



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΝΥΚΤΕΡΙΝΗ ΕΚΠΟΜΠΗ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

ΟΝ/ΜΟ: ΓΙΑΝΝΗΣ Χ. ΜΗΤΡΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΨΗ: κ. ΧΡΗΣΤΟΣ ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίστηκε στη δημοσίευση των κυρίων Μπαγιώργα και Μιχαλακάκου του τομέα της Διοίκησης Περιβαλλοντικών και Φυσικών Πόρων του Πανεπιστημίου των Ιωαννίνων, με τίτλο: "Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling". (Πειραματική και θεωρητική μελέτη νυκτερινού ακτινοβολητή για ψύξη κτιρίου)

Η παραπάνω δημοσίευση αφορά ένα πείραμα που διεξήχθη στην οροφή του κτιρίου του τμήματος, το οποίο βρίσκεται στο Αγρίνιο. Η δε πλήρης περιγραφή του πειράματος γίνεται εκτενέστερα στο αντίστοιχο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους.

Στόχος της εργασίας είναι, αφού παρουσιαστεί το θεωρητικό υπόβαθρο αυτής και εξηγηθεί η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο των Ιωαννίνων, να γίνει αναγωγή αυτής της μεθόδου ψύξης στα κλιματολογικά δεδομένα των Αθηνών και να εκτιμηθεί κατά πόσο θα άξιζε να προωθηθεί σαν τρόπος παθητικού δροσισμού για το Λεκανοπέδιο Αττικής.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με στήριξαν κατά την συγγραφή της εργασίας και συγκεκριμένα τον καθηγητή μου κ. Τζιβανίδη που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα, καθώς και τον κ. Ανδρουτσόπουλο από τον τομέα κτιρίων του Κ.Α.Π.Ε για την πολύτιμη βοήθειά του.

Περιεχόμενα:

Μέρος 1ο

Θεωρητικό:

1.1) Εισαγωγή.....	1
1.2) Παθητικά Ηλιακά Συστήματα.....	4
1.3) Παθητικός Δροσισμός (Passive Cooling).....	12
1.4) Ψύξη δια ακτινοβολίας (Radiative Cooling).....	17
1.5) Πειραματική και θεωρητική μελέτη νυκτερινού ακτινοβολητή για ψύξη κτιρίου (Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling).....	39

Μέρος 2ο

Υπολογιστικό:

2.1) Εισαγωγή.....	53
2.2) Μοντελοποίηση του ακτινοβολητή.....	54
2.3) Χρήση του ακτινοβολητή.....	61
2.4) Θερμική προσομοίωση με χρήση Η/Υ.....	63
2.5) Αποτελέσματα-Συμπέρασματα.....	96

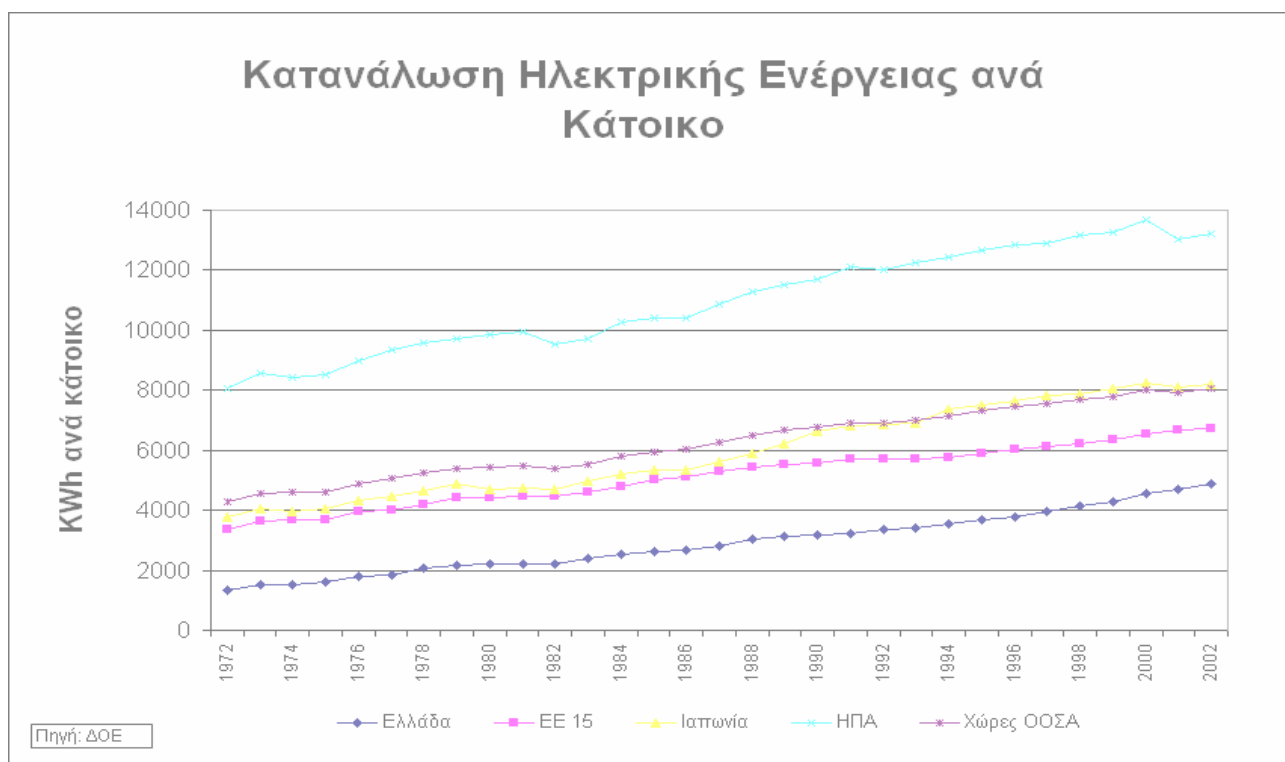
Βιβλιογραφία.....	153
--------------------------	------------

Μέρος 1ο:

1.1) Εισαγωγή:

Οι εξελίξεις των τελευταίων χρόνων τόσο σε παγκόσμια, όσο και σε εθνική κλίμακα έχουν οδηγήσει την ανθρωπότητα σε μία πολύπλευρη κρίση. Τα κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων εξαντλούνται, οι κλιματολογικές συνθήκες του πλανήτη έχουν διαταραχθεί λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας, το φαινόμενο του θερμοκηπίου προκαλεί την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης, με ότι αυτό συνεπάγεται. Αν κάποιος συνυπολογίσει και την οικονομική κρίση στην παγκόσμια οικονομία, γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι η στροφή του ανθρώπου σε "πράσινες" μορφές ενέργειας είναι μονόδρομος.

Από την άλλη πλευρά, το βιοτικό επίπεδο των αναπτυγμένων, αλλά και αναπτυσσόμενων, χωρών οδηγεί σε μία συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια με οικολογικές και οικονομικές συνέπειες, που επιβαρύνουν την ήδη υπάρχουσα κατάσταση. Έτσι, δημιουργείται ένας φαύλος κύκλος, ο οποίος δυστυχώς θα οδηγήσει σε πολύ δυσάρεστη θέση τους πολίτες όλων των κρατών, αν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα.



Σχήμα 1.1.1: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (KWh) ανά κάτοικο.

Η καθολικά αποδεκτή λύση είναι η εφαρμογή όλο και περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας-Α.Π.Ε καθώς και η εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας. Με τον όρο Α.Π.Ε. εννοούμε την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, της αιολικής ενέργειας, της δυναμικής ενέργειας του νερού, μέσω των υδροηλεκτρικών έργων, τη γεωθερμία κ τέλος τη βιομάζα.

Εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται με τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης σε κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα(πχ αποδοτικότεροι κινητήρες, καλύτεροι λαμπτήρες) και με την μείωση της σπατάλης ενέργειας. Βέβαια, η τεχνολογική πρόοδος οδηγεί σε αποδοτικότερες μηχανές και κατασκευές, αλλά δημιουργεί και νέες ανάγκες για ενέργεια.

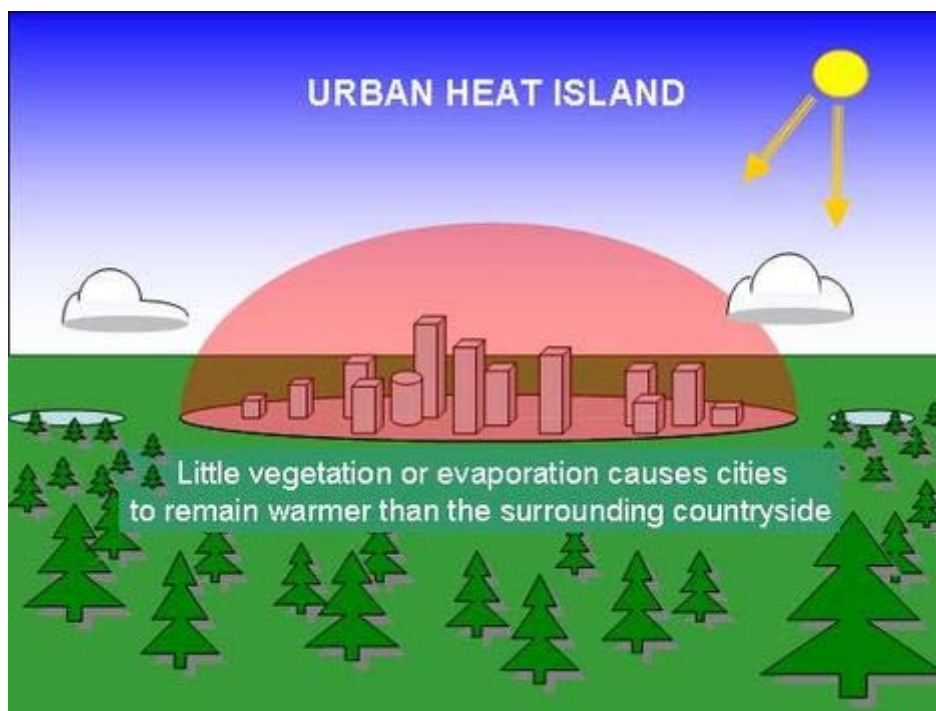
Όσο αφορά τα κτίρια, η μέγιστη κατανάλωση ενέργειας παρατηρείται για την κάλυψη των αναγκών για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό. Έτσι, ένα κτίριο με καλή θερμική συμπεριφορά-απόδοση μειώνει κατά πολύ τις ανάγκες του για ενέργεια και προσφέρει μεγαλύτερη άνεση για τα άτομα που δραστηριοποιούνται σε αυτό.

Σχήμα 1.1.2:Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά τομέα ανθρώπινης δραστηριότητας.

Η Ελλάδα, σαν μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οφείλει και αυτή να ακολουθήσει μια πιο "πράσινη" πολιτική, όσο αφορά την ηλεκτροπαραγωγή με χρήση Α.Π.Ε και να συμβαδίσει με τα επιτρεπόμενα όρια ετήσιας εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), όχι μόνο για λόγους οικολογίας, αλλά και προς αποφυγή βαρύτερων προστίμων. Κάτι που φαντάζει οξύμωρο, δεδομένης της

γεωγραφικής της θέσης, αφού με το τόσο καλό αιολικό δυναμικό και την αυξημένη ετήσια ηλιοφάνεια θα μπορούσε να πρωτοστατεί σε εφαρμογές Α.Π.Ε στην Ευρώπη.

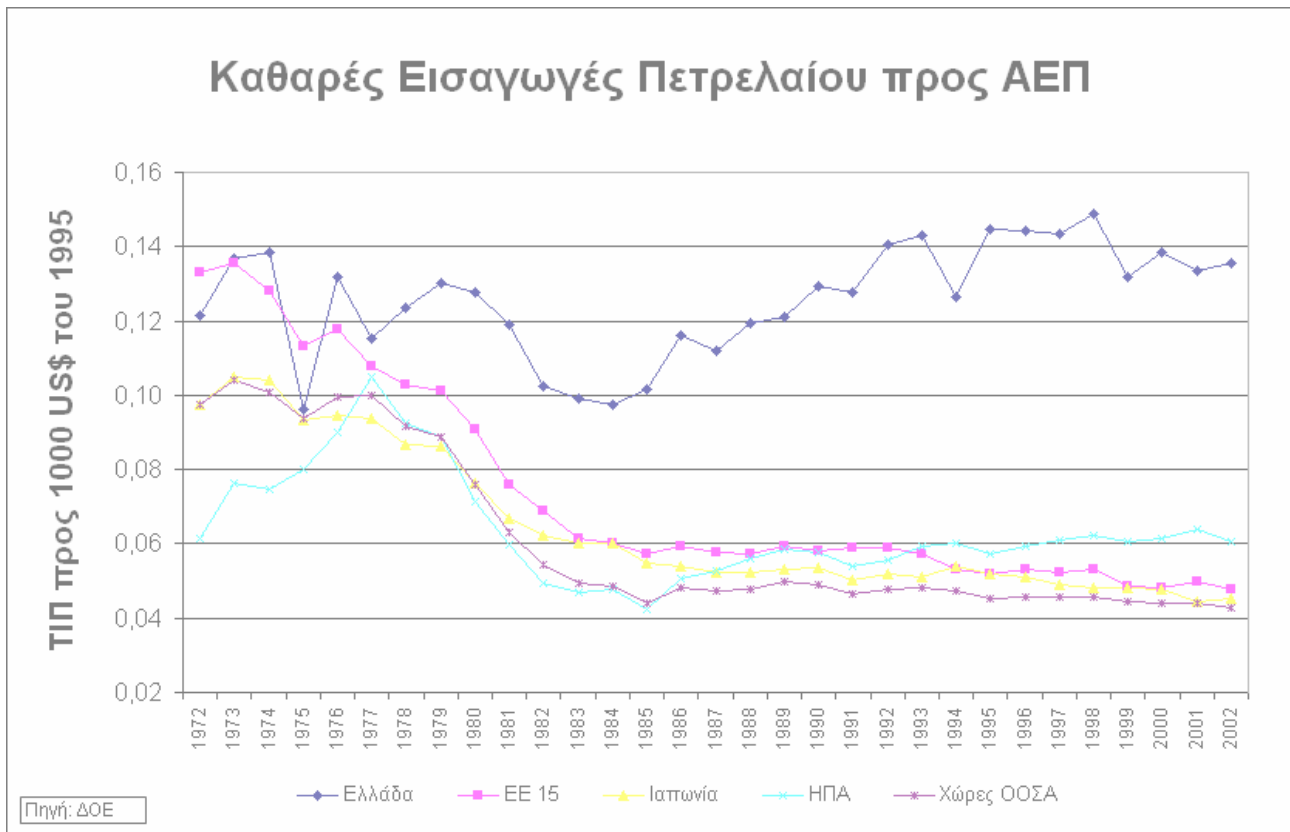
Η πόλη της Αθήνας με την άναρχη δομή της, τα πολλά παλαιά κτίρια και τις περιορισμένες εκτάσεις πρασίνου έχει αποκτήσει σοβαρό πρόβλημα κατά τους θερινούς μήνες. Πλέον το φαινόμενο της θερμικής νήσου, που εμφανίζεται λόγω μεγάλης συγκέντρωσης θερμότητας που εκπέμπεται από τα κτίρια, γίνεται αρκετά έντονο σε μεγάλο μέρος της πόλης. Έτσι, απαιτούνται ακόμη μεγαλύτερα φορτία ψύξης για την βελτίωση των συνθηκών άνεσης για τους ενοίκους.



Σχήμα 1.1.3: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της θερμικής νήσου. Η έλλειψη πρασίνου στα αστικά κέντρα, οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες, απ' ότι στη γύρω ύπαιθρο.

Αλλά και κατά τους χειμερινούς μήνες απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας για θέρμανση, μιας και η κακή θερμική συμπεριφορά των κτιρίων, σε συνδυασμό με τους ξηρούς χειμώνες που συνήθως παρατηρούνται στην Αθήνα, το απαιτούν. Βέβαια, λόγω της γεωγραφικής της θέσης και του κλίματός της, οι ενεργειακές ανάγκες για ψύξη μπορεί να φτάνουν δύο με τρεις φορές αυτές που απαιτούνται για θέρμανση σε ετήσια βάση.

Συνοψίζοντας, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η Ελλάδα, όπως και οι άλλες μεσογειακές χώρες της Νοτίου Ευρώπης, πρέπει να στραφεί στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας και να προωθήσει μέτρα για την εξοικονόμηση ενέργειας με στόχο να περιορίσει την ανεξέλεγκτη ζήτηση, αλλά και να επιδιώξει την ενεργειακή της αυτονομία και ταυτόχρονη απεξάρτηση από το πετρέλαιο σε βάθος χρόνου.



Σχήμα 1.1.4:Καθαρές εισαγωγές πετρελαίου προς ΑΕΠ.

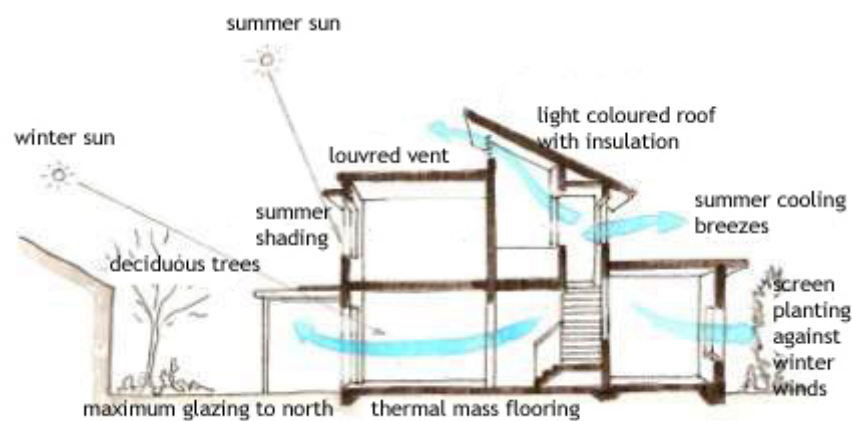
1.2) Παθητικά Ηλιακά Συστήματα:

Η εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον όρο βιοκλιματικός σχεδιασμός των κτιρίων. Ο σχεδιασμός αυτός προβλέπει την φυσική ψύξη-θέρμανση και τον φυσικό αερισμό του κτιρίου με διάφορες μεθόδους με σκοπό την ελάττωση της χρήσης μηχανικών μέσων κ άρα τη μείωση της ζήτησης για ενέργεια(έχει υπολογιστεί, ότι η ζήτηση ενέργειας για κλιματισμό καλύπτει το 10 με 15% περίπου, ενώ οι ανάγκες για εξαερισμό και τεχνική κυκλοφορία αέρα φτάνουν το 30% των ενεργειακών αναγκών ενός κτιρίου).

Όταν η ροή της θερμότητας σε ένα κτίριο γίνεται με φυσικό τρόπο και η ηλιακή ενέργεια καλύπτει πάνω από το μισό της ολικής εξωτερικής ενέργειας που απαιτείται για τη θέρμανση αυτού, τότε το κτίριο αποτελεί παθητική ηλιακή συσκευή.

Πολλά παραδείγματα ψύξης και θέρμανσης με φυσικούς τρόπους συναντώνται στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική διαφόρων περιοχών. Τα πιο επιτυχή από αυτά άντεξαν στο χρόνο και αποτελούν χρήσιμους οδηγούς για κτίρια παρόμοιας κλίμακας και χρήσης σε παρόμοιο περιβάλλον.

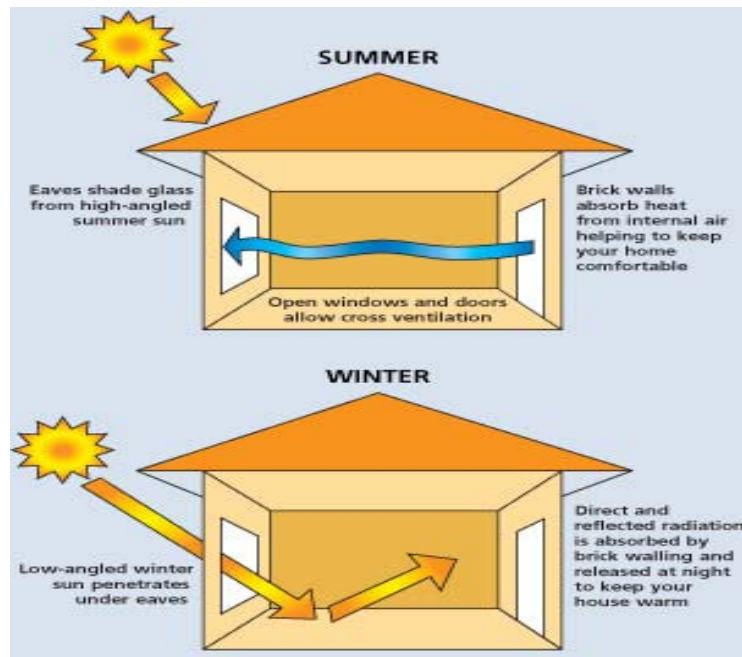
Τα παραδείγματα αυτά, αφορούν την κατασκευή σπιτιών πλήρως εναρμονισμένων με τις κλιματολογικές συνθήκες κάθε τόπου και περισσότερο με τον ήλιο. Τα σπίτια αυτά, επωφελούνταν από τον ήλιο μεταφέροντας θερμότητα από το εξωτερικό περίβλημα-κέλυφος προς το εσωτερικό τους προσφέροντας θερμική άνεση στους ενοίκους.



Σχήμα 1.2.1:Τυπική εφαρμογή βιοκλιματικού σχεδιασμού.

Όμως, ενώ πολλές τεχνικές που εφαρμόστηκαν στα παραδοσιακά κτίρια ήταν αποτέλεσμα εμπειρίας, οι σύγχρονες γνώσεις της επιστήμης του κτιρίου με την ανάπτυξη δομικών υλικών, διαδικασιών και ελέγχου, επιτρέπουν τη χρήση ευρύτερων τεχνικών μεθόδων με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα.

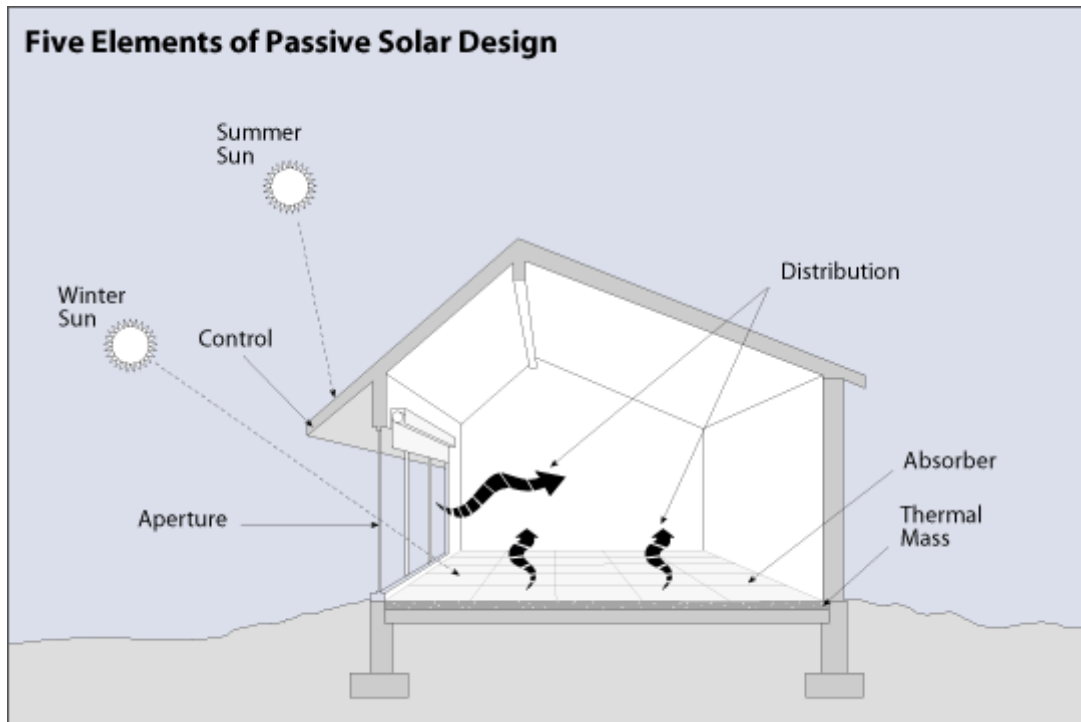
Τα παθητικά ηλιακά συστήματα χωρίζονται κατά βάση σε δύο κατηγορίες, στα συστήματα παθητικής θέρμανσης και στα συστήματα παθητικής ψύξης. Υπάρχουν βέβαια και εφαρμογές τους στα κτίρια που προσδίδουν θέρμανση το χειμώνα και ψύξη κατά το θέρος.



Σχήμα 1.2.2: Εφαρμογή παθητικού ηλιακού συστήματος.

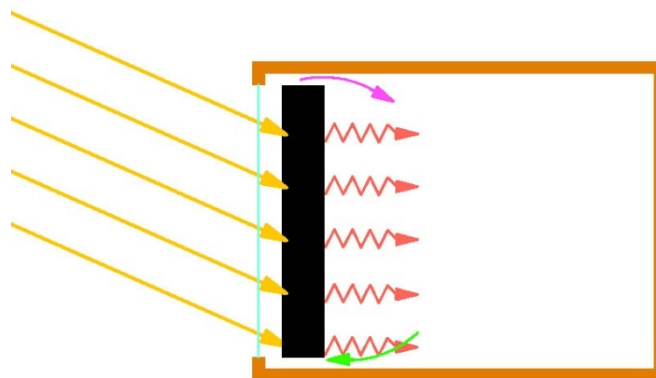
Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει σύντομη αναφορά μόνο στην παθητική θέρμανση, μιας και με την ψύξη θα ασχοληθούμε εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο.

Όσο αφορά την παθητική θέρμανση υπάρχουν τα συστήματα άμεσου και έμμεσου κέρδους. Τα πρώτα είναι η απλούστερη μορφή παθητικής θέρμανσης, μιας και απλά απαιτούν μεγάλη υαλόφρακτη επιφάνεια με μεσημβρινό προσανατολισμό και καλή εξωτερική μόνωση του κτιρίου (κέλυφος) με αρκετά μεγάλη θερμική μάζα συνήθως από μπετόν, τούβλα ή πέτρα για να υπάρχει η απαιτούμενη χρονική υστέρηση και να ομαλοποιείται η κατανομή θερμοκρασίας μέσα στο εικοσιτετράωρο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η συγκέντρωση, η αποθήκευση και η διανομή της ηλιακής ενέργειας- θερμότητας στο κτίριο με αρκετά αποτελεσματικό τρόπο. Έτσι δημιουργείται μια φυσική πηγή θέρμανσης στο χώρο, εξοικονομώντας ικανοποιητικό ποσό ενέργειας. Κάτι τέτοιο όμως, αποφεύγεται κατά τους θερινούς μήνες με τη βοήθεια του κατάλληλου αερισμού και ενός σκίαστρου στην γυάλινη επιφάνεια του κτιρίου. Αυτό συμβαίνει, γιατί ο ήλιος βρίσκεται πιο ψηλά τότε και η ακτινοβολία του εισέρχεται υπό μεγαλύτερη γωνία δια μέσου των παραθύρων στο κτίριο. Συνεπώς το σκίαστρο θα μπορούσε να την αποκλείσει τελείως.



Σχήμα 1.2.3: Σχηματική απεικόνιση των αρχών παθητικής θέρμανσης άμεσου κέρδους.

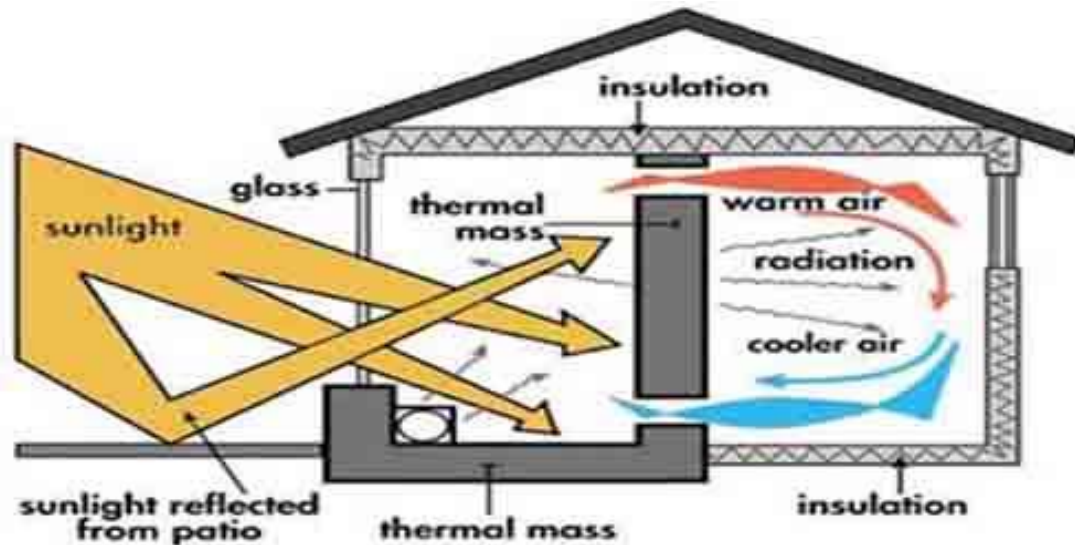
Στα συστήματα έμμεσου κέρδους ανήκουν οι τοίχοι θερμικής αποθήκευσης, τα θερμοσιφωνικά πάνελ και οι ηλιακοί χώροι (θερμοκήπια- ηλιακά αίθρια). Οι τοίχοι θερμικής αποθήκευσης είναι είτε απλοί τοίχοι μάζας, συμπαγείς ή αποτελούμενοι από δοχεία νερού ή υλικών αλλαγής φάσης, είτε τοίχοι μάζας Trombe-Michel θερμοσιφωνικής ροής με θυρίδες στο πάνω και κάτω μέρος τους.



Indirect Gain: Mass Wall - Trombe Wall

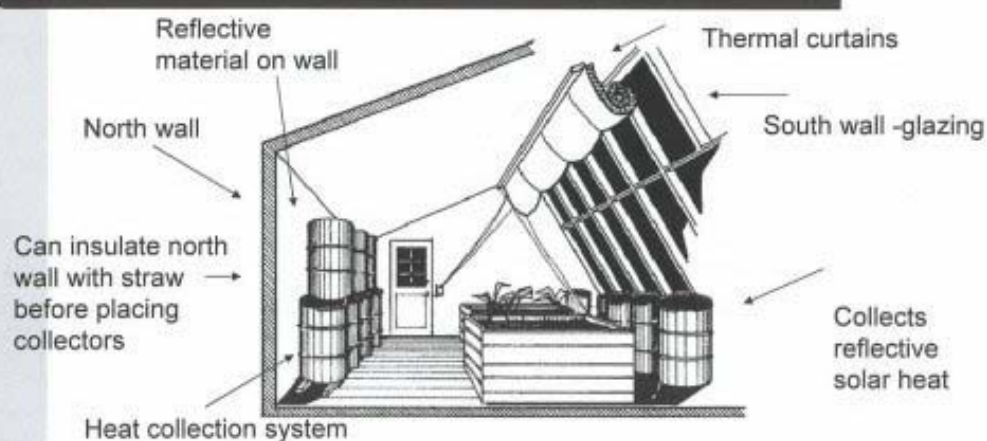
Σχήμα 1.2.4: Αρχή λειτουργίας του τοίχου Trombe.

Οι τοίχοι αυτοί, αποθηκεύουν την ακτινοβολία που δέχονται στην εξωτερική τους πλευρά και με κάποια χρονική υστέρηση την διοχετεύουν στον εσωτερικό χώρο, θερμαίνοντας έτσι τον αέρα του κτιρίου. Η χρονική αυτή υστέρηση εξαρτάται από το πάχος και το υλικό του τοίχου.



Σχήμα 1.2.5: Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής τοίχου Trombe σε κτίριο.

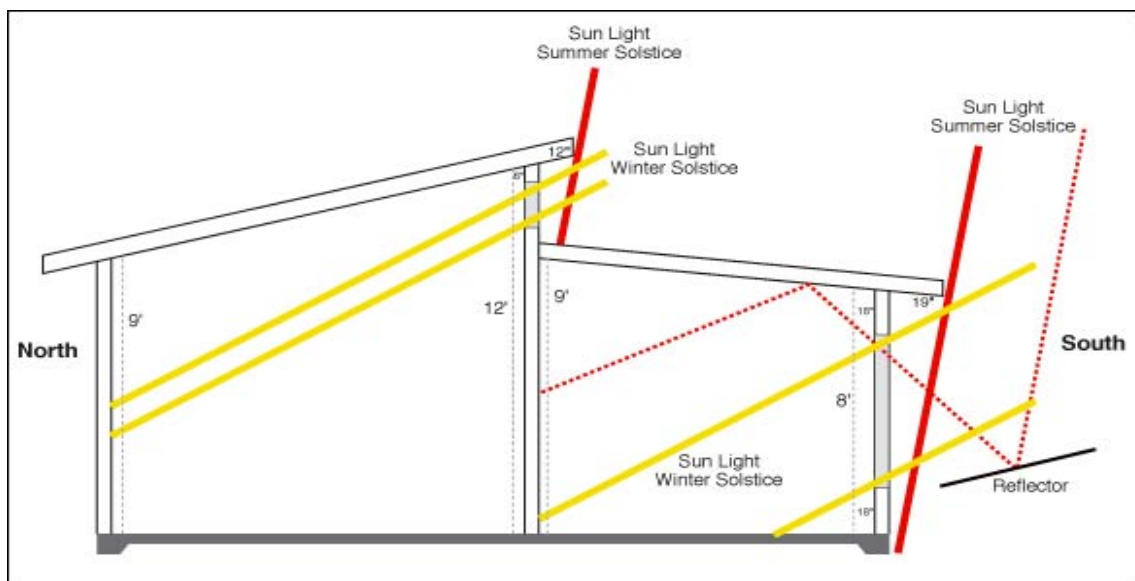
Solar Heated Greenhouse



Σχήμα 1.2.6: Προσαρτημένο θερμοκήπιο σε σπίτι.

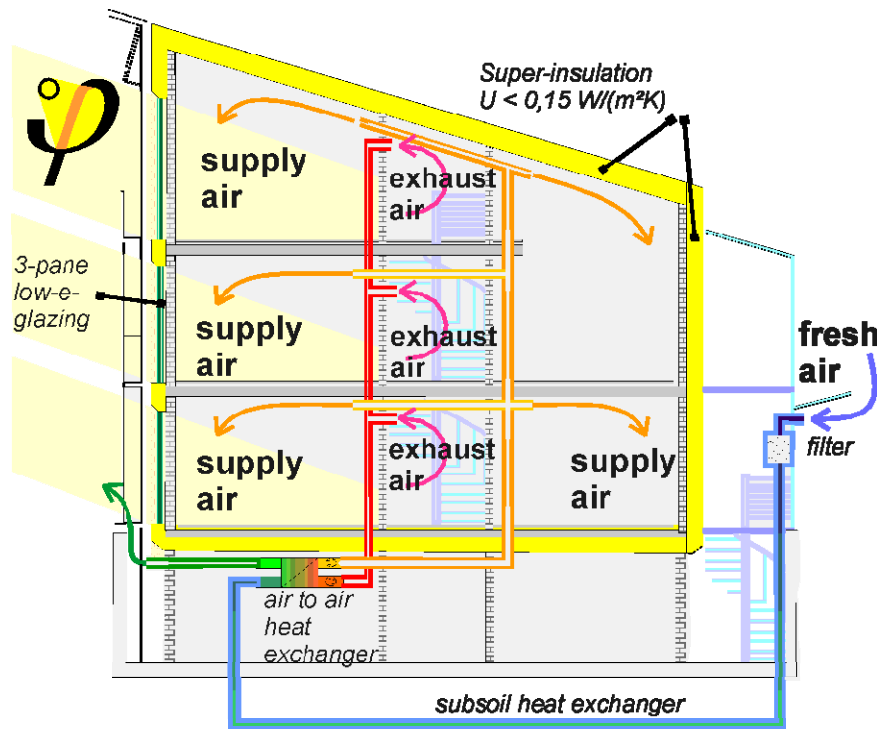
Ένα θερμοκήπιο προσαρτημένο σε κτίριο μπορεί να λειτουργήσει σαν ένα αποδοτικό σύστημα θερμικής αποθήκευσης. Η αρχή λειτουργίας του, που ομοιάζει κατά βάση με αυτή των τοίχων συλλεκτών θερμικής ενέργειας, βασίζεται στην ιδιότητα του θερμοκηπίου να συλλέγει την ηλιακή ακτινοβολία μέσω της διαφανούς επιφάνειάς του, μειώνοντας όμως τις θερμικές απώλειες που απορροφώνται από τις επιφάνειες και τη θερμική του μάζα. Τα προσαρτημένα θερμοκήπια είναι συνήθως κλειστοί χώροι με μεγάλες γυάλινες επιφάνειες στη νότια πλευρά και επικοινωνούν με το υπόλοιπο κτίριο με τοίχο θερμικής αποθήκευσης για να εξασφαλίζεται η μετάδοση της θερμότητας από τον ήλιο στους χώρους του κυρίως κτιρίου.

Για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του θερμοκηπίου πρέπει να προσεχθεί ο προσανατολισμός του, το μέγεθός του, τα υλικά κατασκευής του και ο τρόπος σύνδεσης με τα στοιχεία αποθήκευσης θερμότητας του κτιρίου. Έτσι, με την κατάλληλη θερμική προστασία τον χειμώνα και την απαιτούμενη ηλιοπροστασία κατά το θέρος εξασφαλίζονται τα ζητούμενα πλεονεκτήματα του θερμοκηπίου με τα λιγότερα δυνατά μειονεκτήματα.

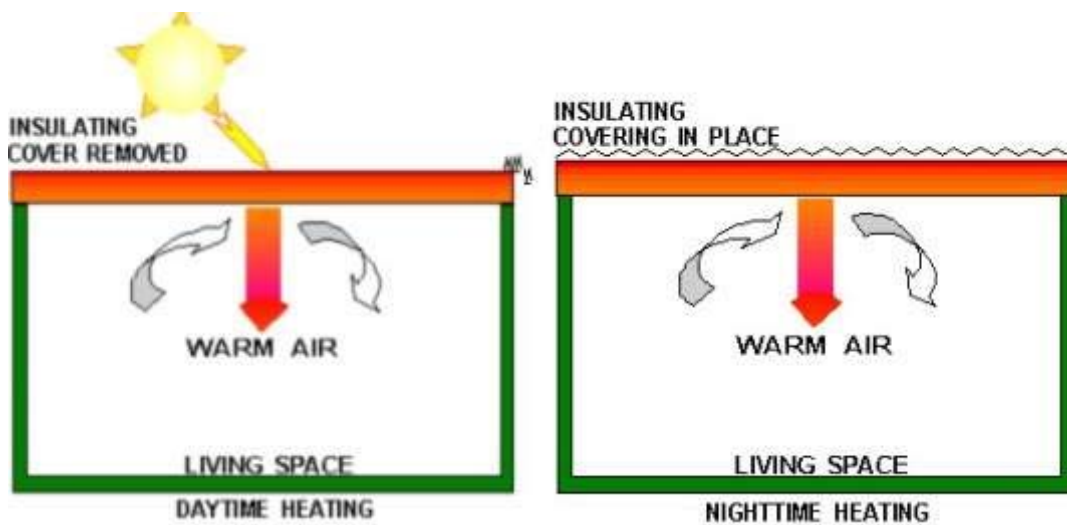


Σχήμα 1.2.7: Προσαρτημένο θερμοκήπιο σε σπίτι, με κίτρινο χρώμα φαίνεται η γωνία πρόσπτωσης της χειμερινής ακτινοβολίας, με κόκκινο της θερινής.

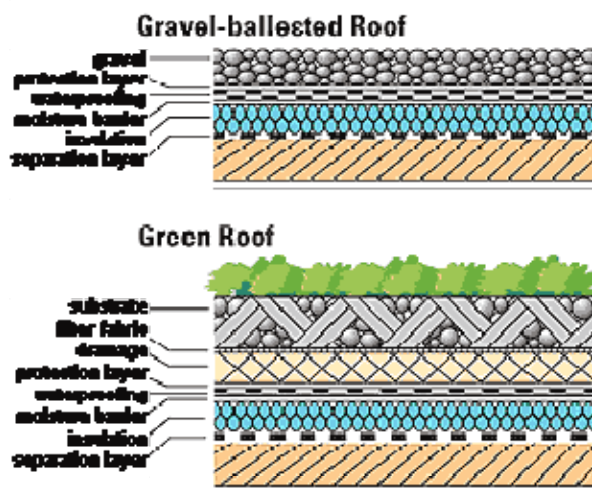
Έκτός από τα παθητικά ηλιακά συστήματα υπάρχουν και μερικά συστήματα που εφαρμόζονται για φυσικό δροσισμό, αλλά συνεισφέρουν θετικά και το χειμώνα, αφού ενισχύουν τη θερμομονωτική ικανότητα του κτιριακού κελύφους. Σε αυτά κατατάσσονται το φράγμα ακτινοβολίας, το αεριζόμενο κέλυφος, το φυτεμένο δώμα, η ηλιακή λίμνη και οι τοίχοι νερού. Σε αυτά, θα πρέπει να προσθέσουμε και κάποια υβριδικά συστήματα, τα οποία ναι μεν βασίζονται στις αρχές των παθητικών συστημάτων, αλλά βασίζονται και σε μηχανικά μέσα, προκειμένου να γίνουν πιο αποτελεσματικά.



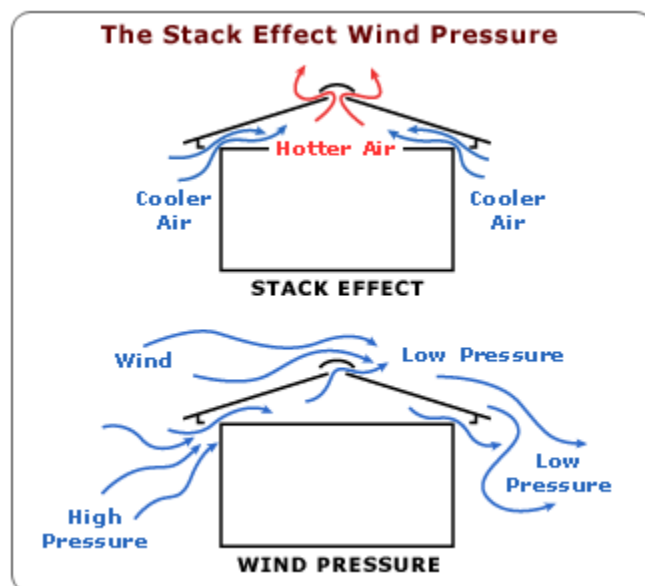
Σχήμα 1.2.8: Εφαρμογή υβριδικού συστήματος βιοκλιματικού σχεδιασμού σε κτίριο (φυσική θέρμανση και φωτισμός, τεχνητή κυκλοφορία αέρα).



Σχήμα 1.2.9: Ηλιακό παθητικό σύστημα με κινητή μόνωση.



Σχήμα 1.2.10: Ενδεικτική διαστρωμάτωση φυτεμένου δώματος.



Σχήμα 1.2.11: Φυσικός αερισμός- το φαινόμενο της καμινάδας.

1.3) Παθητικός Δροσισμός:

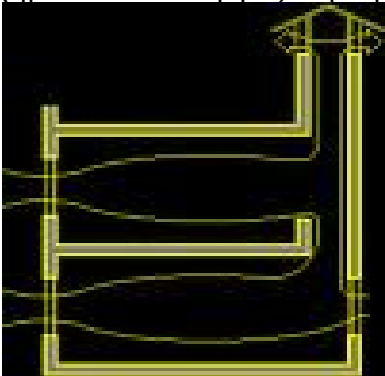
Με ακριβή προσδιορισμό, ο όρος παθητική ψύξη εφαρμόζεται μόνο σε αυτές τις διαδικασίες διάχυσης θερμότητας που πραγματοποιούνται με φυσικό τρόπο, δηλαδή χωρίς τη μεσολάβηση μηχανικών στοιχείων ή ενεργειακή μεταφορά. Παραδείγματα αυτού περιλαμβάνουν φυσικό αερισμό, ψύξη εδάφους, ψύξη από εξάτμιση και ακτινοβολία.

Η λειτουργία των παθητικών συστημάτων και τεχνικών φυσικής ψύξης βασίζεται σε τέσσερις βασικές αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού των κτιρίων. Δηλαδή, στη μείωση των ηλιακών και θερμικών κερδών στο περίβλημα του κτιρίου, στην απόρριψη της θερμότητας από το εσωτερικό του κτιρίου προς το περιβάλλον, στην αξιοποίηση της θερμοχωρητικότητας του κτιρίου σαν ρυθμιστή της εσωτερικής θερμοκρασίας και τέλος στην βελτίωση της θερμικής άνεσης.

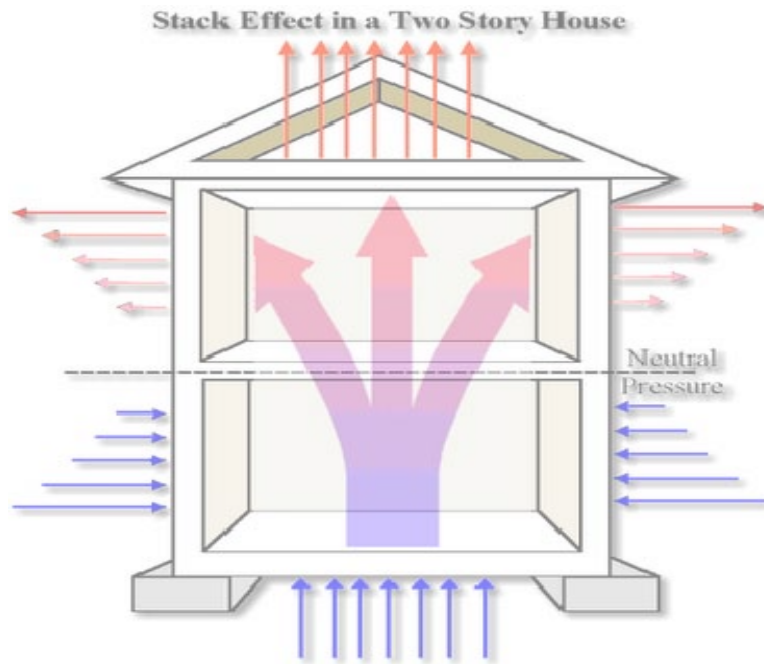
Όσο αφορά την ηλιοπροστασία (θερμική προστασία) οι μέθοδοι που ακολουθούνται είναι: κατάλληλη σκίαση των ανοιγμάτων, ανακλαστικά επιχρίσματα εξωτερικών επιφανειών, φράγμα ακτινοβολίας και φυτεμένο δώμα.

Ο φυσικός αερισμός μπορεί να παράγει σημαντικό ψυκτικό αποτέλεσμα, που εξαρτάται από τη διαμόρφωση του κτιρίου στην περιοχή και στους χώρους που το περιβάλλουν, τη διεύθυνση και την ισχύ των ρευμάτων αέρα και την ώρα της ημέρας. Για τον φυσικό αερισμό του κτιρίου εφαρμόζονται οι εξής τεχνικές: διαμπερής φυσικός αερισμός (ημερήσιος-νυκτερινός), υβριδικός αερισμός (ανεμιστήρες οροφής κλπ), καμινάδα ή πύργος αερισμού (φυσικός ελκυσμός), ηλιακή καμινάδα και τέλος αεριζόμενο κέλυφος.

Σχήμα 1.3.2: Πύργος αερισμού.

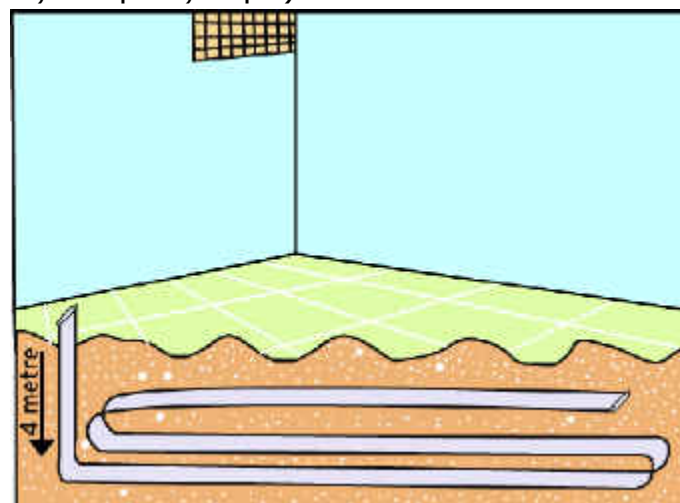


Σχήμα 1.3.1: Διαμπερής νυκτερινός αερισμός.

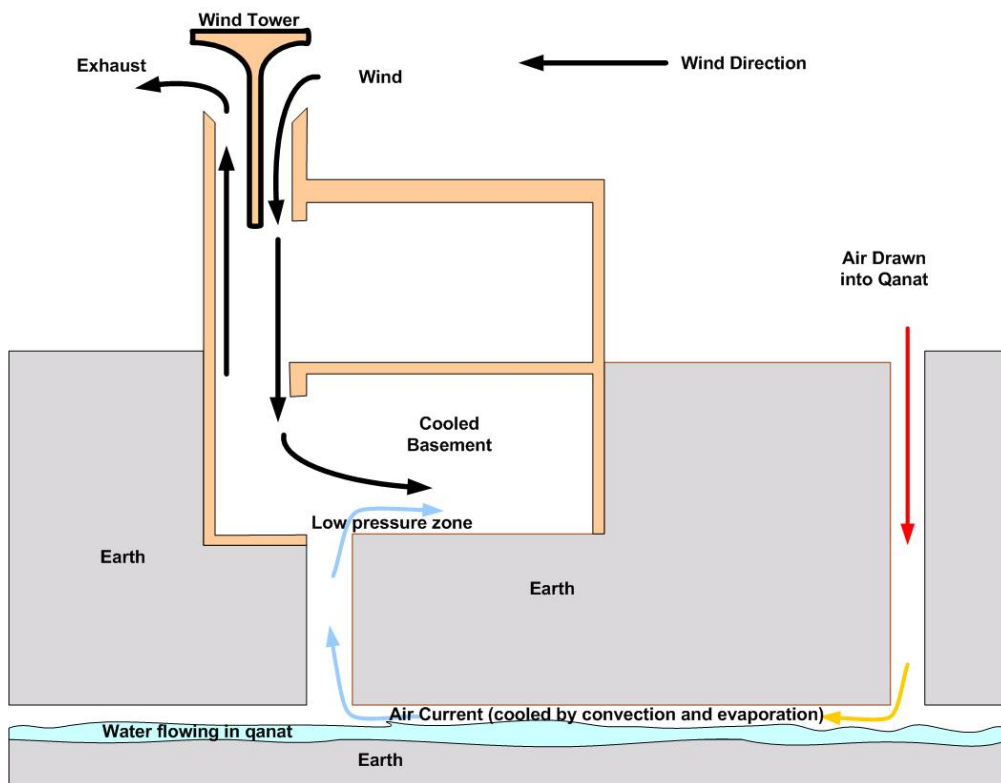


Σχήμα 1.3.3: Φυσικός αερισμός- το φαινόμενο της καμινάδας, σχηματική αναπαράσταση της κατανομής πίεσης του αέρα σε ένα σπίτι δύο ορόφων.

Η αύξηση της επαφής του κτιρίου με το έδαφος μπορεί να παράσχει πρόσθετη ψύξη. Σε όλη τη διάρκεια του έτους οι θερμοκρασίες κάτω από την επιφάνεια του εδάφους είναι πιο σταθερές από τις θερμοκρασίες του αέρα, το οποίο είναι σημαντικά πιο ψυχρό από την επιφάνεια ή τις θερμοκρασίες του αέρα κατά το θέρος. Παραδείγματα αποτελούν τα υπόσκαφα ή ημιυπόσκαφα κτίρια (κτισμένα σε ένα ποσοστό κάτω από το έδαφος) καθώς και τα υπεδάφια συστήματα αγωγών (εναλλάκτες εδάφους-αέρα).

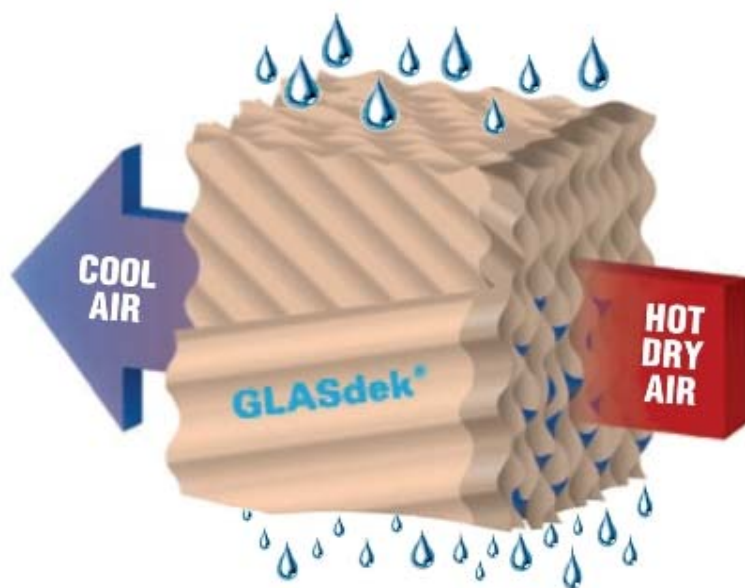


Σχήμα 1.3.4:Υπεδάφιο σύστημα αγωγών.



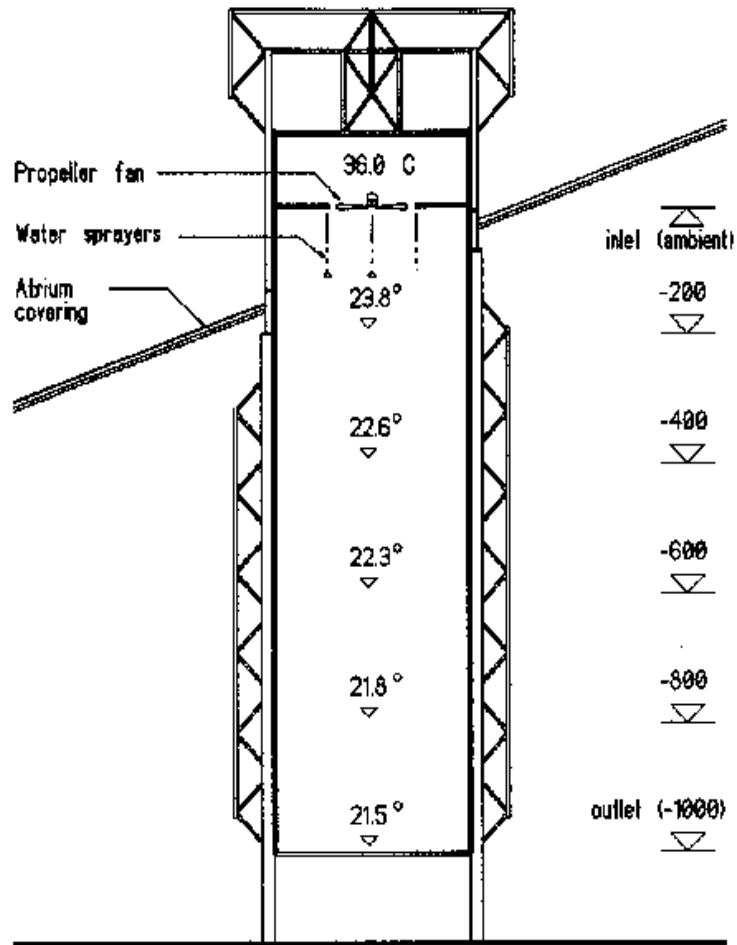
Σχήμα 1.3.5: Ψύξη κτιρίου με εκμετάλλευση του υπεδάφους.

Ο εξατμιστικός δροσισμός βασίζεται στις φυσικές αρχές της άμεσης και έμμεσης ψύξης από εξάτμιση. Αναλυτικότερα, η αλλαγή φάσης του νερού από υγρό σε ατμό συνοδεύεται από την ανάληψη μιας ποσότητας αισθητής θερμότητας από τον περιβάλλοντα αέρα. Στην άμεση ψύξη από εξάτμιση η διαδικασία αυτή χαμηλώνει τη θερμοκρασία ξηρού βολβού του αέρα, ενώ αυξάνει το περιεχόμενο της υγρασίας του.

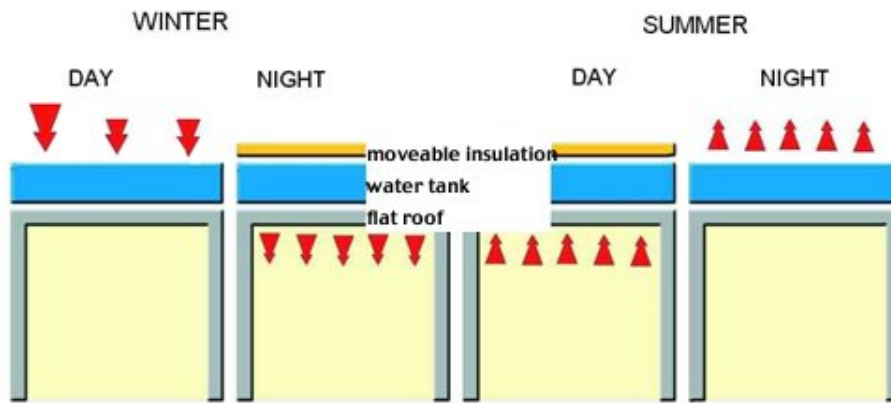


Σχήμα 1.3.6: Σχηματική αναπαράσταση άμεσης ψύξης από εξάτμιση.

Η διαδικασία της έμμεσης ψύξης εξάτμισης βασίζεται στο φαινόμενο κατά το οποίο, όταν γίνεται εξάτμιση στο εσωτερικό ενός σφραγισμένου δοχείου, όπως πχ ένας σωλήνας, η επιφανειακή του θερμοκρασία χαμηλώνει. Ο αέρας που το περιβάλλει εξωτερικά ψύχεται και αυτός, χωρίς όμως καμία αύξηση στην περιεχόμενη υγρασία. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται στα κτίρια είναι οι πύργοι δροσισμού και οι ψυκτικές μονάδες εξάτμισης(άμεσης-έμμεσης ή και συνδυασμένης εξάτμισης).



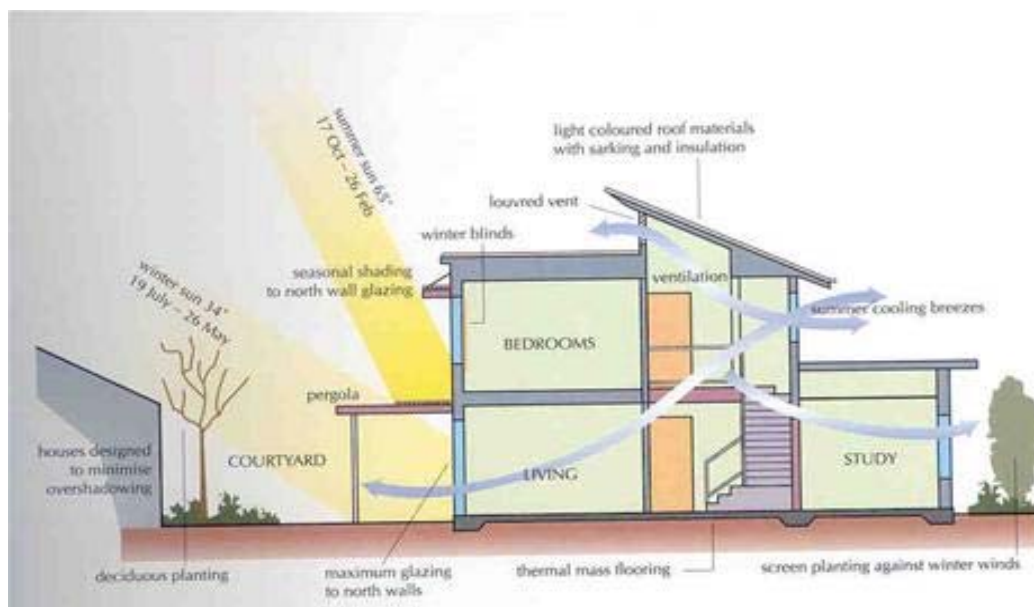
Σχήμα 1.3.7: Πύργος ψύξης-δροσισμού.



Σχήμα 1.3.8: Εξατμιστική εγκατάσταση σε κτίριο με κινητή μόνωση. Το χειμώνα συγκρατείται η θερμότητα της ημέρας, ενώ το θέρος αποβάλλεται.

Η ψύξη δια ακτινοβολίας είναι άλλη μια μέθοδος παθητικού δροσισμού που συναντάται σε κτίρια. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στο ότι θερμότητα μπορεί να χαθεί μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα θερμό σώμα σε ένα ψυχρότερό του. Αυτό μπορεί να έχει πρακτική χρήση επιτρέποντας στη θερμότητα που φορτίζει τον ιστό του κτιρίου κατά τη διάρκεια της ημέρας να χαθεί με ακτινοβολία από τις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου στο νυκτερινό ουρανό (μεταλλικός ακτινοβολητής). Η μέθοδος αυτή θα περιγραφεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο μιας και αποτελεί το αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας.

Τέλος, συμπληρωματικά με τις μεθόδους παθητικού δροσισμού που αναφέρθηκαν, η τροποποίηση του μικροκλίματος γύρω από το κτίριο μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση των συνθηκών άνεσης μέσα και γύρω από αυτό, ενώ περιορίζει τα φορτία ψύξης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τον περιορισμό των εξωτερικών θερμοκρασιών, με ηλιακή προστασία, σχηματισμό ρευμάτων αέρα και με εξάτμιση και διαπνοή φυτών.



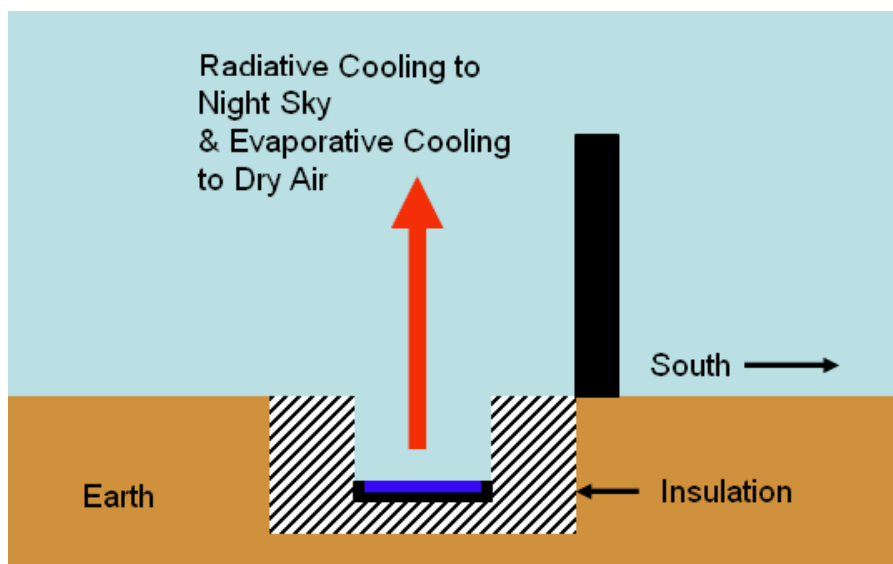
Σχήμα 1.3.9: Εφαρμογή βιοκλιματικού σχεδιασμού σε κατοικία με ταυτόχρονη εκμετάλλευση του μικροκλίματος.

1.4) Ψύξη δια Ακτινοβολίας:

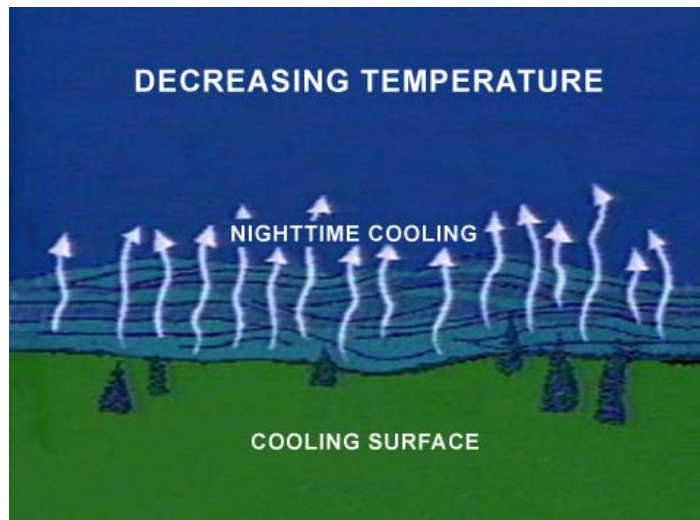
Σε προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά στις διάφορες εφαρμογές παθητικών συστημάτων και τεχνικών φυσικού δροσισμού στα κτίρια. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί αναλυτικά η μέθοδος της ψύξης δια ακτινοβολίας, τις φυσικές αρχές στις οποίες βασίζεται, τις εφαρμογές της και τις διάφορες παραλλαγές της που μπορούν να εφαρμοστούν.

Η διαδικασία της ψύξης θα μπορούσε να είναι μια πολύ απλή υπόθεση αν μπορούσαμε να αξιοποιήσουμε το διάστημα σαν «θερμική δεξαμενή». Εκεί, αρκετά μακριά από την γήινη ατμόσφαιρα συναντούνται θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν (-273° Kelvin) . Όμως μεταξύ της επιφάνειας της γης και του διαστήματος παρεμβάλλεται η ατμόσφαιρα. Αν και η θερμοκρασίες που παρατηρούνται στην ατμόσφαιρα είναι υψηλότερες αυτών του διαστήματος, ο ουρανός παραμένει μια πολύ καλή θερμική δεξαμενή που προσφέρεται για ψύξη.

Παράδειγμα χρήσης του ουρανού για νυκτερινή ψύξη συναντάται στην βόρεια Αφρική, όπου οι άνθρωποι εκεί παρήγαγαν πάγο παρόλη την υψηλή θερμοκρασία του αέρα. Ένα χαντάκι δίπλα σε έναν χαμηλό τοίχο, γεμίζονταν με μικρά δοχεία νερού. Το νερό ψυχόταν κατά τη διάρκεια της νύχτας, αφού ακτινοβολούσε την θερμότητά του στον ψυχρό ουρανό. Το χαμηλό τοιχίο απέτρεπε τα θερμά επίγεια ρεύματα από το να ζεστάνουν το νερό. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και στα εκτεθειμένα στον ψυχρό ουρανό, παρ-μπριζ των αυτοκινήτων.

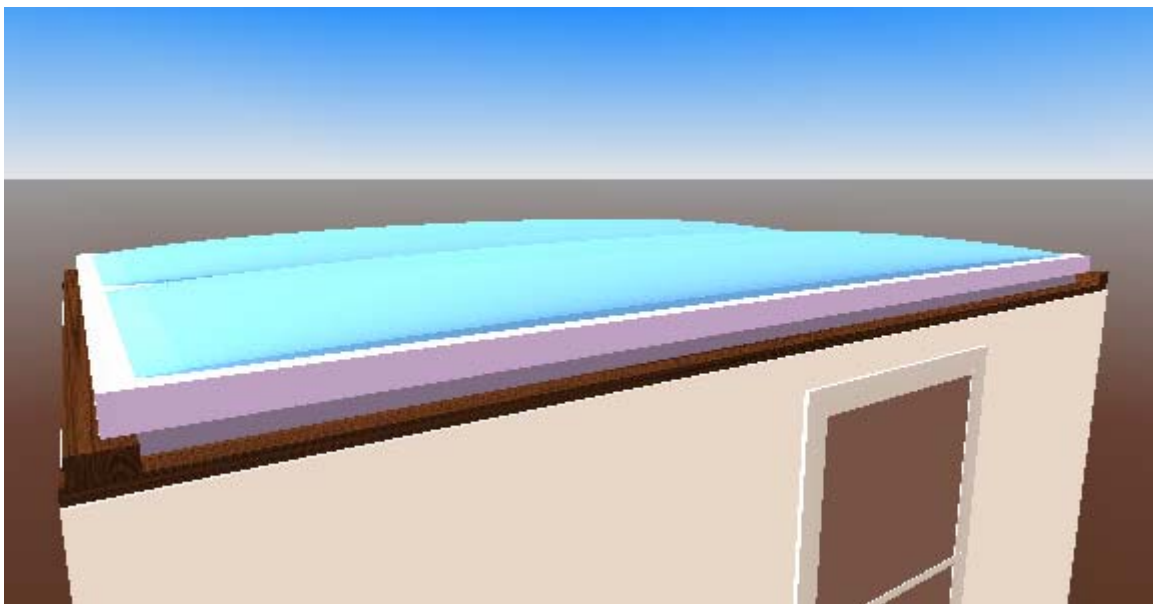


Σχήμα 1.4.1: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου παραγωγής πάγου στη Β. Αφρική. Το νερό στο χαντάκι ψύχεται δια ακτινοβολίας στο νυκτερινό ουρανό, ενώ η μόνωση και το τοιχίο αποτρέπουν την επαφή του νερού με τα ζεστά επίγεια ρεύματα αέρα.



Σχήμα 1.4.2: Το φαινόμενο της ψύξης του εδάφους δια ακτινοβολίας στον ψυχρότερο ουρανό.

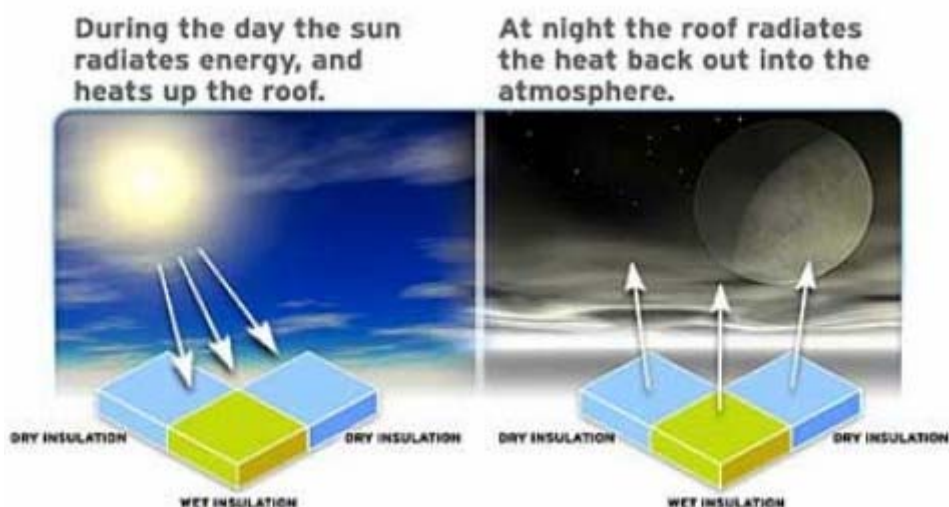
Με τα χρόνια η ψύξη δια ακτινοβολίας βρήκε εφαρμογές στην αρχιτεκτονική και σε άλλες ανθρώπινες εκφάνσεις. Επιφάνειες χωρίς κάποιο σκέπαστρο εκπέμπουν την θερμότητά τους απευθείας στον ψυχρό νυχτερινό ουρανό, ενώ ταυτόχρονα ψύχονται επί προσθέτως από τις ψυχρότερες εξωτερικές επιφάνειες και τα ρεύματα αέρα. Στην εποχή μας, παραδείγματα ψύξης δια ακτινοβολίας είναι οι νυκτερινοί επίπεδοι ακτινοβολητές και οι δεξαμενές νερού στις οροφές των κτιρίων.



Σχήμα 1.4.3: Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής της ψύξης δια ακτινοβολίας σε οροφή κτιρίου.

