

Πολυτεχνείο Κρήτης-Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος

Η ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΩΝ ΦΥΤΕΜΕΝΩΝ ΟΡΟΦΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δαρβίρης Θεόδωρος-Μάριος

Επιβλέπουσα: Διονυσία Κολοκοτσά

Επίκουρη καθηγήτρια Πολυτεχνείου Κρήτης

Χανιά, Ιούλιος 2012

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε για το τμήμα μηχανικών περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Επιβλέπων κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, ήταν η επίκουρη καθηγήτρια Δ. Κολοκοτσά, την οποία θέλω να ευχαριστήσω για την πολύτιμη βοήθειά της κατά το διάστημα αυτό. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τις εταιρίες egreen, elandscape καθώς και την κυρία Ε. Παγκάλου για την βοήθεια και τις πληροφορίες που προσέφεραν.

Περίληψη

Η συνεχής αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας είναι μείζων θέμα ιδιαίτερα για τις ανεπτυγμένες χώρες, στις οποίες γίνονται προσπάθειες εξοικονόμησής της με ποικίλα μέτρα και μεταρρυθμίσεις. Όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση στην Ελλάδα, ο κτηριακός τομέας είναι ο δεύτερος πιο δαπανηρός τομέας μετά τις μεταφορές, ίσως λόγω του γεγονότος ότι το 60 % περίπου του συνόλου των κτηρίων έχει κατασκευαστεί πριν από το 1980 όποτε άρχισε να ισχύει ο κανονισμός θερμομόνωσης. Συνεπώς, η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του κτηριακού τομέα είναι επιτακτική ανάγκη και μια ενδιαφέρουσα πρόταση για τον μετριασμό της κατανάλωσης είναι οι φυτεμένες οροφές.

Στην παρούσα διπλωματική, ελέγχεται η συνεισφορά των φυτεμένων οροφών στην εξοικονόμηση ενέργειας και ιδιαίτερα στη μείωση των ψυκτικών και θερμικών φορτίων με προσομοίωση υπάρχοντος κτηρίου το οποίο διαθέτει δυο φυτεμένες οροφές και βρίσκεται στην Αθήνα. Επίσης, εξετάζονται τέσσερα διαφορετικά σενάρια: υπάρχουσα κατάσταση, αντικατάσταση φυτεμένης οροφής με συμβατική, αύξηση μόνωσης οροφής και αύξηση θερμικής μάζας οροφής· ενώ αναλύεται εκτενώς η δομή και τα ποικίλα πλεονεκτήματα των φυτεμένων οροφών.

Abstract

The continuous rise of the energy demand is a major concern especially for the developed countries. Currently, many energy saving efforts are made through a variety of measures. As far as Greece is concerned, the building sector is the second most energy consuming sector, maybe due to the fact that more than half of the existing buildings in Greece have been constructed before 1980 when the thermal regulation came into force. Therefore, the reduction of the energy consumption of the building sector is mandatory and green roofs are an interesting suggestion to mitigate this consumption.

In the present dissertation, the contribution of green roofs to energy savings, and especially for the cooling and heating loads is studied, through a simulation of an existing building where two green roofs are installed, situated in the Athens district. Furthermore, four different scenarios are taken under consideration: the present situation, replacement of the green roof with a conventional roof, increase in the roof insulation and increase in the thermal mass of the roof. Additionally, there is an extensive analysis of the components that form a green roof as well as the many advantages from their use.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Εισαγωγή	9
1. Τύποι φυτεμένων οροφών	12
1.1. Εκτατική φυτεμένη οροφή (extensive green roof)	12
1.2. Εντατική φυτεμένη οροφή (intensive green roof)	12
1.3. Ημι-εντατική φυτεμένη οροφή (semi intensive green roof)	13
1.4. Φυτεμένη οροφή Βιοποικιλότητας (biodiverse roof)	13
1.5. Σύστημα φυτεμένης οροφής με ανεξάρτητα κομμάτια (modular green roof system).....	14
2. Διαμόρφωση φυτεμένης οροφής.....	15
2.1. Αντιριζική προστασία.....	16
2.2. Ζώνη προστασίας και κατακράτησης υγρασίας.....	17
2.3. Ζώνη αποστράγγισης	17
2.4. Ζώνη φίλτρου.....	18
2.5. Υπόστρωμα ανάπτυξης	18
2.6. Επιλογή χλωρίδας της φυτεμένης οροφής.....	21
3. Σχεδιασμός και εγκατάσταση φυτεμένης οροφής.....	23
3.1. Παράμετροι που πρέπει να τεθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό των φυτεμένων οροφών	23
3.1.1. Επιρροές από παρακείμενες κατασκευές	23
3.1.2. Εξοπλισμός στέγης.....	26
3.2. Δομικά κριτήρια σχεδιασμού	27
3.2.1. Διατμητική τάση	27
3.2.2. Σύστημα στεγάνωσης.....	27
3.2.3. Αέρας.....	28
3.2.4. Πυρασφάλεια.....	28
3.2.5. Άρδευση	29

3.2.6.	Ασφάλεια και πρόσβαση	29
3.3.	Κατασκευαστικές λεπτομέρειες	30
3.3.1.	Αποστράγγιση.....	30
3.3.2.	Άρδευση	30
3.4.	Μέθοδοι εγκατάστασης των παραμέτρων που συντελούν την φυτεμένη οροφή.....	31
3.4.1.	Κατακράτηση υγρασίας.....	31
3.4.2.	Αντιριζική προστασία	32
3.4.3.	Ζώνη αποστράγγισης.....	33
3.4.4.	Στεγάνωση.....	33
3.5.	Τύποι μόνωσης και μεμβρανών οροφής	34
3.5.1.	Μόνωση οροφής.....	34
3.5.2.	Μεμβράνες οροφής	36
4.	Οφέλη από τη χρήση των φυτεμένων οροφών	39
4.1.	Οφέλη για το κτήριο.....	39
4.1.1.	Μείωση των απαιτήσεων σε ψύξη και θέρμανση	39
4.1.2.	Διάρκεια ζωής της φυτεμένης οροφής	40
4.1.3.	Οικονομικά οφέλη	41
4.1.4.	Παραγωγικότητα.....	41
4.1.5.	Ηχομόνωση.....	42
4.1.6.	Οφέλη λόγω του φυλλώματος	43
4.2.	Περιβαλλοντικά οφέλη	44
4.2.1.	Φαινόμενο αστικής νησίδας.....	44
4.2.2.	Ρύπανση αέρα	47
4.2.2.1.	Απομάκρυνση διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂)	48
4.2.3.	Βιοποικιλότητα.....	50
4.2.4.	Υδραυλική συμπεριφορά των φυτεμένων οροφών	50
4.2.5.	Ποιότητα του νερού της απορροής στην έξοδο της φυτεμένης οροφής	52

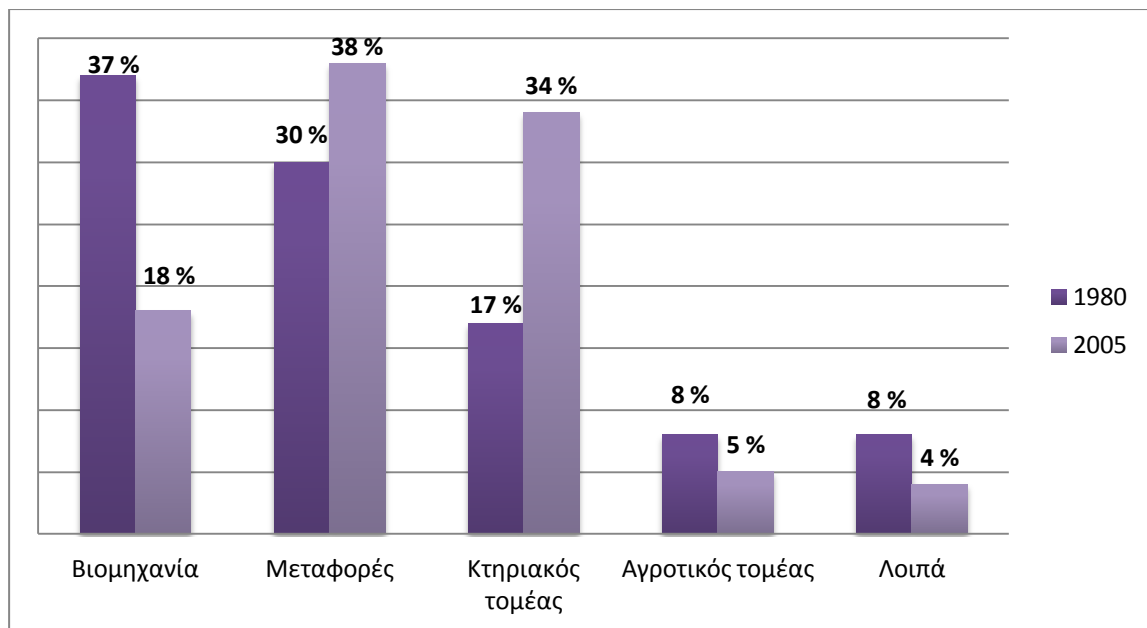
5.	Συντήρηση φυτεμένων οροφών	54
5.1.	Φυτεμένη οροφή εκτατικού τύπου	54
5.2.	Φυτεμένη οροφή εκτατικού τύπου	55
6.	Εκτίμηση κόστους φυτεμένων οροφών	57
6.1.	Πώς να μειωθεί το κόστος των φυτεμένων οροφών	58
7.	Υπό μελέτη κτήριο.....	60
7.1.	Μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας εσωτερικού χώρου	60
7.2.	Φωτογραφίες θερμικής κάμερας	62
7.3.	Μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας περιβάλλοντος.....	64
7.4.	Στοιχεία των εγκατεστημένων φυτεμένων οροφών.....	66
8.	Προσομοίωση κτηρίου	72
8.1.	Θερμικές ζώνες	72
8.2.	Απαραίτητοι παράμετροι για τη σωστή εκτέλεση του προγράμματος EnergyPlus.....	73
8.2.1.	Υπολογισμός θερμοκρασιών εδάφους	73
8.2.2.	Δομικά στοιχεία κτηρίου	76
8.2.3.	Υαλοπίνακες.....	78
8.2.4.	Επιθυμητές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας	79
8.2.5.	Εσωτερικά κέρδη	79
8.2.6.	Αερισμός	80
8.3.	Λειτουργική θερμοκρασία	81
8.4.	Δείκτης Fanger PMV	81
8.5.	Βαθμονόμηση μοντέλου	82
8.6.	Σενάρια	84
8.6.1.	Συστήματα κλιματισμού ενεργοποιημένα.....	84
8.6.2.	Συστήματα κλιματισμού απενεργοποιημένα	87
8.6.2.1.	Αποτελέσματα.....	87
8.7.	Αλλαγή στοιχείων της φυτεμένης οροφής.....	94
8.7.1.	Αποτελέσματα.....	94

8.7.1.1. Θερινή περίοδος (11/06).....	94
8.7.1.2. Χειμερινή περίοδος (22/12).....	98
9. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις	103
Παράρτημα.....	105
Παραδείγματα φυτεμένων οροφών.....	105
Παραδείγματα χλωρίδας κατάλληλης για τις φυτεμένες οροφές	107
Σύνδρομο Άρρωστου Κτηρίου (Sick Building Syndrome -SBS) [39]	109
Βιβλιογραφία	113

Εισαγωγή

Η κατανάλωση και η ζήτηση ενέργειας είναι πολύ σημαντικά ζητήματα τα οποία απασχολούν ιδιαίτερα τις ανεπτυγμένες χώρες όπου η συνεχής αύξηση του πληθυσμού τους έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Βασικό μέλημα των χωρών αυτών είναι η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω μιας σειράς μέτρων και μεταρρυθμίσεων. Για παράδειγμα, η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2010/31/ΕΕ, έχει στόχο έως τις 31/12/2020, όλα τα νέα κτήρια να είναι κτήρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης, δηλαδή σε ετήσια βάση να εμφανίζουν μηδενικό ενεργειακό ισοζύγιο. Συνεπώς η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης είναι επιτακτική ανάγκη.

Όσον αφορά την Ελλάδα, η συνολική ενεργειακή κατανάλωση έχει αυξηθεί κατά 39 % από το 1990, με το πετρέλαιο να κυριαρχεί ως τύπος κατανάλωσης ενέργειας και ακολουθεί ο ηλεκτρισμός [1]. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από την εικόνα 1, όπου συγκρίνεται η ενεργειακή κατανάλωση του 1980 με την αντίστοιχη του 2005, η κατανάλωση της ενέργειας μειώνεται σε όλους τους τομείς εκτός από τις μεταφορές και τον κτηριακό τομέα όπου παρατηρείται διπλασιασμός της ενεργειακής κατανάλωσης του κτηριακού τομέα. Επιπλέον, η διαχρονική μεταβολή της ενεργειακής κατανάλωσης του κτηριακού τομέα έχει ετήσιο ρυθμό αύξησης της τάξης του 1,8 % [2].



Εικόνα 1 Διάγραμμα ενεργειακής κατανάλωσης, κατά τομέα, για τα έτη 1980 και 2005 [2]

Μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση παρουσιάζουν τα παλαιά κτήρια με ελλιπή ή καθόλου θερμομόνωση και ιδιαίτερα αυτά που έχουν κατασκευαστεί πριν το 1980 όποτε άρχισε να ισχύει ο κανονισμός θερμομόνωσης. Ακόμα τα κτήρια που είναι κατασκευασμένα από γυαλί απαιτούν από 2 έως και 3 φορές ενέργεια από τα συμβατικά κτήρια λόγω των αναγκών τους σε κλιματισμό [2].

Τα σημαντικότερα στοιχεία για την αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης σε ένα κτήριο είναι η απουσία μόνωσης, η κακή ποιότητα κουφωμάτων και υαλοπινάκων, η έλλειψη αεροστεγάνωσης και η κακή συντήρηση του κτηρίου και των συστημάτων που το απαρτίζουν [2]. Εκτός λοιπόν από διαδικασίες βελτίωσης των παραμέτρων που προαναφερθήκαν, μια ενδιαφέρουσα επιλογή είναι η εγκατάσταση φυτεμένων οροφών.

Οι φυτεμένες οροφές (Green Roofs) είναι μια τεχνική παθητικού δροσισμού, η οποία εμποδίζει την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στην υποκείμενη δομή του κτηρίου [3]. Δεν είναι σύγχρονη τεχνολογία (στην τωρινή μορφή τους είναι) καθώς οι στέγες με χλοοτάπητα χρησιμοποιούνταν συχνά στη βόρεια Ευρώπη, όμως μειώθηκε η χρήση τους με την βιομηχανική επανάσταση [4]. Πολλές μελέτες που έχουν διεξαχθεί τα τελευταία χρόνια, υποστηρίζουν πως η χρήση της

φυτεμένης οροφής οδηγεί σε ενεργειακά κέρδη για το κτήριο, όπως η μείωση της θέρμανσης κατά την χειμερινή περίοδο και αντίστοιχα η μείωση της ψύξης κατά την θερινή περίοδο. Επιπλέον, η ύπαρξη της φυτεμένης οροφής, προσθέτει θερμική μάζα η οποία βοηθά στην σταθεροποίηση της διακύμανσης των εσωτερικών θερμοκρασιών σε ετήσια βάση[3].

Τα παλαιότερα κτήρια με ελλιπή ή καθόλου θερμομόνωση, φαίνεται να επωφελούνται περισσότερο από την εγκατάσταση της φυτεμένης οροφής καθώς οι υπάρχοντες κανονισμοί θερμομόνωσης απαιτούν υψηλά επίπεδα μόνωσης και ως αποτέλεσμα η χρήση των οροφών αυτών σε νεόδμητα κτήρια ελάχιστα επηρεάζει την ετήσια ενεργειακή κατανάλωση και την εσωτερική θερμοκρασία. Σε μια μελέτη που έγινε στην πόλη La Rochelle της Γαλλίας, η παρουσία φυτεμένης οροφής μείωσε τη μέση και μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία κατά 6,5 και 9,3 °C αντίστοιχα για μια οροφή χωρίς μόνωση ενώ οι αντίστοιχες μειώσεις για μια οροφή με μόνωση είναι της τάξης του 1 °C [3],[5]. Εφόσον το 60 % περίπου του συνόλου των κτηρίων της Ελλάδας, έχει κατασκευαστεί πριν από το 1980, η χρήση της φυτεμένης οροφής αντί της συμβατικής μόνωσης φαντάζει ενδιαφέρουσα. Βέβαια, για τον βέλτιστο καθορισμού αυτής της ευνοϊκής επίδρασης, πρέπει να γνωρίζουμε τη θερμική αγωγιμότητα, το είδος και το πάχος των υλικών κατασκευής της υπάρχουσας στέγης [3].

1. Τύποι φυτεμένων οροφών

1.1. Εκτατική φυτεμένη οροφή (extensive green roof)

Οι εκτατικές φυτεμένες οροφές λειτουργούν σαν οικολογικές επιφάνειες που παρέχουν στην αστική κοινωνία περιβαλλοντικά οφέλη, ενώ στον ιδιοκτήτη του κτηρίου οικονομικά. Έχουν μικρό βάρος, χαμηλές απαιτήσεις σε συντήρηση, και η βλάστηση τους συνήθως αποτελείται από διάφορα παχύφυτα (succulents) ή άλλα είδη ανθεκτικών φυτών όπως τα sedum (φωτογραφίες των ειδών παρουσιάζονται στο παράρτημα) τα οποία φυτεύονται σε μικρού πάχους υπόστρωμα, συνήθως μικρότερο από 100 mm με ελάχιστο τα 80 mm, το οποίο έχει χαμηλή συγκέντρωση σε θρεπτικά, ενώ συνήθως δεν απαιτείται άρδευση [6].

1.2. Εντατική φυτεμένη οροφή (intensive green roof)

Αυτός ο τύπος φυτεμένης οροφής, που αναφέρεται συχνά και ως «roof garden», προσφέρει οφέλη συγγενικά με ένα μικρό αστικό πάρκο ή έναν οικιακό κήπο. Σχεδιάζεται γενικά για χρήση αναψυχής και αποτελείται από υπόστρωμα πάχους μεγαλύτερο από 200 mm και συνήθως απαιτείται συχνή συντήρηση και άρδευση. Έρευνες δείχνουν ότι οι οροφές αυτού του τύπου μπορούν να βελτιώσουν την παραγωγικότητα του εργατικού δυναμικού και να μειώσουν τον χρόνο ανάρρωσης των ασθενών σε περίπτωση που φυτεμένες οροφές αυτού του τύπου εγκατασταθούν σε νοσοκομεία [6].

Στον πίνακα 1, συγκρίνονται οι δυο τύποι φυτεμένων οροφών που έχουν αναφερθεί:

Πίνακας 1 Σύγκριση φυτεμένων οροφών εκτατικού και εντατικού τύπου [7].

Εκτατικές οροφές	Εντατικές οροφές
μικρού βάθους υπόστρωμα 5-15 cm	15-38 cm (μπορεί να είναι και βαθύτερο)
ελαφρύ υπόστρωμα 0,55-2,1 kg/m ²	βαρύτερο υπόστρωμα μεγαλύτερο από 2,1 kg/m ²
μικρού ύψους φυτά 2,5-61 cm	δέντρα, θάμνοι και άλλα είδη
μικρή ποικιλία φυτών (βότανα, αλπικού τύπου κ.α.)	μεγάλη ποικιλία ανάλογα με τον σχεδιασμό και τον προϋπολογισμό
συνήθως δεν είναι προσβάσιμα	σχεδιασμένα για αναψυχή
κλίσεις μέχρι και άνω των 30°	σχετικά επίπεδα
λιγότερο δαπανηρά	περισσότερο δαπανηρά
χαμηλές απαιτήσεις σε άρδευση	συνήθως απαραίτητα άρδευση
χαμηλές απαιτήσεις σε συντήρηση	υψηλές απαιτήσεις σε συντήρηση

1.3. Ημι-εντατική φυτεμένη οροφή (semi intensive green roof)

Οι φυτεμένες οροφές ημι-εντατικού τύπου είναι ένας ενδιάμεσος τύπος οροφής που περιλαμβάνει χαρακτηριστικά από τις εντατικές και τα εκτατικές φυτεμένες οροφές. Γενικώς, το υπόστρωμα έχει πάχος 100-200 mm, μπορεί να αποτελείται από μεγαλύτερο εύρος φυτών σε σχέση με το αντίστοιχο εύρος των εκτατικών δωματίων. Η απαίτηση σε άρδευση και συντήρηση έχει άμεση σχέση με το είδος των φυτών που θα επιλεγεί [6].

1.4. Φυτεμένη οροφή Βιοποικιλότητας (biodiverse roof)

Η φυτεμένη οροφή αυτού του τύπου, είναι παρόμοιας σύνθεσης με του εκτατικού τύπου, όμως σχεδιάζεται αποκλειστικά ώστε να αναπαριστά ένα οικοσύστημα το οποίο να προσελκύει συγκεκριμένη χλωρίδα και πανίδα. Το υπόστρωμα ανάπτυξης είναι ειδικά επιλεγμένο ώστε να επιτρέπει την ανάπτυξη ενδημικών φυτών στη διάρκεια του χρόνου [6].

1.5. Σύστημα φυτεμένης οροφής με ανεξάρτητα κομμάτια (modular green roof system)

Σε αυτού του τύπου τις οροφές χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα κομμάτια (εικόνα 2). Αυτά τα κομμάτια είναι συνήθως πλαστικά κιβώτια με μικρό πλάτος (0,5-1 m) και βάθος περίπου 10-20 cm. Το πλέγμα των κιβωτίων καλύπτει την επιφάνεια της στέγης με οφέλη παρόμοια με τα αντίστοιχα των φυτεμένων οροφών. Η μετακίνηση και η αντικατάσταση κάποιου κιβωτίου είναι πιο εύκολη από την επισκευή μιας φυτεμένης οροφής άλλου τύπου. Ο τύπος αυτός όμως είναι σχετικά καινούργιος, οπότε δεν έχει μελετηθεί επαρκώς ακόμα [7].



Εικόνα 2 Φυτεμένη οροφή με ανεξάρτητα κομμάτια [7].

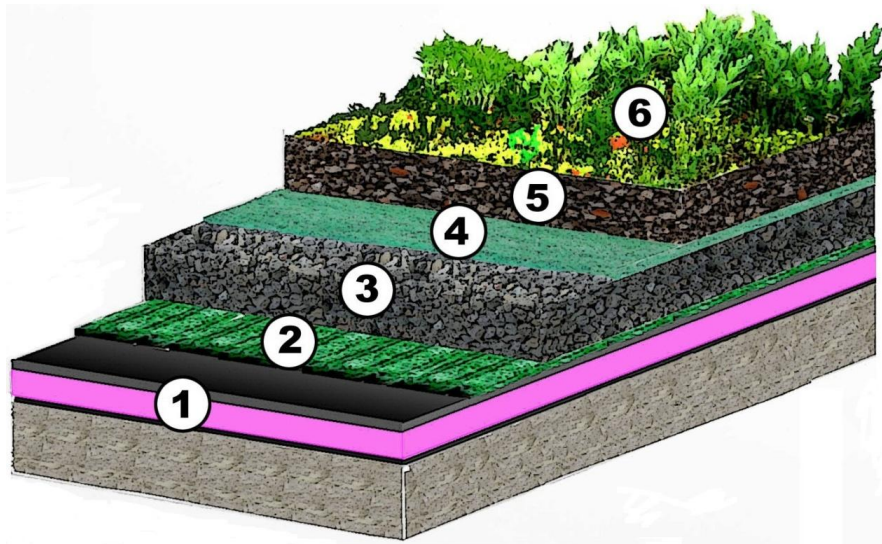
2. Διαμόρφωση φυτεμένης οροφής

Οι όροι, προϋποθέσεις και διαδικασίες κατασκευής φυτεμένων επιφανειών σε δώματα, στέγες και υπαίθριους χώρους κτηρίων δημόσιων ή ιδιωτικών, προκύπτουν από το ΦΕΚ Β' 14/11.01.2012. Συνοπτικά, το υπόστρωμα ανάπτυξης με τη διαστρωμάτωση των εξειδικευμένων υλικών δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τα 40 cm, πάνω από το μέγιστο επιτρεπόμενο ύψους του κτηρίου, ενώ η αντίστοιχη τιμή για το ύψος της βλάστησης είναι τα 3m. Επιπλέον, δεν επιτρέπεται η κατασκευή φυτεμένων επιφανειών επάνω στις απολήξεις των κλιμακοστασίων και τα φρεάτια των ανελκυστήρων, ενώ στην περίπτωση που η φυτεμένη επιφάνεια πρόκειται να εγκατασταθεί σε στέγη, θα πρέπει να ακολουθεί την κλίση της.

Για να ευδοκιμήσει μια φυτεμένη στέγη απαιτούνται κατάλληλα επίπεδα [6]:

- Ηλιοφάνειας
- Υγρασίας
- Αποστράγγισης
- Αερισμού του ριζικού συστήματος των φυτών
- Θρεπτικών

Στην εικόνα 3, απεικονίζεται η τομή μιας φυτεμένης στέγης όπου είναι αριθμημένα τα στοιχεία που την απαρτίζουν, για τα οποία θα γίνει εκτενής ανάλυση στη συνέχεια.



Εικόνα 3 Τομή φυτεμένης οροφής [8]

Όπου:

1. Επιφάνεια στέγης, μόνωση, στεγάνωση
2. Ζώνη προστασίας και αποθήκευσης νερού
3. Ζώνη αποστράγγισης
4. Ζώνη φίλτρου
5. Υπόστρωμα ανάπτυξης
6. Βλάστηση

Ένα σύστημα φυτεμένης οροφής θα πρέπει να διαμορφωθεί με την απαιτούμενη ισορροπία των παραπάνω απαιτήσεων σε συνδυασμό με τα παρακάτω:

2.1. Αντιριζική προστασία

Μια μεμβράνη η οποία προστατεύει μόνιμα την υδατοστεγή επίστρωση της οροφής, εμποδίζοντας το ριζικό σύστημα των φυτών να φτάσει την επίστρωση και να την διαπεράσει. Μπορεί να έχει τη μορφή ανεξάρτητης μεμβράνης ή τη μορφή μονολιθικής υδατοστεγούς ανθεκτικής σε ρίζες. Το στοιχείο αντιριζικής προστασίας μπορεί να είναι κάποιο χημικό ή ένα φυσικό φράγμα [6].

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά για την αξιολόγηση της απόδοσης της είναι:

- Πυκνότητα (kg/m^3)
- Τάση εφελκυσμού (N/mm^2)
- Επιμήκυνση θραύσης (%)

2.2. Ζώνη προστασίας και κατακράτησης υγρασίας

Γεώφασμα σε μορφή κλινοσκεπάσματος, διαθέσιμο σε διάφορα πάχη, γενικά μεταξύ 2-12 mm, όπου έχει διπλή λειτουργία. Προστατεύει την υδατοστεγή επίστρωση κατά την εγκατάσταση της φυτεμένης οροφής και αυξάνει την ικανότητα κατακράτησης νερού της οροφής [6].

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά για την αξιολόγηση της απόδοσης της είναι:

- Ικανότητα αποθήκευσης νερού (L/m^2)
- Πάχος (mm)
- Βάρος [ξηρό] (kg/m^2)
- Τάση εφελκυσμού (kN/m^2)

2.3. Ζώνη αποστράγγισης

Η ζώνη είναι διαθέσιμη σε μια ποικιλία υλικών όπως: σκληρό πλαστικό, πολυστυρένιο, χονδροειδές χαλίκι και θρυμματισμένο ανακυκλωμένο τούβλο, ανάλογα με τις λειτουργικές απαιτήσεις. Η ζώνη αποστράγγισης επιτρέπει στο πλεόνασμα του νερού να αποστραγγίζεται και έτσι εμποδίζει το λίμνασμα του νερού στο υπόστρωμα. Μερικές ζώνες αποστράγγισης επίσης ενσωματώνουν κύτταρα αποθήκευσης νερού για να κατακρατούν το πρόσθετο νερό το οποίο μπορεί να διαχέεται στην ζώνη υποστήριξης των φυτών κατά τη διάρκεια παρατεταμένων ξηρών περιόδων [6].

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά για την αξιολόγηση της απόδοσης της είναι:

- Ικανότητα αποθήκευσης νερού (L/m^2)
- Όγκος πλήρωσης (L/m^2)
- Βάρος [ξηρό] (kg/m^2)
- Ρυθμός ροής ($L/s/m^2$)
- Αντοχή σε θλίψη (kN/m^2)

2.4. Ζώνη φίλτρου

Η ζώνη φίλτρου αποτελείται από γεωύφασμα που εμποδίζει την έκπλυση λεπτόκοκκων υλικών και ιζημάτων από την φυτεμένη οροφή στη ζώνη αποθήκευσης ή αποστράγγισης ώστε να διατηρηθεί η διαπερατότητα [6].

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά για την αξιολόγηση της απόδοσης της είναι:

- Βάρος (kg/m^2)
- Τάση εφελκυσμού (kN/m^2)
- Ενεργό μέγεθος πόρων (m^2)
- Δύναμη διείδυσης (N)

2.5. Υπόστρωμα ανάπτυξης

Ένα τεχνητό υποκατάστατο του εδάφους που είναι ειδικά σχεδιασμένο για να παρέχει στα φυτά της φυτεμένης οροφής τον απαιτούμενο αέρα, νερό και θρεπτικά που χρειάζονται για να επιβιώσουν [6]. Το πάχος του εξαρτάται από το είδος των φυτών που έχει επιλεγεί και πρέπει να είναι μικρού βάρους. Για να είναι βιώσιμο το υπόστρωμα πρέπει να περιέχει υψηλά ποσοστά από μεταλλικά υλικά που δεν θα διασπαστούν κατά τη διάρκεια του χρόνου. Μπορεί να αποτελείται από διογκωμένα αδρανή (διογκωμένη άργιλος, διογκωμένος σχιστόλιθος), ελαφρόπετρα, ηφαιστειακά πετρώματα και μικρού βάρους αδρανή με υψηλό

πορώδες που να έχουν την δυνατότητα κατακράτησης νερού, απαραίτητο για την υποστήριξη των φυτών. Η σωστή αναλογία των μεταλλικών και των οργανικών υλικών πρέπει να είναι 80% (ή περισσότερο) και 20% (ή λιγότερο) αντίστοιχα. Το οργανικό υλικό στο αρχικά εγκατεστημένο υπόστρωμα ανάπτυξης θα διασπαστεί τα πρώτα 3 με 5 χρόνια. Όμως το φύλλωμα των φυτών που θα αποσυντίθεται θα επαναφορτίζει το απαιτούμενο οργανικό φορτίο για την ανάπτυξη των φυτών [9].

Το υπόστρωμα πρέπει να έχει μια σύνθεση που να παρέχει τις παρακάτω ιδιότητες [6]:

- Μικρού βάρους
- Ανθεκτικότητα στον αέρα και στη διάβρωση από νερό
- Απαλλαγμένο από ζιζάνια , ασθένειες και παράσιτα
- Καλή αγκύρωση των φυτών ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος ξεριζώματος
- Ανθεκτικότητα σε πυρκαγιά αποφεύγοντας υψηλά ποσοστά οργανικών υλικών
- Κατάλληλες τάσεις κατακράτησης/απελευθέρωσης νερού ώστε να κατακρατείται ικανό νερό για να καλύπτονται οι ανάγκες των φυτών χωρίς να λιμνάζει νερό στο υπόστρωμα
- Καλός αερισμός στο σημείο κορεσμού του νερού ώστε να αποφευχθεί η πλήρωση των πόρων του υποστρώματος με νερό με αποτέλεσμα να μην το διαπερνά ο αέρας
- Κατάλληλη παροχή θρεπτικών ώστε να επιτρέπεται η ανάπτυξη σύμφωνα με τις ανάγκες του φυτού

Για την εγκατάσταση των φυτεμένων οροφών, συνίσταται ένα πάχος όχι λιγότερο από 80 mm από αδρανή υλικά. Όμως σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρότερο πάχος όπου:

1. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν προ-καλλιεργημένα στρώματα βλάστησης και ως εκ τούτου το πάχος των αδρανών μπορεί να μειωθεί σε 60 mm
2. Κατασκευαστές έχουν αναπτύξει συστήματα για συγκεκριμένες εφαρμογές, παρέχοντας ένα πιο περιορισμένο εύρος πλεονεκτημάτων, μειώνοντας όμως το βάρος του συστήματος

Οι φυτεμένες οροφές που αποτελούνται εξολοκλήρου από υπόστρωμα ανάπτυξης, είναι φθηνότερες στην εγκατάστασή τους σε σχέση με τα στρώματα *sedum*, και έχουν ως στόχο την ανακύκλωση αποβλήτων (όπως θρυμματισμένα τούβλα), ενώ έχει βρεθεί ότι μπορούν να διατηρήσουν σπάνια είδη ασπόνδυλων και πτηνών. Κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο από θρυμματισμένα τούβλα ή απόβλητα από κατεδαφίσεις, όπως θρυμματισμένο τσιμέντο, σε μια προσπάθεια μίμησης εγκαταλελειμμένων τοποθεσιών που μπορούν να βρεθούν στο αστικό περιβάλλον. Σε περίπτωση που θρυμματισμένα τούβλα δεν είναι διαθέσιμα σε κοντινή απόσταση από την τοποθεσία κατασκευής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλα υλικά προκειμένου να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μεταφοράς των εμπορευμάτων [10].

Όμως τα απόβλητα από κατεδαφίσεις, χρειάζονται ειδική επεξεργασίας (απομάκρυνση καρφιών και χάλυβα) που μπορεί να αυξάνουν το κόστος. Ως εκ τούτου πρέπει να βρεθούν οικονομικά, ανακυκλωμένα και βιώσιμα εναλλακτικά υλικά των θρυμματισμένων τούβλων και των αποβλήτων από κατεδαφίσεις. Σε μια έρευνα, χρησιμοποιήθηκαν απόβλητα τα οποία συνήθως απορρίπτονται σε Χ.Υ.Τ.Α. όπως, ιλύς λυμάτων καθαρισμού, απόβλητα αργίλου, ιπτάμενη τέφρα και απόβλητα λατομείων. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία και συνδυασμό με οργανικά συστατικά μπορούν να αντικαταστήσουν τα υποστρώματα εμπορίου με παρόμοιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά [10].

