

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Εξοικονόμηση ενέργειας και βελτίωση του μικροκλίματος με
ψυχρές και πράσινες στέγες»**

ΠΑΠΠΑ ΑΝΤΙΓΟΝΗ



Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Κολοκοτσά Διονυσία (επιβλέπουσα)

Λαζαρίδης Μιχάλης

Τσούτσος Θεοχάρης

Χανιά

Ιούνιος 2014

Στους γονείς μου,
Αγγελική και Παύλο

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα άτομα που βοήθησαν, ο καθένας με τον τρόπο του, στην πραγματοποίησή της.

Καταρχήν, ευχαριστώ την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κ. Διονυσία Κολοκοτσά για τη συνεργασία μας και την καθοδήγηση της, καθώς και γι' αυτά που διδάχτηκα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου από αυτήν. Επίσης, τους καθηγητές κ. Λαζαρίδη και κ. Τσούτσο, που δέχτηκαν να είναι στην εξεταστική επιτροπή και να αξιολογήσουν την παρούσα εργασία.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υποψήφιο Διδάκτορα Σωτήρη Παπαντωνίου, για τη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω την Έλενα, τη Χρύσα, την Αμάντα, και τα υπόλοιπα άτομα γύρω μου με τα οποία έχουμε μοιραστεί σημαντικές στιγμές.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τους γονείς μου, Αγγελική και Παύλο, για την αγάπη, την εμπιστοσύνη και τη στήριξη που μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση του ίδιου κτιρίου με δύο διαφορετικές στέγες, μια ψυχρή και μια πράσινη, με τη χρήση του προγράμματος EnergyPlus. Το κτίριο είναι μια διώροφη κατασκευή που προορίζεται για τη στέγαση γραφείων.

Αρχικά, γίνεται μια αναφορά στην ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας, στον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται το κλίμα της περιοχής καθώς και στα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση της ενέργειας στο αστικό περιβάλλον και που υποβαθμίζουν την ποιότητα ζωής στην πόλη.

Η χρήση ψυχρών υλικών και η φύτευση των στεγών αποτελούν μεθόδους οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν τη ζωή στις αστικές περιοχές καθώς μπορούν να συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση ενέργειας και παράλληλα να βελτιώσουν το μικροκλίμα.

Μέσω του προγράμματος EnergyPlus τροποποιήθηκε το αρχικό μοντέλο ενός κτιρίου με συμβατική στέγη, η οποία αντικαταστάθηκε αρχικά από μια ψυχρή και έπειτα από μια πράσινη στέγη, ώστε να γίνει η προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς της στέγης για τα δύο αυτά σενάρια. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για μια τυχαία ημέρα του καλοκαιριού για την περιοχή των Χανίων.

Και για τις δύο περιπτώσεις γίνεται μια ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να μελετηθεί η επίδραση που έχουν οι αλλαγές των παραμέτρων του μοντέλου στα αποτελέσματα. Στις ψυχρές στέγες γίνονται μεταβολές κυρίως στην ηλιακή απορροφητικότητα του υλικού, ενώ στις πράσινες μεταβάλλεται το ύψος της βλάστησης, ο δείκτης επιφάνειας του φυλλώματος κ.α. Μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων ακολουθεί η επιλογή των χαρακτηριστικών της ψυχρής και της πράσινης στέγης.

Αφού έχει δημιουργηθεί το τελικό μοντέλο της πράσινης και της ψυχρής στέγης, εκτελείται για δυο διαφορετικές πόλεις ώστε να εξεταστεί η επίδραση των καιρικών συνθηκών στην ενεργειακή απόδοση της στέγης.

Τέλος, ακολουθεί μια συνολική σύγκριση μεταξύ της ψυχρής και της πράσινης στέγης. Εξετάζεται η ροή της ενέργειας στις δύο περιπτώσεις, το φορτίο ψύξης, η δυνατότητα εφαρμογής, το κόστος καθώς και τα οφέλη που προσφέρουν τα δύο είδη στέγης.

Abstract

The purpose of this thesis is the simulation of a building with two different types of roof, a cool roof and a green one, using the program EnergyPlus. The building that consists of two floors is intended to accommodate offices.

At first, is mentioned the need of saving energy, the way that a region's climate is affected, as well as the environmental problems resulting from the energy use that degrade the quality of life in a city.

The use of cool materials and the planting of the roofs are methods that can improve the quality of life in the cities as they can contribute to the efficient energy use while improving the microclimate.

Through EnergyPlus the original model of a building with a conventional roof was modified, and the roof was initially replaced by a cool roof and then by a green one, to make the simulation of the energy performance for these two scenarios. The simulation was performed on a random summer day for the region of Chania.

For both cases a sensitivity analysis is performed, to understand the effect on the results when changing the model's parameters. In the case of the cool roof there are changes to the solar absorption of the material, while in the case of the green roof varies the height of vegetation, the leaf area index etc. The processing of the results is followed by the selection of the characteristics of the cool and the green roof.

Once the final model of the green and the cool roof is created, it is executed for two different cities in order to examine the effect of the weather conditions on the energy performance of the building.

Finally, follows an overall comparison between the cool and the green roof. The flux of the energy, the cooling loads, the possibility of applying these roofs, the cost and the benefits of these types of roofs are the parameters of this comparison.

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Σύγκριση μεταξύ θερμών και ψυχρών στεγών: συντελεστές ηλιακής ανάκλασης και υπέρυθρης εκπομπής

Πίνακας 3.1: Οι τύποι της πράσινης στέγης και τα χαρακτηριστικά τους

Πίνακας 4.1: Τα δομικά στοιχεία του κτιρίου και οι ιδιότητές τους.

Πίνακας 4.2: Τα χαρακτηριστικά των υαλοπινάκων

Πίνακας 4.3: Η δομή της ψυχρής στέγης και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων της

Πίνακας 4.4: Τα αρχικά χαρακτηριστικά της πράσινης στέγης

Πίνακας 4.5 : Η δομή της στέγης στην περίπτωση της πράσινης

Πίνακας 4.6: Λίστα μεταβλητών για τη ροή θερμότητας με ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος

Πίνακας 4.7: Λίστα μεταβλητών του αλγορίθμου TARP

Πίνακας 4.8: Πολλαπλασιαστές τραχύτητας της επιφάνειας

Πίνακας 4.9: Λίστα μεταβλητών του μοντέλου DOE-2

Πίνακας 4.10: Ατμοσφαιρικές μεταβλητές για δυο διαφορετικά υψόμετρα

Πίνακας 4.11: Συντελεστές του προφίλ της ταχύτητας του ανέμου

Πίνακας 5.1: Οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες για τις τρεις πόλεις

Πίνακας 5.2: Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της σχετικής υγρασίας για τις τρεις πόλεις

Πίνακας 5.3: Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου για τις τρεις πόλεις

Πίνακας 5.4: Οι μέγιστες τιμές της άμεσης ακτινοβολίας για τις τρεις πόλεις

Πίνακας 5.5: Οι μέγιστες τιμές της άμεσης ακτινοβολίας για τις τρεις πόλεις

Πίνακας 6.1: Οι μεταβολές ανά περίπτωση για την ψυχρή στέγη

Πίνακας 6.2: Η θερμότητα που έχει ανταλλαχθεί κατά το χρονικό διάστημα 10:00 έως 18:00 στην περίπτωση της ψυχρής στέγης

Πίνακας 6.3: Τα ποσοστά μείωσης της ροής της θερμότητας κατά το χρονικό διάστημα 10:00 έως 18:00 στην περίπτωση της ψυχρής στέγης

Πίνακας 6.4: Οι μεταβολές ανά περίπτωση για την πράσινη στέγη

Πίνακας 6.5: Η θερμότητα που έχει ανταλλαχθεί κατά το χρονικό διάστημα 10:00- 18:00 στην περίπτωση της πράσινης στέγης

Πίνακας 6.6: Τα ποσοστά μείωσης της ροής της αισθητής θερμότητας κατά το χρονικό διάστημα 10:00 έως 18:00 στην περίπτωση της πράσινης στέγης

Πίνακας 6.7: Τα ποσοστά μείωσης της ροής της λανθάνουσας θερμότητας κατά το χρονικό διάστημα 10:00 έως 18:00 στην περίπτωση της πράσινης στέγης

Πίνακας 6.8: Τα τελικά χαρακτηριστικά της ψυχρής στέγης

Πίνακας 6.9: Τα τελικά χαρακτηριστικά της πράσινης στέγης

Πίνακας 8.1: Η συνολική ροή της θερμότητας και η ποσοστιαία διαφορά της για τις τρεις περιοχές για τα δύο είδη στέγης για το χρονικό διάστημα 10:00- 18:00

Πίνακας 8.2: Τα φορτία ψύξης του κτιρίου των τριών περιοχών για τα δύο είδη στέγης

Πίνακας 8.3: Το κόστος εγκατάστασης της πράσινης στέγης

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας

Εικόνα 1.2: Φωτογραφία και θερμογραφία περιοχής με άσφαλτο και βλάστηση

Εικόνα 1.3: Το φαινόμενο της αστικής χαράδρας

Εικόνα 2.1: Ψυχρή στέγη βαμμένη με οικολογικό χρώμα βασισμένο στο γάλα και στο ξύδι, σε κυβερνητικό κτίριο

Εικόνα 2.2: Διαμερίσματα με ψυχρή στέγη

Εικόνα 2.3: Ηλιακή ανακλαστικότητα και υπέρυθη εκπομπή για διάφορα υλικά ψυχρών στεγών

Εικόνα 3.1: Πράσινη στέγη στη Νορβηγία

Εικόνα 3.2: Οι κρεμαστοί κήποι της Βαβυλώνας, γκραβούρα του 16^{ου} αιώνα του Marteen van Heemskerck

Εικόνα 3.3: Ξενοδοχειακό συγκρότημα του αρχιτέκτονα Friedensreich Hundertwasser στο Bad Blumau, Αυστρία

Εικόνα 3.4: Απορροή ομβρίων υδάτων από υπόστρωμα φυτεμένων στεγών σε σύγκριση με στρώση χαλικιού σε δώματα

Εικόνα 3.5: Πράσινη στέγη εκτατικού τύπου

Εικόνα 3.6: Πράσινη στέγη ημιεντατικού τύπου

Εικόνα 3.7: Πράσινη στέγη εντατικού τύπου, Hundertwasserhaus, Βιέννη

Εικόνα 3.8: Τομή μιας τυπικής πράσινης στέγης

Εικόνα 4.1: Νοτιοανατολική όψη του κτιρίου

Εικόνα 4.2: Βορειοανατολική όψη του κτιρίου

Εικόνα 4.3: Η κεντρική κονσόλα του EnergyPlus

Εικόνα 4.4: Η προσθήκη της ψυχρής στέγης στο EnergyPlus

Εικόνα 4.11: Το ενεργειακό ισοζύγιο της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης

Εικόνα 4.12: Παράδειγμα της κατάστασης του χώρου για δύο κόμβους

Εικόνα 4.13: Απεικόνιση ενός στρώματος χωρίς μάζα ανάμεσα σε δύο στρώματα με μάζα

Εικόνα 4.14: Ο κώδικας του EnergyPlus για τον υπολογισμό των εξισώσεων μεταφοράς με αγωγή

Εικόνα 4.15: Το ενεργειακό ισοζύγιο της πράσινης στέγης

Εικόνα 6.1: Η φορά της ενέργειας στην ψυχρή στέγη

Εικόνα 6.2: Η ροή της ενέργειας στην πράσινη στέγη

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 5.1: Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας στις δύο πόλεις

Διάγραμμα 5.2: Η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας για τις δύο πόλεις

Διάγραμμα 5.3: Η ταχύτητα του ανέμου για τις δύο πόλεις

Διάγραμμα 5.4: Η άμεση ακτινοβολία για τις δύο πόλεις

Διάγραμμα 5.5: Η διάχυτη ακτινοβολία για τις δύο πόλεις

Διάγραμμα 6.1: Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης στα Χανιά

Διάγραμμα 6.2: Η μεταφορά της θερμότητας από τον αέρα στη στέγη στα Χανιά

Διάγραμμα 6.3: Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της πράσινης στέγης στα Χανιά

Διάγραμμα 6.4: Η μεταφορά της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στο έδαφος στα Χανιά

Διάγραμμα 6.5: Η μεταφορά της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στη βλάστηση στα Χανιά

Διάγραμμα 6.6: Η μεταφορά της λανθάνουσας θερμότητας από το έδαφος στον αέρα στα Χανιά

Διάγραμμα 6.7: Η μεταφορά της λανθάνουσας θερμότητας από τη βλάστηση στον αέρα στα Χανιά

Διάγραμμα 7.1: Η ροή της θερμότητας από τον αέρα στη στέγη για τις δύο περιοχές

Διάγραμμα 7.2: Η ροή της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στο έδαφος για τις δύο περιοχές

Διάγραμμα 7.3: Η ροή της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στη βλάστηση για τις δύο περιοχές

Διάγραμμα 7.4: Η ροή της λανθάνουσας θερμότητας από το έδαφος στον αέρα για τις δύο περιοχές

Διάγραμμα 7.5: Η ροή της λανθάνουσας θερμότητας από τον αέρα στη βλάστηση για τις δύο περιοχές

Διάγραμμα 8.4: Τα ημερήσια φορτία ψύξης του ορόφου

Διάγραμμα 8.5: Το φορτίο ψύξης του ισογείου για το χρονικό διάστημα 10:00- 18:00

Διάγραμμα 8.6: Το φορτίο ψύξης του ορόφου για το χρονικό διάστημα 10:00- 18:00

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	9
1.1. Η κατανάλωση ενέργειας για ψύξη στα κτίρια	10
1.2. Το κλίμα	11
1.3. Το αστικό περιβάλλον	13
1.4. Μεθοδολογία.....	17
2. Οι Ψυχρές Στέγες.....	18
2.1. Τα χαρακτηριστικά της ψυχρής στέγης	19
2.2. Πλεονεκτήματα της ψυχρής στέγης	21
2.3. Τα υλικά των ψυχρών στεγών	22
2.4. Ο χρόνος ζωής.....	24
3. Οι Πράσινες Στέγες	25
3.1. Πλεονεκτήματα της πράσινης στέγης.....	28
3.2. Τύποι πράσινων στεγών	32
3.3. Ο σχεδιασμός και τα δομικά στοιχεία της στέγης	35
3.4. Ο χρόνος ζωής.....	38
4. Η προσομοίωση κτιρίου με χρήση του προγράμματος EnergyPlus	39
4.1. Το μοντέλο του κτιρίου.....	40
4.2. Η προσομοίωση του κτιρίου	44
4.3. Το ενεργειακό ισοζύγιο της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης.....	49
4.4. Το ενεργειακό ισοζύγιο της φυτεμένης στέγης	67
4.5 Ατμοσφαιρική μεταβολή	81
5. Κλιματικές συνθήκες	86
6. Η επίδραση των χαρακτηριστικών στις στέγες	92
6.1. Η επίδραση των χαρακτηριστικών στις ψυχρές στέγες	93
6.2. Η επίδραση των χαρακτηριστικών στις πράσινες στέγες.....	96
6.3. Τα τελικά μοντέλα της ψυχρής και της πράσινης στέγης.....	103
7. Η επίδραση των κλιματικών συνθηκών	104
7.1. Η επίδραση των κλιματικών συνθηκών στην ψυχρή στέγη	105
7.2. Η επίδραση των κλιματικών συνθηκών στην πράσινη στέγη	106
8. Σύγκριση Ψυχρής και Πράσινης Στέγης.....	109
8.1. Η ροή της ενέργειας.....	110
8.2. Κόστος	115

9. Συμπεράσματα- Προτάσεις	117
10. Βιβλιογραφία	120
11. Παράρτημα	126

1. Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες το κλίμα του πλανήτη αλλάζει δραματικά. Ανάμεσα στις διάφορες επιπτώσεις που φέρνει αυτή η αλλαγή είναι τα θερμότερα και ξηρότερα καλοκαίρια και μάλιστα με παρατεταμένη διάρκεια σε σχέση με μερικές δεκαετίες πριν. Ακόμα οι περισσότερες αστικές περιοχές, όχι μόνο τα κέντρα των πόλεων, παρουσιάζουν μια σειρά από ομοιότητες που δρουν αρνητικά στην συνολική περιβαλλοντική εικόνα των πόλεων. Οι κυριότεροι είναι η πυκνή δόμηση, η χρήση θερμών υλικών, οι ελάχιστοι υπαίθριοι χώροι (πλατείες, πάρκα) καθώς και οι ελάχιστες πρασιές οδικών αξόνων με δενδροφυτεύσεις, ο μειωμένος δροσισμός και αερισμός, ο έντονος κυκλοφοριακός φόρτος που συνεπάγεται και υψηλή συγκέντρωση ανθρώπων και δραστηριοτήτων άρα και κατανάλωση ενέργειας καθώς και πολλοί άλλοι.

Αυτό μπορούμε να το αντιληφθούμε άμεσα και έντονα μετρώντας την θερμοκρασία σε ένα κέντρο μιας πόλης και συγκρίνοντάς το με την αντίστοιχη θερμοκρασία, την ίδια στιγμή, σε ένα προάστιο ή ακόμα και στο εσωτερικό ενός αστικού πάρκου όπου οι παραπάνω παράγοντες δρουν σε μικρότερο βαθμό. Θα παρατηρήσουμε ότι η θερμοκρασία είναι αισθητά μεγαλύτερη στο κέντρο της πόλης από ότι στις άλλες δύο περιπτώσεις.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονο ενδιαφέρον σχετικά με την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, και πιο συγκεκριμένα με τη στέγη τους, καθώς αποτελεί την επιφάνεια η οποία είναι περισσότερο εκτεθειμένη στις διάφορες καιρικές συνθήκες. Η χρήση ψυχρών υλικών και φυτεμένων επιφανειών μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του κτιρίου, καθώς και να βελτιώσει το μικροκλίμα.

1.1. Η κατανάλωση ενέργειας για ψύξη στα κτίρια

Η διαρκώς αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας αλλά και η επιδείνωση του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία και η επίλυση τους έχει γίνει επιτακτική ανάγκη σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι προσπάθειες συγκλίνουν στον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα από συμβατικά καύσιμα, με άμεση συνέπεια τον περιορισμό των ρύπων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα και κυρίως των αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ο τομέας των κτιρίων απορροφά, κατά μέση τιμή, το 40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Η ανά χώρα κύμανση ποικίλει από 20% για την Πορτογαλία, έως και 45% για την Ιρλανδία, ενώ στην Ελλάδα κυμαίνεται περίπου στο 30% (Σανταμούρης, 2009).

Η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στα μεγάλα αστικά κέντρα έχει συντελέσει στην δραματική αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για τον δροσισμό των κτιρίων κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια μια σημαντική αύξηση. Η ΔΕΗ αντιμετωπίζει ιδιαίτερο πρόβλημα την περίοδο του καλοκαιριού για να καλύψει τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια που οφείλεται κυρίως στη χρήση κλιματιστικών. Το φορτίο αιχμής πολλές φορές πλησιάζει σε απαγορευτικά υψηλά επίπεδα και η ΔΕΗ αναγκάζεται να εισάγει ηλεκτρική ενέργεια από

γειτονικές χώρες. Παρόλα αυτά, πολλές φορές δημιουργείται αστάθεια στο δίκτυο με κίνδυνο μπλακ άουτ. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η απαιτούμενη ενέργεια για τον δροσισμό ενός κτιρίου στο κέντρο της Αθήνας είναι σχεδόν διπλάσια από την απαιτούμενη στην περιφέρεια της πόλης (Σανταμούρης, 2009).

Η παραγωγή και η χρήση ενέργειας συμβάλει στο 80 % της αέριας ρύπανσης και σχεδόν στο 90 % των αερίων του θερμοκηπίου (Σανταμούρης, 2009). Η αύξηση των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και οι υψηλές εκπομπές μέρους των σύγχρονων δομικών υλικών συντελούν στην αύξηση της συγκέντρωσης ρυπαντών στο εσωτερικό και στον περιβάλλοντα χώρο του κτηρίου, με ιδιαίτερα σημαντικές συνέπειες στην υγεία των ανθρώπων.

Τα κέρδη από την εξοικονόμηση της ενέργειας στα κτήρια είναι πολλαπλά. Σε αυτά περιλαμβάνονται η ορθολογική χρήση της και η εξοικονόμηση φυσικών πόρων, η μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος στις πόλεις, οι καλύτερες συνθήκες διαβίωσης σε αυτές και φυσικά η εξοικονόμηση χρημάτων.

Σ' αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί και η κοινωνικοοικονομική διάσταση στο φαινόμενο αυτό. Ο πληθυσμός που δέχεται σε μεγαλύτερο βαθμό τις συνέπειες των παραπάνω φαινομένων ανήκει στα μεσαία και κατώτερα οικονομικά στρώματα. Το κόστος της μόνωσης των κτηρίων αλλά και τα ακριβότερα ενοίκια σε αναβαθμισμένες περιβαλλοντικά περιοχές έχουν ως αποτέλεσμα οι ομάδες αυτές να είναι εκτεθειμένες στις περιβαλλοντικές συνθήκες ή να ξοδεύουν περισσότερη ενέργεια για να εξασφαλίσουν τη θερμική τους άνεση.

1.2. Το κλίμα

Με τον όρο κλίμα χαρακτηρίζονται το σύνολο των παραγόντων που επηρεάζουν τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και περιγράφονται με τους εξής όρους: ηλιοφάνεια, θερμοκρασία, άνεμος, νέφη, υγρασία και άλλα.

Μπορούμε να το χωρίσουμε σε τρεις διαφορετικές ενότητες:

- ❖ Το Μάκρο-κλίμα που περιγράφει γενικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής π.χ. ηλιοφάνεια, άνεμος, υγρασία και άλλα.
- ❖ Το Μέσο-κλίμα που σχετίζεται με την τροποποίηση του μακροκλίματος από συγκεκριμένα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, π.χ. πεδιάδες, βουνά, επιφάνειες βλάστησης, υδάτινες επιφάνειες.
- ❖ Το Μίκρο-κλίμα που αναφέρεται σε μικρές γεωγραφικές ενότητες στις οποίες οι κλιματολογικές συνθήκες διαμορφώνονται σε μεγάλο βαθμό από τις ανθρώπινες επεμβάσεις στο περιβάλλον π.χ. βλάστηση, οικοδομικά υλικά, υγρασία λόγω εξάτμισης του νερού και άλλα.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το κλίμα και κατ' επέκταση το μεσοκλίμα και το μικροκλίμα και δεν οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες και επεμβάσεις είναι ο ήλιος και η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία της ατμόσφαιρας και ο άνεμος.

Η ηλιακή ακτινοβολία

Η θέση του ήλιου οπότε και η διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία περιοχή της επιφάνειας της γης διαφέρει κατά την διάρκεια της ημέρας αλλά και από εποχή σε εποχή. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι και το γεωγραφικό πλάτος διαφοροποιεί την διεύθυνση της ηλιακής δέσμης. Η θέση του ήλιου στον ουρανό σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή καθορίζεται από το ηλιακό ύψος και το αζιμούθιο. Η ηλιακή ακτινοβολία και το ποσοστό που φτάνει στην επιφάνεια της γης εξαρτάται από την σύσταση της ατμόσφαιρας και το μήκος της τροχιάς της ηλιακής δέσμης. Ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται στην ατμόσφαιρα και επιστρέφει στο διάστημα. Ένα άλλο φτάνει στην επιφάνεια της γης και ονομάζεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία μέρος της οποίας ανακλάται από την επιφάνεια της γης και διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Το υπόλοιπο φτάνει στην επιφάνεια της γης μετά από διάχυση στην ατμόσφαιρα που οφείλεται στην περιεχόμενη σκόνη και τους υδρατμούς και ονομάζεται διάχυτη ακτινοβολία.

Η θερμοκρασία του αέρα

Σε επίπεδο ορισμού η θερμοκρασία είναι το μέτρο της θερμικής κατάστασης ενός υλικού. Η μετάδοσή της θερμότητας γίνεται με συναγωγή, μεταφορά και ακτινοβολία. Η θερμοκρασία του αέρα εξαρτάται από τα αέρια ρεύματα που εισέρχονται σε αυτήν οδηγούμενα από τα καιρικά συστήματα και από τοπικές κλιματικές εισροές ενέργειας. Ανάλογα με την ταχύτητα των αέριων ρευμάτων η θερμοκρασία εξαρτάται περισσότερο ή λιγότερο από την ανακλώμενη ακτινοβολία του εδάφους. Με υψηλές ταχύτητες ρευμάτων αυτός ο παράγοντας επηρεάζει λιγότερο την θερμοκρασία του αέρα.

Ο άνεμος

Οι αέριες μάζες λόγω πολλών παραγόντων παρουσιάζουν διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις. Λόγω της αρχής της ισορροπίας των δυνάμεων οι αέριες μάζες με υψηλότερη πίεση κινούνται προς τις περιοχές με την χαμηλότερη πίεση. Η κίνηση αυτή είναι γνωστή ως άνεμος. Επίσης οι τοπικές συνθήκες και κυρίως η γεωμορφολογία τροποποιούν την κίνηση του ανέμου δημιουργώντας αποκλίσεις από την γενική κατεύθυνση του ανέμου καθώς και διαφορές στην θερμοκρασία και την πίεση. Σε αστικό επίπεδο, η ταχύτητα του ανέμου είναι αισθητά μικρότερη λόγω των κτιρίων, σε μικρό όμως ύψος πάνω από τα κτίρια η ταχύτητα του ανέμου επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα.

Η υγρασία

Ένα από τα κύρια συστατικά της ατμόσφαιρας είναι και οι υδρατμοί, το ποσοστό των υδρατμών στην ατμόσφαιρα αποκαλείται απόλυτη υγρασία. Την πιο κοινή έκφραση της ατμοσφαιρικής υγρασίας αποτελεί η σχετική υγρασία του αέρα. Αυτή χαρακτηρίζει το λόγο των υδρατμών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε μια δεδομένη τιμή θερμοκρασίας και πίεσης σε σχέση με την μέγιστη ποσότητα των υδρατμών την οποία ο αέρας είναι ικανός να κρατήσει στις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

Μια μεταβολή στη σχετική υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα μπορεί να προκληθεί με ένα από τους δυο παρακάτω τρόπους.

1. Αν υπάρχει μια ελεύθερη επιφάνεια νερού, η υγρασία μπορεί να αυξηθεί με την εξάτμιση. Αυτή η διεργασία είναι βαθμιαία και προϋποθέτει τη διάχυση των υδρατμών μέσα στην ατμόσφαιρα.
2. Όταν αυξάνει η θερμοκρασία του αέρα, παράλληλα αυξάνει και η ικανότητα του να συγκρατεί περισσότερη υγρασία. Σε μια τέτοια περίπτωση εφόσον δεν προστίθενται καινούρια ποσά υδρατμών η σχετική υγρασία θα ελαττωθεί. Αντίθετα, με τη μείωση της θερμοκρασίας η σχετική υγρασία αυξάνεται γιατί μειώνεται η ικανότητα κατακράτησης υδρατμών από τον αέρα.

1.3. Το αστικό περιβάλλον

Το περιβάλλον χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, το φυσικό και το ανθρωπογενές. Στο φυσικό περιβάλλον περιέχονται όλοι οι φυσικοί σχηματισμοί καθώς και οι κλιματολογικές συνθήκες κατά τόπους. Στο ανθρωπογενές περιβάλλον περιέχονται όλες οι επεμβάσεις του ανθρώπου στο φυσικό περιβάλλον και οι κλιματολογικές διαφορές που παρουσιάζει από το φυσικό. Είναι δηλαδή το λεγόμενο δομημένο ή αστικό περιβάλλον.

Έχει παρατηρηθεί ότι η θερμοκρασία στο κέντρο της πόλης είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία των προαστίων, γεγονός το οποίο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες προκαλεί δυσφορία και προβλήματα υγείας στους κατοίκους των πόλεων. Αν προστεθούν και οι ρύποι οι οποίοι απελευθερώνονται συνεχώς στο περιβάλλον, τότε καταλαβαίνει κανείς πως η θερμική δυσφορία και τα προβλήματα υγείας εντείνονται.

Αστικό μικροκλίμα

Τα αστικά μικροκλίματα είναι ιδιαίτερα περίπλοκα εξαιτίας του αριθμού και της ποικιλίας των παραγόντων που παρεμβαίνουν σε αυτά. Έτσι εκτός από το τοπικό περιβάλλον που καθορίζει την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία και τις συνθήκες ανέμου, καθώς και την τοπογραφική διαμόρφωση, παράγοντες που κατά κύριο λόγο είναι γνωστοί και

συγκεκριμένοι για κάθε περιοχή, το αστικό μικροκλίμα διαμορφώνεται και από πολλούς παράγοντες που καθορίζονται από την δομή της πόλης.

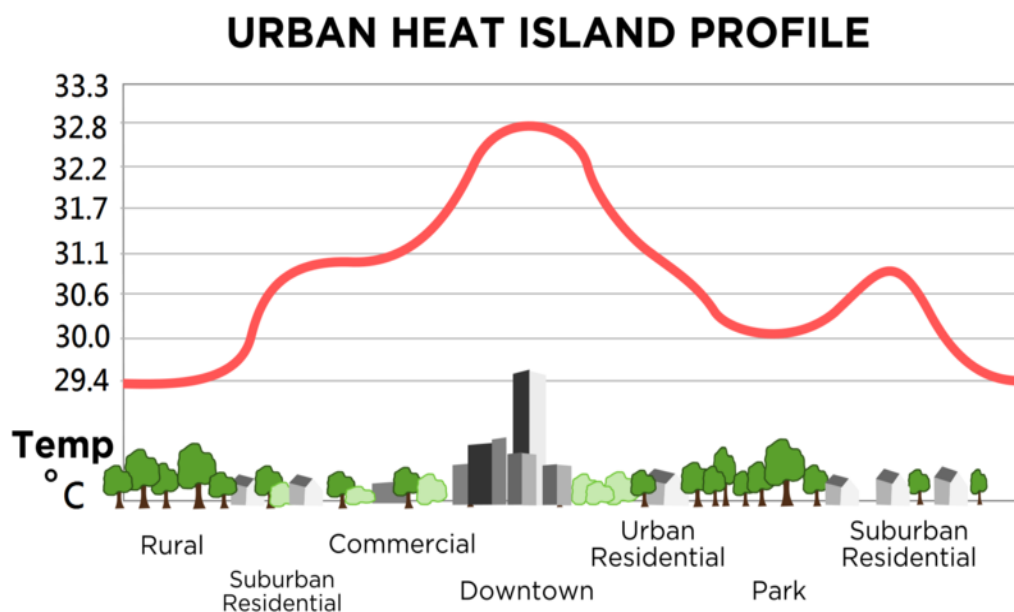
Οι κυριότεροι εξ' αυτών είναι η πυκνότητα της δόμησης, η έλλειψη χώρων πρασίνου, η αυξημένη παραγωγή ρύπων και η απορριπτόμενη θερμότητα από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Τέλος, έναν πολύ σημαντικό παράγοντα αποτελούν τα δομικά υλικά και οι τελικές επιφάνειες των κτιρίων και των οριζόντιων επιφανειών.

Περιβαλλοντικά προβλήματα

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με το αστικό περιβάλλον είναι το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας και της αστικής χαράδρας.

Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας

Η θερμοκρασία στο κέντρο μιας πόλης είναι υψηλότερη απ' αυτή των προαστίων και της αγροτικής περιοχής που την περιβάλλει. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αστική θερμική νησίδα (Urban Heat Island- UHI), (Εικόνα 4.1). Η διαφορά της θερμοκρασίας είναι συνήθως μεγαλύτερη μετά τη δύση του ήλιου και είναι πιο εμφανής όταν οι άνεμοι είναι ασθενείς.



Εικόνα 1.1: Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (πηγή: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Urban_heat_island_profile.gif)

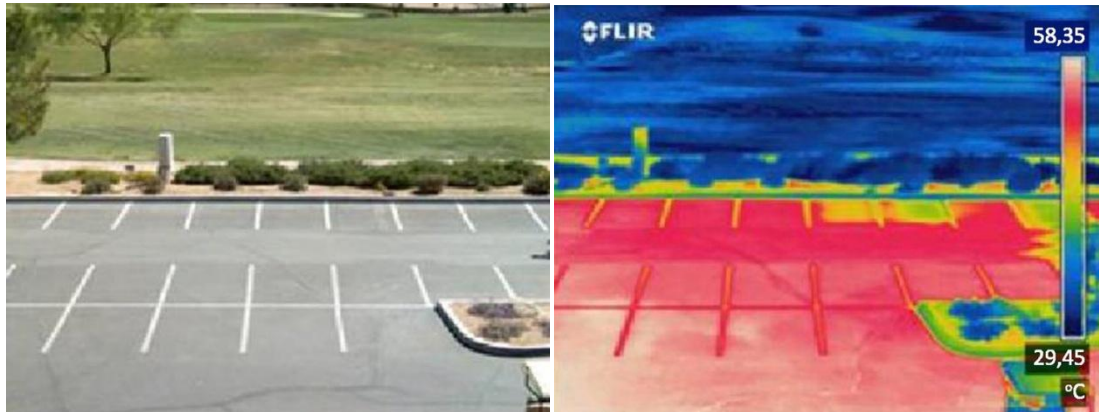
Η αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για δροσισμό και κλιματισμό αυξάνει και την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων. Έτσι η θερμοκρασία του αέρα σε

πυκνά δομημένες περιοχές είναι συνήθως υψηλότερη από την θερμοκρασία σε προαστιακές περιοχές. Για την περίπτωση της Αθήνας, έχει υπολογιστεί ότι το φορτίο ψύξης για το κέντρο της πόλης είναι σχεδόν το διπλάσιο σε σχέση με τα προάστια και η ζήτηση αιχμής σχεδόν η τριπλάσια (Σανταμούρης, 2009).

Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας παρατηρείται σε όλες τις πόλεις και είναι μάλλον η πιο έκδηλη από τις επιπτώσεις που προκαλεί η αστικοποίηση. Εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις γενικότερες κλιματικές συνθήκες της περιοχής που βρίσκεται η πόλη καθώς και από το ανάγλυφο της περιοχής, για το λόγο αυτό παρουσιάζει και συνεχείς μεταβολές στον χρόνο και στον χώρο. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι αποτέλεσμα ενός θερμικού πλεονάσματος, που προκαλεί διαταραχή στον θερμικό ισοζύγιο των πόλεων. Οι κύριοι παράγοντες που συνεισφέρουν στην εμφάνιση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας αναλύονται παρακάτω.

1. Η γεωμετρία των κτιρίων και των αστικών δρόμων, η οποία είναι υπαίτια για τον εγκλωβισμό μεγάλου μέρους της ενέργειας που απορροφούν αλλά και εκπέμπουν. Οι συνεχείς ανακλάσεις που γίνονται παγιδεύουν την ακτινοβολία και δεν διαφεύγει στην ατμόσφαιρα, έτσι αυξάνεται το θερμικό πλεόνασμα του συνόλου των επιφανειών και άρα η θερμοκρασία τους.
2. Οι οπτικές και θερμικές ιδιότητες πολλών υλικών. Μεγάλο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας απορροφάται από αυτά και ακτινοβολείται εκ νέου σαν θερμότητα στην ατμόσφαιρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας, τόσο κατά την διάρκεια της ημέρας όσο και κατά την διάρκεια της νύχτας. Οι οπτικές ιδιότητες είναι η υφή και το χρώμα της επιφάνειας του υλικού. Όσο πιο λεία και ανοιχτόχρωμη είναι τόσο λιγότερη ενέργεια απορροφά σε σχέση με μία πιο τραχιά και σκούρα επιφάνεια του ίδιου υλικού. Οι θερμικές ιδιότητες εξαρτώνται από την χημική και φυσική σύσταση του υλικού και καθορίζουν την συμπεριφορά του στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, στο ποσό της ενέργειας που αποθηκεύει στη μάζα του καθώς και την ακτινοβολούμενη ενέργεια στο περιβάλλον. Γενικά όσο πιο βαρύ είναι ένα υλικό τόσο πιο πολύ ενέργεια μπορεί να αποθηκεύσει στη μάζα του, η ιδιότητα αυτή ονομάζεται θερμοχωρητικότητα και εξαρτάται από την πυκνότητα και το ειδικό βάρος του υλικού. Ο ρυθμός μεταφοράς της ενέργειας εξαρτάται από την θερμοχωρητικότητα και τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.
3. Η απορριπτόμενη θερμότητα από τις ποικίλες ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Ο κλιματισμός, ο φωτισμός, τα μέσα μεταφοράς και άλλες οικιακές ή βιομηχανικές δραστηριότητες απαιτούν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατανάλωση αυτή παράγει μεγάλα ποσά ενέργειας τα οποία αποβάλλονται στο άμεσο περιβάλλον και έτσι συμβάλουν και αυτές στην αύξηση του θερμικού πλεονάσματος.
4. Τα κοινά χαρακτηριστικά πολλών πόλεων. Αυτά είναι η έλλειψη χώρων πρασίνου και επιφανειών νερού. Αυτό έχει διπλή σημασία για το μικροκλίμα των περιοχών της πόλης καθώς οι επιφάνειες πρασίνου και νερού απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας μειώνοντας έτσι την θερμοκρασία του αέρα, ενώ ταυτόχρονα η ακτινοβολούμενη ενέργεια είναι μικρότερη και βραδύτερη με αποτέλεσμα να διατηρούν χαμηλά την θερμοκρασία του άμεσου περιβάλλοντός τους. Ταυτόχρονα

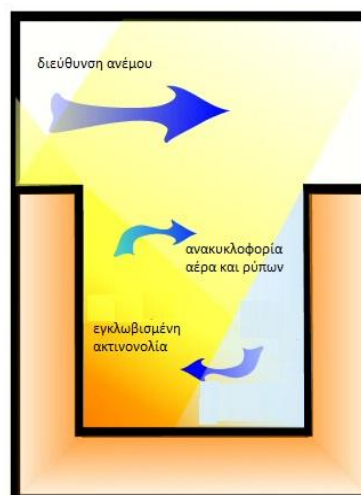
μέσω της διαπνοής αυξάνεται η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας και έτσι μειώνεται η θερμοκρασία. Λειτουργούν δηλαδή σαν ρυθμιστές της θερμοκρασίας και της υγρασίας στην πόλη. Σύμφωνα με έρευνες η θερμοκρασία στο πάρκο μιας πόλης μπορεί είναι κατά μέσο όσο 0,94 °C πιο χαμηλή από τις οικιστικές περιοχές (Bowler, Buyung- Ali, Knight & Pullin, 2010).



Εικόνα 1.2: Φωτογραφία και θερμογραφία περιοχής με ασφαλτο και θλάστηση (Love, 2009)

Το φαινόμενο της αστικής χαράδρας

Με τον όρο «αστική χαράδρα» (Εικόνα 1.3) περιγράφεται ένας δρόμος με υψηλή πυκνότητα οδικής κυκλοφορίας και με χαρακτηριστικά τέτοια, ώστε να περιορίζεται σημαντικά η αραίωση των ρύπων από την παρουσία κτιρίων, με άμεση συνέπεια τη δημιουργία σημείου αιχμής συγκεντρώσεων. Το φαινόμενο της αστικής χαράδρας παρουσιάζεται σε δρόμους με σχετικά μικρό πλάτος, όπου κατά μήκος και των δυο πλευρών του υπάρχουν κτίρια με ύψος συγκρίσιμο με το πλάτος του δρόμου ή μεγαλύτερο από αυτό.



Εικόνα 1.3: Το φαινόμενο της αστικής χαράδρας

Στο εσωτερικό μιας αστικής χαράδρας, και κυρίως όταν η διεύθυνση του ανέμου είναι κάθετη στη διεύθυνση του δρόμου, δημιουργείται ανακυκλοφορία του ανέμου ανάμεσα στις δυο πλευρές του δρόμου, με αποτέλεσμα να παγιδεύονται οι ρύποι σε αυτόν και να αυξάνουν οι συγκεντρώσεις τους μέσα σε αυτήν. Παράλληλα, οι συμπαγείς όγκοι των κτηρίων μειώνουν την ένταση του ανέμου και έτσι περιορίζεται ο αερισμός και ο δροσισμός των πόλεων.

1.4. Μεθοδολογία

Η χρήση ψυχρών υλικών στις στέγες των κτιρίων ή φύτευσή τους αποτελούν τρόπους αποτελούν τρόπους που μπορούν να συντελέσουν στην εξοικονόμηση της ενέργειας αλλά και στη βελτίωση του μικροκλίματος. Στη συνέχεια του κειμένου θα αναλυθούν οι όροι «ψυχρές» και «πράσινες» στέγες, ο τρόπος λειτουργίας τους καθώς και τα πλεονεκτήματα των δύο αυτών ειδών στέγης.

Με τη χρήση του προγράμματος EnergyPlus θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του ενεργειακού ισοζυγίου της κάθε στέγης με το κτίριο να βρίσκεται στην περιοχή των Χανίων. Αρχικά θα γίνουν δοκιμές με κάποια από τα χαρακτηριστικά τους να μεταβάλλονται ώστε να διαπιστωθεί η επίδρασή τους στη ροή της ενέργειας. Έπειτα, θα σχεδιαστεί ένα τελικό μοντέλο στέγης για την περίπτωση της ψυχρής και ένα για την περίπτωση της πράσινης. Το τελικό μοντέλο της κάθε στέγης θα εκτελεστεί επιπλέον για την πόλη της Θεσσαλονίκης με σκοπό να εξεταστεί και η επίδραση των κλιματικών συνθηκών στην απόδοση της στέγης.

Τέλος, θα γίνει η σύγκριση της ψυχρής και της πράσινης στέγης, όπου θα εξεταστεί η ενεργειακή τους απόδοση, το κόστος κατασκευής, ο χρόνος ζωής κ.α.

2. Οι Ψυχρές Στέγες

Οι ψυχρές στέγες (Εικόνα 2.1) είναι κατασκευασμένες με τα κατάλληλα υλικά, ώστε να αυξάνεται στο ελάχιστο δυνατό η θερμοκρασία της επιφάνειάς της, και κατά συνέπεια και η θερμοκρασία του χώρου κάτω από αυτή.



Εικόνα 2.1: Ψυχρή στέγη θαμμένη με οικολογικό χρώμα βασισμένο στο γάλα και στο ξύδι, σε κυβερνητικό κτίριο (Kolokotroni & Warren, 2011).

2.1. Τα χαρακτηριστικά της ψυχρής στέγης

Τα χαρακτηριστικά της ψυχρής στέγης είναι οι αυξημένοι συντελεστές της ανακλαστικότητας και της υπέρυθρης εκπομπής σε σχέση με τις τιμές των συμβατικών.

Συντελεστής ηλιακής ανάκλασης (SR)

Ο συντελεστής ηλιακής ανάκλασης (SR) υποδεικνύει τη συνολική ανακλαστικότητα μιας επιφάνειας, λαμβάνοντας υπόψη την ημισφαιρική ανάκλαση της ακτινοβολίας, που ενσωματώνεται πέρα από το ηλιακό φάσμα, συμπεριλαμβανομένης και της κατοπτρικής διάχυτης ανάκλασης. Παίρνει τιμές από 0 έως 1.

Συντελεστής υπέρυθρης εκπομπής (ε)

Ο συντελεστής υπέρυθρης εκπομπής (ε) αναφέρεται στην ικανότητα της επιφάνειας να απελευθερώνει την απορροφούμενη θερμότητα. Παίρνει τιμές από 0 έως 1. Στον πίνακα 2.1 γίνεται μια σύγκριση των τιμών της ηλιακής ανάκλασης και της υπέρυθρης εκπομπής μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές και στις ψυχρές στέγες.

Συστήματα θερμής στέγης			Συστήματα ψυχρής στέγης		
Τύπος Στέγης	Ανακλαστικότητα	Εκπομπή	Τύπος Στέγης	Ανακλαστικότητα	Εκπομπή
Δομημένη στέγη με σκούρο χαλίκι	0.08 – 0.15	0.80 – 0.90	Δομημένη στέγη με ανοιχτόχρωμο χαλίκι ή τσιμεντένια επίστρωση	0.50 – 0.70	0.80 – 0.90
Μονή στρώση μεμβράνης-μαύρο PVC	0.04 – 0.05	0.80 – 0.90	Μονή στρώση μεμβράνης-άσπρο PVC	0.70 – 0.78	0.80 – 0.90
Μονή στρώση μεμβράνης-μαύρο PVC	0.04 – 0.05	0.80 – 0.90	Μονή στρώση μεμβράνης με ψυχρή βαμμένη επικάλυψη	0.30 – 0.80	0.80 – 0.90
Τροποποιημένη άσφαλτος με μεταλλική επιφάνεια (SBA, APP)	0.10 – 0.20	0.80 – 0.90	Τροποποιημένη άσφαλτος με λευκό επίχρισμα μεταλλικής επιφάνειας (SBA, APP)	0.60 – 0.75	0.80 – 0.90
Σκουρόχρωμα πλακάκια σκυροδέματος με συμβατικές χρωστικές	0.05 – 0.35	0.80 – 0.90	Ψυχρά κεραμίδια σκυροδέματος χρωματιστά	0.40 – 0.65	0.80 – 0.90
Κυματοειδής, άβαφη μεταλλική στέγη	0.30 – 0.50	0.50 – 0.30	Μεταλλική στέγη με ψυχρό χρωματιστό επίχρισμα	0.05 – 0.80	0.80 – 0.90

Πίνακας 2.1: Σύγκριση μεταξύ θερμών και ψυχρών στεγών: συντελεστές ηλιακής ανάκλασης και υπέρυθρης εκπομπής (Kolokotroni & Warren 2011)

Δείκτης ηλιακής ανάκλασης (SRI)

Ο δείκτης ηλιακής ανάκλασης (SRI) είναι άλλος ένας τρόπος για να βρεθεί το πόσο ψυχρή είναι μια στέγη. Συνδυάζει την ηλιακή ανάκλαση και την υπέρυθρη εκπομπή σε έναν όρο. Ο υπολογισμός του δείκτη βασίζεται σε ένα σύνολο εξισώσεων (ASTM 1980E – 01) που

απαιτούν μετρημένες τιμές της ηλιακής ανακλαστικότητας και της υπέρυθρης εκπομπής για συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ο SRI παίρνει τιμές από 0 (για μαύρες επιφάνειες) έως 100 (για άσπρες επιφάνειες) και υπολογίζεται ως εξής:

$$SRI = \frac{(T_B - T_S)}{(T_B - T_W)} \cdot 100$$

Όπου, T_B , T_W και T_S είναι οι θερμοκρασίες σε σταθερές συνθήκες για τη μαύρη, την άσπρη και την επιφάνεια της κάθε περίπτωσης αντίστοιχα.