Η φυσική μας διδάσκει ότι μία οποιαδήποτε επιφάνεια εκπέμπει ακτινοβολία, της οποίας το μήκος κύματος εξαρτάται από την θερμοκρασία της. Για τις συνήθεις θερμοκρασίες που υπάρχουν στη γη, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα διάφορα σώματα κατατάσσεται στην μεγάλη μήκους κύματος ακτινοβολία. Όμοια με τα άλλα ήδη μετάδοσης θερμότητας, η εκπομπή ακτινοβολίας προϋποθέτει διαφορά θερμοκρασίας. Έτσι, όταν μία δεδομένη επιφάνεια "βλέπει" επιφάνειες με παρόμοια θερμοκρασία (πχ το χώρο γύρω από το κτίριο ή άλλα κτίρια) η θερμότητα που μεταδίδεται είναι αμελητέα. Όμως, όταν η δεδομένη επιφάνεια είναι η οροφή ενός κτιρίου και απέναντί της βρίσκεται ο ουράνιος θόλος, η κατάσταση αλλάζει. Η ένταση με την οποία ακτινοβολεί ο ουρανός προς την επιφάνεια της γης, είναι μικρότερη από αυτή που ακτινοβολούν τα διάφορα αντικείμενα προς τα άνω. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχει μια μονοσήμαντη ροή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος από τις επιφάνειες που "κοιτούν" τον ουρανό, με σημαντικά ψυκτικά αποτελέσματα για αυτές.

Η εκπομπή της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος πραγματοποιείται συνεχώς μέρα και νύκτα. Όμως τα σώματα που ακτινοβολούν σε αυτό το εύρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία κατά τις ώρες της ημέρας. Η ηλιακή αυτή ακτινοβολία που απορροφάται από τις επιφάνειες στη γη (εξαρτάται βέβαια από την απορροφητικότητα του σώματος, που έχει να κάνει με το χρώμα του) παράγει θερμότητα, που στις περισσότερες των περιπτώσεων υπερνικάει το ρυθμό ψύξης δια ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, με αποτέλεσμα το οποιοδήποτε σώμα να θερμαίνεται. Συνεπώς, η ψύξη δια ακτινοβολίας είναι αποτελεσματική μόνο κατά τις βραδινές ώρες. Γι'αυτό και το είδος αυτό παθητικής ψύξης αναφέρεται στην βιβλιογραφία και ως ψύξη δια νυκτερινής ακτινοβολίας.



Σχήμα 1.4.4: Η θερμότητα από τον ήλιο που αποθηκεύεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ακτινοβολείται προς τον ουρανό τη νύκτα.

Στο σημείο αυτό θα αναλυθούν οι φυσικοί νόμοι που διέπουν το φαινόμενο της ψύξης δια ακτινοβολίας και θα εξηγηθούν τα διάφορα μεγέθη που εμφανίζονται στη θεωρία.

Κάθε σώμα που βρίσκεται σε μια θερμοκρασία άνω των 0°K εκπέμπει ενέργεια μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η εκπομπή αυτή λαμβάνει χώρα λόγω της κινητικότητας των σωματιδίων του υλικού. Η κινητικότητα των σωματιδίων οφείλεται στην εσωτερική ενέργεια του υλικού, η οποία στην κατάσταση ισορροπίας είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του υλικού. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται λέγεται θερμική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή βρίσκεται σε ένα κομμάτι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταξύ των 0,1 και 100 μικρών (μm).

Κάθε επιφάνεια εκπέμπει θερμική ακτινοβολία, αλλά το πως εκπέμπεται εξαρτάται από την ίδια την επιφάνεια. Είναι όμως δυνατόν με χρήση των νόμων της θερμοδυναμικής να εκτιμηθεί η μέγιστη ποσότητα θερμικής ενέργειας που μπορεί να εκπέμψει ένα σώμα για οποιαδήποτε θερμοκρασία και μήκος κύματος. Ο ιδανικός ακτινοβολητής που θα ακτινοβολούσε αυτή την ενέργεια (μέγιστη) ονομάζεται "μαύρο σώμα" (black body) και αποτελεί το σημείο αναφοράς για τη διαδικασία της εκπομπής ακτινοβολίας για ένα σώμα.

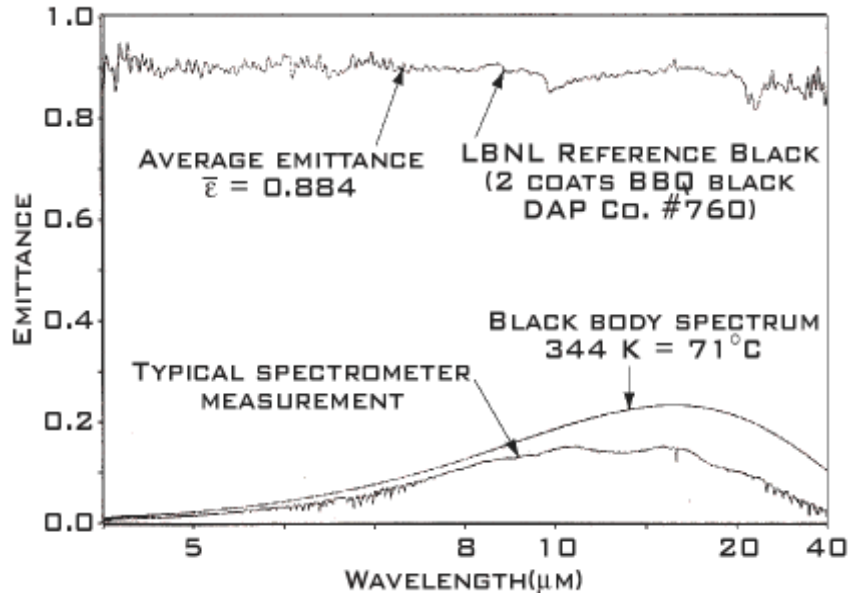
Το μαύρο σώμα ορίζεται ως ένα ιδεατό σώμα το οποίο απορροφά όλη την ακτινοβολία που δέχεται, ασχέτως γωνιών πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και ασχέτως του μήκους κύματος αυτής. Με βάση τον παραπάνω ορισμό, το μαύρο σώμα εκπέμπει τη μέγιστη ακτινοβολία για κάθε μήκος κύματος. Οι φυσικοί νόμοι περιγράφουν τη συμπεριφορά του ιδανικού μαύρου σώματος. Για να υπολογίσουμε την εκπομπή ακτινοβολίας για ένα κοινό σώμα, θα πρέπει να το αναγάγουμε στο μαύρο σώμα χρησιμοποιώντας κατάλληλους συντελεστές.

Μία βασική εξίσωση που περιγράφει την μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεταξύ δύο σωμάτων είναι η ακόλουθη:

$$M = \sigma \cdot F \cdot \epsilon \cdot A \cdot (T_1 - T_2)^4$$

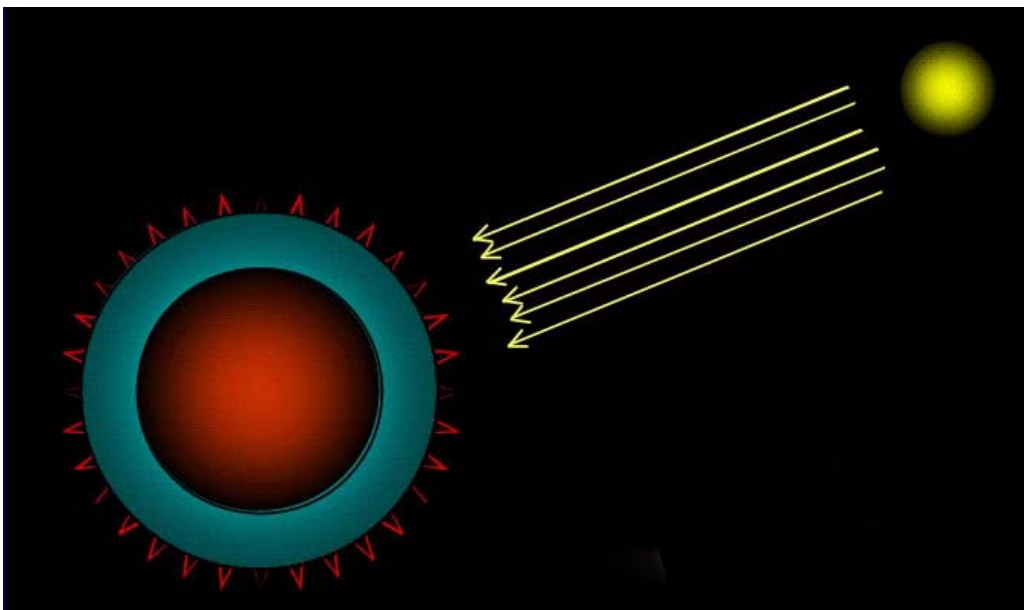
όπου M είναι ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας δια ακτινοβολίας και μετριέται σε Watt, σ είναι η σταθερά των Stefan-Boltzmann, η οποία συμμετέχει σε όλες τις εξισώσεις που αφορούν εκπομπή ακτινοβολίας και αφορά την αφετική ικανότητα του μαύρου σώματος ($M = \sigma \cdot T^4$), ενώ ισχύει: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Το F είναι ένας συντελεστής γεωμετρίας και αφορά το πόσο καλά "βλέπει" το κάθε σώμα το άλλο και παίρνει τιμές μεταξύ του μηδέν και της μονάδας. Στις περισσότερες εφαρμογές θεωρούμε $F=1$, αφού ο ακτινοβολητής στη οροφή του κτιρίου "βλέπει" σχεδόν εξολοκλήρου μόνο τον ουρανό. Με ϵ συμβολίζουμε την αφετική ικανότητα (emittance) του ακτινοβολητή και παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Η μονάδα βέβαια αντιστοιχεί στο μαύρο σώμα, όπως προκύπτει και από το

νόμο των Stefan-Boltzmann: $M = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$. Αρκετά υλικά σαν το τούβλο, το γυαλί, το ξύλο και το τσιμέντο έχουν αφετική ικανότητα ϵ κοντά στο 0,85. Το A είναι το εμβαδό του ακτινοβολητή σε m^2 και T_1 , T_2 είναι οι θερμοκρασίες του ακτινοβολητή και του ακτινοβολουμένου σώματος αντίστοιχα μετρούμενες σε Kelvin.



Σχήμα 1.4.5: Γραφική παράσταση της αφετικής ικανότητας προς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και του μαύρου σώματος συγκεκριμένα.

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό της μετάδοσης θερμότητας δια ακτινοβολίας είναι, ότι δεν χρειάζεται να παρεμβάλλεται κάποιο μέσο μεταξύ του θερμότερου και του ψυχρότερου σώματος για να γίνει η ψύξη του πρώτου. Αυτό είναι εφικτό χάρη στην ηλεκτρομαγνητική φύση της ακτινοβολίας, η οποία ταξιδεύει ακόμη και στο κενό, όπως γνωρίζουμε από τη φυσική.



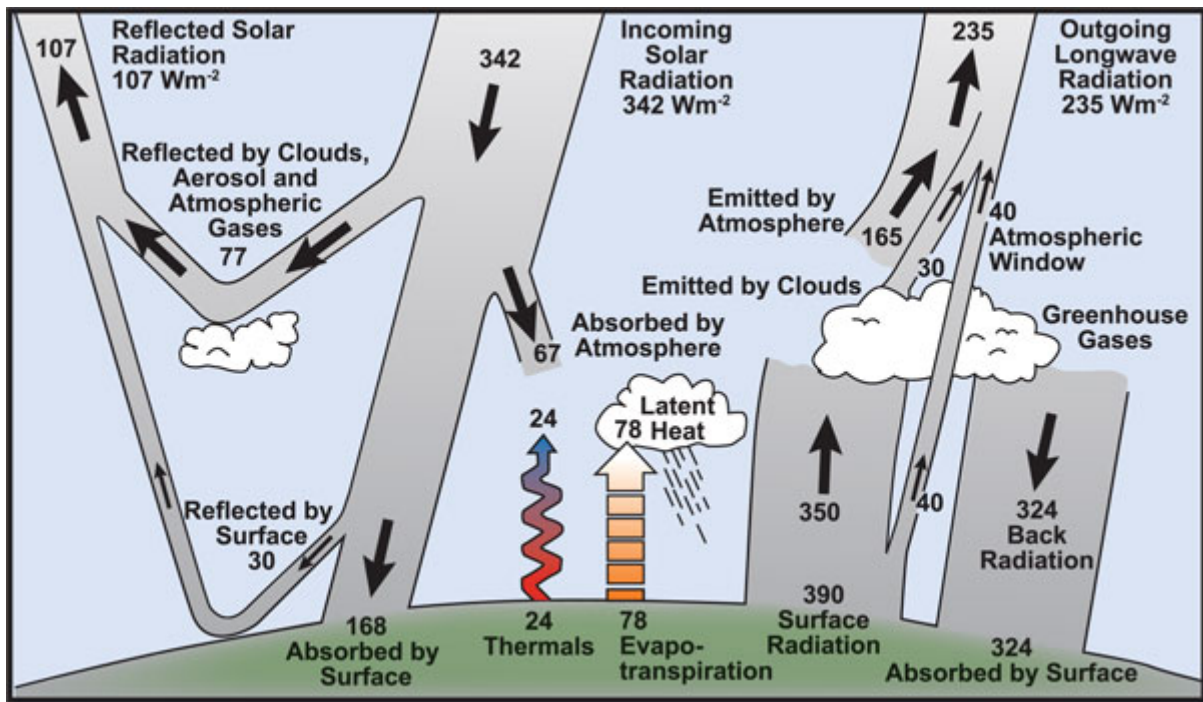
Σχήμα 1.4.6: Η ηλεκτρομαγνητική φύση της θερμικής ακτινοβολίας της επιτρέπει να μεταδίδεται και στο κενό. (π.χ. Ήλιος-πλανήτες).

Το δεύτερο χαρακτηριστικό που κάνει τη μετάδοση θερμότητας δια ακτινοβολίας να διαφέρει από τους άλλους δύο μηχανισμούς της μετάδοσης θερμότητας(αγωγή-συναγωγή), είναι ότι ενώ η αγωγή και η συναγωγή σταματούν όταν τα δύο θερμοδυναμικά συστήματα μεταξύ των οποίων γίνεται η μετάδοση θερμότητας φτάσουν στην ίδια θερμοκρασία, η εκπομπή ακτινοβολίας συνεχίζεται και μεταξύ όμοιων επιφανειών με παρόμοια θερμοκρασία.Κάτι που δείχνει ότι αυτή η ισορροπία είναι δυναμικό φαινόμενο.

Με βάση τις φυσικές αρχές και τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, στο σημείο αυτό θα γίνει ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν την ψύξη δια ακτινοβολίας πιο συγκεκριμένα πλέον.

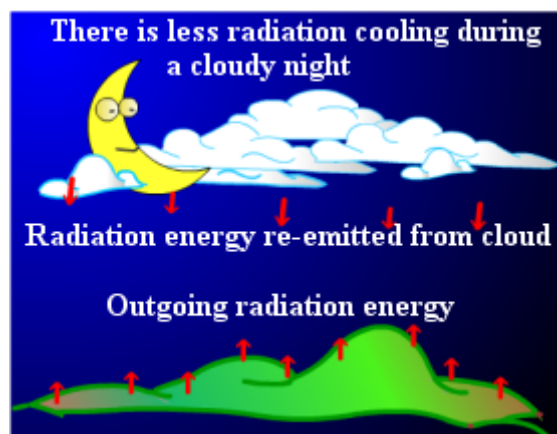
"Ένας σημαντικός παράγοντας που αφορά την ψύξη δια ακτινοβολίας είναι η ατμοσφαιρική ακτινοβολία. Κάθε σώμα που βρίσκεται στην γη και είναι εκτεθειμένο στον ουρανό δέχεται ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος από την ατμόσφαιρα. Η ατμόσφαιρα αποτελείται κυρίως από άζωτο (περίπου 78%) και οξυγόνο (περίπου 21%), ενώ τα υπόλοιπα συστατικά είναι κυρίως υδρατμοί, διοξείδιο του άνθρακα CO₂ και σκόνη. Τα δύο πρώτα, άζωτο και οξυγόνο δεν παίζουν σημαντικό ρόλο σε αυτό το εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, αντιθέτως οι υδρατμοί δέχονται κ εκπέμπουν ακτινοβολία με μήκη κύματος μεταξύ 6,6 και 18 μ, ενώ το CO₂ ακτινοβολεί και ακτινοβολείται στα 15μ. Τα σύννεφα δε, αυξάνουν κατά πολύ την εισερχόμενη ατμοσφαιρική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή, που εκπέμπεται από τον ουρανό προς τα κάτω, δηλαδή τη γη, ονομάζεται "ατμοσφαιρική πίσω ακτινοβολία" (atmospheric back radiation).

Η ατμοσφαιρική πίσω ακτινοβολία εξαρτάται κυρίως από τις νεφώσεις και σε κάποιο βαθμό από τους υδρατμούς του ατμοσφαιρικού αέρα. Σε συνθήκες καθαρού ουρανού(χωρίς νεφώσεις) και με χαμηλή υγρασία, η ατμοσφαιρική ακτινοβολία περιορίζεται σε δύο διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αυτές είναι από 3 ως 8 μ και από 13 ως 20 μ. Μεταξύ 8 και 13 μ η ατμοσφαιρική πίσω ακτινοβολία είναι πολύ μικρή και γι'αυτό το λόγω το διάστημα αυτό 8-13μ ονομάζεται "ατμοσφαιρικό παράθυρο" (atmospheric window). Όσο αυξάνει η συγκέντρωση υδρατμών στον αέρα, τόσο αυξάνει και η ένταση της πίσω ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας στο διάστημα 8-13μ, με αποτέλεσμα περισσότερη ακτινοβολία να εκπέμπεται από την ατμόσφαιρα προς τη γη.



Σχήμα 1.4.7: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος ήλιος-ατμόσφαιρα-γη. Η μισή σχεδόν εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από την ατμόσφαιρα και τη γη, ενώ λόγω των νεφώσεων και των αερίων του θερμοκηπίου τα 2/3 της ακτινοβολίας της γης προς τα άνω, επιστρέφουν τελικά σε αυτή.

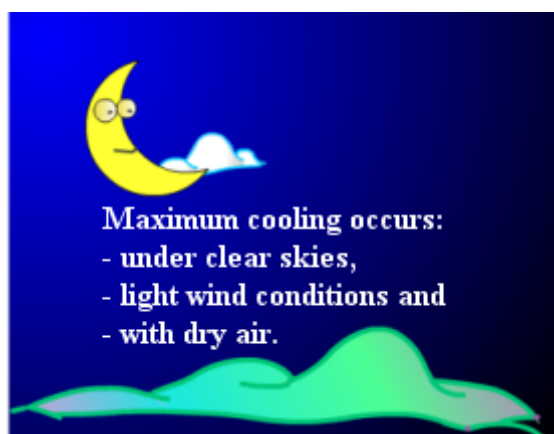
Τα σύννεφα και κυρίως τα χαμηλά νέφη, εκπέμπουν σε όλο το φάσμα της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος και τελικά το φαινόμενο του ατμοσφαιρικού παραθύρου να εξαφανίζεται πρακτικά. Συνεπώς, σε συνθήκες αρκετής νέφωσης η ατμοσφαιρική εκπομπή ακτινοβολίας παίρνει τη μέγιστη τιμή της.



Σχήμα 1.4.8: Σε μια συνεφιασμένη νύκτα, η πίσω ατμοσφαιρική ακτινοβολία αυξάνεται, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της ψύξης δια ακτινοβολίας.

Από τα άλλα συστατικά της ατμόσφαιρας μόνο το όζον και τα αεροζόλ ενισχύουν την θερμική ατμοσφαιρική ακτινοβολία, αλλά σε αμελητέο βαθμό. Το ίδιο έχει αποδειχθεί και για την ατμοσφαιρική ρύπανση των πόλεων.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όταν ένα σώμα στην επιφάνεια της γης εκπέμπει θερμική ακτινοβολία στις συνθήκες του ατμοσφαιρικού παραθύρου (χαμηλή σχετική υγρασία και καθαρός ουρανός), τότε η θερμοκρασία του ακτινοβολητή πέφτει. Αυτό όμως γίνεται μόνο σε συνθήκες καθαρού ουρανού, όπου η θερμική ατμοσφαιρική ακτινοβολία είναι λιγότερη και άρα επιτρέπει στον ακτινοβολητή να εκπέμψει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας προς τον ψυχρό ουρανό. Αντιθέτως, τα σύννεφα απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας και την επιστρέφουν προς τη γη, μειώνοντας έτσι το ρυθμό που ψύχεται ο επίγειος ακτινοβολητής.

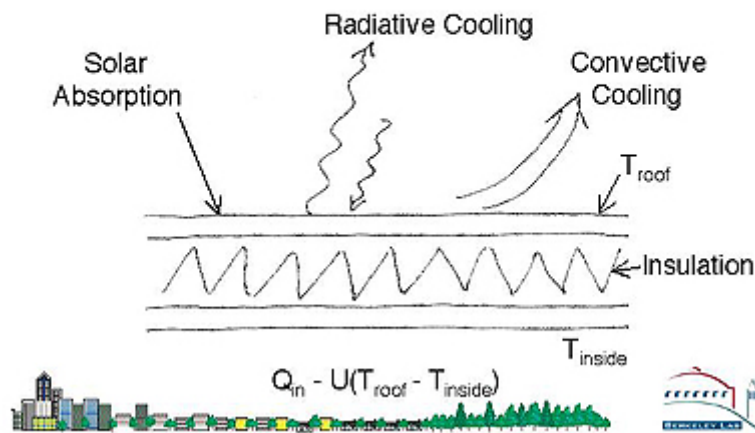


Σχήμα 1.4.9: Ειδανικές συνθήκες για την ψύξη με ακτινοβολία: καθαρός ουρανός, λίγος αέρας και άνευ υγρασίας.

Επιπλέον, μετρήσεις έχουν δείξει ότι η ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που προέρχεται από την κορυφή του ουράνιου θόλου είναι λιγότερη αυτής που έρχεται από τον ορίζοντα. Αυτό συμβαίνει γιατί το οπτικό πάχος της ατμόσφαιρας είναι μικρότερο κοντά στο ζενίθ παρά προς τον ορίζοντα. Άρα, η βέλτιστη θέση για έναν επίπεδο ακτινοβολητή είναι οριζόντια και αυτό δεν έχει να κάνει με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, κάτι που επηρεάζει μόνο τους ηλιακούς θερμοσίφωνες.

Γνωρίζοντας πλέον όχι μόνο το φυσικό υπόβαθρο που εξηγεί την εκπομπή θερμικής ενέργειας μέσω ακτινοβολίας, αλλά και τους παράγοντες που την επηρεάζουν, μπορούν να εξεταστούν οι εφαρμογές της μεθόδου για την ψύξη κτιρίων. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί, ότι δεν είναι πάντα εφικτή-αποδοτική η μέθοδος της ψύξης δια ακτινοβολίας, μιας και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την ίδια ευχέρεια και αποδοτικότητα η παραγόμενη ψυκτική ενέργεια για κάθε κτίριο.

Roof Heat Transfer



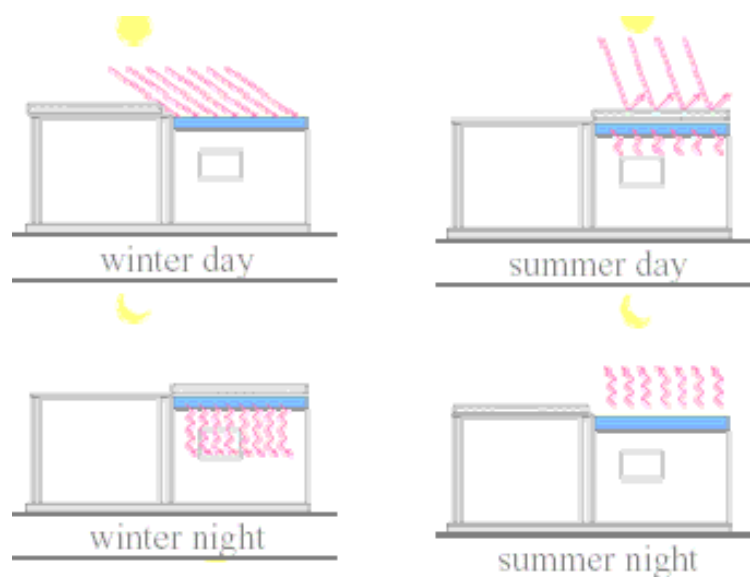
Σχήμα 1.4.10: Σχηματική αναπαράσταση της μετάδοσης θερμότητας σε μία οροφή. Θέρμανση από τον ήλιο και ψύξη με συναγωγή και ακτινοβολία.

Σήμερα πλέον έχουν μελετηθεί αρκετοί τρόποι εφαρμογής της ψύξης δια ακτινοβολίας στα κτίρια. Άλλες από αυτές είναι εύκολες και αποδοτικές στην εφαρμογή τους, άλλες όμως δύσκολες και δαπανηρές και γι'αυτό παρέμειναν σε ερευνητικό επίπεδο ακόμη.

Η πιο απλή τεχνική παθητικού δροσισμού με χρήση ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος είναι να βαφτεί με λευκό χρώμα η οροφή του κτιρίου. Το λευκό χρώμα δεν έχει κάποιο πλεονέκτημα όσο αφορά τη νυκτερινή εκπομπή ακτινοβολίας, αλλά εν συγκρίσει με το μαύρο έχει μικρότερη απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και άρα συγκρατεί λιγότερη θερμότητα. Έτσι μπορεί ευκολότερα να ψυχθεί το βράδυ εκπέμποντας ακτινοβολία. Η τεχνική αυτή παθητικής ψύξης πηγάζει από την παραδοσιακή αρχιτεκτονική της Μεσογείου, όπως τα νησιά των Κυκλάδων επί παραδείγματι. Μετρήσεις έδειξαν ότι με αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί ψυκτικό φορτίο της τάξης των $0,014 \text{ kWh m}^{-2} \text{ day}^{-1}$. Αυτή η μέθοδος αποτελεί την απλούστερη εφαρμογή με μικρά σχετικά αποτελέσματα και γι'αυτό είναι αποδοτική μόνο για πολύ ζεστά κλίματα.

Μια άλλη μέθοδος είναι η κινητή μόνωση στην οροφή ενός κτιρίου. Για να εφαρμοστεί, χρειάζεται ένα μονωτικό υλικό που να μπορεί να καλύψει την οροφή. Η λειτουργία του είναι η ακόλουθη: κατά τις νυκτερινές ώρες η μόνωση αφαιρείται και αποκαλύπτει την οροφή του κτιρίου στον ψυχρό ουρανό. Κατά τις ώρες της ημέρας όμως η οροφή του κτιρίου καλύπτεται από την κινητή μόνωση και έτσι ελαχιστοποιείται η ηλιακή ενέργεια (άρα και θερμική) που αποθηκεύεται στη θερμική μάζα του κτιρίου. Η μονωτική επιφάνεια μπορεί να

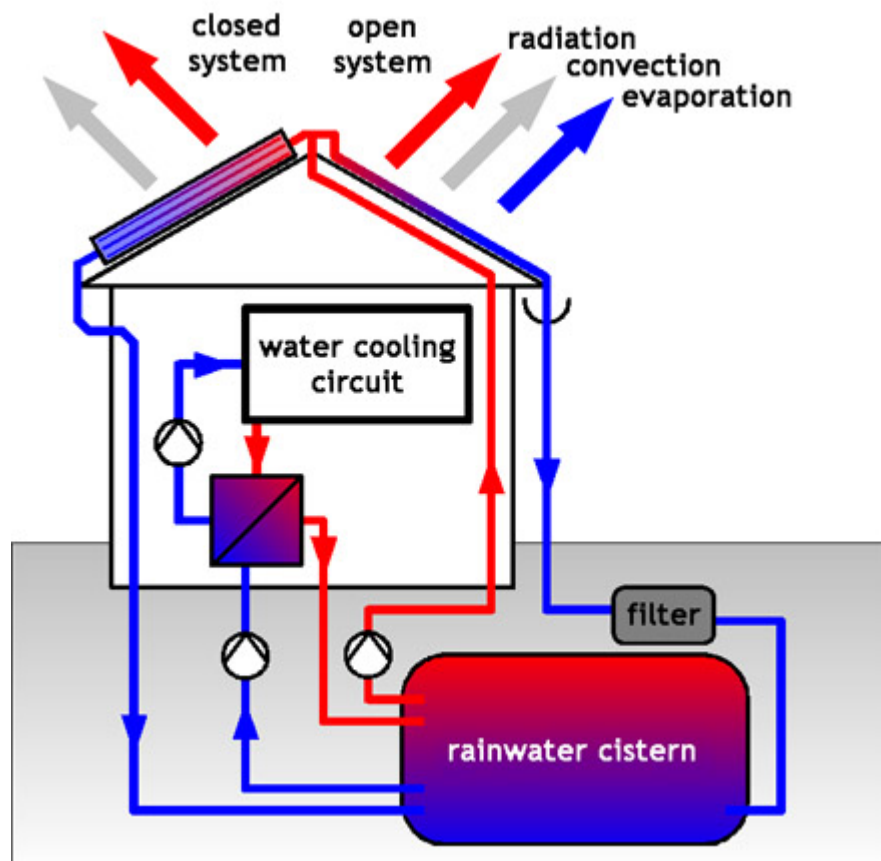
μετακινείται χειροκίνητα ή και αυτόματα. Το δυνατό σημείο αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κατά τους χειμερινούς μήνες για θέρμανση του κτιρίου αντιστρέφοντας τη λειτουργία της. Δηλαδή η θερμική μάζα αφήνεται εκτεθειμένη στον ήλιο και μονώνεται κατά τη διάρκεια της νύκτας με στόχο τη διατήρηση της ηλιακής (θερμικής) ενέργειας μέσα στο κτίριο. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι αυξάνεται το κόστος, μιας και πρέπει να εγκατασταθεί επιπρόσθετος μηχανισμός για τη μετακίνηση της μόνωσης, πόσο μάλλον αν υπάρχει και αυτοματισμός. Το δεύτερο είναι ότι αφού πρόκειται για απλή μέθοδο παθητικού δροσισμού και δεν εμπλέκεται η κίνηση κάποιου ρευστού, το ψυκτικό φορτίο δεν μεταφέρεται σε όλη την κατασκευή, παρά μόνο στην οροφή του κτιρίου και στον όροφο κάτωθεν αυτής. Άρα δεν είναι αποδοτική για ένα κτίριο με πολλούς ορόφους.



Σχήμα 1.4.11: Η κινητή μόνωση επιτρέπει την ψύξη του κτιρίου τις νυκτερινές ώρες κατά το θέρος και την θέρμανση αυτού τις χειμερινές ημέρες.

Μία παραλλαγή της προηγούμενης μεθόδου είναι να υπάρχει κινητή θερμική μάζα στο κτίριο. Δηλαδή, κάτω από την κινητή μόνωση υπάρχει θερμομονωμένη δεξαμενή νερού. Κάτω από τη δεξαμενή υπάρχει χώρος, έτσι ώστε το νερό να μπορεί να κυκλοφορήσει σε δίκτυο μέσα στο κτίριο. Έτσι, κατά τη νύκτα η δεξαμενή γεμίζει νερό, το οποίο παραμένει εκτεθειμένο στον ψυχρό ουρανό και ψύχεται δια ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Το πρωί, η δεξαμενή καλύπτεται και το ψυχρό νερό αρχίζει να κυκλοφορεί δια μέσου του υπάρχοντος δικτύου απορροφώντας θερμότητα από το κτίριο. Εν συγκρίσει με την προηγούμενη μέθοδο, η παρούσα έχει αρκετά αυξημένο κόστος μιας και απαιτεί την κατασκευή καλά μονωμένης δεξαμενής νερού. Επιπλέον, περισσότερα χρήματα και προσοχή κατά το σχεδιασμό είναι απαραίτητα, μιας και το κτίριο θα πρέπει να αντέχει το επιπρόσθετο βάρος αλλά και η μόνωση να

είναι τέτοια ώστε να μην υπάρξουν φαινόμενα απορρόφησης του νερού από τα άλλα υλικά του κτιρίου. Το πλεονέκτημα της μεθόδου έναντι της προηγούμενης είναι ότι πλέον το ψυκτικό φορτίο μπορεί να μεταφερθεί και σε άλλους χώρους του κτιρίου, χάρη στο δίκτυο του νερού.

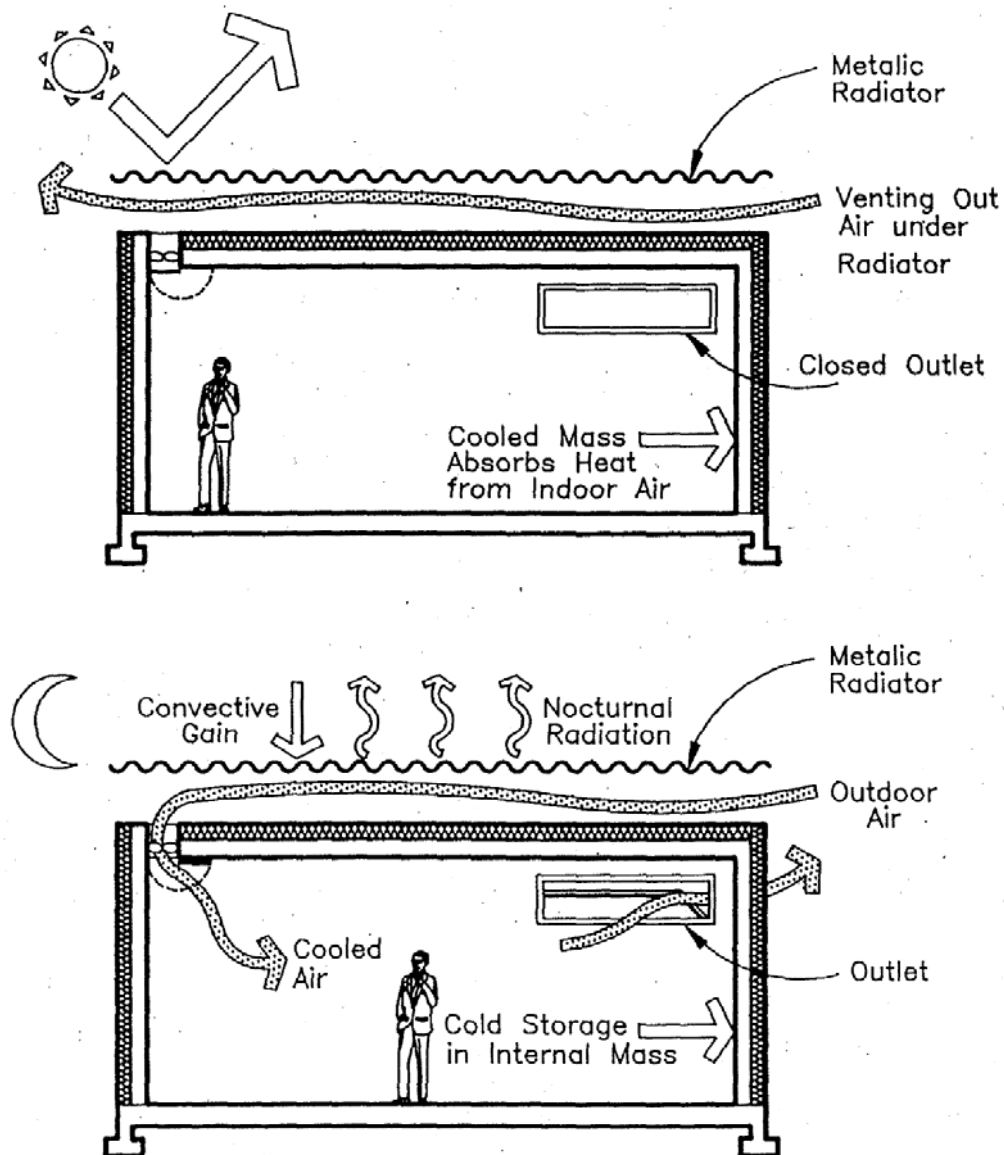


Σχήμα 1.4.12: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος ψύξης σε κτίριο. Τα βρόχινα νερά συγκεντρώνονται σε δεξαμενή, όπου με αντλίες αναγκάζονται σε κυκλοφορία μέσα στο κτίριο (για την ψύξη αυτού), αλλά και στην οροφή αυτού. Εκεί, μπορεί να υπάρχει είτε ανοικτό, είτε κλειστό σύστημα. Στο μεν κλειστό το νερό ψύχεται δια συναγωγής και ακτινοβολίας, στο δε ανοικτό και δια εξάτμισης.

Η επόμενη τεχνική που εφαρμόζεται είναι ένας ελαφρύς μεταλλικός ακτινοβολητής για την ψύξη του περιβάλλοντα αέρα. Ο μεταλλικός αυτός ακτινοβολητής εγκαθίσταται πάνω από την οροφή του κτιρίου με μονωμένη την κάτω πλευρά του. Η εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος ψύχει αρχικά τον ακτινοβολητή κάτω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ακολούθως όμως, μέσω συναγωγής με τον γύρω αέρα ο ακτινοβολητής παίρνει θερμότητα από τον αέρα και αυτό συνεχίζεται μέχρι να επέλθει ισορροπία και τελικά να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του ακτινοβολητή λίγο κάτω από αυτήν του περιβάλλοντα αέρα. Όμως, η ταχύτητα του αέρα έχει σημασία, μιας και όσο αυξάνει η ταχύτητα του αέρα, τόσο ανεβαίνει και η θερμοκρασία της

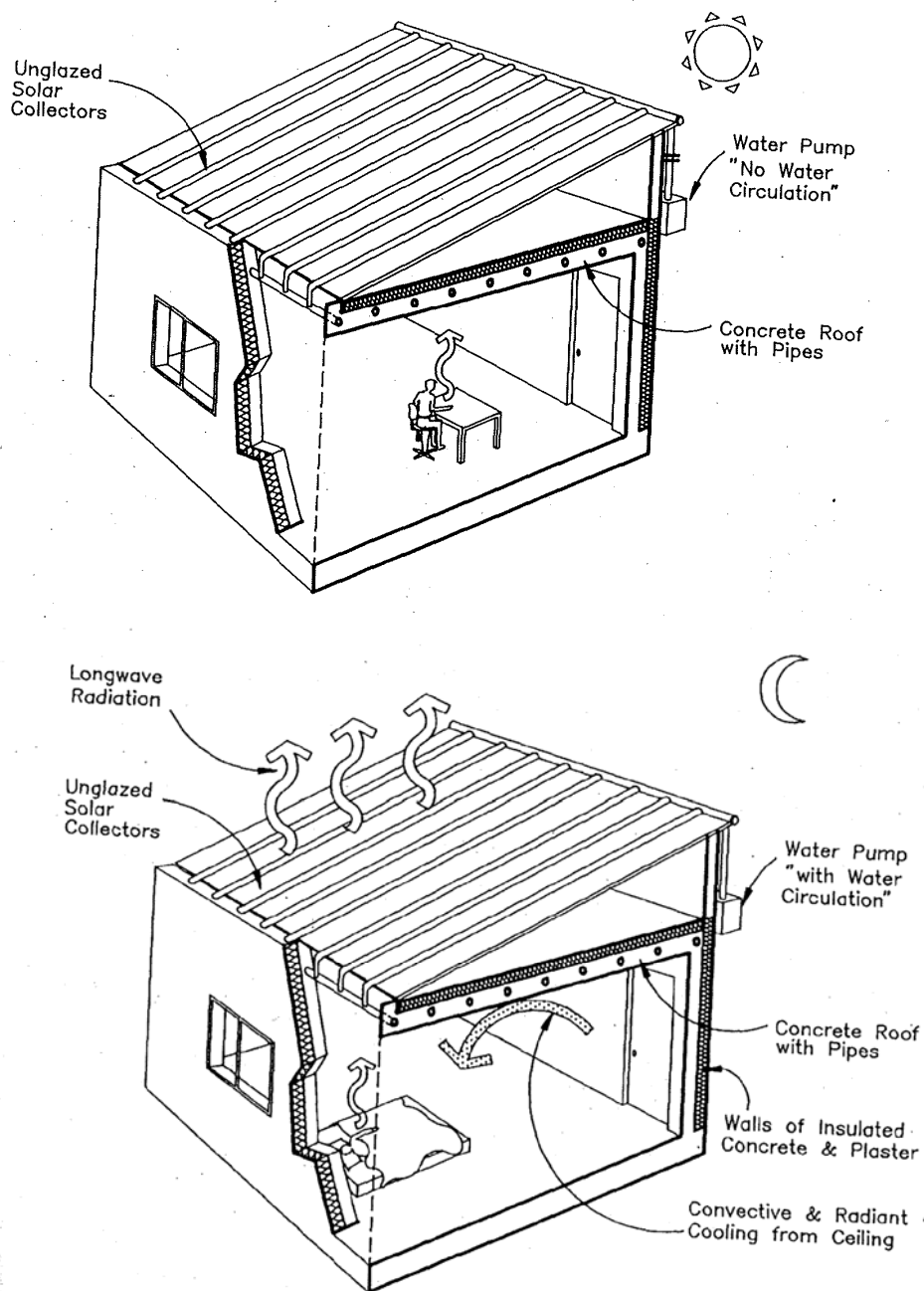
επιφάνειας που ακτινοβολεί, πλησιάζοντας αυτή του περιβάλλοντα αέρα.

Με αυτόν τον τρόπο όμως ένα μονωμένο κτίριο δεν θα μπορούσε να ψυχθεί, επειδή παρουσιάζει αυξημένη θερμική αδράνεια. Για να χρησιμοποιηθεί όμως η ψυκτική ενέργεια που προκύπτει από την εκπομπή ακτινοβολίας, πρέπει αυτή να μεταφερθεί στο εσωτερικό του κτιρίου. Αυτό γίνεται μέσω του αέρα που μπαίνει στο κανάλι που δημιουργείται μεταξύ του ακτινοβολητή και της μόνωσης του κτιρίου. Ο αέρας που εισάγεται στο κανάλι μεταδίδει θερμότητα στον ακτινοβολητή και τελικά φτάνει στο κτίριο αρκετά ψυχρότερος. Εκεί υπάρχουν δύο πιθανά ενδεχόμενα. Είτε να χρησιμοποιηθεί για να ψύξει απευθείας το χώρο και τους ενοίκους και άρα την εσωτερική θερμική μάζα του κτιρίου για την επόμενη μέρα, είτε να οδηγηθεί σε χώρους εντός του κτιρίου με ειδική θερμική μάζα, για χρήση του αποθηκευμένου ψυκτικού φορτίου κατ' επιλογή.



Σχήμα 1.4.13: Αρχή λειτουργίας του μεταλλικού ακτινοβολητή για την ψύξη του περιβάλλοντα αέρα. Την ημέρα ο ζεστός αέρας δεν εισέρχεται στο κτίριο, τη νύκτα όμως μόλις ψυχθεί από τον ακτινοβολητή κυκλοφορεί εντός κτιρίου.

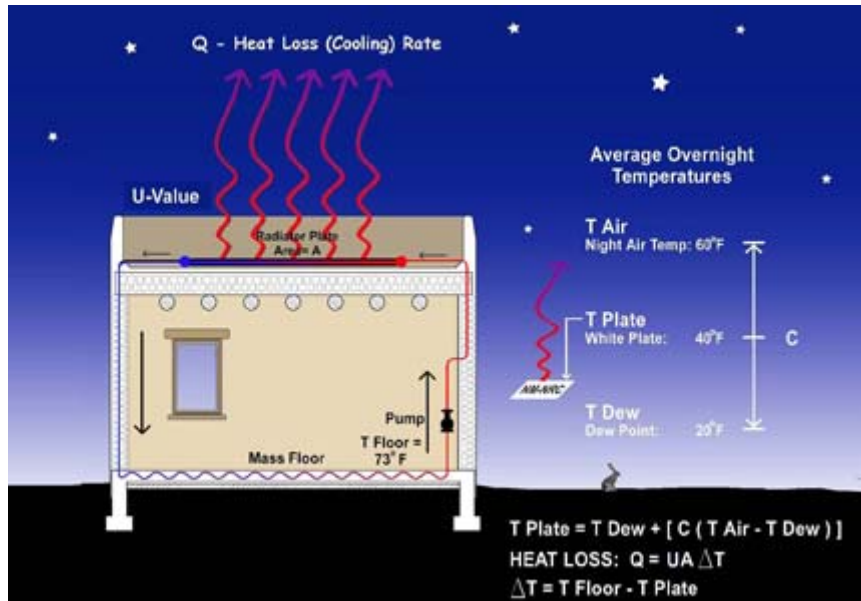
Βέβαια, όλα τα κτίρια δεν έχουν την ίδια χρήση και ανάγκες. Παραδείγματος χάρη υπάρχουν κτίρια που χρησιμοποιούνται το απόγευμα και τη νύκτα από τους ενοίκους, όπως κατοικίες. Σε αυτή την περίπτωση, το ψυκτικό φορτίο αξιοποιείται απευθείας για τις ανάγκες του κτιρίου και δεν χρειάζεται αποθήκευση. Έτσι, η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί ακόμη και σε κτίρια με μικρή θερμική μάζα. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα κτίρια με γραφεία, η ανάγκη για ψυκτική ενέργεια εμφανίζονται κατά τη μέρα. Τότε χρειάζεται το κτίριο να διαθέτει μεγάλη θερμική μάζα ή να έχει χώρο από ειδική κατασκευή για αποθήκευση της ψυκτικής ενέργειας, προκειμένου να είναι διαθέσιμη ώρες μετά από την κάθε νύκτα.



Σχήμα 1.4.14: Εφαρμογή ακτινοβολητή χωρίς υαλοπίνακα με αντλίες σε κτίριο. Κατά τα γνωστά, την ημέρα δεν λειτουργεί το σύστημα, αλλά τη νύκτα η αντλίες κυκλοφορούν το ψυκτικό μέσο (εδώ νερό) στο κτίριο.

Η επόμενη μέθοδος παθητικού δροσισμού με εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, ομοιάζει με το σύστημα του ηλιακού θερμοσίφωνα συνδεδεμένο με αποθηκευτική δεξαμενή. Πρόκειται για έναν πολύ απλό μηχανισμό, ο οποίος μοιάζει σαν έναν επίπεδο θερμοσίφωνα, αλλά χωρίς υαλοπίνακα. Αποτελείται από έναν οριζόντιο ορθογώνιο αεραγωγό, η πάνω πλευρά του οποίου είναι ο ακτινοβολητής, μεταλλικής κατασκευής, ενώ τα υπόλοιπα μέρη του μονώνονται. Η βασική διαφορά μεταξύ του θερμοσίφωνα και του ακτινοβολητή, εκτός βέβαια από την προφανή διαφορά στο σκοπό λειτουργίας τους, είναι ο υαλοπίνακας. Αυτό συμβαίνει γιατί ο υαλοπίνακας ενός θερμοσίφωνα δεν είναι καλός αγωγός της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Μερικοί ακτινοβολητές όμως έχουν ανεμοθώρακα αντ'αυτού. Η παρουσία του ανεμοθώρακα βελτιώνει τη λειτουργία του ακτινοβολητή. Όταν εκκινεί τη λειτουργία του ο ακτινοβολητής, η θερμοκρασία του είναι μεγαλύτερη του περιβάλλοντος αέρα. Έτσι μεταδίδει θερμότητα και ακτινοβολώντας, αλλά και με επαφή στα ρεύματα αέρα. Μετά από κάποια ώρα όμως θα φτάσει σε θερμοκρασία χαμηλότερη του περιβάλλοντος αέρα. Τότε η ψύξη από τον γύρω αέρα θα αναστραφεί και θα γίνει θέρμανση. Σε αυτό το σημείο αποκτά σημασία η ύπαρξη ανεμοθώρακα, αφού σταματάει την μετάδοση θερμότητας από τον αέρα στον ψυχρότερο ακτινοβολητή. Το υλικό του ανεμοθώρακα πρέπει να είναι καλός αγωγός της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας. Λεπτά "φιλμ" από πολυαιθυλένιο (60-100μm) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για αυτό τον σκοπό, μιας και είναι φτηνό και διαδεδομένο υλικό με αφετική ικανότητα που φτάνει το 70% για ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο σχηματισμό υγρασίας πάνω στον ανεμοθώρακα, μιας και αυξάνει τη θερμοκρασία του ακτινοβολητή, καθώς και στην πολύ καλή εφαρμογή του ανεμοθώρακα πάνω στον ακτινοβολητή, για να μην τρεμοπαίζει από τον αέρα.

Βέβαια, ξεχωριστή σημασία πρέπει να δοθεί στο επικάλυμμα της μεταλλικής πλάκας, το οποίο πρέπει να έχει μεγάλη αφετική ικανότητα, όσο αφορά την μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, μιας και αυτή μειώνεται για τα μέταλλα ανάλογα με το μήκος κύματος.



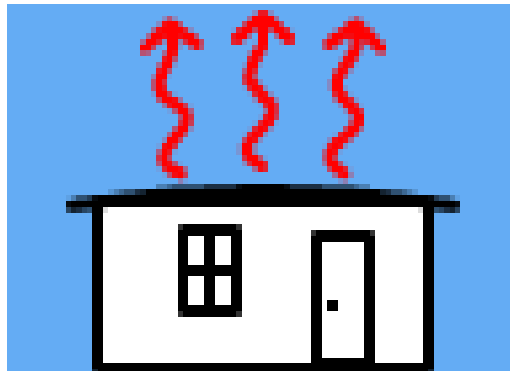
Σχήμα 1.4.15: Ψύξη με ακτινοβολία σε κτίριο μέσω επίπεδου ακτινοβολητή.

Η πιο απλή λύση στο παραπάνω πρόβλημα είναι η μαύρη μεταλλική μπογιά. μία τέτοια επικάλυψη θα προσφέρει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, μιας και η απώλεια θερμότητας μέσω ακτινοβολίας στο εύρος της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος γίνεται μεγαλύτερη. Ένας ακτινοβολητής με τέτοιο επικάλυμμα στην επιφάνειά του, που πλησιάζει αυτήν τη συμπεριφορά, ονομάζεται επιλεκτικός ακτινοβολητής μεγάλου μήκους κύματος. Έρευνες σε υλικά με μεγάλη εκπεμπιμότητα στο εύρος των 8 με 14 μm μικρών, έχουν δείξει ότι τα οξειδία και τα καρβίδια του τιτάνιου, αλουμίνιου, ασβεστίου και ψευδαργύρου είναι κατάλληλα επικαλύμματα, αφού αντανακλούν έντονα και το ηλιακό φώς. Λευκές μπογιές εμπλουτισμένες με τα παραπάνω υλικά που εκπέμπουν στο ίδιο εύρος 8-14 μm έχουν αφεικτική ικανότητα ε μεταξύ 0,9 και 0,95.

Ένας άλλος τύπος επιλεκτικού ακτινοβολητή που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί είναι αλουμίνιο με επικάλυμμα 12,5 μικρών από τέντλαρ (Tedlar). Παρ'όλα αυτά, σειρά πειραμάτων έχει δείξει ότι τα επιλεκτικά επικαλύμματα δεν αποδίδουν αρκετά πιο αποτελεσματικά εν συγκρίσει με τα απλά επικαλύμματα. Τα προβλήματα με τα επιλεκτικά επικαλύμματα είναι το υψηλό κόστος τους και η σύντομη διάρκεια ζωής τους. Άρα με την παρούσα τεχνολογία δεν κρίνονται ως χρήσιμα παρά μόνο σε λίγες περιπτώσεις.

Έχοντας αναλύσει τις πιθανές εφαρμογές συστημάτων παθητικού δροσισμού με νυκτερινή ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, τίθεται το ερώτημα ως το ποιά εφαρμογή θα ήταν η βέλτιστη για ένα δεδομένο κτίριο. Για να απαντηθεί αυτό, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη μερικοί παράμετροι: πρώτα οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην υπό μελέτη τοποθεσία. Δεύτερον, το κατά πόσο

είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η ψύξη δια ακτινοβολίας στο δεδομένο κτίριο και τρίτον, τον τύπου του συστήματος που θα επιλεγεί.(πχ ο ακτινοβολητής και κομιστής θερμότητας θα είναι το ίδιο το κτίριο ή θα υπάρχει μεταλλικός ακτινοβολητής).



Σχήμα 1.4.16: Σχηματική εφαρμογή παθητικού δροσισμού με εκπομπή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία.

Όλες οι εφαρμογές της ψύξης με ακτινοβολία βασίζονται σε πέντε βασικές διαδικασίες μετάδοσης θερμότητας. Έτσι, σε πρώτη φάση ο ακτινοβολητής εκπέμπει θερμότητα μέσω ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Σε δεύτερη φάση ο ακτινοβολητής δέχεται ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα. Σε τρίτη φάση, ο ακτινοβολητής ανταλλάσει θερμότητα με τον περιβάλλοντα αέρα. Σε τέταρτη φάση ο ακτινοβολητής μεταδίδει το ψυκτικό φορτίο στο κτίριο, είτε μέσω επαφής(περίπτωση που ο ακτινοβολητής είναι μέρος του κτιρίου, η οροφή του π.χ.) είτε μέσω ρεύματος αέρα-νερού, ανάλογα με το ψυκτικό μέσο, (περίπτωση που ο ακτινοβολητής είναι ελαφρύς μεταλλικός). Τέλος υπάρχει κ ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του ακτινοβολητή και του ψυκτικού μέσου (αέρα ή νερό) στην περίπτωση του μεταλλικού ακτινοβολητή.Οι δύο πρώτες φάσεις αν αφαιρεθούν ενεργειακά μεταξύ τους δείχνουν την καθαρή απώλεια θερμότητας και έχουν να κάνουν με τα κλιματολογικά δεδομένα του τόπου. Η απώλεια ή μη, θερμότητας του ακτινοβολητή σε σχέση με την τρίτη φάση(ανταλλαγή θερμότητας με τον περιβάλλοντα αέρα) καθορίζει τη θερμοκρασία στασιμότητας (stagnation temperature) του ακτινοβολητή. Έπειτα, η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ακτινοβολητή και του ρεύματος αέρα- νερού (ανάλογα με το ψυκτικό μέσο) καθορίζουν την θερμοκρασία του αέρα και τελικά την ψυκτική ενέργεια που διοχετεύεται στο κτίριο.

Όσο αφορά την ένταση της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπει ένας ακτινοβολητής εξαρτάται από δύο παράγοντες, δηλαδή την απόλυτη θερμοκρασία του T_r και την αφετική του ικανότητα ϵ_r :

$$R = \sigma \cdot \epsilon_r \cdot T_r^4$$

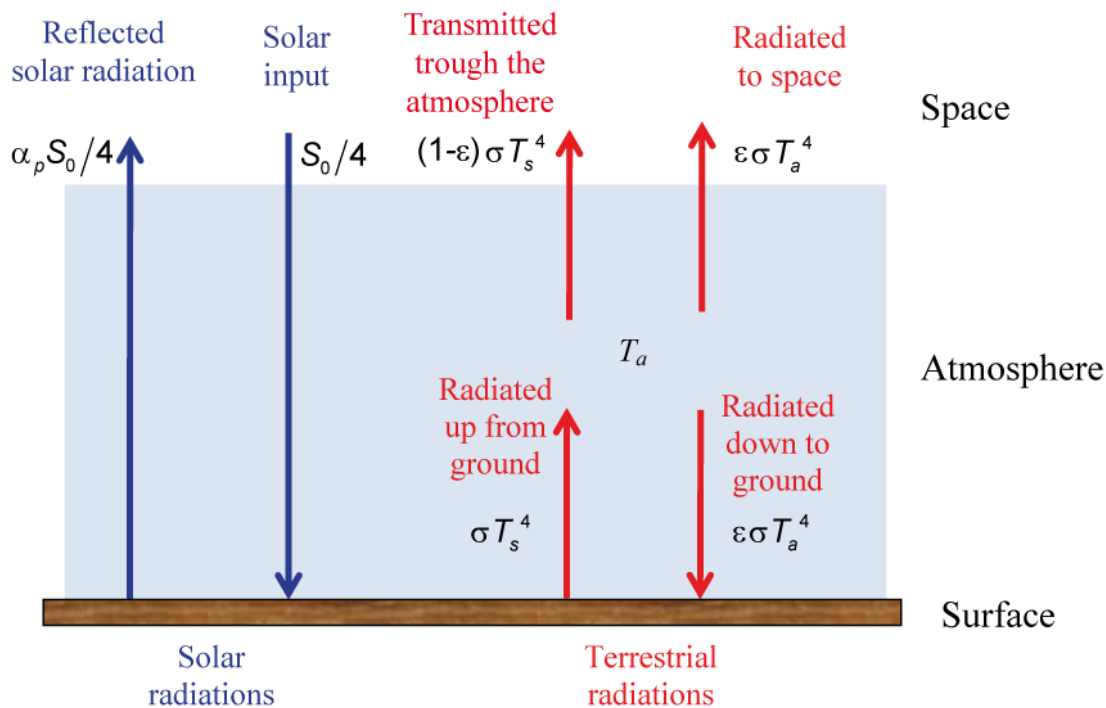
Όπου σ υπενθυμίζουμε η σταθερά των Stefan-Boltzmann:

$$\sigma = 0,567 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Η αφετική ικανότητα είναι φυσική ιδιότητα του κάθε υλικού και το συγκρίνει με το ιδεατό μαύρο σώμα. Όσο αφορά τους μεταλλικούς ακτινοβολητές, θα πρέπει να είναι βαμμένοι με τέτοια μπογιά ώστε να έχουν αφετική ικανότητα σχεδόν 0,90. Έτσι, το στρώμα βαφής θα είναι πλέον ο πραγματικός ακτινοβολητής.

Η θερμοκρασία του ακτινοβολητή και η σχέση αυτής με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα, εξαρτάται από τη μάζα του και από τον τρόπο λειτουργίας του. Άρα, ο σχεδιασμός του συστήματος επηρεάζει και την απόδοσή του. Έτσι, αν ο ακτινοβολητής είναι η ίδια η οροφή του κτιρίου, λόγω της μεγάλης θερμικής μάζας θα βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τον αέρα σχεδόν όλη τη νύκτα. Συνεπώς, θα αυξάνεται η απώλεια θερμότητας και από την επαφή με τον γύρω ψυχρότερο αέρα. Αντιθέτως, ένας ελαφρύς μονωμένος ακτινοβολητής (π.χ μεταλλικός) θα βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τον αέρα και άρα η ψύξη δια ακτινοβολίας θα μετριάζεται λόγω της αλληλεπίδρασης με τον θερμότερο αέρα του περιβάλλοντος. Γίνεται εύκολα, λοιπόν, αντιληπτή η σημασία της επιλογής του τύπου του ακτινοβολητή, συναρτήσει της επιθυμητής απώλειας θερμότητας. Επίσης, η θερμική επαφή του ακτινοβολητή με το υπόλοιπο κτίριο είναι άλλος ένας σημαντικός παράγοντας, που επηρεάζει την θερμοκρασία του και άρα την αποδοτικότητά του.

Όσο αφορά την πίσω ατμοσφαιρική ακτινοβολία, αυτή μπορεί να εκφραστεί ποιοτικά με δύο τρόπους. Ο ένας είναι να θεωρήσουμε την ατμόσφαιρα σαν ένα μαύρο σώμα, για μια δεδομένη θερμοκρασία αυτής T_s , οπότε θα έχει αφετική ικανότητα ίση με τη μονάδα, όπως είδαμε και προηγουμένως, ήτοι $\epsilon_s = 1$. Ο άλλος τρόπος είναι να θεωρήσουμε ότι ο ουρανός έχει την ίδια θερμοκρασία με αυτή κοντά στη γη, αλλά η ατμόσφαιρα θα εκπέμπει σαν ένα γκρι σώμα, ήτοι $\epsilon_s < 1$.



Σχήμα 1.4.17: Ροή ακτινοβολίας από και προς τη γη, διαμέσου της ατμόσφαιρας. Με μπλέ χρώμα φαίνεται η πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας μικρού μήκους και με κόκκινο η μεγάλη ακτινοβολία από και προς τη γη.

Αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να υπολογίσουν τις κλιματικές προοπτικές για την εφαρμογή της ψύξης με ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Η ερευνητική ομάδα του πανεπιστημίου του Τρίνιτι στο Σαν Αντώνιο του Τέξας πρότειναν μια φόρμουλα για τον υπολογισμό της αφετικής ικανότητας του ουρανού ϵ_s , την ενεργή θερμοκρασία του ουρανού στο σημείο δρόσου (dew point) T_{dp} , τη θερμοκρασία του γύρω αέρα T_a και των νεφώσεων ως κάτωθι:

$$\epsilon_s = 0,787 + 0,0028 \cdot T_{dp}$$

Ενώ η θερμοκρασία του καθαρού ουρανού (χωρίς νέφη) σε τιμές απόλυτης θερμοκρασίας είναι:

$$T_{\text{καθ. ουρανού}}(\text{K}) = \epsilon_s^{1/4} \cdot T_a$$

Η θερμοκρασία του συννεφιασμένου ουρανού δίνεται από τη σχέση:

$$T_{\text{συν}} = C_a^{1/4} \cdot T_{\text{καθ. ουρανού}}$$

Η ακτινοβολία του ουρανού θα δίνεται τότε από τη σχέση:

$$R_{\text{ουρανού}} = \sigma \cdot T_{\text{ουρανού}}^{1/4}$$

Όπου σ η γνωστή σταθερά των Stefan-Boltzmann.

Οι Berdhal και Martin(1989) ανέπτυξαν μία φόρμουλα για να εκφράσουν την αφεικτική ικανότητα του καθαρού ουρανού, $\epsilon_{\text{καθ. ουρανού}}$, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου του περιβάλλοντα αέρα:

$$\epsilon_{\text{καθ. ουρανού}} = 0,711 + 0,56 (T_{dp}/100) + 0,73(T_{dp}/100)^2$$

Οι Clark και Allen(1978) ανέπτυξαν μια άλλη φόρμουλα για να υπολογίσουν την αφεικτική ικανότητα του ουρανού ϵ_s , σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου:

$$\epsilon_s = 0,787 + 0,764 \ln((T_{dp} + 273)/273)$$

Ο Clark (1981) ανέπτυξε μία άλλη φόρμουλα για να εκφράσει την επιρροή των νεφώσεων (n) στην ατμοσφαιρική ακτινοβολία $R_{\text{ουρανού}}$:

Η επίδραση των νεφώσεων εκφράζεται από έναν συντελεστή C_a :

$$C_a = 1 + 0,0224n - 0,0035n^2 + 0,00028n^3$$

Η ατμοσφαιρική ακτινοβολία θα δίνεται τότε:

$$R_{\text{ουρανού}} = R_{\text{καθ. ουρανού}}(1 + 0,0224n + 0,0035n^2 + 0,00028n^3)$$

Στην πράξη, σε όλες τις περιπτώσεις ψύξης με ακτινοβολία υπάρχει και ένας παράγοντας αλληλεπίδρασης με τον γύρω αέρα που υπεισέρχεται στη διαδικασία της μετάδοσης θερμότητας. Για ακτινοβολητές μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας, η αγωγή θερμότητας είναι μία συνάρτηση του συντελεστή αγωγής (convective coefficient), ο οποίος εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου κοντά στον ακτινοβολητή. Είναι ανάλογος της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του ακτινοβολητή και του γύρω αέρα.

Ο συντελεστής αγωγής είναι από τους δυσκολότερους παράγοντες ως προς τον υπολογισμό του. Εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα δίπλα στον ακτινοβολητή και από το είδος της ροής (τυρβώδη-στρωτή). Στην πραγματικότητα, η οποιαδήποτε εκτίμηση για την τιμή της ταχύτητας του ανέμου δεν είναι ασφαλής. Τούτο συμβαίνει γιατί τα εκάστοτε δεδομένα που αφορούν την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου, προέρχονται από κάποιο μετεωρολογικό σταθμό που ναί μεν είναι σε κοντινό μέρος, αλλά όχι πάνω στο υπό εξέταση κτίριο. Άρα, η τιμή της ταχύτητας του αέρα είναι μία πρόχειρη εκτίμηση.

Τα συστήματα παθητικής ψύξης, όπου περιμένουμε να έχουν υψηλότερη θερμοκρασία από τον γύρω ατμοσφαιρικό αέρα όλη τη νύκτα (όπως όταν όλη η θερμική μάζα της οροφής λειτουργεί ως ακτινοβολητής), επωφελούνται από τα ρεύματα αέρα με μεγάλη ταχύτητα, αφού αυξάνεται ο ρυθμός της ψύξης λόγω επαφής και με τον αέρα. Αντιθέτως, τα συστήματα που είναι σχεδιασμένα να έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία από τον περιβάλλοντα αέρα(π.χ. μεταλλικός ακτινοβολητής) θα πρέπει να έχουν ανεμοθώρακα, για να περιορίζουν την αλληλεπίδραση με τα θερμότερα ρεύματα αέρα.

Η γενική μαθηματική διατύπωση της μετάδοσης θερμότητας δια αγωγής μεταξύ αέρα και ακτινοβολητή είναι:

$$Q_c = h_c \cdot (T_r - T_a)$$

Όπου με h_c ο συντελεστής συναγωγής. Όπως είδαμε, το πρόβλημα παραμένει ως προς τον τρόπο έκφρασης αυτού του συντελεστή σαν συνάρτηση της κατάστασης του αέρα. Αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να βρουν μια μαθηματική φόρμουλα για να υπολογίζει τον συντελεστή συναγωγής. Οι Givoni και Mostrel (1982) βασισμένοι σε πειραματικά αποτελέσματα για ακτινοβολητές με ή χωρίς ανεμοθώρακα, κατέληξαν στις κάτωθι εξισώσεις :

Για εκτεθειμένο ακτινοβολητή:

$$h_c = 0,6 + 3,5 \cdot (V)^{0,5}$$

Για ακτινοβολητή με μία στρώση πολυαιθυλενίου:

$$h_e = 0,5 + 1,2 \cdot (V)^{0,5}$$

Για ακτινοβολητή με δύο στρώσεις:

$$h_c = 0,3 + 0,8 \cdot (V)^{0,5}$$

Οι Givoni και Mostrel (1982) ανέπτυξαν μαθηματικές φόρμουλες για να υπολογίζουν την θερμοκρασία στασιμότητας (stagnation temperature) ενός ακτινοβολητή, είτε έχει ανεμοθώρακα, είτε όχι. Οι φόρμουλες αυτές υπολογίζουν τη θερμοκρασία στασιμότητας συναρτήσει των μετεωρολογικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία και ταχύτητα αέρα) και των συνθηκών θωράκισης του ακτινοβολητή, εξισώνοντας την καθαρή απώλεια θερμότητας με το θερμικό κέρδος από συναγωγή ενός στάσιμου ακτινοβολητή. Βέβαια, η φόρμουλα αυτή δεν συνυπολογίζει τη νέφωση.

Για έναν ακτινοβολητή θωρακισμένο με πολυαιθυλένιο, μίας ή περισσότερων στρώσεων, η απορρόφηση της ακτινοβολίας του ουρανού $R_{\text{απορ.}}$ αλλά και η εκπομπή προς τον ουρανό $R_{\text{εκπ.}}$, προσδιορίζονται από την εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος του ανεμοθώρακα ($R_{\alpha/\theta}$) και από την αφετική ικανότητα του ακτινοβολητή ϵ_r :

$$R_{\text{απορ.}} = \epsilon_r \cdot R_{\alpha/\theta} \cdot R_{\text{ουρανού}}$$

$$R_{\text{εκπ.}} = \epsilon_r \cdot R_{\alpha/\theta} \cdot \sigma \cdot (T_r)^4$$

Όπου σ η γνωστή σταθερά των Stefan-Boltzmann.

Οι τιμές της μεταβλητής $R_{\alpha/\theta}$ υπολογίζονται 70% για μία στρώση ανεμοθώρακα και 60% για διπλό στρώμα πολυαιθυλενίου.

Η καθαρή απώλεια θερμότητας δια ακτινοβολίας μπορεί να υπολογιστεί, για διάφορες συνθήκες νεφώσεων, από την εξής σχέση των Givoni και Mostrel (1982):

$$R_{\text{καθ.}} = C_n \cdot \epsilon_r \cdot R_{\alpha/\theta} \cdot 0,554 \cdot (T_r - T_{\text{ουρανού}})$$

Όπου με C_n είναι ο παράγοντας των νεφώσεων σύμφωνα με τους Clark και Allen (1978) και προκύπτει:

$$C_n = 1 - 0,056 \cdot n$$

και n είναι ο δείκτης νεφώσεων.

Εξισώνοντας την καθαρή απώλεια θερμότητας με τα θερμικά κέρδη από την αλληλεπίδραση αέρα και ακτινοβολητή ($R_{\text{καθ.}} = Q_c$) τελικά προκύπτει μία σχέση που μπορεί να προβλέψει την θερμοκρασία στασιμότητας του ακτινοβολητή $T_{\text{στασιμ.}}$, σαν συνάρτηση των θερμοκρασιών του αέρα και ουρανού, των νεφώσεων και τέλος της αγωγιμότητας του ανεμοθώρακα στην ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος:

$$T_{\text{στασιμ.}} = (0,544 \cdot C_n \cdot \epsilon_r \cdot T_{\text{καθ ουρανού}} + h_c \cdot T_a) / (0,544 \cdot C_n \cdot \epsilon_r \cdot R_{\alpha/\theta} + h_c)$$

Αν και οι παραπάνω σχέσεις αφορούν μεγέθη για τα οποία υποθέτουμε τιμές ή κάνουμε παραδοχές, τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν διαφέρουν κατά πολύ από τα πειραματικά δεδομένα.

Συνεπώς, οι σχέσεις αυτές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για μια πρώτη εκτίμηση της καθαρής απώλειας θερμότητας δια μέσου του ακτινοβολητή προς το κτίριο. Βέβαια το σωστό για την κάθε εφαρμογή ακτινοβολητή σε κτίριο θα ήταν η επιτόπια μέτρηση των συνθηκών λειτουργίας και της θερμοκρασίας στασιμότητας. Έτσι θα αποκτούσε μεγαλύτερη ακρίβεια η υπολογισθείσα απώλεια θερμότητας για το κτίριο.

Από την παραπάνω ανάλυση που έγινε για την ψύξη κτιρίου με εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, προκύπτουν κάποια άμεσα και χρήσιμα συμπεράσματα. Το φυσικό υπόβαθρο που βρίσκεται πίσω από αυτή την μέθοδο παθητικού δροσισμού, υπαγορεύει και τις συνθήκες λειτουργίας και αποδοτικότητας αυτού. Δηλαδή, η μέθοδος της ψύξης δια ακτινοβολίας δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε υγρά κλίματα, μιας και όπως είδαμε η υγρασία απορροφά την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, μειώνοντας έτσι αισθητά τα ψυκτικά φορτία για το κτίριο. Επιπλέον, τα αυξημένα κόστη για την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος, το καθιστούν απαγορευτικό σε πολλές περιπτώσεις. Οι κινητές μονώσεις, οι αυτοματισμοί, η αύξηση της θερμικής μάζας του κτιρίου, η ενισχύσεις που απαιτούνται στον σκελετό του κτιρίου για να αντέξει το παραπάνω βάρος και όλες οι υπόλοιπες τροποποιήσεις που πρέπει να γίνουν αποτελούν αποτρεπτικούς παράγοντες για αυτή την εφαρμογή παθητικής ψύξης με τα σημερινά δεδομένα. Για όλους τους παραπάνω λόγους η ψύξη με ακτινοβολία δεν μπορεί ακόμη να είναι ανταγωνιστική και άρα διαδεδομένη, αφού συνδυάζει μεγάλο κόστος με αμφίβολη αποδοτικότητα για ορισμένες περιοχές. Άρα, χρειάζεται περαιτέρω μελέτη και έρευνα για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, έτσι ώστε να εφαρμοστεί ευρέως σε νέες κατασκευές.

