

Δυναμικός υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας K σε φυτεμένα δώματα και της εξοικονομούμενης ενέργειας σε μονώροφο κτίριο από την εγκατάστασή τους.

Κοτσίρης Γ., Νεκτάριος Π.

Εργ. Ανθοκομίας και Αρχιτεκτονικής Τοπίου, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθήνας, 118 55

Πολυχρόνη Ε., Α. Ανδρουτσόπουλος Α.

ΚΑΠΕ, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 19 χιλ. Λεωφ. Μαραθώνος, Πικέρμι.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φυτεμένα δώματα εκτός της αισθητικής αναβάθμισης και των πολλών θετικών περιβαλλοντικών τους επιδράσεων, αποτελούν πλέον μια ώριμη τεχνολογία εξοικονόμησης ενέργειας. Οι περισσότερες ωστόσο προσπάθειες εκτίμησης της συμβολής τους στη θερμική απόδοση των κτιρίων έχουν περισσότερο ποιοτικό παρά ποσοτικό χαρακτήρα και έχουν γίνει σε συνθήκες σταθερής κατάστασης. Η παρούσα εργασία προσδιορίζει ποσοτικά τις θερμομονωτικές ιδιότητες των φυτεμένων δωματίων, υπολογίζοντας τον συντελεστή θερμοπερατότητας K σε πραγματική κλίμακα και δυναμικές συνθήκες στο Θάλαμο Δοκιμών του ΚΑΠΕ κατά την τυποποιημένη μέθοδο του διευρωπαϊκού προγράμματος PASLINK. Επιπλέον διερευνήθηκε η διακύμανση του K σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία στο υπόστρωμα. Τέλος οι τιμές K εισάχθηκαν στο λογισμικό TRANSYS και υπολογίστηκε η εξοικονόμηση ενέργειας που θα εξασφαλιζονταν σε ένα βασικό τύπο κτιρίου με και χωρίς θερμομόνωση, με την εγκατάσταση σε αυτό των φυτεμένων δωματίων που αξιολογήθηκαν.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια είναι μεταξύ των συστάσεων της Θεματικής Στρατηγικής πάνω στο Αστικό Περιβάλλον της Ευρωπαϊκής ένωσης, σκοπεύοντας στη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα μέσω της κατασκευής αιεφόρων κτιρίων στις σύγχρονες πόλεις (CEC, 2006). Ο σκοπός είναι σημαντικός ειδικά σε κλίματα με ήπια ψυχρό χειμώνα και θερμό καλοκαίρι όπου ταυτόχρονα πρέπει να διασφαλιστούν και η θερμική μόνωση και η προστασία από υπερθέρμανση του κελύφους των κτιρίων. Σε τέτοιες κλιματικές ζώνες οι στέγες έχουν μεγάλες θερμικές προσόδους λόγω της έντασης και διάρκειας της ηλιακής ακτινοβολίας το καλοκαίρι και έτσι επιβαρύνεται σημαντικά η ψυκτική απόδοση των κτιρίων με αποτέλεσμα συνθήκες υπερθέρμανσης και η θερμική άνεση στο εσωτερικό τους να μετατοπίζεται στη ζώνη της δυσφορίας (Kotsiris and Androutsopoulos, 2008).

Η διαδεδομένη χρήση του μηχανικού κλιματισμού στα κτίρια, αφενός αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας για ψύξη και θέρμανση, αφετέρου προκαλεί την εκπομπή στο περιβάλλον μεγάλων ποσών θερμότητας και συχνά ισοδύναμες με τα άμεσα ηλιακά κέρδη (Watkins, 2000).

Έχει από πολλά χρόνια ήδη υπογραμμισθεί ότι είναι επιτακτικό να βρεθούν εναλλακτικές λύσεις στον μηχανικό κλιματισμό για την εξασφάλιση της θερμικής άνεσης στο εσωτερικό των κτηρίων, με την διερεύνηση των τρόπων ταπείνωσης ή μηδενισμού των ψυκτικών φορτίων των κτηρίων (Iosifides, 1998). Η παραγωγή βιοκλιματικού χάρτη, έδειξε πως ακόμα και για ένα πολύ καλά σχεδιασμένο και μονωμένο κτίριο, είναι δυνατόν να επεκταθεί η ζώνη θερμικής άνεσης των χρηστών με τη χρήση τεχνικών άμεσου και έμμεσου δροσισμού με εξάτμιση (Kotsiris and Androutsopoulos, 2008).

Η φυτοκάλυψη των δωματίων είναι μία τεχνολογία η οποία μέσω της υγρασίας του υποστρώματος και της στρώσης αποθήκης νερού, οδηγεί στην ψύξη του κελύφους του κτιρίου με αγωγή προκαλώντας την άνοδο της αισθητής θερμότητας του υποστρώματος και με συναγωγή μέσω της εξάτμισοδιαπνοής (λανθάνουσα θερμότητα) Όταν το υπόστρωμα συγκρατεί νερό, όχι μόνο ελαχιστοποιούνται οι θερμικές προσόδοι, αλλά λαμβάνει χώρα και ροή θερμότητας προς το περιβάλλον, έτσι ώστε ένα σύστημα φυτοκάλυψης να λειτουργεί σαν παθητικός ψύκτης (Lazzarin et al., 2005). Η θετική συνεισφορά της φυτοκάλυψης στη μείωση των θερμικών προσόδων στο κτίριο επιτυγχάνεται επίσης και από την σκίαση του κελύφους από τα φυτά (Papadakis et al., 2001), με σημαντική συνεισφορά της πυκνότητας της φυλλικής επιφανείας (Wong, 2003, Theodosiou, 2003).

Όμως φαίνεται πως βελτιστοποιώντας την επίδοση της φυτοκάλυψης για την καλοκαιρινή περίοδο γίνεται λιγότερο αποδοτική για τον χειμώνα (Palomo Del Barrio, 1998) και τα ενεργειακά οφέλη είναι περιορισμένα το χειμώνα σε καλά μονωμένα κτίρια και σε συνήθη βάθη υποστρωμάτων (Niachou et al., 2001). Μελετητές από την Σιγκαπούρη (Wong et al., 2003) έδειξαν ότι μια καλή φύτευση με υψηλό LAI (Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας) μειώνει δραστικά έως και μηδενίζει τις θερμικές προσόδους από το δώμα και πως οι μονωτικές ιδιότητες του φυτοδώματος αυξάνονται με μεγάλα πάχη εδαφικού υποστρώματος, γεγονός όμως που αυξάνει τα στατικά φορτία στο κτίριο.