Μια άλλη ενδιαφέρουσα επιλογή υλικού υποστρώματος αντί των συμβατικών πορωδών υλικών (διογκωμένος άργιλος, ελαφρόπετρα, φυσική πουζολάνη, διογκωμένος σχιστόλιθος) είναι το θρυμματισμένο ελαστικό προερχόμενο από ελαστικά αυτοκινήτων. Αυτή η επιλογή μπορεί να μειώσει την κατανάλωση αυτών των φυσικών υλικών, η μεταφορά και η επεξεργασία των οποίων απαιτεί την κατανάλωση μεγάλων ποσών ενέργειας. Επιπλέον, θα είναι ωφέλιμο από περιβαλλοντικής άποψης, καθώς θα μειωθούν τα απόβλητα ελαστικών. Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε από το πανεπιστήμιο της Lleida της Ισπανίας, όπου συγκρίθηκε υπόστρωμα από φυσική πουζολάνη με υπόστρωμα από θρυμματισμένο ελαστικό, προέκυψε ότι τα δυο υποστρώματα έχουν γενικά κοινά χαρακτηριστικά

και συμπεριφορά (παρόμοια ικανότητα κατακράτησης, μόνωση κ.α.). Επομένως, το υπόστρωμα από θρυμματισμένο ελαστικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακίνδυνα [11].

Όσον αφορά τα εμπορικά μείγματα υποστρώματος, υπάρχουν πολλοί τύποι που μπορεί να είναι ακριβότεροι από τα ειδικής παραγγελίας μείγματα, καθώς μπορεί να περιλαμβάνουν ανεπιθύμητα ή περιττά συστατικά. Το όφελος από τη χρήση εμπορικών μειγμάτων είναι ότι το κορεσμένο βάρος των μειγμάτων είναι άμεσα διαθέσιμο. Από την άλλη μεριά, τα μείγματα ειδικής παραγγελίας δίνουν στον κατασκευαστή της φυτεμένης οροφής την δυνατότητα επιλογής αδρανών και οργανικών υλικών τα οποία να είναι διαθέσιμα ή κατασκευάζονται τοπικά με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των μεταφορών και άρα την μείωση του κόστους. Για την εκτίμηση του κορεσμένου βάρους θα πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες δοκιμές [9].

2.6. Επιλογή χλωρίδας της φυτεμένης οροφής

Η επιλογή του κατάλληλου είδους φυτών (πίνακες 2 και 3) για μια φυτεμένη οροφή είναι πολύ σημαντικό ζήτημα και εξαρτάται από το επιθυμητό τελικό ύψος, την περίοδο ανθοφορίας, τον ιδανικό τύπο εδάφους για την καλύτερη ανάπτυξη των φυτών και για την επιθυμητή λειτουργία. Στην περίπτωση που επιδιώκεται η βελτίωση της κατακράτησης του βρόχινου νερού τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν είδη sedum, ενώ αν επιθυμείται η αύξηση της βιοποικιλότητας απαιτείται η χρήση μίγματος αυτοχθόνων φυτών (συνήθως επιλέγονται από ειδικούς οικολόγους). Η φύτευση με μόσχευμα ή με σπορά στο υπόστρωμα του εδάφους χρησιμοποιείται συνήθως στην περίπτωση των ποωδών φυτών, ενώ όταν γίνεται φύτευση με ρίζες, η τελευταία γίνεται σε ειδικά διαμορφωμένες περιοχές του υποστρώματος.

Όσον αφορά το κλίμα, διακυμάνσεις στην ηλιοφάνεια και στην θερμοκρασία του αέρα μπορούν να επηρεάσουν το μήκος, το χρόνο ανάπτυξης και τον κίνδυνο παγετού. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά του φυτού όπως το μέγεθος των φύλλων και το σχήμα θα επηρεάσουν την αντοχή σε ξηρασία και στον αέρα. Τέλος ο

προσανατολισμός του κτηρίου και των περιβαλλόντων κτηρίων θα επηρεάσουν τα επίπεδα σκίασης της οροφής [6], [12].

Πίνακας 2 Είδη φυτών κατάλληλα για φυτεμένες οροφές [12]

Είδος φυτού	Περίοδος ανθοφορίας	Τύπος εδάφους	Τελικό ύψος (cm)
Lavendula vera	Καλοκαίρι	Καλά στραγγισμένο	40-60
Sedum acre	Ιούνιος-Ιούλιος	Καλά στραγγισμένο	2-10
Erica spp.	Όλες τις εποχές	Όξινο	40-50
Dianthus deltoides	Ιούνιος-Σεπτέμβριος	Καλά στραγγισμένο	15-45
Armeria maritima	Απρίλιος-Μάιος	Οποιοδήποτε τύπου	10-20
Bellis perennis	Μάρτιος-Απρίλιος	Καλά στραγγισμένο	7-15
Campanula rotundifolia	Ιούλιος-Σεπτέμβριος	Καλά στραγγισμένο	15-40
Saponaria officinalis	Ιούνιος-Σεπτέμβριος	Καλά στραγγισμένο	30-60
Linaria vulgaris	Ιούλιος-Οκτώβριος	Οποιοδήποτε τύπου	30-80
Primula vulgaris	Μάρτιος-Ιούνιος	Οποιοδήποτε τύπου	8-15

Πίνακας 3 Είδη φυτών κατάλληλα για φυτεμένες οροφές σε μεσογειακά κλίματα [12]

Είδος φυτού	Περίοδος ανθοφορίας	Τύπος εδάφους	Τελικό ύψος (cm)
Nerium oleander	Καλοκαίρι-Φθινόπωρο	Οποιοδήποτε τύπου	80-90
Pyracantha sp.	Άνοιξη	Καλά στραγγισμένο	60-70
Myoporum sp.	Άνοιξη	Όξινο	80-90
Cotoneaster franchetti	Άνοιξη	Καλά στραγγισμένο	50-70
Hibiscus syriacus	Καλοκαίρι-Φθινόπωρο	Καλά στραγγισμένο	40-60
Cassia corymbosa	Καλοκαίρι-Φθινόπωρο	Καλά στραγγισμένο	40-60
Spiraea thumbergii	Άνοιξη	Οποιοδήποτε τύπου	40-50
Pyracantha sp.	Καλοκαίρι-Φθινόπωρο	Οποιοδήποτε τύπου	80-90
Myoporum sp.	Άνοιξη	Καλά στραγγισμένο	60-70
Cotoneaster franchetti	Άνοιξη	Όξινο	80-90

3. Σχεδιασμός και εγκατάσταση φυτεμένης οροφής

Εφόσον αποφασιστεί ο τύπος της φυτεμένης οροφής, θα πρέπει να ελεγχθεί αν η κατασκευή έχει την απαραίτητη υποστήριξη ή αν θα χρειαστεί επιπλέον. Πρέπει, λοιπόν, να εκτιμηθεί το κινητό και το νεκρό φορτίο του κτηρίου. Το σύνολο της κατασκευής συμπεριλαμβανομένου των φυτών και της ποσότητας του νερού που απαιτείται για τον κορεσμό του υποστρώματος, θεωρούνται το νεκρό φορτίο του κτηρίου. Η περίσσεια νερού (αφού έχει επιτευχθεί κορεσμός), το χιόνι και οι άνθρωποι που έχουν πρόσβαση στη φυτεμένη οροφή αποτελούν το κινητό φορτίο. Ο υπολογισμός των συνολικών απαιτήσεων σε φόρτιση είναι ευκολότερος και οικονομικότερος στην φάση σχεδιασμού του κτηρίου παρά στην εκ των υστέρων τοποθέτηση φυτεμένης οροφής σε ήδη υπάρχον κτήριο. Πολλά σχέδια εγκατάστασης φυτεμένων οροφών σε ήδη κατασκευασμένα κτήρια, εγκαταλείπονται σε αυτό το στάδιο λόγω των ανεπαρκών ικανοτήτων στήριξης του κτηρίου και του απαγορευτικού κόστους ενίσχυσης της κατασκευής. Αν και υπάρχουν τρόποι μείωσης του νεκρού φορτίου με την εγκατάσταση συστημάτων άρδευσης προκειμένου να μειωθεί το πάχος του υποστρώματος, τα υψηλά κινητά φορτία μπορεί να απαγορεύουν την χρήση της φυτεμένης οροφής από άτομα με αποτέλεσμα τον τελικό σχεδιασμό οροφής εκτατικού τύπου [9].

3.1. Παράμετροι που πρέπει να τεθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό των φυτεμένων οροφών

3.1.1. Επιρροές από παρακείμενες κατασκευές

3.1.1.1. Σκίαση

Ψηλά κτήρια σε κοντινή απόσταση από την φυτεμένη οροφή, μπορεί να δημιουργούν σκιές. Ανάλογα με τον προσανατολισμό, οι σκιές μπορεί να πέφτουν στη φυτεμένη οροφή διάφορες ώρες της ημέρας κατά τη διάρκεια του χρόνου.

Συνεπώς, απαιτείται προσοχή στην επιλογή των φυτών η οποία πρέπει να συμβαδίζει με τις ανάγκες των φυτών σε ηλιοφάνεια, ειδικά σε περιπτώσεις που η φυτεμένη οροφή δέχεται σκίαση όλη τη μέρα [9].

3.1.1.2. Αντανakλάσεις

Παρακείμενοι κάθετοι τοίχοι κατασκευασμένοι από γυαλί ή μέταλλο με μεγάλη αντανakλαστική ικανότητα μπορούν να ενισχύσουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι ακτίνες που αντανakλούνται από αυτές τι επιφάνειες μπορούν να ξηράνουν γρήγορα το υπόστρωμα και να αφυδατώσουν τα φυτά. Αυτές οι περιοχές απαιτούν φυτά με αντοχή στην ξηρασία και στην ζέστη και μπορεί να χρειάζονται συχνότερη άρδευση. Η αύξηση του πάχους του υποστρώματος μπορεί να βοηθήσει στην αντιστάθμιση του θερμικού κέρδους και στην κατακράτηση περισσότερου νερού ώστε να διατηρούνται τα φυτά ενυδατωμένα. Η θερμότητα από την ακτινοβολία σε αυτές τις περιοχές μπορεί να επεκτείνει την περίοδο ανάπτυξης των φυτών στα βόρεια κλίματα θερμαίνοντας την επιφάνεια της φυτεμένης οροφής [9].

3.1.1.3. Συγκομιδή βρόχινου νερού

Τα υψηλότερα παρακείμενα κτήρια έχουν την δυνατότητα να συλλέγουν το νερό της βροχής από μεγαλύτερα υψόμετρα και να το χρησιμοποιούν για την άρδευση της φυτεμένης οροφής. Μέσω στρατηγικών θέσεων των υδρορροών και σωλήνων απορροής ομβρίων υδάτων το νερό της βροχής μπορεί να συλλέγεται και να διοχετεύεται σε βαρέλια και δεξαμενές. Στη συνέχεια, το αποθηκευμένο νερό θα μπορεί να χρησιμοποιείται από το σύστημα άρδευσης της φυτεμένης οροφής [9].

3.1.1.4. Ανέλκυση υλικών της φυτεμένης οροφής

Το ύψος του κτηρίου καθορίζει διάφορες πτυχές της κατασκευής της φυτεμένης οροφής. Ο όγκος και το βάρος των υλικών που συνθέτουν τη φυτεμένη οροφή αποτελεί το ουσιαστικό πρόβλημα της φάσης κατασκευής. Γενικά, όσο πιο ψηλό το κτήριο τόσο πιο ακριβή θα είναι η μεταφορά των υλικών στο επίπεδο κατασκευής της φυτεμένης οροφής. Το ύψος των κτηρίων χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες: μέχρι 6 m, μεταξύ 6 m και 37 m και υψηλότερο από 37 m. Για ύψος μέχρι 6 m τα υλικά μπορούν να μεταφερθούν με την χρήση συμβατικών μηχανημάτων ανέλκυσης. Για τη δεύτερη κατηγορία συνήθως απαιτείται η χρήση γερανών για την μεταφορά των υλικών στο επίπεδο κατασκευής της φυτεμένης οροφής. Για ύψη μεγαλύτερα από 37 m χρησιμοποιούνται πυργογερανοί ή ανελκυστήρες [9].

3.1.1.5. Αέρας

Οι άνεμοι είναι συνήθως ισχυρότεροι σε μεγαλύτερα υψόμετρα και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή και διαρρύθμιση των φυτών στο υπόστρωμα. Τα ψηλά φυτά επηρεάζονται περισσότερο από τον άνεμο συνεπώς θα πρέπει να τοποθετούνται μακριά από τις άκρες της οροφής όπου οι άνεμοι είναι ισχυρότεροι. Συμπληρωματική στήριξη μπορεί να απαιτείται για τα ψηλά φυτά μέχρι να αναπτυχθεί το ριζικό τους σύστημα. Η περίμετρος της οροφής επηρεάζεται από ένα φαινόμενο γνωστό ως «wind vortex» κατά το οποίο ο αέρας που ανεβαίνει από τον τοίχο του κτηρίου δημιουργεί αρνητικές πιέσεις στην επιφάνεια της οροφής με αποτέλεσμα την δημιουργία δινών κατά μήκος της άκρης της στέγης. Αυτές οι περιοχές μπορεί να χρειάζεται να μείνουν κενές από βλάστηση, ενώ συχνά τοποθετούνται επιστρώσεις σκυροδέματος στις άκρες της στέγης προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το φαινόμενο. Το πιο σημαντικό γενικά στην περίπτωση των ισχυρών ανέμων είναι η σωστή ανάπτυξη του συστήματος των ριζών των φυτών ώστε να συγκρατείται το υπόστρωμα και να αποφευχθεί η απομάκρυνσή του λόγω του ισχυρού αέρα [9].

3.1.2. Εξοπλισμός στέγης

Εξοπλισμοί θέρμανσης, αερισμού και ψύξης των οποίων οι εξωτερικές μονάδες μπορεί να βρίσκονται στην επιφάνεια της στέγης αναμένεται να επηρεάσουν τον σχεδιασμό της φυτεμένης οροφής. Η απόρριψη των ανεμιστήρων καυσαερίων μπορεί να περιέχει αναθυμιάσεις που να βλάπτουν το σύστημα της φυτεμένης οροφής. Για παράδειγμα οι απορροφητήρες των κουζινών συχνά απαιτούν φίλτρο λιπών το οποίο περιέχει σταλάγματα τα οποία βλάπτουν τα φυτά και τις μεμβράνες της φυτεμένης οροφής. Οι εξωτερικές μονάδες απαιτούν συχνή συντήρηση οπότε είναι σημαντικός ο σχεδιασμός περιοχών πρόσβασης σε αυτές [9].

3.1.2.1. Ηλιακοί συλλέκτες

Ηλιακοί συλλέκτες συναντώνται συχνά στις στέγες ως μέρος του αιεφόρου σχεδιασμού και συλλογής ενέργειας. Αυτοί οι εξοπλισμοί μπορεί να απαιτούν επιπλέον ενίσχυση ώστε να στερεώνονται στην στέγη. Τοποθετώντας τα φυτά πίσω από αυτές τις περιοχές θα έχει ως αποτέλεσμα την ευκολότερη επιθεώρηση και επιδιόρθωση του εξοπλισμού. Οι συλλέκτες συχνά δημιουργούν σκιές στα φυτά οπότε θα πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή του είδους των φυτών στις περιοχές αυτές. Επιπλέον εξαιτίας την ικανότητας της φυτεμένης οροφής να μειώνει την θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, ενισχύεται η απόδοση της φωτοβολταϊκής λειτουργίας [9].

3.2. Δομικά κριτήρια σχεδιασμού

3.2.1. Διατμητική τάση

Ο κίνδυνος για την έκθεση του υποστρώματος σε υπερβολική διατμητική τάση ως αποτέλεσμα της απότομης κλίσης της στέγης με αποτέλεσμα την ολίσθησή του, πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό της φυτεμένης οροφής. Αντί-διατμητικά στοιχεία απαιτούνται συνήθως για κλίσεις μεγαλύτερες από 20°. Συχνές λύσεις περιλαμβάνουν διαφράγματα διατήρησης και φράγματα ολίσθησης [6].

3.2.2. Σύστημα στεγάνωσης

Ένα μεγάλο εύρος επιλογών είναι διαθέσιμο για τη στεγάνωση της φυτεμένης οροφής. Ένα εύρος μεμβρανών, στεγάνωση υγρής-εφαρμογής και μεταλλική επίστρωση μπορούν να εγκατασταθούν κάτω από το σύστημα της φυτεμένης οροφής. Μέτρα αποκατάστασης της στεγάνωσης απαιτούν εκτατικές έρευνες για τον εντοπισμό του σημείου βλάβης. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η αφαίρεση της φυτεμένης οροφής που έχει ήδη εγκατασταθεί αποτελεί δραστηριότητα έντονου εργατικού δυναμικού, σημαντικά κόστη μπορούν να προκύψουν αν εμφανιστούν προβλήματα στο σύστημα στεγάνωσης. Συνεπώς, η επιθεώρηση και ο έλεγχος της επίστρωσης της οροφής πριν την εγκατάσταση είναι επιτακτική ανάγκη. Όπου η επίστρωση της οροφής δεν παρέχει την απαραίτητη αντιριζική προστασία, η εγκατάσταση ενός ανεξάρτητου ριζικού φράγματος είναι υποχρεωτική [6].

3.2.3. Αέρας

Όπου στοιχεία φυτεμένων οροφών χρησιμοποιούνται ως έρμα ώστε να αποτρέπεται ο ξεριζωμός βλάστησης ή η απομάκρυνση αντικειμένων που δεν έχουν σταθεροποιηθεί μηχανικά εξαιτίας μεγάλης εντάσεως αέρα, ικανό βάρος πρέπει να ενσωματωθεί στην κατασκευή της οροφής. Σε αυτή την περίπτωση, ξηρά βάρη πρέπει να χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του συστήματος της φυτεμένης οροφής και κάποιο δίκτυο μπορεί να απαιτείται. Τα πιο ευαίσθητα σε διάβρωση σημεία της φυτεμένης οροφής είναι η περίμετρος της οροφής και πιο συγκεκριμένα οι γωνίες, για την προστασία των οποίων πρέπει να χρησιμοποιηθούν βαρύτερα υλικά όπως μεγαλύτερα βάρη για έρμα ή πλάκες πλακόστρωσης [6].

3.2.4. Πυρασφάλεια

Οι φυτεμένες οροφές όπως και κάθε επιφάνεια με φυτοκάλυψη, πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν την απαραίτητη αντοχή στην εξάπλωση της πυρκαγιάς, ακόμα και σε περιόδους παρατεταμένης ξηρασίας.

Η αντοχή μπορεί να αυξηθεί από:

- Αύξηση της περιεκτικότητας με μη-εύφλεκτα συστατικά (μεταλλικά αδρανή)
- Μείωση των εύφλεκτων συστατικών (οργανική ύλη)
- Πρόληψη ξηρασίας

Πιο συγκεκριμένα, για τον τύπο των εκτατικών φυτεμένων οροφών, όπου δεν είναι απαραίτητη η άρδευση, ο κίνδυνος πυρκαγιάς αντιμετωπίζεται με την ενσωμάτωση αντιπυρικών ζωνών. Επίσης το υπόστρωμα πρέπει να έχει 20 % το ανώτερο περιεκτικότητα σε οργανική ύλη και να γίνεται χρήση ποωδών φυτών καθώς συγκρατούν το νερό με αποτέλεσμα να μειώνεται ο κίνδυνος ξηρασίας. Επιπλέον, λωρίδες χωρίς βλάστηση που αποτελούνται από κροκάλες ή πλάκες από σκυρόδεμα πρέπει να διατηρούνται καθαρές από φυτά για την αποφυγή πρόκλησης πυρκαγιάς [6].

3.2.5. Άρδευση

Η άρδευση απαιτείται συνήθως κατά την αρχική εγκατάσταση των φυτεμένων οροφών. Ωστόσο, όταν η φυτοκάλυψη αναπτυχθεί, η άρδευση μπορεί να ελαττωθεί (για τις εντατικές και ημι-εντατικές φυτεμένες οροφές) ή να αποφευχθεί (για τις περισσότερες εκτατικές φυτεμένες οροφές) [6].

Η απαίτηση σε άρδευση εξαρτάται κυρίως από:

- Την απαίτηση νερού της ζώνης βλάστησης
- Την αποθηκευτική ικανότητα της φυτεμένης οροφής
- Την συχνότητα κατακρημνίσεων

3.2.6. Ασφάλεια και πρόσβαση

Εκτατική φυτεμένη οροφή και οροφή βιοποικιλότητας

Με πρόσβαση γενικά απαραίτητη μόνο για το προσωπικό κατασκευής και συντήρησης, κάποιου είδους συστήματος προστασίας πτώσης γενικά επαρκεί για την ασφαλή πρόσβαση του προσωπικού. Οι ειδικές απαιτήσεις συντήρησης και η διάταξη της οροφής θα καθορίσουν τον καταλληλότερο τύπο προστασίας. Γενικά ένα σύστημα αγκύρωσης επαρκεί στις περισσότερες περιπτώσεις [6].

Ημι-εντατική και εντατική φυτεμένη οροφή

Οι τύποι αυτοί απαιτούν υψηλότερα πρότυπα ασφάλειας εξαιτίας της αυξημένης συχνότητας και πυκνότητας των επισκεπτών είτε για να διεξάγουν έργα συντήρησης ή για το όφελος της αναψυχής που προσφέρουν οι φυτεμένες οροφές αυτού του τύπου, αφού σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές συχνά απουσιάζουν οι χώροι πρασίνου. Γενικά, επιπρόσθετα μέτρα όπως κιγκλιδώματα και φράγματα ασφαλείας απαιτούνται για αυτού του τύπου τις φυτεμένες οροφές [6], [13].

3.3. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες

3.3.1. Αποστράγγιση

Συνήθως οι φυτεμένες οροφές κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μια ζώνη από κοκκώδη υλικά (π.χ. χαλίκι) κάτω από ένα φίλτρο από ύφασμα που εμποδίζει την μεταφορά των σωματιδίων με μικρή διάμετρο, από το υπόστρωμα ανάπτυξης. Το νερό διηθείται μέσω του υποστρώματος και στη συνέχεια μέσω του φίλτρου και κινείται πλευρικά σε όλη την επιφάνεια της φυτεμένη οροφής μέσω του χαλικιού. Το πορώδες στρώμα κάτω από το υπόστρωμα είναι απαραίτητο για την αποστράγγιση της περίσσειας νερού καθώς μερικά είδη φυτών που χρησιμοποιούνται για τη βλάστηση της φυτεμένης οροφής απαιτούν καλά αποστραγγισμένο έδαφος για να αποφεύγονται οι ασθένειες από τα νερά που μπορεί να έχουν λιμνάσει στο υπόστρωμα. Αυτά τα συστήματα αποστράγγισης είναι αυξημένου βάρους και η εγκατάστασή τους είναι αρκετά δύσκολη.

Από την άλλη μεριά, τα γεωυφάσματα αποστράγγισης είναι ελαφρότερα και η εγκατάστασή τους είναι ευκολότερη αφού παράγονται σε ρολά. Έχουν ενσωματωμένα μαλακά υφάσματα που προστατεύουν τα υλικά της οροφής και φίλτρο από ύφασμα και είναι εμποτισμένα με αναστολείς ριζών στην άνω πλευρά [9].

3.3.2. Άρδευση

Η κατανομή του νερού στη φυτεμένη οροφή είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τη σωστή άρδευση. Για τις μικρές φυτεμένες οροφές η άρδευση μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας απλούς εκτοξευτήρες νερού για χλοοτάπητα και με σωλήνες κήπων. Οι κοινοί εκτοξευτήρες νερού μπορούν να διανείμουν περίπου 2 cm νερού σε επιφάνεια 450 m² σε διάρκεια 45 min. Όσον αφορά τις μεγάλες φυτεμένες οροφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυο τύποι κατανομής: άρδευση με σταγόνες ή άρδευση δια τεχνητής βροχής. Στην περίπτωση της άρδευσης με σταγόνες, μικρές

ποσότητες νερού διανέμονται απευθείας στο χώμα στη βάση των φυτών μειώνοντας έτσι την ποσότητα του νερού που χάνεται κατά την εξάτμιση και την απορροή. Τα συστήματα άρδευσης αυτού του τύπου αποτελούνται από σειρές σωλήνων με εγκοπές που απελευθερώνουν μια σταγόνα τη φορά επιτρέποντας την άρδευση με τη μικρότερη πίεση νερού. Η άρδευση δια τεχνητής βροχής αναφέρεται στη χρήση συσκευών εκτόξευσης νερού μέσω του αέρα, αν και σε αυτή τη μέθοδο παρατηρούνται απώλειες νερού κατά την εξάτμιση [9].

3.4. Μέθοδοι εγκατάστασης των παραμέτρων που συντελούν την φυτεμένη οροφή

3.4.1. Κατακράτηση υγρασίας

3.4.1.1. Υφάσματα

Τα γεωυφάσματα κατακράτησης υγρασίας, απορροφούν το νερό όταν αυτό είναι διαθέσιμο και μπορούν να το αποθηκεύσουν για την ενυδάτωση των φυτών. Υπάρχει διαφορά στις απόψεις των καλλιεργητών δενδροκηπευτικών, για το αν τα φυτά μπορούν να απορροφήσουν το αποθηκευμένο νερό όταν το γεωύφασμα τοποθετείται κάτω από το αντιριζικό στρώμα, καθώς οι ρίζες πρέπει να βρίσκονται σε επαφή με τη ζώνη αποθήκευσης ώστε να έχουν την ικανότητα απορρόφησης νερού. Κάποια από αυτά τα υλικά, όπως τα παπλώματα, λιθοβάμβακα μπορούν να απορροφήσουν μεγάλες ποσότητες νερού. Αναλόγως με το κλίμα της περιοχής, αυτά τα υλικά μπορούν να παραμένουν υγρά για μεγάλο χρονικό διάστημα γεγονός που μπορεί να είναι επιβλαβές για τα είδη sedum και τα παχύφυτα (succulents) καθώς δεν αντέχουν υγρασία στις ρίζες τους για παρατεταμένες περιόδους [9].

3.4.1.2. Φίλτρο από ύφασμα

Τα φίλτρα από ύφασμα εμποδίζουν την έξοδο των σωματιδίων από τη φυτεμένη οροφή μέσω του νερού της απορροής και την είσοδό τους στο σύστημα αποστράγγισης. Συχνά, τα φίλτρα αυτά, περιέχουν χημικά που εμποδίζουν την ανάπτυξη των ριζών και ως εκ τούτου έχουν διπλό ρόλο, κατακρατούν τα σωματίδια του υποστρώματος και ταυτόχρονα εμποδίζουν την ανάπτυξη των ριζών. Είναι συνήθως μικρού βάρους και κατακρατούν μικρή ποσότητα νερού [9].

3.4.2. Αντιριζική προστασία

3.4.2.1. Υφάσματα

Φίλτρα από ύφασμα που περιέχουν χημικά τα οποία εμποδίζουν την ανάπτυξη των ριζών, αποτρέποντας την δημιουργία βλάβης στα υλικά στεγάνωσης από την ανάπτυξη των ριζών. Τα συγκεκριμένα φίλτρα είναι μικρού βάρους και έχουν σχεδιαστεί για να εμποδίζουν την ανάπτυξη των ριζών των μικρών φυτών. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για τη χρήση σε μικρού πάχους φυτεμένων οροφών με είδη sedum και παχύφυτα με ινώδη ριζικά συστήματα [9].

3.4.2.2. Θερμικό πλαστικό

Τα αντιριζικά συστήματα θερμικού πλαστικού είναι πιο ακριβά από τα φίλτρα από ύφασμα, αλλά παρέχουν προστασία από μεγαλύτερα φυτά όπως μικρά δέντρα, θάμνοι κ.α.. Όταν οι ραφές θερμοσυγκολληθούν σχηματίζεται μια μονολιθική επιφάνεια αδιαπέραστη από νερό και ρίζες. Συνήθως τοποθετούνται κάτω από τη ζώνη αποστράγγισης και πάνω από υλικά στεγάνωσης [9].

3.4.3. Ζώνη αποστράγγισης

3.4.3.1. Αδρανή

Η μεταφορά και η διανομή των αδρανών υλικών στην οροφή του κτηρίου απαιτεί υψηλής εντάσεως εργασία και η εγκατάστασή τους είναι ακριβότερη από τα γεωυφάσματα αποστράγγισης. Το βάρος των αδρανών ανά ίντσα (2,54 cm) πάχους μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 20 kg/m² [9].

3.4.3.2. Γεωυφάσματα

Τα γεωυφάσματα αποστράγγισης είναι μικρού βάρους σε μορφή ρολών που απλά ξετυλίγονται πάνω στην επιθυμητή επιφάνεια [9].

3.4.3.3. Συνδυασμός πυρήνα αποστράγγισης και αντιριζικής προστασίας

Αυτός ο τύπος αποστράγγισης είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος με εύκολη εγκατάσταση και συνήθως συμπεριλαμβάνει ένα φίλτρο από ύφασμα επικολλημένο στην κάτω επιφάνεια του πυρήνα αποστράγγισης. Ένα υλικό αντιριζικής προστασίας είναι επικολλημένο στην άνω επιφάνεια του πυρήνα [9].

3.4.4. Στεγάνωση

Τα υλικά υγρής εφαρμογής όπως το θερμό τροποποιημένο καουτσούκ, σχηματίζουν μονολιθικές μεμβράνες χωρίς ραφές. Μερικά συστήματα αποτελούνται από πολλές στρώσεις που αυξάνουν την ανθεκτικότητα και χρησιμοποιούνται συνήθως για την στεγάνωση υποστρωμάτων σκυροδέματος. Το υλικό εφαρμόζεται απευθείας στο σκυρόδεμα και σχηματίζει μια μεμβράνη πλήρως επικολλημένη στην στέγη με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η πλάγια μετακίνηση του νερού μεταξύ της μεμβράνης

και της στέγης. Αν η μεμβράνη έχει υποστεί ζημιά, τότε το νερό μπορεί να κατευθυνθεί μόνο μέσω του σκυροδέματος, οπότε η περιοχή που έχει υποστεί ζημιά μπορεί να εντοπιστεί εύκολα. Η γρήγορη εγκατάσταση των μεμβρανών υγρής εφαρμογής τις καθιστά οικονομικότερες για την περίπτωση μεγάλων έργων [9].

Οι μεμβράνες σε μορφή ρολών διατίθενται σε ρολά ποικίλων μηκών και πλατών. Τα υλικά αυτά εγκαθίστανται με επικόλληση, με μηχανική επισύναψη ή με απλή τοποθέτηση. Η επιλογή της πλήρους επικόλλησης μειώνει την μετανάστευση του νερού κάτω από την μεμβράνη σε περίπτωση διαρροής, με αποτέλεσμα την μείωση της φθοράς της μόνωσης της οροφής και του εσωτερικού του κτηρίου. Ο εντοπισμός των περιοχών διαρροής είναι συνήθως εύκολη υπόθεση επειδή η διαρροή φαίνεται συνήθως στο εσωτερικό του κτηρίου κοντά στην περιοχή βλάβης. Στην περίπτωση της μηχανικής επισύναψης, αν και οικονομικότερη της πλήρους επικόλλησης, επειδή η επισύναψη γίνεται με βίδες υπάρχει πιθανότητα πρόκλησης βλάβης λόγω της πίεσης που προκαλείται από το βάρος της φυτεμένη οροφή πάνω στην επιφάνεια της κεφαλής της βίδας. Τέλος, η μέθοδος της απλής τοποθέτησης, όπου η μεμβράνη απλώς τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια της στέγης και στερεώνεται με έρμα, είναι η πιο οικονομική τοποθέτηση. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πλευρική μετανάστευση του νερού σε περίπτωση διαρροής με αποτέλεσμα τον δύσκολο εντοπισμό του σημείου διαρροής [9].