Για τις χώρες των βόρειων ακτών της Μεσογείου, υπάρχουν καλές προοπτικές όσο αφορά τις κλιματικές συνθήκες. Βέβαια, η πλειοψηφία των κτιρίων στις χώρες αυτές έχουν τσιμεντένια οροφή. Το υλικό αυτό έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να αποδώσει καλά ως ακτινοβολητής, αρκεί να έχει κινητή μόνωση. Αλλά, όπως προείπαμε κάτι τέτοιο είναι ασύμφορο με τα σημερινά δεδομένα. Με την πρόοδο όμως της τεχνολογίας, στο μέλλον θα είναι εφικτές και ανταγωνιστικές τέτοιες επεμβάσεις-εγκαταστάσεις στον κτιριακό τομέα. Τότε οι κοινές τσιμεντένιες οροφές με κινητή μόνωση θα αποτελούν τις πιο απλές, φθηνές και αποδοτικές εφαρμογές της ψύξης με ακτινοβολία για πολλές περιοχές με θερμό κλίμα.

1.5) Πειραματική και θεωρητική μελέτη νυκτερινού ακτινοβολητή για ψύξη κτιρίου:

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, η υπερκατανάλωση των ορυκτών καυσίμων του πλανήτη και η εκπομπή εκατομμυρίων τόνων αερίων του θερμοκηπίου (κυρίως διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)) από την καύση αυτών, οδηγεί την παγκόσμια παραγωγή ενέργειας σε πιο φυσικούς τρόπους. Όσο αφορά τον κτιριακό τομέα, μεγάλο ποσοστό ενέργειας καταναλώνεται για τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης, με τις δεύτερες να αυξάνονται κατά τους ζεστούς μήνες του έτους λόγω της εμφάνισης του φαινομένου της θερμικής νήσου στα αστικά κέντρα. Η λύση για τον περιορισμό του ενεργειακού φορτίου που καταναλώνεται στα κτίρια είναι τα παθητικά συστήματα. Αυτά χρησιμοποιούν τον ήλιο, τον περιβάλλοντα αέρα, τον ουρανό και το νερό σαν φυσικά μέσα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κτιρίων για τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης.

Όσο αφορά την παθητική ψύξη, αυτή μπορεί να επιτύχει πολύ καλές συνθήκες άνεσης κατά τους θερινούς μήνες με σημαντική μείωση του φορτίου ψύξης. Όταν δε για την ψύξη αξιοποιείται ο ουρανός σαν θερμική δεξαμενή, τότε εφαρμόζεται η ψύξη δια ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Η μέθοδος αυτή, βασίζεται στη φυσική αρχή που λέει ότι κάθε σώμα ακτινοβολεί θερμότητα σε ένα αντιπακτό ψυχρότερο. Έτσι, τα σώματα στη γη μετά τη δύση του ηλίου ακτινοβολούν τη θερμότητα που αποθήκευσαν από τον ήλιο, στον ψυχρότερο ουρανό. Βέβαια, η εκπομπή ακτινοβολίας προς τον ουρανό λαμβάνει χώρα και κατά τη μέρα, αλλά η ηλιακή ακτινοβολία υπερνικάει την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Αυτό το φαινόμενο, μπορεί να παρακαμφθεί αν η επιφάνεια που ακτινοβολεί δεν είναι απευθείας το κτιριακό κέλυφος (άμεση-παθητική ψύξη με ακτινοβολία), αλλά ένας ακτινοβολητής, διαμέσου του οποίου ρέει κάποιο ψυκτικό μέσο (υβριδική ψύξη με ακτινοβολία). Έτσι, μετά τη δύση του ηλίου, ο μεταλλικός ακτινοβολητής αρχίζει να ψύχεται ακτινοβολώντας προς τον ουρανό. Μόλις φτάσει σε θερμοκρασία χαμηλότερη του αέρα, αρχίζει να ψύχει, λόγω επαφής, τον αέρα του γύρω περιβάλλοντος, αλλά και αυτόν που βρίσκεται μέσα του. Ο εσωτερικός αέρας, επειδή είναι πεπερασμένος, συγκριτικά με τον περιβάλλοντα, ψύχεται γρηγορότερα. Άρα, μπορεί πλέον να εισαχθεί στο κτίριο και να το ψύξει. Η διαφορά στην απώλεια θερμότητας από ακτινοβολία, με την πρόσληψη θερμότητας από τον γύρω αέρα λόγω αγωγής, είναι που καθορίζει την τάξη της θερμοκρασιακής πτώσης του ακτινοβολητή και άρα και του εσωτερικού αέρα. Με βάση τα παραπάνω, κάθε επίπεδο μεταλλικό σώμα θα μπορούσε να λειτουργήσει σαν ακτινοβολητής, ενώ η οροφή του κτιρίου θα μπορούσε να είναι μονωμένη επί μονίμου βάσεως.

Ένας μεταλλικός ακτινοβολητής με ειδικά διαμορφωμένο κενό στο κάτω μέρος του για ροή ατμοσφαιρικού αέρα, λειτουργεί ακριβώς ανάποδα από τον κοινό ηλιακό θερμοσίφωνα. Ο αέρας κινούμενος στο χώρο κάτωθεν του ακτινοβολητή, ψύχεται και ακολούθως εισάγεται στο κτίριο. Εκεί παρέχει ψύξη στο χώρο άμεσα, αλλά και δια αγωγής στην εσωτερική μάζα του κτιρίου, διατηρώντας τη έτσι δροσερή για την επόμενη μέρα. Οι δύο βασικές διαφορές του μεταλλικού ακτινοβολητή με τον ηλιακό θερμοσίφωνα είναι πρώτον οι διαφορετικές ώρες λειτουργίας των δύο συστημάτων και δεύτερον η έλλειψη υαλοπίνακα στον ακτινοβολητή, μιας και αυτός απορροφά την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ένα πείραμα που έγινε στο Πανεπιστήμιο των Ιωαννίνων και αφορούσε την εγκατάσταση μεταλλικού ακτινοβολητή στην οροφή ενός κτιρίου στο Αγρίνιο. Η συμπεριφορά του ακτινοβολητή μοντελοποιήθηκε και τελικά έγινε σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν από τη μαθηματική προσομοίωση.

Ο παράγοντας της μετάδοσης θερμότητας με ρεύματα αέρα (convection) h_{win} , είναι μία συνάρτηση της ταχύτητας του αέρα. Για την περίπτωση που ο ακτινοβολητής δεν έχει ανεμοθώρακα, ο παραπάνω παράγοντας δίνεται από τις σχέσεις:

$$h_{win} = 5,7 + 3,8u \quad \text{για } u < 4 \text{ m/s}$$

$$h_{win} = 7,3u^{0,8} \quad \text{για } u > 4 \text{ m/s}$$

Η εκπεμπόμενη ροή θερμότητας του ακτινοβολητή προς τον ουρανό, θα μπορούσε να ενσωματωθεί στην ροή θερμότητας προς το περιβάλλον (ambient) q_{amb} , η οποία περιλαμβάνει τη ροή θερμότητας από ακτινοβολία και από συναγωγή με τα ρεύματα αέρα και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_{amb} = h_e(T_r - T_{th})$$

όπου h_e είναι ο συντελεστής ενεργούς μετάδοσης θερμότητας και T_{th} η απόλυτη θερμοκρασία κατωφλίου (threshold absolute temperature).

Ο συντελεστής ενεργούς μετάδοσης θερμότητας h_e υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$h_e = h_{rad} + h_{win}$$

όπου h_{rad} είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας δια ακτινοβολίας και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$h_{rad} = 0,000000227\tau\epsilon T_a^2$$

με τ συμβολίζεται η υπέρυθρη διαπερατότητα του ανεμοθώρακα (εάν δεν υπάρχει ανεμοθώρακας τότε $\tau=1$), με ϵ η υπέρυθρη αφετική ικανότητα του ακτινοβολητή και με T_a η απόλυτη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε βαθμούς Kelvin.

Γενικά, η θερμοκρασία κατωφλίου ή θερμοκρασία αποτελμάτωσης (T_{th} σε $^{\circ}K$ ή θ_{th} σε $^{\circ}C$) είναι η θερμοκρασία στην οποία μπορεί να πέσει ένα σώμα χωρίς να αρχίσει να προστίθεται θερμότητα σε αυτό. Για την περίπτωση του ακτινοβολητή, η θερμοκρασία κατωφλίου είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία αποτελμάτωσης που μπορεί να φτάσει ο ακτινοβολητής, με τον περιορισμό να μην είναι $1^{\circ}C$ κάτω από το σημείο δρόσου του περιβάλλοντα αέρα.

Η θερμοκρασία κατωφλίου θ_{th} ($^{\circ}C$) υπολογίζεται με την κάτωθι φόρμουλα:

$$\theta_{th} = \theta_a - 0,000000057(1-\epsilon_s) \theta_a^4 / h_e$$

όπου με θ_a συμβολίζεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος και με ϵ_s η αφετική ικανότητα του ουρανού.

Η αφετική ικανότητα του ουρανού ϵ_s υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την αφετική ικανότητα του καθαρού ουρανού ϵ_{cs} και έναν παράγοντα c που υποδηλώνει ουρανό με νεφώσεις:

$$\epsilon_s = c\epsilon_{cs}$$

Σε περίπτωση καθαρού ουρανού, τότε $c=1$. Αρκετοί τρόποι παραμετροποίησης της αφετικής ικανότητας του καθαρού ουρανού ϵ_{cs} έχουν αναπτυχθεί. Στην παρούσα φάση χρησιμοποιήθηκε η φόρμουλα Swinbank, μια πολύ απλή μαθηματική σχέση, η οποία βασίζεται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος:

$$\epsilon_{cs} = 9,36 \cdot 10^{-6} T_a^2$$

Η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του από τον αγωγό θ_{out} ($^{\circ}C$) μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\theta_{out} = \theta_{th} + (\theta_{in} - \theta_{th})e^{-UA/mCp}$$

όπου θ_{in} είναι η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού μέσου ($^{\circ}\text{C}$), U είναι ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ του ρευστού που κυκλοφορεί κάτω από τον ακτινοβολητή και του περιβάλλοντα αέρα ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), A είναι το εμβαδόν του επιπέδου ακτινοβολητή (m^2), m είναι η παροχή του εργαζόμενου ρευστού (kg/s) και C_p η θερμοχωρητικότητα του εργαζόμενου ρευστού (J/kgK).

Η παραπάνω σχέση, για τα δεδομένα του ακτινοβολητή μετασχηματίζεται στην εξής:

$$\theta_{out} = \theta_{th} + (\theta_{in} - \theta_{th})e^{-Uw/1173zu}$$

πλέον με w συμβολίζεται το πλάτος του επιπέδου ακτινοβολητή (m), με z το ύψος που βρίσκεται ο αγωγός (m) και u η ταχύτητα του αέρα που κυκλοφορεί κάτω από τον ακτινοβολητή (m/s). Ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας U υπολογίζεται από το άθροισμα των επιμέρους θερμικών αντιστάσεων:

$$U = 1/R$$

και

$$R = R_r + R_e + R_a$$

όπου R η ολική θερμική αντίσταση και R_r η αντίσταση του επιπέδου ακτινοβολητή, που ισούται με: $R_r = d/k$ (d είναι το πάχος του ακτινοβολητή (m) και k η θερμική αγωγιμότητα του ακτινοβολητή ($k = 236 \text{ W}/\text{mK}$)). Με R_e συμβολίζεται η ενεργός αντίσταση $R_e = 1/h_e$ και με R_a η αντίσταση μεταξύ του αέρα και του ακτινοβολητή $R_a = 1/h$ (το h είναι ο αντίστοιχος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ ακτινοβολητή και αέρα που κυκλοφορεί κάτωθεν αυτού).

Τελικά, συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας U μπορεί να εκφραστεί και:

$$U = 1/(1/h_e) + (1/h) + (d/k)$$

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας h ορίζεται από τις τιμές της υδραυλικής διαμέτρου D_h και της ταχύτητας u του αέρα που κυκλοφορεί κάτω από τον αγωγό.

Η υδραυλική διάμετρος D_h προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$D_h = 2w[z/(w+z)]$$

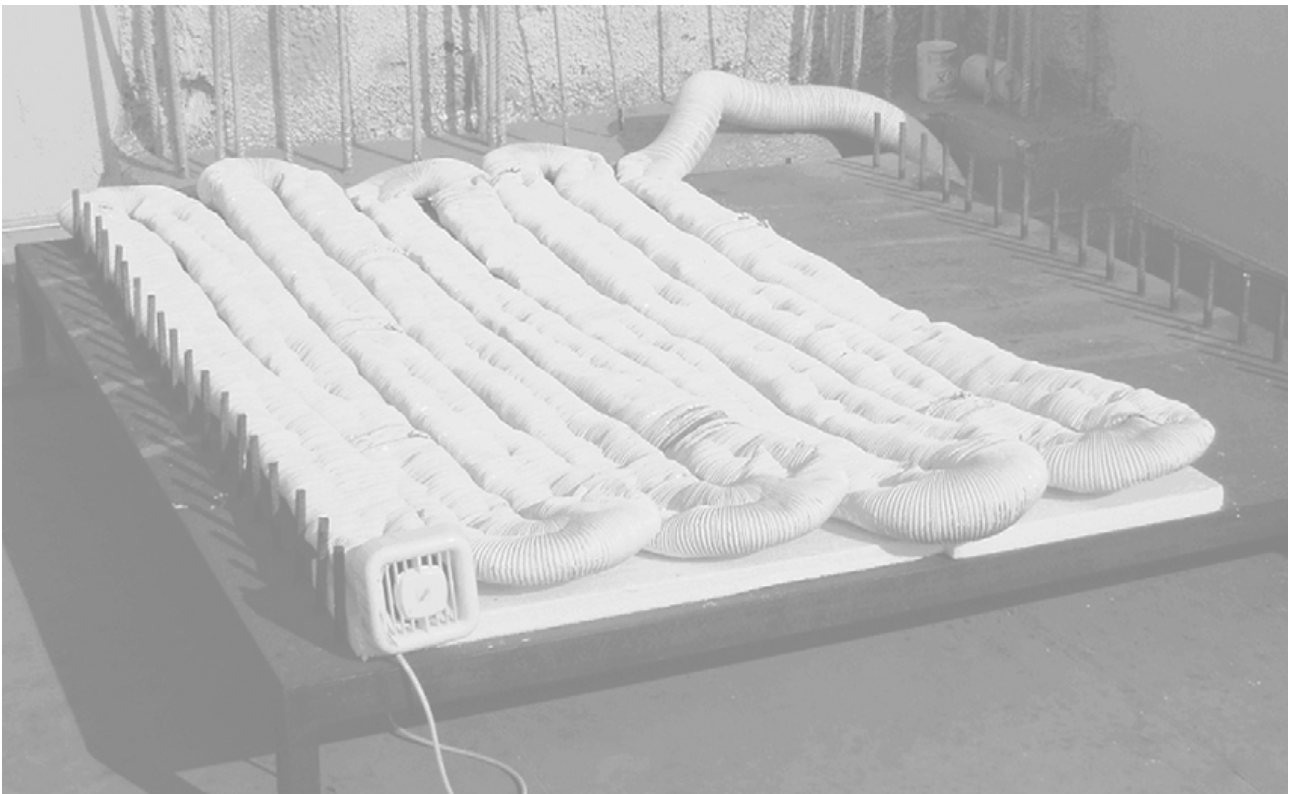
Στη συνέχεια, γίνεται περιγραφή του ακτινοβολητή που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα στο Αγρίνιο. Εκεί, ο μεταλλικός και ελαφρύς ακτινοβολητής εγκαταστάθηκε στην οροφή του κτιρίου, ύψους δέκα μέτρων, του τομέα της Διοίκησης Περιβαλλοντικών και Φυσικών Πόρων. Ο ακτινοβολητής ήταν ένα μεταλλικό πάνελ και αποτελούνταν από έναν μακρύ και ειδικά διαμορφωμένο αγωγό αλουμινίου, μέσω του οποίου κυκλοφορούσε το ψυκτικό μέσο, αέρας.

Ο μακρύς αλουμινένιος αγωγός συναρμολογήθηκε από δέκα μικρότερους, μήκους 3m ο καθένας, κυλινδρικούς αγωγούς αλουμινίου, με διάμετρο 10 cm και πάχος 2mm και ενώθηκαν με μεταλλικά δαχτυλίδια. Έπειτα, ο σχηματισμός αυτός βάρφτηκε δύο φορές με κατάλληλη μπογιά. Μόλις στέγνωσε η μπογιά, ο αγωγός διπλώθηκε οχτώ φορές. Κάθε δίπλα είχε μήκος 2m, ώστε δημιουργήθηκε το αλουμινένιο πάνελ με 2m μήκος και 1m πλάτος, αποτελούμενο από παράλληλους αγωγούς.



Σχήμα 1.5.1: Η αρχική μορφή του μεταλλικού αγωγού μόλις διπλώθηκε στην ειδικά διαμορφωμένη βάση του.

Μετά, ο διπλωμένος αγωγός πιέστηκε και από τις δύο του πλευρές, προκειμένου να αποκτήσει επίπεδο σχήμα με πάχος 1 cm στις επίπεδες πλευρές του. Η διαδικασία επαναλήφθηκε με τα ίδια υλικά και σειρά ενεργειών, αλλά άλλαξε η μπογιά. Το δεύτερο χρώμα είχε μεγαλύτερη αφετική ικανότητα. Έτσι λοιπόν, υπήρχαν δύο όμοιοι ακτινοβολητές, με μόνη διαφορά στις οπτικές τους ιδιότητες, έτοιμοι προς χρήση.



Σχήμα 1.5.2: Μετά την συμπίεση του αγωγού, προέκυψε το επιθυμητό επίπεδο σχήμα του ακτινοβολητή.

Για την αποφυγή ανεπιθύμητης επιστροφής θερμότητας από το κτίριο προς τον ακτινοβολητή, ο τελευταίος τοποθετήθηκε πάνω σε υπερυψωμένη μεταλλική βάση και σε ένα επίπεδο μόνωσης πάχους 3 cm. Επιπλέον, για την καλύτερη στεγάνωση του αγωγού, οι ενώσεις των επιμέρους τμημάτων του καλύφθηκαν και με ειδική μονωτική ταινία.

Η μία άκρη του αγωγού φέρει μικρό ανεμιστήρα, για την οδήγηση του αέρα μέσα στον αγωγό. Ο ανεμιστήρας συνδέθηκε με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ενός χρονικού εκκινητή (time starter) προκειμένου να λειτουργεί μόνο τις νυκτερινές ώρες (22:00 με 06:00). Η άλλη άκρη του αγωγού προσαρμόστηκε καταλλήλως με κόλλα σιλικόνης σε ένα παράθυρο στο κτίριο. Άρα, πλέον τα ρεύματα αέρα, αλληλεπιδρούσαν με τον ψυχρότερο ακτινοβολητή και λόγω του ανεμιστήρα, αναγκάζονταν σε κίνηση προς το εσωτερικό του κτιρίου, μεταφέροντας έτσι τα ψυκτικά φορτία.

Υψηλότερες τιμές εκπομπής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος ή υψηλότερες τιμές μετάδοσης θερμότητας με τα γύρω ρεύματα αέρα, οδηγούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες για τον αέρα που κυκλοφορεί εντός του αγωγού. Ο ακτινοβολητής θα πρέπει να έχει υψηλές τιμές απορροφητικότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, για να απορροφά τη λιγότερη δυνατή ακτινοβολία την ημέρα και

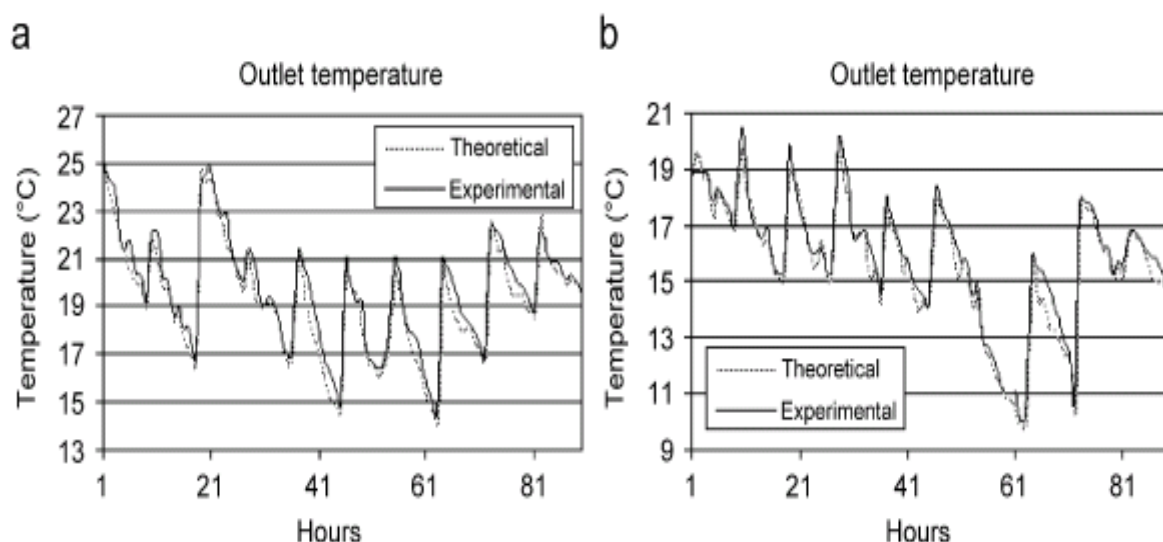
υψηλές τιμές αφετικής ικανότητας στο εύρος της μεγάλου μήκους ακτινοβολίας για να εκπέμπει όσο το δυνατόν περισσότερη θερμότητα τη νύκτα. Παρόλο που τα μέταλλα είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας, η αφετική τους ικανότητα είναι ανάλογη του μήκους κύματος της ακτινοβολίας και αυτό τα καθιστά κακούς ακτινοβολητές. Για αυτό τον λόγο, η εξωτερική επιφάνεια του αλουμινένιου ακτινοβολητή βάρφτηκε με λευκό χρώμα. Η νέα στρώση χρώματος παρέχει ένα παραπάνω στρώμα ακτινοβολητή. Οι μεταλλικές επιφάνειες έχουν αυξημένη απορροφητικότητα και εκπεμφιμότητα, λόγω του λευκού χρώματος, καθώς και υψηλή αγωγιμότητα.

Κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος, οι ληφθέντες τιμές συγκρίθηκαν με αυτές που προέκυψαν από τα μαθηματικά μοντέλα, που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η διαδικασία επαναλήφθηκε και για τους δύο ακτινοβολητές διαφορετικού χρώματος, για να ερευνηθεί η επιρροή των διαφορετικών οπτικών ιδιοτήτων στην αποτελεσματικότητα του συστήματος. Η διάρκεια του πειράματος ήταν δέκα μέρες για το κάθε χρώμα. Δηλαδή, από τις 21/08/06 και ώρα 22:00 ως τις 31/08/06 και ώρα 06:00 για την μπογιά με αφετική ικανότητα 0,71 και από τις 31/08/06 και ώρα 22:00 ως τις 10/09/06 και ώρα 06:00 για την μπογιά με αφετική ικανότητα 0,93. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, ένας αισθητήρας μετρούσε αυτόματα τη θερμοκρασία στον έξοδο του αγωγού. Μετά από αυτή τη φάση του πειράματος και μόνο για την μπογιά με την υψηλότερη αφετική ικανότητα παρακολουθήθηκε η εσωτερική θερμοκρασία του γραφείου, που ήταν συνδεδεμένη η άλλη άκρη του αγωγού-ακτινοβολητή. Ταυτόχρονα παρακολουθήθηκε και ένα γειτονικό γραφείο ίδιων διαστάσεων και χαρακτηριστικών κατασκευής. Αυτό επαναλήφθηκε για δέκα μέρες επίσης: από τις 22:00 το βράδυ της 10/09/06 ως τις 20/09/08 και ώρα 06:00.

Το μόνο πρόβλημα για αυτήν την περίοδο των τριάντα ημερών που διήρκησε το πείραμα θα ήταν τα καιρικά φαινόμενα, μιας και οι επιθυμητές συνθήκες θα ήταν μόνο ο καθαρός ουρανός. Αλλά συνήθως τέτοια εποχή και σε αυτήν την περιοχή της Ελλάδας όπου έλαβε χώρα το πείραμα, οι συνήθεις συνθήκες είναι ψηλές θερμοκρασίες, χαμηλή σχετική υγρασία και σχεδόν καθόλου νεφώσεις και καταιγίδες.

Πίνακας 1.5.1: Κλιματολογικά δεδομένα της περιόδου του πειράματος στο Αγρίνιο.

Ημέρα	Θερμοκρασία (°C)	Σχετική Υγρασία (%)	Διάρκεια Ηλιοφάνειας (min)
1	26.96	41.34	644
2	26.23	47.67	643
3	25.85	45.76	639
4	24.11	44.03	662
5	23.30	41.31	689
6	23.55	42.14	661
7	23.39	41.88	673
8	24.35	44.11	647
9	25.75	45.34	598
10	24.55	53.57	637
11	23.64	51.01	613
12	22.13	48.02	631
13	22.80	44.32	649
14	21.68	41.84	650
15	22.14	42.24	628
16	19.88	45.12	631
17	18.67	44.69	607
18	20.74	47.24	609
19	20.13	46.62	618
20	20.68	44.32	621
21	21.02	44.01	632
22	21.81	43.25	615
23	22.35	43.56	624
24	23.68	42.11	643
25	24.08	43.02	645
26	24.01	44.18	631
27	23.58	43.32	622
28	23.32	41.89	618
29	23.11	43.23	608
30	22.65	42.06	611

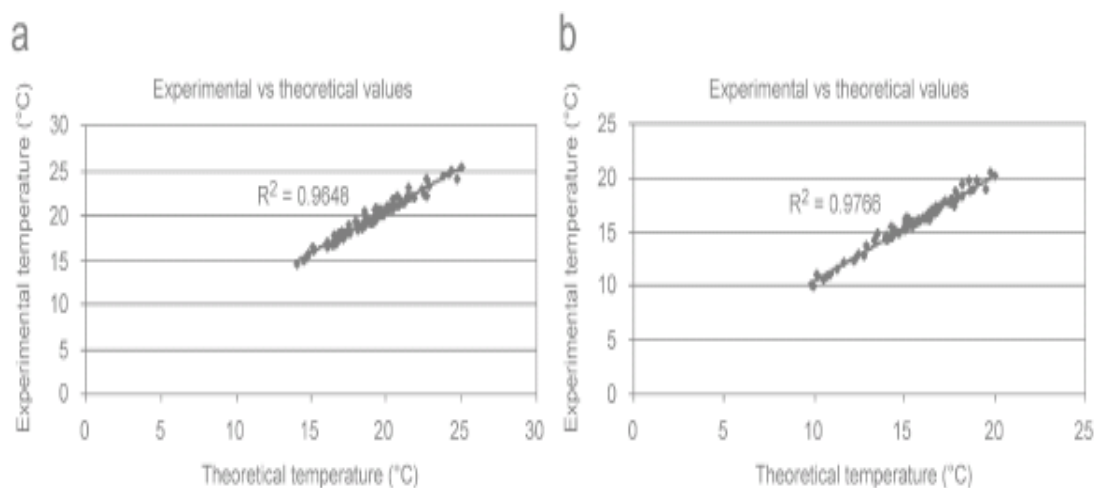


Σχήμα 1.5.3: Θερμοκρασιακή διακύμανση στην έξοδο του ακτινοβολητή συναρτήσει των ωρών λειτουργίας.

Στο παραπάνω σχήμα (α) φαίνεται η διακύμανση τόσο των πειραματικών, όσο και των θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας στην έξοδο του ακτινοβολητή, για το χρώμα με αφετική ικανότητα 0,71. Βέβαια, στις τιμές της ώρας συμπεριλαμβάνονται μόνο οι νυκτερινές, δηλαδή για αυτές που λειτουργούσε ο ακτινοβολητής. Έτσι, οι πρώτες εννιά ώρες αντιστοιχούν στην πρώτη νύκτα λειτουργίας (δηλαδή από τις 22:00 της 20/08/06 ως τις 06:00 της 21/08/06) οι επόμενες εννέα αντιστοιχούν στη δεύτερη μέρα λήψης τιμών κ.ο.κ. και τελικά η 45^η ώρα αντιστοιχεί στις 06:00 της 31^{ης} Αυγούστου. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών για όλο το εύρος λειτουργίας στο δεκαήμερο πείραμα.

Όμοια, στο δεύτερο σχήμα (β) η διακύμανση τόσο των πειραματικών, όσο και των θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας στην έξοδο του ακτινοβολητή, για το χρώμα με αφετική ικανότητα 0,93 δεν διαφέρει πολύ. Κατά τη διάρκεια του δεκαήμερου πειράματος από 31/08 και ώρα 22:00 έως τις 10/09 και ώρα 06:00 οι τιμές της θερμοκρασίας σχεδόν συμπίπτουν.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των τιμών της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του ακτινοβολητή για όλο το διάστημα του πειράματος (10 ημέρες). Το γράφημα (α) αντιστοιχεί στη βαφή του ακτινοβολητή με αφετική ικανότητα 0,71, ενώ το (β) σε αυτή με αφετική ικανότητα 0,93. Εύκολα παρατηρεί κάποιος την μεγάλη σύγκλιση που παρουσιάζουν, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τη γραμμική απόκλιση εξαρτημένης στατιστικής μεταβλητής(εδώ θερμοκρασία) που βρίσκεται κοντά στη μονάδα και στις δύο περιπτώσεις : γράφημα (α) για $\epsilon = 0,71$, $R^2 = 0,9648$ και γράφημα (β) για $\epsilon = 0,93$, $R^2 = 0,9766$



Σχήμα 1.5.4: Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από τον ακτινοβολητή, για μπόγιά με αφετική ικανότητα:(α) 0,71 και (β) 0,93.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο βαθμός συσχέτισης-αντιστοιχίας (correlation coefficient) μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας για κάθε μέρα του πειράματος για τους δύο ακτινοβολητές (κατά τα γνωστά: (α) $\epsilon = 0,71$ και (β) $\epsilon = 0,93$). Οι πολύ υψηλές τιμές του βαθμού αυτού: $0,959278 < CC < 0,988345$ για το (α) και $0,957786 < CC < 0,986548$ για το (β) επιβεβαιώνουν για άλλη μια φορά την εγγύτητα των τιμών και για τις δύο περιπτώσεις.

Day	CC
(a)	
1	0.974169
2	0.977206
3	0.959278
4	0.959417
5	0.979823
6	0.977007
7	0.988345
8	0.959616
9	0.960218
10	0.967170
(b)	
1	0.958693
2	0.978610
3	0.977582
4	0.966045
5	0.986137
6	0.978473
7	0.967282
8	0.961923
9	0.986548
10	0.957786

Πίνακας 1.5.2: Βαθμός συσχέτισης-αντιστοιχίας (correlation coefficient) μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας για τη διάρκεια (δέκα μέρες) του πειράματος για την βαφή του ακτινοβολητή με αφετική ικανότητα (α) 0,71 και (β) 0,93.

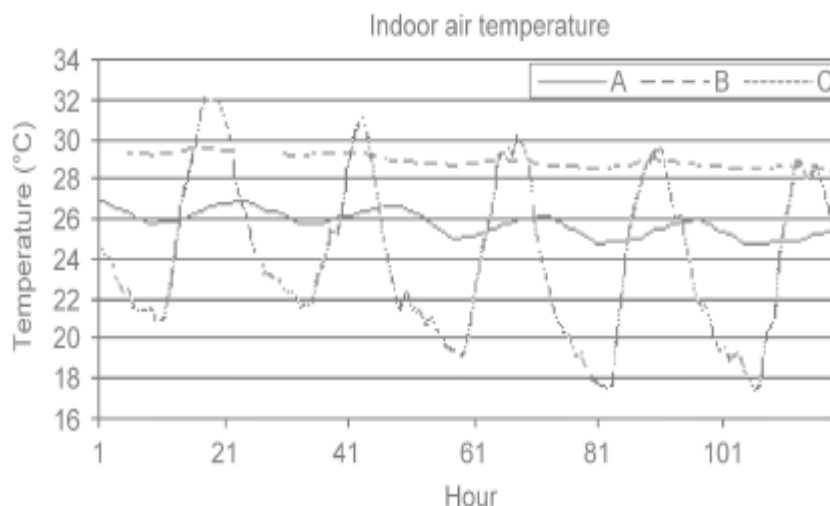
Από τα αποτελέσματα του πειράματος για τους δύο ακτινοβολητές, μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

Ο ακτινοβολητής με την βαφή που έχει αφετική ικανότητα 0,71 είναι λιγότερο αποδοτικός όσο αφορά την επίτευξη χαμηλών θερμοκρασιών, συγκριτικά με την άλλη βαφή. Όπως φαίνεται και στα σχήματα 1.5.3 (α) και (β) ο ακτινοβολητής με τη βαφή με την μικρότερη αφετική ικανότητα, παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων στην περιοχή των χαμηλότερων θερμοκρασιών. Έτσι, για την βαφή με $\epsilon = 0,71$ παρατηρούμε διαφορές 0,43, 0,41 και 0,42 °C για την 18^η, την 45^η και την 63^η ώρα αντίστοιχα. Αντιθέτως, η μπογιά με αφετική ικανότητα 0,93 παρουσιάζει διαφορές 0,28, 0,20 και 0,29 °C τις αντίστοιχες ώρες.

Επιπλέον, υπάρχει καλύτερη συσχέτιση ανάμεσα σε πειραματικές και θεωρητικές τιμές θερμοκρασίας για τον ακτινοβολητή με την μεγαλύτερη αφεικτική ικανότητα. Δηλαδή, ο ακτινοβολητής με $\epsilon=0,71$ έχει $R^2= 0,9648$, ενώ ο δεύτερος με την καλύτερη βαφή $\epsilon=0,93$ έχει $R^2=0,9766$ (σχήμα 1.5.4 (α) και (β)).

Από τα παραπάνω, γίνεται εύκολα αντιληπτή η σημασία της αφεικτικής ικανότητας της βαφής του ακτινοβολητή και η επίδρασή της στην αποδοτικότητα του όλου συστήματος.

Ξέχωρα από τις μετρήσεις που αφορούσαν τον ακτινοβολητή, έγιναν και άλλες που αφορούσαν τον προς ψύξη χώρο. Μετά την ψύξη του από τον ακτινοβολητή με την μεγαλύτερη αφεικτική ικανότητα, με τη βοήθεια του ανεμιστήρα, ο αέρας διοχετεύτηκε σε συγκεκριμένο χώρο του κτιρίου. Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα ήταν υπό εικοσιτετράωρη παρακολούθηση και καταγραφή, καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος. Ένα διπλανό γραφείο με παρόμοιο προσανατολισμό, διαστάσεις, κατασκευή και εσωτερικά θερμικά κέρδη βρίσκονταν και αυτό υπό παρακολούθηση 24 ώρες τη μέρα και σε καθημερινή βάση για όλο το χρονικό διάστημα του πειράματος. Βέβαια, αυτό το δεύτερο γραφείο δεν είχε κανένα σύστημα ψύξης καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 1.5.5: Γραφική παράσταση της χρονικής διακύμανσης της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα για τα δύο γραφεία. Με (Α) φαίνεται η θερμοκρασία του δωματίου που συνδέεται με τον νυκτερινό ακτινοβολητή, με (Β) παριστάνεται το γραφείο χωρίς ψυκτικό σύστημα και με (Γ) η θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα για 5 τυχαία επιλαχούσες ημέρες κατά τη διάρκεια του πειράματος (από τις 22:00 της 15^{ης} Σεπτεμβρίου μέχρι τις 6:00 της 20^{ης} Σεπτεμβρίου).

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η εικοσιτετράωρη διακύμανση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα για τα δύο δωμάτια. Το ένα είναι συνδεδεμένο με το σύστημα του νυκτερινού ακτινοβολητή, ενώ το άλλο με καμία ψυκτική διάταξη. Ο άξονας του χρόνου (ο οριζόντιος) αφορά πέντε τυχαίες μέρες εντός του χρονικού διαστήματος που έλαβε χώρα το πείραμα. Έτσι, οι πρώτες 24 ώρες (1 με 24) αφορούν το διάστημα από 15/9 και ώρα 22:00 έως τις 22:00 της 16/9. Οι επόμενες 24 ώρες (από 25 έως 48) είναι μεταξύ της 16/9 και ώρα 22:00 μέχρι τις 22:00 της 17/9 κ.ο.κ. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό στο διάγραμμα, η θερμοκρασιακή διαφορά για τα δύο δωμάτια κυμαίνεται από 4°C για τις πρώτες πρωινές ώρες ως 2,5°C για τις ώρες της ημέρας. Αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά για τις πρωινές ώρες είναι αρκετά αξιοσημείωτη, δεδομένου ότι δεν λειτουργούσε τότε ο ακτινοβολητής και οφείλεται κυρίως στη θερμική αδράνεια του κτιρίου. Συγκεκριμένα, η διαφορά αυτή λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της στις 06:00 το πρωί κάθε ημέρας, τότε δηλαδή που είναι οι τελευταίες χρονικές στιγμές λειτουργίας του συστήματος και παρατηρούνται οι χαμηλότερες θερμοκρασίες στην έξοδο του ακτινοβολητή και στον περιβάλλοντα αέρα. Στο διάστημα των πέντε ημερών, αυτή η μέγιστη διαφορά (στις 06:00 κάθε πρωί) αυξάνει όσο αυξάνεται και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα στην έξοδο του ακτινοβολητή και του αέρα στο δωμάτιο χωρίς ψύξη. Το συμπέρασμα αυτό, φαίνεται καλύτερα και στον πίνακα που ακολουθεί, όπου φαίνεται η αριθμητική διαφορά στις ώρες όπου εμφανίζονται τα μέγιστα (06:00 το πρωί).

Hour	$T_{\text{room2}} - T_{\text{abm}}$ (°C)	$T_{\text{room2}} - T_{\text{room1}}$ (°C)
9	7.69	3.41
33	7.42	3.36
57	9.07	3.53
81	10.60	3.79
105	10.46	3.75

Πίνακας 1.5.3:Θερμοκρασιακές διαφορές για τα δύο υπό μέτρηση δωμάτια και μεταξύ ατμοσφαιρικού αέρα και αέρα στο δωμάτιο χωρίς ψύξη.(θερμοκρασιακές διαφορές εσωτερικού και εξωτερικού χώρου). Με T_{amb} συμβολίζεται η θερμοκρασία του αέρα εκτός κτιρίου (°C), με T_{room1} η θερμοκρασία του γραφείου σε σύνδεση με τον ακτινοβολητή και με T_{room2} η θερμοκρασία του γραφείου χωρίς ψύξη.

Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν για όλη τη διάρκεια του πειράματος, κάτι που αποδεικνύει την αποδοτικότητα του συστήματος του νυκτερινού ακτινοβολητή. Άρα, ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε όντως να μειώσει αξιοσημείωτα την κατανάλωση ενέργειας για την ψύξη ενός κτιρίου.

Συνοψίζοντας, ένας ελαφρύς αλουμινένιος ακτινοβολητής με κατάλληλη βαφή, εγκαταστάθηκε στην οροφή του κτιρίου του τμήματος Διαχείρισης Περιβαλλοντικών και Φυσικών Πόρων στο Αγρίνιο. Ένα ακριβές μαθηματικό μοντέλο, με βάση τη μετάδοση θερμότητας από τον αέρα εσωτερικά του ακτινοβολητή προς τον περιβάλλοντα αέρα, σύμφωνα με τη μέθοδο των Ito και Miura, χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του ακτινοβολητή προς το εσωτερικό του κτιρίου. Το μοντέλο αυτό δοκιμάστηκε από την εκτενή σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και των θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας. Τελικά, προέκυψε μια πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των τιμών αυτών.

Η διαδικασία λήψης πειραματικών τιμών περιελάμβανε και την δοκιμή δύο διαφορετικών βαφών για τον ακτινοβολητή. Τελικά, προέκυψε ότι η αφετική ικανότητα της βαφής του ακτινοβολητή μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην αποδοτικότητα του συστήματος.

Επίσης, ο νυκτερινός ακτινοβολητής χρησιμοποιήθηκε για να παρέχει ψύξη σε χώρο εντός του κτιρίου του πανεπιστημίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σαν θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ του δωματίου σε σύνδεση με τον ακτινοβολητή και ενός άλλου όμοιου χώρου με παντελή έλλειψη ψυκτικού συστήματος. Οι θερμοκρασιακές διαφορές που βρέθηκαν ήταν αξιοσημείωτες και κυμαίνονταν μεταξύ 2,5 και 4°C τις πρώτες πρωινές ώρες (τελευταίες ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή). Από την παραπάνω διαδικασία έγινε φανερό η πολύ καλή αποτελεσματικότητα του συστήματος του ακτινοβολητή και οι προοπτικές για την χρήση του σαν μέθοδος παθητικής ψύξης.

Μέρος 2ο:

2.1) Εισαγωγή:

Στο προηγούμενο μέρος της παρούσας εργασίας έγινε η παρουσίαση των παθητικών συστημάτων, των μεθόδων παθητικής ψύξης και ειδικά της ψύξης με ακτινοβολία. Στα πρώτα κεφάλαια έγινε απλή αναφορά στις διάφορες μεθόδους, αλλά στα τελευταία αναπτύχθηκε εκτενώς η μέθοδος του ακτινοβολητή.

Σε αυτό το δεύτερο μέρος θα χρησιμοποιήσουμε τις γνώσεις που αποκομίσαμε από τα προηγούμενα κεφάλαια για να κάνουμε μια υποθετική εφαρμογή της μεθόδου του ακτινοβολητή στην περιοχή της Αθήνας. Έχοντας σαν βάση τα ρεαλιστικά κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής, θα προσπαθήσουμε να εκτιμήσουμε την απόδοση που θα είχε μια τέτοια εφαρμογή σε ένα κοινό κτίριο εντός της πόλης. Κρίνεται αυτονόητο, ότι αφού η μελέτη αφορά την παθητική ψύξη, η υπό ανάλυση περίοδος θα αφορά μόνο τους ζεστούς μήνες του έτους. Δηλαδή, από τις αρχές του Ιουνίου έως το πρώτο μισό του Σεπτεμβρίου, περίοδος κατά την οποία παρατηρείται αυξημένη ζήτηση για κλιματισμό. Βέβαια, όπως είδαμε προηγουμένως, με αντιστροφή της λειτουργίας του ακτινοβολητή, μπορεί να παρέχει και θέρμανση τις ημέρες του χειμώνα. Αλλά κάτι τέτοιο θα ξέφευγε από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μιας και θα εμπίπτει στις μεθόδους παθητικής θέρμανσης.

Αναλυτικότερα, όσο αφορά το υπολογιστικό μέρος, θα αναπτυχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά του ακτινοβολητή. Αυτό θα πρέπει να έχει σαν είσοδο δεδομένων τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν στην οροφή του κτιρίου (σχετική υγρασία, νεφώσεις, ταχύτητα του ανέμου και ατμοσφαιρική θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα). Τούτο συμβαίνει, λόγω τις άμεσης εξάρτησης της μεθόδου αυτής από τα μετεωρολογικά φαινόμενα, όπως προκύπτει από την ανάλυση της μεθόδου στα κεφάλαια του πρώτου μέρους. Σαν έξοδο, το ίδιο μοντέλο θα πρέπει να δίνει την μειωμένη θερμοκρασία του αέρα καθώς απομακρύνεται από τον ακτινοβολητή. Έπειτα, με γνωστές μαθηματικές σχέσεις θα υπολογιστεί το ψυκτικό φορτίο που μεταφέρεται εντός του κτιρίου (υπολογιστικές μέθοδοι φαινομένων μεταφοράς). Βέβαια, λόγω του όγκου των υπολογισμών, η χρήση υπολογιστικού προγράμματος στον Η/Υ κρίνεται αναγκαία. Τελικά, μετά τους υπολογισμούς, θα ακολουθήσει παρουσίαση των αποτελεσμάτων και σχόλια επ'αυτών, ώστε να αξιολογηθούν οι προοπτικές προώθησης της μεθόδου αυτής, εαν βέβαια είναι ενθαρρυντικά τα αποτελέσματα που θα προκύψουν.

2.2) Μοντελοποίηση του Ακτινοβολητή:

Ο τύπος του ακτινοβολητή που θα προσομοιωθεί, θα είναι ο ίδιος με το πείραμα που διεξήχθη στο Πανεπιστήμιο των Ιωαννίνων. Δηλαδή, ελαφρύς μεταλλικός ακτινοβολητής με κατάλληλη βαφή. Οι τιμές της σχετικής υγρασίας για την περιοχή της Αθήνας δεν είναι αρκετά υψηλές, εκ πρώτης άποψης βέβαια, ώστε να επιβάλλεται ανεμοθώρακας από πολυαιθυλένιο. Έτσι, σε πρώτη φάση θα μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά του ακτινοβολητή και σε δεύτερη φάση θα υπολογιστεί το ψυκτικό φορτίο αυτού και πόσο βοηθάει το κτίριο ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας.

Η μαθηματική μοντελοποίηση μπορεί να χωριστεί σε τρία βήματα. Το πρώτο αφορά τον υπολογισμό της απώλειας θερμότητας από τον ακτινοβολητή προς το περιβάλλον σαν συνάρτηση της έντασης του περιβάλλοντος αέρα, της σχετικής υγρασίας και των νεφώσεων. Το δεύτερο βήμα αφορά τον υπολογισμό της θερμοκρασίας παύσης (stagnation temperature) και τη θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού μέσου από τον ακτινοβολητή. Τέλος, το τρίτο βήμα περιλαμβάνει τον υπολογισμό της ψυκτικής ισχύος προς το κτίριο, σαν συνάρτηση των στοιχείων σχεδίασης του ακτινοβολητή και της ροής του αέρα.

Οι κλιματικές προοπτικές των μεθόδων ψύξης με ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, έχουν διερευνηθεί από πολλούς μελετητές. Οι Clark και Allen (1978) ανέπτυξαν μια φόρμουλα για να υπολογίσουν την αφετική ικανότητα του ουρανού E_s , σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου του περιβάλλοντος αέρα T_{dp} :

$$E_s = 0,787 + 0,764 \ln((T_{dp} + 273)/273) \quad (2.2.1)$$

Η αφετική ικανότητα του ουρανού μπορεί να επηρεαστεί από την παρουσία νεφώσεων. Το γεγονός αυτό μεταφράζεται μαθηματικά με έναν συντελεστή C:

$$C = 1 + 0,0224n - 0,0035n^2 + 0,00028n^3 \quad (2.2.2)$$

Άρα, πλέον η αφετική ικανότητα του ουρανού θα δίνεται από τη σχέση:

$$E_c = E_s(1 + 0,0224n - 0,0035n^2 + 0,00028n^3) \quad (2.2.3)$$

Όπου με n συμβολίζεται το συνολικό ποσό αδιαφανούς νέφωσης. Δηλαδή, για καθαρό ουρανό θα ισχύει $n=0$, ενώ για συννεφιασμένο $n=1$.

Η μετάδοση θερμότητας δια συναγωγής μεταξύ του ακτινοβολητή και του περιβάλλοντος αέρα, που ουσιαστικά αποτελεί και το ψυκτικό φορτίο προς το κτίριο γράφεται:

$$Q_c = h_c \cdot (T_r - T_a) \quad (2.2.4)$$

Όπου με h_c συμβολίζεται ο συντελεστής συναγωγής ο οποίος είναι συνάρτηση της ταχύτητας του περιβάλλοντος αέρα και δίνεται από τις εξής σχέσεις:

$$h_c = 5,7 + 3,8u \quad \text{για } u < 4 \text{ m/s} \quad (2.2.5)$$

$$h_c = 7,3u^{0,8} \quad \text{για } u > 4 \text{ m/s}$$

βέβαια, οι παραπάνω σχέσεις αφορούν ακτινοβολητή χωρίς ανεμοθώρακα. Για την περίπτωση ακτινοβολητή με μία στρώση πολυαιθυλενίου θα ισχύει:

$$h_c = 0,5 + 1,2 \cdot (V)^{0,5} \quad (2.2.6)$$

Η εκπεμπόμενη ροή θερμότητας του ακτινοβολητή προς τον ουρανό, θα μπορούσε να ενσωματωθεί στην ροή θερμότητας προς το περιβάλλον (ambient) Q_{amb} , η οποία περιλαμβάνει τη ροή θερμότητας από ακτινοβολία και από συναγωγή με τα ρεύματα αέρα και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{amb} = h_e (T_r - T_{st}) \quad (2.2.7)$$

όπου h_e είναι ο συντελεστής ενεργούς μετάδοσης θερμότητας και T_{st} η απόλυτη θερμοκρασία αποτελμάτωσης (absolute stagnation temperature).

Ο συντελεστής ενεργούς μετάδοσης θερμότητας h_e υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$h_e = h_{rad} + h_c \quad (2.2.8)$$

όπου h_{rad} είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας δια ακτινοβολίας και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$h_{rad} = 0,000000227 \tau \epsilon T_a^2 \quad (2.2.9)$$

με τ συμβολίζεται η υπέρυθη διαπερατότητα του ανεμοθώρακα (εάν δεν υπάρχει ανεμοθώρακας τότε $\tau=1$), με ϵ η υπέρυθη αφετική ικανότητα του

ακτινοβολητή και με T_a η απόλυτη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε βαθμούς Kelvin.

Γενικά, η θερμοκρασία κατωφλίου ή θερμοκρασία αποτελμάτωσης (T_{st} σε $^{\circ}K$ ή θ_{st} σε $^{\circ}C$) είναι η θερμοκρασία στην οποία μπορεί να πέσει ένα σώμα χωρίς να αρχίσει να προστίθεται θερμότητα σε αυτό. Για την περίπτωση του ακτινοβολητή, η θερμοκρασία κατωφλίου είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία αποτελμάτωσης που μπορεί να φτάσει ο ακτινοβολητής, με τον περιορισμό να μην είναι $1^{\circ}C$ κάτω από το σημείο δρόσου του περιβάλλοντα αέρα.

Η θερμοκρασία κατωφλίου θ_{st} ($^{\circ}C$) υπολογίζεται με την κάτωθι φόρμουλα:

$$\theta_{st} = \theta_a - 0,000000057(1 - \epsilon_s) \theta_a^4 / h_e \quad (2.2.10)$$

όπου με θ_a συμβολίζεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος και με ϵ_s η αφετική ικανότητα του ουρανού.

Οι Givoni και Mostrel (1982) ανέπτυξαν μαθηματικές φόρμουλες για να υπολογίζουν την θερμοκρασία στασιμότητας (stagnation temperature) ενός ακτινοβολητή, είτε έχει ανεμοθώρακα, είτε όχι. Οι φόρμουλες αυτές υπολογίζουν τη θερμοκρασία στασιμότητας συναρτήσεως των μετεωρολογικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία και ταχύτητα αέρα) και των συνθηκών θωράκισης του ακτινοβολητή, εξισώνοντας την καθαρή απώλεια θερμότητας με το θερμικό κέρδος από συναγωγή ενός στάσιμου ακτινοβολητή. Βέβαια, η φόρμουλα αυτή δεν συνυπολογίζει τη νέφωση.

Εξισώνοντας την καθαρή απώλεια θερμότητας με τα θερμικά κέρδη από την αλληλεπίδραση αέρα και ακτινοβολητή ($R = Q_c$) τελικά προκύπτει μία σχέση που μπορεί να προβλέψει την θερμοκρασία στασιμότητας του ακτινοβολητή T_{st} , σαν συνάρτηση των θερμοκρασιών του αέρα και ουρανού και των νεφώσεων:

$$T_{st} = (0,544 \cdot C_n \cdot E_r \cdot T_{cs} + h_c \cdot T_a) / (0,544 \cdot C_n \cdot E_r + h_c) \quad (2.2.11)$$

Όπου C_n είναι ο παράγοντας των νεφώσεων σύμφωνα με τους Clark και Allen(1978):

$$C_n = 1 - 0,056 \cdot n \quad (2.2.12)$$

και n είναι ο δείκτης νεφώσεων.

Το πρόβλημα του υπολογισμού της θερμοκρασίας του ψυκτικού υγρού που ρέει σε ένα μονοδιάστατο κανάλι εντός του ακτινοβολητή, λύθηκε από τους Ito

και Miura όμοια με την περίπτωση του ηλιακού θερμοσίφωνα:

$$T_{out}-T_{st} = (T_{in}-T_{st})e^{-UA/mCp} \quad (2.2.13)$$

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς τη ζητούμενη T_{out} , δηλαδή την θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού μέσου από τον ακτινοβολητή, προκύπτει η σχέση:

$$T_{out} = T_{st} + (T_{in} - T_{st})e^{-UA/mCp} \quad (2.2.14)$$

όπου T_{in} είναι η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού μέσου ($^{\circ}K$), U είναι ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ του ρευστού που κυκλοφορεί κάτω από τον ακτινοβολητή και του περιβάλλοντα αέρα (W/m^2K), A είναι το εμβαδόν του επίπεδου ακτινοβολητή (m^2), m είναι η παροχή του εργαζόμενου ρευστού (kg/s) και Cp η θερμοχωρητικότητα του εργαζόμενου ρευστού (J/kgK).

Ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας U υπολογίζεται από το άθροισμα των επιμέρους θερμικών αντιστάσεων:

$$U = 1/R \quad (2.2.15)$$

και

$$R = R_f + R_e + R_a \quad (2.2.16)$$

όπου R η ολική θερμική αντίσταση και R_f η αντίσταση του επίπεδου ακτινοβολητή, που ισούται με: $R_f = d/k$ (d είναι το πάχος του ακτινοβολητή (m) και k η θερμική αγωγιμότητα του ακτινοβολητή ($k = 236 W/mK$)). Με R_e συμβολίζεται η ενεργός αντίσταση $R_e = 1/h_e$ και με R_a η αντίσταση μεταξύ του αέρα και του ακτινοβολητή $R_a = 1/h$ (το h είναι ο αντίστοιχος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ ακτινοβολητή και αέρα που κυκλοφορεί κάτωθεν αυτού).

Τελικά, συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας U μπορεί να εκφραστεί και:

$$U = 1/(1/h_e) + (1/h) + (d/k) \quad (2.2.17)$$

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας h ορίζεται από τις τιμές της υδραυλικής διαμέτρου D_h και της ταχύτητας u του αέρα που κυκλοφορεί κάτω από τον αγωγό.

Η υδραυλική διάμετρος D_h προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$D_h = 2w[z/(w+z)] \quad (2.2.18)$$

Μετά την παρουσίαση των μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφουν τη λειτουργία του ακτινοβολητή, είμαστε σε θέση πλέον να υπολογίσουμε και το ψυκτικό φορτίο που παράγεται από αυτόν, αρκεί να γνωρίζουμε τα δεδομένα εισόδου του ακτινοβολητή καθώς και τα γεωμετρικά-κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του. Στην περίπτωση μας, τα δεδομένα αυτά είναι τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής των Αθηνών και τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του (θα δοθούν σε επόμενο κεφάλαιο).

Στη συνέχεια, ακολουθεί μια απλή εφαρμογή των παραπάνω για μια τυπική μέρα του καλοκαιριού στην Αθήνα. Τα κλιματολογικά δεδομένα προέρχονται από στατιστικά στοιχεία για την 21 Ιουλίου και θεωρούμε ότι η ατμόσφαιρα είναι καθαρή, δηλαδή χωρίς νεφώσεις, ήτοι $c=0$.

Έτσι, θεωρούμε ελαφρύ ακτινοβολητή από αλουμίνιο πάχους $d(m)=0,01$, μήκους $L(m)=10$ (μήκος θεωρείται η διάσταση παράλληλα στη ροή του αέρα εσωτερικά του ακτινοβολητή), πλάτους $W(m)=1$, διακένου μεταξύ ακτινοβολητή και μόνωσης $Z(m)=0,03$. Η θερμική διαπερατότητα του αλουμινίου είναι $k=200 \text{ W/mK}$, η αφετική ικανότητα της βαφής του είναι $\epsilon_R=0,93$, ενώ η ταχύτητα του αέρα εντός του ακτινοβολητή είναι $u=2,5 \text{ m/s}$.

Όσο αφορά τα κλιματολογικά δεδομένα δίδονται στον παρακάτω πίνακα, όπως αυτά προέκυψαν από στατιστικά στοιχεία:

Πίνακας 2.2.1): Κλιματολογικά δεδομένα για την τυπική 21 Ιουλίου στην Αθήνα, για τις ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή.

Ώρα	Θερμοκρασία $T_a=T_{in}$ (°C)	Σχετική Υγρασία RH(%)	Ταχύτητα ανέμου v (m/s)
22:00	26,9	49,8	5
23:00	26,5	50,1	5
24:00	26,0	51,2	5
01:00	25,8	55,1	5
02:00	25,3	57,3	5
03:00	24,7	58,2	5
04:00	24,1	59,3	5
05:00	24,1	58,7	5
06:00	24,6	57,8	5

Στον παραπάνω πίνακα, θεωρήσαμε ότι η ταχύτητα του ανέμου παραμένει ίδια σε μέτρο και κατεύθυνση. Τελικά, εισάγοντας όλα τα δεδομένα του παραδείγματός μας στο σύστημα των εξισώσεων(2.2.1 με 2.2.18) προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 2.2.2): Με δεδομένα εισόδου τον πίνακα 2.2.1) και τις παραδοχές που έγιναν, προέκυψαν οι ενδεικτικές τιμές των διαφόρων μεγεθών που αφορούν τον ακτινοβολητή:

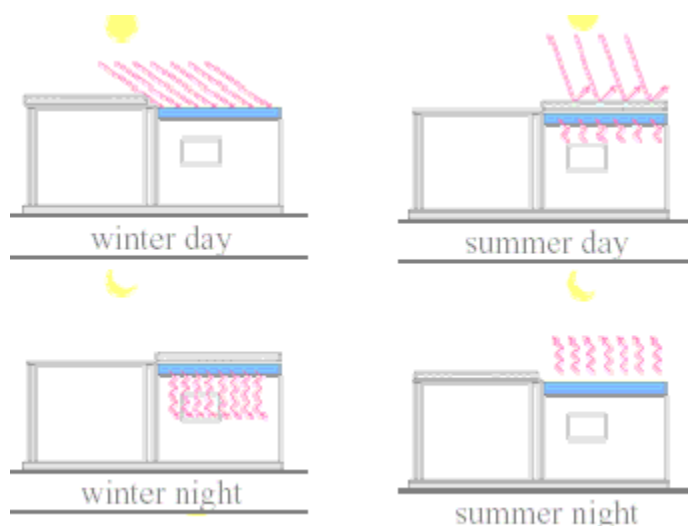
h_e (W/m ² K)	h_r (W/m ² K)	R_e	R	U (W/m ² K)	E_s	T_{st} (°C)	T_{out} (°C)	Q (W/m ²)
32.144	5.694	0.0311	0.1746	5.725	0.8318	24.66	26.76	4.544
32.122	5.672	0.0311	0.1747	5.725	0.8302	24.24	26.36	4.564
32.093	5.643	0.0311	0.1747	5.724	0.8281	23.73	25.86	4.588
32.082	5.632	0.0311	0.1747	5.723	0.8272	23.52	25.66	4.598
32.054	5.604	0.0311	0.1747	5.723	0.8252	23.01	25.16	4.622
32.019	5.567	0.0312	0.1747	5.721	0.8227	22.39	24.55	4.649
31.986	5.536	0.0312	0.1748	5.720	0.8202	21.78	23.95	4.676
31.986	5.536	0.0312	0.1748	5.720	0.8202	21.78	23.95	4.676
32.014	5.564	0.0312	0.1747	5.721	0.8223	22.29	24.45	4.654

Από τον παραπάνω πίνακα, τα στοιχεία με την μεγαλύτερη σημασία είναι η θερμοκρασία εξόδου T_{out} και το ψυκτικό φορτίο Q . Η διαφορά $T_{in}-T_{out}$ είναι της τάξης του 0,14-0,15 °C όχι αρκετά σημαντική δηλαδή, αλλά αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εξετάσαμε μία τυχαία μέρα ενδεικτικά και όχι όλη την περίοδο ενδιαφέροντος. Αντιθέτως, το συνολικό ψυκτικό φορτίο Q για όλη τη διάρκεια λειτουργίας του ακτινοβολητή για εκείνη τη μέρα ανέρχεται σε 41,57 W/m² και είναι αρκετά ενθαρρυντικό.

2.3) Χρήση του ακτινοβολητή:

Η παρούσα εργασία μελετάει την αποδοτικότητα που θα είχε ο ακτινοβολητής, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στο κλίμα της Αθήνας. Στόχος της εγκατάστασης μιας τέτοιας διάταξης σε ένα τυπικό κτίριο είναι η εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της φυσικής, κατά κάποιο τρόπο, ψύξης που θα παρέχει. Βέβαια, η εγκατάστασή του δεν αναμένεται να αντικαταστήσει εντελώς κάποια ενδεχόμενη κλιματιστική μονάδα που μπορεί να έχει το κτίριο, αλλά να περιορίσει τις ώρες λειτουργίας της.

Όπως είδαμε και στο θεωρητικό μέρος της εργασίας, παρόμοιες εφαρμογές ακτινοβολητών αξιοποιήθηκαν εξίσου αποτελεσματικά καθ'όλη τη διάρκεια του έτους. Αυτό επετεύχθη αναστρέφοντας τις ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή, από νυκτερινές κατά το θέρους σε πρωινές το χειμώνα. Στη δεύτερη περίπτωση, ο ακτινοβολητής ομοιάζει πλέον περισσότερο με ηλιακό συλλέκτη, μόνο που αντί να θερμαίνει νερό χρήσης, θερμαίνει το ρευστό (αέρας ή νερό, ανάλογα με το σχεδιασμό του ακτινοβολητή) παρέχοντας θέρμανση στο κτίριο. Άρα πλέον εκμεταλλευόμαστε την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, αντί της νυκτερινής εκπεμπόμενης μεγάλου μήκους κύματος.



Σχήμα 2.3.1: Συνδυασμένη ετήσια λειτουργία του ακτινοβολητή όλο το έτος για ψύξη το καλοκαίρι και θέρμανση το χειμώνα.

Κάτι τέτοιο φαντάζει πιο ολοκληρωμένη λύση για ένα κτίριο, αφού με το ίδιο σύστημα ακτινοβολητή εμφανίζεται εξοικονόμηση ενέργειας, που το μεν καλοκαίρι δαπανάται για την ψύξη, το δε χειμώνα για θέρμανση. Έτσι, σε ετήσια βάση περιορίζονται στο σύνολό τους οι ενεργειακές δαπάνες για τη διατήρηση των συνθηκών άνεσης των ενοίκων του κτιρίου. Βέβαια, αφού η εγκατάσταση του ακτινοβολητή μελετάται για την περιοχή της Αθήνας, δηλαδή στη νότια Ευρώπη, ενδεχομένως να είχε μεγαλύτερη αποδοτικότητα όσο αφορά την ψύξη, αφού δαπανάται περισσότερη ενέργεια για κλιματισμό.

Για να επιτευχθεί η αντιστροφή της λειτουργίας του ακτινοβολητή υπάρχουν δύο ενδεχόμενα. Στην περίπτωση που ο ακτινοβολητής είναι η ίδια η οροφή του κτιρίου ή ο ακτινοβολητής είναι προσαρτημένος στο κτιριακό κέλυφος, η παρουσία κινητής μόνωσης κρίνεται αναγκαία. Η κινητή μόνωση θα κλείνει κατά την ημέρα το καλοκαίρι για να εμποδίζει τη θέρμανση του ακτινοβολητή από τον ήλιο και θα ανοίγει το βράδυ για να μπορέσει να εκπέμψει ο ακτινοβολητής. Αντίστροφα, το χειμώνα θα ανοίγει την ημέρα για να επιτρέπει στον ήλιο να θερμαίνει τον ακτινοβολητή, αλλά θα κλείνει τη νύκτα για να εμποδίζει τη θερμότητα να επιστρέψει στην ατμόσφαιρα μέσω τις ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Στην περίπτωση που ο ακτινοβολητής είναι ελαφρύς, μεταλλικός και η λειτουργία του εκκινεί με χρονοδιακόπτη, όπως στην περίπτωση μας, αρκεί να αλλαχθούν οι ρυθμίσεις του timer και τελικά να εκκινεί τη λειτουργία του με την αυγή του ηλίου και να σταματά με τη δύση του. Βέβαια, θα μπορούσε και σε αυτή την περίπτωση να χρησιμοποιηθεί η λύση της κινητής μόνωσης σε συνδυασμό με την αλλαγή στον χρονοδιακόπτη. Κάτι τέτοιο θα βελτιστοποιούσε την απόδοση του ακτινοβολητή, αφού θα ελάττωνε τις θερμικές απώλειες το χειμώνα και το θερμικό κέρδος το καλοκαίρι.

Όμως, όπως είδαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, κάτι τέτοιο αυξάνει κατά πολύ το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του ακτινοβολητή, καθιστώντας τον ασύμφορο ως επένδυση για ένα κτίριο. Η λύση της αλλαγής του ωραρίου του χρονοδιακόπτη φαντάζει πολύ πιο απλή και οικονομικά συμφέρουσα, αλλά δεν θα εξετασθεί περαιτέρω, μιας και αυτή η περίπτωση ξεφεύγει από το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, που είναι η παθητική ψύξη.

2.4) Θερμική προσομοίωση με χρήση Η/Υ:

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει λεπτομερειακή ανάλυση της επίλυσης του υπολογιστικού μέρους της εργασίας, που έγινε με το πρόγραμμα Energyplus™. Το λογισμικό αυτό προέρχεται από συνεργασία πανεπιστημίων των Η.Π.Α και είναι ελεύθερο προς χρήση για κάθε ενδιαφερόμενο που ασχολείται με τη θερμική προσομοίωση κτιρίου. Η χρήση ενός τέτοιου λογισμικού κρίθηκε αναγκαία, καθώς η επίλυση του υπολογιστικού μέρους της εργασίας εμπειρείχε μεγάλο αριθμό δεδομένων και υπολογισμών. Η έκδοση του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η πιο πρόσφατη: Energyplus 4.0.0.

Με δεδομένο το μαθηματικό μοντέλο του ακτινοβολητή από την ενότητα 2.2 της εργασίας, είναι πλέον εφικτή η θερμική προσομοίωση του κτιρίου. Δηλαδή, με δεδομένο τον τρόπο λειτουργίας καθώς και τις μηχανικές ιδιότητες του ακτινοβολητή, είμαστε σε θέση πλέον να μελετήσουμε το κατά πόσο θα ήταν συμφέρουσα μια τέτοια εφαρμογή για την ψύξη ενός κτιρίου στην περιοχή της Αθήνας.

Το υπολογιστικό πακέτο Energyplus μπορεί να προσφέρει με αρκετά ρεαλιστικό τρόπο την θερμική προσομοίωση οποιουδήποτε κτιρίου καθώς και να υπολογίσει μια σειρά από μεταβλητές και παραμέτρους, ανάλογα με τις απαιτήσεις του μελετητή. Πολλά μεγέθη είναι τυποποιημένα με βάση το βιβλίο: «Handbook of Fundamentals», 2005 της ASHRAE, προφανώς επηρεασμένο από την προέλευση του προγράμματος. Παρ'όλα αυτά, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επέμβει και να αλλάξει διάφορα μεγέθη της αρεσκείας του, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της εκάστοτε μελέτης. Παρακάτω, ακολουθεί η λεπτομερέστατη περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε, συμπεριλαμβανομένων και των παραδοχών, υπολογισμών και διαδικασιών που εκτελέστηκαν.

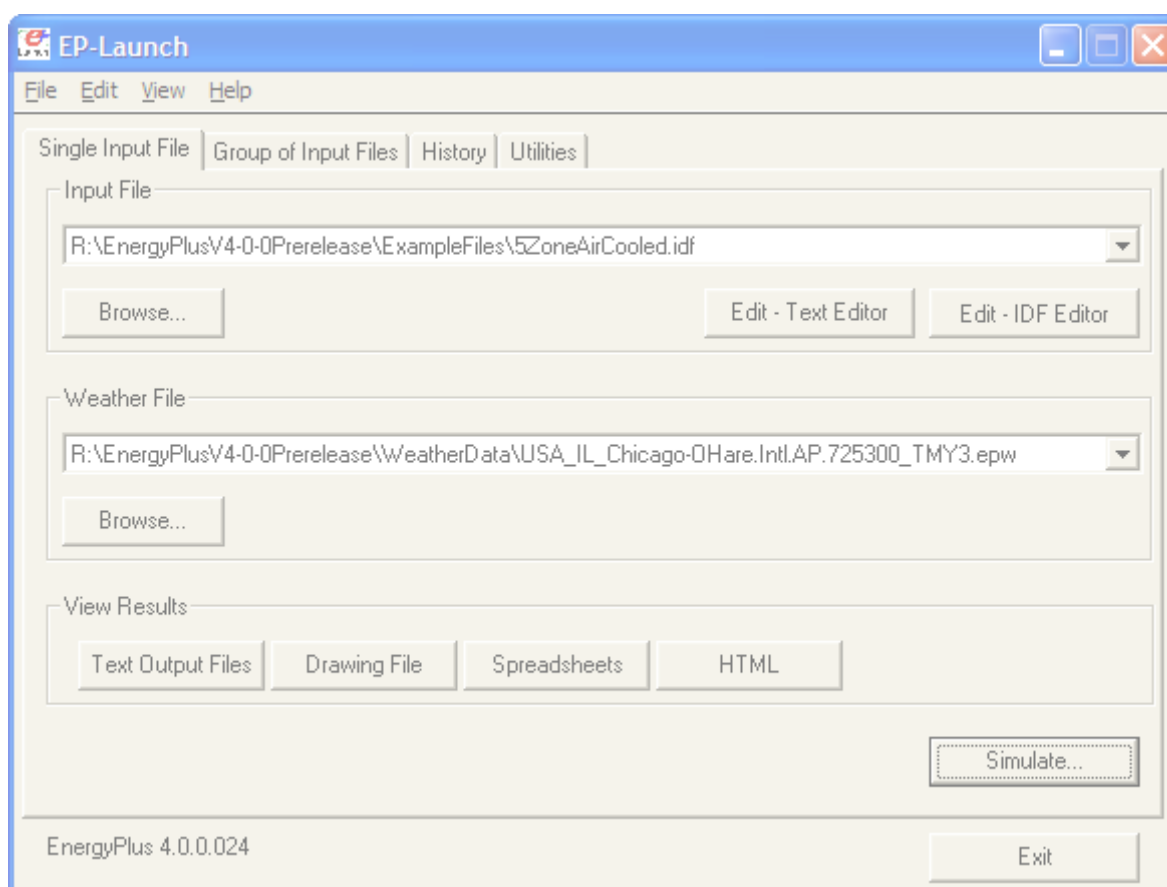
Το πρόγραμμα έχει τη δική του δομή, ως προς τον τρόπο εισαγωγής, εκτέλεσης και εξαγωγής δεδομένων. Η επιφάνεια εργασίας του θυμίζει πολύ το περιβάλλον των Windows™ για να είναι πιο εύχρηστο για τον μελετητή. Σαν δεδομένα εισόδου δέχεται αρχεία τύπου idf, όπου εκεί εμπεριέχονται τα στοιχεία που συνθέτουν την υπό μελέτη περίπτωση (σύνθεση υπόθεσης εργασίας, δομή κτιρίου, επιλογή χρονικού βήματος προσομοίωσης, επιλογή μεταβλητών, παραμέτρων κλπ). Σαν δεύτερη προαιρετική εισαγωγή δεδομένων είναι τα κλιματολογικά δεδομένα (weather file) της υπό μελέτη περιοχής. Αυτά μπορεί να τα αναζητήσει κάποιος στην ηλεκτρονική βιβλιοθήκη δεδομένων του προγράμματος στο διαδίκτυο και προέρχονται από το βιβλίο: «Climate Design Data, ASHRAE 2009 Handbook». Βέβαια, υπάρχει η δυνατότητα μετατροπής κλιματολογικών δεδομένων από άλλη πηγή και άλλη μορφή, σε μορφή αρχείου erw που είναι εκτελέσιμα από το πρόγραμμα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι τα κλιματολογικά δεδομένα εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν με αυτά του Μετεωρολογικού σταθμού της Ε.Μ.Υ. στην περιοχή της Αθήνας και επαληθεύτηκαν σε αρκετά καλό βαθμό από τις γνωστές εμπειρικές σχέσεις του Τομέα θερμότητας του Ε.Μ.Π. για την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία:

$$t_o(H)=M+\sum C_i \cos[i360/24(H-0,5)] + \sum S_i \sin[i360/24(H-0,5)]$$

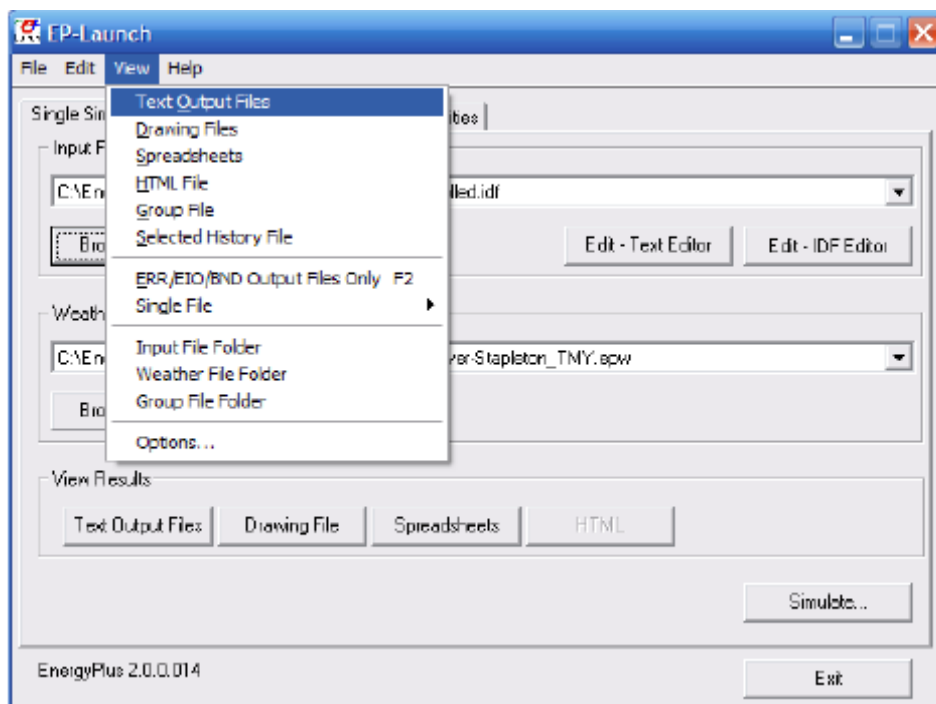
$$\phi_o(H)=m+\sum c_i \cos[i360/24(H-0,5)] + \sum s_i \sin[i360/24(H-0,5)]$$

όπου H είναι η ώρα της ημέρας ($1 \div 24$) και M , C_i , S_i , m , c_i , s_i είναι συντελεστές που δίνονται από γνωστούς πίνακες [11].