Τα αναμενόμενα θερμικά οφέλη των κτηρίων από τα φυτεμένα δώματα υποστηρίχθηκαν περαιτέρω από τους Kotsiris & Androutsopoulos (2008) που έδειξαν μια μείωση της θερμοκρασίας του ταβανιού κατά 2°C σε φυτεμένο δώμα σε σύγκριση με ένα ακάλυπτο δώμα επαρκούς ωστόσο συμβατικής θερμομόνωσης.

Η κατασκευή φυτεμένων δωματίων εντατικού τύπου με ελαφριά υποστρώματα και περιορισμένες εισροές νερού, ίσως είναι ένα πολλά υποσχόμενο σύστημα βιοκλιματικού σχεδιασμού για τη ρύθμιση του αστικού μικροκλίματος στη Μεσογειακή ζώνη. Συνολικά τα ενεργειακά οφέλη από τα φυτεμένα δώματα είναι καλά γνωστά από μια γενική ποιοτική θεώρηση αλλά μια ουσιαστική αξιολόγηση με ποσοτικούς όρους, παρέμενε μέχρι τις μέρες μας μια πρόκληση (Fioretti et al., 2010). Η έρευνα που έχει αναπτυχθεί για την θερμική απόδοση των φυτεμένων δωματίων βασίζεται στην προσομοίωση τους με την χρήση μοντέλων και την εισαγωγή τιμών των παραμέτρων στη βάση σειράς υποθέσεων. Όμως η προσέγγιση μέσω μοντέλων «ενσωματώνει αυξημένη αμφιβολία που αφορά των τύπο των εισροών τιμών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να εγγραφθούν ευρεία πεδία χρησιμότητας των μοντέλων» (Palomo Del Barrio, 1999, Feng, 2010). Ο υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας ως κριτήριο της θερμικής απόδοσης του κτιρίου έχει ήδη επιχειρηθεί. Ωστόσο μέχρι σήμερα περιορίστηκε σε αριθμητικούς υπολογισμούς

κάτω από συνθήκες σταθερής κατάστασης, χρησιμοποιούμενων των υπολογιστικών δυνατοτήτων καταγραφικών περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως το BABUC- A (Wong et al. 2003) . Επιπλέον έχει αξιοποιηθεί ένας συνδυασμός πειραματικού προσδιορισμού με λαμδόμετρο, του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) κάτω από συνθήκες σταθερής κατάστασης και εν συνεχεία αριθμητικού υπολογισμού στη βάση ορισμένων παραδοχών , (Onmura et al., 2001). Περαιτέρω η υγρασία (Palomo Del Baggio , 1999) και η εξατμισοδιαπνοή έχουν εισαχθεί ως παράμετρος σε μοντέλα προσομοίωσης, (Lazzarin et al., 2005).

Την ίδια ώρα αρχίζουν να τίθενται από τον τεχνικό και κατασκευαστικό κόσμο αιτήματα για μια ποσοτικοποιημένη έκφραση της συμβολής τους στο θερμικό ισοζύγιο των κτιρίων. Η ζήτηση στα πλαίσια του προγράμματος ενεργειακής μελέτης κτιρίων (KENAK) για αξιόπιστους συντελεστές θερμοπερατότητας των συστημάτων φυτεμένων δωματίων είναι ήδη επί τάπητος.

Η παρούσα εργασία βρίσκεται έτσι σε θέση να ανταποκριθεί στην ζήτηση που αναπτύσσεται στον τεχνικό , κατασκευαστικό κλάδο δείχνοντας μια αξιόπιστη διαδικασία υπολογισμού του K για φυτεμένα δώματα.

Στο πλαίσιο της εργασίας εντάσσονται: α) οι ρυθμίσεις και ο σχεδιασμός της πειραματικής και υπολογιστικής διαδικασίας για τον δυναμικό υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας συστημάτων φυτεμένων δωματίων. β) Η σύγκριση των K που υπολογίζονται με εκείνα ενός συμβατικού δώματος αλλά και ενός κτιρίου με ενισχυμένη θερμομόνωση. γ) η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των τιμών K και της περιεχομένης στο υπόστρωμα υγρασίας. δ) η προσομοίωση ενεργειακής μελέτης σε κτίρια αναφοράς, με τη χρήση του λογισμικού TRNSYS.

Έγινε συγκεκριμένα ενεργειακή μελέτη για δύο βασικές εκδοχές κτιρίων, χωρίς μόνωση και καλή μόνωση κατά KENAK με σύγχρονα δομικά υλικά με στόχο να επιδειχθεί το πραγματικό επίπεδο της εξοικονομούμενης ενέργειας για ψύξη και για θέρμανση για ορισμένα σενάρια.

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

Τρία διαφορετικά υποστρώματα, αξιολογήθηκαν για τη συμβολή τους στη βελτίωση της θερμικής απόδοσης των κτιρίων, ως συστατικά των φυτεμένων δωματίων τους. Για τον σκοπό αυτό, συστήματα φυτεμένων δωματίων με τα υποστρώματα που συντέθηκαν και δοκιμάστηκαν αγρονομικά, εγκαταστάθηκαν στην θέση μετακινούμενης οροφής Θαλάμου Δοκιμών του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο Πικέρμι Αττικής (lat. 37°58'N, long. 23°55'E, altitude 130 m).

Ο Θάλαμος Δοκιμών, αφορά τυποποιημένη μεθοδολογία για τη θερμική αξιολόγηση υλικών και συστημάτων του κελύφους των κτιρίων, από το διευρωπαϊκό πρόγραμμα PASLINK (Wouters & Vandaele, 1995). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα ψεύδο-αδιαβατικό κέλυφος που σκοπεύει να ελαχιστοποιήσει τις θερμικές απώλειες από όλες τις πλευρές του Δωματίου δοκιμών εκτός αυτής που εξετάζεται που στην περίπτωση μας είναι η οροφή. Με άλλα λόγια είναι ένας πρακτικά θερμικά αδιαβατικός, θάλαμος τοποθετημένος στο εξωτερικό περιβάλλον, με διαστάσεις 8.4 m x 3.8 m x 3.6 m, όπου οι ροές θερμότητας μετρούνται στο στοιχείο που έχει αντικατασταθεί, τοίχος ή παράθυρο στο νότο ή και οροφή. Το στοιχείο που μετρήθηκε ήταν το κάθε σύστημα φυτεμένου δώματος πάνω σε πλάκα σκυροδέματος 12 cm, που τοποθετήθηκε στη θέση της μετακινούμενης οροφής του θαλάμου.