3.5. Τύποι μόνωσης και μεμβρανών οροφής

3.5.1. Μόνωση οροφής

Οι τύποι μόνωσης που χρησιμοποιούνται είναι ποικίλοι: ανάλογα με την αντοχή τους στην υγρασία και τις υψηλές θερμοκρασίες, αν θα τοποθετηθούν πάνω ή κάτω από τα υλικά στεγάνωσης, αν θα είναι σε μορφή πλακών ή παπλώματος ή αν η εφαρμογή της θα γίνει με υλικά σε υγρή μορφή. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι μόνωσης είναι [9]:

3.5.1.1. Πολυισοκυανικός (polyisocyanurate)

- Κύρια μόνωση οροφής
- Πρέπει να διατηρείται ξηρή
- Μπορεί να έχει μίας στρώσης μεμβράνες πλήρως επικολλημένες
- Εγκαθίστανται κάτω από την μεμβράνη της οροφής
- Πρέπει να έχει πλάκα καλύμματος για την εφαρμογή υγρής ασφάλτου ή καουτσούκ
- Βάρος ανά ίντσα (2,54 cm) πάχους: 1-1,5 kg/m²

3.5.1.2. Εξωθημένο Πολυστυρένιο (extruded polystyrene)

- Κύρια μόνωση οροφής
- Αδιαπέραστο από το νερό
- Μπορεί να εγκατασταθεί πάνω ή κάτω από την μεμβράνη της οροφής
- Πρέπει να έχει πλάκα καλύμματος για πλήρως επικολλημένες μεμβράνες μιας στρώσης και για την εφαρμογή υγρής ασφάλτου ή καουτσούκ
- Βάρος ανά ίντσα (2,54 cm) πάχους: 1,25 kg/m²

3.5.1.3. Διογκωμένο Πολυστυρένιο (expanded polystyrene)

- Κύρια μόνωση οροφής
- Πρέπει να διατηρείται ξηρή
- Εγκαθίστανται κάτω από την μεμβράνη της οροφής
- Πρέπει να διαθέτει πλάκα καλύμματος για πλήρως επικολλημένες μεμβράνες μιας στρώσης και για την εφαρμογή υγρής ασφάλτου ή καουτσούκ
- Βάρος ανά ίντσα (2,54 cm) πάχους: 0,5-1 kg/m²

3.5.1.4. Σανίδα FESCO (FESCO board)

- Κύρια μόνωση οροφής ή σανίδα καλύμματος για μονώσεις με μορφή αφρού
- Πρέπει να διατηρείται ξηρή
- Εγκαθίστανται κάτω από την μεμβράνη της οροφής
- Πρέπει να είναι πλήρως ή ελαφρώς επικολλημένη όταν τοποθετείται κάτω από τη φυτεμένη οροφή σαν μηχανικός συνδετήρας
- Μπορεί να φθείρει την μεμβράνη της οροφής όταν το βάρος της φυτεμένης οροφής εγκαθίστανται πάνω από της περιοχές που υπάρχουν μηχανικοί συνδετήρες
- Βάρος ανά ίντσα (2,54 cm) πάχους: 3,85 kg/m²

3.5.2. Μεμβράνες οροφής

3.5.2.1. EPDM (ethylene propylene diene monomer)

- Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μεμβράνη
- Χαμηλού κόστους
- Μεγάλου μεγέθους πάπλωμα οπότε ελαττώνονται οι ραφές
- Μεγάλη ανθεκτικότητα και αντιριζική αντοχή
- Μη ανθεκτική σε χημικά και έλαια οπότε δεν συστήνεται για χρήση σε οροφές εστιατορίων
- Κοινά πάχη: 45 mm (1,45 kg/m²), 60 mm (2 kg/m²), 90 mm (3,15 kg/m²)

3.5.2.2. TPO (thermoplastic polyolefin)

- Αντανακλαστική λευκή επιφάνεια
- Θερμοσυγκόλληση ραφών
- Μεγάλη ανθεκτικότητα και αντιριζική αντοχή
- Κοινά πάχη: 45 mm (1,16 kg/m²), 60 mm (1,57 kg/m²), 80 mm (2,1 kg/m²)

3.5.2.3. PVC (polyvinyl chloride)

- Αντανακλαστική λευκή επιφάνεια
- Θερμοσυγκόλληση ραφών
- Μεγάλη ανθεκτικότητα και αντιριζική αντοχή
- Μεγάλη ανθεκτικότητα σε χημικά και έλαια
- Κοινά πάχη: 45 mm (1,16 kg/m²), 60 mm (1,57 kg/m²), 80 mm (2,1 kg/m²)

3.5.2.4. Ενσωματωμένης στέγης (BUR)

- Συχνά επικαλύπτεται από χαλίκι
- Χαμηλού κόστους
- Χαμηλή αντιριζική αντοχή
- Μη ανθεκτική σε χημικά και έλαια οπότε δεν συστήνεται για χρήση σε οροφές εστιατορίων
- Κοινό βάρος: 10-15 kg/m²

3.5.2.5. Τροποποιημένη άσφαλτος (modified bitumen)

- Συχνά χρησιμοποιούμενη μεμβράνη οροφής ως κάλυμμα για τα συστήματα ενσωματωμένης στέγης
- Χαμηλού κόστους
- Χαμηλή αντιριζική αντοχή
- Μη ανθεκτική σε χημικά και έλαια οπότε δεν συστήνεται για χρήση σε οροφές εστιατορίων
- Κοινό βάρος: 5-8,75 kg/m²

3.5.2.6. Μεμβράνη υγρής εφαρμογής

- Διαθέσιμη σε θερμή ειδικά (καουτσούκ) τροποποιημένη άσφαλτο και συνθετική μεμβράνη υγρής μορφής
- Ιδανική για υπόστρωμα μονολιθικού σκυροδέματος
- Χαμηλού κόστους
- Χαμηλή αντιριζική αντοχή
- Κοινό βάρος: 3,75-7,5 kg/m²

3.5.2.7. Μεταλλική στέγη

Αν και οι φυτεμένες οροφές πάνω από μεταλλική μόνωση εντοπίζονται σπάνια στην Ευρώπη, μελέτες έχουν δείξει ότι η μεταλλική μόνωση είναι μακροχρόνια, μικρού βάρους και είναι κατάλληλη για τις φυτεμένες οροφές. Ενώ, το αρχικό κόστος είναι αρκετά μεγάλο, η διάρκεια ζωής της στέγης μπορεί να ξεπεράσει τα 100 χρόνια. Η μεταλλική μόνωση έχει βάρος συνήθως 5-7,5 kg/m² [9].

4. Οφέλη από τη χρήση των φυτεμένων οροφών

Τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση των φυτεμένων οροφών είναι ποικίλα και δεν περιορίζονται μόνο στην εξοικονόμηση ενέργειας για το κτήριο αλλά έχουν μεγαλύτερη κλίμακα. Στον πίνακα 4, παρουσιάζονται συνοπτικά αυτά τα οφέλη, μερικά από τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Πίνακας 4 Οφέλη από τη χρήση φυτεμένης οροφής [5],[6], [14]

Οφέλη για την οροφή	Οφέλη για το κτήριο	Οφέλη σε ευρύτερη κλίμακα
Θερμοπερατότητα	Θερμικό φορτίο	Φαινόμενο της θερμικής νησίδας
Θερμική αδράνεια	Θερμοκρασιακή άνεση	Φιλτράρισμα αιωρούμενων σωματιδίων
Μείωση ηχορύπανσης	Ακουστική άνεση	Απορρόφηση CO ₂ και παραγωγή O ₂
Μείωση ηλιακής απορρόφησης	Ενεργειακή κατανάλωση	Μείωση της απορροής όμβριων υδάτων
Αύξηση διάρκειας ζωής	Μικροκλίμα	Αύξηση βιοποικιλότητας στις πόλεις

4.1. Οφέλη για το κτήριο

4.1.1. Μείωση των απαιτήσεων σε ψύξη και θέρμανση

Στις μεγάλες πόλεις οι οποίες είναι ενεργειακά απαιτητικές, ένας φαύλος κύκλος δημιουργείται καθώς τα θερμικά φορτία από τις κλιματιστικές μονάδες που χρησιμοποιούνται για να ψύξουν τα κτήρια απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα της πόλης. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγαλύτερα ψυκτικά φορτία για τα κτήρια [15]. Επειδή εκτιμάται ότι τα κτήρια είναι υπεύθυνα για το 39% της ολικής κατανάλωσης ενέργειας και για το 71% της ηλεκτρικής κατανάλωσης, η εφαρμογή της τεχνολογίας των φυτεμένων οροφών σε ευρεία κλίμακα θα μπορούσε να επηρεάσει σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση λόγω των δυνατοτήτων εξοικονόμησης που προσφέρουν [16].

Σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την περιοχή της Αθήνας όπου μοντελοποιήθηκε ένα κτήριο χωρίς φυτεμένη οροφή και στη συνέχεια έγινε

προσθήκη φυτεμένης οροφής, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα: η εγκατάσταση της φυτεμένη οροφής είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί σημαντικά το φορτίο ψύξης για τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο, της τάξης του 15-39 % για το συνολικό κτήριο και 58% και τον υποκείμενο του της φυτεμένης οροφής όροφο. Όσον αφορά τις απαιτήσεις σε θέρμανση, για τους μήνες Ιανουάριο-Απρίλιο και Οκτώβριο-Δεκέμβριο, παρατηρήθηκε μείωση της τάξης του 2-8 % για το σύνολο του κτηρίου και 5-17% για τον τελευταίο όροφο. Συνεπώς, η εγκατάσταση φυτεμένης οροφής συνεισφέρει περισσότερο στη μείωση των απαιτήσεων για ψύξη [12].

Παρόμοιο πόρισμα για τα ψυκτικά φορτία, προέκυψε και από μια άλλη μελέτη που διεξήχθη επίσης στην περιοχή της Αθήνας, όπου εγκαταστάθηκε φυτεμένη οροφή σε νηπιαγωγείο. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε μείωση του φορτίου ψύξης της τάξης του 6-49 % για ολόκληρο το κτήριο ενώ για τον όροφο κάτωθεν της φυτεμένης οροφής, παρατηρήθηκε μείωση στο εύρος 12-87 % [17].

Τέλος, για τη φυτεμένη οροφή που είναι εγκατεστημένη στο δημαρχείο του Σικάγο των Η.Π.Α. (φωτογραφία στο παράρτημα) υπολογίζεται ότι αποφέρει 9270 kWh το χρόνο σε εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη, ενώ αποφέρει 740 εκατομμύρια BTUs το χρόνο σε εξοικονόμηση για θέρμανση. Το σύνολο της εξοικονόμησης εκτιμάται στα \$3600 ανά έτος [7].

4.1.2. Διάρκεια ζωής της φυτεμένης οροφής

Η διάρκεια ζωής μιας τυπικής συμβατικής οροφής αναμένεται στα 20 χρόνια. Όταν οι οροφές αυτές αντικαθίστανται, τα παλιά υλικά που τις συντελούσαν καταλήγουν συνήθως σε Χ.Υ.Τ.Α. όπου όχι μόνο καταλαμβάνουν πολύτιμο χώρο αλλά μπορεί να είναι υπεύθυνα για την διαφυγή ρύπων. Από την άλλη μεριά η διάρκεια ζωής μιας φυτεμένης οροφής υπολογίζεται στα 45 χρόνια περίπου. Η προβλεπόμενη τιμή, επιβεβαιώνεται από μια φυτεμένη οροφή σε εγκατάσταση επεξεργασίας νερού στη Ζυρίχη της Ελβετίας, η οποία εγκαταστάθηκε το 1914 και επισκευάστηκε για πρώτη φορά το 2005, δηλαδή μετά από 91 χρόνια [16].

Η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής είναι αποτέλεσμα της δράσης των φυτεμένων οροφών, καθώς μειώνουν την έκθεση της στέγης στις δυο πιο καταστροφικές δυνάμεις για τα υλικά της οροφής, δηλαδή τις υπεριώδεις ακτίνες και την μεγάλη διακύμανση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι υπεριώδεις ακτίνες υποβαθμίζουν την δυνατότητα διαστολής των υλικών, ενώ η διακύμανση της θερμοκρασίας επηρεάζει την ελαστικότητα των υλικών [9].

4.1.3. Οικονομικά οφέλη

Ενώ κάποια μελλοντική κυβερνητική πολιτική μπορεί να αυξήσει τα οικονομικά οφέλη για τους ιδιοκτήτες των κτηρίων με φυτεμένης οροφές, η αποπληρωμή της αρχικής επένδυσης μπορεί να γίνει λόγω:

- Της μείωσης του ενεργειακού κόστους λόγω της χαμηλότερης απαίτησης σε ενεργειακή κατανάλωση ως αποτέλεσμα την μονωτικής δράσης του υποστρώματος και των στρωμάτων φύτευσης και αποστράγγισης [6].
- Της αύξησης της διάρκειας ζωής της οροφής λόγω της φυτοκάλυψης που προστατεύει την μεμβράνη και ως εκ τούτου μειώνοντας την θερμική καταπόνηση που προκαλείται από τις ακτίνες UV [6].

4.1.4. Παραγωγικότητα

Γενικά, φαίνεται ότι οι εργαζόμενοι τείνουν να δουλεύουν καλύτερα και πιο παραγωγικά όταν το περιβάλλον εργασίας τους είναι υψηλού επιπέδου. Έρευνες δείχνουν ότι η παραγωγικότητα μπορεί να βελτιωθεί κατά 4-10 % βελτιώνοντας τις εσωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες όπως την ποιότητα του αέρα, τον φωτισμό και τον έλεγχο του θορύβου. Αν επίσης αναλογιστούμε ότι οι κάτοικοι των βιομηχανικών χωρών, ξοδεύουν κατά μέσο όρο 80-90% της ζωής τους σε

εσωτερικούς χώρους η καλυτέρευση των εσωτερικών συνθηκών είναι πολύ σημαντική [18].

4.1.5. Ηχομόνωση

Ο υπερβολικός θόρυβος δεν είναι μόνο ενοχλητικός αλλά μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχές της ανθρώπινης υγείας όπως διαταραχές ακοής, υπέρταση, ισχαιμική καρδιοπάθεια και διαταραχές ύπνου. Στις αστικές περιοχές υψηλά επίπεδα θορύβου εντοπίζονται συνήθως σε δρόμους με έντονη κυκλοφορία, σε κλειστούς χώρους που περιβάλλονται από ψηλά κτήρια, σε βιομηχανικές περιοχές ή κοντά σε αεροδρόμια.

Η ποσότητα της ηχητικής ενέργειας που προωθείται από τις θορυβώδης πλευρές ενός κτηρίου στις ήσυχες πλευρές μέσω της οροφής, εξαρτάται από το ύψος, το πλάτος και το σχήμα του κτηρίου. Σε αυτή την περίπτωση οι φυτεμένες οροφές στον τελευταίο όροφο των κτηρίων μπορούν να απορροφούν τα ηχητικά κύματα και ειδικότερα τα κύματα περίθλασης. Ο ήχος μπορεί να μειωθεί από τις φυτεμένες οροφές με δυο τρόπους: λόγω της αυξημένης μόνωσης που προσφέρουν και λόγω της απορρόφησης των ηχητικών κυμάτων εξαιτίας των περιθλαστικών εμποδίων. Ο συνδυασμός του εδάφους, των φυτών και των παγιδευμένων στρωμάτων αέρα μέσα στο σύστημα της φυτεμένης οροφής μπορεί να δράσει σαν φράγμα ηχομόνωσης. Ακόμα, η αύξηση του βάθους του υποστρώματος μέχρι τα 15-20 cm, αυξάνει την ηχομονωτική δράση της φυτεμένη οροφή (περεταίρω αύξηση του βάθους όμως δεν αυξάνει τη δράση σημαντικά). Πολύ σημαντική είναι και η θέση της φυτεμένη οροφή, η οποία πρέπει να είναι η βέλτιστη ανάλογα με το φάσμα των ηχητικών κυμάτων τα οποία απορροφούνται, αντανακλώνονται και εκτρέπονται.

Το υπόστρωμα τείνει να εμποδίζει τις χαμηλές συχνότητες λόγω του μεγάλου πορώδους που επιτρέπει στα ακουστικά κύματα να εισέρθουν στο υπόστρωμα και να απορροφηθούν από το υλικό. Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κυμάτων και της στερεάς φάσης του υποστρώματος, παρατηρείται εξασθένιση στα ηχητικά κύματα. Όμως η παρουσία υγρασίας

επηρεάζει τα πορώδη υλικά και συνήθως μειώνει την ικανότητά τους να απορροφούν τα ηχητικά κύματα. Από την άλλη μεριά, η βλάστηση τείνει να εμποδίζει τις υψηλές συχνότητες. Σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε από το πανεπιστήμιο του Ghent στο Βέλγιο, προέκυψε ότι η χρήση εκτατικών δωματίων οδηγεί σε σημαντική μείωση των ηχητικών κυμάτων και οι ακουστικές βελτιώσεις μπορεί να υπερβαίνουν τα 10 dB. [13], [16], [19], [20].

4.1.6. Οφέλη λόγω του φυλλώματος

Στα θερμά κλίματα, έχει παρατηρηθεί ότι η θερμότητα που έχει συσσωρευτεί κατά τη διάρκεια της ημέρας σε μια στέγη χωρίς ή με ελλιπή μόνωση συνεχίζει να εισχωρεί και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι φυτεμένες οροφές υπέστησαν λιγότερη συσσώρευση θερμότητας και ως εκ τούτου η εισχώρηση κατά τις βραδινές ώρες ήταν πολύ πιο ήπια [21]. Αυτό είναι λογικό εφόσον, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού μια εκτεθειμένη στον ήλιο επιφάνεια μπορεί να φτάσει ακόμα και τους 80 °C, όταν την ίδια περίοδο μια ισοδύναμη επιφάνεια μιας φυτεμένης οροφής έχει θερμοκρασία μόλις 27 °C [3]. Αυτή η τεράστια διαφορά στη θερμοκρασία παρατηρείται εξαιτίας της εξατμισοδιαπνοής καθώς μεγάλες ποσότητες της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να μετατραπούν σε λανθάνον φορτίο το οποίο εμποδίζει την αύξηση της θερμοκρασίας και λόγω της φυσικής σκιάς που προσφέρει το φύλλωμα της φυτεμένης οροφής με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του εδάφους να είναι χαμηλότερη από αυτή του ατμοσφαιρικού αέρα. Την χειμερινή περίοδο συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή η θερμοκρασία του εδάφους είναι μεγαλύτερη από αυτή του ατμοσφαιρικού αέρα επειδή το φύλλωμα δρα σε αυτή την περίπτωση ως στρώμα μόνωσης και εμποδίζει την μεταφορά θερμότητας μεταξύ της φυτεμένης οροφής και του ατμοσφαιρικού αέρα [5], [15].

Σύμφωνα με τις υπέρυθρες φωτογραφίες από μια φυτεμένη οροφή στην περιοχή του Λουτρακίου, στην επιφάνεια της οροφής το εύρος θερμοκρασίας που παρατηρήθηκε ήταν μεταξύ 26 και 40 °C. Πιο συγκεκριμένα, όπου η βλάστηση ήταν πυκνή και σκούρα πράσινη η θερμοκρασία που μετρήθηκε ήταν μεταξύ 26 και 29

°C, όπου υπήρχε αραιή κόκκινη βλάστηση το αντίστοιχο εύρος ήταν 36 και 38 °C ενώ όπου υπήρχε γυμνό έδαφος η θερμοκρασία ήταν 40 °C. Το αντίστοιχο εύρος θερμοκρασίας για γυμνές οροφές χωρίς φυτεμένη οροφή κυμαίνεται από 42 έως 48 °C [22].

Μετρώντας την θερμοκρασία του αέρα σε διάφορα ύψη πάνω από την επιφάνεια της φυτεμένης οροφής, διαπιστώθηκε πως μετά το ηλιοβασίλεμα η θερμοκρασία του αέρα πάνω από τη βλάστηση είχε μειωθεί σημαντικά και συνέχιζε να μειώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το έδαφος χωρίς βλάστηση αντιθέτως, επανακτινοβολούσε την αποθηκευμένη θερμότητα αυξάνοντας έτσι την θερμοκρασία του αέρα [21].

Η απουσία στρώματος μόνωσης, διευρύνει τη διαφορά μεταξύ των θερινών και χειμερινών εσωτερικών θερμοκρασιών, όμως η παρουσία της φυτεμένης οροφής έχει ως αποτέλεσμα την μείωση αυτής της διαφοράς σε σχέση με μια μη συμβατική στέγη. Αν και η παρουσία της φυτεμένης οροφής μπορεί να βελτιώσει την θερμική προστασία του κτηρίου δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να αντικαταστήσει την μόνωση [23].

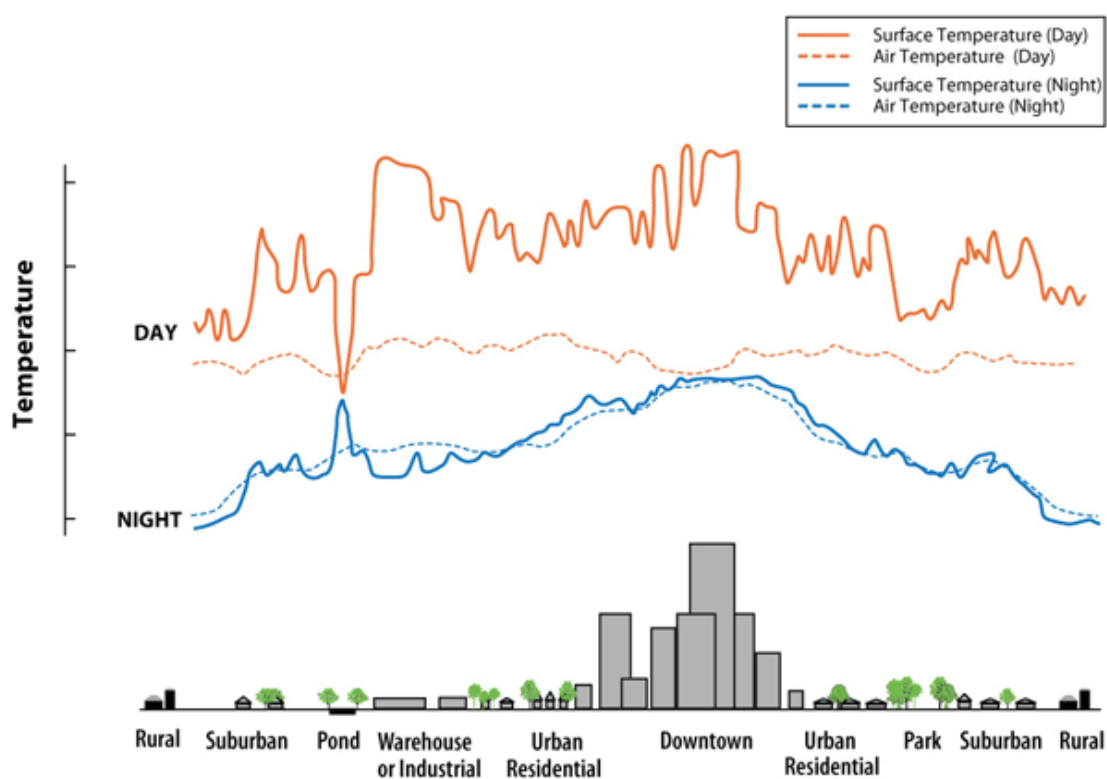
4.2. Περιβαλλοντικά οφέλη

4.2.1. Φαινόμενο αστικής νησίδας

Καθώς οι αστικές περιοχές αναπτύσσονται, το τοπίο αλλάζει καθώς κτήρια και δρόμοι αντικαθιστούν την βλάστηση και τους ανοιχτούς χώρους. Με αυτό τον τρόπο επιφάνειες διαπερατές και επιφάνειες με υγρασία μετατρέπονται σε αδιαπέραστες και ξηρές. Επίσης η απουσία πράσινων χώρων σε συνδυασμό με τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στις αστικές περιοχές που απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία σε συνδυασμό με τη μείωση της ταχύτητα του αέρα στις πόλεις, επηρεάζουν το αστικό κλίμα. Αυτές οι αλλαγές, έχουν ως

αποτέλεσμα οι αστικές περιοχές να έχουν μεγαλύτερη θερμοκρασία από τις γύρω αγροτικές περιοχές, δημιουργώντας ένα «νησί» με υψηλότερες θερμοκρασίες.

Οι περισσότερες μεσογειακές πόλεις υποφέρουν από αρκετά ισχυρό φαινόμενο αστικής νησίδας. Για την Αθήνα συγκεκριμένα, η ένταση του φαινομένου κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, μπορεί να υπερβαίνει τους 8 °C, δημιουργώντας σοβαρά ενεργειακά και περιβαλλοντικά προβλήματα. Κατά τη διάρκεια μιας θερμής και ηλιόλουστης καλοκαιρινής μέρας, ο ήλιος μπορεί να θερμάνει τις ξηρές και εκτεθειμένες αστικές περιοχές όπως οροφές και πεζοδρόμια, σε θερμοκρασίες 27-50 °C θερμότερες από την αντίστοιχη θερμοκρασία του αέρα, ενώ οι σκιασμένες και με υγρασία επιφάνειες έχουν θερμοκρασία κοντινή με αυτή του αέρα. Η ετήσια μέση θερμοκρασία του αέρα σε μια πόλη με ένα εκατομμύριο πληθυσμό μπορεί να είναι 1-3 °C θερμότερη από τις γύρω αγροτικές περιοχές. Σε μια νύχτα με άπνοια η θερμοκρασιακή διαφορά μπορεί να φτάσει τους 12 °C. Η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας για ένα πλήθος διαφορετικών περιοχών (αγροτικές, κέντρο της πόλης, προάστια κ.α.) παρουσιάζεται στην εικόνα 4 [24], [25].



Εικόνα 4 Διάγραμμα διακύμανσης θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας [39]

Οι υψηλές θερμοκρασίες εξαιτίας του φαινομένου της αστικής νησίδας, ειδικά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, μπορούν να επηρεάσουν το περιβάλλον και την ποιότητα ζωής της πόλης. Οι πιο σημαντικές επιπτώσεις είναι [24]:

- Αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι, αυξάνουν την ενεργειακή ζήτηση για ψύξη.
- Αυξημένες εκπομπές αέριων ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου, καθώς η αυξημένη ενεργειακή ζήτηση οδηγεί σε μεγαλύτερες εκπομπές, ενώ οι υψηλές θερμοκρασίες ευνοούν την παραγωγή ατμοσφαιρικού όζοντος.
- Διακυβεύεται η ανθρώπινη υγεία καθώς, οι θερμότερες μέρες και νύχτες σε συνδυασμό με τα υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, συμβάλλουν στην εμφάνιση γενικής δυσφορίας, εξάντλησης και αναπνευστικών δυσκολιών.
- Μείωση ποιότητας του νερού αφού οι θερμές επιφάνειες μεταφέρουν την θερμότητά τους στο νερό της απορροής, το οποίο καταλήγει στο αποχετευτικό σύστημα και αυξάνει τη θερμοκρασία του νερού, το οποίο όταν καταλήγει σε υδάτινους αποδέκτες επηρεάζει αρνητικά τα υδατικά οικοσυστήματα.

Έρευνα από το Tyndall Centre για την κλιματική αλλαγή, θεωρεί ότι χρειαζόμαστε περίπου 10% αύξηση χώρων πράσινου στις πόλεις για να καταπολεμηθεί η κλιματική αλλαγή, κάτι που έχει άμεση σχέση με την μείωση του φαινομένου της αστικής νησίδας [13]. Επίσης, μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την πόλη της Νέας Υόρκης των Η.Π.Α. υποστηρίζει πως αν στο 50% των οροφών της πόλης εγκατασταθούν φυτεμένες οροφές τότε η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της πόλης και των περιοχών που την περιβάλλουν μπορεί να μειωθεί κατά 0,8 °C [22].

Η μετρίαση του φαινομένου της αστικής νησίδας περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές όπως η χρήση υλικών με υψηλή αντανάκλαστική ικανότητα και η χρήση επιπλέον χώρων πράσινου [25]. Οι φυτεμένες οροφές μέσω της εξατμισοδιαπνοής και της σκίασης που προσφέρουν, μειώνουν το φαινόμενο της αστικής νησίδας. Τα φυτά απορροφούν νερό μέσω του συστήματος των ριζών τους και το εκπέμπουν από τα φύλλα τους, αυτή η διαδικασία ονομάζεται διαπνοή. Η εξάτμιση, η μετατροπή του νερού από υγρό σε αέριο επίσης συμβαίνει στην επιφάνεια των φύλλων αλλά και στο υπόστρωμα. Ο συνδυασμός των δυο αυτών διεργασιών ονομάζεται

εξατμισοδιαπνοή, η δράση της οποίας ψυχραίνει τον αέρα αφού απορροφά την θερμότητα του ατμοσφαιρικού αέρα προκειμένου να εξατμιστεί το νερό. Ειδικότερα η ύπαρξη επαρκούς ποσότητας υγρασίας βελτιώνει την απόδοση των δωματίων όσον αφορά στην καταπολέμηση της αστικής νησίδας. Επιπλέον, η σκίαση ελαττώνει τις επιφανειακές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα τη μείωση της μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό του κτηρίου ή την εκπομπή της αποθηκευμένης θερμότητας στην ατμόσφαιρα [7].

4.2.2. Ρύπανση αέρα

Η αέρια ρύπανση στα αστικά περιβάλλοντα είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα, καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός αστικοποιείται όλο και περισσότερο. Ο ρυπασμένος αέρας συνδέεται άμεσα με την πρόκληση προβλημάτων στην ανθρώπινη υγεία με τα πιο συχνά να είναι η αύξηση των περιστατικών αναπνευστικών ασθενειών όπως το άσθμα, και το καρδιαγγειακό νόσημα. Ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας (WHO) εκτιμά ότι κάθε χρόνο πάνω από ένα εκατομμύριο πρόωροι θάνατοι παγκόσμια, μπορεί να οφείλονται στην αστική αέρια ρύπανση των ανεπτυγμένων χωρών.

Γενικά, υπάρχουν συμβατικά προγράμματα ελέγχου της αέριας ρύπανσης στην πηγή, όμως με αυτό τον τρόπο μειώνεται η εκπομπή νέων ρύπων αλλά δεν αντιμετωπίζονται οι ήδη υπάρχοντες ρύποι στην ατμόσφαιρα. Έρευνες δείχνουν ότι τα δέντρα που υπάρχουν στους δρόμους των πόλεων συνεισφέρουν σημαντικά στην καταπολέμηση της αέριας ρύπανσης, όμως η απουσία ελεύθερου χώρου στις πυκνοκατοικημένες πόλεις είναι σημαντικό πρόβλημα. Οι φυτεμένες οροφές έχουν την ικανότητα να «καθαρίζουν» τον ατμοσφαιρικό αέρα καθώς η βλάστηση απομακρύνει τους ρύπους με πολλούς τρόπους ενώ επιπλέον, δεν απαιτούν ελεύθερο χώρο αφού εγκαθίστανται στις οροφές των κτηρίων που υπολογίζονται στο 40-50 % των αδιαπέραστων επιφανειών στις πόλεις.

Τα φυτά απορροφούν τους αέριους ρύπους με τα στόματά τους και τα αέρια σωματίδια με τα φύλλα τους. Επίσης, διασπούν συγκεκριμένες οργανικές ενώσεις όπως πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες στους φυτικούς ιστούς και στο έδαφος.

Τέλος, μειώνοντας την θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους μέσω της ψύξης με διαπνοή και της παροχής σκιάς, ελαττώνονται οι φωτοχημικές αντιδράσεις που παράγουν ρύπους όπως το ατμοσφαιρικό όζον. Εκτιμάται ότι 2000 m² γρασιδιού από φυτεμένες οροφές μπορούν να απομακρύνουν περίπου 4000 kg αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ 1 m² φυτεμένης οροφής μπορεί να αντισταθμίσει τις ετήσιες εκπομπές ενός αυτοκινήτου. Οι φυτεμένες οροφές εντατικού τύπου, φαίνεται να είναι πιο αποτελεσματικές στην αντιμετώπιση των αέριων ρύπων καθώς οι θάμνοι και τα δέντρα που αποτελούν τη βλάστηση αυτού του τύπου, απομακρύνουν περισσότερους ρύπους από την αντίστοιχη βλάστηση των εκτατικών δωματίων λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας των φύλλων. Όμως και οι εντατικού τύπου οροφές μπορούν να έχουν συμπληρωματικό ρόλο στην μετρίαση της αέριας ρύπανσης.

Από τα αποτελέσματα μιας έρευνας που διεξήχθη για την πόλη του Σικάγο των Η.Π.Α. υπολογίσθηκε ότι 200 m² φυτεμένης οροφής, απομάκρυναν 1675 kg αέριων ρύπων μέσα σε ένα χρόνο. Από αυτό το ποσό το 52 % αντιστοιχεί στην απομάκρυνση όζοντος (O₃), το 27 % στην απομάκρυνση διοξειδίου του αζώτου (NO₂), το 14 % στην απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη από 10 μm (PM₁₀) και το 7 % στην απομάκρυνση διοξειδίου του θείου (SO₂). Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η ικανότητα απομάκρυνσης εξαρτάται από την συγκέντρωση ρύπων στον αέρα, τις κλιματικές συνθήκες, τον βαθμό ανάπτυξης των φυτών και από την ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης των ρύπων. Η μεγαλύτερη απομάκρυνση παρατηρήθηκε τον Μάιο όπου τα φύλλα των φυτών ήταν πλήρως ανεπτυγμένα ενώ η χαμηλότερη τον Φεβρουάριο όπου η βλάστηση καλύπτονταν από χιόνι [16], [26].

4.2.2.1. Απομάκρυνση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)

Η καύση ορυκτών καυσίμων έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή CO₂, το οποίο ως γνωστόν είναι ένα από τα αέρια του θερμοκηπίου. Η διακυβερνητική επιτροπή για την κλιματική αλλαγή (IPCC) εκτιμά ότι εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας η συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί κατά 32% από το 1750 (για τις

Η.Π.Α. έχει υπολογιστεί ότι τα κτήρια είναι υπεύθυνα για το 38% των εκπομπών CO₂). Τα φυτά απορροφούν CO₂ από την ατμόσφαιρα μέσω της φωτοσύνθεσης και απελευθερώνουν CO₂ κατά την διαπνοή, όμως η απορρόφηση είναι μεγαλύτερη της εκπομπής. Κατά τη διάρκεια της ημέρας όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι άφθονη, η φωτοσύνθεση είναι πολύ ισχυρή και τα φυτά λειτουργούν σαν «καταβόθρα» για το CO₂. Οι φυτεμένες οροφές μπορούν να βοηθήσουν στην απομάκρυνση του CO₂ καθώς ο άνθρακας είναι βασικό συστατικό της δομής των φυτών και απορροφάται φυσικά μέσω της φωτοσύνθεσης και λόγω της δραστηριότητας των ριζών στο έδαφος.

Εάν σε 1,1 Km² οροφών, εγκατασταθούν φυτεμένες οροφές, τότε μπορεί να αποφευχθεί η εκπομπή 3.640.263 kg CO₂ ανά έτος, ποσότητα που αντιστοιχεί με την ετήσια εκπομπή 661 αυτοκινήτων. Οι ποσότητες βέβαια εξαρτώνται από το κλίμα, τον σχεδιασμό της φυτεμένης οροφής και τον τύπο καυσίμου που χρησιμοποιείται για ηλεκτρισμό και θέρμανση [16], [27]. Οι ερευνητές εκτιμούν ότι μια φυτεμένη οροφή επιφάνειας 93 m² μπορεί να απομακρύνει περίπου 18 kg αιωρούμενων σωματιδίων στη διάρκεια ενός έτους, το οποίο ισοδυναμεί με την ποσότητα που εκπέμπουν 15 αυτοκίνητα το χρόνο [7]. Γενικά, η ικανότητα απομάκρυνσης CO₂ εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα (ευνοϊκότερες οι χαμηλές ταχύτητες), από την φυσική κατάσταση των φυτών και τον προσανατολισμό των φυτεμένων οροφών. Κατά τη διάρκεια μιας ηλιόλουστης μέρας η συγκέντρωση CO₂ κοντά στην περιοχή της φυτεμένη οροφής μπορεί να μειωθεί κατά 2 % [27].