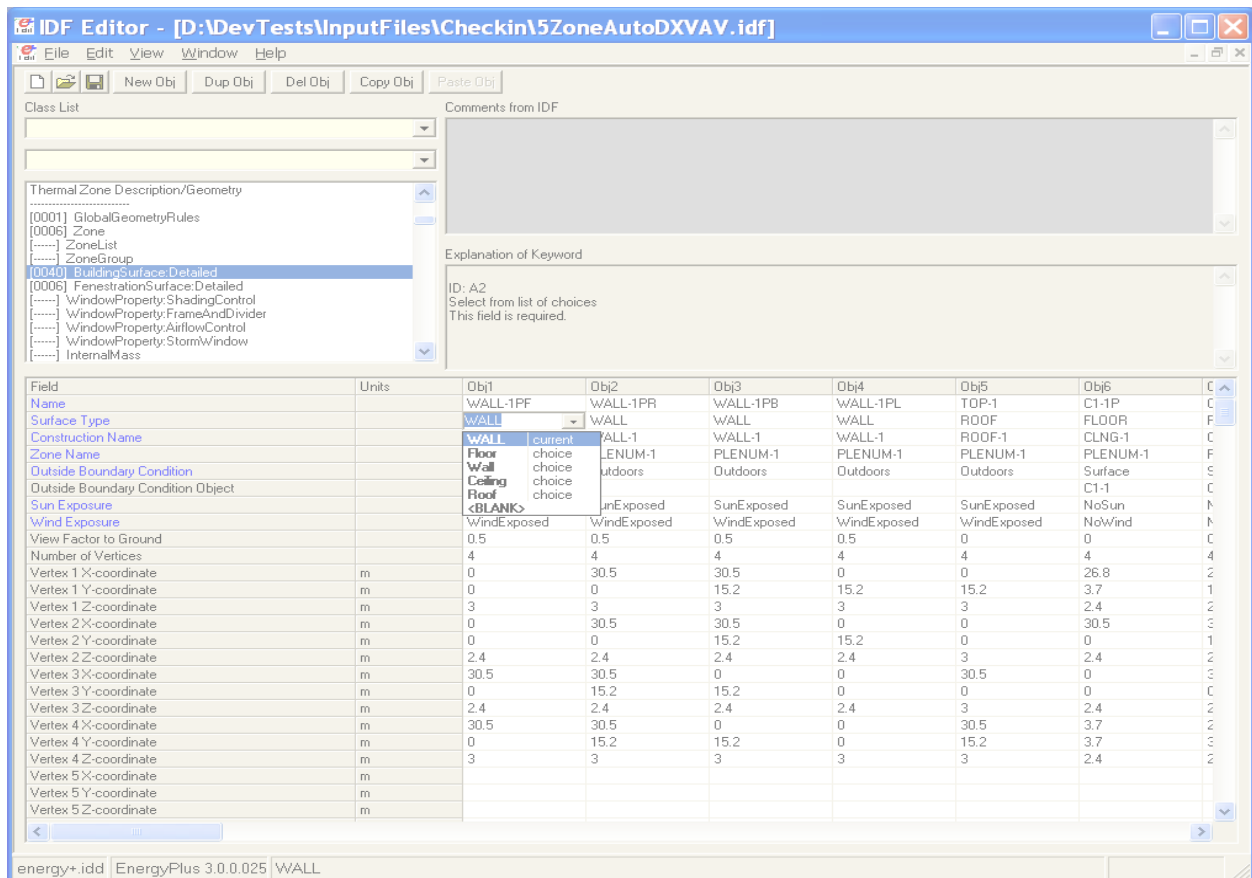
Σχήμα 2.4.1: Η μορφή του κυρίως προγράμματος του πακέτου Energyplus, EP-Launcher. Ξεχωρίζουν οι δύο ζώνες για την εισαγωγή δεδομένων (input files), καθώς και η τρίτη για την εξαγωγή αυτών(output files).

Η έξοδος των δεδομένων μετά την διαδικασία επίλυσης από το πρόγραμμα, γίνεται σε πολλές μορφές αρχείων. Υπάρχει δυνατότητα για το χρήστη να δει σε μορφή σχεδίου το υπό μελέτη κτίριο (Drawing File), να πάρει σε πίνακα ή σε μορφή κειμένου τις τιμές των μεταβλητών που προέκυψαν μετά την επίλυση των θερμικών εξισώσεων (Spreadsheets ή/και HTML αντίστοιχα). Επίσης, μετά από κάθε προσομοίωση ο χρήστης μπορεί να έχει λεπτομερέστατη εικόνα όλων των παραμέτρων που εξετάστηκαν, για το αν κάποια τιμή συνέκλινε ή όχι, αλλά και για το αν παρουσιάστηκαν σφάλματα κατά την εκτέλεση σε μορφή κειμένου και σημειώσεων (Text Output Files).



Σχήμα 2.4.2: Η διαδικασία επιλογής των αρχείων προς εξέταση από τον χρήστη μετά το πέρας των προσομοιώσεων.

Το σημαντικότερο περιφερειακό πρόγραμμα του πακέτου λογισμικού Energyplus είναι το IDF EDITOR. Σε αυτή την εφαρμογή ο χρήστης δίνει όλα τα δεδομένα που συνθέτουν το εκάστοτε πρόβλημα προσομοίωσης. Η μορφή του είναι απλή και ο χειρισμός του θυμίζει επίσης τα Windows.



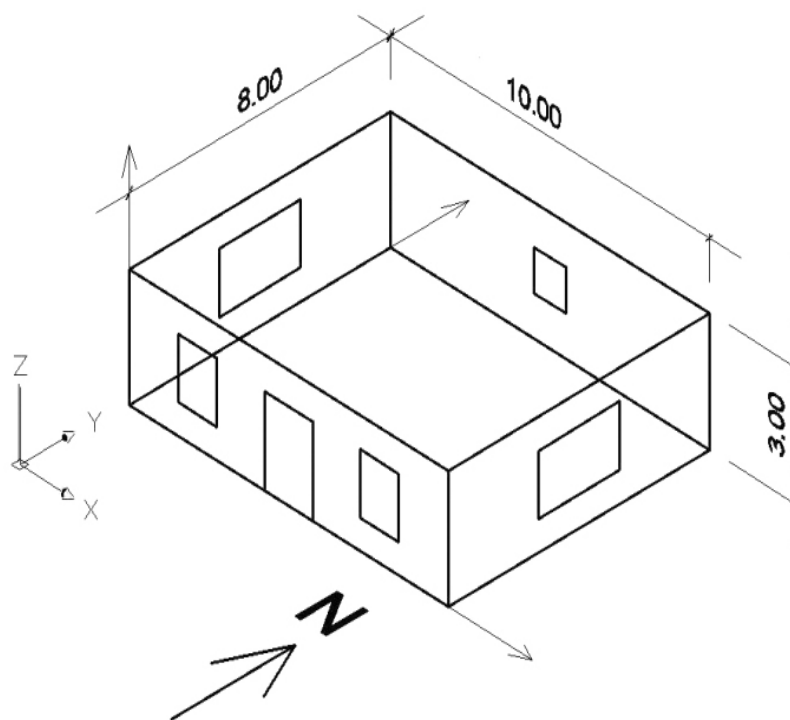
Σχήμα 2.4.3: Η μορφή του περιφερειακού προγράμματος IDF EDITOR. Εδώ καλείται ο χρήστης να καταχωρήσει όλα τα δεδομένα για την εκάστοτε περίπτωση.

Η οθόνη του προγράμματος IDF EDITOR χωρίζεται σε τρία μέρη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4.2. Η αριστερή πλευρά της οθόνης είναι μια λίστα από κατηγορίες που αποτελούν όλες τις πιθανές παραμέτρους που μπορεί να εμπεριέχει ένα πρόβλημα θερμικής προσομοίωσης κτιρίου (Class List). Στη δεξιά πλευρά του παραθύρου περιλαμβάνονται σχόλια για την κάθε κατηγορία, προς διευκόλυνση του χρήστη. Το κάτω μέρος της οθόνης αποτελείται από πίνακα κελιών. Ανάλογα με την κατηγορία που επιλέγει ο χρήστης εμφανίζονται και διαφορετικοί πίνακες. Αυτό γίνεται γιατί η κάθε παράμετρος μπορεί να παίρνει λογικές, αριθμητικές ή/και ολόγραφες τιμές. Βέβαια, το πρόγραμμα προκαθορίζει πως πρέπει να συμπληρωθεί το κάθε κελί δεδομένων προς αποφυγή λαθών.

Έτσι, ο χρήστης έχοντας το προσχέδιο της μελέτης έτοιμο, μπορεί να συνθέσει όλες τις παραμέτρους του προβλήματος και να δημιουργήσει το αντίστοιχο IDF αρχείο. Μετά, ανοίγοντας το EP-Launch, μπορεί να το ανακαλέσει από τη βιβλιοθήκη δεδομένων ως αρχείο εισόδου και να εκτελέσει τις προσομοιώσεις της αρεσκείας του.

Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας ακολουθήθηκαν τα παραπάνω βήματα και δημιουργήθηκε ο βασικός σκελετός της μελέτης με όνομα: «diplomatiki.idf» . Το αρχείο αυτό περιέχει το σύνολο των δεδομένων που αφορούν την θερμική προσομοίωση ενός τυπικού κτιρίου στην περιοχή της Αθήνας.

Όσο αφορά το κτίριο, αυτό σχεδιάστηκε και στη συνέχεια προσομοιώθηκε από το πρόγραμμα με ιδιαίτερη έμφαση στην ψύξη. Το κτίριο, πρόκειται για μία μονοκατοικία με επίπεδη οροφή, αφού εκεί υποθέτουμε ότι θα βρίσκεται ο επίπεδος ακτινοβολητής. Είναι ορθογώνιο με εμβαδό κάτοψης ογδόντα τετραγωνικά μέτρα (80 m^2), ήτοι 8×10 και η μεγαλύτερη πλευρά του είναι παράλληλη του άξονα Ανατολής-Δύσης. Το ύψος του είναι τρία μέτρα (3 m) και φέρει παράθυρα σε όλες τις όψεις του. Η πρόσοψη έχει νότιο προσανατολισμό και θεωρήθηκε όλο το κτίριο ως μία ενιαία θερμική ζώνη, προς χάριν απλότητας. Επίσης, θεωρήθηκε ότι υπάρχει μηδενική απόκλιση από τον πραγματικό Βορρά, δηλαδή το κτίριο είναι σε πλήρη ευθυγράμμιση με τους τέσσερις άξονες του ορίζοντα. Αυτή η παραδοχή έγινε προς απλοποίηση των υπολογισμών, μιας και θα ενέπλεκε τους υπολογισμούς του κτιρίου, ξεφεύγοντας από τις ανάγκες της εργασίας.



Σχήμα 2.4.4: Τρισδιάστατο σχέδιο του κτιρίου που προσομοιώθηκε στα πλαίσια του υπολογιστικού μέρους της εργασίας. Στην οροφή αυτού, έγινε η θεωρητική εγκατάσταση του ακτινοβολητή.

Το κτίριο της εργασίας θεωρήθηκε ότι είναι τυπικής αστικής κατασκευής, ενώ τα υλικά επιλέχθηκαν ώστε να προσεγγίζουν την πραγματικότητα. Αναλυτικότερα, η δομή των τεσσάρων τοίχων, της οροφής και του δαπέδου καθώς και τα παράθυρα δίνονται σε επίπεδα. Όσο αφορά τους τέσσερις τοίχους, η διαστρωμάτωσή τους είναι κοινή και αποτελείται από έξω προς τα μέσα: από ένα στρώμα τούβλου 100mm, ένα στρώμα μόνωσης 50mm, ένα στρώμα αέρος θερμικής αντίστασης 0,15 m²K/W και ένα τελευταίο στρώμα γυψοσανίδας 19mm. Όμοια, η οροφή έχει ένα εξωτερικό στρώμα τσιμέντου πάχους 100mm, ένα κενό στρώμα μόνωσης από αέρα θερμικής αντίστασης 0,18 m²K/W και τέλος ένα στρώμα ηχομόνωσης οροφής από ειδικά πλακάκια (acoustic tiles). Το δάπεδο έχει ακριβώς την ίδια δομή με την οροφή, αλλά με αντίθετη διαστρωμάτωση(από έξω προς τα μέσα: τσιμέντο- θερμομόνωση-ηχομόνωση). Τα παράθυρα σε όλες τις όψεις του κτιρίου είναι από το ίδιο υλικό, δηλαδή διπλό διαφανές τζάμι πάχους 6mm με κενό αέρος 3mm στο ενδιάμεσο.

Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί, ότι τα παραπάνω υλικά που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα, δεν υπάρχουν στο εμπόριο, αλλά είναι ισοδύναμα με αυτά του εμπορίου αναφορικά με τις ιδιότητές τους (σύσταση, αντοχή, θερμοαγωγή, υφή και οπτικές ιδιότητες).

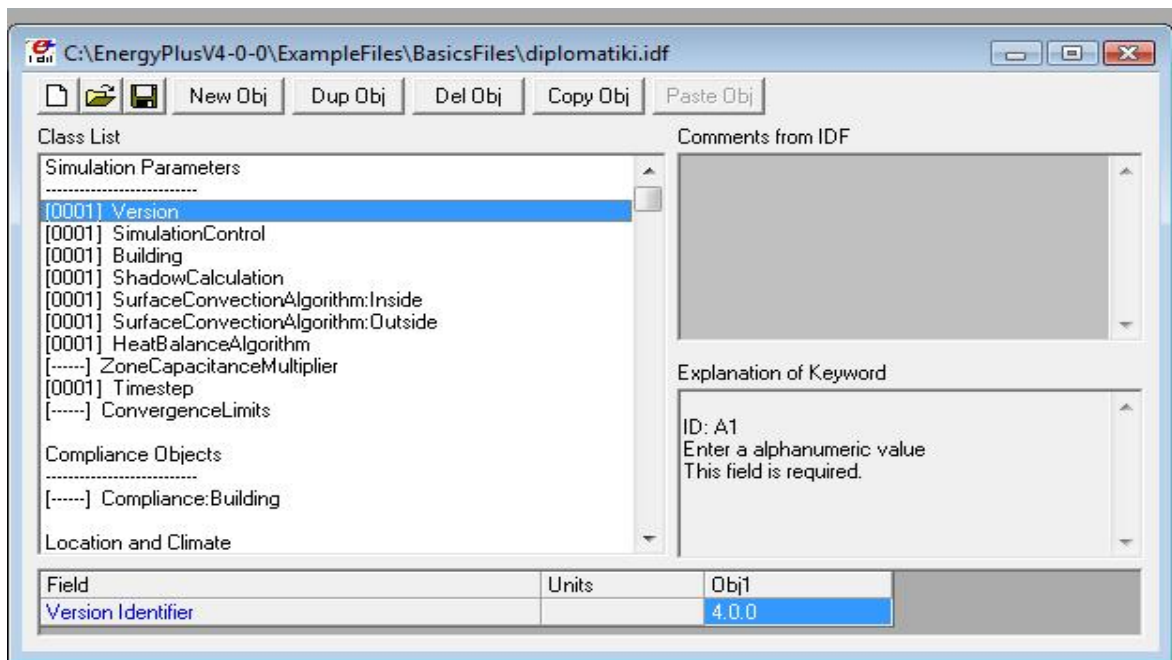
Η μονοκατοικία επιλέχθηκε να βρίσκεται εντός πόλεως και να κατοικείται από μια τετραμελή οικογένεια. Η πρώτη επιλογή του αστικού περιβάλλοντος του κτιρίου επηρεάζει τους υπολογισμούς, αφού το πρόγραμμα συνυπολογίζει το γεγονός ότι δεν είναι πλήρως εκτεθειμένο στον αέρα και στον ήλιο. Έτσι, υπεισέρχεται και το φαινόμενο της θερμικής νήσου, που αναφέρθηκε στη θεωρία, αφού τα ρεύματα αέρα δεν βρίσκουν ελεύθερους διαδρόμους στο αστικό περιβάλλον και άρα δεν μπορούν να απάγουν επαρκώς θερμότητα από τα κτίρια. Το αντίθετο συμβαίνει για μία αγροικία. Επιπλέον, αφού το κτίριο έχει έναν όροφο, σε ένα αστικό περιβάλλον είναι πολύ πιθανό να βρεθούν άλλα ψηλότερα γειτονικά κτίρια. Άρα, αυξάνονται οι πιθανότητες να σκιάζεται το κτίριο για κάποιες ώρες της ημέρας.

Η δεύτερη επιλογή, δηλαδή το είδος του κτιρίου(κατοικία, γραφεία, αποθήκη, ξενοδοχείο κλπ) έχει να κάνει με δύο παράγοντες. Ο πρώτος αφορά τον υπολογισμό των εσωτερικών φορτίων. Τα εσωτερικά φορτία παίζουν σημαντικό ρόλο στους θερμικούς υπολογισμούς του κτιρίου. Μία ολιγομελής οικογένεια έχει συγκεκριμένες ανάγκες σε ψύξη, θέρμανση, φωτισμό και οι οικιακές συσκευές είναι συγκεκριμένες. Αντιθέτως, ένα γραφείο ή ένα ξενοδοχείο έχει σαφώς πολύ μεγαλύτερες ανάγκες για φωτισμό, θέρμανση κλπ, ενώ στην κάθε θερμική ζώνη θα βρίσκονται και πολλά περισσότερα άτομα. Άρα, αλλάζουν κατά πολύ τα εσωτερικά φορτία ανάλογα με το είδος του κτιρίου. Ο δεύτερος παράγοντας που απορρέει από την επιλογή του κτιρίου ως κατοικία, έχει να κάνει με τα ωράρια που ακολουθούνται. Δηλαδή, τα μέλη μίας οικογένειας

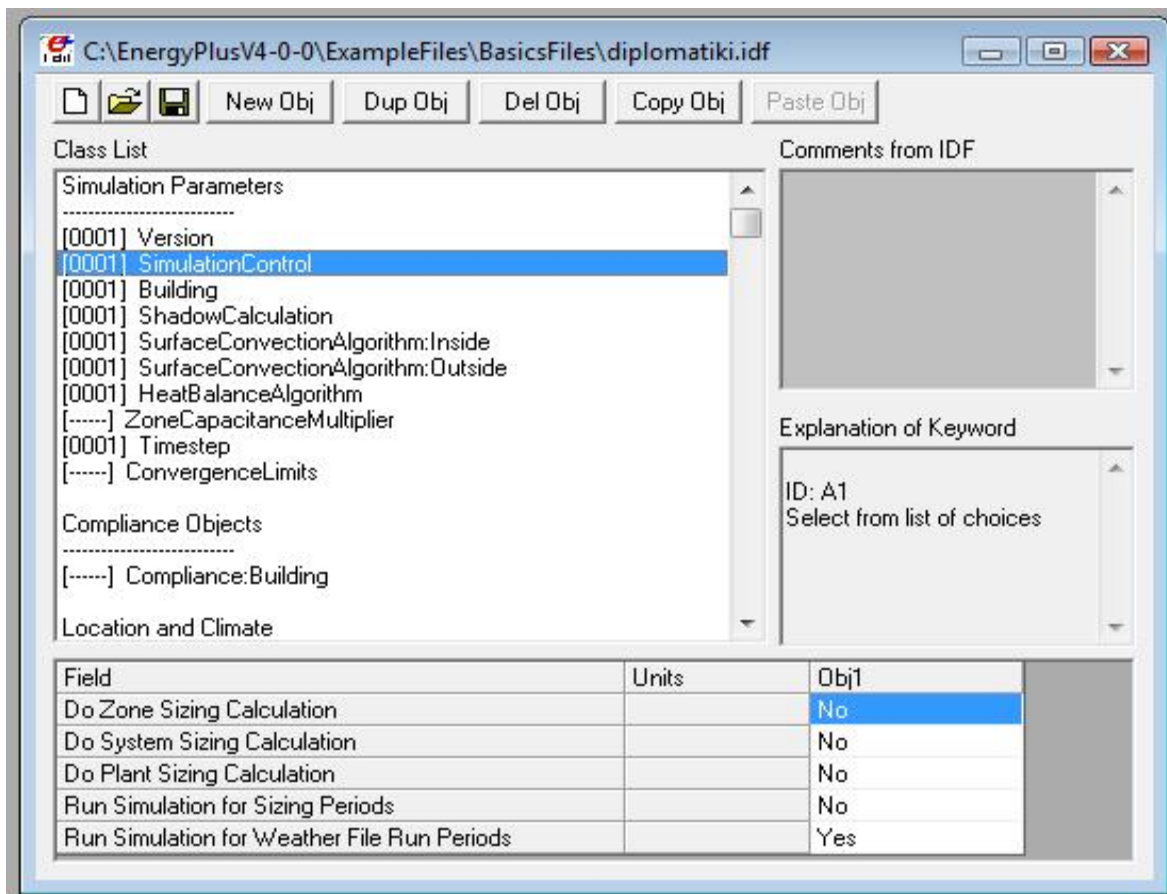
ενδέχεται να λείπουν καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας. Συνεπώς, τα φώτα, οι ηλεκτρικές συσκευές και το σύστημα ψύξης ή/και θέρμανσης θα λειτουργούν κυρίως βραδινές ώρες. Αντίθετα, ένα γραφείο θα λειτουργεί κυρίως από τις 8:00 μέχρι τις 18:00 καθημερινά.

Το χρονικό βήμα (timestep) της προσομοίωσης είναι δέκα λεπτά (10'), ενώ τα αποτελέσματα δίνονται σε ωριαία βάση (hourly). Η περίοδος των υπολογισμών ξεκινάει την 1^η Ιουνίου και λήγει στις 15 Σεπτεμβρίου. Η επιλογή του χρονικού βήματος στους υπολογισμούς (10'), αποσκοπεί στην καλύτερη εποπτεία της διακύμανσης των θερμοκρασιών εντός της θερμικής ζώνης, ενώ η περίοδος προσομοίωσης αφορά τους ζεστούς μήνες του έτους, τότε δηλαδή που κορυφώνεται η ζήτηση για κλιματισμό.

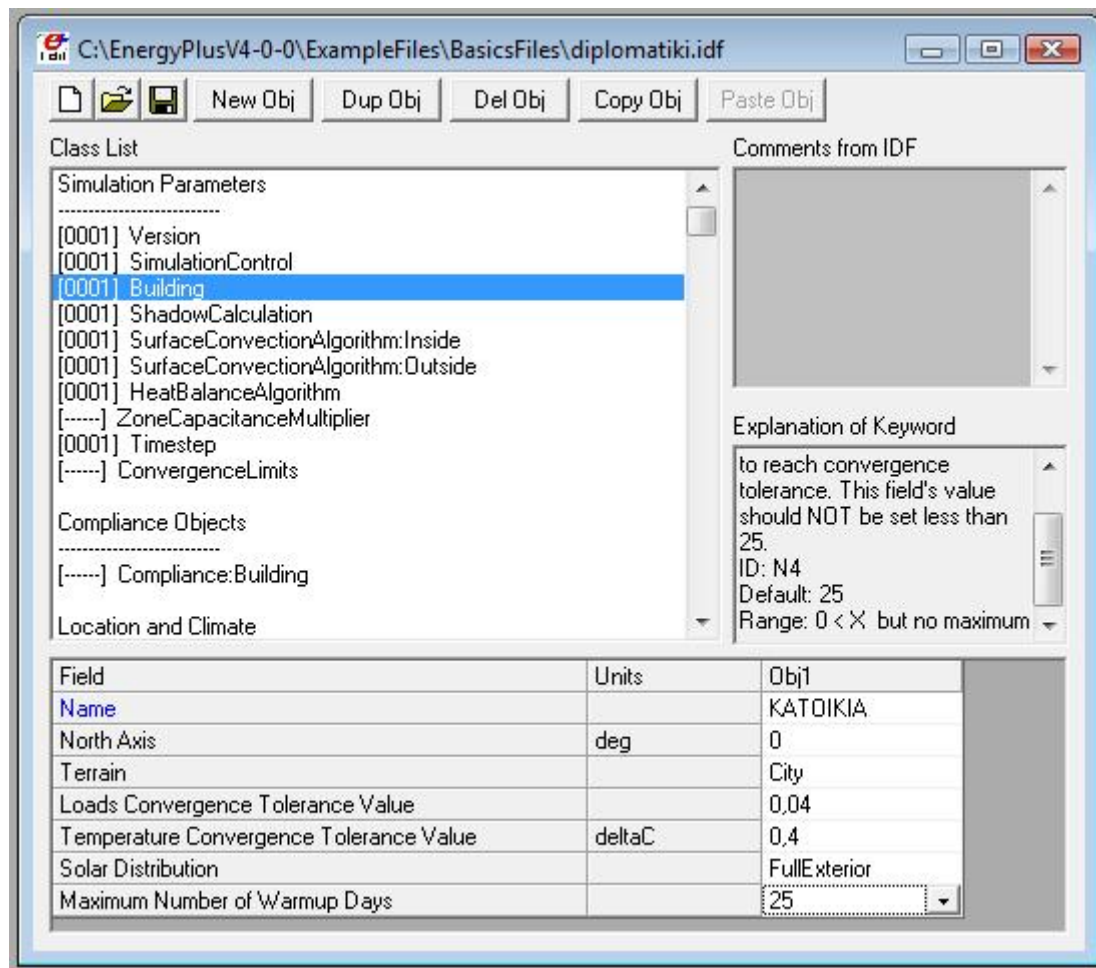
Τα στοιχεία που δόθηκαν παραπάνω, αφορούν το βασικό σχέδιο του υπό μελέτη κτιρίου. Από το πρόγραμμα δίνονται και άλλες δυνατότητες – επιλογές για εκτενέστερη ανάλυση και επεξεργασία της διαδικασίας προσομοίωσης. Η λεπτομερής περιγραφή των υπολοίπων παραμέτρων, καθώς και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις θερμικές προσομοιώσεις θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας. Παρακάτω δίνονται οι εντολές που δόθηκαν στο περιφερειακό πρόγραμμα IDFEditor του προγράμματος EnergyPlus στη μορφή που χρησιμοποιεί το υπολογιστικό πακέτο. Φαίνονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την σύνθεση του κτιρίου, η χρήση αυτού, τα υλικά κατασκευής, οι μεταβλητές που ζητήθηκαν ως έξοδοι, τα κλιματολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν:



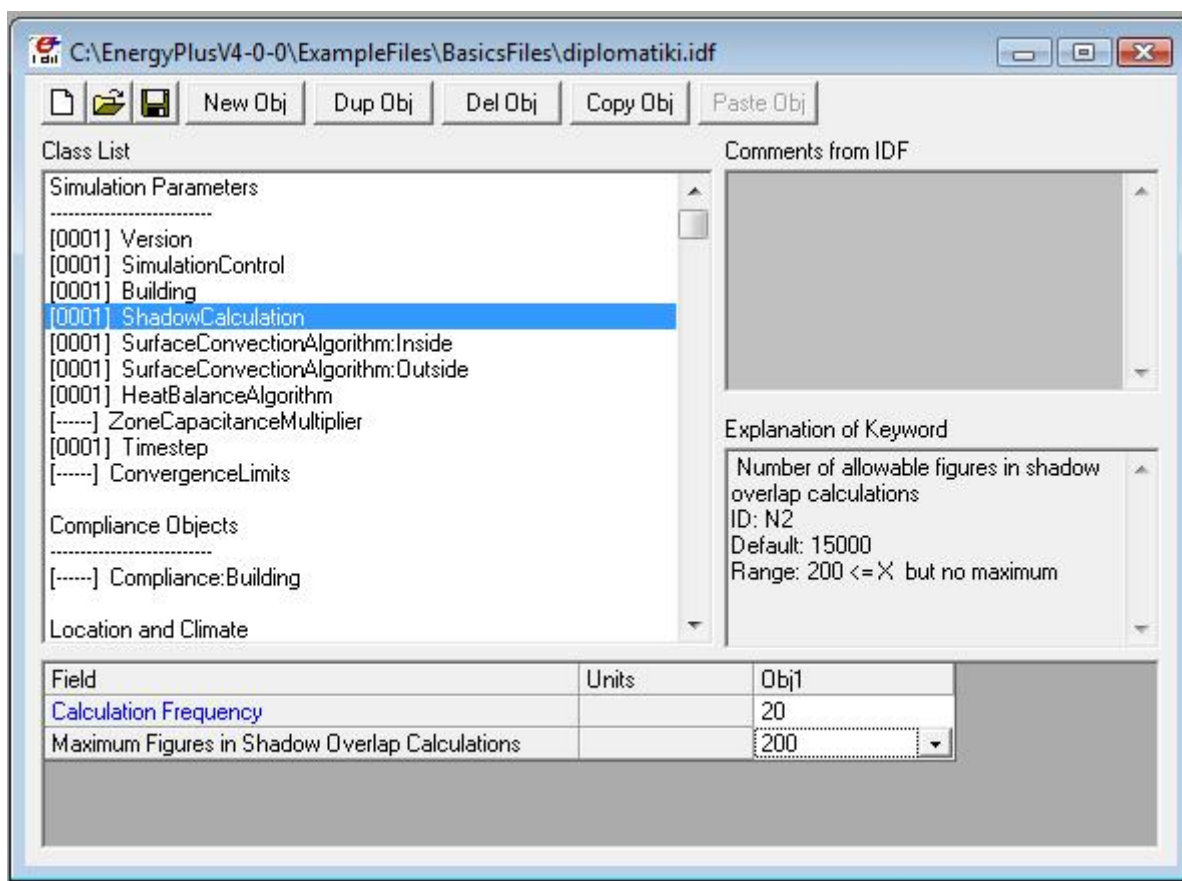
Σχήμα 2.4.5: Βήμα 1^ο: Ορισμός της έκδοσης του προγράμματος EnergyPlus που χρησιμοποιήθηκε (εδώ 4.0.0.).



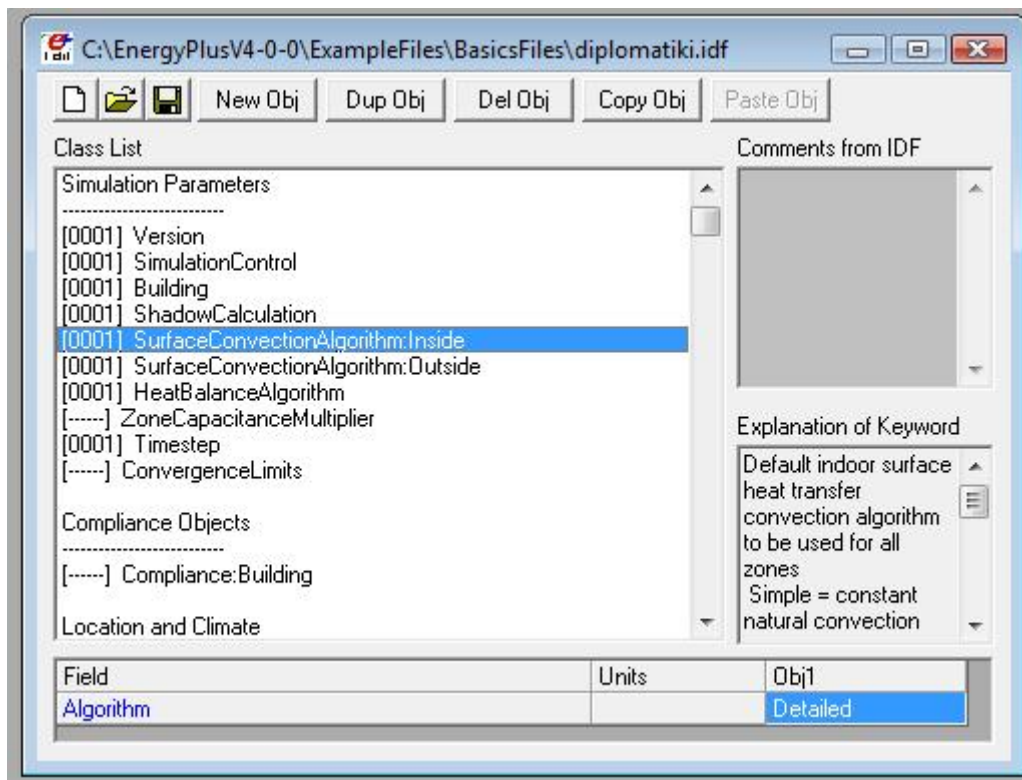
Σχήμα 2.4.6: Βήμα 2^ο: Καθορισμός του ελέγχου προσομοίωσης, με ορισμό των μεγεθών που υπολογίζονται κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης (εδώ ζητήθηκε από το πρόγραμμα να υπολογίζει μόνο με βάση τα κλιματολογικά δεδομένα της υπό εξέταση περιόδου).



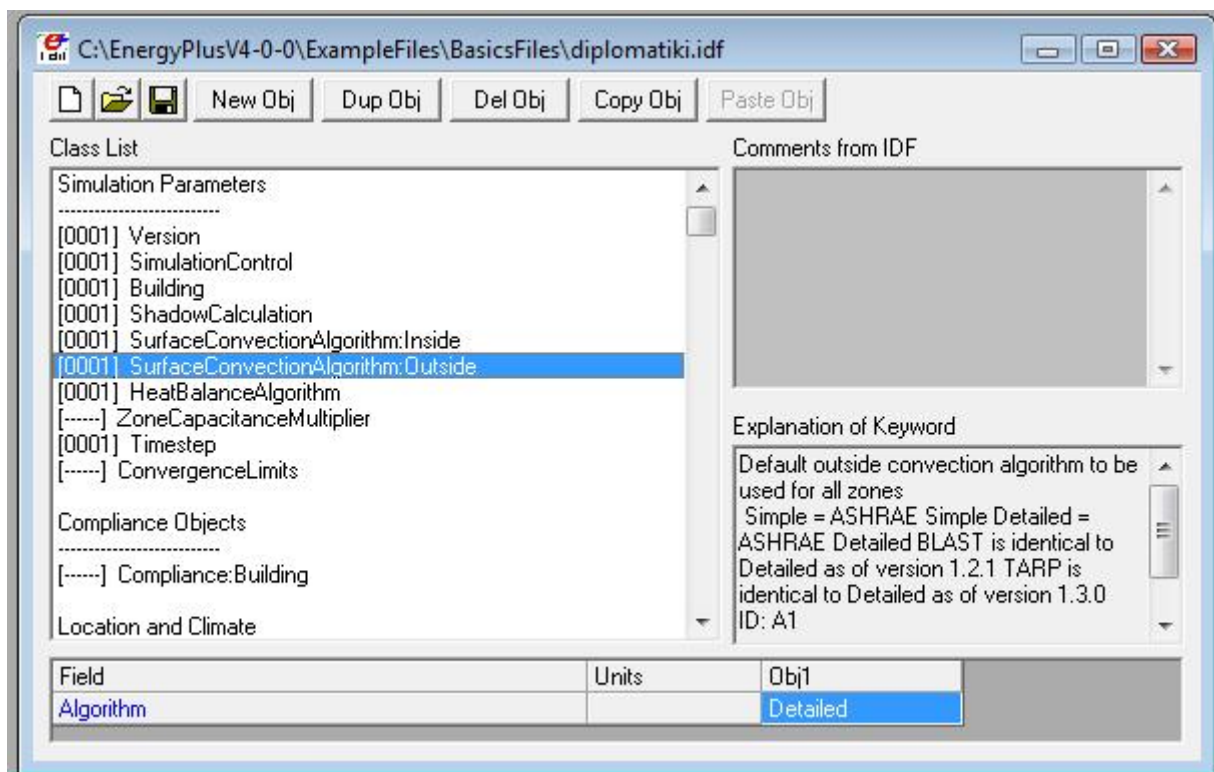
Σχήμα 2.4.7: Βήμα 3^ο: Καθορισμός του κτιρίου που θα προσομοιωθεί (εδώ ονομάστηκε το κτίριο κατοικία, τέθηκε η απόκλιση από τον Βορρά (μηδενική), η τιμή σύγκλισης τόσο για τα θερμικά φορτία, όσο και για τη θερμοκρασία. Επιλέχθηκε ο τρόπος διανομής της ηλιακής ακτινοβολίας για όλη την εξωτερική επιφάνεια του κτιρίου και τέθηκε ο αριθμός των ημερών που πρέπει να «τρέξει» το πρόγραμμα για να επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση).



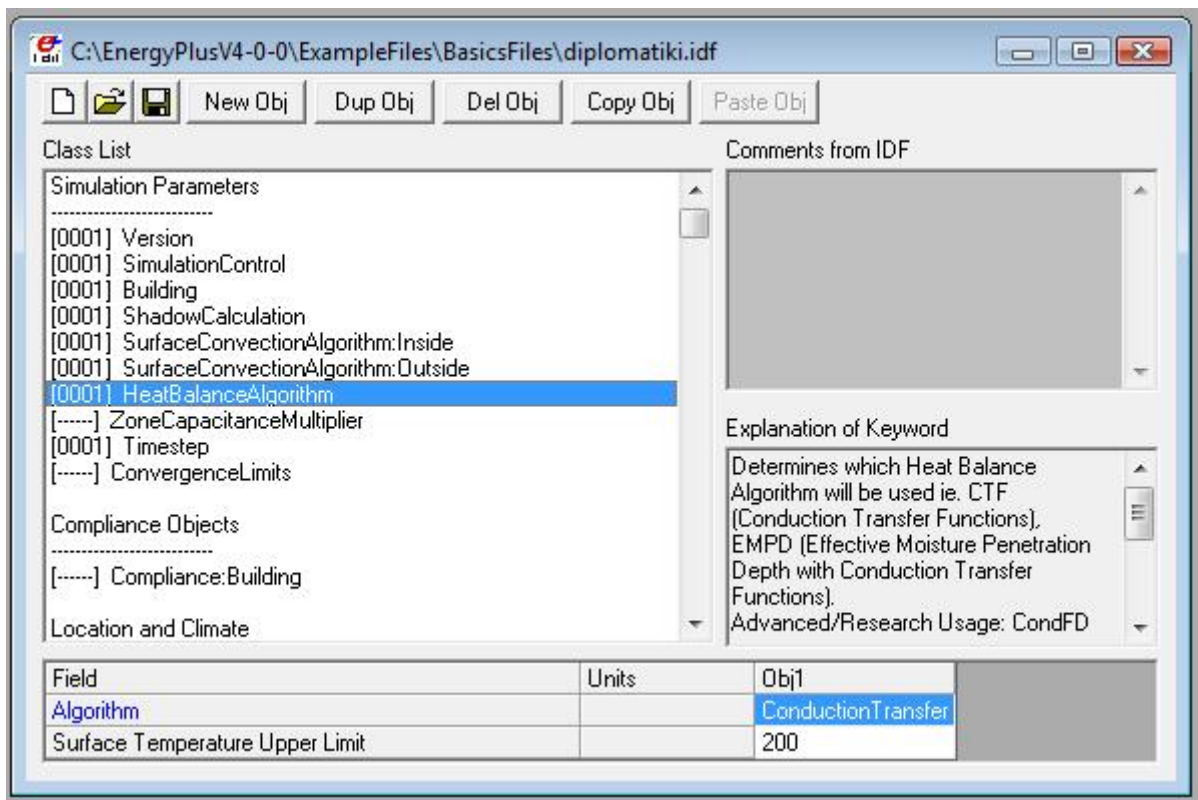
Σχήμα 2.4.8: Βήμα 4^ο: Καθορισμός των παραμέτρων σκίασης (Η πρώτη επιλογή αφορά την περιοδικότητα αλλαγής των παραμέτρων σκίασης (λόγω αλλαγής της γωνίας της τροχιάς που διαγράφει ο ήλιος στον ορίζοντα) και η δεύτερη επιλογή την ακρίβεια του υπολογισμού της σκίασης θέτοντας μέγιστο αριθμό ψηφίων).



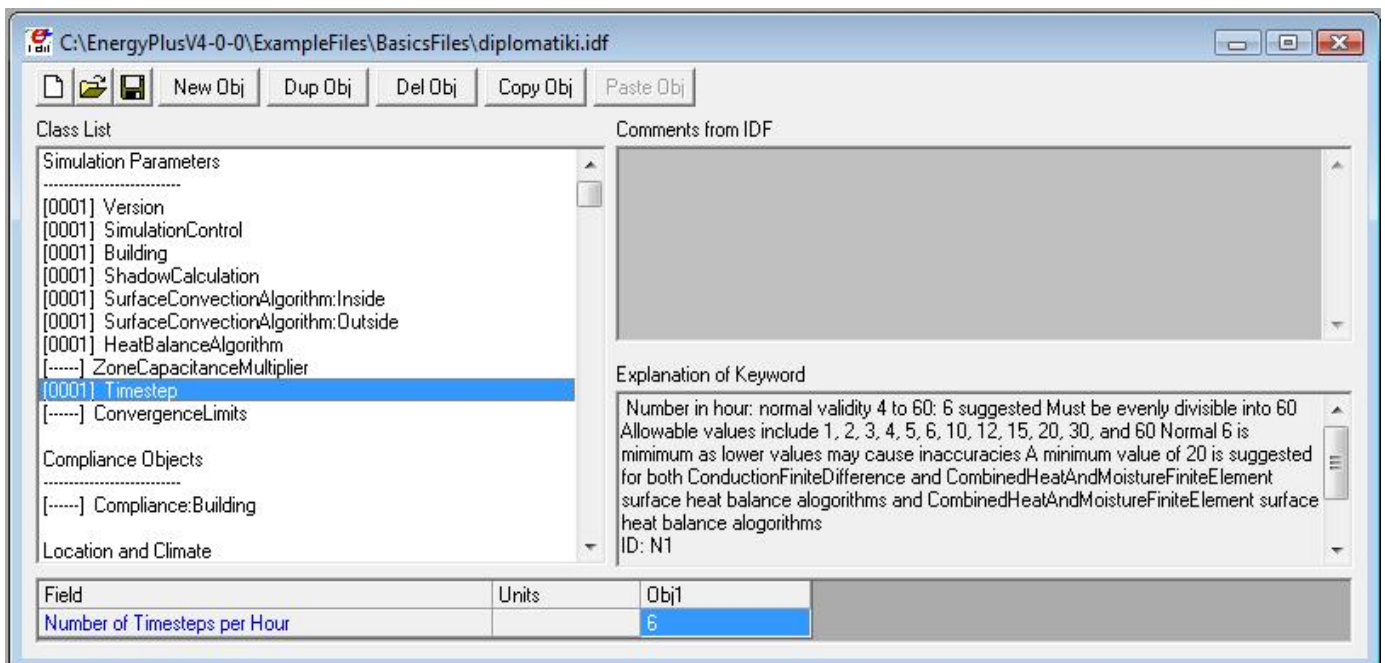
Σχήμα 2.4.9: Βήμα 5^ο: Επιλογή της μορφής του αλγορίθμου συναγωγής για τις εσωτερικές επιφάνειες του κτιρίου. (Επιλέχθηκε ο πιο λεπτομερής αλγόριθμος από τους διαθέσιμους).



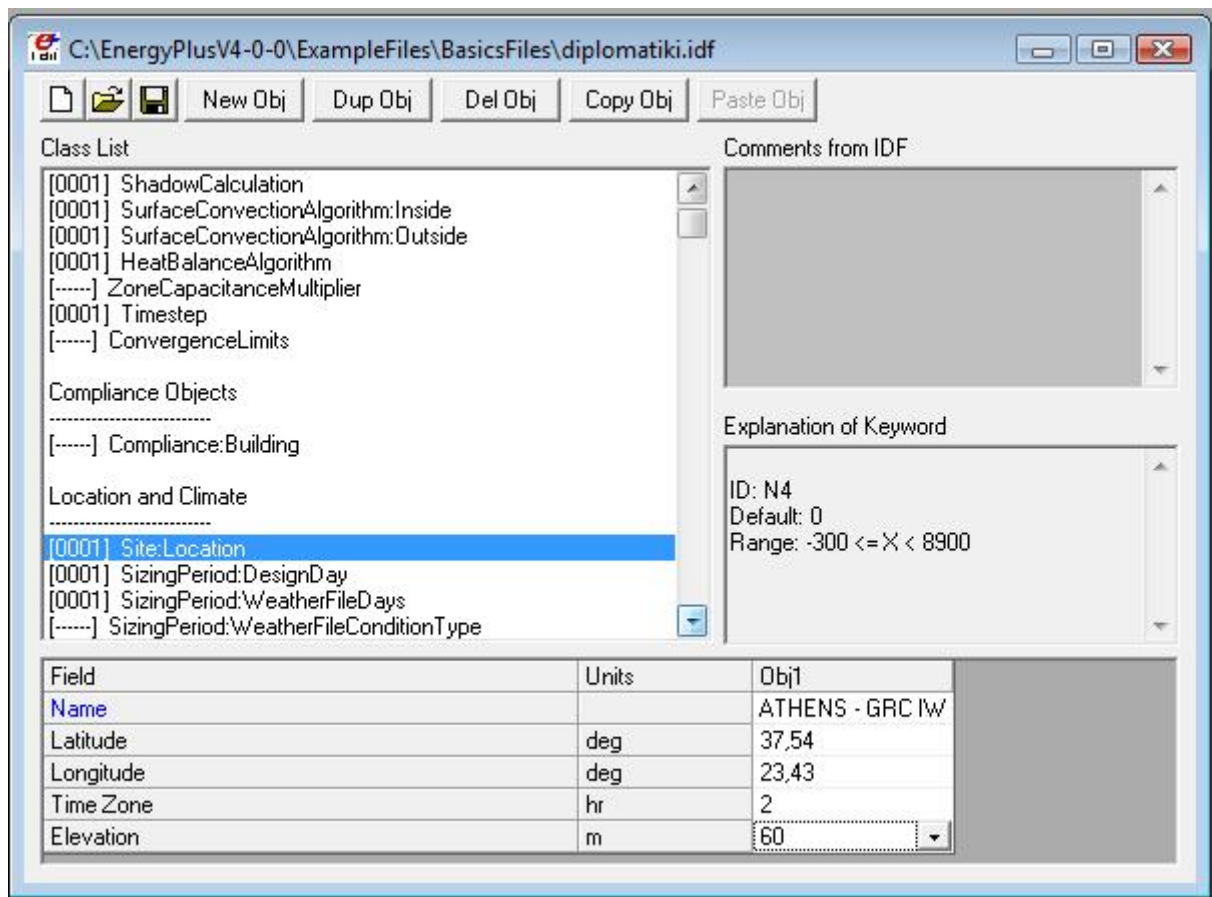
Σχήμα 2.4.10: Βήμα 6^ο: Επιλογή της μορφής του αλγορίθμου συναγωγής για τις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου. (Επιλέχθηκε ο πιο λεπτομερής αλγόριθμος από τους διαθέσιμους).



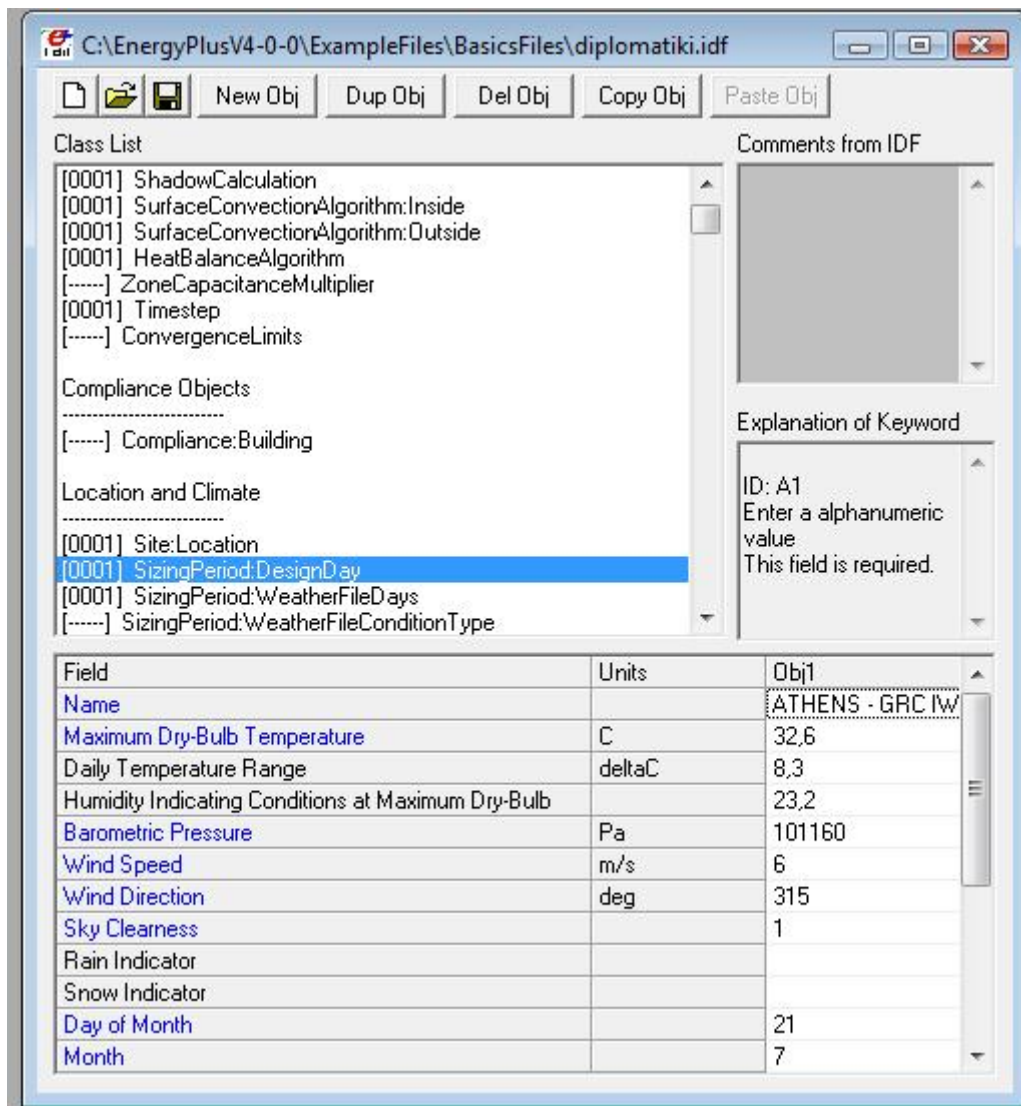
Σχήμα 2.4.11: Βήμα 7^ο: Επιλογή του αλγορίθμου βάσει του τρόπου μετάδοσης θερμότητας για τον υπολογισμό του ισοζυγίου θερμότητας. (Στην υπο εξέταση περίπτωση επιλέχθηκε η μετάδοση δια επαφής (αγωγή) και το ανώτερο θερμοκρασιακό όριο αποτελμάτωσης του αλγορίθμου, τέθηκαν οι 200°C (ακραία τιμή) προς αποφυγή ταχείας σύγκλισης).



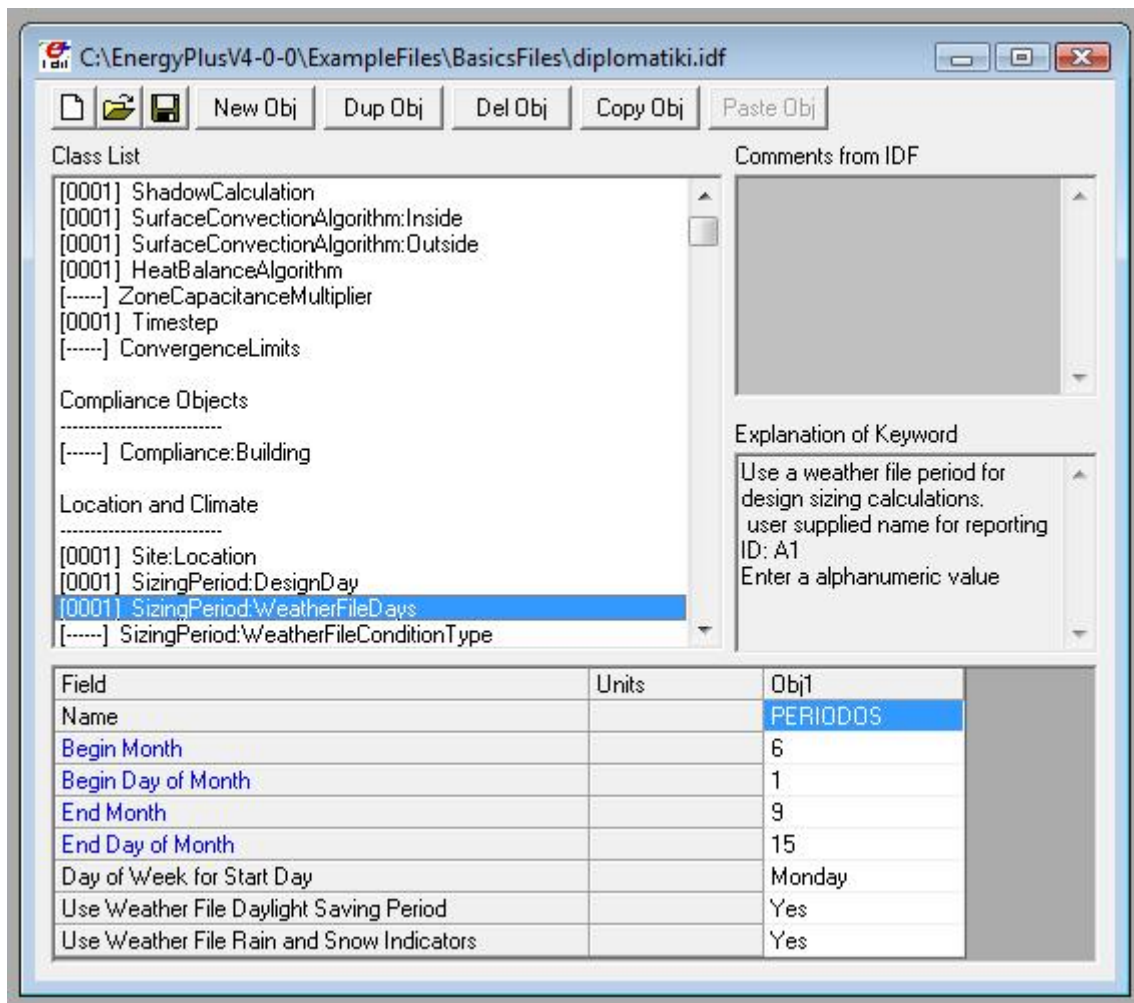
Σχήμα 2.4.12: Βήμα 8^ο: Καθορισμός του χρονικού βήματος της προσομοίωσης ως κλάσμα του 60λεπτου της ώρας. (Επιλέχθηκε βήμα 10 λεπτά, ήτοι $60/6=10\text{min}$).



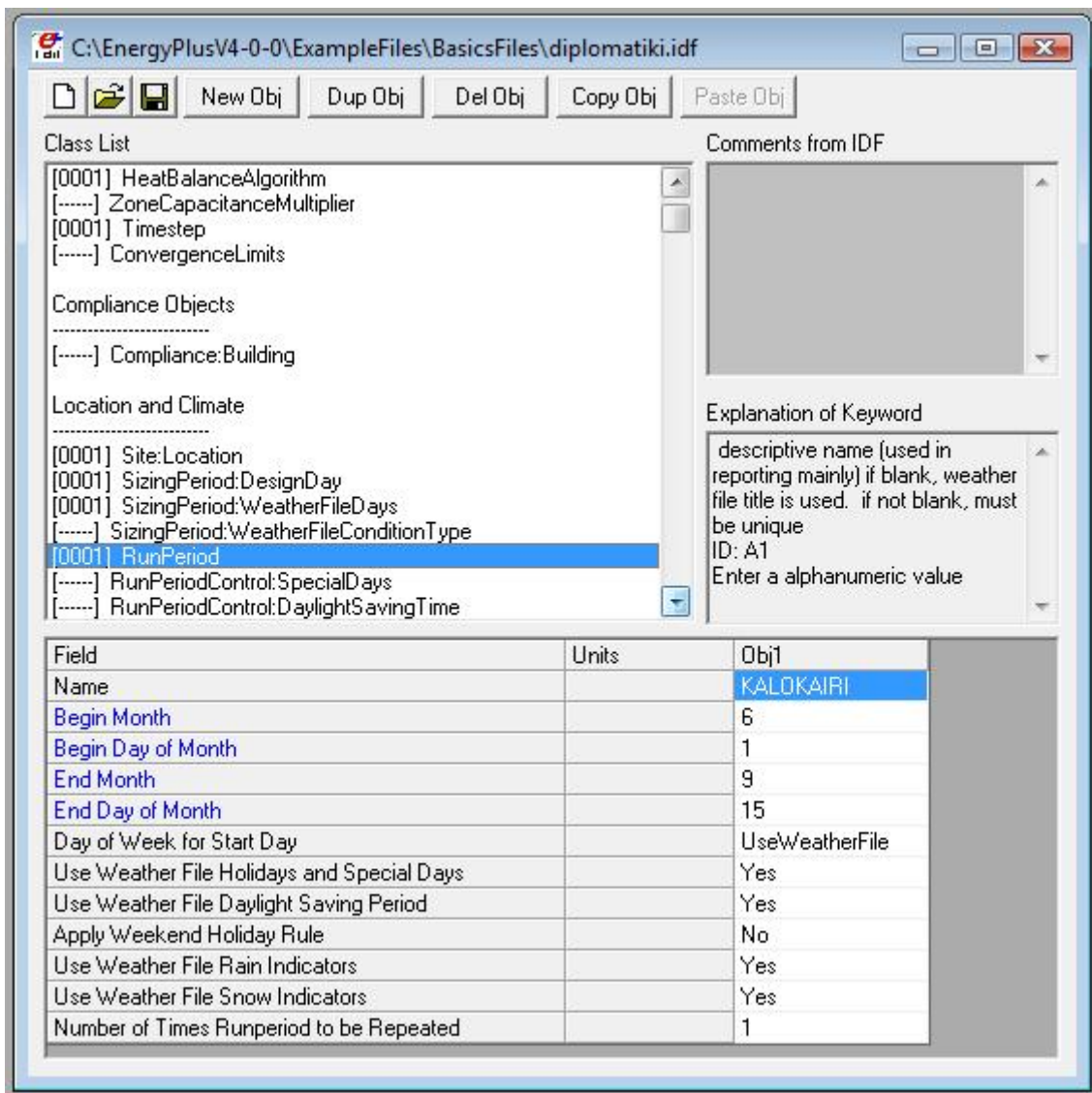
Σχήμα 2.4.13: Βήμα 9^ο: Προσδιορισμός της γεωγραφικής θέσης του προς εξέταση κτιρίου. (Η επιλογή του ύψους των 60 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας, τοποθετεί το κτίριο εντός πόλεως των Αθηνών συμβαδίζοντας με την αρχική υπόθεση, ότι η κατοικία βρίσκεται σε αστικό περιβάλλον).



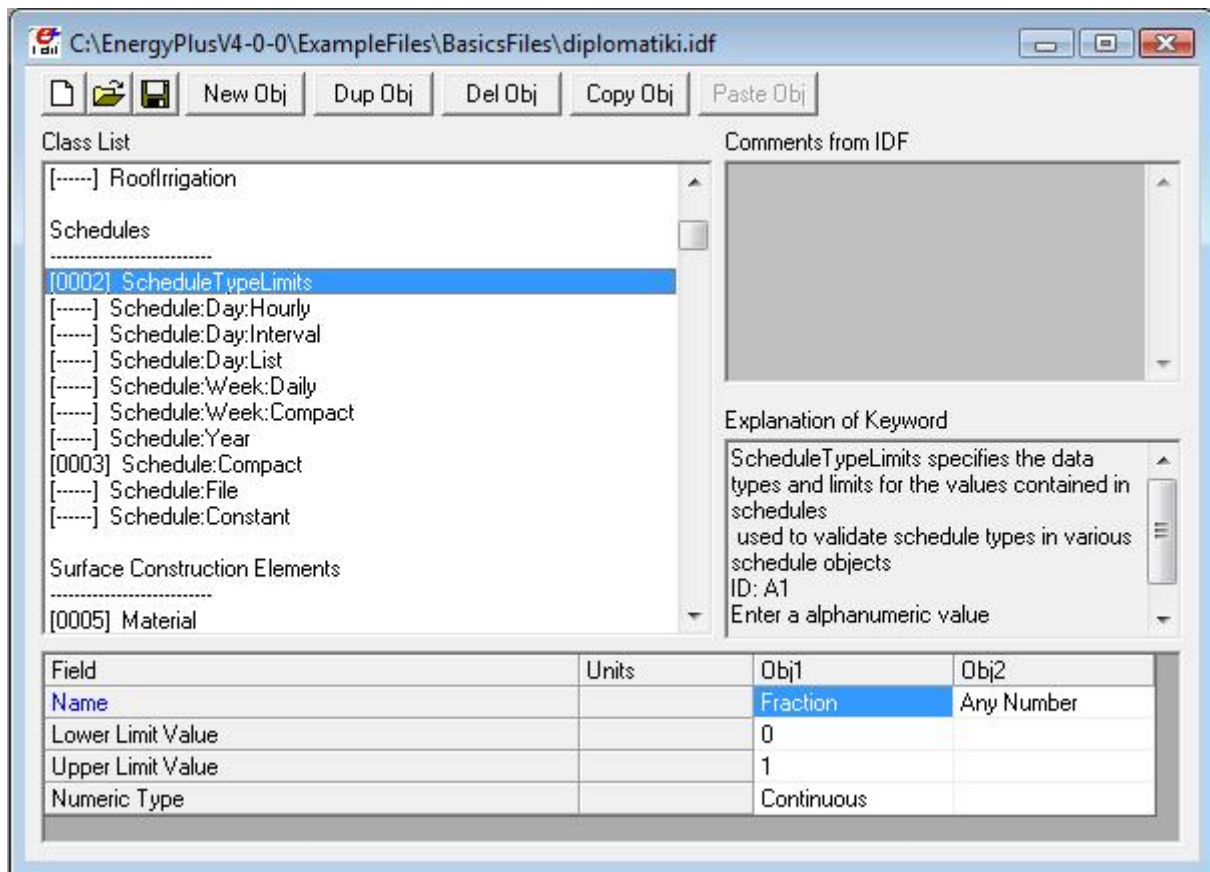
Σχήμα 2.4.14: Βήμα 10^ο: Καθορισμός της τυπικής μέρας για την περίοδο των προσομοιώσεων (Αυτή επιλέχθηκε να είναι η 21^η Ιουλίου και τα στοιχεία της προέρχονται από γνωστούς πίνακες του Τομέα Θερμότητας Ε.Μ.Π.).



Σχήμα 2.4.15: Βήμα 11^ο: Προσδιορισμός της περιόδου προσομοίωσης σε αντιστοιχία με το αρχείο των κλιματολογικών δεδομένων. (Ημερομηνία εκκίνησης τέθηκε η 1^η Ιουνίου και αποπεράτωσης η 15^η Σεπτεμβρίου, ενώ έγινε η παραδοχή ότι η πρώτη ημέρα της περιόδου είναι Δευτέρα. Τα υπόλοιπα στοιχεία προκύπτουν από το αρχείο με τα κλιματολογικά δεδομένα).



Σχήμα 2.4.16: Βήμα 12^ο: Καθορισμός της περιόδου προσομοίωσης. (Ημερομηνία εκκίνησης τέθηκε η 1^η Ιουνίου και αποπεράτωσης η 15^η Σεπτεμβρίου, τα υπόλοιπα στοιχεία και δείκτες που αφορούν την υπό εξέταση περίοδο προέρχονται από τα κλιματολογικά δεδομένα).



Σχήμα 2.4.17: Βήμα 13^ο: Δήλωση των τύπων του χρονικού προγράμματος (ωράριο) που μπορεί να ακολουθεί από μία μεταβλητή-παράμετρο. (Δημιουργήθηκαν δύο, μία για κάθε είδος. Η πρώτη αφορά μεταβλητή που παίρνει δεκαδικές τιμές από 0 ως 1 και η δεύτερη μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή).

The screenshot shows the EnergyPlus software interface. The top window title is "C:\EnergyPlusV4-0-0\ExampleFiles\BasicsFiles\diplomatiiki.idf". The interface includes a menu bar with options like "New Obj", "Dup Obj", "Del Obj", "Copy Obj", and "Paste Obj".

The "Class List" on the left shows a hierarchy of objects, with "[0003] Schedule:Compact" selected. The "Comments from IDF" pane is empty. The "Explanation of Keyword" pane provides details for the selected object:

```

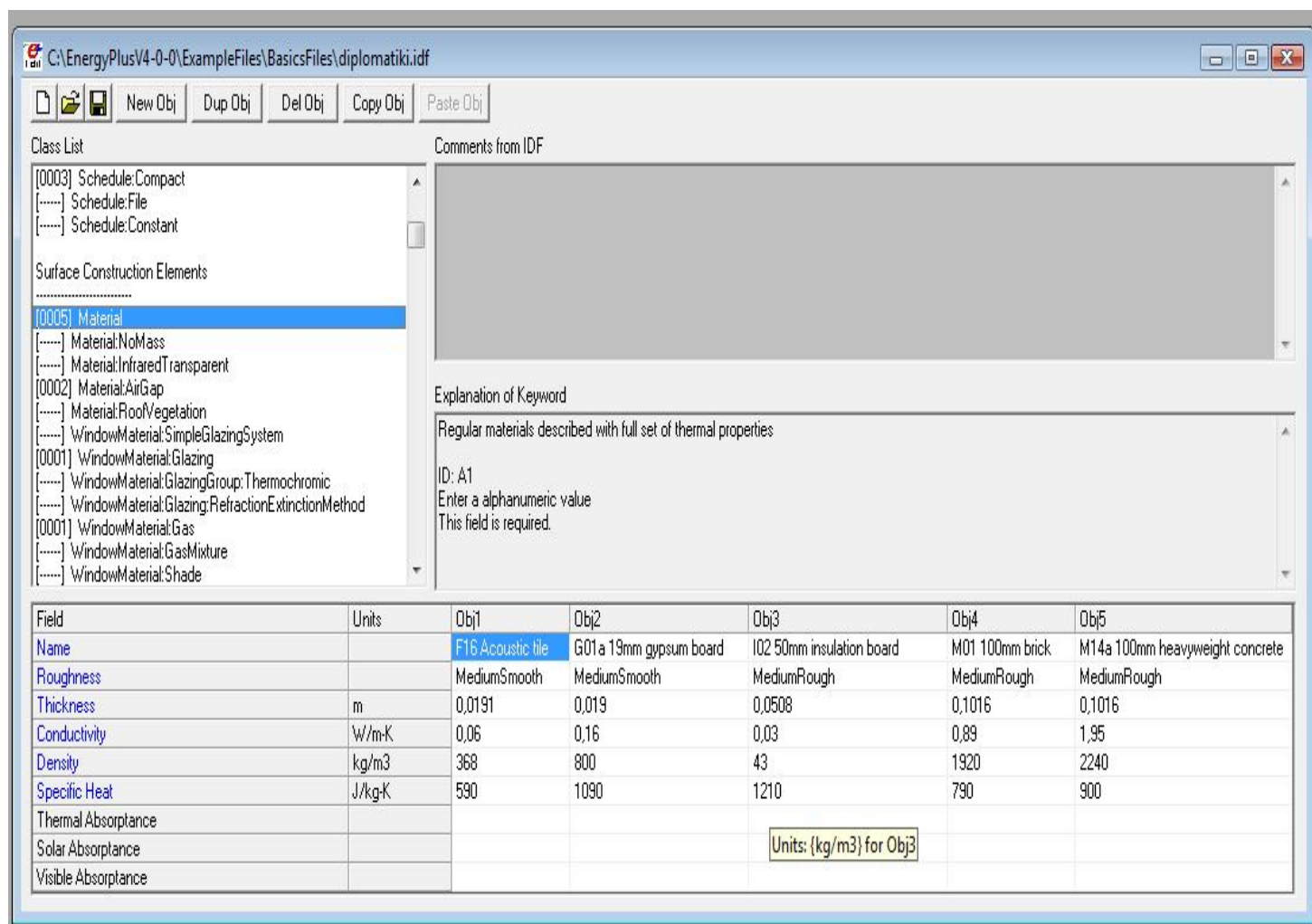
Irregular object. Does not follow the usual definition for fields. Fields A3... are:
Through: Date
For: Applicable days (ref: Schedule:Week:Compact)
Interpolate: Yes/No (ref: Schedule:Day:Interval) -- optional, if not used will be "No"
Until: <Time> (ref: Schedule:Day:Interval)
<numeric value>
words "Through","For","Interpolate","Until" must be included.