Από το ορισμό του SRI είναι αναμενόμενο πολύ θερμά υλικά να έχουν αρνητικές τιμές, ενώ πολύ ψυχρά να έχουν μεγαλύτερες του 100 (Kolokotroni & Warren 2011).

2.2. Πλεονεκτήματα της ψυχρής στέγης

Τα οφέλη της χρήσης ψυχρών υλικών στη στέγη είναι τα εξής:

- Τα ενεργειακά οφέλη
- Ο περιορισμός του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας
- Η άμεση και η έμμεση μείωση της ρύπανσης του αέρα
- Η μείωση του στροβιλισμού της σκόνης

Τα ενεργειακά οφέλη

Η ψυχρή στέγη αντανακλά ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτή η ιδιότητα της έχει ως αποτέλεσμα να μην αυξάνεται σημαντικά η θερμοκρασία στην επιφάνεια της και κατά συνέπεια στο εσωτερικό του κτιρίου. Έτσι, επιτυγχάνεται η θερμική άνεση και η εξοικονόμηση ενέργειας. Τα οφέλη της όμως περιορίζονται κατά τους θερινούς μήνες, καθώς τους χειμερινούς η ενέργεια που απαιτείται για να θερμανθεί ένα κτίριο με ψυχρή στέγη είναι περισσότερη. Για το λόγο αυτό η ψυχρή στέγη είναι κατάλληλη για περιοχές όπου η κατανάλωση ενέργειας για ψύξη είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της θέρμανσης.

Ο περιορισμός του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας

Η αύξηση της ανακλαστικότητας μιας πόλης μπορεί να επηρεάσει το μικροκλίμα χαμηλώνοντας τη θερμοκρασία του αέρα, αφού προκαλεί μικρότερη ροή θερμότητας από τις επιφάνειες (οι οποίες θα έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία) προς τον αέρα της ατμόσφαιρας, και περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Διάφορες μελέτες έχουν δείξει πως η αντικατάσταση θερμών επιφανειών μιας πόλης με ψυχρές ή/ και πράσινες επιφάνειες μπορεί να επιφέρει μείωση στη θερμοκρασία του αέρα κατά 1 ° με 3 ° C κατά τη διάρκεια της ημέρας (Kolokotroni & Warren, 2011).

Η άμεση και η έμμεση μείωση της ρύπανσης του αέρα

Η άμεση μείωση της αέριας ρύπανσης βασίζεται στο γεγονός ότι καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια για τη ψύξη των χώρων. Έτσι, παράγονται λιγότεροι ρύποι (CO₂, NO_x και σωματίδια). Η άμεση μείωση της ρύπανσης αφορά το σχηματισμό του όζοντος, ο οποίος επιταχύνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αντίθετα, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες της πόλης η πιθανότητα σχηματισμού αιθαλομίχλης είναι μειωμένη (Kolokotroni & Warren, 2011).

Η μείωση του στροβιλισμού της σκόνης

Μια στέγη θερμομονωμένη που δεν έχει κατασκευαστεί με ψυχρά υλικά μπορεί να αναπτύξει πολύ υψηλές θερμοκρασίες τις καλοκαιρινές μέρες. Έτσι, δημιουργείται μια κατακόρυφη κίνηση του αέρα (άνωση), η οποία προκαλεί την απελευθέρωση στον αέρα των σωματιδίων της σκόνης και των ρύπων που έχουν επικαθήσει σε μια επιφάνεια, ενώ παράλληλα προκαλεί τη δημιουργία θόλων υδρατμών και ρύπων πάνω από τις κατοικημένες περιοχές. Με την αύξηση της ανακλαστικότητας το φαινόμενο αυτό περιορίζεται καθώς η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης παραμένει χαμηλότερη από του αέρα και δεν δημιουργείται άνωση.

2.3. Τα υλικά των ψυχρών στεγών

Οι ψυχρές στέγες είναι συνήθως άσπρες και η επιφάνεια τους είναι λεία. Τα προϊόντα που υπάρχουν στο εμπόριο χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: αυτά που είναι έτοιμα σε φύλλα για την τοποθέτησή τους και αυτά που είναι σε ρευστή μορφή και τοποθετούνται με επάλειψη.

Στα υλικά που είναι έτοιμα σε φύλλα ανήκουν:

- Το άσπρο EPDM (μεμβράνη συνθετικού καουτσούκ)
- Το άσπρο PVC (πολυβινυλοχλωρίδιο)
- Το άσπρο CPE (πολυαιθυλένιο)
- Το άσπρο CPSE (πολυαιθυλένιο)
- Το άσπρο TPO (θερμοπλαστική πολυολεφίνη)

Στα υλικά που τοποθετούνται με επάλειψη ανήκουν:

- Τα λευκά ελαστομερή επιχρίσματα
- Τα λευκά επιχρίσματα πολυουρεθάνης
- Τα λευκά ακρυλικά επιχρίσματα
- Τα λευκά χρώματα (σε μέταλλο ή σκυρόδεμα)



Εικόνα 2.2: Διαμερίσματα με ψυχρή στέγη (<http://white-roofs.etntalk.com/cool-roofs/White-roofs-can-save-a-lot-of-energy.html>).

Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζονται η ανακλαστικότητα και η υπέρυθη εκπομπή για διάφορα υλικά ψυχρών στεγών.

	Material	Total Solar Reflectance	Emittance
Reflective coatings	Kool seal elastomeric over asphalt shingle	0.71	0.91
	Aged elastomeric on plywood	0.73	0.86
	Flex-tec elastomeric on shingle	0.65	0.89
	Insultec on metal swatch	0.78	0.90
	Enerchon on metal swatch	0.77	0.91
	Aluminum pigmented roof coating	0.30-0.55	0.42-0.67
	Lo-mit on asphalt shingle	0.54	0.42
White metal roofing	MBCI Siliconized white	0.59	0.85
	Atlanta Metal products Kynar Snow White	0.67	0.85
Single-ply roof membrane	Black EPDM	0.06	0.86
	Grey EPDM	0.23	0.87
	White EPDM	0.69	0.87
	White T-EPDM	0.81	0.92
	Hypalon	0.76	0.91
Paint	White	0.85	0.96
	Aluminum paint	0.80	0.40
Asphalt shingles	Black	0.03-0.05	0.91
	Dark Brown	0.08-0.10	0.91
	Medium Brown	0.12	0.91
	Light Brown	0.19-0.20	0.91
	Green	0.16 - 0.19	0.91
	Grey	0.08-0.12	0.91
	Light Grey	0.18-0.22	0.91
	White	0.21-0.31	0.91

Εικόνα 2.3: Ηλιακή ανακλαστικότητα και υπέρυθη εκπομπή για διάφορα υλικά ψυχρών στεγών (Pacific Gas and Electric Company, 2000)

2.4. Ο χρόνος ζωής

Η αποδοτικότητα μιας ψυχρής στέγης μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Η μούχλα, η σκόνη, η φθορά (για τις βαμμένες επιφάνειες), η υγρασία της ατμόσφαιρας, οι κατακρημνίσεις, η ηλιακή ακτινοβολία (και ιδιαίτερα η υπεριώδης), η θερμοκρασία, και διάφοροι ρύποι (ιδιαίτερα τα αεροζόλ και η όξινη βροχή) αποτελούν τους παράγοντες στους οποίους οφείλεται η υποβάθμιση της στέγης. Μελέτες έδειξαν πως οι λευκές μεμβράνες μπορούν να χάσουν πάνω από το 30% της ανακλαστικότητας τους μέσα σε δυο χρόνια, η υποβάθμισή τους όμως, επιβραδύνει έπειτα από αυτό το σημείο (Akbari & Bretz ,1997). Ωστόσο, οι κεκλιμένες στέγες φαίνεται να έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής, αφού ελαχιστοποιείται η σκόνη και το λιμνάζων νερό (Akbari et al., 1992).

3. Οι Πράσινες Στέγες

Η συνεχής και ανεξέλεγκτη δόμηση στα αστικά κέντρα καθώς και η απουσία ανοικτών χώρων πρασίνου οδήγησε τον άνθρωπο να αναζητήσει τέτοιους χώρους. Τα προβλήματα της ρύπανσης του αέρα συνέβαλλαν στην αύξηση των χώρων πρασίνου. Μια μορφή ενός τέτοιου χώρου είναι οι πράσινες στέγες/ φυτεμένα δώματα που αποτελούν σήμερα μία σύγχρονη μορφή αρχιτεκτονικής . Ο σκοπός ενός φυτεμένου δώματος είναι να παρέχει μια παθητική τεχνική για εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα κτίριο.

Ως φυτοκαλυμμένο δώμα ή κήπος σε δώμα, μπορεί να χαρακτηριστεί κάθε κήπος, μεταξύ του οποίου και του εδάφους υπάρχει ένα κτίριο ή μια δομική κατασκευή. Στον ορισμό αυτό περιλαμβάνονται κήποι σε οποιαδήποτε στάθμη από το φυσικό έδαφος (Μιχαλάκη, 2007).

Τα φυτεμένα δώματα (Εικόνα 3.1) είναι επίσης γνωστά ως πράσινες στέγες, οικολογικές στέγες, ταρατσόκηποι κ.α.



Εικόνα 3.1: Πράσινη στέγη στη Νορβηγία (Minke, 2009)

Η ιδέα για το πρασίνισμα των δωματίων και των στεγών ξεκίνησε στα ιστορικά χρόνια. Η εμφάνιση των πρώτων φυτεμένων δωματίων συναντάται με τους γνωστούς, ως ένα από τα επτά θαύματα του κόσμου, Κρεμαστούς Κήπους της Βαβυλώνας, γύρω στο 604-652 π.χ (Εικόνα 3.2). Εξίσου σημαντικές πηγές για τους πρώτους τεχνητούς κήπους, αποτελούν τα Ζιγκουράτ, τα οποία συναντώνται και αυτά στην περιοχή της Μεσοποταμίας και αποτελούσαν τις φυτοκαλυμμένες κλιμακωτές εξέδρες πάνω στις οποίες έκτιζαν οι Βαβυλώνιοι τους ναούς και τα ιερά για να λατρέψουν τους θεούς τους



Εικόνα 3.2: Οι κρεμαστοί κήποι της Βαβυλώνας, γκραβούρα του 16^{ου} αιώνα του Marteen van Heemskerck (http://en.wikipedia.org/wiki/Hanging_Gardens_of_Babylon)

Στα νεότερα χρόνια, οι κήποι στα δώματα, θεωρούνταν στοιχείο υψηλής ποιότητας, αισθητικής και πολυτέλειας, ενώ στις αρχές του 20ού αιώνα δεν ήταν λίγοι οι κορυφαίοι αρχιτέκτονες της εποχής, οι οποίοι υποστήριζαν θερμά τη δημιουργία τέτοιων κατασκευών (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Ξενοδοχειακό συγκρότημα του αρχιτέκτονα Friedensreich Hundertwasser στο Bad Blumau, Αυστρία (<http://flickrhivemind.net/Tags/hundertwasser,spa/Interesting>)

Με την ανάπτυξη του πράσινου κινήματος στις αρχές της δεκαετίας του 1960, με την ηλιακή και βιοκλιματική αρχιτεκτονική, τον παθητικό, ηλιακό και τον ενεργειακό σχεδιασμό, την οικολογική δόμηση και τις Κοινοτικές Οδηγίες που εφαρμόζονται και θα εφαρμόζονται ακόμα περισσότερο, τα σύγχρονα παραδείγματα φυτεμένων δωματίων, τόσο στον ευρωπαϊκό χώρο, όσο και στην Αμερική, ολοένα και πληθαίνουν (Μιχαλάκη 2007).

3.1. Πλεονεκτήματα της πράσινης στέγης

Τα οφέλη της φύτευσης της στέγης είναι τα εξής:

- Τα ενεργειακά οφέλη
- Ο περιορισμός του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας
- Η άμεση και η έμμεση μείωση της ρύπανσης του αέρα
- Η μείωση του στροβιλισμού της σκόνης
- Η παραγωγή οξυγόνου και η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα
- Το φιλτράρισμα της σκόνης των ρύπων και η απορρόφηση βλαβερών ουσιών
- Η ρύθμιση της θερμοκρασίας
- Η ρύθμιση της υγρασίας
- Η οπτική άνεση
- Η ηχοπροστασία
- Η θερμομονωτική λειτουργία.
- Η πυροπροστασία.
- Η ικανότητα συγκράτησης νερού.
- Η χρήση ανακυκλωμένων υλικών.
- Η επίδραση στις οσμές.
- Φυσικό καταφύγιο για την τοπική πανίδα και χλωρίδα.
- Οι αισθητικές και ψυχολογικές επιδράσεις.

Ενεργειακά οφέλη

Μια πράσινη στέγη βοηθάει ώστε η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου να μην παρουσιάζει ακραίες τιμές τόσο κατά τους θερινούς όσο και για τους χειμερινούς μήνες. Η θερμική άνεση και η εξοικονόμηση της ενέργειας επιτυγχάνεται με τους παρακάτω τρόπους, οι οποίοι δρουν συνδυαστικά.

Τα φυτά με το φύλλωμά τους παρέχουν σκιασμό στην επιφάνεια του δώματος και εξασφαλίζουν με τον τρόπο αυτό τη μειωμένη θερμική επιβάρυνση του κτηρίου κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών. Παράλληλα, η θερμοχωρητικότητα του φυτεμένου δώματος είναι ιδιαίτερα αυξημένη σε σχέση με αυτήν ενός συμβατικού δώματος, εξαιτίας της μεγάλης θερμικής μάζας των κηπευτικών στρώσεων και του γεγονότος ότι εντός αυτών παρατηρείται ένα στρώμα ακίνητου αέρα. Το φυτεμένο δώμα λειτουργεί λοιπόν ως μια επιπλέον θερμομονωτική στρώση, ελαττώνοντας τα απαιτούμενα ψυκτικά ή θερμικά φορτία το καλοκαίρι και το χειμώνα αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, στην πράσινη στέγη

αξιοποιείται και το φαινόμενο της εξάτμισης για την παραγωγή ψύξης καθώς και της συμπύκνωσης υδρατμών με παραγωγή θερμότητας. Με τη διαδικασία αυτή («εξατμισοδιαπνοή»), τα φυτά προσφέρουν ψυκτικά ή θερμικά φορτία, τα οποία με τη σειρά τους παρέχουν δροσισμό ή θέρμανση το καλοκαίρι και το χειμώνα.

Ο περιορισμός του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας

Η αύξηση των φυτεμένων εκτάσεων μιας πόλης μπορεί να επηρεάσει το μικροκλίμα χαμηλώνοντας τη θερμοκρασία του αέρα, αφού προκαλεί μικρότερη ροή θερμότητας από τις επιφάνειες (οι οποίες θα έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία) προς τον αέρα της ατμόσφαιρας, και περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Διάφορες μελέτες έχουν δείξει πως η αντικατάσταση θερμών επιφανειών μιας πόλης με ψυχρές ή/ και πράσινες επιφάνειες μπορεί να επιφέρει μείωση στη θερμοκρασία του αέρα κατά 1 ° με 3 ° C κατά τη διάρκεια της ημέρας (Kolokotroni & Warren, 2011).

Η άμεση και η έμμεση μείωση της ρύπανσης του αέρα

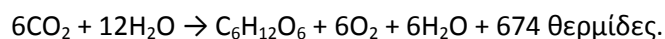
Η άμεση μείωση της αέριας ρύπανσης βασίζεται στο γεγονός ότι καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια για τη ψύξη των χώρων. Έτσι, παράγονται λιγότεροι ρύποι (CO₂, NO_x και σωματίδια). Η άμεση μείωση της ρύπανσης αφορά το σχηματισμό του όζοντος, ο οποίος επιταχύνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αντίθετα, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες της πόλης η πιθανότητα σχηματισμού αιθαλομίχλης είναι μειωμένη (Kolokotroni & Warren, 2011).

Η μείωση του στροβιλισμού της σκόνης

Μια στέγη θερμομονωμένη που δεν προστατεύεται από φυτά μπορεί να αναπτύξει πολύ υψηλές θερμοκρασίες τις καλοκαιρινές μέρες. Έτσι, δημιουργείται μια κατακόρυφη κίνηση του αέρα (άνωση), η οποία προκαλεί την απελευθέρωση στον αέρα των σωματιδίων της σκόνης και των ρύπων που έχουν επικαθήσει σε μια επιφάνεια, ενώ παράλληλα προκαλεί τη δημιουργία θόλων υδρατμών και ρύπων πάνω από τις κατοικημένες περιοχές. Με τη φύτευση των στεγών το φαινόμενο αυτό περιορίζεται καθώς η θερμοκρασία του εδάφους ή της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης παραμένει χαμηλότερη από του αέρα και δεν δημιουργείται άνωση.

Η παραγωγή οξυγόνου και η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα

Η βλάστηση των φυτεμένων στεγών με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης δεσμεύει από τον αέρα διοξείδιο του άνθρακα και παράγει οξυγόνο. Η χημική αντίδραση της φωτοσύνθεσης είναι η εξής:



Κατά τη διάρκεια της διαπνοής παράγεται CO₂ και καταναλώνεται O₂, μόνο όμως το 1/5 έως 1/3 των ποσοτήτων που παράγονται κατά την φωτοσύνθεση. Με τη φύτευση λοιπόν και τη φροντίδα της στέγης, ώστε να υπάρχει ισορροπία μεταξύ της ξήρανσης και της ανάπτυξης των φυτών, θα υπάρχει και παραγωγή οξυγόνου και κατανάλωση διοξειδίου του άνθρακα, γεγονός το οποίο θα βελτιώνει τον αέρα της περιοχής.

Ο καθαρισμός του αέρα

Τα φυτά έχουν την ικανότητα να φιλτράρουν τη σκόνη και τα σωματίδια των ρύπων από τον αέρα. Τα σωματίδια προσκολλώνται στην επιφάνεια των φύλλων και έπειτα με τη βροχή κυλούν στο έδαφος. Ταυτόχρονα, τα φυτά μπορούν να απορροφήσουν και ρυπογόνες ουσίες σε αέρια μορφή, καθώς επίσης και βαρέα μέταλλα (Minke, 2009). Τέλος, τα φυτά μειώνουν την ένταση του ανέμου κοντά στο έδαφος εμποδίζοντας έτσι τη μετάδοση της σκόνης και των σωματιδίων, χωρίς όμως να εμποδίζει τον αερισμό της περιοχής.

Η ρύθμιση της θερμοκρασίας

Η εξάτμιση του νερού, η φωτοσύνθεση και η ικανότητα απορρόφησης θερμότητας του νερού που εμπεριέχεται στα φυτά οδηγεί στην αφαίρεση θερμότητας από το περιβάλλον. Η κατανάλωση της ηλιακής ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας μπορεί να φτάσει και στο 90% κατά τις θερμές καλοκαιρινές μέρες, αφού κατά την εξάτμιση ενός λίτρου νερού καταναλώνονται περίπου 2.2 MJ ενέργειας (Minke, 2009). Οι υδρατμοί στη συνέχεια συμπυκνώνονται στην ατμόσφαιρα όπου σχηματίζονται σύννεφα και έτσι αποδεδεσμεύεται μια ίση ποσότητα ενέργειας. Το ίδιο συμβαίνει και όταν η υγρασία συμπυκνώνεται τη νύχτα πάνω στα φυτά, όπου η πρωινή πάχνη πάνω στα φυτά οδηγεί σε ανάκτηση θερμότητας. Με τον τρόπο αυτό τα φυτά μπορούν να μειώσουν τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του κύκλου μέρας – νύχτας. Η μεγάλη ικανότητα θερμικής αποθήκευσης που έχουν τα φυτά και το χώμα και η διαδικασία της φωτοσύνθεσης ενισχύουν το παραπάνω φαινόμενο.

Τις καλοκαιρινές μέρες λοιπόν έχουμε ρύθμιση της θερμοκρασίας μέσω της παραπάνω διαδικασίας, ενώ τις χειμωνιάτικες νύχτες μέσω της διαδικασίας της διαπνοής με την οποία αποδεδεσμεύεται θερμική ενέργεια. Παρουσιάζονται, δηλαδή μικρότερες μέγιστες θερμοκρασίες και μεγαλύτερες ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του έτους.

Η ρύθμιση της υγρασίας

Τα φυτά μπορούν να ρυθμίσουν τις διακυμάνσεις της υγρασίας. Όταν ο αέρας είναι ξηρός εξατμίζουν μεγάλες ποσότητες νερού αυξάνοντας έτσι τη σχετική υγρασία του. Όταν ο αέρας έχει αρκετή υγρασία μπορούν να τη μειώσουν μέσω του σχηματισμού δροσοσταλίδων, όπου η ομίχλη συμπυκνώνεται πάνω στα φυτά και διοχετεύεται στο έδαφος με τη μορφή σταγόνων νερού.

Η οπτική άνεση

Τα φυτά απορροφούν μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την ανάκλαση της ακτινοβολίας και συμβάλλοντας στην οπτική άνεση.

Η ηχοπροστασία

Τα φυτά μπορούν να μειώσουν τον ήχο μέσω της απορρόφησης και μετατροπής της ηχητικής ενέργειας σε κινητική και θερμική, μέσω της ανάκλασης και μέσω της διάχυσης. Ταυτόχρονα συμβάλει και το χώμα στη μείωση του ήχου μέσω της απορρόφησης.

Θερμομονωτική λειτουργία

Το στρώμα των φυτών στη στέγη προσδίδει ταυτόχρονα και μια θερμομονωτική λειτουργία βάση των παρακάτω φαινομένων:

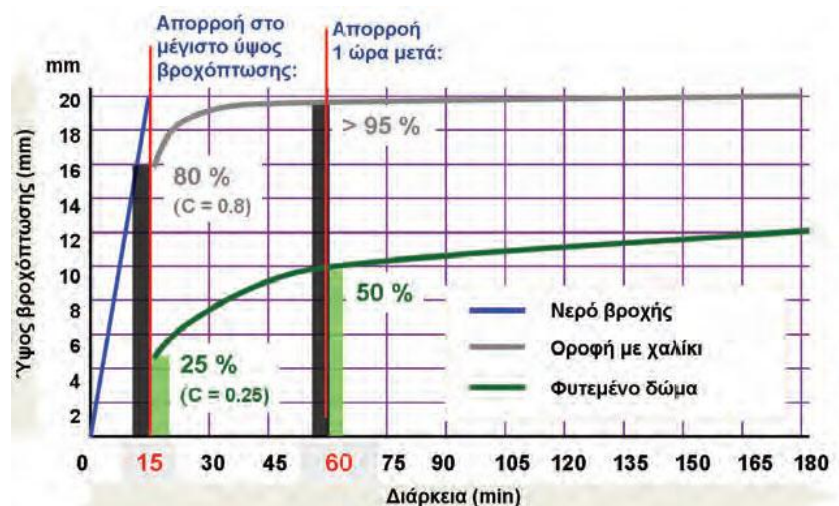
- Το στρώμα του αέρα που υπάρχει γύρω από τα φυτά λειτουργεί ως θερμομονωτικό.
- Ένα μέρος της θερμικής ακτινοβολίας απορροφάται από το φύλλωμα και έτσι μειώνεται η απώλεια θερμότητας δια ακτινοβολίας του κτηρίου.
- Στην επιφάνεια του υποστρώματος δεν υπάρχει κίνηση του αέρα επομένως οι απώλειες θερμότητας λόγω του αέρα είναι ελάχιστες.
- Τις πρώτες πρωινές ώρες που η θερμοκρασία του αέρα είναι η ελάχιστη, η διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού του κτηρίου και της ατμόσφαιρας είναι η μέγιστη. Τότε δημιουργείται πάχνη στην επιφάνεια των φυτών, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία τους, αφού κατά τη συμπύκνωση ενός γραμμαρίου νερού αποδεσμεύονται περίπου 530 cal θερμότητας (Minke, 2009). Έτσι μειώνεται η απώλεια θερμότητας με μεταφορά.
- Με τη διαδικασία της διαπνοής τα φυτά απελευθερώνουν κάποια ποσά θερμότητας τα οποία συμβάλλουν στο να μην παγώνει το χώμα.

Πυροπροστασία

Οι φυτεμένες στέγες θεωρούνται άκαυστες επομένως προσφέρουν μια καλή προστασία για στέγες που κινδυνεύουν από φωτιά.

Ικανότητα συγκράτησης νερού

Οι φυτεμένες στέγες έχουν την ικανότητα να συγκρατούν το νερό της βροχής και να καθυστερούν την απορροή του, μειώνοντας έτσι το φορτίο που δέχονται τα αποχετευτικά δίκτυα κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων (Εικόνα 3.4). Σε μια πράσινη στέγη με πάχος υποστρώματος τουλάχιστον 10 cm μόνο το 30% του βρόχινου νερού απορρέει, ενώ το υπόλοιπο συγκρατείται από τη φυτεμένη στέγη ή εξατμίζεται (Minke, 2009).



Εικόνα 3.4: Απορροή ομβρίων υδάτων από υπόστρωμα φυτεμένων στεγών σε σύγκριση με στρώση χαλίκιου σε δώματα (www.econ3.gr).

Χρήση ανακυκλωμένων υλικών

Πολλά από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πράσινων στεγών, μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν.

Επίδραση στις οσμές

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία φυτών και βοτάνων κατάλληλων για φύτευση στη στέγη με ευχάριστο άρωμα. Αντιθέτως, μια συμβατική στέγη με ασφαλικά φύλλα κατά τη διάρκεια της ημέρας εκπέμπει αναθυμιάσεις, οι οποίες πέρα από τη δυσάρεστη οσμή που έχουν, είναι και βλαβερές για την υγεία.

Φυσικό καταφύγιο για την τοπική πανίδα και χλωρίδα

Με την κατασκευή κήπων στα δώματα και την επαναφορά της «χαμένης» φύσης μέσα στο πυκνοδομημένο περιβάλλον των αστικών κέντρων, είναι δυνατόν να πολλαπλασιαστούν πολλά είδη χλωρίδας, τα οποία στη στάθμη του εδάφους δεν μπορούσαν να αναπτυχθούν. Παράλληλα, στις φυτεμένες στέγες βρίσκουν καταφύγιο διάφορα έντομα, όπως πεταλούδες, μέλισσες και σκαθάρια και δημιουργούν ένα περιβάλλον πιο κοντά στο φυσικό.

Αισθητικές και ψυχολογικές και κοινωνικές επιδράσεις

Μια πράσινη στέγη είναι σαφώς πιο όμορφη από μια συμβατική με χαλίκι ή ασφαλτο. Το περιβάλλον της στέγης και οι μεταβολές του ανάλογα με τις εποχές μπορεί να χαλαρώσει τον άνθρωπο και να τον αναζωογονήσει. Με τη δημιουργία βατών φυτεμένων δωματίων μπορούν να αξιοποιηθούν πολλοί ανεκμετάλλευτοι χώροι, οι οποίοι στις μέρες μας μόνο αισθητική υποβάθμιση «προσφέρουν» στο δομημένο περιβάλλον, αποτελώντας άλλον ένα χώρο του κτηρίου για τις δραστηριότητες των κατοίκων. Με την κατασκευή πράσινων στεγών, εκτός από τη δυνατότητα δημιουργίας λειτουργικών χώρων πρασίνου και αναψυχής, επιτυγχάνεται και η αισθητική αναβάθμιση του περιβάλλοντος του αστικού χώρου, του οποίου η εικόνα τα τελευταία χρόνια, είναι ιδιαίτερα απογοητευτική.

3.2. Τύποι πράσινων στεγών

Με βάση τη βλάστηση και τις απαιτήσεις της, οι πράσινες στέγες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Τον εκτατικό τύπο, τον ημιεντατικό και τον εντατικό. Ο τύπος που επιλέγεται σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Πρώτα από όλα από τις στατικές δυνατότητες του κτιρίου μίας και τα φυτεμένα δώματα προσδίδουν στο κτίριο μεγάλα φορτία και. Ακόμα εξαρτάται και από τα χρήματα που μπορούν να διατεθούν και φυσικά από τα οικονομικά οφέλη που σχεδιάζονται να αποκομισθούν.

Εκτατικός τύπος

Ο εκτατικός τύπος φύτευσης (Εικόνα 3.5) είναι φύτευση ελαχίστων ή μικρών απαιτήσεων. Έχει χαμηλό πάχος υποστρώματος φύτευσης (από 6 cm μέχρι 20 cm), δε δημιουργεί μεγάλα πρόσθετα στατικά φορτία και δεν έχει μεγάλη οικονομική επιβάρυνση. Τα φυτά που επιλέγονται είναι φυτά εδαφοκάλυψης και ποώδη, έχουν ελάχιστες ή μικρές απαιτήσεις σε

νερό, είναι ανθεκτικά στον άνεμο και στο ψύχος, έχουν πολύ μικρό βάρος και χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση.



Εικόνα 3.5: Πράσινη στέγη εκτατικού τύπου (<http://greeningthecity.wordpress.com/green-roofs/>)

Το σύστημα αυτό βρίσκει πολλές εφαρμογές σε μη προσβάσιμες στέγες κτιριακών εγκαταστάσεων, σε πρανή ή σε κτήρια τα οποία δεν είναι ικανά παρά να φέρουν ελαφρύ πρόσθετο φορτίο βλάστησης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα εξής φυτά:

- Sedum
- Ποώδη φυτά
- Αγρωστώδη και ποώδη φυτά

Το ύψος ανάπτυξης της βλάστησης κυμαίνεται μεταξύ των 100 και 150 mm.

Ημιεντατικός τύπος

Ο ημιεντατικός τύπος φύτευσης (Εικόνα 3.6) είναι φύτευση μεσαίων απαιτήσεων. Έχει πάχος 10- 25 cm, δημιουργεί μεγαλύτερα πρόσθετα στατικά φορτία και μεγαλύτερη οικονομική επιβάρυνση από έναν εκτατικό τύπο. Είναι φύτευση μεσαίων απαιτήσεων σε νερό, θρεπτικά συστατικά και συντήρηση. Περιλαμβάνει:

- Γρασίδια- πολυετή ποώδη φυτά
- Τοπική θαμνώδη- ποώδη βλάστηση
- Θαμνώδη βλάστηση

Το ύψος ανάπτυξης της βλάστησης δεν ξεπερνά τα 250 mm.



Εικόνα 3.6: Πράσινη στέγη ημιεντατικού τύπου (http://www.langley.co.uk/case-studies/-/webheath_estate_london_32/)

Εντατικός τύπος

Ο εντατικός τύπος φύτευσης (Εικόνα 3.7) είναι φύτευση αυξημένων απαιτήσεων. Δημιουργεί τα μεγαλύτερα πρόσθετα στατικά φορτία και τη μεγαλύτερη οικονομική επιβάρυνση από τους άλλους τύπους. Το πάχος του υποστρώματος φύτευσης είναι περίπου 15 με 40 cm.



Εικόνα 3.7: Πράσινη στέγη εντατικού τύπου, Hundertwasserhaus, Βιέννη (<http://en.wikipedia.org/wiki/Hundertwasserhaus>).

Αποτελεί φύτευση υψηλών απαιτήσεων σε νερό, θρεπτικά συστατικά και συντήρηση. Περιλαμβάνει ποικιλία φυτών, θάμνων και δέντρων, με τα οποία μπορούν να δημιουργηθούν κήποι με υψηλή βλάστηση, με στοιχεία νερού και να συνδυαστούν με στοιχεία «σκληρού τοπίου» (Wh-landscape), όπως πεζόδρομους ή δρόμους για τροχήλατα οχήματα. Δεν υπάρχει όριο στο ύψος ανάπτυξης της βλάστησης.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συνολικά οι τρεις τύποι της πράσινης στέγης και τα χαρακτηριστικά τους.

	Τύπος πράσινης στέγης		
Χαρακτηριστικά	Εκτατικός	Ημιεντατικός	Εντατικός
Συντήρηση	Χαμηλή	Περιοδική	Υψηλή
Άρδευση	Όχι	Περιοδική	Συστηματική
Βλάστηση	Βρύα, παχύφυτα, βότανα και γρασίδι	Γρασίδι, βότανα και θάμνοι	Γρασίδι, πολυετή φυτά, θάμνοι και δέντρα
Πάχος υποστρώματος	60-200 mm	120-250 mm	150- 400 mm, σε υπόγεια γκαράζ >1000 mm
Φορτίο	60- 150 kg/m ²	120- 200 kg/m ²	180- 500 kg/m ²
Κόστος	Χαμηλό	Μεσαίο	Υψηλό
Χρήση	Οικολογικό προστατευτικό στρώμα	Σχεδιασμένη πράσινη στέγη	Κήπος - πάρκο

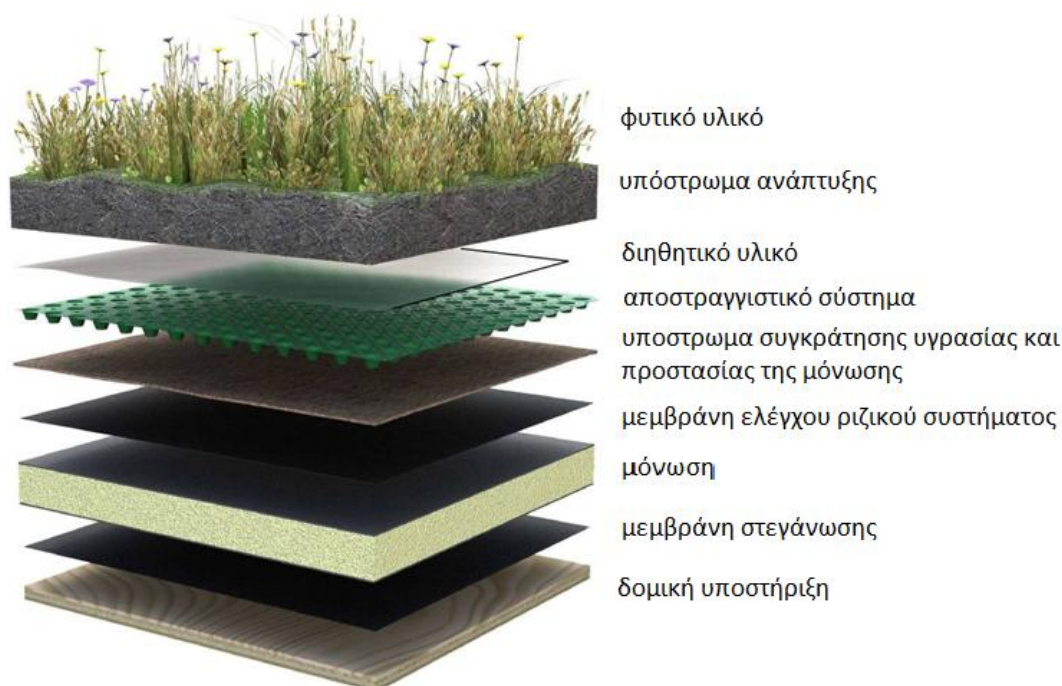
Πίνακας 3.1: Οι τύποι της πράσινης στέγης και τα χαρακτηριστικά τους (πηγή: http://www.igra-world.com/types_of_green_roofs/)

3.3. Ο σχεδιασμός και τα δομικά στοιχεία της στέγης

Για να ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός της στέγης θα πρέπει να καθοριστούν οι δομικές απαιτήσεις και η δομική ικανότητα της. Αρχικά θα υπολογιστεί το συνολικό βάρος της και έπειτα θα καθοριστούν τα βάρη των επιμέρους δομικών στοιχείων της, λαμβάνοντας υπόψη το νερό που βρίσκεται σ' αυτήν.

Δομικά στοιχεία μιας τυπικής πράσινης στέγης αποτελούν:

- η μόνωση της στέγης,
- τα προστατευτικά υλικά ,
- υλικά για τη συγκράτηση της υγρασίας,
- οι μεμβράνες ελέγχου των ριζών,
- το αποστραγγιστικό δίκτυο,
- το υπόστρωμα ανάπτυξης των φυτών,
- το φυτικό υλικό (εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8: Τομή μιας τυπικής πράσινης στέγης

Μόνωση της στέγης

Η μόνωση μπορεί να τοποθετηθεί είτε κάτω από τα υλικά της στέγης και της στεγάνωσης είτε πάνω από αυτά. Ανάλογα με το που θα τοποθετηθεί θα πρέπει να επιλεγθεί και το κατάλληλο μονωτικό υλικό αφού κάποια από αυτά είναι ευαίσθητα στην υγρασία και στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Τα πιο κοινά μονωτικά υλικά είναι τα εξής:

Για θερμομόνωση:

- polyisocyanurate
- εξηλασμένη πολυστερίνη
-

Για υγρομόνωση

- ΤΡΟ (θερμοπλαστική πολυολεφίνη)

- PVC (πολυβινυλοχλωρίδιο)
- Built – up roofing (πολλαπλές στρώσεις τσόχας και ασφάλτου)
- Τροποποιημένη ασφαλτος
- Υγρή επαλειφόμενη μεμβράνη
- Μεταλλική οροφή

Προστατευτικά υλικά

Τα υλικά αυτά προστατεύουν τη μόνωση από θερμικές, μηχανικές και χημικές απειλές κατά τη διάρκεια της κατασκευής της στέγης. Υπάρχουν και υλικά που παράλληλα προστατεύουν τη μόνωση από την υγρασία, αφού όπως αναφέρθηκε κάποια μονωτικά υλικά είναι ευαίσθητα σ' αυτήν. Ως προστασία χρησιμοποιούνται συνήθως:

- Πλάκες από γύψο
- Πλάκες από ίνες ξύλου
- Εξωθημένο πολυστυρένιο
- Υφάσματα

Υλικά για τη διατήρηση της υγρασίας

Συχνά στις πράσινες στέγες χρησιμοποιούνται υλικά για να συγκρατείται το νερό και να υπάρχει διαθέσιμο για περιόδους ξηρασίας. Ωστόσο, υπάρχουν αμφιβολίες για μερικά υλικά σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους και με τις επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρουν στο υπόστρωμα. Τέτοια υλικά είναι:

- Τα υφάσματα
- Κύστες και σωματίδια γέλης
- Κέλυφοι και τάπητες
- Υφάσματα με φίλτρο

Έλεγχος ανάπτυξης των ριζών

Είναι αναγκαίο να τοποθετηθεί ένα σύστημα ελέγχου των ριζών ώστε να μην δημιουργηθούν προβλήματα από τις ρίζες των φυτών ή από μικροοργανισμούς που ζουν σ' αυτές. Αυτό το σύστημα μπορεί να αποτελείται από:

- Μεμβράνες ή
- Θερμικό πλαστικό

Αποστραγγιστικό δίκτυο

Το αποστραγγιστικό δίκτυο έχει στόχο να απομακρύνει το περιττό νερό αλλά και να αποθηκεύσει κάποια ποσότητα. Η διατήρηση μιας επαρκούς ποσότητας νερού στο σύστημα πετυχαίνεται με τους εξής τρόπους:

- Με αδρανές πρόσμειγμα
- Με γεώφασμα
- Με συνδυασμό πυρήνα αποστράγγισης/ όρια ριζών

Υπόστρωμα ανάπτυξης των φυτών

Υπόστρωμα ονομάζεται το στρώμα στο οποίο αναπτύσσεται η βλάστηση. Αποτελεί τη θρεπτική ύλη και αποθηκεύει νερό, ενώ παράλληλα θα πρέπει να έχει μια επαρκή ποσότητα αέρα ώστε να μπορεί να προσφέρει στις ρίζες τη δυνατότητα να αγκιστρωθούν. Ανάλογα με τη βλάστηση θα πρέπει να επιλεγεί και το κατάλληλο υπόστρωμα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπόστρωμα από αδρανή υλικά, όπως διογκωμένο πηλό, τα οποία όμως είναι φτωχά σε θρεπτικά, μείγμα υποστρώματος από την αγορά ή μείγμα χώματος από την περιοχή.

Φυτικό υλικό

Η επιλογή της βλάστησης εξαρτάται από παρακάτω παράγοντες:

- Την κλίση της στέγης
- Τη δύναμη του υποστρώματος και την ικανότητα του να συγκρατεί νερό
- Τον προσανατολισμό
- Την έκθεση στους ανέμους
- Τον σκιασμό
- Το ύψος των βροχοπτώσεων
- Το κλίμα της περιοχής

Όσον αφορά τα είδη βλάστησης διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες:

- Σπορά (2 gr/m^2 και $3-8 \text{ gr/m}^2$ για την ξηρή σπορά)
- Φύτευση βλαστών ($30-50 \text{ gr/m}^2$)
- Θάμνοι
- Έτοιμοι χλοοτάπητες ($0.50 \times 1.00 \text{ m}$ ή 0.40×2.00 για πάχος υποστρώματος 2 cm)
- Στρώματα βλάστησης ($1.00 \times 1.00 \text{ m}$ για πάχος υποστρώματος 3.5 cm)

Σχετικές προδιαγραφές για τη βλάστηση παρέχονται από τις οδηγίες του FLL, ενός οδηγού για το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη συντήρηση μιας πράσινης στέγης.

3.4. Ο χρόνος ζωής

Οι πράσινες στέγες έχουν σχεδόν απεριόριστο χρόνο ζωής καθώς το εδαφικό και το φυτικό υλικό προστατεύουν τη στέγη από τις καιρικές συνθήκες και τους ρύπους. Βέβαια, για να ισχύει αυτό θα πρέπει η στέγη να είναι σχεδιασμένη και κατασκευασμένη σωστά. Θα πρέπει, παρόλα αυτά, να ληφθεί υπόψη η δυσκολία επισκευής σε περίπτωση βλάβης των στεγανωτικών στρώσεων καθώς απαιτείται άμεση αντιμετώπιση του προβλήματος. Παρόλο που μπορεί να υπάρξει τοπική αποξήλωση των προβληματικών στρώσεων της κατασκευής και πάλι η διαδικασία δεν παύει να είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.

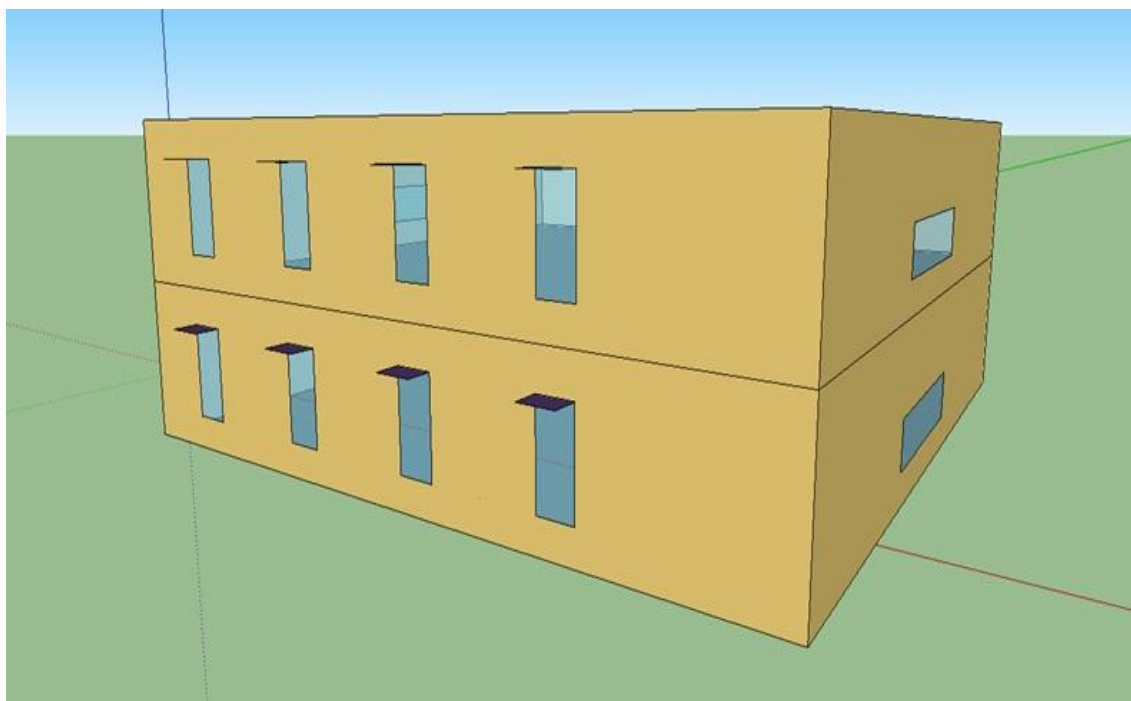
4. Η προσομοίωση κτιρίου με χρήση του προγράμματος EnergyPlus

Το EnergyPlus είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης ενεργειακής ανάλυσης και θερμικού φορτίου. Με βάση την περιγραφή του χρήστη για το κτίριο από την άποψη της φυσικής σύνθεσης του, συνδεδεμένο με μηχανικά συστήματα, κ.λπ., το EnergyPlus υπολογίζει τα φορτία θέρμανσης και ψύξης που είναι απαραίτητα για τη διατήρηση ενός επιθυμητού θερμικού ελέγχου, τις συνθήκες ενός βοηθητικού συστήματος HVAC (σύστημα θέρμανσης, αερισμού και ψύξης), και την κατανάλωση ενέργειας τους πρωτογενούς εξοπλισμού της μονάδας, καθώς και πολλές άλλες λεπτομέρειες προσομοίωσης που είναι απαραίτητες ώστε η προσομοίωση να λειτουργεί όπως θα λειτουργούσε το πραγματικό κτίριο. Πολλά από τα χαρακτηριστικά προσομοίωσης έχουν κληρονομηθεί από παλαιότερα προγράμματα (BLAST και DOE-2).