Παρόλα τα περιβαλλοντικά οφέλη από την χρήση των δωματίων, πρέπει να εξεταστεί και η κατανάλωση ενέργειας και εκπομπή αερίων που προκύπτουν από την παραγωγή των υλικών που συνθέτουν τις φυτεμένες οροφές. Για παράδειγμα, περίπου 2 kg CO₂ εκπέμπονται κατά την παραγωγή 1 kg κόκκων προπυλενίου. Γενικά, η ατμοσφαιρική ρύπανση εξαιτίας της παραγωγής των πολυμερών μπορεί να εξισορροπηθεί από τα φυτεμένες οροφές μεταξύ 13 και 32 χρόνων. Πιο συγκεκριμένα, τα μη ανακυκλωμένα υλικά απαιτούν περισσότερο χρόνο για να εξισορροπήσουν την ρύπανση που προκύπτει από την παραγωγή τους. Είναι λοιπόν αναγκαία η έρευνα για την αντικατάσταση των πολυμερών με άλλα φιλικότερα προς το περιβάλλον υλικά ώστε να ενισχυθεί η αειφορία των δωματίων [22], [32]

4.2.3. Βιοποικιλότητα

Οι φυτεμένες οροφές μπορούν να αντικαταστήσουν οικοσυστήματα που έχουν χαθεί λόγω της αστικής ανάπτυξης ή μπορούν να δημιουργήσουν ενδιαιτήματα για να ενισχύσουν την βιοποικιλότητα και να ενθαρρύνουν την χλωρίδα και την πανίδα παρέχοντας τροφή και δυνατότητες ένθεσης για αράχνες, σκαθάρια, πεταλούδες, πουλιά και άλλα ασπόνδυλα [6].

Το παραπάνω μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πέντε ή περισσότερων ειδών φυτών, γεγονός που εκτός από συνεισφορά στην βιοποικιλότητα της φυτεμένης οροφής βοηθά στην ανθεκτικότητα της. Για παράδειγμα, οι φυτεμένες οροφές με ένα είδος φυτού αν και δημιουργούν πλούσια βλάστηση με ομοιόμορφο ύψος, χρώμα και υφή, είναι ευάλωτες στις κλιματικές συνθήκες και στα παράσιτα τα οποία μπορεί να εξαλείψουν την βλάστηση της φυτεμένης οροφής από τη μια στιγμή στην άλλη χωρίς προειδοποίηση [9].

4.2.4. Υδραυλική συμπεριφορά των φυτεμένων οροφών

Στις ανεπτυγμένες χώρες, το ποσοστό της αστικοποίησης αναμένεται να φτάσει το 83% μέχρι το 2030. Καλλιεργήσιμες εκτάσεις, λιβάδια και δάση, έχουν εκτοπιστεί από δρόμους, πεζοδρόμια και κτήρια [28]. Ως αποτέλεσμα, οι πόλεις «υποφέρουν» από αυξημένη και εντονότερη απορροή εξαιτίας των κατακρημνίσεων, μειωμένη ανατροφοδότηση του συστήματος των υπόγειων υδάτων, μείωση της ποιότητας του νερού της απορροής καθώς και προβλήματα πλημμυρών. Ειδικότερα για κοινότητες που έχουν κοινό σύστημα αποχέτευσης και όμβριων υδάτων, όπου τα λύματα και τα όμβρια ύδατα διοχετεύονται στον ίδιο αγωγό, μπορεί να υπάρξει πρόβλημα εισροής ακατέργαστων λυμάτων σε φυσικούς αποδέκτες, μετά από έντονες βροχοπτώσεις, όπου ο όγκος των εισροών ξεπερνά την χωρητικότητα του συστήματος. Οι φυτεμένες οροφές είναι ενδεχομένως ένα εργαλείο για τη διαχείριση αυτών των προβλημάτων και ειδικά αν αναλογιστούμε τις υψηλές τιμές

αγοράς γης και την μεγάλη έκταση επιφανειών στέγης που δεν χρησιμοποιούνται στα αστικά περιβάλλοντα [6], [16], [28], [29].

Σύμφωνα με μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο Μάλμε της Σουηδίας, η ετήσια απορροή των όμβριων υδάτων μπορεί να μειωθεί έως και 64 % εξαιτίας της εξατμισοδιαπνοής που εξελίσσεται στην φυτοκάλυψη της φυτεμένη οροφής. Το ποσοστό αυτό, επιβεβαιώνεται και από μελέτες που έχουν διεξαχθεί σε διαφορετικές πόλεις των Ηνωμένων Πολιτειών (όπως Σικάγο, Φιλαδέλφεια), όπου το αντίστοιχο ποσοστό είναι της τάξης του 65 %. Συνεπώς η ικανότητα κατακράτησης όγκου του βρόχινου νερού κυμαίνεται μεταξύ 40 και 80 % της συνολικής βροχόπτωσης και εξαρτάται από τα υλικά κατασκευής της φυτεμένης οροφής (αριθμός στρωμάτων και το αντίστοιχο πάχος τους), τις κλιματικές συνθήκες και την ποσότητα της βροχόπτωσης. Όσον αφορά τα υλικά κατασκευής, σημαντικότερο ρόλο στην αύξηση της ικανότητας κατακράτησης έχουν τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος παρά το πάχος του, καθώς έρευνες έχουν δείξει ότι αύξηση στο πάχος της τάξης των 2-15 cm δεν έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου κατακράτησης [14]. Όσον αφορά το κλίμα, έχει βρεθεί ότι η ικανότητα αποθήκευσης της φυτεμένη οροφής είναι αρκετά μεγαλύτερη τους καλοκαιρινούς μήνες παρά τους χειμερινούς, λόγω της έντασης της εξατμισοδιαπνοής και της συχνότητας των βροχοπτώσεων [28].

Η προσωρινή κατακράτηση σε συνδυασμό με την αργή απελευθέρωση του αποθηκευμένου όγκου του νερού, καθορίζει την εξασθένηση και καθυστέρηση της εισροής του βρόχινου νερού στο αποχετευτικό σύστημα. Η καθυστέρηση αυτή, οφείλεται στον χρόνο που απαιτείται από το υπόστρωμα να αρχίσει την αποστράγγιση του νερού, λόγω του φιλτραρίσματος που δέχεται το νερό, εξαιτίας των διάφορων στρωμάτων της φυτεμένη οροφής. Συνεπώς, στις περισσότερες περιπτώσεις, η απορροή του αποστραγγισμένου νερού συνεχίζεται και μετά το πέρας της βροχόπτωσης [14].

Η υγρασία του υποστρώματος αμέσως πριν μια βροχόπτωση επηρεάζει σημαντικά την ικανότητά του να κατακρατά το νερό της βροχής. Το στρώμα εδάφους της φυτεμένης οροφής, έχει μια συγκεκριμένη τιμή κορεσμού σε υγρασία και το

ξηρότερο στρώμα κατακρατά σημαντικά περισσότερο νερό σε σχέση με το υγρό έδαφος. Επομένως, όταν το έδαφος είναι κοντά στην τιμή κορεσμού πριν από ένα φαινόμενο βροχής, μόνο ένα μικρό ποσό του νερού μπορεί να απορροφηθεί [14].

Επιπλέον, τα φυτά της οικογένειας sedum, διαπνέουν γρήγορα το διαθέσιμο νερό και έτσι συμβάλουν έως και 40 % στην ικανότητα αποθήκευσης βρόχινου νερού της φυτεμένης οροφής. Ακόμα, αλλαγή στα χαρακτηριστικά της βλάστησης όπως στο ύψος και στη δομή αλλά και στο μέγεθος της φυτεμένης οροφής και τέλος η ένταση και η συχνότητα της βροχόπτωσης, μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά την ικανότητα αυτή. Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας είναι η ηλικία της φυτεμένης οροφής, καθώς έχει προσδιοριστεί ότι μια οροφή με διάρκεια ζωής πέντε ετών είχε την διπλάσια ικανότητα αποθήκευσης νερού από την ίδια οροφή, όταν αυτή είχε διάρκεια ζωής ενός έτους. Τέλος η άρδευση μπορεί να εμποδίζει την ικανότητα κατακράτησης σε κλίματα με σπάνιες και μέτριας εντάσεως βροχοπτώσεις.

Σε μια έρευνα που έγινε για την πόλη των Βρυξελλών βρέθηκε ότι αν γίνει χρήση εκτατικών δωματίων τέτοια ώστε να καλύπτει το 10% τον διαθέσιμων οροφών της πόλης, τότε μπορεί να επιτευχθεί μείωση της ετήσιας απορροής κατά 2,7 % [28].

4.2.5. Ποιότητα του νερού της απορροής στην έξοδο της φυτεμένης οροφής

Στις αστικές περιοχές οι επιφάνειες των στεγών συμβάλλουν στον εμπλουτισμό του νερού της απορροής με τοξικά μέταλλα και με θρεπτικά συστατικά, ενώ οι φυτεμένες οροφές δεσμεύουν κάποιους από τους πιθανούς ρύπους του νερού της απορροής. Σε μια μελέτη που έγινε για μια φυτεμένη οροφή εκτατικού τύπου επιφάνειας 248 m² στο Κονέκτικατ των Ηνωμένων Πολιτειών προέκυψαν οι πίνακες 5 και 6:

Πίνακας 5 Κατακράτηση θρεπτικών από τις φυτεμένες οροφές [30]

Θρεπτικά (σε $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)	Ολικό N	$\text{NH}_3\text{-N}$	Ολικός P	$\text{PO}_4\text{-P}$
Βροχή	6,29	1,47	0,11	0,05
Φυτεμένη οροφή	4,27	0,18	0,32	0,21
Κατακράτηση (%)	32,1	87,8	-191	-320

Πίνακας 6 Κατακράτηση μετάλλων από τις φυτεμένες οροφές [30]

Μέταλλα (σε $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)	Ολικός Cu	Ολικός Pb	Ολικός Zn	Ολικός Hg
Βροχή	0,02	0,11	0,38	0,0000430
Φυτεμένη οροφή	0,03	0	0,13	0,0000168
Κατακράτηση (%)	-50	100	65,8	60,9

Από τους πίνακες 5 και 6, παρατηρούμε ότι η φυτεμένη οροφή λειτουργεί ως «καταβόθρα» για τα αμμωνιακά ($\text{NH}_3\text{-N}$), τον μόλυβδο (Pb) και τον ψευδάργυρο (Zn) με λιγότερη κατακράτηση να παρατηρείται στην περίπτωση του ολικού φωσφόρου (P), ίσως εξαιτίας της παρουσίας διογκωμένου σχιστόλιθου και βιοστερεών στο υπόστρωμα. Επιπλέον, η σύσταση του υποστρώματος και η χρήση λιπάσματος, ίσως είναι υπεύθυνη για την αύξηση του χαλκού (Cu), του ολικού P και των φωσφορικών ($\text{PO}_4\text{-P}$). Η κατακράτηση των βαρέων μετάλλων ίσως είναι αποτέλεσμα της σταθεροποίησης στο υπόστρωμα μέσω επανειλημμένων κύκλων ύγρυνσης και ξήρανσης και λόγω του σχηματισμού χηλικών ενώσεων με οργανικά υλικά. Ο συνδυασμός της βλάστησης, του διογκωμένου σχιστόλιθου και των λιπασματοποιημένων βιοστερεών μείωσε την έξοδο των θρεπτικών και των μετάλλων που αναφέρθηκαν, μέσω της κατακράτησης του βρόχινου νερού και με την χρησιμοποίηση, μετασχηματισμό και αποθήκευση των ρύπων [30].

5. Συντήρηση φυτεμένων οροφών

Η διαδικασία συντήρησης αποτελείται από δυο φάσεις:

1. Την αρχική περίοδο, αμέσως μετά την εγκατάσταση των φυτών
2. Την διαρκή συντήρηση ώστε να ευδοκιμήσει και να διατηρηθεί η φυτεμένη οροφή

Η συντήρηση θα πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό, και γενικά προτείνεται ο αρχικός κατασκευαστής της φυτεμένης οροφής να είναι υπεύθυνος και για την συντήρηση της. Γενικώς, ανεπιθύμητα είδη φυτών πρέπει να απομακρύνονται και να αποτρέπεται η εμφάνισή τους, με την ολική εξάπλωση των επιθυμητών ειδών στο υπόστρωμα [6], [13].

5.1. Φυτεμένη οροφή εκτατικού τύπου

Απαιτούνται τουλάχιστον δυο επισκέψεις για διαδικασίες συντήρησης το χρόνο. Τον πρώτο χρόνο οι διαδικασίες που θα πρέπει να εκτελούνται είναι οι εξής [13]:

1. Απομάκρυνση ανεπιθύμητης φυτικής ύλης
2. Διόρθωση τοπικών προβλημάτων βλάστησης
3. Αντικατάσταση «νεκρών» φυτών όταν αυτά ξεπερνούν το 5 % της φυτεμένης βλάστησης
4. Εφαρμογή θρεπτικών
5. Έλεγχος αποστράγγισης
6. Αναπλήρωση υποστρώματος όπου χρειάζεται

Οι διαδικασίες 2,3 και 6 συνήθως χρειάζονται τον πρώτο χρόνο. Τα επόμενα χρόνια οι απαιτήσεις σε συντήρηση θα μειωθούν.

5.2. Φυτεμένη οροφή εκτατικού τύπου

Ο αριθμός των επισκέψεων για συντήρηση θα καθοριστεί από τα είδη των φυτών που θα επιλεγούν. Τον πρώτο χρόνο οι διαδικασίες που θα πρέπει να εκτελούνται είναι οι εξής [13]:

1. Απομάκρυνση ανεπιθύμητης φυτικής ύλης
2. Διόρθωση τοπικών προβλημάτων βλάστησης
3. Αντικατάσταση «νεκρών» φυτών όταν αυτά ξεπερνούν το 5 % της φυτεμένης βλάστησης
4. Εφαρμογή θρεπτικών
5. Κλάδεμα και απομάκρυνση νεκρής βλάστησης
6. Αναπλήρωση υποστρώματος όπου χρειάζεται

Οι διαδικασίες 2,3 και 6 συνήθως χρειάζονται τον πρώτο χρόνο. Τα επόμενα χρόνια οι απαιτήσεις σε συντήρηση θα μειωθούν.

Στον πίνακα 7 παρουσιάζονται συνοπτικά οι εργασίες συντήρησης που απαιτούνται για όλους τους τύπους φυτεμένων οροφών που έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 1. Η λίπανση που αναφέρεται στον πίνακα 7, είναι μια διαδικασία κατά την οποία πρόσθετες θρεπτικές ουσίες παρέχονται στα φυτά ενισχύοντας την βλάστηση, την ανθοφορία και την αντοχή σε ακραίες καιρικές συνθήκες.

Πίνακας 7 Εργασίες συντήρησης για τους 4 τύπους φυτεμένων οροφών [6].

Εργασίες συντήρησης	Εκτατικό	Βιοποικιλότητας
Άρδευση	Δεν απαιτείται	Δεν απαιτείται
Λίπανση	Μια φορά το χρόνο (κάθε άνοιξη)	Δεν απαιτείται ειδικά όταν χρησιμοποιούνται αυτόχθονα είδη και γίνεται προσπάθεια αναπαραγωγής εγγενούς ενδιαιτήματος
Διαχείριση φυτών	Απομάκρυνση ανεπιθύμητων ειδών δυο φορές το χρόνο	Δεν απαιτείται ειδικά όταν χρησιμοποιούνται αυτόχθονα είδη και γίνεται προσπάθεια αναπαραγωγής εγγενούς ενδιαιτήματος
Γενικά	Τα σημεία απορροής και οι περίμετροι από χαλίκια, πρέπει να διατηρούνται χωρίς βλάστηση δυο φορές το χρόνο	Τα σημεία απορροής και οι περίμετροι από χαλίκια, πρέπει να διατηρούνται χωρίς βλάστηση και νεκρή ύλη, δυο φορές το χρόνο
Εργασίες συντήρησης	Ημι-εντατικό	Εντατικό
Άρδευση	Απαιτείται περιοδική άρδευση	Απαιτείται συχνή άρδευση
Λίπανση	Απαιτείται συχνή λίπανση	Απαιτείται συχνή λίπανση
Διαχείριση φυτών	Απομάκρυνση ανεπιθύμητων ειδών δυο φορές το χρόνο	Απομάκρυνση ανεπιθύμητων ειδών τουλάχιστον δυο φορές το χρόνο
Γενικά	Τα σημεία απορροής και οι περίμετροι από χαλίκια, πρέπει να διατηρούνται χωρίς βλάστηση δυο φορές το χρόνο	Τα σημεία απορροής και οι περίμετροι από χαλίκια, πρέπει να διατηρούνται χωρίς βλάστηση δυο φορές το χρόνο

6. Εκτίμηση κόστους φυτεμένων οροφών

Η τεχνολογία των φυτεμένων οροφών γίνεται όλο και πιο δημοφιλής λόγω των περιβαλλοντικών τους οφελών, όμως λόγω του αυξημένου κόστους τους, η χρήση τους είναι ακόμα περιορισμένη. Το υψηλό κόστος οφείλεται κυρίως λόγω της ανύψωσης των υλικών με τη χρήση γερανών και του αυξημένου κόστους εργασίας. Επιπλέον εξαιτίας του βάρους των φυτεμένων οροφών, μπορεί να απαιτούνται αλλαγές στον δομικό σχεδιασμό του κτηρίου, όπως η ενίσχυση κολώνων, δοκών κ.α. με αποτέλεσμα την περεταίρω αύξηση του κόστους τους [22].

Όσον αφορά την Ελλάδα, μια τιμή κατά προσέγγιση της φυτεμένης οροφής εκτατικού τύπου είναι 70-90 €/m², ενώ για εντατικού τύπου 120-130 €/m² [πηγή egreen]. Η αντίστοιχη τιμή για εκτατική φυτεμένη οροφή στην Γερμανία (μη συμπεριλαμβανομένου της στεγάνωσης) είναι 12 €/m², περίπου 85 % φθηνότερη από την αντίστοιχη της Ελλάδας. Η χαμηλή τιμή που παρατηρείται στην περίπτωση της Γερμανίας, είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης της αγοράς των φυτεμένων οροφών τα τελευταία 30 χρόνια [31]. Η Γερμανία είναι πρωτοπόρος στη χρήση της τεχνολογίας των φυτεμένων οροφών, όπου η βιομηχανία αναφέρθηκε να αξίζει 77 εκατομμύρια δολάρια το 2008. Επιπλέον, έχει υπολογιστεί ότι 13,5 Km² φυτεμένων οροφών (περίπου το 80% είναι εκτατικού τύπου) υπάρχει στην Γερμανία, τιμή που ισοδυναμεί με το 14% του συνόλου των επίπεδων οροφών της χώρας [3].

Επιπλέον, κατά την ανάλυση του κόστους ζωής έχει υπολογιστεί ότι μια φυτεμένη οροφή είναι 10-14 % ακριβότερη από μια συμβατική στέγη στη διάρκεια 60 ετών. Συνεπώς αν και η αρχική δαπάνη είναι υψηλή, η εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων κατά τη διάρκεια ζωής του κτηρίου, σημαίνει ότι η φυτεμένη οροφή είναι η περιβαλλοντικά προτιμότερη επιλογή [3].

6.1. Πώς να μειωθεί το κόστος των φυτεμένων οροφών

Η τυποποίηση και η πιστοποίηση των υλικών που συνθέτουν τις φυτεμένες οροφές και η εισαγωγή έτοιμων συστημάτων φυτεμένων οροφών μπορεί να μειώσουν το κόστος των υλικών, ενώ η εξειδίκευση και η εκπαίδευση του προσωπικού εγκατάστασης μπορεί να μειώσει το κόστος εγκατάστασής της. Το πιο σημαντικό βέβαια στην εξοικονόμηση κατά την εγκατάσταση των φυτεμένων οροφών είναι η χρήση της πιο σύγχρονης τεχνολογίας μεταφοράς.

Όσον αφορά τα συστήματα μεταφοράς, τα φορτηγά με φουσητήρα, μειώνουν τα κόστη μεταφοράς και εγκατάστασης. Η τελευταία εξέλιξη είναι το φορτηγό speedMaxx το οποίο είναι ένα ανοιχτό σύστημα με μια χοάνη στο πίσω μέρος, επομένως τα υλικά μπορούν να καταφθάνουν στο εργοτάξιο με συμβατικά φορτηγά και είναι το ιδανικό εργαλείο για περιπτώσεις όπου οι φυτεμένες οροφές εγκαθίστανται σε μεγάλα εμπορικά κέντρα και αποθήκες όπου οι επιφάνειες εγκατάστασης έχουν το σχήμα ορθογωνίου. Μια άλλη μέθοδος για την μείωση του κόστους, είναι μια πρακτική που εφαρμόζεται στη Γερμανία όπου ειδικά σχεδιασμένο υπόστρωμα εξαλείφει τη χρήση ξεχωριστού στρώματος αποστράγγισης και φιλτραρίσματος. Αυτή η μέθοδος αν και μειώνει σημαντικά το κόστος, ελαττώνει τη δυνατότητα αποθήκευσης του νερού της απορροής.

Το κόστος έχει άμεση σχέση με την εξέλιξη της αγοράς. Για παράδειγμα, οι χαμηλές τιμές που συναντώνται στην Γερμανία η οποία έχει δεκαετίες εμπειρίας στην χρήση των φυτεμένων οροφών, είναι αποτέλεσμα αυτής της μακράς ανάπτυξης της αγοράς. Όσον αφορά τις τιμές των υλικών, αυτές είναι υψηλές λόγω των μικρών ποσοτήτων των υλικών και του μικρού ανταγωνισμού. Όσο μεγαλώνει η αγορά, η ζήτηση των υλικών και ο αριθμός των προμηθευτών αναμένεται να αυξηθεί. Συνεπώς, ο μεγαλύτερος ανταγωνισμός θα μειώσει τη διαφορά μεταξύ τιμής αγοράς και τιμής πώλησης. Επιπλέον, οι υψηλές τιμές που παρατηρούνται στην αγορά υποστρώματος, μπορεί να οφείλονται στη μειωμένη διαθεσιμότητα φυσικά ελαφρών υλικών όπως η ηφαιστιογενή πέτρα και η ελαφρόπετρα καθώς και των ανακυκλωμένων υλικών όπως το θρυμματισμένο τούβλο. Το υπόστρωμα είναι το μόνο υλικό όπου οι αποστάσεις μεταφοράς πραγματικά παίζουν σημαντικό ρόλο.

Η θέσπιση ολοκληρωμένων συστημάτων με πιστοποιημένα πρότυπα ποιότητας θα κάνει την κατασκευή των φυτεμένων οροφών ευκολότερη, ασφαλέστερη και φθηνότερη [31]:

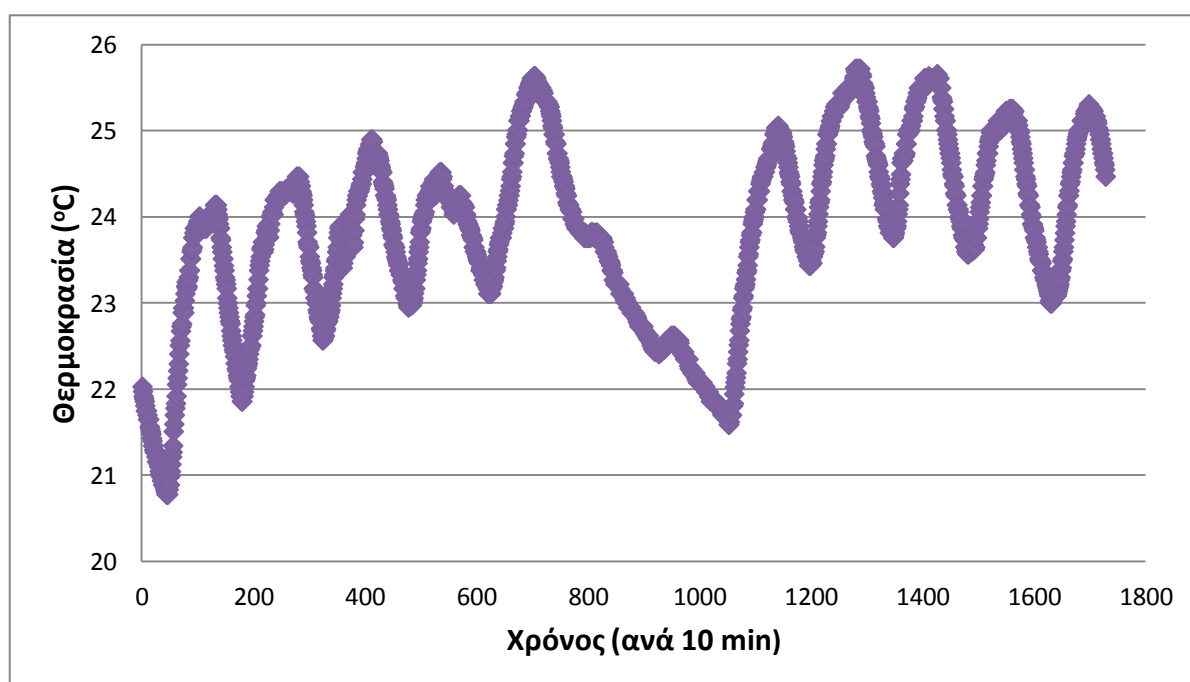
- Ευκολότερος σχεδιασμός και καθορισμός για τους αρχιτέκτονες
- Ευκολότερος υπολογισμός και αγορά των υλικών από τον ανάδοχο του έργου
- Ασφαλέστερο για τον ανάδοχο του έργου καθώς οι εξατομικευμένες λύσεις μπορεί να αποτύχουν ευκολότερα
- Φθηνότερο για τον πελάτη, καθώς τα τυποποιημένα υλικά μπορούν να παραχθούν και να χρησιμοποιηθούν με μικρότερες πιθανότητες αποτυχίας

7. Υπό μελέτη κτήριο

Το κτήριο που μελετήθηκε βρίσκεται στο Αμαρούσιο της Αττικής και αποτελεί κτήριο γραφείων. Αποτελείται από πέντε ορόφους συμπεριλαμβανομένου του ισογείου συνολικής επιφάνειας 6900 m² περίπου, ενώ έχουν εγκατασταθεί δυο φυτεμένες οροφές εκτατικού τύπου στον τρίτο όροφο συνολικής επιφάνειας 390 m² η καθεμία.

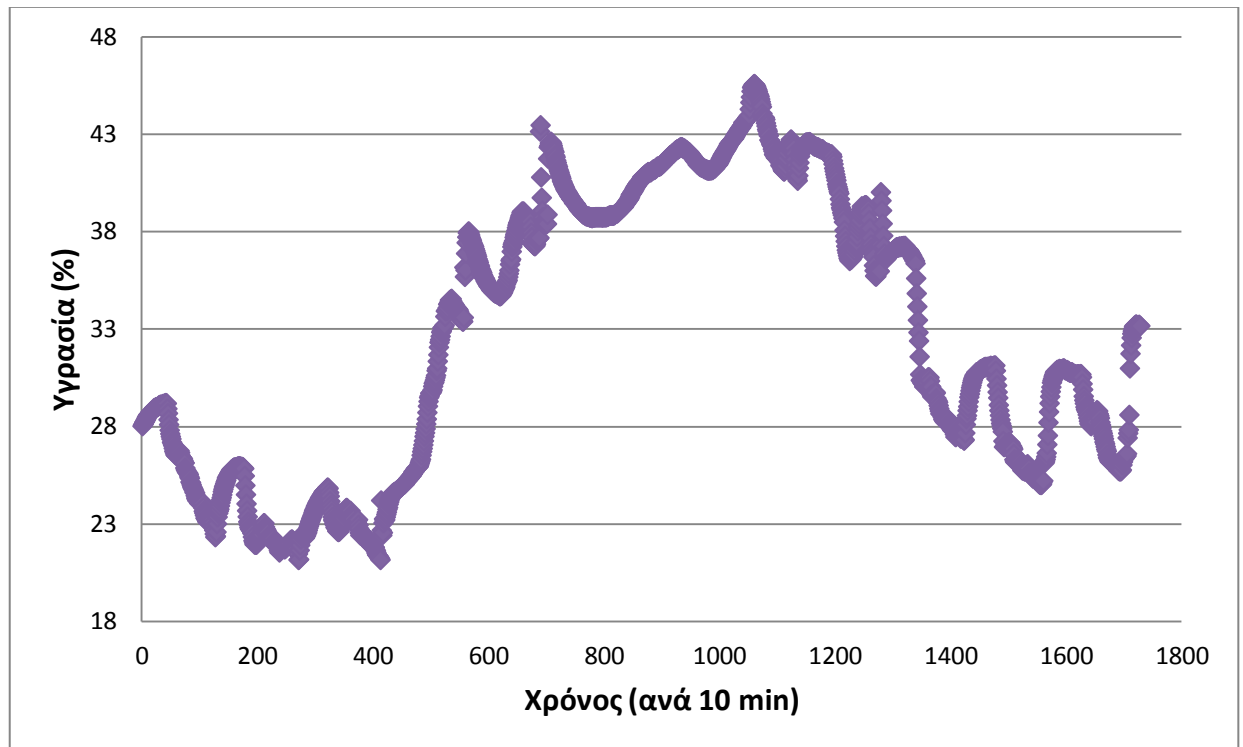
7.1. Μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας εσωτερικού χώρου

Κατά την επίσκεψη του κτηρίου, τοποθετήθηκε μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας στους χώρους κάτωθεν της φυτεμένης οροφής που βρίσκεται στην ανατολική πλευρά, για τη χρονική περίοδο 30/01/12-10/02/12. Στους χώρους κάτωθεν της δυτικής φυτεμένης οροφής δεν τοποθετήθηκε μετρητής καθώς οι χώροι χρησιμοποιούνταν από εργαζόμενους και υπήρχε κίνδυνος μετακίνησης του μετρητή. Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα (εικόνα 5 και 6):



Εικόνα 5 Διακύμανση της θερμοκρασίας κατά τη χρονική περίοδο 30/01/12-10/02/12

Γενικά παρατηρούμε ότι η διακύμανση της θερμοκρασίας (εικόνα 5) είναι παρόμοια για όλες της ημέρες της περιόδου εκτός από αυτές που αντιστοιχούν στο σαββατοκύριακο (800-1.000 min) όπου υπολειτουργεί το κτήριο.

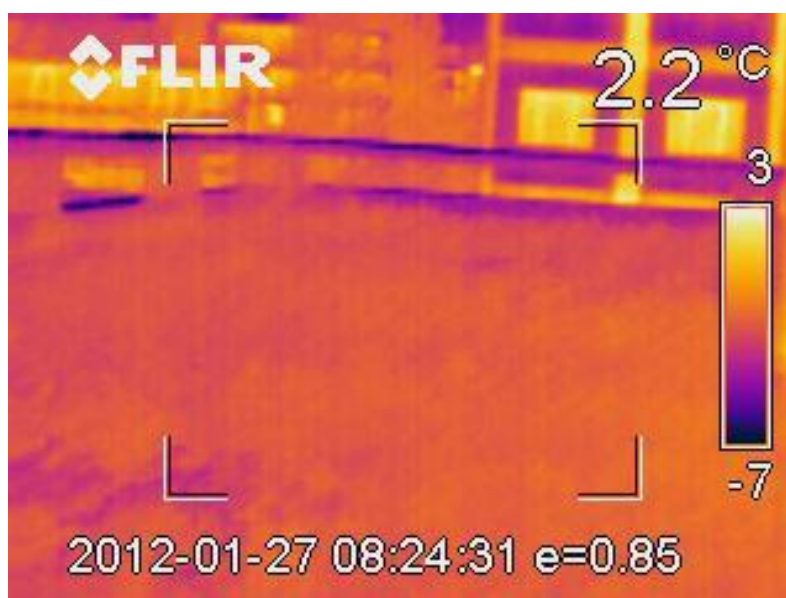


Εικόνα 6 Διακύμανση σχετικής υγρασίας κατά τη χρονική περίοδο 30/01/12-10/02/12

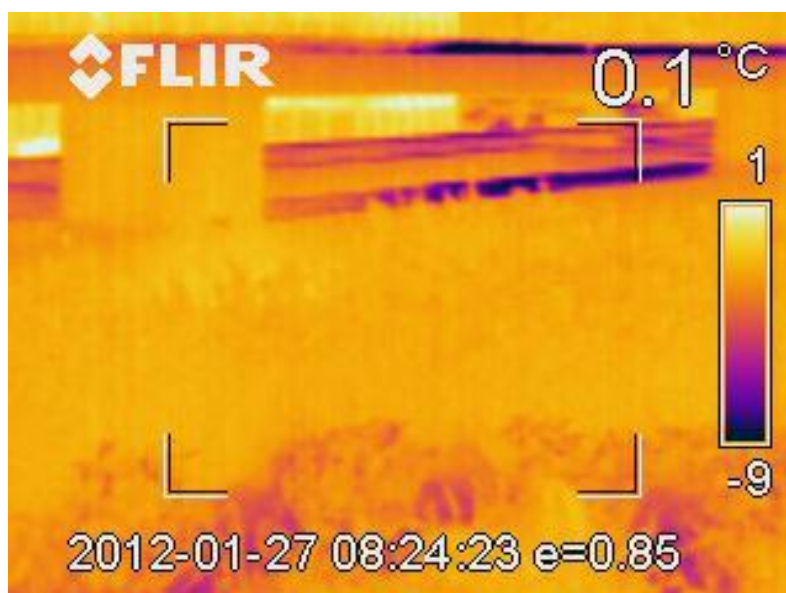
Όσον αφορά τη σχετική υγρασία (εικόνα 6) παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μεγάλη αύξηση για το διάστημα 02-08/02/12, όπου λόγω υπολειτουργίας του κτηρίου (σαββατοκύριακο), το σύστημα θέρμανσης μπορεί να υπολειτουργεί.