```

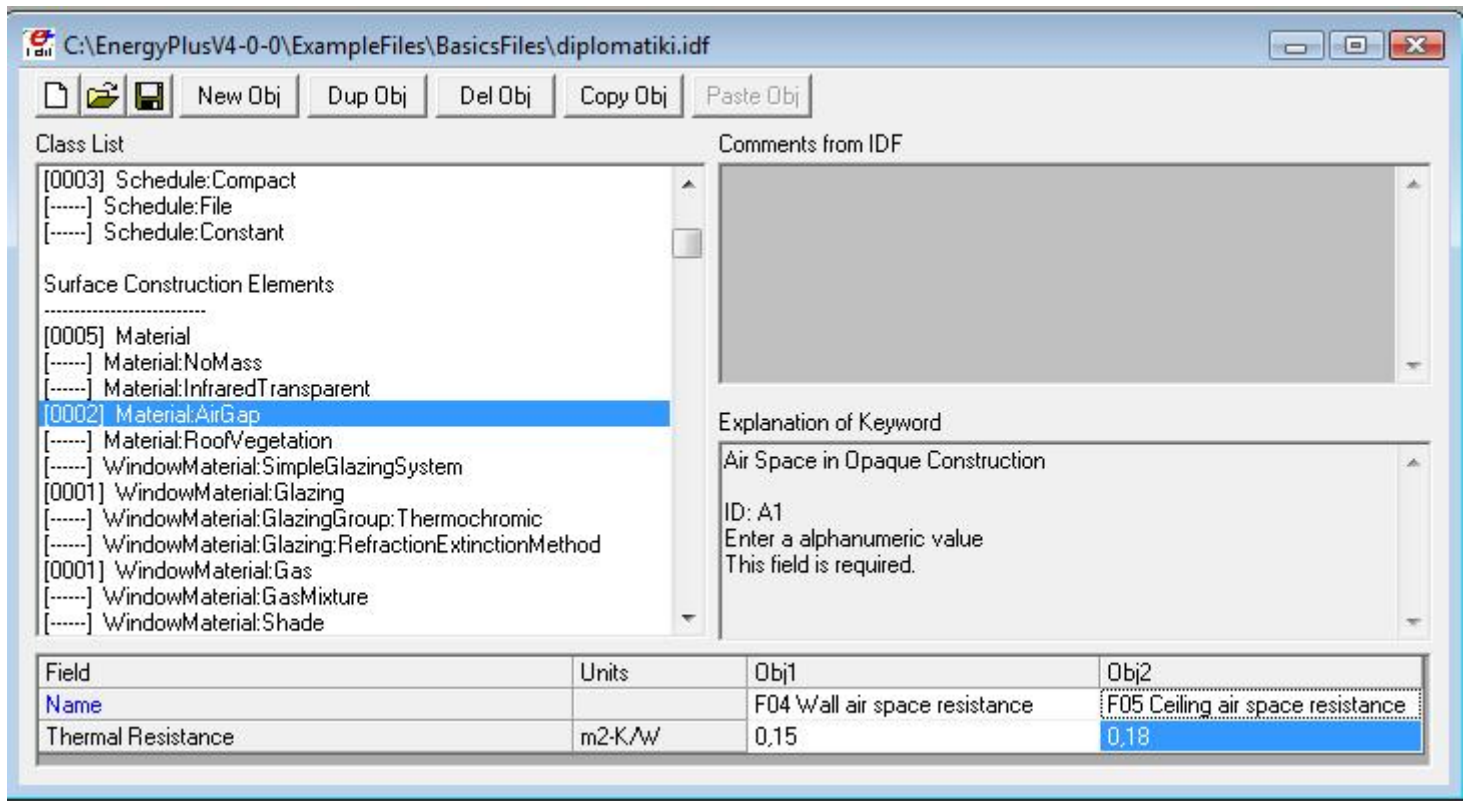
At the bottom, a table displays the field values for the selected object:

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Multifamily OneZone Equipment	Multifamily OneZone Lighting	Multifamily OneZone Occupancy
Schedule Type Limits Name		Fraction	Fraction	Fraction
Field 1		Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2		For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Field 3		Until: 06:00	Until: 06:00	Until: 07:00
Field 4		0.22	0.0	0.67
Field 5		Until: 07:00	Until: 07:00	Until: 08:00
Field 6		0.36	0.95	0.49
Field 7		Until: 08:00	Until: 08:00	Until: 17:00
Field 8		0.76	0.85	0.21
Field 9		Until: 09:00	Until: 19:00	Until: 24:00
Field 10		0.34	0.0	0.67
Field 11		Until: 11:00	Until: 24:00	
Field 12		0.36	0.9	
Field 13		Until: 13:00		
Field 14		0.64		
Field 15		Until: 17:00		

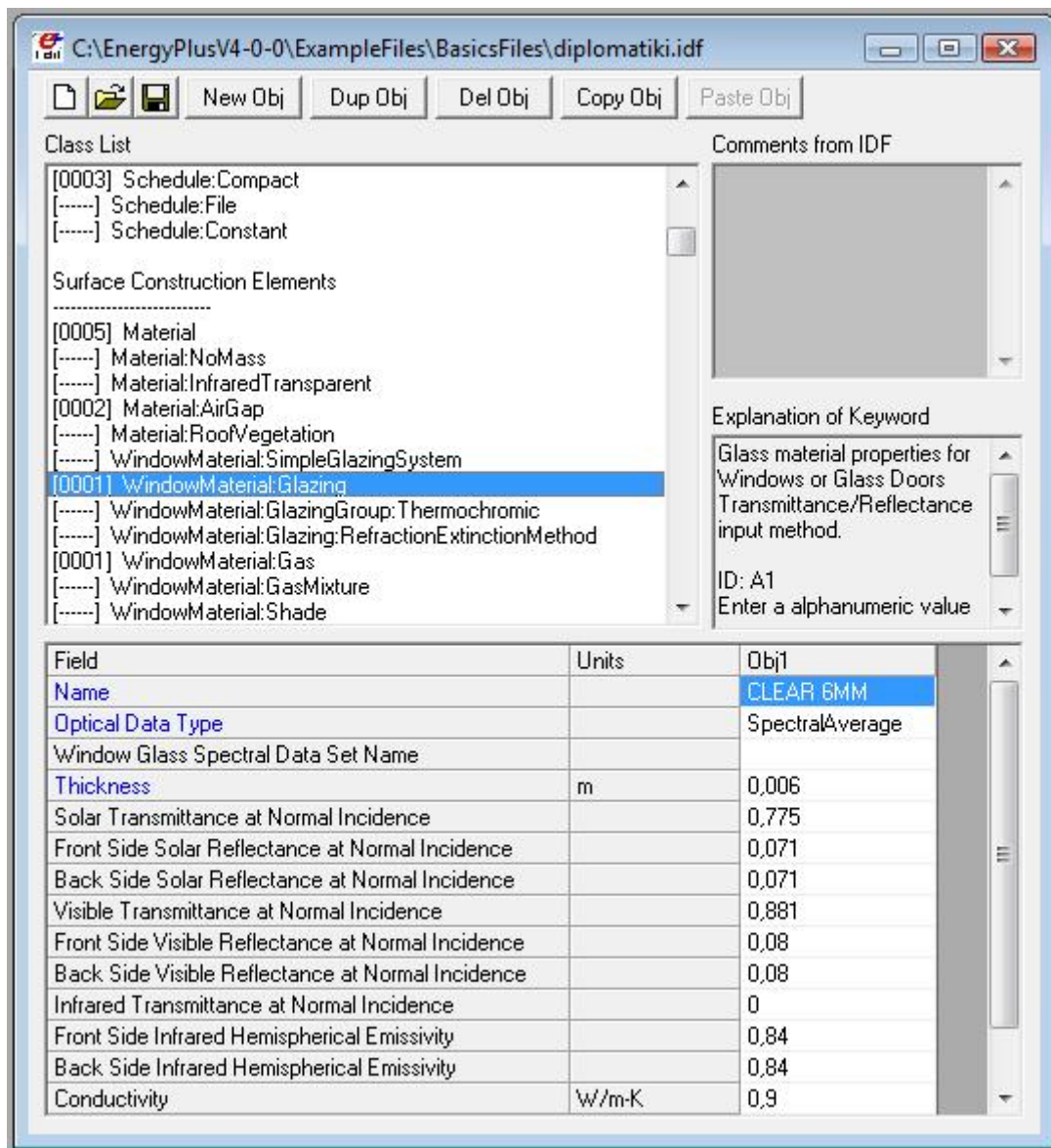
Σχήμα 2.4.18: Βήμα 14^ο: Διαμόρφωση του συνεπτυγμένου προγράμματος για τις παραμέτρους που παρουσιάζουν περιοδικότητα. (Από τη βιβλιοθήκη δεδομένων του προγράμματος, ανάλογα με το είδος του κτιρίου, υπάρχουν έτοιμα πρότυπα προγράμματα της ASHRAE για τον υπολογισμό των εσωτερικών θερμικών κερδών. Για την κατηγορία κατοικία, υπάρχουν τρία προγράμματα δραστηριοτήτων: το πρώτο αφορά τον εξοπλισμό, το δεύτερο τον φωτισμό και το τρίτο το επίπεδο κατοίκησης του κτιρίου).



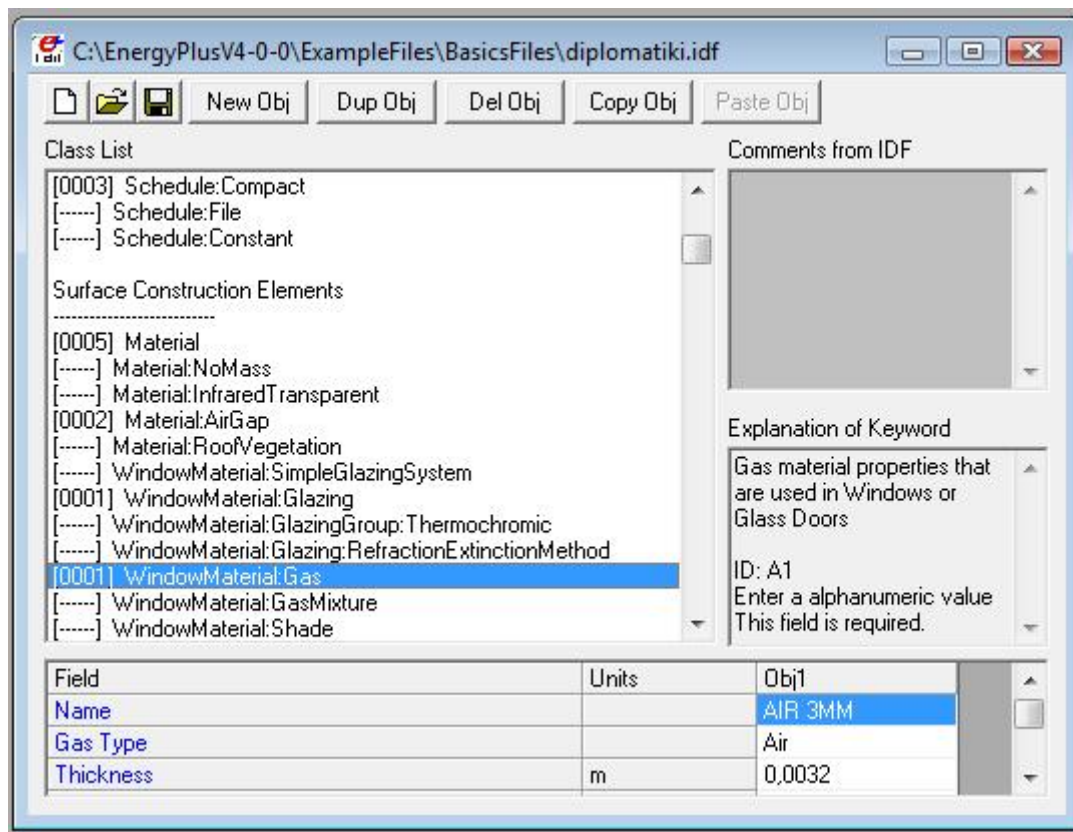
Σχήμα 2.4.19: Βήμα 15^ο: Απαρίθμηση όλων των δομικών υλικών του κτιρίου καθώς και των ιδιοτήτων τους. (Από τη βιβλιοθήκη δεδομένων του προγράμματος, ανάλογα με το είδος του κτιρίου,ελαφριά-μέτρια-βαριά κατασκευή, υπάρχουν έτοιμα πρότυπα υλικά της ASHRAE για τον υπολογισμό των θερμικών ισολογισμών. Υπενθυμίζουμε, τα υλικά αυτά δεν υπάρχουν, αλλά είναι ισοδύναμα ως προς τις ιδιότητές τους με αυτά του εμπορίου).



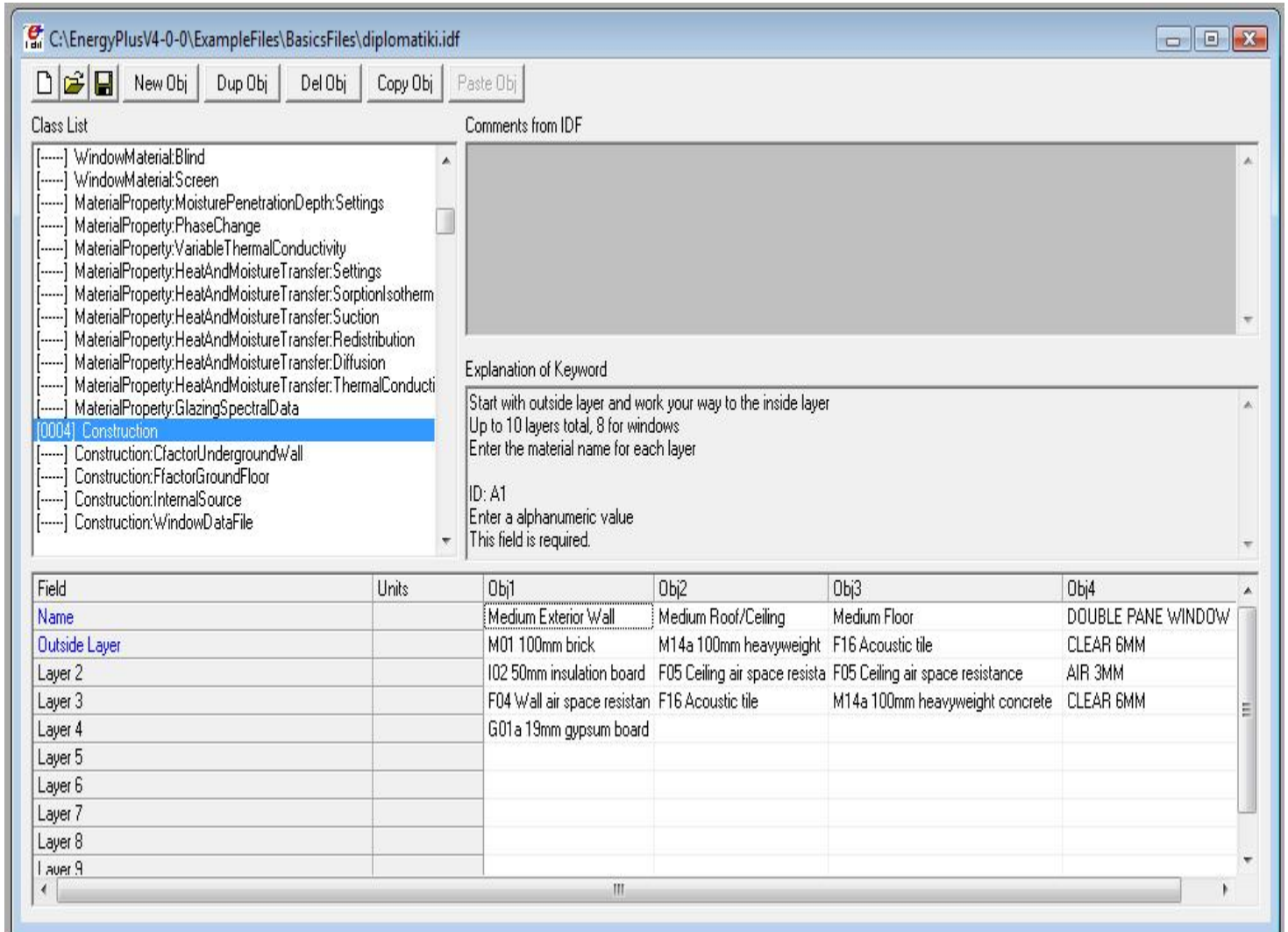
Σχήμα 2.4.20: Βήμα 16^ο: Απαρίθμηση όλων των κενών αέρος που συναντώνται στην κατασκευή του κτιρίου καθώς και της θερμικής τους αντίστασης. (Όμοια με το προηγούμενο βήμα, τα υλικά προέρχονται από πίνακα της ASHRAE. Το κτίριο υπενθυμίζουμε, πρόκειται για μέτρια κατασκευή από άποψη θερμικής μάζας).



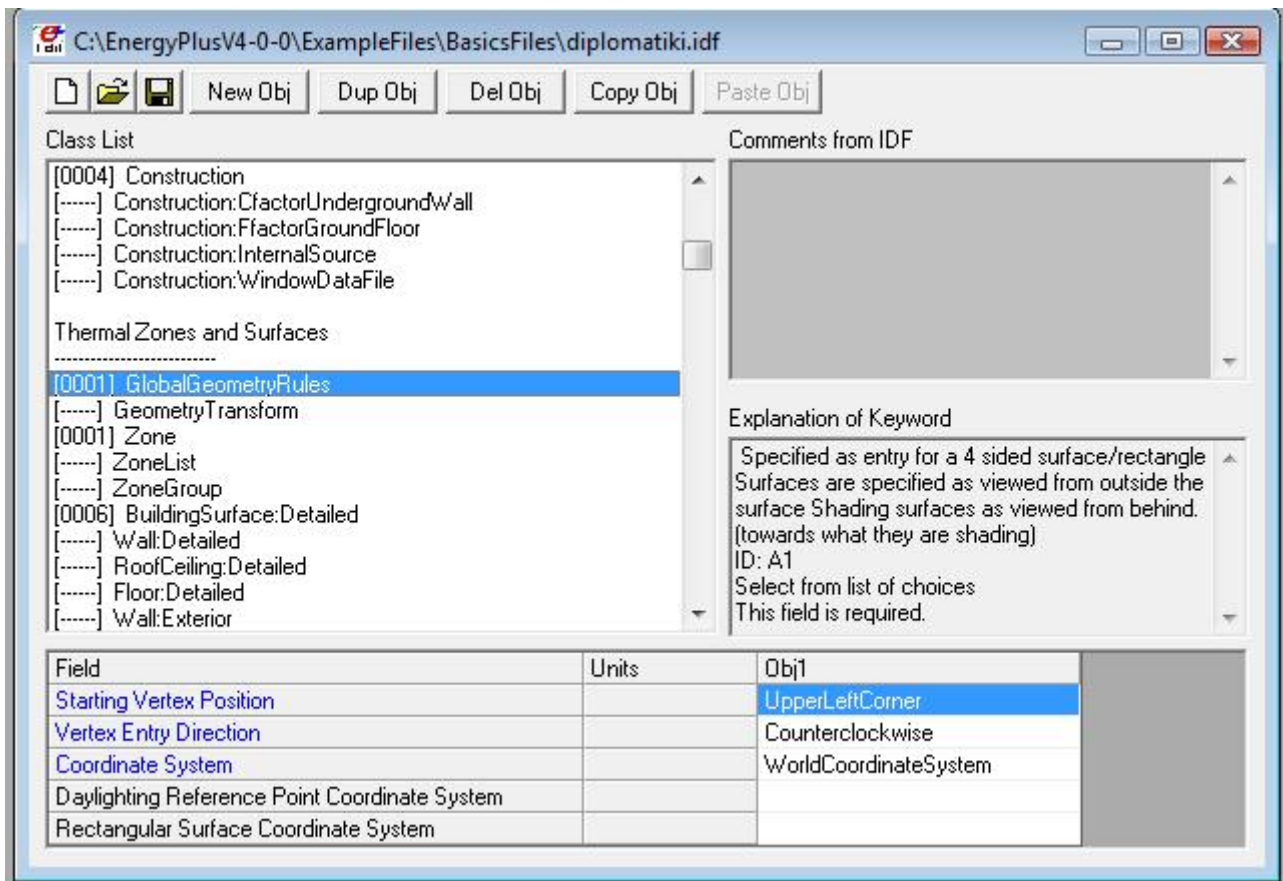
Σχήμα 2.4.21: Βήμα 17^ο: Όμοια με τα δύο προηγούμενα βήματα, στα πλαίσια της καταγραφής των υλικών που συνθέτουν την κατασκευή του κτιρίου, δίνονται και οι ιδιότητες των γυάλινων επιφανειών.



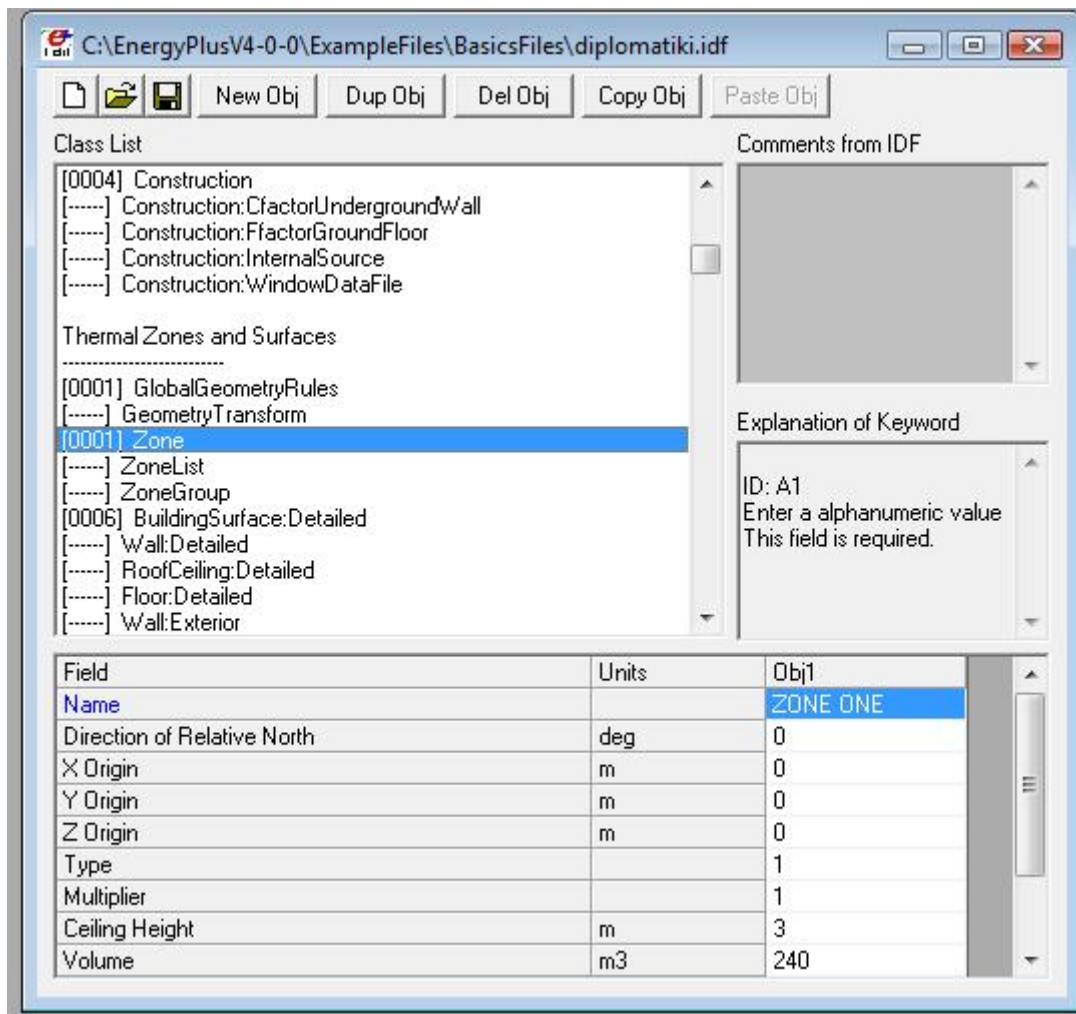
Σχήμα 2.4.22: Βήμα 18^ο: Σε συνέχεια των προηγούμενων βημάτων δίνονται και οι ιδιότητες του αερίου στο μονωτικό διάστημα των γυάλινων επιφανειών. (Στην περίπτωσή μας επιλέχθηκε κενό αέρος πάχους 3 χιλιοστών).



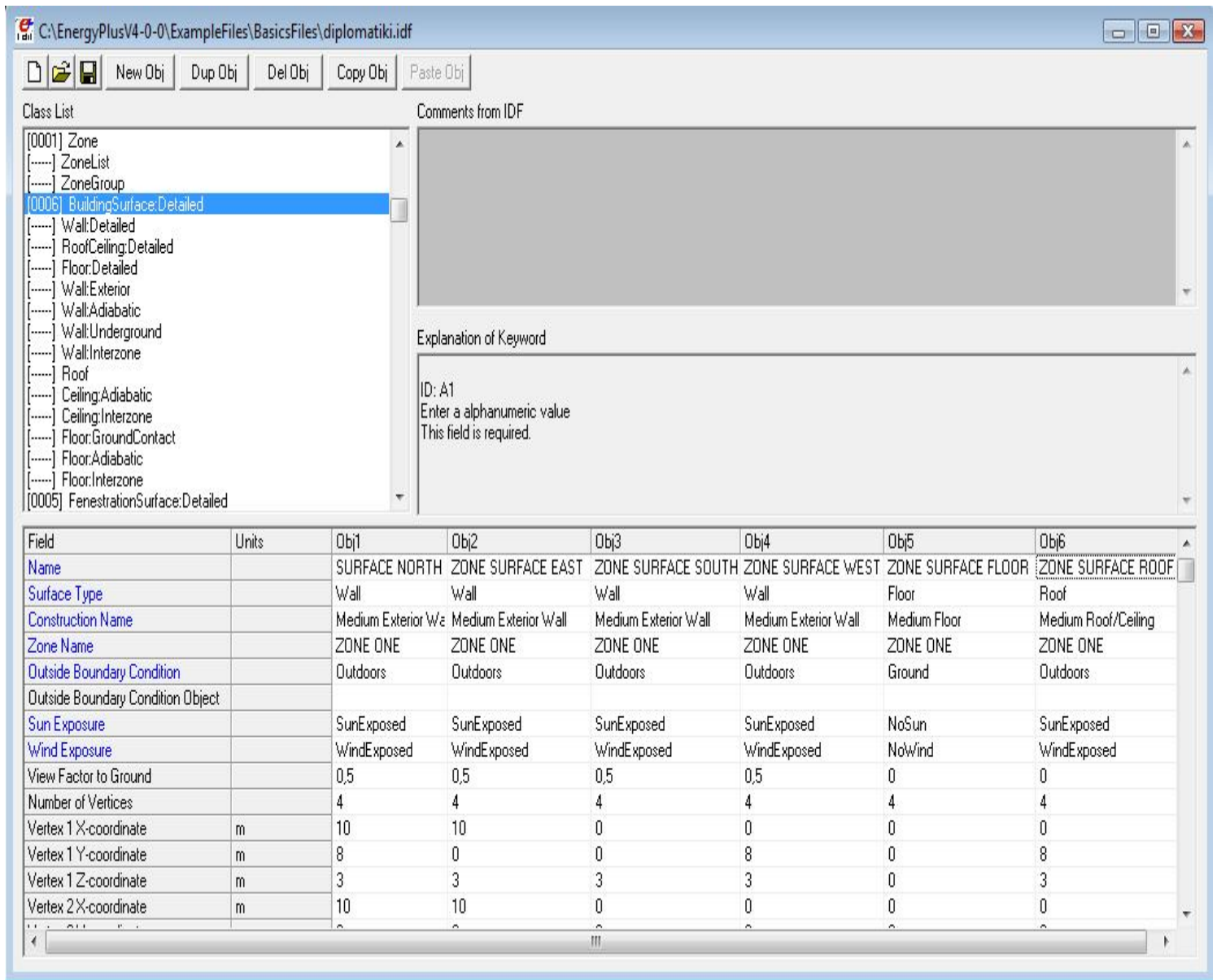
Σχήμα 2.4.23: Βήμα 19^ο: Σύνθεση των υλικών που περιγράφηκαν στα προηγούμενα βήματα. Το αποτέλεσμα είναι οι τέσσερις τοίχοι, το δάπεδο, η οροφή και οι υαλόφρακτες επιφάνειες. Τα διάφορα υλικά κατατάσσονται σε στρώματα από την εξωτερική πλευρά του κτιρίου προς το εσωτερικό-θερμική ζώνη.



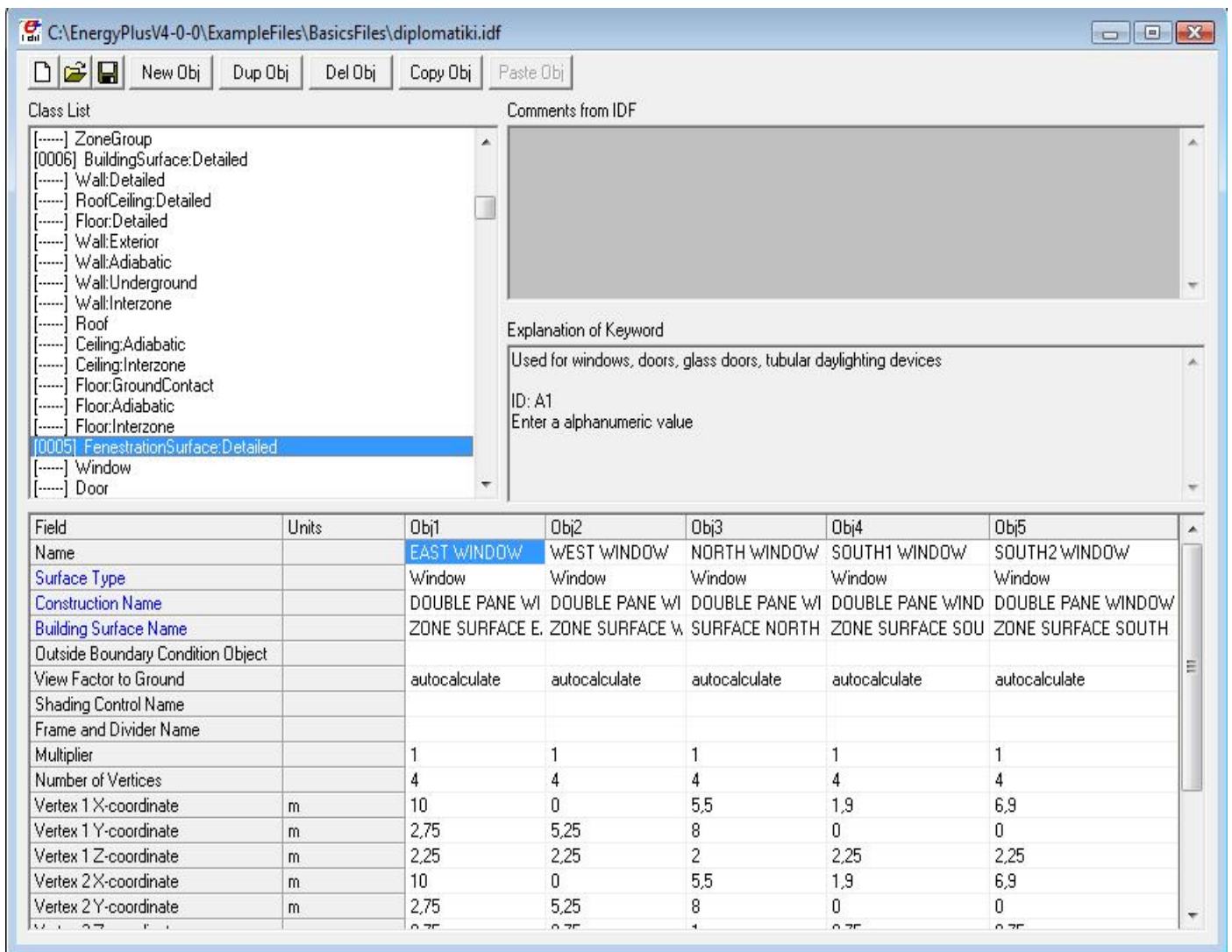
Σχήμα 2.4.24: Βήμα 20^ο: Ανάλυση του συστήματος συντεταγμένων που ακολουθείται. Με αυτόν τον τρόπο τοποθετείται στο χώρο το κτίριο και ορίζεται η αρχή του συστήματος των τριών διαστάσεων. (Οι επιλογές έγιναν με τη βοήθεια του προγράμματος προς αποφυγή σύγχυσης ως προς τα σημεία του οριζοντα).



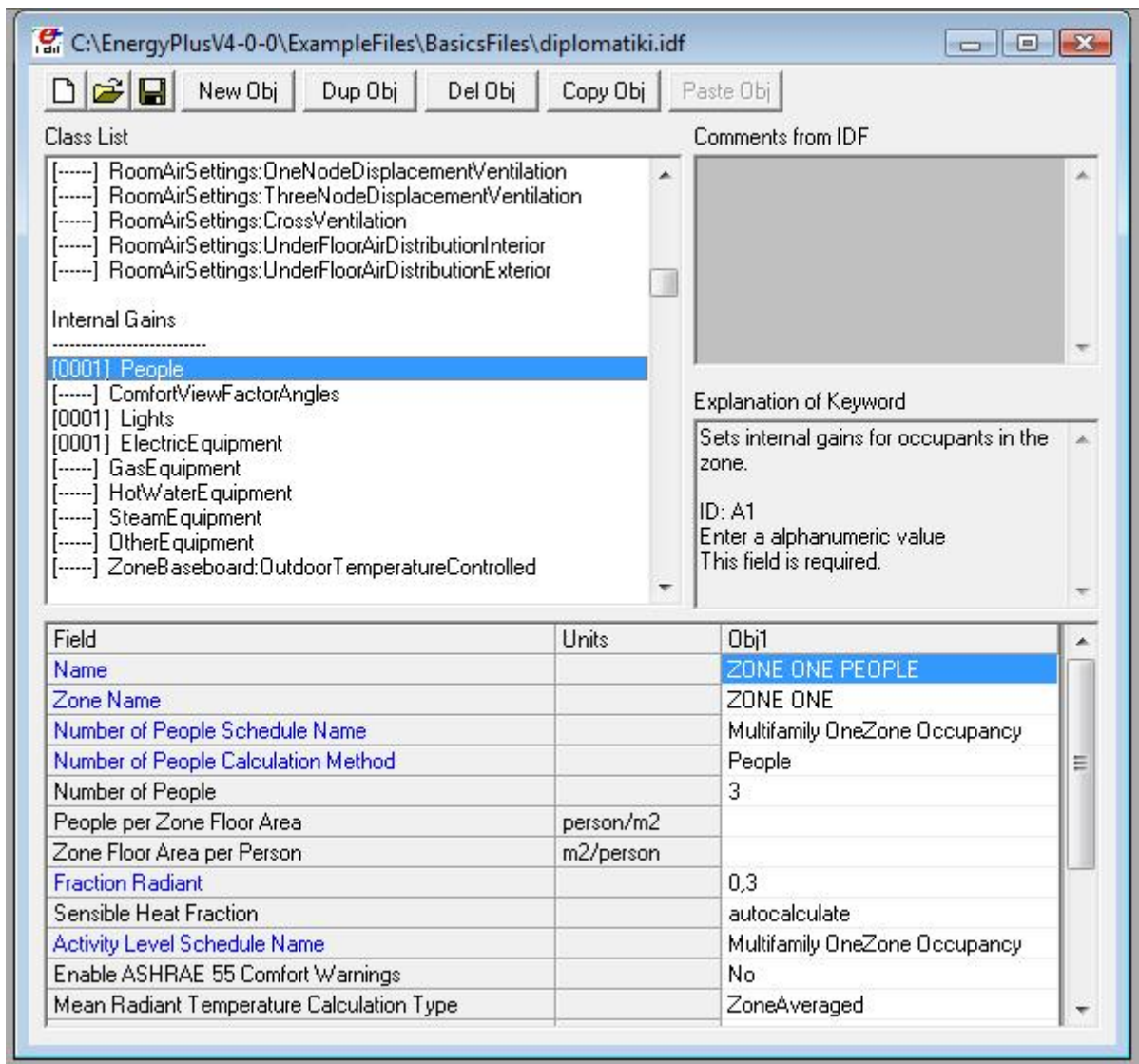
Σχήμα 2.4.25: Βήμα 21^ο: Καθορισμός της θερμικής ζώνης που θα προσομοιωθεί. (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η κατοικία επιλέχθηκε να έχει μηδενική απόκλιση από τον Βορρά, ενώ το σημείο (0,0,0) τέθηκε στην αριστερή κάτω γωνία της πρόσοψης του κτιρίου. Το ύψος επιλέχθηκε 3 μέτρα και ο συνολικός όγκος της ζώνης ανέρχεται σε 240 κυβικά μέτρα).



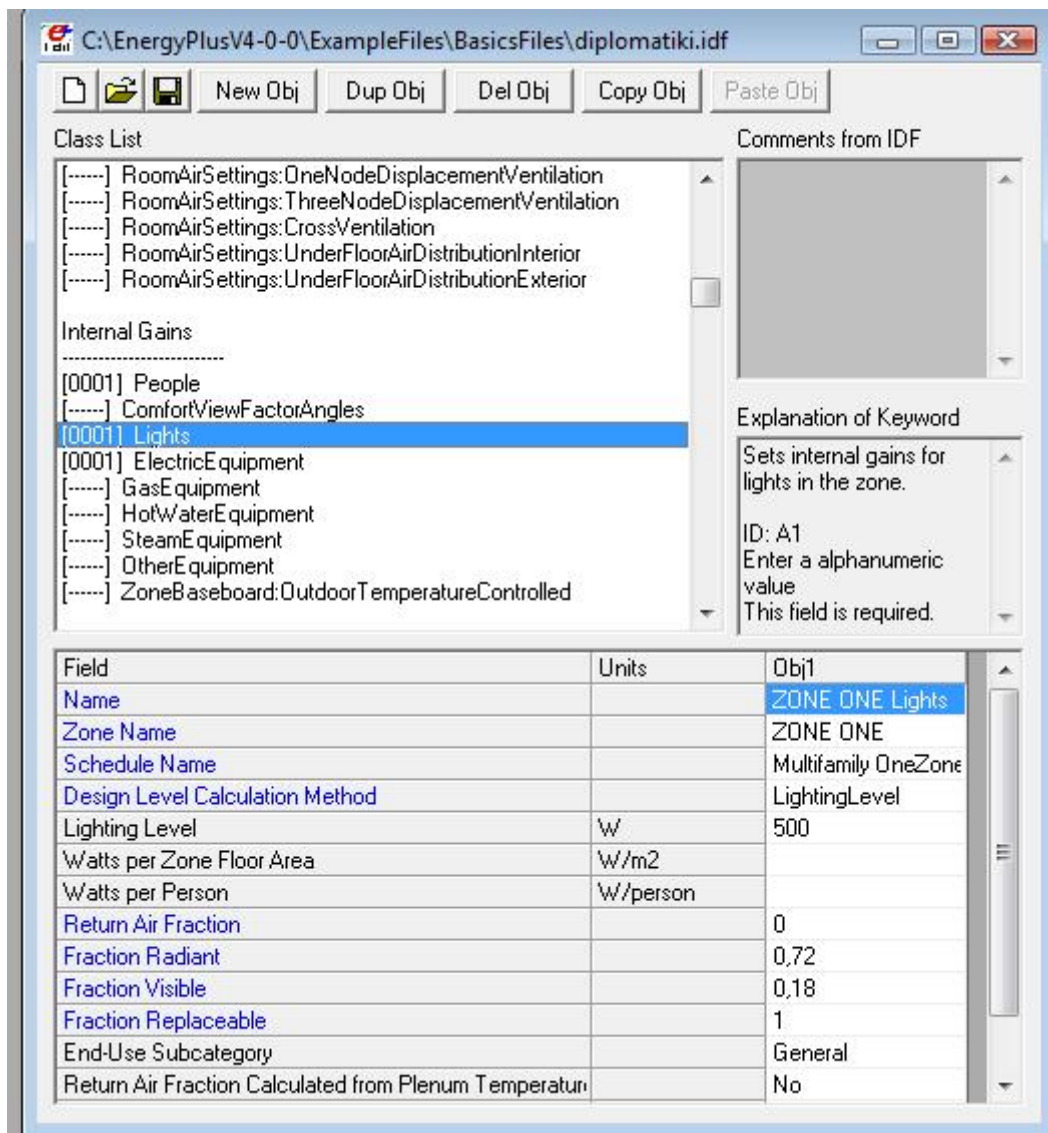
Σχήμα 2.4.26: Βήμα 22^ο: Προσδιορισμός των τεσσάρων τοίχων, της οροφής και του δαπέδου στο χώρο, με βάση το σύστημα συντεταγμένων που ορίστηκε σε προηγούμενο βήμα. Ιδιαιτερότητα του προγράμματος είναι, ότι η κάθε επιφάνεια ορίζεται όπως θα την κοιτούσε παρατηρητής έξω από το κτίριο. Το σημείο 1 αντιστοιχεί στην πάνω αριστερή γωνία της κάθε όψης και συνεχίζεται ανθρωπολογικά.



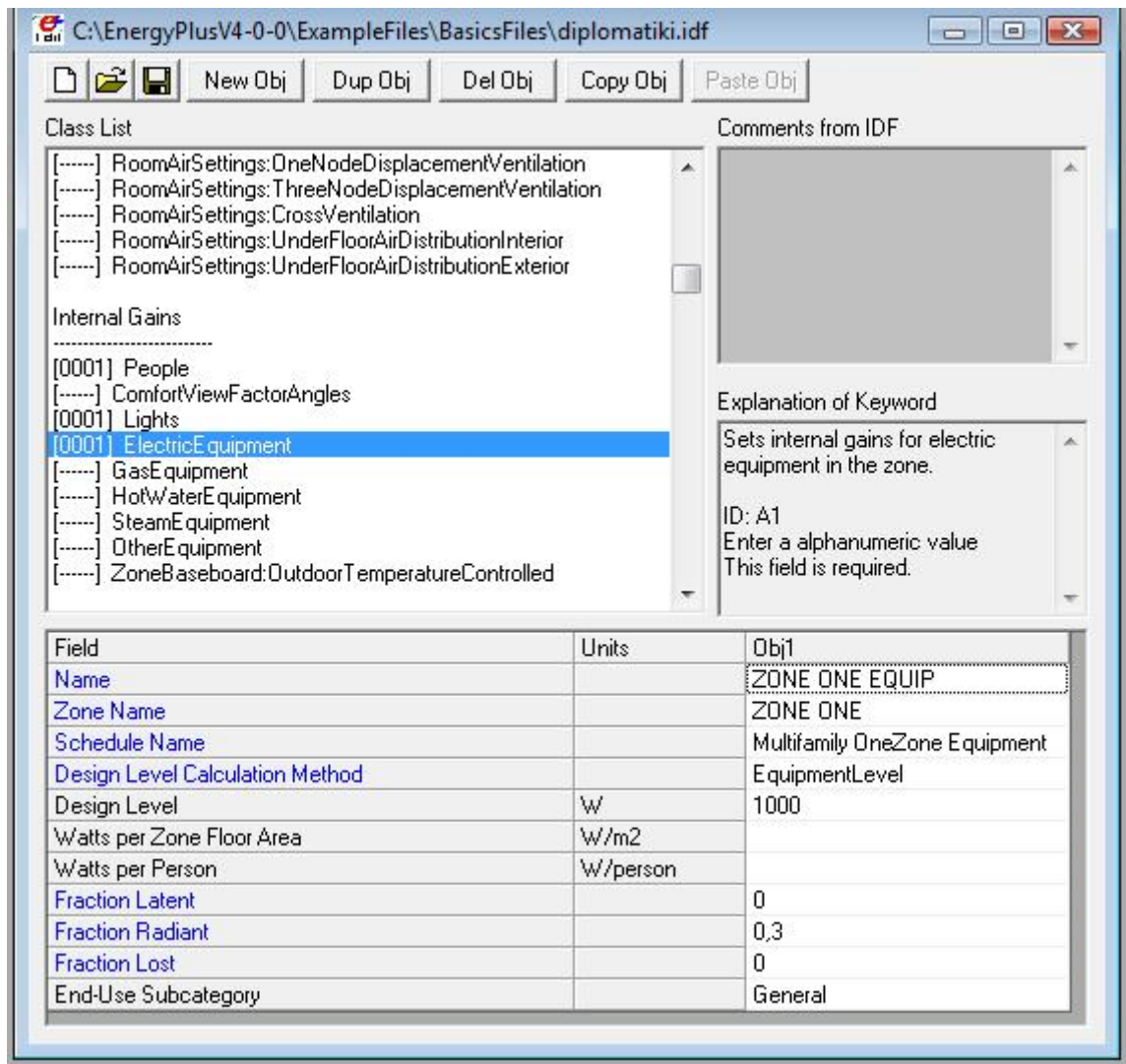
Σχήμα 2.4.27: Βήμα 23^ο: Όμοια με το προηγούμενο βήμα, προσδιορισμός των υαλοφρακτων επιφανειών της κάθε όψης του κτιρίου στο χώρο με την αρίθμηση των συντεταγμένων κ πάλι ανθρωρολογιακά.



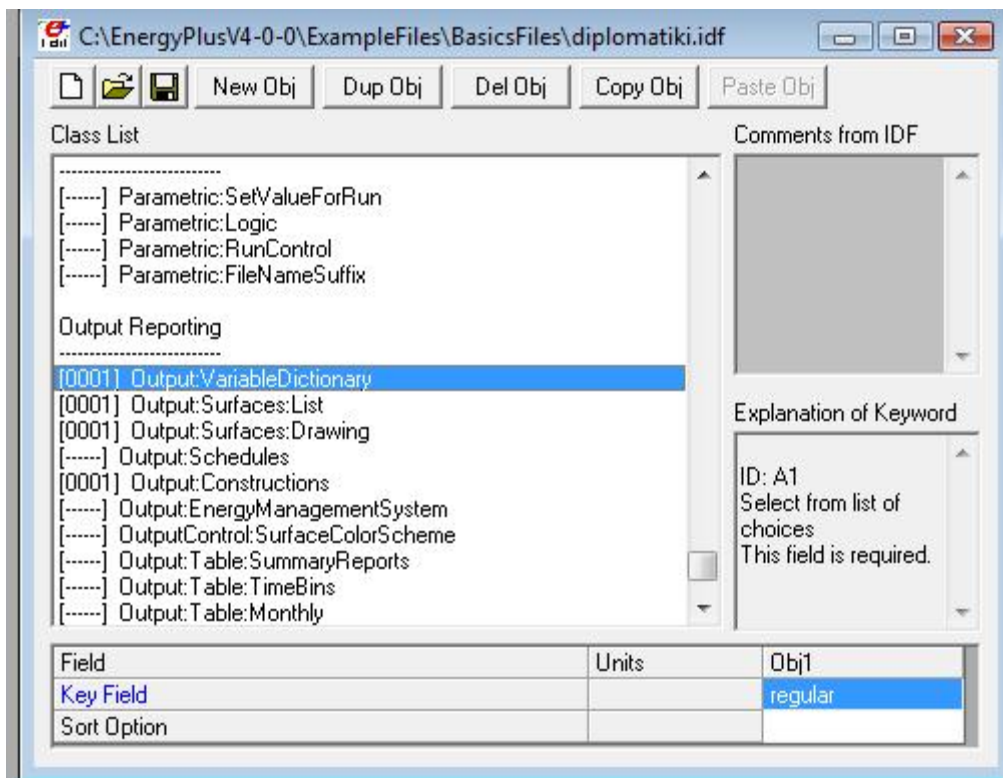
Σχήμα 2.4.28: Βήμα 24^ο: Καθορισμός των εσωτερικών θερμικών κερδών εξαιτίας της ανθρώπινης παρουσίας-δραστηριότητας στην κατοικία. Για τους υπολογισμούς, το επίπεδο κατοίκησης προκύπτει από το πρόγραμμα που καταστρώθηκε σε προηγούμενο βήμα (Schedule name: Multifamily OneZone Occurance), ενώ η μέθοδος υπολογισμών του θερμικού φορτίου ανά άτομο προέρχεται από τη βάση δεδομένων της ASHRAE.



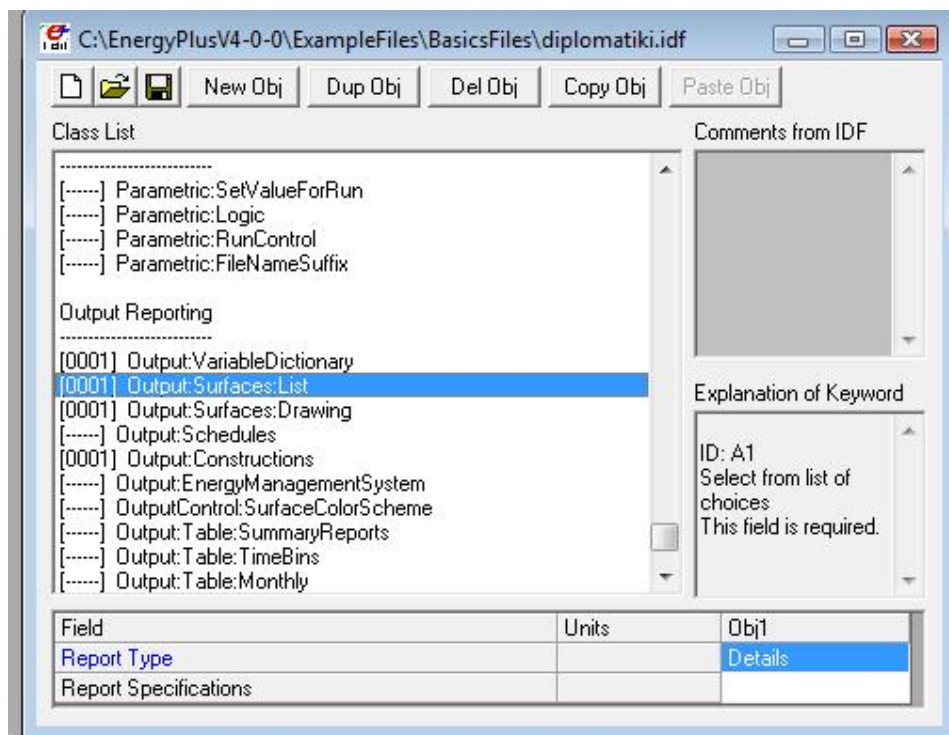
Σχήμα 2.4.29: Βήμα 25^ο: Καθορισμός των εσωτερικών θερμικών κερδών που προέρχονται από τον φωτισμό του κτιρίου. Όμοια με πριν, τα επίπεδα φωτισμού προκύπτουν από το ωράριο που σχηματίστηκε σε προηγούμενο βήμα, ενώ οι τιμές για την ενεργειακή κατανάλωση καθώς και τα χαρακτηριστικά τους προέρχονται από πίνακες της ASHRAE.



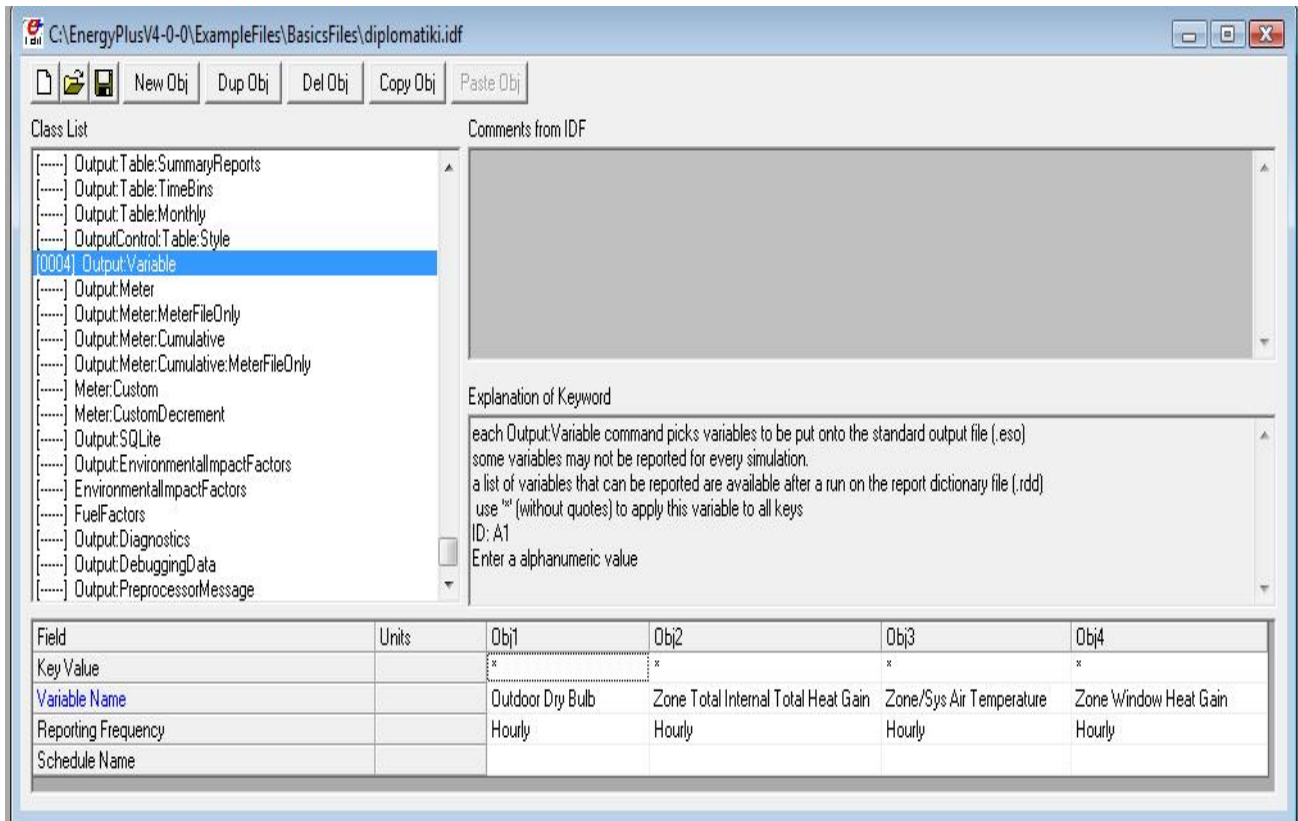
Σχήμα 2.4.30: Βήμα 26^ο: Καθορισμός των εσωτερικών θερμικών κερδών που προέρχονται από τον εξοπλισμό-ηλεκτρικές συσκευές εντός της θερμικής ζώνης. Όμοια με πριν, οι υπολογισμοί του φοτίου του εξοπλισμού προκύπτουν από το ωράριο που σχηματίστηκε σε προηγούμενο βήμα, ενώ οι τιμές για την ενεργειακή κατανάλωση καθώς και τα χαρακτηριστικά τους προέρχονται από πίνακες της ASHRAE.



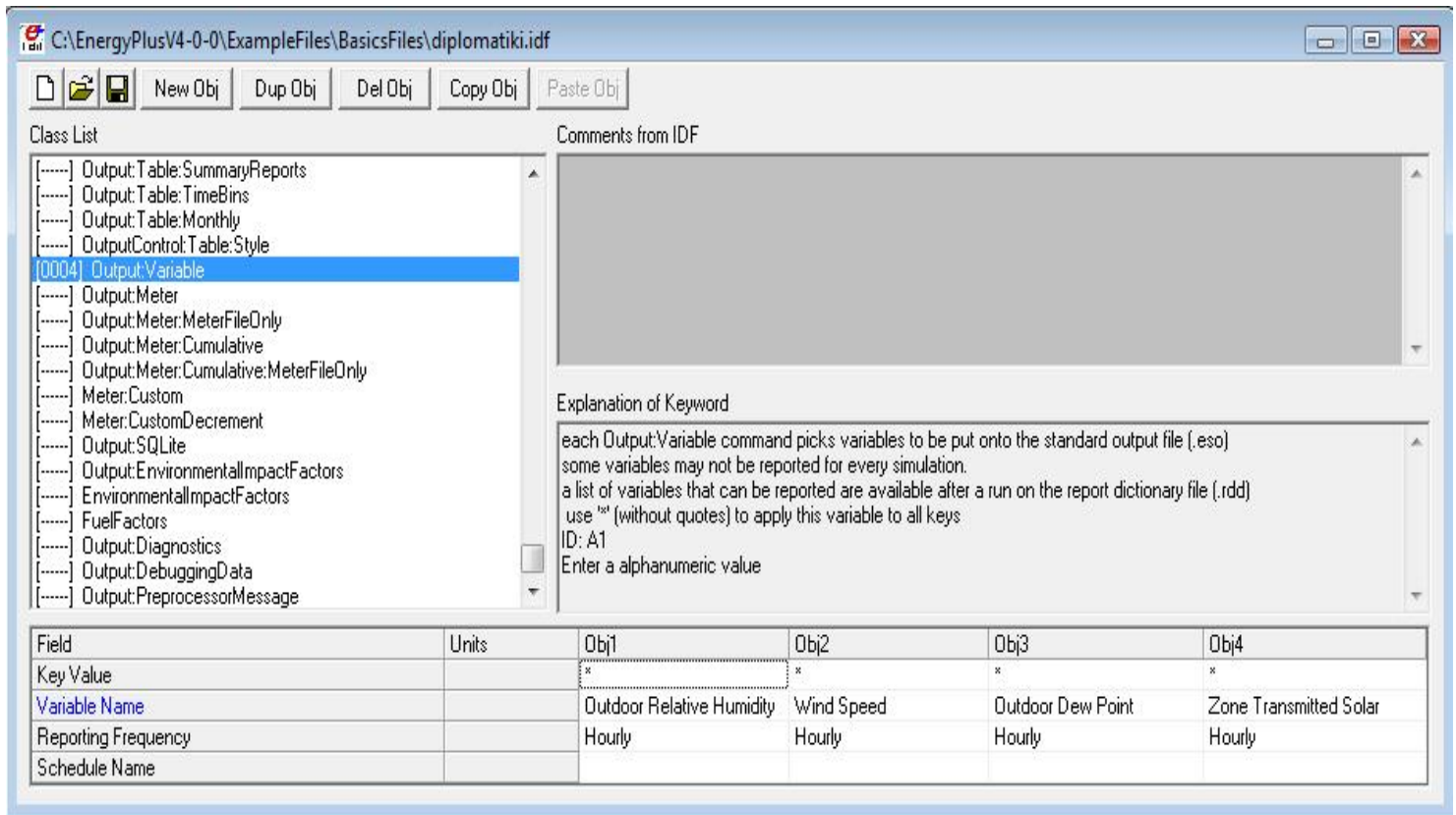
Σχήμα 2.4.31: Βήμα 27^ο: Προσδιορισμός των παραμέτρων εξόδου του προγράμματος. Εδώ, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τον τρόπο και τη μορφή που θα λαμβάνει τα αποτελέσματα των θερμικών προσομοιώσεων. Στην συγκεκριμένη επιλογή το λεξικό των μεταβλητών εξόδου τέθηκε στο κανονικό επίπεδο, που είναι σε μορφή κώδικα που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα.



Σχήμα 2.4.32: Βήμα 28^ο: Οι επόμενες επιλογές Output: Surfaces: List, Drawing και Output: Constructions σχετίζονται με τον τρόπο που παραλαμβάνει τα αποτελέσματα από το IDFEditor, το EP-launch και πως θα μπορεί να τα ανακαλέσει μέσω αυτού ο χρήστης



Σχήμα 2.4.33: Βήμα 29^ο: Προσδιορισμός των μεταβλητών εξόδου μετά το πέρας των θερμικών προσομοιώσεων. Ανάλογα με το είδος του κτιρίου, την χρήση αυτού, την περίοδο προσομοίωσης καθώς και των μεταβλητών εισόδου, ο χρήστης έχει την ευχέρεια να επιλέξει ανάμεσα σε μεγάλο πλήθος πιθανών μεταβλητών. Επίσης, στη δεύτερη σειρά της κάθε επιλεγμένης μεταβλητής, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της συχνότητας της έκθεσής της, παραδείγματος χάρη ωριαία, ημερήσια, εβδομαδιαία, μηνιαία κλπ. (Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκαν : η ατμοσφαιρική θερμοκρασία ξηρού βολβού, τα συνολικά εσωτερικά θερμικά κέρδη, η εσωτερική θερμοκρασία της θερμικής ζώνης και τα θερμικά κέρδη της εισερχόμενης από τα παράθυρα ηλιακής ακτινοβολίας. Για όλες τις μεταβλητές επιλέχθηκε η ωριαία συχνότητα κατά την έκθεσή τους).



Σχήμα 2.4.34: Βήμα 29^ο: Σε συνέχεια του προηγούμενου βήματος, δίνονται και οι υπόλοιπες μεταβλητές εξόδου που λήφθηκαν από τις προσομοιώσεις της κατοικίας και είναι: η ατμοσφαιρική σχετική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η εξωτερική θερμοκρασία του σημείου δρόσου και η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία.

2.5) Αποτελέσματα-Συμπέρασματα:

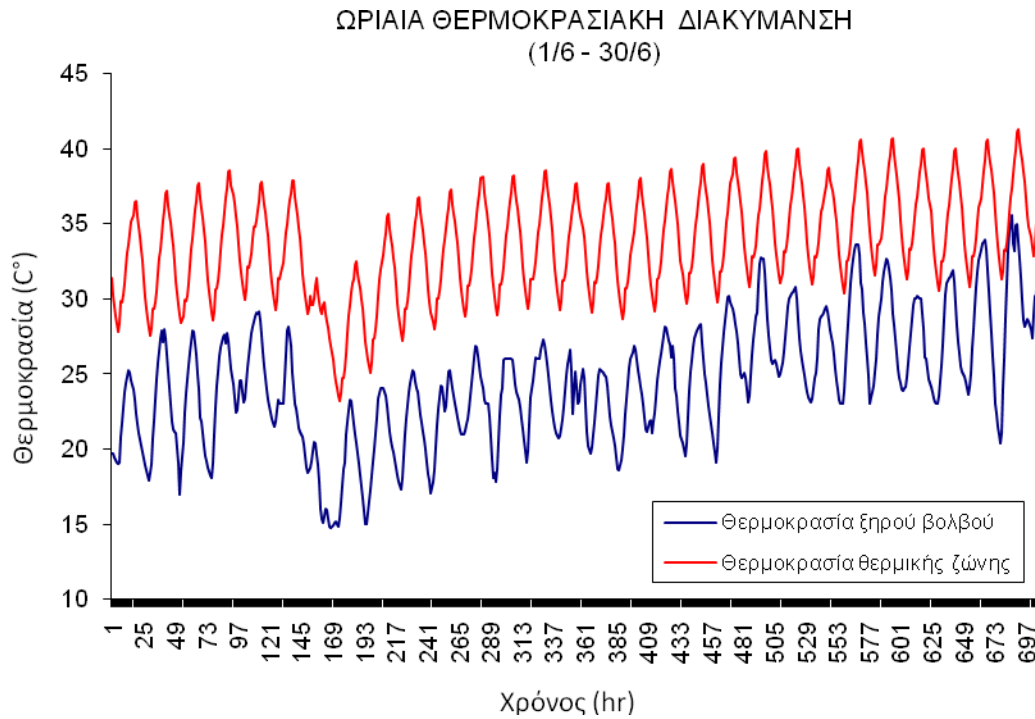
Στα προηγούμενα κεφάλαια του υπολογιστικού μέρους της εργασίας εξετάστηκε η λειτουργία του ακτινοβολητή, η μαθηματική μοντελοποίησή του και τέλος έγινε το κυρίως σχέδιο του υπό εξέταση κτιρίου στην περιοχή της Αθήνας. Σε συνέχεια όλων αυτών, για μια ολοκληρωμένη μελέτη, απομένει να εξεταστεί η αποδοτικότητα του συστήματος του ακτινοβολητή για το δεδομένο κτίριο. Αυτό θα γίνει αναλυτικά σε αυτό το κεφάλαιο.

Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, δημιουργήθηκε ένα αρχείο «diplomatiki.idf», στο οποίο περιέχονται τα βασικά δεδομένα και οι παράμετροι της υπολογιστικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Στα πλαίσια αυτής της ενότητας δημιουργήθηκαν δύο νέα αρχεία στο πρόγραμμα IDF EDITOR. Αυτά ονομάζονται : «diplomatikiA.idf» και «diplomatikiB.idf» . Το πρώτο περιέχει τα χαρακτηριστικά του κτιρίου, όπως αυτά περιγράφηκαν, ενώ στο δεύτερο προστέθηκε στο ήδη υπάρχον η εφαρμογή του ακτινοβολητή, όπως αυτός μοντελοποιήθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Τελικά, τα δύο αρχεία μαζί με τα κλιματολογικά δεδομένα της Αθήνας αποτέλεσαν τα δεδομένα εισόδου για δύο σειρές προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Τα δεδομένα εξόδου που προέκυψαν μετά τους θερμικούς υπολογισμούς παρατίθενται σε αυτό το κεφάλαιο, όπου θα γίνει έκθεση, αναλυτική περιγραφή, σύγκριση και τέλος σχολιασμός των διαφορών των δύο περιπτώσεων. Μέσω της διαδικασίας αυτής θα εξαχθούν τα όποια συμπεράσματα για την αποδοτικότητα του συστήματος και θα γίνουν προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

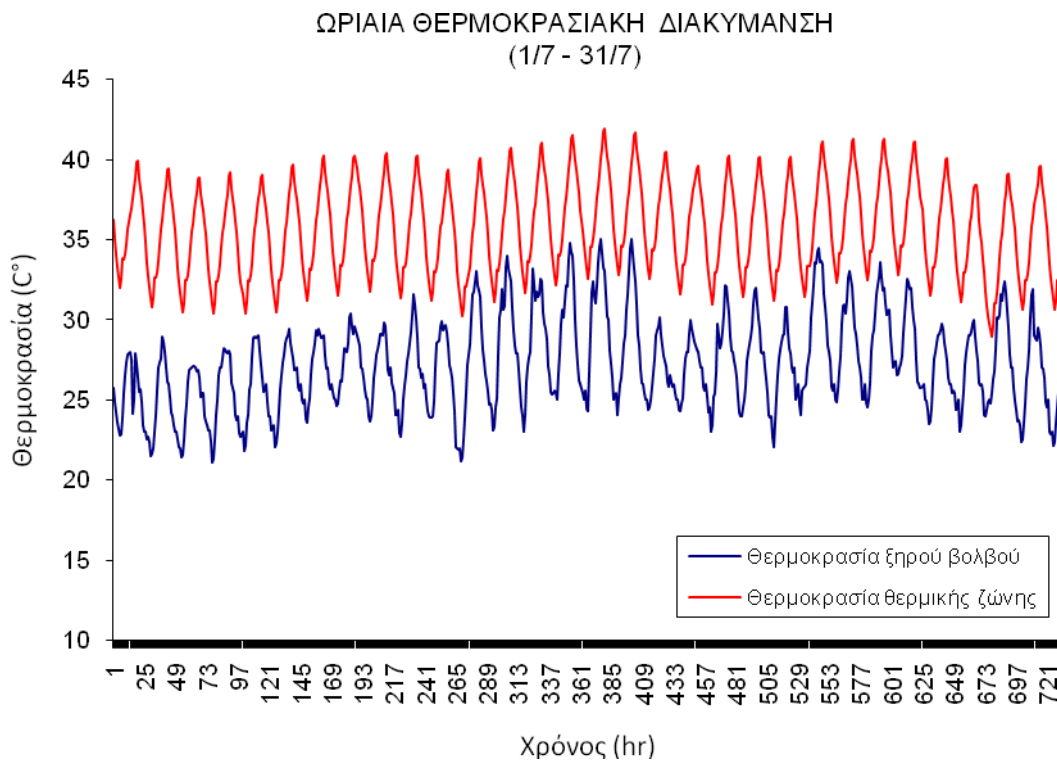
Η πρώτη σειρά υπολογισμών αφορούν την πρώτη υπόθεση της εργασίας, δηλαδή για την κατοικία καθ'αυτή χωρίς την παρουσία του ακτινοβολητή. Τα αρχεία εισόδου για αυτή την περίπτωση είναι τα: «diplomatikiA.idf» και «WeatherData/GRC_Athens.epw» . Το πρώτο περιέχει τα στοιχεία που αφορούν το κτίριο, όπως δομή, τοποθεσία, ενεργειακές ανάγκες – καταναλώσεις, εσωτερικές πηγές θερμικών κερδών, πρόγραμμα δραστηριοτήτων των ενοίκων καθώς και τις παραμέτρους και μεταβλητές που αφορούν την εκτέλεση της προσομοίωσης. Ουσιαστικά αποτελεί το ίδιο αρχείο με το: «diplomatiki.idf» που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Αντίστοιχα, το δεύτερο αρχείο περιέχει τα κλιματολογικά δεδομένα της Αθήνας, δηλαδή θερμοκρασίες υγρού και ξηρού βολβού, τιμές σχετικής υγρασίας, ένταση και κατεύθυνση ανέμων, δείκτες νεφώσεων και τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, όπως αυτά καταγράφονται από την ASHRAE.

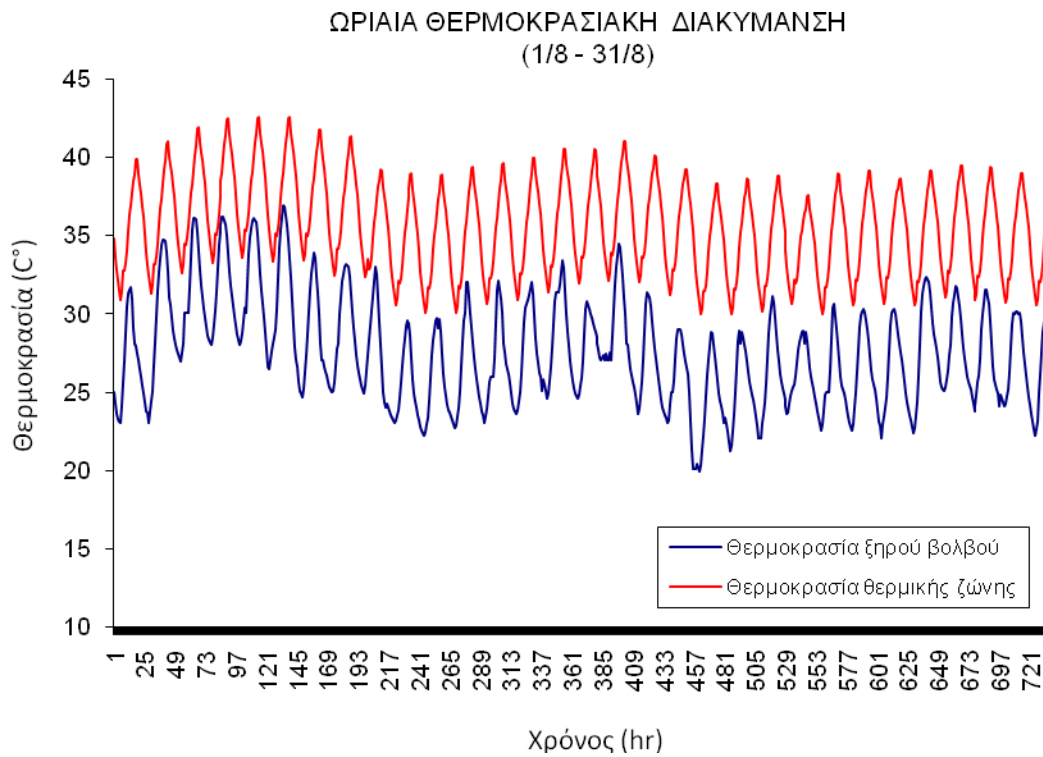
Από την θερμική προσομοίωση προέκυψε η αναλυτική διακύμανση των ωριαίων τιμών της θερμοκρασίας εντός της θερμικής ζώνης συγκριτικά με τη θερμοκρασία ξηρού βολβού για την υπό εξέταση περίοδο (1/6 έως 15/9) και ανά μήνα είναι:



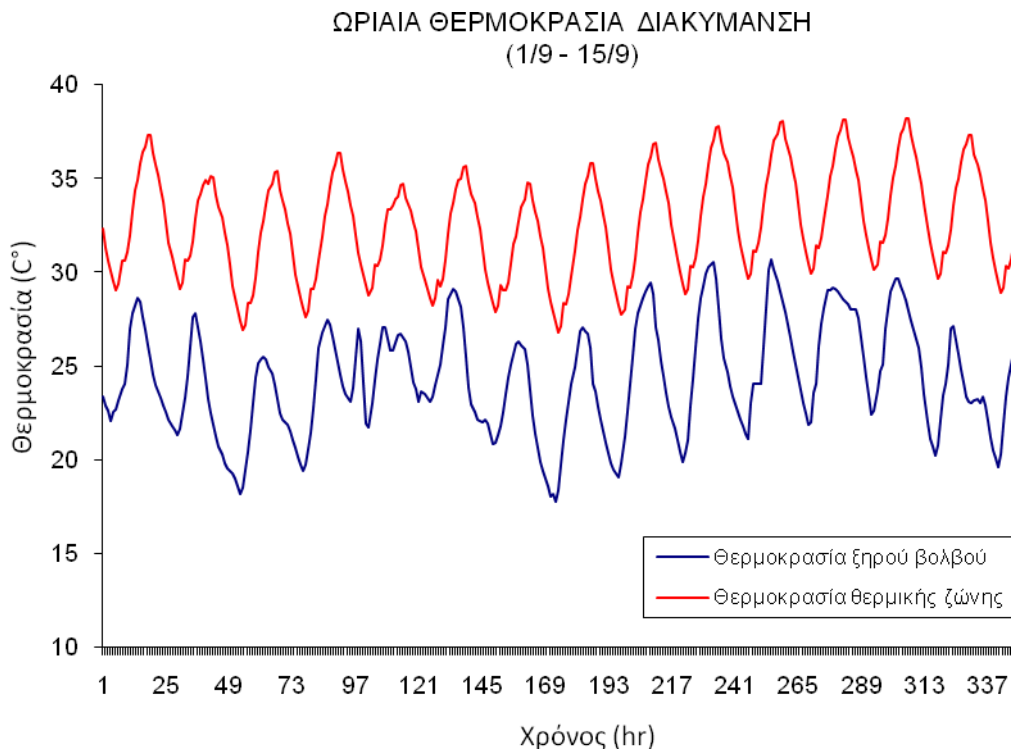
Διάγραμμα 2.5.1: Ωριαία θερμοκρασιακή διακύμανση εντός και εκτός της κατοικίας για το μήνα Ιούνιο.