4.1. Υποστρώματα

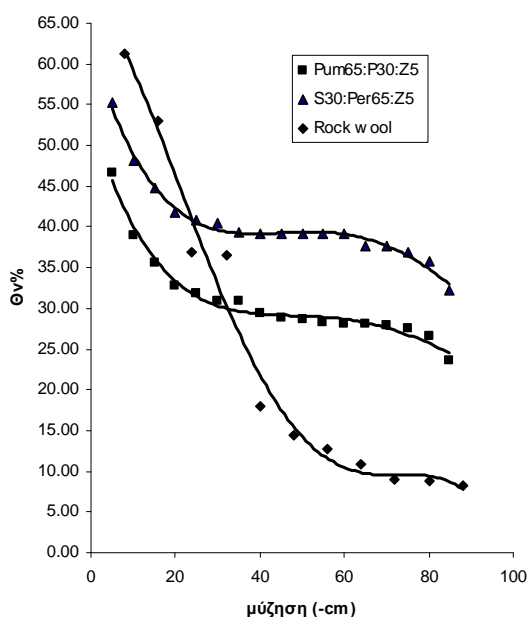
Συνολικά μετρήθηκαν πέντε στοιχεία, δηλαδή κατασκευάστηκαν σε πραγματική

κλίμακα πέντε διαφορετικά συστήματα φυτεμένων δωμάτων, διαφοροποιούμενα ως προς τον τύπο ή το βάθος του υποστρώματος, τηρουμένων ίδιων των λοιπών επιπέδων διαστρωμάτωσης.

Τα πέντε διαφορετικά υποστρώματα που δοκιμάστηκαν ήταν: 1. Πετροβάμβακας πάχους 8 cm + 2 cm χώμα με ριζωμένο χλοοτάπητα. 2. Μίγμα Κίσσηρης 65% + Τύρφης 30% + Ζεόλιθου 5% (Pum₆₅:P₃₀:Z₅), βάθους 8 cm + 2 cm χώμα με ριζωμένο χλοοτάπητα. 3. μίγμα εδάφους 30%, Περλίτη 65% και Ζεόλιθου 5% (S₃₀:Per₆₅:Z₅) βάθους 8 cm + 2 cm χώμα με ριζωμένο χλοοτάπητα. Το 4^ο και 5^ο υπόστρωμα ήταν επανάληψη του 2^{ου} και 3^{ου} αλλά σε βάθος 20 cm και με φύτευση *Lavandula angustifolia*. Η Κίσσηρη (LAVA, Minining & Quarrying A.D., Athens, 14123, Greece) είχε κατανομή μεγέθους σωματιδίων μεταξύ 0,1-8 mm, ενώ ο Ζεόλιθος (S & B Industrial Minerals A.D., Athens, 14564 Greece) και ο Περλίτης (Perloflor της ISOCON A.D., Athens, 18223, Greece) είχαν 0.8-2.5 mm και 1-5 mm αντίστοιχα. Παρακάτω δίδονται τα φυσικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 1) και οι χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας των υποστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν (Διάγραμμα 1).

υπόστρωμα/ χαρακτηριστικό	πορώδες %	Φαινόμενο ειδικό βάρος στον κορεσμό	Φαινόμενο Ειδικό βάρος (Kgr/l)	pH	EC μs/cm	Οργανικό περιεχόμενο%
Rock wool	80	0.77	0.162	7-9.2		
S ₃₀ :Per ₆₅ :Z ₅	53	1.222	0.668	8.4	149	0.63
Pum ₆₅ :P ₃₀ :Z ₅	44.8	1.144	0.655	7.34	567	4.72

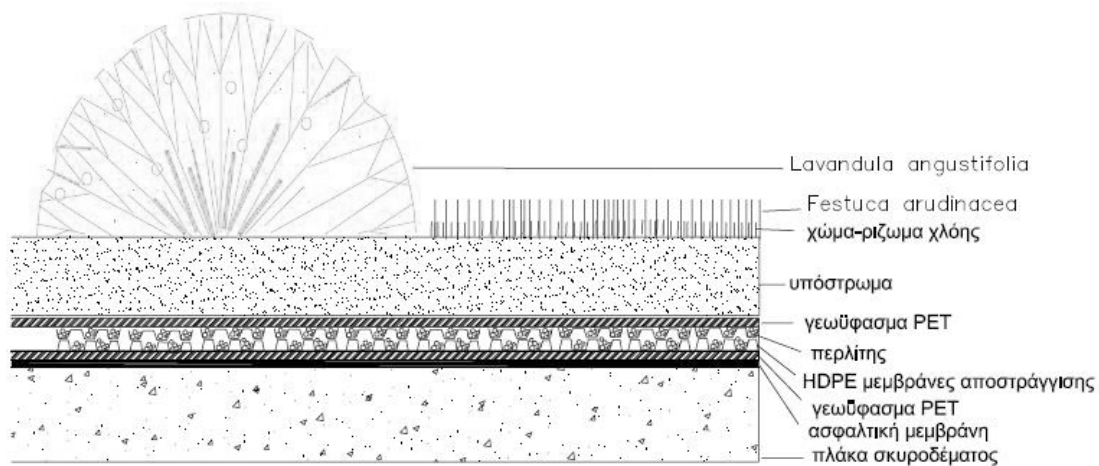
Πίνακας 1. Ιδιότητες των υποστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν



Διάγραμμα 1: Οι χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας για τα υποστρώματα που χρησιμοποιήθηκαν (S=αμμοπηλώδες έδαφος, P=Τύρφη, Pum=Κίσσηρη, Per=Περλίτης, Z=Ζεόλιθος).

