Πράσινων Οροφών (International Green Roof Institute - IGRI) που βρίσκεται στο Μάλμοε της Σουηδίας, έχει εγκατασταθεί ο πρώτος βοτανικός ταρατσόκηπος.

(iii) Στην υπό ανέγερση «Ακαδημία των Επιστημών» στο Σαν Φρανσίσκο έχει εγκατασταθεί φυτεμένη οροφή έκτασης 10000 m², κάτι που όπως υπολογίζετε θα μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση κατά 35-40%.



Εικόνα 3.8-1: Ακαδημία των Επιστημών στο Σαν Φρανσίσκο²².

(iv) Στην έδρα της Banco Santander (τράπεζα) στη Μαδρίτη βρίσκεται η πιο μεγάλη κατασκευή φυτεμένης οροφής στην Ευρώπη. Πρόκειται για μια συνδυασμένη κατασκευή εντατικού και εκτατικού τύπου πάνω από 100000 m².

Σε αντίθεση με το τι ισχύει στο διεθνή χώρο, στην Ελλάδα η ανάπτυξη των φυτεμένων οροφών βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο. Τα παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι περιορισμένα και τα συναντάμε κυρίως στο Λεκανοπέδιο της Αττικής και στη Θεσσαλονίκη. Για αυτό κυρίως ευθύνεται το κορεσμένο κτιριακά αστικό τοπίο, που δεν επιτρέπει κατασκευή νέων κτιρίων με αρχικό σχεδιασμό και πρόνοια για εγκατάσταση φυτών στην οροφή, παρά μόνο επέμβαση σε υφιστάμενα. Πέραν τούτου, η πολιτεία δεν έχει λάβει ακόμα αρκετά μέτρα ώστε να μπορεί να εξαπλωθεί η υιοθέτηση της τεχνικής αυτής. Πρώτα και κύρια η ίδια αποτελεί το κακό παράδειγμα, αφού τα δημόσια κτίρια είναι στη συντριπτική του πλειοψηφία ενεργειακές καταβόθρες. Εκτός από τη φύτευση των οροφών των δημόσιων κτιρίων, θα μπορούσε με νόμους να υποχρεώσει τους ιδιοκτήτες νέων κτιρίων να φυτοκαλύψουν ένα συγκεκριμένο ποσοστό της οροφής τους ή ακόμα να προσφέρει σε όσους προτείνονται να δημιουργήσουν τέτοιες κατασκευές επιδοτήσεις ανά τετραγωνικό μέτρο. Η Αθήνα κυρίως, αλλά και οι υπόλοιπες μεγάλες πόλεις, με βάση και τις κλιματολογικές

συνθήκες της χώρας, αλλά και τη δομή των ελληνικών κτιρίων με τις απέραντες επίπεδες ταράτσες, όχι μόνο επιτρέπουν την εδραίωση των φυτεμένων οροφών, αλλά και το επιβάλλουν.



Εικόνα 3.8-2: Βιβλιοθήκη Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης⁸.

4. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

4.1 Χωροχρόνος

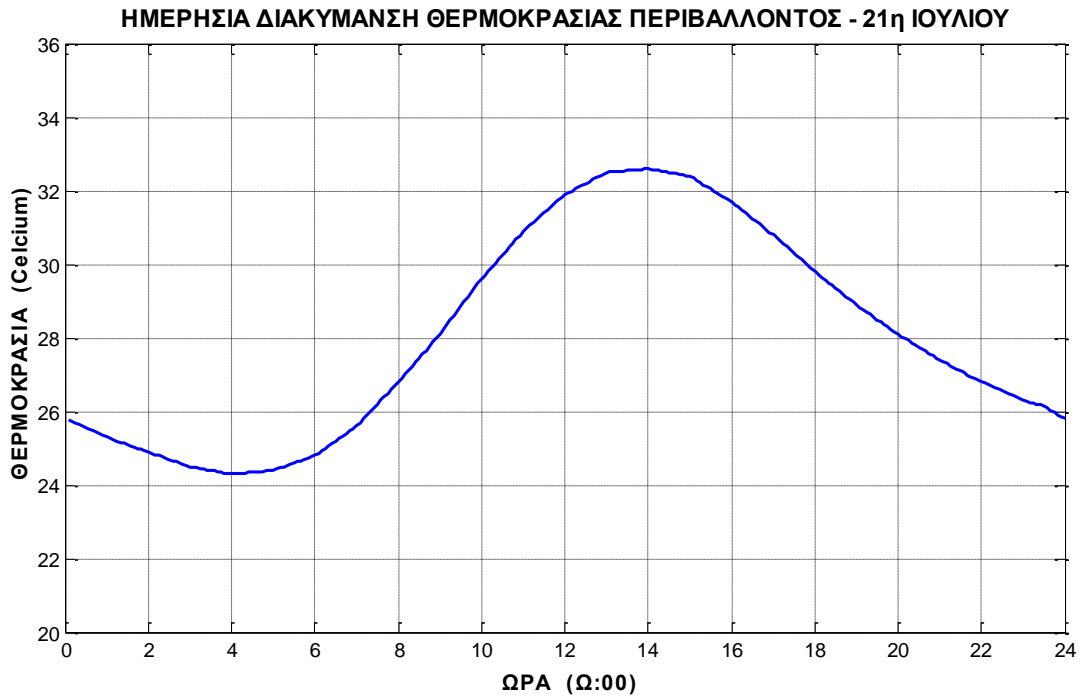
Η παρούσα διπλωματική εργασία στόχο έχει να προσομοιώσει τη θερμική συμπεριφορά ενός κτιρίου καθ' όλη τη διάρκεια μιας τυπικής θερινής μέρας, στο οποίο υποθέτουμε ότι έχει εγκατασταθεί φυτεμένη οροφή, και να συγκριθεί στη συνέχεια με τη πραγματική του συμπεριφορά, έχοντας μια τυπική οροφή με απλή μόνωση.

Υποθέτουμε ότι το υπό εξέταση κτίριο βρίσκεται σε ένα προάστιο της Αθήνας και όχι στο πυκνοδομημένο κέντρο, όπου συναντάμε έντονα το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Η υπόθεση αυτή γίνεται ώστε τόσο η διακύμανση, όσο γενικά και οι τιμές της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος να είναι φυσικές, για να μπορέσουμε έτσι να χρησιμοποιήσουμε τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας αυτής, όπως δίνονται από την ASHRAE.

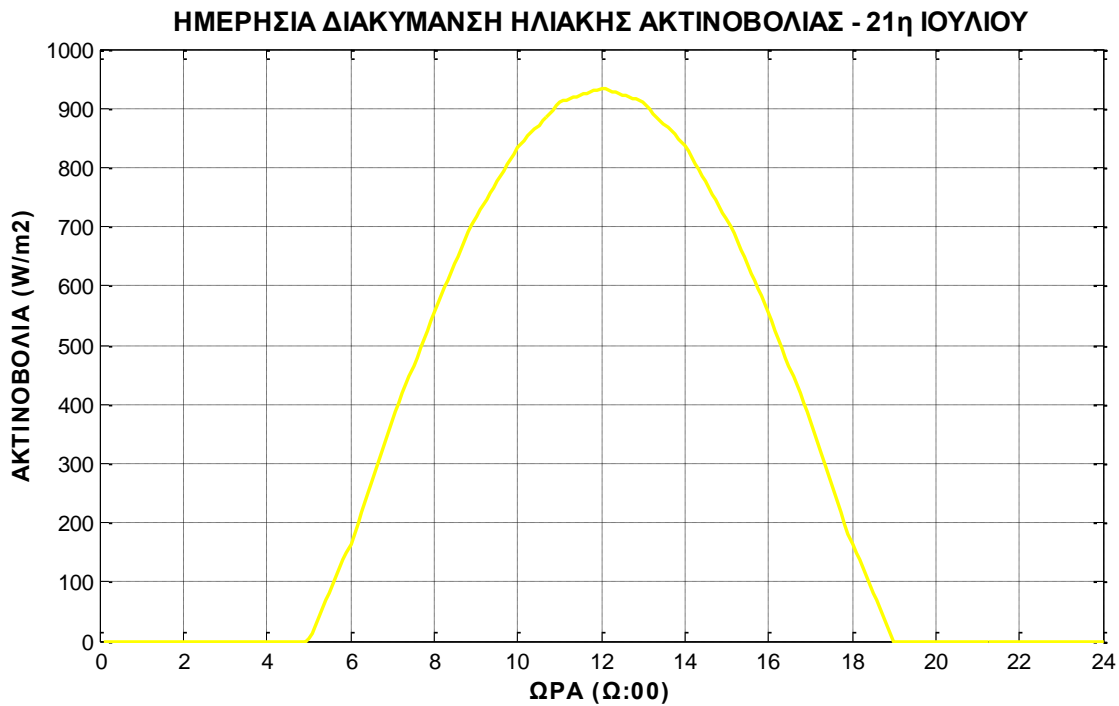
Όσο αφορά το χρονικό υπόβαθρο των υπολογισμών, αυτό τοποθετείται στην 21^η του Ιούλη. Η επιλογή αυτή στηρίχτηκε αφενός στο γεγονός ότι ο Ιούλιος αποτελεί το θερμότερο μήνα του χρόνου, και αφετέρου στο ότι όπως αναφέρθηκε κάποια από τα κλιματολογικά – καιρικά δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν, έχουν αντληθεί από την ASHRAE, η οποία δίνει τα στοιχεία αυτά για την 21^η κάθε μήνα.

Τοποθετώντας επομένως το πρόβλημα σε μια ζεστή μεσογειακή πόλη όπως η Αθήνα, στο μέσο του καλοκαιριού, αυτό αποκτά εξαιρετικό ενδιαφέρον, λόγω του ακραίου των θερμοκρασιών, αλλά και της τιμής της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που επιβάλλει ο χώρος και ο χρόνος. Με βάσει και τα όσα έχουν αναφερθεί, τα πιο κάτω διαγράμματα παρουσιάζουν την ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος και της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι η ASHRAE παρουσιάζει τιμές ανά ώρα. Για το σχεδιασμό των πιο κάτω γραφημάτων, αλλά και στους υπολογισμούς που θα γίνουν στη συνέχεια, όπου υπάρχει απαίτηση για πολύ μικρότερο χρονικό βήμα από την μια ώρα, οι ενδιάμεσες τιμές υπολογίστηκαν κάνοντας γραμμική παρεμβολή.



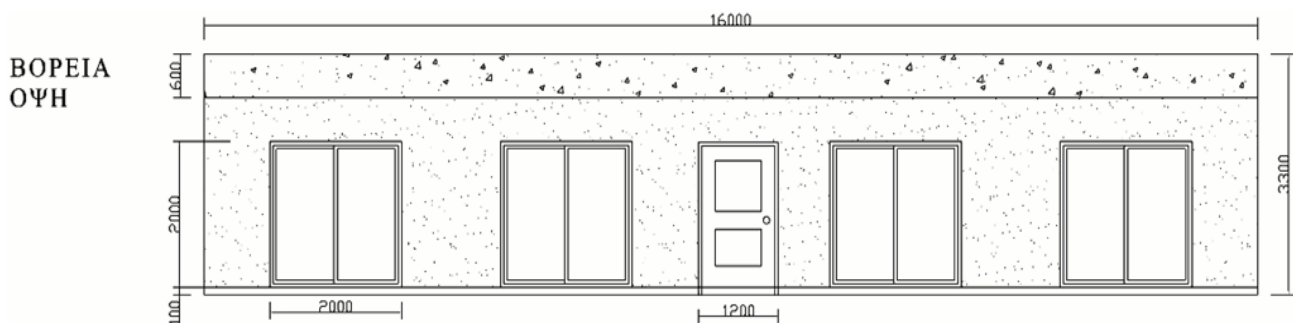
Εικόνα 4.1-1: Μέση τιμή της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για την 21^η Ιουλίου²³



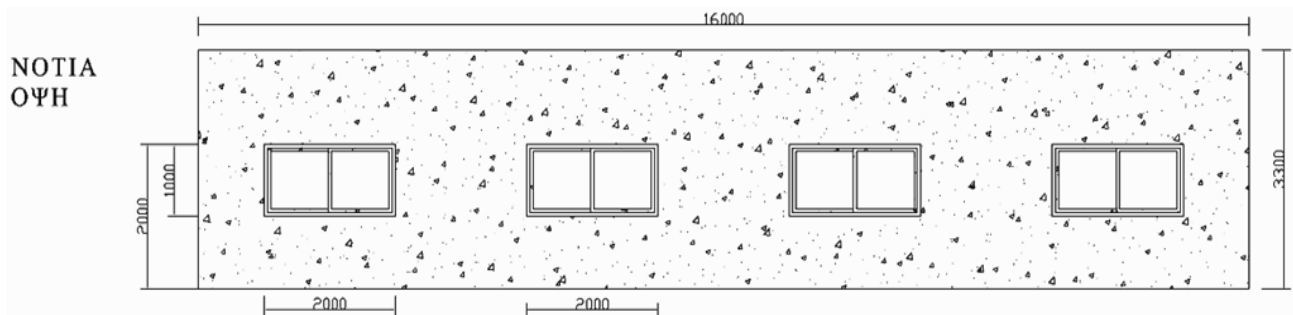
Εικόνα 4.1-2: Μέση τιμή της ημερήσιας διακύμανσης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για την 21^η Ιουλίου²²

4.2 Κτίριο

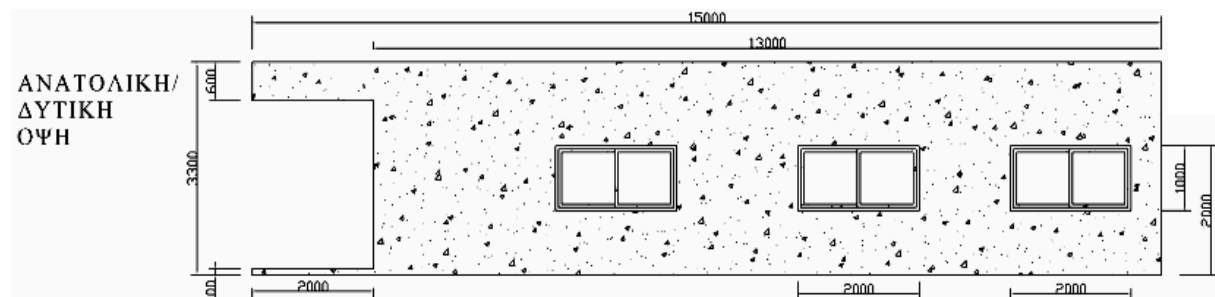
Το κτίριο που εξετάζεται αποτελεί μια τυπική μονόροφη κατοικία της δεκαετίας του 1980. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα κτίριο διαστάσεων 16m πλάτος x 13m μήκος x 3,3m ύψος. Η οροφή είναι επίπεδη ταράτσα (πλάκα), ενώ οι τέσσερις πλαϊνοί τοίχοι είναι αυτόνομοι (δεν είναι κοινοί δηλαδή με γειτονικά κτίρια), συναλλάσσοντας έτσι θερμότητα απευθείας με το περιβάλλον. Αναλυτικά σε κάθε πλευρά του κτιρίου έχουμε:



Συνολική επιφάνεια πλευράς: 52.8m^2
 Επιφάνεια τοίχου: 36.8m^2
 Επιφάνεια ανοιγμάτων (παράθυρα): 16m^2



Συνολική επιφάνεια πλευράς: 52.8m^2
 Επιφάνεια τοίχου: 44.8m^2
 Επιφάνεια ανοιγμάτων (παράθυρα): 8m^2



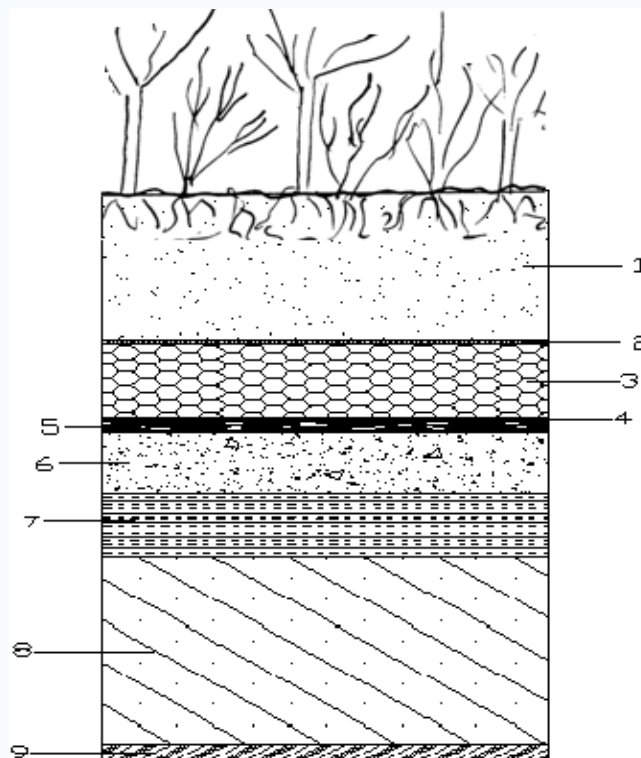
Συνολική επιφάνεια πλευράς: 42.9m^2
 Επιφάνεια τοίχου: 36.9m^2
 Επιφάνεια ανοιγμάτων (παράθυρα): 6m^2

Εικόνα 4.2-1: Όψεις κτιρίου.

4.2 Δομική – θερμική ανάλυση κτιρίου

Α. Οροφή

Πρόκειται για μια συμβατική κατασκευή, αποτελούμενη από στρώματα τυπικών κατασκευαστικών υλικών. Θεωρείται επομένως μια πολυεπίπεδη κάτοψη, με τα επίπεδα αυτά να βρίσκονται σε τέλεια θερμική επαφή. Στη περίπτωση της φύτευσης, τα επιπλέον στρώματα (όπως αυτά έχουν περιγραφεί στη παράγραφο 3.4) τοποθετούνται πάνω από τα υφιστάμενα, χωρίς οποιεσδήποτε άλλες προσθαφαιρέσεις. Η διαστρωμάτωση της φυτεμένης οροφής υπακούει στις ανάγκες μιας **εκτατικού τύπου κατασκευής**:



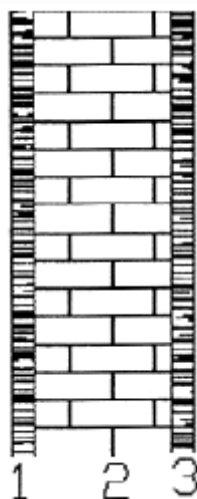
Εικόνα 4.3-1 – Τομή δώματος

		A/A	ΣΤΡΩΜΑ	L (m)	k (W/m ² K)	c (J/kg ^o K)	ρ (kg/m ³)
Φ Υ Τ Ε Μ Ε Ν Η		1	Μέσο ανάπτυξης (χώμα)	0.12	1.16	800	600
		2	Ίνες πολυπροπυλενίου	0.003	0.22	800	700
		3	Ελαφρόπετρα	0.06	0.1	700	250
		4	Ασφαλτόπανο	0.004	0.19	1800	1100
	Σ Υ Μ Β Α Τ	5	Ασφαλτόφυλλο	0.007	0.19	1800	1100
		6	Screed Ρύσεων	0.05	1.35	840	1200
		7	Μόνωση	0.05	0.041	1000	50
		8	Μπετόν	0.15	2.5	880	2300
		9	Σοβάς (τσιμεντοκονίαμα)	0.015	0,87	1000	1800

Πίνακας 4.3-1: Στρώματα και θερμικές ιδιότητες αυτών συμβατικής και φυτεμένης οροφής (όπου L: πάχος, k: θερμική αγωγιμότητα, c: ειδική θερμοχωρητικότητα, ρ: πυκνότητα).

Β. Εξωτερική Τοιχοποιία

Η ηλικία του κτιρίου δε μας επιτρέπει να μιλάμε για μόνωση στα εξωτερικά τοιχώματα και έτσι μπορεί να λεχθεί ότι αποτελούν θερμικές καταβόθρες. Αποτελούνται από συνηθισμένο τρυπητό τούβλο (300x200x100mm) πάχους 20 cm, σοβατισμένο εσωτερικά και εξωτερικά με σοβά πάχους 2,5 cm.



Εικόνα 4.3-2: Τομή εξωτερικού τοίχου²⁴

A/A	ΣΤΡΩΜΑ	L (m)	k (W/m ² ·K)	c (J/kg ² ·K)	ρ (kg/m ³)
1	Σοβάς (τσιμεντοκονίαμα)	0.025	0,87	1000	1800
2	Τούβλο	0.2	0.25	840	1000
3	Σοβάς (τσιμεντοκονίαμα)	0.025	0,87	1000	1800

Πίνακας 4.3-2: Στρώματα και θερμικές ιδιότητες αυτών εξωτερικών τοίχων.

Γ. Εσωτερική Τοιχοποιία

Ομοίως με την εξωτερική με τη διαφορά ότι τα τούβλα είναι δομημένα με τη πλευρά πάχους 10 cm.

5. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της ροής θερμότητας από και προς το κτίριο, μέσω της οροφής για τη μια και την άλλη περίπτωση. Για το σκοπό αυτό γίνεται μαθηματική επίλυση του μοντέλου με τη μέθοδο των **πεπερασμένων διαφορών**. Το πρόβλημα είναι μεταβατικό, με μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες, ενώ για την απλοποίησή του κάνουμε τη παραδοχή ότι έχουμε μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας μέσω της οροφής. Πρόκειται επομένως για ένα παραβολικό πεδίο ροής (πεδίο αρχικών τιμών). Ο ενεργειακός ισολογισμός που περιγράφει επομένως την εξέλιξη της θερμικής κατάστασης της οροφής είναι:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (5 - 1)$$

Όπου:

ρc Πυκνότητα (kg/m^3) επί ειδική θερμοχωρητικότητα ($\text{J/kg}^\circ\text{K}$) επιπέδου

$\frac{\partial T}{\partial t}$ Μεταβολή της θερμοκρασίας ($^\circ\text{K}$) σε κάθε χρονικό βήμα (sec)

$\frac{\partial T}{\partial x}$ Μεταβολή της θερμοκρασίας ($^\circ\text{K}$) σε κάθε χωρικό βήμα (m)

k Θερμική αγωγιμότητα επιπέδου ($\text{W/m}^\circ\text{K}$)

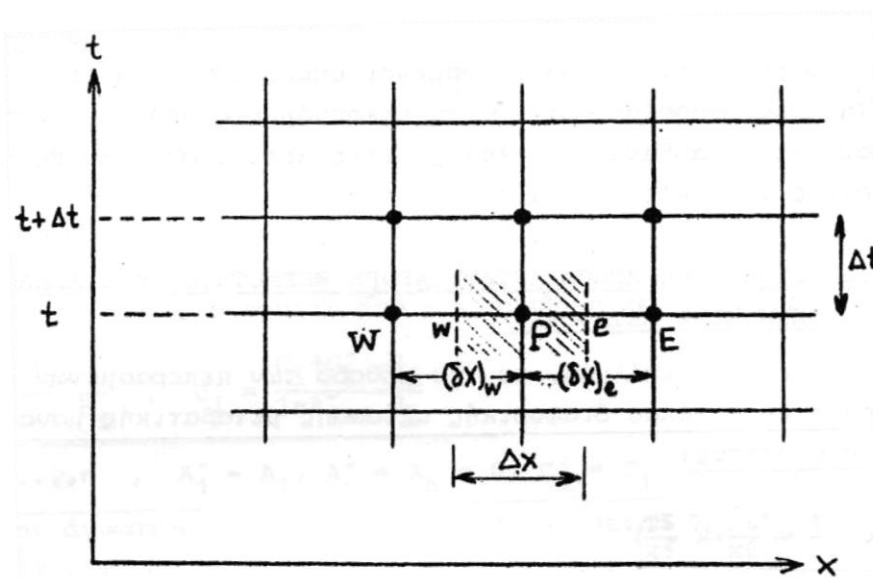
5.1 Διακριτοποίηση προβλήματος

Για την επίλυση της Δ.Ε. (5.3.1) με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, θα πρέπει πρώτα να γίνει διακριτοποίηση του χώρου στο κατάλληλο αριθμητικό (υπολογιστικό) πλέγμα. Επομένως, το ολικό πάχος της κατασκευής της οροφής, η κατακόρυφη δηλαδή απόσταση της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής με την εσωτερική (ταβάνι) θα πρέπει να χωριστεί σε έναν αριθμό κόμβων N . Με μεγαλύτερη πυκνωση του πλέγματος (ελάττωση απόστασης γειτονικών κόμβων – περισσότεροι κόμβοι), επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια, προσεγγίζοντας έτσι την ακριβή, αναλυτική λύση της Δ.Ε. Η απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών κόμβων δx ($\delta x = x_{i+1} - x_i$) μπορεί να είναι είτε σταθερή (ομοιόμορφο πλέγμα), είτε να μειώνεται σε περιοχές με μεγάλη μεταβολή της τοπικής θερμοκρασίας, ώστε να εξοικονομείται χώρος στη μνήμη του Η/Υ και χρόνος. Ωστόσο, η απλοποίηση του προβλήματος μέσω της μονοδιάστατης του επίλυσης από τη μια, και οι υψηλές δυνατότητες

του Η/Υ από την άλλη, μας δίνουν τη δυνατότητα να καθορίσουμε ένα ιδιαίτερα πυκνό ομοιόμορφο πλέγμα, όπου και στις δυο περιπτώσεις έχουμε $\delta x \approx 1\text{mm}$. Συγκεκριμένα:

	ΦΥΤΕΜΕΝΗ ΟΡΟΦΗ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΟΡΟΦΗ
Πάχος κατασκευής L (m)	0.469	0.282
Αρ. Κόμβων N	400	275
Απόσταση γειτονικών κόμβων δx (m)	0.00117	0.00103

Πίνακας 5.1-1: Πληροφορίες διακριτοποίησης οροφής.



Εικόνα 5.1-1: Υπολογιστικό πλέγμα συντεταγμένων x-t για την επίλυση της μεταβατικής μονοδιάστατης εξίσωσης διάχυσης.²⁵

5.2 Γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών

Επανερχόμενοι στην εξίσωση (5-1), το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της θερμοκρασίας σε κάθε κόμβο i του πλέγματος κατά τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$, με γνωστές τις αντίστοιχες θερμοκρασίες κατά την προηγούμενη χρονική στιγμή t . Για το σκοπό αυτό ορίζουμε όγκους αναφοράς οι οποίοι περικλείουν τον κάθε κόμβο i .

Στο σχήμα 5.1-1 ο γραμμοσκιασμένος όγκος αναφοράς w_e , μήκους Δx , περιβάλλει τον κόμβο P με τις δυο πλευρές του w και e να διχοτομούν τις αποστάσεις WP και PE αντίστοιχα, οι οποίες είναι ίσες. Κάνοντας την παραδοχή ότι η πυκνότητα ρ και η ειδική θερμοχωρητικότητα c του υλικού του επιπέδου στο οποίο βρίσκεται ο υπό εξέταση κόμβος

είναι σταθερά, ολοκληρώνουμε τη Δ.Ε. (5-1) στο συγκεκριμένο όγκο αναφοράς στο χρονικό βήμα από t μέχρι $t+\Delta t$:

$$\rho c \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial T}{\partial t} dz dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz dt \quad (5.2 - 1)$$

Λόγω του αρκετά πυκνού υπολογιστικού πλέγματος, γίνεται η καθ' όλα δόκιμη παραδοχή ότι η θερμοκρασία του κόμβου T_P είναι σταθερή σε ολόκληρο τον όγκο αναφοράς. Επομένως το πρώτο μέλος της εξίσωσης (5.2-1) γράφεται:

$$\rho c \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \rho c \Delta x (T_P^1 - T_P^0) \quad (5.2 - 2)$$

Όπου T_P^1 και T_P^0 η θερμοκρασία στο κόμβο P τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$ και t αντίστοιχα. Αντίστοιχα, λύνοντας το δεύτερο μέλος:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dz dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dt \quad (5.2 - 3)$$

Υποθέτοντας ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ δυο διαδοχικών κόμβων είναι γραμμική η πιο πάνω εξίσωση μετατρέπεται σε:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dz dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(k_e \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} \right) - \left(k_w \frac{T_P - T_W}{(\delta x)_w} \right) \right] dt \quad (5.2 - 4)$$

Συνοψίζοντας, η Δ.Ε. (5.2-1) γράφεται:

$$\rho c \Delta x (T_P^1 - T_P^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(k_e \frac{(T_E - T_P)}{(\delta x)_e} \right) - \left(k_w \frac{(T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right) \right] dt \quad (5.2 - 5)$$

Εφόσον η T_P μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο, θα ισχύει:

$$\int_t^{t+\Delta t} T_P dt = (0.5 T_P^1 + 0.5 T_P^0) \Delta t \quad (5.2 - 6)$$

Υιοθετώντας την γραμμικότητα αυτή και για τις θερμοκρασίες T_E και T_W , η εξίσωση μετατρέπεται:

$$\rho c \Delta x (T_P^1 - T_P^0) = 0.5 \left[\left(k_e \frac{(T_E^1 - T_P^1)}{(\Delta x)_e} \right) - \left(k_w \frac{(T_P^1 - T_W^1)}{(\Delta x)_w} \right) \right] + 0.5 \left[\left(k_e \frac{(T_E^0 - T_P^0)}{(\Delta x)_e} \right) - \left(k_w \frac{(T_P^0 - T_W^0)}{(\Delta x)_w} \right) \right] \quad (5.2 - 7)$$

Παραλείποντας τους δείκτες 1 (θερμοκρασία κόμβου τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$) και αφού γίνουν οι πράξεις, η πιο πάνω εξίσωση διατυπώνεται ως ακολούθως (διατύπωση Crank – Nicolson):

Από την εξίσωση (5.2-8) παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία κατά τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$ σε ένα τυχαίο κόμβο T_i εκφράζεται συναρτήσει των αγνώστων θεοκρασιών των γειτονικών κόμβων T_{i-1} και T_{i+1} . Πρόκειται επομένως για ένα σύστημα εξισώσεων τριδιαγώνιας μορφής (TDMA), του οποίου η διαδικασία επίλυσης θα περιγραφεί στη συνέχεια.

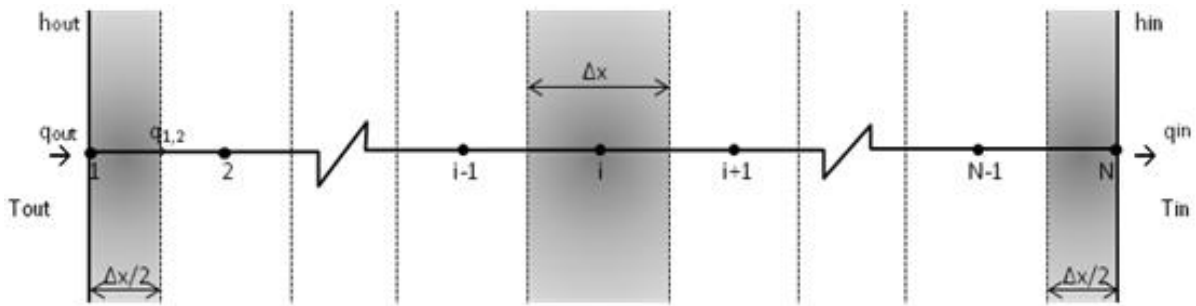
5.3 Οριακές συνθήκες

Διατυπώνοντας τις $N-2$ εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών στους $N-2$ εσωτερικούς όγκους αναφοράς, καταστρώνεται ένα σύστημα του οποίου η λύση είναι αδύνατη γιατί στις εξισώσεις αυτές περιέχονται εκτός από τις $N-2$ άγνωστες θερμοκρασίες των εσωτερικών κόμβων T_i ($i=2 \dots N-2$) και οι δυο άγνωστες θερμοκρασίες στους οριακούς κόμβους T_1 και T_N . Χρειάζονται επομένως άλλες δυο εξισώσεις, των οποίων η εξεύρεση γίνεται μέσω των οριακών συνθηκών προβλήματος.

Στο πρόβλημα που εξετάζεται, είναι γνωστές οι τιμές των συντελεστών συναγωγής h_{in} , h_{out} μεταξύ εσωτερικής επιφάνειας κατασκευής (ταβάνι) και εσωτερικού αέρα, καθώς και μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής και εξωτερικού αέρα αντίστοιχα. Όσον αφορά τις αντίστοιχες θερμοκρασίες T_{in} και T_{out} (θερμοκρασίες διερχόμενου ρευστού), αυτές είναι υπολογίσιμες. Επομένως, οι οριακές συνθήκες στην περίπτωσή μας είναι οι θερμοροές στα δυο όρια:

$$\dot{q}_{in} = h_{in} (T_{in} - T_N) \quad (5.3 - 1\alpha)$$

$$\dot{q}_{out} = h_{out} (T_{out} - T_1) \quad (5.3 - 1\beta)$$



Εικόνα 5.1-2: Εσωτερικός και οριακοί όγκοι αναφοράς.

Με βάσει τα παραπάνω, η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών στο εξωτερικό όριο του πλέγματος (κόμβος 1) διατυπώνεται:

$$\rho c \frac{\Delta x}{2} (T_1^1 - T_1^0) = 0.5 \left[\left(k_e \frac{(T_2^1 - T_1^1)}{(\delta x)_e} \right) - (h_{out} (T_1^1 - T_{out}^1)) \right] + 0.5 \left[\left(k_e \frac{(T_2^0 - T_1^0)}{(\delta x)_e} \right) - (h_{out} (T_1^0 - T_{out}^0)) \right] \quad (5.3 - 2)$$

$$A_1 T_1 = \frac{A_2}{2} (T_2 + T_2^0) + \frac{h_{out}}{2} (T_{out} + T_{out}^0) + T_1^0 \left(A_1^0 - \frac{A_2}{2} - \frac{h_{out}}{2} \right) \quad (5.3 - 3)$$

Όπου:

$$A_2 = \frac{k_e}{(\delta x)_e}$$

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

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

Αντίστοιχα, οι εξισώσεις (5.3-2) και (5.3-3) ισχύουν και για το εσωτερικό όριο (κόμβος N με τις ακόλουθες αντικαταστάσεις:

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

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

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

Παρατηρούμε ότι για την επίλυση του προβλήματος, οι οριακές συνθήκες που πρέπει να καθοριστούν είναι οι θερμοκρασίες εξωτερικού T_{out} και εσωτερικού T_{in} αέρα, καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές συναγωγής h_{out} και h_{in} .

5.3.1α Διαμόρφωση εξωτερικών οριακών συνθηκών

Ο προσδιορισμός των εξωτερικών οριακών συνθηκών στην περίπτωση που έχουμε φυτεμένο δώμα αποτελεί μακράν το πιο δύσκολο στάδιο της διαδικασίας επίλυσης. Η βλάστηση πάνω από την οροφή διαμορφώνει ένα ιδιαίτερο τοπικό μικροκλίμα, μέσα στο οποίο τα διάφορα κλιματικά μεγέθη είναι διαφοροποιημένα από τα αντίστοιχα της περιρρέουσας ατμόσφαιρας. Αυτό συμβαίνει γιατί μέσα στο χώρο που ορίζεται μεταξύ της ανώτερης επιφάνειας του μέσου ανάπτυξης και του ύψους της βλάστησης, ο οποίος στο εξής θα καλείται **θόλος** (canopy), λαμβάνουν χώρα μια σειρά από φυσικές λειτουργίες των φυτών, οι οποίες δημιουργούν διάφορα ενεργειακά φαινόμενα. Τα φαινόμενα αυτά έχουν ισχυρότατη αλληλεξάρτηση και δεν μπορούν να λυθούν με αναλυτικές σχέσεις. Επομένως, η μαθηματική περιγραφή της συμπεριφοράς της ενέργειας μέσα στο θόλο είναι ένα εξαιρετικά δυναμικό φαινόμενο και δεν υπάρχει έτσι κάποια απλοποιημένη σχέση, με την οποία θα μπορούσαμε να προσεγγίσουμε απευθείας τα χαρακτηριστικά του αέρα εντός του θόλου.

Απώτερος σκοπός της μελέτης της θερμικής συμπεριφοράς του θόλου, είναι να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του αέρα που διαμορφώνεται εντός του, καθώς και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά τη βλάστηση και προσπίπτει στην ανώτερη επιφάνεια της οροφής, σε κάθε χρονική στιγμή του 24ώρου. Τα δυο αυτά μεγέθη θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια κατά τον ενεργειακό ισολογισμό στον εξωτερικό, οριακό κόμβο της διαστρωμάτωσης της κατασκευής.