Διάγραμμα 2.5.2: Ωριαία θερμοκρασιακή διακύμανση εντός και εκτός της κατοικίας για το μήνα Ιούλιο.



Διάγραμμα 2.5.3: Ωριαία θερμοκρασιακή διακύμανση εντός και εκτός της κατοικίας για το μήνα Αύγουστο.



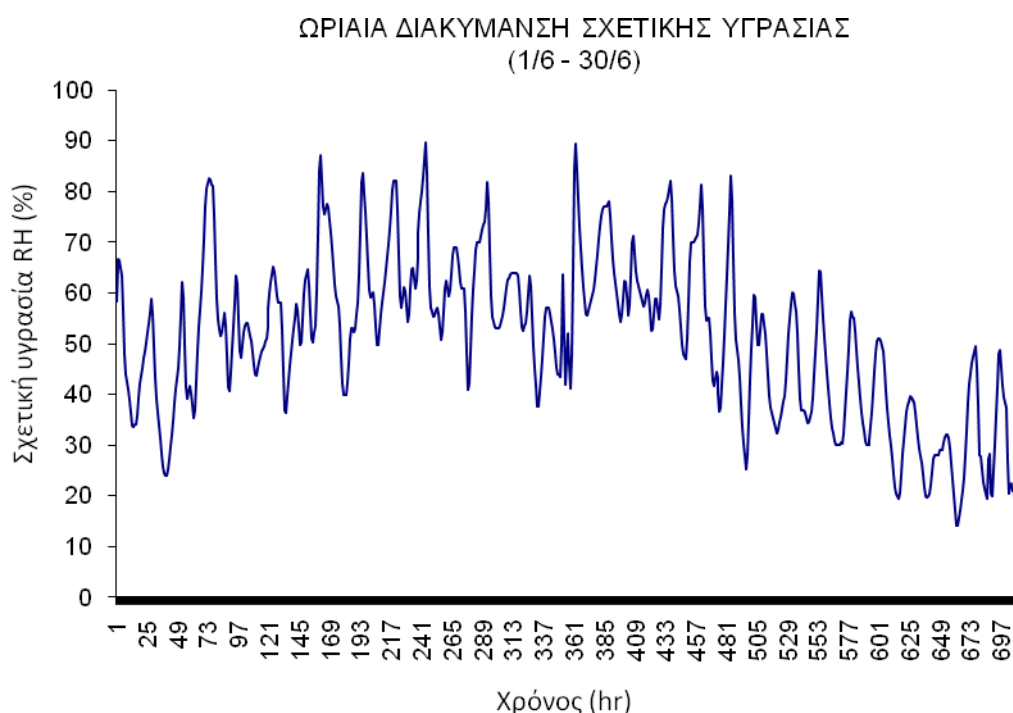
Διάγραμμα 2.5.4: Ωριαία θερμοκρασιακή διακύμανση εντός και εκτός της κατοικίας για το μήνα Σεπτέμβριο (μέχρι τις 15/9).

Τα παραπάνω διαγράμματα αφορούν την πρώτη σειρά προσομοιώσεων που έγιναν για την θερμική ζώνη της υπό μελέτη κατοικίας. Στον κατακόρυφο άξονα διακρίνεται το εύρος των θερμοκρασιών που σημειώθηκαν ανά μήνα, ενώ στον κάθετο διακρίνεται το σύνολο των ωρών που διήρκεσε ο μήνας. Σε κάθε διάγραμμα διακρίνονται δύο καμπύλες. Η μία περιγράφει τη θερμοκρασιακή διακύμανση της θερμικής ζώνης και η δεύτερη την εξωτερική θερμοκρασία, που ταυτίζεται με αυτή του ξηρού βολβού. Λόγω της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας, για κάθε καμπύλη χαράχθηκε και η μέση τιμή της.

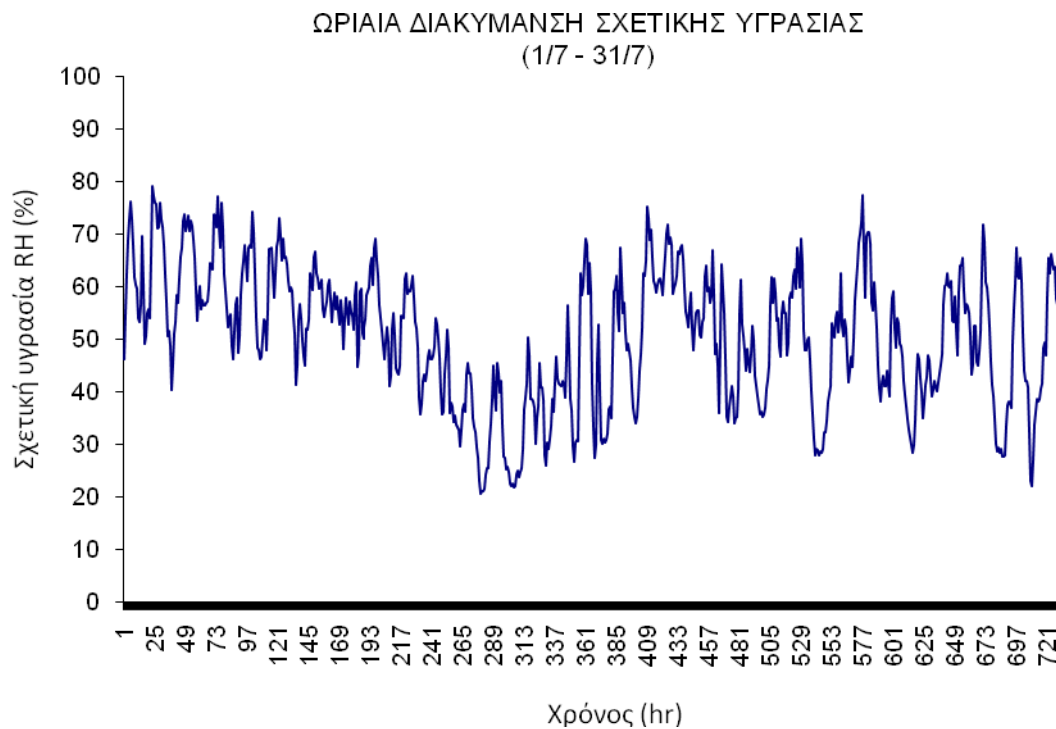
Παρατηρούμε ότι για όλους τους μήνες, η θερμοκρασία εντός της θερμικής ζώνης είναι σταθερά αυξημένη έναντι αυτής του περιβάλλοντος. Αυτό ήταν αναμενόμενο, δεδομένης της έλλειψης κλιματιστικής μονάδας στην κατοικία, όπως ήταν η αρχική υπόθεση. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι οι τιμές της θερμοκρασίας για τη θερμική ζώνη εντός της κατοικίας, έπονται χρονικά των μεταβολών που παρουσιάζει η καμπύλη της εξωτερικής θερμοκρασίας(ξηρού βολβού) και επίσης δεν παρατηρούνται στην κατοικία οι κατά καιρούς απότομες μεταβολές της εξωτερικής θερμοκρασίας. Αντιθέτως, η καμπύλη που αφορά την θερμοκρασία εντός της θερμικής ζώνης του κτιρίου έχει πιο αρμονική διακύμανση και ομοιάζει με αυτή του ημιτόνου. Δεν πρόκειται βέβαια για ταλάντωση, αλλά τα τοπικά ακρότατα ταυτίζονται με τις μέγιστες θερμοκρασίες για την ημέρα και με τις ελάχιστες για τη νύκτα. Η δε διαφορά τους, αποτελεί το εύρος (range) θερμοκρασιών που παρατηρείται κατά ένας πλήρες εικοσιτετράωρο. Όλα αυτά τα φαινόμενα εξηγούνται από την ύπαρξη της θερμικής μάζας του κτιρίου. Δηλαδή, τα δομικά στοιχεία της κατοικίας, εκτός του ότι φέρουν μόνωση, έχουν και μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα σε σύγκριση με τον εξωτερικό αέρα. Άρα, παρουσιάζουν θερμική αδράνεια και δεν επιτρέπουν στη θερμική ζώνη που περικλείουν να «βλέπει» άμεσα τις μεταβολές των εξωτερικών συνθηκών.

Από την εκτέλεση της πρώτης σειράς αποτελεσμάτων προέκυψε και η διακύμανση της σχετικής υγρασίας (RH %) για τον κάθε μήνα της υπό εξέτασης περιόδου. Τα διαγράμματα της σχετικής υγρασίας έχουν ιδιαίτερη σημασία για την παρούσα εργασία. Όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό μέρος, οι τιμές αυτού του μεγέθους επηρεάζουν άμεσα την αποτελεσματικότητα του ακτινοβολητή. Αυτό συντελείται σε δύο επίπεδα. Το πρώτο αφορά τον ακτινοβολητή. Κατά τη λειτουργία του, η ύπαρξη αυξημένης σχετικής υγρασίας στην ατμόσφαιρα και συγκεκριμένα στο επίπεδο της οροφής του κτιρίου οδηγεί στο σχηματισμό σταγόνων νερού στην επίπεδη επιφάνεια του ακτινοβολητή. Οι σταγόνες αυτές δεν επιτρέπουν στην υπέρυθρη ακτινοβολία να περάσει με αποτέλεσμα να μειώνεται η αφετική ικανότητα (emissivity) του ακτινοβολητή, άρα και η εκπομπή θερμότητας προς τον ουράνιο θόλο.

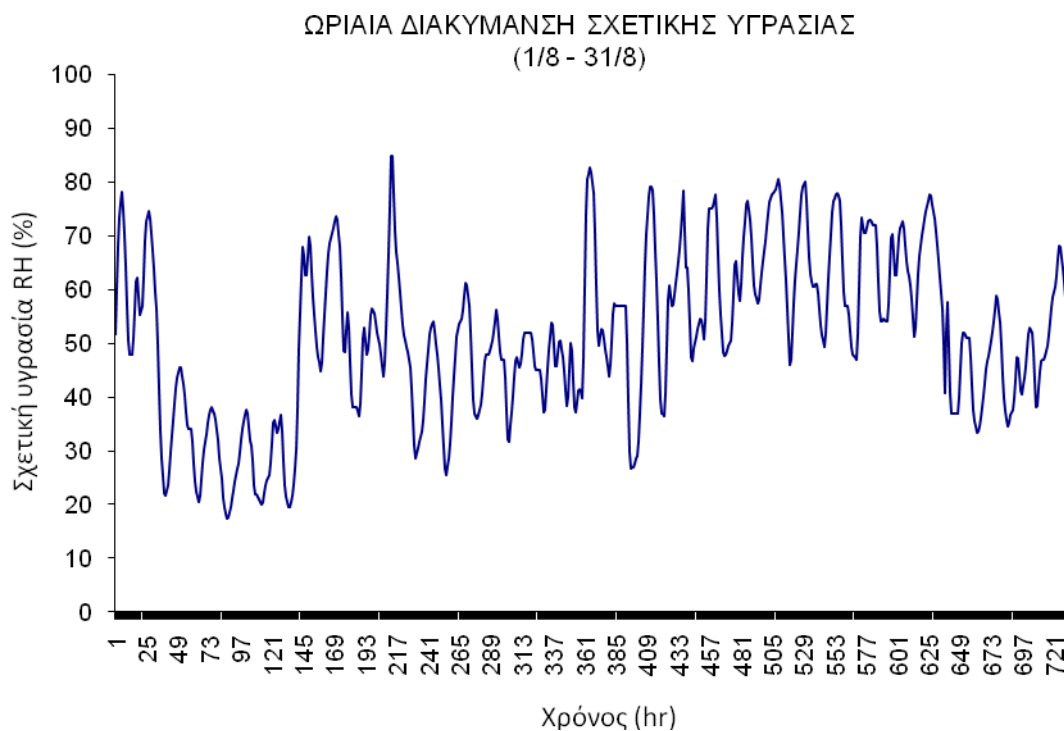
Το δεύτερο επίπεδο αφορά την ατμόσφαιρα και την διαπερατότητά της ως προς το εύρος της ακτινοβολίας του ακτινοβολητή. Δηλαδή, η ύπαρξη αυξημένης σχετικής υγρασίας οδηγεί σε σχηματισμό υδρατμών, που είτε αιωρούνται στην ατμόσφαιρα, είτε σχηματίζουν νεφώσεις. Έτσι δημιουργείται ένα φιλμ – στρώμα υγρασίας, το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ του ακτινοβολητή και των ανώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Αυτό δεν επιτρέπει στη θερμότητα της επιφάνειας της γης να διαφύγει στον ψυχρότερο ουρανό, αλλά την αντανακλά πίσω στη γή. Το φαινόμενο αυτό, όπως είδαμε και προηγουμένως, ονομάζεται “ατμοσφαιρική πίσω ακτινοβολία” (atmospheric back radiation). Οι τιμές της σχετικής υγρασίας για την περίπτωση μας φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν:



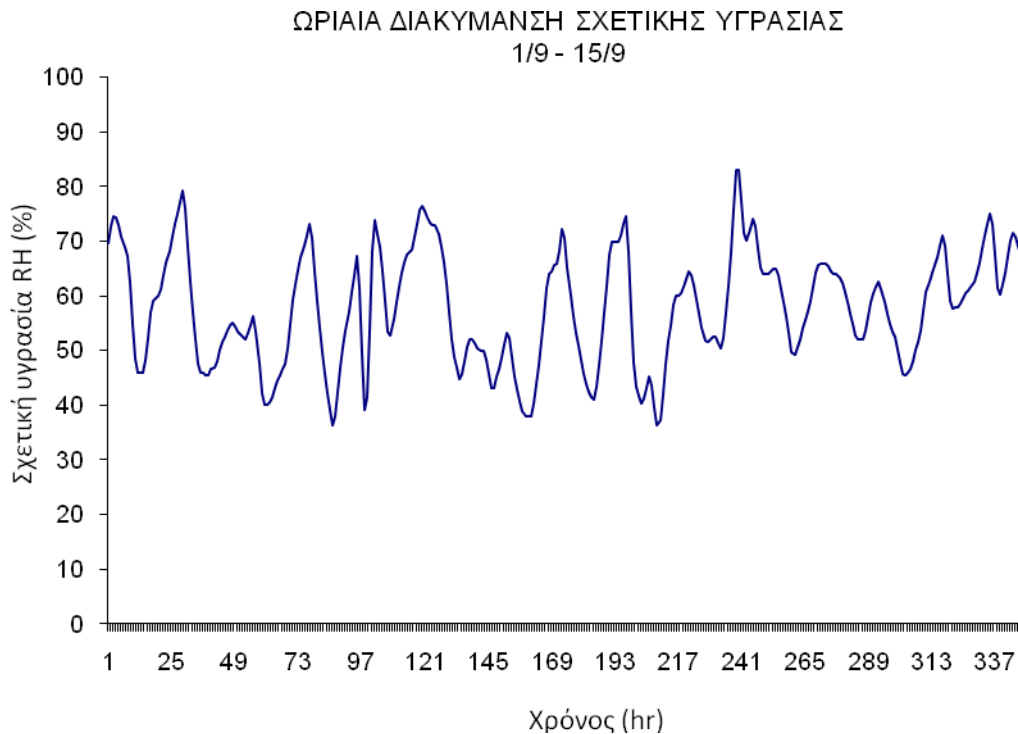
Διάγραμμα 2.5.5: Ωριαία διακύμανση της σχετικής υγρασίας για το μήνα Ιούνιο.



Διάγραμμα 2.5.6: Ωριαία διακύμανση της σχετικής υγρασίας για το μήνα Ιούλιο



Διάγραμμα 2.5.7: Ωριαία διακύμανση της σχετικής υγρασίας για το μήνα Αύγουστο



Διάγραμμα 2.5.8: Ωριαία διακύμανση της σχετικής υγρασίας για το μήνα Σεπτέμβριο (μέχρι τις 15/9)

Παρατηρούμε στα διαγράμματα, ότι η σχετική υγρασία μεταβάλλεται κατά πολύ κατά τη διάρκεια των θερμών μηνών στην περιοχή της Αθήνας. Με κριτήριο την χαμηλότερη δυνατή ύπαρξη υγρασίας στην ατμόσφαιρα, οι ιδανικότεροι μήνες για τη λειτουργία του ακτινοβολητή είναι ο Ιούνιος, ο Ιούλιος και το πρώτο εικοσαήμερο του Αυγούστου. Κατά την περίοδο αυτή, οι μέσες τιμές της σχετικής υγρασίας ελάχιστες φορές ξεπερνούν το 60%.

Βέβαια, στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι οι μετρήσεις προέρχονται από παράκτιο σταθμό. Τόσο η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ. – Ελληνικό, Αττικής), όσο και η ASHRAE (το πρόγραμμα EnergyPlus χρησιμοποιεί κλιματολογικά δεδομένα από τη βάση δεδομένων της, Climate Design Data, ASHRAE 2009 Handbook) εμφανίζουν στα δεδομένα τους ως ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας, τα δεκαπέντε μέτρα (15 m). Αυτός είναι και ο λόγος που η σχετική υγρασία παίρνει τόσο υψηλές τιμές, που φτάνουν και το 80%. Αντιθέτως, οι γνωστές εμπειρικές σχέσεις του Τομέα Θερμότητας του Ε.Μ.Π. για την σχετική υγρασία:

$$\varphi_o(H) = m + \sum c_i \cos[i360/24(H-0,5)] + \sum s_i \sin[i360/24(H-0,5)] \quad [11]$$

δίνουν μια πιο γενική εικόνα για την περιοχή της Αθήνας.

Επιστρέφοντας λοιπόν στα διαγράμματα της σχετικής υγρασίας, παρατηρούμε ότι οι μέσες τιμές της δεν ξεπερνούν το 60%. Η τιμή αυτή επιτρέπει σε έναν ακτινοβολητή να έχει αρκετά καλή απόδοση. Επιπλέον, εκτιμάται ότι δεν χρειάζεται και η ύπαρξη επιστρώσης πολυαιθυλενίου, που χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις με υψηλή υγρασία.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα που προέκυψαν για την κατοικία, μπορούμε να υπολογίσουμε την ενεργειακή απόδοση του ακτινοβολητή και εν συνεχεία να εκτιμήσουμε την συνεισφορά που θα είχε στην ψύξη του κτιρίου. Βέβαια, υπενθυμίζουμε ότι μία τέτοια εφαρμογή δεν θα μπορούσε να αντικαταστήσει πλήρως μία σύγχρονη κλιματιστική μονάδα. Πιο ρεαλιστικός στόχος θα ήταν η εξοικονόμηση ενέργειας, που επιτυγχάνεται μειώνοντας τις ώρες λειτουργίας του κλιματισμού.

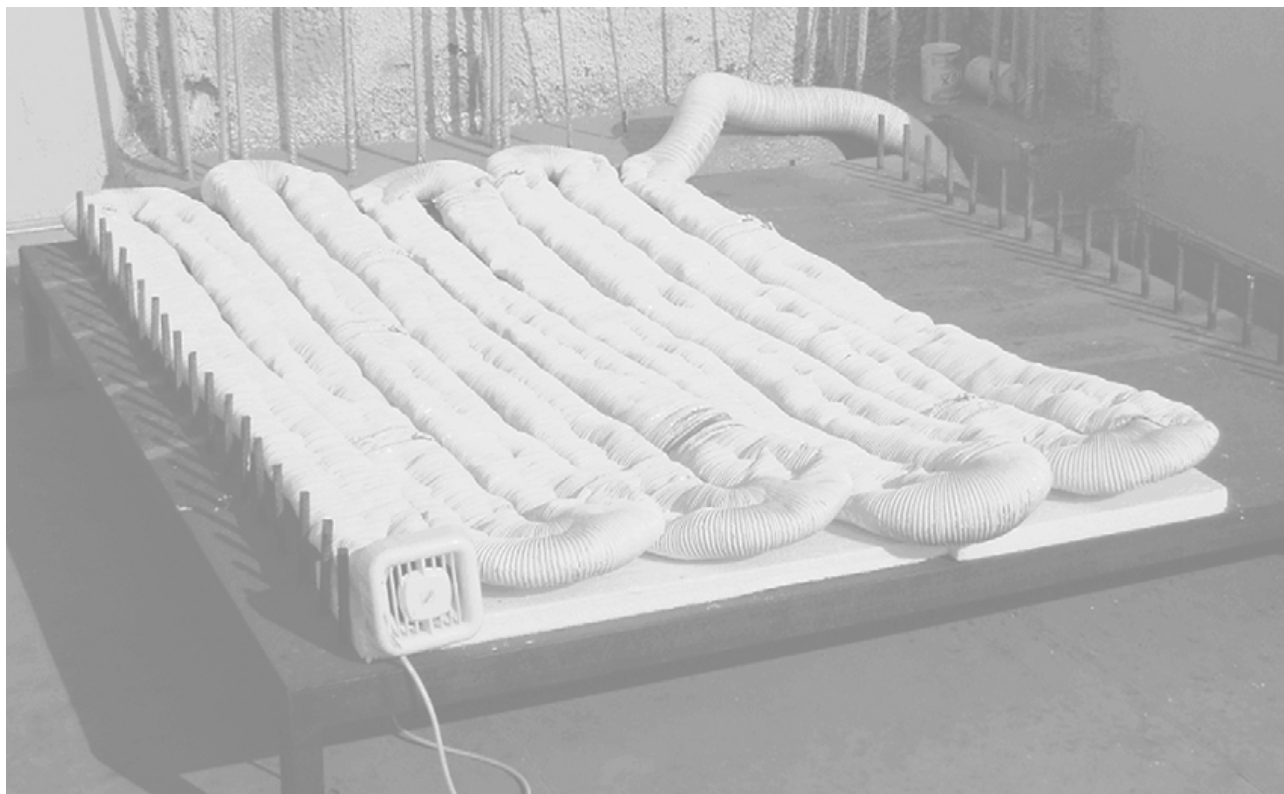
Στο σημείο αυτό θα υπενθυμίσουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ακτινοβολητή και στη συνέχεια θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα, σε μορφή διαγραμμάτων, που προέκυψαν από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου του ακτινοβολητή.

Ο ακτινοβολητής είναι ένα μεταλλικό πάνελ και αποτελείται από έναν μακρύ και ειδικά διαμορφωμένο αγωγό αλουμινίου, μέσω του οποίου κυκλοφορεί το ψυκτικό μέσο, δηλαδή αέρας. Ο μακρύς αλουμινένιος αγωγός συναρμολογείται από δέκα μικρότερους, μήκους 3m ο καθένας, κυλινδρικούς αγωγούς αλουμινίου, με διάμετρο 10 cm και πάχος 2mm και ενώνεται με μεταλλικά δαχτυλίδια. Έπειτα, ο σχηματισμός αυτός βάφεται με κατάλληλη βαφή αφετικής ικανότητας 0,93 . Μόλις στεγνώσει η μπογιά, ο αγωγός διπλώνεται οχτώ φορές. Κάθε «δίπλα» έχει μήκος 2m, ώστε τελικά δημιουργείται το αλουμινένιο πάνελ με 2m μήκος και 1m πλάτος, αποτελούμενο από παράλληλους αγωγούς.



Σχήμα 2.5.1: Η αρχική μορφή του μεταλλικού αγωγού μόλις διπλώθηκε στην ειδικά διαμορφωμένη βάση του.

Μετά, ο διπλωμένος αγωγός πιέζεται και από τις δύο του πλευρές, προκειμένου να αποκτήσει επίπεδο σχήμα με πάχος 1 cm στις επίπεδες πλευρές του.



Σχήμα 2.5.2: Μετά την συμπίεση του αγωγού, προέκυψε το επιθυμητό επίπεδο σχήμα του ακτινοβολητή.

Για την αποφυγή ανεπιθύμητης επιστροφής θερμότητας από το κτίριο προς τον ακτινοβολητή, ο τελευταίος τοποθετείται πάνω σε υπερυψωμένη μεταλλική βάση και σε ένα επίπεδο μόνωσης πάχους 3 cm. Επιπλέον, για την καλύτερη στεγάνωση του αγωγού, οι ενώσεις των επιμέρους τμημάτων του καλύπτονται και με ειδική μονωτική ταινία.

Η μία άκρη του αγωγού φέρει μικρό ανεμιστήρα, για την οδήγηση του αέρα μέσα στον αγωγό. Ο ανεμιστήρας συνδέεται με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ενός χρονικού εκκινητή (time starter) προκειμένου να λειτουργεί μόνο τις νυκτερινές ώρες (22:00 με 06:00). Η ισχύς ενός τέτοιου ανεμιστήρα δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα 500 Watt, αν και η επιλογή του εξαρτάται άμεσα από την εκάστοτε εφαρμογή και τις ανάγκες του κτιρίου. Η άλλη άκρη του αγωγού προσαρμόζεται καταλλήλως με κόλλα σιλικόνης σε ένα παράθυρο στο κτίριο. Άρα, πλέον τα ρεύματα αέρα, αλληλεπιδρούν με τον ψυχρότερο ακτινοβολητή και λόγω του ανεμιστήρα, αναγκάζονται σε κίνηση προς το εσωτερικό του κτιρίου, μεταφέροντας έτσι τα ψυκτικά φορτία.

Η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου έγινε για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ροής αέρα εντός του ακτινοβολητή. Αυτές είναι: $u_{f1} = 1,5 \text{ m/sec}$, $u_{f2} = 2 \text{ m/sec}$ και $u_{f3} = 2,5 \text{ m/sec}$. Για τις τρεις ταχύτητες προέκυψαν τρεις παροχές αέρα προς το εσωτερικό του κτιρίου:

$$F_1 = 1620 \text{ m}^3/\text{hr} \text{ ή } 0,45 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$F_2 = 2160 \text{ m}^3/\text{hr} \text{ ή } 0,6 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$F_3 = 2700 \text{ m}^3/\text{hr} \text{ ή } 0,75 \text{ m}^3/\text{sec}$$

Ενώ οι αριθμοί Reynolds για τις τρεις ροές αέρα είναι αντίστοιχα οι:

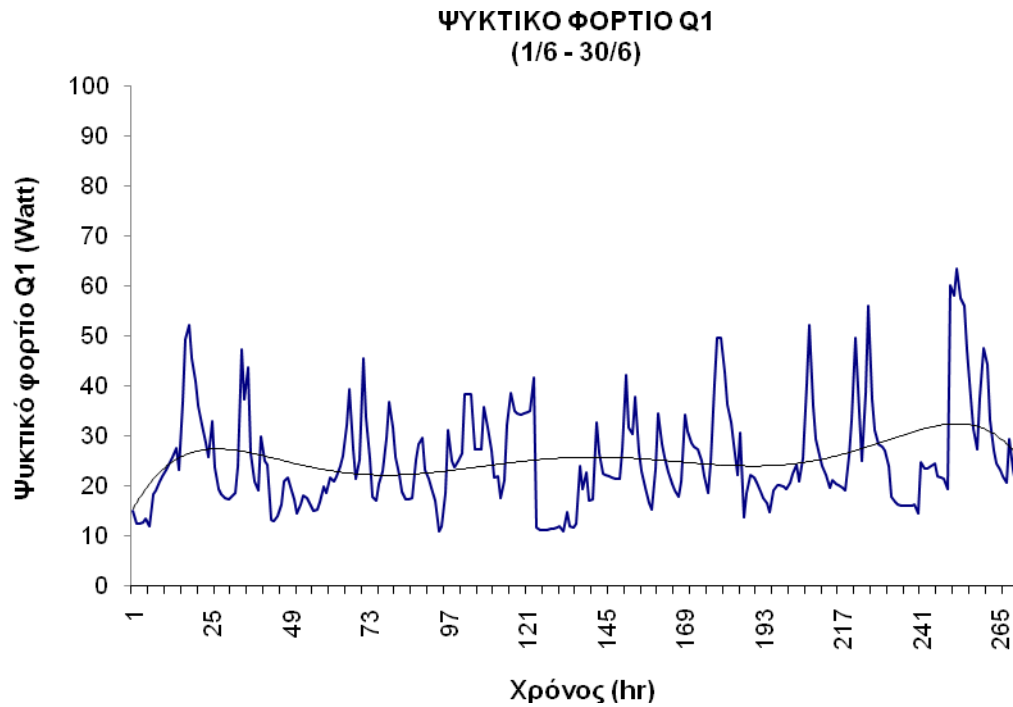
$$R_1 = 6230$$

$$R_2 = 8310$$

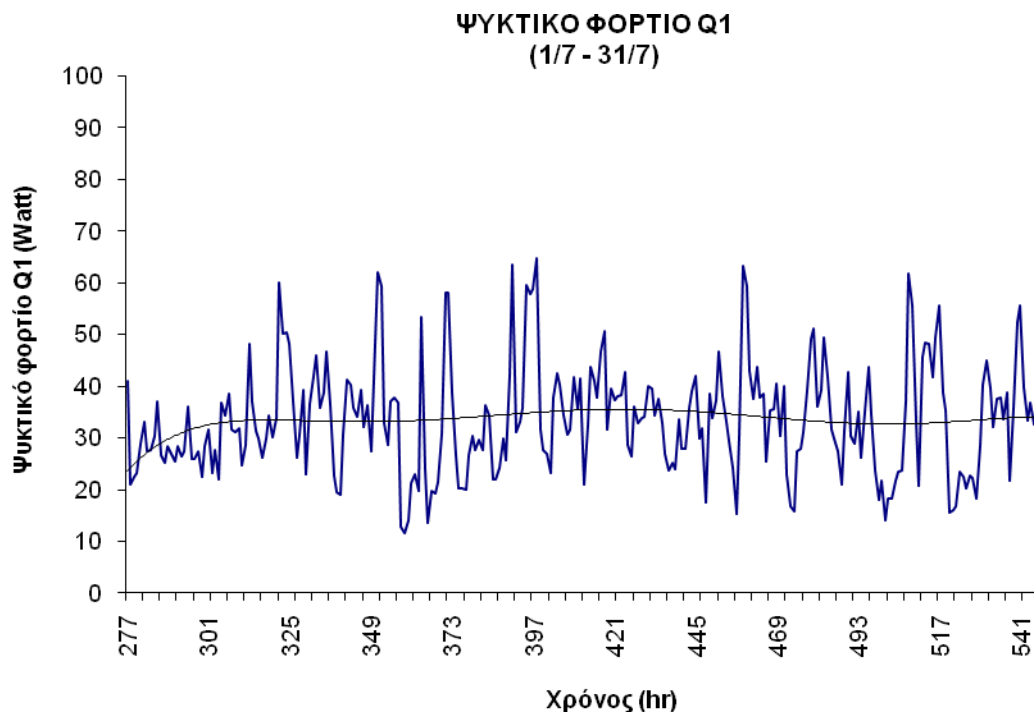
$$R_3 = 10380$$

Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι οι υπολογισμοί έγιναν με την υπόθεση ότι ο αέρας διατηρεί σταθερές τις γνωστές του ιδιότητες κατά τη ροή εντός του αγωγού. Επίσης, οι απώλειες πίεσης και η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα λόγω τριβών από την τυρβώδη ροή εντός του ακτινοβολητή (R_1 , R_2 , $R_3 > 4000$) θεωρούνται αμελητέες. Επιπλέον, για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται η τιμή του δείκτη νεφώσεων (η) που ισχύει για την τελευταία ώρα της κάθε ημέρας. Αυτό έγινε, γιατί κατά τη διάρκεια της νύκτας δεν μπορούν να καταγραφούν τα επίπεδα νεφώσεων. Άρα, θεωρήθηκε ότι η κάθε νύκτα είχε το ίδιο επίπεδο νεφώσεων με την τελευταία ώρα πριν δύσει ο ήλιος.

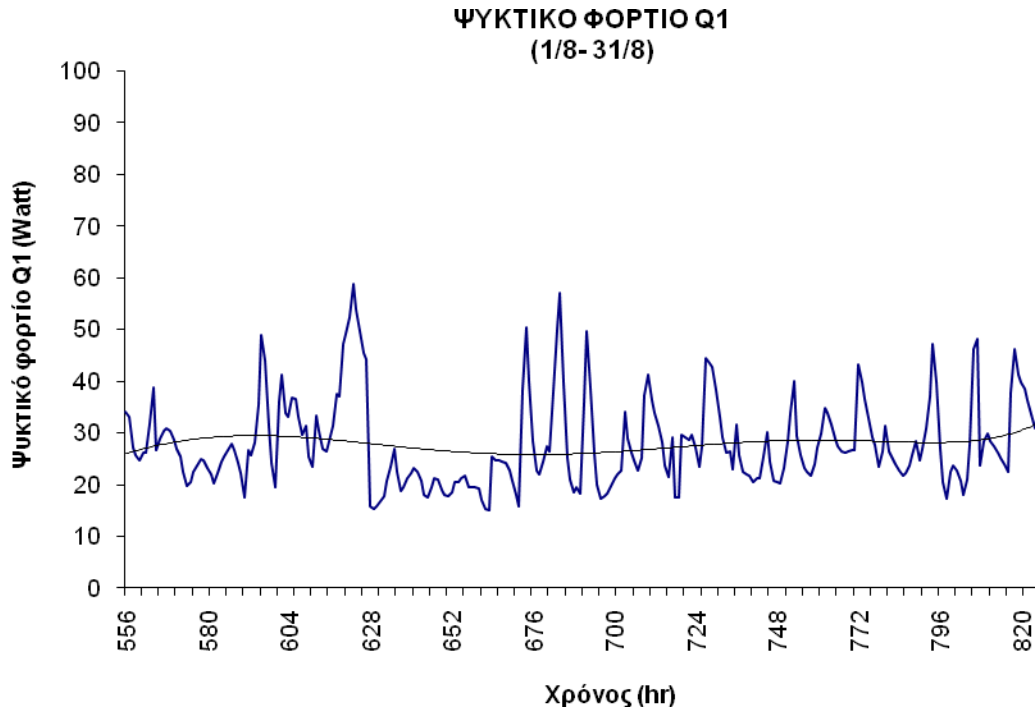
Τελικά, για τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες αέρα προέκυψαν τρεις διαφορετικές τιμές ψυκτικού φορτίου Q (Watt) που παρήχθη από τον ακτινοβολητή και στάλθηκε προς τη θερμική ζώνη του υπό εξέταση κτιρίου. Σε αντιστοιχία με τις τρεις ταχύτητες, τα ψυκτικά φορτία είναι τα: Q_1 , Q_2 και Q_3 . Η διακύμανση των τριών μεγεθών συναρτήσει των συνεχόμενων ωρών λειτουργίας (νυκτερινών) του ακτινοβολητή, φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν:



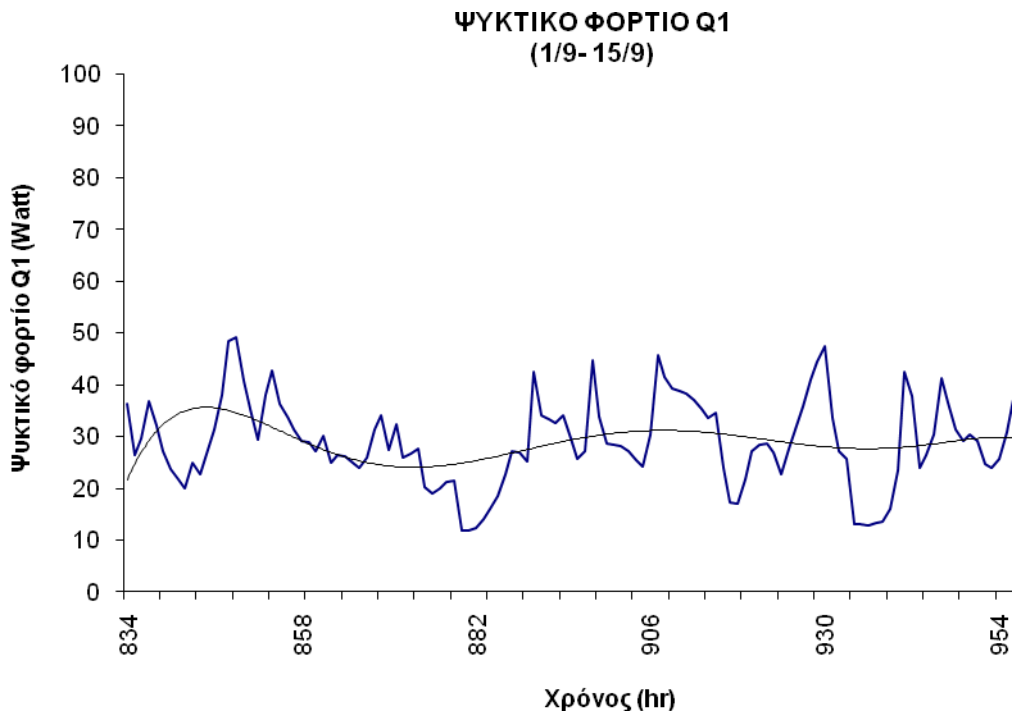
Διάγραμμα 2.5.9: Ωριαία διακύμανση του ψυκτικού φορτίου Q₁ για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Ιούνιο.



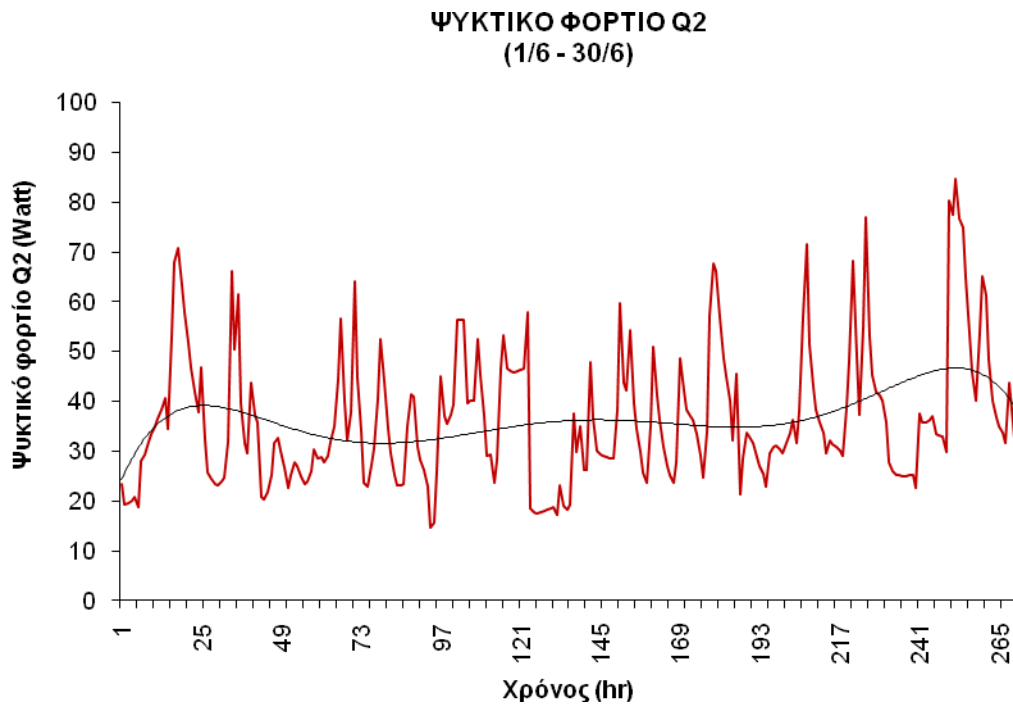
Διάγραμμα 2.5.10: Ωριαία διακύμανση του ψυκτικού φορτίου Q₁ για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Ιούλιο.



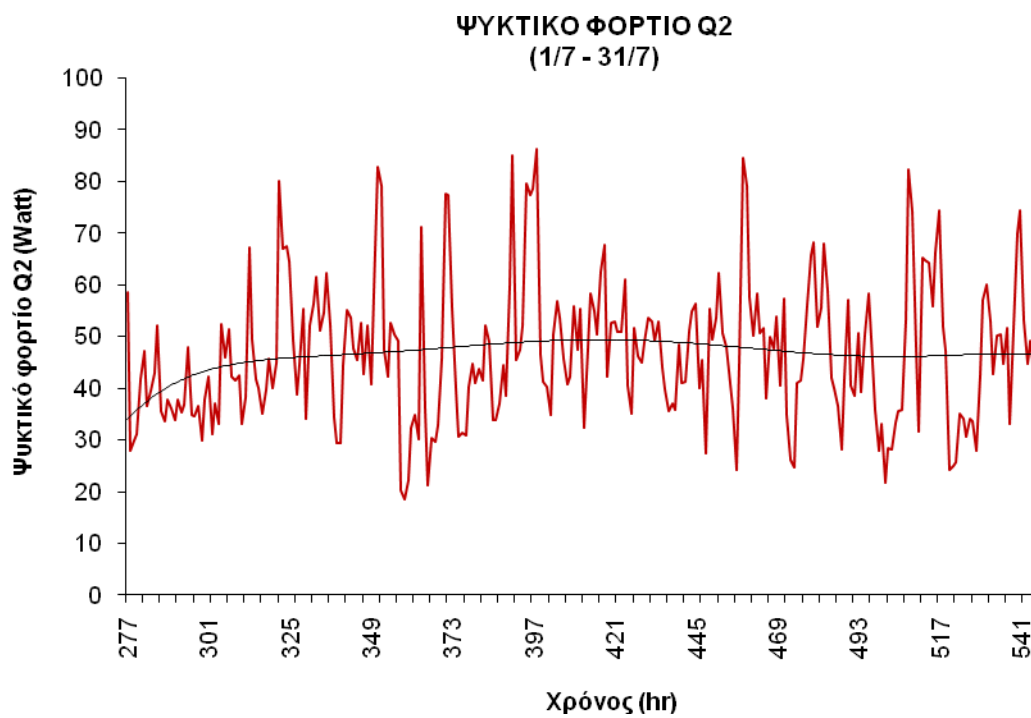
Διάγραμμα 2.5.11: Ωριαία διακύμανση του ψυκτικού φορτίου Q_1 για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Αύγουστο.



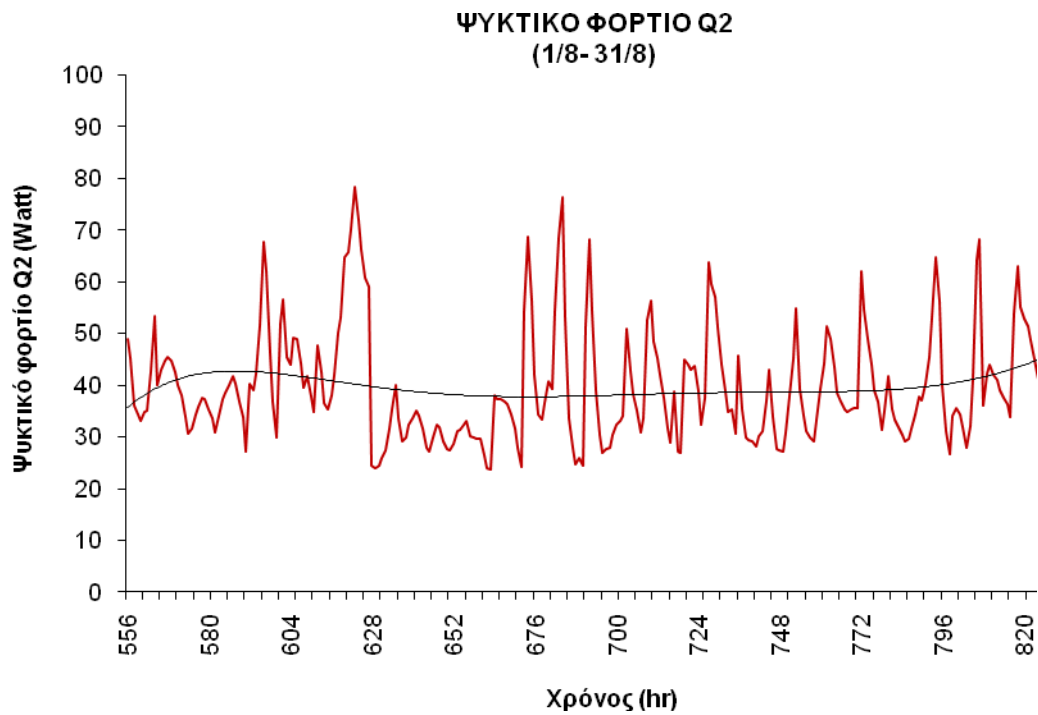
Διάγραμμα 2.5.12: Ωριαία διακύμανση του ψυκτικού φορτίου Q_1 για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Σεπτέμβριο (ως τις 15/9).



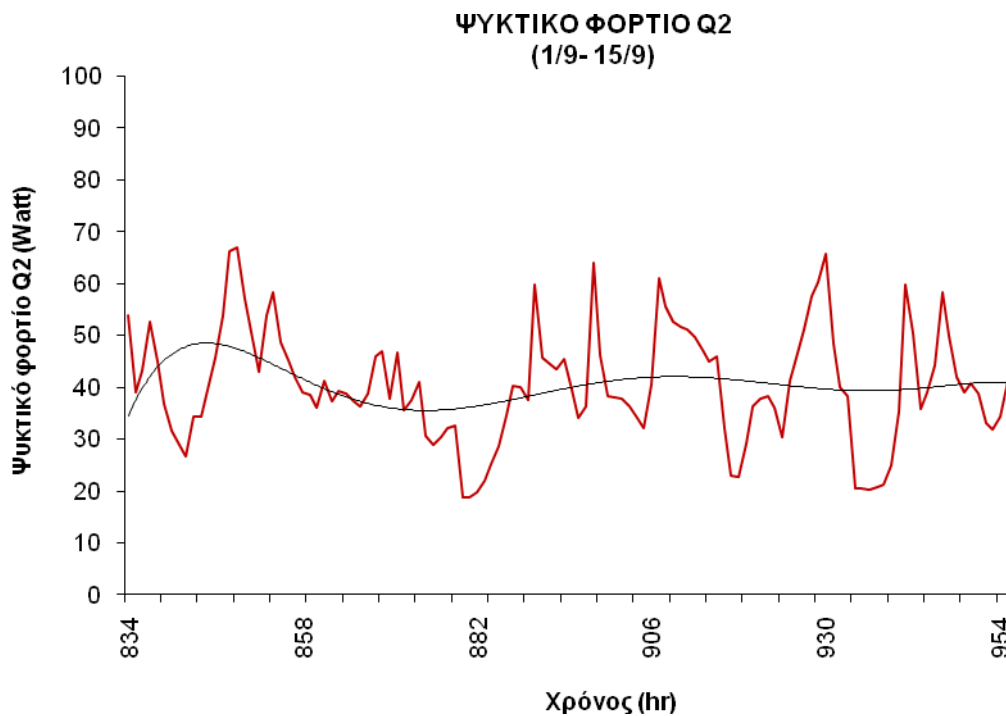
Διάγραμμα 2.5.13: Ωριαία διακύμανση του ψυκτικού φορτίου Q₂ για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Ιούνιο.



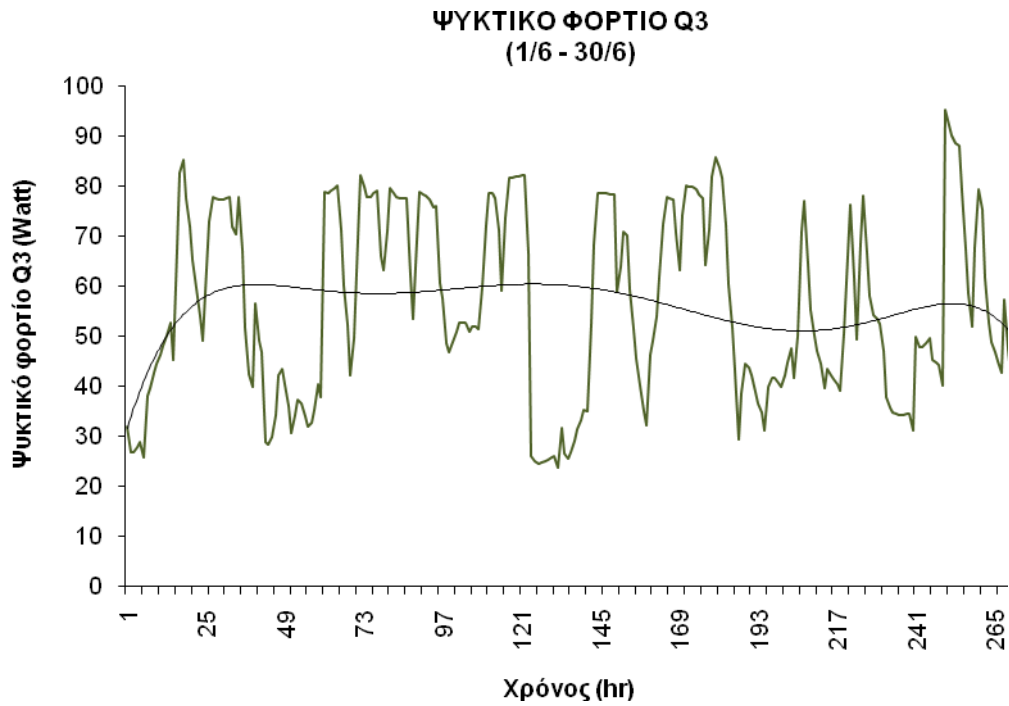
Διάγραμμα 2.5.14: Ωριαία διακύμανση του ψυκτικού φορτίου Q₂ για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Ιούλιο.



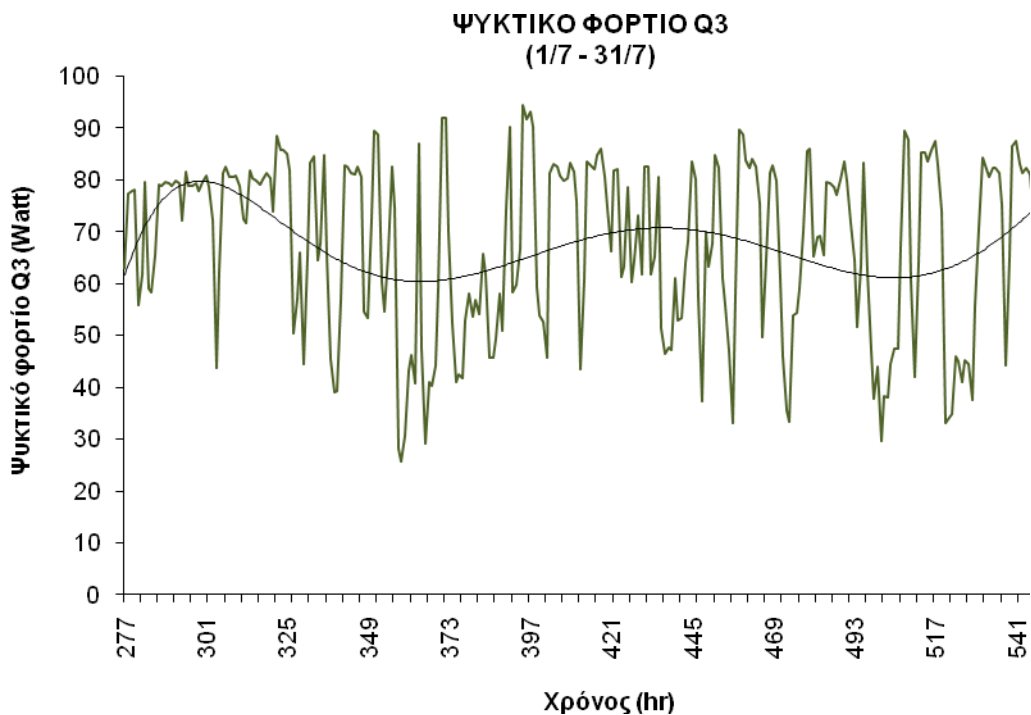
Διάγραμμα 2.5.15: Ωριαία διακύμανση του ψυκτικού φορτίου Q₂ για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Αύγουστο



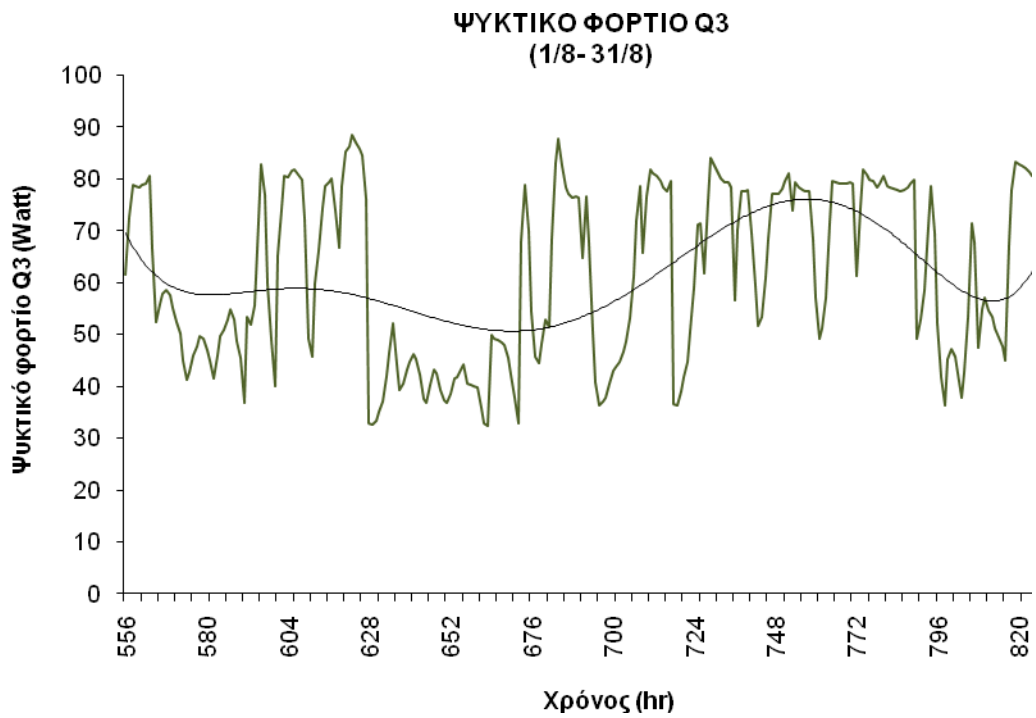
Διάγραμμα 2.5.16: Ωριαία διακύμανση του ψυκτικού φορτίου Q₂ για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Σεπτέμβριο (ως τις 15/9)



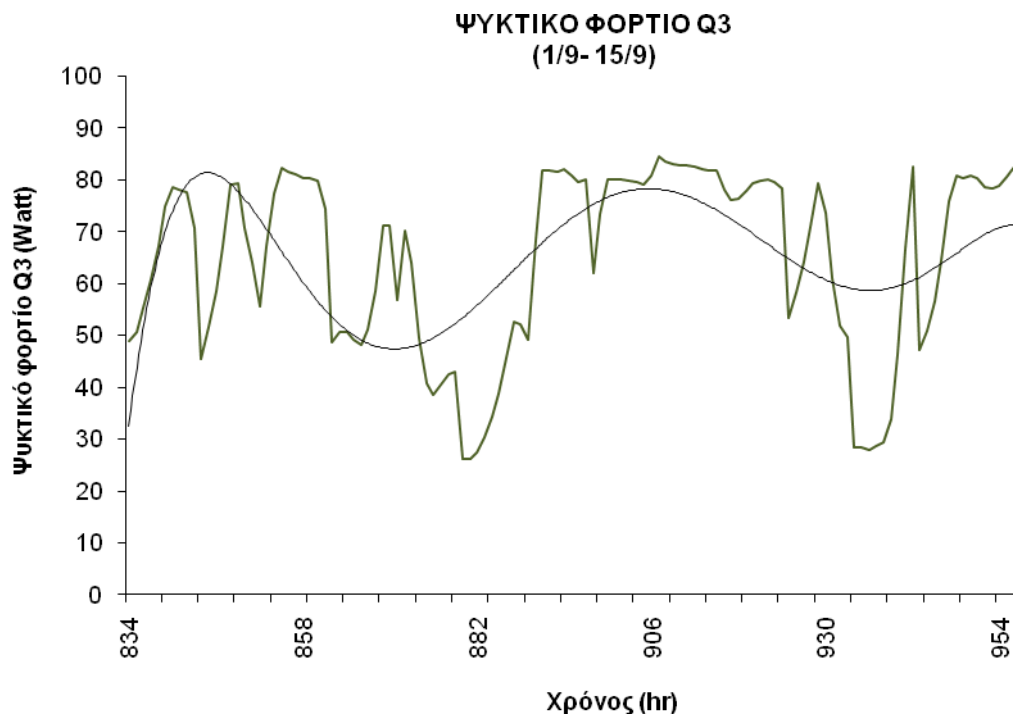
Διάγραμμα 2.5.17: Ωριαία διακύμανση του ψυκτικού φορτίου Q₃ για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Ιούνιο



Διάγραμμα 2.5.18: Ωριαία διακύμανση του ψυκτικού φορτίου Q₃ για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Ιούλιο



Διάγραμμα 2.5.19: Ωριαία διακύμανση του ψυκτικού φορτίου Q₃ για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Αύγουστο



Διάγραμμα 2.5.20: Ωριαία διακύμανση του ψυκτικού φορτίου Q₃ για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Σεπτέμβριο (ως τις 15/9)

Απο τα διαγράμματα των ψυκτικών φορτίων Q_{1-3} , προκύπτει ένα άμεσο συμπέρασμα για τη λειτουργία του ακτινοβολητή. Για τις ίδιες χρονικές περιόδους και άρα υπό τις ίδιες κλιματολογικές συνθήκες, παρατηρούμε ότι ισχύει:

$$Q_3 > Q_2 > Q_1$$

Ενώ η αρχική υπόθεση ήταν:

$$U_{f3} > U_{f2} > U_{f1}$$

Δηλαδή, όσο αυξάνεται η ταχύτητα ροής του αέρα εντός του ακτινοβολητή, αυξάνεται και το ψυκτικό φορτίο που εισέρχεται στο κτίριο. Τα τρία διαγράμματα παρουσιάζουν τις ίδιες ακριβώς διακυμάνσεις, αλλά διαφέρουν οι τιμές στα μέγιστα σημεία, που όπως προείπαμε αυξάνονται όσο αυξάνει η ταχύτητα της ροής. Με δεδομένες τις κλιματολογικές συνθήκες (ταχύτητα ανέμου, σχετική υγρασία, νεφώσεις και θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα) για τις τρεις περιπτώσεις, καθορίζονται οι δύο από τους τρεις συντελεστές μετάδοσης θερμότητας (h_c και h_{rad}). Ο πρώτος συντελεστής έχει να κάνει με τη μετάδοση θερμότητας μεταξύ των εξωτερικών ρευμάτων αέρα και του ακτινοβολητή και ο δεύτερος αφορά την αλληλεπίδραση του ακτινοβολητή με τον ουρανό. Έτσι, μένει ο τρίτος συντελεστής h που αφορά τη μετάδοση θερμότητας από τον ακτινοβολητή προς το ψυκτικό μέσο (αέρας εδώ). Ο τελευταίος συντελεστής αυξάνει όσο αυξάνεται και η ταχύτητα της ροής του ψυκτικού μέσου, δεδομένης και της υδραυλικής διαμέτρου που είναι σταθερή, αφού δεν αλλάζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ακτινοβολητή. Άρα, τελικά, σωστά ισχύουν οι παραπάνω ανισότητες και τα αποτελέσματα κρίνονται λογικά. Βέβαια, αυξάνοντας την ταχύτητα του αέρα εσωτερικά του ακτινοβολητή, οδηγεί σε μείωση της πτώσης της θερμοκρασίας του αέρα. Αυτό γίνεται γιατί ο αέρας κινούμενος με μεγάλη ταχύτητα δεν προλαβαίνει να αλληλεπιδράσει αρκετά με τον ψυχρό ακτινοβολητή. Έτσι, δεν μπορεί να αποβάλλει μεγάλο ποσό θερμότητας και να ψυχθεί αρκετά. Όμως, λόγω της μεγάλης παροχής προς το κτίριο μεγαλύτερη ποσότητα αέρα εισέρχεται στη θερμική ζώνη που βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία εκείνη την ώρα. Έτσι, μεταβιβάζεται ψυχρός αέρας σε μεγάλες ποσότητες και τελικά, η θερμική ζώνη «αισθάνεται» μεγαλύτερο ψυκτικό φορτίο.

Αντιθέτως, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, τόσο αυξάνεται και η πρόσδοση θερμότητας από τον θερμότερο αέρα στον ψυχρότερο ακτινοβολητή. Τελικά, η ψύξη δια ακτινοβολίας θα μετριάζεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Για αυτό το λόγο δίνονται παρακάτω τα διαγράμματα της ταχύτητας του ανέμου για τις ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή ανά μήνα



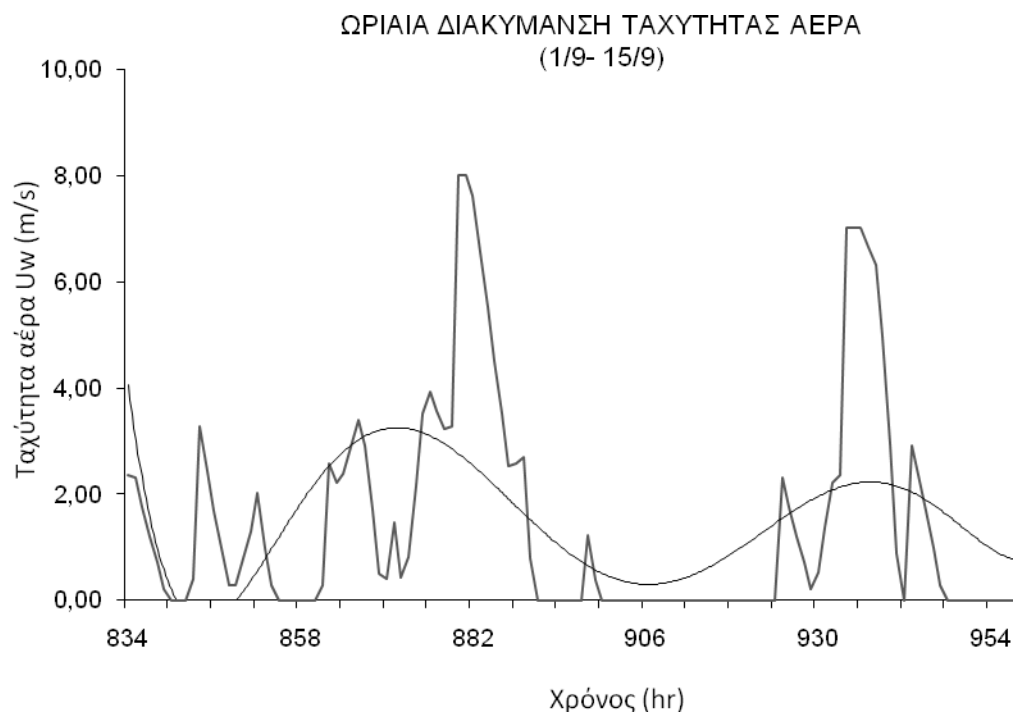
Διάγραμμα 2.5.21: Ωριαία διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου u_w για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Ιούνιο.



Διάγραμμα 2.5.22: Ωριαία διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου u_w για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Ιούλιο.

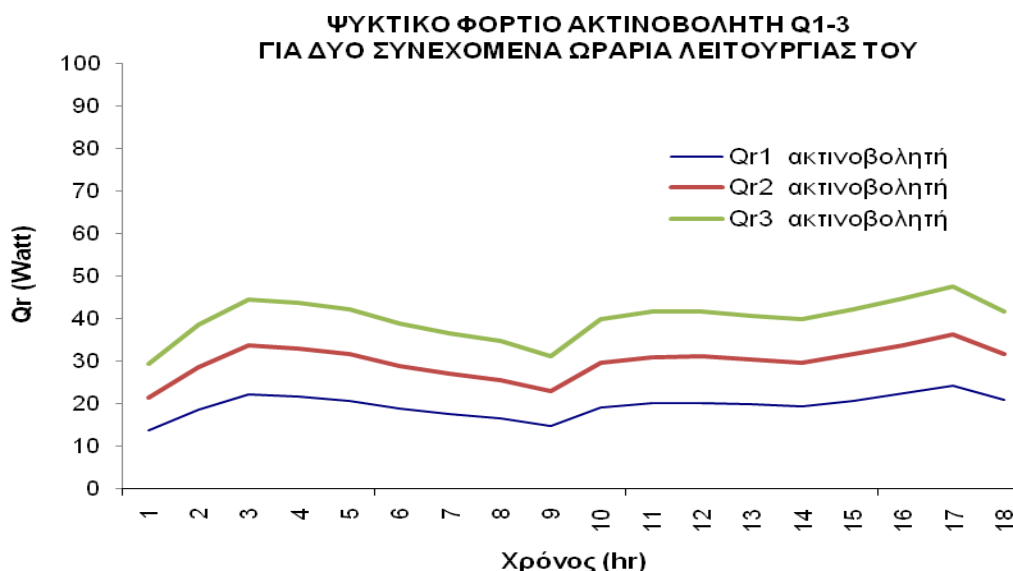


Διάγραμμα 2.5.23: Ωριαία διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου u_w για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Αύγουστο



Διάγραμμα 2.5.24: Ωριαία διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου u_w για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Σεπτέμβριο (ως τις 15/9).

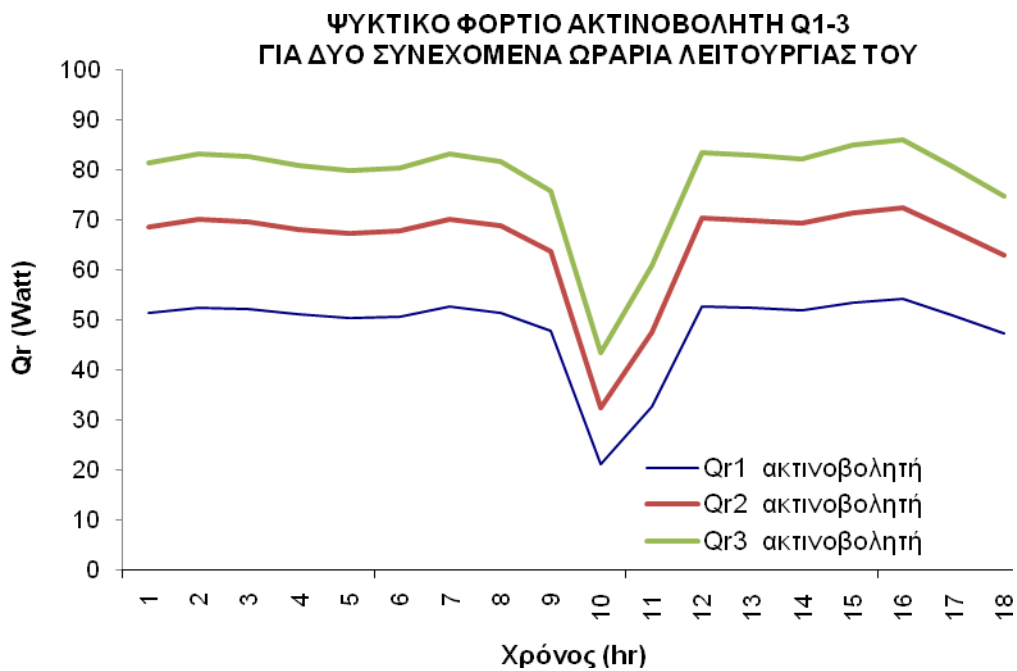
Παρατηρούμε από τα διαγράμματα της ταχύτητας του ανέμου, την επαλήθευση του θεωρητικού μέρους της εργασίας. Τα τοπικά μέγιστα της καμπύλης της ταχύτητας του ανέμου, ταυτίζονται με τα τοπικά ελάχιστα των καμπυλών των ψυκτικών φορτίων. Αντίστροφα, όπου ελαχιστοποιείται η ταχύτητα του ανέμου, ταυτόχρονα μεγιστοποιείται το ψυκτικό φορτίο από τον ακτινοβολητή προς το κτίριο. Έτσι, γίνεται εύκολα αντιληπτή η σημαντική επίδραση των ταχυτήτων, τόσο του εξωτερικού αέρα όσο και του αέρα που ρέει εντός του ακτινοβολητή, στην αποδοτικότητα του ακτινοβολητή. Παρακάτω δίνονται διαγράμματα για τυχαίες συνεχόμενες μέρες λειτουργίας του ακτινοβολητή για όλους τους μήνες καθώς και η διακύμανση της έντασης του ανέμου για τα ίδια ωράρια λειτουργίας του ακτινοβολητή:



Διάγραμμα 2.5.25: Ωριαία διακύμανση των ψυκτικών φορτίων Q_{1-3} από τον ακτινοβολητή και προς την κατοικία για τυχαίες 18 συνεχόμενες ώρες λειτουργίας του κατά το μήνα Ιούνιο.



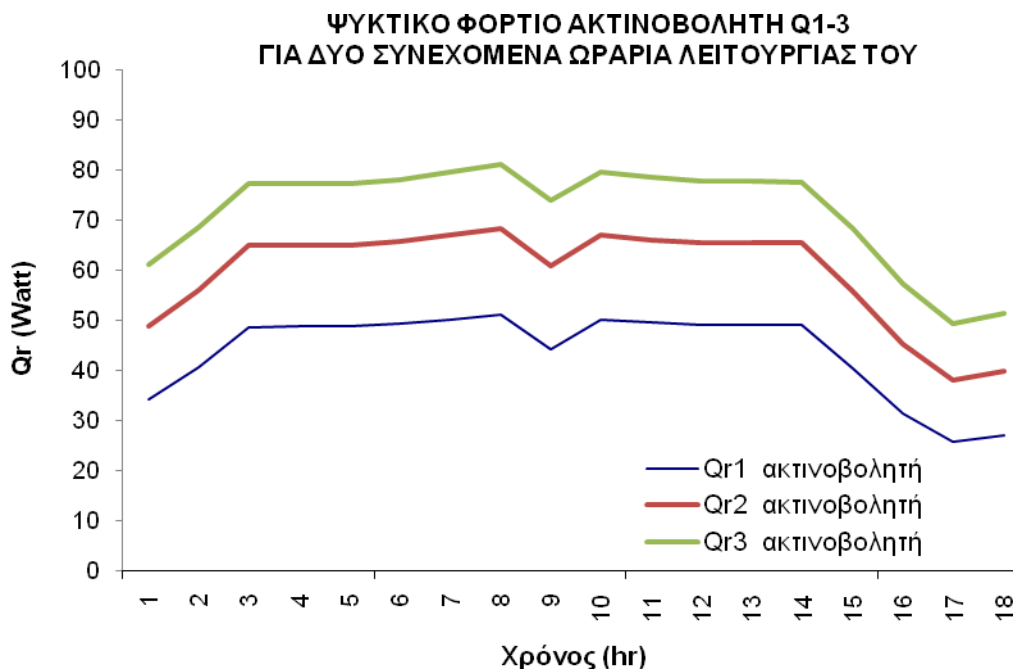
Διάγραμμα 2.5.26: Ωριαία διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου για τις ίδιες τυχαίες 18 συνεχόμενες ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή κατά το μήνα Ιούνιο.