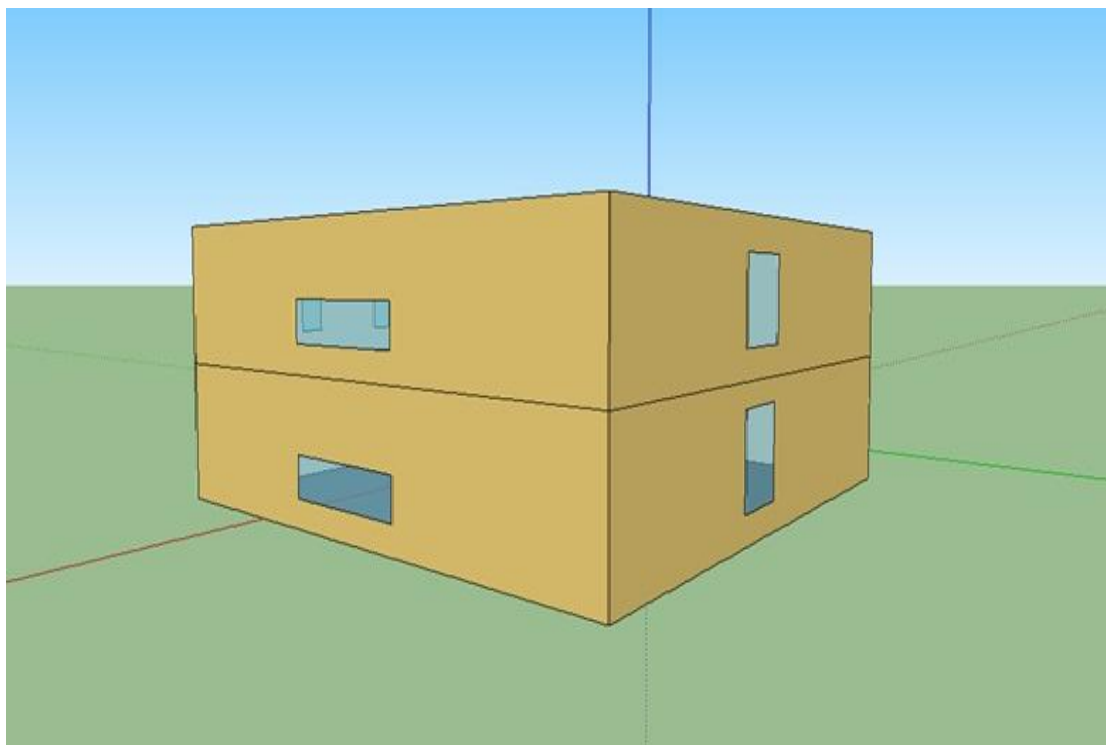
Για να εξεταστεί η απόδοση της στέγης στην εξοικονόμηση της ενέργειας θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του κτιρίου με μια ψυχρή και με μια πράσινη στέγη. Στην ενότητα αυτή θα δοθούν πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο του κτιρίου και τους παράγοντες προσομοίωσης, και τέλος θα γίνει η ανάλυση του θερμικού ισοζυγίου μιας απλής στέγης και μιας φυτεμένης και θα παρουσιαστούν τα μαθηματικά μοντέλα του προγράμματος.

4.1. Το μοντέλο του κτιρίου

Το κτίριο για το οποίο γίνεται η προσομοίωση παρουσιάζεται στις Εικόνες 4.1 και 4.2. Η τρισδιάστατη εικόνα του κτιρίου πραγματοποιείται από το πρόγραμμα Google SketchUp, το οποίο μπορεί να απεικονίσει τη φυσική σύνθεση της κατασκευής με τη χρήση των αρχείων του EnergyPlus.



Εικόνα 4.1: Νοτιοανατολική όψη του κτιρίου



Εικόνα 4.2: Βορειοανατολική όψη του κτιρίου

Οι διαστάσεις του κτιρίου είναι $20\text{ m} * 20\text{ m} * 7\text{ m}$. Αποτελείται από δυο ορόφους, ο καθένας από τους οποίους καταλαμβάνει μια επιφάνεια των 400 m^2 και αποτελεί την κάθε θερμική ζώνη. Το κτίριο βρίσκεται πάνω στον άξονα βορά- νότου και η περιοχή στην οποία έχει τοποθετηθεί έχει χαρακτηριστεί αστική.

Το κτίριο στεγάζει χώρους εργασίας, επομένως τα ωράρια χρήσης του φωτισμού, του ηλεκτρικού εξοπλισμού κλπ., έχουν καθοριστεί με βάση τη λειτουργία του.

Τα δομικά στοιχεία του κτιρίου

Για τον υπολογισμό του θερμικού ισοζυγίου είναι απαραίτητος και ο καθορισμός των δομικών στοιχείων των επιφανειών του, καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά τους (π.χ. το πάχος, η θερμική αγωγιμότητα). Τα δομικά στοιχεία του κτιρίου και οι ιδιότητες τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

	Υλικό	Τραχύτητα	Πάχος (m)	Αγωγιμότητα (W/ m K)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Ειδική θερμότητα (J / kg K)	Θερμική αντίσταση (m ² K / W)
Εξωτερικό πάτωμα	I02 50mm μονωτική σανίδα	Μέτριο προς τραχύ	0,0508	0,03	43	1210	-
	M15 200mm βαρύ σκυρόδεμα	Μέτριο προς τραχύ	0,2032	1,95	2240	900	-
Εσωτερικό πάτωμα	F16 πλάκα ηχομόνωσης	Μέτριο προς λείο	0,0191	0,06	368	590	-
	F05 εναέριος χώρος αντίστασης της οροφής	-	-	-	-	-	0,18
	M11 100mm ελαφρύ σκυρόδεμα	Μέτριο προς τραχύ	0,1016	0,53	1280	840	-
Εξωτερικός τοιίχος	M01 100mm τούβλο	Μέτριο προς τραχύ	0,1016	0,89	1920	790	-
	M15 200mm βαρύ σκυρόδεμα	Μέτριο προς τραχύ	0,2032	1,95	2240	900	-
	I02 50mm μονωτική σανίδα	Μέτριο προς τραχύ	0,0508	0,03	43	1210	-
	F04 εναέριος χώρος αντίστασης του τοίχου	-	-	-	-	-	0,15
	G01a 19mm γυψοσανίδα	Τραχύ	0,019	0,16	800	1090	-
Εσωτερικός τοιίχος	G01a 19mm γυψοσανίδα	Τραχύ	0,019	0,16	800	1090	-
	F04 εναέριος χώρος αντίστασης του τοίχου	-	-	-	-	-	0,15
	G01a 19mm γυψοσανίδα	Τραχύ	0,019	0,16	800	1090	-
Εσωτερική οροφή	M11 100mm ελαφρύ σκυρόδεμα	Μέτριο προς τραχύ	0,1016	0,53	1280	840	-
	F05 εναέριος χώρος αντίστασης της οροφής	-	-	-	-	-	0,18
	F16 πλάκα ηχομόνωσης	Μέτριο προς λείο	0,0191	0,06	368	590	-
Εξωτερικά παράθυρα	Διάφανος υαλοπίνακας 3mm	-	-	-	-	-	-
	Αέρας 13mm	Gas Type	0,0127	-	-	-	-
	Διάφανος υαλοπίνακας 3mm	-	-	-	-	-	-
Εσωτερικά παράθυρα	Διάφανος υαλοπίνακας 3mm	-	-	-	-	-	-

Εξωτερική πόρτα	F08 Μεταλλική επιφάνεια	Λείο	0,0008	45,28	7824	500	-
	I01 25mm μονωτική σανίδα	Μέτρο προς λείο	0,0254	0,03	43	1210	-
Εσωτερική πόρτα	G05 25mm ξύλο	Μέτριο προς λείο	0,0254	0,15	608	1630	-

Πίνακας 4.1: Τα δομικά στοιχεία του κτιρίου και οι ιδιότητές τους.

Η δομή της στέγης και οι ιδιότητες των υλικών της θα αναφερθούν στις επόμενες παραγράφους, καθώς οι ιδιότητες της θα τροποποιηθούν για να δοκιμαστεί η επίδρασή τους στην απόδοση της στέγης.

Στον Πίνακα 4.2 καταγράφονται τα χαρακτηριστικά των υαλοπινάκων.

Χαρακτηριστικά υαλοπινάκων	
Υλικό	Διάφανος υαλοπίνακας 3mm
Φασματικός μέσος	Τύπος οπτικών δεδομένων
Πάχος (m)	0,03
Ηλιακή μετάδοση*	0,837
Ηλιακή ανάκλαση της μπροστινής πλευράς*	0,075
Ηλιακή ανάκλαση της οπίσθιας πλευράς*	0,075
Διαπερατότητα ορατής ακτινοβολίας*	0,898
Ανάκλαση ορατής ακτινοβολίας της μπροστινής πλευράς*	0,081
Ανάκλαση ορατής ακτινοβολίας της οπίσθιας πλευράς*	0,081
Μετάδοση υπέρυθρης ακτινοβολίας*	0
Υπέρυθρη ημισφαιρική εκπομπή της μπροστινής πλευράς	0,84
Υπέρυθρη ημισφαιρική εκπομπή της οπίσθιας πλευράς	0,84
Αγωγιμότητα (W/ m K)	0,9

*σε κανονική πρόσπτωση

Πίνακας 4.2: Τα χαρακτηριστικά των υαλοπινάκων

4.2. Η προσομοίωση του κτιρίου

Η προσομοίωση του κτιρίου πραγματοποιείται για μια τυχαία καλοκαιρινή ημέρα, λαμβάνοντας υπόψη τα μετεωρολογικά δεδομένα τριών περιοχών, των Χανίων, της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης

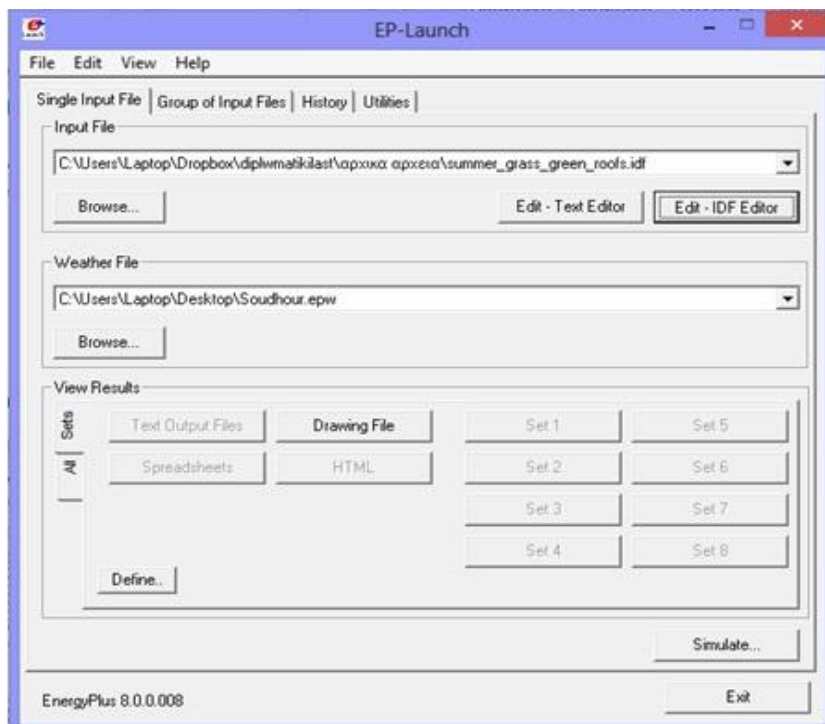
Ένα πραγματικό κτίριο για το συγκεκριμένο μήνα που γίνεται η προσομοίωση θα έχει ήδη κάποιο θερμικό φορτίο και κάποια θερμοκρασία. Για να γίνει λοιπόν επιτυχημένη η προσομοίωση χρησιμοποιούνται κάποιες συναρτήσεις ώστε να βρεθούν οι αρχικές συνθήκες που θα υπήρχαν στην πραγματικότητα. Η τιμή του ανεκτού φορτίου σύγκλισης (Loads Convergence Tolerance Value) είναι ίση με 0,04. Αυτή η τιμή αντιπροσωπεύει τον αριθμό στον οποίο οι τιμές του φορτίου πρέπει να συμφωνήσουν πριν γίνει η σύγκλιση. Η τιμή του ανεκτού φορτίου είναι ένα κλάσμα του φορτίου. Η τιμή της ανεκτής θερμοκρασίας σύγκλισης είναι ίση με 0,4 ΔC. Αυτή η τιμή αντιπροσωπεύει τον αριθμό στον οποίο οι θερμοκρασίες ζώνης πρέπει να συμφωνήσουν (από την προηγούμενη επανάληψη) πριν επιτευχθεί «σύγκλιση». Σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν το κριτήριο της θερμοκρασίας ή του φορτίου είναι ικανοποιημένο.

Το πεδίο «maximum number of warmup days» καθορίζει τον αριθμό των ημερών «προθέρμανσης» που μπορεί να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση μέχρι να επιτευχθεί η "σύγκλιση". Έχουν καθοριστεί οι 25 ημέρες, οι οποίες είναι παραπάνω από αρκετές για μία απλή κατασκευή. Παρόλα αυτά εάν το πρόγραμμα "ξεμείνει" από ημέρες πριν γίνει η "σύγκλιση", θα εμφανιστεί μήνυμα σφάλματος.

Η ηλιακή κατανομή είναι πλήρης, εσωτερική και εξωτερική. Αυτό σημαίνει πως οι σκιά που δημιουργείται στις εξωτερικές επιφάνειες από ανεξάρτητους παράγοντες σκίασης είναι υπολογισμένη. Το πρόγραμμα υπολογίζει το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κάθε επιφάνεια της ζώνης, συμπεριλαμβάνοντας το πάτωμα, τους τοίχους και τα παράθυρα προβάλλοντας τις ακτίνες του ηλίου από τα εξωτερικά παράθυρα, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των εξωτερικών επιφανειών σκίασης και τις συσκευές σκίασης των παραθύρων. Το πρόγραμμα θα υπολογίσει επίσης, το ποσό της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο εσωτερικό ενός εξωτερικού παραθύρου (από τα υπόλοιπα παράθυρα της ζώνης) και απορροφάται από αυτό, το ποσό που αντανακλάται πίσω στη ζώνη και το ποσό που μεταδίδεται έξω από το χώρο.

Κατά την προσομοίωση πραγματοποιούνται 4 βήματα ανά ώρα για το μοντέλο με την ψυχρή στέγη και 60 στο μοντέλο με την πράσινη στέγη.

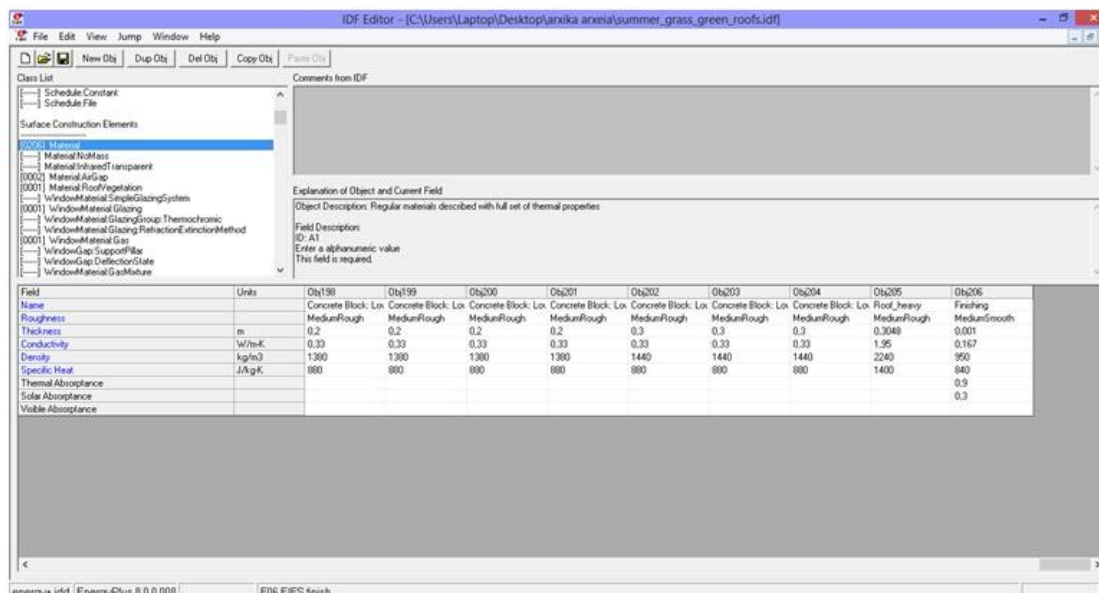
Η κεντρική κονσόλα του προγράμματος φαίνεται στην Εικόνα 4.3. Για τον καθορισμό των παραμέτρων της στέγης ανοίγουμε την επιλογή «Edit - IDF Editor».



Εικόνα 4.3: Η κεντρική κονσόλα του EnergyPlus.

Η προσομοίωση της ψυχρής στέγης

Η προσθήκη της ψυχρής στέγης γίνεται στην επιλογή material όπου έχει προστεθεί το τελείωμα της στέγης.



Εικόνα 4.4: Η προσθήκη της ψυχρής στέγης στο EnergyPlus.

Σ' αυτό το σημείο καθορίζονται και οι ιδιότητες του υλικού αυτού. Στη συγκεκριμένη εικόνα η ηλιακή απορροφητικότητα είναι ίση με 0,3.

Γίνονται, όμως, διάφορες αλλαγές στην τιμή της ηλιακής απορροφητικότητας, με κάποιες να μην αντιστοιχούν σε ψυχρά αλλά σε θερμά υλικά, ώστε να διαπιστωθεί η ροή της ενέργειας σε κάθε περίπτωση.

Η δομή της στέγης γίνεται στην επιλογή construction. Τα δομικά στοιχεία της στέγης και οι ιδιότητες τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 ξεκινώντας με την εξωτερική επιφάνεια της στέγης και καταλήγοντας στο εσωτερικό.

Δομικά στοιχεία της στέγης								
Υλικό	Τραχύτητα	Πάχος (m)	Αγωγιμότητα (W / m K)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Ειδική θερμότητα (J / kg K)	Θερμική αντίσταση (m ² K / W)	Θερμική απορροφητικότητα	Ηλιακή απορροφητικότητα
Τελείωμα	Μέτριο προς λείο	0,001	0,167	950	840	-	0,9	-
M02 150mm ελαφρύ σκυρόδεμα	Μέτριο προς τραχύ	0,1524	0,49	512	880	-	-	-
I01 25mm μονωτική σανίδα	Μέτριο προς τραχύ	0,0254	0,03	43	1210	-	-	-
F05 εναέριος χώρος αντίστασης της οροφής	-	-	-	-	-	0,18	-	-
F16 πλάκα ηχομόνωσης	Μέτριο προς λείο	0,0191	0,06	368	590	-	-	-

Πίνακας 4.3: Η δομή της ψυχρής στέγης και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων της

Για την ψυχρή στέγη θα υπολογιστούν:

- Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης
- Η ροή της θερμότητας από τον αέρα προς τη στέγη

Η προσομοίωση της πράσινης στέγης

Η προσθήκη της πράσινης στέγης γίνεται από το Material: RoofVegetation. Σ' αυτό το σημείο καταγράφονται τα χαρακτηριστικά της πράσινης στέγης. Οι τιμές της πρώτης περίπτωσης που εξετάστηκε παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Field	Units	Object 1
Όνομα	-	Green_roof
Ύψος φυτών	m	0,03
Δείκτης επιφάνειας φυλλώματος	-	0,005
Ανάκλαση φυλλώματος	-	0,22
Εκπομπή φυλλώματος	-	0,95
Ελάχιστη στοματική αντίσταση	s/m	180
Όνομα στρώσης εδάφους	-	Green Roof Soil
Τραχύτητα	-	Μέτριο προς τραχύ
Πάχος	m	0,1
Αγωγιμότητα του ξηρού εδάφους	W/ m K	0,35
Πυκνότητα του ξηρού εδάφους	Kg/ m ³	1100
Ειδική θερμότητα του ξηρού εδάφους	J/ kg K	1200
Θερμική απορροφητικότητα	-	0,9
Ηλιακή απορροφητικότητα	-	0,7
Ορατή απορροφητικότητα	-	0,75
Ποσοστό υγρασίας κορεσμού κατ' όγκο του εδαφικού στρώματος	-	0,3
Ποσοστό υπολειμματικής υγρασίας κατ' όγκο του εδαφικού στρώματος	-	0,01
Ποσοστό αρχικής υγρασίας κατ' όγκο του εδαφικού στρώματος	-	0,1
Μέθοδος υπολογισμού της διάχυσης της υγρασίας	-	Advanced

Πίνακας 4.4: Τα αρχικά χαρακτηριστικά της πράσινης στέγης

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για το σχεδιασμό των υπόλοιπων περιπτώσεων που εξετάζονται. Διάφορες παράμετροι μεταβάλλονται σ' αυτό το σημείο, όπως το ύψος των

φυτών ή ο δείκτης επιφάνειας του φυλλώματος. Οι μεταβολές στα χαρακτηριστικά της πράσινης στέγης θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο της ανάλυσης ευαισθησίας.

Για το κτήριο με την πράσινη στέγη έχει καθοριστεί πως η θερμοκρασία του εδάφους στην επιφάνεια του κτιρίου είναι ίση με 18 °C για όλους τους μήνες του χρόνου.

Η άρδευση που έχει οριστεί λειτουργεί καθημερινά τους καλοκαιρινούς μήνες από τις 9:00 μέχρι τις 18:00 στο 3% ενώ τις υπόλοιπες ώρες η παροχή του νερού είναι μηδενική. Ο τύπος του μοντέλου άρδευσης που έχει καθοριστεί είναι ο SmartSchedule. Αυτός ο τύπος επιτρέπει στο πρόγραμμα να παρακαμφθεί η άρδευση εάν η τρέχουσα κατάσταση της υγρασίας του εδάφους περισσότερη του 40% του κορεσμού του. Αρχικά η απόδοση της στέγης θα εξεταστεί χωρίς να είναι ενεργοποιημένη η άρδευση, ενώ στη συνέχεια θα ενεργοποιηθεί ώστε να εξεταστεί η επίδρασή της.

Στη συνέχεια στο construction προστίθεται η πράσινη στέγη σαν αντικείμενο εισόδου, όπου περιγράφονται οι στρώσεις και τα υλικά της στέγης. Η δομή της στέγης και τα χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων της παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Δομικά στοιχεία της στέγης						
Υλικό	Τραχύτητα	Πάχος (m)	Αγωγιμότητα (W / m K)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Ειδική θερμότητα (J / kg K)	Θερμική αντίσταση (m ² K / W)
Πράσινη στέγη	-	-	-	-	-	-
M06 300mm σκυρόδεμα	Μέτριο προς τραχύ	0,3048	1,4	800	880	920
I01 25mm πλάκα μόνωσης	Μέτριο προς τραχύ	0,0254	0,03	43	1210	-
F05 στρώμα αέρα θερμικής αντίστασης	-	-	-	-	-	0,18
F16 πλακάκια ηχοπροστασίας	Μέτριο προς λείο	0,0191	0,06	368	590	-

Πίνακας 4.5 : Η δομή της στέγης στην περίπτωση της πράσινης.

Τέλος, στην επιλογή variables επιλέγονται τα μεγέθη που θα υπολογιστούν με την εκτέλεση του προγράμματος. Για την πράσινη στέγη θα υπολογιστούν:

- Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης
- Η ροή της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στο έδαφος
- Η ροή της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στη βλάστηση
- Η ροή της λανθάνουσας θερμότητας από το έδαφος στον αέρα
- Η ροή της λανθάνουσας θερμότητας από τη βλάστηση στον αέρα

- Η υγρασία στην επιφάνεια του εδάφους
- Η υγρασία κοντά στις ρίζες των φυτών
- Το αθροιστικό βάθος άρδευσης
- Το τρέχον βάθος άρδευσης

Ενώ ζητείται παράλληλα να εμφανιστούν οι μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής την ημέρα της προσομοίωσης. Στην κεντρική κονσόλα (Εικόνα 4.3) στην επιλογή weather file επιλέγεται το αρχείο καιρού της κάθε περιοχής. Τα αρχεία καιρού μπορεί κανείς να τα βρει στο internet, στην σελίδα του EnergyPlus.

Τα μετεωρολογικά μεγέθη τα οποία έχουν ζητηθεί να παρουσιαστούν με την εκτέλεση του προγράμματος είναι:

- Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας
- Η ταχύτητα του ανέμου
- Η σχετική ατμοσφαιρική υγρασία
- Η άμεση και η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία

Η προσθήκη του συστήματος ψύξης

Στη συνέχεια, προστίθεται στο μοντέλο του κτηρίου ένα σύστημα ψύξης. Στο HVACTemplate: Thermostat ορίζονται οι θερμοκρασίες του θερμοστάτη. Η μέγιστη θερμοκρασία για τη θέρμανση που έχει οριστεί είναι οι 20 ° C, ενώ για την ψύξη οι 25 ° C. Έπειτα, προστίθεται το σύστημα ψύξης, όπου στην προκειμένη περίπτωση έχει επιλεγθεί το Ideal Loads Air System για τις δύο θερμικές ζώνες του κτιρίου και έχει ρυθμιστεί να λειτουργεί σύμφωνα με τα όρια του θερμοστάτη.

Στα στοιχεία που υπολογίζει το μοντέλο τώρα θα προστεθεί και η κατανάλωση ενέργειας για την ψύξη των δύο θερμικών ζωνών.

4.3. Το ενεργειακό ισοζύγιο της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης

Το ενεργειακό ισοζύγιο της εξωτερικής επιφάνειας (Εικόνα 4.11) είναι:

$$q''_{sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0$$

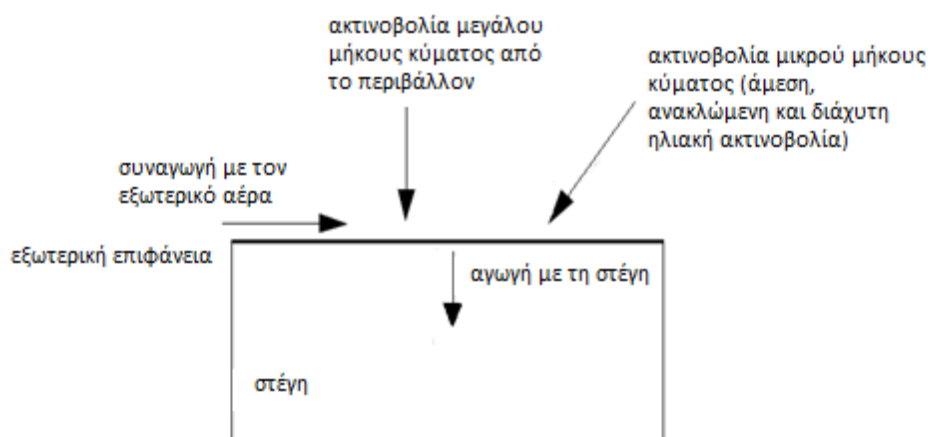
Όπου,

q''_{sol} = η ροή θερμότητας με ακτινοβολία της απορροφώμενης άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας (μηκρού μήκους κύματος)

q''_{LWR} = η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος με τον αέρα και το περιβάλλον

q''_{conv} = η ανταλλαγή θερμότητας με συναγωγή με τον εξωτερικό αέρα

q''_{ko} = η ανταλλαγή θερμότητας με αγωγή στη στέγη (q/A)



Εικόνα 4.11: Το ενεργειακό ισοζύγιο της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης

Όλοι οι όροι είναι θετικοί για την καθαρή ροή στην επιφάνεια, εκτός από τον όρο αγωγιμότητας, η οποία γενικά θεωρείται ότι είναι θετική στην κατεύθυνση του τοιχώματος από έξω προς τα μέσα. Κάθε ένα από τα συστατικά του ισοζυγίου της θερμότητας περιγράφονται εν συντομία παρακάτω.

Εξωτερική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος

Η εξωτερική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (q''_{asol}) περιλαμβάνει την άμεση και τη διάχυτη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από την επιφάνεια της στέγης. Επηρεάζεται από τη θέση, τη γωνία που είναι στραμμένη η επιφάνεια και την κλίση της, τις ιδιότητες του υλικού, τις καιρικές συνθήκες, κλπ. Τα θερμικά κέρδη δίνονται από την εξίσωση:

$$Q_{so} = a \left(I_b \cos \theta \frac{S_s}{S} + I_s F_{ss} + I_g F_{sg} \right)$$

Όπου,

a = η ηλιακή απορροφητικότητα της επιφάνειας

A = η γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του ήλιου

S = το εμβαδόν της επιφάνειας

S_s = η ηλιόλουστη επιφάνεια

I_b = η ένταση της δέσμης της άμεσης ακτινοβολίας

I_s = η ένταση της διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό

I_g = η ένταση της ανακλώμενης από το έδαφος διάχυτης ακτινοβολίας

F_{ss} = ο συντελεστής της γωνίας μεταξύ της επιφάνειας και του ουρανού

F_{sg} = ο συντελεστής της γωνίας μεταξύ της επιφάνειας και του εδάφους

Για την επιφάνεια ενός κτιρίου που βρίσκεται σε μια πεδιάδα χωρίς ιδιαίτερα χαρακτηριστικά:

$$F_{ss} = \frac{1 + \cos\varphi}{2}$$

και

$$F_{sg} = \frac{1 - \cos\varphi}{2}$$

Αν η επιφάνεια είναι σκιασμένη το πρόγραμμα τροποποιεί το συντελεστή F_{ss} με ένα συντελεστή διόρθωσης που θα λαμβάνει υπόψη την κατανομή της ακτινοβολίας από τον ουρανό. Η σκίαση από την ηλιακή διάχυτη ακτινοβολία του εδάφους δεν υπολογίζεται από το πρόγραμμα. Ο χρήστης θα πρέπει να εκτιμήσει την επίδραση της σκίασης και να τροποποιήσει την τιμή εισόδου του F_{sg} αναλόγως.

Εξωτερική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος

Η ροή ανταλλαγής (q''_{LWR}) είναι μια τυπική διατύπωση ανταλλαγής ακτινοβολίας μεταξύ της επιφάνειας, του ουρανού και του εδάφους. Η ροή θερμότητας της ακτινοβολίας υπολογίζεται από την απορροφητικότητα της επιφάνειας, από τη θερμοκρασία της επιφάνειας, από τη θερμοκρασία του ουρανού και του εδάφους και τους παράγοντες θέας του ουρανού και του εδάφους.

Η ανταλλαγή θερμότητας ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος μεταξύ των επιφανειών εξαρτάται από τις θερμοκρασίες των επιφανειών, τις χωρικές σχέσεις μεταξύ των επιφανειών και του περιβάλλοντος και τις ιδιότητες των υλικών των επιφανειών. Οι σχετικές ιδιότητες του υλικού της επιφάνειας, εκπομπή (ϵ) και απορροφητικότητα (α), είναι

πολύπλοκες συναρτήσεις της θερμοκρασίας, της γωνίας και του μήκους κύματος για κάθε επιφάνεια. Ωστόσο, είναι γενικά αποδεκτές κάποιες υποθέσεις για τον υπολογισμό των φορτίων στα κτήρια (Chapman 1984; Lienhard 1981), οι οποίες χρησιμοποιούνται σε όλες σχεδόν τις εφαρμογές μηχανικής:

- κάθε επιφάνεια εκπέμπει ή αντανακλά διάχυτα και είναι γκρίζα και αδιαφανή ($\alpha = \varepsilon$, $\tau = 0$, $\rho = 1 - \varepsilon$)
- κάθε επιφάνεια έχει ομοιόμορφη θερμοκρασία
- η ενεργειακή ροή που αφήνει μια επιφάνεια είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την επιφάνεια
- το μέσο εντός του περιβλήματος δεν συμμετέχει

Θεωρούμε ένα περίβλημα που αποτελείται από την εξωτερική επιφάνεια του κτιρίου, από την περιβάλλουσα επιφάνεια του εδάφους και από τον ουρανό. Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω παραδοχές, μπορεί να προσδιοριστεί η ροή ανταλλαγής θερμικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος στην εξωτερική επιφάνεια του κτηρίου (Walton 1983; McClellan & Pedersen 1997). Η συνολική ροή ανταλλαγής θερμικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος είναι το άθροισμα των στοιχείων λόγω ανταλλαγής ακτινοβολίας με το έδαφος, τον ουρανό και τον αέρα.

$$q_{LWR}'' = q_{gnd}'' + q_{sky}'' + q_{air}''$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο των Stefan-Boltzmann για κάθε συνιστώσα:

$$q_{LWR}'' = \varepsilon \sigma F_{gnd} (T_{gnd}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon \sigma F_{sky} (T_{sky}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon \sigma F_{air} (T_{air}^4 - T_{surf}^4)$$

Όπου,

ε = η εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλου κύματος της επιφάνειας

σ = ο συντελεστής Stefan-Boltzmann

F_{gnd} = συντελεστής θέασης της επιφάνειας της στέγης στη θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους (view factor of wall surface to ground surface temperature)

F_{sky} = συντελεστής θέασης της επιφάνειας της στέγης στη θερμοκρασία του ουρανού (view factor of wall surface to sky temperature)

F_{air} = συντελεστής θέασης της επιφάνειας της στέγης στη θερμοκρασία του αέρα (view factor of wall surface to air temperature)

T_{surf} = η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας

T_{gnd} = η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους

T_{sky} = η θερμοκρασία του ουρανού

T_{air} = η θερμοκρασία του αέρα

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδες	Διακύμανση
q''_{LWR}	Ροή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος στην εξωτερική επιφάνεια	W/m^2	-
h_r	Γραμμικοποιημένος συντελεστής της μεταφοράς θερμότητας στη θερμοκρασία του αέρα	$W/(m^2 K)$	-
T_{surf}	Θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας	K	-
T_{air}	Θερμοκρασία του αέρα	K	-
T_{gnd}	Θερμοκρασία του εδάφους	K	-
T_{sky}	Ενεργός θερμοκρασία του ουρανού	K	-
F_{gnd}	Παράγοντας θέασης της επιφάνειας της στέγης από το έδαφος	-	0 ~ 1
F_{sky}	Παράγοντας θέασης της επιφάνειας της στέγης από τον ουρανό	-	0 ~ 1
F_{air}	Παράγοντας θέασης της επιφάνειας της στέγης από τον αέρα	-	0 ~ 1
ϵ	Εκπομπή μεγάλου μήκους κύματος της επιφάνειας	-	0 ~ 1
σ	Stefan- Boltzman	$W/m^2 \cdot K^4$	

Πίνακας 4.6: Λίστα μεταβλητών για τη ροή θερμότητας με ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος

Οι γραμμικοποιημένοι συντελεστές μεταφοράς ακτινοβολίας θερμότητας έχουν εισαχθεί ώστε να καταστήσουν την παραπάνω εξίσωση πιο συμβατή με το ισοζυγίου θερμότητας,

$$q''_{LWR} = h_{r,gnd} (T_{gnd} - T_{surf}) + h_{r,sky} (T_{sky} - T_{surf}) + h_{r,air} (T_{air} - T_{surf})$$

Όπου,

$$h_{r,gnd} = \frac{\varepsilon \sigma F_{gnd} (T_{surf}^4 - T_{gnd}^4)}{T_{surf} - T_{gnd}}$$

$$h_{r,sky} = \frac{\varepsilon \sigma F_{sky} (T_{surf}^4 - T_{sky}^4)}{T_{surf} - T_{sky}}$$

$$h_{r,air} = \frac{\varepsilon \sigma F_{air} (T_{surf}^4 - T_{air}^4)}{T_{surf} - T_{air}}$$

Οι παράγοντες θέασης μεγάλου μήκους κύματος για το έδαφος και τον ουρανό υπολογίζονται με τις παρακάτω εξισώσεις (Walton 1983):

$$F_{ground} = 0.5 (1 - \cos\varphi)$$

$$F_{sky} = 0.5 (1 + \cos\varphi)$$

Όπου φ είναι η γωνία κλίσης της επιφάνειας.

Ο συντελεστής θέασης προς τον ουρανό διαχωρίζεται περαιτέρω στην ακτινοβολία του ουρανού και του αέρα με:

$$\beta = \sqrt{0.5(1 + \cos\varphi)}$$

Η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους θεωρείται ότι είναι η ίδια με την θερμοκρασία του αέρα. Οι τελικές μορφές των συντελεστών μεταφοράς ακτινοβολίας θερμότητας παρουσιάζονται εδώ.

$$h_{r,gnd} = \frac{\varepsilon \sigma F_{gnd} (T_{surf}^4 - T_{air}^4)}{T_{surf} - T_{air}}$$

$$h_{r,sky} = \frac{\varepsilon \sigma F_{sky} (T_{surf}^4 - T_{sky}^4)}{T_{surf} - T_{sky}}$$

$$h_{r,air} = \frac{\varepsilon \sigma F_{sky} (1 - \beta) (T_{surf}^4 - T_{air}^4)}{T_{surf} - T_{air}}$$

Ανταλλαγή με Εσωτερική/ εξωτερική συναγωγή

Η μεταφορά θερμότητας από μια επιφάνεια με συναγωγή μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_c = h_{c,ext} A (T_{surf} - T_{air})$$

Όπου:

Q_c = το ποσοστό της εξωτερικής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή

$h_{c,ext}$ = ο συντελεστής της εξωτερικής συναγωγής

A = η επιφάνεια

T_{surf} = η θερμοκρασία της επιφάνειας

T_{air} = η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα

Σημαντική έρευνα έχει γίνει για τη διαμόρφωση μοντέλων για την εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον. Το EnergyPlus προσφέρει μια ευρεία επιλογή διαφορετικών μεθόδων για τον προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή εξωτερικής συναγωγής ($h_{c,ext}$), με μεγάλη διαφορά μεταξύ τους (Cole & Sturrock 1977; Yazdani & Klems 1994). Η επιλογή των εξισώσεων του μοντέλου για το $h_{c,ext}$ μπορεί να γίνει σε δυο διαφορετικά επίπεδα. Το πρώτο είναι ένα σύνολο επιλογών διαθέσιμο στο αντικείμενο εισόδου `SurfaceConvectionAlgorithm:Outside` που παρέχει έναν τρόπο επιλογής των εξισώσεων που εφαρμόζονται στο μοντέλο. Τα αντικείμενα εισόδου `SurfaceProperty:ConvectionCoefficients` και `SurfaceProperty:ConvectionCoefficients:MultipleSurface` παρέχουν επίσης τρόπους για τη επιλογή των εξισώσεων ή τις τιμές που εφαρμόζονται για συγκεκριμένες επιφάνειες. Αυτές οι βασικές επιλογές που προσδιορίζονται από το κλειδί που χρησιμοποιείται για την είσοδο και περιλαμβάνουν:

- SimpleCombined
- TARP
- MoWiTT
- DOE-2
- AdaptiveConvectionAlgorithm

Στη συγκεκριμένη εργασία για την εξωτερική συναγωγή χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος DOE-2, ενώ για την εσωτερική ο αλγόριθμος TARP. Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι αναλύονται παρακάτω. Περισσότερες πληροφορίες για τους υπόλοιπους μπορεί να βρει κανείς στο Engineering Reference του EnergyPlus.

TARP Algorithm (Thermal Analysis Research Program)

Ο αλγόριθμος TARP είναι ένα σημαντικό εργαλείο και προκάτοχος του EnergyPlus (Walton 1983). Αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για τη συναγωγή της θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον.

Η συναγωγή είναι χωρισμένη σε δυο συστατικούς παράγοντες, τον εξαναγκασμένο και τον φυσικό. Η συνολική συναγωγή είναι το άθροισμά τους.

$$h_c = h_f + h_n$$

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδες	Διακύμανση
A	Εμβαδόν της επιφάνειας	m ²	/=0
h_c	Συντελεστής εξωτερικής συναγωγής της επιφάνειας	W/(m ² K)	-
h_f	Συντελεστής εξαναγκασμένης συναγωγής	W/(m ² K)	-
h_n	Συντελεστής φυσικής συναγωγής	W/(m ² K)	-
P	Περίμετρος της επιφάνειας	m	-
R_f	Πολλαπλασιαστής τραχύτητας της επιφάνειας	-	-
T_{air}	Θερμοκρασία του αέρα στο ύψος της επιφάνειας	°C	-
T_{so}	Θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας	°C	-
ΔT	Διαφορά θερμοκρασίας της επιφάνειας και του αέρα	°C	-
V_z	Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της επιφάνειας	m/s	
W_f	Τροποποιητής της κατεύθυνσης του ανέμου	--	-
φ	Γωνία μεταξύ του εδάφους και της επιφάνειας	degree	-
Δείκτης Τραχύτητας	Δείκτης τραχύτητας της επιφάνειας	-	1~6

Πίνακας 4.7: Λίστα μεταβλητών του αλγορίθμου TARP

Ο παράγοντας της αναγκαστικής συναγωγής βασίζεται σε μια συσχέτιση από τους Sparrow, Ramsey και Mass (1979):

$$h_f = 2.537 W_f R_f \left(\frac{P V_z}{A} \right)^{1/2}$$

Όπου,

$W_f = 1.0$ για προσήνεμες επιφάνειες

ή

$W_f = 0.5$ για υπήνεμες επιφάνειες

Ο πολλαπλασιαστής της τραχύτητας της επιφάνειας βασίζεται στο γράφημα ASHRAE για την αγωγιμότητα της επιφάνειας (ASHRAE 1981) και μπορεί να ληφθεί από τον ακόλουθο Πίνακα.

Δείκτης τραχύτητας	R_f	Παράδειγμα
1 (Πολύ τραχύ)	2.17	Στόκος
2 (Τραχύ)	1.67	Τούβλο
3 (Λίγο τραχύ)	1.52	Σκυρόδεμα
4 (Λίγο λείο)	1.13	Καθαρό πεύκο
5 (Λείο)	1.11	Λείος σοβάς
6 (Πολύ λείο)	1.00	Γυαλί

Πίνακας 4.8: Πολλαπλασιαστές τραχύτητας της επιφάνειας

Το μοντέλο για τη φυσική συναγωγή συσχετίζει το συντελεστή της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή με τον προσανατολισμό της επιφάνειας και τη διαφορά των θερμοκρασιών μεταξύ της επιφάνειας και της ζώνης του αέρα (όπου ΔT = θερμοκρασία του αέρα – θερμοκρασία της επιφάνειας). Ο αλγόριθμος λαμβάνεται απευθείας από τον Walton (1983). Ο αλγόριθμος του Walton προέρχεται από το ASHRAE Handbook (2001), Πίνακας 5 στη σελ. 3.12, όπου δίνει εξισώσεις για τους συντελεστές της μεταφοράς της θερμότητας με φυσική συναγωγή στην περιοχή της τυρβώδους ροής για μεγάλες κατακόρυφες πλάκες και για μεγάλες οριζόντιες πλάκες στραμμένες προς τα πάνω όταν θερμαίνονται (ή προς τα κάτω όταν ψύχονται). Μια σημείωση στο κείμενο δίνει επίσης μια προσέγγιση για τις μεγάλες οριζόντιες πλάκες που είναι στραμμένες προς τα κάτω όταν θερμαίνονται (ή πάνω όταν ψύχονται) συνιστώντας ότι θα πρέπει να είναι το μισό της αξίας των στραμμένων προς τα πάνω. Ο Walton προσθέτει μια προσαρμογή καμπύλης ως μια συνάρτηση του συνημίτονου της γωνίας κλίσης ώστε να παρέχει ενδιάμεσες τιμές μεταξύ των οριζόντιων και των κατακόρυφων. Οι τιμές της καμπύλης στα άκρα ταυτίζονται με τις τιμές στο ASHRAE.

Για καμία θερμοκρασιακή διαφορά ή για μια κάθετη επιφάνεια χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$h = 1.31|\Delta T|^{\frac{1}{3}}$$

Για ($\Delta T < 0.0$ και επιφάνεια στραμμένη προς τα πάνω) ή ($\Delta T > 0.0$ και μια επιφάνεια στραμμένη προς τα κάτω) χρησιμοποιείται η σχέση της εξαναγκασμένης συναγωγής:

$$h = \frac{9.482|\Delta T|^{\frac{1}{3}}}{7.283 - |\cos \Sigma|} \quad (1)$$

Όπου Σ είναι η γωνία κλίσης της επιφάνειας.

Για ($\Delta T > 0.0$ και επιφάνεια στραμμένη προς τα πάνω) ή ($\Delta T < 0.0$ και επιφάνεια στραμμένη προς τα κάτω) χρησιμοποιείται μια σχέση μειωμένης συναγωγής:

$$h = \frac{1.810|\Delta T|^{\frac{1}{3}}}{1.382 + |\cos \Sigma|} \quad (2)$$

Όπου Σ είναι η γωνία κλίσης της επιφάνειας.