Σημείωση: Οι τιμές των διαφόρων μεγεθών που απεικονίζονται στα διαγράμματα του εδαφίου αυτού και αφορούν το θόλο (θερμοκρασία, ένταση ακτινοβολίας, υγρασία κτλ) και γενικότερα τη περίπτωση της φυτεμένης οροφής, είναι αυτές που έχουν υπολογιστεί μέσα από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων. Η παρουσίασή τους γίνεται σε αυτό το στάδιο και όχι μετά την ολοκλήρωση της περιγραφής του υπολογιστικού μοντέλου, για να τονιστεί η διαφοροποίηση των εξωτερικών οριακών συνθηκών στη περίπτωση της φυτεμένης οροφής σε σύγκριση με το συμβατικό δώμα.

I. Ισολογισμός ενέργειας στην επιφάνεια του φυλλώματος

$$(\rho c)_f dLAI \frac{dT_f}{dt} = \Phi_{\text{rad,sol}} + \Phi_{\text{rad,TIR}} + \Phi_{\text{conv,f-ca}} + \Phi_{\text{trans,f-ca}} \quad (5.3.1 - 1)$$

ΔΕΙΚΤΗΣ	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ
F	φύλλωμα (foliage)
Rad	ακτινοβολία (radiation)
Sol	ηλιακή (solar)
TIR	θερμική (μεγάλου μήκους κύματος)
Conv	συναγωγή θερμότητας (convection)
Trans	λανθάνων φορτίο εξάτμισης (transpiration)
Ca	αέρας θόλου (canopy air)

Πίνακας 5.3.1-1: Επεξήγηση δεικτών εξίσωσης (5.3.1-1).

Το αριστερό μέλος της πιο πάνω Δ.Ε. αφορά το φύλλωμα αυτό καθ' αυτό, όπου:

- $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$ Πυκνότητα
- $c = 3750 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$ Ειδική θερμοχωρητικότητα
- $d = 0.0005 \text{ m}$ Πάχος
- $LAI = 4$ Leaf Area Index (βλ. Παράγραφος 3.4). Η τιμή αντιπροσωπεύει έναν εκτατικό τύπο κατασκευής.
- $\frac{dT_f}{dt}$ Μεταβολή της θερμοκρασίας T_f ($^\circ\text{K}$) στην επιφάνεια του φύλλου κατά το χρονικό βήμα dt (s).

Αντίστοιχα, το δεξί μέλος της εξίσωσης παρουσιάζει τις διάφορες παραμέτρους που επενεργούν στο ενεργειακό ισοζύγιο στο φύλλωμα:

(i) $\Phi_{\text{rad,sol}}$ - Ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από τα φύλλα (W/m^2)

Ο σημαντικότερος παράγοντας μετάδοσης θερμότητας προς τα φύλλα είναι η ηλιακή ακτινοβολία (ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος). Αυτό βέβαια είναι εν μέρει επιθυμητό, ώστε μέσω της σκίασης να περιορίζεται η ηλιακή πρόσπτωση απευθείας στην επιφάνεια της οροφής. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται προς τα φύλλα είναι το άθροισμα της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφούν τα φύλλα και της μικρής εκείνης ποσότητας ακτινοβολίας που ανακλάται από την επιφάνεια του χώματος, αφού έχει περάσει και δεν έχει απορροφηθεί από τα φύλλα. Η τιμή της υπολογίζεται:

$$\Phi_{\text{rad,sol}} = [1 - \tau_s - (1 - \tau_s)\rho_\infty](1 + \tau_s\rho_g)I_s \quad (5.3.1 - 2)$$

Γίνεται αντιληπτό ότι η ολική ηλιακή ακτινοβολία I_s , δεν απορροφάται στο σύνολό της από τα φύλλα. Ένα μέρος της διαχέεται προς το θόλο ($-\tau_s I_s$), ανάλογα και με το συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος του φυλλώματος τ_s , ο οποίος μπορεί να προσεγγιστεί:

$$\tau_s = e^{-k_s LAI} \quad (5.3.1 - 3)$$

Όπου k_s ο συντελεστής εξάλειψης φύλλων:

$$k_s = 0.74k_l \quad (5.3.1 - 4)$$

Ο συντελεστής εξάλειψης φύλλων για ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος k_l , προσδιορίζεται με βάση το πίνακα:

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΥΛΛΟΥ	k_l
Οριζόντια ($\alpha=0^\circ$)	1:1.05
Κωνική ($\alpha=45^\circ$)	0,829
Κάθετη ($\alpha=90^\circ$)	0,436
Σφαιρική	0,684:0.81

Πίνακας 5.3.1-2: Πίνακας τιμών k_l (α – γωνία μεταξύ οριζόντιου επιπέδου και φύλλου)²⁶

Υποθέτοντας ότι η φυλλωσιά είναι κωνική με $k_l=0.829$ και με $LAI=4$, ο συντελεστής εκπομπής της ηλιακής ακτινοβολίας παίρνει τη τιμή $\tau_s=0.086$.

Πέρα από την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που εκπέμπεται, ένα άλλο ποσοστό αυτής ανακλάται ($-(1-\tau_s)\rho_\infty I_s$) με βάση το λόγο ανάκλασης των φύλλων (albedo) ρ_∞ . Ο λόγος αυτός συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.1 - 0.25. Στη περίπτωση που εξετάζεται, δίνουμε μια μέση τιμή $\rho_\infty=0.175$.

Όπως προαναφέρθηκε, στο σύνολο της ακτινοβολίας που απορροφούν τα φύλλα, προστίθεται και το ποσό εκείνης που ανακλάται από το χώμα φύτευσης ($+\tau_s \rho_g I_s$). Η ανακλώμενη αυτή ακτινοβολία καθορίζεται από τον αντίστοιχο λόγο ανάκλασης του χώματος φύτευσης ρ_g με τιμές μεταξύ 0.15-0.25. Εδώ θέτουμε $\rho_g=0.2$.

Τέλος, οι τιμές της ολικής ακτινοβολίας I_s ποικίλουν ανάλογα με την εποχή, το μήνα, τη μέρα και τη χρονική στιγμή του 24ώρου, ενώ στους υπολογισμούς έχουν ληφθεί υπόψη οι μέσες τιμές που έχουν δημοσιευτεί από την ASHRAE. (βλ. Εικόνα 4.1-2).

(ii) $\Phi_{\text{rad,TIR}}$ - Θερμική ακτινοβολία από (-) και προς (+) φύλλα (W/m^2)

Η συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας (ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος), γίνεται μεταξύ των φύλλων και του ουρανού, των φύλλων και της επιφάνειας του μέσου ανάπτυξης, καθώς και μεταξύ των ιδίων των φύλλων. Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\Phi_{\text{rad,TIR}} = (1 - \tau_l)(\sigma T_{\text{sky}}^4 + \sigma T_{\text{gr}}^4 - 2\sigma T_f^4) \quad (5.3.1 - 5)$$

Όπως φαίνεται και στην εξίσωση (5.3.1-5), το φύλλωμα απορροφά ένα ποσοστό ίσο προς $(1-\tau_l)$ της συνολικής θερμικής ακτινοβολίας που δέχεται. Όπως και στην περίπτωση της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος, έτσι και εδώ η τιμή της συναλλασσόμενης ακτινοβολίας καθορίζεται από το συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος του φυλλώματος τ_l . Για την εξεύρεση του συντελεστή αυτού, θεωρούμε το γινόμενο $\tau_l(\text{LAI})$. Το μέγεθος αυτό αποτελεί το λόγο της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος που εισέρχεται από το ανώτερο ή το κατώτερο στρώμα του θόλου, προς την ακτινοβολία που εξέρχεται από το άλλο τμήμα του θόλου. Επηρεάζεται κυρίως από τη γεωμετρία του θόλου και υπολογίζεται:

$$\tau_l(\text{LAI}) = e^{-k_l \text{LAI}} \quad (5.3.1 - 6)$$

Με βάσει τα όσα αναφέρθηκαν, $k_l=0.684$ και $\text{LAI}=4$, και επομένως $\tau_l=0.0091$.

Η τιμή της θερμική ακτινοβολίας διαμορφώνεται από τη θερμοκρασία του φυλλώματος T_f , τη θερμοκρασία της ανώτερης επιφάνειας του μέσου ανάπτυξης των φυτών (growing media) T_{gr} και τη θερμοκρασία ουρανού:²⁷

$$T_{\text{sky}} = 0.554T_0^{1.5} \quad (5.3.1 - 7)$$

Όπου:

T_0 - θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος (βλ. Εικόνα 4.1-1)

$\sigma = 5.699 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ - σταθερά Stefan – Boltzmann.

Σημείωση: Η θερμοκρασία της ανώτερης επιφάνειας του μέσου ανάπτυξης των φυτών T_{gr} είναι ουσιαστικά η θερμοκρασία T_1 του υπολογιστικού πλέγματος της φυτεμένης οροφής. Πρόκειται δηλαδή για μια άγνωστη παράμετρο, της οποίας η τιμή υπολογίζεται από το σύστημα εξισώσεων του προβλήματος.

(iii) $\Phi_{conv, f-ca}$ - Συναγωγή θερμότητας μεταξύ φύλλων – αέρα θόλου (W/m^2)

Η θερμική συναγωγή του αισθητού φορτίου μεταξύ της επιφάνειας των φύλλων και του αέρα εντός του θόλου, αποτυπώνεται από τον Νευτώνικό Νόμο περί συναγωγής:

$$\Phi_{conv, f-ca} = -2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{r_e} (T_f - T_{ca}) \quad (5.3.1 - 8)$$

Όπου $\rho=1.18 \text{ kg/m}^3$ και $c_p=1006 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$, η πυκνότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα αντίστοιχα του αέρα εντός του θόλου.

Κατ' αρχάς παρατηρούμε ότι στη πιο πάνω εξίσωση εισάγεται άλλη μια άγνωστη παράμετρος, αυτή της θερμοκρασίας του αέρα εντός του θόλου T_{ca} . Για τη θερμοκρασία αυτή ισχύει ότι αναφέρθηκε και για την θερμοκρασία $T_{gr}=T_1$.

Μια άλλη σημαντικότερη παράμετρος που επηρεάζει τη θερμική αυτή συναλλαγή, πέραν της θερμοκρασιακής διαφοράς φυλλώματος – αέρα θόλου ($T_f - T_{ca}$), είναι η μέση αντίσταση του φυλλώματος στη μετάδοση αισθητού θερμικού φορτίου r_e , που είναι γνωστή και σαν «εξωτερική αντίσταση» του φυλλώματος. Αν και τα διάφορα πειραματικά δεδομένα που αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία δε συγκλίνουν σε κάποια μοναδική εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης, η Ιταλίδα γεωπόνος C. Stahghellini, μετά από πειραματική εργασία κατάφερε να προσεγγίσει την «εξωτερική αντίσταση» μέσω της πιο κάτω σχέσης:²⁸

$$r_e = \frac{a l^m}{(|T_f - T_{ca}| + b u_{ca}^2)^n} \quad [S/m] \quad (5.3.1 - 9)$$

Οι συντελεστές a,b,m και n είναι εμπειρικοί. Με βάση σχετική δημοσίευση²⁵ ορίζουμε τις τιμές $a=1174$, $b=207$, $m=0.5$ και $n=0.25$, οι οποίες είναι οι κατάλληλες για ντοματοκαλλιέργειες και αποδεχόμαστε ότι αυτές δεν αποκλίνουν αισθητά από τις αντίστοιχες των φυτών που χρησιμοποιούνται σε μια φυτεμένη οροφή. Όσο αφορά το l, αυτό αντιπροσωπεύει το χαρακτηριστικό μήκος των φύλλων και παίρνει τιμές από 0.05m μέχρι 0.3m. Δίνουμε μια ενδιάμεση τιμή $l=0.15m$.

Η δυσκολία υπολογισμού της r_e , έγκειται στο γεγονός ότι πρέπει να προσδιοριστεί η ταχύτητα του αέρα εντός του θόλου u_{ca} . Ούτε και εδώ υπάρχει μια αποδεδειγμένη σχέση με την οποία να γίνεται ακριβής προσδιορισμός, αλλά το υπολογιστικό πακέτο Energy Plus προσεγγιστικά δίνει²⁹:

$$u_{ca} = 0.83 \sigma_f u_0 \sqrt{C_{hn}^f} + (1 - \sigma_f) u_0 \quad [m/s] \quad (5.3.1 - 10)$$

Όπου:

$\sigma_f = LAI/7$ Κλασματική φυτοκάλυψη (βλ. Παράγραφος 3.4)

C_{hn}^f - Συντελεστής μετάδοσης σε ουδέτερες συνθήκες ατμοσφαιρικής σταθερότητας, όπου:

$$C_{hn}^f = K_v^2 \left[\ln \left(\frac{Z_f - Z_d}{Z_{of}} \right) \right]^{-2} \quad (5.3.1 - 11)$$

Όπου:

$K_v = 0.4$ Σταθερά του Von Karman

$Z_f = 0.6m$

$Z_d = 0.701Z_f^{0.979}$

$Z_{of} = 0.131Z_f^{0.979}$

Επανερχόμενοι στη σχέση (5.3.1-10), πρέπει να καθορίσουμε την ταχύτητα του ανέμου στο περιβάλλον u_0 . Θα χρησιμοποιήσουμε τις μετρήσεις που γίνονται από τους σταθμούς μέτρησης που είναι εγκατεστημένοι εντός της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Από το αρχείο των μετρήσεων βρίσκουμε τη μέση 24ωρη διακύμανση της ταχύτητας για την 21^η Ιουλίου μεταξύ 2001-2003. Χρησιμοποιώντας έτσι τις τιμές αυτές θα υπολογίσουμε στη συνέχεια την ταχύτητα του αέρα εντός του θόλου. Η διαφοροποίηση της ταχύτητας του ανέμου φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Εικόνα 5.3.1-1 – Μέση τιμή της ημερήσιας διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου εντός και εκτός του θόλου για την 21^η Ιουλίου 2001-2003.³⁰

(iv) $\Phi_{trans,f-ca}$ - Λανθάνουσα θερμότητα λόγω εξατμισοδιαπνοής φύλλων (W/m^2)

Η εξατμισοδιαπνοή των φύλλων αποτελεί τη σπουδαιότερη φυσική λειτουργία, πέραν της σκίασης, στην οποία οφείλεται η αποδοτικότητα των φυτεμένων οροφών. Η αποβολή υδρατμών από τα στομάτια των φύλλων μέσω της διαπνοής και η εξάτμισή τους στη συνέχεια, δημιουργούν συνθήκες εξατμιστικής ψύξης, απελευθερώνοντας έτσι λανθάνων φορτίο (βλ. παράγραφος 3.3). Ο ακριβής προσδιορισμός του φορτίου αυτού για κάθε χρονική στιγμή είναι εξαιρετικά δύσκολος, μιας και πρόκειται για ένα πολυσύνθετο φαινόμενο, το οποίο επηρεάζεται από μια σειρά από φυτικές και κλιματικές παραμέτρους. Εμπλέκονται έτσι όροι φυτολογίας - γεωπονίας, κάτι που ξεφεύγει αρκετά από το φάσμα ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες προσεγγιστικές σχέσεις. Κατόπιν μιας μικρής έρευνας και δοκιμών, θα χρησιμοποιηθεί η εξής σχέση υπολογισμού από το υπολογιστικό πακέτο Roofsol:

$$\Phi_{trans,f-ca} = -2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{\gamma(r_e + r_i)} (e_f - e_{ca}) \quad (5.3.1 - 12)$$

Πρωτεύων ρόλο στο μέγεθος της εξατμιστικής ψύξης παίζει η διαφορά ($e_f - e_{ca}$) της τάσης ατμού του αέρα που βρίσκεται επί της επιφάνειας του φύλλου και του αέρα εντός του θόλου. Η τάση ατμού e γενικά υπολογίζεται από το γινόμενο της τάσης κορεσμένου ατμού e_s επί τη σχετική υγρασία w (%) του αέρα.

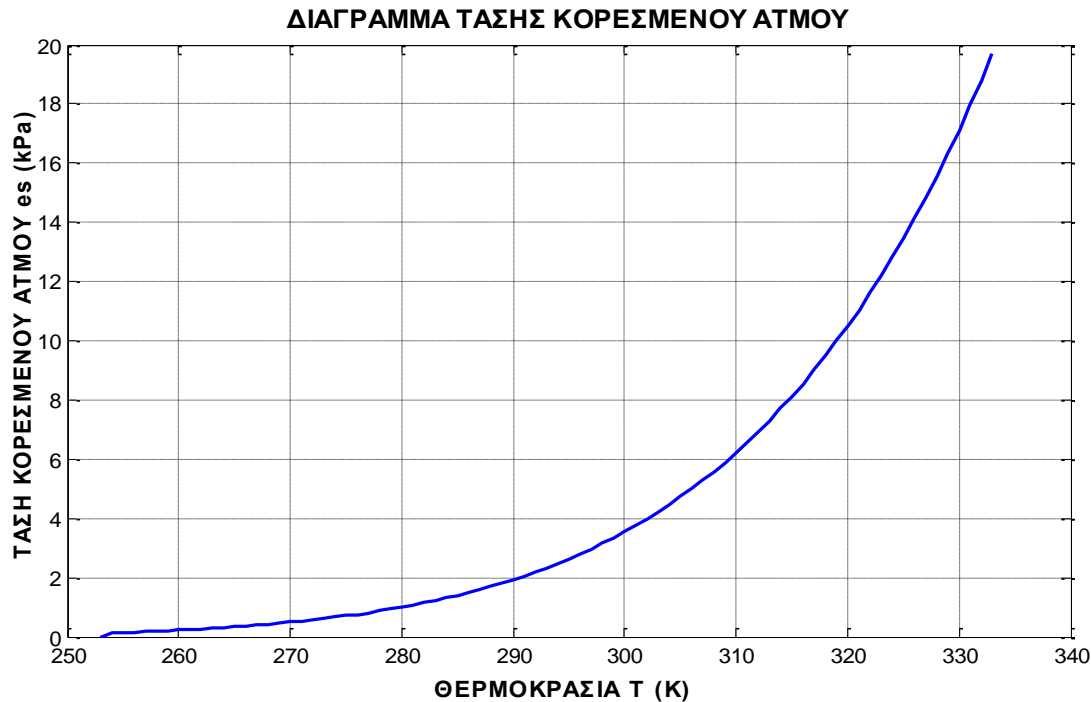
$$e = we_s \quad (5.3.1 - 13)$$

Ο ακριβής προσδιορισμός της τάσης κορεσμένου ατμού e_s γίνεται από το αντίστοιχο διάγραμμα 5.3.1-2 συναρτήσει της θερμοκρασίας του αέρα T ($^{\circ}K$).

Επειδή όμως κατά την εκτέλεση του κώδικα επίλυσης του προβλήματος δεν είναι εφικτή η άντληση δεδομένων από το γράφημα αυτό, μπορούμε με σχετική ακρίβεια να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση:

$$e_s = 610.78 e^{\frac{17.2694T}{T+238.3}} \quad (Pa) \quad (5.3.1 - 14)$$

Όπου T ($^{\circ}C$) η θερμοκρασία του αέρα και e το λογαριθμικό e και όχι τη τάση ατμού.



Εικόνα 5.3.1-2: Διάγραμμα τάσης κορεσμένου ατμού e_s αέρα θερμοκρασίας T .

Στη περίπτωση της τάσης ατμού του αέρα επί της επιφάνειας του φυλλώματος e_f , αυτή ταυτίζεται με την τάση κορεσμένου ατμού ($e_f = e_{sf}$), αφού στα φύλλα έχουμε υδρατμό, άρα $w=100\%$. Με τη βοήθεια έτσι της T_f , υπολογίζεται η e_f . Για τον υπολογισμό της τάσης ατμού του αέρα του θόλου e_{ca} , χρησιμοποιείται η σχέση:

$$e = \frac{\theta p_0}{(0.62198 + \theta)} \quad [\text{Pa}] \quad (5.3.1 - 15)$$

Όπου $p_0=101.325 \times 10^3$ Pa η πίεση του ατμοσφαιρικού αέρα (θεωρούμε ίση τη πίεση του αέρα εντός θόλου) και θ η ειδική υγρασία του αέρα (specific air humidity – kg/kg).

Για την εξεύρεση της ειδικής υγρασίας θ , θα πρέπει να γίνει ένας ενεργειακός ισολογισμός της ειδικής υγρασίας του αέρα (specific humidity) εντός του θόλου:

$$(\rho c)_{ca} L \frac{d\theta_{ac}}{dt} = \Phi_{vap,ca-f} + \Phi_{vap,ca-gr} + \Phi_{vap,ca-0} \quad (5.3.1 - 16)$$

Όπου:

$L=0.6\text{m}$ Ύψος της βλάστησης

$\frac{d\theta_{ca}}{dt}$ Μεταβολή της ειδικής υγρασίας θ_{ca} (kg υδρατμ. / kg αέρα) αέρα θόλου κατά το χρονικό βήμα dt (s).

Το δεξί μέλος της εξίσωσης παρουσιάζει τις διάφορες παραμέτρους που επενεργούν στο ισοζύγιο της ειδικής υγρασίας:

➤ $\Phi_{vap,ca-f}$ - Ροή υγρασίας μεταξύ αέρα θόλου και φύλλων (kg/m^2)

Πρόκειται για τη μεταβολή της υγρασίας που προκαλεί η εξατμισοδιαπνοή:

$$\Phi_{vap,ca-f} = 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{\gamma \Lambda (r_e + r_i)} (e_f - e_{ca}) \quad (5.3.1 - 17)$$

Όπου Λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης (T θερμοκρασία σε $^{\circ}C$):

$$\Lambda = (2.501 - 0,002361T) \times 10^6 \quad [J/kg] \quad (5.3.1 - 18)$$

γ η θερμοδυναμική ψυχομετρική σταθερά:

$$\gamma = \frac{(\rho c_p)_{ca}}{0,622\Lambda} \quad [Pa/K] \quad (5.3.1 - 19)$$

Και r_i η αντίσταση στομάτων (stomatal resistance – βλ. παράγραφος 3.4), καλούμενη και ως «εσωτερική αντίσταση» του φυλλώματος στη μετάδοση λανθάνουσας θερμότητας. Επηρεάζεται από μια σειρά φυτολογικών και περιβαλλοντολογικών παραμέτρων και παίρνει διάφορες τιμές κατά τη διάρκεια μια χρονικής περιόδου. Περιορίζοντας τη παράμετρο καθαρά στο περιβαλλοντολογικό της χαρακτήρα, και εδώ με βάση την C. Stahghellini:

$$r_i = r_{min} \widetilde{r}_i(I_s) \widetilde{r}_i(T_f) \widetilde{r}_i(CO_2) \widetilde{r}_i(e_f - e_{ca}) \quad [s/m] \quad (5.3.1 - 20)$$

Όπου $r_{min}=82$ s/m είναι μια ελάχιστη δυνατή αντίσταση, της οποίας η τιμή έχει καθαρά φυτολογικό χαρακτήρα. Τα σύμβολα \widetilde{r}_i αντιπροσωπεύουν αδιάστατες συναρτήσεις μεγαλύτερες της μονάδας, οι οποίες ποσοτικοποιούν τη σχετική αύξηση της αντίστασης r_i , ανάλογα με τη τιμή της παραμέτρου που εκφράζουν (ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία I_s , θερμοκρασία φυλλώματος T_f , συγκέντρωση CO_2 εντός θόλου και διαφορά τάσης ατμού $e_f - e_{ca}$). Έχουμε:

$$\widetilde{r}_i(I_s) = \frac{\bar{I}_s + C1}{\bar{I}_s + C2}, \quad \text{όπου } \bar{I}_s = \frac{I_s}{2LAI} \quad (5.3.1 - 21\alpha)$$

$$\widetilde{r}_i(T_f) = 1 + C3(T_f - T_m)^2, \quad \text{όπου } T_m = 24.5^{\circ}C \quad (5.3.1 - 21\beta)$$

$$\widetilde{r}_i(CO_2) = 1 + C4(CO_2 - 200)^2, \quad \text{υποθέτοντας ότι } CO_2 = 300 \quad (5.3.1 - 21\gamma)$$

$$\widetilde{r}_i(e_f - e_{ca}) = 1 + C4(e_f - e_{ca})^2 \quad (5.3.1 - 21\delta)$$

Για ντοματοκαλλιέργεια $C_1=4.3$, $C_2=0.54$, $C_3=2.3 \times 10^{-2}$, $C_4=6.1 \times 10^{-7}$, $C_5=4.3 \times 10^{-7}$. Για περισσότερη ακρίβεια, μπορούμε να θέσουμε:

$$r_i = f r_{i, \text{tom}} \quad (5.3.1 - 22)$$

Όπου $f < 1$ αν στα φυτά της κατασκευής συναντάται πιο έντονο το φαινόμενο της διαπνοής ή $f > 1$ πιο ασθενές. Γενικά $f=0.5:2$. Εδώ, θεωρούμε $f=1.25$ σαν μια ενδιάμεση κατάσταση.

➤ $\Phi_{\text{vap,ca-gr}}$ - Ροή υγρασίας μεταξύ αέρα θόλου και χώματος (kg/m^2)

Στο μέσο ανάπτυξης των φυτών υπάρχει υγρασία λόγω της άρδευσης, της οποίας η τιμή επηρεάζει, αλλά και επηρεάζεται από την υγρασία του αέρα μέσα στο θόλο.

$$\Phi_{\text{vap,ca-gr}} = \frac{h_{\text{veg}}}{\gamma \Lambda} (e_{\text{gr}} - e_{\text{ca}}) \quad (5.3.1 - 23)$$

Το πόσο υγρό πρέπει να είναι το χώμα φύτευσης είναι ένα πρόβλημα καθαρά γεωπονικής φύσεως, το οποίο εξ άλλου είναι σχετικό, μιας και έχει να κάνει με το είδος της βλάστησης, το στάδιο ανάπτυξης των φυτών τις τοπικές κλιματικές και περιβαλλοντολογικές συνθήκες κτλ. Επίσης, η παρουσία της υγρασίας και μόνο περιπλέκει ακόμη πιο πολύ το πρόβλημα, μεταβάλλοντας τα θερμικά και μη χαρακτηριστικά του χώματος (πυκνότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα). Επομένως, γίνεται η παραδοχή (όπως άλλωστε και στις περισσότερες σχετικές δημοσιεύσεις) ότι μελετάμε ένα "ξηρό" φυτεμένο δώμα, με $w_{\text{gr}}=0$. Έτσι η τάση ατμού επί της επιφάνειας του χώματος είναι πρακτικά μηδέν, με τον αέρα επομένως του θόλου να χάνει υγρασία προς το χώμα, ανάλογα και με το συντελεστή συναγωγής αέρα θόλου – χώματος h_{veg} . Ο συντελεστής αυτός, λόγω και της περιορισμένης ταχύτητας του ανέμου εντός του θόλου, είναι αρκετά χαμηλός με μια μέση τιμή την $h_{\text{veg}}=1.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

➤ $\Phi_{\text{vap,ca-}\infty}$ - Ροή υγρασίας μεταξύ αέρα θόλου και περιβάλλοντος (kg/m^2)

Η συναλλαγή αυτή της υγρασίας, οφείλεται στη μεταφορά μάζας μεταξύ του αέρα του θόλου και του αέρα περιβάλλοντος.

$$\Phi_{\text{vap,ca-}\infty} = \frac{h_{\text{ca}\infty}}{\gamma \Lambda} (e_{\text{ca}} - e_0) \quad (5.3.1 - 24)$$

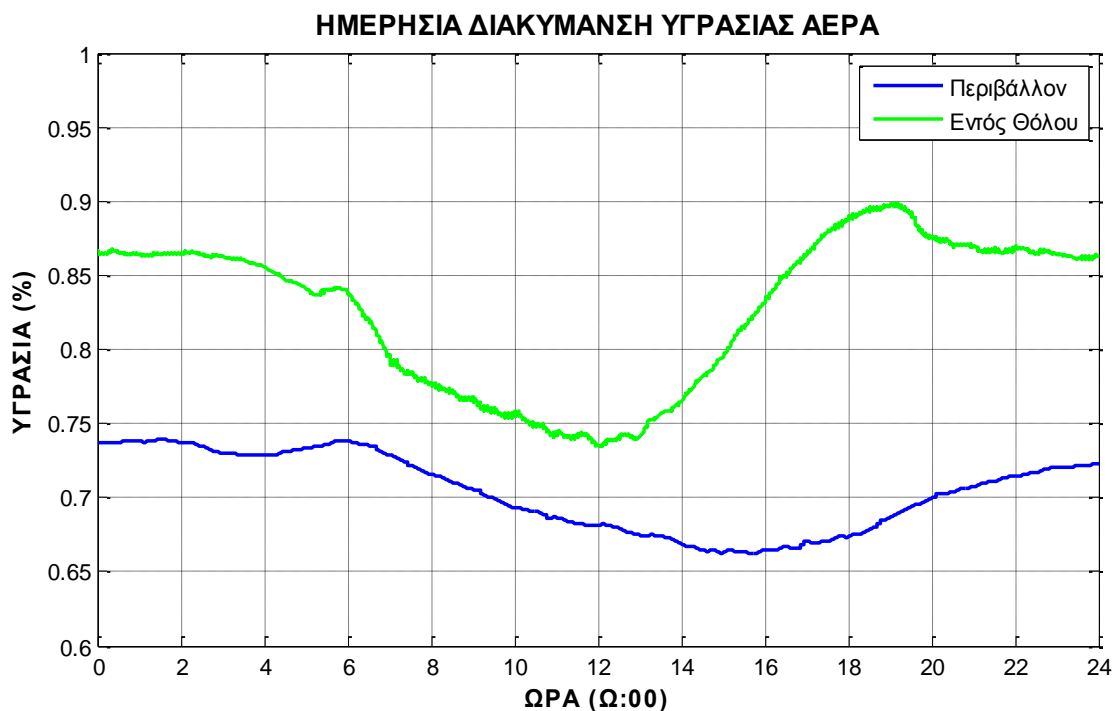
Η τάση ατμού του αέρα περιβάλλοντος e_0 υπολογίζεται, αφού βρούμε τη τάση κορεσμένου ατμού e_{s0} από τη σχέση (5.3.1-13), με βάση τη θερμοκρασία (βλ. παράγραφος

4.1) και τη σχετική υγρασία του αέρα περιβάλλοντος, την οποία παίρνουμε και αυτή από μετρήσεις που γίνονται στη Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, όπως ακριβώς και στη περίπτωση της ταχύτητας του ανέμου. Ο συντελεστής συναγωγής h_{ca0} αφορά την συναλλαγή μεταξύ αέρα θόλου – αέρα περιβάλλοντος και υπολογίζεται:

$$h_{ca\infty} = RL(\rho c_p)_{ca} \quad [W/m^2\cdot K] \quad (5.3.1 - 25)$$

Ο συντελεστής R (1/s) απεικονίζει τις ανανεώσεις του αέρα μέσα στο θόλο και κυμαίνεται μεταξύ 0.033 – 0.25 ανανεώσεις το δευτερόλεπτο. Θεωρούμε $R=0.1s^{-1}$.

Υπολογίζοντας επομένως την ειδική υγρασία θ (kg υδρατμ. / kg αέρα) του αέρα εντός του θόλου, προσδιορίζουμε την e_{ca} από τη σχέση (5.3.1-15). Μπορούμε επίσης να υπολογίσουμε την τάση κορεσμένου ατμού e_{sca} από την εξίσωση (5.3.1-14), ώστε να προσδιορίσουμε την σχετική υγρασία w του αέρα θόλου και να τη συγκρίνουμε με την αντίστοιχη του αέρα περιβάλλοντος.



Εικόνα 5.3.1-3 – Μέση τιμή της ημερήσιας διακύμανσης της σχετικής υγρασίας του αέρα περιβάλλοντος και του αέρα εντός του θόλου.²⁹

Παρατηρούμε ότι ο αέρας εντός του θόλου είναι αρκετά υγρός και αυτό οφείλεται βεβαίως στην υγρασία που προσδίδουν τα φυτά μέσω της διαπνοής.

II. Ισολογισμός ενέργειας στον αέρα εντός του θόλου.

$$(\rho c)_{ca} L \frac{dT_{ca}}{dt} = \Phi_{conv,ca-f} + \Phi_{conv,ca-gr} + \Phi_{conv,ca-0} \quad (5.3.1 - 26)$$

Όπου:

$\frac{dT_{ca}}{dt}$ Μεταβολή της θερμοκρασίας T_{ca} (°K) του αέρα εντός του θόλου κατά το χρονικό βήμα dt (s).

Αντίστοιχα, το δεξί μέλος της εξίσωσης παρουσιάζει τις διάφορες παραμέτρους που επενεργούν στο ενεργειακό ισοζύγιο στο θόλο:

(i) $\Phi_{conv,ca-f}$ - Συναγωγή θερμότητας μεταξύ φύλλων – αέρα θόλου (W/m^2)

$$\Phi_{conv,f-ca} = -\Phi_{conv,ca-f} \quad (5.3.1 - 27)$$

(ii) $\Phi_{conv,ca-gr}$ - Συναγωγή θερμότητας μεταξύ αέρα θόλου και χώματος (W/m^2)

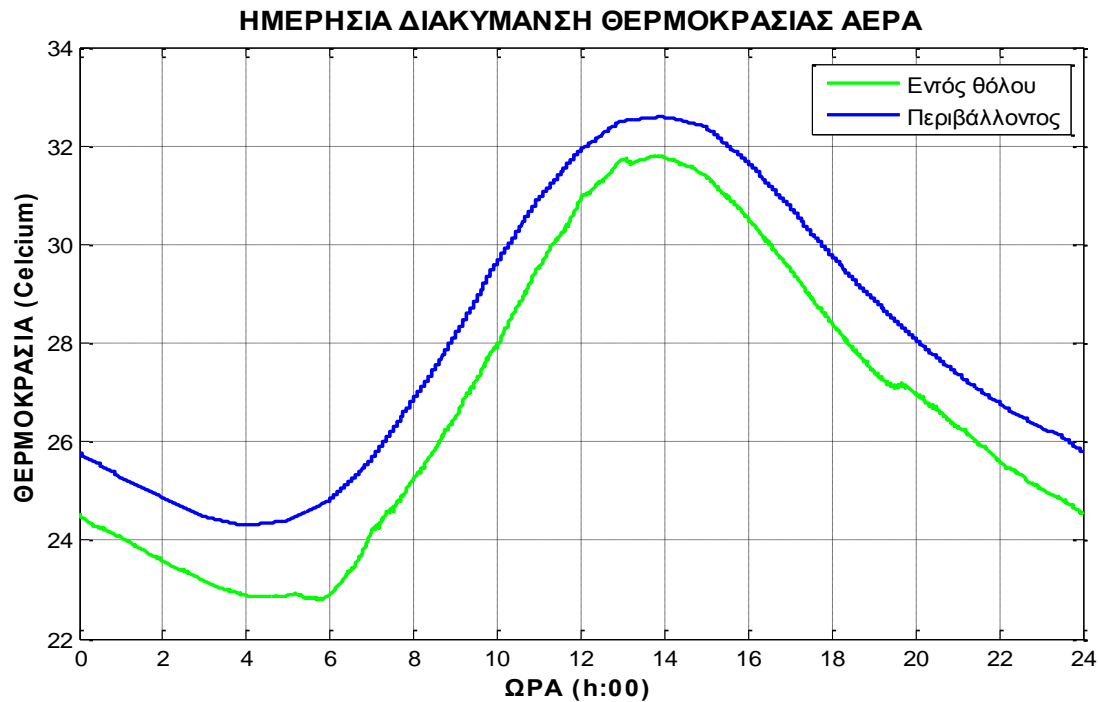
$$\Phi_{conv,ca-gr} = h_{veg}(T_{gr} - T_{ca}) \quad (5.3.1 - 28)$$

Κατ' αντιστοιχία με την $\Phi_{vap,ca-gr}$.

(iii) $\Phi_{conv,ca-0}$ - Συναγωγή θερμότητας μεταξύ αέρα θόλου – περιβάλλοντος (W/m^2)

$$\Phi_{conv,ca-\infty} = h_{ca\infty}(T_{ca} - T_0) \quad (5.3.1 - 29)$$

Κατ' αντιστοιχία με την $\Phi_{vap,ca-0}$.



Εικόνα 5.3.1-4 – Μέση τιμή της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας αέρα.