4.2. Κατασκευή δοκιμίων φυτοδωμάτων

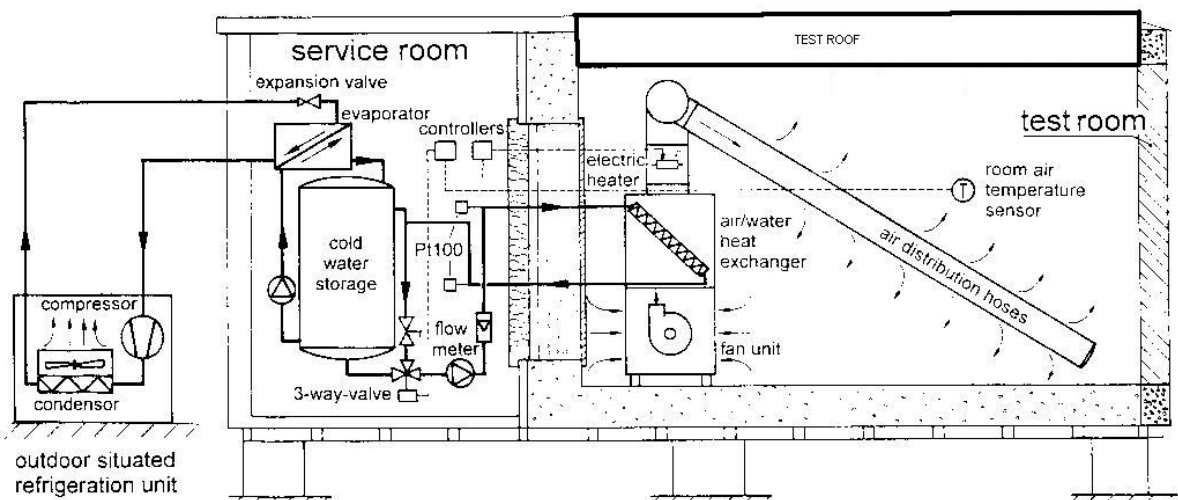
Όλα και τα πέντε συστήματα φυτεμένων δωμάτων κατασκευάστηκαν με τον ίδιο βασικό τρόπο. Το σύστημα απαρτίζεται από πολύ-επίπεδη στρώση υλικών για τον επαρκή αερισμό και στράγγιση του ριζικού συστήματος των φυτών (Διάγραμμα 2).



Διάγραμμα 2. Το στοιχείο που μετρήθηκε. Η πλάκα σκυροδέματος μαζί με το πολύ-επίπεδο σύστημα φυτεμένου δώματος που κατασκευάστηκε στην οροφή του Θαλάμου Δοκιμών του ΚΑΠΕ.

4.3. Εξοπλισμός και Μεθοδολογία

Ο θάλαμος δοκιμών αποτελείται από δύο δωμάτια: το καθαυτό δωμάτιο ελέγχου με διαστάσεις 2.75 m x 2.75 m x 5.00 m , εμβαδού 13.75 μ² όσο και το εμβαδόν του κάθε φυτεμένου δώματος που κατασκευάζεται και το βοηθητικό δωμάτιο το οποίο φιλοξενεί βοηθητικό εξοπλισμό για την εκτέλεση των διαδικασιών ελέγχου (Διάγραμμα 3).



Διάγραμμα 3. Διαγραμματική απεικόνιση του θαλάμου δοκιμών του ΚΑΠΕ με το σύστημα ψύξης και δροσίσιμou.

Το κύριο χαρακτηριστικό του θαλάμου δοκιμών είναι οι πλήρως ελεγχόμενες θερμικές συνθήκες του δωματίου ελέγχου. Ο θάλαμος δοκιμών είναι εξοπλισμένος με ένα εξελιγμένο σύστημα θέρμανσης και ψύξης, ελεγχόμενο από μια Μονάδα Συλλογής Δεδομένων και Ελέγχου για την εκτέλεση μιας ειδικά σχεδιασμένης ακολουθίας δυναμικών δοκιμών. Η ακολουθία αυτή συνίσταται σε μια σειρά προκαθορισμένων θερμικών διεγέρσεων, ειδικά σχεδιασμένων να καλύψουν όλα τα σταθερής και δυναμικής κατάστασης χαρακτηριστικά των στοιχείων των κτιρίων και

να διασφαλίσουν ότι όλες οι επιδράσεις των περιβαλλοντικών επιρροών, είναι σαφώς αποσυσχετισμένες

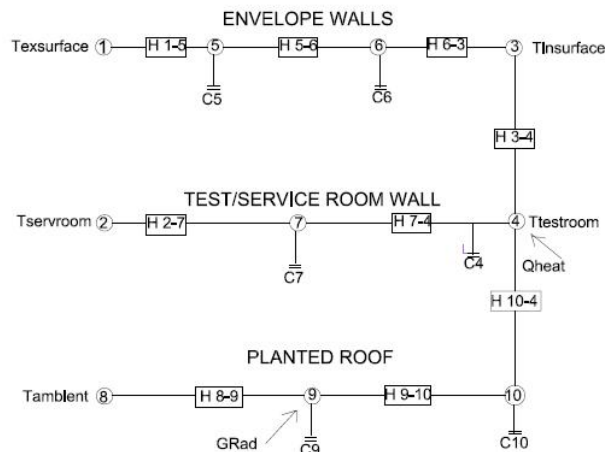
Αμφότερες οι εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες, καταγράφονταν μέσω μιας σειράς αισθητήρων για την μέτρηση των παρακάτω παραμέτρων: α) Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, β) διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου, γ) σχετική υγρασία, δ) Θερμοκρασίες αέρα και επιφανειών μέσα και έξω από το θάλαμο, ε) Ισχύς για θέρμανση ή ψύξη, στ) Ροή Θερμότητας μέσω του συστήματος φυτεμένου δώματος, ζ) η εδαφική υγρασία των υποστρωμάτων .

Ο μόνιμος εξοπλισμός αισθητήρων του Θαλάμου Δοκιμών χρησιμοποιούνταν για την παρακολούθηση της θερμικής απόδοσης αυτού καθαυτού του Δωματίου Ελέγχου. Οι συνθήκες των δωματίων ήταν υπό παρακολούθηση και πλήρως ελεγχόμενες μέσω μιας σειράς αισθητήρων συνδεδεμένοι με το σύστημα θέρμανσης και ψύξης. Για το σκοπό της ανάλυσης έχει υποθεθεί ότι η ροές θερμότητας από το κέλυφος του θαλάμου δοκιμών έχουν άθροισμα μηδέν. Για την ακρίβεια η διαφορά θερμοκρασίας εγκάρσια των τοιχωμάτων του, ελέγχεται μεταξύ -0.15 και $+0.10$ °C.

Για την αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης του συστήματος φυτεμένου δώματος, εγκαταστάθηκαν πρόσθετοι αισθητήρες. Για την θερμοκρασία του αέρα χρησιμοποιήθηκε προστατευμένος αισθητήρας PT 100 (LSI-Lastem, 20090 Settala, Milano), δύο αισθητήρες θερμοκρασίας επιφανείας, Θερμοζεύγη T-τύπου, εφαρμοσμένοι συμμετρικά στο ταβάνι του Δωματίου Ελέγχου και δύο αισθητήρες ροής θερμότητας (TNO-BOUW, Laan van Westenenk 501. P.O. Box 342. Apeldoorn . 7300 AH. Netherlands) εφαρμοσμένοι επίσης, συμμετρικά στο ταβάνι. Στο υπόστρωμα του κάθε φυτεμένου δώματος τοποθετήθηκαν συμμετρικά δύο αισθητήρες υγρασίας τύπου ML2X (Delta-T). Οι περιβαλλοντικές παράμετροι ελήφθησαν από σταθμό ηλιακών και μετεωρολογικών μετρήσεων του ΚΑΠΕ.