7.2. Φωτογραφίες θερμικής κάμερας

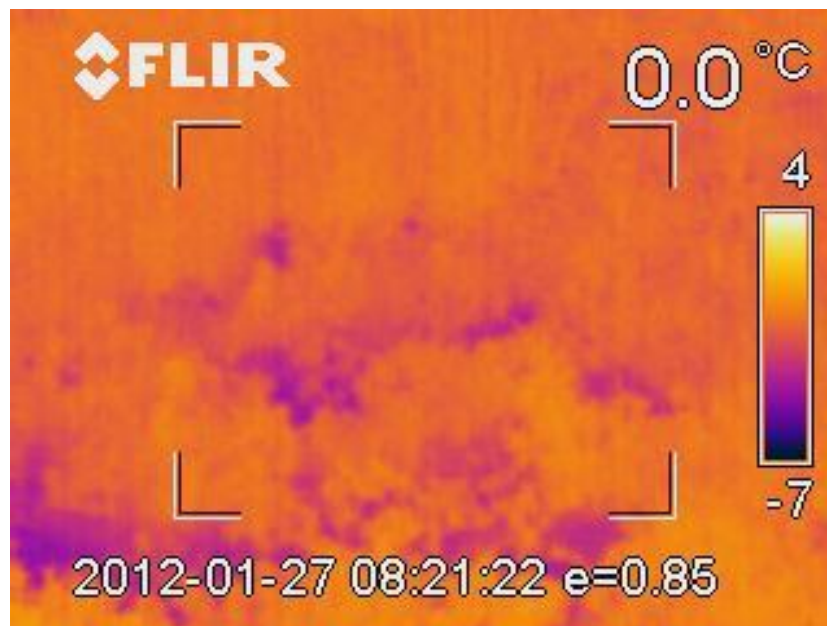
Κατά την επίσκεψη λήφθηκαν φωτογραφίες της φυτεμένης οροφής με τη χρήση θερμικής κάμερας οι οποίες παραθέτονται στη συνέχεια (εικόνες 7-11).



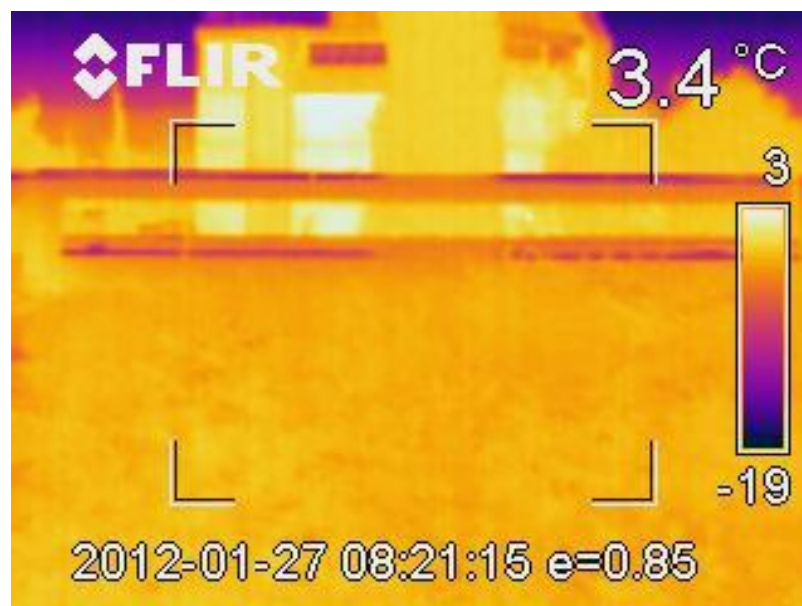
Εικόνα 7 Φυτεμένη οροφή 1



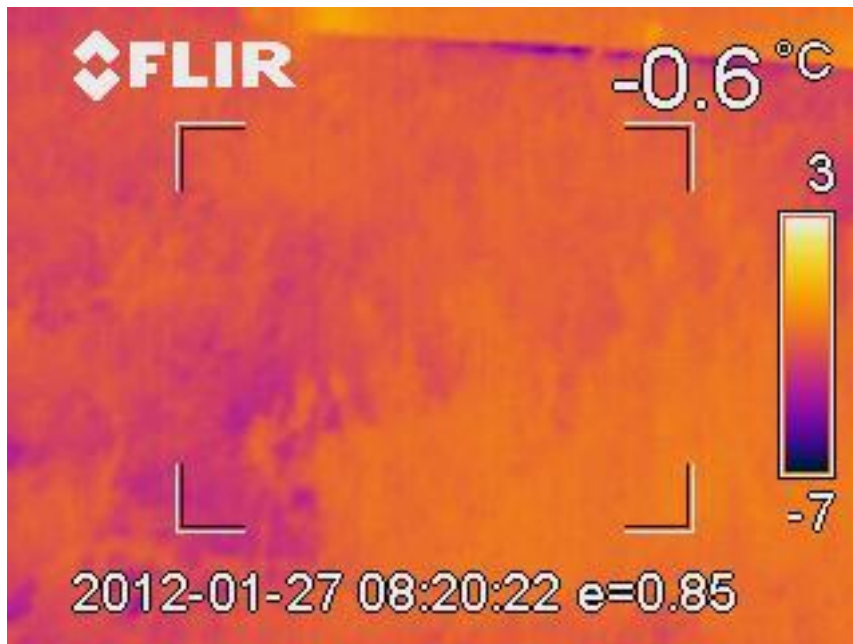
Εικόνα 8 Φυτεμένη οροφή 2



Εικόνα 9 Φυτεμένη οροφή 3



Εικόνα 10 Φυτεμένη οροφή 4

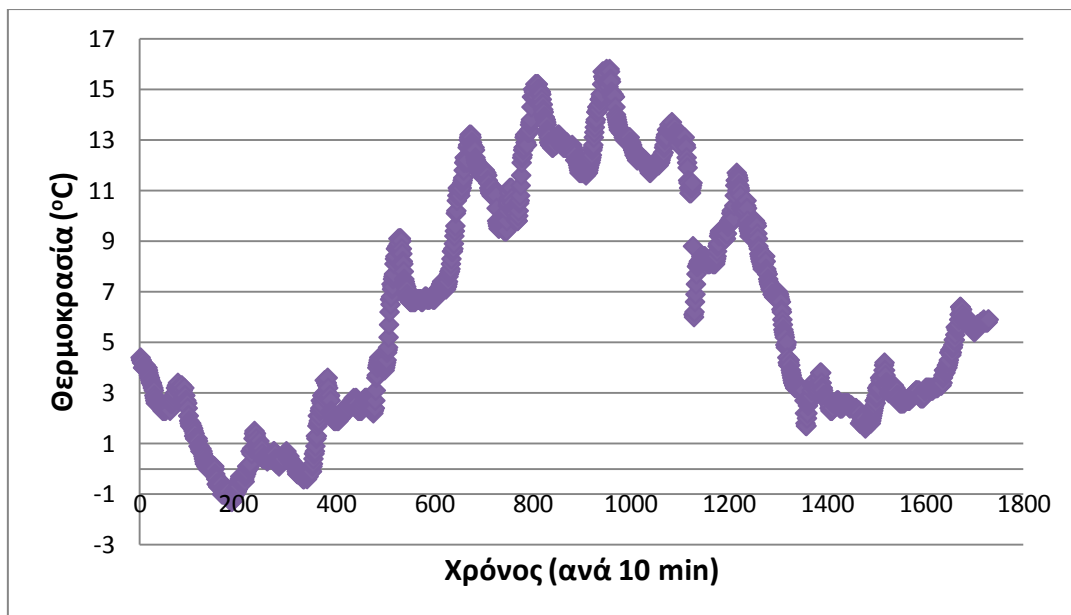


Εικόνα 11 Φυτεμένη οροφή 5

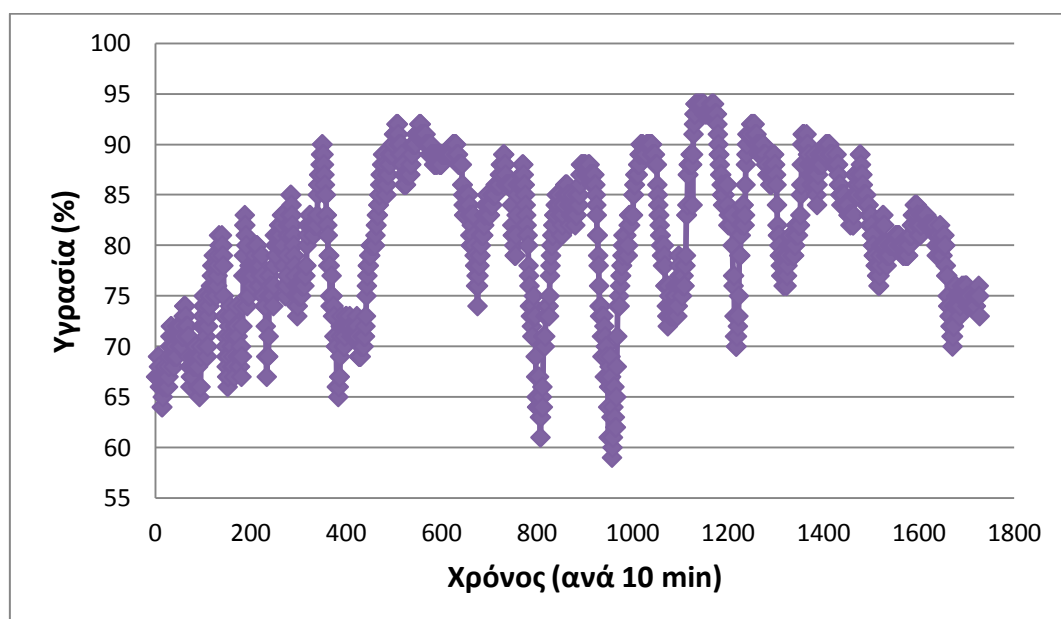
Στο δεξί μέρος των θερμικών φωτογραφιών φαίνεται η χρωματική κλίμακα όπου κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετική θερμοκρασία. Από τις φωτογραφίες παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία της βλάστησης είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη θερμοκρασία των δομικών υλικών, όπως τα κιγκλιδώματα, και από τις περιοχές της φυτεμένης οροφής με αραιή ή καθόλου βλάστηση κάτι που συμφωνεί με τη θεωρία που έχει ήδη αναφερθεί.

7.3. Μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας περιβάλλοντος

Οι τιμές της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος για τη χρονική περίοδο 30/01/12-10/02/12, δόθηκαν από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Οι τιμές προκύπτουν από μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στην ταράτσα πενταόροφης πολυκατοικίας στην περιοχή του Αμαρουσίου και είναι οι εξής (εικόνα 12 και 13):



Εικόνα 12 Διακύμανση της θερμοκρασίας κατά τη χρονική περίοδο 30/01/12-10/02/12



Εικόνα 13 Διακύμανση της σχετικής υγρασίας κατά τη χρονική περίοδο 30/01/12-10/02/12

Συγκρίνοντας την εικόνα 12 με την εικόνα 6, παρατηρούμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το διάστημα 500-1300 min, συμβαδίζει με την αύξηση της εσωτερικής σχετικής υγρασίας για το ίδιο διάστημα, το οποίο δείχνει την ορθότητα των τιμών που μετρήθηκαν.

7.4. Στοιχεία των εγκατεστημένων φυτεμένων οροφών

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, στο κτήριο έχουν εγκατασταθεί δυο φυτεμένες οροφές εκτατικού τύπου, επιφάνειας 390 m² η καθεμία. Στη συνέχεια παραθέτονται φωτογραφίες των φυτεμένων οροφών οι οποίες λήφθηκαν κατά την επίσκεψη του κτηρίου (εικόνες 14-16).



Εικόνα 14 Φυτεμένη οροφή 1

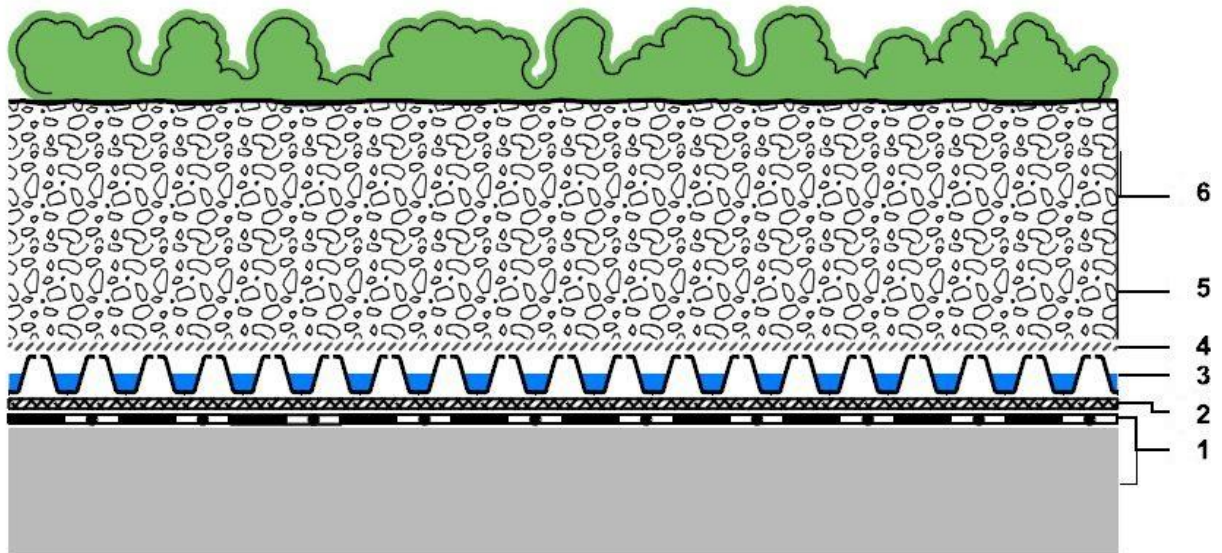


Εικόνα 15 Φυτεμένη οροφή 2



Εικόνα 16 Φυτεμένη οροφή 3

Στην εικόνα 17 παρουσιάζεται η τομή της φυτεμένης οροφής με αριθμημένα τα επιμέρους στοιχεία που το απαρτίζουν. Πιο συγκεκριμένα:



Εικόνα 17 Τομή φυτεμένης οροφής

1. Στεγανοποίηση φυτεμένης οροφής με αντιριζική προστασία
2. Υπόστρωμα προστασίας και συγκράτησης υγρασίας TSM32 (πάχος 10 cm)

Αποτελείται από πολυεστέρα υψηλής ποιότητας από ανακυκλωμένες ίνες υψηλής μηχανικής αντοχής. Βασικός του ρόλος η συγκράτηση υγρασίας, η εξοικονόμηση νερού και η προστασία της μόνωσης από τη φθορά.

Πίνακας 8 Τεχνικές προδιαγραφές TSM32

Τεχνικές Προδιαγραφές	
Χρώμα	Γκρι
Πάχος	3 mm
Βάρος	320 g/m ²
Ικανότητα συγκράτησης υγρασίας	3 L/m ²
Σημείο τήξης	260 °C
Κατηγορία αντοχής	3

3. Αποστραγγιστικό σύστημα Floradrain FD25 (φύλλα 1mX2m)

Αποτελείται από ανακυκλωμένο θερμοδιαμορφωμένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας με αμφίπλευρες διάτρητες κωνικές προεξοχές για την αποστράγγιση και απορροή της πλεονάζουσας ποσότητας νερού, την αποθήκευση του νερού στις κυψέλες και την συγκράτηση του υποστρώματος ανάπτυξης στις προεξοχές σε κεκλιμένες επιφάνειες.

Πίνακας 9 Τεχνικές προδιαγραφές FD25

Τεχνικές Προδιαγραφές	
Χρώμα	Σκούρο Γκρι
Ύψος	25 mm
Βάρος	1,7 kg/m ²
Ικανότητα συγκράτησης υγρασίας	3 L/m ²
Όγκος πλήρωσης	10 L/m ²
Μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο	250 kN/m ²

4. Διηθητικό φύλλο SF (πάχος 15 cm)

Το φύλλο βοηθά στην ομαλή διόδο του νερού χωρίς την απομάκρυνση τεμαχιδίων από το ειδικό εδαφικό υπόστρωμα.

Πίνακας 10 Τεχνικές προδιαγραφές SF

Τεχνικές Προδιαγραφές	
Πάχος	0,6 mm
Βάρος	100 g/m ²
Αντοχή στη διάτρηση	820 N
Κατηγορία αντοχής	1
Εφελκυστική αντοχή (200 mm)	
κατά μήκος	4 kN/m
κατά πλάτος	5 kN/m

5. Υπόστρωμα ανάπτυξης φυτικού υλικού εκτατικού τύπου (πάχος 15 cm)

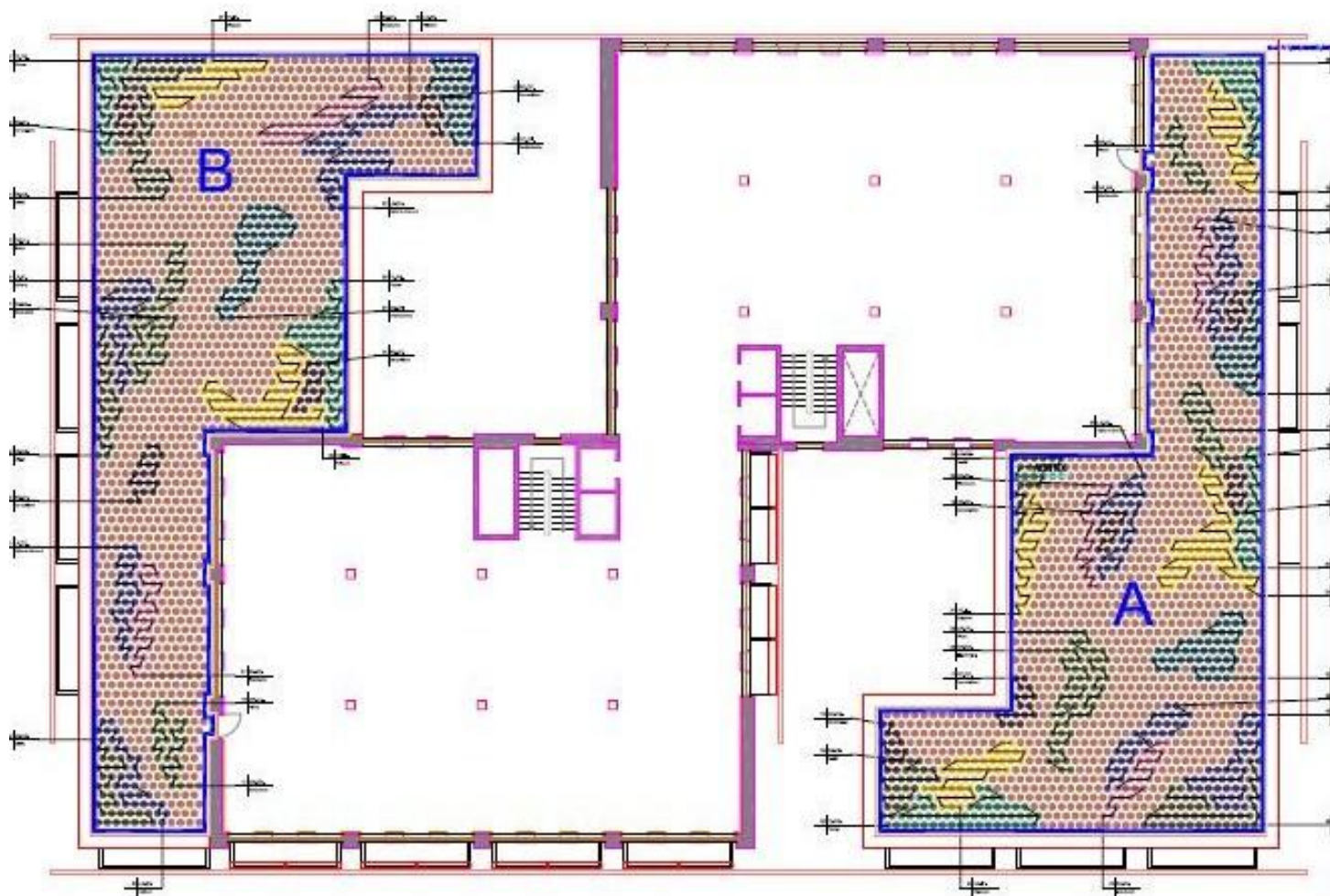
Το υπόστρωμα αποτελείται από διαβαθμισμένη κοκκομετρία, με ειδική σύσταση από ανακυκλωμένα οργανικά και ανόργανα υλικά, μικρού βάρους, το οποίο δεν συμπυκνώνεται, ενώ είναι διαπερατό από αέρα ακόμη και σε κατάσταση κορεσμού.

Πίνακας 11 Στοιχεία υποστρώματος

Παράμετροι	Τιμή αναφοράς	Ανάλυση υποστρώματος	Τιμή μονάδας
Ποσοστό στοιχείων με $d < 0,0063$ mm	≤ 7	2,4	μάζα %
Συνολικός όγκος πόρων	-	63	όγκος %
Μέγιστη υδατοϊκανότητα	≥ 20	25	όγκος %
Περιεχόμενος αέρας στη μέγιστη υδατοϊκανότητα	≥ 10	38	όγκος %
pH	6,5-9,5	7,9	-
Αλλατότητα	$\leq 2,5$	0,8	g/L

6. Ξηρανθεκτικά είδη

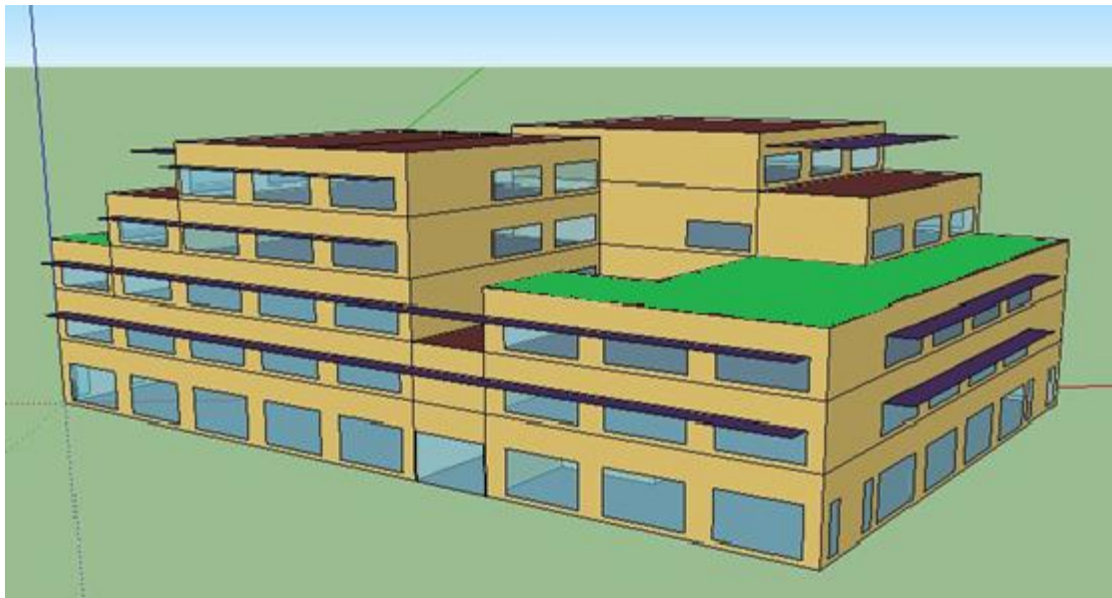
Η χλωρίδα της φυτεμένης οροφής αποτελείται από αψιθιά, λεβάντα, δεντρολίβανο, μαντζουράνα, ρίγανη, τεύκριο, ελίχρυσο, φασκόμηλο και κονβόλβουλο.



Εικόνα 18 Κάτοψη των δυο φυτεμένων οροφών

8. Προσομοίωση κτηρίου

Με τη χρήση του προγράμματος Google Sketch Up (Version 8) σχεδιάστηκε το κτήριο, ενώ κατά την εκτέλεση του προγράμματος EnergyPlus (Version 7) προέκυψαν τα αποτελέσματα. Το κτήριο που σχεδιάστηκε στο Google Sketch Up φαίνεται στην εικόνα 19, όπου το πράσινο χρώμα αντιπροσωπεύει τις εγκατεστημένες φυτεμένες οροφές.



Εικόνα 19 Προσομοίωση κτηρίου στο Google Sketch Up

8.1. Θερμικές ζώνες

Για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτηρίου, αυτό χωρίζεται σε θερμικές ζώνες, δηλαδή σε χώρους με παρόμοια χρήση, ίδιο προφίλ λειτουργίας και κοινά ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα. Γενικά ο διαχωρισμός θα πρέπει να γίνεται στο μικρότερο δυνατό αριθμό προκειμένου να επιτυγχάνεται οικονομία στο πλήθος των δεδομένων εισόδου [33].

Το παρόν κτήριο χωρίστηκε σε 10 θερμικές ζώνες: το ισόγειο και ο πρώτος όροφος αποτελούν δυο ενιαίες θερμικές ζώνες με εξαίρεση το αίθριο εισόδου το οποίο λόγω της υπερυψωμένης οροφής που εκτείνεται μέχρι το ύψος του δεύτερου ορόφου θεωρήθηκε ξεχωριστή θερμική ζώνη. Όσον αφορά τον δεύτερο όροφο, χωρίστηκε σε 3 θερμικές ζώνες, λόγω της παρουσίας των δυο φυτεμένων οροφών όπου ο εκάστοτε υποκείμενος χώρος χωρίστηκε σε διαφορετική θερμική ζώνη. Τέλος ο τρίτος και ο τέταρτος όροφος χωρίστηκαν σε 4 θερμικές ζώνες (2 για κάθε όροφο) λόγω υψομετρικής διαφοράς της πρόσοψης από το πίσω μέρος.

8.2. Απαραίτητοι παράμετροι για τη σωστή εκτέλεση του προγράμματος EnergyPlus

8.2.1. Υπολογισμός θερμοκρασιών εδάφους

Η θερμοκρασία του εδάφους είναι βασική παράμετρος η οποία συνήθως σπάνια μετριέται από μετεωρολογικούς σταθμούς. Ο προσδιορισμός της συνεπώς θα γίνει από τον παρακάτω τύπο, ο οποίος ισχύει για ομογενές έδαφος με σταθερό συντελεστή θερμικής διάχυσης α , ενώ θεωρείται ότι δεν υπάρχουν πηγές ή καταβόθρες θερμότητας στο έδαφος.

$$T(z, t) = T_m - A_s \exp \left[-z \left(\frac{\pi}{365 \cdot \alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cos \left[\left(\frac{2\pi}{365} \right) \left(t - t_o - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{\pi \cdot \alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]$$

Όπου:

- $T(z, t)$, η θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος z (σε °C)
- Z , το βάθος (σε m)

- T , χρόνος στον οποίο υπολογίζεται η θερμοκρασία $T(z,t)$ (σε ημέρα του έτους)
- T_m , μέση ετήσια θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους (σε $^{\circ}\text{C}$)
- A_s , πλάτος της ετήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους (σε $^{\circ}\text{C}$)
- α , συντελεστής θερμικής διάχυσης του εδάφους ($0,06 \text{ m}^2/\text{ημέρα}$)
- t_o , ημέρα του έτους κατά την οποία η θερμοκρασία επιφάνειας του εδάφους λαμβάνει τη χαμηλότερη τιμή της

Η μηνιαία διακύμανση της θερμοκρασίας προκύπτει αφαιρώντας την μέση μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία από την μέση μηνιαία θερμοκρασία για τον κάθε μήνα και στη συνέχεια η τιμή που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με το 2 [33]. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για να διεξαχθούν τα αποτελέσματα καθώς και τα τελευταία, παρουσιάζονται στον πίνακα 12.

Πίνακας 12 Θερμοκρασία εδάφους

Περιοχή: Αθήνα	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
Μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)	10,3	10,6	12,3	16	20,7	25,4	28,1	28	24,3	19,6	15,4	12
Μέση μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία (°C)	13,6	14,2	15,8	19,5	24,2	28,9	31,9	31,9	28,3	23,4	18,8	15,2
Μηνιαία διακύμανση της θερμοκρασίας (°C)	6,6	7,2	7	7	7	7	7,6	7,8	8	7,6	6,8	6,4
Μηνιαία θερμοκρασία εδάφους (για βάθος 1 m)	14,65	15,37	15,78	17,32	19,58	22,06	23,11	22,82	20,41	18,20	16,60	15,07

8.2.2. Δομικά στοιχεία κτηρίου

Λόγω έλλειψης πληροφοριών για τα δομικά στοιχεία του κτηρίου, αυτά θεωρήθηκαν σύμφωνα με την τεχνική οδηγία τεχνικού επιμελητηρίου Ελλάδας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.) 20701-1/2010, ως εξής:

Εξωτερική οροφή

- Οπλισμένο σκυρόδεμα ($\geq 2\%$ σίδηρος), πάχους 250 mm
- Υαλοβάμβακας σε μορφή παπλώματος, πάχους 30 mm
- Ηχομονωτικό στρώμα, πάχους 19.1 mm

Φυτεμένη οροφή

- Υπόστρωμα ανάπτυξης, πάχους 15 cm
- Οπλισμένο σκυρόδεμα ($\geq 2\%$ σίδηρος), πάχους 300 mm
- Υαλοβάμβακας σε μορφή παπλώματος, πάχους 20 mm
- Ηχομονωτικό στρώμα, πάχους 19.1 mm

Εσωτερική οροφή

- Οπλισμένο σκυρόδεμα ($\geq 2\%$ σίδηρος), πάχους 200 mm
- Ηχομονωτικό στρώμα, πάχους 19.1 mm

Εσωτερικό δάπεδο

- Οπλισμένο σκυρόδεμα ($\geq 2\%$ σίδηρος), πάχους 200 mm
- Ηχομονωτικό στρώμα, πάχους 19.1 mm

Εξωτερικός τοίχος

- Οπλισμένο σκυρόδεμα ($\geq 2\%$ σίδηρος), πάχους 150 mm
- Υαλοβάμβακας σε μορφή πλακών, πάχους 50 mm
- Οπλισμένο σκυρόδεμα ($\geq 2\%$ σίδηρος), πάχους 150 mm
- Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα, πάχους 10 mm

Εσωτερικός τοίχος

- Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα, πάχους 10 mm
- Οπτοπλινθοδομή με διάτρητες οπτόπλινθους, πάχους 150 mm
- Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα, πάχους 10 mm

Οι παράμετροι των παραπάνω στοιχείων παραθέτονται στους πίνακες 13 και 14:

Πίνακας 13 Παράμετροι δομικών στοιχείων

Παράμετρος	Οπλισμένο σκυρόδεμα	Υαλοβάμβακας σε μορφή παπλώματος	Υαλοβάμβακας σε μορφή πλακών
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($W/m \cdot K$)	2,5	0,037	0,034
Πυκνότητα (kg/m^3)	2400	43	80
Ειδική θερμοχωρητικότητα ($J/kg \cdot K$)	1000	840	840

Πίνακας 14 Παράμετροι δομικών στοιχείων

Παράμετρος	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα	Διάτρητες οπτόπλινθοι	Ηχομόνωση	Υπόστρωμα ανάπτυξης
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($W/m \cdot K$)	0,87	0,58	0,06	0,35
Πυκνότητα (kg/m^3)	1800	1700	368	1100
Ειδική θερμοχωρητικότητα ($J/kg \cdot K$)	1000	1000	590	1200

8.2.3. Υαλοπίνακες

Λόγω έλλειψης πληροφοριών για τους υαλοπίνακες του κτηρίου, αυτοί θεωρήθηκαν σύμφωνα με την τεχνική οδηγία τεχνικού επιμελητηρίου Ελλάδας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.) 20701-1/2010, ως εξής:

Θύρα εισόδου από υαλοπίνακα

- Υαλοπίνακας 12 mm
- Διάκενο αέρα 6 mm
- Υαλοπίνακας 12 mm

Εξωτερικός υαλοπίνακας

- Υαλοπίνακας 6 mm
- Διάκενο αέρα 6 mm
- Υαλοπίνακας 6 mm

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για τους υαλοπίνακες 6 mm και 12 mm θεωρείται $0,9 W/m \cdot K$, ενώ ο συντελεστής θερμοπερατότητας $3,3 W/m^2 \cdot K$ και $2,8 W/m^2 \cdot K$ για τη θύρα εισόδου και τους εξωτερικούς υαλοπίνακες αντίστοιχα.

Κούφωμα υαλοπίνακα

Για μεταλλικό πλαίσιο πλάτους 20 cm και με θερμοδιακόπτη 12 mm, ο συντελεστής θερμοπερατότητας θεωρείται $3,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

8.2.4. Επιθυμητές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας

Ο σκοπός κάθε συστήματος θέρμανσης είναι η επίτευξη θερμικής άνεσης στους χώρους του κτηρίου το οποίο επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση διάφορων παραμέτρων με της σημαντικότερες να είναι η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Η εσωτερική θερμοκρασία είναι η βασικότερη παράμετρος διαμόρφωσης της θερμικής άνεσης ενός κτηρίου, βέβαια εξαιτίας της υποκειμενικότητας του επιπέδου θερμικής άνεσης και των επιλογών του εκάστοτε χρήστη, η επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικών χώρων μπορεί να ποικίλλει. Για χρήση γραφείου, γενικά επιλέγονται 20°C και 26°C για τη χειμερινή και τη θερινή περίοδο αντίστοιχα. Όσον αφορά την τιμή της σχετικής υγρασίας, επιλέγεται 35 % για τη χειμερινή περίοδο και 45 % για τη θερινή [33].