DOE-2 Model

Το μοντέλο συναγωγής DOE-2 είναι ένας συνδυασμός του MoWiTT και του μοντέλου συναγωγής BLAST Detailed (LBL 1994). Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για πολύ λείες επιφάνειες (π.χ. γυαλί) υπολογίζεται ως εξής:

$$h_{c,glass} = \sqrt{h_n^2 + [\alpha V_z^b]^2}$$

Το h_n υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) ή την εξίσωση (2). Οι σταθερές a και b δίνονται στον Πίνακα 4.9.

Για λιγότερο λείες επιφάνειες, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας έχει τροποποιηθεί σύμφωνα με την εξίσωση:

$$h_c = h_n + R_f(h_{c,glass} - h_n)$$

Όπου R_f είναι ο πολλαπλασιαστής τραχύτητας που δίνεται από τον πίνακα 4.8.

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδες	Διακύμανση
a	Σταθερά	$W/(m^2K(m/s)^b)$	-
b	Σταθερά	-	-
C_t	Σταθερά τυρβώδους φυσικής συναγωγής	$W/(m^2K^{4/3})$	-
h_c	Συντελεστής εξωτερικής συναγωγής της επιφάνειας	$W/(m^2K)$	-
T_{so}	Θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας	$^{\circ}C/K$	-
ΔT	Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και του αέρα	$^{\circ}C/K$	-

Πίνακας 4.9: Λίστα μεταβλητών του μοντέλου DOE-2

Ανταλλαγή με αγωγή μέσω των επιφανειών

Η πιο βασική επίλυση με χρονοσειρές είναι η εξίσωση του συντελεστή απόκρισης, η οποία συσχετίζει τη ροή σε μία επιφάνεια ενός στοιχείου με μια άπειρη σειρά θερμοκρασιών και στις δύο πλευρές, όπως φαίνεται από την εξίσωση:

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta}$$

Όπου,

q'' = η ροή της θερμότητας

T = η θερμοκρασία

i = σηματοδοτεί το εσωτερικό του δομικού στοιχείου

o = σηματοδοτεί το εξωτερικό του δομικού στοιχείου

t = το τρέχον χρονικό βήμα

X και Y = οι συντελεστές απόκρισης

Ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις οι όροι της διασπώνται αρκετά γρήγορα, ο άπειρος αριθμός των όρων που απαιτούνται για μια ακριβή λύση το καθιστά λιγότερο επιθυμητό. Ευτυχώς, η ομοιότητα των όρων υψηλότερης τάξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τους αντικαταστήσει με όρους ροής. Το νέο διάλυμα περιέχει στοιχεία που ονομάζονται συναρτήσεις μεταφοράς αγωγιμότητας (CTFs). Η βασική μορφή της επίλυσης με τη συνάρτηση μεταφοράς με αγωγιμότητα παρουσιάζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta}$$

για την εσωτερική ροή της θερμότητας, και

$$q''_{ko}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta}$$

για την εξωτερική ροή θερμότητας ($q'' = q/A$)

όπου,

X_j = ο εξωτερικός συντελεστής CTF, $j = 0, 1, \dots, nz$

Y_j = ο συντελεστής διατομής CTF, $j = 0, 1, \dots, nz$

Φ_j = ο εσωτερικός συντελεστής CTF, $j = 0, 1, \dots, nz$

T_i = η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας

T_o = η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας

q''_{ko} = η μεταφορά θερμότητας με αγωγή στην εξωτερική επιφάνεια

q'' = η μεταφορά θερμότητας με αγωγή στην εσωτερική επιφάνεια

Ο δείκτης μετά από το κόμμα δείχνει το χρονικό διάστημα για την ποσότητα των όρων στο χρονικό βήμα δ . Σημειώστε ότι οι πρώτοι όροι της σειράς (αυτοί με δείκτη 0) έχουν διαχωριστεί ώστε να διευκολύνεται η επίλυση για την τρέχουσα θερμοκρασία. Αυτές οι εξισώσεις αναφέρουν ότι η ροή θερμότητας στις δύο πλευρές της επιφάνειας οποιουδήποτε δομικού στοιχείου σχετίζεται γραμμικά με την τρέχουσα και ορισμένες από τις προηγούμενες θερμοκρασίες τόσο στην εσωτερική και στην εξωτερική επιφάνεια, καθώς και με ορισμένες από τις προηγούμενες τιμές ροής στην εσωτερική επιφάνεια.

Με μια ενιαία, σχετικά απλή, γραμμική εξίσωση με σταθερούς συντελεστές, η αγωγιμότητα μεταφοράς θερμότητας διαμέσου ενός στοιχείου μπορεί να υπολογιστεί. Οι συντελεστές (CTFs) της εξίσωσης είναι σταθερές που πρέπει μόνο να καθοριστούν μία φορά για κάθε τύπο κατασκευής. Τα μόνα στοιχεία που απαιτείται να αποθηκευτούν είναι τα ίδια τα CTFs και ένας περιορισμένος αριθμός των όρων της θερμοκρασίας και της ροής. Η διατύπωση αυτή ισχύει για κάθε τύπο επιφάνειας και δεν απαιτεί τον υπολογισμό ή την αποθήκευση στοιχείων της εσωτερικής θερμοκρασίας.

Ο υπολογισμός των εξισώσεων μεταφοράς μέσω αγωγής

Η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται στο EnergyPlus για τους υπολογισμούς των CTF είναι γνωστή ως η μέθοδος της κατάστασης του χώρου (state space method)(Ceylan & Myers 1980; Seem 1987; Ouyang and Haghighat 1991). Μια άλλη κοινή, παλαιότερη μέθοδος που έχει χρησιμοποιηθεί είναι με μετασχηματισμούς Laplace για να φτάσει κανείς στην επίλυση: Η μέθοδος Laplace χρησιμοποιούταν στο BLAST (Hittle, 1979; Hittle & Bishop, 1983). Το βασικό σύστημα της μεθόδου ορίζεται από τις ακόλουθες γραμμικές εξισώσεις του πίνακα:

$$\frac{d[x]}{dt} = [A][x] + [B][u]$$

$$[y] = [C][x] + [D][u]$$

όπου το x είναι ένα διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης, το u είναι ένα διάνυσμα των εισροών, το y είναι το διάνυσμα εξόδου, t είναι ο χρόνος, και τα A , B , C και D είναι ο πίνακες συντελεστών. Μέσω της χρήσης της άλγεβρας, το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης (X) μπορεί να εξαλειφθεί από το σύστημα των εξισώσεων, και ο φορέας εξόδου (Y) μπορεί να σχετίζονται άμεσα με το διάνυσμα εισόδου (u) και τα ιστορικά των διανυσμάτων εισόδου και εξόδου.

Η σύνθεση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λύσει την εξίσωση της παροδικής αγωγής της θερμότητας με την επιβολή έναν πεπερασμένο διαφορικού πλέγματος πάνω από τα διάφορα στρώματα του δομικού στοιχείου που αναλύεται. Σε αυτή την περίπτωση, οι μεταβλητές κατάστασης είναι οι κομβικές θερμοκρασίες, οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος (εσωτερικού και εξωτερικού) είναι οι εισοδοί και οι προκύπτουσες ροές θερμότητας στα δύο επιφάνειες είναι οι έξοδοι. Έτσι, η αναπαράσταση της κατάστασης του χώρου με πεπερασμένες διαφορικές μεταβλητές θα λάβει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix}}{dt} = [A] \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} q_i'' \\ q_o'' \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} + [D] \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix}$$

όπου $T_1, T_2, \dots, T_{n-1}, T_n$ είναι οι πεπερασμένες διαφορικές κομβικές θερμοκρασίες, n είναι ο αριθμός των κόμβων, T_i και T_o είναι οι εσωτερικές και εξωτερικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, και q_i'' και q_o'' οι ροές θερμότητας (επιθυμητή έξοδος).

Ο Seem (1987) δείχνει ότι για μια απλή πλάκα ενός στρώματος με δύο εσωτερικούς κόμβους και συναγωγή και στις δύο πλευρές οι προκύπτουσες πεπερασμένες διαφορικές εξισώσεις δίνονται από:

$$C \frac{dT_1}{dt} = hA(T_o - T_1) + \frac{T_2 - T_1}{R}$$

$$C \frac{dT_2}{dt} = hA(T_i - T_2) + \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$q_i'' = h(T_i - T_2)$$

$$q_o'' = h(T_1 - T_o)$$

Όπου,

$$R = \frac{l}{kA}$$

$$C = \frac{\rho c_p l A}{2}$$

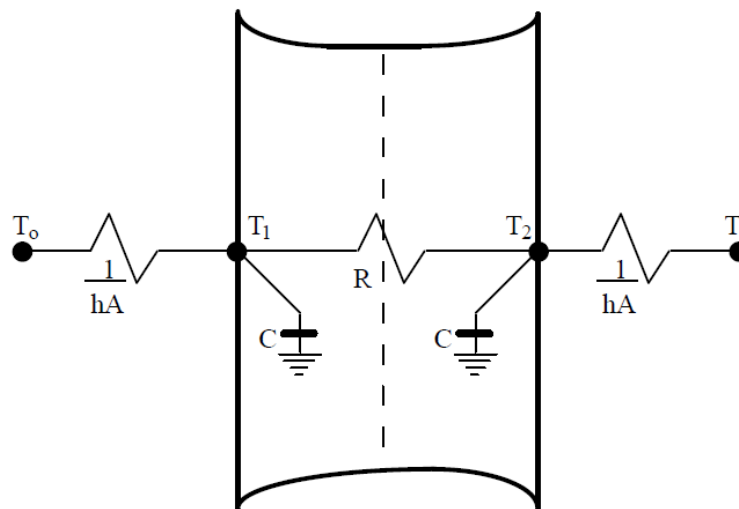
και A είναι το εμβαδόν της επιφάνειας που είναι εκτεθειμένη στις περιβαλλοντικές θερμοκρασίες.

Σε μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_1}{dt} \\ \frac{dT_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} - \frac{hA}{C} & \frac{1}{RC} \\ \frac{1}{RC} & -\frac{1}{RC} - \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{hA}{C} & 0 \\ 0 & \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_o \\ T_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} q_o'' \\ q_i'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -h \\ h & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & h \\ -h & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_o \\ T_i \end{bmatrix}$$

Η σημαντική πτυχή της τεχνικής κατάστασης χώρου είναι ότι μέσω της χρήσης αλγεβρικών πινάκων οι μεταβλητές κατάστασης χώρου (κομβικές θερμοκρασίες) μπορούν να εξαλειφθούν για να καταλήξουμε σε μια εξίσωση πινάκων που δίνει τις εξόδους (ροές θερμότητας) ως συνάρτηση των εισόδων (θερμοκρασίες περιβάλλοντος) μόνο. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για την επίλυση των ριζών στον τομέα Laplace. Επιπλέον, η προκύπτουσα μορφή του πίνακα έχει περισσότερο φυσικό νόημα από τις πολύπλοκες εξισώσεις που απαιτούνται από τη μέθοδο μετασχηματισμού Laplace.



Εικόνα 4.12: Παράδειγμα της κατάστασης του χώρου για δύο κόμβους (πηγή: EnergyPlus; Engineering Reference).

Η ακρίβεια της μεθόδου της κατάστασης του χώρου για τον υπολογισμό των CTFs έχει εξεταστεί στην βιβλιογραφία. Οι Ceylan και Myers (1980) σύγκριναν την απάντηση που προβλέπεται από τη μέθοδο της κατάστασης του χώρου με διάφορες άλλες τεχνικές επίλυσης, συμπεριλαμβανομένης και μιας αναλυτικής λύσης. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι για έναν επαρκή αριθμό κόμβων η μέθοδος της κατάστασης του χώρου υπολόγισε μία ροή θερμότητας στην επιφάνεια μιας απλής πλάκας ενός στρώματος στο 1% της αναλυτικής λύσης. Οι Ouyang και Haghighat (1991) έκαναν μια άμεση σύγκριση μεταξύ της μεθόδου Laplace και της μεθόδου κατάστασης του χώρου. Για έναν τοίχο που

αποτελείται από μόνωση μεταξύ δύο στρώσεων από σκυρόδεμα, δε βρήκαν σχεδόν καμία διαφορά στους παράγοντες απόκρισης που υπολογίζονται από την κάθε μέθοδο.

Ο Seem (1987) συνοψίζει τα βήματα που απαιτούνται για τη λήψη των συντελεστών CTF από τους πίνακες A, B, C και D. Ενώ είναι πιο χρονοβόρα από τον υπολογισμό CTFs χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Laplace, η άλγεβρα των πινάκων (συμπεριλαμβανομένου του υπολογισμού του αντίστροφου και του εκθετικού πίνακα για το A) είναι πιο εύκολο να ακολουθηθεί από αλγόριθμους που βρίσκουν τη ρίζα. Μια άλλη διαφορά μεταξύ των μεθόδων Laplace και της κατάστασης χώρου είναι ο αριθμός των συντελεστών που απαιτούνται για μια λύση. Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος κατάστασης χώρου απαιτεί περισσότερους συντελεστές. Επιπλέον, ο αριθμός του ιστορικού των όρων της θερμοκρασίας και της ροής είναι πανομοιότυπο ($n_z = N_q$). Να σημειωθεί ότι όπως και με τη μέθοδο Laplace ο πραγματικός αριθμός των όρων θα ποικίλει από κατασκευή σε κατασκευή.

Δύο διακριτά πλεονεκτήματα της μεθόδου της κατάστασης του χώρου έναντι της μεθόδου Laplace που παρουσιάζουν ενδιαφέρον κατά την εφαρμογή της επίλυσης ενός CTF για την αγωγιμότητα μέσω ενός δομικού στοιχείου είναι η ικανότητα να ληφθούν CTFs για πολύ μικρότερα χρονικά βήματα και η δυνατότητα να αποκτηθούν δισδιάστατες και τρισδιάστατες συναρτήσεις μεταφοράς θερμότητας με αγωγή. Αν και δεν εφαρμόζονται στο πακέτο εργαλείων, και ο Seem (1987) και ο Strand (1995) έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου κατάστασης χώρου στο χειρισμό αυτών των καταστάσεων που μπορεί να έχουν σημαντικές εφαρμογές σε κτίρια.

Υπολογισμοί των εξισώσεων μεταφοράς με αγωγή (CTFs) στο EnergyPlus

Οι περισσότεροι χρήστες θα επιλέξουν να προσθέσουν υλικά με τέσσερις παραμέτρους που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τον υπολογισμό των εξισώσεων μεταφοράς με αγωγή: πάχος, αγωγιμότητα, πυκνότητα και η ειδική θερμότητα. Για αυτά τα υλικά, το EnergyPlus θα διαιρέσει κάθε στρώμα υλικού εντός μιας κατασκευής σε 6 με 18 κόμβους για την εφαρμογή της μεθόδου της κατάστασης χώρου. Για πολυεπίπεδες κατασκευές, οι κόμβοι τοποθετούνται επίσης στη διεπαφή μεταξύ των δύο στρωμάτων. Αυτοί οι κόμβοι διασύνδεσης αποτελούνται από το μισό κόμβο του πρώτου στρώματος και το μισό κόμβο του δεύτερου στρώματος.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, είτε λόγω έλλειψης πληροφόρησης είτε λόγω της επιθυμίας για την απλοποίηση των εισροών, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να εισάγει ένα στρώμα υλικού ως "no mass" ή "R-Value only" υλικό. Η υπόθεση αυτή ουσιαστικά λέει ότι αυτά τα στρώματα δεν προσθέτουν τίποτα στη θερμική μάζα της συνολικής κατασκευής και μόνο προσθέτουν στη συνολική αντίσταση ή R-Value της κατασκευής ως σύνολο. Ενώ αυτό δεν συνιστάται, επιτρέπεται και σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι μια φτωχή υπόθεση για τα εξαιρετικά ελαφριά υλικά, όπως ορισμένα είδη μόνωσης.

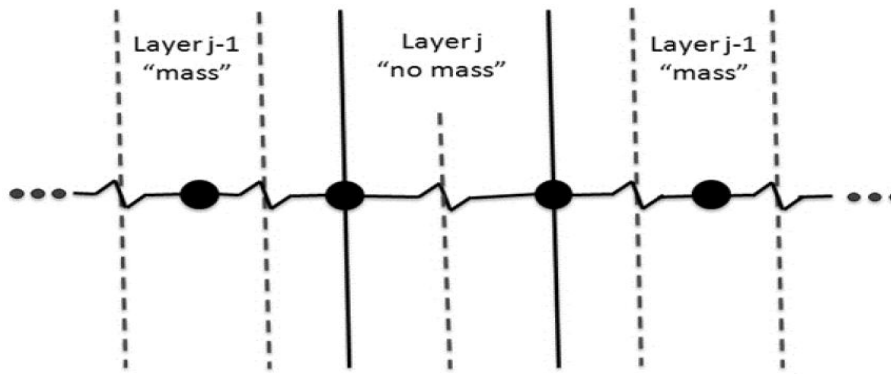
Στο παρελθόν, όταν ένας χρήστης εισήγαγε ένα τέτοιο "no mass" υλικό στο EnergyPlus, εσωτερικά οι ιδιότητες του στρώματος αυτού μετατρέπονταν ώστε να προσεγγίσουν τις

ιδιότητες του αέρα (πυκνότητα, ειδική θερμότητα, και αγωγιμότητα) με το πάχος να προσαρμόζεται για να διατηρήσει το επιθυμητό κατά τον χρήστη R-Value. Αυτό επέτρεψε τέτοια στρώματα να αντιμετωπίζονται εσωτερικά με τον ίδιο τρόπο όπως τα άλλα στρώματα, χωρίς επιπλέον αλλαγές στον κώδικα. Η λύση αυτή θεωρείται αρκετά ακριβής, καθώς ο αέρας έχει πολύ μικρή θερμική μάζα και έκανε την κωδικοποίηση της μεθόδου της κατάστασης χώρου απλούστερη.

Είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη τα στρώματα που δεν έχουν θερμική μάζα στην επίλυση με τη μέθοδο της κατάστασης χώρου, χωρίς την προσφυγή στην ανάθεση εικονικών ιδιοτήτων του υλικού. Οι εσωτερικές εξισώσεις του EnergyPlus για την εκχώρηση τιμών σε τμήματα των πινάκων A, B, C, και D, όπως φαίνεται στα προηγούμενα εδάφια έχουν μεταβληθεί για να ληφθεί υπόψη η πιθανή παρουσία στρωμάτων R-Value μόνο (ή no mass) χωρίς την προσφυγή στην εκχώρηση σε αυτά τα υλικά των ιδιοτήτων του αέρα. Αυτό γίνεται με την παραδοχή ότι το "no mass" στρώμα είναι στρώμα ενός κόμβου. Δεδομένου ότι οι κόμβοι ορίζονται ότι η διεπαφή μεταξύ των στρωμάτων του υλικού, το "no mass" στρώμα είναι ουσιαστικά δύο "μισοί κόμβοι" που είναι κοινοί με τα γύρω στρώματα. Αυτό επιτρέπει στα στρώματα των γύρω υλικών για να παρέχουν θερμική χωρητικότητα για καθένα από τους κόμβους στις διεπαφές υλικού.

Στο EnergyPlus, υπάρχουν δύο πιθανές περιπτώσεις για την ύπαρξη στρωμάτων "no mass": είτε μεταξύ δύο άλλων στερεών, θερμικά μαζικών στρωμάτων (πολλαπλά στρώματα "no mass" το ένα δίπλα στο άλλο συνδυάζονται απλά σε αυτή την προσέγγιση) είτε στις εσωτερικές ή εξωτερικές στρώσεις μιας κατασκευής. Υπάρχουν πιθανά ζητήματα όταν υπάρχει ένα στρώμα μόνο αντίστασης ή στις εσωτερικές ή στις εξωτερικές στρώσεις μιας κατασκευής. Ένα στρώμα με μικρή ή καθόλου μάζα θα μπορούσε να λάβει εκεί έντονη θερμική ακτινοβολία από εσωτερικές πηγές ή από τον ήλιο αυξάνοντας τη θερμοκρασία στην εσωτερική ή στην εξωτερική επιφάνεια σε πολύ υψηλά επίπεδα. Αυτό είναι ανεπιθύμητο για την προσομοίωση, καθώς υπάρχουν όρια για τα επίπεδα της θερμοκρασίας στο EnergyPlus που θα μπορούσαν να ξεπεραστούν με αποτέλεσμα η προσομοίωση να τερματίσει και δεν είναι ρεαλιστικό από την προοπτική του πραγματικού κόσμου. Έτσι, γι' αυτά τα ενδεχομένως προβληματικά υπολογιστικά σενάρια, το EnergyPlus θα συνεχίσει να μετατρέπει ένα στρώμα "no mass" είτε στο εσωτερικό είτε στο εξωτερικό στρώμα της κατασκευής σε ένα στρώμα θερμικής μάζας χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες του αέρα, όπως έχει γίνει και στο παρελθόν.

Η περίπτωση όπου ένα στρώμα μόνο αντίστασης ορίζεται οπουδήποτε εκτός από το εσωτερικό ή το εξωτερικό στρώμα μιας κατασκευής γίνεται με κατεργασία του "no mass" στρώματος ως ένα στρώμα ενιαίου κόμβου. Αυτό θα οδηγήσει σε ένα κόμβο σε κάθε διασύνδεση όπως στις τυποποιημένες περιπτώσεις του υλικού του στρώματος. Όταν ένα "no mass" υλικό είναι παρόν, το στρώμα με μόνο R-Value δεν θα προσθέσει καμία θερμική χωρητικότητα στους κόμβους στις διεπαφές σε καμία πλευρά του υλικού. Θα προσθέσει απλά αντίσταση μεταξύ των δύο κόμβων.



Εικόνα 4.13: Απεικόνιση ενός στρώματος χωρίς μάζα ανάμεσα σε δύο στρώματα με μάζα (πηγή: *EnergyPlus; Engineering reference*).

Από τον κώδικα (Εικόνα 4.14), ο πίνακας A (AMat) αντιστοιχεί σε τιμές στη διεπαφή χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις (που λαμβάνονται από το πραγματικό κώδικα):

```
cap = ( rho(Layer)*cp(Layer)*dx(Layer) &
        +rho(Layer+1)*cp(Layer+1)*dx(Layer+1) ) * 0.5D0

AMat(Node,Node-1) = rk(Layer)/dx(Layer)/cap      ! Assign matrix
AMat(Node,Node)   = -1.0D0 * ( rk(Layer)/dx(Layer)+ & ! values for
                        rk(Layer+1)/dx(Layer+1) ) / cap ! the current
AMat(Node,Node+1) = rk(Layer+1)/dx(Layer+1)/cap   ! node.
```

Εικόνα 4.14: Ο κώδικας του *EnergyPlus* για τον υπολογισμό των εξισώσεων μεταφοράς με αγωγή (πηγή: *EnergyPlus; Engineering reference*).

Να σημειωθεί ότι αυτές οι εξισώσεις δεν αλλάζουν. Για τα στρώματα "no mass", στις μεταβλητές της πυκνότητας (ρ) και της ειδικής θερμότητας (cp) μεταβλητές θα εκχωρηθούν μηδενικές τιμές. Επιπλέον, το πάχος (dx) θα εξισωθεί με την οριζόμενη από το χρήστη αντίσταση (R -Value) και στην αγωγιμότητα (rk) θα ανατεθεί μια τιμή της ενότητας. Επιπλέον, ο αριθμός των κόμβων για το στρώμα "no mass" θα οριστεί ίσος με 1.

Αυτό χειρίζεται τα στρώματα αντίστασης σωστά χωρίς να καταφεύγουν σε ανάθεση των ιδιοτήτων του αέρα για τα στρώματα "no mass". Το μόνο πιθανό πρόβλημα με αυτό είναι αν δύο στρώματα αντίστασης τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο. Σε αυτή την περίπτωση, η διασύνδεση μεταξύ των δύο στρώσεων αντίστασης δεν θα είχε καμία μάζα (η μεταβλητή "cap" θα ισούται με το μηδέν) και θα έχει ως αποτέλεσμα μια διαίρεση με το μηδέν. Για να αποφευχθεί αυτό, τα παρακείμενα "no mass" στρώματα συνδυάζονται εσωτερικά, ώστε να μη χρειάζεται να το κάνει ο χρήστης και να αποφεύγονται λάθη όπως η διαίρεση με το μηδέν.

Ενώ από την άποψη των αποτελεσμάτων, η διαφορά στην απόδοση μεταξύ της ανάθεσης των ιδιοτήτων του αέρα για την ειδική θερμότητα, την πυκνότητα, κλπ. και του χειρισμού υλικών χωρίς μάζα είναι αμελητέα, ο σωστός χειρισμός των στρωμάτων "no mass" παρέχει καλύτερη απόδοση του κώδικα από την άποψη της ταχύτητας υπολογισμού.

4.4. Το ενεργειακό ισοζύγιο της φυτεμένης στέγης

Το αντικείμενο εισόδου: RoofVegetation παρέχει ένα μοντέλο για τις πράσινες στέγες, που γίνονται όλο και πιο διαδεδομένες και για τα νέα και υπάρχοντα κτίρια. Υπάρχει ευρεία αναγνώριση και μια αυξανόμενη βιβλιογραφία των μετρούμενων δεδομένων που υποδεικνύουν ότι οι πράσινες στέγες μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου.

Υπάρχουν, όμως, λίγα σχεδιαστικά εργαλεία διαθέσιμα την εκτίμηση του πιθανού μεγέθους της εξοικονόμησης ενέργειας που συνδέεται με διάφορες επιλογές εφαρμογής (π.χ., τον τύπο/βάθος του εδάφους, επιλογές άρδευσης, τον τύπο των φυτών).

Υπάρχει, λοιπόν, μια σημαντική ανάγκη ενός εργαλείου προσομοίωσης που θα μελετά την αποτελεσματικότητα μιας πράσινης στέγης. Σε απάντηση στην ανάγκη αυτή έχει δημιουργηθεί ένα μοντέλο που υπολογίζει τη θερμότητα στις διαδικασίες μεταφοράς που συμβαίνουν στη φυτεμένη στέγη. Το μοντέλο υπολογίζει:

- Την ανταλλαγή ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου μήκους κύματος εντός του θόλου που σχηματίζουν τα φυτά
- Την επίδραση των φυτών στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή
- Την εξατμισοδιαπνοή από το έδαφος και τα φυτά
- Τη θερμική αγωγιμότητα (και αποθήκευση) του εδαφικού στρώματος
- Την υγρασία

Το EnergyPlus επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει "ecorooft", ως το εξωτερικό στρώμα του τελευταίου ορόφου μιας κατασκευής με τη χρήση του αντικειμένου "Material: RoofVegetation".

Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει στη συνέχεια διάφορα χαρακτηριστικά της πράσινης στέγης όπως το ύψος των φυτών, το βάθος, θερμικές ιδιότητες των φυτών, τη στοματική αγωγιμότητα (ικανότητα να απορροφούν υγρασία), και εδαφολογικές συνθήκες υγρασίας, συμπεριλαμβανομένης και της άρδευσης.

Το μοντέλο περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

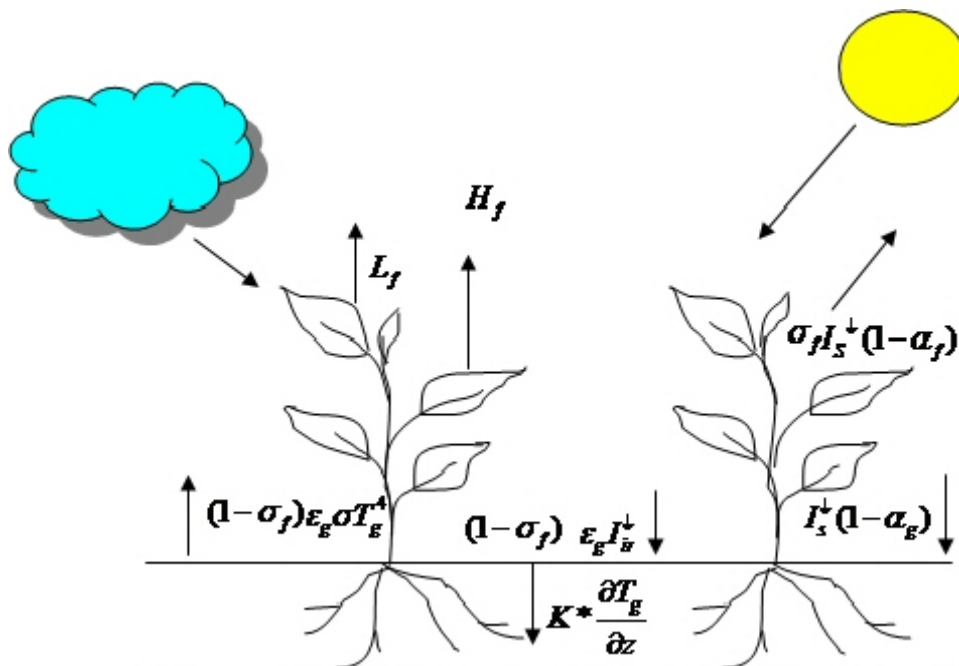
- απλοποιημένη ισορροπία της υγρασίας που επιτρέπει την κατακρήμνιση, την άρδευση και τη μεταφορά της υγρασίας ανάμεσα σε δύο στρώματα του εδάφους (κορυφή και ριζικό σύστημα),
- το ενεργειακό ισοζύγιο του εδάφους και των φυτών βασισμένο στο Army Corps of Engineers' FASST (Frankenstein & Koenig, 2004), βασισμένο στο BATS (Dickenson et al., 1986) και στο SiB (Sellers et al., 1986).

- οι εξισώσεις θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους (T_g) και του φυλλώματος (T_f) λύνονται ταυτόχρονα σε κάθε χρονικό βήμα, αναστρέφοντας τις συναρτήσεις μεταφοράς με συναγωγή για την εξαγωγή πληροφοριών για τη ροή της θερμότητας για τον υπολογισμό του ενεργειακού ισοζυγίου.

Η λεπτομερής ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου και εξισώσεις που προκύπτουν συνοψίζονται εδώ. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο από δύο ταυτόχρονες εξισώσεις για τη θερμοκρασία, μία για την επιφάνεια του εδάφους και μία για το φύλλωμα.

Περιγραφή μοντέλου

Όπως και με μια παραδοσιακή στέγη, το ενεργειακό ισοζύγιο μιας πράσινης στέγης κυριαρχείται από την κατακράτηση της ακτινοβολίας από τον ήλιο. Η ηλιακή ακτινοβολία εξισορροπείται από την ροή της αισθητής (συναγωγή) και της λανθάνουσας (εξάτμιση) θερμότητας από το έδαφος και τα φυτά, σε συνδυασμό με την αγωγιμότητα της θερμότητας στο υπόστρωμα του εδάφους. Το ενεργειακό ισοζύγιο απεικονίζεται στην Εικόνα 4.15. Οι μεταβλητές που εισάγονται σε αυτό το σχήμα ορίζονται στις εξισώσεις που ακολουθούν.



Εικόνα 4.15: Το ενεργειακό ισοζύγιο της πράσινης στέγης.

Η ανάλυση του προϋπολογισμού της ενέργειας ακολουθεί το μοντέλο Fast All Season Soil Strength (FASST) που αναπτύχθηκε από τους Frankenstein και Koenig (2004) για το σώμα των μηχανικών του στρατού των ΗΠΑ. Το FASST αναπτύχθηκε, εν μέρει, για να προσδιοριστεί η ικανότητα των εδαφών να υποστηρίξει επανδρωμένα και μη επανδρωμένα οχήματα και προσωπικό κίνησης. Για να επιτευχθεί αυτό, ωστόσο, το FASST παρακολουθεί την ενέργεια και την ισορροπία της υγρασίας (συμπεριλαμβανομένου του πάγου και

χιονιού) σε έδαφος με βλάστηση. Είναι ένα μονοδιάστατο μοντέλο που στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό σε άλλα μοντέλα σχετικά με το θόλο των φυτών, συμπεριλαμβανομένου του BATs (Dickinson et al., 1986) και του SiB (Sellers et al., 1986). Στο FASST έχουν γίνει μόνο λίγες τροποποιήσεις για την προσαρμογή για χρήση με ένα σχετικά λεπτό στρώμα χώματος. Η σύμβαση που έχει γίνει θεωρεί όλες τις ροές θερμότητας να είναι θετικές όταν η ενέργεια απορροφάται μέσα στο στρώμα.

Στο κείμενο που ακολουθεί το ισοζύγιο της ενέργειας χωρίζεται σε ένα ισοζύγιο για το στρώμα φυλλώματος (F_f) και σε έναν για την επιφάνεια του εδάφους (F_g). Οι διάφορες παραμετροποιήσεις για τη ροή της λανθάνουσας και τη αισθητής θερμότητας περιγράφονται με κάποια λεπτομέρεια και στη συνέχεια το σύνολο των εξισώσεων μειώνεται με την ταυτόχρονη λύση δύο εξισώσεων που αφορούν τις θερμοκρασίες του φυλλώματος και της επιφάνειας του εδάφους.

Ισοζύγιο ενέργειας στο στρώμα φυλλώματος

Το ενεργειακό ισοζύγιο του φυλλώματος δίνεται από τη σχέση:

$$F_f = \sigma_f [I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{i\gamma}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f$$

Όπου:

F_f = η καθαρή ροή θερμότητας στο στρώμα του φυλλώματος (W/m^2)

σ_f = η κλασματική φυτοκάλυψη

I_s^\downarrow = η συνολική εισερχόμενη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (W/m^2)

α_f = η ανακλαστικότητα (μικρού μήκους κύματος) του θόλου

ε_f = η εκπομπή του θόλου

$I_{i\gamma}^\downarrow$ = η συνολική εισερχόμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (W/m^2)

σ = η σταθερά Stefan-Boltzmann ($5.699 \cdot 10^{-8} W/m^2 \text{ } ^\circ K^4$)

ε_g = η εκπομπή της επιφάνειας του εδάφους

$\varepsilon_1 = \varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g$

T_g = η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους (Kelvin)

T_f = η θερμοκρασία του φυλλώματος (Kelvin)

H_f = η αισθητή ροή θερμότητας στο φύλλωμα (W/m^2)

L_f = η λανθάνουσα ροή θερμότητας στο φύλλωμα (W/m^2)

Αυτή η εξίσωση υπολογίζει επίσης τη μικρού και μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία που απορροφάται από τη βλάστηση, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων των πολλαπλών ανακλάσεων. Οι όροι της ροής αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας (H_f και L_f) είναι λίγο περίπλοκοι και για αυτό θα συζητηθούν περισσότερο παρακάτω.

Ροή αισθητής θερμότητας στο στρώμα φυλλώματος

Η μεταφορά της αισθητής θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του φύλλου και του αέρα κοντά στο θόλο (H_f) επηρεάζεται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τους, την ταχύτητα του ανέμου, και τον δείκτη επιφάνειας του φυλλώματος (LAI). Ο δείκτης επιφάνειας του φυλλώματος, αδιάστατος όρος, είναι η αναλογία της προβαλλόμενης επιφάνειας του φύλλου ανά μονάδα περιοχής του εδάφους. Αντίθετα, η κλασματική φυτοκάλυψη (σ_f) είναι ο λόγος της σκιασμένης επιφάνειας του εδάφους προς τη συνολική επιφάνεια του. Η ροή της αισθητής θερμότητας δίνεται από τον τύπο:

$$H_f = (1.1 \cdot LAI \rho_{af} C_{p,a} C_f W_{af})(T_{af} - T_f)$$

Όπου:

LAI = ο δείκτης επιφάνειας φυλλώματος (m^2/m^2)

ρ_{af} = η πυκνότητα του αέρα στη θερμοκρασία του φυλλώματος (kg/m^3)

$C_{p,a}$ = η ειδική θερμότητα του αέρα σε σταθερή πίεση ($1005.6 J/kg K$)

C_f = ο συντελεστής μαζικής μεταφοράς θερμότητας

W_{af} = η ταχύτητα του ανέμου μέσα στο θόλο (m/s)

T_{af} = η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο θόλο (Kelvin)

T_f = η θερμοκρασία του φυλλώματος (Kelvin)

Στην εξίσωση αυτή ο όρος 1.1 συμπεριλαμβάνεται για τη μεταφορά της θερμότητας από τα κλαδιά, τους μίσχους, και τα άκρα (Deardoff 1978). Οι ιδιότητες του αέρα κοντά στο φύλλωμα έχουν μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας τον μέσο όρο του φυλλώματος και τις συνθήκες του οργάνου:

$$\rho_{af} = 0.5(\rho_a + \rho_f)$$

Όπου:

ρ_a = η πυκνότητα του αέρα στο ύψος του οργάνου

ρ_f = η πυκνότητα του αέρα, στη θερμοκρασία των φύλλων.

Η θερμοκρασία του αέρα εντός του φυλλώματος εκτιμάται από τον τύπο:

$$T_{af} = (1 - \sigma_f)(T_a) + \sigma_f(0.3T_a + 0.6T_f + 0.1T_g)$$

Όπου:

T_a = η θερμοκρασία του αέρα στο ύψος του οργάνου (Kelvin)

T_f = η θερμοκρασία των φύλλων (Kelvin)

T_g = η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους (Kelvin).

Η ταχύτητα του ανέμου στο φύλλωμα υπολογίζεται ως εξής:

$$W_{af} = 0.83\sigma_f W \sqrt{C_{hn}^f} + (1 - \sigma_f)W$$

Όπου:

W = η ταχύτητα του ανέμου πάνω από το θόλο

C_{hn}^f = ο συντελεστής της σχεδόν ουδέτερης μεταφοράς στο στρώμα του φυλλώματος

$$C_{hn}^f = K_v^2 \left(\ln \left(\frac{Z_a - Z_d}{Z_o^f} \right) \right)^{-2}$$

Όπου:

K_v = η σταθερά von Karmen's (0.4)

Z_a = το ύψος του οργάνου (m)

Z_d = το μηδενικό ύψος μετατόπισης (ύψος πάνω από το έδαφος εντός του οποίου η ταχύτητα του ανέμου είναι ουσιαστικά μηδενική) (m)

Z_o^f = η τραχύτητα του φυλλώματος (m) .

Οι φόρμες για μηδενικό ύψος μετατόπισης είναι:

$$Z_d = 0.701Z_f^{0.979}$$

$$Z_o = 0.131Z_f^{0.997}$$

Ο συντελεστής μαζικής μεταφοράς δίνεται από τον τύπο:

$$C_f = 0.01 \left(1 + \frac{0.3(m/s)}{W_{af}(m/s)} \right)$$

Ροή λανθάνουσας θερμότητας στο στρώμα φυλλώματος

Η διαδικασία της απώλειας νερού μέσω της αναπνοής των φυτών είναι γνωστή ως διαπνοή. Ελέγχεται από το κλείσιμο και το άνοιγμα των στομάτων - τα μεσοκυττάρια ανοίγματα μεταξύ των επιδερμικών κύτταρων. Η αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών από αυτούς τους χώρους στην ατμόσφαιρα ονομάζεται στοματική αντίσταση. Εξαρτάται από παράγοντες όπως η ένταση του φωτός, η υγρασία του εδάφους και η διαφορά πίεσης του ατμού μεταξύ του εσωτερικού φύλλου και της εξωτερικής ατμόσφαιρας. Μετρείται σε μονάδες s/m και διατυπώνεται ως εξής:

$$r_s = \frac{r_{s,min}}{LAI} f_1 f_2 f_3$$

Όπου:

r_s = η στοματική αντίσταση του φυλλώματος (s/m)

$r_{s,min}$ = η ελάχιστη στοματική αντίσταση του φυλλώματος (s/m)

f_1 και f_2 = οι συντελεστές πολλαπλασιασμού για την επίδραση της ακτινοβολίας στη στοματική αντίσταση

f_3 = ο πρόσθετος συντελεστής πολλαπλασιασμού για τη στοματική αντίσταση

Η πραγματική αντίσταση των στομάτων ανά πάσα στιγμή, είναι ανάλογη προς την ελάχιστη και αντιστρόφως ανάλογη προς τον δείκτη επιφάνειας του φυλλώματος (LAI). Η στοματική αντίσταση τροποποιείται περαιτέρω με κλασματικούς παράγοντες πολλαπλασιασμού που σχετίζονται με την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και την ατμοσφαιρική υγρασία. Οι αντιστροφικοί των συντελεστών πολλαπλασιασμού f_1 , f_2 και f_3 δίνονται από:

$$\frac{1}{f_1} = \min \left[1, \frac{0.004 I_s^\downarrow + 0.005}{0.81(0.004 I_s^\downarrow + 1)} \right]$$

$$\frac{1}{f_2} = \begin{cases} 0, & \text{όταν } \theta_r > \bar{\theta} \\ \frac{\bar{\theta} - \theta_r}{\theta_{max} - \theta_r}, & \text{όταν } \theta_r \leq \bar{\theta} \leq \theta_{max} \end{cases}$$

$$\frac{1}{f_3} = \exp[-g_d(e_{f,sat} - e_a)]$$

Όπου:

θ_r = η απομένουσα περιεκτικότητα σε υγρασία (η ποσότητα της υγρασίας στο έδαφος, όταν φυτά αρχίζουν να μαραίνονται)

θ_{max} = η μέγιστη περιεκτικότητα σε υγρασία (το μέγιστο ποσό της υγρασίας όπου ένα συγκεκριμένο είδος εδάφους μπορεί να κρατήσει και πάνω από το οποίο υπάρχει απορροή)

$\bar{\theta}$ = ο μέσος όρος της υγρασίας του εδάφους στην ζώνη της ρίζας.

g_d = ειδικό χαρακτηριστικό του φυτού (μη μηδενικό μόνο για τα δέντρα)

$e_{f,sat}$ = η πίεση κορεσμένων ατμών στη θερμοκρασία των φύλλων

e_a = η πίεση ατμών του αέρα

Η υπολειμματική περιεκτικότητα σε υγρασία είναι συνήθως γύρω στο $0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Frankenstein & Koenig, 2004). Το μέγιστο περιεχόμενο σε υγρασία εξαρτάται από το έδαφος, αλλά γενικά ποικίλει από 0.3 έως $0.6 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Guymon et al., 1993). Η αντοχή στην ανταλλαγή υγρασίας που προσφέρεται από το οριακό στρώμα που σχηματίζεται στην επιφάνεια του φύλλου είναι γνωστή ως αεροδυναμική αντίσταση. Μετρείται σε μονάδες (s/m) και επηρεάζεται από την ταχύτητα του ανέμου, την τραχύτητα της επιφάνειας και τη σταθερότητα της ατμόσφαιρας (Oke, 1987). Διατυπώνεται ως εξής:

$$r_a = \frac{1}{c_f W_{af}}$$

Όπου r_a = αεροδυναμική αντίσταση στη διαπνοή (s/m)

Η συνδυασμένη επίδραση της αεροδυναμικής και της στοματικής αντίστασης στην διάχυση υδρατμών είναι ενσωματωμένη σε ένα συντελεστή υγρασίας της επιφάνειας του φυλλώματος:

$$r'' = \frac{r_a}{r_a + r_s}$$

Όπου r'' = ο συντελεστής επιφανειακής ύγρανσης

Αυτός ο παράγοντας υγρασίας της επιφάνειας είναι απλά μια αναλογία της αεροδυναμικής αντίστασης στην συνολική αντίσταση. Όταν η αεροδυναμική αντίσταση είναι μικρή ο παράγοντας της υγρασίας προσεγγίζει το μηδέν (οι επιφάνειες των φύλλων παραμένουν ξηρές, καθώς επιφανειακή υγρασία εξατμίζεται εύκολα). Δεδομένου ότι οι αεροδυναμική αντίσταση αυξάνεται και συνδέεται σημαντικά με τη στοματική αντίσταση ο παράγοντας της υγρότητας προσεγγίζει το 1.0 (η υγρασία ταξιδεύει εύκολα στις επιφάνειες των φύλλων, αλλά δεν εξατμίζεται εύκολα).

Η ροή της λανθάνουσας θερμότητας δίνεται από τον τύπο:

$$L_f = I_f LAI \rho_{af} C_f W_{af} r'' (q_{af} - q_{f,sat})$$

Όπου:

I_f = η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (J / kg),

$q_{f,sat}$ = η αναλογία ανάμειξης κορεσμού στην θερμοκρασία της επιφάνειας των φύλλων

q_{af} = η αναλογία ανάμειξης του αέρα μέσα στο θόλο.