Όλες οι μετρήσεις από τον Θάλαμο Δοκιμών συλλέγονταν από ένα κεντρικό Καταγραφικό HP-DAS 3852A ανά λεπτό και δεκάλεπτο ενώ η παρακολούθηση της καταγραφής και ο έλεγχος του εξοπλισμού γινόταν μέσω ειδικού λογισμικού επικοινωνίας (interface) που αναπτύχθηκε ειδικά για τον σκοπό αυτό, πάνω στην πλατφόρμα προγραμματισμού VEE και αντικατέστητε το πεπαλαιωμένο λογισμικό SADAT που είχε αναπτυχθεί από το πρόγραμμα PASILK.

Οι μετρήσεις μετά από επεξεργασία εισάγονταν σε ειδικό λογισμικό (LORD) για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας K. Το λογισμικό χρησιμοποιεί δύο μη-ντετερμινιστικές μεθόδους. Την μέθοδο Downhill Simplex και την μέθοδο Monte-Carlo. Για το τρέξιμο του προγράμματος μοντελοποιήθηκε η θερμική συμπεριφορά του θαλάμου και του φυτεμένου δώματος σαν ένα RC δίκτυο. Αγωγιμότητες και χωρητικότητες διακριτοποιημένων κόμβων των στοιχείων του κελύφους, έχουν υπολογισθεί κατά την διαδικασία στάθμισης του Θαλάμου Δοκιμών του προγράμματος PASILK και εμπεριέχονται στο LORD. Κάθε πρόσθετη πηγή θερμότητας (από θέρμανση ή ηλιακή ακτινοβολία κλπ), ή ροή, μετριέται και εισάγεται στον κατάλληλο κόμβο για την κάθε περίπτωση με την ανάλογη διαμόρφωση του μοντέλου RC (Διάγραμμα 4). Το μοντέλο αναπτύχθηκε για τα συγκεκριμένα πειράματα ως τροποποίηση υφισταμένου μοντέλου για δομικά στοιχεία.



Διάγραμμα 4: Το μοντέλο RC-δικτύου

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι συντελεστές θερμοπερατότητας U που υπολογίστηκαν για τα τρία συστήματα φυτεμένων δωματίων με επικάλυψη χλοοτάπητα και συνολικό πάχος υποστρώματος 10 cm. Παρατίθενται επίσης τα U για μια τυπικά μονωμένη οροφή και την οροφή του βιοκλιματικού κτιρίου του ΚΑΠΕ.

Στοιχείο	UA (W/K)	A (m ²)	U-value (W m ⁻² K ⁻¹)
Φυτεμένο δάμα υπόστρωμα 10 cm πετροβάμβακα	5.233	13.75	0.38
Φυτεμένο δάμα υπόστρωμα 10 cm περλίτη	8.959	13.75	0.651
Φυτεμένο δάμα υπόστρωμα 10 cm κίσσηρη	8.337	13.75	0.606
Συμβατική οροφή			0.454
Οροφή βιοκλιματικού κτιρίου			0.33

Πίνακας 2. Τιμές U για τρία συστήματα πράσινων δωματίων με υπόστρωμα πάχους 10 cm, για μια συμβατικά μονωμένη οροφή και για την οροφή του βιοκλιματικού κτιρίου.

Η οροφή του βιοκλιματικού κτιρίου του ΚΑΠΕ, βρίσκεται στο Πικέρμι και έχει μονωθεί με 5 cm εξηλασμένης πολυστερίνης. Η οροφή ενός συμβατικού κτιρίου αναφέρεται σε μόνωση με περλιτομεπτόν πάχους 17 cm και με φαινόμενο ειδικό βάρος 0.44 g cm⁻³ και μαλτεζόπλακες.

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων η κατ' όγκο περιεκτικότητα σε νερό (Θν%), των υποστρωμάτων των φυτεμένων δωματίων διακυμάνθηκε μεταξύ 30-45 % m³ m⁻³. Η μέση εδαφική υγρασία ± την τυπική απόκλιση για κάθε υπόστρωμα, ήταν: α) για τον πετροβάμβακα: 37.41 ± 3.35, β) για το υπόστρωμα με περλίτη : 37.02 ± 2.59, γ)

για το υπόστρωμα με κίσσηρη : 38.12 ± 1.92 .

Περαιτέρω διερευνήθηκε η σχέση ανάμεσα στο περιεχόμενο στο υπόστρωμα νερό και την μεταβολή της υπολογιζόμενης τιμής U. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές σειρές μετρήσεων σε ίδιο σύστημα φυτεμένου δώματος αλλά με διαφορετική εδαφική υγρασία υποστρώματος την κάθε φορά. Ήταν ήδη γνωστό ότι ανάμεσα στην θερμική αγωγιμότητα και την περιεχόμενη στο υπόστρωμα υγρασία είχε καταγραφεί γραμμική σχέση (De Rijck, 1994; Castletona et al., 2010), έτσι μια ανάλογη σχέση αναμενόταν και με τον συντελεστή θερμοπερατότητας. Έχοντας αυτά υπόψη, πραγματοποιήθηκαν τρεις συνεχόμενες σειρές μετρήσεων, τρεις επαναλήψεις θα λέγαμε γιατί λήφθηκαν πάνω στο ίδιο σύστημα φυτεμένου δώματος, αυτού με υπόστρωμα περλίτη, προκαλώντας διαφορετικό επίπεδο εδαφικής υγρασίας στην κάθε επανάληψη.

Οι τιμές συντελεστή θερμοπερατότητας (U) που υπολογίστηκαν ήταν 0.651, 0.55, and 0.548 για επίπεδα υγρασίας 36.61%, 33.28% and 32.95% αντίστοιχα και η ανάλυση παλινδρόμησης ανάμεσα στις δύο παραμέτρους έδωσε πολύ στενή γραμμική σχέση όπου το R^2 ήταν 0.9956. Παρόμοια αποτελέσματα βρέθηκαν από τους Alcazar και Bass (2005), οι οποίοι χρησιμοποίησαν το λογισμικό πακέτο θερμικής προσομοίωσης ESP-r προκειμένου να εκτελέσουν προσομοιώσεις ροής θερμότητας σε ένα τριώροφο κτίριο.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τιμές U σε μεγαλύτερα πάχη υποστρωμάτων. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα U που υπολογίστηκαν για δύο συστήματα φυτεμένων δωματίων με υπόστρωμα που περιείχε κίσσηρη και στη συνέχεια αυτού που περιείχε περλίτη, με φύτευση Λεβάντας και πάχος υποστρώματος 20 cm, αμφότερα. Παρατίθενται επίσης ξανά τα U για μια τυπική οροφή και την οροφή του βιοκλιματικού κτιρίου του ΚΑΠΕ.