8.2.5. Εσωτερικά κέρδη

Η εκλυόμενη θερμότητα στο εσωτερικό των κτηρίων επηρεάζει την εσωτερική θερμοκρασία των χώρων και κατά συνέπεια τα πραγματικά φορτία θέρμανσης και ψύξης. Τα εσωτερικά αυτά κέρδη για λόγους ασφαλείας αγνοούνται συνήθως στους υπολογισμούς των φορτίων θέρμανσης και στη διαστασιολόγηση των συστημάτων θέρμανσης. Όμως, για την εξοικονόμηση ενέργειας τα κέρδη αυτά θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Στην περίπτωση του υπολογισμού των φορτίων ψύξης τα εσωτερικά κέρδη συνυπολογίζονται κανονικά. Τα εσωτερικά κέρδη συμπεριλαμβάνουν τρεις βασικές κατηγορίες [33]:

1. Τον ηλεκτροφωτισμό

Σε κάθε χώρο πρέπει να παρέχεται φωτισμός ικανός να εξασφαλίζει στους χρήστες οπτική άνεση και να επιτρέπει την ευχάριστη διαμονή και την εκτέλεση εργασιών. Συνεπώς η στάθμη φωτισμού επιλέγεται στα 500 lux, ενώ η ισχύς για το κτήριο θεωρείται $9,1 \text{ W/m}^2$.

2. Την έκλυση θερμότητας από τους ανθρώπους

Κάθε άτομο ανάλογα με τη δραστηριότητα του, εκλύει θερμότητα υπό τη μορφή αισθητού (λόγω ακτινοβολίας σώματος) και λανθάνοντος φορτίου. Η πυκνότητα πληθυσμού ανά 100 m^2 αναμένεται στα 10 άτομα και ο συνολικός αριθμός των εργαζομένων θεωρείται 150, ενώ η θερμική ισχύς ανά άτομο υπολογίζεται σε 80 W/άτομο .

3. Τον εξοπλισμό

Η εκλυόμενη ισχύς από ηλεκτρικές συσκευές και από άλλες συσκευές, εκλύεται με ακτινοβολία και μεταφορά θερμότητας από την συσκευή στον αέρα. Για γραφεία, η ισχύς του εξοπλισμού θεωρείται 15 W/m^2 .

8.2.6. Αερισμός

Ο αερισμός πραγματοποιείται με την ανανέωση του εσωτερικού αέρα από νωπό αέρα περιβάλλοντος, προκειμένου να επιτευχθούν αποδεκτές συνθήκες υγιεινής και άνεσης. Για τον αερισμό του κτηρίου λαμβάνεται υπόψη ξεχωριστά ο αερισμός από τις διαφυγές αέρα (διείσδυση από τα κουφώματα) και ο μηχανικός αερισμός. Η τιμή της διείσδυσης του αέρα θεωρείται $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ ενώ του μηχανικού αερισμού $30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{άτομο}$ και $3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ [33].

8.3. Λειτουργική θερμοκρασία

Εξαιτίας της εντατικής χρήσης της ενέργειας και του υψηλού της κόστους, σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες είναι αμφιλεγόμενη η χρήση των κλιματιστικών συστημάτων. Βέβαια με τη χρήση των κλιματιστικών επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος της εσωτερικής θερμοκρασίας, όμως υπάρχουν περιπτώσεις που η χρήση κλιματιστικών μονάδων προκαλεί δυσφορία λόγω υπερβολικής ξήρανσης του αέρα, ηχορύπανσης και του συνδρόμου του άρρωστου κτηρίου (ανάλυση έννοιας στο παράρτημα). Το εύρος της λειτουργικής θερμοκρασία είναι μεταξύ 20 και 24 °C για τη χειμερινή περίοδο και 23 με 26 °C για τη θερινή [34].

8.4. Δείκτης Fanger PMV

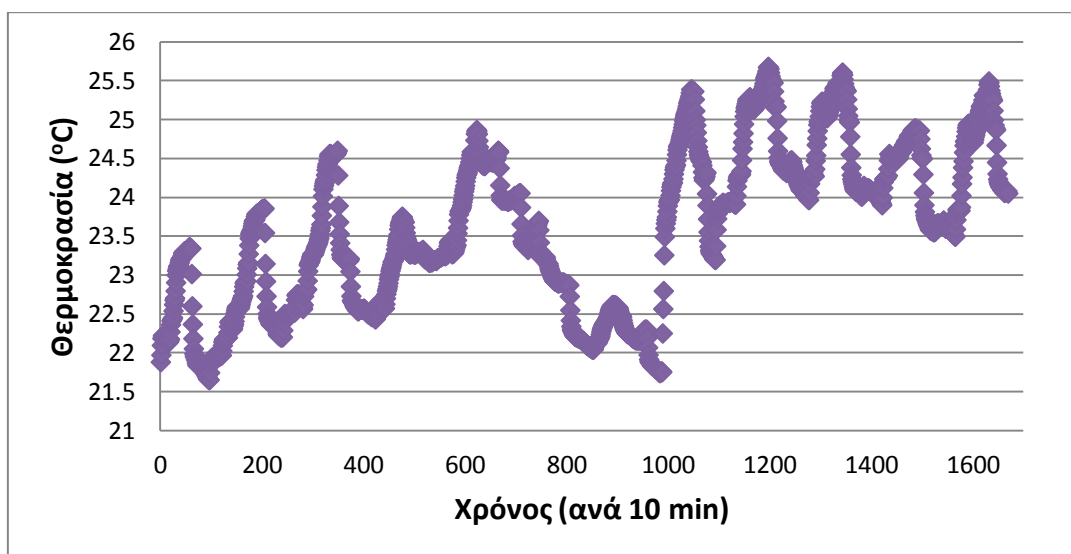
Το μοντέλο Fanger PMV (Predicted Mean Vote) αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1970 και για τον προσδιορισμό του δείκτη, οι συμμετέχοντες οι οποίοι ήταν ντυμένοι με τυπικό ρουχισμό και πραγματοποιούσαν τυπικές δραστηριότητες ήταν εκτεθειμένοι σε διαφορετικές θερμικές συνθήκες. Οι συμμετέχοντες στη συνέχεια κατέγραφαν πως αισθάνονται βάση μιας κλίμακας 7 σημείων (πίνακας 15). Το μοντέλο Fanger PMV συνυπολογίζει τέσσερις φυσικές μεταβλητές (θερμοκρασία αέρα, ταχύτητα αέρα, μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία και σχετική υγρασία) και δυο προσωπικές (ρουχισμό και επίπεδα δραστηριότητας) [35].

Πίνακας 15 Κλίμακα Fanger PMV με αντιστοιχία

-3	-2	-1	0	1	2	3
Υπερβολικό κρύο	Δροσιά	Ελαφρώς Δροσερά	Ουδέτερα	Ελαφρώς ζέστα	Ζέστη	Υπερβολική ζέστη

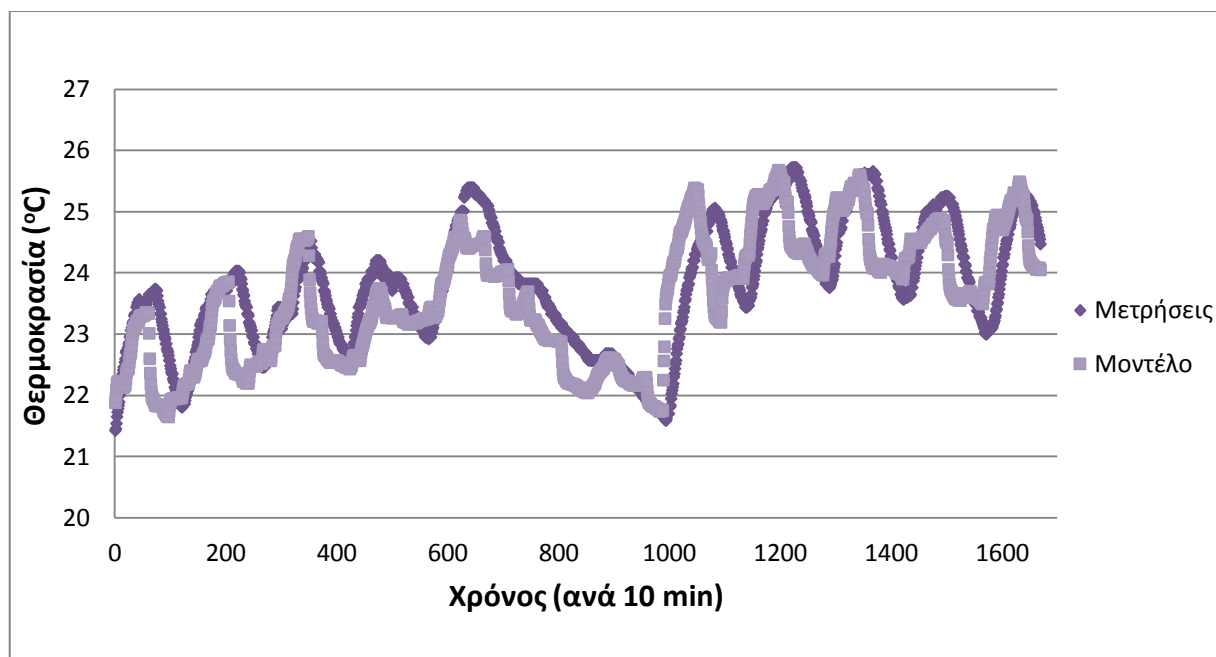
8.5. Βαθμονόμηση μοντέλου

Μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση των διάφορων συντελεστών του προγράμματος (προγράμματα λειτουργίας, δομικά στοιχεία, θερμοκρασία εδάφους και όσα έχουν προαναφερθεί) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα (εικόνα 20) για τη χρονική περίοδο 30/01/12-10/02/12, που αφορούν την θερμοκρασία αέρα εσωτερικού περιβάλλοντος:

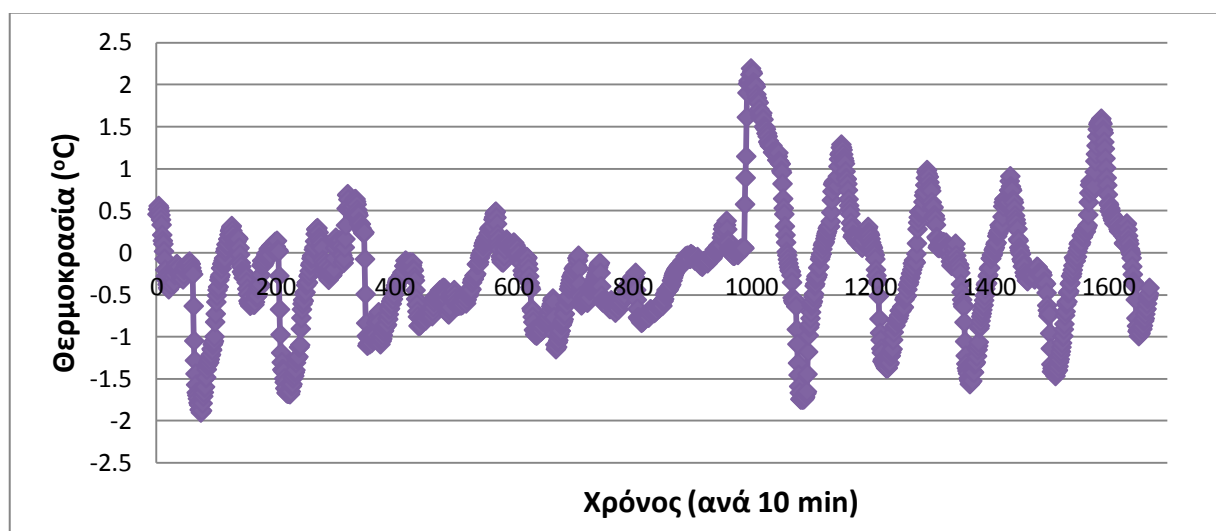


Εικόνα 20 Αποτελέσματα μοντέλου

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος του μοντέλου (εικόνα 20), με τις μετρήσεις για τη χρονική περίοδο 30/01/12-10/02/12 (εικόνα 5), προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 21):



Εικόνα 21 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και μετρήσεων



Εικόνα 22 Διαφορά τιμών θερμοκρασίας μοντέλου και μετρήσεων

Από τα διαγράμματα 21 και 22, παρατηρούμε ότι οι τιμές των μετρήσεων και τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μοντέλου δεν αποκλίνουν γενικά σε μεγάλο βαθμό (απόκλιση περίπου 30%), επομένως η βαθμονόμηση του μοντέλου θεωρείται αποδεκτή.

8.6. Σενάρια

Για την καλύτερη κατανόηση του ρόλου των φυτεμένων οροφών στο κτήριο, ελέγχθηκαν διάφορα σενάρια, για το χρονικό διάστημα του ενός έτους, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

8.6.1. Συστήματα κλιματισμού ενεργοποιημένα

8.6.1.1. Σενάριο 1^ο «Υπάρχον κτήριο»

Στην περίπτωση αυτή ισχύουν οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες, τα προγράμματα και τα δομικά στοιχεία όπως έχουν αναφερθεί, δηλαδή το σενάριο αυτό αντιπροσωπεύει την πραγματική κατάσταση όπως αυτή έχει οριστεί.

8.6.1.2. Σενάριο 2^ο «Αφαίρεση φυτεμένων οροφών»

Στο σενάριο αυτό γίνεται αντικατάσταση των δυο φυτεμένων οροφών με την συμβατική εξωτερική οροφή που έχει οριστεί στην ενότητα 8.2.2., δηλαδή:

Εξωτερική οροφή

- Οπλισμένο σκυρόδεμα ($\geq 2\%$ σίδηρος), πάχους 250 mm
- Υαλοβάμβακας σε μορφή παπλώματος, πάχους 30 mm
- Ηχομονωτικό στρώμα, πάχους 19.1 mm

8.6.1.3. Σενάριο 3ο «Προσθήκη μόνωσης»

Στο σενάριο αυτό γίνεται αντικατάσταση των δυο φυτεμένων οροφών με την συμβατική εξωτερική οροφή που έχει αναφερθεί στην ενότητα 8.2.2., αλλά με αύξηση μόνωσης, δηλαδή:

Εξωτερική οροφή

- Οπλισμένο σκυρόδεμα ($\geq 2\%$ σίδηρος), πάχους 250 mm
- Υαλοβάμβακας σε μορφή παπλώματος, πάχους 50 mm
- Ηχομονωτικό στρώμα, πάχους 19.1 mm

8.6.1.4. Σενάριο 4ο «Αύξηση θερμικής μάζας»

Στο σενάριο αυτό γίνεται αντικατάσταση των δυο φυτεμένων οροφών με την συμβατική εξωτερική οροφή που έχει οριστεί στην ενότητα 8.2.2., αλλά με αύξηση θερμικής μάζας, δηλαδή:

Εξωτερική οροφή

- Οπλισμένο σκυρόδεμα ($\geq 2\%$ σίδηρος), πάχους 300 mm
- Υαλοβάμβακας σε μορφή παπλώματος, πάχους 30 mm
- έχει οριστεί στην ενότητα 8.2.2., πάχους 19.1 mm

8.6.1.5. Αποτελέσματα

Πίνακας 16 Αποτελέσματα εκτέλεσης προγράμματος EnergyPlus (σε GJ)

Παράμετροι φορτίων ενέργειας	1ο Σενάριο	2ο Σενάριο	3ο Σενάριο	4ο Σενάριο
Εσωτερικός φωτισμός (GJ)	916,96	916,96	916,96	916,96
Εξοπλισμός (GJ)	1846,85	1846,85	1846,85	1846,85
Ψύξη (GJ)	2421,47	2430,02	2411,51	2428,48
Θέρμανση (GJ)	582,69	600,66	579,58	599,23
Συνολικό φορτίο (GJ)	5767,97	5794,49	5754,9	5791,52

Πίνακας 17 Αποτελέσματα εκτέλεσης προγράμματος EnergyPlus (σε kWh/m²)

Παράμετροι φορτίων ενέργειας	1ο Σενάριο	2ο Σενάριο	3ο Σενάριο	4ο Σενάριο
Εσωτερικός φωτισμός (kWh/m ²)	36,94	36,94	36,94	36,94
Εξοπλισμός (kWh/m ²)	74,41	74,41	74,41	74,41
Ψύξη (kWh/m ²)	97,56	97,91	97,16	97,84
Θέρμανση (kWh/m ²)	23,48	24,20	23,35	24,14
Συνολικό φορτίο (kWh/m ²)	232,39	233,46	231,86	233,34

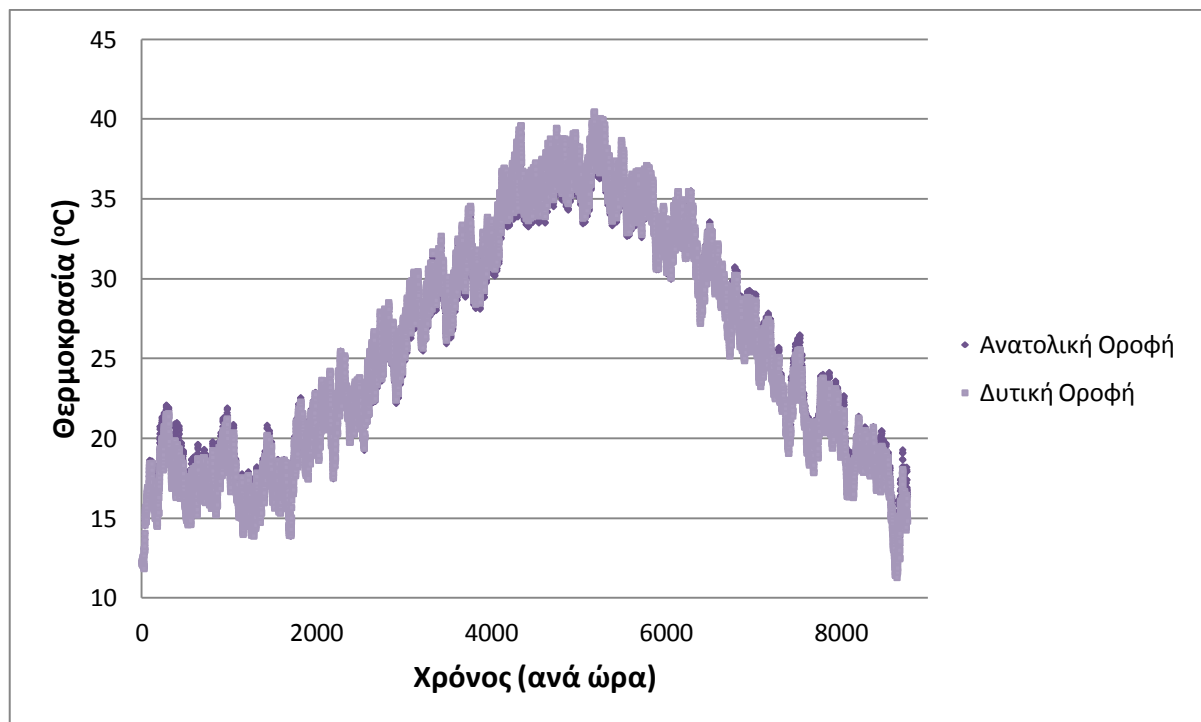
Από τους πίνακες 16 και 17, παρατηρούμε ότι η παρουσία της φυτεμένης οροφής παρουσιάζει ενεργειακή εξοικονόμηση σε σχέση με τα σενάρια 2 και 4, όμως στην περίπτωση του σεναρίου 3, ευνοϊκότερη στην εξοικονόμηση είναι η οροφή με αυξημένη μόνωση. Πιο συγκεκριμένα, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση 3,5 % και 3 % για τα φορτία ψύξης και θέρμανσης αντίστοιχα σε σχέση με την αντικατάστασή της από συμβατική στέγη (σενάριο 2), ενώ στην περίπτωση που η φυτεμένη οροφή αντικατασταθεί με στέγη αυξημένης θερμικής μάζας (σενάριο 4) τότε η εξοικονόμηση ανέρχεται σε 2,9 % για τα φορτία ψύξης και 2,8 % για τα φορτία θέρμανσης. Όμως στην περίπτωση που η φυτεμένη οροφή αντικατασταθεί με στέγη με αυξημένη μόνωση (σενάριο 3) τότε η στέγη αυξημένης μόνωσης παρουσιάζει εξοικονόμηση 4,1 % και 0,5 % για τα φορτία ψύξης και θέρμανσης αντίστοιχα.

8.6.2. Συστήματα κλιματισμού απενεργοποιημένα

Για τον υπολογισμό της λειτουργικής θερμοκρασίας και του δείκτη Fanger PMV απενεργοποιούνται τα συστήματα κλιματισμού στα 4 σενάρια.

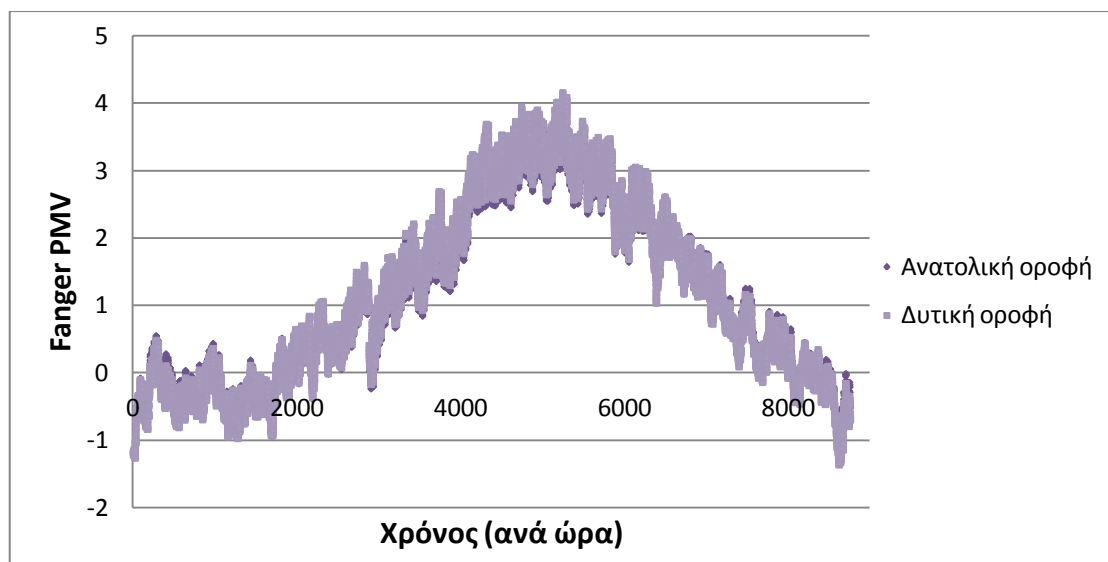
8.6.2.1. Αποτελέσματα

8.6.2.1.1. Σενάριο 1^ο «Υπάρχον κτήριο»



Εικόνα 23 Διακύμανση λειτουργικής θερμοκρασίας για το 1^ο σενάριο

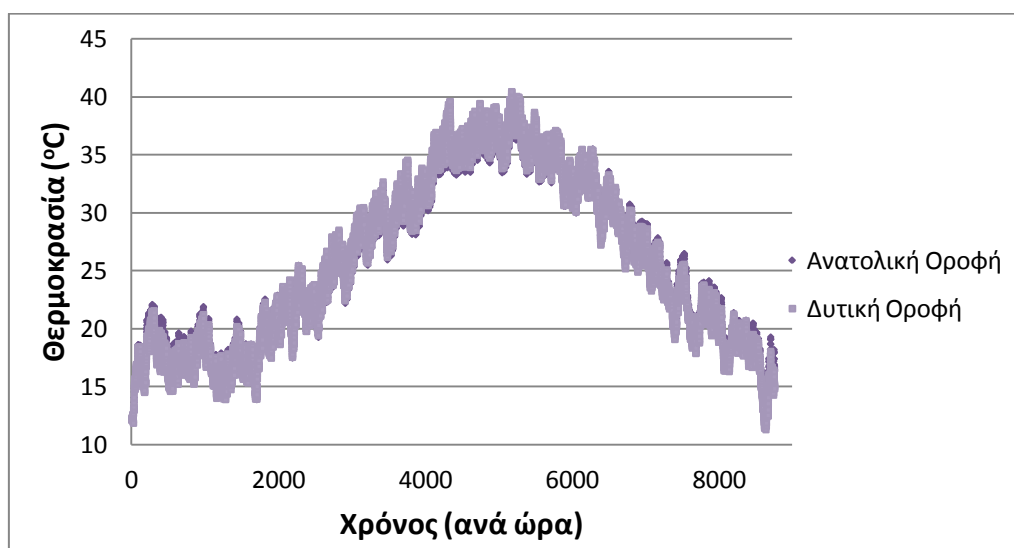
Χωρίς την λειτουργία των κλιματιστικών συστημάτων λοιπόν, οι ώρες που έχουν θερμοκρασία εκτός των ορίων που έχουν ήδη αναφερθεί, και χαρακτηρίζονται ως ώρες δυσφορίας είναι 75 % (6604.0 ώρες) και 77 % (6703.7 ώρες) για την ανατολική και δυτική φυτεμένη οροφή αντίστοιχα.



Εικόνα 24 Διακύμανση δείκτη Fanger PMV για το 1^ο σενάριο

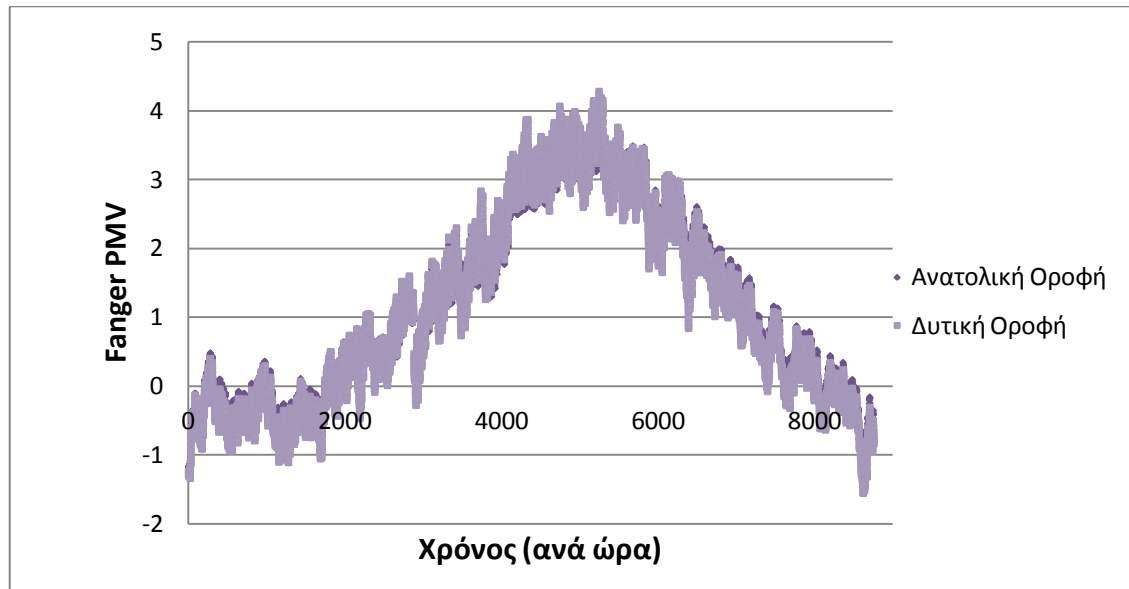
Γενικά παρατηρούμε ότι ο δείκτης Fanger PMV δεν είναι εκτός ορίων για το μεγαλύτερο διάστημα του χρόνου, εκτός από την περίοδο του καλοκαιριού, κάτι αναμενόμενο αν αναλογιστούμε τις συνθήκες που επικρατούν το καλοκαίρι στην περιοχή της Αθήνας. Η ίδια τάση παρατηρείται για όλα τα σενάρια που ακολουθούν.

8.6.2.1.2. Σενάριο 2^ο «Αφαίρεση φυτεμένων οροφών»



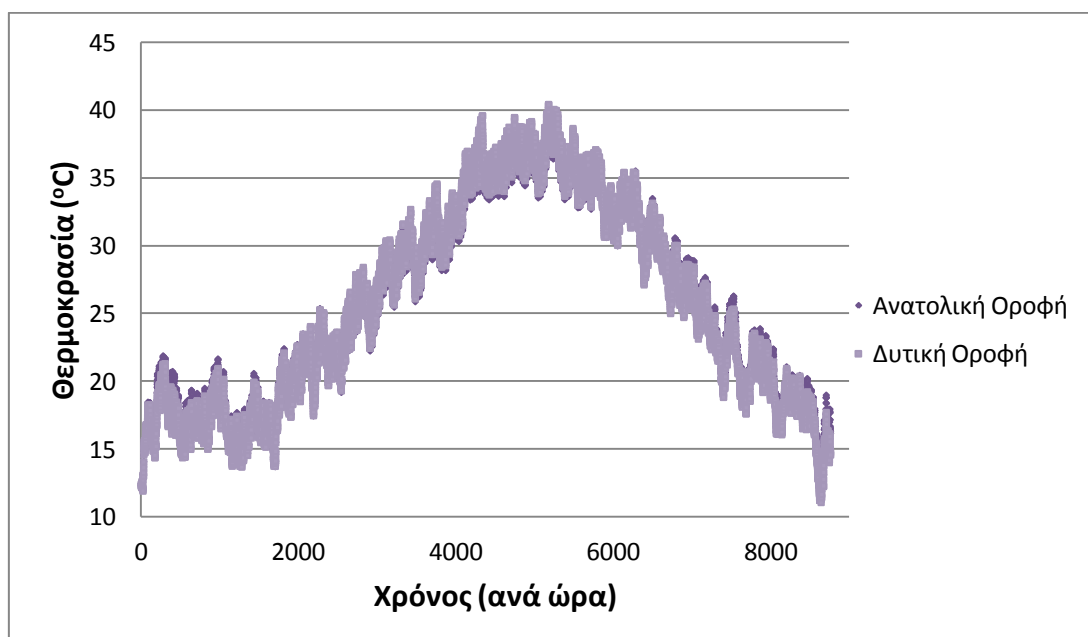
Εικόνα 25 Διακύμανση λειτουργικής θερμοκρασίας για το 2^ο σενάριο

Στο δεύτερο σενάριο, οι ώρες δυσφορίας υπολογίζονται σε 76 % (6698.7 ώρες) και 78 % (6849.0 ώρες) για την ανατολική και δυτική φυτεμένη οροφή αντίστοιχα.



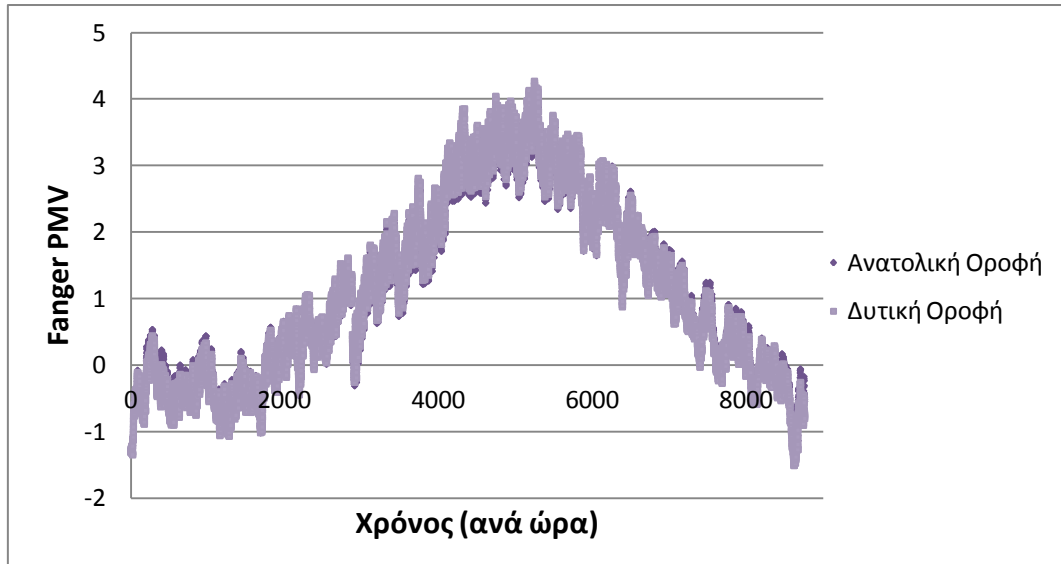
Εικόνα 26 Διακύμανση δείκτη Fanger PMV για το 2^ο σενάριο

8.6.2.1.3. Σενάριο 3^ο «Προσθήκη μόνωσης»



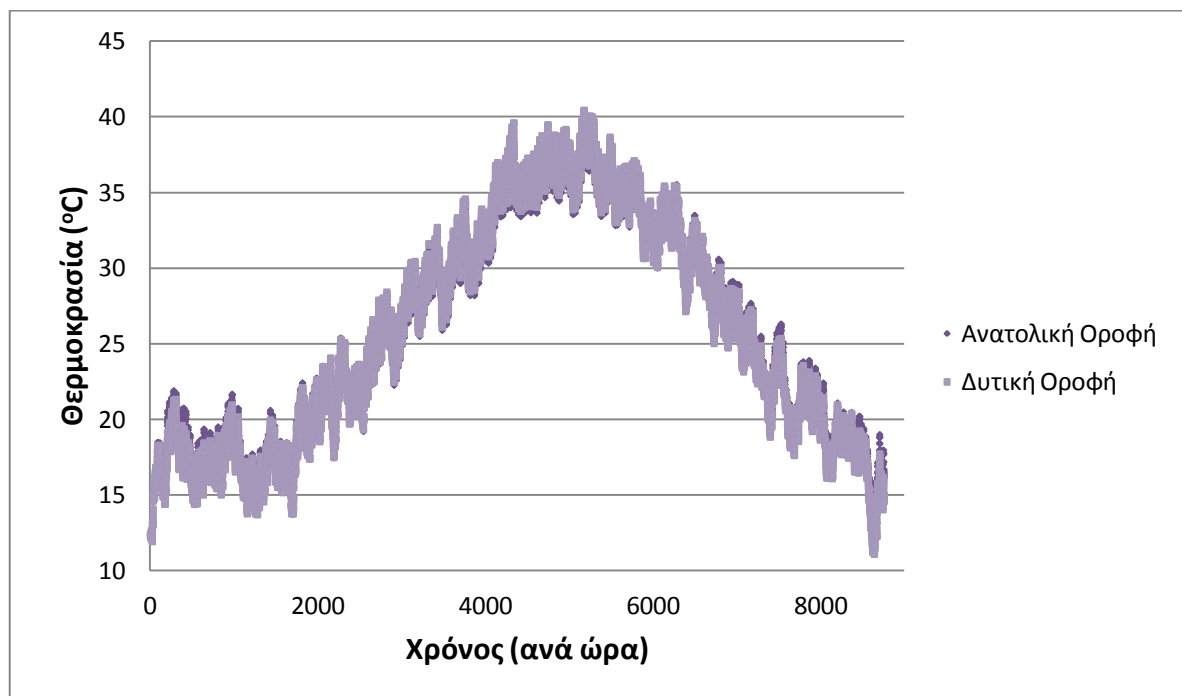
Εικόνα 27 Διακύμανση λειτουργικής θερμοκρασίας για το 3^ο σενάριο

Στο τρίτο σενάριο, οι ώρες δυσφορίας υπολογίζονται σε 76 % (6633.2 ώρες) και 77 % (6770.8 ώρες) για την ανατολική και δυτική φυτεμένη οροφή αντίστοιχα.



