



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΠΑΝΕΛ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ
ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ**

υπό
ΚΑΤΕΡΙΝΑ ΤΖΑΦΟΛΙΑ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2021

© 2021 Κατερίνα Τζαφόλια

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Γεώργιος Χαραλάμπους Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, η οποία υλοποιήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν στη διεκπεραίωσή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βασίλειο Μποντόζογλου, καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος της διατριβής μου και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την εκπόνησή της. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής μου για τη συμβολή τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τους γονείς μου για την αγάπη, την κατανόηση και την υποστήριξή, σε πρακτικό και ψυχολογικό επίπεδο, καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας.

ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΠΑΝΕΛ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Τζαφόλια Κατερίνα

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Επιβλέπων Καθηγητής: Μποντόζογλου Βασίλειος, Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση των υδραυλικών πάνελ για θέρμανση και ψύξη κερδίζει στις μέρες μας όλο και περισσότερο έδαφος έναντι των συμβατικών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Η βελτίωση της απόδοσής τους και τα πολλά πλεονεκτήματά τους ευνοούν την χρήση τους σε πολλές κτιριακές και όχι μόνο κατασκευές. Αρχικά στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των διάφορων ακτινοβόλων συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Στην συνέχεια παρατίθενται οι διάφοροι τύποι συστημάτων που υπάρχουν στην αγορά, τα δομικά στοιχεία που τα απαρτίζουν, τα πλεονεκτήματά τους και κάποιες εφαρμογές. Τέλος παρουσιάζονται αποτελέσματα μελετών που πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικές συνθήκες και αφορούν τα επίπεδα της θερμικής άνεσης, των εκπομπών αλλά και του κόστους λειτουργίας των ακτινοβόλων συστημάτων με πάνελ και τα γενικά συμπεράσματα.

HYDRONIC RADIANT PANELS: STRUCTURAL AND OPERATING CHARACTERISTICS

Tzafolia Katerina

University of Thessaly, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Vasileios Bontozoglou, Professor

ABSTRACT

The use of hydronic panels for heating and cooling is gaining nowadays more ground than the conventional heating and cooling systems. The improvement in their performance and their many advantages favor their use in buildings and other constructions. Initially, this thesis presents the basic principles of operation of the various radiant heating and cooling systems. Then, the different types of systems available on the market, the components that make them up, their advantages and some applications are presented. Finally, the results of studies carried out under real conditions are presented concerning the levels of thermal comfort, emissions and operating costs, and some general conclusions are drawn.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή	9
1.1. Ενέργεια	9
1.2. Ενεργειακό ζήτημα και Ενεργειακή ανάπτυξη	9
1.3. Συμβατικές πηγές ενέργειας.....	10
1.4. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	11
1.5. Ενεργειακές ανάγκες κτηρίων.....	12
1.6. Τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	14
1.7. Ιστορική αναδρομή συστημάτων ακτινοβολίας.....	18
2. Μεταφορά θερμότητας σε υδραυλικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία.....	21
2.1. Μέθοδοι μεταφοράς θερμότητας - Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	21
2.2. Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας σε ακτινοβόλα πάνελ – Μικτή συναγωγή.....	23
2.3. Μεταφορά θερμότητας σε πάνελ ακτινοβολίας – Ανάλυση μοντέλου CRCP.....	24
2.4. Μεταφορά θερμότητας σε πάνελ ακτινοβολίας – Η περίπτωση ψυχόμενων δαπέδων.....	29
2.5. Παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση των πάνελ ακτινοβολίας.....	53
3. Υδραυλικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία.	37
3.1. Αρχή λειτουργίας.....	37
3.2. Κατηγορίες και τύποι συστημάτων	38
3.3. Δομικά υλικά πάνελ ακτινοβολίας.....	43
3.4. Δομικά υλικά μόνωσης	47
3.5. Σύστημα Ελέγχου.....	48
4. Πειραματικές εφαρμογές πάνελ ακτινοβολίας	59
4.1. Περίπτωση μελέτης συνθηκών άνεσης σε σχολική αίθουσα	59
4.2. Περίπτωση μελέτης συνθηκών άνεσης σε χώρο γραφείων.....	65

5. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	76
Βιβλιογραφία	78

1. Εισαγωγή

1.1. Ενέργεια

Η ενέργεια με την οποία τροφοδοτείται ο πλανήτης μας προέρχεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τον ήλιο. Η ενέργεια χαρακτηρίζεται τόσο στην θεωρία όσο και στην πράξη, περισσότερο ως μαθηματική έννοια, που δίνει την δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης ή της κίνησης ενός συστήματος. Ορίζεται σαν το ποσό του έργου που απαιτείται προκειμένου το σύστημα να πάει από μία αρχική κατάσταση σε μία τελική. Ακριβώς πόση ενέργεια περιέχεται σε ένα σύστημα μπορεί να υπολογιστεί παίρνοντας το άθροισμα ή το ολοκλήρωμα ενός αριθμού ειδικών εξισώσεων (όπως είναι οι εξισώσεις Lagrange ή οι εξισώσεις Hamilton), καθεμία από τις οποίες δίνει την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί κατά έναν ιδιαίτερο τρόπο. Ανάλογα με τον τρόπο που έχει αποκτηθεί, ανταλλαχθεί ή αποθηκευτεί, μπορούμε να μιλήσουμε για πολλές μορφές ενέργειας.

1. Μηχανική ενέργεια, που συνδυάζει την κινητική και την δυναμική
2. Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, που είναι αλληλεπίδραση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου
3. Πυρηνική ενέργεια
4. Θερμική ενέργεια
5. Χημική ενέργεια
6. Υλο-ενέργεια

1.2. Ενεργειακό ζήτημα και Ενεργειακή ανάπτυξη

Είναι γεγονός ότι η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αυξάνεται διαρκώς. Η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως στη σημαντική αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, στην αύξηση των οικονομικών και αναπτυξιακών δραστηριοτήτων σε όλο τον πλανήτη καθώς και στη σημαντική βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και όσων αυτή συνεπάγεται. Αυτό οδήγησε στο να απελευθερώνονται κάθε χρόνο δισεκατομμυρια τόνοι διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα που πρόερχονται κυρίως από την κάυση ορυκτών καυσίμων, όπως είναι το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο, αλλά και άλλων αερίων όπως είναι το μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου, με αποτέλεσμα να

αλλάζει η σύσταση του αέρα της ατμόσφαιρας που παρέμενε σταθερή για δεκάδες χιλιάδες χρόνια (Παπανδρέου, 2015).

Από την αρχή της βιομηχανικής επανάστασης μέχρι και σήμερα οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα που οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα έχουν αυξηθεί κατά 25%. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κάθε χρόνο η ατμόσφαιρα να επιβαρύνεται με έξι δισεκατομμύρια τόνους CO₂, ενώ υπολογίζεται πως η μέση θερμοκρασία της γης τον επόμενο αιώνα θα ανέβει από 2 έως 6οC (Αποστολοπούλου, 2013).

Το διοξείδιο του άνθρακα συμμετέχει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά 60% και ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα κυρίως από την καύση των ορυκτών καυσίμων σε εφαρμογές που συνδέονται κατά κύριο λόγο με κτίρια, μεταφορές και βιομηχανικές δραστηριότητες. Καθώς αυξάνονται τα αέρια που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, αλλάζει η θερμική ισορροπία του πλανήτη. Τα ακραία καρικά φαινόμενα που εμφανίζονται όλο και συχνότερα σε όλη την υφήλιο μαρτυρούν τις δραματικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της κλιματικής αλλαγής, παρατηρείται υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Αυτή φωτογραφίζεται κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες, με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στα μεγάλα αστικά κέντρα, γεγονός που έχει οδηγήσει σε κατακόρυφη αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για τον δροσισμό των κτιρίων που βρίσκονται σε αυτά.

Για την κάλυψη των ολοένα αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών την κοινωνίας γίνεται η προσπάθεια διάθεσης επαρκών ενεργειακών πηγών και δευτερογενών πηγών ενέργειας. Οι πηγές αυτές είναι συμβατικές, εναλλακτικές και ανανεώσιμες καθώς επίσης γίνεται προσπάθεια ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης της ενέργειας η οποία υπό διαφορετικές συνθήκες θα χανόταν.

1.3. Συμβατικές πηγές ενέργειας

Ως συμβατικές πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται αυτές οι οποίες δεν αναπληρώνονται ή αναπληρώνονται εξαιρετικά αργά για τα ανθρώπινα μέτρα από φυσικές διαδικασίες και είναι οι εξής:

- τα στερεά καύσιμα των γαιανθράκων (π.χ. λιγνίτης, ανθρακίτης)

- τα υγρά καύσιμα, τα οποία προκύπτουν ως προϊόν από την κατεργασία υδρογονανθράκων (π.χ. πετρέλαιο, βενζίνη)
- τα αέρια καύσιμα (π.χ. φυσικό αέριο, υγραέριο)
- η πυρηνική ενέργεια, η οποία λαμβάνεται από τη σχάση ραδιενεργών υλικών

Ωστόσο λόγω της μείωσης των αποθεμάτων κυρίως των ορυκτών καυσίμων αλλά και του περιβαλλοντικού κόστους της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα που προέρχεται από την καύση των στερεών, υγρών και αέριων καυσίμων, εντείνεται η ενεργειακή μας απεξάρτηση από αυτά και γίνεται επιτακτική η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Γιαννακοπούλου, Κουτσογράδη, 2019) .

1.4. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι ενεργειακές πηγές που υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον και προέρχονται από φυσικές διαδικασίες (όπως είναι ο ήλιος, ο άνεμος και η κυκλοφορία του νερού), δηλαδή πρακτικά ανεξάντλητες πηγές που δεν προκαλούν περιβαλλοντική ρύπανση. Σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ως κατηγορίες ενέργειας η οποία προκύπτει από ανανεώσιμες, μη ορυκτές πηγές μπορούν να θεωρηθούν οι εξής:

- Αιολική
- Ηλιακή
- Αεροθερμική
- Γεωθερμική
- Υδροθερμική και η ενέργεια των ωκεανών,
- Υδροηλεκτρική,
- Ενέργεια από βιομάζα,
- Ενέργεια από τα εκλυόμενα αέρια στους χώρους υγειονομικής ταφής
- Ενέργεια από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων
- Ενέργεια από βιοαέρια

Τα βασικά πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι ότι η αξιοποίησή τους δεν απαιτεί ενεργητική παρέμβαση, όπως είναι η εξόρυξη, η άντληση ή η καύση, όπως με τις

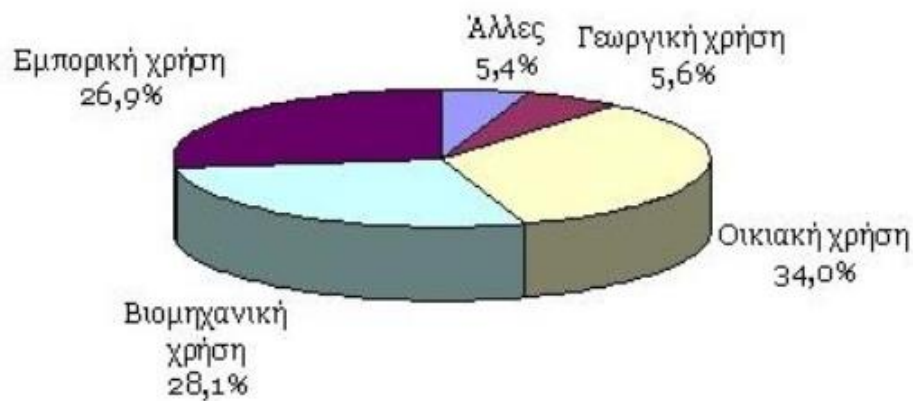
μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας. Η εκμετάλλευση των ΑΠΕ γίνεται μέσω της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Επιπλέον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, οι οποίες είναι πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεδμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα.

Οι ΑΠΕ αποτελούν σήμερα, για πολλές χώρες, μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος καθώς και στην αειφόρο ανάπτυξη μιας περιοχής (Γιαννακοπούλου, Κουτσογράδη, 2019).

1.5. Ενεργειακές ανάγκες κτηρίων

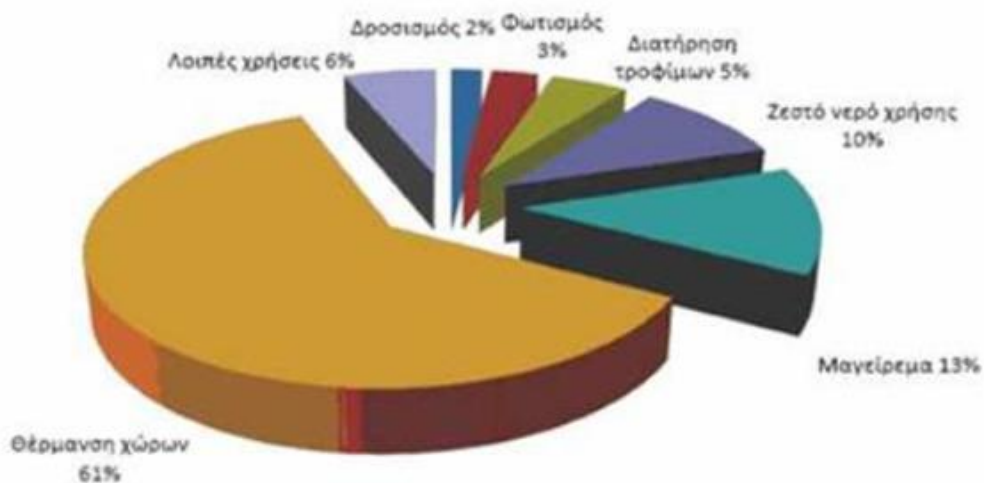
Από το συνολικό ποσό ενέργειας που καταναλώνει μια χώρα, η μεγαλύτερη απορρόφηση αυτής γίνεται από τα κτίρια, τις βιομηχανίες και τις μεταφορές. Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης ο κτιριακός τομέας έχει περίπου το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Η θέρμανση των κτιρίων καταλαμβάνει την μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση (61%) και ακολουθεί η παραγωγή ζεστού νερού (10%), οι ηλεκτρικές συσκευές και ο φωτισμός (11%). Το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια έχουν θεσπιστεί αυστηρότερα ενεργειακά κριτήρια και ότι οι ηλεκτρικές συσκευές είναι ενεργειακά αποδοτικότερες έχει οδηγήσει σε μείωση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας ανα κατοικία τα τελευταία χρόνια, ενώ πολλά κτίρια στην Ευρώπη καλύπτουν μεγάλο ποσοστό των ενεργειακών τους αναγκών από την εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών και κυρίως της ηλιακής ακτινοβολίας (Παπανδρέου, 2015).

Στην Ελλάδα, ο κτιριακός τομέας αποτελείται κατά το 70% από κτίρια κατοικιών ενώ το υπόλοιπο 30% ανήκει στον τριτογενή τομέα. Τα κτίρια καταναλώνουν περίπου το 35% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας (Παπανδρέου, 2015).



Γράφημα 1-1 Σύνθεση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (Παπανδρέου, 2015)

Στην χώρα μας, λόγω του κλίματός της, εμφανίζει λιγότερες απαιτήσεις σε θέρμανση τον χειμώνα σε σχέση με τις βορειότερες χώρες της Ευρώπης (περίπου 61% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης), ενώ από τις οικιακές συσκευές, τον φωτισμό και τον κλιματισμό απαιτεί το 18% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης.



Γράφημα 1-2 Κατανάλωση ενέργειας ανά χρήση σε κατοικίες (Παπανδρέου, 2015)

Παρατηρείται πως η θέρμανση έχει την μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση για όλα τα κτίρια στην χώρα. Αυτό οφείλεται σε μια σειρά παραμέτρων που σχετίζονται με το πλήθος των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού, το είδος της προστασίας των κτηρίων κατά την διάρκεια του χειμώνα και του καλοκαιριού καθώς και στο γεγονός

ότι για τον δροσισμό των χώρων χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια και συσκευές με συντελεστή απόδοσης κατά πολύ μεγαλύτερο της μονάδας.

Να σημειωθεί πως στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στις κατοικίες κεντρικό σύστημα θέρμανσης με καύσιμο αποκλειστικά πετρέλαιο σε ποσοστό περίπου 35,5% ενώ το υπόλοιπο 64% αφορά αυτόνομες θερμαινόμενες κατοικίες που χρησιμοποιούν 25% πετρέλαιο και 12% ηλεκτρικό ρεύμα. Αντίθετα με τις υπόλοιπες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στην Ελλάδα η καταναλισκόμενη ενέργεια στα κτίρια εμφανίζει αυξητική τάση (Παπανδρέου, 2015).

Επομένως καθίσταται ξεκάθαρο πως η εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα είναι πλέον επιβεβλημένη. Τα κτίρια ευθύνονται για περισσότερο από το 45% των συνολικών εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Το γεγονός ότι οι ανάγκες θέρμανσης και ψήξης χώρων, ο φωτισμός και ο αερισμός καλύπτονται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους από συμβατικές πηγές ενέργειας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πλέον είναι επιτακτικός ο σχεδιασμός των κτιρίων κατά τρόπο που να μειώνει όσο το δυνατόν περισσότερο τις ενεργειακές τους ανάγκες και να καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ορίζει ο βιοκλιματικός σχεδιασμός και οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Παπανδρέου, 2015).