Διάγραμμα 2.5.27: Ωριαία διακύμανση των ψυκτικών φορτίων Q_{1-3} από τον ακτινοβολητή και προς την κατοικία για τυχαίες 18 συνεχόμενες ώρες λειτουργίας του κατά το μήνα Ιούλιο.



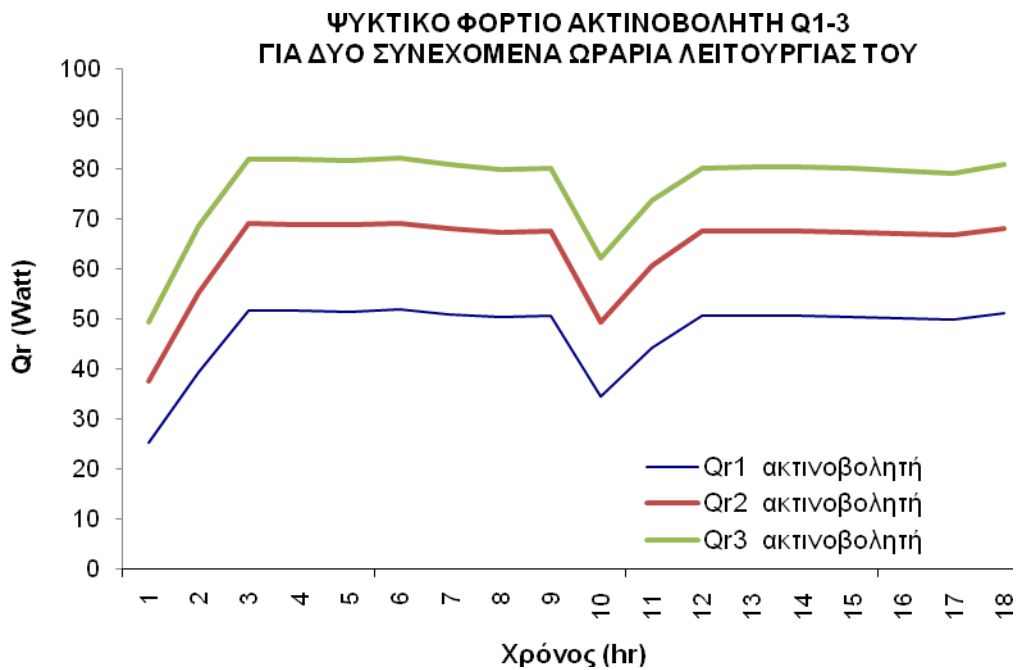
Διάγραμμα 2.5.28: Ωριαία διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου για τις ίδιες τυχαίες 18 συνεχόμενες ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή κατά το μήνα Ιούλιο.



Διάγραμμα 2.5.29: Ωριαία διακύμανση των ψυκτικών φορτίων Q_{1-3} από τον ακτινοβολητή και προς την κατοικία για τυχαίες 18 συνεχόμενες ώρες λειτουργίας του κατά το μήνα Αύγουστο.



Διάγραμμα 2.5.30: Ωριαία διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου για τις ίδιες τυχαίες 18 συνεχόμενες ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή κατά το μήνα Αύγουστο.

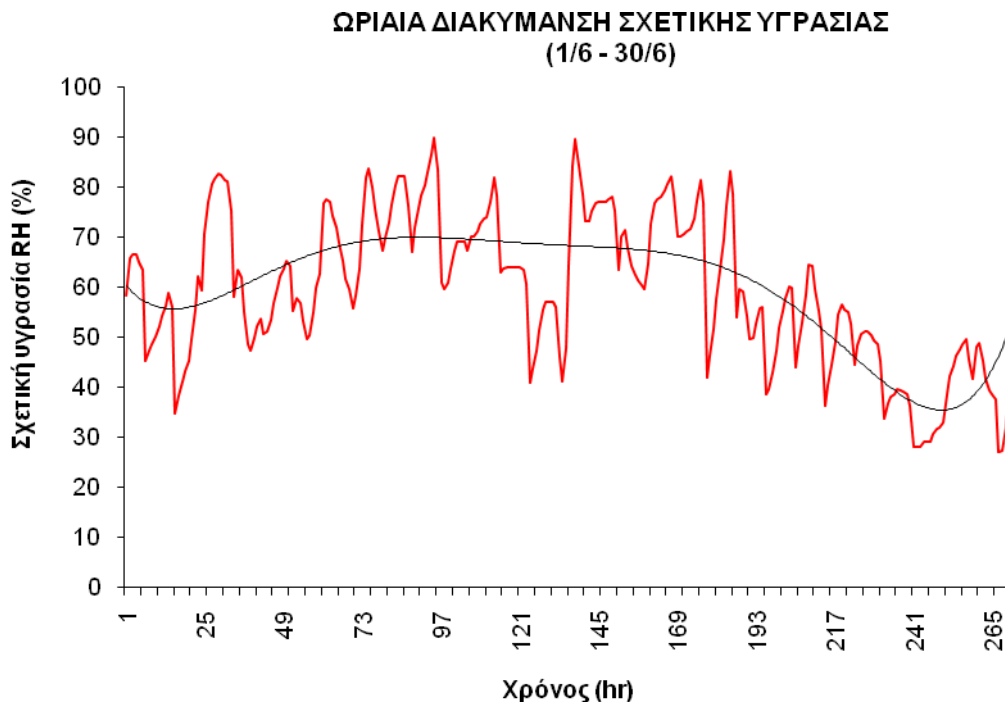


Διάγραμμα 2.5.31: Ωριαία διακύμανση των ψυκτικών φορτίων Q_{1-3} από τον ακτινοβολητή και προς την κατοικία για τυχαίες 18 συνεχόμενες ώρες λειτουργίας του κατά το μήνα Σεπτέμβριο.

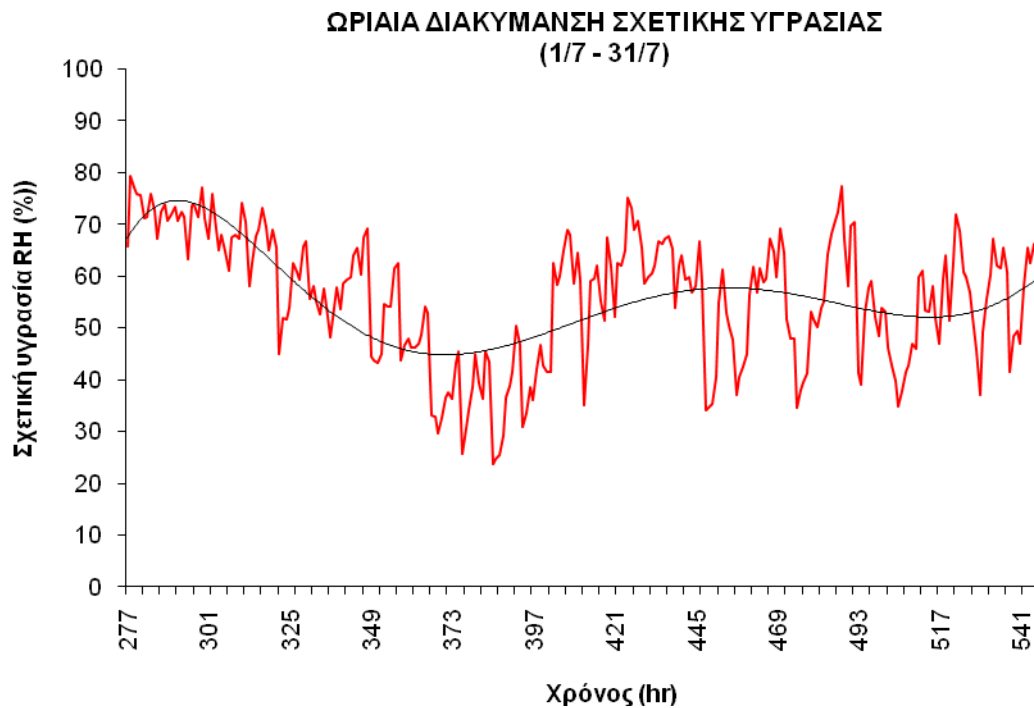


Διάγραμμα 2.5.32: Ωριαία διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου για τις ίδιες τυχαιές 18 συνεχόμενες ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή κατά το μήνα Σεπτέμβριο.

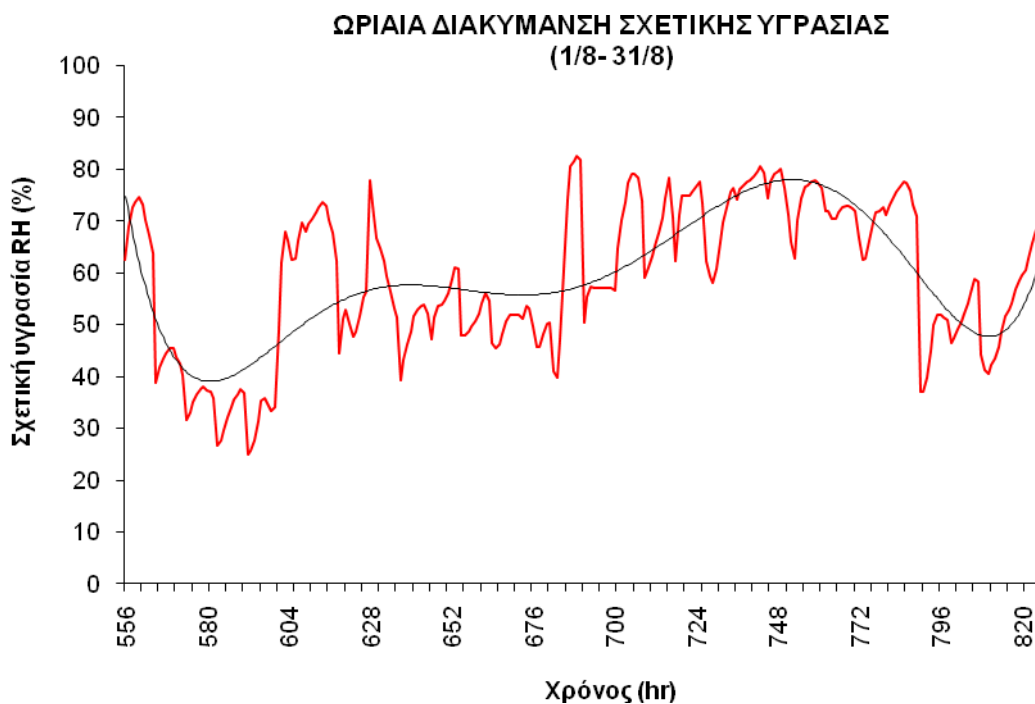
Αντίθετα, το επίπεδο της σχετικής υγρασίας φαίνεται να έχει πιο σταθερή επίδραση στον ακτινοβολητή, εν συγκρίσει με τη δυναμική επίδραση της ταχύτητας του αέρα εντός και εκτός ακτινοβολητή:



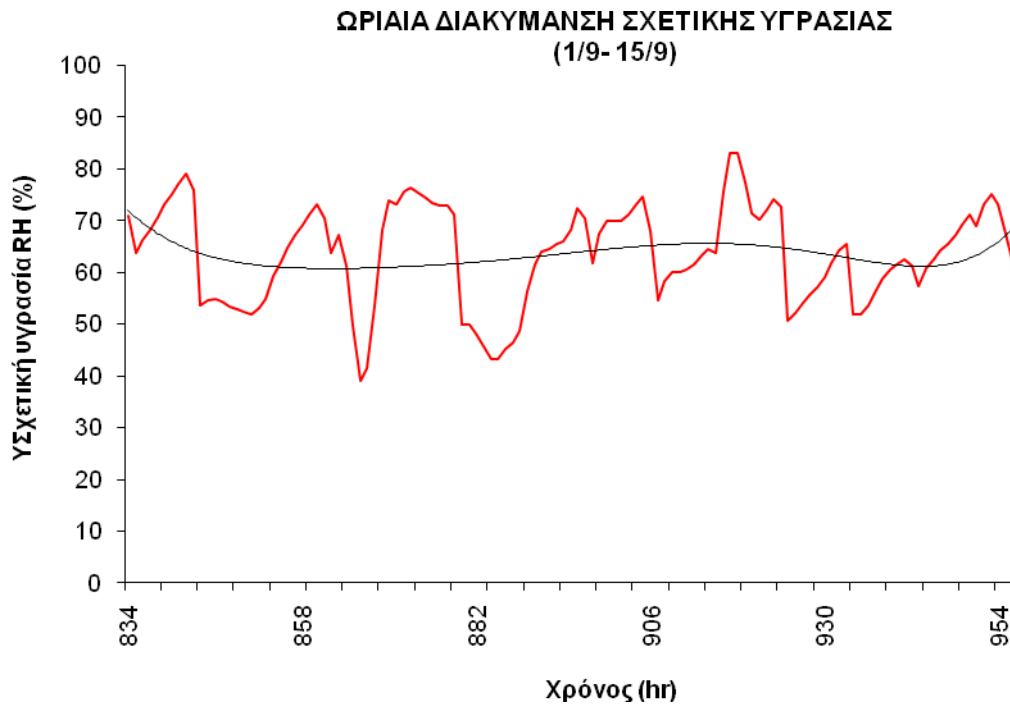
Διάγραμμα 2.5.33: Ωριαία διακύμανση της σχετικής υγρασίας RH(%) για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Ιούνιο.



Διάγραμμα 2.5.34: Ωριαία διακύμανση της σχετικής υγρασίας RH(%) για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Ιούλιο.



Διάγραμμα 2.5.35: Ωριαία διακύμανση της σχετικής υγρασίας RH(%) για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Αύγουστο

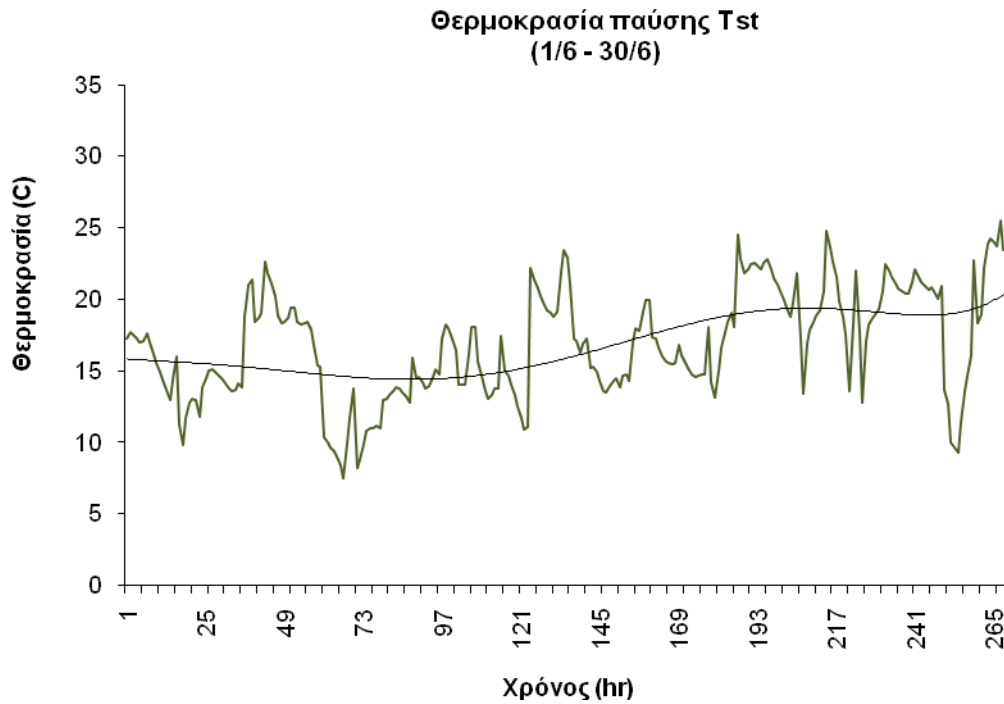


Διάγραμμα 2.5.36: Ωριαία διακύμανση της σχετικής υγρασίας RH(%) για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Σεπτέμβριο (ως τις 15/9).

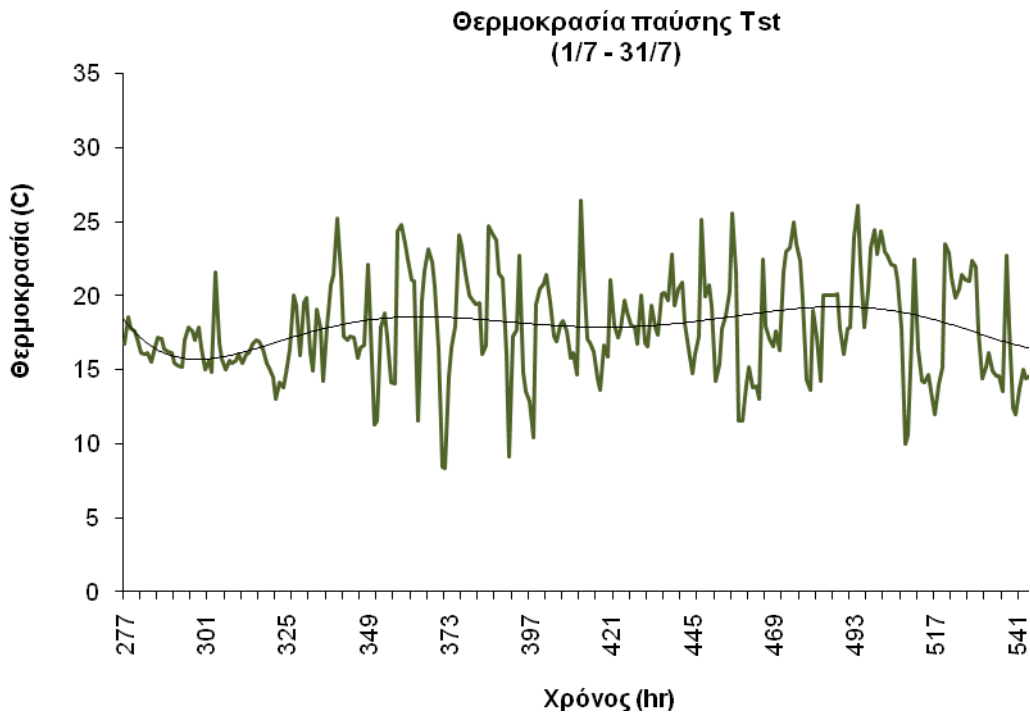
Από το «προφίλ» της σχετικής υγρασίας για τις ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή παρατηρούμε ότι οι αυξημένες τιμές της, οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές για το ψυκτικό φορτίο που παράγεται. Βέβαια, το γεγονός ότι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας δια ακτινοβολίας h_{rad} είναι υποπολλαπλάσιος των συντελεστών συναγωγής με τον αέρα, δεν επιτρέπουν στη σχετική υγρασία να μεταβάλλει τόσο απότομα τη διακύμανση του ψυκτικού φορτίου, όπως παρατηρήθηκε για τις μεταβολές του αέρα. Επιπλέον, η διακύμανση του ψυκτικού φορτίου έπεται ελαφρά των μεταβολών της σχετικής υγρασίας.

Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος που αφορά την λειτουργία του ακτινοβολητή και επηρεάζεται άμεσα από τα κλιματολογικά δεδομένα, είναι η θερμοκρασία παύσης-αποτελμάτωσης γνωστή στην ξένη βιβλιογραφία ως «Stagnation Temperature». Υπενθυμίζουμε από την θεωρία ότι είναι η θερμοκρασία στην οποία μπορεί να πέσει ένα σώμα χωρίς να αρχίσει να προστίθεται θερμότητα σε αυτό. Για την περίπτωση του ακτινοβολητή, η θερμοκρασία κατωφλίου είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία αποτελμάτωσης που μπορεί να φτάσει ο ακτινοβολητής, με τον περιορισμό να μην είναι 1°C κάτω από το σημείο δρόσου του περιβάλλοντα αέρα.

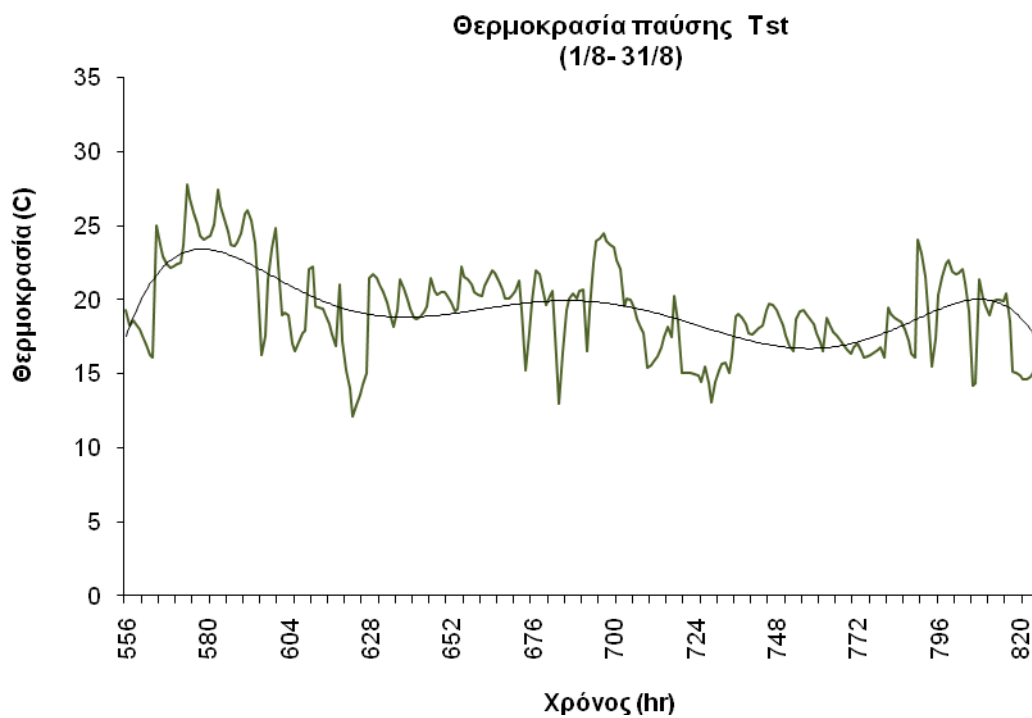
Η ωριαία διακύμανση της Θερμοκρασίας παύσης για την περίοδο που μελετάμε δίνεται στα παρακάτω διαγράμματα:



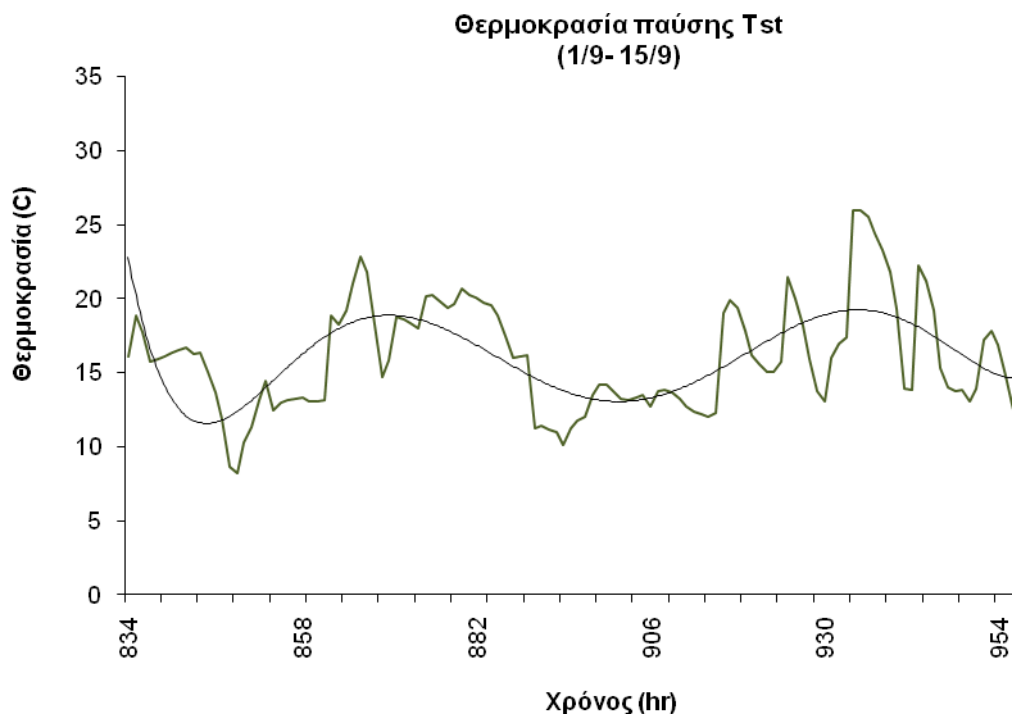
Διάγραμμα 2.5.37: Ωριαία διακύμανση της θερμοκρασίας παύσης Tst για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Ιούνιο.



Διάγραμμα 2.5.38: Ωριαία διακύμανση της θερμοκρασίας παύσης Tst για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Ιούλιο.



Διάγραμμα 2.5.39: Ωριαία διακύμανση της θερμοκρασίας παύσης Tst για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Αύγουστο.

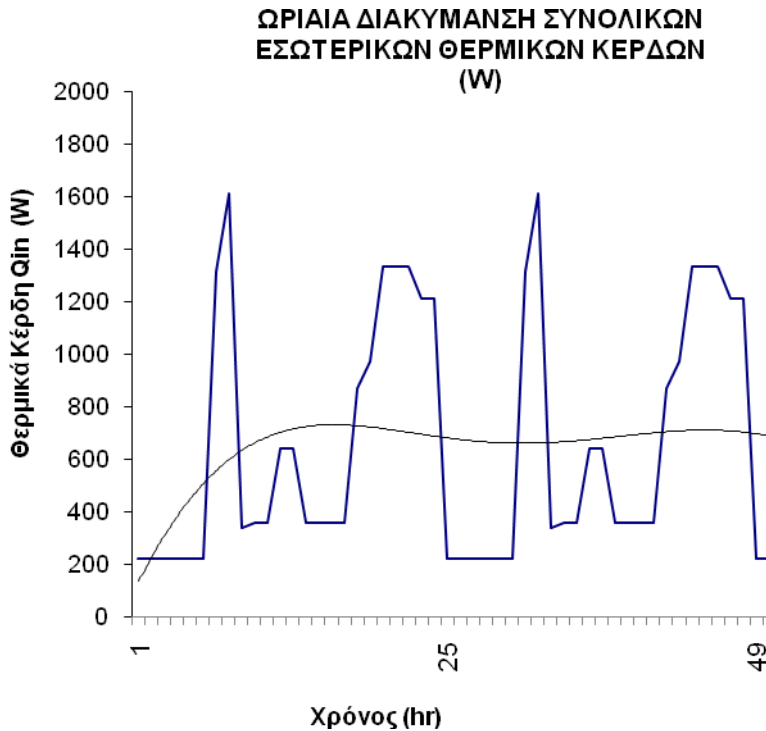


Διάγραμμα 2.5.40: Ωριαία διακύμανση της θερμοκρασίας παύσης Tst για τις συνεχείς ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή (νυκτερινές) κατά το μήνα Σεπτέμβριο (ως τις 15/9).

Παρατηρούμε ότι οι τιμές της θερμοκρασίας παύσης είναι ανάλογες της έντασης του ανέμου και αντιστρόφως ανάλογες της σχετικής υγρασίας για τις ίδιες ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του θερμότερου ανέμου, προσδίδεται περισσότερη θερμότητα στον ακτινοβολητή. Έτσι, αυξάνεται η θερμοκρασία του δεύτερου, αντί να μειώνεται συνεχώς. Συνεπώς αυξάνεται και η τιμή της θερμοκρασίας παύσης, δηλαδή της κατώτερης θερμοκρασίας που μπορεί να πέσει ο ακτινοβολητής, πριν αρχίσει να λαμβάνει θερμότητα από το περιβάλλον. Αντίστροφα, όσο αυξάνεται η σχετική υγρασία, επειδή αυξάνεται και η πίσω ατμοσφαιρική ακτινοβολία, περιορίζεται η απώλεια θερμότητας του ακτινοβολητή και άρα η πτώση της θερμοκρασίας του. Επιπλέον, η υψηλή σχετική υγρασία δείχνει ότι το σημείο δρόσου είναι πιο κοντά στην τρέχουσα θερμοκρασία του αέρα. Δεδομένου του περιορισμού για την θερμοκρασία αποτελμάτωσης να μην είναι 1°C κάτω από το σημείο δρόσου του περιβάλλοντα αέρα, η θερμοκρασία παύσης θα μεταβάλλεται αντιστοίχως. Βέβαια και σε αυτήν την περίπτωση, οι αυξομειώσεις της ταχύτητας επιδρούν εντονότερα στην θερμοκρασία παύσης συγκριτικά με την σχετική υγρασία. Αυτό συμβαίνει, γιατί, όπως είδαμε, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ ακτινοβολητή και ανέμου είναι πολλαπλάσιος αυτού της εκπομπής ακτινοβολίας από τον ακτινοβολητή. Άρα, οι μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου γίνονται περισσότερο «αισθητές» στην θερμοκρασία του ακτινοβολητή, παρά αυτών της σχετικής υγρασίας.

Έχοντας πλέον δεδομένη και την ενεργειακή απόδοση του ακτινοβολητή, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την εξοικονόμηση ενέργειας που πραγματοποιείται στο κτίριο. Με δεδομένα τα κλιματολογικά δεδομένα της καλοκαιρινής περιόδου που εξετάζουμε, μπορούμε με ασφάλεια να εισάγουμε το ψυκτικό φορτίο του ακτινοβολητή στην μονοκατοικία μας και να εξετάσουμε την επίδραση που θα έχει στην θερμοκρασία της θερμικής ζώνης. Εκτός όμως από τις συνθήκες άνεσης και την θερμοκρασία, θα κρίνουμε και το κατά πόσο μειώνεται η ανάγκη για ψύξη του κτιρίου, τόσο σε ενεργειακό, όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Για να το πετύχουμε αυτό πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε το ψυκτικό φορτίο που απαιτείται για την ψύξη της μονοκατοικίας και επίσης να υπολογίσουμε τα θερμικά κέρδη εντός αυτής.

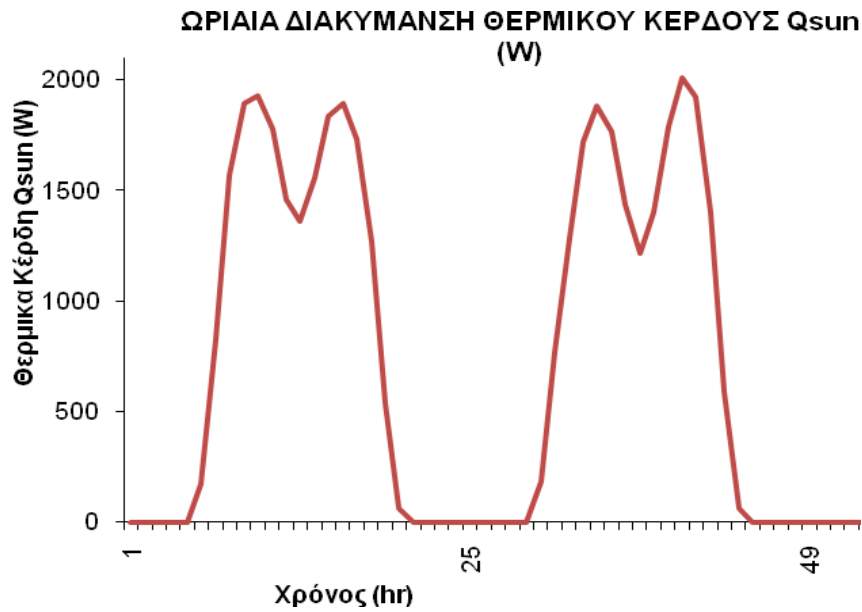
Από την εκτέλεση των προσομοιώσεων για την τυχαία μονοκατοικία στην Αθήνα που εξετάζουμε, προέκυψαν οι αναλυτικές ωριαίες ανάγκες για ψυκτική ενέργεια. Επιπλέον, με το πρόγραμμα Energy Plus υπολογίσαμε τα συνολικά εσωτερικά θερμικά κέρδη Q_{in} που δημιουργούνται εξαιτίας των ενοίκων, του εξοπλισμού (οικιακές ηλεκτρικές συσκευές) και του φωτισμού εντός της κατοικίας. Βέβαια, οι τιμές των εσωτερικών θερμικών κερδών εμφανίζουν την ίδια περιοδικότητα για κάθε μήνα και μέρα. Αυτό οφείλεται στην παραδοχή που έγινε στους υπολογισμούς, ότι δηλαδή οι ένοικοι και οι συσκευές της κατοικίας έχουν σταθερό πρόγραμμα δραστηριοτήτων.



Διάγραμμα 2.5.41: Ωριαία διακύμανση των εσωτερικών θερμικών κερδών Q_{in} της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε τη διακύμανση που έχουν τα εσωτερικά θερμικά κέρδη Q_{in} για δύο συνεχόμενα εικοσιτετράωρα. Κατά τη διάρκεια της νύκτας παρατηρούνται οι μικρότερες τιμές των θερμικών κερδών. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι εκείνες τις ώρες δεν υπάρχει καμία δραστηριότητα εντός της κατοικίας, μιας και συνήθως εκείνες τις ώρες οι ένοικοι καθεύδουν. Αντιθέτως, τις πρωινές, απογευματινές και κατά τις πρώτες νυκτερινές ώρες παρατηρείται αύξηση στα θερμικά κέρδη, αφού τα άτομα εντός της κατοικίας δραστηριοποιούνται. Υπάρχουν ανοικτά φώτα, οι οικιακές συσκευές λειτουργούν και υπάρχει κινητικότητα εντός της κατοικίας.

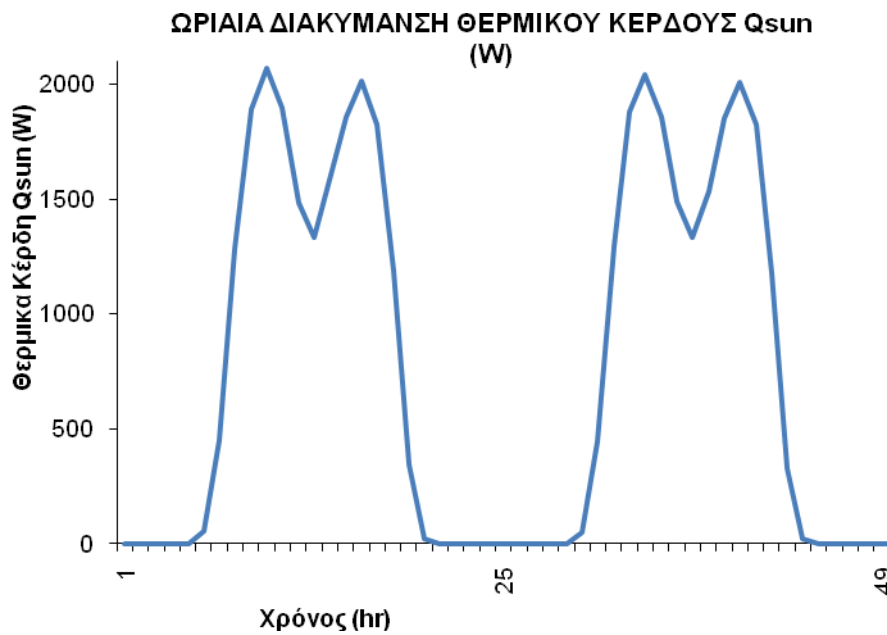
Στην υπό εξέταση κατοικία εκτός από τα εσωτερικά θερμικά κέρδη Q_{in} υπάρχουν και τα θερμικά κέρδη που προέρχονται από την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στην κατοικία από τα διαφανή ανοίγματα (υαλόφρακτες επιφάνειες - παράθυρα) και τα αγωγή στοιχεία του κτιρίου. Αυτά συμβολίζονται με Q_{sun} και εξαρτούνται άμεσα από την ηλιοφάνεια για την υπό εξέταση περίοδο.



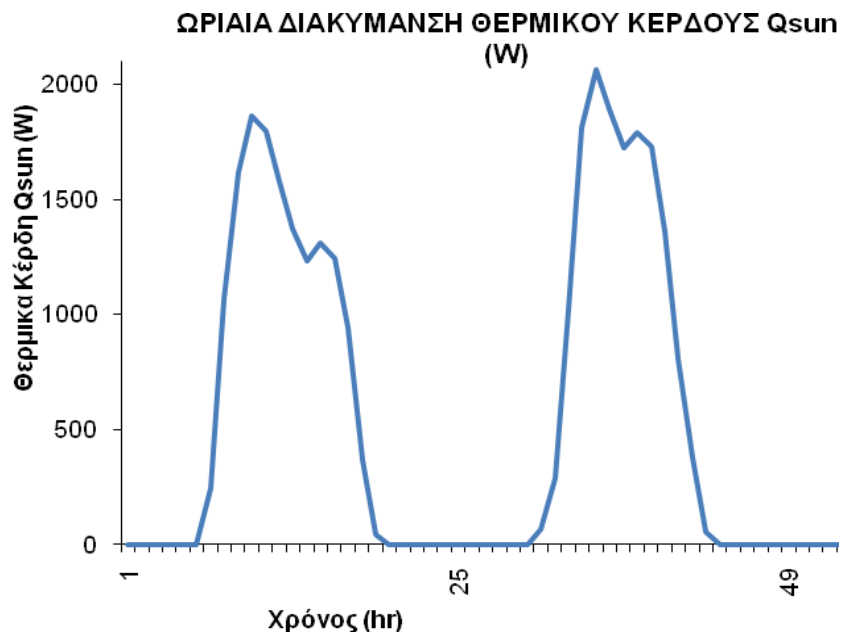
Διάγραμμα 2.5.42: Ωριαία διακύμανση των θερμικών κερδών λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας Q_{sun} εντός της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες κατά το μήνα Ιούνιο.



Διάγραμμα 2.5.43: Ωριαία διακύμανση των θερμικών κερδών λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας Q_{sun} εντός της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες κατά το μήνα Ιούλιο.



Διάγραμμα 2.5.44: Ωριαία διακύμανση των θερμικών κερδών λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας Q_{sun} εντός της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες κατά το μήνα Αύγουστο.



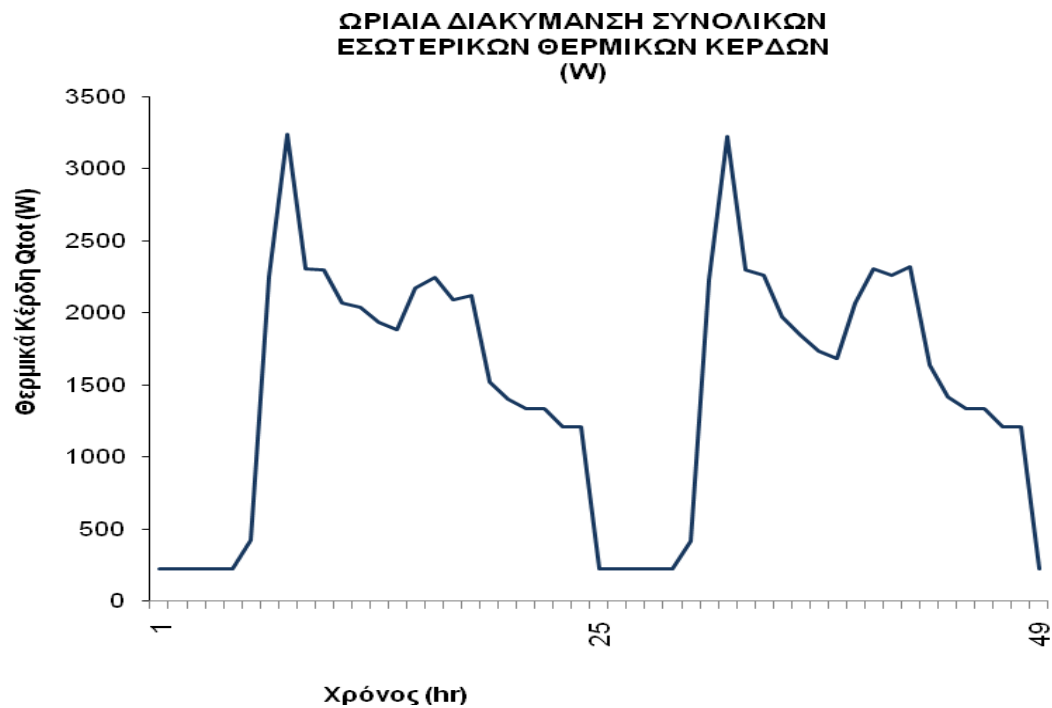
Διάγραμμα 2.5.45: Ωριαία διακύμανση των θερμικών κερδών λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας Q_{sun} εντός της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες κατά το μήνα Σεπτέμβριο.

Παρατηρούμε στα διαγράμματα 2.5.41 – 44 ότι τα θερμικά κέρδη εξαιτίας της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζουν περιοδικότητα ως προς την εναλλαγή των φάσεων μέρα-νύκτα. Την ημέρα παρουσιάζουν τα μέγιστα, ενώ κατά τη νύκτα παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους, δηλαδή 0 W αφού δεν υπάρχει ηλιοφάνεια τότε. Το πιο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό τους, που εμφανίζεται για όλους τους θερινούς μήνες είναι η αυξομείωση που παρουσιάζουν κατά τις ώρες του ηλιακού μεσημεριού. Αυτό το χαρακτηριστικό «ψαλίδι» που σχηματίζεται εξηγείται από το γεγονός, ότι εκείνες τις ώρες ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ της τροχιάς του στον ουράνιο θόλο. Δηλαδή, η πρωτογενής ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει εντελώς κάθετα στην κατοικία και συγκεκριμένα στην οροφή της. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει φεγγίτης ή άλλο άνοιγμα στην οροφή, δεν μπορεί να εισέλθει άμεσα ηλιακή ακτινοβολία στην κατοικία, παρά μόνο υπό μορφής αντανακλάσεων από γειτονικές επιφάνειες. Η δευτερογενής όμως ακτινοβολία έχει χάσει μέρος της ενέργειάς της. Γι'αυτό παρατηρείται αυτή η μικρή πτώση των τιμών του μεγέθους Q_{sun} . Μόλις περάσουν αυτές οι λίγες ώρες και αλλάξει θέση ο ήλιος, παρατηρείται και πάλι αύξηση στα θερμικά κέρδη από ηλιακή ακτινοβολία. Μόνο κατά τον μήνα Σεπτέμβριο δεν έχει την ίδια έκταση το φαινόμενο αυτό. Η αιτία είναι ότι πλέον αλλάζουμε εποχή, άρα μειώνεται η γωνία της τροχιάς του ηλίου στον ουράνιο θόλο και επιπλέον η ημέρα διαρκεί σημαντικά λιγότερο συγκριτικά με τους «καθαρά» θερινούς μήνες.

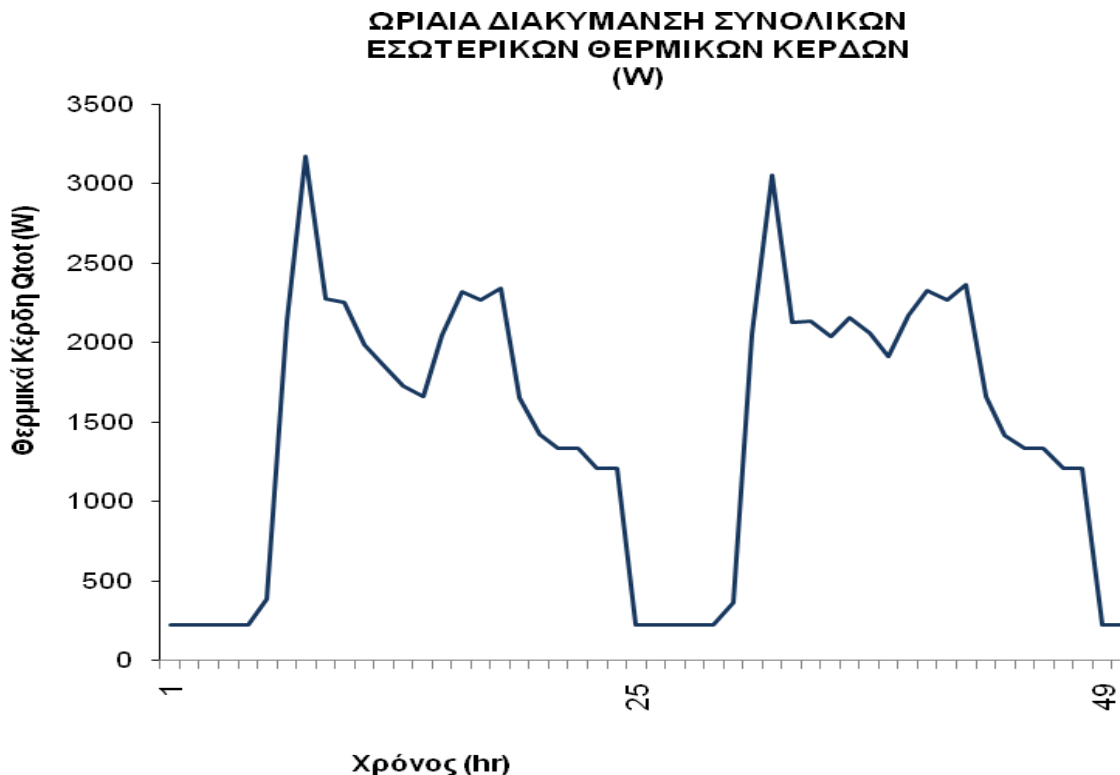
Τελικά, τα συνολικά θερμικά κέρδη της κατοικίας Q_{total} θα προκύψουν σαν άθροισμα των δύο προηγούμενων κατηγοριών:

$$Q_{total} = Q_{in} + Q_{sun}$$

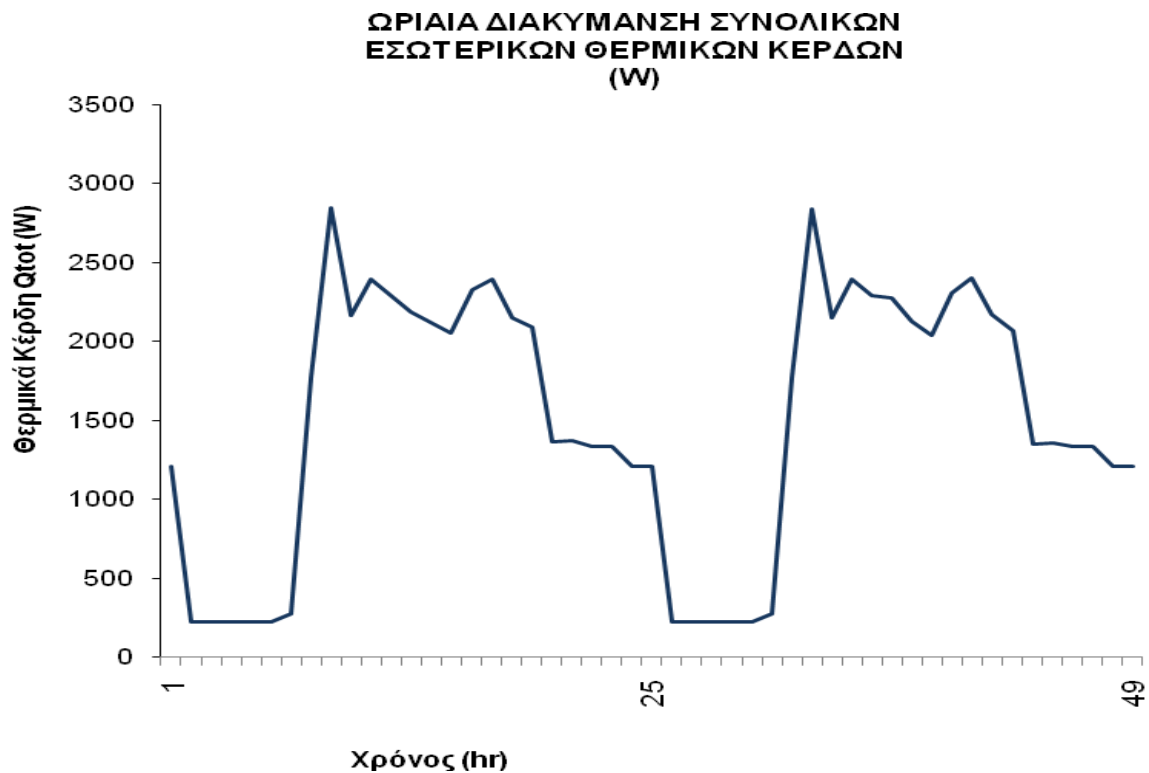
Ενώ η ωριαία διακύμανσή τους φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν:



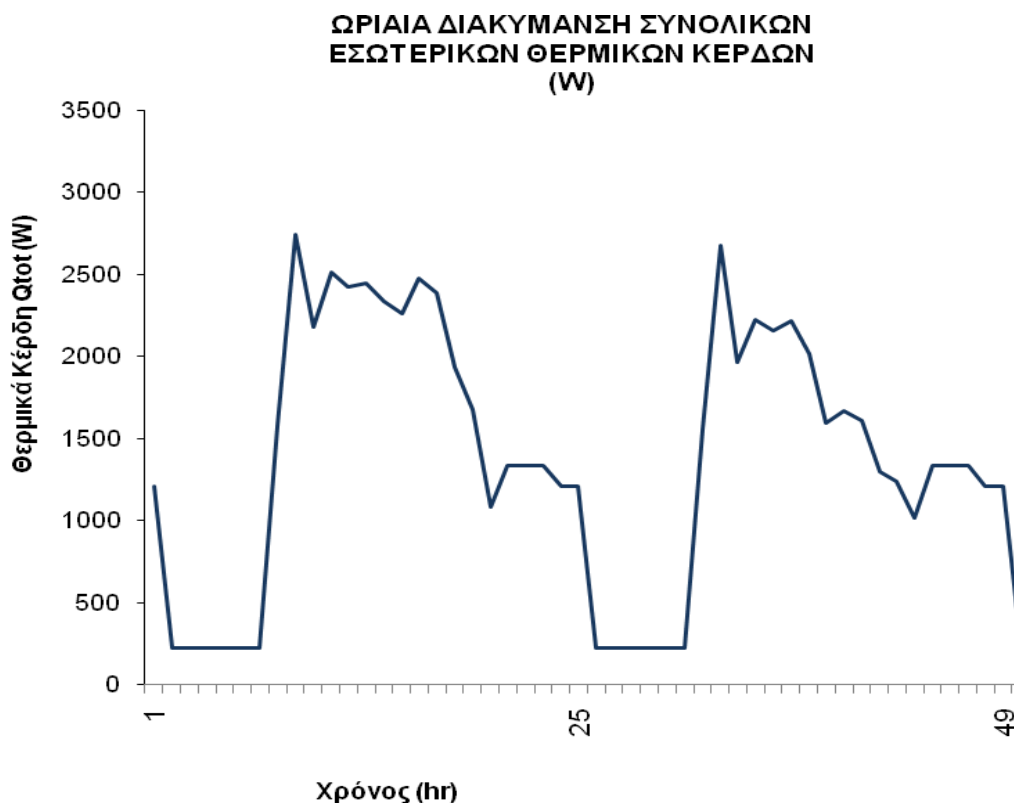
Διάγραμμα 2.5.46: Ωριαία διακύμανση των συνολικών εσωτερικών θερμικών κερδών Q_{tot} της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες κατά το μήνα Ιούνιο



Διάγραμμα 2.5.47: Ωριαία διακύμανση των συνολικών εσωτερικών θερμικών κερδών Q_{tot} της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες κατά το μήνα Ιούλιο.



Διάγραμμα 2.5.48: Ωριαία διακύμανση των συνολικών εσωτερικών θερμικών κερδών Q_{tot} της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες κατά το μήνα Αύγουστο.



Διάγραμμα 2.5.49: Ωριαία διακύμανση των συνολικών εσωτερικών θερμικών κερδών Q_{tot} της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες κατά το μήνα Σεπτέμβριο.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των συνολικών εσωτερικών θερμικών κερδών Q_{tot} της κατοικίας για τυχαίες ώρες καθόλη την υπό εξέταση περίοδο, βλέπουμε ότι διατηρήθηκε η περιοδικότητα και χαρακτηριστικά των δύο συνιστωσών τους ($Q_{in} + Q_{sun}$). Βέβαια, για τα δύο εικοσιτετράωρα που εμφανίζονται, η διακυμάνσεις των θερμικών φορτίων δεν είναι τελείως ταυτόσημες, γεγονός που οφείλεται στις ιδιαιτερότητες των δύο διαφορετικών ημερών. Για τους τρεις θερινούς μήνες δεν υπάρχουν πολλές διαφορές ως προς την τιμή των μέγιστων. Αντίθετα, παρατηρούμε ότι για τον Σεπτέμβριο τα μέγιστα είναι ελαφρώς μειωμένα έναντι των προηγούμενων μηνών, κάτι που μαρτυράει και την ελάττωση της ζήτησης για κλιματισμό αυτόν τον μήνα.

Στο σημείο αυτό είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την στιγμιαία τιμή του ψυκτικού φορτίου $Q_{a/c}$, (W), που απαιτείται για την ψύξη της θερμικής ζώνης της κατοικίας. Ο υπολογισμός του μεγέθους αυτού γίνεται με βάση την εξής σχέση:

$$Q_{a/c} = [k (T_{out} - T_{in}) + Q_{in} + Q_{sun}]^+$$

ή ισοδύναμα

$$Q_{a/c} = [k (T_{out} - T_{in}) + Q_{tot}]^+$$

όπου με k συμβολίζεται ο συντελεστής φορτίου του κτιρίου, ($W/^\circ C$), T_{out} η θερμοκρασία περιβάλλοντος, ($^\circ C$), T_{in} η θερμοκρασία της θερμικής ζώνης, ($^\circ C$), Q_{in} τα εσωτερικά θερμικά κέρδη της κατοικίας, (W) και Q_{sun} τα θερμικά κέρδη από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία από τα διαφανή ανοίγματα (W).

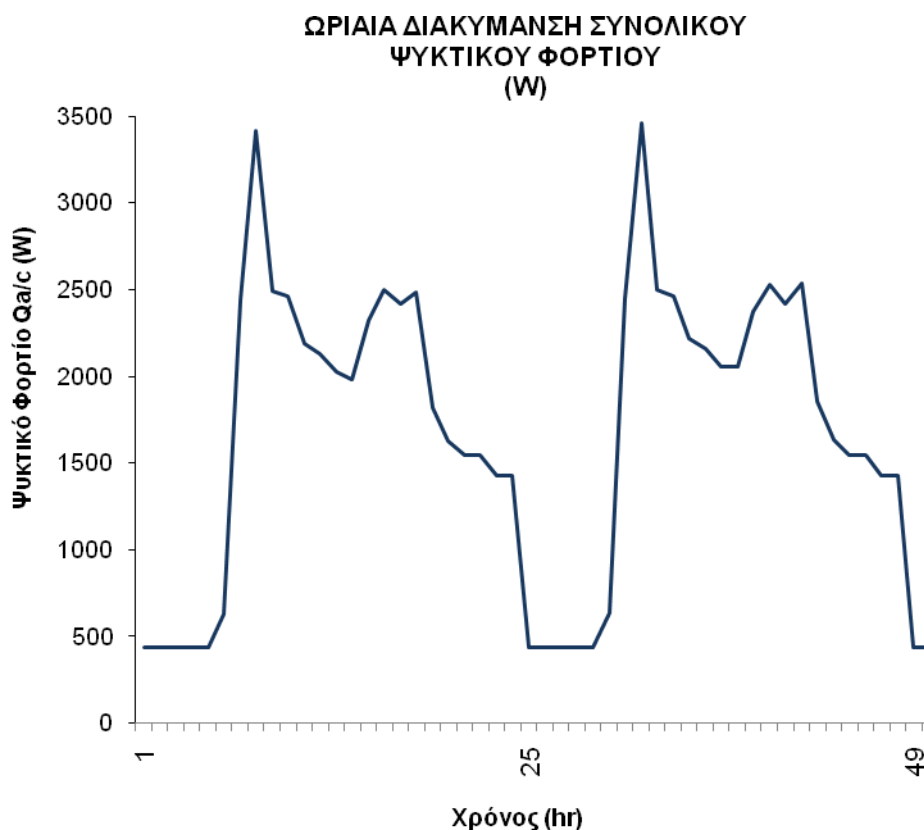
Η παραπάνω σχέση αναλύεται σε τρεις βασικούς όρους. Ο πρώτος είναι: $[k (T_{out} - T_{in})]$ και δηλώνει τη ροή θερμότητας λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας εντός και εκτός θερμικής ζώνης. Ο δεύτερος είναι: $[Q_{in}]$ και αναφέρεται στην παραγωγή θερμότητας μέσα στην θερμική ζώνη (ανθρώπινες δραστηριότητες, φωτισμός, συσκευές). Ο τρίτος είναι: $[Q_{sun}]$ και δηλώνει την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται μέσω των διαφανών επιφανειών της κατοικίας και προσθέτει θερμότητα. Ποιοτικά η σχέση θα είναι:

$$\begin{aligned} [\Psi\text{υκτικό Φορτίο}] &= [\text{Ροή θερμότητας λόγω } \Delta T \text{ εντός και εκτός θερμικής ζώνης}] \\ &+ [\text{Παραγωγή θερμότητας εντός θερμικής ζώνης}] \\ &+ [\text{Εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία μέσω διαφανών επιφανειών}] \end{aligned}$$

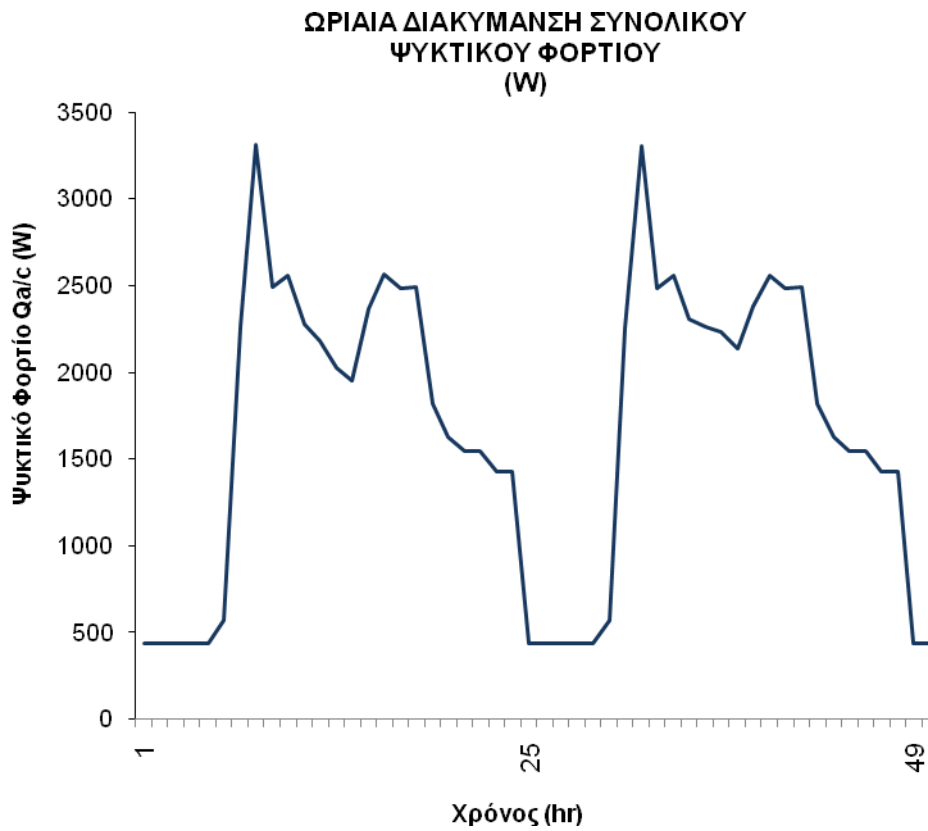
Με γνωστά όλα τα μεγέθη του αριστερού μέλους της παραπάνω εξίσωσης μπορούμε να υπολογίσουμε και το ψυκτικό φορτίο που απαιτείται για την υπό εξέταση κατοικία. Βέβαια, είναι γνωστό από τη θεωρία περί κλιματισμού χώρου, ότι η τιμή του ψυκτικού φορτίου δεν είναι ακριβώς ίση, για την ίδια χρονική στιγμή, με την τιμή του θερμικού κέρδους. Αυτό γίνεται γιατί η θερμική μάζα του κτιρίου αποθηκεύει και στη συνέχεια αποβάλλει την θερμότητα με κάποια

χρονική υστέρηση. Έτσι, παρατηρείται μια διαφορά φάσης μεταξύ των δύο μεγεθών. Οπότε, πρέπει να εξετάσουμε τον πλήρη κύκλο ενός 24ώρου για να διαπιστώσουμε αν το συνολικά εισερχόμενο θερμικό κέρδος ισούται με το συνολικά εξερχόμενο από την κλιματιστική μονάδα. Επιπλέον, για μία κλιματιστική μονάδα, το ψυκτικό φορτίο πρέπει να υπερκεράσει όχι μόνο τα θερμικά κέρδη, αλλά και τυχόν απώλειες στο μηχανισμό της συσκευής και στους κλάδους διανομής στους χώρους. Επίσης, για την περίπτωση μας έγινε η παραδοχή ότι δεν υπάρχουν χωρίσματα στη θερμική ζώνη και δεν παρατηρείται διείσδυση αέρα (infiltration) από τα ανοίγματα του κτιρίου.

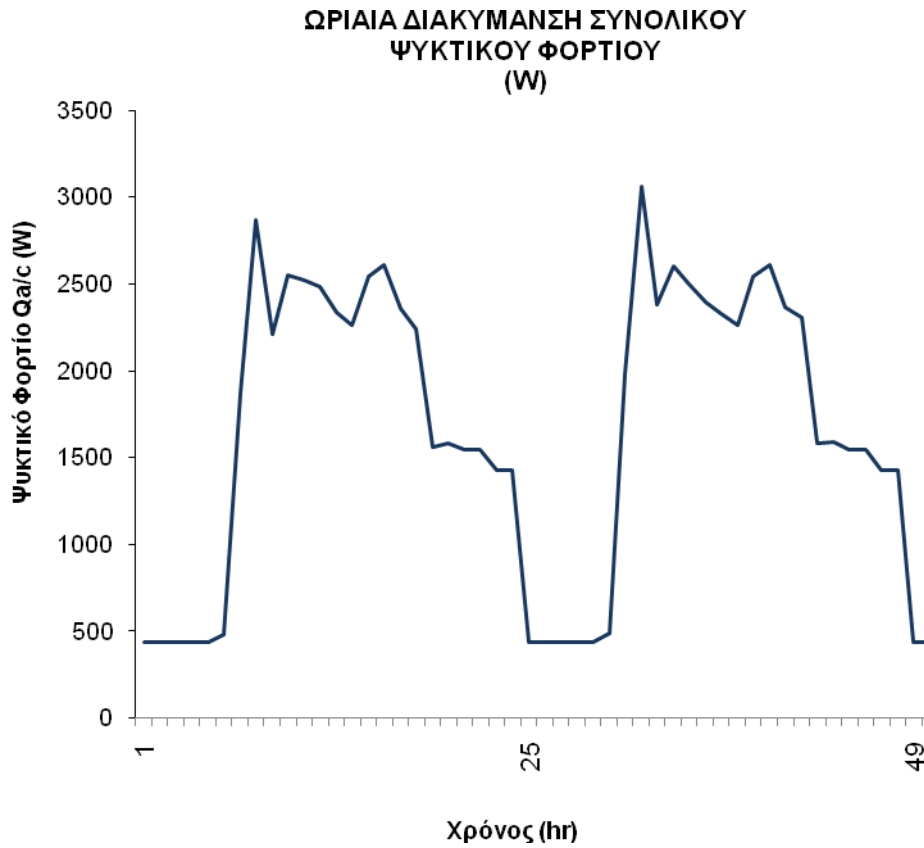
Για τον κάθε μήνα δίνονται ενδεικτικά διαγράμματα του ψυκτικού φορτίου για συνεχόμενα εικοσιτετράωρα, ώστε να είναι πιο αντιπροσωπευτικά:



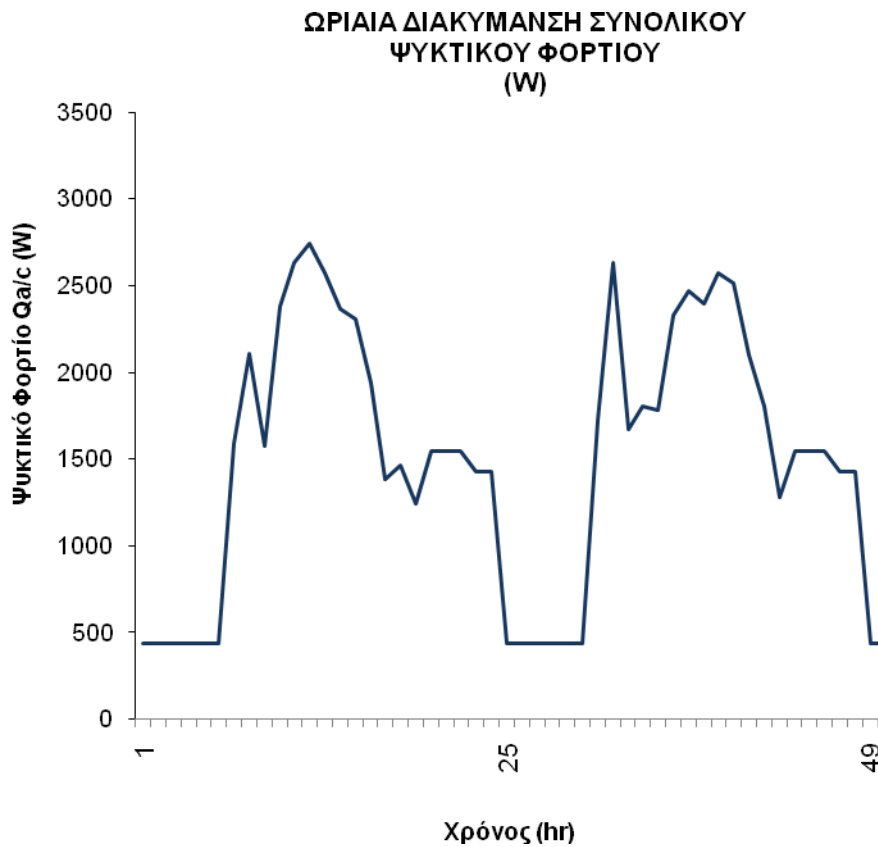
Διάγραμμα 2.5.50: Ωριαία διακύμανση του συνολικού απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου $Q_{a/c}$ της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες κατά το μήνα Ιούνιο.



Διάγραμμα 2.5.51: Ωριαία διακύμανση του συνολικού απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου $Q_{a/c}$ της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες κατά το μήνα Ιούλιο.



Διάγραμμα 2.5.52: Ωριαία διακύμανση του συνολικού απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου $Q_{a/c}$ της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες κατά το μήνα Αύγουστο.



Διάγραμμα 2.5.53: Ωριαία διακύμανση του συνολικού απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου $Q_{a/c}$ της κατοικίας για τυχαίες 48 συνεχόμενες ώρες κατά το μήνα Σεπτέμβριο.

Στα διαγράμματα του ψυκτικού φορτίου για την θερμική ζώνη του κτιρίου που εξετάζουμε, παρατηρούνται λογικές διακυμάνσεις, έχοντας σαν δεδομένες αυτές των θερμικών κερδών εντός κατοικίας. Η ανάγκη για κλιματισμό κορυφώνεται για τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες, όπου παρατηρείται και η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά εντός και εκτός ζώνης, ενώ ελαττώνεται την νύκτα. Κατά τις απογευματινές και πρώτες βραδινές ώρες το ψυκτικό φορτίο πέφτει περίπου στο μισό απ' ότι τις πρωινές, ενώ όσο περνούν οι ώρες έχει συνεχώς φθίνουσα πορεία. Γενικά, αναμέναμε τέτοια μορφή για την καμπύλη του μεγέθους $Q_{a/c}$, αφού γνωρίζαμε ήδη τη «συμπεριφορά» των θερμικών κερδών της μονοκατοικίας. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι αρχικά τον Αύγουστο και κυρίως τον Σεπτέμβριο οι μέγιστες τιμές του ψυκτικού φορτίου μειώνονται συγκριτικά με τους δύο προηγούμενους μήνες (σ.σ. Ιούνιο-Ιούλιο). Επίσης, για τα δύο εικοσιτετράωρα που εμφανίζονται στον κάθε μήνα, οι διακυμάνσεις των φορτίων δεν είναι τελείως ταυτόσημες, γεγονός που οφείλεται στις ιδιαιτερότητες των δύο διαφορετικών ημερών (διαφορετική ένταση ανέμου, εξωτερικής θερμοκρασίας, υγρασίας κλπ).