Στοιχείο	U-value ($W m^{-2} K^{-1}$)
Φυτεμένο δώμα υπόστρωμα 20 cm περλίτη	0.393
Φυτεμένο δώμα υπόστρωμα 20 cm κίσσηρη	0.417
Συμβατική οροφή	0.454
Οροφή βιοκλιματικού κτιρίου	0.33

Πίνακας 3: τιμές U για δύο συστήματα πράσινων δωματίων με υπόστρωμα πάχους 20 cm , για μια συμβατικά μονωμένη οροφή και για την οροφή του βιοκλιματικού κτιρίου .

Στη συνέχεια επαναλάβουμε μετρήσεις πάνω στα ίδια υποστρώματα αλλά με διαφορετικές περιεκτικότητες σε υγρασία, σε μια περαιτέρω διερεύνηση της σχέσης της $\Theta_n\%$, με τον υπολογιζόμενο συντελεστή θερμοπερατότητας.

Οι τιμές συντελεστή θερμοπερατότητας (U) που υπολογίστηκαν για το υπόστρωμα με κίσσηρη ήταν 0.342, 0.379, και 0.439 για επίπεδα υγρασίας 28%, 30.9% και 45.25% αντίστοιχα και η ανάλυση παλινδρόμησης ανάμεσα στις δύο παραμέτρους έδωσε πολύ στενή γραμμική σχέση όπου το R^2 ήταν 0.948 . Για το υπόστρωμα με περλίτη υπολογίστηκαν τιμές U: 0.525, 0.484, και 0.435 για επίπεδα υγρασίας 49.26%,

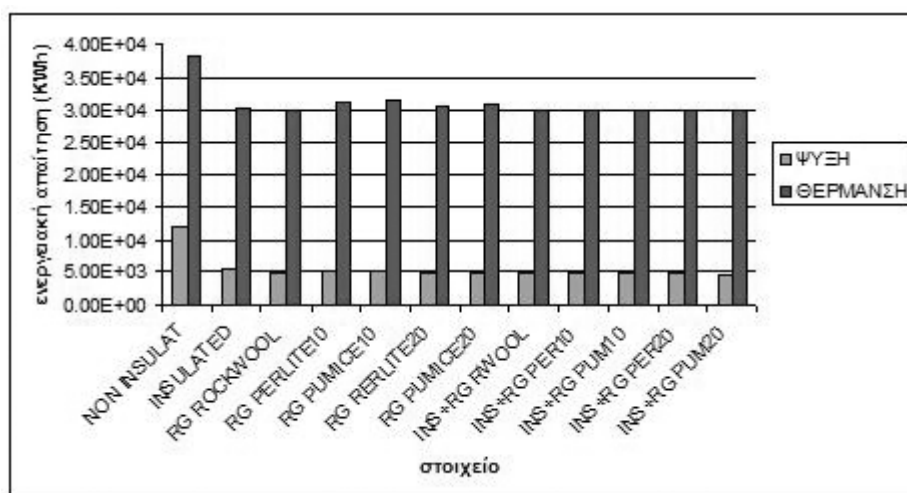
47.33% and 41.56% αντίστοιχα και η ανάλυση παλινδρόμησης ανάμεσα στις δύο παραμέτρους έδωσε πολύ στενή γραμμική σχέση όπου το R^2 ήταν 0.973

Στην συνέχεια οι τιμές U που υπολογίστηκαν εισαχθήκαν στο λογισμικό TRNSYS για την ενεργειακή αξιολόγηση ενός τύπου μονώροφου κτιρίου αναφοράς (Εικόνα 1), σε δύο εκδοχές, μιας με αμόνωτο δώμα και μιας με θερμομόνωση στο δώμα κατά KENAK (με θερμομονωτικό πάχους 6cm και $\lambda=0,038$ W/m.K). Οι θερμοκρασίες αναφοράς που εισαχθήκαν στο λογισμικό ήταν 20°C για χειμώνα και 26°C, ενώ για το καλοκαίρι, ενώ σχεδιάστηκε πρόγραμμα νυκτερινού αερισμού.



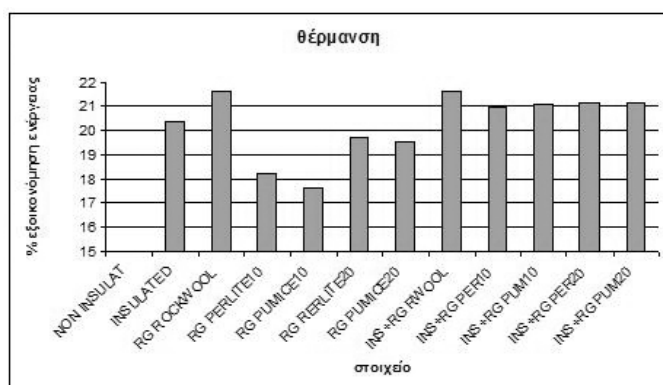
Εικόνα 1. ΝΑ και ΒΔ αξονομετρικό του κτιρίου αναφοράς που προσομοιώθηκε ενεργειακά στο TRANSYS.

Η επίδραση της Εξαμισοδιαπνοής των φυτών στην ψύξη προσομοιώθηκε μέσω της εκτίμησης της λανθάνουσας θερμότητας και της ανάλογης μείωσης των θερμικών προσόδων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.

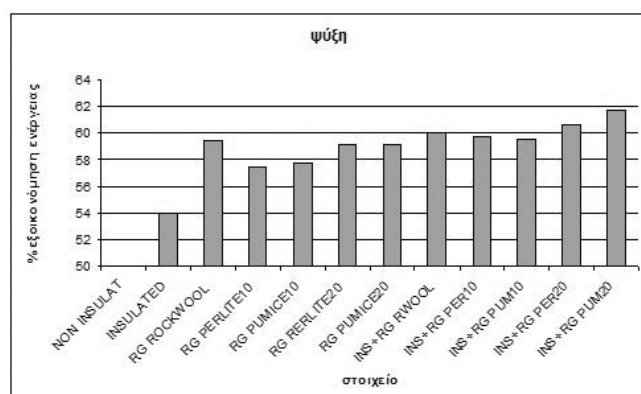


Διάγραμμα 5: Ενεργειακή ζήτηση μονώροφης κατοικίας για δώδεκα διαφορετικά σενάρια μόνωσης του δώματος. Χωρίς μόνωση, μόνωση κατά KENAK, φύτευση με υπόστρωμα πετροβάμβακα πάχους 8 cm, φύτευση με υπόστρωμα που περιέχει 65% κίσηρη πάχους 10 cm, φύτευση με υπόστρωμα που περιέχει 65% περλίτη πάχους 10 cm, φύτευση με υπόστρωμα που περιέχει 65% κίσηρη πάχους 20 cm, φύτευση με υπόστρωμα που περιέχει 65% περλίτη πάχους 20 cm. και όλοι οι συνδυασμοί μονωμένου δώματος κατά KENAK μαζί με κάποιο τύπο φυτεμένου δώματος.