Στο πιο πάνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η αρχική υπόθεση, ότι δηλαδή η θερμοκρασία κάτω από τη βλάστηση είναι μικρότερη από την θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος με την οποία συνάγεται θερμότητα σε μια συμβατική οροφή. Η μείωση αυτή δεν είναι σταθερή, αλλά βλέπουμε να είναι αυξημένη τις πρωινές και βραδινές ώρες, ενώ κατά τις θερμές μεσημβρινές ώρες, η θερμοκρασία εντός του θόλου φαίνεται να προσεγγίζει την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

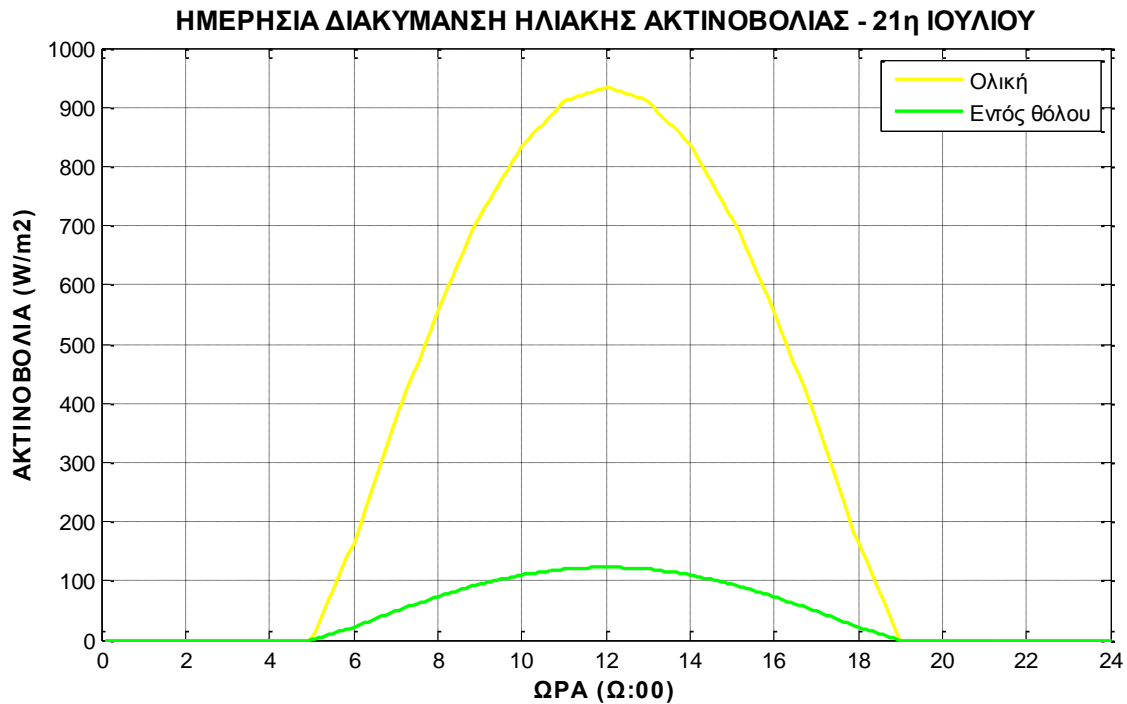
Όπως έχει αναφερθεί, πέραν της μείωσης της θερμοκρασίας πάνω από την εξωτερική επιφάνεια της οροφής, η φυτοκάλυψη σκοπό έχει επίσης να μειώσει την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας επί την οροφής μέσω της σκίασης. Από την εξίσωση (5.3.1-2), το ποσό της ακτινοβολίας που διαπερνά το φύλλωμα και προσπίπτει στην οροφή (χώμα φύτευσης) I_{gr} υπολογίζεται:

$$I_{gr} = \tau_s I_s \quad [W/m^2] \quad (5.3.1 - 30)$$

Όπου:

$\tau_s=0.086$ Ο συντελεστής εκπομπής της ηλ. ακτινοβολίας όπως έχει υπολογιστεί

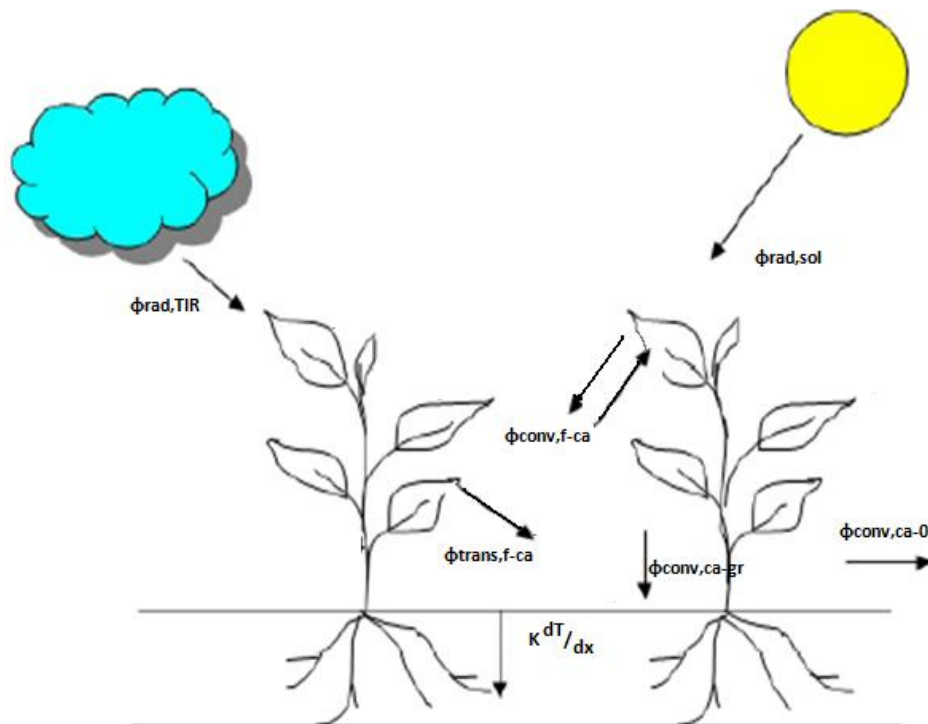
I_s Η ολική ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2) – βλ. εικόνα 4.1-2



Εικόνα 5.3.1-5 : Μέση τιμή της ημερήσιας διακύμανσης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και της αντίστοιχης που διαπερνά το φύλλωμα και εκπέμπεται στο θόλο.

Από το πιο πάνω διάγραμμα, γίνεται εύκολα αντιληπτό το πόσο μεγάλο είναι το θερμικό όφελος από τη παρουσία της βλάστησης σε μια φυτεμένη οροφή. Βλέπουμε ότι με μια μέση φυτοκάλυψη ($LAI=4$), η ηλιακή ακτινοβολία που διαπερνά το φύλλωμα δε ξεπερνά το 15% της ολικής. Με ακόμα πιο πυκνή κάλυψη, αυξάνοντας το LAI το ποσοστό αυτό μπορεί υπό προϋποθέσεις να πέσει κάτω από το 5%, αναιρώντας έτσι σχεδόν εξ ολοκλήρου τον παράγοντα της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος!

Οι Δ.Ε (5.3.1-1) και (5.3.1-26) που διατυπώνουν τον ενεργειακό ισολογισμό στο φύλλωμα και στον αέρα του θόλου αντίστοιχα, θα ενταχθούν στο σύστημα των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών όπως αυτό παρουσιάζεται στις παραγράφους 5.2 και 5.3.



Εικόνα 5.3.1-6: Σχηματική απεικόνιση των ενεργειακών ισολογισμών στη φυτεμένη οροφή.

Β. ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΟΡΟΦΗ (ΑΠΛΗ ΜΟΝΩΣΗ)

Στην περίπτωση αυτή ο προσδιορισμός των εξωτερικών οριακών συνθηκών είναι σαφώς πιο εύκολος. Η θερμοκρασία του αέρα που συνάγει θερμότητα με την επιφάνεια της οροφής και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι τα αντίστοιχα μεγέθη περιβάλλοντος, όπως αυτά φαίνονται στα γραφήματα (5.3.1-4) και (5.3.1-5) με μπλε και κίτρινο χρώμα αντίστοιχα.

Είναι προφανές ότι οι οριακές συνθήκες στη περίπτωση του φυτεμένου δώματος είναι αρκετά ηπιότερες σε σχέση με τη περίπτωση της γυμνής ταράτσας. Μετά τον καθορισμό των οριακών συνθηκών του προβλήματος, το επόμενο βήμα είναι να εξεταστεί η συναγωγή θερμότητας του αέρα με την επιφάνεια της κατασκευής.

5.3.1β Μετάδοση θερμότητας στην επιφάνεια της οροφής

Α. ΦΥΤΕΜΕΝΗ ΟΡΟΦΗ

Η ταχύτητα της θερμικής ροής από και προς την εξωτερική επιφάνεια της οροφής υπολογίζεται:

$$\dot{q}_{ca-gr} = \Phi_{rad,sol-gr} + \Phi_{rad,TIR-gr} + \Phi_{conv,ca-gr} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5.3.1 - 31)$$

Αναλυτικά:

(i) $\Phi_{rad,sol-gr}$ - Απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία από το μέσο ανάπτυξης (W/m^2)

Όπως σημειώθηκε στην παράγραφο 5.1, από το συνολικό ποσό της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας I_s , ένα αρκετό μικρό ποσό διαπερνά τη βλάστηση και προσπίπτει στην οροφή I_{gr} . Από την προσπίπτουσα αυτή ακτινοβολία μόνο ένα μέρος της απορροφάται από την κατασκευή και αυτό ισούται με:

$$\Phi_{rad,sol-gr} = (1 - \rho_{gr})I_{gr} \quad (5.3.1 - 32)$$

Όπως αναφέρθηκε κατά τον ενεργειακό ισολογισμό στο φύλλωμα, κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο χώμα φύτευσης, ένα κομμάτι της ανακλάται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήσαμε ότι εξαρτάται από το λόγο ανάκλασης (albedo), όπου στη περίπτωση του χώματος φύτευσης παίρνει τιμές $\rho_{gr}=0.15-0.25$. Εδώ θέτουμε $\rho_{gr}=0.2$.

(ii) $\Phi_{rad,TIR-gr}$ - Θερμική ακτινοβολία από και προς το χώμα φύτευσης (W/m^2)

Κατά αντιστοιχία με τα περί θερμικής ακτινοβολίας που επισημάνθηκαν στον ενεργειακό ισολογισμό στο φύλλωμα και εδώ έχουμε συναλλαγή θερμότητας δια ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος από (-) και προς (+) την επιφάνεια της κατασκευής:

$$\Phi_{rad,TIR-gr} = - \frac{\sigma_f \epsilon_{gr} \epsilon_f \sigma}{\epsilon_l} (T_{gr}^4 - T_f^4) \quad (5.3.1 - 33)$$

Το νέο μέγεθος που εμφανίζεται εδώ είναι η διαχυτικότητα ϵ , όπου για το μέσο ανάπτυξης gr και το φύλλωμα f οι τιμές κυμαίνονται συνήθως:

$$\epsilon_{gr} = 0.92-0.98 \quad - \quad \text{Θέτουμε } \epsilon_{gr} = 0.95$$

$$\epsilon_f = 0.94-0.99 \quad - \quad \text{Θέτουμε } \epsilon_f = 0.965$$

$$\text{Ενώ ισχύει: } \epsilon_l = \epsilon_{gr} + \epsilon_f - \epsilon_f \epsilon_{gr}$$

(iii) $\Phi_{conv,ca-gr}$ - Συναγωγή θερμότητας αέρα θόλου – μέσο ανάπτυξης (W/m^2)

Όπως και στην περίπτωση της ροής του αέρα ανάμεσα στα φύλλα, έτσι και κατά τη κίνηση του αέρα του θόλου προς την επιφάνεια της κατασκευής, η θερμοκρασιακή τους διαφορά ($T_{ac}-T_{gr}$) προκαλεί μετάδοση θερμότητας δια συναγωγής:

$$\Phi_{conv,ca-gr} = h_{veg}(T_{ca} - T_{gr}) \quad (5.3.1 - 34)$$

Με συντελεστή συναγωγής $h_{veg} = 1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

B. ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΟΡΟΦΗ

Ομοίως με τη φυτεμένη οροφή η ταχύτητα της θερμικής αυτής ροής υπολογίζεται:

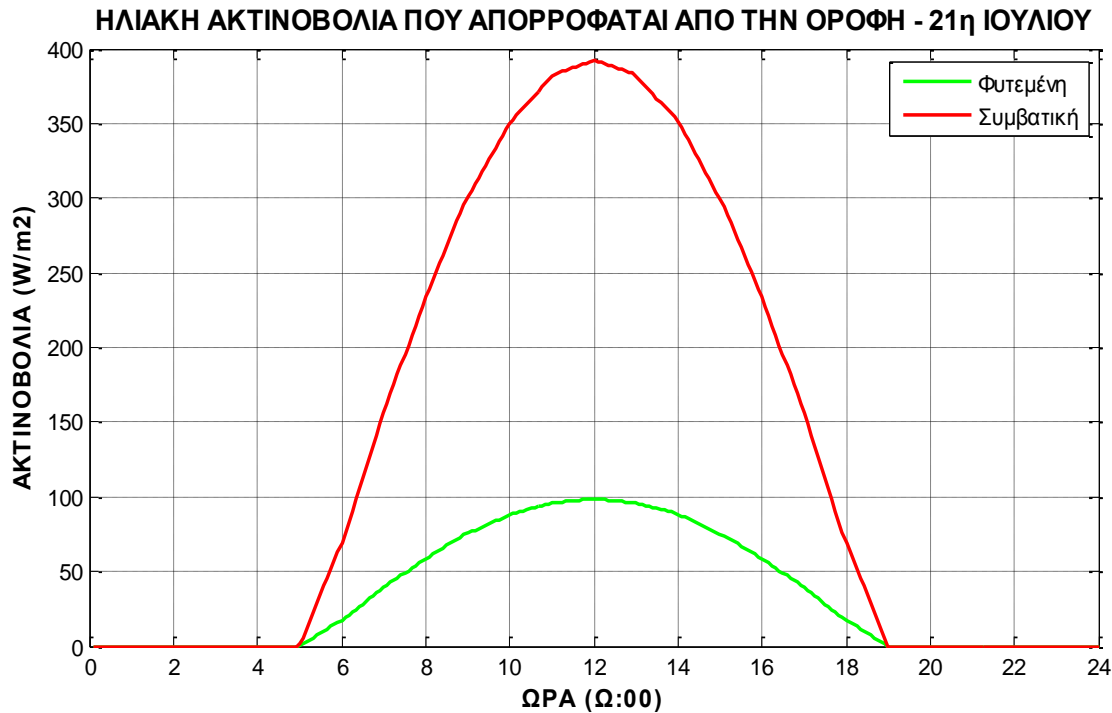
$$\dot{q}_{0-r} = \Phi_{rad,sol-r} + \Phi_{rad,TIR-r} + \Phi_{conv,0-r} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5.3.1 - 35)$$

Αναλυτικά:

(i) $\Phi_{rad,sol-r}$ - Απορροφόμενη ηλιακή ακτινοβολία από την οροφή (W/m^2)

Η ηλιακή ακτινοβολία εδώ προσπίπτει προφανώς στο σύνολό της στην επιφάνειας της οροφής (δείκτης r). Ωστόσο, μεγάλο ποσοστό της και εδώ ανακλάται. Η ανάκλαση στην περίπτωση αυτή είναι έντονη, μιας και συνηθίζεται οι οροφές αυτές να βάφονται με τη χαρακτηριστική ασημομπογιά των ταρατσών. Χρησιμοποιείται επομένως και εδώ η εξίσωση (5.3.1-32) με την προσπίπτουσα όμως ακτινοβολία να είναι η ολική I_s , και με λόγο ανάκλασης $\rho_r=0.58$. Αυτός προσδιορίζεται βάσει του λόγου απορρόφησης για ανοιχτόχρωμη επιφάνεια οροφής που δίνει η ASHRAE, που είναι ίσος με $\alpha=0.42$. Κάνουμε δηλαδή την παραδοχή ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία είτε απορροφάται, είτε ανακλάται από την επιφάνεια ($\alpha=1-\rho_r$).

Στο διάγραμμα που ακολουθεί αποτυπώνεται ξεκάθαρα ότι η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από μια οροφή στην οποία έχει εγκατασταθεί βλάστηση, είναι πολύ μικρότερη από μια γυμνή οροφή με απλή μόνωση. Αξιοσημείωτο επίσης, είναι το γεγονός ότι η διαφορά αυτή είναι αρκετά μεγάλη ακόμη και στα μοντέλα που εξετάζονται όπου, αφενός έχει εκλεγεί εκτατικός τύπος φυτεμένης οροφής χωρίς πάρα πολύ πυκνή φυτοκάλυψη - σκίαση (LAI=4), αφετέρου, έγινε η παραδοχή ότι η συμβατική οροφή είναι βαμμένη με μπογιά ψηλής ηλιακής ανάκλασης. Προσεγγιστικά φαίνεται να ισχύει $\Phi_{rad,sol-gr} \approx 0.25 \Phi_{rad,sol-r}$



Εικόνα 5.3.1-7: Διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από μια φυτεμένη και μια συμβατική οροφή.

(ii) $\Phi_{rad,TIR-r}$ - Θερμική ακτινοβολία από την οροφή (W/m^2)

Η θερμική ακτινοβολία υπεισέρχεται στους υπολογισμούς στην περίπτωση αυτή υπό τη μορφή ενός διορθωτικού συντελεστή για μεγάλο μήκος κύματος ακτινοβολία $\epsilon\Delta R$ (W/m^2K), όπου:

$$\Phi_{rad,TIR-r} = \epsilon\Delta R = -63 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (5.3.1 - 36)$$

(iii) $\Phi_{conv,ca-r}$ - Συναγωγή θερμότητας αέρας περιβάλλοντος – οροφή (W/m^2)

Χρησιμοποιείται και εδώ η εξίσωση (5.3.1-34) με τη διαφορά ότι αντί προφανώς της θερμοκρασίας αέρα θόλου T_{ca} θα ληφθεί υπόψη η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος T_0 , ενώ ο συντελεστής συναγωγής στη περίπτωση αυτή είναι $h_{roof}=16.3 \text{ W/m}^2K$. Επομένως, πέρα από τις υψηλότερες θερμοκρασίες στις οποίες υποβάλλεται η εξωτερική επιφάνεια της οροφής συγκριτικά με το φυτεμένο δώμα (βλ. διάγραμμα 5.3.1-4), ο κατά πολύ μεγαλύτερος συντελεστής συναγωγής καθιστά την κατασκευή πιο ευάλωτη στις διακυμάνσεις της εξωτερικής θερμοκρασίας.

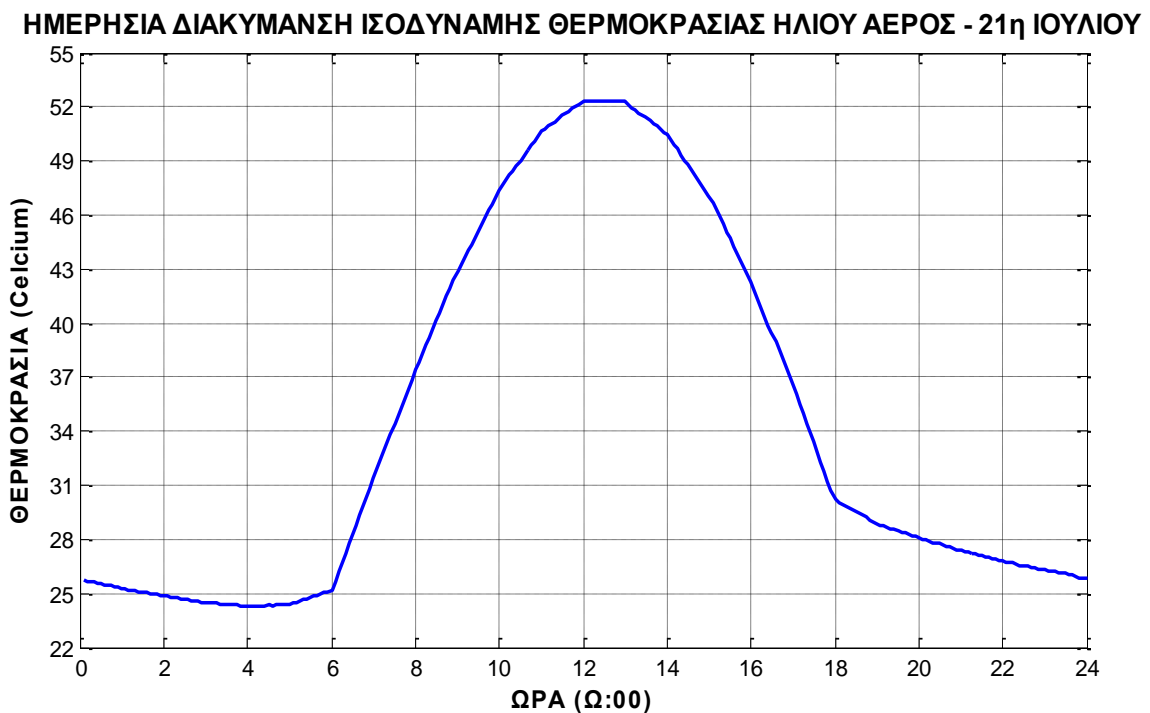
Συνυπολογίζοντας τις παραμέτρους που διαμορφώνουν την εισερχόμενη θερμοροή στη συμβατική οροφή, η ASHRAE έχει διατυπώσει την ισοδύναμη θερμοκρασία ηλίου – αέρος T_e :

$$T_e = T_0 + \frac{\alpha}{h_{\text{roof}}} I_t - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_{\text{roof}}} \quad [^\circ\text{K}] \quad (5.3.1 - 37)$$

Έτσι η εξίσωση (5.2.5) μπορεί να διατυπωθεί και:

$$\dot{q}_{0-r} = h_{\text{roof}} (T_e - T_r) \quad (5.3.1 - 38)$$

Με βάση την εξίσωση (5.3.1-37):



Εικόνα 5.3.1-8 – Διακύμανση της ισοδύναμης θερμοκρασίας ηλίου αέρος.

Με την ίδια λογική μπορούμε να υπολογίσουμε μια αντίστοιχη ισοδύναμη θερμοκρασία ηλίου αέρα για το θόλο στην περίπτωση της φυτεμένης οροφής:

$$T_{e,ca} = T_{ca} + \frac{1}{h_{\text{veg}}} \left[(1 - \rho_{\text{gr}}) I_{\text{gr}} - \frac{\sigma_f \varepsilon_{\text{gr}} \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_l} (T_{\text{gr}}^4 - T_f^4) \right] \quad (5.3.1 - 39)$$

Αντικαθιστώντας τις ισοδύναμες θερμοκρασίες για τις δυο περιπτώσεις T_e και $T_{e,ca}$ στην εξίσωση (5.3-3) όπου T_{out} , οι εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών στο εξωτερικό όριο του πλέγματος (κόμβος 1) είναι έτοιμες.

5.3.2α Διαμόρφωση εσωτερικών οριακών συνθηκών

Το ζητούμενο εδώ είναι ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του αέρα εντός του κτιρίου T_{in} σε κάθε χρονική στιγμή του 24ώρου, με τον οποίο συναλλάσσει θερμότητα δια συναγωγής η εσωτερική επιφάνεια της κατασκευής (ταβάνι). Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να υπολογιστούν τα διάφορα θερμικά φορτία από τους παράγοντες που διαμορφώνουν την θερμοκρασία του χώρου, πέραν βεβαίως από την οροφή που έχει περιγραφεί στις προηγούμενες παραγράφους.

Ένας ακριβής υπολογισμός θα πρέπει να περιλαμβάνει την μελέτη όλων εκείνων των παραμέτρων που επενεργούν λίγο ή πολύ στη διαμόρφωση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Έτσι, πέρα από τις θερμοροές μέσω της οροφής, των τοίχων και των υαλοπινάκων, θα πρέπει να υπολογιστούν επίσης όλα τα υπόλοιπα θερμικά κέρδη από τις ηλεκτρικές συσκευές, το φωτισμό, τα άτομα που βρίσκονται εντός του χώρου κτλ. Μια τέτοια ανάλυση θα ήταν ωστόσο ιδιαίτερα πολύπλοκη λόγω του ακαθόριστου και ακανόνιστου της χρήσης του κτιρίου, καθώς και χρονοβόρα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα φορτία αυτά υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν είναι αρκετά ώστε να προκαλέσουν θεαματικές μεταβολές στη θερμοκρασία του χώρου, στη παρούσα μελέτη αμελούνται. Έτσι η εξέταση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου επικεντρώνεται στα θερμικά κέρδη από την οροφή, των τέσσερις πλαϊνούς τοίχους, τους υαλοπίνακες, τη διείσδυση του αέρα μέσω των ανοιγμάτων και από την εσωτερική τοιχοποιία.

Ανεξάρτητα επομένως από το είδος της οροφής, φυτεμένης ή μη, αμφότερες για τις δυο περιπτώσεις ισχύει:

A. ΘΕΡΜΟΡΟΗ ΑΠΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΤΟΙΧΟΥΣ

Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου συναλλάσσει θερμότητα με τον αέρα περιβάλλοντος θερμοκρασίας T_0 , ενώ υπόκειται και στην ηλιακή ακτινοβολία I_t . Ενώ προφανώς η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος είναι σταθερή για τους τέσσερις τοίχους και η διακύμανσή της φαίνεται στο Διαγρ. 4.1-1, η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάθε τοίχο διαφέρει ανάλογα με τον προσανατολισμό. Μπορούμε ωστόσο και σε αυτή τη περίπτωση να χρησιμοποιήσουμε την αντίστοιχη ισοδύναμη θερμοκρασία ήλιου αέρος, κατά τα πρότυπα της ASHRAE:

$$T_{e,orien} = T_0 + \frac{\alpha}{h_{ex,wall}} I_{t,orien} \quad [^{\circ}K] \quad (5.3.2 - 1)$$

Όπου:

$T_{e,orien}$ - Ισοδύναμη θερμοκρασία ήλιου αέρος σε κάθε προσανατολισμό (όπου $orien \rightarrow$ east ή west ή south ή north)

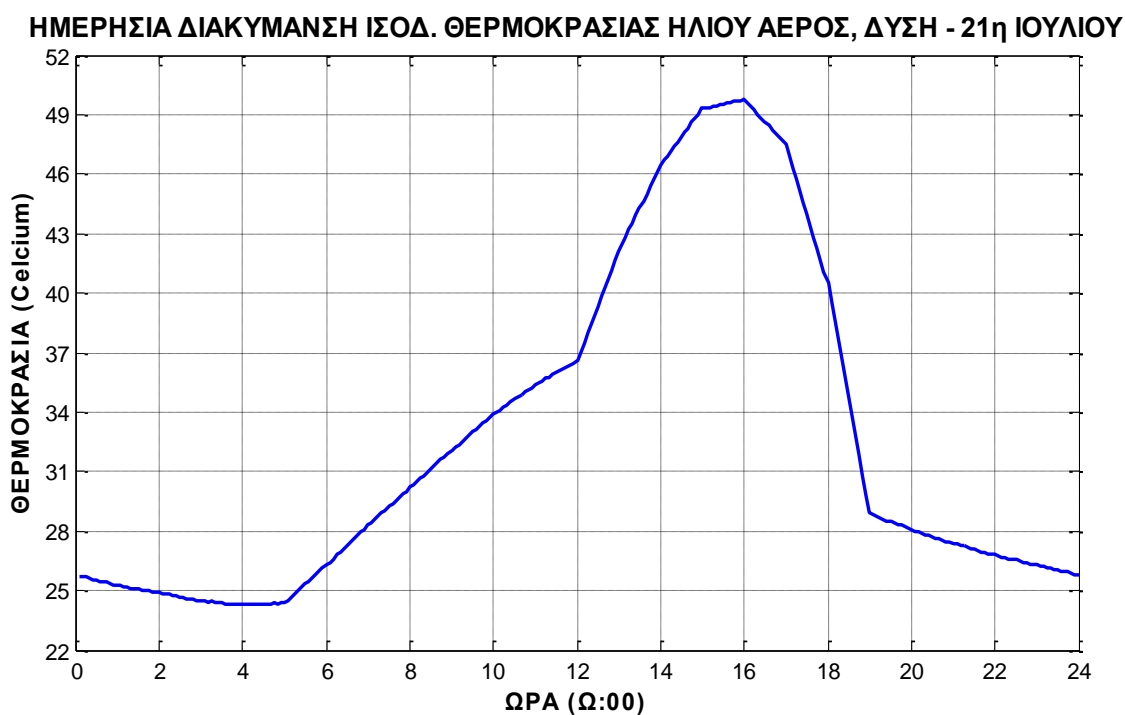
$h_{ex,wall} = 16.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ - Συντελεστής συναγωγής αέρα περιβάλλοντος – εξωτερική επιφάνεια τοίχου

$I_{t,orien}$ - Ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάθε τοίχο (W/m^2)

$\alpha=0.42$ - Ηλιακή απορροφητικότητα τοίχου

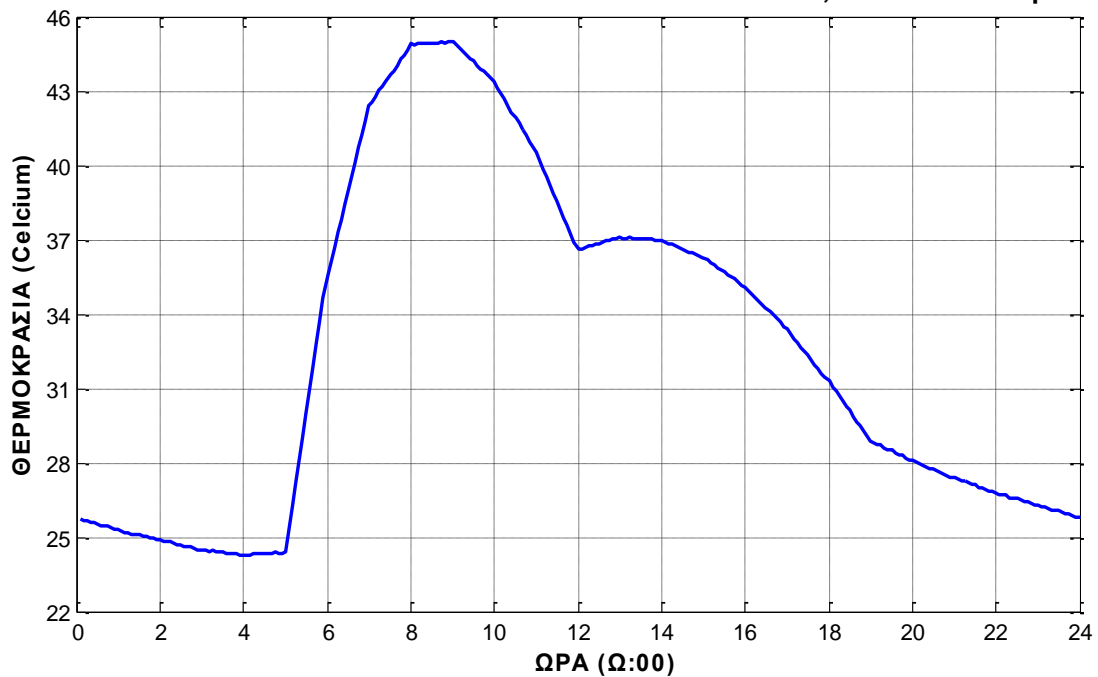
Ο διορθωτικός συντελεστής για ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος ε_{DR} σε αυτή τη περίπτωση (κατακόρυφη επιφάνεια) είναι μηδέν.

Έτσι η εξωτερική επιφάνεια κάθε τοίχου, ανάλογα με τον προσανατολισμό του, συνάγει θερμότητα με την αντίστοιχη ισοδύναμη θερμοκρασία ήλιου αέρος:



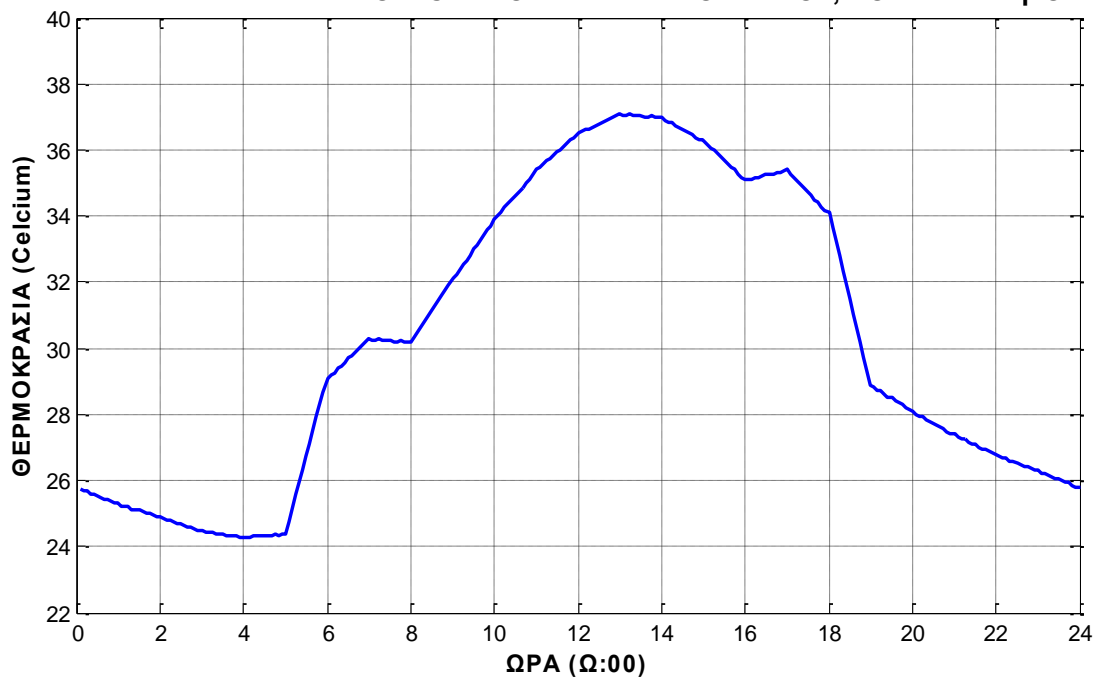
Εικόνα 5.3.2-1: Διακύμανση της ισοδύναμης θερμοκρασίας ήλιου αέρος για δυτικά προσανατολισμένο ανοιχτόχρωμο τοίχο.²²

ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΙΣΟΔ. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΗΛΙΟΥ ΑΕΡΟΣ, ΑΝΑΤΟΛΗ - 21η ΙΟΥΛΙΟΥ



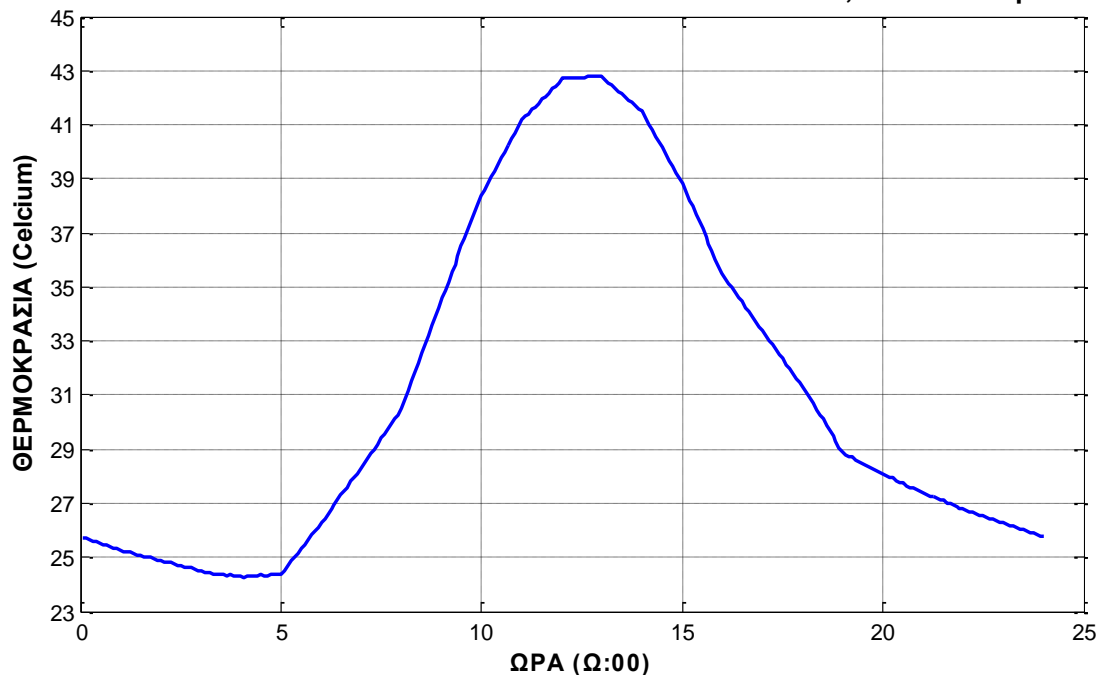
Εικόνα 5.3.2-2: Διακύμανση της ισοδύναμης θερμοκρασίας ήλιου αέρος για ανατολικά προσανατολισμένο ανοιχτόχρωμο τοίχο.²²

ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΙΣΟΔ. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΗΛΙΟΥ ΑΕΡΟΣ, ΒΟΡΡΑΣ - 21η ΙΟΥΛΙΟΥ



Εικόνα 5.3.2-3: Διακύμανση της ισοδύναμης θερμοκρασίας ήλιου αέρος για βόρεια προσανατολισμένο ανοιχτόχρωμο τοίχο.²²

ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΙΣΟΔ. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΗΛΙΟΥ ΑΕΡΟΣ, ΝΟΤΟΣ - 21η ΙΟΥΛΙΟΥ



Εικόνα 5.3.2-4: Διακύμανση της ισοδύναμης θερμοκρασίας ήλιου αέρος για νότια προσανατολισμένο ανοιχτόχρωμο τοίχο.²²

Για τον υπολογισμό της θερμοροής μέσω του κάθε τοίχου, θα εφαρμοσθεί και εδώ η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών για μεταβατική μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας. Έτσι, δουλεύοντας ξεχωριστά σε κάθε τοίχο και κατ' αντίστοιχο τρόπο με την περίπτωση της οροφής (βλ. Παρ. 5.1 – 5.3), θα χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις (5.2-8) και (5.3-3), όπου:

ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΤΟΙΧΟΣ	
T_{out}	$T_{e,orien}$
h_{in} (W/m^2K)	$h_{in,wall} = 7.8$
h_{out} (W/m^2K)	$h_{ex,wall} = 16.3$
Πάχος κατασκευής L (m)	0.3
Αρ. Κόμβων N	225
Απόσταση γειτονικών κόμβων δx (m)	0.00133

Πίνακας 5.3.2-1: Πληροφορίες διακριτοποίησης εξωτερικών τοίχων.