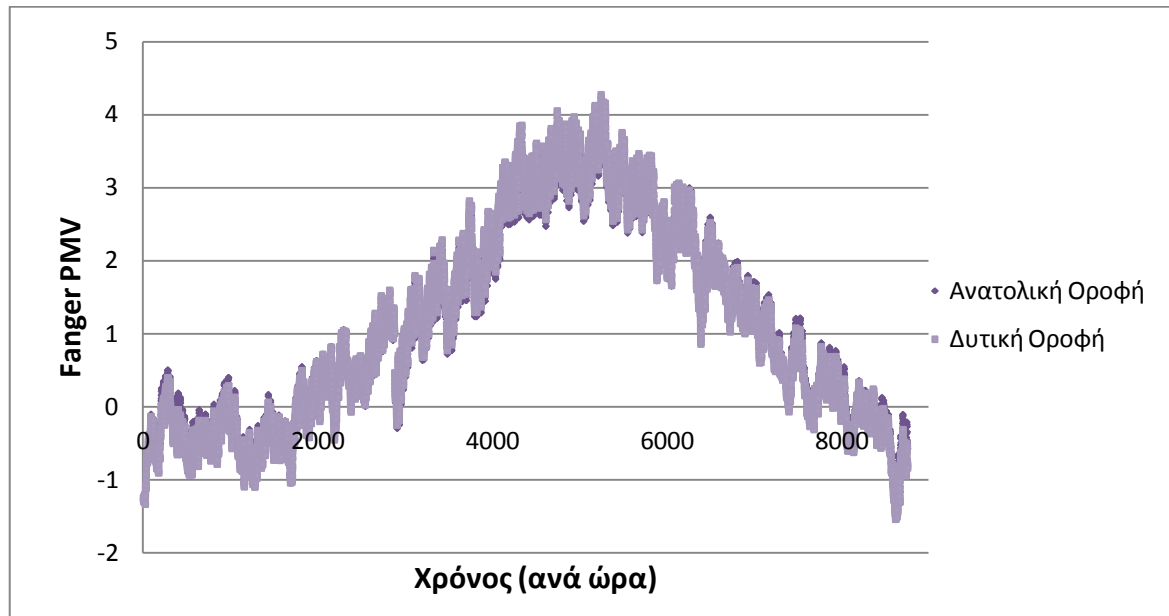
Εικόνα 28 Διακύμανση δείκτη Fanger PMV για το 3^ο σενάριο

8.6.2.1.4. Σενάριο 4^ο «Αύξηση θερμικής μάζας»

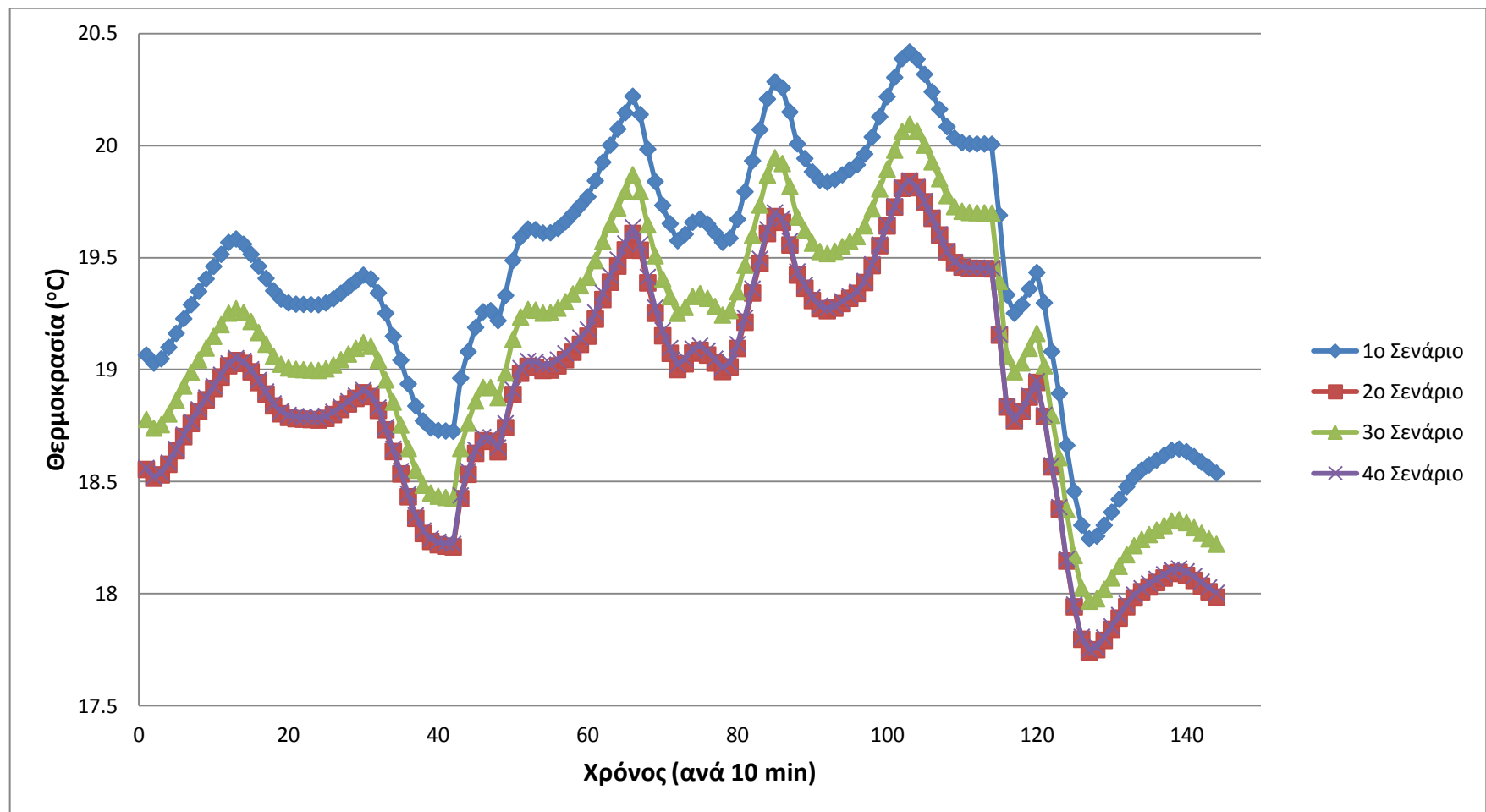


Εικόνα 29 Διακύμανση λειτουργικής θερμοκρασίας για το 4^ο σενάριο

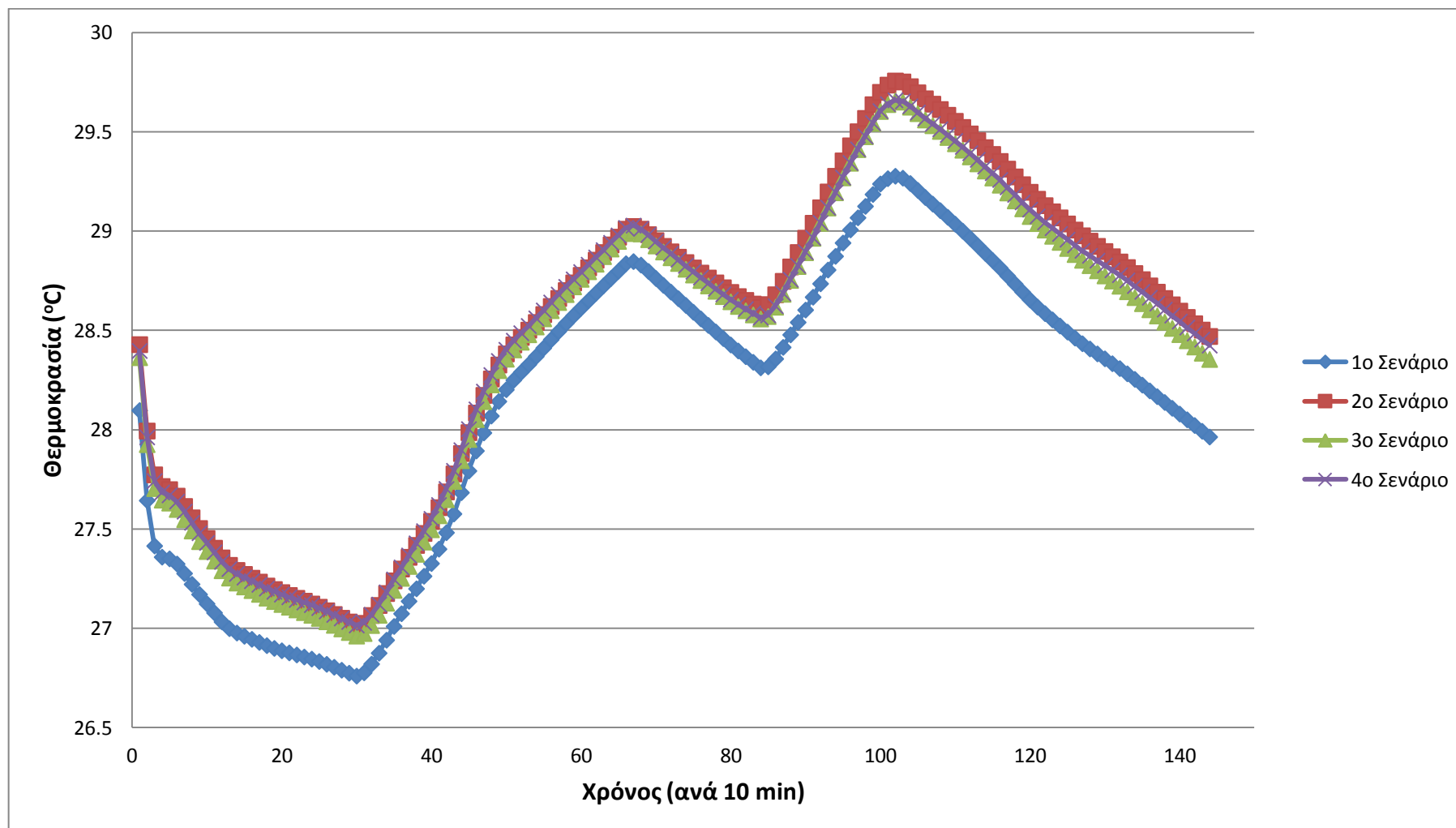
Στο τελευταίο σενάριο, οι ώρες δυσφορίας υπολογίζονται σε 76 % (6695.2 ώρες) και 78 % (6846.7 ώρες) για την ανατολική και δυτική φυτεμένη οροφή αντίστοιχα.



Εικόνα 30 Διακύμανση δείκτη Fanger PMV για το 4^ο σενάριο



Εικόνα 31 Ημερήσια διακύμανση της θεοκρασίας για τις 22/12 (τυχαία ημέρα)



Εικόνα 32 Ημερήσια διακύμανση της θεοκρασίας για τις 11/06 (τυχαία ημέρα)

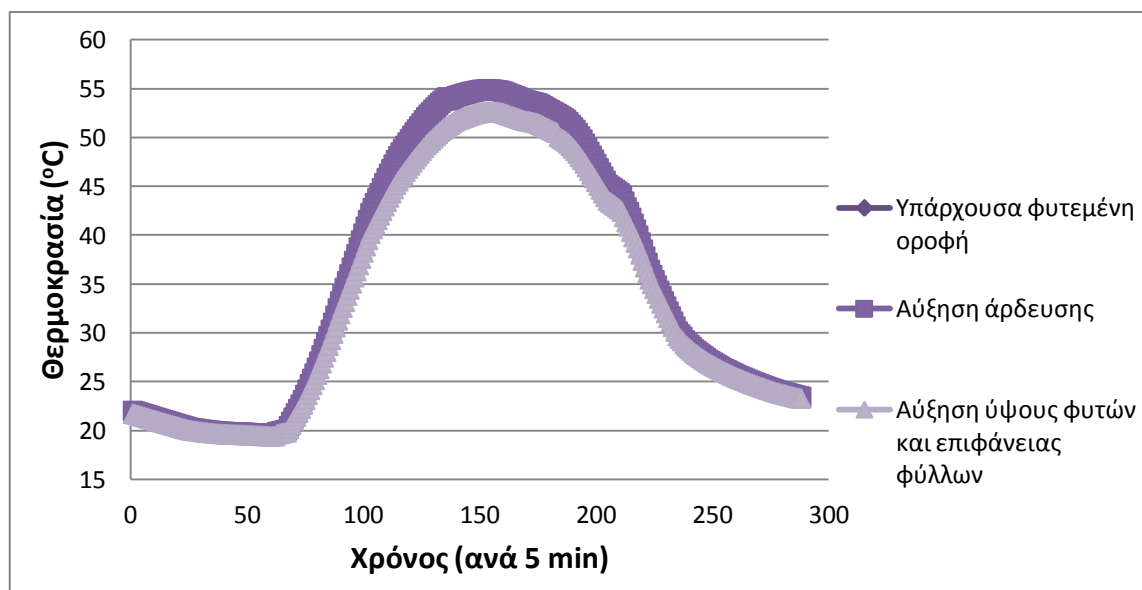
8.7. Αλλαγή στοιχείων της φυτεμένης οροφής

Για την καλύτερη κατανόηση του ρόλου της βλάστησης των φυτεμένων οροφών, θα μελετηθούν οι εξής περιπτώσεις: αύξηση άρδευσης και αύξηση ύψους φυτών και επιφάνειας φύλλων.

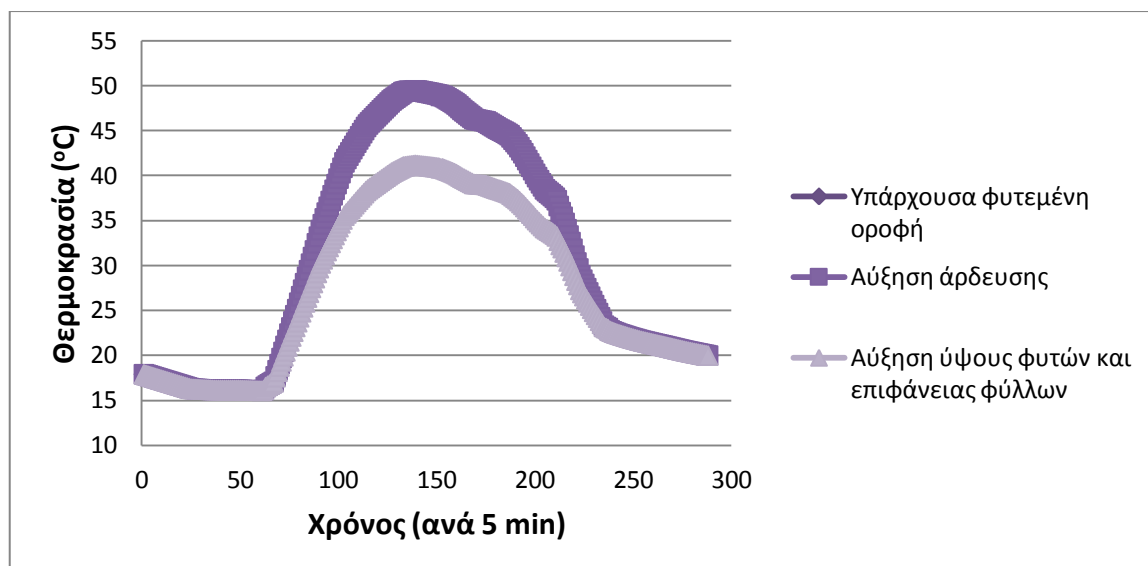
8.7.1. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα προέκυψαν από την εκτέλεση του προγράμματος EnergyPlus (Version 7.1). Για τις περιπτώσεις που έχουν αναφερθεί, ελέγχθηκαν οι εξής παράμετροι: θερμοκρασία εδάφους και βλάστησης φυτεμένης οροφής, λανθάνουσα ροή και ροή αισθητής θερμότητας βλάστησης και εδάφους και η εξατμισοδιαπνοή. Επίσης επιλέχθηκαν δυο τυχαίες ημέρες, η 11/06 για τη θερινή περίοδο και η 22/12 για τη χειμερινή περίοδο.

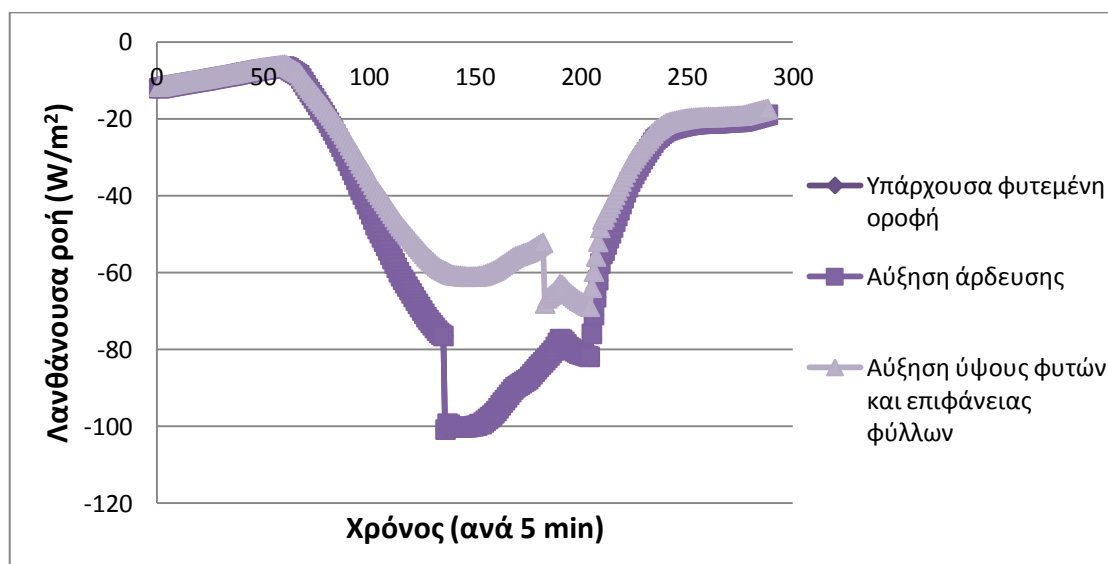
8.7.1.1. Θερινή περίοδος (11/06)



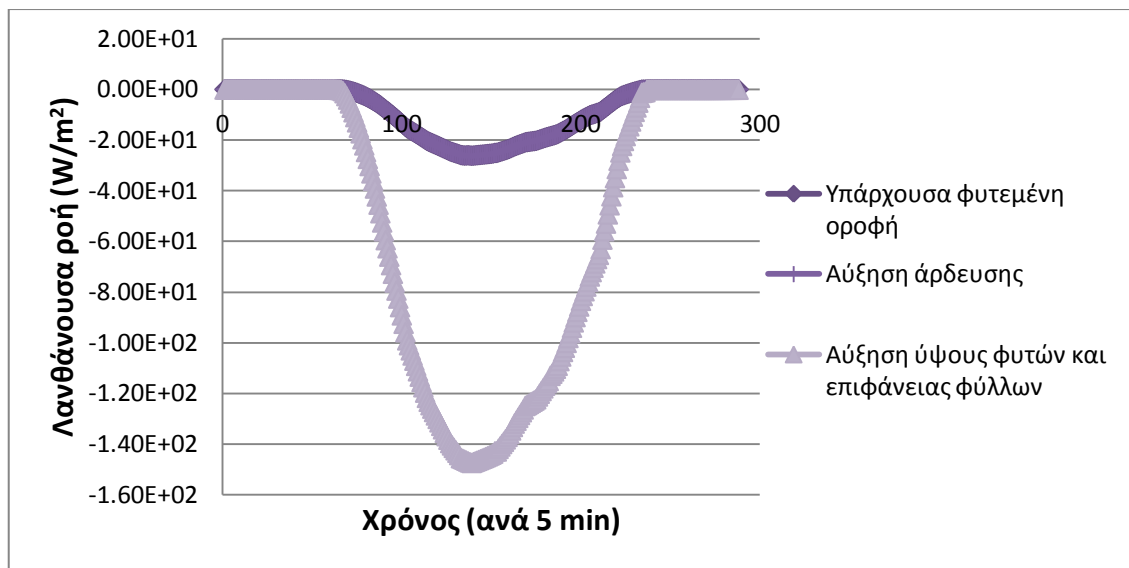
Εικόνα 33 Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας εδάφους



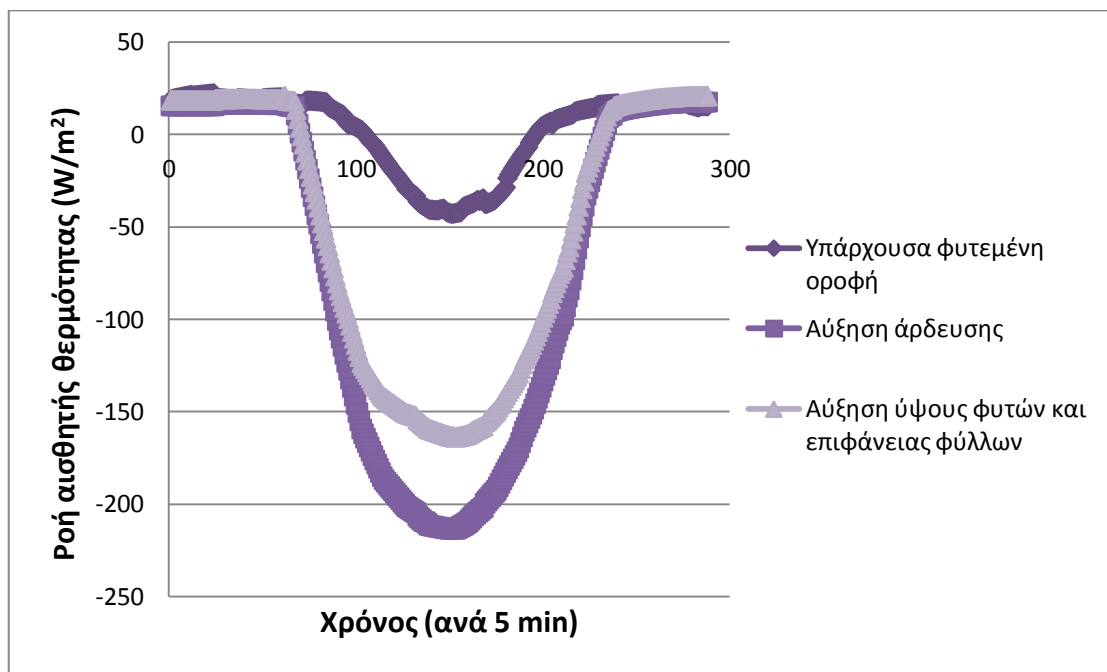
Εικόνα 34 Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας βλάστησης



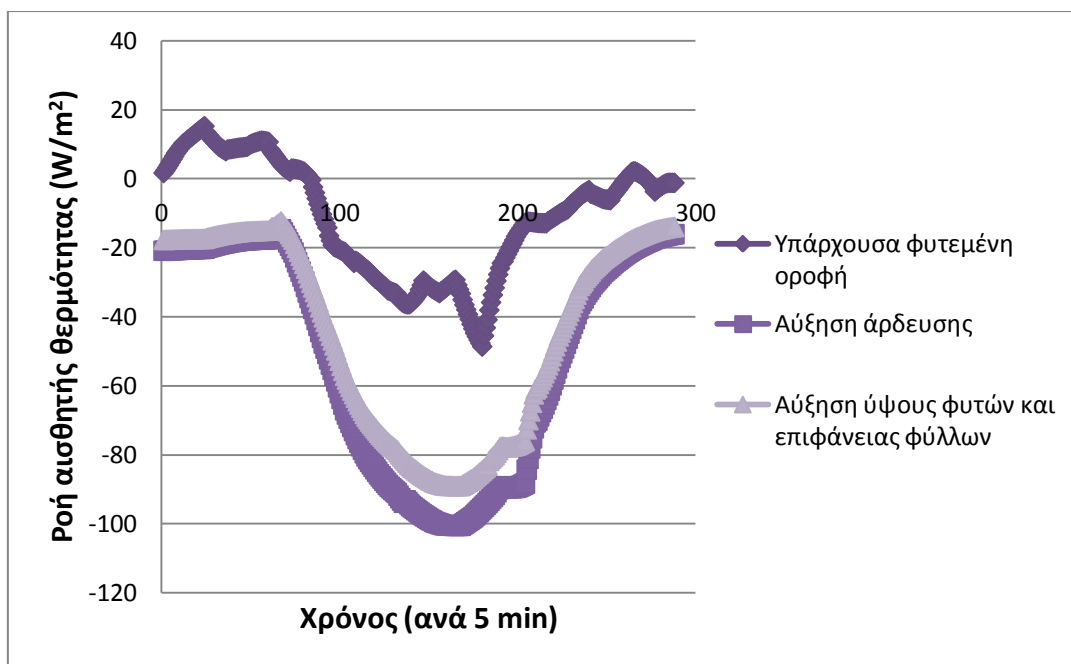
Εικόνα 35 Ημερήσια διακύμανση λανθάνουσας ροής εδάφους



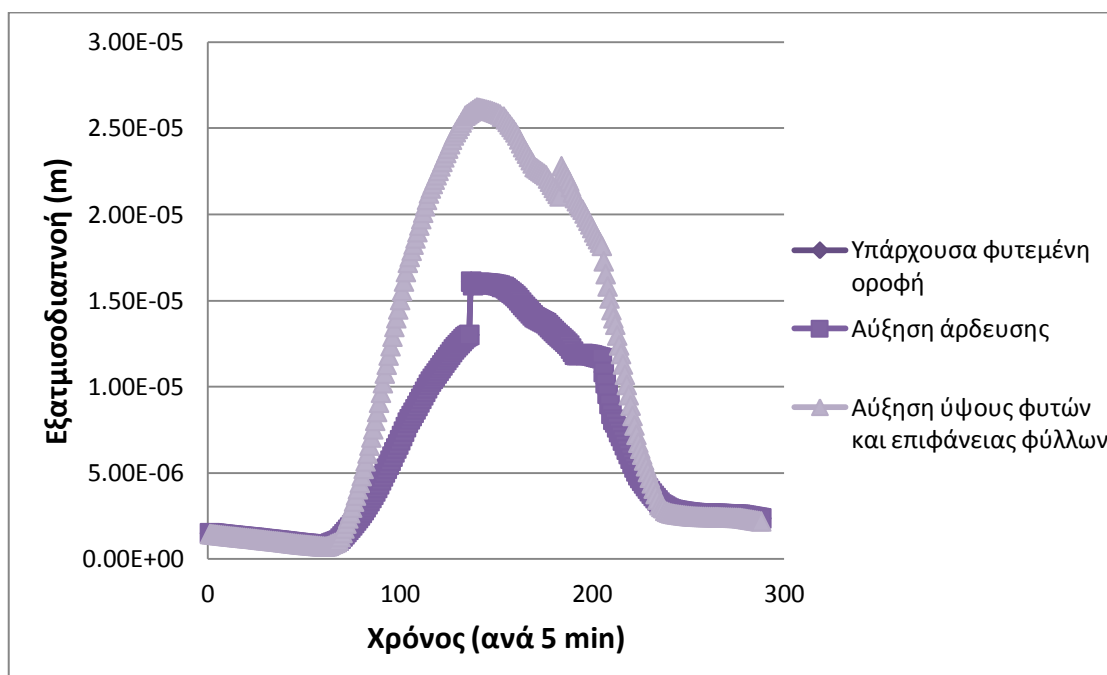
Εικόνα 36 Ημερήσια διακύμανση λανθάνουσας ροής βλάστησης



Εικόνα 37 Ημερήσια διακύμανση ροής αισθητής θερμότητας βλάστησης



Εικόνα 38 Ημερήσια διακύμανση ροής αισθητής θερμότητας εδάφους

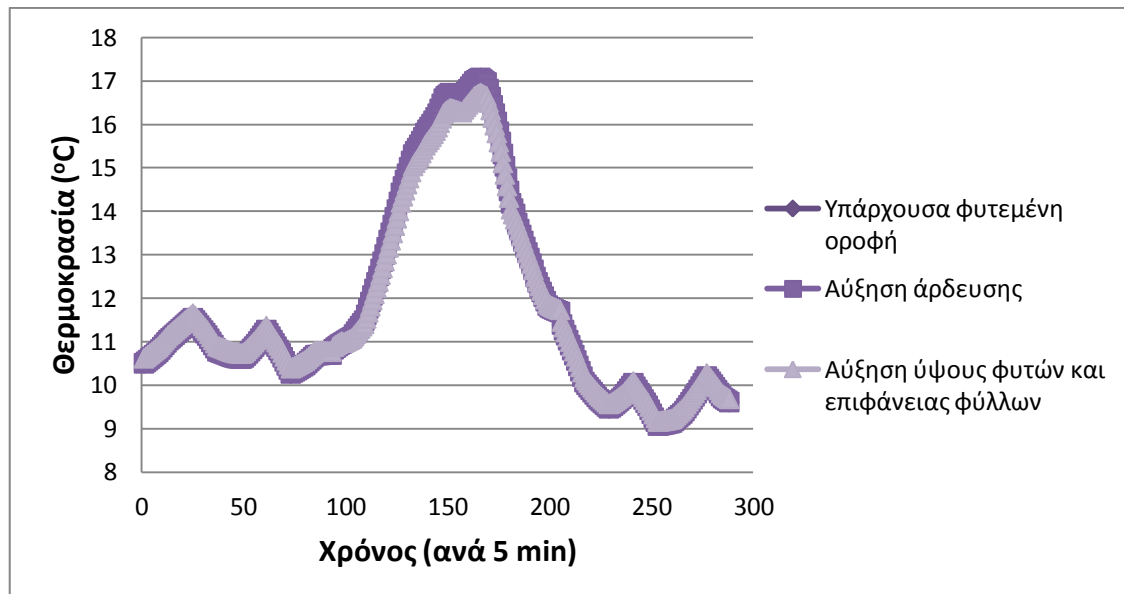


Εικόνα 39 Ημερήσια διακύμανση εξατμισοδιαπνοής

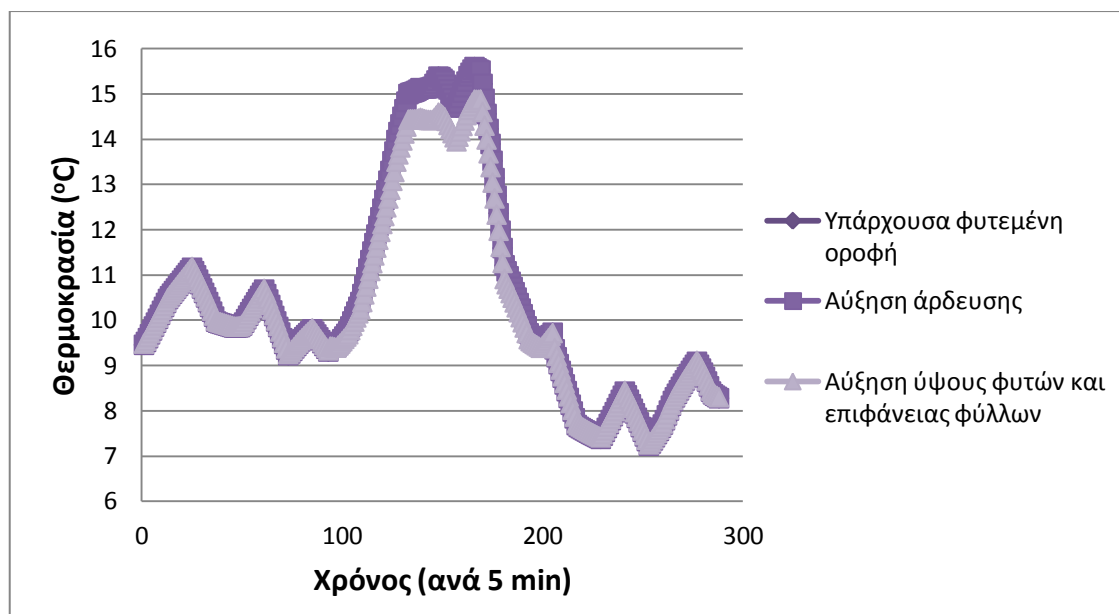
Από τα διαγράμματα (εικόνες 33-39) παρατηρούμε ότι η αύξηση άρδευσης ελάχιστα επηρεάζει τις περισσότερες παραμέτρους, σε αντίθεση με την αύξηση του ύψους των φυτών και της επιφάνειας των φύλλων. Με αύξηση 33 % και 28 % του ύψους

των φυτών και της επιφάνεια των φύλλων αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι η διακύμανση της θερμοκρασίας του εδάφους και της βλάστησης της φυτεμένης οροφής είναι μικρότερη, ενώ η ένταση της εξατμισοδιαπνοής αυξάνεται αισθητά. Όσον αφορά τη λανθάνουσα ροή, για το χρονικό διάστημα μεταξύ 6:30 και 19:30, παρατηρείται μεγάλη μείωση της ροής βλάστησης και αισθητή αύξηση της ροής εδάφους. Τέλος για τη ροή αισθητής θερμότητας, παρατηρούμε μεγάλη μείωση της στις περιπτώσεις αυξημένης άρδευσης και αύξησης ύψους φυτών και επιφάνειας φύλλων, τόσο για τη βλάστηση όσο για το έδαφος.