Για αποσαφήνιση της % εξοικονόμησης ενέργειας με κάθε σενάριο, παρουσιάζονται τα παρακάτω διαγράμματα 6 και 7 και στον πίνακα 4.



Διάγραμμα 6. Η επί τοις εκατό εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση, με κάθε σενάριο.



Διάγραμμα 7. Η επί τοις εκατό εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη, με κάθε σενάριο.

ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ % ΑΜΟΝΩΤΟΥ		ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ % ΚΕΝΑΚ	
	ΘΕΡΜΑΝΣΗ	ΨΥΞΗ	ΘΕΡΜΑΝΣΗ	ΨΥΞΗ
ΑΜΟΝΩΤΟ	-	-	-	-
ΜΟΝΩΜΕΝΟ ΚΑΤΑ ΚΕΝΑΚ	20,36	54,03	-	-
ΦΥΤ.ΔΩΜΑ ΜΕ ΠΕΤΡΟΒΑΜΒΑΚΑ	21,66	59,46	6,45	10,04
ΦΥΤ. ΔΩΜΑ ΜΕ ΠΕΡΛΙΤΗ 10cm	18,20	57,51	-10,58	6,42
ΦΥΤ. ΔΩΜΑ ΜΕ ΚΙΣΣΗΡΗ 10cm	17,65	57,73	-13,29	6,84
ΦΥΤ. ΔΩΜΑ ΜΕ ΠΕΡΛΙΤΗ 20cm	19,70	59,21	-3,23	9,58
ΦΥΤ. ΔΩΜΑ ΜΕ ΚΙΣΣΗΡΗ 20cm	19,45	59,16	-4,26	9,49
ΚΑΤΑ ΚΕΝΑΚ + ΦΥΤ.ΔΩΜΑ ΜΕ ΠΕΤΡΟΒΑΜΒΑΚΑ	21,61	60,05	6,19	11,13
ΚΑΤΑ ΚΕΝΑΚ + ΦΥΤ. ΔΩΜΑ ΜΕ ΠΕΡΛΙΤΗ 10cm	20,93	59,69	2,67	10,46
ΚΑΤΑ ΚΕΝΑΚ + ΦΥΤ. ΔΩΜΑ ΜΕ	21,06	59,52	3,39	10,15

ΚΙΣΣΗΡΗ 10cm				
ΚΑΤΑ ΚΕΝΑΚ + ΦΥΤ. ΔΩΜΑ ΜΕ ΠΕΡΛΙΤΗ 20cm	21,17	60,69	4,0	12,31
ΚΑΤΑ ΚΕΝΑΚ + ΦΥΤ. ΔΩΜΑ ΜΕ ΚΙΣΣΗΡΗ 20cm	21,14	61,74	3,87	14,26

Πίνακας 4. Επί τοις εκατό εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, κάθε στοιχείου σε σχέση με το αμόνωτο δώμα, των φυτεμένων δωματίων με σχέση το φυτεμένο δώμα κατά ΚΕΝΑΚ και του συνδυασμού και μονωμένου κατά ΚΕΝΑΚ και φυτεμένου δώματος μαζί, σε σχέση με μόνο το μονωμένο κατά ΚΕΝΑΚ.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα πειράματα βρέθηκε ότι το σύστημα φυτεμένου δώματος με υπόστρωμα πετροβάμβακα επέδειξε ένα χαμηλό συντελεστή θερμοπερατότητας (U), που ήταν κοντά στο U της οροφής του βιοκλιματικού κτιρίου. Αντίθετα τα δύο φυτεμένα δώματα με υποστρώματα που περιείχαν περλίτη το ένα και κίσηρη το άλλο, επέδειξαν υψηλές τιμές U , υψηλότερες από μια συμβατική οροφή (Πίνακας 2) αλλά και πάνω από τις μέγιστες που καθορίζει ο Ελληνικός κανονισμός θερμομόνωσης για την ζώνη Β ($0.45 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$). Επομένως, όσον αφορά αυτά τα δύο υποστρώματα, συνίσταται να χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερα βάθη. Περαιτέρω όμως δείχθηκε ότι οι τιμές U εξαρτώνται από την περιεχόμενη στα υποστρώματα υγρασία.

Ο ρόλος του πετροβάμβακα στην επίτευξη τόσο χαμηλής τιμής U , από το σύστημα φυτεμένου δώματος όπου συμμετέχει ως υπόστρωμα, μπορεί να εξηγηθεί από αυξημένο πορώδες του (Πίνακας 1), που υπολογίστηκε στο 80% (v/v). Έτσι σε επίπεδα συγκράτησης νερού 30-40% του όγκου του, ένα μεγάλο ποσοστό των πόρων του εξακολουθεί να καταλαμβάνετε από αέρα, ο οποίος έχει μεγάλη θερμική αντίσταση.

Επιπλέον εξηγείται από την ταχύτατη αποστράγγιση του και την απότομη πτώση του περιεχομένου του σε νερό, απουσία συνθηκών που προκαλούν κορεσμό (Διάγραμμα 1), όπως ύστερα από μια έντονη βροχόπτωση ή μια υπερβολική άρδευση. Φαίνεται λοιπόν πως ο πετροβάμβακας είναι ένα πολύ αποδοτικό υπόστρωμα για χαμηλού βάθους και μικρού βάρους φυτεμένα δώματα, κατάλληλο να υποστηρίξει όχι μόνο την ανάπτυξη των φυτών αλλά και με υψηλές θερμομονωτικές ιδιότητες. Ωστόσο επειδή όπως φαίνεται από τις χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας, ο πετροβάμβακας απελευθερώνει γρήγορα το βαρυτικό και το τριχοειδώς συγκρατούμενο νερό, προβληματίζει η επίδραση του στην επιβίωση και ανάπτυξη των φυτών στη διάρκεια της ξηρής περιόδου. Ο Bougoul κ.α. (2005), εργαζόμενοι με υδρόφιλο πετροβάμβακα πυκνότητας μικρότερης των 55 gr/liter, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι πρέπει να χρησιμοποιείται σε κατάσταση πλησίον του κορεσμού σε νερό, σε τάση μεταξύ 0 και -20 cm και ότι προκειμένου να αποφεύγεται ο κίνδυνος υδατικής καταπόνησης των φυτών, πρέπει να αποφεύγεται η υπερβολική ξήρανσή του μέσω ενός προγράμματος συχνών αρδεύσεων. Επειδή όμως στη Μεσογειακή ζώνη το νερό είναι ένας πόρος σε περιορισμό κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, πρέπει την κάθε φορά να εκτιμώνται τα πλεονεκτήματά του σε σχέση με την ανάγκη περιορισμένης συχνής άρδευσης αν και σε μικρές δόσεις. Όπως μπορεί να υπολογισθεί από την καμπύλη υγρασία (Διάγραμμα 1), η υδατοϊκανότητα του (μύζηση 50 cm) είναι $\Theta_v = 15\%$.