Αφού επιλυθεί το πιο πάνω σύστημα πεπερασμένων διαφορών και υπολογιστούν οι θερμοκρασίες στους κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος κάθε τοίχου, βρίσκουμε τη θερμοροή μέσω του κάθε τοίχου από και προς τον εσωτερικό χώρο:

$$\dot{q}_{\text{orien,wall-in}} = h_{\text{in,wall}} (T_{\text{N,orienwall}} - T_{\text{in}}) \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (5.3.2 - 2)$$

Όπου $T_{\text{N,orienwall}}$ η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του κάθε τοίχου (κόμβος N του αντίστοιχου υπολογιστικού πλέγματος). Επομένως, η ολική θερμότητα που αποδίδει ο κάθε τοίχος στο εσωτερικό του κτιρίου:

$$Q_{\text{orien,wall}} = \dot{q}_{\text{orien,wall-in}} A_{\text{orien,wall}} \quad [\text{W}] \quad (5.3.2 - 3)$$

Από την παράγραφο 4.2 το ολικό εμβαδό της επιφάνειας κάθε τοίχου:

$$A_{\text{northwall}} = 36.8\text{m}^2$$

$$A_{\text{southwall}} = 40.8\text{m}^2$$

$$A_{\text{eastwall}} = A_{\text{westwall}} = 34.9\text{m}^2$$

Συνολικά:

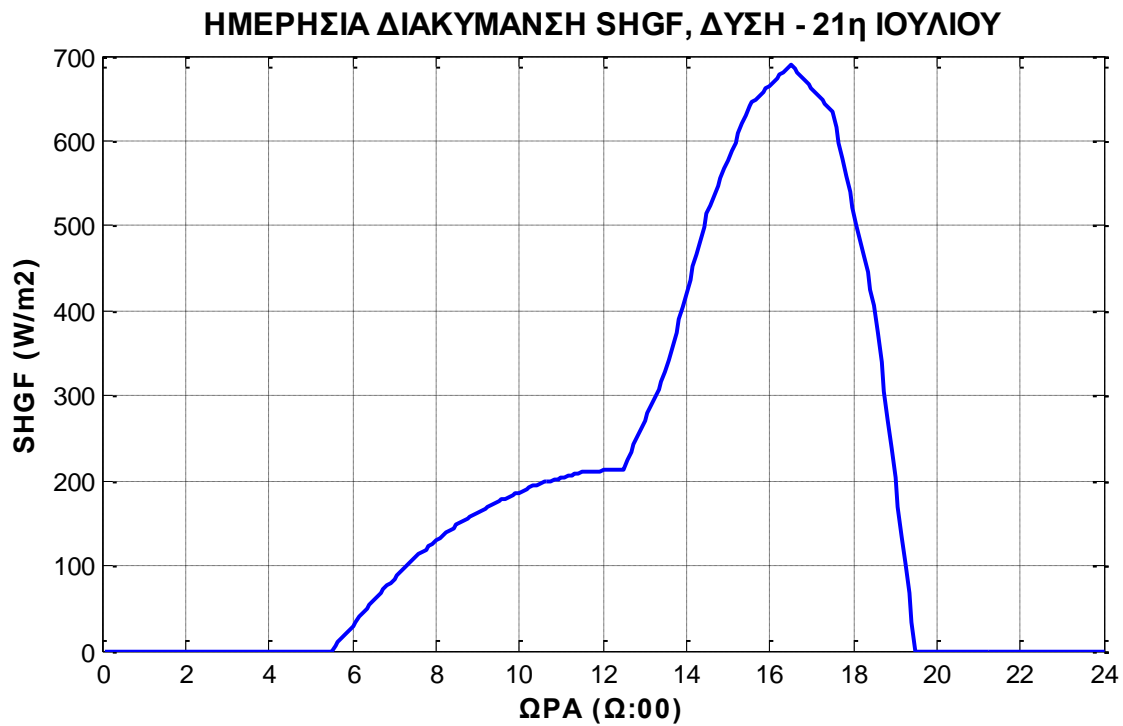
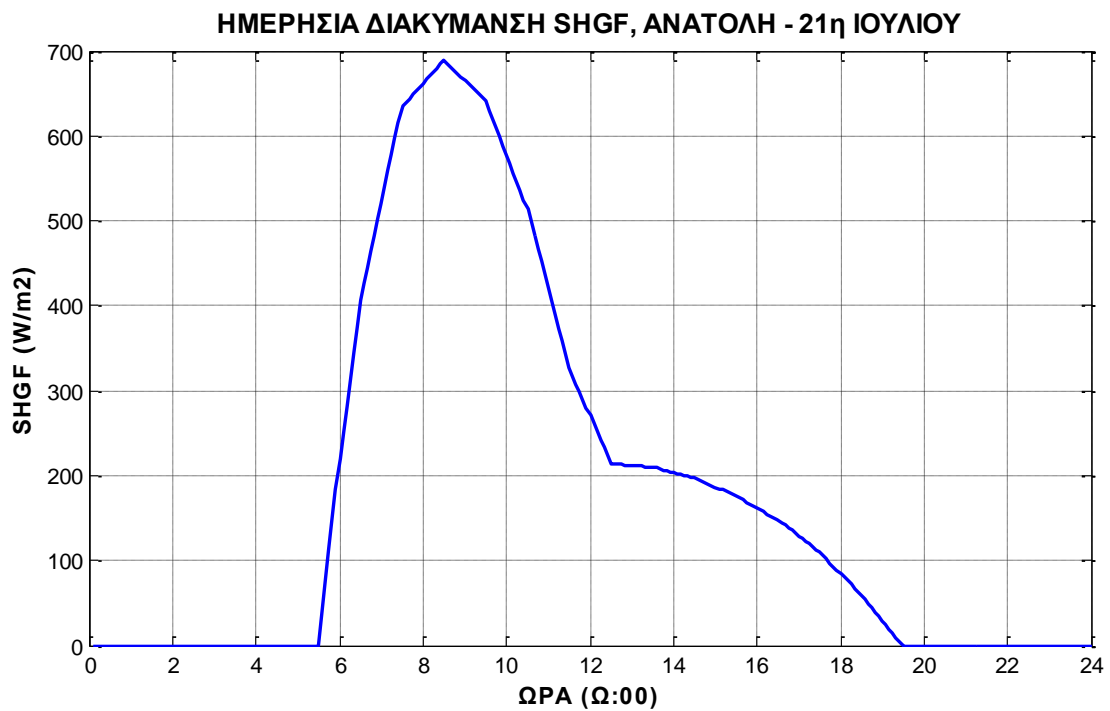
$$Q_{\text{walls}} = Q_{\text{northwall}} + Q_{\text{southwall}} + Q_{\text{eastwall}} + Q_{\text{westwall}} \quad [\text{W}] \quad (5.3.2 - 4)$$

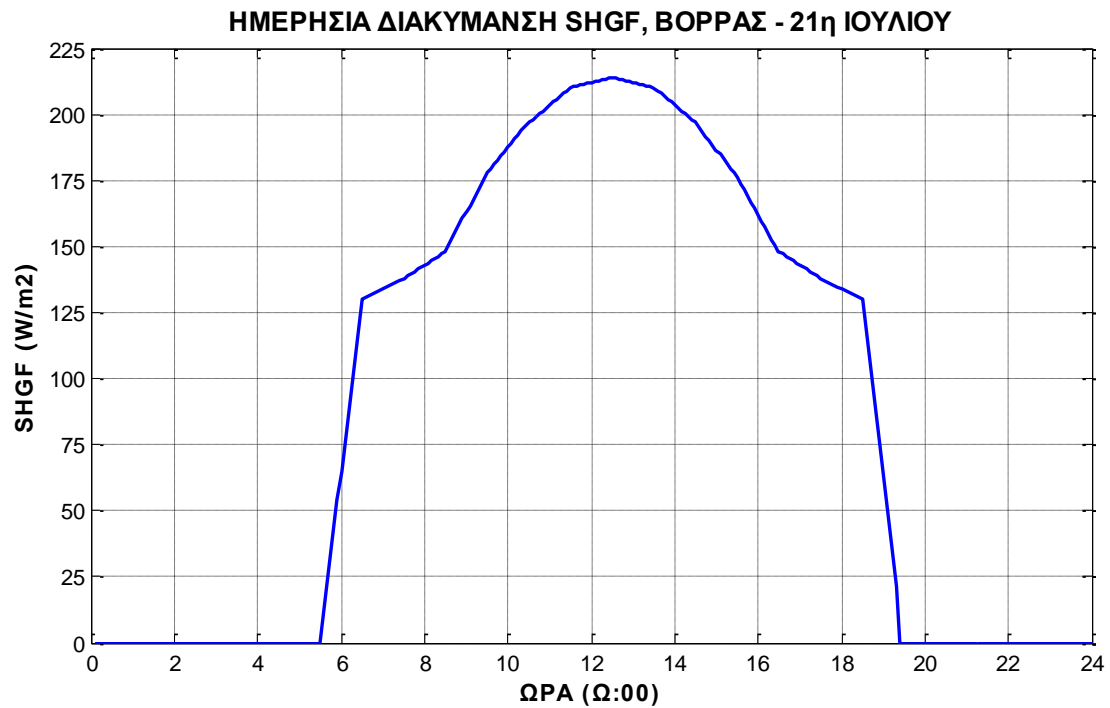
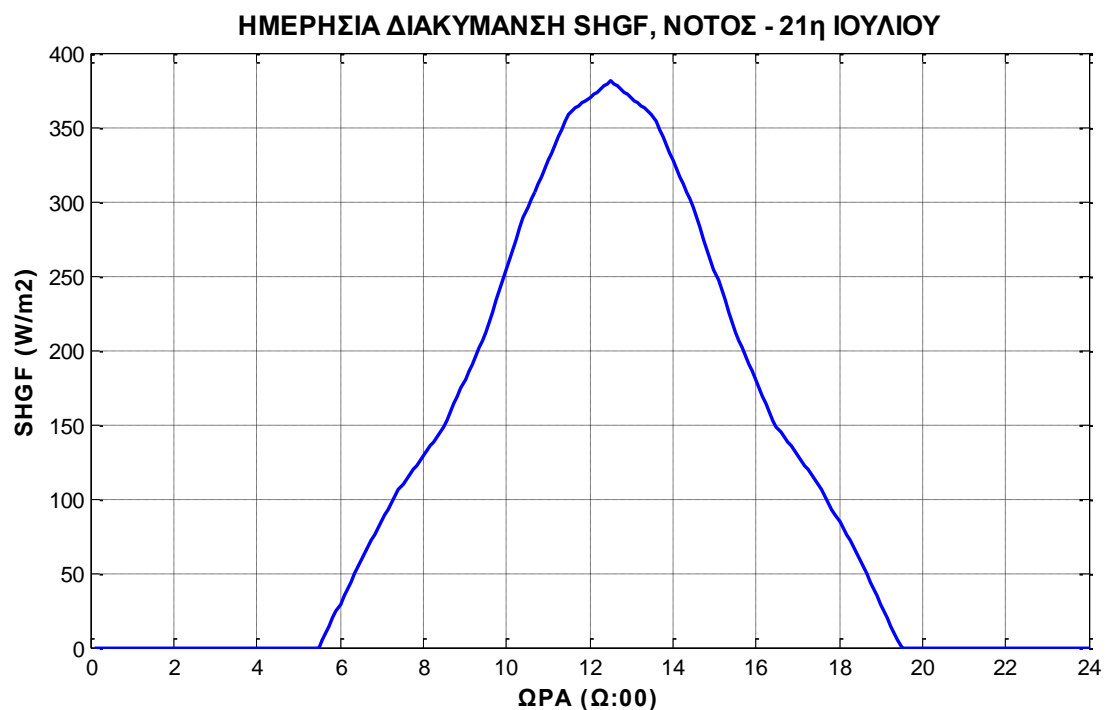
B. ΘΕΡΜΟΡΟΗ ΑΠΟ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ

Το συνολικό θερμικό κέρδος χώρου μέσω ενός υαλοπίνακα είναι το άθροισμα του ηλιακού θερμικού κέρδους και του κέρδους λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.

Για τον υπολογισμό του ηλιακού θερμικού κέρδους από τους υαλοπίνακες απαιτείται παρόμοια «συμπύεση» δεδομένων που να εκφράζει ένα αντίστοιχο πεδίο καταστάσεων, όπως και στην περίπτωση της ισοδύναμης θερμοκρασίας ήλιου αέρος. Για το σκοπό αυτό εισάγεται ο Συντελεστής Ηλιακού Θερμικού Κέρδους σε W/m^2 **SHGF** (Solar Heat Gain Factor), μέγεθος που αντιπροσωπεύει το κέρδος στον υαλοπίνακα αναφοράς DSA. Η ASHRAE έχει δημοσιεύσει πίνακες τυποποιημένων τιμών του SHGD ανά ώρα για κάθε 4° του βόρειου γεωγραφικού πλάτους από 0° μέχρι 64° , για την 21^η μέρα κάθε μήνα και για 16 διαφορετικούς προσανατολισμούς.

Η 24ωρη διακύμανση του SHGF κατά την 21^η Ιουλίου στην Αθήνα για τους τέσσερις προσανατολισμούς του κτιρίου, απεικονίζεται στα πιο κάτω διαγράμματα:

Εικόνα 5.3.2-5: Διακύμανση του SGHF για δυτικά προσανατολισμένο υαλοπίνακα.²²Εικόνα 5.3.2-6: Διακύμανση του SGHF για ανατολικά προσανατολισμένο υαλοπίνακα.²²

Εικόνα 5.3.2-7: Διακύμανση του SGHF για βόρια προσανατολισμένο υαλοπίνακα.²²Εικόνα 5.3.2-8: Διακύμανση του SGHF για νότια προσανατολισμένο υαλοπίνακα.²²

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα υαλοπίνακα διασκορπίζεται, με ένα κομμάτι της να ανακλάται πίσω προς το περιβάλλον, άλλο να απορροφάται μέσα στο γυαλί και το υπόλοιπο ποσό να μεταδίδεται κατευθείαν μέσα στο χώρο, λόγω της οπτικής διαπερατότητας. Θερμική ισχύς μεταφέρεται εντός του χώρου και από την ακτινοβολία που

έχει απορροφηθεί από τον υαλοπίνακα, αφού το η ενέργεια αυτή ρέει προς τις δυο επιφάνειες του υαλοπίνακα. Με ποια αναλογία εμφανίζονται αυτά τα φαινόμενα και κατ' επέκταση έτσι σε ποιο βαθμό η θερμότητα που εκφράζει ο SGHF μεταδίδεται εντός του κτιρίου εξαρτάται από τον **παράγοντα σκίασης SC** (shading coefficient) του υαλοπίνακα. Πρόκειται για το λόγο του ηλιακού θερμικού κέρδους μέσω ενός δεδομένου υαλοπίνακα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες προς το αντίστοιχο κέρδος του υαλοπίνακα αναφοράς DSA (διπλό γυαλί με 86% οπτική διαπερατότητα, 8% ανακλαστικότητα και 6% απορροφητικότητα), κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Οι υαλοπίνακες του κτιρίου είναι μονωτικοί (διπλοί) με σκούρα ρολά σκίασης και από του πίνακες τις ASHRAE **SC=0.35**.

Type of Glass	Nominal Thickness, Each Light	Type of Shading						
		Solar Transmittance ^a		Venetian Blinds ^b		Roller Shade		
		Outer Pane	Inner Pane	Medium	Light	Opaque		Translucent
						Dark	White	Light
Clear out	2.4, 3 mm	0.87	0.87	0.62 ^e	0.58 ^c	0.71	0.35	0.40
Clear in				(0.63) ^d	(0.58) ^d			
Clear in	6 mm	0.80	0.80					
Heat-absorbing ^e out	6 mm	0.46	0.80	0.39	0.36	0.40	0.22	0.30
Clear in								
Reflective coated glass	SC = 0.20 ^f			0.19	0.18			
	= 0.30			0.27	0.26			
	= 0.40			0.34	0.33			

Πίνακας 5.3.2: Συντελεστές Σκίασης SC για διπλούς υαλοπίνακες με εσωτερική σκίαση από στόρια ή ρολά σκίασης.³¹

Όσον, αφορά το θερμικό κέρδος λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς του αέρα περιβάλλοντος με τον αέρα εντός του κτιρίου, αυτό καθορίζεται από την **ολική θερμική διαπερατότητα U** (W/m²°C) του υαλοπίνακα. Για διπλούς υαλοπίνακες με διάκενο 6mm μεταξύ των δυο πλευρών του, από τους πίνακες της ASHRAE για εξωτερικούς κατακόρυφους υαλοπίνακες **U=3.3 W/m²°C**.

/

	No Storm Sash			
	No Shade		Indoor Shade	
	Winter*	Summer**	Winter*	Summer**
Flat Glass^c				
Single Glass, Clear	6.2	5.9	4.7	4.6
Single Glass, Low Emittance Coating ^d				
$e = 0.60$	5.8	5.7	4.3	4.5
$e = 0.40$	5.2	5.1	3.9	4.0
$e = 0.20$	4.5	4.3	3.3	3.1
Insulating Glass, Double^e				
5 mm air space ^f	3.5	3.7	3.0	3.3
6 mm air space ^f	3.3	3.5	2.7	3.1
13 mm air space ^g	2.8	3.2	2.4	3.0
13 mm air space low emittance coating ^h				
$e = 0.60$	2.4	3.0	2.2	2.8
$e = 0.40$	2.2	2.7	2.0	2.4
$e = 0.20$	1.8	2.2	1.7	2.0
Insulating Glass, Triple^e				
6 mm air space ^f	2.2	2.5	1.8	2.3
13 mm air space ⁱ	1.8	2.2	1.5	2.0

Πίνακας 5.3.3 – Ολική θερμική θερμικής διαπερατότητας U για εξωτερικούς κατακόρυφους υαλοπίνακες.³⁰

Συνοψίζοντας, η θερμοροή μέσω του κάθε υαλοπίνακα από και προς τον εσωτερικό χώρο:

$$\dot{q}_{\text{orien, glass-in}} = (SC)SHGF_{\text{orienglass}} + U(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (5.3.2 - 5)$$

Και η θερμότητα που αποδίδει ο κάθε υαλοπίνακας στο εσωτερικό του κτιρίου:

$$Q_{\text{orien, glass}} = \dot{q}_{\text{orien, glass-in}} A_{\text{orien, glass}} \quad [\text{W}] \quad (5.3.2 - 6)$$

Από την παράγραφο 4.2 το ολικό εμβαδό της επιφάνειας κάθε υαλοπίνακα:

$$A_{\text{northglass}} = 16\text{m}^2$$

$$A_{\text{southglass}} = 8\text{m}^2$$

$$A_{\text{eastglass}} = A_{\text{westglass}} = 6\text{m}^2$$

Συνολικά:

$$Q_{\text{glass}} = Q_{\text{northglass}} + Q_{\text{southglass}} + Q_{\text{eastglass}} + Q_{\text{westglass}} \quad [\text{W}] \quad (5.3.2 - 7)$$

Γ. ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΕΡΑ

Τέλος, ένας παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό ισοζύγιο του αέρα εντός του κτιρίου, είναι ο αέρας που εισέρχεται μέσα στο χώρο από τα διάφορα ανοίγματα. Ο παράγοντας αυτός θα προσεγγιστεί κάνοντας κάποιες παραδοχές, μιας και είναι ιδιαίτερα περίπλοκος.

Κατ' αρχάς, θεωρούμε ότι η υγρασία του αέρα περιβάλλοντος είναι πρακτικά ίση με την υγρασία του εσωτερικού αέρα. Η παραδοχή αυτή γίνεται για να απαλείψουμε τον παράγοντα του λανθάνοντος ψυκτικού φορτίου, ώστε να μην περιπλακεί περαιτέρω το πρόβλημά μας με ενθαλπίες και ψυχομετρικούς χάρτες. Ούτως ή άλλως η επιρροή του λανθάνοντος φορτίου προς το ολικό είναι μικρή σε σχέση με το αισθητό. Επομένως, το ολικό ψυκτικό φορτίο λόγω ανανέωσης και διείσδυσης του αέρα υπολογίζεται:

$$Q_{\text{air}} = 1.23\dot{M}(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad [\text{W}] \quad (5.3.2 - 8)$$

Η παράμετρος \dot{M} απεικονίζει την απαιτούμενη ποσότητα ανανέωσης του εσωτερικού αέρα με εξωτερικό και υπολογίζεται:

$$\dot{M} = \frac{1000}{3600} V_{\text{build}} \text{ACH} \quad [\text{l/s}] \quad (5.3.2 - 9)$$

Ο παράγοντας ACH αντιπροσωπεύει την ωριαία ανανέωση αέρα (Air Change per Hour). Στη περίπτωση μας, όπου το κτίριο βρίσκεται σε ένα όχι ιδιαίτερα πυκνοδομημένο προάστιο με λίγες πολυκατοικίες στα περίξ, θέτουμε $\text{ACH} = 1.5 \text{ h}^{-1}$. Όσο αφορά τον όγκο V_{build} του κτιρίου υπολογίζεται:

$$V_{\text{build}} = L_e W H \quad [\text{m}^3] \quad (5.3.2 - 10)$$

Όπου:

$W = 13 \text{ m}$ Πλάτος κτιρίου

$L_e = 16 \text{ m}$ Μήκος κτιρίου

$H = 3,3 \text{ m}$ Ύψος κτιρίου

Δ. ΘΕΡΜΟΡΟΗ ΑΠΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΤΟΙΧΟΥΣ

Ισχύει ότι ακριβώς και στη περίπτωση της εξωτερικής τοιχοποιίας με τα εξής δεδομένα:

ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΤΟΙΧΟΣ	
T_{out}	T_{in}
h_{in} (W/m ² K)	$h_{intwall} = 7,7$
h_{out} (W/m ² K)	$h_{intwall} = 7,7$
Πάχος κατασκευής L (m)	0.2
Αρ. Κόμβων N	150
Απόσταση γειτονικών κόμβων δx (m)	0.00133

Πίνακας 5.3.2-4 – Πληροφορίες διακριτοποίησης εσωτερικών τοίχων.

Αφού υπολογιστεί η ταχύτητα της θερμικής ροής μέσω των εσωτερικών τοίχων $q_{intwall}$, υπολογίζεται η συνολική θερμική ισχύς:

$$Q_{intwall} = q_{intwall} \cdot H \cdot L_{e_{intwall}} \quad [W] \quad (5.3.2 - 11)$$

Όπου:

$L_{e_{intwall}} = 80 \text{ m}$ Συνολικό μήκος εσωτερικών τοίχων.

Με γνωστά τα θερμικά φορτία από οροφή, εξωτερικούς και εσωτερικούς τοίχους, υαλοπίνακες και διεύδυση αέρα για κάθε χρονική στιγμή, υπολογίζεται το συνολικό φορτίο:

$$Q_{tot} = Q_{roof} + Q_{walls} + Q_{glass} + Q_{air} + Q_{intwall} \quad [W] \quad (5.3.2 - 12)$$

Όπου Q_{roof} το θερμικό φορτίο που αποδίδεται από την οροφή στον εσωτερικό χώρο και αντίστροφα (αναφορά στο επόμενο εδάφιο).

Ενώ η $\Delta.E.$ που δίνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = Q_{tot} / C_{tot} \quad (5.3.2 - 13)$$

Όπου C_{tot} η ισοδύναμη θερμοχωρητικότητα του εσωτερικού χώρου και υπολογίζεται:

$$C_{\text{tot}} = (\rho c_p)_{\text{air}} V_{\text{build}} \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right] \quad (5.3.2 - 14)$$

Με τον όγκο του εσωτερικού χώρου $V_{\text{in,build}}$ να είναι ίσος:

$$V_{\text{in,build}} = V_{\text{build}} - (L_{\text{eintwall}} H L_{\text{intwall}}) \quad [\text{m}^3] \quad (5.3.2 - 15)$$

Όπου:

$$L_{\text{intwall}} = 0.15 \text{ m} \quad \text{Πάχος εσωτερικών τοίχων}$$

Έτσι, αν επανέλθουμε στη Δ.Ε (5.3.2-13), η θερμοκρασία T_{in} του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου, υπολογίζεται σε κάθε χρονική στιγμή $t+\Delta t$:

$$T_{\text{in}} = \frac{Q_{\text{tot}}}{C_{\text{tot}}} \Delta t + T_{\text{in}}^0 \quad [^\circ\text{K}] \quad (5.3.2 - 16)$$

5.3.2β Μετάδοση θερμότητας από το ταβάνι στο εσωτερικό

Η ταχύτητα της θερμικής ροής από και προς την εσωτερική επιφάνεια της οροφής υπολογίζεται:

$$\dot{q}_{\text{r-in}} = h_{\text{in}}(T_{\text{N}} - T_{\text{in}}) \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (5.3.2 - 17)$$

Αντίστοιχα το θερμικό φορτίο:

$$Q_{\text{roof}} = \dot{q}_{\text{r-in}} A_{\text{roof}} \quad [\text{W}] \quad (5.3.2 - 18)$$

Με το εμβαδό της επιφάνειας του ταβανιού να ισούται:

$$A_{\text{roof}} = L_{\text{e}} W \quad [\text{m}^2] \quad (5.3.2 - 19)$$

Προσαρμόζοντας την εξίσωση (5.3-3) στο εσωτερικό όριο του υπολογιστικού πλέγματος και εισάγοντας τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα T_{in} και το συντελεστή συναγωγής $h_{\text{in}} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών στο εσωτερικό όριο του πλέγματος (κόμβος N) είναι έτοιμη.

5.4 Τελική διαμόρφωση συστήματος

Α. ΦΥΤΕΜΕΝΗ ΟΡΟΦΗ

Συνοψίζοντας, οι εξισώσεις που συνθέτουν το σύστημα, του οποίου η επίλυση θα μας δώσει τις θερμοκρασίες T_i ($i=1 \dots N$) στους N κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος είναι:

- **N-2 εξισώσεις για τους εσωτερικούς κόμβους, όπου $i=2 \dots (N-1)$:**

$$A_i T_i = \frac{A_{i-1}}{2} (T_{i-1} + T_{i-1}^0) + \frac{A_{i+1}}{2} (T_{i+1} + T_{i+1}^0) + T_i^0 \left(A_i^0 - \frac{A_{i-1}}{2} - \frac{A_{i+1}}{2} \right) \quad (5.4 - 1)$$

Όπου:

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

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

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

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

- **Εξίσωση στο εξωτερικό όριο, όπου $i=1$:**

$$A_1 T_1 = \frac{A_2}{2} (T_2 + T_2^0) + \frac{h_{out}}{2} (T_{out} + T_{out}^0) + T_1^0 \left(A_1^0 - \frac{A_2}{2} - \frac{h_{out}}{2} \right) \quad (5.4 - 2)$$

Όπου:

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

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

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

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

$$T_{out} = T_{e,ca} \text{ (εξ. 5.3.1 -39)}$$

Ο υπολογισμός της $T_{e,ca}$ γίνεται όπως είδαμε συναρτήσει της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στο θόλο T_{ca} , που και αυτή με τη σειρά της εξαρτάται και από τη θερμοκρασία στο φύλλωμα T_f . Στο σύστημα επομένως εισάγονται και οι Δ.Ε. (5.3.1-1) και (5.3.1-26) με τη μορφή:

$$T_f = T_f^0 + \frac{\Delta t}{(\rho c)_f dLAI} \left[\begin{array}{l} [1 - \tau_s - (1 - \tau_s)\rho_\infty](1\tau_s\rho_g)I_s + \\ (1 - \tau_l)(\sigma T_{sky}^4 + \sigma T_{gr}^0{}^4 - 2\sigma T_f^0{}^4) + \\ -2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{r_e} (T_f^0 - T_{ca}^0) + \\ -2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{\gamma(r_e + r_i)} (e_{fs} - e_{ca}) \end{array} \right] \quad (5.4 - 3)$$

$$T_{ca} = T_{ca}^0 + \frac{\Delta t}{(\rho c)_{ca} LAI} \left[\begin{array}{l} 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{r_e} (T_f^0 - T_{ca}^0) + \\ h_{veg}(T_{gr}^0 - T_{ca}^0) + \\ h_{ca\infty}(T_{ca}^0 - T_0) \end{array} \right] \quad (5.4 - 4)$$

Ενώ για να γίνει κατορθωτή η επίλυση του συστήματος, θα πρέπει εισαχθεί και ο ενεργειακός ισολογισμός της ειδικής υγρασίας του αέρα θ εντός του θόλου. Από την εξίσωση (5.3.1-16):

$$\theta_{ca} = \theta_{ca}^0 + \frac{\Delta t}{(\rho c)_{ca} L} \left[\begin{array}{l} 2LAI \frac{(\rho c_p)_{ca}}{\gamma\Lambda(r_e + r_i)} (e_{fs} - e_{ca}) + \\ \frac{h_{veg}}{\gamma\Lambda} (e_{gr} - e_{ca}) + \\ \frac{h_{ca\infty}}{\gamma\Lambda} (e_{ca} - e_0) \end{array} \right] \quad (5.4 - 5)$$

Με τη τάση κορεσμένου ατμού φυλλώματος e_{fs} να υπολογίζεται από την εξίσωση (5.3.1-14), τη τάση ατμού αέρα περιβάλλοντος e_0 από τις σχέσεις (5.3.1-13) και (5.3.1-14) ανάλογα με τη σχετική υγρασία w (%) του αέρα περιβάλλοντος, τη τάση ατμού αέρα θόλου από την εξίσωση (5.3.1-15) και τη τάση ατμού του αέρα επί την επιφάνεια του μέσου ανάπτυξης να είναι πρακτικά μηδέν $e_{gr}=0$. Οι θερμοκρασίες αέρα θόλου, φυλλώματος και επιφάνειας μέσου ανάπτυξης που εισάγονται κατά τους υπολογισμούς των τάσεων ατμού, όπως και στις εξισώσεις (5.4-3) και (5.4-4) είναι οι αντίστοιχες που έχουν υπολογιστεί κατά τη χρονική στιγμή t (δείκτης 0), που λόγω του πολύ μικρού χρονικού βήματος Δt είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες του $t+\Delta t$.

- **Εξίσωση στο εσωτερικό όριο, όπου $i=N$:**

$$A_N T_N = \frac{A_{N-1}}{2} (T_{N-1} + T_{N-1}^0) + \frac{h_{in}}{2} (T_{in} + T_{in}^0) + T_N^0 \left(A_N^0 - \frac{A_{N-1}}{2} - \frac{h_{in}}{2} \right) \quad (5.4 - 6)$$

Όπου:

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

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

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

$$h_{in} = 7.8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

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

Εδώ εισάγονται στο σύστημα άλλα δυο «υποσυστήματα» N εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση των εξωτερικών τοίχων και των εσωτερικών τοίχων, με βάση τα δεδομένα που παρουσιάζουν οι πίνακες (5.3.2-1) και (5.3.2-4) αντίστοιχα.

Παρατηρούμε ότι έχουμε ένα σύστημα με $(N_{\text{οροφή}} + 4N_{\text{εξ.τοιχοι}} + N_{\text{εξ.τοιχοι}} + 2)$ εξισώσεις με ισάριθμους $+1$ αγνώστους. Για να γίνει κατορθωτή η επίλυση του συστήματος, θα πρέπει να εισάγουμε κάποιες αρχικές υποθετικές τιμές των αγνώντων για τη χρονική στιγμή $t=t_0$ (ώρα 00:00), οι οποίες στη συνέχεια με τα κατάλληλα loops θα διορθωθούν, δίνοντας στο σύστημά μας μια πιο σωστή λύση.

Επομένως για τις άγνωστες οριακές συνθήκες:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΑΡΧΙΚΗ ΤΙΜΗ
Θερμοκρασία στο φύλλωμα T_f	295 °K
Θερμοκρασία αέρα μέσα στο θόλο T_{ca} (°K)	296 °K
Ειδική υγρασία αέρα μέσα στο θόλο ω_{ca}	0.013 $\frac{\text{kg υδρατμ}}{\text{kg αέρα}}$
Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα T_{in} (°K)	302 °K

Πίνακας 5.4-1: Αρχικές τιμές συστήματος φυτεμένης οροφής.

Για τον υπολογισμό των αρχικών θερμοκρασιών T_i ($i=1 \dots N$) στους κόμβους του πλέγματος της οροφής και των τοίχων, ανάγουμε σε πρώτη φάση το πρόβλημα σε **μόνιμο**. Η Δ.Ε που περιγράφει του πρόβλημα γίνεται:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (5.4 - 7)$$

Η εφαρμογή και επίλυση της πιο πάνω Δ.Ε στη περίπτωση μας γίνεται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που έχει παρουσιαστεί προηγουμένως με τη διαφορά ότι οι εξισώσεις (5.4-1), (5.4-2) και (5.4-6) μετατρέπονται σε:

$$A_i T_i = A_{i-1} T_{i-1} + A_{i+1} T_{i+1} \quad (5.4 - 8)$$

$$A_1 T_1 = A_2 T_2 + h_{\text{out}} T_{\text{out}} \quad (5.4 - 9)$$

$$A_N T_N = A_{N-1} T_{N-1} + h_{\text{in}} T_{\text{in}} \quad (5.4 - 10)$$

Όπου:

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

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

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

Επομένως:

➤ **Για $t = t_0$**

Με αρχικές οριακές συνθηκών αυτές που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4-1 επιλύεται το πρόβλημα ως μόνιμο (εξισώσεις (5.4-8), (5.4-9) και (5.4-10) και υπολογίζονται οι αρχικές θερμοκρασίες στους κόμβους του πλέγματος σε οροφή και τοίχους.

➤ **Για $t = t_0 + \Delta t \dots t_{\text{ολικό}}$**

Γίνεται επίλυση του συστήματος εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών (5.4-1), (5.4-2) και (5.4-6) με εξωτερικές οριακές συνθήκες αυτές που σε κάθε χρονικό βήμα υπολογίζονται με τη βοήθεια των εξισώσεων (5.4-3), (5.4-4) και (5.4-5) και εσωτερική θερμοκρασία αυτή που προσδιορίζεται από την εξίσωση (5.3.2-16), έχοντας υπολογίσει στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή τα διάφορα φορτία.