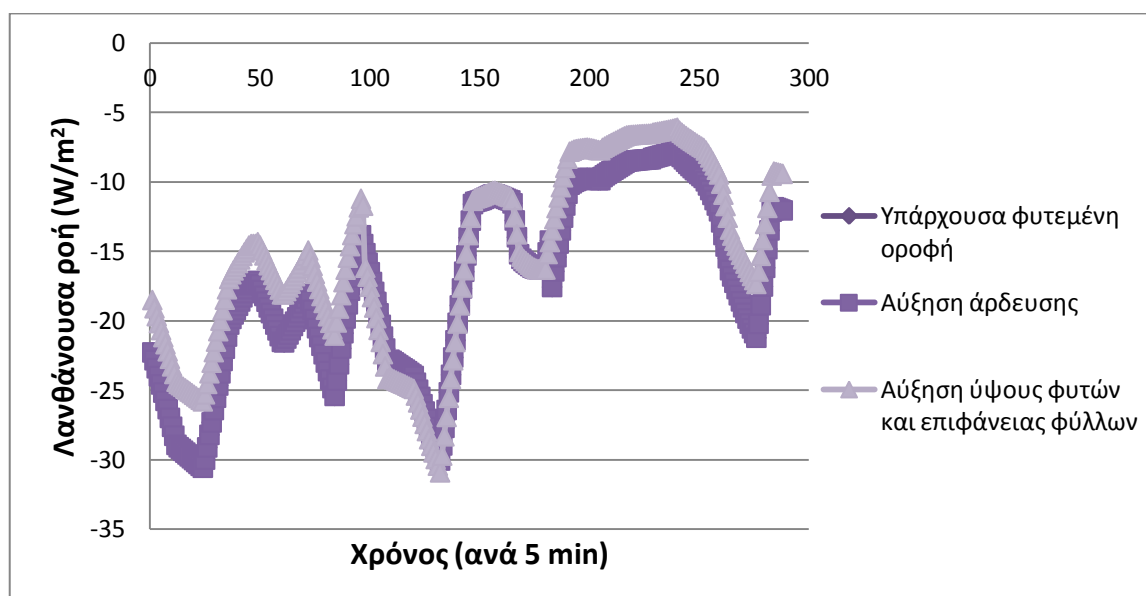
8.7.1.2. Χειμερινή περίοδος (22/12)



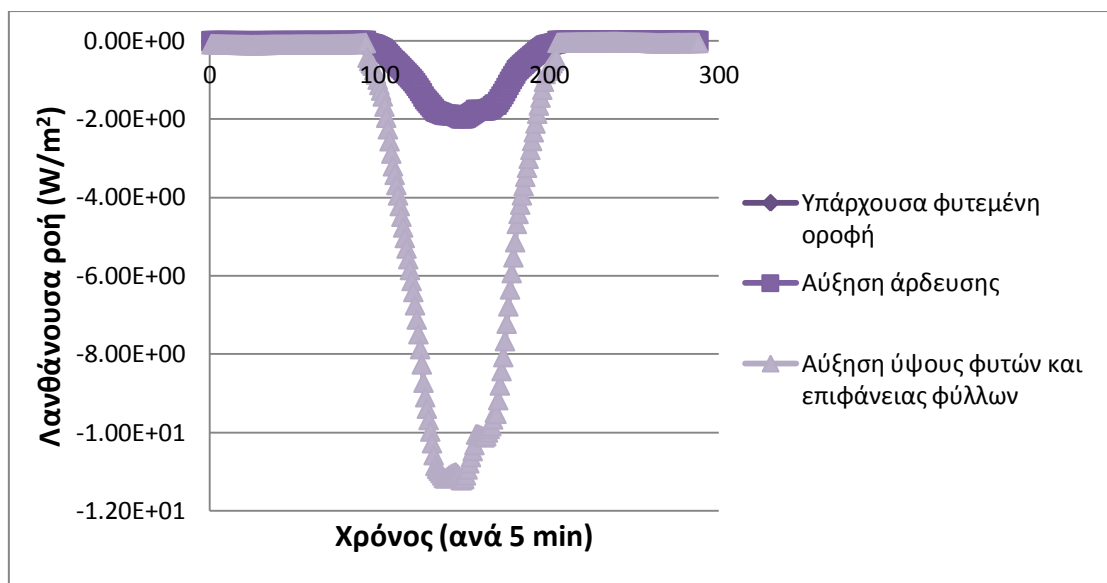
Εικόνα 40 Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας εδάφους



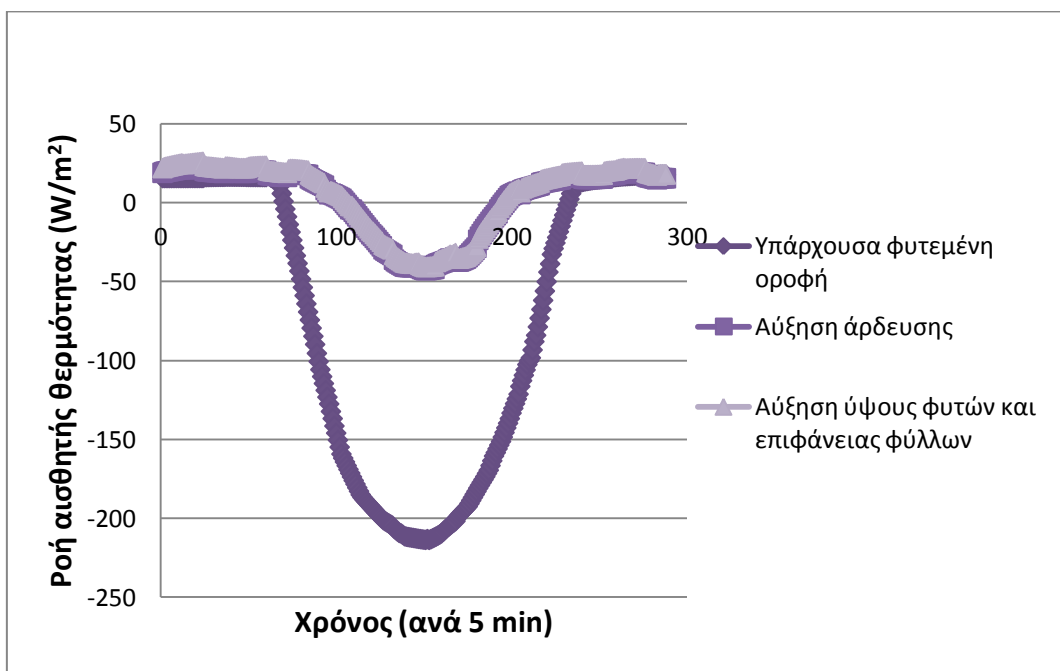
Εικόνα 41 Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας βλάστησης



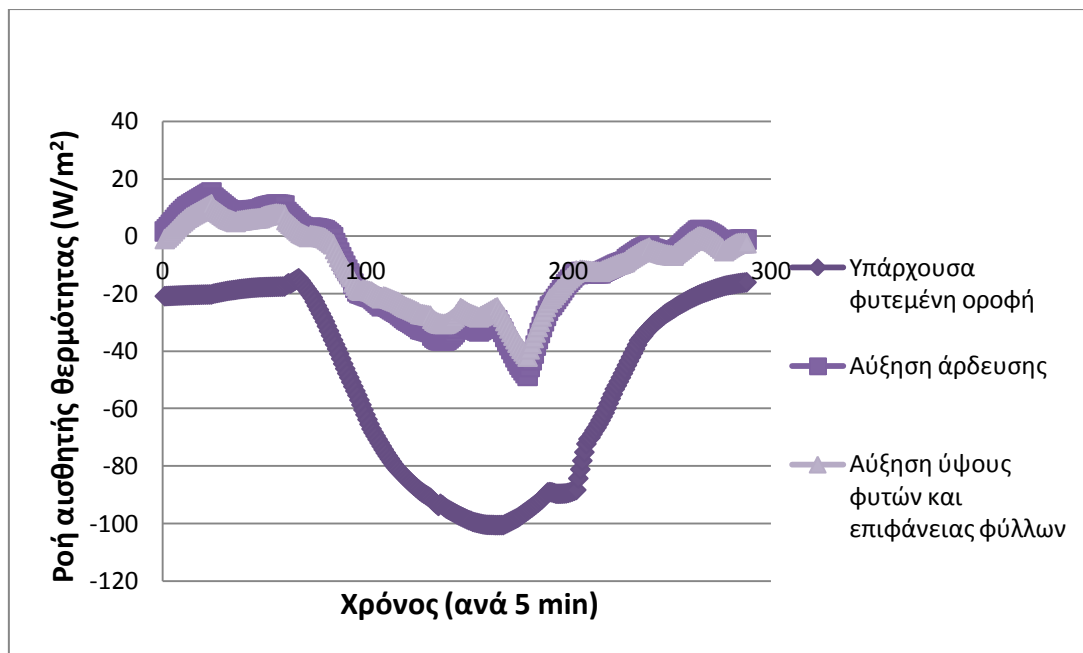
Εικόνα 39 Ημερήσια διακύμανση λανθάνουσας ροής εδάφους



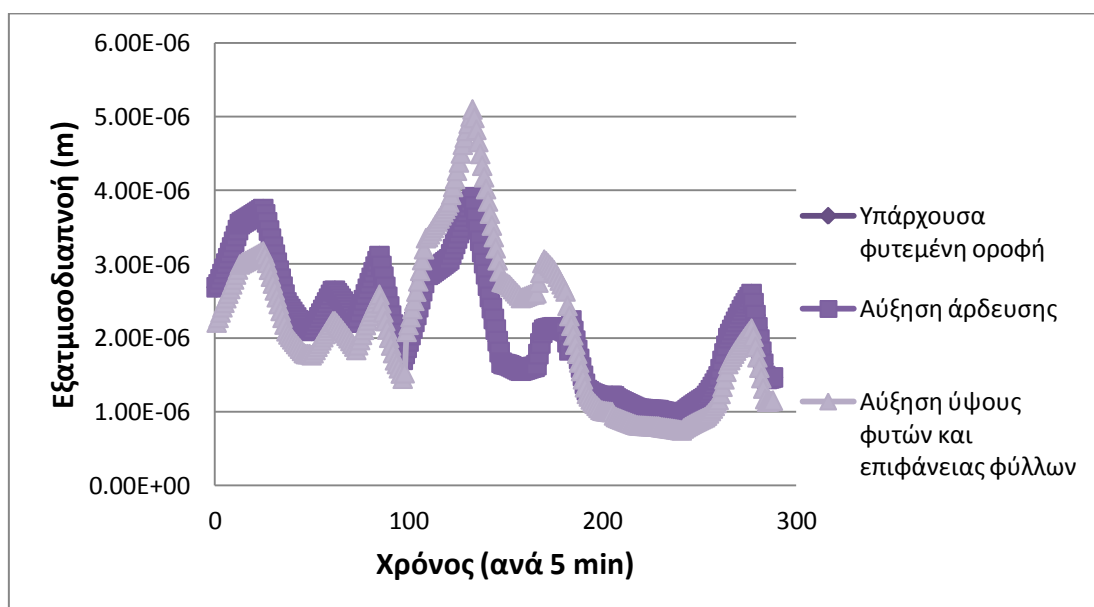
Εικόνα 40 Ημερήσια διακύμανση λανθάνουσας ροής βλάστησης



Εικόνα 42 Ημερήσια διακύμανση ροής αισθητής θερμότητας εδάφους



Εικόνα 43 Ημερήσια διακύμανση ροής αισθητής θερμότητας εδάφους



Εικόνα 44 Ημερήσια διακύμανση εξατμισοδιαπνοής

Ίδια τάση παρατηρείται και για τις 22/12, με μόνη διαφορά στην εξατμισοδιαπνοή στη λανθάνουσα ροή εδάφους και στην διακύμανση της ροής αισθητής θερμότητας. Στην πρώτη περίπτωση, ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής είναι μεν μεγαλύτερος στην περίπτωση της αύξησης ύψους φυτών και επιφάνειας φύλλων, όμως η διαφορά με την αντίστοιχη τιμή της υπάρχουσας φυτεμένης οροφής είναι μικρότερη σε σχέση

με τις 11/06. Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση, η ημερήσια διακύμανση της λανθάνουσας ροής του εδάφους είναι εντονότερη από την αντίστοιχη της θερινής περιόδου. Για τη ροή αισθητής θερμότητας, παρατηρείται αντίθετη συμπεριφορά από την αντίστοιχη της θερινής περιόδου. Δηλαδή, η αύξηση άρδευσης και του ύψους των φυτών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ροής εδάφους και βλάστησης.

Από τα αποτελέσματα των δυο περιόδων, παρατηρούμε ότι η αύξηση του ύψους των φυτών και της επιφάνειας των φύλλων είναι επιθυμητή, καθώς αυξάνεται ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής, κατά τη δράση της οποίας μεγάλες ποσότητες της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να μετατραπούν σε λανθάνον φορτίο το οποίο εμποδίζει την αύξηση της θερμοκρασίας. Επιπλέον, μειώνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας βλάστησης και εδάφους και ως εκ τούτου, και το μέγεθος των ενεργειακών απωλειών. Τέλος η αύξηση στην άρδευση δεν φαίνεται να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις παραμέτρους που έχουν αναφερθεί εκτός από την περίπτωση της ροής αισθητής θερμότητας, όπου μειώνεται η τιμή της κατά τη θερινή περίοδο και αυξάνεται κατά την χειμερινή.

Όσον αφορά τη λανθάνουσα ροή και τη ροή αισθητής θερμότητας, παρατηρούμε ότι στο μεγαλύτερο μέρος της ημέρας, έχει αρνητική τιμή. Αυτό σημαίνει ότι η μεταφορά θερμότητας γίνεται από το υπόστρωμα προς το περιβάλλον και όχι από το περιβάλλον προς το κτήριο που παρατηρείται στις περιπτώσεις των δομικών υλικών. Συνεπώς η φυτεμένη οροφή προστατεύει από θερμικές απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο και από εισροή θερμότητας τη θερινή περίοδο.

9. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Από τα αποτελέσματα και τη βιβλιογραφία προκύπτει ότι οι φυτεμένες οροφές συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της μείωσης των απαιτούμενων φορτίων για ψύξη και θέρμανση (πίνακες 16 και 17), μειώνουν τις ώρες που χαρακτηρίζονται ως ώρες δυσφορίας (εικόνα 23), ενώ η διακύμανση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι μικρότερη σε σχέση με τα άλλα σενάρια κατά τη θερινή περίοδο (εικόνα 32), συνεπώς συνεισφέρουν στη μείωση των θερμοκρασιών εντός του κτηρίου. Όσον αφορά τη χειμερινή περίοδο, για μια τυχαία μέρα παρατηρούμε ότι συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο (εικόνα 31), δηλαδή το σενάριο της φυτεμένης οροφής έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, αφού η φυτεμένη οροφή λειτουργεί σαν στρώμα μόνωσης και μειώνει τις ενεργειακές απώλειες. Αν και το σενάριο αυξημένης μόνωσης παρουσιάζει μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, αν αναλογιστούμε την αυξημένη διάρκεια ζωής της στέγης και την μεγαλύτερη μείωση των ωρών δυσφορίας που προσφέρει, τότε η χρήση των φυτεμένων οροφών φαίνεται να είναι ευνοϊκότερη.

Τα αποτελέσματα του σεναρίου αύξησης μόνωσης ήταν αναμενόμενα καθώς, εξαιτίας των υψηλών επίπεδων μόνωσης των νεόδμητων κτηρίων ελάχιστα επηρεάζεται η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση και η εσωτερική θερμοκρασία. Αντίθετα, τα παλαιότερα κτήρια με ελλιπή ή καθόλου θερμομόνωση επωφελούνται περισσότερο από την εγκατάσταση της φυτεμένης οροφής, συνεπώς η χρήση των φυτεμένων οροφών στον Ελλαδικό χώρο όπου το 60 % των κτηρίων έχει κατασκευαστεί πριν τεθεί σε ισχύ ο νόμος της θερμομόνωσης, φαντάζει ελκυστική.

Σε περιοχές με ήπιο χειμώνα και αρκετά θερμό καλοκαίρι, όπως στη χώρα μας, η παρουσία των φυτεμένων οροφών είναι ευεργετική κατά την καλοκαιρινή περίοδο καθώς οι ανάγκες για ψύξη είναι αυξημένες. Από την άλλη μεριά, κατά τη χειμερινή περίοδο η φυτεμένη οροφή προστατεύει έναντι των ενεργειακών απωλειών. Όμως η παρουσία της φυτεμένης οροφής δεν είναι ικανή ώστε να παρέχονται συνθήκες πλήρους άνεσης (εικόνες 23, 24), οπότε τα συστήματα κλιματισμού είναι απαραίτητα.

Τέλος αν και η αρχική δαπάνη των φυτεμένων οροφών είναι μεγάλη, λόγω της διάρκειας ζωής τους και όλων των οφελών που προκύπτουν από τη χρήση τους όπως ο μετριασμός φαινομένου αστικής νησίδας και ρύπανσης αέρα, απορρόφηση και κατακράτηση του νερού της απορροής, αύξηση βιοποικιλότητας και δημιουργία χώρων πράσινου κ.α., συμπεραίνουμε ότι η χρήση των φυτεμένων οροφών είναι ευεργετική και απαραίτητη και πρέπει να προωθηθεί και από την πολιτεία ώστε να καταπολεμηθεί ο φραγμός της αρχικής δαπάνης.

Όσον αφορά τις μελλοντικές επεκτάσεις, προκειμένου να επιτευχθεί μικρότερο ποσοστό σφάλματος, θα πρέπει να παρέχονται όλες οι απαιτούμενες πληροφορίες (χρονοδιαγράμματα ψύξης, θέρμανσης, φωτισμού, πληροφορίες για τα δομικά στοιχεία κ.α.) για το υπό μελέτη κτήριο. Επιπλέον, θα ήταν δυνατόν να αξιολογηθούν κτήρια (σύγχρονα ή μη) και φυτεμένες οροφές διαφορετικού τύπου. Τέλος, για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, απαιτούνται μετρήσεις για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Παράρτημα

Παραδείγματα φυτεμένων οροφών



Εικόνα 45 Φυτεμένες οροφές στο Βερολίνο της Γερμανίας (από προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 46 Φυτεμένη οροφή στο Μοντρέ της Ελβετίας (από προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 47 Κατασκευή φυτεμένης οροφής στη Λωζάννη της Ελβετίας (από προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 48 Δημαρχείο Σικάγου των Η.Π.Α. [36]

Παραδείγματα χλωρίδας κατάλληλης για τις φυτεμένες οροφές



Εικόνα 49 *Sedum album* [37]



Εικόνα 50 *Sedum sexangulare* [37]



Εικόνα 51 *Sedum kamtschaticum* [37]



Εικόνα 52 *Sedum spurium* 'Fuldaglut' [38]

Σύνδρομο Άρρωστου Κτηρίου (Sick Building Syndrome -SBS) [39]

Ο όρος SBS χρησιμοποιείται για να περιγράψει καταστάσεις στις οποίες οι παρευρισκόμενοι στο εσωτερικό ενός κτηρίου (κυρίως εργαζόμενοι), βιώνουν σοβαρά προβλήματα υγείας τα οποία φαίνονται να έχουν άμεση σχέση με τον χρόνο που περνούν μέσα στο κτήριο. Όμως, συγκεκριμένα συμπτώματα ή ασθένειες δεν μπορούν να προσδιοριστούν. Επιπλέον, τα παράπονα μπορούν να προέρχονται από ένα συγκεκριμένο χώρο ή ζώνη του κτηρίου ή μπορεί να προέρχονται από ολόκληρο το κτήριο. Το 1984 μια αναφορά του WHO υποστηρίζει ότι οι χρήστες πάνω από το 30% των καινούργιων ή ανακατασκευασμένων κτηρίων παγκοσμίως, διατυπώνουν έντονα παράπονα για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Συχνά αυτή η κατάσταση είναι προσωρινή, αλλά μερικά κτήρια έχουν μακροχρόνια προβλήματα. Συνήθως, τα προβλήματα εγείρονται όταν ένα κτήριο λειτουργεί ή συντηρείται με λάθος τρόπο [EPA, 1991].

Δείκτες SBS:

- Οι χρήστες των κτηρίων διαμαρτύρονται για συμπτώματα σχετιζόμενα με οξεία δυσφορία. Τέτοια είναι πονοκέφαλοι, ερεθισμοί ματιών, ανώτερου αναπνευστικού συστήματος, ξηρός βήχας, ξηρό δέρμα ή κνησμός, ζαλάδες, ναυτίες, δυσκολία συγκέντρωσης, κόπωση και ευαισθησία σε οσμές.
- Η αιτία των συμπτωμάτων δεν είναι γνωστή.
- Οι περισσότεροι από αυτούς που διαμαρτύρονται υποστηρίζουν πως ανακουφίζονται από τα συμπτώματα σε σύντομο χρονικό διάστημα από την απομάκρυνσή τους εκ του κτηρίου.

Αιτίες του SBS:

Μη επαρκής αερισμός

Σαν αποτέλεσμα του εμπάργκο του πετρελαίου το 1973, η εθνική υπηρεσία ενεργειακής διαχείρισης της Αμερικής προχώρησε σε μείωση της ποσότητας του εξωτερικού αέρα για τον αερισμό των κτηρίων. Σε πολλές περιπτώσεις αυτή η μείωση, είχε σαν αποτέλεσμα να κριθεί ανεπαρκής ο νέος αερισμός αφού δεν ήταν πλέον ικανός να διατηρήσει την υγεία και την άνεση των χρηστών των κτηρίων. Ο ανεπαρκής αερισμός, μπορεί επίσης να προκύψει αν η θέρμανση και τα κλιματιστικά συστήματα δεν κάνουν αποτελεσματική διανομή του αέρα στο κτήριο.

Χημικοί ρύποι από εσωτερικές πηγές

Οι περισσότεροι ρύποι της εσωτερικής ατμόσφαιρας, προέρχονται από πηγές που βρίσκονται μέσα στο κτήριο. Όπως για παράδειγμα από κόλλες, χαλιά, ταπετσαρίες, κατασκευασμένα ξύλινα προϊόντα, φωτοτυπικά, φυτοφάρμακα. Επίσης τα προϊόντα καθαρισμού μπορούν να εκπέμπουν πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) συμπεριλαμβανομένου της φορμαλδεΐδης. Ο καπνός από τα τσιγάρα περιέχει υψηλά επίπεδα VOCs, άλλων τοξικών ενώσεων καθώς και εισπνεύσιμων αιρούμενων σωματιδίων. Έρευνες δείχνουν ότι κάποιες VOCs προκαλούν χρόνια και οξεία προβλήματα υγείας σε υψηλές συγκεντρώσεις και κάποιες είναι γνωστές ως καρκινογόνες. Χαμηλές ή μέτριες συγκεντρώσεις VOCs μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές αντιδράσεις. Τα προϊόντα της καύσης όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) καθώς και εισπνεόμενα σωματίδια μπορούν να προέρχονται από ξυλόσομπες, τζάκια, σόμπες αερίου κ.α.

Χημικοί ρύποι από εξωτερικές πηγές

Ο εξωτερικός αέρας που εισέρχεται στο κτήριο μπορεί να είναι πηγή εσωτερικής ρύπανσης. Για παράδειγμα, οι ρύποι από τις εξατμίσεις των οχημάτων μπορούν να εισέλθουν από τα ανοίγματα προσαγωγής του αέρα, τα παράθυρα και άλλα ανοίγματα. Επιπλέον προϊόντα καύσης μπορεί να εισέρχονται στο κτήριο από ένα κοντινό γκαράζ.

Βιολογικοί ρύποι

Βακτήρια, μύκητες, γύρη και ιοί είναι είδη βιολογικών ρύπων. Αυτοί οι ρύποι μπορούν να αναπαράγονται σε στάσιμο νερό το οποίο έχει συσσωρευτεί σε αγωγούς, υγραντήρες, πλακάκια, χαλιά ή στη μόνωση. Μερικές φορές τα έντομα ή τα περιττώματα των πτηνών μπορεί να είναι πηγές βιολογικών ρύπων. Τα συμπτώματα που σχετίζονται με τη βιολογική μόλυνση περιλαμβάνουν βήχα, σφίξιμο του στήθους, πυρετό, ρίγη, μυαλγίες, ερεθισμό των βλεννογόνων μεμβρανών. Τα συμπτώματα αυτά μπορεί να είναι αποτέλεσμα συνδυασμού της ανεπαρκούς θερμοκρασίας, υγρασίας ή φωτισμού. Όμως ακόμα και μετά τον έλεγχο του κτηρίου οι συγκεκριμένες αιτίες παραμένουν άγνωστες.

Διαδικασίες διερεύνησης του κτηρίου

Ο στόχος της διερεύνησης του κτηρίου είναι να προσδιοριστούν και να επιλυθούν τα παράπονα εξαιτίας της ποιότητας της εσωτερικής ατμόσφαιρας με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτραπεί η επανάληψή τους και για την αποφυγή δημιουργίας περεταίρω προβλημάτων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, είναι απαραίτητη για τον ερευνητή να ανακαλύψει εάν η καταγγελία σχετίζεται στην πραγματικότητα με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα, να εντοπίσει την αιτία της καταγγελίας και να καθορίσει την καταλληλότερη διορθωτική ενέργεια.

Λύσεις για την καταπολέμηση του SBS

Η απομάκρυνση ή τροποποίηση της πηγής ρύπανσης είναι αποτελεσματική προσέγγιση για την επίλυση ενός προβλήματος όταν οι πηγές είναι γνωστές και ο έλεγχος είναι εφικτός. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τη συνήθη συντήρηση του συστήματος κλιματισμού, απομάκρυνση των λεκέδων νερού από την οροφή και τις μοκέτες, περιορισμό του καπνίσματος, αποθήκευση και χρήση βαφών, κολλών και φυτοφαρμάκων σε καλά αεριζόμενους χώρους. Επίσης θα πρέπει να δοθεί χρόνος για τα υλικά κατασκευής σε καινούργιες ή ανακατασκευασμένες περιοχές, ώστε να εκπέμψουν τα απαέρια των ρύπων πριν την χρήση των χώρων από άτομα.

Η αύξηση των ποσοστών εξαερισμού και η σωστή διανομή του αέρα μπορεί να είναι συχνά ένα αποδοτικό μέσο για τη μείωση των συγκεντρώσεων των ρύπων. Τα συστήματα αερισμού θα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να πληρούν τουλάχιστον τα πρότυπα και τους τοπικούς κώδικες κτηρίων. Ωστόσο πολλά συστήματα δεν συντηρούνται σωστά ώστε να διασφαλίζονται αυτά τα πρότυπα. Όταν υπάρχουν ισχυρές πηγές ρύπων, ο τοπικός εξαερισμός μπορεί να είναι κατάλληλος ώστε να απομακρύνει τον ρυπασμένο αέρα απευθείας από το κτήριο και συνίσταται για συγκεκριμένους χώρους όπως τουαλέτες και χώροι εκτύπωσης.

Ο «καθαρισμός» του αέρα μπορεί να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο της πηγής και τον εξαερισμό αλλά έχει ορισμένους περιορισμούς. Οι τυπικές συσκευές μέτρησης των σωματιδίων μπορεί να είναι φθηνές αλλά δεν μετρούν αποτελεσματικά τα μικρά σωματίδια. Τα φίλτρα υψηλής απόδοσης μετρούν τα μικρότερα σωματίδια αλλά είναι σχετικά ακριβά στην εγκατάσταση και στη λειτουργία τους. Τα μηχανικά φίλτρα δεν απομακρύνουν αέριους ρύπους, ενώ κάποιοι συγκεκριμένοι ρύποι μπορεί να απομακρυνθούν από απορροφητικά κρεβάτια αλλά αυτές οι συσκευές είναι ακριβές και απαιτούν συνεχή αντικατάσταση του απορροφητικού υλικού. Εν ολίγοις, οι «καθαριστές» αέρα έχουν περιορισμένη εφαρμογή [39].

Βιβλιογραφία

- [1] <http://ec.europa.eu/>
- [2] Μαρία Γ. Μηλιάδη, Προσομοίωση θερμικής συμπεριφοράς κτηρίου με φυτεμένη οροφή, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π., 2010.
- [3] H.F. Castleton, V. Stovin, S.B.M. Beck, J.B. Favison, Green Roofs; building energy savings and the potential of retrofit, *Energy and buildings* 42, 2010: 1582-1591.
- [4] <http://www.greenroofguide.co.uk/>, What are green roofs.
- [5] I. Jaffal, S.E. Ouldboukhite, R. Belarbi, A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance, *Renewable energy* 43, 2012: 157-164.
- [6] <http://livingroofs.org/>, The GRO green roof code: green roof code of best practice for the UK 2011, 1st publication, 18/01/2011.
- [7] E. Wong, K. Hogan, J. Rosenberg, A. Denny, Reducing urban heat islands: compendium of strategies, <http://www.epa.gov/>.
- [8] Edmund C. Snodgrass, Linda McIntyre, The green roof manual: A professional guide to design, installation and maintenance, Timber Press, 2010.
- [9] Kelly Luckett, Green roof construction and maintenance, Mc Graw Hill, 2009.
- [10] C.J. Molineux, C.H. Fentiman, A.C. Gange, Characterizing alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K., *Ecological engineering* 35, 2009: 1507-1513.
- [11] G. Pérez, A. Vila, L. Rincón, C. Solé, L.F. Cabeza, Use of rubber crumbs as drainage layer in green roofs as potential energy improvement material, *Applied energy*, 2011.
- [12] A. Spala, H.S. Bagiorgas, M.N. Assimakopoulos, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos, G. Mihalakakou, On the green roof system: Selection, state of the art

and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece, Renewable energy 33, 2008: 173-177.

[13] <http://livingroofs.org/>, Guidelines to green roofing.

[14] R. Fioretti, A. Palla, L.G. Lanza, P. Principi, Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate, Building and environment 45, 2010: 1890-1904.

[15] Μ.Γρ. Βραχόπουλος, Α.Ε. Φιλίος, Γ.Τρ. Κωτσιόβελος, Εξοικονόμηση ενέργειας στα κτήρια με φυτεμένο δώμα.

[16] D.B. Rowe, Green roofs as a means of pollution abatement, Environmental pollution 159, 2011: 2100-2110.

[17] M. Santamouris, C. Pavlou, P. Doukas, G. Mihalakakou, A. Synnefa, A. Hatzibiros, P. Patargias, Investigating and analyzing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece, Energy 32, 2007: 1781-1788.

[18] A. Smith, M. Pitt, Healthy workplaces: plantscaping for indoor environment quality, Emerald, 2010.

[19] T. Van Renterghem, D. Botteldooren, In-situ measurements of sound propagating over extensive green roofs, Building and environment 46, 2011: 729-738.

[20] H.S. Yang, J. Kang, M.S. Choi, Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level, Building and environment 50, 2012: 44-55.

[21] N.H. Wong, Y. Chen, Y. Chen, C.L. Ong, A. Sia, Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment, Building environment 38, 2003: 261-270.

[22] A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou, Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance, Energy and buildings 33, 2001: 719-729.

- [23] E. Eumorfopoulou, D. Aravantinos, The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece, *Energy and buildings* 27, 1997.
- [24] What is an urban heat island?, <http://www.epa.gov/>.
- [25] A. Sfakianaki, E. Pagalou, K. Pavlou, M. Santamouris, M.N. Assimakopoulos, Theoretical and experimental analysis of the thermal behavior of a green roof system installed in two residential buildings in Athens, Greece, *International journal of energy research*, 2009.
- [26] J. Yang, Q. Yu, P. Gong, Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago, *Atmospheric environment* 42, 2008: 7266-7273.
- [27] J.F. Li, O.W.H. Wai, Y.S. Li, J. Zhan, Y. Alexander Ho, J. Li, E. Lam, Effect of green roof on ambient CO₂ concentration, *Building and environment* 45, 2010: 2644-2651.
- [28] J. Mentens, D. Raes, M. Hermy, Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?, *Landscape and urban planning* 77, 2006: 217-226.
- [29] E. Schroll, J. Lambrinos, T. Righetti, D. Sandrock, The role of vegetation in regulating storm water runoff from green roofs in a winter rainfall climate, *Ecological engineering* 37, 2011: 595-600.
- [30] B.G. Gregoire, J.C. Clausen, Effect of a modular extensive green roof on storm water runoff and water quality, *Ecological engineering* 37, 2011: 963-969.
- [31] P.M. Philippi, How to get cost reduction in green roof construction, <http://greenroofs.org/>, 2006.
- [32] F. Bianchini, K. Hewage, How “green” are the green roofs? Lifecycle analyses of green roof materials, *Building and environment* 48, 2012: 57-65.
- [33] Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε., 20701-1/2010.
- [34] Bjarne W. Olesen, Cooling and heating of buildings by activating their thermal mass with embedded hydronic pipe systems. [<http://www.cibse.org/pdfs/Embedded%20Hydronic%20Pipe%20Sys.pdf>]

[35] Charles K.E., Fanger's thermal comfort and drought models, National research council Canada, 2003.

[36] <http://www.asla.org/meetings/awards/awds02/chicagocityhall.html>

[37] <http://www.sedumphotos.net/>

[38] <http://willowbrooknurseries.com/>

[37] <http://www.epa.gov/>