Σε επόμενα πειράματα διαπιστώθηκε ότι συστήματα φυτεμένων δωμαίων με υποστρώματα αποτελούμενα από χονδρόκοκα αδρανή υλικά σε αυξημένα βάθη (20 cm), επιτυγχάνουν τιμές U χαμηλότερες του μέγιστου απαιτούμενου από τον κανονισμό θερμομόνωσης (Πίνακας 3) και ότι οι καταγραφόμενες τιμές U , είναι επίσης σε γραμμική σχέση με την περιεχομένη υγρασία σε αυτά.

Από την προσομοίωση μονώροφου κτιρίου στο λογισμικό TRNSYS, με δώδεκα διαφορετικά σενάρια, δείχθηκε ότι με την εγκατάσταση των πέντε τύπων φυτεμένων δωμαίων, το U των οποίων υπολογίστηκε, επιτεύχθηκε εξοικονόμηση ενέργειας (Πίνακας 4). Για την θέρμανση σε επίπεδα 20% αλλά μόνο το υπόστρωμα με πετροβάμβακα είχε σημαντική (6,5%) εξοικονόμηση σε σχέση με το κατά KENAK μονωμένο δώμα, ενώ αντίθετα τα ρηγά χονδρόκοκα υποστρώματα, υστερούσαν σημαντικά (10-13%).

Είναι αξιοσημείωτο, ότι η φύτευση επάνω σε ήδη μονωμένο δώμα κατά KENAK, ελάχιστα μειώνει τα θερμικά φορτία του κτιρίου τον χειμώνα, πλην του υποστρώματος με πετροβάμβακα (6,2%).

Αναφορικά με την ψύξη, όλα τα σενάρια είχαν πολύ μεγάλη εξοικονόμηση, σε επίπεδα 60% και επίσης όλοι οι τύποι φυτεμένων δωμαίων είχαν σημαντική (περί το 7% τα ρηγά χονδρόκοκα υποστρώματα) έως πολύ σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη (περί το 10% αυτά με πετροβάμβακα και τα βαθιά χονδρόκοκα) σε σχέση με το κατά KENAK μονωμένο δώμα. Είναι επίσης αξιοσημείωτο, ότι η φύτευση επάνω σε ήδη μονωμένο κατά KENAK δώμα, επιφέρει πολύ σημαντική μείωση των ψυκτικών φορτίων το καλοκαίρι, 11, 12,3 και 14,3% για υπόστρωμα με πετροβάμβακα, με περλίτη στα 20 cm και κίσηρη στα 20 cm, αντίστοιχα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Alcazar S., Bass B., Energy performance of green roofs in a multi storey residential building in Madrid, in: *Greening Rooftops for Sustainable Communities*, 2005, Washington, DC.
- Bougol S., Ruy S., Groot F., Boulard T., 2005, Hydraulic and physical properties of stonewool substrates in horticulture, *Scientia Horticulturae*; 104:391-405.
- De Rijck G., Schrevels E., de Baerdemaker J., 1996 Thermal conductivity sensing for on-line monitoring and control of the moisture content in rock wool slabs. Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, Department of Applied Plant Sciences, K.U. Leuven, Belgium. *ISHS Acta Horticulturae* 406: II IFAC/ISHS Workshop :Mathematical & Control Applications in Agriculture & Horticulture, 1994 Silsoe, U.K..
- Castletona H.F., Stovinb V., Beckc S.B.M., Davisonb J.B., 2010, Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit, *Energy and Buildings*; 42 :1582–1591.
- CEC, Commission of the European Communities, 2006, Communication from the commission to the council and the European Parliament on Thematic Strategy on the urban environment, Brussels, 11 January 2006, COM (2005): 718.
- Feng C., Meng Q., Zhang Y., 2010, Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs, *Energy and Buildings*; 42: 959–965.
- Fioretti R., Palla A., Lanza L.G., Principi P., 2010, Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate, *Building and Environment*; 45: 1890-1904.
- Iosifides M., 1998, Experience, problems and suggestions for buildings. Proceedings of the national conference on the implementation of renewable energy sources, NTUA-RENES network, Athens, 30 Nov.- 2 Dec.1998: pp: 18–26 (in Greek).
- Kotsiris G., Androutopoulos A., 2008, The contribution of a green roof to achieve thermal comfort and energy savings, Proceedings DVD, International Conference of AgEng, Crete, Greece, 2008; pp:340-344
- Lazzarin M.R., Castelliani F., Busato F., 2005 Experimental measurement and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*; 37:1260-1267.
- Niachou A., Papakonstantinou K., Santamouris M., Tsangrassoulis G., Mihalakakou G., 2001, Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings* 33: 719-729.

- Onmura S., Matsumoto M., Hokoi S., 2001, Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens, *Energy and Buildings* 33: 653-666.
- Papadakis G., Tsamis P., Kyritsis S., 2001, An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings. *Energy and Buildings* 33: 831-836.
- Palomo Del Barrio E., 1999, Roof components models simplification via statistical linearization and model reduction techniques *Energy and Buildings* 29: 259–281.
- Theodosiou Th., 2003, Summer period analysis of the performance of planted roof as passive cooling technique. *Energy and Buildings* 35: 909-917.
- Watkins R., 2000, *The Impact of the Urban Environment on the Energy Demand for Cooling Buildings. Literature Review*. Report, written as part of a research project carried out at Brunel University and the Building Research Establishment Ltd., Available from <http://www.brunel.ac.uk/research/solvent/>
- Wong N.H., Chen Y., Ong C.L., Sia A., 2003, The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore, *Energy and Buildings* 38: 261-270.
- Wouters P, Vandaele L (eds), 1995, COMPASS project. Final research report (JOU2-CT92-0216).