Μετά το πέρας των υπολογισμών για ολόκληρη την χρονική περίοδο που εξετάζουμε (24ωρο), γίνεται αντικατάσταση των θερμοκρασιών της χρονικής στιγμής $t = t_{\text{ολικό}}$ (ώρα 24:00) στις αντίστοιχες θερμοκρασίες για $t = t_0$ (ώρα 00:00). Επαναλαμβάνουμε έτσι τη διαδικασία υπολογισμών με νέες τιμές εκκίνησης, πιο κοντά στις πραγματικές αυτή τη φορά. Η αντικατάσταση αυτή και η εκ νέου επίλυση του συστήματος γίνεται μέχρις ότου η διαφορά των θερμοκρασιών για $t = t_{\text{ολικό}}$ να είναι ελάχιστη από τις αντίστοιχες για $t = t_0$ (5-6 φορές).

B. ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΟΡΟΦΗ

Ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία με τις εξής διαφοροποιήσεις:

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

$$T_{\text{out}} = T_e \text{ (εξ. 5.3.1 -37, διαγρ. 5.3.2-16)}$$

5.5 Επίλυση συστήματος

Για την επίλυση του συστήματος, φέρνουμε τις εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών (5.4-1), (5.4-2), (5.4-3), (5.4-8), (5.4-9) και (5.4-10) (και τις αντίστοιχες της τοιχοποιίας) στη μορφή:

$$a_{j,i} T_i = a_{j,i+1} T_{i+1} + a_{j,i-1} T_{i-1} + b_{j,i} \quad (5.5 - 1)$$

Όπου a ο συντελεστής των θερμοκρασιών και b μια ανεξάρτητη από τις θερμοκρασίες τιμή, που προκύπτουν κάνοντας τις πράξεις στην αντίστοιχη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών. Οι δείκτες:

$i \rightarrow$ αντιπροσωπεύει τον κόμβο

$j \rightarrow$ υποδεικνύει σε ποιο κόμβο γίνεται ο ισολογισμός, ισούται δηλαδή πάντα με i

Κατά τον ισολογισμό για παράδειγμα στον κόμβο 2, με βάση την εξίσωση (5.4-1) (ή και (5.4-8) ανάλογα), η εξίσωση (5.5-1), παίρνει τη μορφή:

$$a_{2,2} T_2 = a_{2,3} T_3 + a_{2,1} T_1 + b_{2,2} \quad (5.5 - 2)$$

Όπου:

$$a_{2,2} = A_2$$

$$a_{2,3} = A_3/2$$

$$a_{2,1} = A_1/2$$

$$b_{2,2} = \left(A_1/2 \right) T_1^0 + \left(A_3/2 \right) T_3^0 + \left(A_2^0 + A_1/2 + A_1/2 \right) T_2^0$$

Εφαρμόζοντας επομένως την εξίσωση (5.5-1) σε κάθε κόμβο $i=1..N$, όπου $a_{N,N+1}=a_{1,0}=0$, προκύπτει ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, για την επίλυση του οποίου καταστρώνεται ο $N \times N$ πίνακας $[a]$ με τις γνωστές τιμές $a_{j,i}$:

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

Ο πιο πάνω πίνακας είναι τριδιαγώνιας μορφής (**TriDiagonal Matrix Algorithm - TDMA**), δηλαδή οι μη μηδενικοί συντελεστές του πίνακα κείνται επί τριών διαδοχικών διαγωνίων.

Καταστρώνεται επίσης ο Nx1 πίνακας [T] με τις άγνωστες θερμοκρασίες στους κόμβους T_i :

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

Και ο Nx1 πίνακας [b] με τους γνωστούς όρους $b_{j,i}$:

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

Όπου ισχύει:

$$[a]x[T] = [b] \quad (5.5 - 3)$$

Με το πίνακα θερμοκρασιών να υπολογίζεται:

$$[T] = [a]^{-1}[b] \quad (5.5 - 4)$$

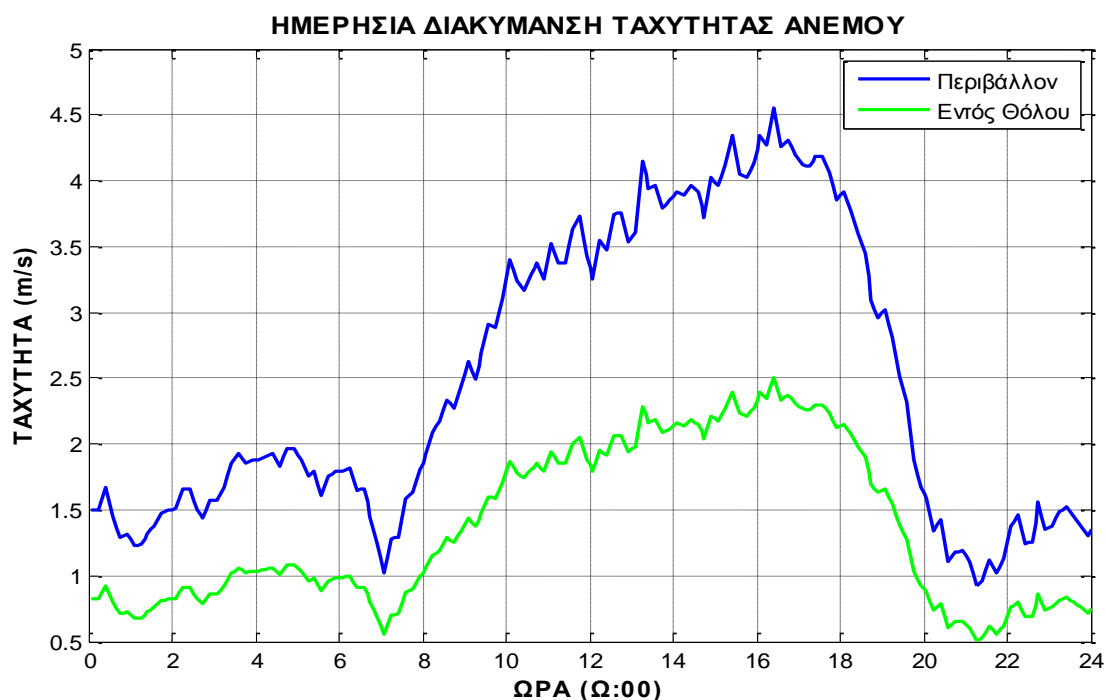
Κάνοντας τη διαδικασία αυτή σε κάθε χρονική στιγμή, υπολογίζουμε τις θερμοκρασίες στους κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος για κάθε περίπτωση καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εκτελώντας τον κώδικα υπολογισμού της παραγράφου 5.6 σε Matlab, επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό η προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου με φυτεμένη οροφή. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με τα αντίστοιχα της περίπτωσης συμβατικού δώματος, εξάγονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα της τεχνικής αυτής.

Όσο αφορά τις εξωτερικές οριακές συνθήκες και τη διαμόρφωση του τοπικού μικροκλίματος άνωθεν της φυτεμένης οροφής, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5 κάποια συγκριτικά διαγράμματα με τις αντίστοιχες τιμές για τις δυο περιπτώσεις. Συνοπτικά, υπενθυμίζεται:

- Από την **Εικόνα 5.3.1-1**, βλέπουμε ότι ο **άνεμος** μέσα στο θόλο επιβραδύνεται, με την **ταχύτητά** του να ελαττώνεται περίπου κατά 50%. Αυτό είναι ιδιαίτερα θετικό μιας και συμβάλλει στην ελάττωση του συντελεστή συναγωγής h_{veg} μεταξύ της ανώτερης επιφάνειας της κατασκευής και του αέρα πάνω από αυτή. Έτσι, η φυτεμένη οροφή είναι πιο ανθεκτική στις ακραίες θερμοκρασίες και θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.



Εικόνα 5.3.1-1 – Μέση τιμή της ημερήσιας διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου εντός και εκτός του θόλου για την 21^η Ιουλίου 2001-2003. (Πηγή Ε.Μ.Π.).

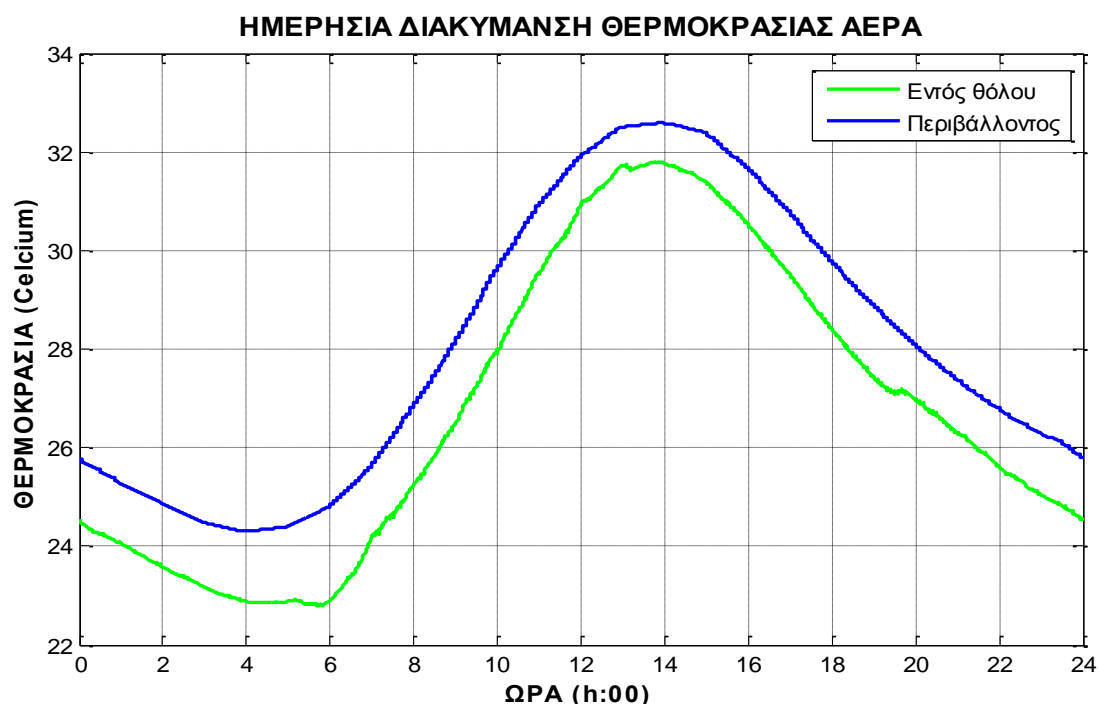
- Η **σχετική υγρασία** του αέρα μέσα στο θόλο, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 5.3.1-3**, παίρνει σαφώς μεγαλύτερες τιμές. Αυτό οφείλεται όπως έχει αναφερθεί στη λειτουργία της διαπνοής υδρατμών από τα στομάτια των φύλλων. Η εξάτμιση των υδρατμών αυτών (εξατμισοδιαπνοή) συνιστά ένα φαινόμενο εξατμιστικής ψύξης, κάτι που συμβάλλει αποφασιστικά στη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στο θόλο. Ένα άλλο θετικό στοιχείο, είναι και η διατήρηση της σχετικής υγρασίας σε ψηλά επίπεδα ($\approx 75\%$) ακόμα και κατά τις ξηρές και θερμές μεσημβρινές ώρες. Αυτό συμβάλλει στη περεταίρω απόμυξση του μικροκλίματος κατά τις ώρες αυτές.



Εικόνα 5.3.1-3 – Μέση τιμή της ημερήσιας διακύμανσης της σχετικής υγρασίας του αέρα περιβάλλοντος και του αέρα εντός του θόλου.

- Στην **Εικόνα 5.3.1-4** παρουσιάζεται η 24ωρη διακύμανση της **θερμοκρασίας του αέρα** μέσα στο θόλο, συγκριτικά με την αντίστοιχη του αέρα περιβάλλοντος. Είναι εμφανές ότι στη περίπτωση της φυτεμένης οροφής, το στρώμα αέρα που συναλλάσσει θερμότητα με την οροφή είναι πιο δροσερό καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας κατά $1-2^{\circ}\text{C}$. Αυτό οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής, όπως έχει τονισθεί. Αξιοσημείωτο είναι δε και το γεγονός ότι στη μελέτη αυτή εξετάζεται μια «ξηρή» κατασκευή, με τη παραδοχή δηλαδή ότι δεν υπάρχει υγρασία στο χώμα φύτευσης. Αυτό βέβαια είναι καθαρά θεωρητικό, μιας και στη πραγματικότητα, το μέσο ανάπτυξης είναι υγρό λόγω της άρδευσης για μεγάλο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του 24ώρου,

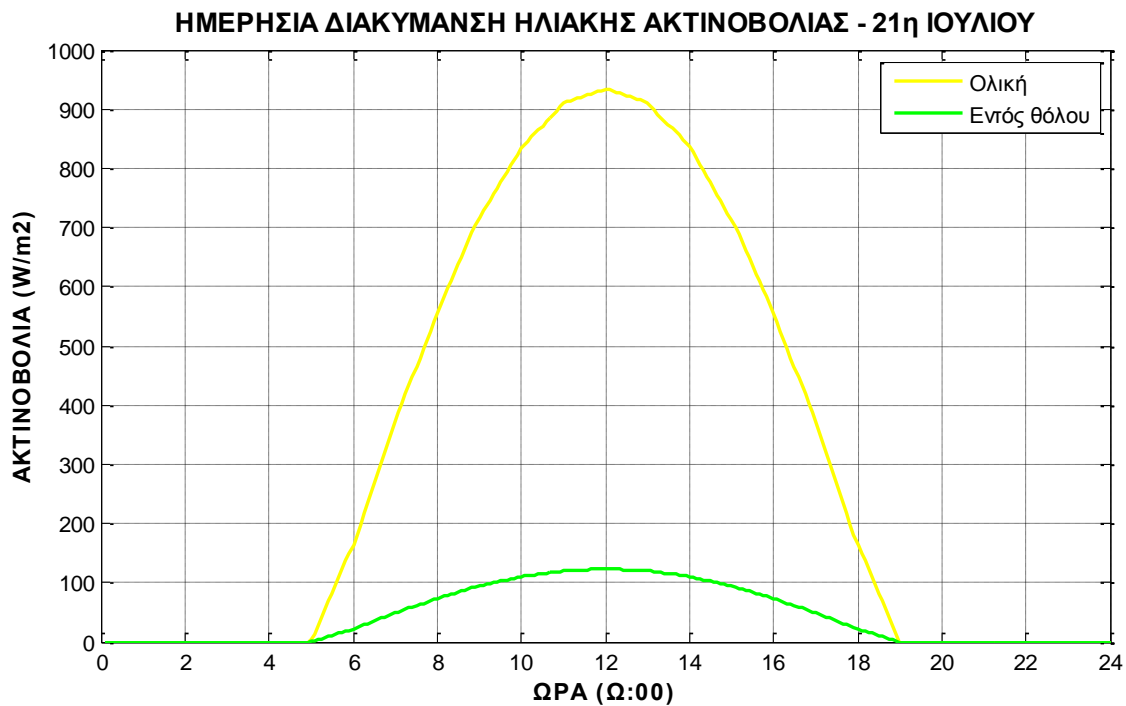
κάτι που εντείνει την εξατμιστική ψύξη με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας.



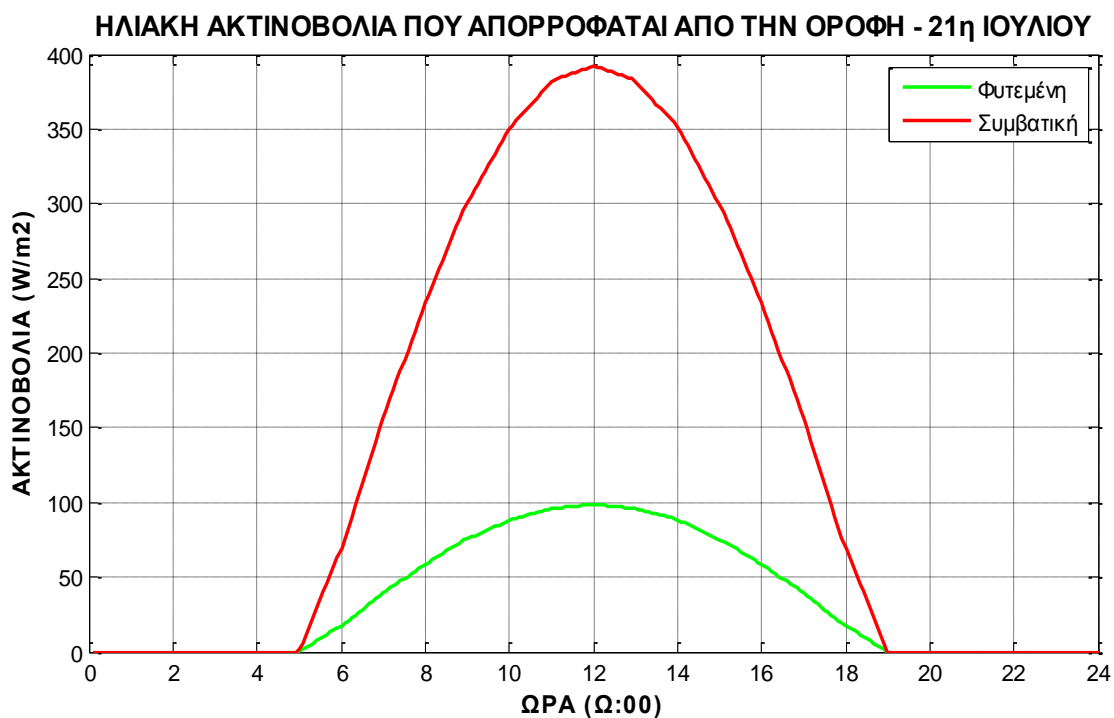
Εικόνα 5.3.1-4 – Μέση τιμή της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας αέρα.

- Όπως αναφέρθηκε στη παράγραφο 5.3, η παράμετρος που «κυριαρχεί» στον ισολογισμό ενέργειας στο φύλλωμα είναι η **ηλιακή ακτινοβολία** ή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος. Εδώ είναι και η τεράστια συμβολή των φυτεμένων οροφών. Κατ' αρχάς στην **Εικόνα 5.3.1-5**, παρατηρούμε ότι τα φύλλα μέσω της σκίασης προστατεύουν την οροφή από την ηλιακή ακτινοβολία σε τεράστιο βαθμό. Η μείωση της ηλιακής ακτινοβολία που διαπερνά το φύλλωμα και προσπίπτει τελικά στην οροφή είναι πέραν του 85%. Χαρακτηριστικά, στις 12 το μεσημέρι, όταν η τιμή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας αγγίζει τα $I_t=930 \text{ W/m}^2$, η ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην οροφή είναι περίπου $I_r=120 \text{ W/m}^2$. Όσον αφορά το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται τελικά από την οροφή, η εικόνα **5.3.1-7** παρουσιάζει συγκριτικά αποτελέσματα για τις δυο περιπτώσεις. Βλέπουμε ότι η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται τελικά από μια φυτεμένη οροφή είναι στην περίπτωσή μας το 25% της αντίστοιχης που απορροφά μια συμβατική οροφή με απλή μόνωση. Αξίζει και εδώ να αναφερθεί, ότι η υπό μελέτη φυτεμένη οροφή αποτελεί μια κατασκευή εκτατικού τύπου με μια μέση τιμή του δείκτη έκτασης φύλλων (leaf area index) $LAI=4$ και συνεπώς μιας μέσης φυτοκάλυψης. Σε περίπτωση που εξετάζαμε μια εντατική φυτεμένη οροφή, με πυκνότερη βλάστηση και

συνεπώς μεγαλύτερο LAI, το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που θα απορροφούσε η οροφή θα ήταν αμελητέο!

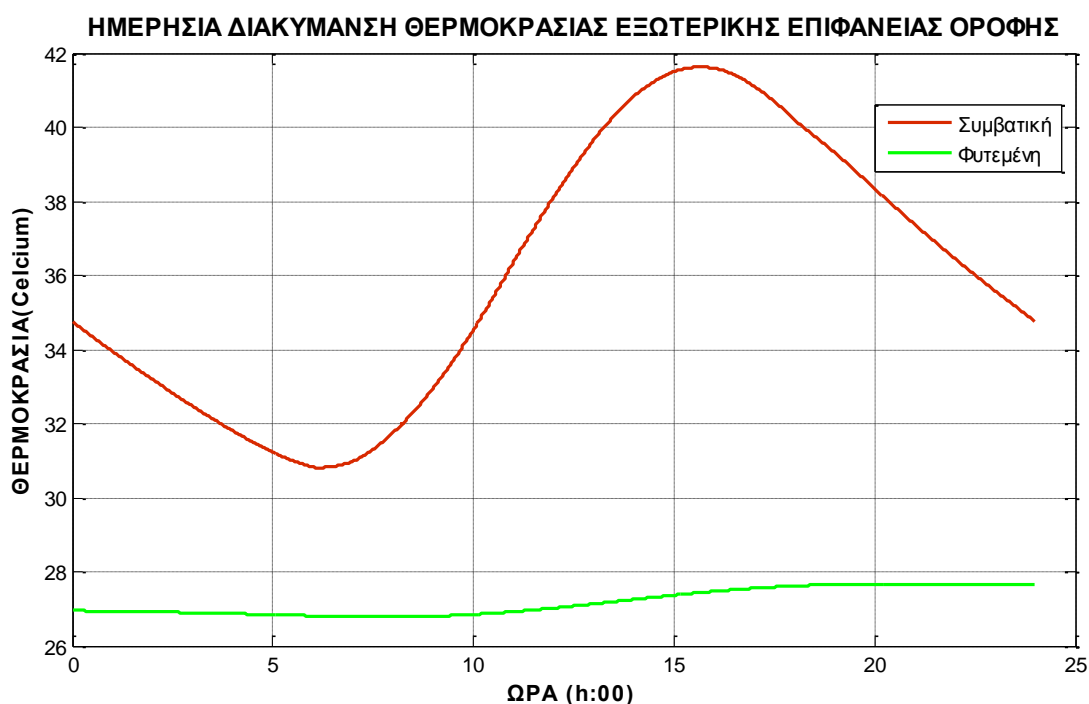


Εικόνα 5.3.1-5 : Μέση τιμή της ημερήσιας διακύμανσης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και της αντίστοιχης που διαπερνά το φύλλωμα και εκπέμπεται στο θόλο.



Εικόνα 5.3.1-7: Διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από μια φυτεμένη και μια συμβατική οροφή.

- Τέλος, αυτό που σε τελική ανάλυση έχει μεγαλύτερη σημασία είναι ότι λόγω των όσων έχουν αναφερθεί, η **θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής** δεν παίρνει ακραίες τιμές στη περίπτωση της φυτεμένης οροφής σε αντίθεση με μια συμβατική. Βλέπουμε από την **Εικόνα 6-1** ότι ενώ η θερμοκρασία στην επιφάνεια μιας συμβατικής οροφής μπορεί κατά τις θερμές μεσημβρινές ώρες να φτάσει μέχρι και τους 42°C, στη φυτεμένη αντίστοιχα κυμαίνεται στους 28°C. Πέραν τούτου, το **εύρος τιμών** που λαμβάνει η θερμοκρασία είναι αρκετά μεγαλύτερο στη συμβατική οροφή (11°C περίπου) σε σχέση με τη φυτεμένη (1°C περίπου), με αποτέλεσμα να προστατεύεται η κατασκευή από φθορές.

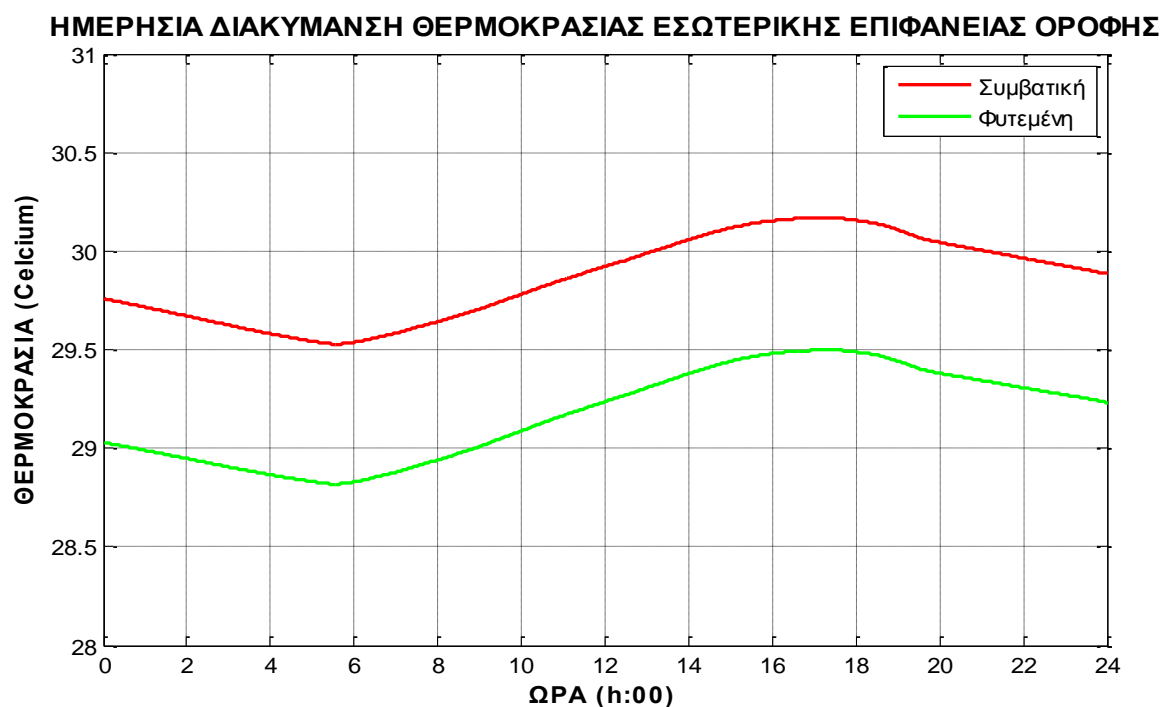


Εικόνα 6-1: Συγκριτικό διάγραμμα της διακύμανσης της θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής για τις δυο περιπτώσεις.

Σημ.: Στη περίπτωση της φυτεμένης οροφής εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής ορίζεται η ανώτερη επιφάνεια του δομικού στοιχείου, η ίδια δηλαδή επιφάνεια που αναφερόμαστε στη συμβατική οροφή και όχι η επιφάνεια του χώματος φύτευσης.

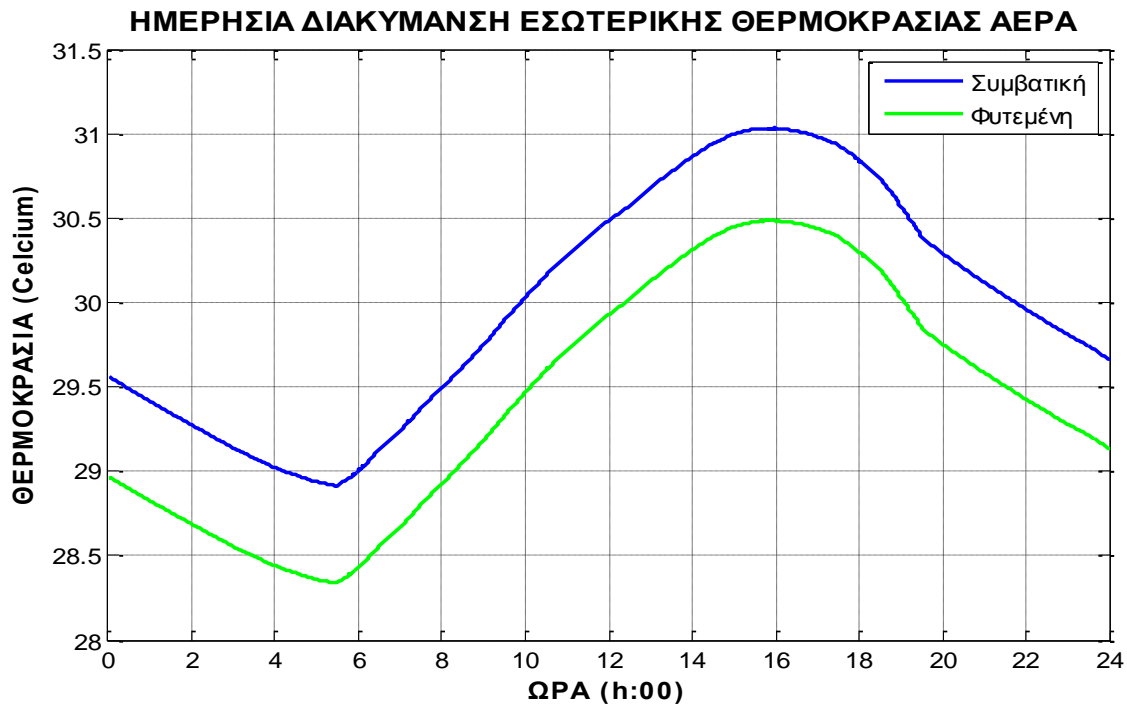
Όλα τα παραπάνω στοιχεία, βρίσκουν την πρακτική τους σημασία στη διαμόρφωση των συνθηκών στο εσωτερικό του κτιρίου. Έτσι για τις δυο περιπτώσεις, μετά τους υπολογισμούς προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Κατ' αντιστοιχία με την εικόνα 6-1, παρατηρούμε μια πανομοιότυπη κατάσταση και όσο αφορά τη **θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας της οροφής** (ταβάνι). Με βάση την **εικόνα 6-2**, παρατηρείται ελάττωση της θερμοκρασίας αυτής κατά $0,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ περίπου στη περίπτωση της φυτεμένης οροφής, καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου.



Εικόνα 6-2: Συγκριτικό διάγραμμα της διακύμανσης της θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια της κατασκευής για τις δυο περιπτώσεις.

- Έτσι, φτάνοντας στο αποτέλεσμα όλων των παραπάνω, στην **εικόνα 6-3** παρουσιάζεται η διακύμανση της **εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου** για της δυο περιπτώσεις. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι στη περίπτωση όπου στο συγκεκριμένο κτίριο εγκατασταθεί μια κατασκευή φυτεμένου δώματος, έχουμε μια σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου μείωση της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου κατά $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ περίπου.



Εικόνα 6-3: Συγκριτικό διάγραμμα της διακύμανσης της θερμοκρασίας του αέρα στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου.

- Η ελάττωση της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου, μειώνει αντίστοιχα και το **χρόνο λειτουργίας των κλιματιστικών συσκευών** που είναι εγκατεστημένες στο κτίριο. Για τον υπολογισμό του χρόνου αυτού, υποθέτουμε ότι οι συσκευές αυτές έχουν συνολική ισχύ $Q_{ac}=9$ KW, οι οποίες με τη βοήθεια θερμοστάτη ενεργοποιούνται για θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα μεγαλύτερες των $26,5^{\circ}\text{C}$. Έτσι, η ισχύς αυτή προστίθεται με αρνητικό πρόσημο (-9000W) στην συνολική ισχύ που έχουμε σε κάθε χρονική στιγμή. Εκτελείται επομένως άλλη μια φορά ο κώδικας επίλυσης με τη προσθήκη της παρακάτω συνθήκης που αφορά την εξίσωση (5.3.2-16):

$$T_{in} = \frac{Q_{tot}}{C_{tot}} \Delta t + T_{in}^0 \quad [^{\circ}\text{K}] \quad (5.3.2 - 16)$$

$$\text{Όπου } \rightarrow T_{in} > 299.5^{\circ}\text{K} \rightarrow Q_{tot} = Q_{tot} - 9000$$

$$\rightarrow T_{in} < 299.5^{\circ}\text{K} \rightarrow Q_{tot} = Q_{tot}$$

Για κάθε χρονική στιγμή όπου $T_{in} > 299.5^{\circ}\text{K}$ στην οποία ενεργοποιείται το κλιματιστικό, προστίθεται το Δt στον ολικό χρόνο λειτουργίας των κλιματιστικών συνθηκών. Για τις δυο περιπτώσεις προκύπτει:

	ΦΥΤΕΜΕΝΗ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ
Χρόνος λειτουργίας κλιμ. συσκευών → $time_{ac}$ [h]	5,99667	6.31333

Πίνακας 6-1: Συνολικός χρόνος λειτουργίας κλιματιστικών συσκευών για τις δυο περιπτώσεις.

- Σαν αποτέλεσμα της μείωσης του χρόνου λειτουργίας των κλιματιστικών συσκευών, μειώνεται αντίστοιχα και η **ολική ενέργεια που καταναλώνεται** για την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης E_{ac} . Από την εξίσωση:

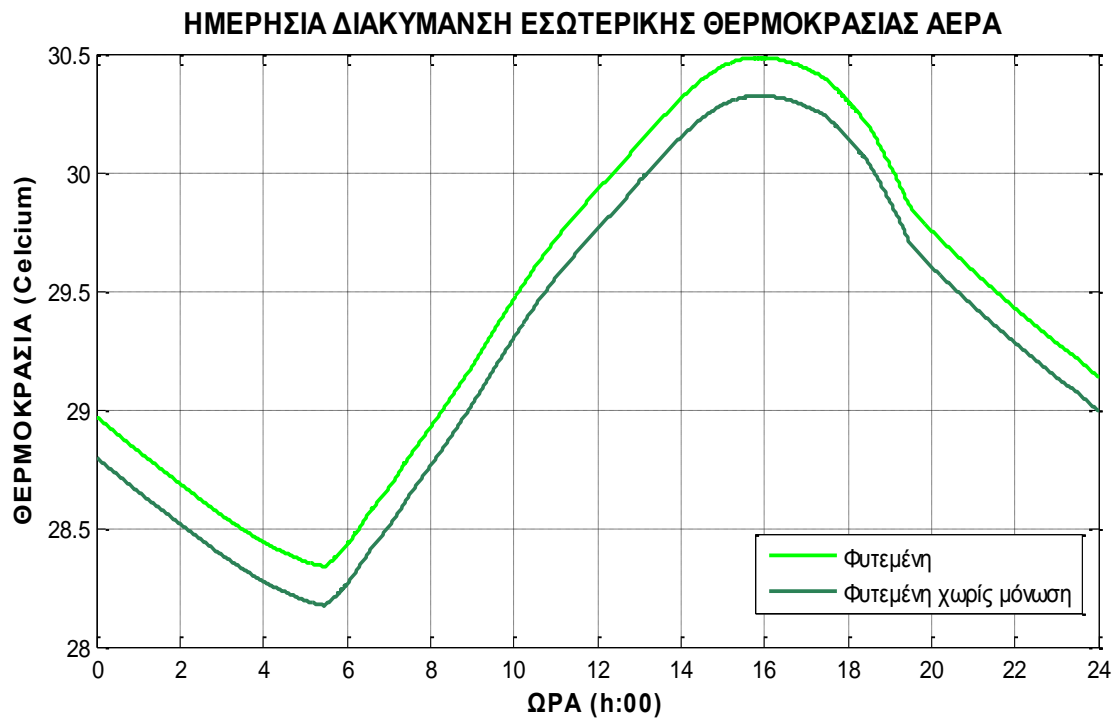
$$E_{ac} = time_{ac} Q_{ac} \quad [KWh] \quad (6 - 1)$$

Η ολική ενέργεια που καταναλώνεται στις δυο περιπτώσεις:

	ΦΥΤΕΜΕΝΗ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ
Ενέργεια που καταναλώνεται από κλιμ. συσκευές → E_{ac} [KWh]	53,97	56,82

Πίνακας 6-1: Συνολική ενέργεια που καταναλώνουν τα κλιματιστικά στις δυο περιπτώσεις.

Αρκετές εταιρίες που ασχολούνται με την εγκατάσταση φυτεμένων οροφών στο εξωτερικό, υποστηρίζουν ότι εφόσον οι κατασκευές αυτές λειτουργούν σαν συστήματα παθητικής ψύξης, θα ήταν αποδοτικότερο αν παραλείπαμε το στρώμα της μόνωσης. Σε μια τέτοια περίπτωση, ο εσωτερικός θερμός αέρας θα αποβαλλόταν ευκολότερα μέσω της οροφής προς το περιβάλλον. Στην Ελλάδα, σε αυτό το στάδιο τουλάχιστο κάτι τέτοιο δεν επιτρέπεται από τη νομοθεσία. Στην **εικόνα 6-4** παρουσιάζεται ένα συγκριτικό διαγράμματα σχετικά με τη διαφοροποίηση της εσωτερικής θερμοκρασίας αέρα στην περίπτωση όπου παραλειφθεί το στρώμα της μόνωση από μια φυτεμένη οροφή.



Εικόνα 6-4: Συγκριτικό διάγραμμα της διακύμανσης της θερμοκρασίας του αέρα στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου.