1.6. Τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Η ορθή διαχείριση των κτιρίων σε συνδυασμό με την εφαρμογή Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε αυτά, οδηγεί σε μείωση της ενεργειακής τους κατανάλωσης. Τα δύο βασικά προβλήματα που έχουν περιορίσει μέχρι σήμερα την διάδοση τεχνολογιών που βασίζονται στην Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι το υψηλό τους κόστος σε συνδυασμό με την χαμηλή τους απόδοση. Παρόλα αυτά με την πρόοδο της τεχνολογίας ο κλάδος έχει εξελιχθεί σημαντικά με αποτέλεσμα το κόστος τους να έχει μειωθεί σημαντικά ενώ παράλληλα έχει αυξηθεί αισθητά η ενεργειακή τους απόδοση, καθιστώντας την ενσωμάτωσή τους στον κτηριακό τομέα υλοποιήσιμη (Γαρμπής, 2019).

Οι τεχνολογίες ΑΠΕ που αξιοποιούνται περισσότερο στον κτηριακό τομέα αυτή την στιγμή είναι:

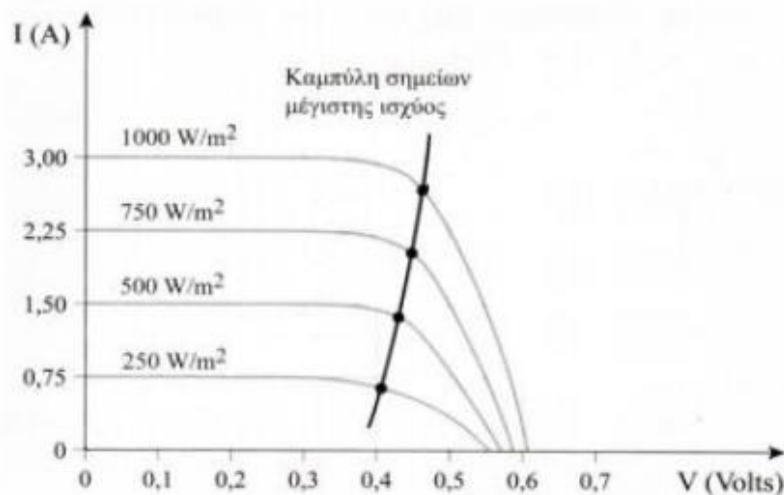
Ηλιακά θερμικά συστήματα: Είναι συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική. Είναι διαδεδομένα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ζεστού νερού, θέρμανση, οικιακή χρήση κ.α. (Γαρμπής, 2019).

Φωτοβολταϊκά συστήματα: Αποτελούνται από ένα ή περισσότερα πλαίσια φωτοβολταϊκών στοιχείων τα οποία μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα τόσο σε μικρή όσο και σε μεγάλη κλίμακα. Μερικά από τα πλεονεκτήματά τους είναι:

- Μηδενική ρύπανση του περιβάλλοντος
- Δημιουργία συστήματος οποιασδήποτε ισχύος εφόσον υπάρχει ο διαθέσιμος χώρος
- Η δυνατότητα ένταξής τους στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό
- Η μεγάλη διάρκεια ζωής τους
- Η δυνατότητα σύνδεσής τους με το δίκτυο

Τα φωτοβολταϊκά διακρίνονται σε μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά και άμορφα. Αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι οι δύο πρώτες κατηγορίες με τα μονοκρυσταλλικά να έχουν μεγαλύτερη απόδοση, ενώ τα πολυκρυσταλλικά χαμηλότερη τιμή.

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων επηρεάζεται αναλόγως από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ισχύς που προσπίπτει σε μια επιφάνεια 1m² μια ηλιόλουστη μέρα μπορεί να φτάσει και 1000W. Η επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην απόδοσή τους παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Γαρμπής, 2019).



Γράφημα 1-3 Η επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην απόδοση του φωτοβολταϊκού (Γαρμπής, 2019).

Ανεμογεννήτριες: Μπορούν να τοποθετηθούν στον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου, εάν αυτός υπάρχει, είτε στην οροφή του είτε να ενσωματωθούν στον αρχικό σχεδιασμό του. Για την τοποθέτησή τους πρέπει να ληφθεί υπόψη:

Η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

Η ελαχιστοποίηση των ταλαντώσεων

Η μείωση του θορύβου λειτουργίας

Οι χωροταξικοί-πολεοδομικοί περιορισμοί

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των φωτοβολταϊκών συστημάτων, όμως μέχρι στιγμής δεν έχουν την ίδια απήχηση με αυτά λόγω των μικρότερων αποδόσεων, των απαιτήσεων για μεγάλες ταχύτητες αέρα και διαθέσιμου χώρου που είναι δύσκολο να ικανοποιηθούν μέσα στον αστικό ιστό. Παρόλα αυτά χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά ταυτόχρονα με φωτοβολταϊκά συστήματα καθώς ο συνδυασμός τους επιτρέπει την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κτιρίων. Αυτό συμβαίνει διότι το μεγαλύτερο διάστημα του χρόνου οι δύο αυτές πηγές ενέργειας (ήλιος και άνεμος) δρύνε συμπληρωματικά (Γαρμπής, 2019).



Εικόνα 1-1 Ενσωμάτωση ανεμογεννητριών στην αρχιτεκτονική κτιρίων(Γαρμπής, 2019)

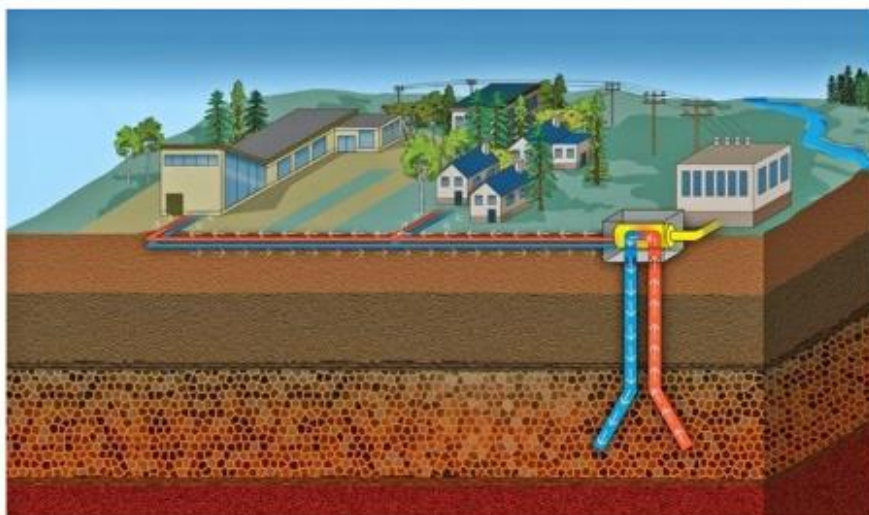
Γεωθερμία: Πρόκειται για την ενέργεια που προέρχεται από το υπέδαφος. Αναλόγως με τη θερμοκρασία χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες:

Χαμηλής ενθαλπίας (25-100°C)

Μέσης ενθαλπίας (100-150°C)

Υψηλής ενθαλπίας (>150°C)

Η γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας είναι κατάλληλη για ψύξη, θέρμανση και κλιματισμό χώρων, γι αυτό και προτιμάται η χρήση της στον κτηριακό τομέα. Το αρχικό κόστος της συγκεκριμένης εγκατάστασης μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλο, αλλά λόγω των εξαιρετικά υψηλών ενεργειακών αποδόσεων μπορεί να γίνει γρήγορη οικονομική απόσβεση (Γαρμπής, 2019).



Εικόνα 1-2 Ενδεικτική λειτουργία συστήματος γεωθερμίας (Γαρμπής, 2019).

Βιομάζα: Στον όρο βιομάζα περιλαμβάνεται οποιοδήποτε υλικό που παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς (όπως είναι το ξύλο τα υπολείμματα καλλιεργειών, τα κτηνοτροφικά απόβλητα, κ.α.) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας.

Η βιομάζα χρησιμοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια στον κτιριακό τομέα και κυρίως για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης. Η χρήση της έγινε ακόμη πιο διαδεδομένη τα τελευταία χρόνια λόγω της αύξησης της τιμής του πετρελαίου την τελευταία δεκαετία και οδήγησε σε αύξηση των καυστήρων βιομάζας (Γαρμπής, 2019).

Παρατηρείται επομένως ότι υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες που αξιοποιούν της Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας με τις περισσότερες ωστόσο, με εξαίρεση τα φωτοβολταϊκά, να βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο. Τα προβλήματα που παρουσιάζουν μπορούν να αντιμετωπιστούν εύκολα και η ενσωμάτωσή τους στον κτιριακό τομέα να οδηγήσει σε κτίρια με χαμηλή λη ακόμη και με μηδενική ενεργειακή κατανάλωση.

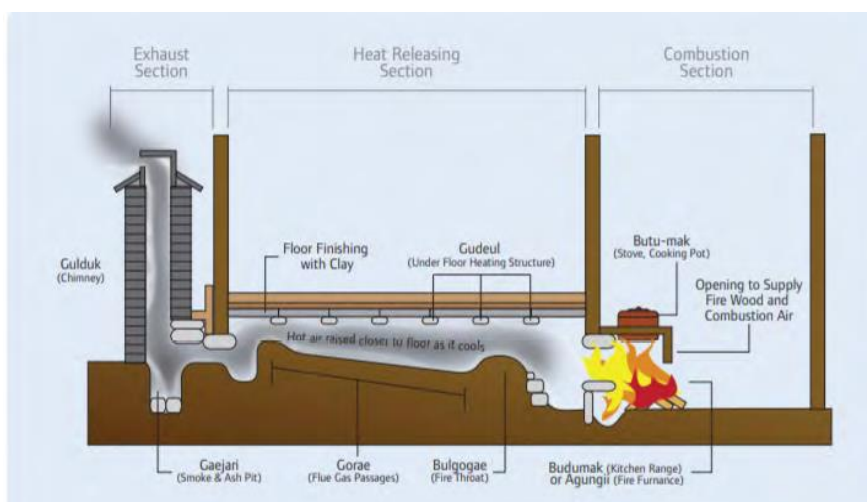
1.7. Ιστορική αναδρομή συστημάτων ακτινοβολίας

Παρόλο που η αρχαία Ρώμη θεωρείται από πολλούς ιστορικούς ως η γενέτειρα της θέρμανσης με ακτινοβολία, αρχαιολογικές ανασκαφές σε Ασία και Αμερική αποδεικνύουν την ύπαρξη ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ακτινοβολία πριν από 3000 χρόνια. Στο Βόρειο Ημισφαίριο από την Νεολιθική ακόμη περίοδο οι άνθρωποι θέρμαιναν τα υπόγεια καταφύγια αξιοποιώντας τον καπνό από την φωτιά μέσα από

χαρακώματα σκαμμένα στο δάπεδο. Οι πέτρες ακτινοβολούσαν την θερμότητα από το δάπεδο δημιουργώντας σχετικά άνετες συνθήκες διαβίωσης σε πολύ σκληρά κλίματα (Uronor, 2013).

Παρόμοιο σύστημα χρησιμοποιούσαν και στην αρχαία Κίνα όπου τα καυσαέρια της φωτιάς που χρησιμοποιούσαν στο μαγείρεμα θέρμαιναν μια πλατφόρμα (kang) από πηλό ή τούβλα. Η πλατφόρμα χρησιμοποιούνταν για την θέρμανση του χώρου αλλά και ως θερμαινόμενο κρεβάτι.

Περίπου το 1000π.Χ. εμφανίζεται στην Κορέα το σύστημα *ondol* που μπορεί να αποτελεί και το πρώτο ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης. Η εκπεμπόμενη θερμότητα της φωτιάς θέρμαινε άμεσα τον αέρα κάτω από το δάπεδο της οικίας και έμεσα τον εσωτερικό της χώρο. Το *ondol* εμφανίζει πολλές ομοιότητες με τα ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης και ψύξης που χρησιμοποιούνται σήμερα (Uronor, 2013).



Εικόνα 1-3: Σύστημα ondol (Uronor, 2013)

Συστήματα ακτινοβολίας με βάση το νερό έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς στην Ευρώπη του περασμένου αιώνα. Αρχικά οι σωληνώσεις ήταν από χαλκό, διότι θεωρούνταν φθινό υλικό και εύκολο στην επεξεργασία. Ωστόσο προβλήματα όπως συστροφές κατά την εγκατάσταση, η διάβρωση, η διάτρηση και η συσσώρευση, μείωναν την αποτελεσματικότητα του συστήματος στον χρόνο και περιορίσε τη χρήσιμη ζωή του (Uronor, 2013).

Το 1968, ο Γερμανός μηχανικός Thomas Engel ανέπτυξε μια μέθοδο διασύνδεσης μορίων οξυγόνου πολυαιθυλενίου για δημιουργία σταυροσυνδεδεμένου πολυαιθυλενίου ή PEX. Τον επόμενο έτος, η Wirsbo, μια σουηδική εταιρεία,

τελειοποίησε την κατασκευαστική διαδικασία για PEX χρησιμοποιώντας την μέθοδο του Engel, και έκανε το PEX-μια σωλήνωση εμπορικά διαθέσιμο. Η σωλήνωση της Wirsbo έφερε επανάσταση στο υδρονική βιομηχανία παρέχοντας μια ευέλικτη και ανθεκτική λύση υψηλής ποιότητας εναλλακτική για τον χαλκό (Υρονος, 2013).

2. Μεταφορά θερμότητας σε υδραυλικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία.

2.1. Μέθοδοι μεταφοράς θερμότητας - Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

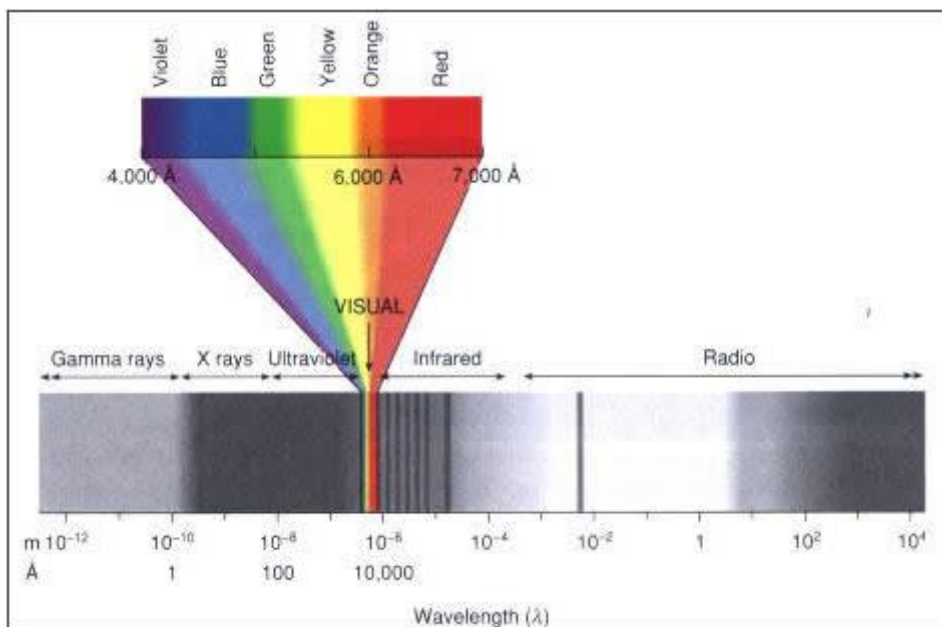
Οι βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας είναι η αγωγή, η συναγωγή και η ακτινοβολία. Στους μηχανισμούς αυτούς η θερμότητα μεταφέρεται από το μέσο με την υψηλότερη θερμοκρασία προς αυτό με την χαμηλότερη θερμοκρασία. Βασικός παράγοντας για να έχουμε μεταφορά θερμότητας με αγωγή είναι τα δύο μέσα να είναι στερεά και να βρίσκονται σε επαφή. Η συναγωγή συμβαίνει ανάμεσα σε ένα στερεό και ένα ρευστό. Η ακτινοβολία εκπέμπεται από κάθε σημείο μιας επιφάνειας και προς όλες τις κατευθύνσεις.

Μια από τις κυριότερες διαφορές των τριών μηχανισμών, είναι ότι η ακτινοβολία δεν απαιτεί την παρουσία υλικού μέσου για να επιτευχθεί η μεταφοράς θερμότητας σε αντίθεση με τους μηχανισμούς της αγωγής και της συναγωγής. Επίσης ο μηχανισμός της ακτινοβολίας είναι γρηγορότερος καθώς η μεταφορά θερμότητας γίνεται με την ταχύτητα του φωτός, χωρίς αυτή να εξασθενεί στο κενό. Η ακτινοβολία εμφανίζεται σε στερεά, υγρά και αέρια μέσα και αποτελεί τον μοναδικό μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας στο κενό. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί πως η μεταφορά θερμότητας είναι μια πολύπλοκη διαδικασία και στις πραγματικές εφαρμογές εμφανίζονται και οι τρεις μηχανισμοί (αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία).