Ο λόγος ανάμειξης μέσα στο θόλο μπορεί να προσδιορισθεί από τη σχέση:

$$q_{af} = \left[\frac{(1 - \sigma_f)q_a + \sigma_f(0.3q_a + 0.6q_{f,sat}r'' + 0.1q_{f,sat}M_g)}{1 - \sigma_f[0.6(1 - r'') + 0.1(1 - M_g)]} \right]$$

Όπου:

M_g = ο λόγος της ογκομετρικής περιεκτικότητας σε υγρασία προς το πορώδες του εδάφους (Koenig, 1994), κυμαίνεται από 0 έως 1.

q_a = η αναλογία ανάμειξης του αέρα

Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (I_f) είναι η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για να μετατρέψει μια μονάδα μάζας του νερού σε ατμό. Μετριέται σε μονάδες J/kg και είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τη θερμοκρασία. Εκτιμάται ως:

$$I_f = 1.91846 * 10^6 \left[\frac{T_f}{T_f - 33.91} \right]^2$$

Ισοζύγιο ενέργειας στο έδαφος

Το ισοζύγιο της ενέργειας στην επιφάνεια του εδάφους επηρεάζεται κυρίως από τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους, το ποσό της φυτικής κάλυψης (σ_f) και την ποσότητα της υγρασίας στο έδαφος. Εάν η επιφάνεια του εδάφους έχει πυκνή κάλυψη από τα φυτά το ημερήσιο εύρος της θερμοκρασίας της επιφάνειας είναι μικρό. Στον προϋπολογισμό της ενέργειας του εδάφους η θερμότητα που εκλύεται ή απορροφάται λόγω των αλλαγών φάσης του νερού του εδάφους, η θερμική ροή της καθίζησης και η ροή θερμότητας λόγω της κάθετης μεταφοράς του νερού στο έδαφος αγνοούνται. Αναμένεται μελλοντικές βελτιώσεις του μοντέλου να συμπεριλάβουν και αυτά τα φαινόμενα. Η σύμβαση που ακολουθείται εδώ είναι η ίδια όπως παραπάνω (η ροή της θερμότητας προς το έδαφος είναι θετική). Το συνολικό ισοζύγιο ενέργειας στην επιφάνεια του εδάφους (Frankenstein & Koenig, 2004) είναι:

$$F_g = (1 - \sigma_f)[I_s^\downarrow(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \frac{\partial T_g}{\partial z}$$

Όπου:

F_g = η καθαρή ροή της θερμότητας στην επιφάνεια του εδάφους (W/m²)

α_g = η ανακλαστικότητα (μικρού μήκους κύματος) της επιφάνειας του εδάφους

ε_g = η εκπομπή της επιφάνειας του εδάφους

T_g = η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους (Kelvin)

T_f = η θερμοκρασία των φύλλων (Kelvin)

H_g = η ροή της αισθητής θερμότητας στο έδαφος (W/m^2)

L_g = η ροή της λανθάνουσας θερμότητας στο έδαφος (W/m^2)

z = το ύψος του βάθους (m)

Όπως και με την εξίσωση ενέργειας για το φύλλωμα αυτή η εξίσωση παρουσιάζει τη ροή της αισθητής θερμότητας (H_g), τη ροή της λανθάνουσας θερμότητας (L_g), και τις πολλαπλές ανακλάσεις που συνδέονται με την ακτινοβολία μικρού και μεγάλου κύματος. Ο τελικός όρος στη δεξιά πλευρά δίνει την αγωγιμότητα της θερμότητας μέσα στο υπόστρωμα του εδάφους.

Ροή αισθητής θερμότητας στο στρώμα του εδάφους

Η ροή της αισθητής θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του αέρα στην περιοχή του εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτών και της ταχύτητας του ανέμου μέσα από το θόλο. Δίνεται από τον τύπο:

$$H_g = \rho_{ag} C_{p,a} C_h^g W_{af} (T_{af} - T_g)$$

Όπου:

C_h^g = ο συντελεστής μαζικής μεταφοράς

ρ_{ag} = η πυκνότητα του αέρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (kg/m^3)

$$p_{ag} = \frac{p_a + p_g}{2}$$

Όπου:

ρ_g = η πυκνότητα του αέρα στη θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους

ρ_a = η πυκνότητα του αέρα στο ύψος του οργάνου

Ο συντελεστής μαζικής μεταφοράς δίνεται σαν ένας γραμμικός συνδυασμός του συντελεστή μαζικής μεταφοράς κοντά στο έδαφος (C_{hn}^f) και κοντά στη διεπιφάνεια

φυλλώματος- ατμόσφαιρας (C_{hn}^g) πολλαπλασιασμένος με τον συντελεστή σταθερότητας (Γ_h) και διατυπώνεται:

$$C_h^g = \Gamma_h [(1 - \sigma_f) C_{hn}^g + \sigma_f C_{hn}^f]$$

Οι συντελεστές μαζικής μεταφοράς του εδάφους και του φυλλώματος δίνονται από τους τύπους:

$$C_{hn}^g = r_{ch}^{-1} \left[\frac{K_v}{\ln \left(Z_a / Z_o^g \right)} \right]^2$$

Και

$$C_{hn}^f = \left[\frac{K_v}{\ln \left(Z_a - Z_d / Z_o^f \right)} \right]^2$$

Όπου:

Z_o^g και Z_o^f = τα μήκη τραχύτητας του εδάφους και του φυλλώματος

r_{ch} = ο τυρβώδης αριθμός Schmidt (0.63)

K_v = ο συντελεστής von Karman (0.4)

Οι συνθήκες της ατμόσφαιρας (Γ_h) καθορίζονται ως σταθερές ή ασταθείς με βάση τον αριθμό Richardson.

$$R_{ib} = \frac{2gZ_a(T_{af} - T_g)}{(T_{af} + T_g)W_{af}^2}$$

Ο παράγοντας της ατμοσφαιρικής σταθερότητας δίνεται από τον τύπο των Businger (1966), Lumley και Panofsky (1964).

$$\Gamma_h = \begin{cases} \frac{1.0}{(1.0 - 16.0 R_{ib})^{0.5}} & \text{για } R_{ib} < 0 \\ \frac{1.0}{(1.0 - 5.0 R_{ib})} & \text{για } R_{ib} > 0 \end{cases}$$

Ροή λανθάνουσας θερμότητας στο έδαφος

Η απομάκρυνση του υδρατμού από την επιφάνεια του εδάφους εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ της αναλογίας ανάμιξης της επιφάνειας του εδάφους και του αέρα και την ταχύτητα του ανέμου στο θόλο. Η ροή της λανθάνουσας θερμότητας που προκύπτει δίνεται από τον τύπο:

$$L_R = C_e^g I_g W_{af} \rho_{ag} (q_{af} - q_g)$$

Όπου:

L_R = η ροή της λανθάνουσας θερμότητας

C_e^g = ο συντελεστής μαζικής μεταφοράς

I_g = η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης στη θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους

q_{af} = η αναλογία ανάμιξης στην διεπιφάνεια φυλλώματος και ατμόσφαιρας

q_g = η αναλογία ανάμιξης στην επιφάνεια του εδάφους

$$q_g = M_g q_{g,sat} + (1 - M_g) q_{af}$$

Όπου:

M_g = παράγοντας κορεσμού υγρασίας

$q_{g,sat}$ = αναλογία ανάμιξης κορεσμού στη θερμοκρασία του εδάφους

Ο συντελεστής μαζικής μεταφοράς για την ανταλλαγή της λανθάνουσας θερμότητας είναι ανάλογος με αυτόν για την ανταλλαγή της αισθητής θερμότητας και δίνεται από τη σχέση:

$$C_e^g = \Gamma_e [(1 - \sigma_f) C_{en}^g + \sigma_f C_{hn}^f]$$

Όπου:

C_{en}^g = ο συντελεστής μαζικής μεταφοράς κοντά στο έδαφος για τη ροή της λανθάνουσας θερμότητας

Γ_e = ο διορθωτικός συντελεστής σταθερότητας για την ανταλλαγή της λανθάνουσας θερμότητας (θεωρούμε πως είναι ίδιος με τον Γ_h).

Γραμμικοποίηση

Για να λυθούν οι συναρτήσεις για το ισοζύγιο της ενέργειας για το φύλλωμα και για το έδαφος, οι όροι T_f^4 και T_g^4 και οι όροι αναλογίας ανάμιξης $Q_{g,sat}$ και $Q_{f,sat}$ γραμμικοποιούνται σύμφωνα με τον Deardorff (1978):

$$[T_f^{(n+1)}]^4 = [T_f^n]^4 + 4[T_f^n]^3 [T_f^{n+1} - T_f^n]$$

$$[T_g^{(n+1)}]^4 = [T_g^n]^4 + 4[T_g^n]^3 [T_g^{n+1} - T_g^n]$$

Όπου:

T_f^{n+1} και T_g^{n+1} = τα τρέχοντα χρονικά βήματα για τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του φύλλου και του εδάφους (Kelvin)

T_f^n και T_g^n = οι θερμοκρασίες που αντιστοιχούν στο προηγούμενο χρονικό βήμα

Οι αναλογίες ανάμιξης κορεσμού στην επιφάνεια του εδάφους και του φύλλου δίνονται από τις σχέσεις:

$$q_{g,sat}(T_g^{n+1}) = q_{sat}(T_g^n) + \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial T} \right)_{T_g^n} (T_g^{n+1} - T_g^n)$$

Και

$$q_{f,sat}(T_f^{n+1}) = q_{sat}(T_f^n) + \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial T} \right)_{T_f^n} (T_f^{n+1} - T_f^n)$$

Όπου, $q_{sat}(T_g^n)$ η αναλογία ανάμιξης κορεσμού στο προηγούμενο χρονικό βήμα και διατυπώνεται:

$$q_{sat}(T_g^n) = \frac{0.622 e^*(T_g^n)}{P - e^*(T_g^n)}$$

Όπου e^* , η τάση των κορεσμένων ατμών (Pa) και εκτιμάται στη θερμοκρασία του εδάφους από το προηγούμενο χρονικό βήμα (T_g^n) ως εξής:

$$e^* = 611.2 \exp \left[17.67 \left(\frac{T_g^n - 273.15}{T_g^n - 29.65} \right) \right]$$

Η παράγωγος της αναλογίας κορεσμού ανάμιξης στο προηγούμενο χρονικό βήμα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dq^*}{dT_g^n} = \left[\frac{0.622 P}{(P - 0.378 e^*)^2} \right] \left(\frac{de^*}{dT_g^n} \right)$$

Η παράγωγος της πίεσης κορεσμού των ατμών μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση Clausius- Clapeyron:

$$\frac{de^*}{dT_g^n} = \frac{I_g e^*(T_g^n)}{(R_v (T_g^n)^2)}$$

Όπου:

R_v = η σταθερά των αερίων για υδρατμούς

I_g = η λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως στη θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους

Οι αντίστοιχη σχέση για την αναλογία ανάμιξης για τις επιφάνειες των φύλλων μπορούν να υπολογιστούν με αντικατάσταση του T_g με το T_f στην παραπάνω σχέση.

Τελικές εξισώσεις

Μετά τη γραμμικοποίηση οι τελικές σχέσεις είναι της μορφής:

$$C_1^f + C_2^f T_g + C_3^f T_f = 0$$

$$C_1^g + C_2^g T_g + C_3^g T_f = 0$$

Οι συντελεστές σε αυτές τις εξισώσεις προκύπτουν από τον άμεσο συνδυασμό των εξισώσεων από την ανωτέρω ανάπτυξη.

Το τελικό σύνολο των εξισώσεων λύνεται ταυτόχρονα ώστε να βρεθούν τα T_g και T_f . Μια βασική διαφορά στην δική μας υλοποίηση του αλγορίθμου FASST είναι ότι οι όροι της συναγωγής στις εξισώσεις για το C_1^g και το C_2^g λύνονται με αναστροφή των συναρτήσεων μεταφοράς με συναγωγή στο EnergyPlus.

4.5 Ατμοσφαιρική μεταβολή

Όλα τα κτίρια βρίσκονται στην τροπόσφαιρα, την κατώτερη στρώση της ατμόσφαιρας. Η τροπόσφαιρα επεκτείνεται από το επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας έως το ύψος των 11 km. Εντός της τροπόσφαιρας, η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται σχεδόν γραμμικά με το ύψος, με ποσοστό 1°C ανά 150 m. Η ατμοσφαιρική πίεση μειώνεται με μικρότερο ρυθμό. Από την άλλη, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το υψόμετρο.

Επειδή η ατμόσφαιρα αλλάζει με το υψόμετρο (που ορίζεται ως το ύψος πάνω από το έδαφος σε αυτή την περίπτωση), ψηλά κτίρια μπορούν να βιώσουν σημαντικές διαφορές στις τοπικές ατμοσφαιρικές ιδιότητες μεταξύ του ισογείου και του τελευταίου ορόφου. Τα κτήρια αλληλεπιδρούν με την ατμόσφαιρα μέσω της συναγωγής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του εξωτερικού αέρα και των εξωτερικών επιφανειών του κελύφους του κτιρίου, καθώς και μέσω της ανταλλαγής αέρα ανάμεσα στο εξωτερικό και στο εσωτερικό του κτιρίου μέσω της διείσδυσης και εξαερισμού.

Συγκρίνοντας την ετήσια κατανάλωση ενέργειας μεταξύ 60 ορόφων ενός κτιρίου, αποδεικνύεται ότι η επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου είναι κυρίαρχη για τους δέκα πρώτους ορόφους. Αλλά στο πάτωμα 25, παραδόξως, η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα είναι περίπου ίση με την επίδραση της ταχύτητας του ανέμου. Στους παραπάνω ορόφους είναι κυρίαρχη η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα. Είναι σαφές, λοιπόν, ότι είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση της μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα για τα ψηλά κτίρια.

Στον Πίνακα 4.9 φαίνονται οι ατμοσφαιρικές μεταβλητές και οι μεταβολές τους για ένα κτήριο με ύψος 284 m.

Μεταβλητές	1.5 μέτρα	284 μέτρα	Απόλυτη διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά (%)
Θερμοκρασία αέρα	15 °C	13.15 °C	1.85 °C	12.3
Βαρομετρική πίεση	101.325 Pa	97.960 Pa	3.365 Pa	3.3
Ταχύτητα του ανέμου	2.46 m/s	7.75 m/s	5.29 m/s	215

Πίνακας 4.10: Ατμοσφαιρικές μεταβλητές για δυο διαφορετικά υψόμετρα

Το EnergyPlus υπολογίζει αυτόματα την τοπική θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα και την ταχύτητα του ανέμου ξεχωριστά για κάθε ζώνη και επιφάνεια που είναι εκτεθειμένη στο εξωτερικό περιβάλλον. Το κέντρο βάρους της ζώνης ή της επιφάνειας χρησιμοποιείται για να καθορίσει το ύψος πάνω από το έδαφος. Μόνο η τοπική εξωτερική θερμοκρασία του αέρα και η ταχύτητα ανέμου υπολογίζονται, επειδή είναι σημαντικοί παράγοντες για τον υπολογισμό της εξωτερικής συναγωγής για τις επιφάνειες και που αποτελούν παράγοντες για τον υπολογισμό της διείσδυσης του αέρα και του αερισμού. Η διακύμανση του αέρα λαμβάνεται υπόψη όταν χρησιμοποιούνται αντικείμενα δικτύου ροής του αέρα.

Υπολογισμός τοπικής θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα

Η διακύμανση της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα υπολογίζεται με βάση την αμερικάνικη πρότυπη ατμόσφαιρα (U.S. Standard Atmosphere, 1976). Η αμερικάνικη πρότυπη ατμόσφαιρα είναι μια σειρά από μοντέλα που ορίζουν τιμές για την ατμοσφαιρική θερμοκρασία, την πυκνότητα, την πίεση και άλλες ιδιότητες σε ένα ευρύ φάσμα των υψών. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα και το υψόμετρο σε ένα δεδομένο στρώμα της ατμόσφαιρας είναι:

$$T_z = T_b + L(H_z - H_b)$$

Όπου:

T_z = η θερμοκρασία του αέρα σε ύψος z

T_b = η θερμοκρασία του αέρα στη βάση του στρώματος, δηλαδή, το επίπεδο του εδάφους για την τροπόσφαιρα

L = η κλίση της θερμοκρασίας του αέρα, ίση με -0,0065 K / m στην τροπόσφαιρα

H_b = η αντιστάθμιση ίση με το μηδέν για την τροπόσφαιρα

H_z = το γεωδυναμικό ύψος

Η μεταβλητή H_z ορίζεται ως:

$$H_z = \frac{Ez}{(E + z)}$$

Όπου:

E = 6.356 χιλιόμετρα, η ακτίνα της Γης

z = το ύψος

Για τη μοντελοποίηση κτηρίων στην τροπόσφαιρα, το υψόμετρο z αναφέρεται στο ύψος πάνω από το επίπεδο του εδάφους και στο ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το ύψος πάνω από το έδαφος υπολογίζεται ως το ύψος του κέντρου βάρους για κάθε ζώνη και επιφάνεια.

Η θερμοκρασία του αέρα στο επίπεδο του εδάφους, T_b , προέρχεται από το αρχείο για τις καιρικές συνθήκες της θερμοκρασίας του αέρα αναστρέφοντας την παραπάνω εξίσωση:

$$T_b = T_{z,met} - L \left(\frac{Ez_{met}}{E + z_{met}} - H_b \right)$$

Όπου:

$T_{z,met}$ = η θερμοκρασία του αέρα από το αρχείο καιρικών συνθηκών (που έχει μετρηθεί στο μετεωρολογικό σταθμό)

z_{met} = το ύψος του αισθητήρα θερμοκρασίας του αέρα πάνω από το έδαφος στο μετεωρολογικό σταθμό.

Η προεπιλεγμένη τιμή για z_{met} για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα είναι 1,5 m πάνω από το έδαφος. Η τιμή αυτή μπορεί να παρακαμφθεί με τη χρήση του αντικειμένου Site:WeatherStation.

Υπολογισμός τοπικής ταχύτητας του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου που μετράται σε ένα μετεωρολογικό σταθμό προεκτείνεται σε άλλα ύψη με την εξίσωση (ASHRAE 2005):

$$V_z = V_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{z_{met}} \right)^{\alpha_{met}} \left(\frac{z}{\delta} \right)^{\alpha}$$

Όπου:

z = το ύψος πάνω από το έδαφος

V_z = η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος z

α = ο εκθέτης του προφίλ της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή

δ = το πάχος του οριακού στρώματος του προφίλ της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή

z_{met} = το ύψος πάνω από το έδαφος του αισθητήρα ταχύτητας του ανέμου στο μετεωρολογικό σταθμό

V_{met} = η ταχύτητα του ανέμου που μετράται στο μετεωρολογικό σταθμό

α_{met} = ο εκθέτης του προφίλ της ταχύτητας του ανέμου στο μετεωρολογικό σταθμό

δ_{met} = το πάχος του οριακού στρώματος του προφίλ της ταχύτητας του ανέμου στο μετεωρολογικό σταθμό

Οι συντελεστές του προφίλ της ταχύτητας του ανέμου α , δ , α_{met} και δ_{met} είναι μεταβλητές που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της τραχύτητας του περιβάλλοντος εδάφους. Τυπικές τιμές για τις παραπάνω μεταβλητές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11.

Η προεπιλεγμένη τιμή για το z_{met} για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου είναι 10 m πάνω από το έδαφος. Οι προεπιλεγμένες τιμές για α_{met} και δ_{met} είναι 0.14 και 270 m, αντίστοιχα, επειδή οι περισσότεροι μετεωρολογικοί σταθμοί βρίσκονται σε ανοικτό πεδίο. Οι τιμές αυτές μπορούν να παρακαμφθούν με τη χρήση του αντικειμένου Site:WeatherStation.

Περιγραφή του εδάφους	Εκθέτης, α	Πάχος οριακού στρώματος, δ (m)
Επίπεδο, ύπαιθρος	0.14	270
Τραχύ, ξυλώδης περιοχή	0.22	370
Πόλεις και κωμοπόλεις	0.33	460
Ωκεανός	0.10	210
Αστικές, βιομηχανικές, δασικές εκτάσεις	0.22	370

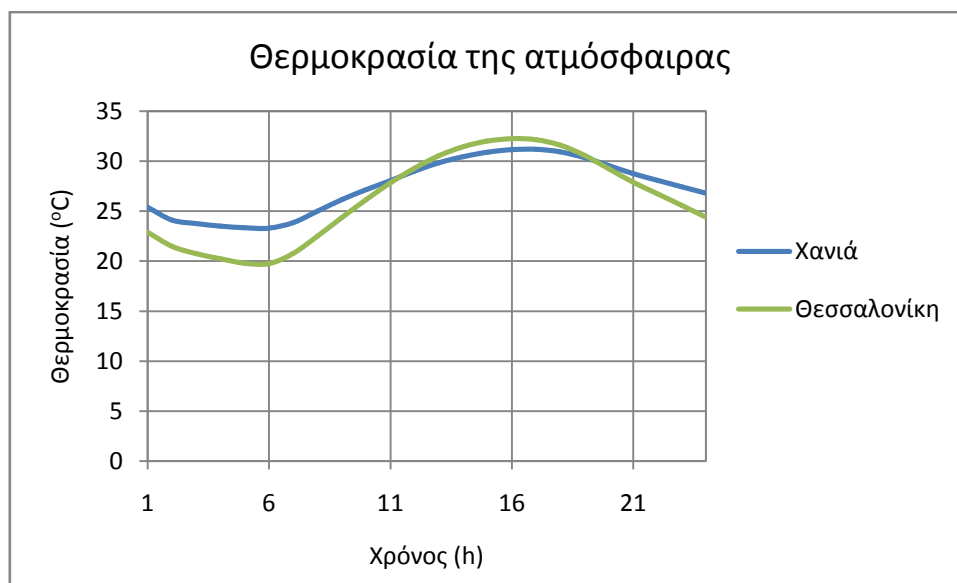
Πίνακας 4.11: Συντελεστές του προφίλ της ταχύτητας του ανέμου (ASHRAE Fundamentals 2005)

5. Κλιματικές συνθήκες

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι καιρικές συνθήκες οι οποίες επικρατούν κατά την ημέρα της προσομοίωσης στις δύο περιοχές (Χανιά και Θεσσαλονίκη). Τα αρχεία του καιρού που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτέλεση του προγράμματος παρέχονται από το EnergyPlus.

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5.1 για τις τρεις περιοχές.



Διάγραμμα 5.1: Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας στις δύο πόλεις

Η θερμοκρασία στη Θεσσαλονίκη παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές κατά τη διάρκεια του μεσημεριού και τις χαμηλότερες κατά τις πρώτες πρωινές και βραδινές ώρες.

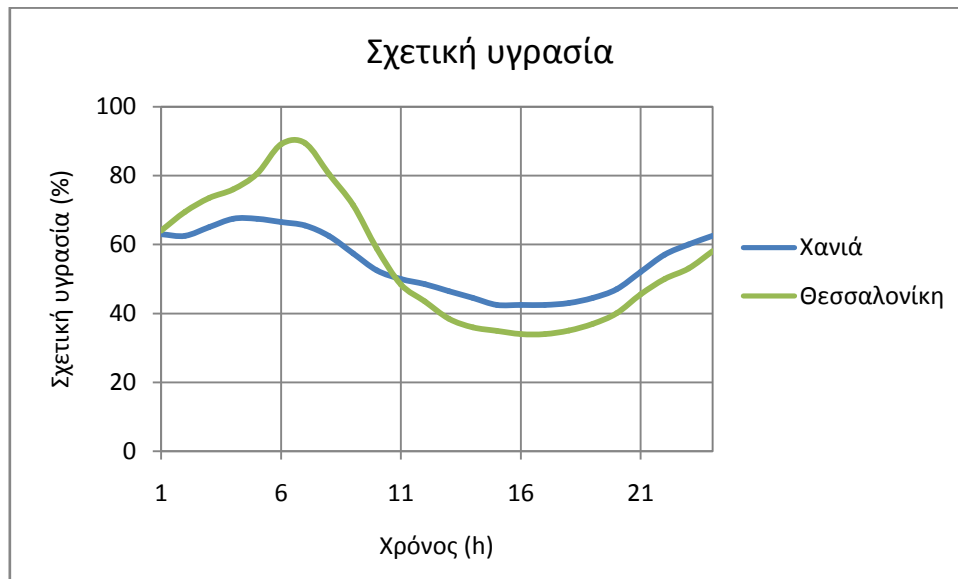
Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας για τις τρεις πόλεις.

Χανιά		Θεσσαλονίκη	
Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)	Ελάχιστη Θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)	Ελάχιστη Θερμοκρασία (°C)
31	23	32	20

Πίνακας 5.1: Οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες για τις τρεις πόλεις

Σχετική υγρασία

Στο Διάγραμμα 5.2 φαίνεται η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας για τις τρεις πόλεις.



Διάγραμμα 5.2: Η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας για τις δύο πόλεις

Η μέγιστη τιμή της υγρασίας συναντάται κατά τις πρωινές ώρες ενώ η ελάχιστη κατά τις απογευματινές. Η μεγαλύτερη διακύμανση παρουσιάζεται στην περίπτωση της Θεσσαλονίκης..

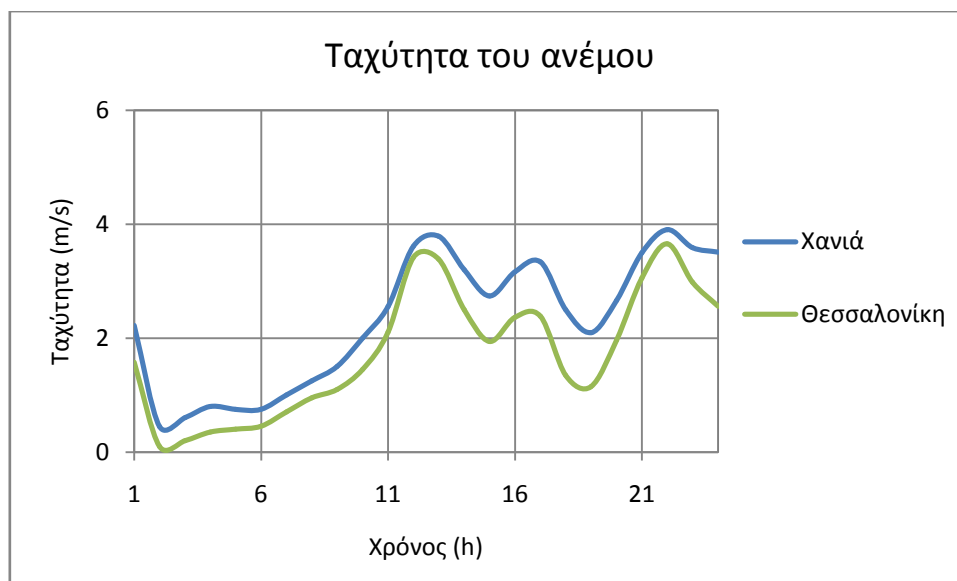
Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της υγρασίας για τις δύο πόλεις.

Χανιά		Θεσσαλονίκη	
Μέγιστη Υγρασία (%)	Ελάχιστη Υγρασία (%)	Μέγιστη Υγρασία (%)	Ελάχιστη Υγρασία (%)
68	42	89	34

Πίνακας 5.2: Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της σχετικής υγρασίας για τις δύο πόλεις

Ταχύτητα του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5.3.



Διάγραμμα 5.3: Η ταχύτητα του ανέμου για τις δύο πόλεις

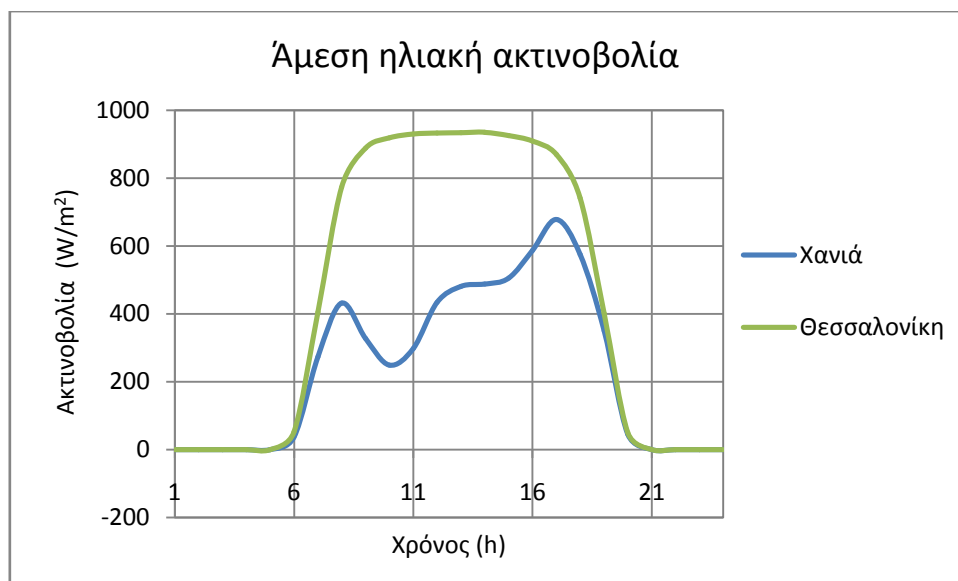
Στον Πίνακα 5.3 εμφανίζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου για τις δύο πόλεις.

Χανιά		Θεσσαλονίκη	
Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Ελάχιστη Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Ελάχιστη Ταχύτητα Ανέμου (m/s)
3,8	0,5	3,7	0,1

Πίνακας 5.3: Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου για τις δύο πόλεις

Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία αναλύεται στην άμεση και στη διάχυτη ακτινοβολία. Η άμεση ακτινοβολία παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5.4, για τις δύο πόλεις και η διάχυτη στο Διάγραμμα 5.5.



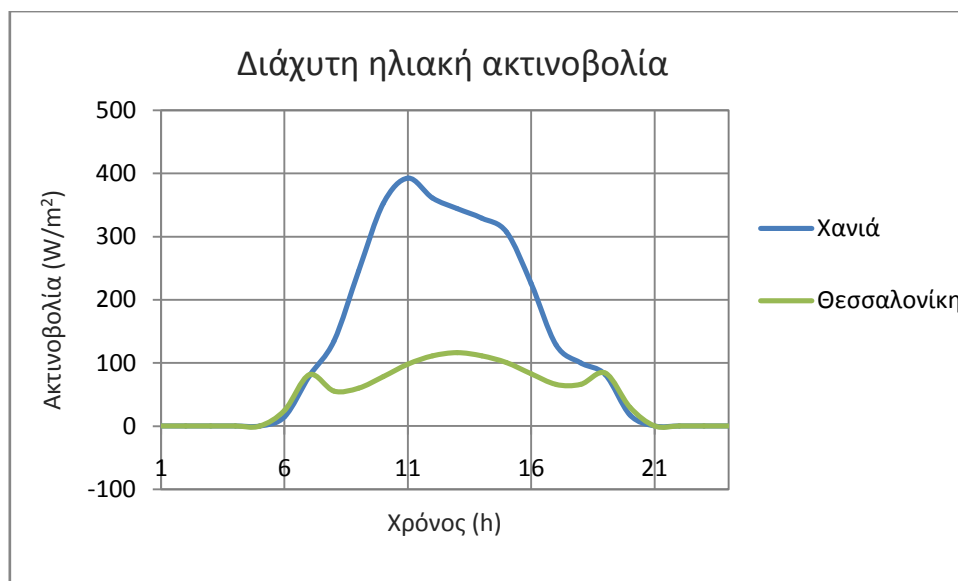
Διάγραμμα 5.4: Η άμεση ακτινοβολία για τις δύο πόλεις

Η μέγιστη άμεση ακτινοβολία συναντάται στη Θεσσαλονίκη. Στην περιοχή των Χανίων, παρατηρούνται περισσότερες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Ακολουθούν οι μέγιστες τιμές της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας για τις δύο πόλεις (Πίνακας 5.4).

Πόλη	Μέγιστη τιμή της άμεσης ακτινοβολίας (W/m ²)
Χανιά	679
Θεσσαλονίκη	935

Πίνακας 5.4: Οι μέγιστες τιμές της άμεσης ακτινοβολίας για τις δύο πόλεις



Διάγραμμα 5.5: Η διάχυτη ακτινοβολία για τις δύο πόλεις

Το μέγιστο της διάχυτης ακτινοβολίας συναντάται στην περιοχή των Χανίων.

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας για τις τρεις πόλεις.

Πόλη	Μέγιστη τιμή της άμεσης ακτινοβολίας (W/m ²)
Χανιά	393
Θεσσαλονίκη	117

Πίνακας 5.5: Οι μέγιστες τιμές της άμεσης ακτινοβολίας για τις δύο πόλεις

6. Η επίδραση των χαρακτηριστικών στις στέγες

Στο σημείο αυτό εξετάζεται η ενεργειακή συμπεριφορά της στέγης. Διάφορες παράμετροι μεταβάλλονται, ώστε να μελετηθεί η απόδοσή της και ο τρόπος που η κάθε ιδιότητα της την επηρεάζει. Η προσομοίωση θα γίνει για μια καλοκαιρινή ημέρα (8 Ιουλίου) για την περιοχή των Χανίων. Τα μετεωρολογικά δεδομένα προέρχονται από το μετεωρολογικό σταθμό της Σούδας.

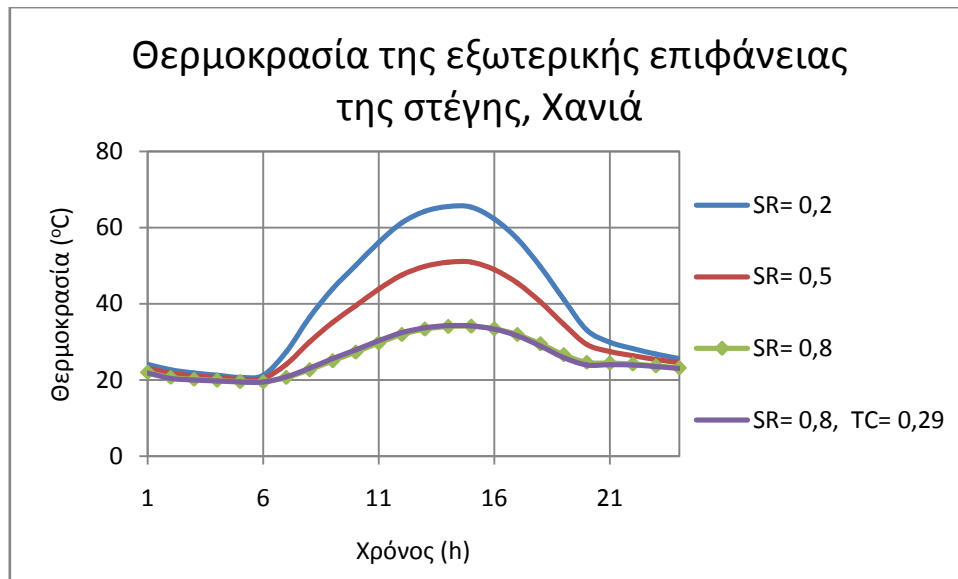
6.1. Η επίδραση των χαρακτηριστικών στις ψυχρές στέγες

Στην περίπτωση της ψυχρής στέγης θα πραγματοποιηθούν τέσσερις προσομοιώσεις. Στις τρεις πρώτες προσομοιώσεις μεταβάλλεται η ανακλαστικότητα της στέγης, ενώ στην τελευταία περίπτωση ελέγχεται η συμπεριφορά της στέγης εάν αλλάξει η θερμική μάζα της (Πίνακας 6.1).

Περίπτωση	Ανακλαστικότητα- SR	Αγωγιμότητα – TC (W/m K)
1	0,2	0,49
2	0,5	0,49
3	0,8	0,49
4	0,8	0,29

Πίνακας 6.1: Οι μεταβολές ανά περίπτωση για την ψυχρή στέγη

Στο Διάγραμμα 6.1 φαίνεται το θερμοκρασιακό προφίλ της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης για την ημέρα της προσομοίωσης. Η θερμοκρασία της στέγης μειώνεται όσο αυξάνεται η ανακλαστικότητα. Και μια μικρή μεταβολή στην ανακλαστικότητα της μπορεί να επιφέρει σημαντικές μεταβολές στη θερμοκρασία της εξωτερικής της επιφάνειας. Στην πρώτη περίπτωση, όπου η ανακλαστικότητα είναι ίση με 0,2 η θερμοκρασία φαίνεται να πλησιάζει τους 66 °C. Με την αύξηση της ανακλαστικότητας στο 0,5, η θερμοκρασία της στέγης φτάνει σχεδόν τους 51 °C, ενώ με την περαιτέρω αύξηση στο 0,8 παρατηρείται μια εξίσου σημαντική μείωση, με τη μέγιστη θερμοκρασία να είναι ίση με 34 °C. Στην τελευταία περίπτωση, η ανακλαστικότητα της στέγης παραμένει σταθερή, μεταβάλλεται όμως η αγωγιμότητα του σκυροδέματος που βρίσκεται στη στέγη. Η μεταβολή αυτή δεν επιφέρει κάποια σημαντική αλλαγή στη θερμοκρασία της στέγης, η μέγιστη τιμή της οποίας αυξάνεται σε αυτό το σενάριο κατά 0,15 °C.



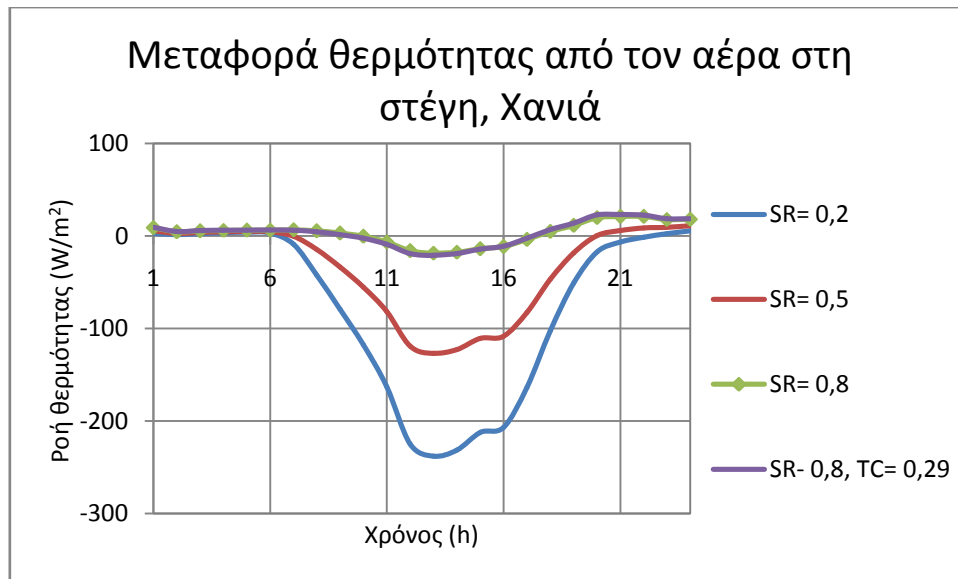
Διάγραμμα 6.1: Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης στα Χανιά

Στο Διάγραμμα 6.2 φαίνεται η μεταφορά της θερμότητας μεταξύ του αέρα και της στέγης. Η φορά της ενέργειας της προκύπτει από το κεφάλαιο είναι θετική όταν γίνεται με φορά από τη στέγη της τον αέρα (Εικόνα 6.1).



Εικόνα 6.1: Η φορά της ενέργειας στην ψυχρή στέγη

Η ροή της θερμότητας σε όλες τις περιπτώσεις παίρνει για ένα διαφορετικό διάστημα κάθε φορά αρνητικές τιμές. Όταν ισχύει αυτό η ενέργεια μεταφέρεται από τη στέγη προς την ατμόσφαιρα. Σημαντικό ρόλο στη μεταφορά της θερμότητας φαίνεται να έχει η ανακλαστικότητα της στέγης. Όταν αυξάνεται η ανακλαστικότητα μειώνεται η ποσότητα της ενέργειας που μεταφέρεται από τη στέγη προς τον αέρα.



Διάγραμμα 6.2: Η μεταφορά της θερμότητας από τον αέρα στη στέγη στα Χανιά

Στην πρώτη περίπτωση, με τη χαμηλότερη ανακλαστικότητα, η ροή πραγματοποιείται από τη στέγη προς τον αέρα για τις περισσότερες ώρες της ημέρας (07:00- 23:00) και η μέγιστη τιμή της είναι ίση με -238 W/m^2 . Στην περίπτωση 2 όπου ο συντελεστής ανάκλασης έχει αυξηθεί, μειώνεται και το διάστημα της ημέρας κατά το οποίο η ροή της θερμότητας παρουσιάζει αρνητική φορά (07:00- 20:00) αλλά και η μέγιστη ροή, η οποία πλησιάζει τα -127 W/m^2 . Στη συνέχεια, με την αύξηση της ανακλαστικότητας στο 0,8, το διάστημα κατά το οποίο η θερμότητα μεταφέρεται από τη στέγη προς τον αέρα περιορίζεται στις 8 ώρες (10:00- 18:00) και η μέγιστη τιμή της ενέργειας που μεταφέρεται ισούται με σχεδόν -19 W/m^2 .

Η μεταβολή της αγωγιμότητας δεν φαίνεται να προκαλεί κάποια σημαντική μεταβολή. Με τη μείωση της αγωγιμότητας από τα $0,49 \text{ W/mK}$ στα $0,29 \text{ W/mK}$ η μέγιστη τιμή της ροής είναι περίπου -21 W/m^2 , ενώ το διάστημα όπου η ροή πραγματοποιείται από τη στέγη προς τον αέρα είναι το ίδιο με την προηγούμενη περίπτωση.

Η τιμή της συνολικής ενέργειας που μεταφέρεται κατά το χρονικό διάστημα 10:00 έως 18:00 φαίνεται στον Πίνακα 6.2. Με βάση τις ποσότητες αυτές της θερμότητας υπολογίζεται στον Πίνακα 6.3 το ποσοστό μείωσης της ροής της ενέργειας σε σχέση με την πρώτη περίπτωση.

Περίπτωση	Συνολική θερμότητα (Wh/m ²)
1	-1558
2	-808
3	-88
4	-98

Πίνακας 6.2: Η θερμότητα που έχει ανταλλαχθεί κατά το χρονικό διάστημα 10:00 έως 18:00 στην περίπτωση της ψυχρής στέγης

Περίπτωση	Ποσοστό μείωσης της ροής της θερμότητας (%)
1	-
2	48
3	94
4	93

Πίνακας 6.3: Τα ποσοστά μείωσης της ροής της θερμότητας κατά το χρονικό διάστημα 10:00 έως 18:00 στην περίπτωση της ψυχρής στέγης

Με την αύξηση της ανακλαστικότητας η ενέργεια που μεταφέρεται μεταξύ του αέρα και της στέγης είναι πολύ λιγότερη, και συγκεκριμένα για τις μεσημεριανές ώρες το ποσοστό μείωσης μπορεί να φτάσει και το 94%.

Με τη μείωση της αγωγιμότητας βλέπουμε πως η ροή γίνεται μεγαλύτερη καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας σχεδόν, καθώς η θερμότητα που αποκτά η στέγη μεταφέρεται πιο αργά στα κατώτερα στρώματα της στέγης και τελικά στο εσωτερικό του κτιρίου.

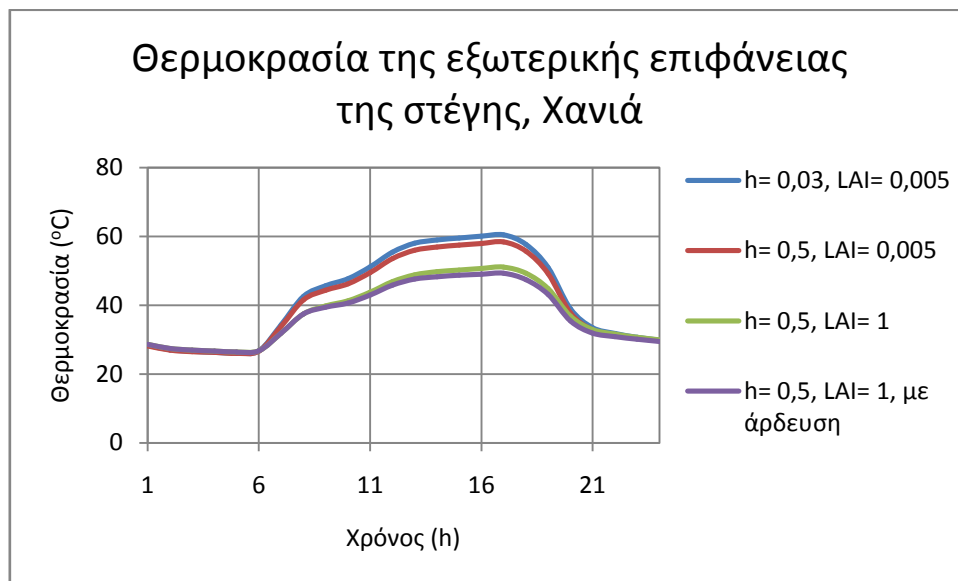
6.2. Η επίδραση των χαρακτηριστικών στις πράσινες στέγες

Η απόδοση της πράσινης στέγης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από κάποια χαρακτηριστικά της. Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η μεταφορά της θερμότητας (αισθητής και λανθάνουσας) όταν μεταβάλλεται το ύψος των φυτών, ο δείκτης επιφάνειας του φυλλώματος και τέλος όταν είναι σε λειτουργία το σύστημα άρδευσης. Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζονται οι μεταβολές στη στέγη ανά περίπτωση.

Περίπτωση	Ύψος βλάστησης- h (m)	Δείκτης επιφάνειας φυλλώματος- LAI	Σύστημα άρδευσης
1	0,03	0,005	Ανενεργό
2	0,5	0,005	Ανενεργό
3	0,5	1	Ανενεργό
4	0,5	1	Ενεργό

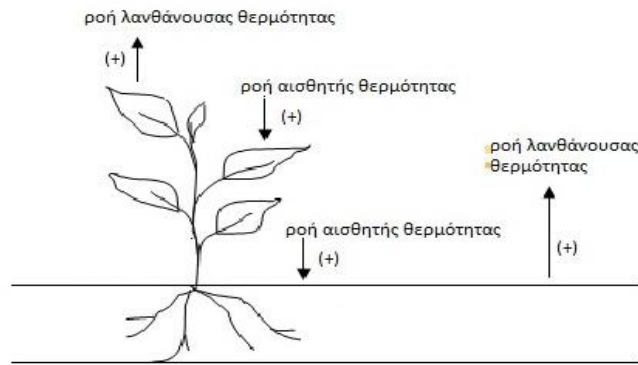
Πίνακας 6.4: Οι μεταβολές ανά περίπτωση για την πράσινη στέγη

Η θερμοκρασία στις δύο πρώτες περιπτώσεις είναι αρκετά υψηλή με τη μέγιστή τιμή της να φτάνει στους 60 °C όταν το ύψος των φυτών είναι ίσο με 0,03 m και στους 58 °C όταν το ύψος αυξάνεται στα 0,5 m. Σημαντικότερη μείωση της θερμοκρασίας παρατηρείται με την αύξηση του δείκτη επιφάνειας φυλλώματος, όπου η μέγιστη τιμή της πέφτει στους 51 °C. Περαιτέρω μείωση, αλλά μικρότερης κλίμακας, παρουσιάζεται όταν τίθεται σε λειτουργία το σύστημα άρδευσης, όπου η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας ελαττώνεται κατά 3 μονάδες περίπου (Διάγραμμα 6.3).