Με γνωστό πια το ενεργειακό προφίλ της υπό μελέτη θερμικής ζώνης, θα εισάγουμε το ψυκτικό φορτίο του ακτινοβολητή που υπολογίσαμε προηγουμένως. Αυτό θα γίνει με τη βοήθεια του προγράμματος EnergyPlus και συγκεκριμένα του αρχείου «diplomatikiB.idf» που δημιουργήσαμε. Στο αρχείο αυτό διατηρούνται όλες οι παράμετροι ίδιοι με το αρχικό «diplomatikiA.idf», αλλά πλέον έχουμε νυκτερινή ψύξη του χώρου από τον ακτινοβολητή. Για να το πετύχουμε αυτό προσθέσαμε ένα αντικείμενο στην κατηγορία του νυκτερινού αερισμού στον αντίστοιχο τομέα του προγράμματος IDFEditor, ενώ ο τύπος του αερισμού επιλέχθηκε να είναι μόνο εισροή αέρα στη θερμική ζώνη, όπως ακριβώς έγινε και στο πείραμα στο Αγρίνιο. Θέσαμε το ωράριο λειτουργίας από τις 06:00 το πρωί ως τις 24:00 καθημερινά. Η ροή επιλέχθηκε να είναι σταθερή και ανέρχεται στα $0,75 \text{ m}^3/\text{sec}$ (η τιμή της ροής αντιστοιχεί στο φορτίο του ακτινοβολητή Q_{R3} , το μέγιστο δηλαδή από αυτά που υπολογίσαμε προηγουμένως). Όσο αφορά τον ανεμιστήρα που θα δίνει την ώθηση που χρειάζεται για να είναι η ροή σταθερή από τον ακτινοβολητή προς την κατοικία, υπολογίζεται από τις εξής σχέσεις:

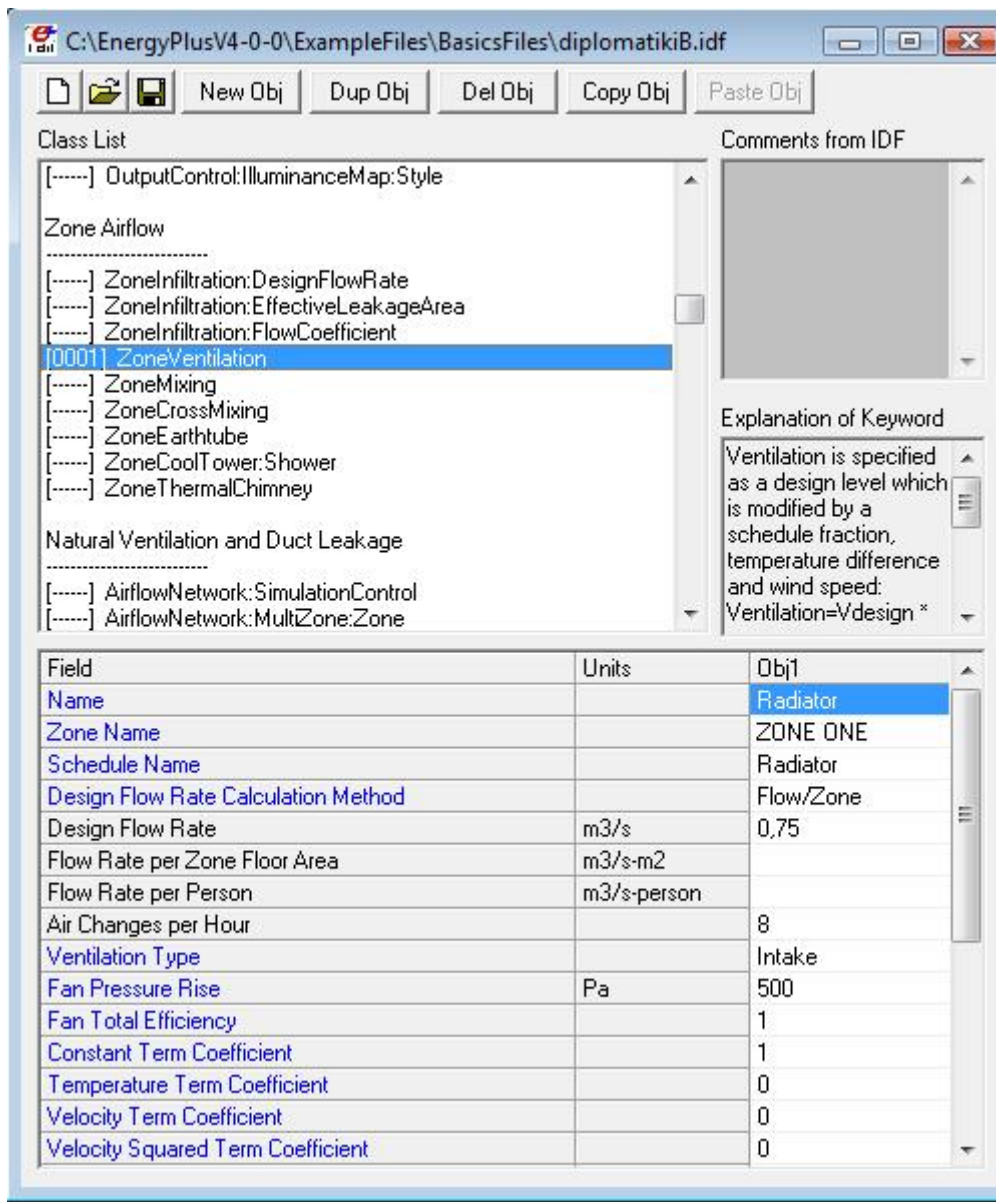
$$P = dp F$$

$$\mu_f = dp F / P$$

$$P = dp F / (\mu_f \mu_b \mu_m)$$

$$dt = dp / 1000$$

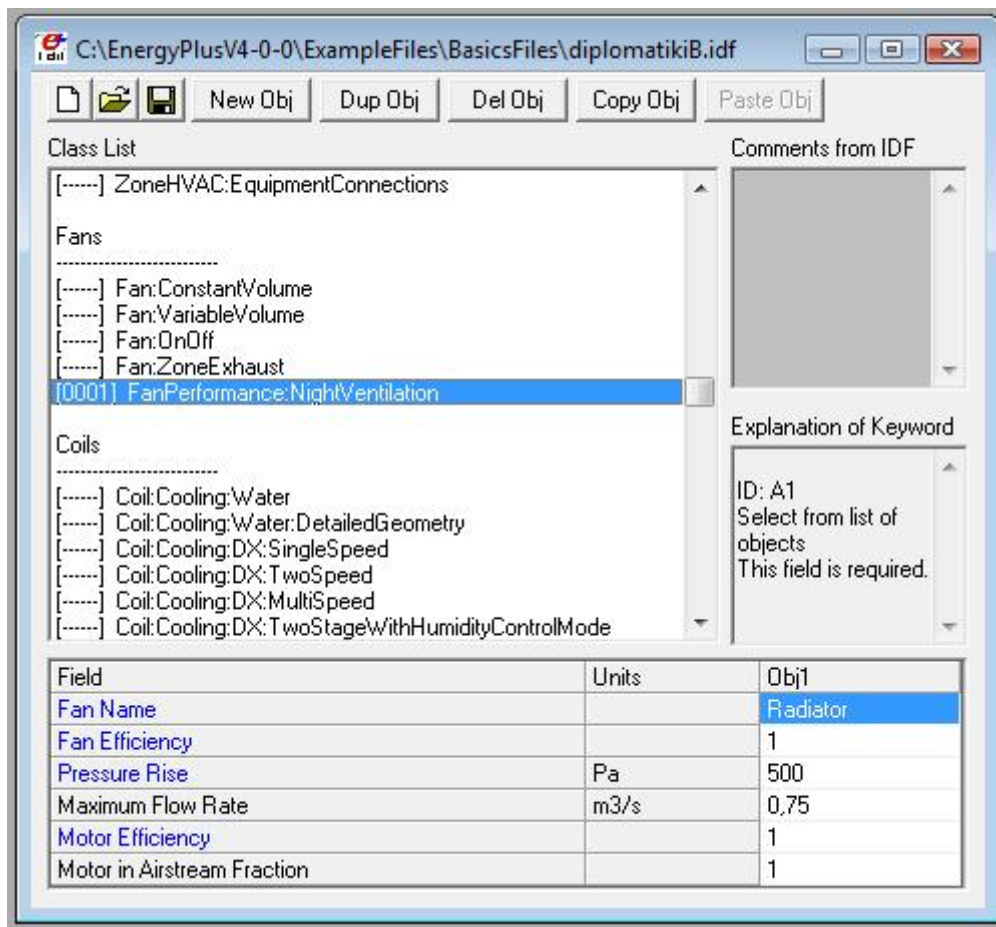
όπου με P συμβολίζεται η ισχύς του ανεμιστήρα σε W , με dp συμβολίζεται η αύξηση πίεσης στο ρευστό υπό την επίδραση του ανεμιστήρα σε Pa και με dt η πρόσδοση θερμότητας στο ρευστό εκφρασμένη σε αύξηση της θερμοκρασίας του σε $^{\circ}K$. Με μ_f συμβολίζεται ο συντελεστής του ανεμιστήρα, ενώ οι μ_b και μ_m είναι οι συντελεστές απόδοσης του ιμάντα και του κινητήρα του ανεμιστήρα αντίστοιχα. Τελικά για ροή που ανέρχεται στα $0,75 \text{ m}^3/\text{sec}$, επιλέχθηκε ιδανικός ανεμιστήρας: με συντελεστή απόδοσης $\mu_f = 1$, ισχύ $P = 375 \text{ W}$, αύξηση πίεσης $dp = 500 \text{ Pa}$ και αύξηση θερμοκρασίας $dt = 0,5 \text{ }^{\circ}K$. Όσο αφορά το ψυκτικό μέσο γνωρίζουμε ότι είναι αέρας. Εισέρχεται στον ακτινοβολητή με θερμοκρασία T_{in} ίση με αυτή του περιβάλλοντος και εξέρχεται με μία άλλη μειωμένη T_{out} . Κατά την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου, βρήκαμε ότι η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον ακτινοβολητή είναι μειωμένη έναντι της αρχικής κατά μερικά δέκατα της κλίμακας κελσίου ($^{\circ}C$). Αυτός είναι ο λόγος που στο αρχείο «diplomatikiB.idf» έγινε η παραδοχή, ότι ο εισερχόμενος αέρας από τον ανεμιστήρα προς τη θερμική ζώνη, έχει ίση θερμοκρασία με αυτήν του περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.5.3: Στο πεδίο που σχετίζεται με τη ροή του αέρα εντός της θερμικής ζώνης, προστέθηκε ένα αντικείμενο στην κατηγορία του αερισμού της ζώνης. Ονομάστηκε «Radiator» (ακτινοβολητής), καθορίστηκε η θερμική ζώνη στην οποία θα υπάρξει είσοδος αέρα και διαμορφώθηκε το ωράριο λειτουργίας (κατά τα γνωστά 22:00 με 06:00 καθημερινά). Καθορίστηκε η παροχή αέρα και οι αλλαγές του αέρα ανέρχονται στις 8 (Για το πεδίο αυτό, συμβουλευτήκαμε πίνακες του βιβλίου Κλιματισμός για τις προβλεπόμενες ανανεώσεις αέρα, ανάλογα με το είδος της κατοικίας. Το ελάχιστο είναι 5 και το μέγιστο 10. Τελικά επιλέχθηκε μια μέση τιμή). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά συμπληρώθηκαν όπως αυτά υπολογίστηκαν προηγουμένως, ενώ τα τέσσερα τελευταία κελιά αφορούν συντελεστές της εξίσωσης:

$$\text{Ventilation} = V_{\text{design}} * F_{\text{schedule}} * (A + B * |(T_{\text{zone}} - T_{\text{odb}})| + C * \text{WindSpd} + D * \text{WindSpd} * 2)$$
 Το πρόγραμμα ακολουθεί τη σχέση της ASHRAE για τον υπολογισμό της εισερχόμενης παροχής αέρα, σαν συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και της θερμοκρασιακής διαφοράς εντός και εκτός θερμικής ζώνης. Επειδή στην υπόθεση της μελέτης ο ανεμιστήρας έχει σταθερή παροχή, εδώ V_{design} , ανεξαρτήτως των υπολοίπων συνθηκών, οι τιμές των υπόλοιπων όρων θα έπρεπε να έχουν αποτέλεσμα τη μονάδα. Γι'αυτό στην παραπάνω σχέση τέθηκε $A=1$, $B=0$, $C=0$ και $D=0$ και όλη η παρένθεση δίνει αποτέλεσμα 1. Έτσι, ο αερισμός σταματάει μόνο αν ο όρος F_{schedule} πάρει μηδενική τιμή. Ο όρος αυτός όμως παίρνει τιμές από το ωράριο λειτουργίας του

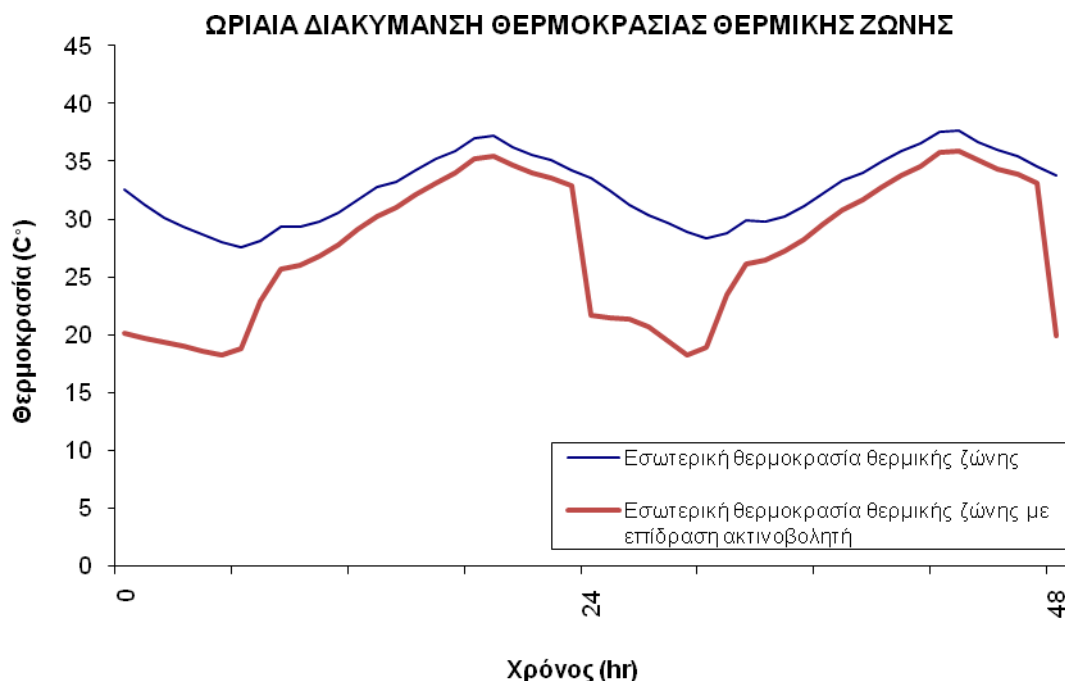
ακτινοβολητή και η τιμή του όρου Fschedule τελικά παίρνει τις τιμές 1 από τις 22:00 ως τις 06:00 και 0 από τις 06:00 ως τις 22:00. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίστηκε η σταθερή παροχή αέρα προς την κατοικία και μόνο για τις επιθυμητές ώρες του 24ώρου.



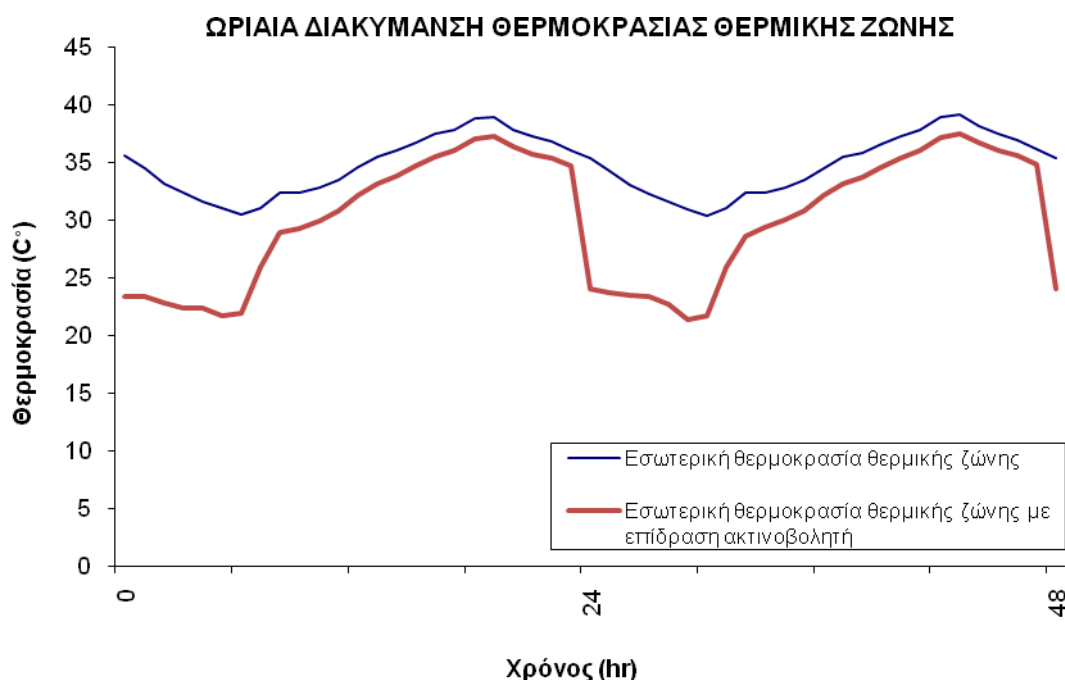
Σχήμα 2.5.4: Το πεδίο αυτό αφορά τον ανεμιστήρα και πρέπει να είναι σε συμφωνία με το προηγούμενο βήμα. Στα αντίστοιχα κελιά συμπληρώθηκαν τα χαρακτηριστικά του ανεμιστήρα, όπως αυτά υπολογίστηκαν προηγουμένως.

Τελικά, μετά από την εισαγωγή της λειτουργίας του ακτινοβολητή με τον τρόπο που περιγράφηκε, εκκίνησε η διαδικασία προσομοίωσης για την ίδια κατοικία-θερμική ζώνη. Τα αποτελέσματα των θερμικών υπολογισμών που προέκυψαν είναι αρκετά ικανοποιητικά και θα αναπτυχθούν εκτενώς. Ενδεικτικά αναφέρουμε, ότι η μείωση του συνολικού απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για τη θερμική ζώνη, φτάνει το 12% με μέγιστη τιμή περίπου 40% για ιδανικές περιπτώσεις λειτουργίας του ακτινοβολητή και ελάχιστο περίπου 3%. Επιπλέον, η μέση θερμοκρασία της κατοικίας για όλη τη περίοδο εφαρμογής του ακτινοβολητή μειώθηκε κατά 4°C. Η μέγιστη μείωση της θερμοκρασίας παρατηρήθηκε νυκτερινές ώρες (εντός του ωραρίου του ακτινοβολητή) και έφτανε τους 10~11°C, ενώ η ελάχιστη ήταν 1°C και αφορούσε τις ώρες της ημέρας.

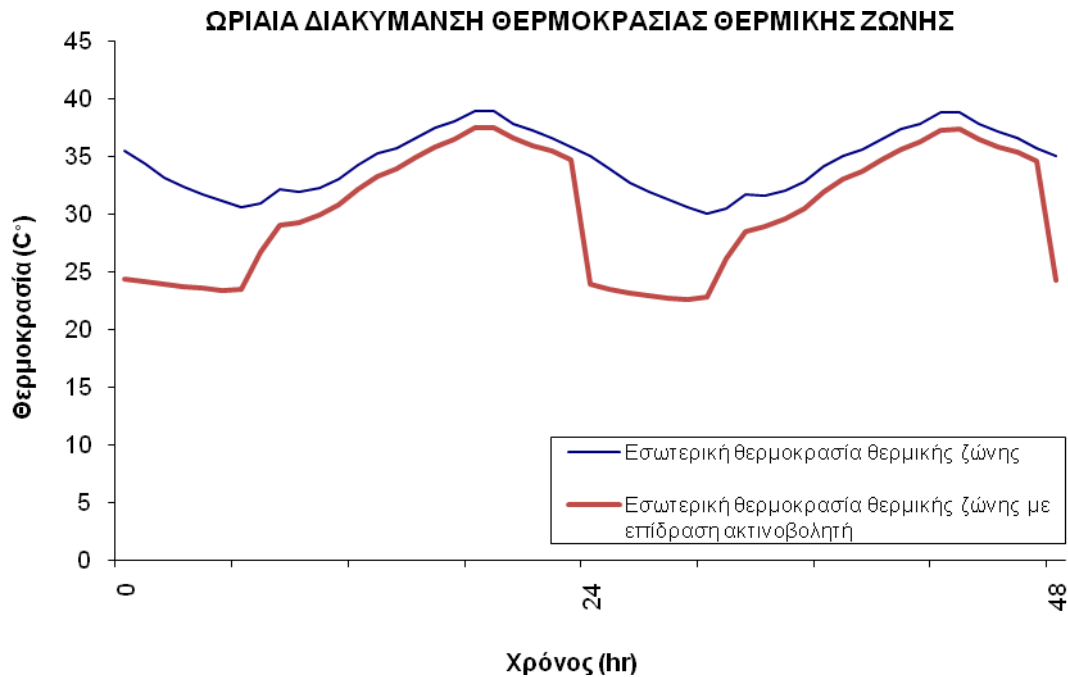
Αναλυτικότερα, για κάθε μήνα δίνονται διαγράμματα με τη θερμοκρασία εντός της θερμικής ζώνης πριν και μετά την εφαρμογή του ακτινοβολητή. Η διαφορά των θερμοκρασιών αυξάνεται αρκετά κατά τις νυκτερινές ώρες και μειώνεται πάλι κατά τις πρωινές, αφού τότε παύει η λειτουργία του ακτινοβολητή.



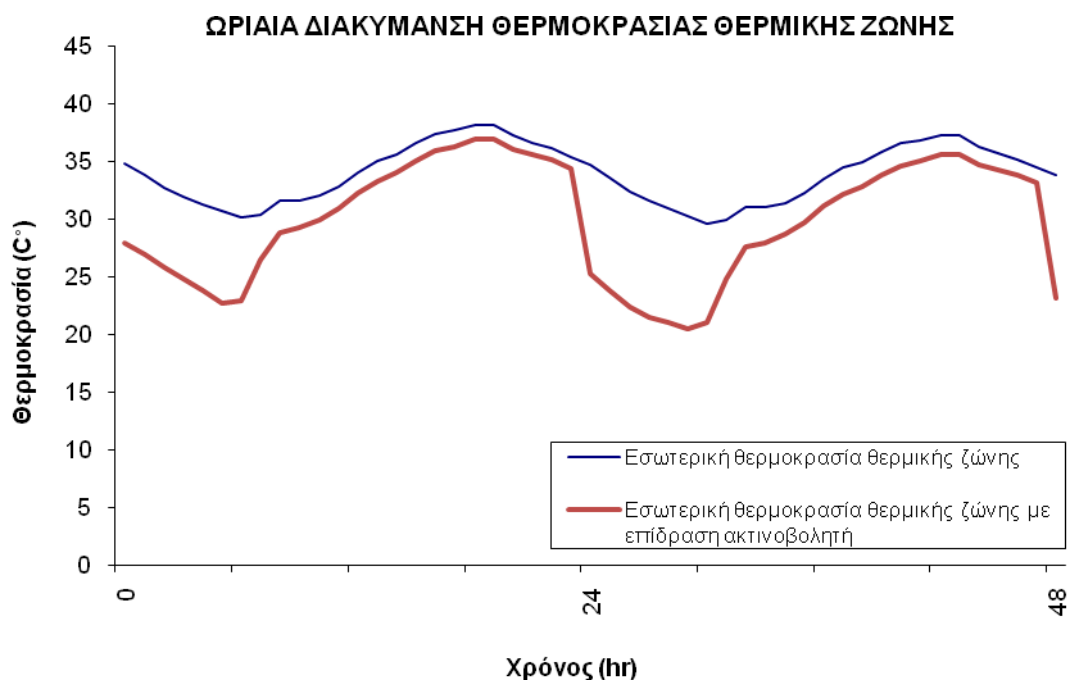
Διάγραμμα 2.5.54: Ωριαία διακύμανση της θερμοκρασίας εντός της θερμικής ζώνης πριν και μετά την εφαρμογή του ακτινοβολητή για δύο τυχαία, αλλά συνεχόμενα 24ωρα κατά το μήνα Ιούνιο.



Διάγραμμα 2.5.55: Ωριαία διακύμανση της θερμοκρασίας εντός της θερμικής ζώνης πριν και μετά την εφαρμογή του ακτινοβολητή για δύο τυχαία, αλλά συνεχόμενα 24ωρα κατά το μήνα Ιούλιο.



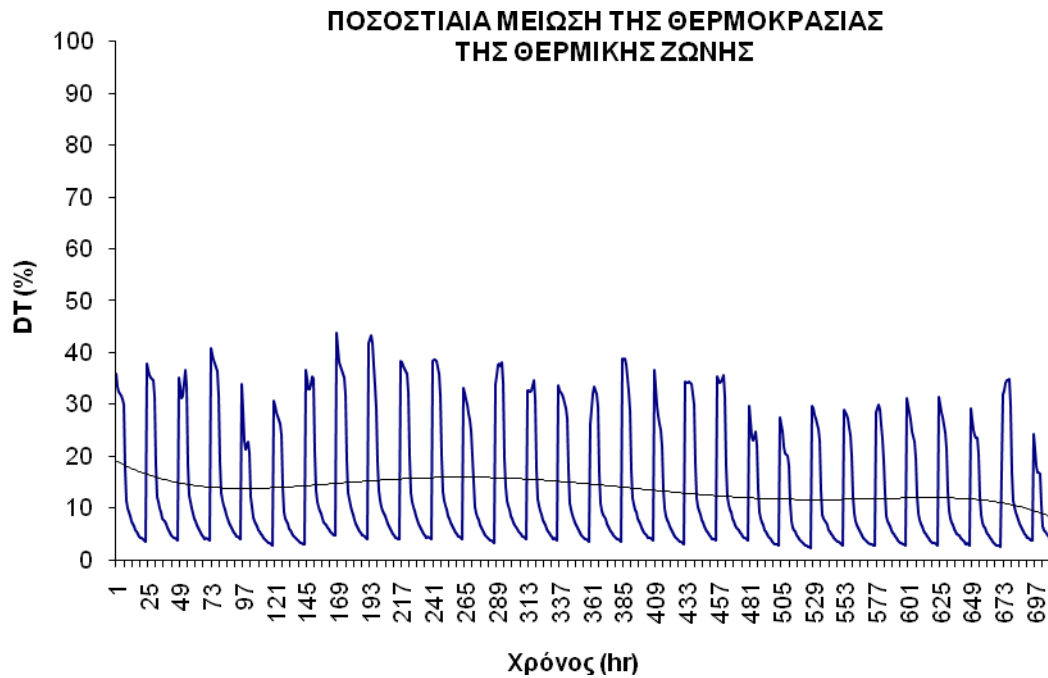
Διάγραμμα 2.5.56: Ωριαία διακύμανση της θερμοκρασίας εντός της θερμικής ζώνης πριν και μετά την εφαρμογή του ακτινοβολητή για δύο τυχαία, αλλά συνεχόμενα 24ωρα κατά το μήνα Αύγουστο.



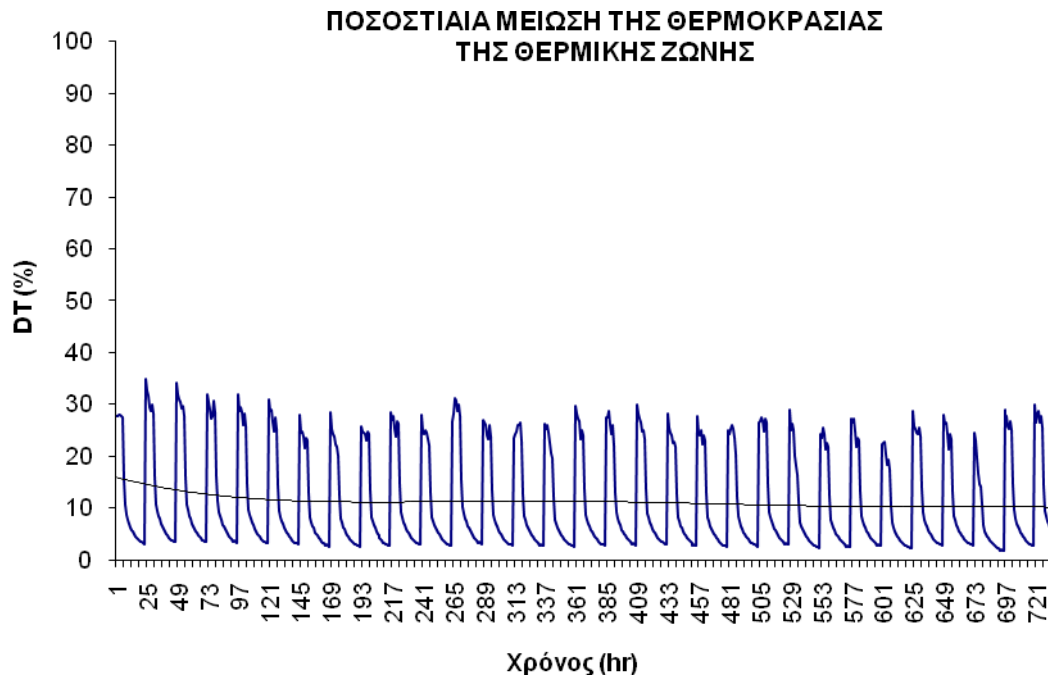
Διάγραμμα 2.5.57: Ωριαία διακύμανση της θερμοκρασίας εντός της θερμικής ζώνης πριν και μετά την εφαρμογή του ακτινοβολητή για δύο τυχαία, αλλά συνεχόμενα 24ωρα κατά το μήνα Σεπτέμβριο.

Στα διαγράμματα της θερμοκρασίας της θερμικής ζώνης, είναι εμφανής η διαφορά μετά την επιβολή του ψυκτικού φορτίου από τον ακτινοβολητή. Η διαφορά κορυφώνεται κατά τις νυκτερινές-πρώτες πρωινές ώρες και ελαχιστοποιείται κατά τις απογευματινές-πρώτες βραδινές. Για κάθε 24ωρο παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία υπό την επίδραση του ακτινοβολητή(δηλαδή από τις 22:00 ως τις 06:00) πέφτει αισθητά. Με την επόμενη αυγή του ηλίου, σηματοδοτείται και η παύση του ακτινοβολητή. Τότε η θερμοκρασία αρχίζει να αυξάνεται και πλησιάζει την θερμοκρασία της ζώνης χωρίς τον ακτινοβολητή. Η διαφορά των δύο θερμοκρασιών μειώνεται συνεχώς από το μεσημέρι και μετά. Το απόγευμα και λίγο μετά τη δύση του ηλίου, η διαφορά φτάνει στο επίπεδο του $1\sim 2^{\circ}\text{C}$. Εκείνες τις ώρες, ενώ τα θερμικά φορτία από την εισερχόμενη ακτινοβολία ελαχιστοποιούνται, κάποιος θα περίμενε η θερμοκρασία να πέσει σε χαμηλότερα επίπεδα. Αυτό δεν γίνεται, γιατί τότε αρχίζουν να εκπέμπουν θερμότητα οι θερμικές μάζες(τέσσερις τοίχοι και οροφή) του κτιρίου. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από την ηλιοφάνεια της ημέρας. Τελικά, λίγη ώρα μετά την εκκίνηση του ακτινοβολητή, οι δύο θερμοκρασίες ρέπουν στο να ταυτιστούν. Τότε εμφανίζεται και η ελάχιστη διαφορά τους. Μόλις περάσει περίπου μία ώρα από την εκκίνηση του ακτινοβολητή, η θερμοκρασία της ζώνης πέφτει σχεδόν κατακόρυφα, εκτοξεύοντας τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο περιπτώσεων στη μέγιστη τιμή της, δηλαδή $10\sim 11^{\circ}\text{C}$. Το επόμενο πρωί, μετά τη λήξη του ωραρίου του ακτινοβολητή, η θερμοκρασία εντός ζώνης παραμένει σε χαμηλά επίπεδα για κάποιο χρονικό διάστημα. Αυτό εξηγείται και πάλι από την χρονική υστέρηση στην εκπομπή θερμότητας που παρουσιάζει η θερμική μάζα του κτιρίου. Δηλαδή, καθόλη τη νύχτα ψύχοντας τον αέρα της ζώνης άμεσα, ψύχεται σταδιακά δια συναγωγής και η θερμική μάζα. Με αυτόν τον τρόπο αποθηκεύεται μέρος του ψυκτικού φορτίου σε αυτή. Έπειτα, το επόμενο πρωινό και ενώ έχει βγει ο ήλιος, επιστρέφεται, με κάποια χρονική υστέρηση, το ψυκτικό φορτίο από τη μάζα στον αέρα της ζώνης, διατηρώντας τον ψυχρότερο. Μόλις υπερिशύσει η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και τα λοιπά εσωτερικά θερμικά κέρδη, αρχίζει και πάλι η θέρμανση του αέρα. Αυτός ο κύκλος επαναλαμβάνεται για όλη την περίοδο λειτουργίας του ακτινοβολητή, με διαφορετική ένταση και διακύμανση βέβαια, ανάλογα με τα καιρικά φαινόμενα της κάθε ημέρας. Τελικά, η θερμοκρασία της θερμικής ζώνης διατηρείται σταθερά σε χαμηλότερο επίπεδο χάρη στην επίδραση του ακτινοβολητή. Η μέση μείωση για όλη την περίοδο προσομοίωσης τελικά ανέρχεται σε 4°C , τιμή που κρίνεται άκρως ικανοποιητική.

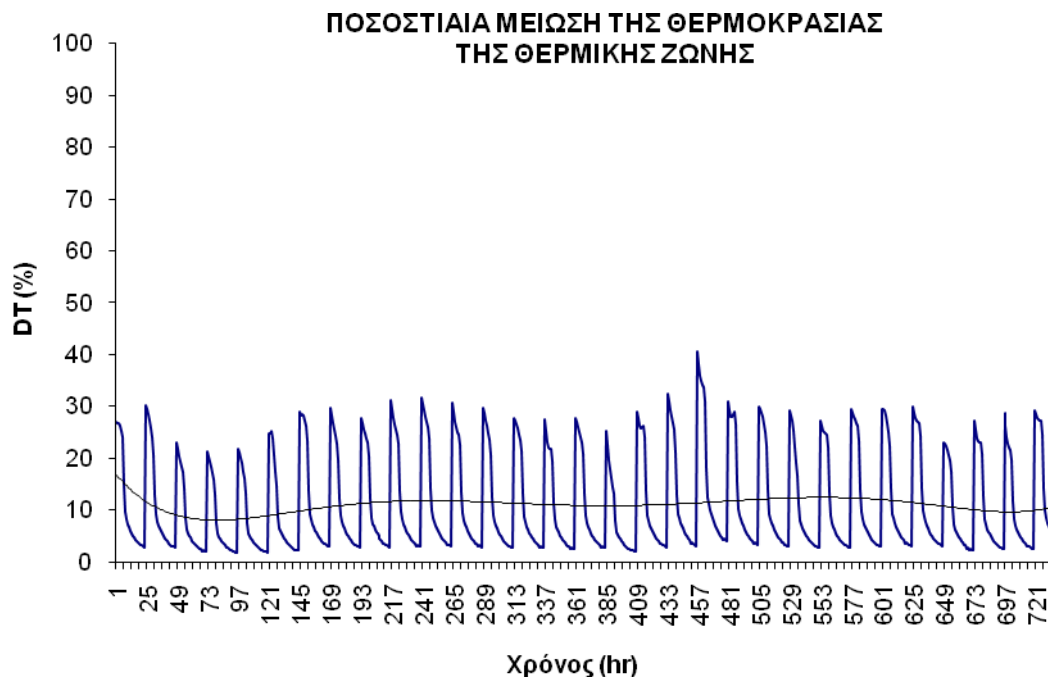
Σε συνέχεια των παραπάνω στοιχείων για τη μείωση της θερμοκρασίας δίνονται και τα διαγράμματα της ποσοστιαίας μείωσης αυτής σε μηνιαίο επίπεδο για τη θερμική ζώνη μετά την επίδραση του ακτινοβολητή. Οι μέγιστες τιμές κυμαίνονται από 30~40% και παρατηρούνται κατά τις νυκτερινές ώρες και συγκεκριμένα εντός του ωραρίου λειτουργίας του ακτινοβολητή, ενώ οι ελάχιστες ανέρχονται σε 5% και όπως είδαμε παρατηρούνται τις τελευταίες ώρες πριν την εκκίνησή του:



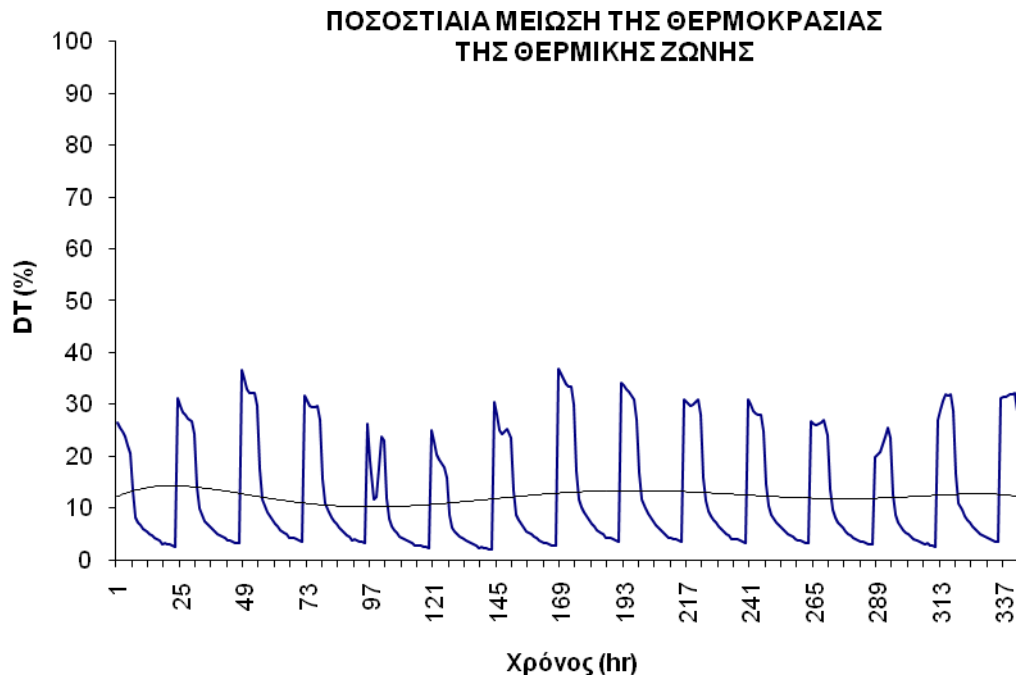
Διάγραμμα 2.5.58: Ποσοστιαία μείωση της θερμοκρασίας εντός της θερμικής ζώνης κατά τον Ιούνιο.



Διάγραμμα 2.5.59: Ποσοστιαία μείωση της θερμοκρασίας εντός της θερμικής ζώνης κατά τον Ιούλιο.

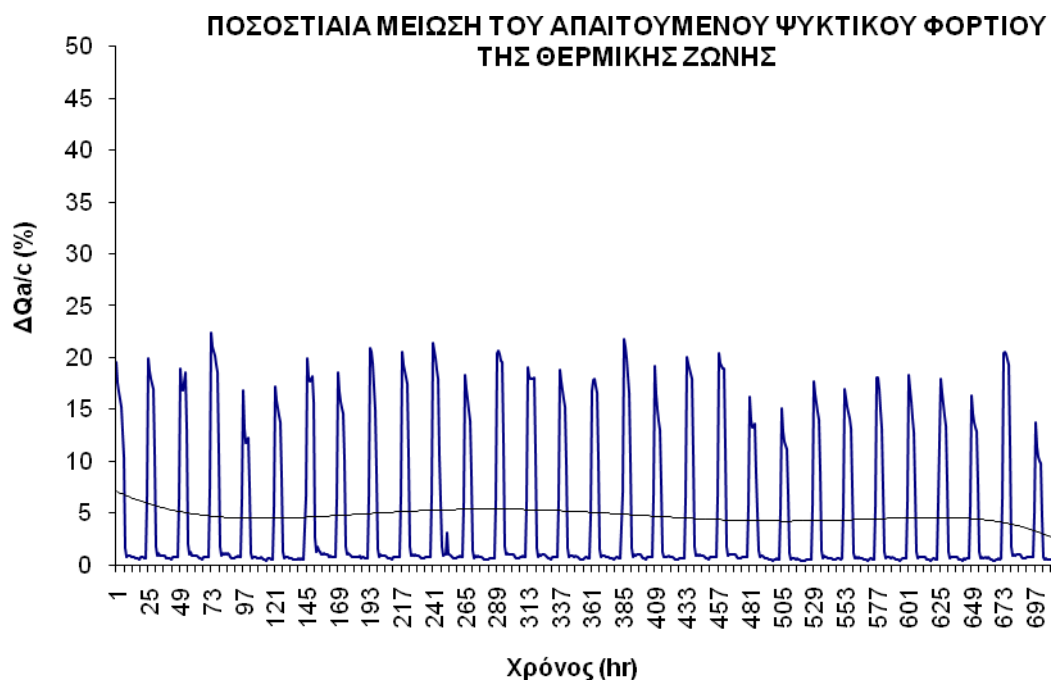


Διάγραμμα 2.5.60: Ποσοστιαία μείωση της θερμοκρασίας εντός της θερμικής ζώνης κατά τον Αύγουστο.

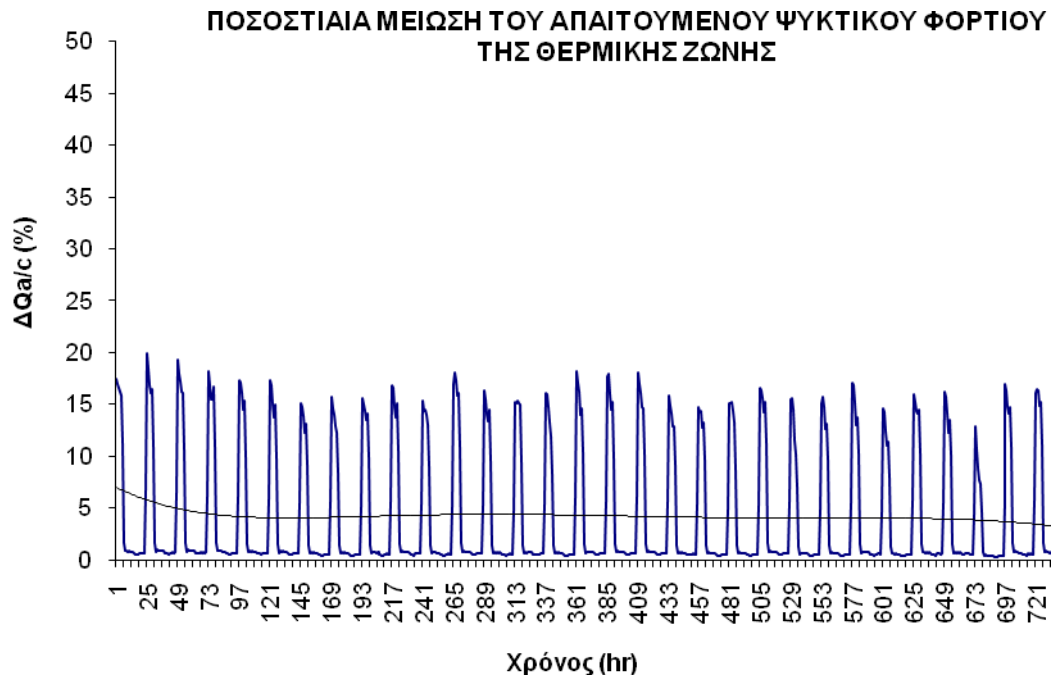


Διάγραμμα 2.5.61: Ποσοστιαία μείωση της θερμοκρασίας εντός της θερμικής ζώνης κατά το Σεπτέμβριο.

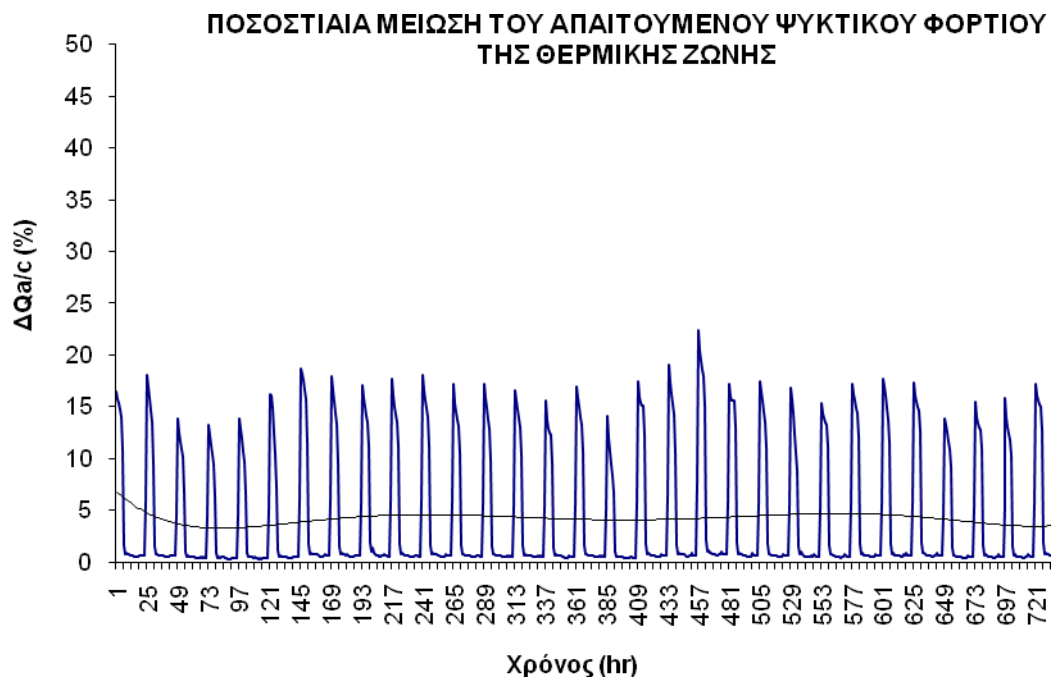
Έχοντας ως δεδομένο την ποσοστιαία μείωση της θερμοκρασίας εντός της θερμικής ζώνης, μπορεί να υπολογιστεί η μείωση και του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της κατοικίας:



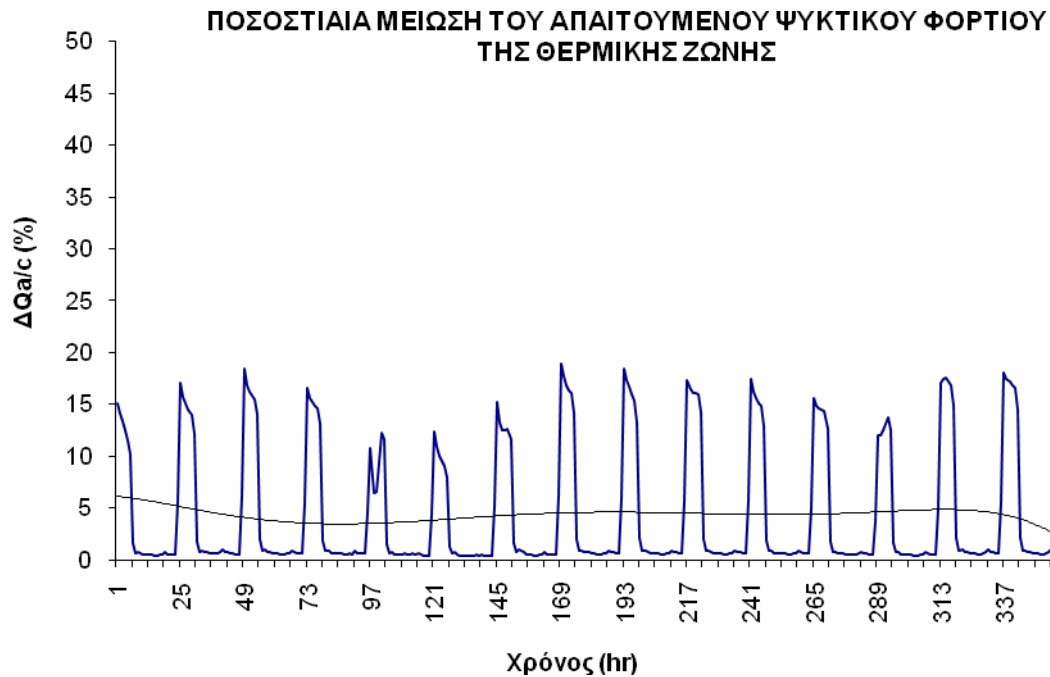
Διάγραμμα 2.5.62: Ποσοστιαία μείωση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για την κάλυψη των θερμικών κερδών της ζώνης σε μηνιαία βάση για τον Ιούνιο.



Διάγραμμα 2.5.63: Ποσοστιαία μείωση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για την κάλυψη των θερμικών κερδών της ζώνης σε μηνιαία βάση για τον Ιούλιο.



Διάγραμμα 2.5.64: Ποσοστιαία μείωση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για την κάλυψη των θερμικών κερδών της ζώνης σε μηνιαία βάση για τον Αύγουστο.



Διάγραμμα 2.5.65: Ποσοστιαία μείωση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για την κάλυψη των θερμικών κερδών της ζώνης σε μηνιαία βάση για τον Σεπτέμβριο.

Παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα της μείωσης του ψυκτικού φορτίου παρουσιάζουν ακρότατα, ελάχιστα και μέγιστα, στα αντίστοιχα σημεία με τα προηγούμενα διαγράμματα για τις θερμοκρασίες. Αυτό εξηγείται απλά υπενθυμίζοντας την σχέση από την οποία υπολογίσαμε το φορτίο:

$$Q_{a/c} = [k (T_{out} - T_{in}) + Q_{tot}]^+$$

Το δεξί μέλος αποτελείται από δύο όρους. Τη ροή θερμότητας λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας εντός και εκτός ζώνης και από τα πάγια θερμικά κέρδη εντός της κατοικίας. Με τον όρο πάγια, εννοούμε ότι και για τις δύο περιπτώσεις θα είναι σταθερά. Μόνο ο πρώτος όρος μπορεί να αλλάξει για τις δύο περιπτώσεις, όπως και γίνεται, αφού η θερμοκρασία T_{in} μειώθηκε μετά την επιβολή του ψυκτικού φορτίου από τον ακτινοβολητή. Έτσι, με γνωστή τη διακύμανση της μείωσης της θερμοκρασίας, η αντίστοιχη διακύμανση της μείωσης του ψυκτικού φορτίου κρίνεται λογική. Τα μέγιστα σημειώνονται κατά τις ώρες λειτουργίας του ακτινοβολητή και ανέρχονται σε 20~25%, ενώ τα ελάχιστα κατά την ημέρα περί το 3%.

Στο σημείο αυτό εισάγουμε την έννοια της θερμικής άνεσης για τους ενοίκους. Σύμφωνα με την Αμερικανική Επιστημονική Εταιρία Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning), ως θερμική άνεση ορίζεται η κατάσταση του μυαλού κατά την οποία ένα άτομο δεν επιθυμεί καμία θερμική αλλαγή του εσωτερικού περιβάλλοντος και εκφράζει ικανοποίηση με τις επικρατούσες θερμικές συνθήκες. Όπως είναι προφανές η κατάσταση στην οποία ένα άτομο αισθάνεται θερμικά άνετα έχει υποκειμενικό χαρακτήρα. Έτσι στον ίδιο χώρο είναι δυνατόν κάποιο άτομο να εκφράζει την ικανοποίησή του για τις θερμικές συνθήκες, ενώ κάποιο άλλο άτομο τη δυσaráσκειά του. Η λέξη άνεση εμπεριέχει ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων που την ορίζουν κάθε φορά για κάθε άτομο. Για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω κατηγοριοποίηση:

Εργασία	Μεταβολική δραστηριότητα [W]	Ρουχισμός [clo]	Θερμοκρασία άνεσης $T_a(\text{comf})$ [$^{\circ}\text{C}$]	Συνθήκες μετρήσεων: θερμοκρασία αέρα = μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, πίεση ατμών = 10 hPa, ταχύτητα αέρα = 0.1 m/s.
Ηρεμία	0	0,5	31	Πηγή: Peter Höppe, Ivo Martinac, 1998, <i>Biometeorology, Indoor Climate and Air Quality</i> .
	0	1,0	29	
Καθιστική εργασία	43	0,5	27	
	43	1,0	23	
Ελαφριά εργασία	100	0,5	22	
	100	1,0	16	
Έντονη εργασία	20	0,5	12	

Σχήμα 2.5.5: Καθορισμός της θερμοκρασίας άνεσης με κριτήρια το είδος εργασίας, τη μεταβολική δραστηριότητα και τον ρουχισμό.

Με δεδομένο τον τύπο του κτιρίου της εργασίας, κατοικία, θεωρούμε ότι οι ένοικοι θα εμπίπτουν στην κατηγορία της ηρεμίας. Η θερμοκρασία άνεσης για την κατηγορία αυτή κυμαίνεται από 29~31 $^{\circ}\text{C}$, ανάλογα με το επίπεδο ρουχισμού. Όμως, αφού πρόκειται για θερινή περίοδο επιλέγουμε την πρώτη κατηγορία για 0,5 μονάδες ρουχισμού. Άρα, θέτουμε την θερμοκρασία Άνεσης $T_a(\text{comfort}) = 31^{\circ}\text{C}$. Δηλαδή, με βάση τον παραπάνω ορισμό της θερμικής άνεσης, θεωρούμε ότι μόλις η εσωτερική θερμοκρασία ξεπεράσει το όριο που θέσαμε, οι ένοικοι θα απωλέσουν την άνεσή τους και θα επιθυμήσουν να αλλάξουν τις θερμικές συνθήκες της κατοικίας. Το πιο σύνηθες μέτρο που λαμβάνεται τα τελευταία χρόνια από τα Ελληνικά νοικοκυριά, είναι η εγκατάσταση κλιματιστικού. Έτσι, θέτουμε την θερμοκρασία $T_a(\text{comfort}) = 31^{\circ}\text{C}$ σαν κριτήριο για το αν θα λειτουργούν το κλιματιστικό τους ή όχι οι ένοικοι της υπό εξέταση κατοικίας. Με βάση αυτή την παραδοχή, βρήκαμε ότι

με την προσθήκη της διάταξης του ακτινοβολητή, οι ένοικοι θα χρησιμοποιούσαν περίπου 38% λιγότερες ώρες το κλιματιστικό τους. Εκτιμούμε ότι για να ικανοποιηθεί ψυκτικά η υπό εξέταση ζώνη (80m²) θα χρειαζόταν δύο κλιματιστικά της τάξης των 22.000 Btu περίπου, ήτοι 44.000 Btu. Με την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας να ανέρχεται σε 0,07 €/kWh και για 12,9 kWh συνολική κατανάλωση των δύο κλιματιστικών, το υποθετικό νοικοκυριό της κατοικίας θα εξοικονομούσε περίπου 200 € για τη χρονική περίοδο που εξετάζουμε.

Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Συνοψίζοντας, η ψύξη δια ακτινοβολίας είναι μια αρκετά σημαντική μέθοδος παθητικής ψύξης, που ,υπό συγκεκριμένες συνθήκες, μπορεί να συνεισφέρει στον θερμικό έλεγχο ενός κτιρίου. Το φυσικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίζεται η λειτουργία αυτού του τύπου παθητικής ψύξης, περιορίζει τις εφαρμογές που θα μπορούσε να έχει αυτή η μέθοδος. Οι βέλτιστες συνθήκες για έναν νυκτερινό ακτινοβολητή είναι τα ξηρά κλίματα (δηλαδή, με χαμηλές τιμές σχετικής υγρασίας RH%), με χαμηλούς δείκτες νεφώσεων και χαμηλές ταχύτητες ανέμου κατά τις καλοκαιρινές νύκτες. Υπό τέτοιες συνθήκες όλες οι δυνατές εφαρμογές ακτινοβολητών μεγιστοποιούνται. Ακτινοβολητές σε περιοχές με ιδανικές συνθήκες, όπως αυτές που περιγράφηκαν, μπορούν να μειώσουν τη θερμοκρασία του εισαγόμενου ατμοσφαιρικού αέρα κατά 3~4°C στη νυκτερινή τους λειτουργία. Ακόμη και σε υγρότερα κλίματα, αλλά με καθαρό ουρανό και χαμηλές ταχύτητες ανέμου, θα μπορούσε ένας ακτινοβολητής να αποτελέσει ικανοποιητική λύση. Σε τέτοιες εφαρμογές, ο νυκτερινός αέρας μπορεί να ψυχθεί κατά 2~3°C και επιπροσθέτως να απωλέσει και μέρος της υγρασίας του, όπως αυτή συμπυκνώνεται στην εσωτερική επιφάνεια του ψυχρότερου ακτινοβολητή. Αντιθέτως, σε περιοχές με αυξημένες νεφώσεις ή/και ισχυρούς νυκτερινούς ανέμους η απώλεια θερμότητας μετριάζεται αρκετά. (όπως είδαμε να συμβαίνει στην περίπτωσηή μας) Συνήθως, σε τέτοιες περιπτώσεις η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται μόνο κατά 1°C, τιμή που δεν μπορεί να επιφέρει τα επιθυμητά ψυκτικά φορτία για το υπόψη κτίριο.

Η κατάσταση είναι πολύ διαφορετική όταν η απώλεια θερμότητας με νυκτερινή εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, συμπληρώνεται από συναγωγή, όπως στην περίπτωση οροφής με μεγάλη θερμική μάζα με συμπληρωματική κινητή μόνωση. Σε τέτοιες περιπτώσεις ακτινοβολητών με μεγάλη θερμική μάζα, η θερμοκρασία τους παραμένει υψηλότερη από την ατμοσφαιρική σχεδόν όλο το βράδυ. Στην απώλεια θερμότητας δια ακτινοβολίας προστίθεται και η συναγωγή με τον άνεμο, που εδώ παίζει σημαντικό ρόλο στην

ψύξη της θερμικής μάζας. Το ίδιο συμβαίνει και σε περιπτώσεις όπου ο ακτινοβολητής συντίθεται από θερμοσιφωνικά πάνελ χωρίς υάλινη επικάλυψη. Τότε, το νερό που κυκλοφορεί τις νυκτερινές ώρες στα πάνελ με μηχανικό τρόπο, χρησιμοποιείται για να ψύξει τη θερμική μάζα, που είναι είτε δεξαμενή νερού, είτε η ίδια η τσιμεντένια οροφή με ενσωματωμένες σωλήνες νερού. Ακτινοβολητές με μεγάλη μάζα σε συνεργασία με τη νυκτερινή συναγωγή με τον περιβάλλοντα αέρα και με την κινητή μόνωση κλειστή κατά την ημέρα, μπορούν να αποδώσουν αρκετά καλύτερα εκεί που οι μικροί μεταλλικοί ακτινοβολητές δεν αποδίδουν.

Όσο αφορά την εγκατάσταση του ακτινοβολητή, λόγω της χαμηλής έντασης του ψυκτικού φορτίου που παράγεται, χρειάζεται να έχει μεγάλες διαστάσεις, ώστε να αποδίδει σημαντική ψύξη για ένα κτίριο. Αφού η πιο λογική θέση για εγκατάσταση είναι η οροφή, αυτή η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε μονοκατοικίες και στις ταράτσες των πολυόροφων κτιρίων. Επίσης, ο τύπος της οροφής, από κατασκευαστικής άποψης, καθορίζει το είδος του ακτινοβολητή που μπορεί να εφαρμοστεί στο δεδομένο κτίριο. Για παράδειγμα, μόνο οροφές που αντέχουν φορτίο 200 με 300 Kg/m² μπορούν να υποστηρίξουν δεξαμενή νερού. Επιπλέον, μόνο τσιμεντένιες οροφές με πάχος τουλάχιστον 25cm μπορούν να παράσχουν την απαιτούμενη θερμική μάζα για να λειτουργήσουν ως νυκτερινοί ακτινοβολητές με κινητή μόνωση για την ημέρα.

Κτίρια με οροφές που δεν αντέχουν τέτοια μεγάλα στατικά φορτία, μπορούν να χρησιμοποιήσουν μόνο ελαφρούς μεταλλικούς ακτινοβολητές. Σε τέτοιες περιπτώσεις όπου απουσιάζει η απαιτούμενη θερμική μάζα, το ψυκτικό φορτίο από τον ακτινοβολητή μετουσιώνεται σε άμεση πρόσδοση ψυχρού αέρα εντός του κτιρίου για να ικανοποιηθούν οι συνθήκες θερμικής άνεσης. Σε περιοχές όπου ακόμη και τα απογεύματα η θερμοκρασία είναι ψηλή, κτίρια τέτοιου τύπου θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν άμεσα τον ψυχρό αέρα ,προφανώς γιατί οι ένοικοι δραστηριοποιούνται τις απογευματινές και νυκτερινές ώρες και χρειάζονται την ψύξη εκείνες τις ώρες. Έτσι, η παροχή αέρα που είναι ψυχρότερος από τον ατμοσφαιρικό, θα είχε πολύ καλά αποτελέσματα. Τέτοια κτίρια θα μπορούσαν να είναι δημόσιοι χώροι, οι οποίοι είναι κατειλημμένοι κυρίως βραδινές ώρες και χρειάζονται υψηλούς ρυθμούς εξαερισμού, όπως θέατρα και άλλες τέτοιου τύπου αίθουσες.

Αυξάνοντας την ταχύτητα της ροής του αέρα εντός του ακτινοβολητή, για να ικανοποιηθούν οι ανάγκες εξαερισμού ενός κτιρίου, οδηγεί σε μικρότερη πτώση της θερμοκρασίας του αέρα, αλλά σε μεγαλύτερη απόδοση της ψύξης (όπως συμβαίνει και στην περίπτωση μας). Βέβαια, με μείωση της θερμοκρασίας του αέρα της τάξης των 1~2 °C, αλλά με μεγάλη ταχύτητα της ροής, μπορεί να επιτευχθεί αρκετά καλό αποτέλεσμα.

Εκτός όμως από τις δυσκολίες που παρουσιάζονται λόγω κλιματολογικών συνθηκών, αυτή η μέθοδος ψύξης δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στην πράξη, γιατί το κοινό, αλλά και όσοι ασχολούνται με την οικοδομή, δεν γνωρίζουν τις αρχές του φαινομένου, αλλά και τις προοπτικές ψύξης που μπορεί να προσφέρει. Επιπλέον, ενώ η εφαρμογή της δεξαμενής νερού απέφερε αρκετά καλά αποτελέσματα, δεν έγινε ιδιαίτερα γνωστή στο εμπόριο εξαιτίας της δυσκολίας στην εγκατάσταση και στη συντήρηση. Όπως είδαμε και προηγουμένως, ένα κτίριο που θα εφαρμόσει κάποιο σύστημα ψύξης με ακτινοβολία πρέπει να έχει σχεδιαστεί κατάλληλα από πριν, μιας και δεν είναι εύκολες οι μετέπειτα επεμβάσεις.

Ενδεχομένως, νέα υλικά που θα αύξαναν την αποδοτικότητα του συστήματος, να το βοηθούσαν να γίνει ευρύτερα αποδεκτό από το κοινό. Ένα από αυτά θα ήταν ένα πολύ καλύτερο επικάλυμμα με καλή αγωγιμότητα στην υπέρυθη ακτινοβολία. Τότε θα αυξάνονταν πολύ η αποδοτικότητά του συστήματος και θα γίνονταν ανταγωνίσιμο στο εμπόριο. Επιπλέον, η κατασκευή του συστήματος του ακτινοβολητή είναι ακόμη ακριβή και πολύπλοκη για έναν απλό τεχνίτη του χώρου της οικοδομής. Έτσι, ενώ συστήματα ακτινοβολητών έχουν εξεταστεί σε πολλά μέρη ανά τον κόσμο, πολύ λίγες εφαρμογές του έγιναν τελικά πράξη, πόσο μάλλον ευρύτερα γνωστά.

Ένα ακόμη θέμα που αφορά την απόδοση του ακτινοβολητή, είναι η μαθηματική του μοντελοποίηση. Για όλες τις γνωστές εφαρμογές που μπορεί να αντιμετωπίσει κάποιος, θα πρέπει κατά κάποιο τρόπο να υποθέσει τις τιμές των νεφώσεων και του θερμικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας μεταξύ ανέμου και ακτινοβολητή. Οι δύο αυτές τιμές, δεν μπορούν παρά να είναι πρόχειρες εκτιμήσεις. Για αυτό το λόγο, αρκετοί μελετητές προτείνουν την πειραματική μέτρηση του πιο σημαντικού μεγέθους για έναν ακτινοβολητή, που είναι η θερμοκρασία παύσης, «Stagnation Temperature».

Όσο αφορά την περίπτωση του ακτινοβολητή στην περιοχή της Αθήνας, όπως αυτός μελετήθηκε στην παρούσα εργασία, επαλήθευσε τα παραπάνω συμπεράσματα. Ενώ οι τιμές της σχετικής υγρασίας δεν ήταν απαγορευτικές για μια τέτοια εφαρμογή, διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα του ανέμου έφτανε σε τέτοια επίπεδα, ώστε να επηρεάζει αισθητά την απόδοση του ακτινοβολητή. Βέβαια, η μελέτη αφορούσε εν γένει την περιοχή της Αθήνας και τον μέσο όρο των διαφόρων μεταβλητών που πραγματεύτηκαν. Ακολουθώντας τη συμβουλή των διαφόρων μελετητών για πειραματικό προσδιορισμό της θερμοκρασίας παύσης T_{st} , ενδεχομένως να μας έδινε διαφορετικά αποτελέσματα. Επιπλέον, το γεγονός ότι αναφερόμαστε σε αστικό περιβάλλον και όχι στην ύπαιθρο είχε επίδραση στους υπολογισμούς της εξωτερικής σκίασης του κτιρίου μας. Αν θέλαμε όμως να γίνουμε πιο ακριβείς για την απόδοση του ακτινοβολητή και

πάλι θα έπρεπε να λάβουμε μετρήσεις με πειραματικό τρόπο από την ακριβή θέση ενός κτιρίου εντός της πόλης.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη μειωμένη θερμοκρασία της θερμικής ζώνης είναι αρκετά ενθαρρυντικά (υπενθυμίζουμε μείωση της μέσης θερμοκρασίας για την υπό εξέταση περίοδο ανέρχεται σε 4°C), η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται κρίνεται άκρως ικανοποιητική (μείωση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου κατά 12%) με τα ανάλογα οικονομικά οφέλη για το υποτιθέμενο οικογενειακό νοικοκυριό της υπό εξέταση κατοικίας. Οι παραδοχές που έγιναν τόσο στο πρόγραμμα EnergyPlus, όσο και στους υπολογισμούς είχαν απλουστευτικό χαρακτήρα και δεν ξέφυγαν από τον στόχο της παρούσας εργασίας, ούτε αφαίρεσαν τη ρεαλιστικότητά της. Ο χαρακτήρας της οποίας ήταν η εξοικονόμηση ενέργειας με τη βοήθεια του ακτινοβολητή και όχι η αντικατάσταση μιας κλιματιστικής μονάδας από αυτόν. Τελικά, αποδείξαμε ότι στην περιοχή της Αθήνας θα υπήρχε καλή προοπτική για την εφαρμογή της ψύξης δια ακτινοβολίας, πάντα βέβαια σε ερευνητικό επίπεδο, γιατί στην πράξη είδαμε ότι υπάρχουν ακόμη αρκετά εμπόδια που πρέπει να υπερπηδηθούν ώστε να γίνει η μέθοδος αυτή προσιτή και άμεσα εφαρμόσιμη.

Δεδομένης της σημασίας που δίνεται προς την εξοικονόμηση ενέργειας στον τομέα των κτιρίων, θα άξιζε η περαιτέρω μελέτη αυτής της μεθόδου. Τα κλιματολογικά δεδομένα της Αθήνας είναι ενθαρρυντικά, αλλά χρειάζεται να εκμεταλλευτούν με το σωστό τρόπο. Διαπιστώσαμε ότι το ισχυρό αιολικό δυναμικό που αναπτύσσεται κατά τους θερινούς μήνες στην Ελλάδα, γνωστό ως «μελτέμια» έχει αρνητική επίδραση για έναν ακτινοβολητή χωρίς ανεμοθώρακα. Άρα, μελλοντικά θα έπρεπε να ερευνηθεί, αν για την ίδια περίοδο και υπό τις ίδιες ατμοσφαιρικές συνθήκες συνθήκες ένας ακτινοβολητής με ανεμοθώρακα θα μπορούσε να έχει καλύτερη απόδοση. Επιπλέον, θα μπορούσε να ερευνηθεί η περίπτωση, όπου σαν ακτινοβολητής θα ενεργούσε η ίδια η οροφή του κτιρίου. Σε αυτήν την περίπτωση, η αυξημένη ένταση του ανέμου θα λειτουργούσε υπέρ του ακτινοβολητή, όπως είδαμε και στη θεωρία. Ακόμη, στην παρούσα εργασία μελετήθηκε μία μονοκατοικία, όπου υποθέσαμε ότι διαμένει μια ολιγομελής τυπική οικογένεια με συγκεκριμένες ενεργειακές ανάγκες. Η κατασκευή του κτιρίου χαρακτηρίστηκε ως μέτρια, όσο αφορά τη θερμική μάζα. Ένα μικρό κτίριο με την ίδια εφαρμογή ακτινοβολητή, αλλά με μεγαλύτερη θερμική μάζα ίσως να αποθήκευε καλύτερα το ψυκτικό φορτίο του ακτινοβολητή, παρέχοντας μεγαλύτερη μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας της θερμικής ζώνης και με μεγαλύτερη χρονική υστέρηση. Έτσι, θα πετυχαίναμε καλύτερες συνθήκες άνεσης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κατά την ημέρα. Επίσης, θα άξιζε να διερευνηθεί η απόδοση του ακτινοβολητή και για άλλα κτίρια (πολυόροφα, κτίρια με γραφεία, δημόσια κτίρια κλπ). Βέβαια, σε αυτές τις περιπτώσεις θα έπρεπε να αυξηθεί το μέγεθος του ακτινοβολητή, καθώς και να μελετηθεί το ενδεχόμενο για διαφορετικό ψυκτικό μέσο με μεγαλύτερη

θερμοχωρητικότητα από αυτή του αέρα (πχ. νερό). Τότε, με κατάλληλη διάταξη θα μπορούσαμε να φτιάξουμε ένα υβριδικό σύστημα με μηχανική ώθηση (αντλίες) και να στέλνουμε το ψυκτικό φορτίο του ακτινοβολητή σε περισσότερες από μία ζώνες του κτιρίου. Επίσης, θα μπορούσε να γίνει μία άλλη μελλοντική μελέτη για το κατά πόσο και πως θα μπορούσαμε να αποθηκεύουμε το ψυκτικό φορτίο του ακτινοβολητή για χρήση όλο το 24ωρο και όχι μόνο τις νυκτερινές ώρες. Τέλος, θα άξιζε να μελετηθεί η εξοικονόμηση θερμότητας που θα επιτυγχάναμε σε ετήσια βάση, αν στην ίδια διάταξη αντιστρέψαμε το ωράριο λειτουργίας για τους ψυχρούς μήνες του έτους, όπως ακριβώς περιγράφηκε στη θεωρία. Έτσι, θα είχαμε μια πιο ολοκληρωμένη λύση με παθητική ψύξη το καλοκαίρι και παθητική θέρμανση το χειμώνα.

Βιβλιογραφία:

Διεθνής βιβλιογραφία:

1. Abrams DW. (1987). *Low-Energy Cooling*, New York: Van Nosrand Reinhold company.
2. Argiriou, A. – Santamouris, M. – Assimakopoulos, DN. (1994). *Assessment of the radiative cooling potential of a collector using hourly weather data*, Energy, 19, pp. 879-888.
3. Asimakopoulos, MN. – Mihalakakou, G. – Flokas, HA. (2007). *Simulating the thermal behavior of a building during summer period in the urban environment*, Renew Energy, 32, pp. 1805-16.
4. Bagiorgas HS and Mihalakakou G. (2008). *Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling*. Renew Energy, 33, pp. 1220-1227.
5. Cook J. (1989). *Passive cooling*, Cambridge, MA: MIT Press.
6. Eurostat (2004). *Energy, transport and environmental indicators*, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
7. Givoni B. (1994). *Passive and low energy cooling of buildings*, New York: Wiley.
8. Ito S. and Miura N. (1989). *Studies of radiative cooling systems for storing thermal energy*. ASME J Sol Energy Eng, 111, pp. 251-7.
9. Mihalakakou, G. – Ferrante, A. – Lewis, JO. (1998). *The cooling potential of a metallic nocturnal radiator*. Energy and Buildings, 28, pp.251-256.
10. Parker DS. (2005). *Theoretical Evaluation of the Night Cool Nocturnal Radiation Cooling Concept*, Florida Solar Energy Center.
11. Santamouris M. and Asimakopoulos DN. (1996). *Passive cooling of buildings*. London: James & James.

Ελληνική βιβλιογραφία:

1. Αντωνόπουλος, ΚΑ. (2007). *Κλιματισμός – μέρος πρώτο*, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
2. Αντωνόπουλος, ΚΑ. (2006). *Ηλιακή Ενέργεια*, Ε.Μ.Π, Αθήνα.
3. Αντωνόπουλος, ΚΑ. (2005). *Υπολογιστικές μέθοδοι φαινομένων μεταφοράς – μέρος πρώτο*, Ε.Μ.Π, Αθήνα.
4. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.) (2002). *Βιοκλιματικός σχεδιασμός στην Ελλάδα*, Εκδόσεις Κ.Α.Π.Ε., Πικέρμι Αττικής.
5. Παπαδόπουλος, ΑΜ. (2006). *Θερμική άνεση στα κτίρια. Νέα πρότυπα και βελτίωση θερμικής άνεσης στα κτίρια*, Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη.

Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις:

1. www.cres.gr
2. www.energytoolbox/ashrae.com
3. www.apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus.com
4. www.sciencedirect.com
5. www.wikipedia.org
6. www.jeffvail.net
7. www.builditsolar.com
8. www.solarmirror.com
9. <http://people.csail.mit.edu/jaffer/cool>
10. solarcycle24com.proboards.com/index.cgi?board..
11. www.hnms.gr