Η θεωρητική βάση της ακτινοβολίας τέθηκε από τον φυσικό James Clerk Maxwell το 1864. Αποδέχθηκε ότι η επιτάχυνση των φορτίων ή των ρευμάτων που αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου θα παράγει ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Αυτά τα γρήγορα κινούμενα πεδία ονομάζονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, τα οποία αντιπροσωπεύουν την ενέργεια που εκπέμπεται από την ύλη που προκαλείται από αλλαγές στη διαμόρφωση ατόμων ή μορίων. Το 1887, μέσω πειραμάτων ο Heinrich Hertz απέδειξε την ύπαρξη τέτοιων ηλεκτρικών κυμάτων. Αν και όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά, κύματα διαφορετικών μηκών συμπεριφέρονται διαφορετικά. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καλύπτει ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος. Για κοσμικές ακτίνες, το μήκος επέκτασης είναι μικρότερο από 10-10 μm, ενώ για ηλεκτρικά κύματα, το

μήκος επέκτασης είναι μεγαλύτερο από 10^{10} μm . Στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα περιλαμβάνονται επίσης οι ακτίνες γ και X, η υπεριώδης ακτινοβολία, το ορατό φως, η υπέρυθρη και η θερμική ακτινοβολία, τα μικροκύματα καθώς και τα ραδιοκύματα (Ζδέτσης Α).

Ο τύπος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που σχετίζεται με τη μεταφορά θερμότητας είναι η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται λόγω της κίνησης μορίων, ατόμων και ηλεκτρονίων της ύλης. Η θερμοκρασία είναι ένας δείκτης της ικανότητας μέτρησης αυτών των ενεργειών σε μικροσκοπικό επίπεδο, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται επίσης η εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας. Κάθε υλικό του οποίου η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από το απόλυτο μηδέν θα εκπέμπει συνεχώς θερμική ακτινοβολία. Επομένως, όλα τα αντικείμενα που υπάρχουν στον κόσμο γύρω μας εκπέμπουν και απορροφούν συνεχώς ακτινοβολία. Το φάσμα της κυμαίνεται από 0,1 μm έως 100 μm . Επομένως, περιλαμβάνει όλο το ορατό φως και την υπέρυθρη ακτινοβολία (IR) καθώς και μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV). Οι ιδιότητες της επιφάνειας, όπως είναι η απορροφητικότητα, η ανακλαστικότητα και η εκπεμπιμότητα, καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της θερμικής ακτινοβολίας (Ζδέτσης Α).



Εικόνα 2-1 Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
(<http://light.physics.auth.gr/history/two/spectrum.html>)

2.2. Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας σε ακτινοβόλα πάνελ – Μικτή συναγωγή

Μια πραγματική εφαρμογή συνδυασμού των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας αποτελούν τα πάνελ ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται για την ψύξη και θέρμανση χώρων. Σε αυτά τα συστήματα ακτινοβολία συμμετέχει συνήθως σε ποσοστό μεγαλύτερου του 50% της συνολικής μεταφερόμενης ενέργειας, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό μεταφοράς θερμότητας καλύπτεται από τον μηχανισμό της συναγωγής. Η ικανότητα απορρόφησης θερμότητας και το ποσοστό με το οποίο συμμετέχουν οι 2 μηχανισμοί σε αυτή, εξαρτάται από τον τύπο του πάνελ και τα υλικά από τα οποία αποτελείται. Ο υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς για την ακτινοβολία είναι σχετικά απλός, ενώ για την περίπτωση της συναγωγής, ο υπολογισμός γίνεται αφού διακρίνουμε τρεις τύπους συναγωγής, ανάλογα με την επίδραση που έχει η ταχύτητα του αέρα στην μεταφορά θερμότητας, την φυσική, την εξαναγκασμένη και την μικτή (Lienhard, 2000).

Συντελεστής φυσικής συναγωγής (Natural Convection)

Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας φυσικής συναγωγής (NC) χρησιμοποιούνται από πολλούς ερευνητές για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας σε πάνελ ακτινοβολίας, όπως για παράδειγμα τα πάνελ οροφής για ψύξη (Ceiling Radiant cooling Panel ή CRCP). Χρησιμοποιούνται κατά κόρον στον υπολογισμό μεταφοράς θερμότητας σε πάνελ που βρίσκονται σε χώρους οι οποίοι δεν αερίζονται, ενώ χρησιμοποιούνται ακόμη και από Ευρωπαϊκά Πρότυπα όπως το DIN 4715 (1997), όπου η φυσική συναγωγή είναι μία από τις βασικές δοκιμαστικές συνθήκες για την αξιολόγηση συστημάτων ακτινοβολίας όπως τα CRCP (Jeong and Mumma, 2003).

Εξαναγκασμένη συναγωγή (Forced Convection)

Η εξαναγκασμένη συναγωγή λαμβάνει χώρα σε περιπτώσεις όπου έχουμε μηχανικό αερισμό και επομένως μεγαλύτερη κίνηση του αέρα στον χώρο. Η μεγαλύτερη ταχύτητα των ατόμων του αέρα δεν επιτρέπει την χρήση των συντελεστών φυσικής συναγωγής, ωστόσο ενισχύει την μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής στο πάνελ χωρίς όμως να υπάρχει κάποια αξιοσημείωτη αύξηση της αποδοτικότητάς του. Από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε δωμάτια με μηχανικό αερισμό και σε πραγματικά κτίρια φαίνεται ότι υπάρχει αύξηση της μεταφοράς θερμότητας κατά 10-

15% και 25% αντίστοιχα, σε σχέση με τις δοκιμές κατά DIN 4715 που χρησιμοποιούν συντελεστές φυσικής συναγωγής (Kochendoerfer, 1996).

Συντελεστής μικτής συναγωγής (Mixed Convection)

Λόγω του ότι στις περισσότερες πραγματικές εφαρμογές έχουμε φυσικό και μηχανικό αερισμό, ο πιο αξιόπιστος τρόπος υπολογισμού της μεταφοράς θερμότητας αποτελεί η χρήση του συντελεστή μικτής συναγωγής (Mixed Convection ή MC). Για τον υπολογισμό του συντελεστή MC έχουν γίνει πολλά πειράματα, για περιπτώσεις όπου έχουμε χαμηλά επίπεδα μηχανικού αερισμού με περίπου 3-7 ACH (air changes per hour) (Chen et al., 1989), ή για περιπτώσεις με πιο έντονο μηχανικό αερισμό με 15-100 ACH, όπου λόγω των πολλών ανανεώσεων του αέρα στο σύστημα είχαμε μεταφορά θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή (Spitler et al., 1991).

Ακολούθησαν και άλλες μελέτες όπως αυτές των Fisher και Pedersen το 1997 και των Beausoleil-Morrison το 2001. Ωστόσο η μελέτη των Awbi και Hatton το 2000 αποτελεί την πιο αξιοσημείωτη πρόταση για το υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με μικτή συναγωγή σε πάνελ θέρμανσης-ψύξης. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένας καλά μονωμένος θάλαμος στο μέγεθος ενός χώρου γραφείου. Οι θερμικές πλάκες τοποθετήθηκαν στις εσωτερικές επιφάνειές του, ενώ για να δημιουργηθεί κίνηση του αέρα και να επιτευχθεί ταυτόχρονα φυσική και εξαναγκασμένη συναγωγή, τοποθετήθηκε στο ένα άκρο των θερμικών πάνελ ένας ανεμιστήρας με ρυθμιζόμενο ακροφύσιο. Με βάση το μοντέλο που προέκυψε, ο συντελεστής μικτής συναγωγής υπολογίζεται συναρτήσει 4 παραμέτρων, οι οποίες είναι η χαρακτηριστική διάμετρος του χώρου (De), η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ πάνελ και χώρου (ΔT), το πλάτος του αεραγωγού (W) και η ταχύτητα εξόδου του αέρα από τον αεραγωγό (V) (Jeong and Mumma, 2003).

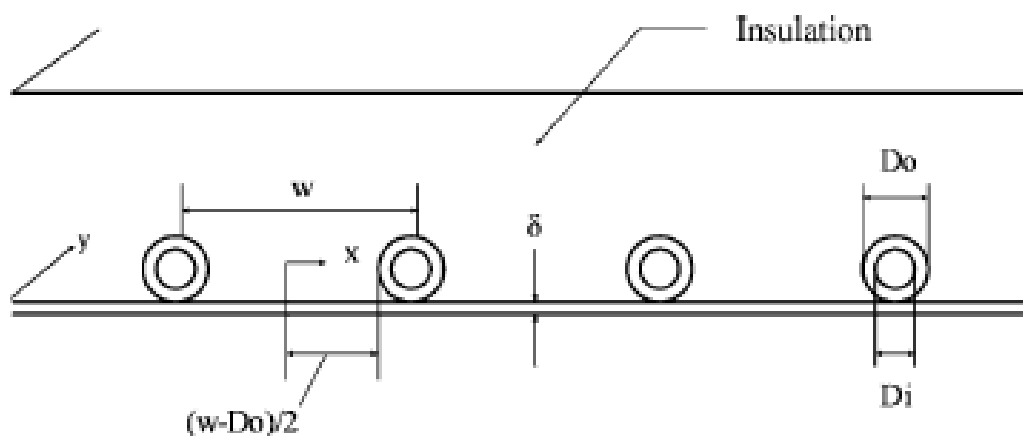
2.3. Μεταφορά θερμότητας σε πάνελ ακτινοβολίας – Ανάλυση μοντέλου CRCP

Οι Jeong και Mumma (2007) υπολόγισαν την μεταφορά θερμότητας σε πάνελ ακτινοβολίας. Τα πάνελ που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αλουμινίου και κρεμάμενα και χρησιμοποιούνταν για την ψύξη του χώρου.



Εικόνα 2-2 Κρεμαστό μεταλλικό σύστημα CRCP (Jeong and Mumma, 2007)

Τα παραπάνω συστήματα αποτελούνται από υδραυλικό κύκλωμα που περιέχει χάλκινους σωλήνες ενσωματωμένους στο πίσω μέρος του πάνελ. Η ενσωμάτωσή τους έγινε με συγκόλληση αλουμινίου.



Εικόνα 2-3 Διάταξη γεωμετρίας συστήματος CRCP (Jeong and Mumma, 2003)

Η ολική μεταφορά θερμότητας υπολογίζεται από το άθροισμα της συνολικής μεταφοράς θερμότητας λόγω ακτινοβολίας και της συνολικής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής.

$$q_0 = q_r + q_c \quad (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

$$q_r = h_r * (AUST - T_{pm}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2)$$

$$q_c = h_c * (T_a - T_{pm}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (3)$$

Επομένως προκύπτει η σχέση:

$$q_0 = h_r * (AUST - T_{pm}) + h_c * (T_a - T_{pm}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (4)$$

Στην παραπάνω σχέση μπορεί να συμπεριληφθεί και ο ολικός συντελεστής θερμότητας U_0 που περιλαμβάνει την δράση και των δύο μηχανισμών στην ολική μεταφορά θερμότητας στο πάνελ.

$$U_0 = \frac{q_0}{(T_a - T_{pm})} \quad (5)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής μικτής συναγωγής (Awbi and Hatton, 2000)

$$h_c = (h_{cn}^{3.2} + h_{cf}^{3.2})^{1/3.2} \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (6)$$

$$h_{cn} = \frac{2.175}{D_e^{0.076}} * (T_a - T_{pm})^{0.308} \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (7)$$

$$h_{cf} = 4.25 * W^{0.575} * W^{0.557} \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (8)$$

Αντίστοιχα υπολογίζεται και ο συντελεστής ακτινοβολίας (ASHRAE 2000)

$$h_r = 5 * 10^{-8} * [(AUST + 273)^2 + (T_{pm} + 273)^2] * [(AUST + 273) + (T_{pm} + 273)] \quad (9)$$

Η τιμή του AUST (Kilkis et al., 1994) είναι:

$$AUST \approx T_a - d \cdot z$$

(10)

$$z \cong \frac{7}{T_{oa} - 45} \quad \text{για } 26^\circ C \leq T_{oa} \leq 36^\circ C$$

(11)

Όπου d , δείκτης που σχετίζεται με την θέση στην οποία βρίσκεται ο χώρος:

- $d=0.5$, για εσωτερικό χώρο,
- $d=1$, για δωμάτιο με μία πλευρά εκτεθειμένη σε εξωτερικό χώρο και παράθυρα με επιφάνεια λιγότερη από το 5% της συνολικής επιφάνειας του δωματίου (fenestration $\leq 5\%$),
- $d=2$, για δωμάτιο με παράθυρα συνολικής επιφάνειας μεγαλύτερη από το 5% της επιφάνειας του δωματίου (fenestration $\geq 5\%$) και
- $d=3$, για δωμάτιο με δύο ή περισσότερες πλευρές εκτεθειμένες σε εξωτερικό χώρο

Απαραίτητος για τον υπολογισμό του U_0 είναι ο υπολογισμός της μέσης θερμοκρασίας του πάνελ T_{pm} . Η μεταφορά της θερμότητας γίνεται κατά μήκος του πάνελ, επομένως η γεωμετρία του πάνελ παίζει σημαντικό ρόλο. Θεωρούμε ότι το πάνελ είναι μια επίπεδη επιφάνεια πλάτους (W) με τους σωλήνες να έχουν τον ρόλο πτερυγίων (F). Επιπλέον θεωρούμε ότι η επιφάνεια είναι πολύ πάχους σε σχέση με το μήκος της, οπότε η μεταφορά της θερμότητας από την άκρη του πάνελ (διεύθυνση- y) είναι αμελητέα. Σύμφωνα με τους Jeong και Mumma (2003) η κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πάνελ, ανάμεσα από τους σωλήνες, κατά την x -διεύθυνση, $T_p(x)$, εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{T_p(x) - T_a}{T_b - T_a} = \frac{\cosh(mx)}{\cosh\left(\frac{m(w - D_0)}{2}\right)}$$

(12)

Η αποδοτικότητα των πτερυγίων F , εκφράζει τον λόγο της πραγματικής θερμικής ενέργειας που μεταφέρεται στο πτερύγιο προς την ιδανική θερμότητα που θα μεταφέρονταν στην περίπτωση που όλο το πτερύγιο βρισκόταν στην ίδια θερμοκρασία με την βάση του και δίνεται από τον τύπο:

$$F = \frac{\tanh \frac{m(w-D_0)}{2}}{\frac{m(w-D_0)}{2}} \quad \text{όπου } m = \sqrt{U_0/k * \delta} \quad (13)$$

Η συνολική θερμική ενέργεια που μεταφέρεται, κατά την χ-διεύθυνση, στο πάνελ ανά μονάδα μήκους, q' ισούται με το άθροισμα της θερμότητας που κερδίζει η βάση του πετυργίου, πλάτους $(w-D_0)$, και της θερμότητα που κερδίζει ο σωλήνας διαμέτρου D_0 .

$$q'_{total} = q'_{fin} + q'_{tube} \quad (\text{W/m}) \quad (14)$$

$$q'_{fin} = -FU_0(w - D_0)(T_b - T_a) \quad (\text{W/m}) \quad (15)$$

$$q'_{tube} = -D_0U_0(T_b - T_a) \quad (\text{W/m}) \quad (16)$$

Άρα προκύπτει:

$$q'_{total} = -[(w - D_0)F + D_0]U_0(T_b - T_a) \quad (\text{W/m}) \quad (17)$$

Ωστόσο στην συνολική ενέργεια συμβάλει και το νερό που ρέει στην επιφάνειά του, ενώ επίσης πρέπει να λάβουμε υπόψη το πώς επηρεάζεται η μεταφορά θερμότητας από την συγκόλληση και τον σωλήνα που υπάρχει μεταξύ νερού και πάνελ.

$$q'_{total} = \frac{T_b - T_f}{\frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{\gamma}{k_b b w}} \quad (\text{W/m})$$

(18)

Αν απαλείψουμε τον όρο την θερμοκρασίας στην βάση του περυγίου προκύπτει:

$$q'_{total} = -w F' U_0 (T_f - T_a) \quad (\text{W/m})$$

(19)

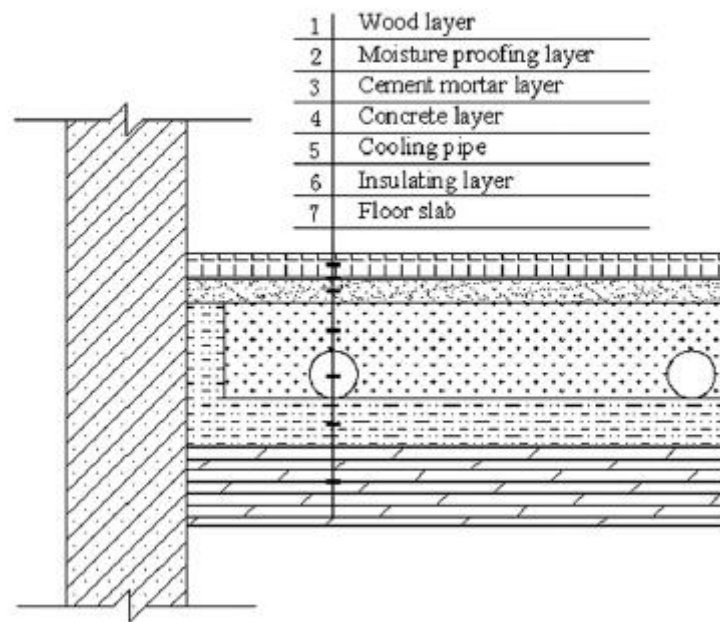
Όπου F' είναι ο δείκτης αποτελεσματικότητας του πάνελ. Ο δείκτης F' εκφράζει τον λόγο της πραγματικής θερμικής ενέργειας που κερδίζει το πάνελ ως προς αυτή που θα κέρδιζε αν η θερμοκρασία σε κάθε σημείο της επιφάνειας του ήταν ίδια με την θερμοκρασία του νερού που ρέει στο συγκεκριμένο σημείο.

$$F' = \frac{1/U_0}{w \left[\frac{1}{U_0 [D_0 + (w - D_0) F]} + \frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{\gamma}{k_b b w} \right]}$$

(20)

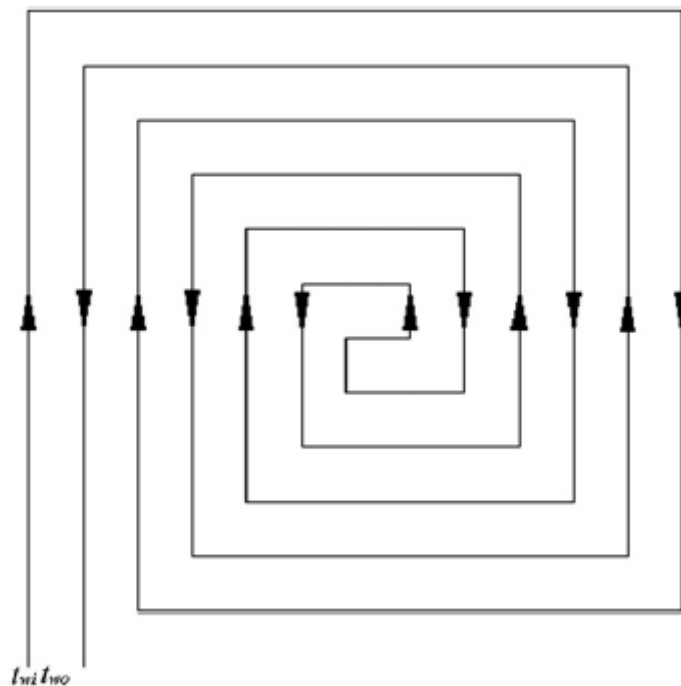
2.4. Μεταφορά θερμότητας σε πάνελ ακτινοβολίας – Η περίπτωση ψυχόμενων δαπέδων

Το 2010 οι Jin, Zhang, Luo και Cao χρησιμοποίησαν τα ραδιενεργά πάνελ ακτινοβολίας σαν εναλλακτική των συνηθισμένων συστημάτων ψύξης.