Παρατηρούμε ότι πράγματι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες τουλάχιστο είναι καλύτερα να μην υπάρχει μόνωση στη διαστρωμάτωση της φυτεμένης οροφής. Σε μια τέτοια περίπτωση η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα ελαττώνεται κατά $0,2^{\circ}\text{C}$ περίπου καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου σε σχέση με τη κατασκευή φυτεμένης οροφής με μόνωση. Ωστόσο, η απουσία της μόνωσης αυξάνει τη χρήση του κλιματιστικού στις **6,335 ώρες**, μιας και ο δροσερός αέρας του χώρου διαφεύγει ευκολότερα. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας είναι αντίστοιχα **57,015 KWh**.

Συνοψίζοντας, στη παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια **προσέγγιση** της μεταβολής της θερμικής συμπεριφοράς ενός κτηρίου στο οποίο γίνεται εγκατάσταση μιας «ξηρής» φυτεμένης οροφής εκτατικού τύπου, σε σχέση με μια συμβατική οροφή με απλή μόνωση. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα γραφήματα του κεφαλαίου αυτού, παρατηρείται ότι με την εφαρμογή της τεχνικής αυτής φαίνεται να επιβεβαιώνονται τα διάφορα οφέλη που παρατίθενται στη παράγραφο 3.6 και τα οποία αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία. (δροσισμός κτιρίου, προστασία οροφής από ψηλές τιμές θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας). Τα οφέλη αυτά με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτά δεν φαίνεται να είναι ιδιαίτερα σημαντικά, τουλάχιστον όσο αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας. Υποθετικά όμως μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι στη πραγματικότητα, θεωρητικά τουλάχιστο, είναι μεγαλύτερα, αν αναλογιστούμε και το παράγοντα της εξατμιστικής ψύξης που προκύπτει από την υγρασία του χώματος φύτευσης. Ταυτόχρονα, φυτεμένες οροφές εντατικού ή και ημιεντατικού τύπου, ενισχύουν την αποτελεσματικότητα της τεχνικής αυτής. Παράλληλα, ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στη παράγραφο 2.2 για τα **περιβαλλοντικά οφέλη** από τη παρουσία της βλάστησης στα αστικά κέντρα. Επομένως, οι φυτεμένες οροφές όντας μικρές εστίες πρασίνου, μπορούν να συμβάλουν και αυτές με τη σειρά τους στη βελτίωση της αποπνικτικής ατμόσφαιρας, δεσμεύοντας διοξείδιο του άνθρακα και παράγοντας οξυγόνο, αμβλύνοντας το φαινόμενο της αστικής θερμονησίδας και συμβάλλοντας στο περιορισμό των πλημμυρικών φαινομένων.

Εν κατακλείδι, το συμπέρασμα που βγαίνει από τη μελέτη αυτή είναι ότι η υιοθέτηση της τεχνικής αυτής για τη προστασία των κτιριακών κελυφών είναι ιδιαίτερα αναγκαία. Τα ενεργειακά και περιβαλλοντολογικά κέρδη που μπορεί να αποκομίσει η κοινωνία από την επέκταση των φυτεμένων οροφών τις καθιστούν απαραίτητες. Λαμβάνοντας υπόψη μάλιστα τις ιδιαιτερότητες των ελληνικών πόλεων (πυκνή δόμηση, ρύπανση, ψηλές θερμοκρασίες, ενεργειακά ασύμφορα κτίρια κτλ), γίνεται αντιληπτό ότι οι αρμόδιοι φορείς θα πρέπει να κινητοποιηθούν άμεσα, ώστε αφενός να ενημερωθούν οι πολίτες για τα οφέλη που προσφέρουν οι κατασκευές αυτές και αφετέρου να δοθούν κίνητρα για την επέκτασή τους. Εδώ εμπλέκεται και ο κοινωνικός ρόλος των μηχανικών, οι οποίοι σαν εξειδικευμένοι επιστήμονες, είναι υπεύθυνοι να προωθήσουν ότι είναι ικανό να συμβάλει στην αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος. Και μια τέτοια λύση είναι και οι φυτεμένες οροφές.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας Επίλυσης

Για την επίλυση του συστήματος, γράφεται κατάλληλος κώδικας σε **MATLAB** στην έκδοση 2008Ra. Για μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά και για να επιτευχθεί ευστάθεια στους υπολογισμούς, ορίζουμε πολύ μικρό χρονικό βήμα της τάξεως του $\Delta t = 6 \text{ sec}$. Λοιπά δεδομένα εισόδου έχουν οριστεί σε προηγούμενες παραγράφους, ενώ τιμές θερμοκρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας, SHGF, ταχύτητας ανέμου και υγρασίας εισάγονται από το αρχείο '**July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls**' της Microsoft Excel.

```
function Roof_Simulation

clc
clear all
format long

%%%%%      EISAGWGH DEDOMENWN      %%%%%

% syntelestis thermikis agwgimothtas k (W/mK)
kypf=1.16;      % ypostrwma fyteyshs
ksfil=0.22;     % ines polypropyleniou
kelafp=0.1;     % elafropetra
kasfap=0.195;  % asfaltopano
kasfaf=0.195;  % asfaltofylo
kelafb=1.35;   % screed rysewn
kmon=0.041;    % monwsh
kbet=2.5;      % beton
ksov=0.87;     % sovas
ktouv=0.25;    % touvlo

% eidikh thermoxwrhtikothta c (J/kgK)
cypf=800;      % ypostrwma fyteyshs
csfil=800;     % ines polypropyleniou
celafp=700;    % elafropetra
casfap=1000;   % asfaltopano
casfaf=1800;   % asfaltofylo
celafb=840;    % screed rysewn
cmon=1000;     % monwsh
cbet=1000;     % beton
csov=1000;    % sovas
ctouv=840;     % touvlo

% pyknothta ρ (kg/m^3)
roypf=600;     % ypostrwma fyteyshs
rosfil=700;    % ines polypropyleniou
roelafp=250;   % elafropetra
roasfap=1100;  % asfaltopano
roasfaf=1700;  % asfaltofylo
roelafb=1200;  % screed rysewn
```

```

romon=50;      % monwsh
robet=2300;    % beton
rosov=1300;    % sovas
rotouv=1000;   % touvlo

% dedomena fyteyshs
rocan=950;     % pyknothta fyllwn (kg/m3)
ccan=3750;     % thermoxwrhtikothta fyllou (J/Kg/K)
dcan=0.0005;   % paxos fyllwn (m)
LAI=4;         % leaf area index
kl=0.829;     % syntelestis eksalipshs fyllwn gia aktinobolia
                megalou mhkous kymatos
ks=kl*0.74;    % syntelestis eksalipshs fyllwn
tafs=exp(-ks*LAI); % syntelesths ekpomphs aktinobolias mikrou kymatos
albedocan=0.2; % logos antanaklashs fyllwmatos
albedoosil=0.2; % logos antanaklash xwmatos
tafl=exp(-kl*LAI); % syntelesths ekpomphs aktinobolias megalou kymatos
sigma=5.699*(10^-8); % Stefan-Boltzmann constant (W/m2K4)
roair=1.15;    % pyknothta aera (kg/m3)
cair=1003;     % thermoxvrhtikotha aera (J/Kg/K)
pair=101.325*10^3; % piesh atmosf. aera (Pa)
sigmaf=LAI/7;  % klasmatikh fytokalypsh orofhs
L=0.6;        % ypsos vlasthshs (m)

% syntelestis synagwghs h (W/m^2K)
hveg=1.35;     % xwma fyteyshs - aeras tholou
hin=7.7;       % eswterikos aeras - eswterikh epifaneia toixwn h orofhs
hout=16.3;     % ekswterikos aeras - ekswterikh epifaneia toixvn
hroof=16.3;    % ekswterikh epifaneia symvatikou dwmatos - ekswterikos aeras
hroofin=10;    % eswterikh epifaneia orofhs - eswterikos aeras
R=0.1;        % ananewseis aera tholou (1/s)
haout=R*L*roair*cair; % aeras tholou - aeras periballontos

% ekswterikes synthikes
ToutC5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','B4:B291'); %
eisagwgh thermokrasiwn eks. aera (C) apo arxeio excel
Tout5=ToutC5+273; %
metatroph ToutC5 se Kelvin
Iout5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','D4:D291'); %
olikh aktinobolia I pou prospiptei sthn orofh (W/m^2s)
Teqroof5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','k4:k291'); %
isodynamh thermokrasia hliou - aera Roof
Teqno5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','M4:M291'); %
isodynamh thermokrasia hliou - aera North
Teqso5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','N4:N291'); %
isodynamh thermokrasia hliou - aera South
Teqwe5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','L4:L291'); %
isodynamh thermokrasia hliou - aera West
Teqea5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','O4:O291'); %
isodynamh thermokrasia hliou - aera East
SHGFno5=0.2*xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','T4:T291'); %
eisagwgh SHGF (W/m^2) North
SHGFso5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','U4:U291'); %
eisagwgh SHGF (W/m^2) South
SHGFwe5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','S4:S291'); %
eisagwgh SHGF (W/m^2) West
SHGFea5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','V4:V291'); %
eisagwgh SHGF (W/m^2) East
ucan5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','G4:G291'); %
taxythta anemou entos tholou (m/s)

```



```

uamb5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','F4:F291'); %
taxythta anemou (m/s)
RHout5=xlsread('July 21th, ana 5 lepta --matlab.xls','H4:H291'); %
ygrasia atmosf aera %
RHgr=0.0; %
ygrasia xwmatos fyteyshs %

% paxoi diastrwmatwshs L(m) orofhs kai toixwn
Lypf=0.12; % ypostrwma fyteyshs
Lsfil=0.003; % ammos gia filtrarisma
Lelafp=0.06; % elafropetra
Lasfap=0.004; % asfaltopano
Lasfaf=0.007; % asfaltofylllo
Lelafb=0.05; % elafrobetaon
Lmon=0.05; % monwsh
Lbet=0.15; % betaon
Lrsov=0.025; % sovas orofhs
Lwsov=0.025; % sovas toixou
Ltoutv=0.2; % touvlo ekswterikhhs toixopoiias
Lintouv=0.1; % touvlo eswterikhhs toixopoiias

% diastaseis ktiriou
mhkos=13;
platos=16;
yposos=3.3;

% anoigmata (m2) - xarakthristika yalopinakwn
anoigno=16; % vorras
anoigso=8; % notos
anoigwe=6; % dysh
anoigea=6; % anatolh
SC=0.35; % shading coefficient (syntelestis skiashs)
U=3.3; % U - factor

% loipa
dtlepta=1/10; % xroniko vhma se lepta
dt=dtlepta*60; % xroniko vhma se seconds
ACH=1.5; % ananewsh aera xwrou
Qac=-5000; % isxys klimatistikwn

% epeksergasia dedomenwn
Lroof=Lasfaf+Lelafb+Lmon+Lbet+Lrsov; % oliko paxos symbatikhs orofhs
Nroof=275; % komvoi symbatikhs orofhs
dzcommon=Lroof/(Nroof-1); % vhma symbatikhs orofhs
Lveg=Lypf+Lsfil+Lelafp+Lasfap+Lasfaf+Lelafb+Lmon+Lbet+Lrsov; % oliko paxos
fytemenhs orofhs
Nveg=400; % komvoi fytemenhs orofhs
dzveg=Lveg/(Nveg-1); % vhma orofhs
Lwall=Lwsov*2+Ltoutv; % oliko paxos toixwn
Nwall=225; % komvoi toixwn
dx=Lwall/(Nwall-1); % vhma toixwn
Linwall=Lwsov*2+Lintouv; % oliko paxos eswt. toixou
Ninwall=150; % komvoi eswt. toixwn
dxin=Linwall/(Ninwall-1); % vahma eswt. toixou
f=0.5; % Crank-Nicolson
eg=0.95; % diaxythkothta aktinobolias mesoy anaptykshs
ef=0.98; % diaxythkothta aktinobolias mesoy anaptykshs
el=eg+ef-ef*eg;

% ypologismos isodynamhs thermoxvrhtikothta eswt. xwrou Ctot (J/K)

```

```

Lengthinwall=70; % oliko mhkos eswt. toixopoias
Ctot=cair*roair*(platos*mhkos*ypsos-(Lengthinwall*ypsos*Linwall)); %
isodynamh thermoxwrhthkothta (J/K)

% anagwgh tw'n input ana 5lepto dedomenwn se times ana lepto me
grammikh parembolh

Tout1(1)=0.2*Tout5(1)+0.8*Tout5(288);
Tout1(2)=0.4*Tout5(1)+0.6*Tout5(288);
Tout1(3)=0.6*Tout5(1)+0.4*Tout5(288);
Tout1(4)=0.8*Tout5(1)+0.2*Tout5(288);

Iout1(1)=0.2*Iout5(1)+0.8*Iout5(288);
Iout1(2)=0.4*Iout5(1)+0.6*Iout5(288);
Iout1(3)=0.6*Iout5(1)+0.4*Iout5(288);
Iout1(4)=0.8*Iout5(1)+0.2*Iout5(288);

ucan1(1)=0.2*ucan5(1)+0.8*ucan5(288);
ucan1(2)=0.4*ucan5(1)+0.6*ucan5(288);
ucan1(3)=0.6*ucan5(1)+0.4*ucan5(288);
ucan1(4)=0.8*ucan5(1)+0.2*ucan5(288);

uamb1(1)=0.2*uamb5(1)+0.8*uamb5(288);
uamb1(2)=0.4*uamb5(1)+0.6*uamb5(288);
uamb1(3)=0.6*uamb5(1)+0.4*uamb5(288);
uamb1(4)=0.8*uamb5(1)+0.2*uamb5(288);

RHout1(1)=0.2*RHout5(1)+0.8*RHout5(288);
RHout1(2)=0.4*RHout5(1)+0.6*RHout5(288);
RHout1(3)=0.6*RHout5(1)+0.4*RHout5(288);
RHout1(4)=0.8*RHout5(1)+0.2*RHout5(288);

Teqroof1(1)=0.2*Teqroof5(1)+0.8*Teqroof5(288);
Teqroof1(2)=0.4*Teqroof5(1)+0.6*Teqroof5(288);
Teqroof1(3)=0.6*Teqroof5(1)+0.4*Teqroof5(288);
Teqroof1(4)=0.8*Teqroof5(1)+0.2*Teqroof5(288);

Teqno1(1)=0.2*Teqno5(1)+0.8*Teqno5(288);
Teqno1(2)=0.4*Teqno5(1)+0.6*Teqno5(288);
Teqno1(3)=0.6*Teqno5(1)+0.4*Teqno5(288);
Teqno1(4)=0.8*Teqno5(1)+0.2*Teqno5(288);

Teqso1(1)=0.2*Teqso5(1)+0.8*Teqso5(288);
Teqso1(2)=0.4*Teqso5(1)+0.6*Teqso5(288);
Teqso1(3)=0.6*Teqso5(1)+0.4*Teqso5(288);
Teqso1(4)=0.8*Teqso5(1)+0.2*Teqso5(288);

Teqwe1(1)=0.2*Teqwe5(1)+0.8*Teqwe5(288);
Teqwe1(2)=0.4*Teqwe5(1)+0.6*Teqwe5(288);
Teqwe1(3)=0.6*Teqwe5(1)+0.4*Teqwe5(288);
Teqwe1(4)=0.8*Teqwe5(1)+0.2*Teqwe5(288);

Teqea1(1)=0.2*Teqea5(1)+0.8*Teqea5(288);
Teqea1(2)=0.4*Teqea5(1)+0.6*Teqea5(288);
Teqea1(3)=0.6*Teqea5(1)+0.4*Teqea5(288);
Teqea1(4)=0.8*Teqea5(1)+0.2*Teqea5(288);

```

```

SHGFno1 (1)=0.2*SHGFno5 (1)+0.8*SHGFno5 (288);
SHGFno1 (2)=0.4*SHGFno5 (1)+0.6*SHGFno5 (288);
SHGFno1 (3)=0.6*SHGFno5 (1)+0.4*SHGFno5 (288);
SHGFno1 (4)=0.8*SHGFno5 (1)+0.2*SHGFno5 (288);

```

```

SHGFso1 (1)=0.2*SHGFso5 (1)+0.8*SHGFso5 (288);
SHGFso1 (2)=0.4*SHGFso5 (1)+0.6*SHGFso5 (288);
SHGFso1 (3)=0.6*SHGFso5 (1)+0.4*SHGFso5 (288);
SHGFso1 (4)=0.8*SHGFso5 (1)+0.2*SHGFso5 (288);

```

```

SHGFwe1 (1)=0.2*SHGFwe5 (1)+0.8*SHGFwe5 (288);
SHGFwe1 (2)=0.4*SHGFwe5 (1)+0.6*SHGFwe5 (288);
SHGFwe1 (3)=0.6*SHGFwe5 (1)+0.4*SHGFwe5 (288);
SHGFwe1 (4)=0.8*SHGFwe5 (1)+0.2*SHGFwe5 (288);

```

```

SHGFfe1 (1)=0.2*SHGFfe5 (1)+0.8*SHGFfe5 (288);
SHGFfe1 (2)=0.4*SHGFfe5 (1)+0.6*SHGFfe5 (288);
SHGFfe1 (3)=0.6*SHGFfe5 (1)+0.4*SHGFfe5 (288);
SHGFfe1 (4)=0.8*SHGFfe5 (1)+0.2*SHGFfe5 (288);

```

```
for t1=2:(24*60/5)
```

```

Tout1 ((t1-1)*5)=Tout5 (t1-1);
Tout1 ((t1-1)*5+1)=0.8*Tout5 (t1-1)+0.2*Tout5 (t1);
Tout1 ((t1-1)*5+2)=0.6*Tout5 (t1-1)+0.4*Tout5 (t1);
Tout1 ((t1-1)*5+3)=0.4*Tout5 (t1-1)+0.6*Tout5 (t1);
Tout1 ((t1-1)*5+4)=0.2*Tout5 (t1-1)+0.8*Tout5 (t1);
Tout1 ((t1-1)*5+5)=Tout5 (t1);

```

```

Iout1 ((t1-1)*5)=Iout5 (t1-1);
Iout1 ((t1-1)*5+1)=0.8*Iout5 (t1-1)+0.2*Iout5 (t1);
Iout1 ((t1-1)*5+2)=0.6*Iout5 (t1-1)+0.4*Iout5 (t1);
Iout1 ((t1-1)*5+3)=0.4*Iout5 (t1-1)+0.6*Iout5 (t1);
Iout1 ((t1-1)*5+4)=0.2*Iout5 (t1-1)+0.8*Iout5 (t1);
Iout1 ((t1-1)*5+5)=Iout5 (t1);

```

```

ucan1 ((t1-1)*5)=ucan5 (t1-1);
ucan1 ((t1-1)*5+1)=0.8*ucan5 (t1-1)+0.2*ucan5 (t1);
ucan1 ((t1-1)*5+2)=0.6*ucan5 (t1-1)+0.4*ucan5 (t1);
ucan1 ((t1-1)*5+3)=0.4*ucan5 (t1-1)+0.6*ucan5 (t1);
ucan1 ((t1-1)*5+4)=0.2*ucan5 (t1-1)+0.8*ucan5 (t1);
ucan1 ((t1-1)*5+5)=ucan5 (t1);

```

```

uamb1 ((t1-1)*5)=uamb5 (t1-1);
uamb1 ((t1-1)*5+1)=0.8*uamb5 (t1-1)+0.2*uamb5 (t1);
uamb1 ((t1-1)*5+2)=0.6*uamb5 (t1-1)+0.4*uamb5 (t1);
uamb1 ((t1-1)*5+3)=0.4*uamb5 (t1-1)+0.6*uamb5 (t1);
uamb1 ((t1-1)*5+4)=0.2*uamb5 (t1-1)+0.8*uamb5 (t1);
uamb1 ((t1-1)*5+5)=uamb5 (t1);

```

```

RHout1 ((t1-1)*5)=RHout5 (t1-1);
RHout1 ((t1-1)*5+1)=0.8*RHout5 (t1-1)+0.2*RHout5 (t1);
RHout1 ((t1-1)*5+2)=0.6*RHout5 (t1-1)+0.4*RHout5 (t1);
RHout1 ((t1-1)*5+3)=0.4*RHout5 (t1-1)+0.6*RHout5 (t1);
RHout1 ((t1-1)*5+4)=0.2*RHout5 (t1-1)+0.8*RHout5 (t1);
RHout1 ((t1-1)*5+5)=RHout5 (t1);

```

```

Tegroof1 ((t1-1)*5)=Tegroof5 (t1-1);
Tegroof1 ((t1-1)*5+1)=0.8*Tegroof5 (t1-1)+0.2*Tegroof5 (t1);

```

```

Teqroof1 ((t1-1)*5+2)=0.6*Teqroof5 (t1-1)+0.4*Teqroof5 (t1);
Teqroof1 ((t1-1)*5+3)=0.4*Teqroof5 (t1-1)+0.6*Teqroof5 (t1);
Teqroof1 ((t1-1)*5+4)=0.2*Teqroof5 (t1-1)+0.8*Teqroof5 (t1);
Teqroof1 ((t1-1)*5+5)=Teqroof5 (t1);

```

```

Teqno1 ((t1-1)*5)=Teqno5 (t1-1);
Teqno1 ((t1-1)*5+1)=0.8*Teqno5 (t1-1)+0.2*Teqno5 (t1);
Teqno1 ((t1-1)*5+2)=0.6*Teqno5 (t1-1)+0.4*Teqno5 (t1);
Teqno1 ((t1-1)*5+3)=0.4*Teqno5 (t1-1)+0.6*Teqno5 (t1);
Teqno1 ((t1-1)*5+4)=0.2*Teqno5 (t1-1)+0.8*Teqno5 (t1);
Teqno1 ((t1-1)*5+5)=Teqno5 (t1);

```

```

Teqso1 ((t1-1)*5)=Teqso5 (t1-1);
Teqso1 ((t1-1)*5+1)=0.8*Teqso5 (t1-1)+0.2*Teqso5 (t1);
Teqso1 ((t1-1)*5+2)=0.6*Teqso5 (t1-1)+0.4*Teqso5 (t1);
Teqso1 ((t1-1)*5+3)=0.4*Teqso5 (t1-1)+0.6*Teqso5 (t1);
Teqso1 ((t1-1)*5+4)=0.2*Teqso5 (t1-1)+0.8*Teqso5 (t1);
Teqso1 ((t1-1)*5+5)=Teqso5 (t1);

```

```

Teqwe1 ((t1-1)*5)=Teqwe5 (t1-1);
Teqwe1 ((t1-1)*5+1)=0.8*Teqwe5 (t1-1)+0.2*Teqwe5 (t1);
Teqwe1 ((t1-1)*5+2)=0.6*Teqwe5 (t1-1)+0.4*Teqwe5 (t1);
Teqwe1 ((t1-1)*5+3)=0.4*Teqwe5 (t1-1)+0.6*Teqwe5 (t1);
Teqwe1 ((t1-1)*5+4)=0.2*Teqwe5 (t1-1)+0.8*Teqwe5 (t1);
Teqwe1 ((t1-1)*5+5)=Teqwe5 (t1);

```

```

Teqea1 ((t1-1)*5)=Teqea5 (t1-1);
Teqea1 ((t1-1)*5+1)=0.8*Teqea5 (t1-1)+0.2*Teqea5 (t1);
Teqea1 ((t1-1)*5+2)=0.6*Teqea5 (t1-1)+0.4*Teqea5 (t1);
Teqea1 ((t1-1)*5+3)=0.4*Teqea5 (t1-1)+0.6*Teqea5 (t1);
Teqea1 ((t1-1)*5+4)=0.2*Teqea5 (t1-1)+0.8*Teqea5 (t1);
Teqea1 ((t1-1)*5+5)=Teqea5 (t1);

```

```

SHGFno1 ((t1-1)*5)=SHGFno5 (t1-1);
SHGFno1 ((t1-1)*5+1)=0.8*SHGFno5 (t1-1)+0.2*SHGFno5 (t1);
SHGFno1 ((t1-1)*5+2)=0.6*SHGFno5 (t1-1)+0.4*SHGFno5 (t1);
SHGFno1 ((t1-1)*5+3)=0.4*SHGFno5 (t1-1)+0.6*SHGFno5 (t1);
SHGFno1 ((t1-1)*5+4)=0.2*SHGFno5 (t1-1)+0.8*SHGFno5 (t1);
SHGFno1 ((t1-1)*5+5)=SHGFno5 (t1);

```

```

SHGFso1 ((t1-1)*5)=SHGFso5 (t1-1);
SHGFso1 ((t1-1)*5+1)=0.8*SHGFso5 (t1-1)+0.2*SHGFso5 (t1);
SHGFso1 ((t1-1)*5+2)=0.6*SHGFso5 (t1-1)+0.4*SHGFso5 (t1);
SHGFso1 ((t1-1)*5+3)=0.4*SHGFso5 (t1-1)+0.6*SHGFso5 (t1);
SHGFso1 ((t1-1)*5+4)=0.2*SHGFso5 (t1-1)+0.8*SHGFso5 (t1);
SHGFso1 ((t1-1)*5+5)=SHGFso5 (t1);

```

```

SHGFea1 ((t1-1)*5)=SHGFea5 (t1-1);
SHGFea1 ((t1-1)*5+1)=0.8*SHGFea5 (t1-1)+0.2*SHGFea5 (t1);
SHGFea1 ((t1-1)*5+2)=0.6*SHGFea5 (t1-1)+0.4*SHGFea5 (t1);
SHGFea1 ((t1-1)*5+3)=0.4*SHGFea5 (t1-1)+0.6*SHGFea5 (t1);
SHGFea1 ((t1-1)*5+4)=0.2*SHGFea5 (t1-1)+0.8*SHGFea5 (t1);
SHGFea1 ((t1-1)*5+5)=SHGFea5 (t1);

```

```

SHGFwe1 ((t1-1)*5)=SHGFwe5 (t1-1);
SHGFwe1 ((t1-1)*5+1)=0.8*SHGFwe5 (t1-1)+0.2*SHGFwe5 (t1);
SHGFwe1 ((t1-1)*5+2)=0.6*SHGFwe5 (t1-1)+0.4*SHGFwe5 (t1);
SHGFwe1 ((t1-1)*5+3)=0.4*SHGFwe5 (t1-1)+0.6*SHGFwe5 (t1);
SHGFwe1 ((t1-1)*5+4)=0.2*SHGFwe5 (t1-1)+0.8*SHGFwe5 (t1);

```

```

SHGFwe1((t1-1)*5+5)=SHGFwe5(t1);

end

for t2=1:(24*60)           % anagwgh input dedomenwn se times ana dt

    for t3=(60/dt-1):-1:0

        Tout(t2*(60/dt)-t3)=Tout1(t2);
        Iout(t2*(60/dt)-t3)=Iout1(t2);

        ucan(t2*(60/dt)-t3)=ucan1(t2);
        uamb(t2*(60/dt)-t3)=uamb1(t2);

        RHout(t2*(60/dt)-t3)=RHout1(t2);

        Teqroof(t2*(60/dt)-t3)=Teqroof1(t2);
        Teqno(t2*(60/dt)-t3)=Teqno1(t2);
        Teqso(t2*(60/dt)-t3)=Teqso1(t2);
        Teqwe(t2*(60/dt)-t3)=Teqwe1(t2);
        Teqea(t2*(60/dt)-t3)=Teqea1(t2);

        SHGFno(t2*(60/dt)-t3)=SHGFno1(t2);
        SHGFso(t2*(60/dt)-t3)=SHGFso1(t2);
        SHGFwe(t2*(60/dt)-t3)=SHGFwe1(t2);
        SHGFea(t2*(60/dt)-t3)=SHGFea1(t2);

    end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%      FYTEMENO DWMA      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Se prwth fash ginetai eksetash tu problhmatos se MONIMO pedio wste na
% dothun kapoies arxikes times thermokrasias stous komvoux twv plegmatwn

t=1;           % xronikh stigmh t=0 ---> wra 00:00:06

% Orizume arxikes oriakes (times ekkinhshs)
Tcan(t)=296.3;   % thermokrasia fyllwmatos
Tac(t)=297.6;   % thermokrasia aera tholou
Tin(t)=301.5;   % thermokrasia eswterikou aera
SH(t)=0.0165;   % eidikh ygrasia aera tholou

escan(t)=610.78*exp((Tcan(t)-273)/(Tcan(t)-273+238.3)*17.2694); % tash
koresmenou atmou sthn epifaneia fyllwmatos (Pa)
esac(t)=610.78*exp((Tac(t)-273)/(Tac(t)-273+238.3)*17.2694); % tash
koresmenou atmou aera entos tholou (Pa)
eac(t)=SH(t)*pair/(0.62198+SH(t)); % tash
atmou aera entos tholou (Pa)
RHac(t)=eac(t)/esac(t); % sxetikh
ygrasia aera tholou %

Teqroofv(t)=Tac(t)+tafs*(1-albedosoil)*Iout(t)/hveg-
sigmaf*eg*ef*sigma/el*(300^4-Tcan(t)^4)/hveg; % isodynamh thermokrasia

```

```

hliou aeros

%i=1 prwtos kombos

%orofh
kveg(1)=kypf; % syntelestis thermikis agwgimothtas sto epipedo pu
vrisketai o kombos
Lveg(1)=0; % apostash apo thn ekswterikh epifaneia ths kataskeuhs
pou vrisketai o kombos
Tfactorveg(1,1)=hveg+kveg(1)/dzveg; % paragontas a1,1
Tfactorveg(1,2)=-kveg(1)/dzveg; % paragontas a1,2
Cfactorveg(1)=hveg*Teqroofv(t); % paragontas b1

%toixos North
kwall(1)=ksov;
Lwall(1)=0;
Tfactorwano(1,1)=hout+kwall(1)/dx;
Tfactorwano(1,2)=-kwall(1)/dx;
Cfactorwano(1)=hout*Teqno(t);

%toixos South
Tfactorwaso(1,1)=hout+kwall(1)/dx;
Tfactorwaso(1,2)=-kwall(1)/dx;
Cfactorwaso(1)=hout*Teqso(t);

%toixos West
Tfactorwawe(1,1)=hout+kwall(1)/dx;
Tfactorwawe(1,2)=-kwall(1)/dx;
Cfactorwawe(1)=hout*Teqwe(t);

%toixos East
Tfactorwaea(1,1)=hout+kwall(1)/dx;
Tfactorwaea(1,2)=-kwall(1)/dx;
Cfactorwaea(1)=hout*Teqea(t);

%toixos indoor
kinwall(1)=ksov;
Linwall(1)=0;
Tfactorwain(1,1)=hin+kinwall(1)/dxin;
Tfactorwain(1,2)=-kinwall(1)/dxin;
Cfactorwain(1)=hin*Tin(t);

for i=2:(Nveg-1) % Eswterikoi komvoi orofhs

Lveg(i)=Lveg(i-1)+dzveg; % Ypologismos se poio vathos
vriskomaste

if (Lveg(i)<=Lypf) kveg(i)=kypf; % Epilogh katallhlwn thermikvn
xarakthristikvn
cveg(i)=cypf;
roveg(i)=roypf;
elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil) kveg(i)=ksfil;
cveg(i)=csfil;
roveg(i)=rosfil;
elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelafp) kveg(i)=kelafp;
cveg(i)=celafp;
roveg(i)=roelafp;
elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelafp+Lasfap) kveg(i)=kasfap;

```

```

                                                                    cveg(i)=casfaf;
                                                                    roveg(i)=roasfaf;
elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelafp+Lasfaf+Lasfaf) kveg(i)=kasfaf;
                                                                    cveg(i)=casfaf;

roveg(i)=roasfaf;
elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelafp+Lasfaf+Lasfaf+Lelafb)
kveg(i)=kelafb;

cveg(i)=celafb;

roveg(i)=roelafb;
elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelafp+Lasfaf+Lasfaf+Lelafb+Lmon)
kveg(i)=kmon;

cveg(i)=cmon;

roveg(i)=romon;
elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelafp+Lasfaf+Lasfaf+Lelafb+Lmon+Lbet)
kveg(i)=kbet;

cveg(i)=cbet;

roveg(i)=robet;
elseif
(Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelafp+Lasfaf+Lasfaf+Lelafb+Lmon+Lbet+Lrsov)
kveg(i)=ksov;

cveg(i)=csov;

roveg(i)=rosov;
end

Tfactorveg(i,i-1)=kveg(i-1)/dzveg;
Tfactorveg(i,i)=-kveg(i-1)/dzveg-kveg(i)/dzveg;
Tfactorveg(i,i+1)=kveg(i)/dzveg;
Cfactorveg(i)=0;

end

for i=2:(Nwall-1) %toixoi

Lwall(i)=Lwall(i-1)+dx;

if (Lwall(i)<=Lwsov) kwall(i)=ksov;
                    cwall(i)=csov;
                    rowall(i)=rosov;
elseif (Lwall(i)<=Lwsov+Ltouv) kwall(i)=ktouv;
                    cwall(i)=ctouv;
                    rowall(i)=rotouv;
elseif (Lwall(i)<=Lwsov*2+Ltouv) kwall(i)=ksov;
                    cwall(i)=csov;
                    rowall(i)=rosov;

end

%toixos North
Tfactorwano(i,i-1)=kwall(i-1)/dx;
Tfactorwano(i,i)=-kwall(i-1)/dx-kwall(i)/dx;

```

```

Tfactorwano (i, i+1)=kwall (i) /dx;
Cfactorwano (i)=0;

%toixos South
Tfactorwaso (i, i-1)=Tfactorwano (i, i-1);
Tfactorwaso (i, i)=Tfactorwano (i, i);
Tfactorwaso (i, i+1)=Tfactorwano (i, i+1);
Cfactorwaso (i)=Cfactorwano (i);

%toixos West
Tfactorwawe (i, i-1)=Tfactorwano (i, i-1);
Tfactorwawe (i, i)=Tfactorwano (i, i);
Tfactorwawe (i, i+1)=Tfactorwano (i, i+1);
Cfactorwawe (i)=Cfactorwano (i);

%toixos East
Tfactorwaea (i, i-1)=Tfactorwano (i, i-1);
Tfactorwaea (i, i)=Tfactorwano (i, i);
Tfactorwaea (i, i+1)=Tfactorwano (i, i+1);
Cfactorwaea (i)=Cfactorwano (i);

end

for i=2:(Ninwall-1)           % eswt. toixos

Linwall (i)=Linwall (i-1)+dxin;

if (Linwall (i)<=Lwsov) kinwall (i)=ksov;
                        cinwall (i)=csov;
                        roinwall (i)=rosov;
elseif (Linwall (i)<=Lwsov+Lintouv) kinwall (i)=ktouv;
                                       cinwall (i)=ctouv;
                                       roinwall (i)=rotouv;
elseif (Linwall (i)<=Lwsov*2+Lintouv) kinwall (i)=ksov;
                                       cinwall (i)=csov;
                                       roinwall (i)=rosov;

end

Tfactorwain (i, i-1)=kinwall (i-1) /dxin;
Tfactorwain (i, i)=-kinwall (i-1) /dxin-kinwall (i) /dxin;
Tfactorwain (i, i+1)=kinwall (i) /dxin;
Cfactorwain (i)=0;

end

%i=N komvos N

%orofh
kveg (Nveg)=ksov;
Tfactorveg (Nveg, Nveg-1)=kveg (Nveg-1) /dzveg;
Tfactorveg (Nveg, Nveg)=-kveg (Nveg-1) /dzveg-hroofin;
Cfactorveg (Nveg)=-hroofin*Tin (t);

Cfactorlveg (1:Nveg, 1)=Cfactorveg;
Tnroof=inv (Tfactorveg) *Cfactorlveg;
Troof (1:Nveg, t)=Tnroof;  %katagrafh thermokrasiwn stous N kombous th
xronikh stigmh t