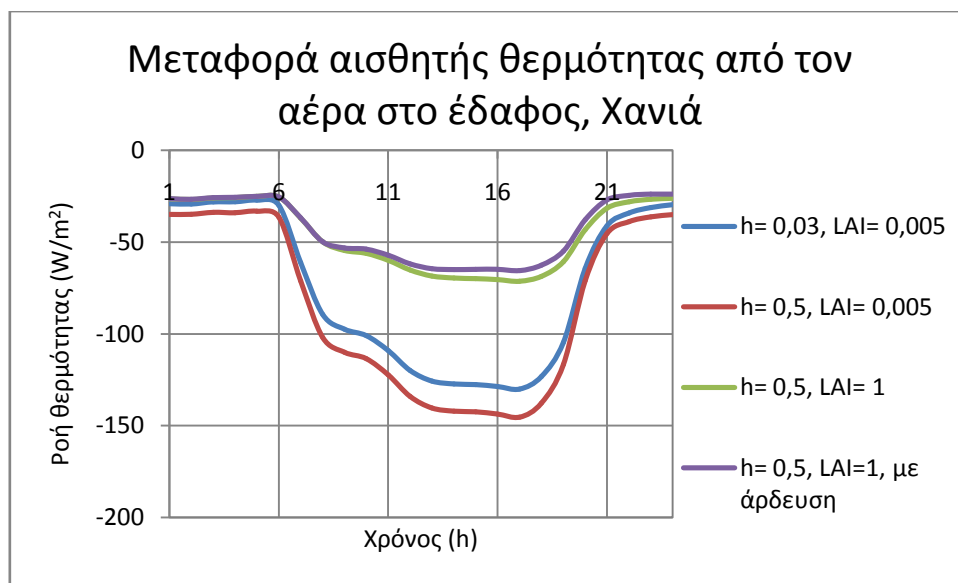
Διάγραμμα 6.3: Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της πράσινης στέγης στα Χανιά

Η φορά της αισθητής και της λανθάνουσας ενέργειας παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.2. Η ροή της αισθητής είναι θετική όταν πραγματοποιείται από το έδαφος ή τη βλάστηση προς τον αέρα, ενώ η ροή της λανθάνουσας θερμότητας είναι αντίθετη.



Εικόνα 6.2: Η ροή της ενέργειας στην πράσινη στέγη

Η μεταφορά της θερμότητας είναι για όλο το 24ωρο αρνητική, επομένως η ροή πραγματοποιείται από το έδαφος προς τον αέρα.



Διάγραμμα 6.4: Η μεταφορά της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στο έδαφος στα Χανιά

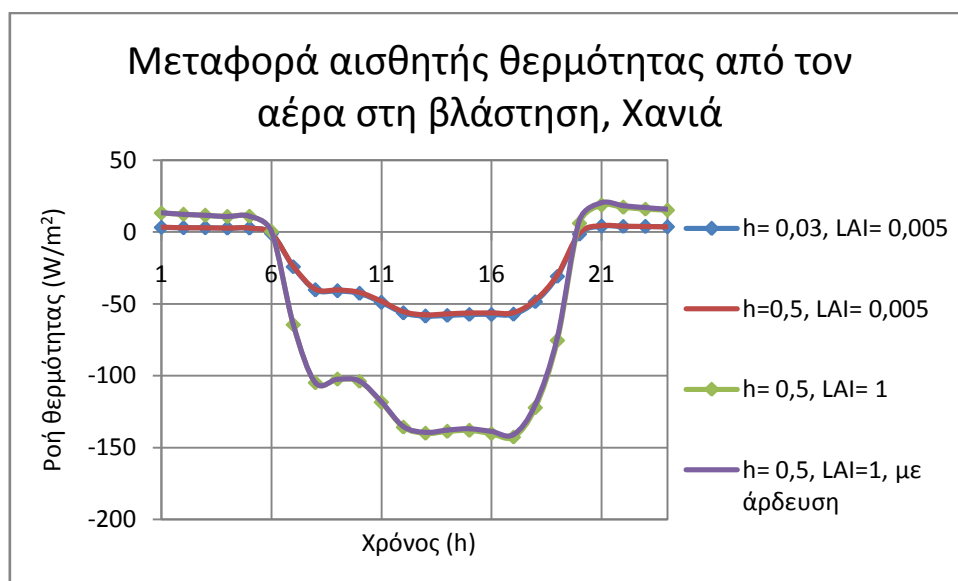
Η μεταβολή του ύψους των φυτών μπορεί να προκαλέσει αλλαγή στη ροή της ενέργειας καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου μέσα στο θόλο των φυτών. Στην πρώτη περίπτωση, όπου το ύψος βλάστησης είναι ίσο με 0,03 m παρατηρείται αρκετά μεγάλη ροή θερμότητας με τη μέγιστη τιμή να ισούται με -130 W/m^2 . Με την αύξηση του ύψους των φυτών στα 0,5 m η ροή αυξάνεται με αποτέλεσμα να φτάνει μέχρι και τα -145 W/m^2 .

Μεγαλύτερη επίδραση, ωστόσο, φαίνεται να έχει ο δείκτης επιφάνειας φυλλώματος. Στην περίπτωση 3, όπου αυξάνεται ο δείκτης προκύπτει μια σημαντική μείωση της ροής της

ενέργειας. Η μέγιστη τιμή μετά από αυτήν τη μεταβολή ξεπερνάει κατά ελάχιστα τα -71 W/m^2 .

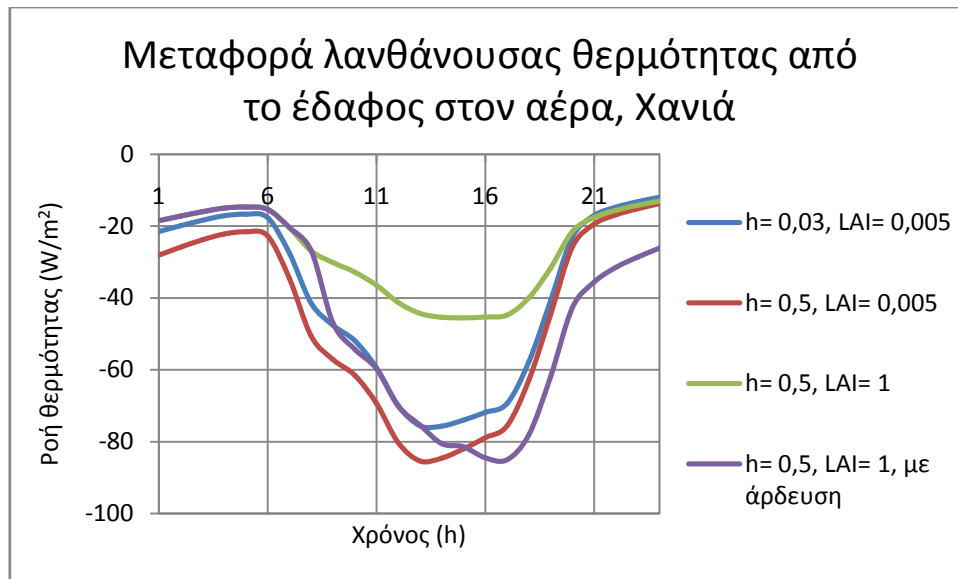
Η υγρασία του εδάφους επηρεάζει και αυτή κατά ένα βαθμό τη ροή της ενέργειας ιδιαίτερα τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες. Με την ενεργοποίηση του συστήματος άρδευσης η ροή της θερμότητας ελαττώνεται περαιτέρω με τη μέγιστη τιμή τώρα να φτάνει τα -66 W/m^2 .

Η ροή της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στη βλάστηση (Διάγραμμα 6.5) επηρεάζεται σημαντικά από τον δείκτη επιφάνειας του φυλλώματος. Έτσι, στις δύο πρώτες περιπτώσεις όπου ο δείκτης επιφάνειας είναι ίσος με 0,005 παρατηρείται η μικρότερη ροή θερμότητας. Η μεταβολή του ύψους της βλάστησης δεν δείχνει να επηρεάζει σημαντικά τη μετάδοση της θερμότητας καθώς στην πρώτη περίπτωση η μέγιστη τιμή της είναι ίση -59 W/m^2 , ενώ στη δεύτερη ίση με -58 W/m^2 . Με την αύξηση του δείκτη επιφάνειας φυλλώματος η ροή της ενέργειας αυξάνεται με τη μέγιστή τιμή να ισούται με -140 W/m^2 περίπου στις άλλες δύο περιπτώσεις. Και στην περίπτωση της αισθητής θερμότητας μεταξύ του αέρα και της βλάστησης, η ροή είναι αρνητική για το μεγαλύτερο διάστημα της ημέρας άρα πραγματοποιείται με φορά από τη βλάστηση προς τον αέρα.



Διάγραμμα 6.5: Η μεταφορά της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στη βλάστηση στα Χανιά

Η μεταφορά της λανθάνουσας θερμότητας γίνεται με φορά από τον αέρα προς το έδαφος καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, καθώς οι τιμές της είναι αρνητικές, σε όλες τις περιπτώσεις (Διάγραμμα 6.6).

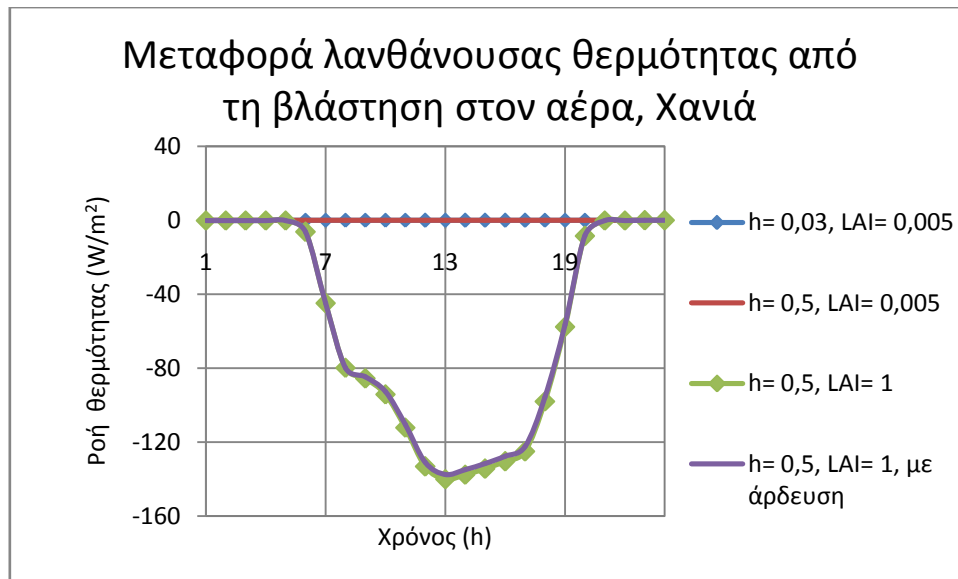


Διάγραμμα 6.6: Η μεταφορά της λανθάνουσας θερμότητας από το έδαφος στον αέρα στα Χανιά

Στην πρώτη περίπτωση η μέγιστη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας ισούται με -76 W/m^2 . Με την αύξηση του ύψους των φυτών, η μεταφορά της λανθάνουσας θερμότητας από το έδαφος στον αέρα μειώνεται περαιτέρω καθώς μειώνεται η ταχύτητα του ανέμου μέσα στο θόλο. Η μέγιστη τιμή της τότε φτάνει τα -85 W/m^2 . Με την αύξηση του δείκτη επιφάνειας φυλλώματος η ροή αυξάνεται κατά πολύ και δεν ξεπερνά τώρα τα -46 W/m^2 . Με την ενεργοποίηση, όμως, του συστήματος άρδευσης, με την αύξηση δηλαδή της υγρασίας στο έδαφος, η ροή μειώνεται και πάλι καθώς μειώνεται η διαφορά μεταξύ της αναλογίας ανάμιξης του εδάφους και του αέρα. Η μέγιστη τιμή της γίνεται σχεδόν ίση με αυτή στη δεύτερη περίπτωση και εμφανίζεται κάποιες ώρες αργότερα, έτσι κατά τις απογευματινές και τις βραδινές ώρες η ροή είναι μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση 2. Αντίθετα, στην αρχή του 24ώρου είναι μεγαλύτερη ακόμα και από την περίπτωση 1, όταν δηλαδή το σύστημα άρδευσης είναι προγραμματισμένο να μη λειτουργεί.

Στο Διάγραμμα 6.7 φαίνεται η ροή της λανθάνουσας θερμότητας μεταξύ της βλάστησης και του αέρα. Η ροή πάλι πραγματοποιείται με φορά από τον αέρα προς τη βλάστηση, καθώς οι τιμές είναι αρνητικές.

Ο παράγοντας που επηρεάζει κυρίως τη ροή της ενέργειας είναι ο δείκτης επιφάνειας του φυλλώματος καθώς είναι αντιστρόφως ανάλογος της στοματικής αντίστασης. Όταν αυξάνεται, λοιπόν, ο δείκτης επιφάνειας φυλλώματος μειώνεται η ροή της λανθάνουσας θερμότητας από τη βλάστηση στον αέρα. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις η ροή της θερμότητας είναι σχεδόν μηδενική. Με την αύξηση του δείκτη επιφάνειας φυλλώματος η ροή από το έδαφος στον αέρα μειώνεται σημαντικά, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει τα -140 W/m^2 .



Διάγραμμα 6.7: Η μεταφορά της λανθάνουσας θερμότητας από τη βλάστηση στον αέρα στα Χανιά

Με την αύξηση της υγρασίας στο έδαφος παρατηρείται μια ελάχιστη μεταβολή στη ροή κατά τις μεσημεριανές ώρες, όπου η ροή από τη βλάστηση προς τον αέρα είναι ελάχιστα μειωμένη. Έτσι, στην περίπτωση 4 η ροή είναι σχεδόν ίση καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας αλλά ελαφρώς μικρότερη, ιδιαίτερα το μεσημέρι και η μέγιστη τιμή της ισούται με $-137 W/m^2$.

Περίπτωση	1	2	3	4
Αισθητή θερμότητα από τον αέρα στο έδαφος (Wh/m^2)	-970	-1084	-532	-498
Αισθητή θερμότητα από τον αέρα στη βλάστηση (Wh/m^2)	-437	-429	-1059	-1052
Λανθάνουσα θερμότητα από το έδαφος στον αέρα (Wh/m^2)	-548	-618	-336	-592
Λανθάνουσα θερμότητα από τη βλάστηση στον αέρα (Wh/m^2)	-0,13	-0,12	-1007	-988

Πίνακας 6.5: Η θερμότητα που έχει ανταλλαχθεί κατά το χρονικό διάστημα 10:00- 18:00 στην περίπτωση της πράσινης στέγης

Η τιμή της συνολικής ενέργειας που μεταφέρεται κατά το χρονικό διάστημα 10:00 έως 18:00 φαίνεται στον Πίνακα 6.5. Με βάση τις ποσότητες αυτές της θερμότητας υπολογίζεται στους Πίνακες 6.6 και 6.7 το ποσοστό μείωσης ή αύξησης της ροής της ενέργειας σε σχέση με την πρώτη περίπτωση.

Ποσοστά μείωσης της ροής της αισθητής θερμότητας (%)				
Περίπτωση	1	2	3	4
Αισθητή θερμότητα από τον αέρα στο έδαφος (%)	-	-12	45	49
Αισθητή θερμότητα από τον αέρα στη βλάστηση (%)	-	2	-142	-141

Πίνακας 6.6: Τα ποσοστά μείωσης της ροής της αισθητής θερμότητας κατά το χρονικό διάστημα 10:00 έως 18:00 στην περίπτωση της πράσινης στέγης

Ποσοστά αύξησης της ροής της λανθάνουσας θερμότητας (%)				
Περίπτωση	1	2	3	4
Λανθάνουσα θερμότητα από το έδαφος στον αέρα (%)	-	13	-39	8
Λανθάνουσα θερμότητα από τη βλάστηση στον αέρα (%)	-	-4	>>100	>>100

Πίνακας 6.7: Τα ποσοστά μείωσης της ροής της λανθάνουσας θερμότητας κατά το χρονικό διάστημα 10:00 έως 18:00 στην περίπτωση της πράσινης στέγης

Αυτό που επιδιώκεται στην περίπτωση της πράσινης στέγης είναι η όσο το δυνατόν χαμηλότερη ροή αισθητής και μεγαλύτερη ροή λανθάνουσας θερμότητας από το έδαφος και προς τον αέρα.

Το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης της ροής της αισθητής θερμότητας παρατηρείται στην περίπτωση 4 για την ανταλλαγή μεταξύ αέρα και εδάφους. Η μικρή διαφορά μεταξύ των ποσοστών που παρουσιάζουν οι δύο τελευταίες μεταβολές δείχνει πως ο βασικός παράγοντας που οδηγεί στη μείωση της ροής της ενέργειας είναι η αύξηση του δείκτη επιφάνειας φυλλώματος. Η ενεργοποίηση του συστήματος ψύξης συμβάλλει θετικά στην απόδοση της πράσινης στέγης.

Η ροή της αισθητής θερμότητας από τον αέρα προς τη βλάστηση αυξάνεται σημαντικά στις περιπτώσεις 3 και 4, καθώς έχει αυξηθεί σημαντικά ο δείκτης επιφάνειας του φυλλώματος και επομένως αυξάνεται η επιφάνεια των φυτών όπου δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία. Με την αύξηση της υγρασίας μεταφέρεται λιγότερη θερμότητα καθώς καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια για το φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής.

Η λανθάνουσα θερμότητα που μεταδίδεται από το έδαφος προς τον αέρα αυξάνεται αρκετά με την αύξηση του ύψους των φυτών, καθώς με αυτήν τη μεταβολή αυξάνεται και η ταχύτητα του ανέμου μέσα στο θόλο. Η αύξηση του δείκτη επιφάνειας φυλλώματος οδηγεί σε μεγάλη μείωση του ποσοστού αφού λιγότερη ακτινοβολία καταφέρνει να φτάσει στο έδαφος. Η αύξηση της υγρασίας οδηγεί σε αύξηση του ποσοστού της ενέργειας που μεταδίδεται από το έδαφος προς τον αέρα καθώς αυξάνεται με αυτόν τον τρόπο ο παράγοντας της αναλογίας ανάμειξης μέσα στο θόλο.

Ο παράγοντας που φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την ροή της λανθάνουσας θερμότητας είναι ο δείκτης επιφάνειας φυλλώματος. Η ενέργεια που ανταλλάσσεται στις περιπτώσεις 3 και 4 όπου η επιφάνεια της βλάστησης είναι αυξημένη ξεπερνά κατά πολύ τα πρώτα σενάρια όπου η επιφάνεια είναι περιορισμένη. Η αύξηση του ύψους των φυτών φαίνεται να οδηγεί στη μείωση της ροής της λανθάνουσας θερμότητας κατά ένα μικρό ποσοστό όμως.

6.3. Τα τελικά μοντέλα της ψυχρής και της πράσινης στέγης

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας σχεδιάζονται τα μοντέλα τα οποία θα εξεταστούν στη συνέχεια της εργασίας. Η απόδοση της στέγης στις παραπάνω περιπτώσεις καθορίζει τα χαρακτηριστικά τα οποία αυτές θα έχουν. Στους Πίνακες 6.8 και 6.9 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της ψυχρής και της πράσινης στέγης αντίστοιχα. Στις περιπτώσεις αυτές στο κτίριο έχει προστεθεί και σύστημα ψύξης.

Ψυχρή στέγη	
Ανακλαστικότητα	0,8
Αγωγιμότητα (W/m K)	0,49

Πίνακας 6.8: Τα τελικά χαρακτηριστικά της ψυχρής στέγης

Πράσινη στέγη	
Ύψος βλάστησης (m)	0,5
Δείκτης επιφάνειας φυλλώματος	1
Σύστημα άρδευσης	Ενεργό

Πίνακας 6.9: Τα τελικά χαρακτηριστικά της πράσινης στέγης

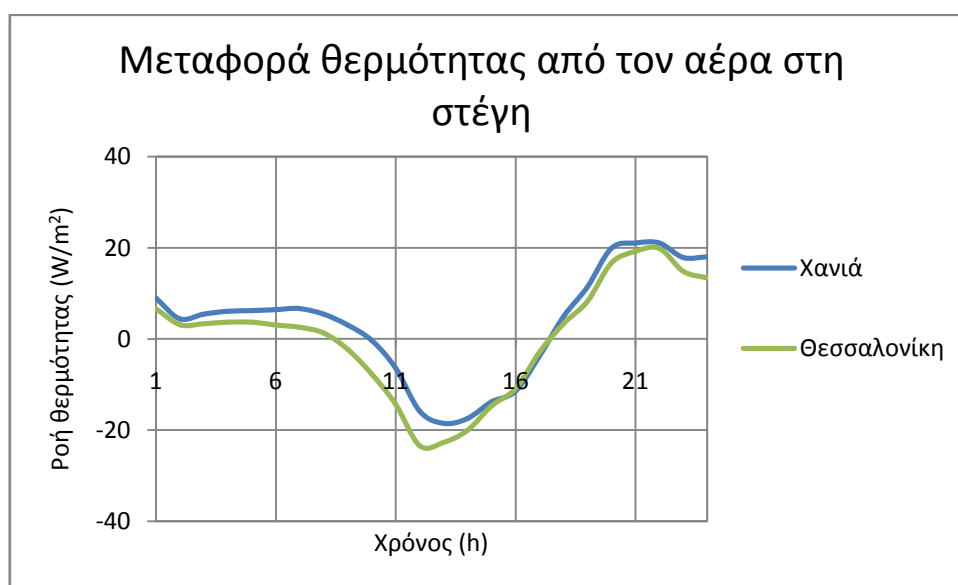
7. Η επίδραση των κλιματικών συνθηκών

Τα χαρακτηριστικά της στέγης δεν αποτελούν τους μοναδικούς παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή της. Οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή επηρεάζουν και αυτές το ενεργειακό ισοζύγιο.

Για να ελεγχθεί η επίδραση των καιρικών συνθηκών θα εξεταστεί η απόδοση της ίδιας στέγης σε δύο διαφορετικές περιοχές, στα Χανιά και στη Θεσσαλονίκη. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση έχουν παρουσιαστεί στην ενότητα 5. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση του προγράμματος είναι αυτά που καθορίστηκαν στην ενότητα 6.3.

7.1. Η επίδραση των κλιματικών συνθηκών στην ψυχρή στέγη

Η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μεταφορά της θερμότητας καθώς επηρεάζει τη θερμοκρασία της στέγης αλλά και της ατμόσφαιρας. η ροή μεταφέρεται συνεχώς από τον αέρα προς τη στέγη. Στα Χανιά όπου παρατηρείται η χαμηλότερη άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Διάγραμμα 5.4) η ενέργεια που μεταφέρεται από τη στέγη προς τον αέρα μειώνεται, καθώς επίσης μειώνεται και το χρονικό διάστημα όπου η ροή της ενέργειας έχει αρνητικές τιμές.



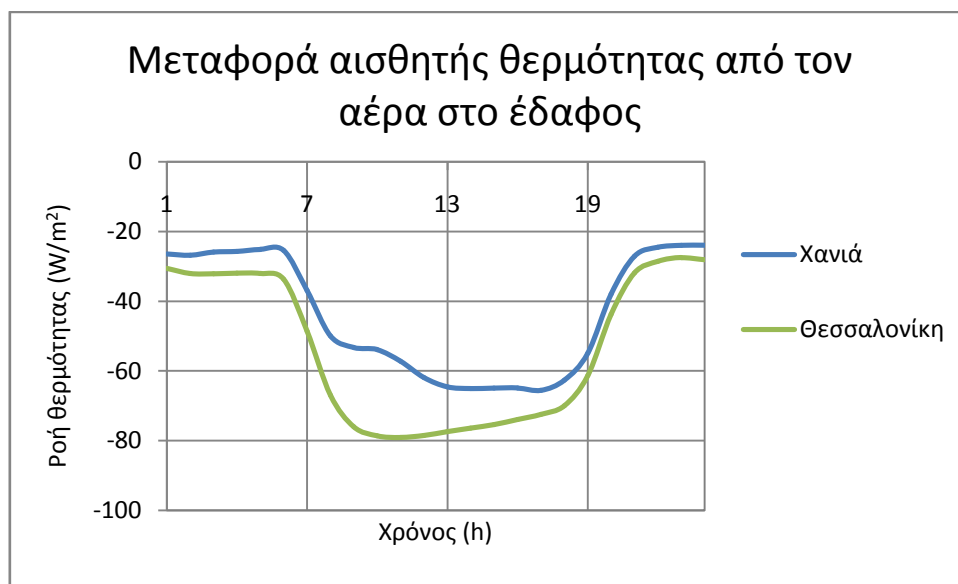
Διάγραμμα 7.1: Η ροή της θερμότητας από τον αέρα στη στέγη για τις δύο περιοχές

Παράλληλα, η ανταλλαγή θερμότητας ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος επηρεάζεται από τη διαφορά της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας και της στέγης. Από τη διαφορά αυτή επηρεάζεται και η ανταλλαγή θερμότητας με συναγωγή, που εξαρτάται ταυτόχρονα και από την ταχύτητα του ανέμου, όπου οφείλονται οι διάφορες μικρές διακυμάνσεις στις καμπύλες της ροής.

7.2. Η επίδραση των κλιματικών συνθηκών στην πράσινη στέγη

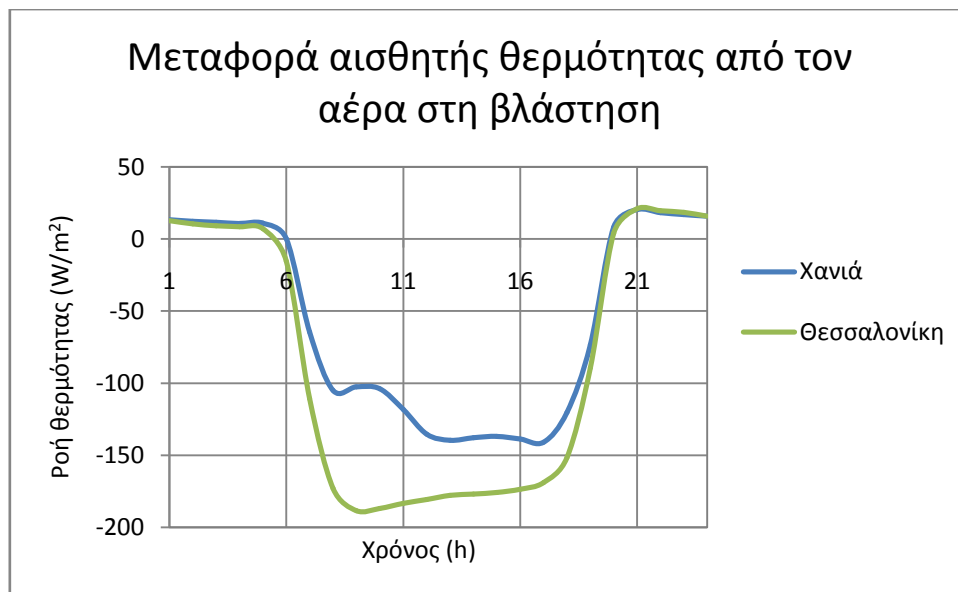
Η μεταφορά της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στο έδαφος (Διάγραμμα 7.2) επηρεάζεται σημαντικά από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία επιδρά στη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της στέγης και της ατμόσφαιρας.

Έτσι, στα Χανιά όπου η άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Διάγραμμα 5.4) είναι λιγότερη παρατηρείται η μεγαλύτερη ροή ενέργειας από τον αέρα στο έδαφος. Ο άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη ροή της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στο έδαφος είναι η ταχύτητα του ανέμου, αφού τα μεγέθη αυτά είναι ανάλογα.



Διάγραμμα 7.2: Η ροή της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στο έδαφος για τις δύο περιοχές

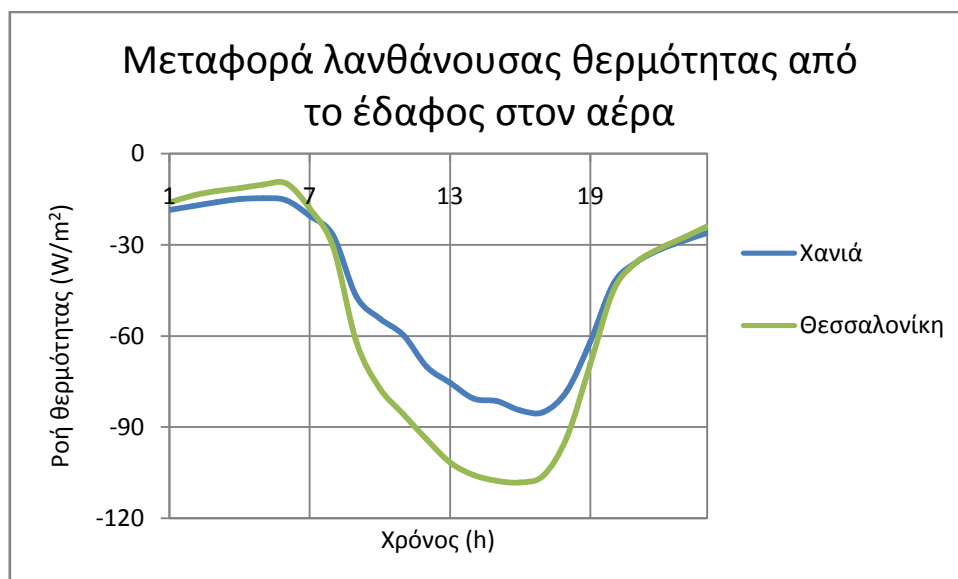
Η μεταφορά της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στη βλάστηση (Διάγραμμα 7.3) επηρεάζεται όπως στην παραπάνω περίπτωση, από την ηλιοφάνεια, τη θερμοκρασία αέρα και βλάστησης και την ταχύτητα του ανέμου δηλαδή. Έτσι, παρατηρείται η μεγαλύτερη ροή από τον αέρα προς το έδαφος στην περιοχή των Χανίων και ακολουθεί η Θεσσαλονίκη. Ένας άλλος παράγοντας που φαίνεται να επιδρά είναι η σχετική υγρασία καθώς επηρεάζει την πυκνότητα του αέρα μέσα στο θόλο.



Διάγραμμα 7.3: Η ροή της αισθητής θερμότητας από τον αέρα στη βλάστηση για τις δύο περιοχές

Η μεταφορά της λανθάνουσας θερμότητας από το έδαφος στον αέρα (Διάγραμμα 7.4) επηρεάζεται από τη σχετική υγρασία. Με την αύξηση της σχετικής υγρασίας τις μεσημεριανές ώρες παρατηρείται μεγαλύτερη ροή από το έδαφος προς τον αέρα.

Το διάγραμμα της ροής ακολουθεί τη μορφή του διαγράμματος της σχετική υγρασίας (Διάγραμμα 5.2), οι μεταβολές όμως της ροής δεν είναι τόσο απότομες καθώς επιδρά και η ταχύτητα του ανέμου πάνω σ' αυτό εξομαλύνοντάς τες. Παράλληλα, η ταχύτητα του ανέμου προκαλεί διάφορες μικρές διακυμάνσεις στη ροή της θερμότητας.

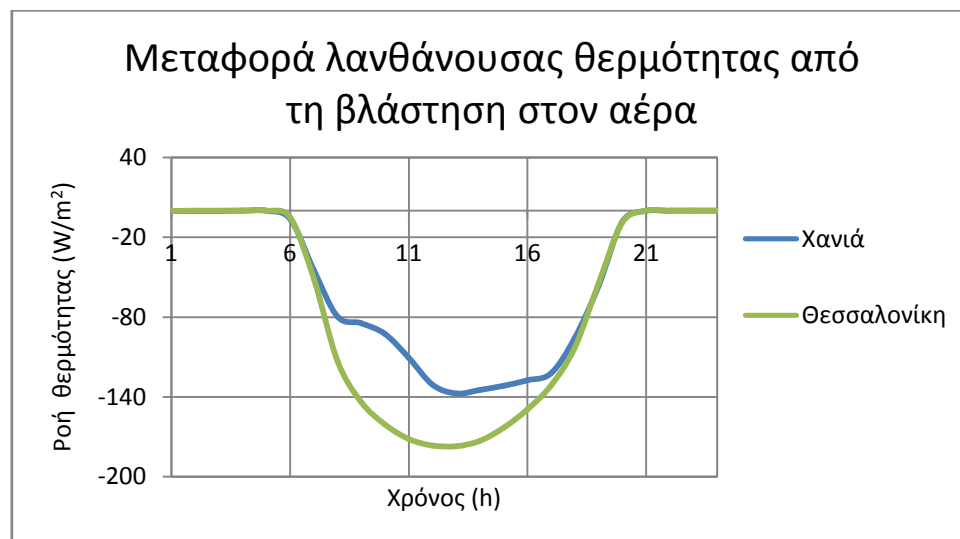


Διάγραμμα 7.4: Η ροή της λανθάνουσας θερμότητας από το έδαφος στον αέρα για τις δύο περιοχές

Οι καμπύλες της ροής της θερμότητας Η μεταφορά της λανθάνουσας ενέργειας από τη βλάστηση στον αέρα (Διάγραμμα 7.5) επηρεάζεται από την ένταση του φωτός. Επομένως, στα Χανιά, όπου υπάρχει λιγότερη άμεση ηλιακή ακτινοβολία παρατηρείται και η μικρότερη ροή της ενέργειας από τον αέρα στη βλάστηση (αντίθετη φορά). Αντίθετα στη Θεσσαλονίκη, όπου υπάρχει η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία συμβαίνει και η μέγιστη ροή λανθάνουσας θερμότητας από τον αέρα στη βλάστηση.

Ο άλλος παράγοντας που επιδρά στη ροή της θερμότητας είναι η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, καθώς επιδρά στην πίεση της ατμόσφαιρας και έπειτα στη στοματική αντίσταση των φυτών. Με την αύξηση της υγρασίας αυξάνεται η λανθάνουσα θερμότητα που μεταφέρεται από τη βλάστηση στον αέρα.

Επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει τη ροή της θερμότητας είναι η ταχύτητα του ανέμου, με την αύξηση του οποίου αυξάνεται η ροή.



Διάγραμμα 7.5: Η ροή της λανθάνουσας θερμότητας από τον αέρα στη βλάστηση για τις δύο περιοχές

8. Σύγκριση Ψυχρής και Πράσινης Στέγης

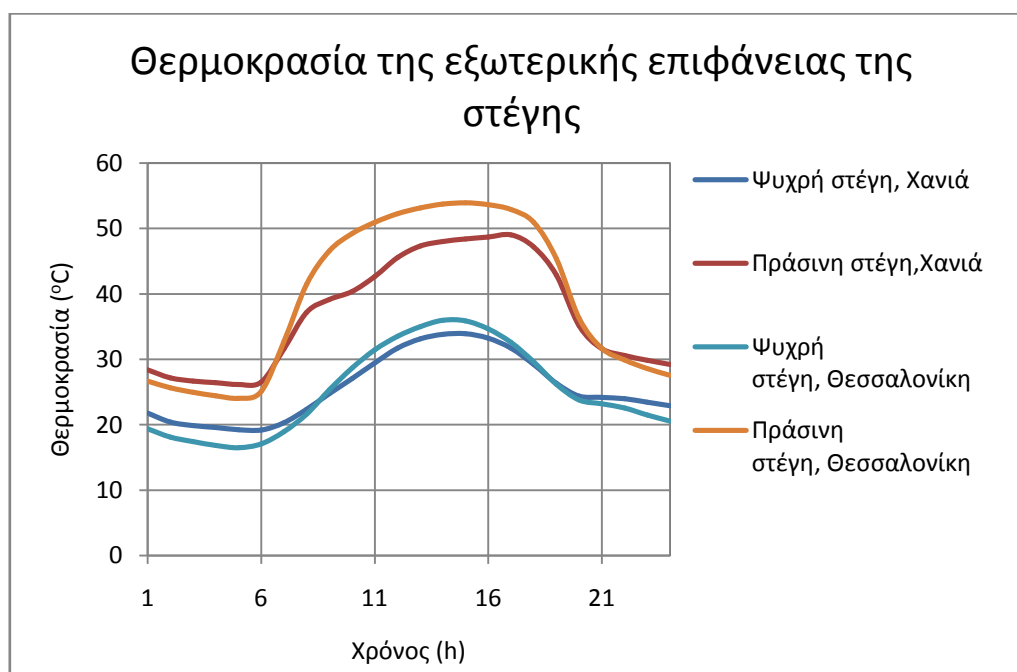
Στην ενότητα 8 γίνεται η σύγκριση μεταξύ της ψυχρής και της πράσινης στέγης. Τα ενεργειακά οφέλη, το κόστος εγκατάστασης, ο χρόνος ζωής αναλύονται στη συνέχεια συγκριτικά. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση είναι τα τελικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν στο κεφάλαιο 6.

8.1. Η ροή της ενέργειας

Αρχικά, θα γίνει μια σύγκριση μεταξύ των δύο ειδών στέγης με κριτήριο τα ενεργειακά οφέλη. Θα παρουσιαστεί η μεταβολή της θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας μεταξύ των δυο στεγών, η ροή της αισθητής θερμότητας και τα φορτία που απαιτούνται για την ψύξη του ορόφου και του ισογείου σε κάθε περιοχή για μια καλοκαιρινή ημέρα.

Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης

Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος της στέγης. Στο Διάγραμμα 8.1 φαίνονται οι τιμές της θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας της πράσινης και της ψυχρής στέγης στις δύο περιοχές. Η θερμοκρασία που αναπτύσσει η πράσινη στέγη είναι σε όλες τις περιπτώσεις υψηλότερη από της ψυχρής, με τη διαφορά μεταξύ τους να είναι περισσότερο αισθητή κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Διάγραμμα 8.1: Θερμοκρασιακό προφίλ της εξωτερικής επιφάνειας της στέγης στις δύο περιοχές

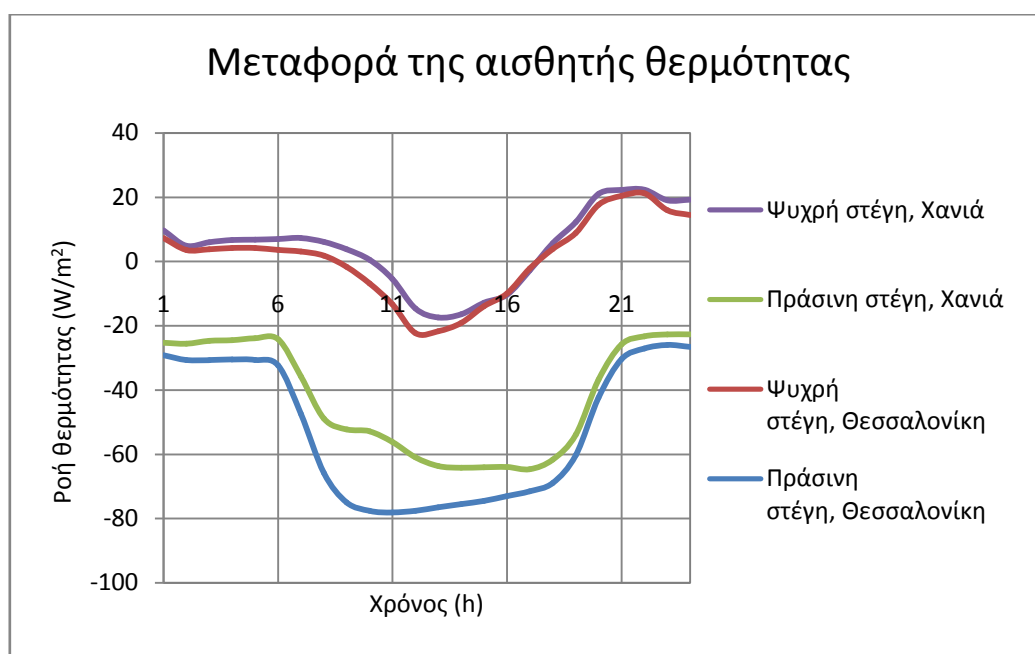
Στα Χανιά στην περίπτωση της φυτεμένης στέγης η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει τους 49 °C, ενώ στην περίπτωση της ψυχρής στέγης, είναι περίπου ίση με 34 °C. Στη Θεσσαλονίκη, όταν

η στέγη είναι φυτεμένη η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της φτάνει τους 54 °C, ενώ στην περίπτωση της ψυχρής στέγης η θερμοκρασία δεν ξεπερνά τους 36 °C.

Η ροή της αισθητής θερμότητας

Ακολουθεί η σύγκριση της ροής της αισθητής θερμότητας που μεταφέρεται μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας της ψυχρής στέγης και του αέρα και μεταξύ του εδάφους της πράσινης στέγης και του αέρα. Η ροή της αισθητής θερμότητας για την κάθε περίπτωση παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.2.

Η ροή της θερμότητας έχει οριστεί θετική όταν πραγματοποιείται από τον αέρα προς τη στέγη.



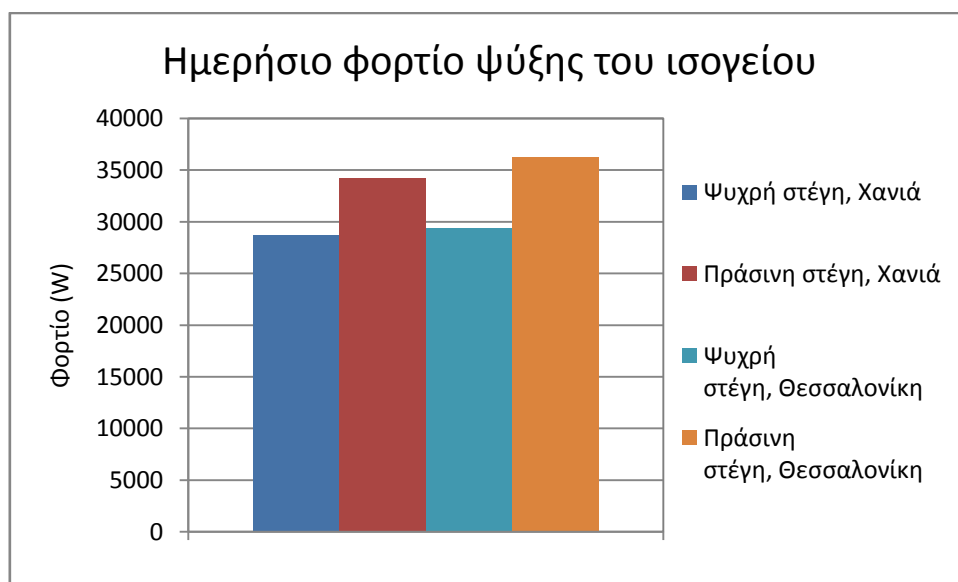
Διάγραμμα 8.2: Η ροή της αισθητής θερμότητας στη στέγη στις δύο περιοχές

Στην περίπτωση της πράσινης στέγης η ροή είναι αρνητική σε όλες τις περιοχές για όλο το 24ωρο. Η θερμότητα δηλαδή μεταφέρεται συνεχώς από τη στέγη προς την ατμόσφαιρα. Αντίθετα, στην περίπτωση της ψυχρής στέγης παρατηρείται θετική ροή για το μεγαλύτερο διάστημα της ημέρας.

Στα Χανιά η μέγιστη τιμή της ροής είναι ίση με -65 W/m^2 όταν η στέγη είναι φυτεμένη, ενώ όταν είναι κατασκευασμένη με ψυχρά υλικά η ροή της έχει σαν μέγιστη αρνητική τιμή τα -17 W/m^2 . Στη Θεσσαλονίκη, η μέγιστη τιμή της ροής είναι ίση με -78 W/m^2 και -22 W/m^2 , για την πράσινη και την ψυχρή στέγη, αντίστοιχα.

Το φορτίο ψύξης

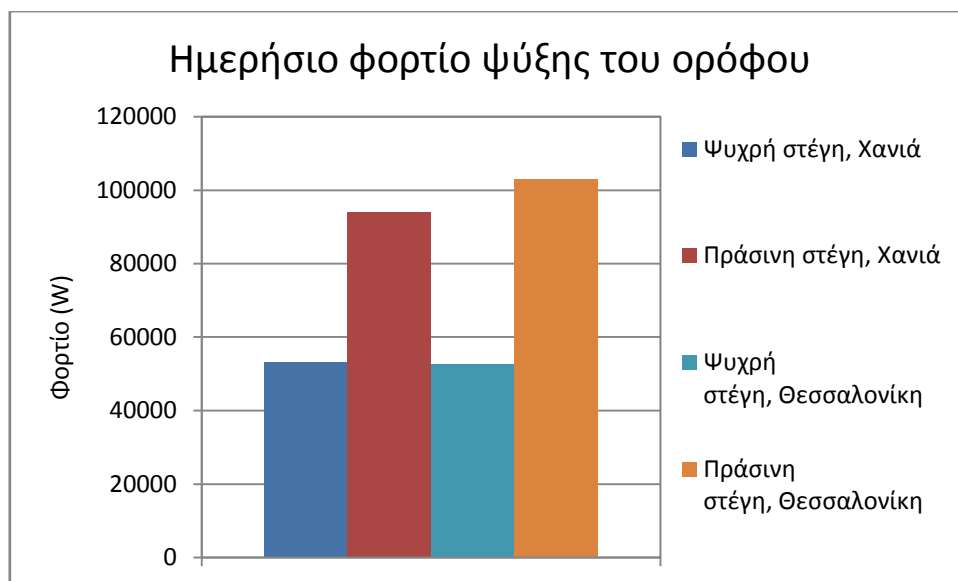
Είναι σημαντικό να μελετηθεί και η ενέργεια που καταναλώνεται για τον κλιματισμό του κτιρίου. Στο Διάγραμμα 8.3 και 8.4 παρουσιάζονται τα ημερήσια φορτία ψύξης της πράσινης και της ψυχρής στέγης για την ψύξη του ισογείου και του ορόφου.