Εικόνα 2-4 Φυσικό μοντέλο του πατώματος (Jin, et.al, 2010)

Στα περισσότερα ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης – ψύξης οι αγωγοί είναι φτιαγμένοι από πλαστικό και έχουν κυλινδρικό σχήμα, ενώ οι στρώσεις του δαπέδου έχουν κυβοειδές σχήμα. Παρακάτω δίνεται η διάταξη των σωλήνων στο σύστημα.

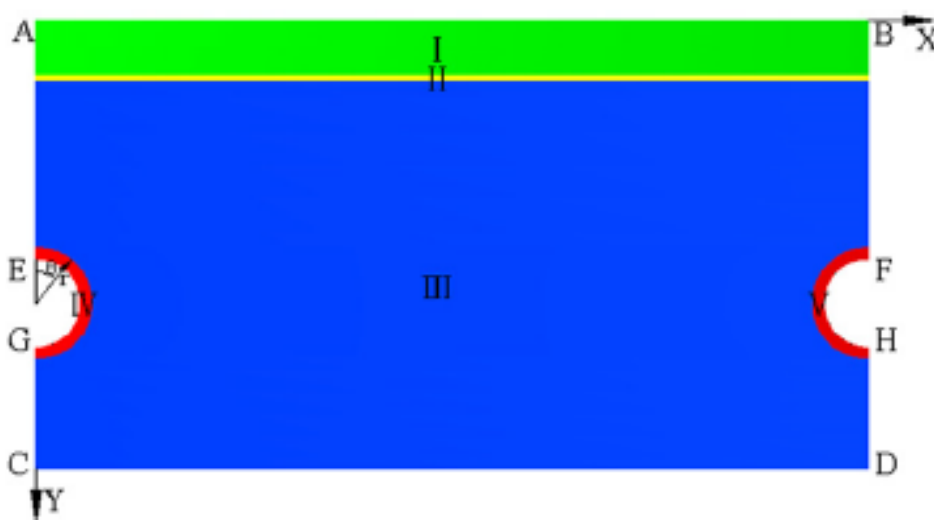


Εικόνα 2-5 Διάταξη σωλήνων σε σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης-ψύξης (Jin, et.al, 2010)

Για την απλοποίηση του μοντέλου μεταφοράς θερμότητας έγιναν οι παρακάτω θεωρήσεις:

- Τα κάθετα κεντρικά σημεία των σωλήνων θεωρούμε ότι είναι αδιαβατικά λόγω της συμμετρίας της θερμοκρασίας.
- Λόγω το ότι η θερμική αγωγιμότητα των μονωτικών στρώσεων είναι πολύ χαμηλή, οι θερμοκρασιακές διαφορές είναι πολύ μικρές στην κάτω επιφάνεια του μονωτικού στρώματος. Γι αυτό θεωρούμε ότι στην κάτω επιφάνεια του μονωτικού στρώματος η θερμοκρασία είναι ενιαία.
- Θεωρούμε πως όλα τα υλικά είναι ιστροπικά μέσα.

Η γεωμετρία των στρώσεων του δαπέδου επιτρέπει την χρήση των καρτεσιανών συντεταγμένων, ωστόσο όμως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση των αγωγών στις 3 διαστάσεις. Για τον λόγο αυτό γίνεται προσομοίωση των αγωγών στις 2 διαστάσεις με την χρήση των πολικών συντεταγμένων. Το πάτωμα χωρίζεται σε 5 τομείς. Το στρώμα I είναι το στρώμα της επιφάνειας, το II είναι η στρώση στεγανοποίησης της υγρασίας, το στρώμα III περιλαμβάνει τα στρώματα τσιμεντοειδών κονιαμάτων, το στρώμα του σκυροδέματος και την μόνωση. Οι τομείς IV και V είναι για τους PPR αγωγούς.



Εικόνα 2-6 Διαχωρισμός του δαπέδου στους 5 τομείς. (Jin, et.al, 2010)

Στους τομείς I, II και III χρησιμοποιούνται οι καρτεσιανές συντεταγμένες, ενώ στους τομείς IV και V οι πολικές.

Οι βασικές εξισώσεις για το δάπεδο είναι:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0 \quad (x, y \in I, II, III)$$

(21)

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \theta^2} = 0 \quad (r, \theta \in IV, V)$$

(22)

Οι οριακές συνθήκες για τις παραπάνω εξισώσεις είναι:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = 0 \quad (x, y \in AE, GC, BF, HD)$$

(23)

$$t = t_b \quad (x, y \in CD)$$

(24)

$$\lambda_s \frac{\partial t}{\partial y} = h_s(t - t_a) \quad (x, y \in AB)$$

(25)

$$\lambda_p \frac{\partial t}{\partial r} = h_w(t - t_w) \quad (x, y \in EG, FH)$$

(26)

Η μέση θερμοκρασία του δαπέδου υπολογίζεται από την σχέση:

$$t_s = \frac{1}{S} \int_0^S t_{i0} dx$$

(27)

Όπου λ_s και λ_r , η θερμική αγωγιμότητα του στρώματος της επιφάνειας και του αγωγού αντίστοιχα και t_b , t_a και t_w οι θερμοκρασίες της κάτω επιφάνειας του στρώματος της μόνωσης, του αέρα και του νερού αντίστοιχα.

Η επιφάνεια του δωματίου θεωρείται ως κλειστό σύστημα αποτελούμενο από δύο γκρι επιφάνειες που είναι η επιφάνεια του δαπέδου και οι άλλες επιφάνειες (τοίχοι και οροφή), του δωματίου αντίστοιχα. Η ακτινοβολούμενη ροή θερμότητας μεταξύ δύο γκριζών επιφανειών μπορεί να υπολογιστεί από τις εξής εξισώσεις:

$$q_r = \frac{\sigma(T_{os}^4 - T_s^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) + \frac{1}{X_{12}} + \frac{F_1}{\sum_{i=2}^6 F_i \left(\frac{1}{\varepsilon_i} - 1\right)}}$$

(28)

$$T_{os} = \frac{\sum_{i=2}^6 (F_i T_i)}{\sum_{i=2}^6 F_i}$$

(29)

όπου το q_r είναι ροή θερμότητας με ακτινοβολία, το T_s είναι η θερμοκρασία επιφάνειας του δαπέδου, T_{os} είναι η μέση θερμοκρασία των άλλων επιφανειών του δωματίου, το F_1 είναι το εμβαδόν του πατώματος και F_i είναι το εμβαδόν των άλλων επιφανειών του δωματίου.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ακτινοβολίας μεταξύ του δαπέδου και των άλλων επιφανειών του δωματίου υπολογίζονται από την εξίσωση

$$h_r = \frac{q_r}{T_{os} - T_s}$$

(30)

Η ροή θερμότητας λόγω συναγωγής υπολογίζεται από την εξίσωση

$$q_c = h_c(t_a - t_s)$$

(31)

όπου το q_c είναι ροή θερμότητας και h_c είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του δαπέδου και του αέρα.

Στην περίπτωση της φυσικής συναγωγής ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται ως:

$$h_{nc} = 0.27 \frac{\lambda_a}{L} (GrPr)^{0.25}$$

(32)

Όπου λ_a η θερμική αγωγιμότητα του αέρα.

Στην περίπτωση της μεικτής συναγωγής με βάση τον τύπο του Neiswanger et al. προκύπτει η εξίσωση ως συνδυασμός της φυσικής και της εξαναγκασμένης συναγωγής.

$$h_{mc} = (h_{nc}^{3.2} + h_{fc}^{3.2})^{1/3.2}$$

(33)

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ νερού και σωλήνα μπορεί να υπολογιστεί με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$h_w = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{\lambda_p}{D_i} \quad (Re \geq 10000) \quad (34)$$

$$h_w = 1.86 \left(Re Pr \frac{D_i}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\lambda_p}{D_i} \quad \left(Re < 2200, Re Pr \frac{D_i}{L} > 10 \right) \quad (35)$$

$$h_w = \left(3.66 + \frac{0.0668 Re Pr \frac{D_i}{L}}{\left(1 + 0.04 Re Pr \frac{D_i}{L} \right)^{\frac{2}{3}}} \right) \frac{\lambda_p}{D_i} \quad \left(Re < 2200, Re Pr \frac{D_i}{L} \leq 10 \right) \quad (36)$$

$$h_w = 0.116 \left(Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) Pr^{\frac{1}{3}} \left(1 + \left(\frac{D_i}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \frac{\lambda_p}{D_i} \quad (2200 \leq Re < 10000) \quad (37)$$

Το ισοζύγιο θερμότητας δίνεται από την εξίσωση:

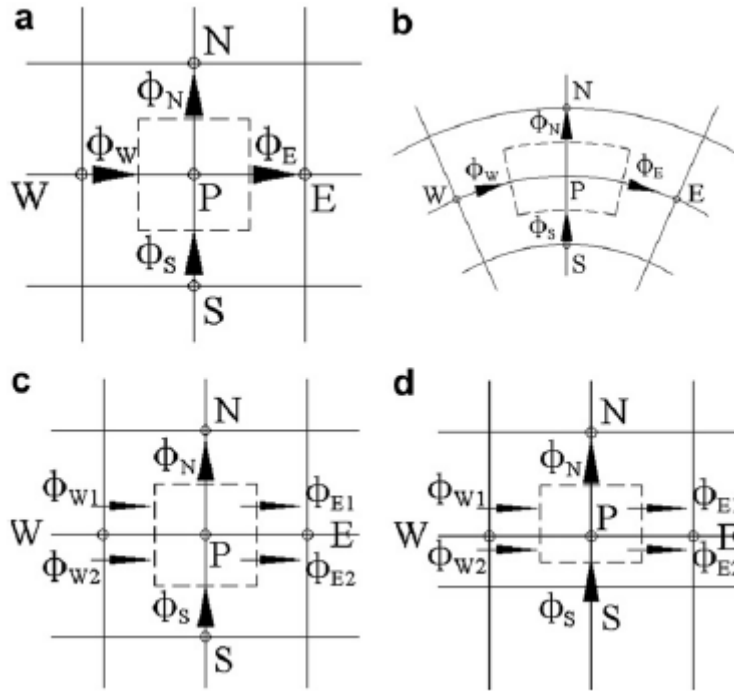
$$\Phi_W + \Phi_S = \Phi_E + \Phi_N \quad (38)$$

Λόγω του ότι το σύστημα είναι χωρισμένο σε 2 συστήματα συντεταγμένων αλλά και λόγω του ότι στην διεπιφάνεια των διαφόρων υλικών του συστήματος επικρατούν διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες με βάση τα παρακάτω διαγράμματα προκύπτουν οι εξισώσεις.

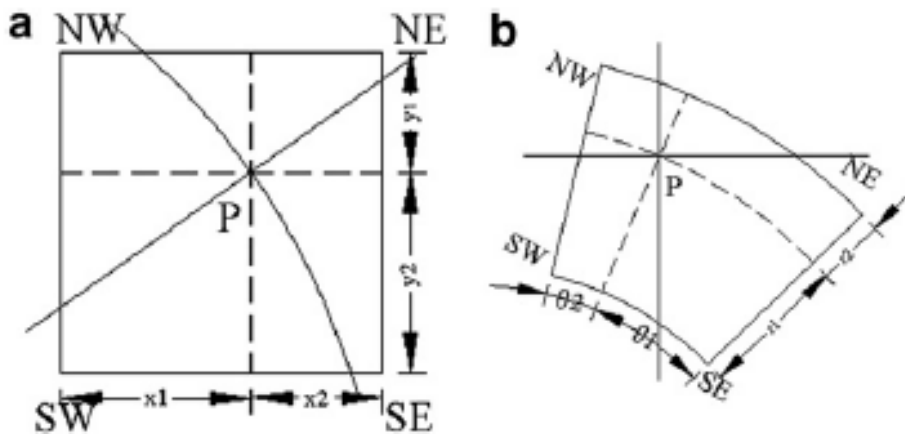
$$t_p = \frac{(t_{NE}x_1 + t_{NW}x_2)y_2 + (t_{SE}x_1 + t_{SW}x_2)y_1}{(x_1 + x_2)(y_1 + y_2)} \quad (39)$$

$$t_p = \frac{(t_{NW}r_1 + t_{SW}r_2)\theta_1 + (t_{NE}r_1 + t_{SE}r_2)\theta_2}{(r_1 + r_2)(\theta_1 + \theta_2)}$$

(40)



Εικόνα 2-7 Διάγραμμα κόμβων (a) σε καρτεσιανό σύστημα, (b) σε πολικό σύστημα, (c) στην διεπιφάνεια 2 υλικών, (d) στο στεγανοποιητικό στρώμα (Jin, et.al, 2010)



Εικόνα 2-8 Διεπιφάνεια τιμέντου-αγωγού. (a) σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, (b) σε πολικό σύστημα συντεταγμένων. (Jin, et.al, 2010)

3. Συστήματα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία.

3.1 Αρχή λειτουργίας

Για να χαρακτηριστεί ένα σύστημα ως ακτινοβόλο, πρέπει η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας να καλύπτει περισσότερο από το 50% της συνολικής μεταφερόμενης θερμικής ενέργειας (ASHRAE, 2012). Η θέρμανση και η ψύξη με ακτινοβολία επιτυγχάνεται μεταξύ επιφανειών με συγκεκριμένη θερμοκρασία που ανταλλάσσουν θερμότητα με τα σώματα που βρίσκονται στον χώρο. Το μέσο μεταφοράς θερμότητας είναι το νερό σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα που χρησιμοποιούν ως θερμικό μέσο τον αέρα.

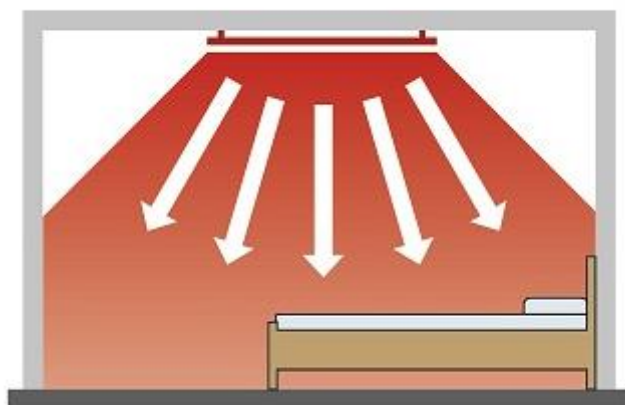
Τα υδραυλικά συστήματα αποτελούνται από μία λεπτή πλάκα στην οποία είναι τοποθετημένο το σύστημα σωληνώσεων μέσω του οποίου γίνεται η μεταφορά του νερού. Συνήθως τοποθετείται μόνωση από την πίσω πλευρά ώστε να μην έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες. Σε κάθε πλάκα υπάρχει σημείο εισόδου και εξόδου του νερού, με το σημείο εξόδου της πρώτης πλάκας να είναι ενωμένο με το σημείο εισόδου της δεύτερης πλάκας, ώστε να δημιουργείται κύκλωμα που να καλύπτει την επιθυμητή επιφάνεια.