```



```

%toixos North
kwall(Nwall)=ksov;
Tfactorwano(Nwall,Nwall-1)=kwall(Nwall-1)/dx;
Tfactorwano(Nwall,Nwall)=-kwall(Nwall-1)/dx-hin;
Cfactorwano(Nwall)=-hin*Tin(t);

Cfactorlwano(1:Nwall,1)=Cfactorwano;
Tnwano=inv(Tfactorwano)*Cfactorlwano;
Twno(1:Nwall,t)=Tnwano;           %katagrafh thermokrasiwn
stous N kombous th xronikh stigmh t

%toixos Sourth
Tfactorwaso(Nwall,Nwall-1)=kwall(Nwall-1)/dx;
Tfactorwaso(Nwall,Nwall)=-kwall(Nwall-1)/dx-hin;
Cfactorwaso(Nwall)=-hin*Tin(t);

Cfactorlwaso(1:Nwall,1)=Cfactorwaso;
Tnwaso=inv(Tfactorwaso)*Cfactorlwaso;
Twaso(1:Nwall,t)=Tnwaso;          %katagrafh thermokrasiwn
stous N kombous th xronikh stigmh t

%toixos West
Tfactorwawe(Nwall,Nwall-1)=kwall(Nwall-1)/dx;
Tfactorwawe(Nwall,Nwall)=-kwall(Nwall-1)/dx-hin;
Cfactorwawe(Nwall)=-hin*Tin(t);

Cfactorlwawe(1:Nwall,1)=Cfactorwawe;
Tnwawe=inv(Tfactorwawe)*Cfactorlwawe;
Tnwawe(1:Nwall,t)=Tnwawe;        %katagrafh thermokrasiwn
stous N kombous th xronikh stigmh t

%toixos East
Tfactorwaea(Nwall,Nwall-1)=kwall(Nwall-1)/dx;
Tfactorwaea(Nwall,Nwall)=-kwall(Nwall-1)/dx-hin;
Cfactorwaea(Nwall)=-hin*Tin(t);

Cfactorlwaea(1:Nwall,1)=Cfactorwaea;
Tnwaea=inv(Tfactorwaea)*Cfactorlwaea;
Tnwaea(1:Nwall,t)=Tnwaea;        %katagrafh thermokrasiwn
stous N kombous th xronikh stigmh t

%toixos eswt.
kinwall(Ninwall)=ksov;
Tfactorwain(Ninwall,Ninwall-1)=kinwall(Ninwall-1)/dxin;
Tfactorwain(Ninwall,Ninwall)=-kinwall(Ninwall-1)/dxin-hin;
Cfactorwain(Ninwall)=-hin*Tin(t);

Cfactorlwain(1:Ninwall,1)=Cfactorwain;
Tnwain=inv(Tfactorwain)*Cfactorlwain;
Tnwain(1:Ninwall,t)=Tnwain;      %katagrafh thermokrasiwn
stous N kombous th xronikh stigmh t

j=0; % Me bash tis times T(1:N) pou ypologisthkan pio panw gia t=t0
(wra 00:00:06) ginontai mia fora oi ypologismoi gia t=2...toliko. Sto
telos ths diadikasias dinoume sthn t=t0 tis thermokrasies gia t=toliko
(wra 24:00:00) pou einai pio realistikes apo tis arxikes kai

```

epanalambanetai ksana h diadikasia. Auto ginetai 4 fores gia megalyterh akribeia. Apothhkeuontai oi times pou pairnoume th teleutaia fora.

```

while (j<5)

    timeveg=0;

    t=1;

    escan(t)=610.78*exp((Tcan(t)-273)/(Tcan(t)-273+238.3)*17.2694);
% tash koresmenou atmou sthn epifaneia fyllwmatos (Pa)
    esac(t)=610.78*exp((Tac(t)-273)/(Tac(t)-273+238.3)*17.2694);
% tash koresmenou atmou aera entos tholou (Pa)
    eac(t)=SH(t)*pair/(0.62198+SH(t));
    RHac(t)=eac(t)/esac(t);

% Thermoroos (W/m2) k fortia (W)

% orofh
qiveg(t)=hroofin*(Troof(Nveg,t)-Tin(t));
Qveg(t)=qiveg(t)*mhkos*platos;

% toixos North
qiwano(t)=hin*(Twano(Nwall,t)-Tin(t));
Qwano(t)=qiwano(t)*(platos*ypsos-anoigno);

% toixos South
qiwaso(t)=hin*(Twaso(Nwall,t)-Tin(t));
Qwaso(t)=qiwaso(t)*(platos*ypsos-anoigso);

% toixos West
qiwawe(t)=hin*(Twawe(Nwall,t)-Tin(t));
Qwawe(t)=qiwawe(t)*(mhkos*ypsos-anoigwe);

% toixos East
qiwaea(t)=hin*(Twaea(Nwall,t)-Tin(t));
Qwaea(t)=qiwaea(t)*(mhkos*ypsos-anoigea);

% toixos eswt.
qiwain(t)=hin*(Twain(Ninwall,t)-Tin(t));
Qwain(t)=qiwain(t)*Lengthinwall*ypsos;

% yalopinakes North
qiglno(t)=SC*SHGFno(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglno(t)=qiglno(t)*anoigno;

% yalopinakes South
qiglso(t)=SC*SHGFso(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglso(t)=qiglso(t)*anoigso;

% yalopinakes West
qiglwe(t)=SC*SHGFwe(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglwe(t)=qiglwe(t)*anoigwe;

% yalopinakes East
qiglea(t)=SC*SHGFea(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglea(t)=qiglea(t)*anoigea;

```

```

% ananewsh aera
Paroxhair(t)=ACH*platos*mhkos*ypsos*1000/3600;
Qanan(t)=Paroxhair(t)*1.23*(Tout(t)-Tin(t));

Qtot(t)=Qveg(t)+Qwano(t)+Qwaso(t)+Qwawe(t)+Qwaea(t)+2*Qwain(t)+1*(Qglno(t)
+Qglso(t)+Qglwe(t)+Qglea(t))+Qanan(t); % Oliko fortio
Tin(t+1)=dt*Qtot(t)/Ctot+Tin(t); % Diamorfwsh neas eswterikhs
thermokrasias gia epomeno xroniko vhma

for t=2:(24*60/dtlepta) % ana dt apo 00:00:06 mexri 24:00:00

%% Ypologismoi Tholou

esout(t)=610.78*exp((Tout(t-1)-273)/(Tout(t-1)-273+238.3)*17.2694);
% tash koresmenou atmou atmosfairikou aera (Pa)
escan(t)=610.78*exp((Tcan(t-1)-273)/(Tcan(t-1)-273+238.3)*17.2694);
% tash koresmenou atmou sthn epifaneia fyllwmatos (Pa)
esac(t)=610.78*exp((Tac(t-1)-273)/(Tac(t-1)-273+238.3)*17.2694);
% tash koresmenou atmou aera entos tholou (Pa)
eac(t)=SH(t-1)*pair/(0.62198+SH(t-1));
esgr(t)=610.78*exp((Troof(1,t-1)-273)/(Troof(1,t-1)-
273+238.3)*17.2694); % tash koresmenou atmou sthn epifaneia xwmatos
(Pa)
RHac(t)=eac(t)/esac(t);

a=1173; %
b=273; %
m=0.5; % statheres
n=0.25; %
l=0.15; % xarakthristiko mhkos fyllou (m)
re(t)=a*(l^m)/((l*abs(Tcan(t-1)-Tac(t-1))+b*(ucan(t)^2))^n); %
ekswterikh antistash fyllwmatos (s/m)

Tsky(t)=0.0554*(Tout(t)^1.5); % thermokrasia ouranou (K)

l(t)=(2.501-(Tcan(t-1)-273)*0.002361)*(10^6); % lanthanousa thermohtta
eksatmishs (J/Kg)
gamma(t)=cair*pair/0.622/l(t); % psychrometrikh stathera (Pa/°K)

C1=4.3; %
C2=0.54; %
C3=2.3*(10^-2); % syntelestes gia kalliergeia ntomatas
C4=6.1*(10^-7); %
C5=4.3*(10^-7); %
CO2=205; % sygkentrwsh CO2
riI(t)=(Iout(t)/2/LAI+C1)/(Iout(t)/2/LAI+C2); % paragontas
eksarthshs eswterikhs antistashs fyllwmatos apo aktinobolia
riTcan(t)=1+C3*((Tcan(t-1)-24.5-273)^2); % paragontas
eksarthshs eswterikhs antistashs fyllwmatos apo thermokrasia fyllwmatos
riCO2(t)=1+C4*((CO2-200)^2); % paragontas
eksarthshs eswterikhs antistashs fyllwmatos apo sygkentrwsh CO2
ripacpac(t)=1+C5*((escan(t)-eac(t))^2); % paragontas
eksarthshs eswterikhs antistashs fyllwmatos apo diafora pieshs atmou
rmin=80; % elaxisth
eswterikhs antistashs fyllwmatos (s/m)
ritom(t)=rmin*riI(t)*riTcan(t)*riCO2(t)*ripacpac(t); % eswterikh

```

```

antistashs fyllwmatos gia ntomata
    fe=0.5; % syntelesths
    ri(t)=fe*ritom(t); % eswterikh
antistash fyllwmatos (s/m)

% ypologismos thermokrasias fyllwmatos (K)
Tcan(t)=Tcan(t-1)+dt/rocan/ccan/dcan/LAI*((1-tafs-(1-
tafs)*albedocan)*(1+tafs*albedosoil)*Iout(t-1)+(1-
tafl)*sigma*(Tsky(t)^4+Troof(1,t-1)^4-2*(Tcan(t-1)^4))-
2*LAI*roair*cair/re(t)*(Tcan(t-1)-Tac(t-1))-
2*LAI*roair*cair/(gamma(t)*(re(t)+ri(t)))*(escan(t)-eac(t)));

% ypologismos thermokrasias aera entos tholou (K)
Tac(t)=Tac(t-1)+dt/roair/cair/L*(2*LAI*roair*cair/re(t)*(Tcan(t-1)-
Tac(t-1))+hveg*(Troof(1,t-1)-Tac(t-1))+haout*(Tout(t-1)-Tac(t-1)));

% ypologismos ygrasias aera entos tholou (kg/kg)
SH(t)=SH(t-
1)+dt/roair/cair/L*(2*LAI*roair*cair/gamma(t)/l(t)/(re(t)+ri(t))*(escan(t)
-eac(t))+hveg/l(t)/gamma(t)*(RHgr*esgr(t)-eac(t))-
haout/l(t)/gamma(t)*(eac(t)-RHout(t)*esout(t)));

% ypologismos isodynamhs thermokrasias (K)
Tegroofv(t)=Tac(t)+tafs*(1-albedosoil)*Iout(t)/hveg-
sigmaf*eg*ef*sigma/el*(Troof(1,t-1)^4-Tcan(t)^4)/hveg;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

i=1; %prwtos kombos

%orofh
kveg(1)=kypf;
cveg(i)=cypf;
roveg(i)=roypf;
A2veg=kveg(i+1)/dzveg;
Aloveg=roveg(i)*cveg(i)*dzveg/(dt*2);
Alveg=f*hveg+f*A2veg+Aloveg;
Tfactorveg(1,1)=-Alveg;
Tfactorveg(1,2)=A2veg*f;
Cfactorveg(1)=-hveg*(f*Tegroofv(t)+(1-f)*Tegroofv(t-1))-A2veg*(1-
f)*Troof(i+1,t-1)-Troof(i,t-1)*(Aloveg-(1-f)*A2veg-(1-f)*hveg);

%toixos North
kwall(1)=ksov;
cwall(i)=csov;
rowall(i)=rosov;
A2wano=kwall(i+1)/dx;
Alowano=rowall(i)*cwall(i)*dx/(dt*2);
Alwano=f*hout+f*A2wano+Alowano;
Tfactorwano(1,1)=-Alwano;
Tfactorwano(1,2)=A2wano*f;
Cfactorwano(1)=-hout*(f*Teqno(t)+(1-f)*Teqno(t-1))-A2wano*(1-
f)*Twano(i+1,t-1)-Twano(i,t-1)*(Alowano-(1-f)*A2wano-(1-f)*hout);

%toixos South
A2waso=kwall(i+1)/dx;
Alowaso=rowall(i)*cwall(i)*dx/(dt*2);

```

```

A1waso=f*hout+f*A2waso+Alowaso;
Tfactorwaso(1,1)=-A1waso;
Tfactorwaso(1,2)=A2waso*f;
Cfactorwaso(1)=-hout*(f*Teqso(t)+(1-f)*Teqso(t-1))-A2waso*(1-
f)*Twaso(i+1,t-1)-Twaso(i,t-1)*(Alowaso-(1-f)*A2waso-(1-f)*hout);

%toixos West
A2wawe=kwall(i+1)/dx;
Alowawe=rowall(i)*cwall(i)*dx/(dt*2);
A1wawe=f*hout+f*A2wawe+Alowawe;
Tfactorwawe(1,1)=-A1wawe;
Tfactorwawe(1,2)=A2wawe*f;
Cfactorwawe(1)=-hout*(f*Teqwe(t)+(1-f)*Teqwe(t-1))-A2wawe*(1-
f)*Twawe(i+1,t-1)-Twawe(i,t-1)*(Alowawe-(1-f)*A2wawe-(1-f)*hout);

%toixos East
A2waea=kwall(i+1)/dx;
Alowaea=rowall(i)*cwall(i)*dx/(dt*2);
A1waea=f*hout+f*A2waea+Alowaea;
Tfactorwaea(1,1)=-A1waea;
Tfactorwaea(1,2)=A2waea*f;
Cfactorwaea(1)=-hout*(f*Teqea(t)+(1-f)*Teqea(t-1))-A2waea*(1-
f)*Twaea(i+1,t-1)-Twaea(i,t-1)*(Alowaea-(1-f)*A2waea-(1-f)*hout);

%toixos eswt.
A2wain=kinwall(i+1)/dxin;
Alowain=roinwall(i)*cinwall(i)*dxin/(dt*2);
A1wain=f*hin+f*A2wain+Alowain;
Tfactorwain(1,1)=-A1wain;
Tfactorwain(1,2)=A2wain*f;
Cfactorwain(1)=-hin*(f*Tin(t)+(1-f)*Tin(t-1))-A2wain*(1-
f)*Twain(i+1,t-1)-Twain(i,t-1)*(Alowain-(1-f)*A2wain-(1-f)*hin);

for i=2:(Nveg-1) %orofh

Lveg(i)=Lveg(i-1)+dzveg;

if (Lveg(i)<=Lypf) kveg(i)=kypf;
                cveg(i)=cypf;
                roveg(i)=roypf;
elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil) kveg(i)=ksfil;
                cveg(i)=csfil;
                roveg(i)=rosfil;
elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelafp) kveg(i)=kelafp;
                cveg(i)=celafp;
                roveg(i)=roelafp;
elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelafp+Lasfap) kveg(i)=kasfap;
                cveg(i)=casfap;
                roveg(i)=roasfap;
elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelafp+Lasfap+Lasfaf) kveg(i)=kasfaf;
                cveg(i)=casfaf;

roveg(i)=roasfaf;
elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelafp+Lasfap+Lasfaf+Lelafb)
kveg(i)=kelafb;
cveg(i)=celafb;

```

```

roveg(i)=roelaafb;
    elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelaftp+Lasfap+Lasfaf+Lelaafb+Lmon)
kveg(i)=kmon;

cveg(i)=cmon;

roveg(i)=romon;
    elseif (Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelaftp+Lasfap+Lasfaf+Lelaafb+Lmon+Lbet)
kveg(i)=kbet;

cveg(i)=cbet;

roveg(i)=robet;
    elseif
(Lveg(i)<=Lypf+Lsfil+Lelaftp+Lasfap+Lasfaf+Lelaafb+Lmon+Lbet+Lrsov)
kveg(i)=ksov;

cveg(i)=csov;

roveg(i)=rosov;
    end

    A1veg=kveg(i-1)/dzveg;
    A3veg=kveg(i+1)/dzveg;
    A2oveg=roveg(i)*cveg(i)*dzveg/dt;
    A2veg=f*A1veg+f*A3veg+A2oveg;
    Tfactorveg(i,i-1)=A1veg*f;
    Tfactorveg(i,i)=-A2veg;
    Tfactorveg(i,i+1)=A3veg*f;
    Cfactorveg(i)=-A1veg*(1-f)*Troof(i-1,t-1)-A3veg*(1-f)*Troof(i+1,t-
1)-Troof(i,t-1)*(A2oveg-(1-f)*A1veg-(1-f)*A3veg);

    end

    for i=2:(Nwall-1)      %toixoi

Lwall(i)=Lwall(i-1)+dx;

        if (Lwall(i)<=Lwsov) kwall(i)=ksov;
                                cwall(i)=csov;
                                rowall(i)=rosov;
        elseif (Lwall(i)<=Lwsov+Ltouv) kwall(i)=ktouv;
                                cwall(i)=ctouv;
                                rowall(i)=rotouv;
        elseif (Lwall(i)<=Lwsov*2+Ltouv) kwall(i)=ksov;
                                cwall(i)=csov;
                                rowall(i)=rosov;

        end

    %toixos North
    A1wano=kwall(i-1)/dx;
    A3wano=kwall(i+1)/dx;
    A2owano=rowall(i)*cwall(i)*dx/dt;
    A2wano=f*A1wano+f*A3wano+A2owano;
    Tfactorwano(i,i-1)=A1wano*f;
    Tfactorwano(i,i)=-A2wano;
    Tfactorwano(i,i+1)=+A3wano*f;
    Cfactorwano(i)=-A1wano*(1-f)*Twano(i-1,t-1)-A3wano*(1-

```

```

f) *Twano (i+1,t-1) -Twano (i,t-1) * (A2owano- (1-f) *Alwano- (1-f) *A3wano) ;

%toixos South
Alwaso=kwall (i-1) /dx;
A3waso=kwall (i+1) /dx;
A2owaso=rowall (i) *cwall (i) *dx/dt;
A2waso=f*Alwaso+f*A3waso+A2owaso;
Tfactorwaso (i,i-1)=Alwaso*f;
Tfactorwaso (i,i)=-A2waso;
Tfactorwaso (i,i+1)=+A3waso*f;
Cfactorwaso (i)=-Alwaso* (1-f) *Twaso (i-1,t-1) -A3waso* (1-
f) *Twaso (i+1,t-1) -Twaso (i,t-1) * (A2owaso- (1-f) *Alwaso- (1-f) *A3waso) ;

%toixos West
Alwawe=kwall (i-1) /dx;
A3wawe=kwall (i+1) /dx;
A2owawe=rowall (i) *cwall (i) *dx/dt;
A2wawe=f*Alwawe+f*A3wawe+A2owawe;
Tfactorwawe (i,i-1)=Alwawe*f;
Tfactorwawe (i,i)=-A2wawe;
Tfactorwawe (i,i+1)=+A3wawe*f;
Cfactorwawe (i)=-Alwawe* (1-f) *Twawe (i-1,t-1) -A3wawe* (1-
f) *Twawe (i+1,t-1) -Twawe (i,t-1) * (A2owawe- (1-f) *Alwawe- (1-f) *A3wawe) ;

%toixos East
Alwaea=kwall (i-1) /dx;
A3waea=kwall (i+1) /dx;
A2owaea=rowall (i) *cwall (i) *dx/dt;
A2waea=f*Alwaea+f*A3waea+A2owaea;
Tfactorwaea (i,i-1)=Alwaea*f;
Tfactorwaea (i,i)=-A2waea;
Tfactorwaea (i,i+1)=+A3waea*f;
Cfactorwaea (i)=-Alwaea* (1-f) *Twaea (i-1,t-1) -A3waea* (1-
f) *Twaea (i+1,t-1) -Twaea (i,t-1) * (A2owaea- (1-f) *Alwaea- (1-f) *A3waea) ;

end

for i=2:(Ninwall-1) % eswt. toixos

Linwall (i)=Linwall (i-1)+dxin;

if (Linwall (i)<=Lwsov) kinwall (i)=ksov;
                    cinwall (i)=csov;
                    roinwall (i)=rosov;
elseif (Linwall (i)<=Lwsov+Lintouv) kinwall (i)=ktouv;
                    cinwall (i)=ctouv;
                    roinwall (i)=rotouv;
elseif (Linwall (i)<=Lwsov*2+Lintouv) kinwall (i)=ksov;
                    cinwall (i)=csov;
                    roinwall (i)=rosov;

end

Alwain=kinwall (i-1) /dxin;
A3wain=kinwall (i+1) /dxin;
A2owain=roinwall (i) *cinwall (i) *dxin/dt;
A2wain=f*Alwain+f*A3wain+A2owain;
Tfactorwain (i,i-1)=Alwain*f;
Tfactorwain (i,i)=-A2wain;

```

```

Tfactorwain(i,i+1)=+A3wain*f;
Cfactorwain(i)=-A1wain*(1-f)*Twain(i-1,t-1)-A3wain*(1-
f)*Twain(i+1,t-1)-Twain(i,t-1)*(A2owain-(1-f)*A1wain-(1-f)*A3wain);

end

%i=N

%orofh
i=Nveg;
A2veg=kveg(i-1)/dzveg;
A3oveg=roveg(i-1)*cveg(i-1)*dzveg/dt/2;
A3veg=f*hroofin+f*A2veg+A3oveg;
Tfactorveg(i,i-1)=f*A2veg;
Tfactorveg(i,i)=-A3veg;
Cfactorveg(i)=-hroofin*(f*Tin(t)+(1-f)*Tin(t-1))-A2veg*(1-
f)*Troof(i-1,t-1)-Troof(i,t-1)*(A3oveg-(1-f)*A2veg-(1-f)*hroofin);
Cfactor1veg(1:Nveg,1)=Cfactorveg;
Tnroof=inv(Tfactorveg)*Cfactor1veg;
Troof(1:Nveg,t)=Tnroof;
qiveg(t)=hroofin*(Troof(Nveg,t)-Tin(t));
Qveg(t)=qiveg(t)*mhkos*platos;

%toixos North
i=Nwall;
A2wano=kwall(i-1)/dx;
A3owano=rowall(i-1)*cwall(i-1)*dx/dt/2;
A3wano=f*hin+f*A2wano+A3owano;
Tfactorwano(i,i-1)=f*A2wano;
Tfactorwano(i,i)=-A3wano;
Cfactorwano(i)=-hin*(f*Tin(t)+(1-f)*Tin(t-1))-A2wano*(1-
f)*Twano(i-1,t-1)-Twano(i,t-1)*(A3owano-(1-f)*A2wano-(1-f)*hin);
Cfactor1wano(1:Nwall,1)=Cfactorwano;
Tnwano=inv(Tfactorwano)*Cfactor1wano;
Twano(1:Nwall,t)=Tnwano; %katagrafh
thermokrasiwn stous N kombous th xronikh stigmh t
qiwano(t)=hin*(Twano(Nwall,t)-Tin(t));
Qwano(t)=qiwano(t)*(platos*ypsos-anoigno);

%toixos Sourth
A2waso=kwall(i-1)/dx;
A3owaso=rowall(i-1)*cwall(i-1)*dx/dt/2;
A3waso=f*hin+f*A2waso+A3owaso;
Tfactorwaso(i,i-1)=f*A2waso;
Tfactorwaso(i,i)=-A3waso;
Cfactorwaso(i)=-hin*(f*Tin(t)+(1-f)*Tin(t-1))-A2waso*(1-
f)*Twaso(i-1,t-1)-Twaso(i,t-1)*(A3owaso-(1-f)*A2waso-(1-f)*hin);
Cfactor1waso(1:Nwall,1)=Cfactorwaso;
Tnwaso=inv(Tfactorwaso)*Cfactor1waso;
Twaso(1:Nwall,t)=Tnwaso; %katagrafh
thermokrasiwn stous N kombous th xronikh stigmh t
qiwaso(t)=hin*(Twaso(Nwall,t)-Tin(t));
Qwaso(t)=qiwaso(t)*(platos*ypsos-anoigno);

%toixos West
A2wawe=kwall(i-1)/dx;

```



```

A3owawe=rowall(i-1)*cwall(i-1)*dx/dt/2;
A3wawe=f*hin+f*A2wawe+A3owawe;
Tfactorwawe(i,i-1)=f*A2wawe;
Tfactorwawe(i,i)=-A3wawe;
Cfactorwawe(i)=-hin*(f*Tin(t)+(1-f)*Tin(t-1))-A2wawe*(1-
f)*Twawe(i-1,t-1)-Twawe(i,t-1)*(A3owawe-(1-f)*A2wawe-(1-f)*hin);
Cfactorlwawe(1:Nwall,1)=Cfactorwawe;
Tnwawe=inv(Tfactorwawe)*Cfactorlwawe;
Twawe(1:Nwall,t)=Tnwawe; %katagrafh
thermokrasiwn stous N kombous th xronikh stigmh t
qiwawe(t)=hin*(Twawe(Nwall,t)-Tin(t));
Qwawe(t)=qiwawe(t)*(platos*ypsos-anoigno);

%toixos East
A2waea=kwall(i-1)/dx;
A3owaea=rowall(i-1)*cwall(i-1)*dx/dt/2;
A3waea=f*hin+f*A2waea+A3owaea;
Tfactorwaea(i,i-1)=f*A2waea;
Tfactorwaea(i,i)=-A3waea;
Cfactorwaea(i)=-hin*(f*Tin(t)+(1-f)*Tin(t-1))-A2waea*(1-
f)*Twaea(i-1,t-1)-Twaea(i,t-1)*(A3owaea-(1-f)*A2waea-(1-f)*hin);
Cfactorlwaea(1:Nwall,1)=Cfactorwaea;
Tnwaea=inv(Tfactorwaea)*Cfactorlwaea;
Twaea(1:Nwall,t)=Tnwaea; %katagrafh
thermokrasiwn stous N kombous th xronikh stigmh t
qiwaea(t)=hin*(Twaea(Nwall,t)-Tin(t));
Qwaea(t)=qiwano(t)*(platos*ypsos-anoigno);

%toixos eswt.
i=Ninwall;
A2wain=kinwall(i-1)/dxin;
A3owain=roinwall(i-1)*cinwall(i-1)*dxin/dt/2;
A3wain=f*hin+f*A2wain+A3owain;
Tfactorwain(i,i-1)=f*A2wain;
Tfactorwain(i,i)=-A3wain;
Cfactorwain(i)=-hin*(f*Tin(t)+(1-f)*Tin(t-1))-A2wain*(1-
f)*Twain(i-1,t-1)-Twain(i,t-1)*(A3owain-(1-f)*A2wain-(1-f)*hin);
Cfactorlwain(1:Ninwall,1)=Cfactorwain;
Tnwain=inv(Tfactorwain)*Cfactorlwain;
Twain(1:Ninwall,t)=Tnwain; %katagrafh
thermokrasiwn stous N kombous th xronikh stigmh t
qiwain(t)=hin*(Twain(Ninwall,t)-Tin(t));
Qwain(t)=qiwain(t)*Lengthinwall*ypsos;

%yalopinakes North
qiglno(t)=SC*SHGFno(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglno(t)=qiglno(t)*anoigno;

%yalopinakes South
qiglso(t)=SC*SHGFso(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglso(t)=qiglso(t)*anoigso;

%yalopinakes West
qiglwe(t)=SC*SHGFwe(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglwe(t)=qiglwe(t)*anoigwe;

%yalopinakes East

```

```

qiglea(t)=SC*SHGFea(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglea(t)=qiglea(t)*anoigea;

% ananewsh aera
Paroxhair(t)=ACH*platos*mhkos*yposos*1000/3600;
Qanan(t)=Paroxhair(t)*1.23*(Tout(t)-Tin(t));

if (t<(24*60/dtlepta)) % an t<toliko ypologizetai

Qtot(t)=Qveg(t)+1*(Qglno(t)+Qglso(t)+Qglwe(t)+Qglea(t))+Qwano(t)+Qwaso(t)+
Qwawe(t)+Qwaea(t)+2*Qwain(t)+Qanan(t); % to synoliko fortio k meta

if Tin(t-1)>299.5
    Qtotalveg=Qtot(t)+Qac;
    timeveg=timeveg+dt;
else Qtotalveg=Qtot(t);
end

Tin(t+1)=dt*(Qtotalveg)/Ctot+Tin(t);

elseif (j<4)
% an t=toliko ypologizetai

Qtot(t)=Qveg(t)+1*(Qglno(t)+Qglso(t)+Qglwe(t)+Qglea(t))+Qwano(t)+Qwaso(t)+
Qwawe(t)+Qwaea(t)+2*Qwain(t)+Qanan(t); % to synoliko fortio enw h
    Tin(1)=Tin(24*60/dtlepta);
% es. thermok. einai ish pros Tin(toliko-Dt

else
Qtot(t)=Qveg(t)+1*(Qglno(t)+Qglso(t)+Qglwe(t)+Qglea(t))+Qwano(t)+Qwaso(t)+
Qwawe(t)+Qwaea(t)+2*Qwain(t)+Qanan(t);
end

end

if (j<4) %
Tcan(1)=Tcan(24*60/dtlepta); %
Tac(1)=Tac(24*60/dtlepta); %
SH(1)=SH(24*60/dtlepta); %
Troof(1:Nveg,1)=Troof(1:Nveg,24*60/dtlepta); %
Twano(1:Nwall,1)=Twano(1:Nwall,24*60/dtlepta); %
Twaso(1:Nwall,1)=Twaso(1:Nwall,24*60/dtlepta); %
Twawe(1:Nwall,1)=Twawe(1:Nwall,24*60/dtlepta); % dinume
stous komvous gia t=t0 tis thermokrasies
    Twaea(1:Nwall,1)=Twaea(1:Nwall,24*60/dtlepta); % gia
t=toliko wste na epanekkinisei h diadikasia
    Twain(1:Ninwall,1)=Twain(1:Ninwall,24*60/dtlepta); % me pio
realistikes arxikes times, ektos k an exei

else Troof(1:Nveg,1)=Troof(1:Nveg,1); % ginei o
telefteos gyros ypologismwn opote den
    Twano(1:Nwall,1)=Twano(1:Nwall,1); % ginetai h
antikatastash ayth
    Twaso(1:Nwall,1)=Twaso(1:Nwall,1); %
    Twawe(1:Nwall,1)=Twawe(1:Nwall,1); %
    Twaea(1:Nwall,1)=Twaea(1:Nwall,1); %

```

```

Twain(1:Ninwall,1)=Twain(1:Ninwall,1); %

end

j=j+1;

end

Qtotveg=0;
Qtotwano=0;
Qtotwaso=0;
Qtotwawe=0;
Qtotwaea=0;
Qtotglno=0;
Qtotglso=0;
Qtotglwe=0;
Qtotglea=0;

for t=1:(24*60/dtlepta)

    Qtotveg=Qtotveg+Qveg(t);

    Qtotwano=Qtotwano+Qwano(t);
    Qtotwaso=Qtotwaso+Qwaso(t);
    Qtotwawe=Qtotwawe+Qwawe(t);
    Qtotwaea=Qtotwaea+Qwaea(t);

    % ypologismos synolikwn fortiwn
24wrou
    Qtotglno=Qtotglno+Qglno(t);
    Qtotglso=Qtotglso+Qglso(t);
    Qtotglwe=Qtotglwe+Qglwe(t);
    Qtotglea=Qtotglea+Qglea(t);

Qtotv(t)=Qveg(t)+Qwano(t)+Qwaso(t)+Qwawe(t)+Qwaea(t)+Qglno(t)+Qglso(t)+Qglwe(t)+Qglea(t);

    Tlvegdom(t)=Troof(161,t)-273;
    Tlveg(t)=Troof(1,t)-273; % thermokrasia epifaneia orofhs
(beton)
    Tlvegplus(t)=Troof(6,t)-273;
    Tin_veg(t)=Tin(t)-273; % anagwgh eswt thermokr. se
Celcium
    TNveg(t)=Troof(Nveg,t)-273; % anagwgh thermokr. komvous
orofhs se Celcium
    qiveg(t)=hroofin*(Troof(Nveg,t)-Tin(t)); % thermoroh apo orofh pros
eswt ktiriou

    save acQtotv.dat -ASCII Qtotv

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% SYMΒΑΤΙΚΟ DWMA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

t=1; % xronikh stigmh t=0 ---> wra 00:00:06

Tin(t)=302;

%i=1 prwtos kombos

%orofh
kroof(1)=kasfaf;
Lroof(1)=0;
Tfactorroof(1,1)=hroof+kroof(1)/dzcommon;
Tfactorroof(1,2)=-kroof(1)/dzcommon;
Cfactorroof(1)=hroof*Teqroof(t);

%toixos North
kwall(1)=ksov;
Lwall(1)=0;
Tfactorwano(1,1)=hout+kwall(1)/dx;
Tfactorwano(1,2)=-kwall(1)/dx;
Cfactorwano(1)=hout*Teqno(t);

%toixos South
Tfactorwaso(1,1)=hout+kwall(1)/dx;
Tfactorwaso(1,2)=-kwall(1)/dx;
Cfactorwaso(1)=hout*Teqso(t);

%toixos West
Tfactorwawe(1,1)=hout+kwall(1)/dx;
Tfactorwawe(1,2)=-kwall(1)/dx;
Cfactorwawe(1)=hout*Teqwe(t);

%toixos East
Tfactorwaea(1,1)=hout+kwall(1)/dx;
Tfactorwaea(1,2)=-kwall(1)/dx;
Cfactorwaea(1)=hout*Teqea(t);

%toixos indoor
kinwall(1)=ksov;
Linwall(1)=0;
Tfactorwain(1,1)=hin+kinwall(1)/dxin;
Tfactorwain(1,2)=-kinwall(1)/dxin;
Cfactorwain(1)=hin*Tin(t);

for i=2:(Nroof-1)           %orofh

    Lroof(i)=Lroof(i-1)+dzcommon;

    if (Lroof(i)<=Lasfaf) kroof(i)=kasfaf;
                        croof(i)=casfaf;
                        rorooof(i)=roasfaf;
    elseif (Lroof(i)<=Lasfaf+Lelafb) kroof(i)=kelafb;
                                    croof(i)=celafb;
                                    rorooof(i)=roelafb;
    elseif (Lroof(i)<=Lasfaf+Lelafb+Lmon) kroof(i)=kmon;
                                           croof(i)=cmon;

```

```

                                roroof(i)=romon;
elseif (Lroof(i)<=Lasfaf+Lelafb+Lmon+Lbet) kroof(i)=kbet;
                                croof(i)=cbet;
                                roroof(i)=robet;
elseif (Lroof(i)<=Lasfaf+Lelafb+Lmon+Lbet+Lrsov) kroof(i)=ksov;
                                croof(i)=csov;
                                roroof(i)=rosov;

end

Tfactorroof(i,i-1)=kroof(i-1)/dzcommon;
Tfactorroof(i,i)=-kroof(i-1)/dzcommon-kroof(i)/dzcommon;
Tfactorroof(i,i+1)=kroof(i)/dzcommon;
Cfactorroof(i)=0;

end

for i=2:(Nwall-1)                %toixoi

Lwall(i)=Lwall(i-1)+dx;

if (Lwall(i)<=Lwsov) kwall(i)=ksov;
                    cwall(i)=csov;
                    rowall(i)=rosov;
elseif (Lwall(i)<=Lwsov+Ltouv) kwall(i)=ktouv;
                    cwall(i)=ctouv;
                    rowall(i)=rotouv;
elseif (Lwall(i)<=Lwsov*2+Ltouv) kwall(i)=ksov;
                    cwall(i)=csov;
                    rowall(i)=rosov;

end

%toixos North
Tfactorwano(i,i-1)=kwall(i-1)/dx;
Tfactorwano(i,i)=-kwall(i-1)/dx-kwall(i)/dx;
Tfactorwano(i,i+1)=kwall(i)/dx;
Cfactorwano(i)=0;

%toixos South
Tfactorwaso(i,i-1)=Tfactorwano(i,i-1);
Tfactorwaso(i,i)=Tfactorwano(i,i);
Tfactorwaso(i,i+1)=Tfactorwano(i,i+1);
Cfactorwaso(i)=Cfactorwano(i);

%toixos West
Tfactorwawe(i,i-1)=Tfactorwano(i,i-1);
Tfactorwawe(i,i)=Tfactorwano(i,i);
Tfactorwawe(i,i+1)=Tfactorwano(i,i+1);
Cfactorwawe(i)=Cfactorwano(i);

%toixos East
Tfactorwaea(i,i-1)=Tfactorwano(i,i-1);
Tfactorwaea(i,i)=Tfactorwano(i,i);
Tfactorwaea(i,i+1)=Tfactorwano(i,i+1);
Cfactorwaea(i)=Cfactorwano(i);

end

for i=2:(Ninwall-1)            % eswt. toixos