Διάγραμμα 8.3: Τα ημερήσια φορτία ψύξης του ισογείου

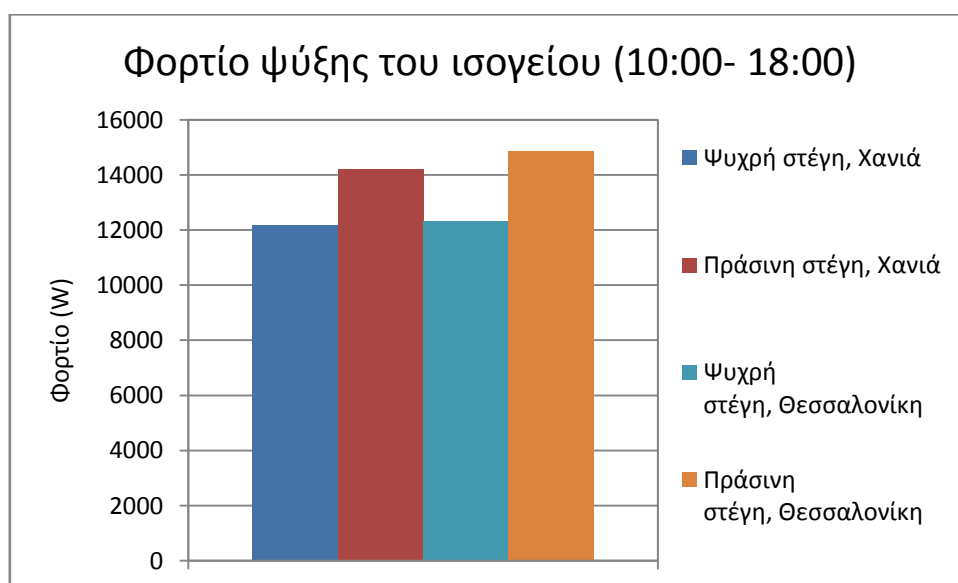
Τα μεγαλύτερα φορτία παρουσιάζονται στην περίπτωση των πράσινων στεγών και για τις τρεις πόλεις. Στα Χανιά το φορτίο ψύξης μπορεί να φτάσει τα 34 kW όταν η στέγη είναι φυτεμένη και τα 29 kW όταν η στέγη είναι κατασκευασμένη με ψυχρά υλικά. Στη Θεσσαλονίκη στην περίπτωση της πράσινης στέγης το φορτίο είναι ίσο με 36 kW, ενώ στην ψυχρή 29 kW.

Στα Χανιά το φορτίο ψύξης του ορόφου είναι ίσο με 94 kW στην περίπτωση της πράσινης και 53 kW στην περίπτωση της ψυχρής στέγης. Στη Θεσσαλονίκη οι τιμές του φορτίου ισούνται με 103 kW υπό την επίδραση της φυτεμένης στέγης και 53 kW υπό την επίδραση της ψυχρής.

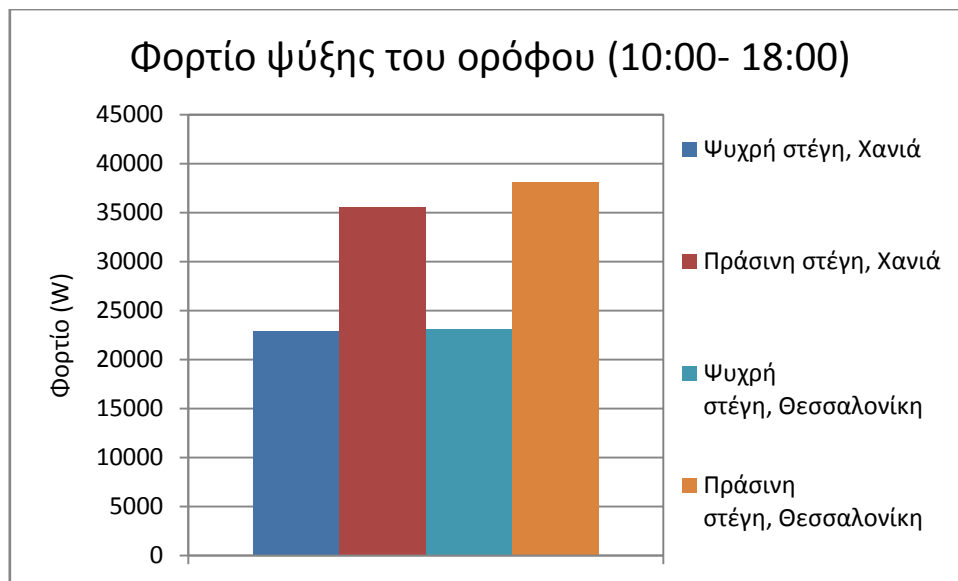


Διάγραμμα 8.4: Τα ημερήσια φορτία ψύξης του ορόφου

Ακολουθούν τα διαγράμματα ψύξης του ισογείου και του ορόφου για το χρονικό διάστημα 10:00 έως 18:00, όταν παρατηρείται η περισσότερη θερμική δυσφορία.



Διάγραμμα 8.5: Το φορτίο ψύξης του ισογείου για το χρονικό διάστημα 10:00- 18:00



Διάγραμμα 8.6: Το φορτίο ψύξης του ορόφου για το χρονικό διάστημα 10:00- 18:00

Και στις τρεις περιοχές προκύπτει μια πτώση της ροής της ενέργειας από τη στέγη προς την ατμόσφαιρα, όταν υπάρχει η ψυχρή στέγη.

Στις πράσινες επιφάνειες υπάρχει μία συνεχής ροή θερμότητας από το έδαφος προς τον αέρα, η οποία ελαττώνεται μεν αλλά συνεχίζει και τις νυκτερινές ώρες. Αντίθετα στις ψυχρές επιφάνειες η ροή θερμότητας γίνεται από τον αέρα προς την στέγη τις περισσότερες ώρες (νυχτερινές, πρωινές και απογευματινές ώρες).

Έτσι η συνολική ροή θερμότητας για την Θεσσαλονίκη και τα Χανιά είναι για τις πράσινες στέγες πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις ψυχρές. Ως προς το απόλυτο μέγεθος της ροής της θερμότητας βλέπουμε ότι η ροή θερμότητας στις πράσινες στέγες είναι περίπου η τριπλάσια στις μέγιστες τιμές.

Η πράσινη στέγη έχει μία μεγαλύτερη συμβολή στην διαμόρφωση της θερμοκρασίας του αέρα που την περιβάλει. Προσλαμβάνει θερμότητα από την ακτινοβολία και με την θερμοχωρητικότητα που διαθέτει την αποθηκεύει και συνεχίζει να αποδίδει θερμότητα και την νύχτα και τις ημέρες έλλειψης ηλιοφάνειας, προσδίδοντας θερμική αδράνεια στην κατασκευή.

Αυτό δεν συμβαίνει στις ψυχρές στέγες που αποδίδουν θερμότητα μόνο κάποιες ώρες, τις ημέρες με ηλιοφάνεια και η συμβολή τους στην διαμόρφωση της θερμοκρασίας του αέρα είναι περιορισμένη. Παρατηρείται, λοιπόν, μια μεγαλύτερη πτώση της θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας τους, ιδιαίτερα κατά τις βραδινές και τις πρωινές ώρες. Αυτό το φαινόμενο, όμως σε περιοχές με χαμηλή δόμηση ή κατά τη διάρκεια των χειμερινών ημερών μπορεί να οδηγήσει σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες στο εσωτερικό των κτιρίων, ιδιαίτερα εάν η στέγη δεν είναι μονωμένη.

Ο τύπος της πράσινης στέγης επηρεάζει και αυτός την απόδοσή της. Η φυτεμένη στέγη που δημιουργήθηκε αντιστοιχεί σε μια εκτατικού τύπου, η οποία έχει τη μικρότερη απόδοση,

όπως έχει ειπωθεί στη θεωρία. Οι άλλοι τύποι, ο ημιεντατικός και ο εντατικός, θα παρουσίαζαν μεγαλύτερη απόδοση και συνεπώς μικρότερα φορτία ψύξης αλλά θα είχαν περισσότερες απαιτήσεις στο σχεδιασμό και στη λειτουργία.

Περιοχή	Συνολική θερμότητα (Wh/m ²)		Ποσοστό μείωσης της ροής της θερμότητας με τη ψυχρή στέγη (%)
	Πράσινη στέγη	Ψυχρή στέγη	
Χανιά	-491	-79	116
Θεσσαλονίκη	-604	-109	118

Πίνακας 8.1: Η συνολική ροή της θερμότητας και η ποσοστιαία διαφορά της για τις δύο περιοχές για τα δύο είδη στέγης για το χρονικό διάστημα 10:00 – 18:00

Στον Πίνακα 8.2 και παρουσιάζονται τα φορτία ψύξης του κτιρίου και για τις δύο στέγες καθώς και το ποσοστό μείωσης του για το χρονικό διάστημα 10:00 – 18:00.

Περιοχή	Συνολικό Φορτίο Ψύξης (kWh)		Ποσοστό μείωσης του φορτίου με τη ψυχρή στέγη (%)
	Πράσινη στέγη	Ψυχρή στέγη	
Χανιά	50	35	30
Θεσσαλονίκη	53	35	34

Πίνακας 8.2 : Τα φορτία ψύξης του κτιρίου των δύο περιοχών για τα δύο είδη στέγης για το χρονικό διάστημα 10:00 – 18:00

Το κτίριο με την ψυχρή στέγη φαίνεται να καταναλώνει μικρότερα ποσά ενέργειας για την ψύξη του. Τα ποσοστά μείωσης του φορτίου ψύξης με την ύπαρξη της ψυχρής στέγης που υπολογίστηκαν κυμαίνονται από 30 % έως 34 %, για δύο διαφορετικά αρχεία καιρού, και με τον μέσο όρο να ισούται με 32%.

8.2. Κόστος

Ένας σημαντικός παράγοντας ο οποίος πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι το κόστος μιας ψυχρής και μια πράσινης στέγης.

Η ψυχρή στέγη αποτελεί μια πιο οικονομική λύση. Το κόστος κατασκευής της κυμαίνεται γύρω στα 10 €/m² και το υλικό που έχει επιλεγεί είναι η μεταλλική βαφή.

Το κόστος κατασκευής της πράσινης στέγης είναι προφανώς μεγαλύτερο, καθώς πρόκειται για ένα πιο πολύπλοκο σύστημα. Η στέγη που σχεδιάστηκε στην παρούσα εργασία στοιχίζει για να κατασκευαστεί γύρω στα 39 €/m² (Πίνακας 8.3). Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί, πως πέρα από το κόστος της κατασκευής, υπάρχουν και κάποιες ετήσιες δαπάνες, οι οποίες αφορούν την άρδευση και τη συντήρηση της φυτεμένης επιφάνειας. Οι τιμές διαμορφώθηκαν μετά από επικοινωνία με την Ωμέγα Τεχνική Ε.Π.Ε.

Εργασία	Κόστος (€/m ²)
Τοποθέτηση μεμβράνης αντιριζικής προστασίας	17
Τοποθέτηση αποστραγγιστικού φύλλου	6
Τοποθέτηση γεωυφάσματος	1
Τοποθέτηση υποστρώματος	10
Φύτευση	5
Σύνολο	39

Πίνακας 8.3: Το κόστος εγκατάστασης της πράσινης στέγης

9. Συμπεράσματα- Προτάσεις

Η υπερκατανάλωση ενέργειας στον κτιριακό τομέα αλλά και τα περιβαλλοντικά προβλήματα που γίνονται αισθητά στον αστικό χώρο καθιστούν απαραίτητη τη μελέτη της ροής της ενέργειας στα κτίρια. Μια από τις επιφάνειες, η οποία δρα καθοριστικά στο θερμικό ισοζύγιο μιας δομικής κατασκευής είναι η στέγη, καθώς είναι περισσότερο εκτεθειμένη στις καιρικές συνθήκες σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Με τη βοήθεια της τεχνολογίας και τη χρήση μαθηματικών μοντέλων είναι δυνατή η μελέτη του θερμικού ισοζυγίου της στέγης, αλλά και του συνόλου του κτιρίου. Το πρόγραμμα EnergyPlus επιτρέπει τη συνεχή και ολοκληρωμένη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς, έτσι ώστε να προσδιορίζεται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας η ροή της ενέργειας σε κάποια επιφάνεια ή και σε ολόκληρο το κτίριο.

Για τον επιτυχή προσδιορισμό της ροής της ενέργειας είναι απαραίτητος ο σωστός προσδιορισμός των κλιματολογικών δεδομένων (π.χ. η θερμοκρασία του αέρα, η ηλιακή ακτινοβολία). Επιπλέον, είναι σημαντικός ο ακριβής καθορισμός των στοιχείων της κατασκευής (π.χ. ο προσανατολισμός, οι συντεταγμένες των επιφανειών) αλλά και των ιδιοτήτων των υλικών (π.χ. η ηλιακή απορροφητικότητα και ο δείκτης επιφάνειας φυλλώματος).

Από αυτή τη σύγκριση των δύο ειδών στέγης φάνηκε πως στην περίπτωση της ψυχρής παρουσιάζεται περισσότερη θερμική άνεση, ή περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας σε περίπτωση ύπαρξης κλιματισμού, κατά τις καλοκαιρινές ημέρες. Φάνηκε επίσης, η διαφορά του τρόπου λειτουργίας της κάθε στέγης και η διαφορά της επίδρασης στη ροή της ενέργειας.

Η ψυχρή στέγη αντανακλά την ακτινοβολία του ήλιου, με αποτέλεσμα να περιορίζεται σημαντικά η αύξηση της θερμοκρασίας της στέγης, το οποίο είναι ωφέλιμο για τους θερινούς μήνες αλλά για τους χειμερινούς οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας του εσωτερικού του χώρου. Η λειτουργία της πράσινης στέγης, όμως, είναι διαφορετική. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από τη βλάστηση και από το χώμα, και ένα μέρος της ενέργειας μεταφέρεται στο εσωτερικού του κτιρίου, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο θετικά στο θερμικό ισοζύγιο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Έτσι, λοιπόν, η ψυχρή στέγη φαίνεται να είναι πιο αποτελεσματική σε περιοχές όπου το φορτίο ψύξης είναι πολύ μεγαλύτερο από το φορτίο θέρμανσης, σε περιοχές δηλαδή που τα καλοκαίρια είναι ιδιαίτερα ζεστά και οι χειμώνες ήπιοι.

Παράλληλα, αναδείχθηκαν συνολικά τα οφέλη που παρέχει η κάθε στέγη στο περιβάλλον αλλά και στον άνθρωπο. Όπως, φάνηκε η πράσινη στέγη παρουσιάζει περισσότερα οφέλη και αποτελεί έναν πιο ολοκληρωτικό τρόπο επίλυσης περιβαλλοντικών και όχι μόνο, προβλημάτων που υπάρχουν στο αστικό περιβάλλον (παραγωγή οξυγόνου, διαχείριση όμβριων υδάτων) καθώς πρόκειται για ένα «φυσικό οικοσύστημα».

Οι ψυχρές στέγες μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε υπάρχον ή υπό κατασκευή κτήριο. Αντίθετα, για να φυτευτεί μια στέγη απαιτείται ο στατικός έλεγχος του κτηρίου, ο οποίος μπορεί να καθορίσει και το είδος της φυτεμένης στέγης. Η πράσινη στέγη μπορεί να δημιουργηθεί μόνο στα κτίρια τα οποία αντέχουν το φορτίο της. Στο φορτίο της στέγης

συμπεριλαμβάνεται και το υπόστρωμα κορεσμένο με νερό, καθώς και το επιφανειακό φορτίο της βλάστησης.

Επιπλέον, η ψυχρή στέγη είναι σαφώς πιο οικονομική, καθώς με το κατάλληλο χρώμα μπορεί να μειωθεί σημαντικά η θερμική της απορρόφηση. Αντίθετα, στην πράσινη στέγη, πέρα από τα έξοδα κατασκευής, τα οποία είναι αυξημένα, υπάρχουν και τα έξοδα συντήρησης της. Ο χρόνος ζωής της βέβαια, μπορεί να θεωρηθεί απεριόριστος αν σχεδιαστεί και συντηρηθεί σωστά, κάτι το οποίο δεν ισχύει στις ψυχρές στέγες, οι οποίες χρειάζονται ανανέωση έπειτα από κάποια χρόνια, ώστε να είναι αποτελεσματικές.

Ως αντικείμενο μελλοντικής μελέτης θα μπορούσε να είναι η προσομοίωση της ενεργειακής ροής για όλο το χρόνο στις ψυχρές και τις πράσινες στέγες, ώστε να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της θερμικής συμπεριφοράς της στέγης και της εξοικονόμησης της ενέργειας.

Επίσης, θα μπορούσε να γίνει μια παρόμοια προσομοίωση, αλλά να εξεταστεί και η συμπεριφορά των υπόλοιπων τύπων της πράσινης στέγης. Να σχεδιαστεί δηλαδή, μια στέγη ημιεντατικού τύπου, μια εντατικού και μια εκτατικού, ώστε εξεταστεί η απόδοση του κάθε τύπου και να γίνει έπειτα η σύγκριση μεταξύ των πράσινων και της ψυχρής στέγης.

10. Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία

Akbari and Bretz, 1997, Long term performance of high- albedo roof coatings. Energy and buildings vol 25

Akbari et al., 1992, High albedo materials for reducing building cooling energy use. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL- 31721

Alamdari, F. and G.P., Hammond, 1983, Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms. Building Services Engineering Research & Technology. Vol. 4, No. 3.

ASHRAE, 1981, 1981 ASHRAE Handbook – Fundamentals, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc

ASHRAE, 1985, 1985 ASHRAE Handbook – Fundamentals, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc

ASHRAE, 1989, 1989 ASHRAE Handbook – Fundamentals, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.

ASHRAE, 1993, 1993 ASHRAE Handbook – Fundamentals, Chapter 3, Heat Transfer, I-P & S-I Editions, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc

ASHRAE, 2001, 2001 ASHRAE Handbook – Fundamentals, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc

ASHRAE, 2005, 2005 ASHRAE Handbook – Fundamentals, Chapter 16, Air Flow Around Buildings, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc

Balick, L. R., R. K. Scoggins, and L. E. Link, 1981, Inclusion of a simple vegetation layer in terrain temperature models for thermal IR signature prediction. IEEE Geoscience and Remote Sensing GE-19(3), pp.143-152.

Booten, C., N. Kruis, and C. Christensen, 2012, Identifying and Resolving Issues in EnergyPlus and DOE-2 Window Heat Transfer Calculations. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5500-55787. Golden, CO

Bowler, D.E., Buyung- Ali L., Knight, T.M., Pullin, A.S., 2010, Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence

Businger, J. A, 1966, In ‘Arctic Heat Budget and Atmospheric Circulation’, Symposium Proceedings, pp. 305-332. The Rand Corporation.

Chapman, A. J., 1984, Heat Transfer, 4th Edition, New York: Macmillan Publishing Company
Cole, R. J., and N. S. Sturrock. 1977. The Convective Heat Exchange at the External Surface of Buildings. Building and Environment, Vol. 12, p. 207

Deardorff, J.W., 1978, “Efficient Prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation”, Journal Geophysical Research, pp. 1889-1902.

- Dickinson, R.E., A. Henderson-Sellers, P.J. Kennedy, and M.F. Wilson, 1986, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR community climate model. NCAR Technical Note, TN-275+STR.
- Earthscan, 2009, Advances in building energy research, vol.3
- ECMWF, 2002, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Integrated Forecast System. Documentation, CY25R1 (Operational implementation 9 April 2002).
<http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY25r1/Physics/Physics-08-03.html>
- Ellis, P.G., and P.A. Torcellini, 2005, "Simulating Tall Buildings Using EnergyPlus", Proceedings of the Ninth International IBPSA Conference, Building Simulation 2005, Montreal, Canada, August 15-18, 2005
- EnergyPlus, 2013, Engineering Reference
- Frankenstein, S., and G. Koenig, 2004, FASST Vegetation Models. U. S. Army Engineer Research and Development Center, Cold regions Research and Engineering Laboratory, ERDC/CRREL Technical Report TR-04-25.
- Garratt, J.R., 1992, The Atmospheric Boundary Layer, Cambridge university press
- Gates, D.M. ,1980, Biophysical Ecology. New York: Springer-Verlag
- Guymon, G.L., R.L. Berg, and T.V. Hromadka, 1993, Mathematical Model of Frost Heave and Thaw Settlement in Pavements. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report 93-2.
- Henderson-Sellers, B., 1984, "A New Formula for Latent Heat of Vaporization of water as function of temperature", Quarterly Journal Royal Meteorological Society, 10 pp. 1186-1190
- Hittle, D. C., 1979, Calculating Building Heating and Cooling Loads Using the Frequency Response of Multilayered Slabs, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, IL.
- Hittle, D. C., and R. Bishop, 1983, An Improved Root-Finding Procedure for Use in Calculating Transient Heat Flow Through Multilayered Slabs. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 26, No. 11, pp. 1685-1693
- Hughes, P.A., T.J.L. McComb, A.B. Rimmer, and K.E. Turver, 1993, "A mathematical model for the prediction of temperature of man-made and natural surfaces", International Journal of Remote Sensing 14 (7), pp. 1383-1412.
- Koenig, G.G., 1994, Smart Weapons Operability Enhancement (SWOE) Joint Test and Evaluation (JT and E) Program: Final Report. Dr. James P. Welch, Joint Test Director, SWOE JT and E, SWOE Report 94-10, Annex D.
- Kolokotroni, M. and Warren, P., 2011, Cool Roofs, Technical Guidelines Handbook, Brunel University
- Kolokotsa, D., Diakaki, C., Papantoniou, S., Vlissidis, A., 2011, Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece

Kolokotsa, D., Santamouris, M., Zerefos, S.C., 2013, Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions

Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), 1994, DOE2.1E-053 source code

Lienhard, J. H., 1981, A Heat Transfer Textbook, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc

Love, J., 2009, Improved Pedestrian Thermal Comfort Through Urban Design,
http://geoplan.asu.edu/files/planning/JLove_appliedProject2.pdf,

Luckett, K., 2009, Green Roof Construction and Maintenance

Lumley, J. L. and Panofsky, H. A., 1964, 'The structure of Atmospheric Turbulence'. Interscience Monographs and Texts in Physics and Astronomy, Vol. XII. Wiley, New York
McClellan, T. M., and C. O. Pedersen. 1997. Investigation of Outside Heat Balance Models for Use in a Heat Balance Cooling Load Calculation. ASHRAE Transactions, Vol. 103, Part 2, pp. 469-484

Mastrapostoli, E., Karlessi, T., Pantazaras, A., Kolokotsa, D., Gobakis, K., & Santamouris, M. 2014, On the cooling potential of cool roofs in cold climates: Use of cool fluorocarbon coatings to enhance the optical properties and the energy performance of industrial buildings. Energy and Buildings, 69, 417-425

Minke, 2009, Φύτευση Στεγών, Παρατηρητής της Θράκης Α.Ε., Ξάνθη

Oke, T.R., 1987, Boundary Layer Climates, University Press, Cambridge

Ouyang, K., and F. Haghighat, 1991, A Procedure for Calculating Thermal Response Factors of Multi-layered Walls--State Space Method. Building and Environment, Vol. 26, No. 2, pp. 173-177.

Pacific Gas and Electric Company, 2000, High Albedo (Cool) Roofs

R. Priyadarsini, R., 2009, Urban Heat Island and its Impact on Building Energy Consumption

Rashid, R., Mohd. Hamdan Bin Ahmed, Khan Md. Sayem, 2010, Green roof and its impact on Urban Environment sustainability: The case in Bangladesh

Santamouris, M., Kolokotsa, D., Pavlou, K., Synnefa, A., Niachou, K., 2007, Recent progress on passive cooling techniques: Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households

Santamouris, M., Synnefa, A., Kolokotsa, D., Dimitriou, V., Apostolakis, K., 2008, Passive cooling of the built environment – use of innovative reflective materials to fight heat islands and decrease cooling needs

Seem, J. E., 1987, Modeling of Heat Transfer in Buildings, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, WI

Sellers, P.J., Y. Mintz, Y.C. Sud, and A. Dalcher, 1986, A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of Atmospheric Science*, 43 (6), pp. 505-532. with Time-Dependent Inputs. *ASME Journal of Heat Transfer*, Volume 102, No. 1, pp. 115-120.

Simmons, M.T., Gardiner, B., Windhager S., 2008, Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non reflective roofs in a sub-tropical climate

Spanaki, A., Tsoutsos, T., Kolokotsa, D., 2011, On the selection and design of the proper roof pond variant for passive cooling purposes

Sparrow, E. M., J. W. Ramsey, and E. A. Mass, 1979, Effect of Finite Width on Heat Transfer and Fluid Flow about an Inclined Rectangular Plate. *Journal of Heat Transfer*, Vol. 101, p. 204

Strand, R. K., 1995, Heat Source Transfer Functions and Their Application to Low Temperature Radiant Heating Systems, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, IL.

Synnefa, A., Karlessi, T., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, D.N., 2010, Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate

Synnefa, A., Saliari, M., Santamouris, M., 2012, Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens

Taylor, R. D., C.O. Pedersen, D.E. Fisher, R. J. Liesen, L.K. Lawrie, 1990, Simultaneous Simulation of Buildings and Mechanical Systems in Heat Balance Based Energy Analysis Programs, *Proceedings of the 3rd International Conference on System Simulation in Buildings*, Liege, Belgium, December 3-5, 1990.

Theodosiou, T., 2009, *Green Roofs in Buildings: Thermal and Environmental Behaviour*

U.S. Standard Atmosphere, 1976, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. Walton, G. N. 1981. Passive Solar Extension of the Building Loads Analysis and System Thermodynamics (BLAST) Program, Technical Report, United States Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL

Walton, G. N., 1983, Thermal Analysis Research Program Reference Manual. NBSSIR 83-2655. National Bureau of Standards

Yazdanian, M. and J. H. Klems, 1994, Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-Rise Buildings. *ASHRAE Transactions*, Vol. 100, Part 1, p. 1087

Zinzi, M., Agnoli, S., 2011, Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region

Zinzi, M., Fasano, G., 2010, Properties and performance of advanced reflective paints to reduce the cooling loads in buildings and mitigate the heat island effect in urban areas

Ελληνική βιβλιογραφία

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Ευώνυμος Οικολογική Βιβλιοθήκη, 2001, Οδηγός για εξοικονόμηση ενέργειας στις κατοικίες

Κολοκοτσά, Δ., 2013, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης

[Σανταμούρης, Μ., 2009, Ενέργεια και Κτήριο \(Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων και οι νέες τεχνικές για τη μείωσή της\),
http://www.buildings.gr/greek/aiforos/exikonomisi/m_santamouris.htm \(11/12/2009\)](http://www.buildings.gr/greek/aiforos/exikonomisi/m_santamouris.htm)

Διαδυκτιακές πηγές

<http://www.econ3.gr>, Η συμβολή των φυτεμένων δωματίων στη διαχείριση των υδάτινων πόρων

http://en.wikipedia.org/wiki/Hanging_Gardens_of_Babylon

<http://en.wikipedia.org/wiki/Hundertwasserhaus>

<http://flickrhivemind.net/Tags/hundertwasser,spa/Interesting>

<http://greeningthecity.wordpress.com/green-roofs/>

http://www.langley.co.uk/case-studies/-/webheath_estate_london_32/

<http://white-roofs.etntalk.com/cool-roofs/White-roofs-can-save-a-lot-of-energy.html>

Λίστα προγραμμάτων

EnergyPlus version 8-0-0 ,Copyright 2000- 2013 by Gard Analytics, Inc

SketchUp version 8.0.16846, 2006, Google

11. Παράρτημα

Χανιά

Περίπτωση 1

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Soil Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Vegetation Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Soil Root Moisture Ratio [](Hourly)
07/08 01:00:00	25,38166667	28,32061438	28,34682819	23,69269805	0,100000003
07/08 02:00:00	24,09666667	27,07451544	27,08722039	22,5528046	1,00E-01
07/08 03:00:00	23,7475	26,57897529	26,58373198	22,27656805	1,00E-01
07/08 04:00:00	23,49833333	26,32658734	26,3308734	22,14175783	1,00E-01
07/08 05:00:00	23,34916667	26,04794798	26,05301986	21,94947385	1,00E-01
07/08 06:00:00	23,3	26,73377399	26,67402773	23,91785102	1,00E-01
07/08 07:00:00	23,85916667	34,33498133	34,18006048	37,0121207	1,00E-01
07/08 08:00:00	25,01	42,62095304	42,51936964	46,97966493	1,00E-01
07/08 09:00:00	26,15916667	45,69388667	45,66537143	48,56776855	1,00E-01
07/08 10:00:00	27,1575	47,71864723	47,67576995	50,52143975	1,00E-01
07/08 11:00:00	28,0575	51,16980469	51,10031251	54,86010046	1,00E-01
07/08 12:00:00	29,00833333	55,44934356	55,38812957	59,8595418	1,00E-01
07/08 13:00:00	29,85583333	57,99180238	57,96389414	61,92626007	1,00E-01
07/08 14:00:00	30,45416667	58,99605723	58,98597834	62,22257349	1,00E-01
07/08 15:00:00	30,90333333	59,53674513	59,5284328	62,35107342	1,00E-01
07/08 16:00:00	31,15083333	60,04942014	60,03893413	62,57737244	1,00E-01
07/08 17:00:00	31,2	60,46789878	60,47999014	62,5737992	1,00E-01
07/08 18:00:00	30,94583333	57,69292706	57,76899968	57,56658663	1,00E-01
07/08 19:00:00	30,34416667	50,9366191	51,09933275	47,34280813	1,00E-01
07/08 20:00:00	29,5425	38,96929259	39,14262575	30,54341935	1,00E-01
07/08 21:00:00	28,74416667	33,48410687	33,52581672	26,66856493	1,00E-01
07/08 22:00:00	28,095	31,75049569	31,77163001	26,06730887	1,00E-01
07/08 23:00:00	27,44416667	30,6637055	30,68015113	25,4941077	1,00E-01
07/08 24:00:00	26,795	29,80341287	29,81575511	24,91254355	1,00E-01

Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Vegetation	Environment:Green Roof Vegetation	Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Vegetation
Near Surface Moisture Ratio	Sensible Heat Transfer Rate per Area	Sensible Heat Transfer Rate per Area	Moisture Transfer Rate	Moisture Transfer Rate	Latent Heat Transfer Rate per Area
[/](Hourly)	[W/m2](Hourly)	[W/m2](Hourly)	[m/s](Hourly)	[m/s](Hourly)	[W/m2](Hourly)
9,97E-02	-29,22203485	3,213798994	1,81E-15	8,91E-09	-4,37E-06
9,90E-02	-29,35032031	2,944909197	1,75E-15	8,26E-09	-4,24E-06
9,85E-02	-28,20111917	2,802344182	1,59E-15	7,61E-09	-3,85E-06
9,79E-02	-28,08469909	2,58886974	1,46E-15	7,09E-09	-3,53E-06
9,74E-02	-27,19078915	2,663891078	1,43E-15	6,91E-09	-3,46E-06
9,69E-02	-30,02337556	-1,073029049	9,64E-14	7,34E-09	-2,33E-04
9,63E-02	-61,2078568	-24,16444033	1,14E-12	1,15E-08	-2,72E-03
9,52E-02	-89,45927415	-40,29418465	2,69E-12	1,74E-08	-6,40E-03
9,39E-02	-97,52637516	-41,01779632	2,98E-12	2,00E-08	-7,08E-03
9,24E-02	-101,036258	-42,74712343	3,46E-12	2,19E-08	-8,20E-03
9,07E-02	-109,2362253	-49,0396266	4,76E-12	2,51E-08	-1,12E-02
8,87E-02	-119,9738027	-56,43051093	6,71E-12	2,97E-08	-1,58E-02
8,65E-02	-125,7420097	-58,61830488	7,68E-12	3,21E-08	-1,81E-02
8,42E-02	-127,3585131	-58,03096069	7,80E-12	3,21E-08	-1,83E-02
8,19E-02	-127,7843147	-57,42485447	7,85E-12	3,14E-08	-1,84E-02
7,96E-02	-128,7213604	-57,37139176	7,95E-12	3,05E-08	-1,87E-02
7,75E-02	-130,166493	-57,25575501	7,94E-12	2,95E-08	-1,87E-02
7,55E-02	-123,3255805	-48,51139857	5,58E-12	2,45E-08	-1,32E-02
7,40E-02	-104,6273367	-30,85113804	2,58E-12	1,72E-08	-6,13E-03
7,30E-02	-64,48044402	-1,517699566	2,43E-13	9,62E-09	-5,82E-04
7,24E-02	-41,14294497	4,010798506	2,93E-15	7,10E-09	-7,07E-06
7,20E-02	-34,21601868	3,874422359	2,46E-15	6,11E-09	-5,94E-06
7,15E-02	-31,23126687	3,711158421	2,17E-15	5,49E-09	-5,26E-06
7,12E-02	-29,71462996	3,576260561	1,94E-15	4,98E-09	-4,69E-06

	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	
Environment:Green Roof Soil Latent Heat Transfer Rate per Area [W/m2](Hourly)	Cumulative Precipitation Depth [m](Hourly)	Cumulative Irrigation Depth [m](Hourly)	Cumulative Runoff Depth [m](Hourly)	Cumulative Evapotranspiration Depth [m](Hourly)	Current Precipitation Depth [m](Hourly)	
-21,48950183		0	0	0	9,92E-04	0
-19,93423536		0	0	0	2,85E-03	0
-18,37288931		0	0	0	4,56E-03	0
-17,12169749		0	0	0	6,14E-03	0
-16,69727607		0	0	0	7,65E-03	0
-17,70967711		0	0	0	9,16E-03	0
-27,56672367		0	0	0	1,11E-02	0
-41,48032721		0	0	0	1,42E-02	0
-47,61991435		0	0	0	1,83E-02	0
-51,89145221		0	0	0	2,28E-02	0
-59,45436227		0	0	0	2,79E-02	0
-70,03356173		0	0	0	3,38E-02	0
-75,65234776		0	0	0	4,05E-02	0
-75,72940463		0	0	0	4,75E-02	0
-74,0453719		0	0	0	5,43E-02	0
-71,874634		0	0	0	6,10E-02	0
-69,41563546		0	0	0	6,76E-02	0
-57,82798666		0	0	0	7,35E-02	0
-40,71754836		0	0	0	7,80E-02	0
-22,98963655		0	0	0	8,09E-02	0
-17,04925537		0	0	0	8,26E-02	0
-14,69944018		0	0	0	8,40E-02	0
-13,20768102		0	0	0	8,53E-02	0
-12,00165022		0	0	0	8,64E-02	0

	Environment:G
Environment:Gr	reen Roof
een Roof	Current
Current	Evapotranspira
Irrigation Depth	tion Depth
[m](Hourly)	[m](Hourly)
0	3,21E-05
0	2,98E-05
0	2,74E-05
0	2,55E-05
0	2,49E-05
0	2,63E-05
0	4,10E-05
0	6,24E-05
0	7,20E-05
0	7,85E-05
0	9,01E-05
0	1,07E-04
0	1,15E-04
0	1,16E-04
0	1,13E-04
0	1,10E-04
0	1,06E-04
0	8,87E-05
0	6,24E-05
0	3,49E-05
0	2,56E-05
0	2,21E-05
0	1,98E-05
0	1,80E-05

Περίπτωση 2

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Soil Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Vegetation Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Soil Root Moisture Ratio [](Hourly)
07/08 01:00:00	25,38166667	28,20674281	28,2342783	23,66169489	0,100000001
07/08 02:00:00	24,09666667	26,93602872	26,94811787	22,51460322	1,00E-01
07/08 03:00:00	23,7475	26,48823628	26,49210559	22,25156829	1,00E-01
07/08 04:00:00	23,49833333	26,27817424	26,28192742	22,1285284	1,00E-01
07/08 05:00:00	23,34916667	26,02606786	26,03076581	21,9436098	1,00E-01
07/08 06:00:00	23,3	26,68298689	26,62655011	23,90482667	1,00E-01
07/08 07:00:00	23,85916667	33,82050638	33,67553605	36,87207915	1,00E-01
07/08 08:00:00	25,01	41,5427232	41,4490073	46,67783435	1,00E-01
07/08 09:00:00	26,15916667	44,31379813	44,28835779	48,17338889	1,00E-01
07/08 10:00:00	27,1575	46,17424724	46,13416188	50,07724559	1,00E-01
07/08 11:00:00	28,0575	49,44750843	49,3810726	54,36170404	1,00E-01
07/08 12:00:00	29,00833333	53,53888669	53,48053839	59,30115397	1,00E-01
07/08 13:00:00	29,85583333	55,96229514	55,93556946	61,32631406	1,00E-01
07/08 14:00:00	30,45416667	56,9248967	56,91521817	61,60582538	1,00E-01
07/08 15:00:00	30,90333333	57,45462988	57,44630715	61,72852953	1,00E-01
07/08 16:00:00	31,15083333	57,9741381	57,96350269	61,95482245	1,00E-01
07/08 17:00:00	31,2	58,39962742	58,41130507	61,95085124	1,00E-01
07/08 18:00:00	30,94583333	55,70810058	55,78176987	56,96586404	1,00E-01
07/08 19:00:00	30,34416667	49,17712001	49,33408855	46,81084979	1,00E-01
07/08 20:00:00	29,5425	37,76661873	37,92861302	30,18384118	1,00E-01
07/08 21:00:00	28,74416667	32,82132437	32,85670061	26,47667491	1,00E-01
07/08 22:00:00	28,095	31,3641956	31,38200634	25,95713471	1,00E-01
07/08 23:00:00	27,44416667	30,42248705	30,43723405	25,4260114	1,00E-01
07/08 24:00:00	26,795	29,6445285	29,65573403	24,86800931	1,00E-01

Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Vegetation	Environment:Green Roof Vegetation	Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Vegetation
Near Surface Moisture Ratio	Sensible Heat Transfer Rate per Area	Sensible Heat Transfer Rate per Area	Moisture Transfer Rate	Moisture Transfer Rate	Latent Heat Transfer Rate per Area
[.](Hourly)	[W/m2](Hourly)	[W/m2](Hourly)	[m/s](Hourly)	[m/s](Hourly)	[W/m2](Hourly)
9,96E-02	-34,93719563	3,268043818	1,80E-15	1,16E-08	-4,35E-06
9,87E-02	-34,87174608	3,011364801	1,74E-15	1,07E-08	-4,21E-06
9,80E-02	-33,86387765	2,846145495	1,58E-15	9,87E-09	-3,83E-06
9,73E-02	-34,08776752	2,612451949	1,45E-15	9,18E-09	-3,52E-06
9,67E-02	-33,22791109	2,674898952	1,43E-15	8,94E-09	-3,46E-06
9,60E-02	-36,48099041	-1,051164671	9,60E-14	9,44E-09	-2,32E-04
9,52E-02	-71,20918605	-23,9339887	1,12E-12	1,44E-08	-2,69E-03
9,39E-02	-102,0103824	-39,79244963	2,64E-12	2,12E-08	-6,27E-03
9,23E-02	-110,1167128	-40,35698966	2,91E-12	2,40E-08	-6,90E-03
9,05E-02	-113,5077853	-42,00126259	3,36E-12	2,59E-08	-7,97E-03
8,85E-02	-122,3956262	-48,2028785	4,61E-12	2,93E-08	-1,09E-02
8,62E-02	-134,199481	-55,49301082	6,48E-12	3,40E-08	-1,53E-02
8,37E-02	-140,4378783	-57,60950362	7,40E-12	3,62E-08	-1,74E-02
8,11E-02	-142,1460224	-56,99252892	7,50E-12	3,59E-08	-1,76E-02
7,85E-02	-142,5924805	-56,37593876	7,55E-12	3,48E-08	-1,78E-02
7,61E-02	-143,711264	-56,32218846	7,65E-12	3,35E-08	-1,80E-02
7,37E-02	-145,4237187	-56,2054821	7,64E-12	3,21E-08	-1,80E-02
7,15E-02	-137,7777147	-47,4956249	5,37E-12	2,66E-08	-1,27E-02
6,99E-02	-116,7114091	-29,94706642	2,49E-12	1,88E-08	-5,92E-03
6,88E-02	-70,98153142	-0,899906365	2,34E-13	1,08E-08	-5,61E-04
6,82E-02	-45,44226143	4,341467303	2,85E-15	8,11E-09	-6,88E-06
6,76E-02	-38,86386608	4,064658475	2,42E-15	7,02E-09	-5,84E-06
6,72E-02	-36,32843058	3,829161008	2,15E-15	6,31E-09	-5,20E-06
6,67E-02	-35,14062356	3,653828258	1,92E-15	5,73E-09	-4,65E-06

	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	
Environment:Green Roof Soil Latent Heat Transfer Rate per Area [W/m2](Hourly)	Cumulative Precipitation Depth [m](Hourly)	Cumulative Irrigation Depth [m](Hourly)	Cumulative Runoff Depth [m](Hourly)	Cumulative Evapotranspiration Depth [m](Hourly)	Current Precipitation Depth [m](Hourly)	
-28,07624072		0	0	0	1,30E-03	0
-25,91984793		0	0	0	3,71E-03	0
-23,83841094		0	0	0	5,94E-03	0
-22,17748371		0	0	0	7,99E-03	0
-21,58818166		0	0	0	9,94E-03	0
-22,80078824		0	0	0	1,19E-02	0
-34,64621531		0	0	0	1,44E-02	0
-50,66512592		0	0	0	1,82E-02	0
-57,13124783		0	0	0	2,32E-02	0
-61,4966321		0	0	0	2,86E-02	0
-69,39974881		0	0	0	3,45E-02	0
-80,29741144		0	0	0	4,13E-02	0
-85,44224564		0	0	0	4,89E-02	0
-84,60631628		0	0	0	5,67E-02	0
-81,99003686		0	0	0	6,44E-02	0
-78,91089426		0	0	0	7,18E-02	0
-75,58302255		0	0	0	7,89E-02	0
-62,85135575		0	0	0	8,53E-02	0
-44,55045236		0	0	0	9,02E-02	0
-25,74519742		0	0	0	9,34E-02	0
-19,49149479		0	0	0	9,54E-02	0
-16,88029897		0	0	0	9,70E-02	0
-15,18411117		0	0	0	9,84E-02	0
-13,79405451		0	0	0	9,97E-02	0

	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof
Current	Current	Current
Irrigation Depth	Evapotranspiration Depth	
[m](Hourly)	[m](Hourly)	
0	4,20E-05	
0	3,87E-05	
0	3,56E-05	
0	3,31E-05	
0	3,22E-05	
0	3,39E-05	
0	5,16E-05	
0	7,61E-05	
0	8,63E-05	
0	9,30E-05	
0	1,05E-04	
0	1,22E-04	
0	1,30E-04	
0	1,29E-04	
0	1,25E-04	
0	1,21E-04	
0	1,16E-04	
0	9,63E-05	
0	6,82E-05	
0	3,91E-05	
0	2,93E-05	
0	2,53E-05	
0	2,27E-05	
0	2,07E-05	

Περίπτωση 3

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Soil Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Vegetation Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Soil Root Moisture Ratio [](Hourly)
07/08 01:00:00	25,38166667	28,63239792	28,65678513	24,54335588	1,00E-01
07/08 02:00:00	24,09666667	27,44714402	27,45963345	23,35809629	1,00E-01
07/08 03:00:00	23,7475	26,94603332	26,95114595	23,04634986	1,00E-01
07/08 04:00:00	23,49833333	26,68098077	26,68529536	22,86554203	1,00E-01
07/08 05:00:00	23,34916667	26,41130319	26,4160549	22,685143	1,00E-01
07/08 06:00:00	23,3	26,80327839	26,76406325	23,54543506	9,99E-02
07/08 07:00:00	23,85916667	31,883691	31,77939117	29,80842705	9,92E-02
07/08 08:00:00	25,01	37,50541054	37,43486897	34,71626592	9,73E-02
07/08 09:00:00	26,15916667	39,78695901	39,76411215	35,79391571	9,48E-02
07/08 10:00:00	27,1575	41,3217525	41,2907715	36,98780245	9,21E-02
07/08 11:00:00	28,0575	43,7787838	43,7292476	39,26464553	8,90E-02
07/08 12:00:00	29,00833333	46,85287201	46,80783508	41,88620079	8,53E-02
07/08 13:00:00	29,85583333	48,81592563	48,7929174	43,23031672	8,12E-02
07/08 14:00:00	30,45416667	49,71101459	49,7013463	43,75949181	7,70E-02
07/08 15:00:00	30,90333333	50,22694646	50,21897567	44,17192551	7,28E-02
07/08 16:00:00	31,15083333	50,70537472	50,69625795	44,62859703	6,88E-02
07/08 17:00:00	31,2	51,09800181	51,10429309	44,9202876	6,49E-02
07/08 18:00:00	30,94583333	49,3283042	49,37829238	42,79530939	6,15E-02
07/08 19:00:00	30,34416667	44,8281442	44,9370354	37,90777915	5,91E-02
07/08 20:00:00	29,5425	36,77988266	36,89825166	29,64037782	5,81E-02
07/08 21:00:00	28,74416667	32,89832333	32,92960907	27,52439237	5,81E-02
07/08 22:00:00	28,095	31,56609559	31,58278315	26,94861492	5,81E-02
07/08 23:00:00	27,44416667	30,68147071	30,69529183	26,37558976	5,81E-02
07/08 24:00:00	26,795	29,94559212	29,95629303	25,78945568	5,81E-02

Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Vegetation	Environment:Green Roof Vegetation	Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Vegetation
Near Surface Moisture Ratio	Sensible Heat Transfer Rate per Area	Sensible Heat Transfer Rate per Area	Moisture Transfer Rate	Moisture Transfer Rate	Latent Heat Transfer Rate per Area
[/](Hourly)	[W/m2](Hourly)	[W/m2](Hourly)	[m/s](Hourly)	[m/s](Hourly)	[W/m2](Hourly)
9,97E-02	-26,5607761	13,25510735	8,13E-11	7,69E-09	-0,196760014
9,92E-02	-26,88512371	12,18105681	7,78E-11	7,15E-09	-0,188393632
9,87E-02	-25,99864992	11,56732621	7,09E-11	6,64E-09	-0,171824061
9,82E-02	-25,78957096	10,72113346	6,52E-11	6,22E-09	-0,157868325
9,78E-02	-25,21655745	10,98163879	6,43E-11	6,09E-09	-0,155677844
9,73E-02	-25,55713701	0,271939835	2,63E-09	6,35E-09	-6,357045265
9,68E-02	-36,95181094	-64,50470853	1,87E-08	8,50E-09	-44,93863657
9,61E-02	-49,99266901	-104,9562399	3,33E-08	1,12E-08	-79,83270393
9,52E-02	-54,57874299	-102,5060183	3,57E-08	1,26E-08	-85,63023214
9,43E-02	-56,22427396	-103,9904027	3,93E-08	1,38E-08	-94,16728978
9,32E-02	-59,97227861	-118,5456965	4,69E-08	1,53E-08	-112,1495045
9,21E-02	-65,33086089	-135,8654351	5,59E-08	1,74E-08	-133,2541507
9,08E-02	-68,60182154	-140,2326729	5,88E-08	1,87E-08	-140,0157742
8,94E-02	-69,70966936	-138,849172	5,78E-08	1,91E-08	-137,6748978
8,80E-02	-69,95642925	-138,1631686	5,65E-08	1,92E-08	-134,4393288
8,66E-02	-70,46341751	-140,2941857	5,48E-08	1,91E-08	-130,4759181
8,53E-02	-71,38084582	-142,7628589	5,26E-08	1,89E-08	-125,1054262
8,40E-02	-68,68362818	-122,283291	4,11E-08	1,69E-08	-98,03083211
8,29E-02	-60,6609741	-75,57264539	2,42E-08	1,33E-08	-57,77570023
8,21E-02	-43,2657715	6,102214706	3,57E-09	8,98E-09	-8,582735902
8,15E-02	-31,6076347	18,67396232	6,81E-11	7,33E-09	-0,164216555
8,10E-02	-28,112723	17,09517103	5,84E-11	6,49E-09	-0,140988208
8,05E-02	-26,79298515	15,9385914	5,23E-11	5,92E-09	-0,1263917
8,01E-02	-26,23478056	15,11053848	4,72E-11	5,42E-09	-0,113983459

	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	
Environment:Green Roof Soil Latent Heat Transfer Rate per Area [W/m2](Hourly)	Cumulative Precipitation Depth [m](Hourly)	Cumulative Irrigation Depth [m](Hourly)	Cumulative Runoff Depth [m](Hourly)	Cumulative Evapotranspiration Depth [m](Hourly)	Current Precipitation Depth [m](Hourly)	
-18,52723425		0	0	0	8,65E-04	0
-17,24803524		0	0	0	2,48E-03	0
-16,02781061		0	0	0	3,99E-03	0
-15,01228643		0	0	0	5,39E-03	0
-14,70354302		0	0	0	6,73E-03	0
-15,33754314		0	0	0	8,16E-03	0
-20,42313614		0	0	0	1,19E-02	0
-26,90714918		0	0	0	1,97E-02	0
-30,17879693		0	0	0	2,99E-02	0
-32,81358698		0	0	0	4,08E-02	0
-36,51915451		0	0	0	5,32E-02	0
-41,32182941		0	0	0	6,78E-02	0
-44,37062517		0	0	0	8,42E-02	0
-45,36015291		0	0	0	0,100936056	0
-45,57532659		0	0	0	0,117429851	0
-45,29312884		0	0	0	0,133593826	0
-44,74024903		0	0	0	0,149400648	0
-40,00028373		0	0	0	0,163594918	0
-31,67353731		0	0	0	0,1740742	0
-21,49704383		0	0	0	0,179364721	0
-17,60821193		0	0	0	0,181254887	0
-15,61380553		0	0	0	0,182756897	0
-14,23466016		0	0	0	0,18410633	0
-13,05434672		0	0	0	0,185342744	0

Environment:Green Roof
 Environment:Green Roof
 Current
 Current
 Irrigation Depth
 Irrigation Depth
 [m](Hourly) [m](Hourly)

0 2,80E-05
 0 2,60E-05
 0 2,42E-05
 0 2,26E-05
 0 2,21E-05
 0 3,17E-05
 0 9,66E-05
 0 1,60E-04
 0 1,74E-04
 0 1,91E-04
 0 2,24E-04
 0 2,63E-04
 0 2,79E-04
 0 2,77E-04
 0 2,73E-04
 0 2,66E-04
 0 2,58E-04
 0 2,10E-04
 0 1,36E-04
 0 4,61E-05
 0 2,67E-05
 0 2,36E-05
 0 2,15E-05
 0 1,97E-05

Περίπτωση 4

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Soil Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Vegetation Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Soil Root Moisture Ratio [](Hourly)
07/08 01:00:00	25,38166667	28,61275387	28,63713352	24,53896927	1,00E-01
07/08 02:00:00	24,09666667	27,42834549	27,44081282	23,35392132	1,00E-01
07/08 03:00:00	23,7475	26,92856734	26,93365866	23,04248268	1,00E-01
07/08 04:00:00	23,49833333	26,66464764	26,66894545	22,86193214	1,00E-01
07/08 05:00:00	23,34916667	26,39589925	26,40063646	22,68174414	1,00E-01
07/08 06:00:00	23,3	26,78858897	26,74937039	23,54231696	9,99E-02
07/08 07:00:00	23,85916667	31,86854139	31,76425214	29,80561245	9,92E-02
07/08 08:00:00	25,01	37,48994225	37,41940112	34,71350604	9,73E-02
07/08 09:00:00	26,15916667	39,42801404	39,4141142	35,76174664	9,48E-02
07/08 10:00:00	27,1575	40,66828972	40,64037251	36,90950273	9,22E-02
07/08 11:00:00	28,0575	42,97792932	42,93048257	39,16374584	8,91E-02
07/08 12:00:00	29,00833333	45,83980564	45,79937067	41,75777834	8,55E-02
07/08 13:00:00	29,85583333	47,61026951	47,58926967	43,0660745	8,14E-02
07/08 14:00:00	30,45416667	48,29905128	48,29332469	43,55578106	7,73E-02
07/08 15:00:00	30,90333333	48,68797188	48,68261587	43,9345739	7,33E-02
07/08 16:00:00	31,15083333	48,99315956	48,9854917	44,35206575	6,94E-02
07/08 17:00:00	31,2	49,28731019	49,29633333	44,61259125	6,56E-02
07/08 18:00:00	30,94583333	47,46663272	47,51477712	42,4543949	6,23E-02
07/08 19:00:00	30,34416667	43,15174038	43,25646825	37,57388765	6,00E-02
07/08 20:00:00	29,5425	35,42746595	35,53958591	29,33684742	5,90E-02
07/08 21:00:00	28,74416667	31,89922927	31,92528197	27,29505999	5,90E-02
07/08 22:00:00	28,095	30,82509392	30,83832361	26,77996266	5,90E-02
07/08 23:00:00	27,44416667	30,10335892	30,11510949	26,24477728	5,91E-02
07/08 24:00:00	26,795	29,47863402	29,48760992	25,68418264	5,91E-02

Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Vegetation	Environment:Green Roof Vegetation	Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Vegetation
Near Surface Moisture Ratio	Sensible Heat Transfer Rate per Area	Sensible Heat Transfer Rate per Area	Moisture Transfer Rate	Moisture Transfer Rate	Latent Heat Transfer Rate per Area
[/](Hourly)	[W/m2](Hourly)	[W/m2](Hourly)	[m/s](Hourly)	[m/s](Hourly)	[W/m2](Hourly)
9,97E-02	-26,46679664	13,28787576	8,13E-11	7,68E-09	-0,196626412
9,92E-02	-26,79546245	12,2122351	7,78E-11	7,15E-09	-0,188274189
9,87E-02	-25,91388691	11,59617693	7,09E-11	6,64E-09	-0,171714823
9,82E-02	-25,70996423	10,74805356	6,51E-11	6,21E-09	-0,157767047
9,78E-02	-25,14062337	11,00697233	6,42E-11	6,09E-09	-0,155583231
9,73E-02	-25,48492673	0,294564394	2,63E-09	6,35E-09	-6,354576236
9,68E-02	-36,8885857	-64,48654007	1,87E-08	8,49E-09	-44,92735677
9,61E-02	-49,93610036	-104,93929	3,33E-08	1,12E-08	-79,81703474
0,119841582	-53,29993247	-102,4877036	3,53E-08	1,97E-08	-84,66024163
0,12310071	-53,89454847	-103,7346201	3,87E-08	2,27E-08	-92,72925151
0,121390042	-57,18735085	-118,1776722	4,62E-08	2,51E-08	-110,4240015
0,122622499	-61,92709184	-135,3927345	5,49E-08	2,95E-08	-131,0092848
0,121459614	-64,6213273	-139,5407817	5,77E-08	3,18E-08	-137,4927255
0,122776268	-65,08984612	-137,9038625	5,66E-08	3,40E-08	-134,9097018
0,121458704	-64,93795828	-136,9547406	5,53E-08	3,43E-08	-131,6955253
0,122615085	-64,89875745	-138,8057752	5,36E-08	3,56E-08	-127,6450244
0,122051813	-65,54292484	-141,0085732	5,14E-08	3,59E-08	-122,3921312
0,121818589	-62,6049784	-120,1845903	4,02E-08	3,29E-08	-95,77205003
0,119712524	-54,94636106	-73,34421515	2,36E-08	2,60E-08	-56,40597744
0,118175439	-37,96329763	8,339556283	3,46E-09	1,78E-08	-8,330447
0,117048771	-27,07529748	20,39563588	6,62E-11	1,48E-08	-0,159752022
0,116071551	-24,56547492	18,35735317	5,71E-11	1,31E-08	-0,137904766
0,115196344	-23,97282036	16,91641283	5,14E-11	1,19E-08	-0,124136793
0,114397691	-23,9399424	15,89700397	4,65E-11	1,08E-08	-0,112260716

	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	
Environment:Green Roof Soil Latent Heat Transfer Rate per Area [W/m2](Hourly)	Cumulative Precipitation Depth [m](Hourly)	Cumulative Irrigation Depth [m](Hourly)	Cumulative Runoff Depth [m](Hourly)	Cumulative Evapotranspiration Depth [m](Hourly)	Current Precipitation Depth [m](Hourly)	
-18,51979209		0	0	0	8,65E-04	0
-17,24143248		0	0	0	2,48E-03	0
-16,02134593		0	0	0	3,99E-03	0
-15,00541863		0	0	0	5,39E-03	0
-14,6975708		0	0	0	6,72E-03	0
-15,33261726		0	0	0	8,16E-03	0
-20,41393883		0	0	0	1,19E-02	0
-26,89281343		0	0	0	1,97E-02	0
-47,02074267		0	17,6	17,52549333	3,06E-02	0
-54,28050931		0	21	20,9111	4,31E-02	0
-59,75643249		0	21	20,9111	5,73E-02	0
-70,18553648		0	23,25	23,151575	7,41E-02	0
-75,44659628		0	24	23,8984	9,31E-02	0
-80,62279626		0	26,6	26,48739333	0,112558061	0
-81,46516414		0	27,4	27,28400667	0,132030727	0
-84,55424787		0	30	29,873	0,151384487	0
-85,08248226		0	31,4	31,26707333	0,170504156	0
-78,07102499		0	33	32,8603	0,188122412	0
-61,90916129		0	33	32,8603	0,201555149	0
-42,70437346		0	33	32,8603	0,209078435	0
-35,579873		0	33	32,8603	0,212698547	0
-31,5153267		0	33	32,8603	0,21571734	0
-28,61870955		0	33	32,8603	0,21842215	0
-26,13274824		0	33	32,8603	0,220890881	0

	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof
	Current	Current
	Evapotranspiration Depth	Evapotranspiration Depth
Irrigation Depth [m](Hourly)	Irrigation Depth [m](Hourly)	Irrigation Depth [m](Hourly)
0	2,80E-05	
0	2,60E-05	
0	2,42E-05	
0	2,26E-05	
0	2,21E-05	
0	3,17E-05	
0	9,66E-05	
0	1,60E-04	
0,35	1,97E-04	
0	2,21E-04	
0	2,56E-04	
5,00E-02	3,03E-04	
0	3,22E-04	
5,00E-02	3,26E-04	
5,00E-02	3,23E-04	
0	3,21E-04	
5,00E-02	3,15E-04	
0	2,64E-04	
0	1,80E-04	
0	7,77E-05	
0	5,36E-05	
0	4,74E-05	
0	4,30E-05	
0	3,93E-05	

Τελικό μοντέλο

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Soil Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Vegetation Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Soil Root Moisture Ratio [](Hourly)
07/08 01:00:00	25,38166667	28,36589229	28,39054265	24,4839779	1,00E-01
07/08 02:00:00	24,09666667	27,17267086	27,18514239	23,29726046	1,00E-01
07/08 03:00:00	23,7475	26,67472384	26,67976799	22,98638892	1,00E-01
07/08 04:00:00	23,49833333	26,41297955	26,41725057	22,80641159	1,00E-01
07/08 05:00:00	23,34916667	26,14578827	26,15049794	22,62665345	1,00E-01
07/08 06:00:00	23,3	26,53823007	26,49915852	23,48929224	9,99E-02
07/08 07:00:00	23,85916667	31,59725344	31,49336831	29,75530975	9,92E-02
07/08 08:00:00	25,01	37,20026461	37,12993703	34,66191725	9,73E-02
07/08 09:00:00	26,15916667	39,14124453	39,12699671	35,70903541	9,48E-02
07/08 10:00:00	27,1575	40,38429271	40,35659625	36,85723247	9,22E-02
07/08 11:00:00	28,0575	42,69005296	42,64260753	39,11102603	8,92E-02
07/08 12:00:00	29,00833333	45,55608825	45,51560957	41,70551157	8,55E-02
07/08 13:00:00	29,85583333	47,32559282	47,3045877	43,01293102	8,15E-02
07/08 14:00:00	30,45416667	48,01905372	48,0133303	43,5017395	7,74E-02
07/08 15:00:00	30,90333333	48,40834772	48,40298945	43,87925127	7,34E-02
07/08 16:00:00	31,15083333	48,70810279	48,70046454	44,29508823	6,95E-02
07/08 17:00:00	31,2	49,01549211	49,02436385	44,55607165	6,57E-02
07/08 18:00:00	30,94583333	47,18061538	47,22900083	42,39410658	6,24E-02
07/08 19:00:00	30,34416667	42,85528208	42,96014816	37,50975756	6,01E-02
07/08 20:00:00	29,5425	35,13148744	35,24338736	29,26968335	5,91E-02
07/08 21:00:00	28,74416667	31,62432269	31,64999827	27,23246473	5,91E-02
07/08 22:00:00	28,095	30,56850835	30,58150551	26,7219696	5,91E-02
07/08 23:00:00	27,44416667	29,85611954	29,8677807	26,1891603	5,92E-02
07/08 24:00:00	26,795	29,23559031	29,24450892	25,62970345	5,92E-02

Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Vegetation	Environment:Green Roof Vegetation	Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Vegetation
Near Surface Moisture Ratio	Sensible Heat Transfer Rate per Area	Sensible Heat Transfer Rate per Area	Moisture Transfer Rate	Moisture Transfer Rate	Latent Heat Transfer Rate per Area
[.](Hourly)	[W/m2](Hourly)	[W/m2](Hourly)	[m/s](Hourly)	[m/s](Hourly)	[W/m2](Hourly)
9,97E-02	-25,27361939	13,69845951	8,06E-11	7,65E-09	-0,194953811
9,92E-02	-25,56211458	12,63514143	7,71E-11	7,11E-09	-0,18665436
9,87E-02	-24,66726564	12,01443269	7,02E-11	6,60E-09	-0,170131421
9,82E-02	-24,46852977	11,16186751	6,45E-11	6,17E-09	-0,156210519
9,78E-02	-23,89219355	11,41737515	6,36E-11	6,05E-09	-0,154050874
9,73E-02	-24,23941115	0,67893973	2,61E-09	6,32E-09	-6,312008554
9,68E-02	-35,74929088	-64,16217093	1,86E-08	8,42E-09	-44,72532505
9,61E-02	-48,87278398	-104,6227983	3,32E-08	1,11E-08	-79,52379251
0,119737361	-52,27781148	-102,156198	3,52E-08	1,94E-08	-84,38400939
0,123154419	-52,89033041	-103,4059608	3,86E-08	2,25E-08	-92,45015008
0,121458698	-56,19256506	-117,8497543	4,61E-08	2,49E-08	-110,1196422
0,122570311	-60,9774043	-135,0679653	5,48E-08	2,92E-08	-130,6953454
0,121568894	-63,68529849	-139,2076769	5,76E-08	3,15E-08	-137,1779456
0,12269964	-64,17457504	-137,5557389	5,65E-08	3,36E-08	-134,6289197
0,121332687	-64,0253092	-136,59149	5,52E-08	3,39E-08	-131,4384539
0,122799079	-63,96921057	-138,4289741	5,35E-08	3,54E-08	-127,3925134
0,121906264	-64,66200046	-140,6238342	5,13E-08	3,54E-08	-122,1908741
0,122049378	-61,66424653	-119,7678669	4,01E-08	3,27E-08	-95,58801136
0,119956159	-53,92109228	-72,88850347	2,35E-08	2,58E-08	-56,2721144
0,11842597	-36,75900394	8,83948154	3,45E-09	1,78E-08	-8,300505622
0,117298228	-25,76641978	20,86449222	6,58E-11	1,49E-08	-0,158921425
0,116317595	-23,28194999	18,79060624	5,68E-11	1,31E-08	-0,137133302
0,115439799	-22,71983535	17,3315456	5,11E-11	1,19E-08	-0,123404066
0,114639619	-22,70594603	16,30349001	4,62E-11	1,09E-08	-0,11154934

Environment:Green Roof Soil Latent Heat Transfer Rate per Area [W/m2](Hourly)	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof
	Cumulative	Cumulative	Cumulative	Cumulative	Current
	Precipitation	Irrigation	Runoff	Evapotranspiration	Precipitation
	Depth [m](Hourly)	Depth [m](Hourly)	Depth [m](Hourly)	Depth [m](Hourly)	Depth [m](Hourly)
-18,43423958	0	0	0	8,61E-04	0
-17,15940299	0	0	0	2,47E-03	0
-15,93429655	0	0	0	3,97E-03	0
-14,90548347	0	0	0	5,36E-03	0
-14,60647324	0	0	0	6,69E-03	0
-15,25455076	0	0	0	8,11E-03	0
-20,25162867	0	0	0	1,18E-02	0
-26,62458753	0	0	0	1,96E-02	0
-46,46096323	0	17,5	17,42591667	3,04E-02	0
-53,81596063	0	21	20,9111	4,28E-02	0
-59,24798247	0	21	20,9111	5,70E-02	0
-69,44218764	0	23,15	23,05199833	7,37E-02	0
-74,82527102	0	24	23,8984	9,26E-02	0
-79,74572283	0	26,45	26,33802833	0,111954019	0
-80,51893711	0	27,2	27,08485333	0,131337364	0
-83,98230719	0	30	29,873	0,150584227	0
-84,08886059	0	31,15	31,01813167	0,169612246	0
-77,61672754	0	33	32,8603	0,187142028	0
-61,59221565	0	33	32,8603	0,200522567	0
-42,6453583	0	33	32,8603	0,208018659	0
-35,71265703	0	33	32,8603	0,211642617	0
-31,63814701	0	33	32,8603	0,214672712	0
-28,70446789	0	33	32,8603	0,217386247	0
-26,17742182	0	33	32,8603	0,219860439	0

	Environment:Green Roof	GROUND_FLOORZ	1ST_FLOORZONEH
Environment:Green Roof	Current	ONEHVAC:IDEALLO	VAC:IDEALLOADSA
Current	Evapotranspiration Depth	ADSAIRSYSTEM:Zone Total Cooling	IRSYSTEM:Zone Ideal Loads Zone
Irrigation Depth [m](Hourly)	tion Depth [m](Hourly)	Energy [J](Hourly)	Total Cooling Energy [J](Hourly)
	0	2,79E-05	3848403,38
	0	2,59E-05	3600500,418
	0	2,40E-05	3406297,637
	0	2,25E-05	3223129,751
	0	2,20E-05	3041478,327
	0	3,15E-05	3009401,65
	0	9,60E-05	3814009,319
	0	1,59E-04	4667661,525
	0,35	1,96E-04	5214454,352
	0	2,20E-04	5697758,049
	0	2,55E-04	6092787,45
	5,00E-02	3,02E-04	6097748,649
	0	3,21E-04	5926354,581
	5,00E-02	3,24E-04	6218942,464
	5,00E-02	3,21E-04	6751724,088
	0	3,20E-04	7099691,547
	5,00E-02	3,13E-04	7270560,621
	0	2,63E-04	7280131,454
	0	1,79E-04	6924441,494
	0	7,76E-05	5734598,394
	0	5,38E-05	4945216,043
	0	4,76E-05	4607322,977
	0	4,32E-05	4361409,206
	0	3,93E-05	4148175,72

Θεσσαλονίκη

Τελικό μοντέλο

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Soil Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Vegetation Temperature [C](Hourly)	Environment:Green Roof Soil Root Moisture Ratio [](Hourly)
07/08 01:00:00	22,885	26,64790369	26,66684894	22,10756945	1,00E-01
07/08 02:00:00	21,49166667	25,62930034	25,64332766	20,93055685	1,00E-01
07/08 03:00:00	20,74583333	24,93561161	24,94490741	20,2981317	1,00E-01
07/08 04:00:00	20,24583333	24,41003513	24,41870354	19,84592293	1,00E-01
07/08 05:00:00	19,79666667	24,02787245	24,03150473	19,51111296	1,00E-01
07/08 06:00:00	19,7525	25,11222945	25,04406285	21,37862025	1,00E-01
07/08 07:00:00	20,76416667	32,75144194	32,59819685	30,75832968	9,92E-02
07/08 08:00:00	22,515	41,51588448	41,39003274	38,30131796	9,68E-02
07/08 09:00:00	24,36583333	46,59804656	46,54180676	41,81568128	9,28E-02
07/08 10:00:00	26,16416667	49,21820413	49,18567641	43,63915001	8,82E-02
07/08 11:00:00	27,81333333	50,95805562	50,93236344	45,07059056	8,32E-02
07/08 12:00:00	29,31166667	52,26255218	52,24301365	46,40244379	7,80E-02
07/08 13:00:00	30,55916667	53,13139251	53,12123626	47,42935653	7,26E-02
07/08 14:00:00	31,45583333	53,72029696	53,71265691	48,25731225	6,73E-02
07/08 15:00:00	32,00333333	53,93055539	53,93196149	48,70239597	6,22E-02
07/08 16:00:00	32,25083333	53,6455086	53,65116613	48,70998337	5,75E-02
07/08 17:00:00	32,1475	52,91581958	52,93641841	48,15145495	5,33E-02
07/08 18:00:00	31,59333333	50,96869181	51,0239411	45,98114671	4,98E-02
07/08 19:00:00	30,59	45,35722151	45,48816579	39,30001021	4,74E-02
07/08 20:00:00	29,2375	36,28451921	36,41779316	29,4495917	4,66E-02
07/08 21:00:00	27,89	31,68014	31,71940533	26,40797855	4,66E-02
07/08 22:00:00	26,74083333	29,88516338	29,91077306	25,32644221	4,67E-02
07/08 23:00:00	25,59	28,55797638	28,57701269	24,26065184	4,67E-02
07/08 24:00:00	24,39	27,56154036	27,57608284	23,29627204	4,68E-02

Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Vegetation	Environment:Green Roof Vegetation	Environment:Green Roof Soil	Environment:Green Roof Vegetation
Near Surface Moisture Ratio	Sensible Heat Transfer Rate per Area	Sensible Heat Transfer Rate per Area	Moisture Transfer Rate	Moisture Transfer Rate	Latent Heat Transfer Rate per Area
[/](Hourly)	[W/m2](Hourly)	[W/m2](Hourly)	[m/s](Hourly)	[m/s](Hourly)	[W/m2](Hourly)
9,97E-02	-29,13766708	13,14779671	6,82E-11	6,62E-09	-0,165337873
9,93E-02	-30,64089743	10,93146885	5,39E-11	5,63E-09	-0,130846252
9,89E-02	-30,70483638	9,606467962	4,51E-11	5,02E-09	-0,109420396
9,86E-02	-30,51428205	9,002060515	3,96E-11	4,63E-09	-9,61E-02
9,83E-02	-30,63459906	7,664211269	3,14E-11	4,14E-09	-7,63E-02
9,80E-02	-32,36270974	-14,82723786	2,06E-09	3,96E-09	-4,987103076
9,76E-02	-47,39819871	-110,4125349	2,12E-08	7,37E-09	-50,92077864
9,69E-02	-65,82446968	-172,53704	4,71E-08	1,26E-08	-112,6856774
0,119512174	-75,01397534	-188,0768027	6,02E-08	2,56E-08	-143,5570101
0,123058192	-77,66599645	-186,4938665	6,73E-08	3,22E-08	-160,322002
0,121687696	-78,11848296	-182,9059121	7,20E-08	3,57E-08	-171,3399992
0,122149626	-77,57937811	-180,3368975	7,41E-08	3,94E-08	-176,2426221
0,12240588	-76,52393577	-177,4704714	7,45E-08	4,24E-08	-176,8600462
0,121987203	-75,52392863	-176,519563	7,28E-08	4,42E-08	-172,7655035
0,121671786	-74,51182049	-175,3795466	6,87E-08	4,50E-08	-163,0500315
0,122391191	-73,01400533	-172,9872393	6,29E-08	4,55E-08	-149,3357475
0,122401318	-71,51425762	-168,327897	5,53E-08	4,42E-08	-131,2986206
0,120492088	-68,91740879	-150,9745944	4,33E-08	3,91E-08	-102,9509758
0,11809199	-60,24790882	-88,82027445	2,28E-08	2,90E-08	-54,464685
0,116472258	-42,3854821	4,566493491	3,66E-09	1,87E-08	-8,792265849
0,115357423	-30,39607674	21,52619526	5,43E-11	1,49E-08	-0,131181994
0,11442427	-27,05028866	20,08855237	4,65E-11	1,30E-08	-0,112342841
0,113598584	-25,98950446	18,92859803	4,09E-11	1,15E-08	-9,89E-02
0,112879206	-26,62990154	16,32598414	3,45E-11	9,93E-09	-8,35E-02

Environment:Green Roof Soil Latent Heat Transfer Rate per Area [W/m2](Hourly)	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof	Environment:Green Roof
	Cumulative	Cumulative	Cumulative	Cumulative	Current
	Precipitation Depth [m](Hourly)	Irrigation Depth [m](Hourly)	Runoff Depth [m](Hourly)	Evapotranspiration Depth [m](Hourly)	Precipitation Depth [m](Hourly)
-15,98424825	0	0	0	7,59E-04	0
-13,60395062	0	0	0	2,09E-03	0
-12,14557628	0	0	0	3,25E-03	0
-11,20746166	0	0	0	4,30E-03	0
-10,02125654	0	0	0	5,26E-03	0
-9,563498478	0	0	0	6,19E-03	0
-17,69740098	0	0	0	9,48E-03	0
-30,12488743	0	0	0	1,90E-02	0
-60,93134905	0	17	16,92803333	3,49E-02	0
-76,39616022	0	21	20,9111	5,50E-02	0
-84,64714485	0	21,75	21,657925	7,74E-02	0
-93,21213684	0	24	23,8984	0,101385699	0
-100,3890967	0	26,25	26,138875	0,126266507	0
-104,5365119	0	28,15	28,03083167	0,151570508	0
-106,4287403	0	30,2	30,07215333	0,176600324	0
-107,5597039	0	33	32,8603	0,200669469	0
-104,6278668	0	35,25	35,100775	0,223170402	0
-92,72857794	0	36	35,8476	0,243112469	0
-68,976406	0	36	35,8476	0,257817736	0
-44,87553586	0	36	35,8476	0,265612198	0
-35,76353825	0	36	35,8476	0,269375462	0
-31,27297898	0	36	35,8476	0,272378549	0
-27,77819108	0	36	35,8476	0,275041271	0
-23,9553556	0	36	35,8476	0,277370177	0

	Environment:Green Roof	GROUND_FLOORZ	1ST_FLOORZONEH	
Environment:Green Roof	Current	ONEHVAC:IDEALLOADS	VAC:IDEALLOADS	
Current	Evapotranspiration Depth	ADSAIRSYSTEM:Zone Total Cooling	IRSYSTEM:Zone Total Cooling	
Irrigation Depth [m](Hourly)	Evapotranspiration Depth [m](Hourly)	Zone Total Cooling Energy [J](Hourly)	Zone Total Cooling Energy [J](Hourly)	
	0	2,42E-05	4062173,076	13477616,43
	0	2,05E-05	3788937,937	12942888,75
	0	1,83E-05	3553393,495	12418800,77
	0	1,68E-05	3327401,89	11892237,22
	0	1,51E-05	3108663,969	11363059,5
	0	2,11E-05	3153100,621	11225141,1
	0	1,01E-04	4237361,545	13024652,12
	0	2,14E-04	5158700,797	14786094,17
	0,35	3,08E-04	5768442,3	15849592,18
	0	3,58E-04	6262811,404	16563679,65
	5,00E-02	3,87E-04	6520587,309	16837218,37
	0	4,09E-04	6365327,217	16432353,14
	5,00E-02	4,21E-04	6044912,716	15794682,34
	5,00E-02	4,21E-04	6307583,361	16194099,67
	5,00E-02	4,10E-04	6920887,838	17424349,42
	0	3,91E-04	7408049,344	18589543,17
	5,00E-02	3,59E-04	7653692,767	19356870,35
	0	2,98E-04	7774501,458	19839014,8
	0	1,88E-04	7485081,072	19507146,85
	0	8,18E-05	6219521,73	17397457,18
	0	5,39E-05	5342940,514	15851834,38
	0	4,70E-05	4949430,083	15194257,13
	0	4,17E-05	4662946,014	14707711,44
	0	3,60E-05	4409397,377	14248371,65

Χανιά

Περίπτωση 1

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL: Surface Outside Face Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate [W](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate per Area [W/m2](Hourly)
07/08 01:00:00	25,125	24,13662264	1093,744188	2,734360469
07/08 02:00:00	24,05	22,6502568	585,4628466	1,463657116
07/08 03:00:00	23,7125	21,80998905	1044,869498	2,612173745
07/08 04:00:00	23,475	21,24624566	1400,93795	3,502344876
07/08 05:00:00	23,3375	20,6814596	1639,319057	4,098297643
07/08 06:00:00	23,3	21,21526111	1314,602952	3,28650738
07/08 07:00:00	23,9875	27,41128755	-3621,094765	-9,052736911
07/08 08:00:00	25,15	36,44160061	-16837,70356	-42,09425891
07/08 09:00:00	26,2875	43,97184986	-31655,35277	-79,13838194
07/08 10:00:00	27,2625	50,05662896	-47075,47232	-117,6886808
07/08 11:00:00	28,1625	56,18104792	-65160,69892	-162,9017473
07/08 12:00:00	29,125	61,28252604	-89978,0028	-224,945007
07/08 13:00:00	29,9375	64,29610015	-95266,42649	-238,1660662
07/08 14:00:00	30,5125	65,56869546	-92654,8724	-231,637181
07/08 15:00:00	30,95	65,41868896	-84962,34705	-212,4058676
07/08 16:00:00	31,1625	62,31006444	-82781,08483	-206,9527121
07/08 17:00:00	31,2	57,05702061	-65507,12922	-163,767823
07/08 18:00:00	30,8875	49,71785197	-40931,18798	-102,32797
07/08 19:00:00	30,2625	41,14370878	-20398,4841	-50,99621025
07/08 20:00:00	29,4375	33,07502335	-6839,968101	-17,09992025
07/08 21:00:00	28,6625	29,90649583	-2641,856458	-6,604641144
07/08 22:00:00	28,025	28,21834246	-493,7708148	-1,234427037
07/08 23:00:00	27,3625	26,81744215	958,9729728	2,397432432
07/08 24:00:00	26,725	25,61794961	2193,766799	5,484416998

Περίπτωση 2

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL: Surface Outside Face Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate [W](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate per Area [W/m2](Hourly)
07/08 01:00:00	25,125	23,18493172	2192,526117	5,481315294
07/08 02:00:00	24,05	21,76336094	1086,51206	2,716280151
07/08 03:00:00	23,7125	21,07111714	1539,072501	3,847681253
07/08 04:00:00	23,475	20,63797862	1851,039488	4,627598719
07/08 05:00:00	23,3375	20,17098945	2015,645358	5,039113396
07/08 06:00:00	23,3	20,40413176	1886,034063	4,715085158
07/08 07:00:00	23,9875	24,11260292	-177,7230705	-0,444307676
07/08 08:00:00	25,15	29,94922154	-5801,57038	-14,50392595
07/08 09:00:00	26,2875	35,14082734	-13448,01236	-33,62003091
07/08 10:00:00	27,2625	39,45971778	-22099,60027	-55,24900068
07/08 11:00:00	28,1625	43,83162784	-32675,27811	-81,68819527
07/08 12:00:00	29,125	47,53722165	-47686,8095	-119,2170238
07/08 13:00:00	29,9375	49,80862945	-50756,47708	-126,8911927
07/08 14:00:00	30,5125	50,90343459	-49120,19222	-122,8004806
07/08 15:00:00	30,95	50,95849421	-44262,19833	-110,6554958
07/08 16:00:00	31,1625	48,98143421	-43353,23359	-108,383084
07/08 17:00:00	31,2	45,46039587	-33055,61465	-82,63903663
07/08 18:00:00	30,8875	40,51181636	-18707,47202	-46,76868005
07/08 19:00:00	30,2625	34,64724423	-7257,001182	-18,14250296
07/08 20:00:00	29,4375	29,33788282	199,7378304	0,499344576
07/08 21:00:00	28,6625	27,44846294	2341,11013	5,852775326
07/08 22:00:00	28,025	26,4035275	3508,381083	8,770952706
07/08 23:00:00	27,3625	25,40179311	3737,942501	9,344856253
07/08 24:00:00	26,725	24,5094137	4449,966613	11,12491653

Περίπτωση 3

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL: Surface Outside Face Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate [W](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate per Area [W/m2](Hourly)
07/08 01:00:00	25,125	22,03369475	3573,964557	8,934911392
07/08 02:00:00	24,05	20,69786907	1763,515885	4,408789712
07/08 03:00:00	23,7125	20,18221976	2176,530831	5,441327077
07/08 04:00:00	23,475	19,90440635	2419,383181	6,048457953
07/08 05:00:00	23,3375	19,55429583	2487,8274	6,219568501
07/08 06:00:00	23,3	19,50359105	2557,419806	6,393549516
07/08 07:00:00	23,9875	20,62649311	2657,928887	6,644822218
07/08 08:00:00	25,15	22,65706126	2172,882719	5,432206797
07/08 09:00:00	26,2875	25,01416337	1220,198692	3,05049673
07/08 10:00:00	27,2625	27,30042903	-122,6508472	-0,306627118
07/08 11:00:00	28,1625	29,71484618	-2569,18321	-6,422958024
07/08 12:00:00	29,125	31,93846502	-6349,036722	-15,8725918
07/08 13:00:00	29,9375	33,31892592	-7409,106615	-18,52276654
07/08 14:00:00	30,5125	33,99917339	-6988,426311	-17,47106578
07/08 15:00:00	30,95	34,10420154	-5527,324501	-13,81831125
07/08 16:00:00	31,1625	33,42666389	-4586,26342	-11,46565855
07/08 17:00:00	31,2	31,91166887	-1516,70345	-3,791758626
07/08 18:00:00	30,8875	29,47244081	1957,40009	4,893500225
07/08 19:00:00	30,2625	26,59654335	4572,348769	11,43087192
07/08 20:00:00	29,4375	24,62866828	7965,460782	19,91365196
07/08 21:00:00	28,6625	24,42828885	8418,346108	21,04586527
07/08 22:00:00	28,025	24,19710196	8414,932174	21,03733043
07/08 23:00:00	27,3625	23,68640064	7147,624873	17,86906218
07/08 24:00:00	26,725	23,16672789	7207,735032	18,01933758

Περίπτωση 4

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL: Surface Outside Face Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate [W](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate per Area [W/m2](Hourly)
07/08 01:00:00	25,125	21,82286721	3803,497664	9,508744159
07/08 02:00:00	24,05	20,3947571	1966,984969	4,917462423
07/08 03:00:00	23,7125	19,94445995	2354,883188	5,88720797
07/08 04:00:00	23,475	19,7497451	2543,503643	6,358759107
07/08 05:00:00	23,3375	19,44327961	2575,031911	6,437579777
07/08 06:00:00	23,3	19,46185471	2593,636206	6,484090516
07/08 07:00:00	23,9875	20,78357423	2521,663345	6,304158361
07/08 08:00:00	25,15	23,05555404	1804,745588	4,511863971
07/08 09:00:00	26,2875	25,58412896	640,7638348	1,601909587
07/08 10:00:00	27,2625	27,92338528	-921,4128109	-2,303532027
07/08 11:00:00	28,1625	30,32647294	-3626,4798	-9,0661995
07/08 12:00:00	29,125	32,46804822	-7579,895054	-18,94973764
07/08 13:00:00	29,9375	33,71789928	-8335,520125	-20,83880031
07/08 14:00:00	30,5125	34,25208072	-7532,245907	-18,83061477
07/08 15:00:00	30,95	34,20294601	-5722,677006	-14,30669251
07/08 16:00:00	31,1625	33,34291811	-4403,930431	-11,00982608
07/08 17:00:00	31,2	31,62563796	-992,002021	-2,480005052
07/08 18:00:00	30,8875	28,93563852	2739,597565	6,848993913
07/08 19:00:00	30,2625	25,8534443	5555,263347	13,88815837
07/08 20:00:00	29,4375	23,93913664	9139,187992	22,84796998
07/08 21:00:00	28,6625	24,01396973	9262,532181	23,15633045
07/08 22:00:00	28,025	23,95357621	8959,209196	22,39802299
07/08 23:00:00	27,3625	23,50900295	7501,298223	18,75324556
07/08 24:00:00	26,725	23,03175663	7485,440203	18,71360051

Τελικό μοντέλο

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL: Surface Outside Face Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate [W](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate per Area [W/m2](Hourly)
07/08 01:00:00	25,125	21,77213001	3886,073489	9,715183722
07/08 02:00:00	24,05	20,39789655	1964,219186	4,910547965
07/08 03:00:00	23,7125	19,87528234	2404,932395	6,012330987
07/08 04:00:00	23,475	19,59774468	2662,956097	6,657390242
07/08 05:00:00	23,3375	19,24713663	2728,031322	6,820078305
07/08 06:00:00	23,3	19,19808204	2800,060475	7,000151187
07/08 07:00:00	23,9875	20,32894147	2921,873433	7,304683583
07/08 08:00:00	25,15	22,37057101	2443,962212	6,109905529
07/08 09:00:00	26,2875	24,7393837	1503,873261	3,759683153
07/08 10:00:00	27,2625	27,04216419	199,4809139	0,498702285
07/08 11:00:00	28,1625	29,48004022	-2173,954468	-5,434886171
07/08 12:00:00	29,125	31,73065438	-5869,475095	-14,67368774
07/08 13:00:00	29,9375	33,12191819	-6958,618363	-17,39654591
07/08 14:00:00	30,5125	33,80025273	-6568,388823	-16,42097206
07/08 15:00:00	30,95	33,89981938	-5146,616555	-12,86654139
07/08 16:00:00	31,1625	33,22326932	-4157,059503	-10,39264876
07/08 17:00:00	31,2	31,70254512	-1121,254711	-2,803136777
07/08 18:00:00	30,8875	29,24032558	2295,84673	5,739616826
07/08 19:00:00	30,2625	26,34641656	4903,025217	12,25756304
07/08 20:00:00	29,4375	24,37700411	8397,585335	20,99396334
07/08 21:00:00	28,6625	24,18433762	8914,968466	22,28742116
07/08 22:00:00	28,025	23,95760909	8952,22735	22,38056837
07/08 23:00:00	27,3625	23,44156015	7634,460664	19,08615166
07/08 24:00:00	26,725	22,91996129	7719,226318	19,29806579

GROUND_FLOORZON	1ST_FLOORZONEHV
EHVAC:IDEALLOADSAI	AC:IDEALLOADSAIRS
RSYSTEM:Zone Ideal	YSTEM:Zone Ideal
Loads Zone Total	Loads Zone Total
Cooling Energy	Cooling Energy
[J](Hourly)	[J](Hourly)
3108583,378	5663151,074
2858137,838	4892716,32
2653827,849	4163654,148
2456866,444	3472640,28
2259866,566	2853745,894
2261492,097	2550024,881
3095584,319	3525005,756
3869691,652	4716723,789
4336390,698	5589128,222
4786848,433	6627199,516
5138791,64	7737362,518
5094514,98	8438529,268
4956136,096	9035640,652
5320519,982	10403654,1
5881316,224	12160740,9
6245142,441	13601217,94
6430442,527	14534865,56
6438973,903	14846865,06
6041577,797	14069327,09
4815141,937	11498092,71
4159636,409	9561223,648
3865718,722	8317591,454
3632212,036	7330513,941
3421456,043	6495717,783

Θεσσαλονίκη

Τελικό μοντέλο

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL: Surface Outside Face Temperature [C](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate [W](Hourly)	ROOF_ALL:Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate per Area [W/m2](Hourly)
07/08 01:00:00	22,675	19,39392818	2917,488523	7,293721308
07/08 02:00:00	21,375	18,10863321	1437,374546	3,593436364
07/08 03:00:00	20,6875	17,40601861	1535,455743	3,838639357
07/08 04:00:00	20,1875	16,85344722	1684,973256	4,212433141
07/08 05:00:00	19,75	16,49663621	1681,583461	4,203958654
07/08 06:00:00	19,7875	17,07699302	1435,383921	3,588459803
07/08 07:00:00	20,9625	18,95504078	1243,295985	3,108239962
07/08 08:00:00	22,725	21,64247724	742,3966651	1,855991663
07/08 09:00:00	24,5875	25,35351741	-653,352943	-1,633382357
07/08 10:00:00	26,3625	28,68857006	-2728,11755	-6,820293874
07/08 11:00:00	28	31,46245821	-5347,336655	-13,36834164
07/08 12:00:00	29,475	33,51917359	-8909,697401	-22,2742435
07/08 13:00:00	30,6875	35,00617233	-8673,537463	-21,68384366
07/08 14:00:00	31,5375	35,95919087	-7656,601882	-19,1415047
07/08 15:00:00	32,05	35,88394393	-5559,429322	-13,89857331
07/08 16:00:00	32,2625	34,6479489	-3993,790861	-9,984477153
07/08 17:00:00	32,1125	32,57031243	-856,0465967	-2,140116492
07/08 18:00:00	31,5	29,62568111	1558,818455	3,897046139
07/08 19:00:00	30,45	26,16133468	3543,851647	8,859629118
07/08 20:00:00	29,0625	23,77394711	7055,878795	17,63969699
07/08 21:00:00	27,75	23,18674532	8169,354534	20,42338633
07/08 22:00:00	26,6125	22,5474907	8480,507443	21,20126861
07/08 23:00:00	25,45	21,47855049	6374,659778	15,93664945
07/08 24:00:00	24,25	20,55013171	5803,056067	14,50764017

GROUND_FLOORZON	1ST_FLOORZONEHV
EHVAC:IDEALLOADSAI	AC:IDEALLOADSAIRS
RSYSTEM:Zone Ideal	YSTEM:Zone Ideal
Loads Zone Total	Loads Zone Total
Cooling Energy	Cooling Energy
[J](Hourly)	[J](Hourly)
3153576,832	5220336,788
2869211,352	4267396,777
2617767,261	3392034,99
2370579,906	2595534,153
2132839,325	1898616,481
2230299,182	1611883,224
3323023,595	2865942,872
4134559,264	4190711,624
4661305,858	5307496,595
5089467,116	6500896,172
5281614,959	7587440,701
5082745,399	8223021,672
4817648,559	8769119,642
5196192,82	10285557,3
5855056,596	12376888,67
6356577,632	14182776,95
6623570,784	15325472,76
6763980,822	15830673,46
6415190,394	15048087,26
5122587,774	12229737,33
4388064,399	10007888,35
4043621,048	8526936,534
3770910,373	7320297,79
3512803,382	6264039,319