Εικόνα 3-1: Πάνελ οροφής (<https://www.kaffe.gr/product.asp?catid=512>)

Στόχος του συστήματος είναι να δημιουργηθεί στον χώρο η επιθυμητή θερμοκρασία. Στην περίπτωση της θέρμανσης, η θερμότητα του νερού μεταφέρεται στην πλάκα και από εκεί μέσω της θερμικής ακτινοβολίας μεταφέρεται στον χώρο, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται και η θερμοκρασία του νερού που ρέει στο κύκλωμα. Αντίστροφα γίνεται στην περίπτωση της ψύξης όπου το κρύο νερό απορροφά την θερμότητα από την επιφάνεια του πάνελ.

Λόγω του ότι η θερμότητα μεταφέρεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα προς όλες τις κατευθύνσεις είναι σημαντικό η τοποθέτηση του πάνελ να γίνεται στο σωστό ύψος ώστε να είναι μεγαλύτερη η περιοχή υψηλής απόδοσης.



Εικόνα 3-2: Περιοχές απόδοσης πάνελ οροφής (<http://www.ffi-fueconomygreece.com/epsilonrhoomegatauetausigmaepsilonioniotasigma--alphaphialphanutauetausigmaepsilonioniotasigma.html>)

3.2 Κατηγορίες και τύποι συστημάτων

Αναφορικά με τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία που είναι διαθέσιμα στην αγορά, μπορεί να πει κανείς ότι αυτά ποικίλουν. Υπάρχουν, δηλαδή, συστήματα που τοποθετούνται στο πάτωμα, στην οροφή ή στον τοίχο και προσαρμόζονται στις προτιμήσεις των καταναλωτών. Συγκεκριμένα, η λειτουργία των υδραυλικών συστημάτων RHC προτείνεται τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη με μία μικρή διαφορά: στις εφαρμογές ψύξης, λόγω της μετακίνησης του ψυχρότερου αέρα προς τα κάτω, η τοποθέτηση του συστήματος γίνεται στην οροφή του χώρου, σε αντίθεση με τις εφαρμογές θέρμανσης, στις οποίες η τοποθέτηση του συστήματος

προτείνεται στο πάτωμα, αφού ο θερμότερος αέρας μετακινείται προς τα πάνω. Επομένως, η μεγαλύτερη απόδοση των συστημάτων οφείλεται στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, δηλαδή εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς στην θερμοκρασία του αέρα και της επιφάνειας (Jeong and Mumma, 2006).

Σύμφωνα με τη θέση του αγωγού στην κύρια δομή του κτιρίου, οι τρεις βασικές κατηγορίες συστημάτων θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία είναι οι εξής:

Συστήματα ενσωματωμένα στην επιφάνεια της δομής (Embedded Surface Systems)

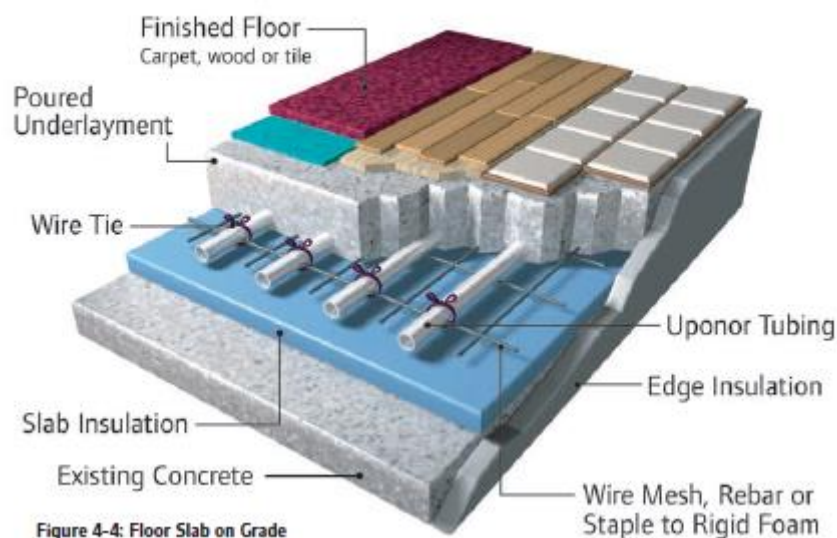
Θερμικά-Ενεργά κτίρια (Thermally Active Building Systems [TABS])

Πάνελ ακτινοβολίας (Radiant Panels)

Στη συνέχεια θα αναφερθούν περιληπτικά τα χαρακτηριστικά των τριών αυτών κατηγοριών.

Ενσωματωμένα συστήματα στην επιφάνεια της δομής

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα ενσωματωμένα συστήματα στην επιφάνεια της δομής, στα οποία η τοποθέτηση των σωληνών γίνεται στο εσωτερικό μίας πλάκας που στην πλειοψηφία της κατασκευάζεται από γύψο ή πλαστικό. Χαρακτηριστικό της πλάκας αυτής είναι ότι δεν ενσωματώνεται εντός της δομής του κτιρίου (σκυρόδεμα), αλλά στο επιφανειακό στρώμα. Το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να τοποθετηθεί στην οροφή, στο πάτωμα, αλλά και στον τοίχο.



Εικόνα 3-3: Τομή συστήματος δαπέδου (Uponor, 2013)

Θερμικά – Ενεργά Κτίρια (TABS)

Στη δεύτερη κατηγορίων συστημάτων θέρμανης – ψύξης ανήκουν τα θερμικά – ενεργά κτίρια (TABS). Εδώ η ενσωμάτωση των πλαστικών σωλήνων γίνεται στον πυρήνα της βασικής δομής του κτιρίου (σκυροδέμα). Ο σχηματισμός αυτός δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να αξιοποιήσει την υψηλή θερμική χωρητικότητα του σκυροδέματος με στόχο να μειωθούν τα μέγιστα φορτία ενέργειας που απαιτούνται, μεταφέροντάς τα εκτός ώρας αιχμής (Περισσότερα για το φαινόμενο αυτό θα αναφερθούν παρακάτω). Στα κτίρια που χρησιμοποιούν αυτή τη διάταξη παρατηρούνται αρκετά σταθερές θερμοκρασίες σε όλη την εγκατάσταση, ενώ οι χρήστες αναφέρουν εξαιρετική θερμική άνεση (Bjarne W Olesen, 2012).

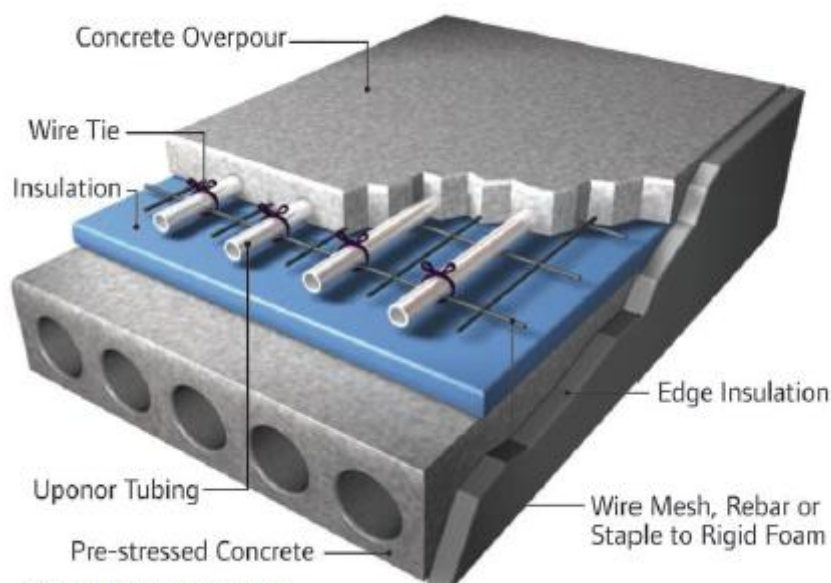


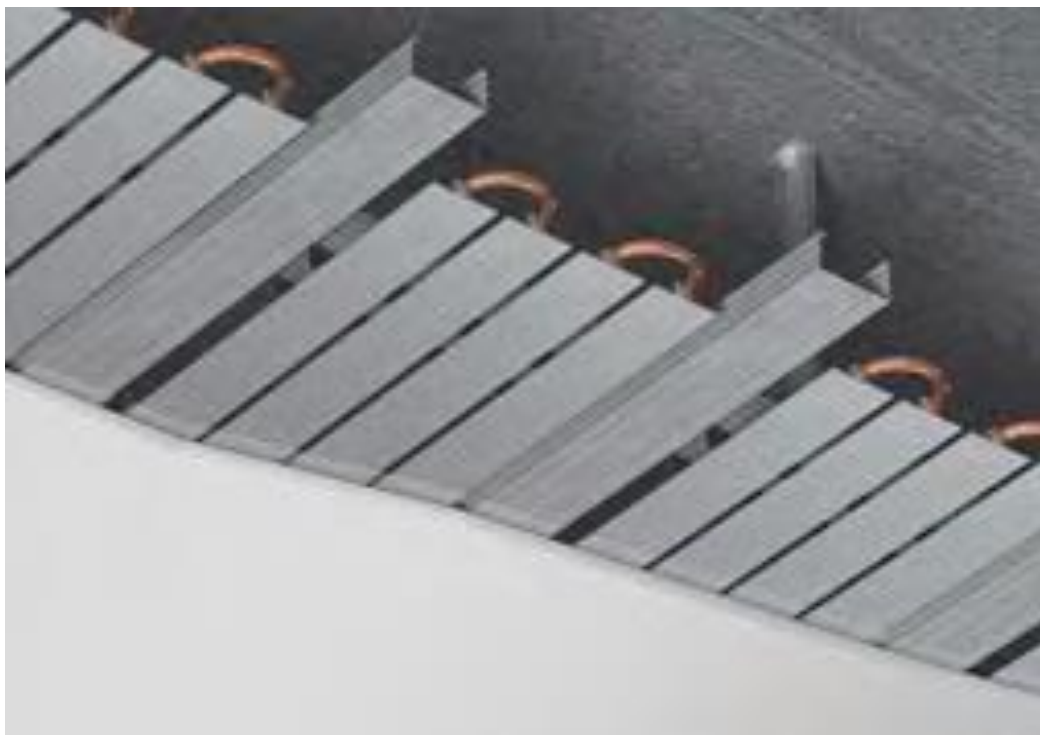
Figure 4-6: Topping Slab on Slab

Εικόνα 3-4: Τομή με σωλήνες εντός του σκυροδέματος (Uponor, 2013)

Πάνελ ακτινοβολίας

Στην τρίτη και τελευταία κατηγορία συστημάτων συναντάμε τα πάνελ ακτινοβολίας. Στη διάταξη αυτή, η ενσωμάτωση των σωλήνων πραγματοποιείται σε πολύ ελεφτά μεταλλικά πάνελ, τα οποία είναι απομονωμένα από τη βασική δομή του κτιρίου στο μέγιστο βαθμό. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ιδιαίτερη ευελιξία

αναφορικά με την τοποθέτηση, αλλά και την επισκευή τους. Τα συγκεκριμένα πάνελ αναρτώνται στην οροφή του χώρου με τη χρήση μεταλλικών κρεμαστρών, ενώ σε σπάνιες περιπτώσεις τοποθετούνται σε τοίχους. Η μόνωση τοποθετείται συχνά στο πίσω μέρος τους, έτσι ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη μείωση των θερμικών απωλειών.



Εικόνα 3-5:Μεταλλικό πάνελ οροφής (<https://www.emco-klimatechnik.net/index.html>)

Διάταξη σωλήνων

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσω μία επιπρόσθετη κατηγοριοποίηση των πάνελ ακτινοβολίας, η οποία γίνεται ως προς τη μορφή της διάταξης των σωλήνων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι σωλήνες τύπου – S, καθώς και οι σωλήνες παράλληλης ροής.

α. Σωλήνες τύπου-S (σερπαντίνα)

Οι σωλήνες τύπου – S απλώνονται στην επιφάνεια της πλάκας σε διάταξη σερπαντίνας (S). Ο ενιαίος σωλήνας, τον οποίο διαθέτει κάθε πάνελ, έχει μία είσοδο και μία έξοδο για νερό. Στα ενσωματωμένα συστήματα στην επιφάνεια της δομής και στα TABS (Embedded Surface Systems) γίνεται μεγάλη χρήση της διάταξης αυτής, καθώς καλύπτει όλη την επιφάνεια του τοίχου, του δαπέδου ή της οροφής, ενώ τη

συναντάμε πολλές φορές και στα κρεμάμεμα πάνελ οροφής. Επίσης, λόγω της μικρότερης ροής νερού παρατηρείται μείωση της μεταφερόμενης θερμικής ενέργειας σε σύγκριση με τους σωλήνες παράλληλης ροής.



Εικόνα 0-6:Υδραυλικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με διάταξη σερπαντίνας

β. Διάταξη παράλληλης ροής

Οι σωλήνες στην κατηγορία αυτή τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους σε μία ευθεία γραμμή. Ο κάθε σωλήνας διαθέτει μία είσοδο στην αρχή του και μία έξοδο στο τέλος του. Η είσοδος του νερού πραγματοποιείται αρχικά μέσω της κάθετης κεφαλής συλλογής, που με τη σειρά της κατανέμει το νερό σε κάθε έναν από τους σωλήνες του πάνελ. Στο τέλος του πάνελ μία αντίστοιχη κεφαλή βοηθά στη συλλογή του νερού από όλους τους σωλήνες και το οδηγεί στην έξοδο. Αυτή η μορφή συστήματος θεωρείται κατάλληλη για πάνελ ακτινοβολίας οροφής που συνδέονται σε ευθεία διάταξη κατά μήκος της οροφής των εσωτερικών χώρων. Καθώς το νερό έχει μεγαλύτερη ροή, είναι φυσικό και επόμενο να πραγματοποιείται αυξημένη μεταφορά ποσοστού ενέργειας, ενώ η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του εκάστοτε πάνελ μικραίνει σε σύγκριση με τα πάνελ με διάταξη σερπαντίνας, που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 3-7: Υδραυλικό πάνελ οροφής παράλληλης ροής
(<https://www.zehndergroup.com/de/produkte-und-loesungen/geschaeftsfelder-und-produktlinien>)

3.3 Δομικά υλικά πάνελ ακτινοβολίας

Μέσα στα κύρια δομικά στοιχεία ενός υδραυλικού πάνελ για θέρμανση και ψύξη με ακτινοβολία, ανήκουν οι σωλήνες μέσα στους οποίους γίνεται η ροή του νερού (θερμού ή ψυχρού), η πλάκα όπου τοποθετείται το κύκλωμα των σωλήνων και ακτινοβολεί με τον περιβάλλοντα χώρο, όπως και το μονωτικό υλικό στο πίσω μέρος, ώστε να εξαληφθούν οι θερμικές απώλειες. Στις μέρες μας συνηθίζεται η χρήση πάνελ σε εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία τα οποία δημιουργούνται από αλουμίνιο, ενώ οι σωλήνες από χαλκό. Κάτι τέτοιο, όμως, δεν είναι απόλυτο, αφού δύνανται να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά για την κατασκευή τους. Για την επιλογή, ωστόσο, των δομικών υλικών των πάνελ λαμβάνονται υπόψη το κόστος, η αποδοτικότητα και η αντοχή που απαιτεί η εκάστοτε εφαρμογή.

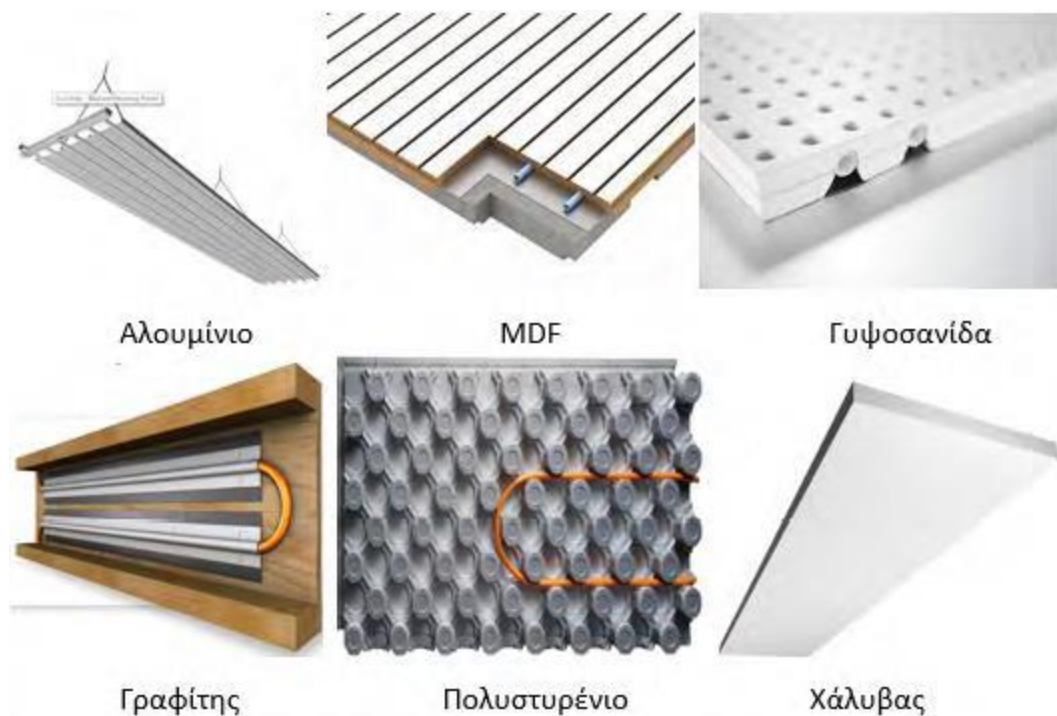
Δομικά υλικά πλάκας

Οι πλάκες που κυκλοφορούν στην αγορά υπάρχουν σε μεγάλη ποικιλία. Κάποια από τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

- Αλουμίνιο
- Χάλυβας

- Γραφίτης
- MDF (ινόπλακα μέτριας πυκνότητας)
- Γυψοσανίδα
- Πολυστερένιο

Η διαφορά στις πλάκες αυτές έχει να κάνει πρωτίστως με το κόστος του υλικού, τη θερμική αγωγιμότητα, όπως και το βάρος του. Επίσης, παίζουν σημαντικό ρόλο και οι ιδιαιτερότητές τους αναφορικά με τη συναρμολόγηση και τοποθέτηση, όπως και την εμφάνισή τους, καθώς όσον αφορά τις ακτινοβολίες πάνελ οροφής, η πλάκα είναι πολλές φορές εμφανής στον εσωτερικό χώρο των κτιρίων. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως μερικές φορές παίζουν ρόλο και οι ιδιότητες του υλικού, όπως η ευφλεκτότητά του για την ασφάλεια που παρέχει το εκάστοτε υλικό σε ενδεχόμενο πυρκαγιάς.