```

```

Linwall(i)=Linwall(i-1)+dxin;

if (Linwall(i)<=Lwsov) kinwall(i)=ksov;
                    cinwall(i)=csov;
                    roinwall(i)=rosov;
elseif (Linwall(i)<=Lwsov+Lintouv) kinwall(i)=ktouv;
                    cinwall(i)=ctouv;
                    roinwall(i)=rotouv;
elseif (Linwall(i)<=Lwsov*2+Lintouv) kinwall(i)=ksov;
                    cinwall(i)=csov;
                    roinwall(i)=rosov;

end

Tfactorwain(i,i-1)=kinwall(i-1)/dxin;
Tfactorwain(i,i)=-kinwall(i-1)/dxin-kinwall(i)/dxin;
Tfactorwain(i,i+1)=kinwall(i)/dxin;
Cfactorwain(i)=0;

end

%i=N komvos N

%orofh
kroof(Nroof)=ksov;
Tfactorroof(Nroof,Nroof-1)=kroof(Nroof-1)/dzcommon;
Tfactorroof(Nroof,Nroof)=-kroof(Nroof-1)/dzcommon-hroofin;
Cfactorroof(Nroof)=-hroofin*Tin(t);
Cfactorlroof(1:Nroof,1)=Cfactorroof;
Tnroof=inv(Tfactorroof)*Cfactorlroof;
Troof(1:Nroof,t)=Tnroof; %katagrafh thermokrasiwn
stous N kombous th xronikh stigmh t

%toixos North
kwall(Nwall)=ksov;
Tfactorwano(Nwall,Nwall-1)=kwall(Nwall-1)/dx;
Tfactorwano(Nwall,Nwall)=-kwall(Nwall-1)/dx-hin;
Cfactorwano(Nwall)=-hin*Tin(t);
Cfactorlwano(1:Nwall,1)=Cfactorwano;
Tnwano=inv(Tfactorwano)*Cfactorlwano;
Twno(1:Nwall,t)=Tnwano; %katagrafh thermokrasiwn
stous N kombous th xronikh stigmh t

%toixos Sourth
Tfactorwaso(Nwall,Nwall-1)=kwall(Nwall-1)/dx;
Tfactorwaso(Nwall,Nwall)=-kwall(Nwall-1)/dx-hin;
Cfactorwaso(Nwall)=-hin*Tin(t);
Cfactorlwaso(1:Nwall,1)=Cfactorwaso;
Tnwaso=inv(Tfactorwaso)*Cfactorlwaso;
Twaso(1:Nwall,t)=Tnwaso; %katagrafh thermokrasiwn
stous N kombous th xronikh stigmh t

%toixos West
Tfactorwawe(Nwall,Nwall-1)=kwall(Nwall-1)/dx;
Tfactorwawe(Nwall,Nwall)=-kwall(Nwall-1)/dx-hin;
Cfactorwawe(Nwall)=-hin*Tin(t);
Cfactorlwawe(1:Nwall,1)=Cfactorwawe;
Tnwawe=inv(Tfactorwawe)*Cfactorlwawe;
Tnawe(1:Nwall,t)=Tnwawe; %katagrafh thermokrasiwn

```

```

stous N kombous th xronikh stigmh t

%toixos East
Tfactorwaea (Nwall,Nwall-1)=kwall (Nwall-1)/dx;
Tfactorwaea (Nwall,Nwall)=-kwall (Nwall-1)/dx-hin;
Cfactorwaea (Nwall)=-hin*Tin (t);
Cfactorlwaea (1:Nwall,1)=Cfactorwaea;
Tnwaea=inv (Tfactorwaea)*Cfactorlwaea;
Twaea (1:Nwall,t)=Tnwaea; %katagrafh thermokrasiwn
stous N kombous th xronikh stigmh t

%toixos eswt.
kinwall (Ninwall)=ksov;
Tfactorwain (Ninwall,Ninwall-1)=kinwall (Ninwall-1)/dxin;
Tfactorwain (Ninwall,Ninwall)=-kinwall (Ninwall-1)/dxin-hin;
Cfactorwain (Ninwall)=-hin*Tin (t);
Cfactorlwain (1:Ninwall,1)=Cfactorwain;
Tnwain=inv (Tfactorwain)*Cfactorlwain;
Twain (1:Ninwall,t)=Tnwain; %katagrafh thermokrasiwn
stous N kombous th xronikh stigmh t

j=0; % Me bash tis times T(1:N) pou ypologisthkan pio panw gia t=t0
(wra 00:00:10) ginontai mia fora oi ypologismoi gia t=2...toliko. Sto
telos ths diadikasias dinoume sthn t=t0 tis thermokrasies gia t=toliko
(wra 24:00:00) pou einai pio realistikes apo tis arxikes kai
epanalambanetai ksana h diadikasia. Auto ginetai 4 fores gia megalyterh
akribeia. Apothhkeuontai oi times pou pairnoume th teleutaia fora.

while (j<6)

    timecom=0;

    t=1;

    % orofh
    qiroof (t)=hroofin*(Troof (Nroof,t)-Tin (t));
    Qroof (t)=qiroof (t)*mhkos*platos;

    % toixos North
    qiwano (t)=hin*(Twano (Nwall,t)-Tin (t));
    Qwano (t)=qiwano (t)*(platos*ypsos-anoigno);

    % toixos South
    qiwaso (t)=hin*(Twaso (Nwall,t)-Tin (t));
    Qwaso (t)=qiwaso (t)*(platos*ypsos-anoigso);

    % toixos West
    qiwawe (t)=hin*(Twawe (Nwall,t)-Tin (t));
    Qwawe (t)=qiwawe (t)*(mhkos*ypsos-anoigwe);

    % toixos East
    qiwaea (t)=hin*(Twaea (Nwall,t)-Tin (t));
    Qwaea (t)=qiwaea (t)*(mhkos*ypsos-anoigea);

    % toixos eswt.
    qiwain (t)=hin*(Twain (Ninwall,t)-Tin (t));
    Qwain (t)=qiwain (t)*Lengthinwall*ypsos;

```

```

% yalopinakes North
qiglno(t)=SC*SHGFno(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglno(t)=qiglno(t)*anoigno;

% yalopinakes South
qiglso(t)=SC*SHGFso(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglso(t)=qiglso(t)*anoigso;

% yalopinakes West
qiglwe(t)=SC*SHGFwe(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglwe(t)=qiglwe(t)*anoigwe;

% yalopinakes East
qiglea(t)=SC*SHGFea(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglea(t)=qiglea(t)*anoigea;

% ananewsh aera
Paroxhair(t)=ACH*platos*mhkos*ypsos*1000/3600;
Qanan(t)=Paroxhair(t)*1.23*(Tout(t)-Tin(t));

Qtot(t)=Qroof(t)+Qwano(t)+Qwaso(t)+Qwawe(t)+Qwaea(t)+2*Qwain(t)+1*(Qglno(t)
)+Qglso(t)+Qglwe(t)+Qglea(t))+1*Qanan(t);
Tin(t+1)=dt*Qtot(t)/Ctot+Tin(t);

for t=2:(24*60/dtlepta) % ana 5lepto apo 00:05 mexri 24:00

i=1; %prwtos kombos

%orofh
kroof(i)=kasfaf;
croof(i)=casfaf;
roroof(i)=roasfaf;
A2roof=kroof(i+1)/dzcommon;
A1roof=roroof(i)*croof(i)*dzcommon/(dt*2);
A1roof=f*hroof+f*A2roof+A1roof;
Tfactorroof(i,i)=-A1roof;
Tfactorroof(i,i+1)=A2roof*f;
Cfactorroof(i)=-hroof*(f*Teqroof(t)+(1-f)*Teqroof(t-1))-A2roof*(1-
f)*Troof(i+1,t-1)-Troof(i,t-1)*(A1roof-(1-f)*A2roof-(1-f)*hroof);

%toixos North
kwall(1)=ksov;
cwall(i)=csov;
rowall(i)=rosov;
A2wano=kwall(i+1)/dx;
A1wano=rowall(i)*cwall(i)*dx/(dt*2);
A1wano=f*hout+f*A2wano+A1wano;
Tfactorwano(1,1)=-A1wano;
Tfactorwano(1,2)=A2wano*f;
Cfactorwano(1)=-hout*(f*Teqno(t)+(1-f)*Teqno(t-1))-A2wano*(1-
f)*Twano(i+1,t-1)-Twano(i,t-1)*(A1wano-(1-f)*A2wano-(1-f)*hout);

%toixos South
A2waso=kwall(i+1)/dx;
A1waso=rowall(i)*cwall(i)*dx/(dt*2);

```



```

A1waso=f*hout+f*A2waso+A1owaso;
Tfactorwaso(1,1)=-A1waso;
Tfactorwaso(1,2)=A2waso*f;
Cfactorwaso(1)=-hout*(f*Teqso(t)+(1-f)*Teqso(t-1))-A2waso*(1-
f)*Twaso(i+1,t-1)-Twaso(i,t-1)*(A1owaso-(1-f)*A2waso-(1-f)*hout);

%toixos West
A2wawe=kwall(i+1)/dx;
A1owawe=rowall(i)*cwall(i)*dx/(dt*2);
A1wawe=f*hout+f*A2wawe+A1owawe;
Tfactorwawe(1,1)=-A1wawe;
Tfactorwawe(1,2)=A2wawe*f;
Cfactorwawe(1)=-hout*(f*Teqwe(t)+(1-f)*Teqwe(t-1))-A2wawe*(1-
f)*Twawe(i+1,t-1)-Twawe(i,t-1)*(A1owawe-(1-f)*A2wawe-(1-f)*hout);

%toixos East
A2waea=kwall(i+1)/dx;
A1owaea=rowall(i)*cwall(i)*dx/(dt*2);
A1waea=f*hout+f*A2waea+A1owaea;
Tfactorwaea(1,1)=-A1waea;
Tfactorwaea(1,2)=A2waea*f;
Cfactorwaea(1)=-hout*(f*Teqea(t)+(1-f)*Teqea(t-1))-A2waea*(1-
f)*Twaea(i+1,t-1)-Twaea(i,t-1)*(A1owaea-(1-f)*A2waea-(1-f)*hout);

%toixos eswt.
A2wain=kinwall(i+1)/dxin;
A1owain=roinwall(i)*cinwall(i)*dxin/(dt*2);
A1wain=f*hin+f*A2wain+A1owain;
Tfactorwain(1,1)=-A1wain;
Tfactorwain(1,2)=A2wain*f;
Cfactorwain(1)=-hin*(f*Tin(t)+(1-f)*Tin(t-1))-A2wain*(1-
f)*Twain(i+1,t-1)-Twain(i,t-1)*(A1owain-(1-f)*A2wain-(1-f)*hin);

for i=2:(Nroof-1) %orofh

Lroof(i)=Lroof(i-1)+dzcommon;

if (Lroof(i)<=Lasfaf) kroof(i)=kasfaf;
                    croof(i)=casfaf;
                    rorooof(i)=roasfaf;
elseif (Lroof(i)<=Lasfaf+Lelafb) kroof(i)=kelafb;
                    croof(i)=celafb;
                    rorooof(i)=roelafb;
elseif (Lroof(i)<=Lasfaf+Lelafb+Lmon) kroof(i)=kmon;
                    croof(i)=cmon;
                    rorooof(i)=romon;
elseif (Lroof(i)<=Lasfaf+Lelafb+Lmon+Lbet) kroof(i)=kbet;
                    croof(i)=cbet;
                    rorooof(i)=robet;
elseif (Lroof(i)<=Lasfaf+Lelafb+Lmon+Lbet+Lrsov) kroof(i)=ksov;
                    croof(i)=csov;
                    rorooof(i)=rosov;

end

A1roof=kroof(i-1)/dzcommon;
A3roof=kroof(i+1)/dzcommon;
A2orooof=rorooof(i)*croof(i)*dzcommon/dt;
A2roof=f*A1roof+f*A3roof+A2orooof;
Tfactorrooof(i,i-1)=A1roof*f;

```

```

Tfactorroof(i,i)=-A2roof;
Tfactorroof(i,i+1)=A3roof*f;
Cfactorroof(i)=-A1roof*(1-f)*Troof(i-1,t-1)-A3roof*(1-
f)*Troof(i+1,t-1)-Troof(i,t-1)*(A2orooof-(1-f)*A1roof-(1-f)*A3roof);

end

for i=2:(Nwall-1)      %toixoi

Lwall(i)=Lwall(i-1)+dx;

    if (Lwall(i)<=Lwsov) kwall(i)=ksov;
                        cwall(i)=csov;
                        rowall(i)=rosov;
    elseif (Lwall(i)<=Lwsov+Ltoutv) kwall(i)=ktouv;
                                    cwall(i)=ctouv;
                                    rowall(i)=rotouv;
    elseif (Lwall(i)<=Lwsov*2+Ltoutv) kwall(i)=ksov;
                                    cwall(i)=csov;
                                    rowall(i)=rosov;

end

%toixos North
Alwano=kwall(i-1)/dx;
A3wano=kwall(i+1)/dx;
A2owano=rowall(i)*cwall(i)*dx/dt;
A2wano=f*Alwano+f*A3wano+A2owano;
Tfactorwano(i,i-1)=Alwano*f;
Tfactorwano(i,i)=-A2wano;
Tfactorwano(i,i+1)=+A3wano*f;
Cfactorwano(i)=-A1wano*(1-f)*Twano(i-1,t-1)-A3wano*(1-
f)*Twano(i+1,t-1)-Twano(i,t-1)*(A2owano-(1-f)*Alwano-(1-f)*A3wano);

%toixos South
Alwaso=kwall(i-1)/dx;
A3waso=kwall(i+1)/dx;
A2owaso=rowall(i)*cwall(i)*dx/dt;
A2waso=f*Alwaso+f*A3waso+A2owaso;
Tfactorwaso(i,i-1)=Alwaso*f;
Tfactorwaso(i,i)=-A2waso;
Tfactorwaso(i,i+1)=+A3waso*f;
Cfactorwaso(i)=-A1waso*(1-f)*Twaso(i-1,t-1)-A3waso*(1-
f)*Twaso(i+1,t-1)-Twaso(i,t-1)*(A2owaso-(1-f)*Alwaso-(1-f)*A3waso);

%toixos West
Alwawe=kwall(i-1)/dx;
A3wawe=kwall(i+1)/dx;
A2owawe=rowall(i)*cwall(i)*dx/dt;
A2wawe=f*Alwawe+f*A3wawe+A2owawe;
Tfactorwawe(i,i-1)=Alwawe*f;
Tfactorwawe(i,i)=-A2wawe;
Tfactorwawe(i,i+1)=+A3wawe*f;
Cfactorwawe(i)=-A1wawe*(1-f)*Twawe(i-1,t-1)-A3wawe*(1-
f)*Twawe(i+1,t-1)-Twawe(i,t-1)*(A2owawe-(1-f)*Alwawe-(1-f)*A3wawe);

%toixos East
Alwaea=kwall(i-1)/dx;
A3waea=kwall(i+1)/dx;
A2owaea=rowall(i)*cwall(i)*dx/dt;

```

```

A2waea=f*A1waea+f*A3waea+A2owaea;
Tfactorwaea(i,i-1)=A1waea*f;
Tfactorwaea(i,i)=-A2waea;
Tfactorwaea(i,i+1)=+A3waea*f;
Cfactorwaea(i)=-A1waea*(1-f)*Twaea(i-1,t-1)-A3waea*(1-
f)*Twaea(i+1,t-1)-Twaea(i,t-1)*(A2owaea-(1-f)*A1waea-(1-f)*A3waea);

end

for i=2:(Ninwall-1)           % eswt. toixos

Linwall(i)=Linwall(i-1)+dxin;

if (Linwall(i)<=Lwsov) kinwall(i)=ksov;
                        cinwall(i)=csov;
                        roinwall(i)=rosov;
elseif (Linwall(i)<=Lwsov+Lintouv) kinwall(i)=ktouv;
                                    cinwall(i)=ctouv;
                                    roinwall(i)=rotouv;
elseif (Linwall(i)<=Lwsov*2+Lintouv) kinwall(i)=ksov;
                                    cinwall(i)=csov;
                                    roinwall(i)=rosov;

end

%toixos eswt
A1wain=kinwall(i-1)/dxin;
A3wain=kinwall(i+1)/dxin;
A2owain=roinwall(i)*cinwall(i)*dxin/dt;
A2wain=f*A1wain+f*A3wain+A2owain;
Tfactorwain(i,i-1)=A1wain*f;
Tfactorwain(i,i)=-A2wain;
Tfactorwain(i,i+1)=+A3wain*f;
Cfactorwain(i)=-A1wain*(1-f)*Twain(i-1,t-1)-A3wain*(1-
f)*Twain(i+1,t-1)-Twain(i,t-1)*(A2owain-(1-f)*A1wain-(1-f)*A3wain);

end

%i=N

%orofh
i=Nroof;
A2roof=kroof(i-1)/dzcommon;
A3orooof=rorooof(i-1)*crooof(i-1)*dzcommon/dt/2;
A3roof=f*hrooofin+f*A2roof+A3orooof;
Tfactorrooof(i,i-1)=f*A2roof;
Tfactorrooof(i,i)=-A3roof;
Cfactorrooof(i)=-hrooofin*(f*Tin(t)+(1-f)*Tin(t-1))-A2roof*(1-
f)*Trooof(i-1,t-1)-Trooof(i,t-1)*(A3orooof-(1-f)*A2roof-(1-f)*hrooofin);
Cfactor1rooof(1:Nroof,1)=Cfactorrooof;
Tnrooof=inv(Tfactorrooof)*Cfactor1rooof;
Trooof(1:Nroof,t)=Tnrooof;
qirooof(t)=hrooofin*(Trooof(Nroof,t)-Tin(t));
Qrooof(t)=qirooof(t)*mhkos*platos;

%toixos North
i=Nwall;
A2wano=kwall(i-1)/dx;
A3owano=rowall(i-1)*cwall(i-1)*dx/dt/2;
A3wano=f*hin+f*A2wano+A3owano;

```

```

Tfactorwano (i, i-1)=f*A2wano;
Tfactorwano (i, i)=-A3wano;
Cfactorwano (i)=-hin* (f*Tin (t) + (1-f) *Tin (t-1) )-A2wano* (1-
f) *Twano (i-1, t-1) -Twano (i, t-1) * (A3owano- (1-f) *A2wano- (1-f) *hin);
Cfactorlwano (1:Nwall, 1)=Cfactorwano;
Tnwano=inv (Tfactorwano) *Cfactorlwano;
Twano (1:Nwall, t)=Tnwano; %katagrafh
thermokrasiwn stous N kombous th xronikh stigmh t
qiwano (t)=hin* (Twano (Nwall, t) -Tin (t) );
Qwano (t)=qiwano (t) * (platos*ypsos-anoigno);

%toixos Sourth
A2waso=kwall (i-1) /dx;
A3owaso=rowall (i-1) *cwall (i-1) *dx/dt/2;
A3waso=f*hin+f*A2waso+A3owaso;
Tfactorwaso (i, i-1)=f*A2waso;
Tfactorwaso (i, i)=-A3waso;
Cfactorwaso (i)=-hin* (f*Tin (t) + (1-f) *Tin (t-1) )-A2waso* (1-
f) *Twaso (i-1, t-1) -Twaso (i, t-1) * (A3owaso- (1-f) *A2waso- (1-f) *hin);
Cfactorlwaso (1:Nwall, 1)=Cfactorwaso;
Tnwaso=inv (Tfactorwaso) *Cfactorlwaso;
Twaso (1:Nwall, t)=Tnwaso; %katagrafh
thermokrasiwn stous N kombous th xronikh stigmh t
qiwaso (t)=hin* (Twaso (Nwall, t) -Tin (t) );
Qwaso (t)=qiwaso (t) * (platos*ypsos-anoigno);

%toixos West
A2wawe=kwall (i-1) /dx;
A3owawe=rowall (i-1) *cwall (i-1) *dx/dt/2;
A3wawe=f*hin+f*A2wawe+A3owawe;
Tfactorwawe (i, i-1)=f*A2wawe;
Tfactorwawe (i, i)=-A3wawe;
Cfactorwawe (i)=-hin* (f*Tin (t) + (1-f) *Tin (t-1) )-A2wawe* (1-
f) *Twawe (i-1, t-1) -Twawe (i, t-1) * (A3owawe- (1-f) *A2wawe- (1-f) *hin);
Cfactorlwawe (1:Nwall, 1)=Cfactorwawe;
Tnwawe=inv (Tfactorwawe) *Cfactorlwawe;
Twawe (1:Nwall, t)=Tnwawe; %katagrafh
thermokrasiwn stous N kombous th xronikh stigmh t
qiwawe (t)=hin* (Twawe (Nwall, t) -Tin (t) );
Qwawe (t)=qiwawe (t) * (platos*ypsos-anoigno);

%toixos East
A2waea=kwall (i-1) /dx;
A3owaea=rowall (i-1) *cwall (i-1) *dx/dt/2;
A3waea=f*hin+f*A2waea+A3owaea;
Tfactorwaea (i, i-1)=f*A2waea;
Tfactorwaea (i, i)=-A3waea;
Cfactorwaea (i)=-hin* (f*Tin (t) + (1-f) *Tin (t-1) )-A2waea* (1-
f) *Twaea (i-1, t-1) -Twaea (i, t-1) * (A3owaea- (1-f) *A2waea- (1-f) *hin);
Cfactorlwaea (1:Nwall, 1)=Cfactorwaea;
Tnwaea=inv (Tfactorwaea) *Cfactorlwaea;
Twaea (1:Nwall, t)=Tnwaea; %katagrafh
thermokrasiwn stous N kombous th xronikh stigmh t
qiwaea (t)=hin* (Twaea (Nwall, t) -Tin (t) );
Qwaea (t)=qiwano (t) * (platos*ypsos-anoigno);

%toixos eswt.
i=Ninwall;
A2wain=kinwall (i-1) /dxin;
A3owain=roinwall (i-1) *cinwall (i-1) *dxin/dt/2;

```

```

A3wain=f*hin+f*A2wain+A3owain;
Tfactorwain(i,i-1)=f*A2wain;
Tfactorwain(i,i)=-A3wain;
Cfactorwain(i)=-hin*(f*Tin(t)+(1-f)*Tin(t-1))-A2wain*(1-
f)*Twain(i-1,t-1)-Twain(i,t-1)*(A3owain-(1-f)*A2wain-(1-f)*hin);
Cfactorlwain(1:Ninwall,1)=Cfactorwain;
Tnwain=inv(Tfactorwain)*Cfactorlwain;
Twain(1:Ninwall,t)=Tnwain; %katagrafh
thermokrasiwn stous N kombous th xronikh stigmh t
qiwain(t)=hin*(Twain(Ninwall,t)-Tin(t));
Qwain(t)=qiwain(t)*Lengthinwall*ypsos;

%yalopinakes North
qiglno(t)=SC*SHGFno(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglno(t)=qiglno(t)*anoigno;

%yalopinakes South
qiglso(t)=SC*SHGFso(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglso(t)=qiglso(t)*anoigso;

%yalopinakes West
qiglwe(t)=SC*SHGFwe(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglwe(t)=qiglwe(t)*anoigwe;

%yalopinakes West
qiglea(t)=SC*SHGFea(t)+U*(Tout(t)-Tin(t));
Qglea(t)=qiglea(t)*anoigea;

% ananewsh aera
Paroxhair(t)=ACH*platos*mhkos*ypsos*1000/3600;
Qanan(t)=Paroxhair(t)*1.23*(Tout(t)-Tin(t));

if (t<(24*60/dtlepta))

Qtot(t)=Qroof(t)+1*(Qglno(t)+Qglso(t)+Qglwe(t)+Qglea(t))+Qwano(t)+Qwaso(t)
+Qwawe(t)+Qwaea(t)+2*Qwain(t)+Qanan(t);

    if Tin(t-1)>299.5
        Qtotalco=Qtot(t)+Qac;
        timecom=timecom+dt;
    else Qtotalco=Qtot(t);
    end

    Tin(t+1)=dt*(Qtotalco)/Ctot+Tin(t);

elseif (j<5)
    Tin(1)=Tin(24*60/dtlepta);

Qtot(t)=Qroof(t)+1*(Qglno(t)+Qglso(t)+Qglwe(t)+Qglea(t))+Qwano(t)+Qwaso(t)
+Qwawe(t)+Qwaea(t)+2*Qwain(t)+Qanan(t);

else
Qtot(t)=Qroof(t)+1*(Qglno(t)+Qglso(t)+Qglwe(t)+Qglea(t))+Qwano(t)+Qwaso(t)
+Qwawe(t)+Qwaea(t)+2*Qwain(t)+Qanan(t);

end

```

```

end

if (j<5) %
Troof(1:Nroof,1)=Troof(1:Nroof,24*60/dtlepta); %
Twano(1:Nwall,1)=Twano(1:Nwall,24*60/dtlepta); %
Twaso(1:Nwall,1)=Twaso(1:Nwall,24*60/dtlepta); %
Twawe(1:Nwall,1)=Twawe(1:Nwall,24*60/dtlepta); %
Twaea(1:Nwall,1)=Twaea(1:Nwall,24*60/dtlepta); %
Twain(1:Ninwall,1)=Twain(1:Ninwall,24*60/dtlepta); %

else Troof(1:Nroof,1)=Troof(1:Nroof,1); %
Twano(1:Nwall,1)=Twano(1:Nwall,1); %
Twaso(1:Nwall,1)=Twaso(1:Nwall,1); %
Twawe(1:Nwall,1)=Twawe(1:Nwall,1); %
Twaea(1:Nwall,1)=Twaea(1:Nwall,1); %
Twain(1:Ninwall,1)=Twain(1:Ninwall,1); %

end

j=j+1;

end

Qtotroof=0;
Qtotwano=0;
Qtotwaso=0;
Qtotwawe=0;
Qtotwaea=0;
Qtotwain=0;
Qtotglno=0;
Qtotglso=0;
Qtotglwe=0;
Qtotglea=0;

save timeveg.dat -ASCII timeveg
save timecom.dat -ASCII timecom

for t=1:(24*60/dtlepta) % plots

    Qtotroof=Qtotroof+Qroof(t);

    Qtotwano=Qtotwano+Qwano(t);
    Qtotwaso=Qtotwaso+Qwaso(t);
    Qtotwawe=Qtotwawe+Qwawe(t);
    Qtotwaea=Qtotwaea+Qwaea(t);
    Qtotwain=Qtotwain+Qwain(t);

    Qtotglno=Qtotglno+Qglno(t);
    Qtotglso=Qtotglso+Qglso(t);
    Qtotglwe=Qtotglwe+Qglwe(t);
    Qtotglea=Qtotglea+Qglea(t);

Qtotco(t)=Qroof(t)+Qwano(t)+Qwaso(t)+Qwawe(t)+Qwaea(t)+Qglno(t)+Qglso(t)+Q
glwe(t)+Qglea(t);

treal(t)=t*dtlepta/60;

```

```

ToutC(t)=Tout(t)-273;

Tlcommonplus(t)=Troof(6,t)-273;
Tlcommon(t)=Troof(1,t)-273;
Tin_common(t)=Tin(t)-273;
TNcommon(t)=Troof(Nroof,t)-273;
qicommon(t)=hroofin*(Troof(Nroof,t)-Tin(t));
Tequr(t)=Teqroof(t)-273;

Tlvegg(t)=Tlveg(t);
Tlvegpluss(t)=Tlvegplus(t);
Tlvegdomm(t)=Tlvegdom(t);
Tin_vegg(t)=Tin_veg(t);
TNvegg(t)=TNveg(t);
qivegg(t)=qiveg(t);
SpHu(t)=SH(t);
ReHuac(t)=RHac(t);
TcanC(t)=Tcan(t)-273;
TacC(t)=Tac(t)-273;
Teqveg(t)=Teqroofv(t)-273;

figure(1);
x=treal;
y=Tlcommon;
z=Tlvegg;
w=ToutC;
plot(x,y,'r',x,z,'g',x,w,'b')
title('External roof surface day temperature')
xlabel('Time (h:00)')
ylabel('Temperature (Celcium)')
grid
legend('Common Roof','Green Roof','Ambient Temperature')

figure(2);
x=treal;
y=Tin_common;
z=Tin_vegg;
plot(x,y,'b',x,z,'g')
title('Inside Day Temperature')
xlabel('Time (h:00)')
ylabel('Temperature (Celcium)')
grid
legend('Common Roof','Green Roof')

figure(3)
x=treal;
y=TNcommon;
z=TNvegg;
plot(x,y,'r',x,z,'g')
title('Inside roof surface day temperature')
xlabel('Time (h:00)')
ylabel('Temperature (Celcium)')
grid
legend('Common Roof','Green Roof')

figure(4)
x=treal;
y=qicommon;
z=qivegg;
plot(x,y,'b',x,z,'g')

```

```
title('Heat Gain')
xlabel('Time (h:00)')
ylabel('Heat flow (W/m^2)')
grid
legend('Common Roof','Green Roof')

figure(5)
plot(treal,TacC,'g',treal,ToutC,'b')
title('Canopy air and ambient temperature')
xlabel('Time (h:00)')
ylabel('Temperature (Celcium)')
grid
legend('Canopy air','Ambient')
```

end

```
save Qtotco.dat -ASCII Qtotco
save Tlcommonplus.dat -ASCII Tlcommonplus
save Tlcommon.dat -ASCII Tlcommon
save Tincommon.dat -ASCII Tin_common
save TNcommon.dat -ASCII TNcommon
save Tlvegplus.dat -ASCII Tlvegpluss
save Tlvegdom.dat -ASCII Tlvegdomm
save Tlveg.dat -ASCII Tlvegg
save Tin_veg.dat -ASCII Tin_vegg
save TNveg.dat -ASCII TNvegg
save Tcan.dat -ASCII TcanC
save Tac.dat -ASCII TacC
save ReHu.dat -ASCII ReHuac
save SpHu.dat -ASCII SpHu
save Teqveg.dat -ASCII Teqveg
```

end

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

1. www.agoraideon.eu
2. www.ktirio.gr
3. <http://el.wikipedia.org>
4. www.buildings.gr
5. www.cres.gr
6. www.energia.gr
7. <http://eia.doe.gov>
8. <http://energy.eu>
9. www.warwickdc.gov.uk/wdc
10. www.epa.gov
11. www.greenrooftops.com
12. www.greenroofs.org
13. www.igra-world.com
14. www.thegreenroofcentre.co.uk
15. www.greenroofs.gr
16. www.life.illinois.edu/plantbio/wimovac/newpage9.htm
17. www.bsyse.wsu.edu/cropsyst/manual/simulation/et/common.htm#latent_heat_vapor

B. ΑΡΘΡΑ – ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

18. Henry Lee, 'The Energy Problem', National Energy Symposium, California, 2006
19. ΚΑΠΕ, «ΑΠΕ σε οικιστικά σύνολα»
20. Dr Jane Tarran, Mr Philip Hewett, 'Urban Forestry and Urban Greening: Benefits to people and their cities from well-managed Urban Vegetation', Urbanism Downunder Conference, Wellington, 2005.
21. David J. Nowak, 'The effects of urban trees on air quality', USDA Forest Service, Syracuse, NY

22. ‘Vegetation Benefits in the Urban Environment’, Portland Bureau of Environmental Services, 2007
23. ‘The Green Roof Pocket Guide’, by the Green Roof Centre, Second edition 2007
24. Steven Peck and Monica Kuhn, ‘Design Guidelines for green roofs’, Ontario Association of Architects, Ottawa, 2003
25. Erica Oberndorfer, Jeremy Lundholm, Brad Bass, eid R. Coffman, Hitesh Doshi, Nigel Dunnet, Stuart Gaffin, Manfred Kohler, Karen K. Y. Liu and Bradley Rowe, ‘Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions and Services’, BioScience November 2007 / Vol. 57 No. 10
26. Brad Bass, ‘Green Roofs and Green Walls: Potential Energy Savings in the Winter’, Adaptation & Impacts Research Division, University of Toronto, 2007
27. Theodore Theodosiou, ‘Green Roofs in Buildings: Thermal and Environmental Behaviour’, Advances in building energy research, 2009, VOL 3, Pages 271–288
28. Theodore Theodosiou, ‘Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique’, Thessaloniki, 2003
29. Ekaterini Eumorfopoulou, Dimitris Aravantinos, ‘The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece’, Thessaloniki, 1997
30. 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’, Athens, 2007
31. D.J. Sailor, ‘A green roof model for building energy simulation programs’, Department of Mechanical and Materials Engineering, Portland State University, 2008
32. Niachou K, Papakonstantinou K, Santamouris M, Tsagrassoulis A, Mihalakakou G., ‘Analysis of the green roof properties and investigation of its energy performance’, Energy Build 2001;33:719–29., Athens
33. Palomo E. ‘Roof components models simplification via statistical linearization and model reduction techniques’, Energy Build 1999; 29(3):259–81.

34. Elena Palomo Del Barrio, 'Analysis of the green roofs cooling potential in buildings', Groupe Informatiyue et Systemes Energetiques, Ecole Nationale des Pants et Chaussees, France, 1997
35. 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, Washington, D. C., 1981
36. Βραχόπουλος Μ. Γρ., Φιλίος Α.Ε., Κωτσιόβελος Γ. Τρ., «Εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια με φυτεμένο δώμα», ΤΕΙ Χαλκίδας,

Γ. **BIBΛΙΑ**

37. Hans Landsberg, 'Energy, the next twenty years' , The ford foundation, 1979
38. Ashrae 1997 HVAC Fundamentals Handbook
39. Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, 'Κλιματισμός – Μέρος Πρώτο', Αθήνα 2007
40. Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, 'Υπολογιστικές Μέθοδοι Φαινομένων Μεταφοράς – Μέρος Πρώτο', Αθήνα 2005
41. Ξενοφών Κ. Κακάτσιος, 'Μετάδοση Θερμότητας', Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2002

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

-
- ¹ Αντώνης Δ. Λιβιεράτος, «Το ενεργειακό πρόβλημα», Αθήνα, 1985
 - ² http://jcwinnie.biz/wordpress/imageSnag/468_pollution.jpg
 - ³ European Commission, ‘EU Energy and Transport in figures, Statistical Pocketbook 2007/08’
 - ⁴ U.S. Department of Energy ‘2008 Buildings Energy Data Book’
 - ⁵ <http://www.iea.org>
 - ⁶ http://www.energia.gr/article.asp?art_id=15296
 - ⁷ http://www.energia.gr/article.asp?art_id=16104
 - ⁸ Εύα Τζανακάκη, «Αρχές και τεχνολογίες ενεργειακού σχεδιασμού»
 - ⁹ Cecile Marin, ‘Atlas Environnement du Monde Diplomatique, 2007’
 - ¹⁰ U.S. Environmental Protection Agency’s Office of Atmospheric Programs, ‘Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies’
 - ¹¹ <http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/vsc/en/ch/16/uc/images/transpiration.jpg>
 - ¹² http://www.inhabitat.com/images/newyork_roof_gardens_imagined.jpg
 - ¹³ <http://www.greekarchitects.gr/index.php?maincat=23&newid=1114>
 - ¹⁴ Rakesh Kumar, S.C. Kaushik, ‘Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings’, Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology, New Delhi, 2004
 - ¹⁵ <http://comeuptomyroom.com/wp-content/uploads/2009/01/picture-52.png>
 - ¹⁶ <http://www.egreen.gr/erga.html>
 - ¹⁷ <http://www.egreen.gr/why.html>
 - ¹⁸ M. Santamouris, C. Pavlou, P. Doukas, G. Mihalakakou, A. Synnefa, A. Hatzibiros, P. Patargia, ‘Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens’, Athens, 2005
 - ¹⁹ Renato M. Lazzarin, Francesco Castellotti, Filippo Busato, ‘Experimental measurements and numerical modelling of a green roof’, Department of Management and Engineering, University of Padova, Vicenza, 2003
 - ²⁰ Brad Bass, ‘Green Roofs and Green Walls: Potential Energy Savings in the Winter’, Adaptation & Impacts Research Division, University of Toronto, 2007

-
- ²¹ Paulo César Tabares Velasco, ‘A new model to calculate energy savings of green roofs to be used in building energy simulation programs’
- ²² <http://www.hydrotechusa.com/cas1.html>
- ²³ Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, ‘Κλιματισμός – Μέρος Πρώτο’, Αθήνα 2007
- ²⁴ ‘Οδηγός Θερμομόνωσης Κτιρίων’, Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού Κυπριακής Δημοκρατίας
- ²⁵ Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, ‘Υπολογιστικές Μέθοδοι Φαινομένων Μεταφοράς – Μέρος Πρώτο’, Αθήνα 2005
- ²⁶ Elena Palomo Del Barrio, ‘Analysis of the green roofs cooling potential in buildings’, Groupe Informatiyue et Systemes Energetiques, Ecole Nationale des Pants et Chaussees, France, 1997
- ²⁷ Duffie, J.A., and Beckman, W.A., ‘Solar Energy Thermal Processes’
- ²⁸ C. Stahghellini, ‘Transpiration of greenhouse crops’, Ph.D. Dissertation, Agricultural University, Wageningen, 1987.
- ²⁹ D.J. Sailor, ‘A green roof model for building energy simulation programs’, Department of Mechanical and Materials Engineering, Portland State University, 2008
- ³⁰ www.meteo.ntua.gr
- ³¹ Ashrae 1997 HVAC Fundamentals Handbook