Εικόνα 3-8: Δομικά υλικά πλάκας (<http://www.wattsradiant.com/products/flexplate/>), (<https://www.archiproducts.com/en/products/radiant-ceiling-panels>), (<https://www.amvicsystem.com/products/ampex/>)

Δομικά υλικά σωλήνων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ροή του νερού στα υδραυλικά συστήματα ακτινοβολίας για θέρμανση και ψύξη γίνεται μέσω σωλήνων που τοποθετήθηκαν

στην επιφάνεια της πλάκας του πάνελ. Δύο από τα πιο γνωστά υλικά για την κατασκευή σωλήνων για την συγκεκριμένη χρήση είναι ο χαλκός και το PEX (διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο).

Σωλήνες χαλκού:

Οι σωλήνες χαλκού είναι υπεύθυνοι για την κυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια του πάνελ. Εκτός από το συγκεκριμένο είδος σωλήνων έχει γίνει χρήση σωλήνων από χάλυβα και σίδηρο, τακτική, ωστόσο, που παρατηρείται σχετικά σπάνια. Ο χαλκός διαθέτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που τον καθιστούν κατάλληλο για χρήση σε υδραυλικά συστήματα. Μερικά από αυτά είναι η αντοχή του στην διάβρωση, το χαμηλό κόστος, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα που διαθέτει, καθώς και το βάρος του – είναι ελαφρύτερο από άλλα μέταλλα. Ο μαλακός σωλήνας χαλκού τύπου-L προτείνεται για χρήση σε υδραυλικά πάνελ ακτινοβολίας, αφού με ευκολία μπορεί να κάμπτεται και να διαμορφώνεται γύρω από κουζίνες, λέβητες και άλλα εμπόδια που εμφανίζονται στην δομή του κτιρίου. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό καθιστά τον χαλκό ως ένα πολύ χρήσιμο υλικό κατά την τοποθέτησή του, αφού μειώνει τον χρόνο και το κόστος της εγκατάστασης. Η παραγωγή των σωλήνων χαλκών γίνεται σε διαμέτρους που κυμαίνονται από 1/8 μέχρι 10 ίντσες (0.003m - 0.25m) και σε ποικίλα πάχη τοιχωμάτων. Τα υδραυλικά συστήματα που παρουσιάζονται χρησιμοποιούν μικρά μεγέθη σωλήνων χαλκού ενσωματωμένα στο πάνελ με ράγες συγκόλλησης. Το μέγεθος που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τον απαιτούμενο ρυθμό ροής του νερού, αλλά και την πτώση πίεσης.



Εικόνα 3-9: σωλήνες χαλκού (<https://www.balkanenergy.gr/product/coiled-copper-pipe-for-air-conditioners>)

Σωλήνες Pex

Το Pex ή αλλιώς διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο αποτελείται από πολυαιθυλένιο μεσαίας μέχρι και υψηλής πυκνότητας με διασταυρωμένους δεσμούς που εισέρχονται στη δομή του πολυμερούς, και το μετατρέπουν σε θερμοσκληραινόμενο. Συγκριτικά με τον σωλήνα χαλκού, ένας σωλήνας Pex έχει προδήλως χαμηλότερο κόστος. Όσον αφορά την διάβρωση, ο Pex αντέχει πολύ περισσότερο από τον σωλήνα χαλκού, και ιδιαίτερα σε περιοχές που παρατηρούνται έντονα σημάδια όξινου νερού. Επιπροσθέτως, η δυνατότητα διαστολής του υλικού των σωλήνων Pex, τους προσδίδει και το πλεονέκτημα της ευκαμψίας, συγκριτικά με τους μεταλλικούς σωλήνες. Οι πλαστικοί σωλήνες υπερτερούν σ αυτό το χαρακτηριστικό ακόμα και έναντι του χαλκού, ο οποίος θεωρείται από τους πιο εύκαμπτους. Η εγκατάσταση των πλαστικών σωλήνων είναι πιο εύκολη καθώς η διαπλαστικότητα του υλικού, τους δίνει τη δυνατότητα να λυγίζουν, να χωράνε και να προσαρμόζονται γενικά σε κάθε χώρο, όπου απαιτείται. Ένα ακόμη θετικό στοιχείο των Pex είναι ότι στην σύνδεσή τους δεν απαιτείται συγκόλληση, όπως πχ στους χάλκινους σωλήνες, αφού χρησιμοποιούνται ειδικά συνδετικά εξαρτήματα.

Εκτός από την γρήγορη εγκατάσταση, τους σωλήνες Pex ακολουθεί και η απλοποίηση της διαδικασίας της επισκευής τους, αφού λόγω της έγχρωμης κωδικοποίησής τους διευκολύνεται η διάκριση ανάμεσα στις ζεστές και κρύες σωληνώσεις. Τέλος, η χρήση πλαστικών σωλήνων καθιστά το σύστημα σημαντικά

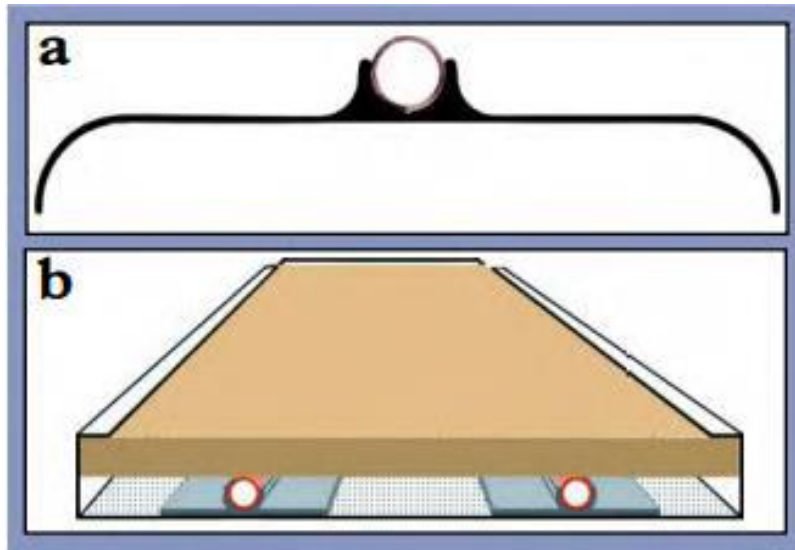
ελαφρύτερο σε σχέση με εγκαταστάσεις όπου χρησιμοποιούνται σωλήνες διαφορετικού υλικού.



Εικόνα 3-10: σωλήνες PEX (<https://www.due-line.gr/proionta/swlhna-diktywmenoy-polyai8ylaeniou-pek-b/>)

3.4. Δομικά υλικά μόνωσης

Η τοποθέτηση μονωτικού υλικού στα πάνελ οροφής αποσκοπεί στο να αποφευχθεί η μεταφορά θερμότητας από τον ενδιαφερόμενο χώρο προς τους άλλους χώρους. Εκτός από τα συγκεκριμένου τύπου πάνελ, τα οποία αποκαλούνται κλειστού τύπου, υπάρχει και η κατηγορία των κρεμαστών πάνελ οροφής, ή αλλιώς πάνελ ανοικτού τύπου, τα οποία συναντώνται περισσότερο σε περιπτώσεις ψύξης του χώρου. Στην κατηγορία των κρεμαστών ελεύθερου τύπου πάνελ, για τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή αξιοποιείται το πάνω και κάτω μέρος της πλάκας. Επομένως η θερμότητα με συναγωγή μεταφέρεται πιο γρήγορα αφού διπλασιάσουμε την επιφάνεια για συναγωγή.



Εικόνα 3-11 πάνελ οροφής ανοιχτού τύπου, β) πάνελ οροφής κλειστού τύπου (Mumma, 2001)

ΥΛΙΚΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΠΑΝΕΛ	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/Mk)
Υαλοβάμβακας	0,04
Πετροβάμβακας	0,045
Αφρός πολυαιθυλενίου	0,04
Εξωθημένος αφρός πολυστυρενίου	0,03

3.5 Σύστημα Ελέγχου

Παράμετροι ρύθμισης συστημάτων θέρμανσης ψύξης με ακτινοβολία

Τον πρώτιστο ρυθμιστικό ρόλο του υδραυλικού συστήματος θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία αναλαμβάνει η ροή του νερού τροφοδοσίας και η θερμοκρασία. Τα ίδια αυτά όμως για να ρυθμιστούν απαιτείται η τοποθέτηση λέβητα, ανεμιστήρων και άλλα.

Για την εύρυθμη λειτουργία των συστημάτων αυτών ελέγχεται η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα. Με βάση τα αποτελέσματα του ελέγχου αυτού, δίνεται το μήνυμα

στο σύστημα να ρυθμίσει την θερμοκρασία τροφοδοσίας του νερού καθώς και την ταχύτητά του ώστε να επιτευχθεί η εκάστοτε θερμοκρασία στο χώρο.

Στην περίπτωση της ενδοδαπέδιας θέρμανσης ή ψύξης το βασικό ρόλο για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας του δαπέδου. Η θερμοκρασία αυτή θα πρέπει να ελέγχεται από το σύστημα μέσω αισθητήρων, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή θερμότητα ή ψύξη και η εξοικονόμηση ενέργειας, ακόμη κι όταν η ισορροπία της θερμοκρασίας απειλείται από εξωτερικούς παράγοντες (λ.χ ηλιακή ακτινοβολία) (Li et al, 2013).

Αισθητήρες

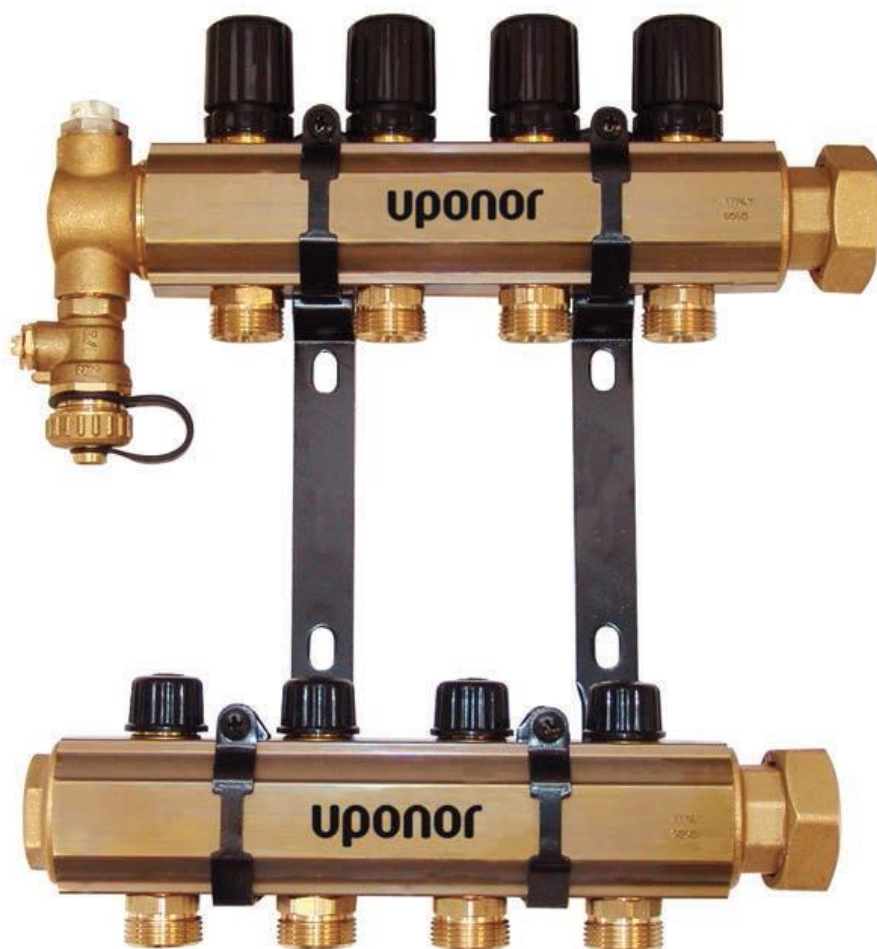
Την λειτουργία και την αποδοτικότητα των συστημάτων ψύξης απειλεί η συμπύκνωση. Η χρήση αισθητήρων κρίνεται απαραίτητη και σε αυτήν την περίπτωση. Κι αυτό γιατί αυτοί, εντοπίζοντας υψηλά ποσοστά υγρασίας στο χώρο, για την οποία υγρασία υπεύθυνη είναι η συμπύκνωση, «δίνουν» εντολή παύσης της ροής του νερού στους σωλήνες έτσι ώστε το σύστημα αερισμού με τη σειρά του να διαχειριστεί και να ομαλοποιήσει την κατάσταση. Η σχεδίαση του συστήματος θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε το σύστημα να βρίσκεται σε ετοιμότητα να αντιμετωπίσει τυχόν απότομες μεταβολές στα επίπεδα υγρασίας και να επαναφέρει την ισορροπία.

Επομένως κρίνεται απαραίτητη η χρήσης αισθητήρων στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο του κτιρίου ώστε το σύστημα να λαμβάνει συνεχώς πληροφορίες για την θερμοκρασία του αέρα του εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, τα επίπεδα υγρασίας του χώρου και την θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας και επιστροφής, ώστε αυτό να λειτουργεί με την μέγιστη απόδοση (Uronor, 2013).

Υδραυλικοί συλλέκτες

Πρόκειται για ένα σύστημα πολλαπλών σωληνώσεων με μία μόνο γραμμή τροφοδοσίας και επιστροφής. Συνήθως στο υδραυλικό σύστημα των πάνελ ακτινοβολίας περιλαμβάνονται 2 συλλέκτες ένας για την τροφοδοσία και ένας για την επιστροφή. Ο συλλέκτης τροφοδοσίας παραλαμβάνει νερό από την συσκευή θέρμανσης (ή ψύξης) μέσω ενός σωλήνα τροφοδοσίας, ενώ ο συλλέκτης επιστροφής

το επιστρέφει, και το διανέμει μέσω πολλαπλών γραμμών σωληνώσεων στο πάνελ ώστε να επιτευχθεί η θέρμανση ή ψύξη του χώρου.



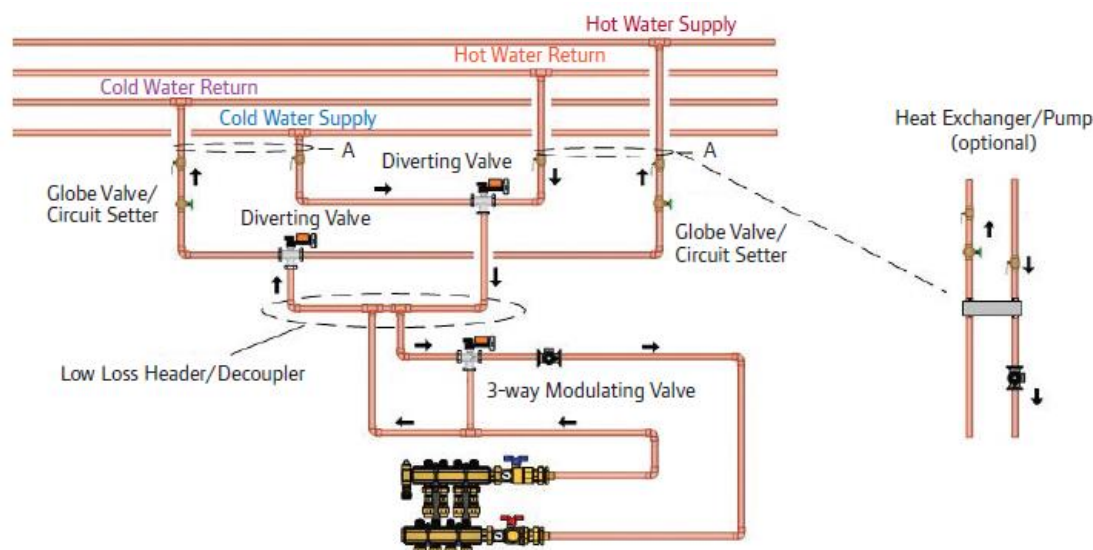
Εικόνα 3-12: Υδραυλικό σύστημα (Uponor, 2013)

Ρυθμιστικές βαλβίδες

Οι ρυθμιστικές βαλβίδες που χρησιμοποιούνται στο σύστημα αναλαμβάνουν τον έλεγχο της ροής και της θερμοκρασίας του νερού στο σύστημα. Πιο συγκεκριμένα ελέγχουν τα ανώτερα όρια της θερμοκρασίας και πίεσης του νερού που κυλάει στο σύστημα όπως αυτά έχουν οριστεί από τον κατασκευαστή, ενώ άλλες απομονώνουν μέρος του συστήματος που έχει υποστεί βλάβη χωρίς το σύστημα να σταματάει την λειτουργία του. Επίσης βαλβίδες χρησιμοποιούνται και στους υδραυλικούς συλλέκτες για τον έλεγχο της ροής στις γραμμές διανομής του συστήματος.

Τύποι βαλβίδων που συναντώνται στα συστήματα είναι η τρίοπη βαλβίδα διακοπής (SOV, shut of valve) που επιτρέπει την κυκλοφορία μόνο ζεστού ή κρύου νερού στο

σύστημα και η τρίοδη βαλβίδα ανάμειξης (MXV, mixing valve) που αναμειγνύει το κρύο και ζεστό νερό ώστε αυτό να έρθει στην επιθυμητή θερμοκρασία και να κυκλοφορήσει στο σύστημα (Uronor, 2013).



Εικόνα 3-13: Σύστημα βαλβίδων (Uronor, 2013)

3.6. Αξιολόγηση συστημάτων με πάνελ ακτινοβολίας

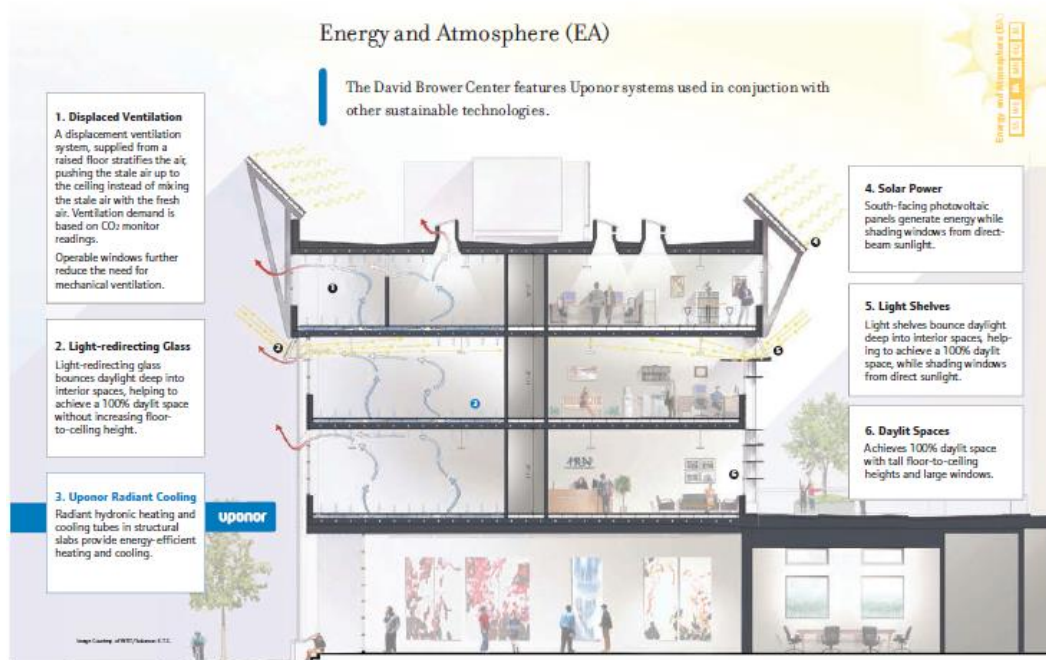
Τα παραπάνω συστήματα εμφανίζουν μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, λόγω του ότι το νερό, μέσω του οποίου γίνεται η μεταφορά της θερμικής ενέργειας έχει περίπου 3.500 φορές μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα από τον αέρα, που χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς της θερμικής ενέργειας στα συμβατικά συστήματα.

Επίσης τα πάνελ ακτινοβολίας, λόγω του ότι είναι τοποθετημένα στην βασική δομή του κτιρίου, χρησιμοποιούν όλη την θερμοχωρητικότητα του κτιρίου για την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας. Όταν το σύστημα είναι σωστά σχεδιασμένο, η θερμική μάζα του κτιρίου αξιοποιείται στο έπακρο αφού η ενέργεια αποθηκεύεται σε αυτό και είναι δυνατόν την νύχτα το σύστημα να λειτουργεί μόνο με την αντλία του επιτυγχάνοντας ελάχιστη κατανάλωση. Έτσι το σύστημα επανέρχεται στις απαιτούμενες συνθήκες λειτουργίας χρησιμοποιώντας μικρότερο φορτίο (Bjarne W. Olesen, 2012).

Λόγω του ότι το σύστημα έχει μεγάλη επιφάνεια και αλληλεπιδρά με όλο τον χώρο, απαιτείται μικρή ποσότητα ενέργειας για την διατήρηση των επιθυμητών θερμοκρασιών ώστε να επιτυγχάνεται το επιθυμητό επίπεδο θερμικής άνεσης αφού η

μεταφορά θερμότητας γίνεται με ακτινοβολία από τις ακτινοβολούμενες επιφάνειες στο ανθρώπινο σώμα. Η θερμοκρασία διατηρείται σε σταθερά επίπεδα επομένως είναι δυνατή η χρήση υψηλής θερμοκρασίας νερού για ψύξη και χαμηλής για θέρμανση, όπως στην περίπτωση της ενδοδαπέδιας ψύξης όπου η θερμοκρασία του νερού στο σύστημα είναι 2-4 οC μικρότερη από την επιθυμητή θερμοκρασία που θέλουμε να έχουμε στον χώρο (Olesen, 2008). Χαρακτηριστικά η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας για ψύξη κυμαίνεται σε θερμοκρασίες 15-21⁰C, ενώ για θέρμανση 25-40⁰C.

Η υψηλότερη θερμοκρασία νερού σε λειτουργία ψύξης και η χαμηλότερη θερμοκρασία νερού στη λειτουργία θέρμανσης βοηθούν τους εναλλάκτες θερμότητας, τις αντλίες θερμότητας, τους λέβητες και οποιονδήποτε άλλο εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας των σωλήνων συστήματος ώστε να λειτουργεί πιο αποτελεσματικά. Μπορεί επίσης να γίνει και σύνδεση με άλλα υδραυλικά συστήματα ή ακόμη και συνδυασμός των συστημάτων πάνελ ακτινοβολίας με άλλα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως είναι οι γεωθερμικές αντλίες ή τα ηλιακά συστήματα (Uponor, 2013).



Εικόνα 3-14: Συνδυασμός πάνελ ακτινοβολίας με συστήματα ανανεώσιμων πηγών (Uponor, 2013)

3.7 Παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση των πάνελ ακτινοβολίας

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ικανότητα ψύξης ή θέρμανσης ενός πάνελ ακτινοβολίας σχετίζονται κυρίως με τα υλικά και την γεωμετρία του συστήματος, όπως είναι ο αριθμός των σωλήνων και η μεταξύ τους απόσταση, η διάμετρος και η θερμική αγωγιμότητα των σωλήνων, το μήκος, το πάχος και η θερμική αγωγιμότητα του πάνελ καθώς και το πάχος, το πλάτος και η θερμική αγωγιμότητα της συγκόλλησης.

Τα χαρακτηριστικά του νερού που ρέει στο κύκλωμα των σωληνώσεων όπως είναι ο ρυθμός ροής, η θερμική αγωγιμότητα και η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού καθώς και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ρευστού- σωλήνα, επηρεάζουν και αυτά με την σειρά τους την απόδοση του συστήματος (Li et al, 2013).

Καθώς στα περισσότερα συστήματα η κίνηση του αέρα γίνεται μηχανικά, η ταχύτητα εξόδου αέρα από τον αεραγωγό, το πλάτος του, η θερμοκρασία του δωματίου και η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα επηρεάζουν την ικανότητα ψύξης ή θέρμανσης του συστήματος.

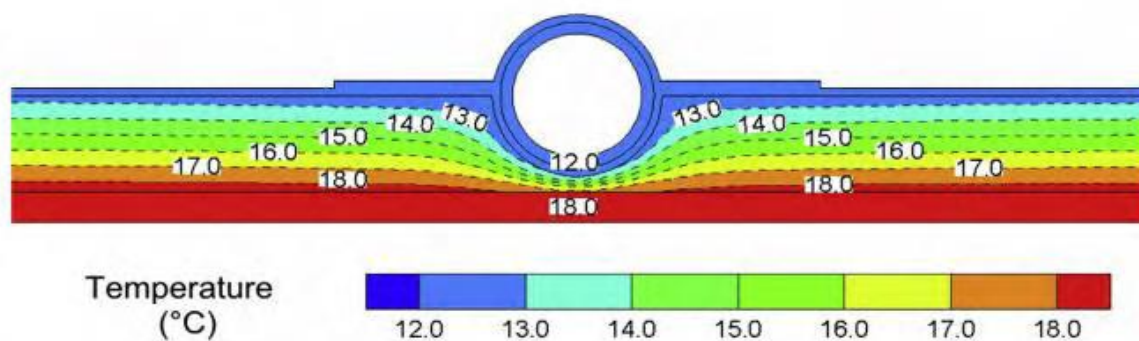
Βασικό στοιχείο σχεδιασμού ενός συστήματος ψύξης-θέρμανσης με πάνελ ακτινοβολίας είναι και οι διαστάσεις και ο προσανατολισμός του χώρου στον οποίο αυτό θα τοποθετηθεί καθώς επίσης και τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένα τα επιμέρους τμήματά του πάνελ (Feng et al., 2013).

Επίδραση στην απόδοση- Απόσταση σωλήνων

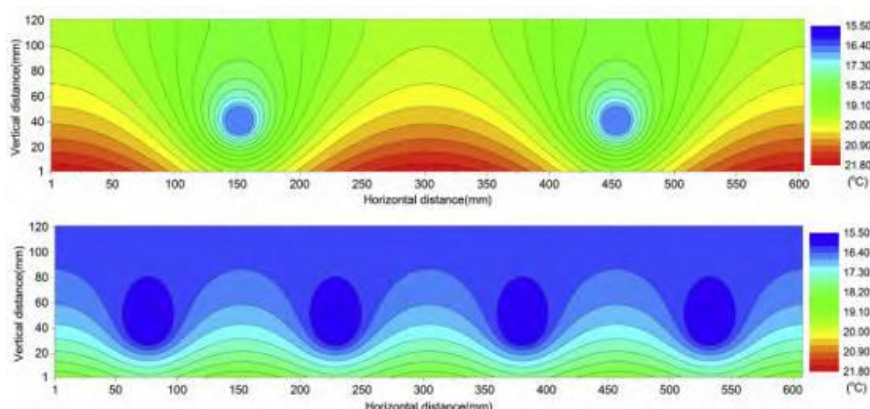
Η απόσταση μεταξύ των σωλήνων είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση και το κόστος των συστημάτων ψύξης- θέρμανσης με πάνελ ακτινοβολίας. Οι περιοχές κοντά στους σωλήνες επηρεάζονται περισσότερο από κρύο νερό, επομένως η θερμοκρασία σε αυτές τις περιοχές είναι χαμηλότερη, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτούς αυξάνεται (Ning et al., 2016).

Όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση μεταξύ των σωλήνων τόσο πιο δύσκολα ψύχεται η περιοχή που παρεμβάλλεται, με αποτέλεσμα η μέση θερμοκρασία του πάνελ (T_{pm}) να αυξάνεται ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η ικανότητα ψύξης του. Όσο πιο μικρή είναι η απόσταση μεταξύ των σωληνώσεων, τόσο πιο σταθερή είναι η δομή του πάνελ. Όμως

η αύξηση του συνολικού μήκους των σωληνώσεων οδηγεί σε αύξηση του κόστους, χωρίς όμως να συνεπάγεται και αντίστοιχη αύξηση της αποδοτικότητας του πάνελ.



Εικόνα 3-15 Κατανομή θερμοκρασίας στην περιοχή γύρω από σωλήνα πάνελ οροφής για ψύξη με ακτινοβολία (Ning et al., 2016)



Εικόνα 3-16 Θερμοκρασιακή κατανομή για απόσταση σωλήνων a μεγάλη ($W=0.3m$) και για την μισή απόσταση ($Wt=0.15m$) (Su et al., 2015)

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής είναι αυτές που ορίζουν την συνάρτηση απόδοσης-κόστους και κατ' επέκταση την απόσταση μεταξύ των σωληνώσεων.

Επίδραση στην απόδοση- Θερμική Αγωγιμότητα σωλήνων

Εξετάζοντας τα υλικά των σωλήνων που χρησιμοποιούνται συνήθως στα υδραυλικά συστήματα βλέπουμε ότι η θερμική αγωγιμότητα του εκάστοτε υλικού επηρεάζει την ικανότητα ψύξης ή θέρμανσης. Συνήθως υλικά όπως το PVC (πολυβινυλοχλωρίδιο) και το PEX που έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα ($k < 1$ W/mK) αυξάνουν την απόδοση του συστήματος όταν πρόκειται για σύστημα ψύξης, σε σχέση με υλικά όπως ο χάλυβας και ο χαλκός που έχουν θερμική αγωγιμότητα

$k > 10 \text{ W/mK}$. Ωστόσο και σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει η επιλογή του υλικού του σωλήνα να γίνει με βάση το είδος του συστήματος και τις συνθήκες τις εκάστοτε εφαρμογής του (Su et al., 2015).

Επίδραση στην απόδοση- Θερμική αγωγιμότητα πάνελ

Το είδος και η ποιότητα του υλικού από το οποίο αποτελείται το πάνελ σε συνδυασμό και με το πάχος του επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος. Στα ενδοδαπέδια συστήματα ακτινοβολίας η απόδοση του πάνελ εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα του υλικού από το οποίο αποτελείται το δάπεδο και το πάχος του δαπέδου. Δεδομένου ότι κάτω από το πάνελ βρίσκεται η διάταξη των σωλήνων, η απόδοση του επηρεάζεται και από το την θερμοκρασία και την ταχύτητα του νερού που τρέχει στους σωλήνες καθώς και την θερμοκρασία του αέρα του δωματίου και την θερμοκρασία των άλλων επιφανειών του δωματίου.

3.8. Κόστος συστήματος

Τα συστήματα με πάνελ ακτινοβολίας παρέχουν υψηλά επίπεδα θερμικής άνεσης και είναι οικονομικά. Ένα πάνελ οροφής κοστίζει κατά μέσο όρο γύρω στα 120 €/m². Το συνολικό κόστος του συστήματος καθορίζεται από το κόστος όλων των μονάδων που συμμετέχουν σε αυτό (αντλίες, ανεμιστήρες, μονάδα επεξεργασίας αέρα, αγωγοί κλπ.) και από το κόστος λειτουργίας του (Imanari et al., 1999).

Σε μελέτη που έγινε σε ένα κτίριο 6 ορόφων στο Τόκιο (Imanari et al., 1999)

έδειξε ότι τα συστήματα με πάνελ ακτινοβολίας παρέχουν μεγαλύτερα επίπεδα θερμικής άνεσης, έχουν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας έως και 10% συνολικά ενώ η ενέργεια που απαιτείται για την μεταφορά του αέρα είναι μειωμένη κατά 20% σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα και ο χρόνος αποπληρωμής τους είναι περίπου ένας χρόνος (Imanari et al., 1999).

3.9 Εφαρμογές

Τα συστήματα θέρμανσης-ψύξης με ακτινοβολία χρησιμοποιούνται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις και εμπορικά κτίρια, σε σχολεία αεροδρόμια, κέντρα αθλητισμού και σε κτίρια με κάθε είδος χρήσης.

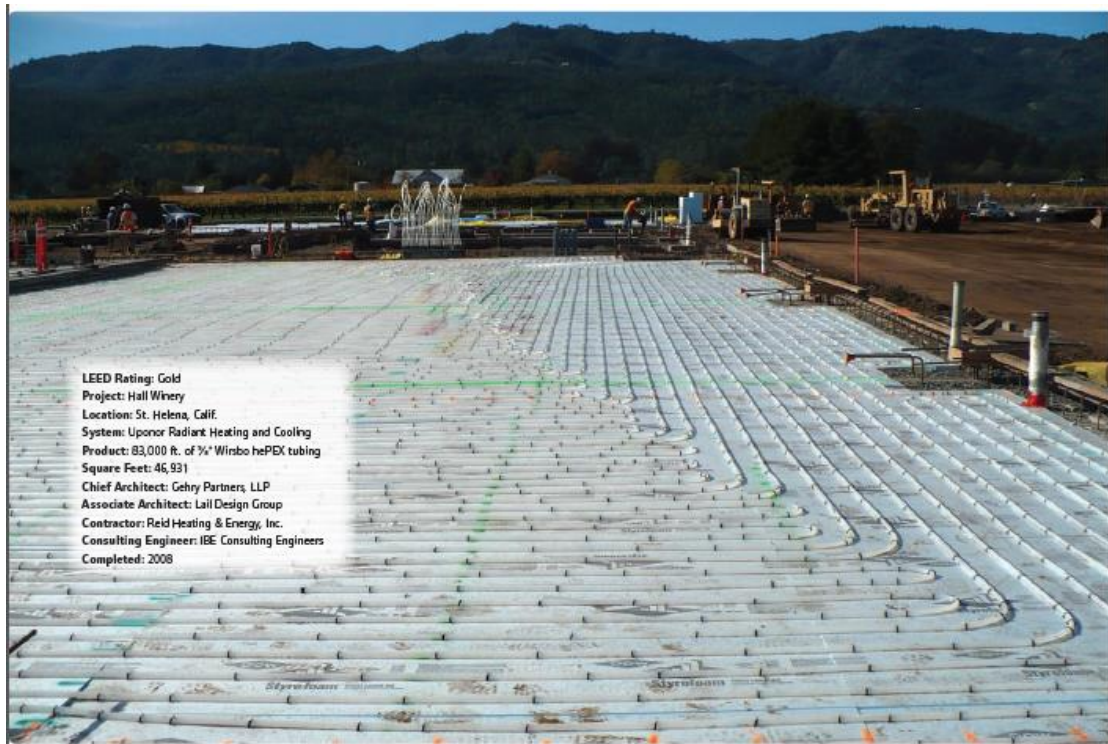
Η χρήση τους μπορεί να γίνει και σε εξωτερικούς χώρους, όπως είναι τα ενδοδαπέδια συστήματα που χρησιμοποιούνται σε δρόμους για την αποφυγή πάγου. Σε κάθε περίπτωση ο τύπος του συστήματος ορίζεται από την εκάστοτε εφαρμογή με βάση την οποία γίνεται ο σχεδιασμός του ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής συστημάτων με πάνελ ακτινοβολίας.



Εικόνα 3-17: Κτίριο στο Berkley, Calif (Uponor, 2013)



Εικόνα 3-18: Cooper Union, N.Y. (Uponor, 2013)



Εικόνα 3-19: Αμπελώνας St.Helena, Calif (Uponor, 2013)



Εικόνα 3-20: Μουσείο Akron Art, Ohio (Uponor, 2013)



Εικόνα 3-21: Αεροδρόμιο Bangkok (Uponor, 2013)



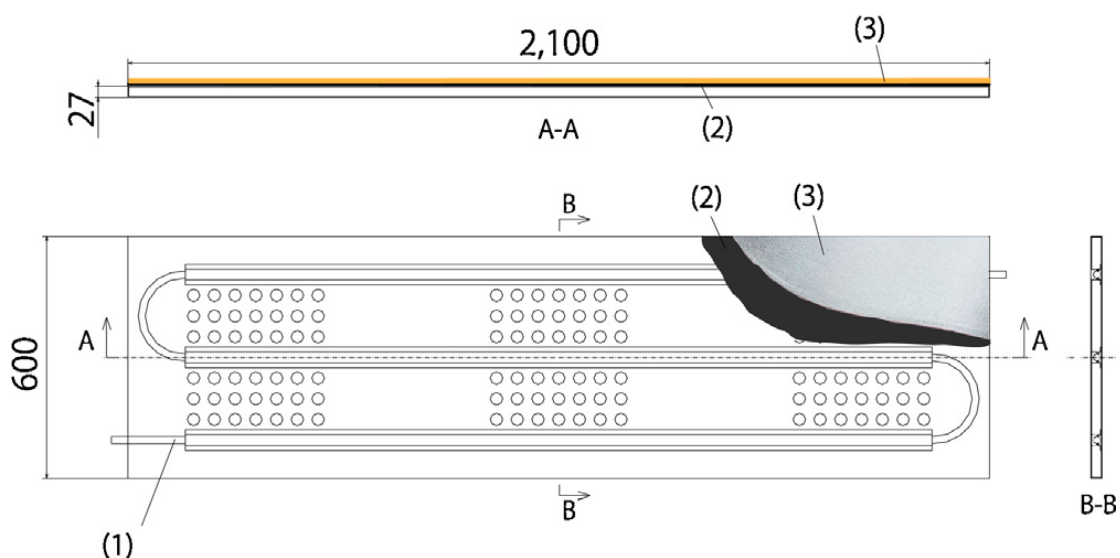
Εικόνα 3-22: Αυτοκινητόδρομο, Bandimere (Uponor, 2013)

4 Πειραματικές εφαρμογές πάνελ ακτινοβολίας

4.1 Περίπτωση μελέτης συνθηκών άνεσης και χωρητικότητας συστήματος ακτινοβολίας σε πανεπιστημιακές εγκαταστάσεις.

Η μελέτη των Rongling Li, Togo Yoshidomi, Ryoza Ooka και Bjarne W. Olesen, αφορά την απόδοση του συστήματος ψύξης- θέρμανσης εγκατεστημένο σε κτίριο του πανεπιστημίου του Τόκιο και πιο συγκεκριμένα μελέτησαν την θερμική και ψυκτική χωρητικότητα του συστήματος και τις συνθήκες άνεσης που δημιουργεί.

Πρόκειται για σύστημα πάνελ οροφής εμβαδού $1,26 \text{ m}^2$ το ένα κατασκευασμένα από αλουμίνιο. Η οροφή πάνω από τα αιωρούμενα πάνελ είναι μονωμένη ώστε να αποφευχθούν απώλειες θερμότητας προς τον σκελετό του κτιρίου.



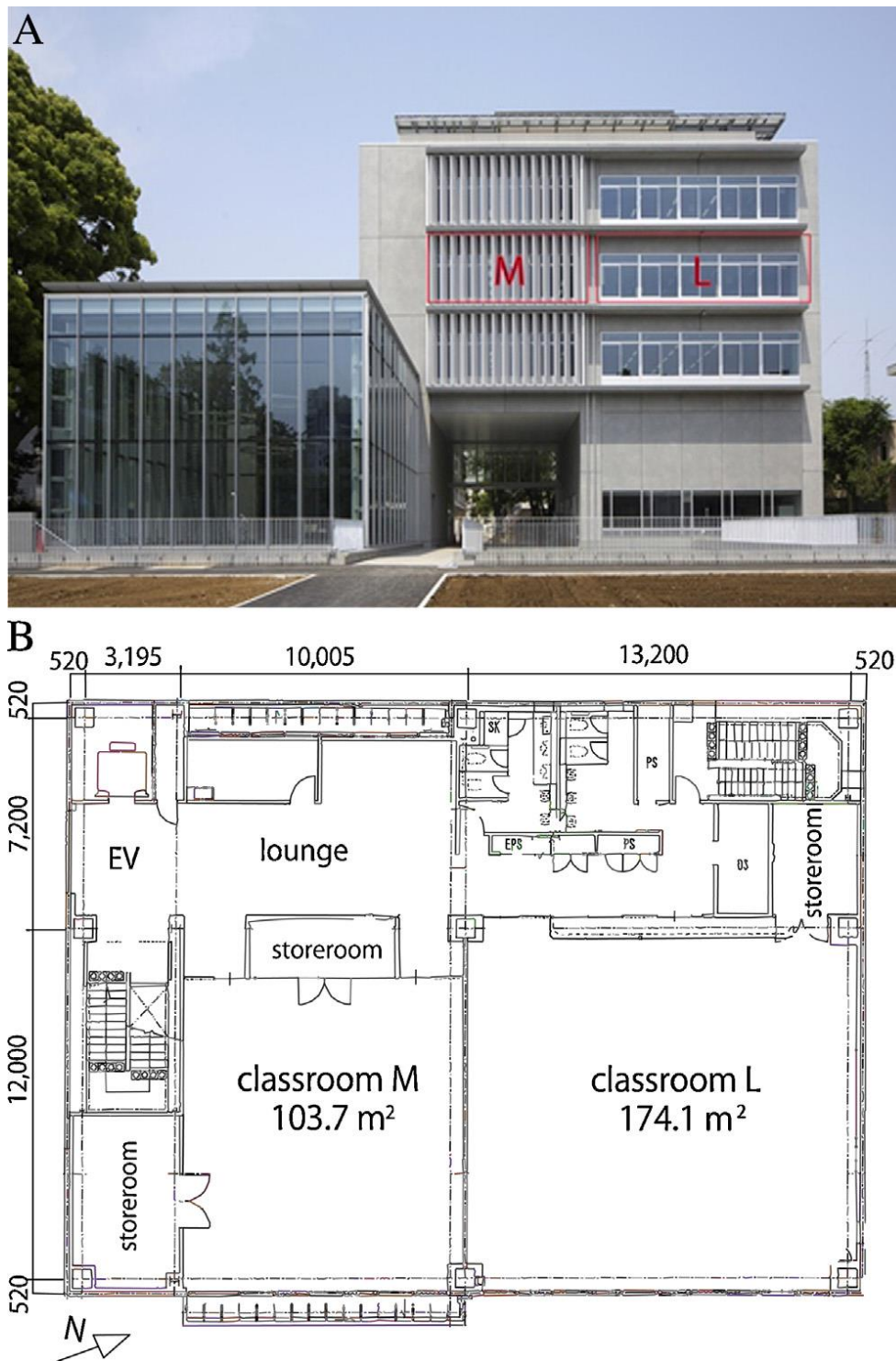
Εικόνα 4-1: Πάνελ ακτινοβολίας (Rongling Li et al, 2013)

Main characteristics of tested radiant panel.

	Characteristic
(1)	Polybutene; internal diameter: 13 mm, external diameter: 18 mm
(2)	Ø25 mm
(3)	10 mm glass wool

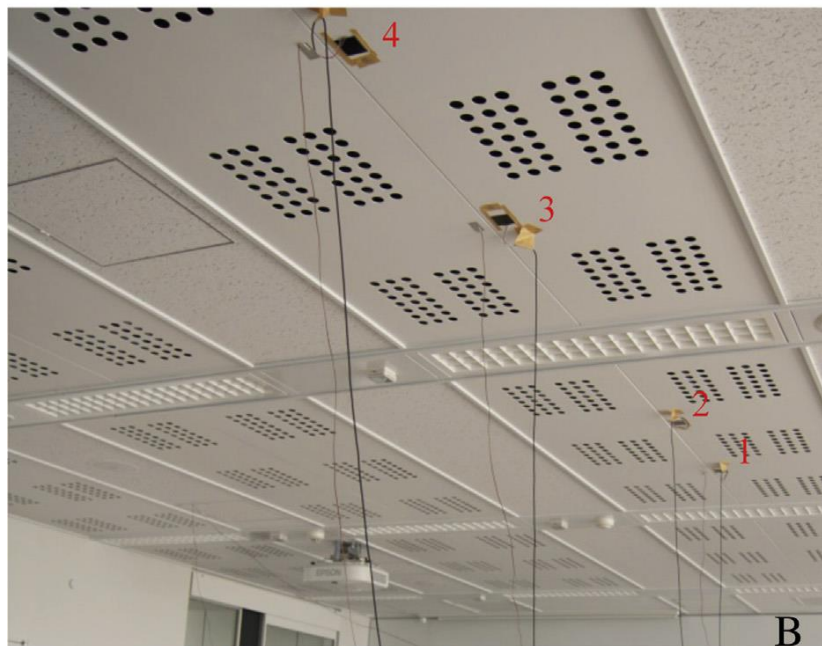
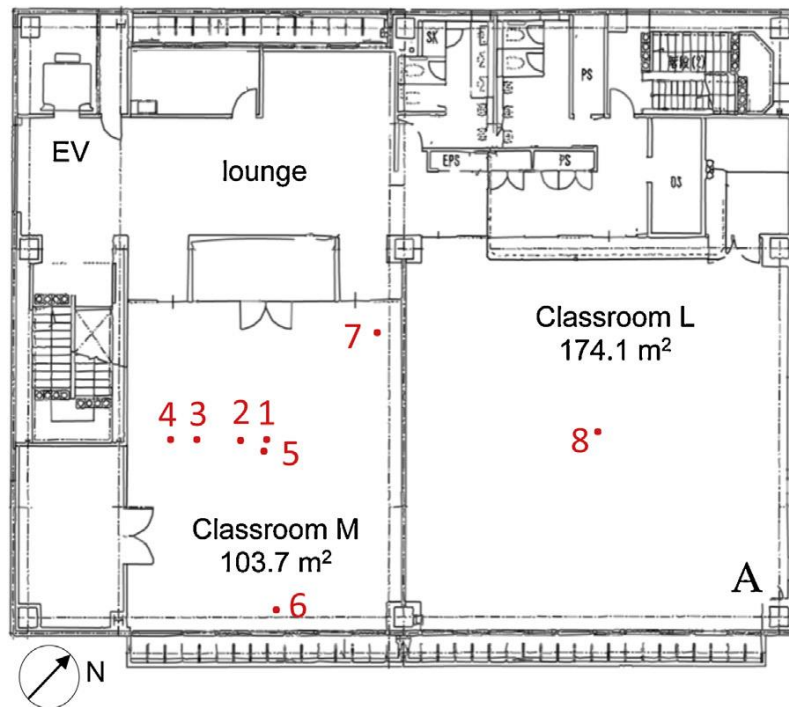
Εικόνα 4-2: Χαρακτηριστικά πάνελ (Rongling Li et al, 2013)

Το σύστημα είναι εγκατεστημένο σε 2 αίθουσες διδασκαλίας του 4ου ορόφου (αίθουσες M και L). Η αίθουσα M έχει εμβαδόν $103,7\text{m}^2$ ενώ η αίθουσα L $174,1\text{m}^2$. Τα πάνελ καλύπτουν το 45% και το 40% της οροφής αντίστοιχα. Και στις 2 αίθουσες επικρατούν πανομοιότυπες συνθήκες. Οι αίθουσες έχουν ύψος 2,85m.



Εικόνα 23-3: Θέση των αιθουσών στο κτίριο (α) και κάτοψη ορόφου (β) (Rongling Li et al, 2013)

Στον υπολογισμό της ροής θερμότητας λαμβάνεται και η μεταφορά θερμότητας από το νερό που κυκλοφορεί στο σύστημα. Πάνω στα πάνελ εγκαταστάθηκαν αισθητήρες για την μέτρηση της θερμοκρασίας και της μεταφοράς θερμότητας. Για την μέτρηση της παροχής του νερού, την θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας, την θερμοκρασία του νερού επιστροφής και την θερμοκρασία περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκαν οι ήδη εγκατεστημένοι αισθητήρες του κτιρίου.



Εικόνα 4-4: Θέσεις αισθητήρων στην αίθουσα (Rongling Li et al, 2013)

Οι μετρήσεις σε λειτουργία θέρμανσης έγιναν τον Μάρτιο και ώρες 19:00-07:00 για να αποφευχθούν παρεμβολές στις μετρήσεις από την ηλιακή ακτινοβολία. Οι μετρήσεις για την λειτουργία ψύξης έγιναν τον Σεπτέμβριο και ώρες 08:00-17:00. Παρακάτω ακολουθούν οι πίνακες με τα δεδομένα για τις μετρήσεις σε λειτουργία θέρμανσης (H1,-H4) και σε ψύξη (C1-C4).

Cases & outdoor temperature.

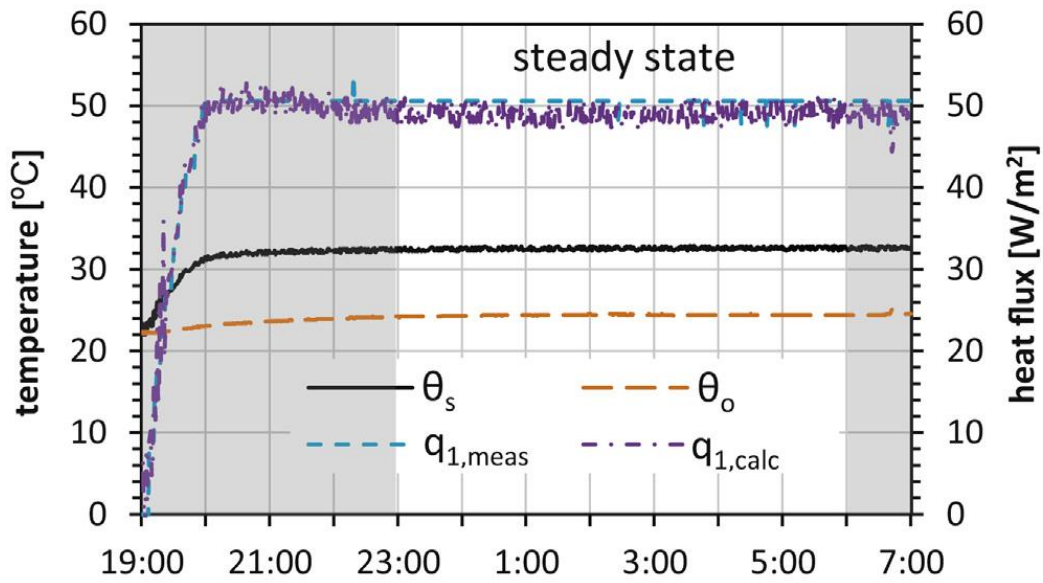
	H1	H2	H3	H4	C1	C2	C3
supply water temperature [°C]	40	40	28	35	18	18	20
water flow rate [l/s]	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
outdoor temperature [°C]	16-20	7-13	13-17	12-16	26-32	23-28	28-32

Εικόνα 4-5: Περιπτώσεις και εξωτερική θερμοκρασία (Rongling Li et al, 2013)

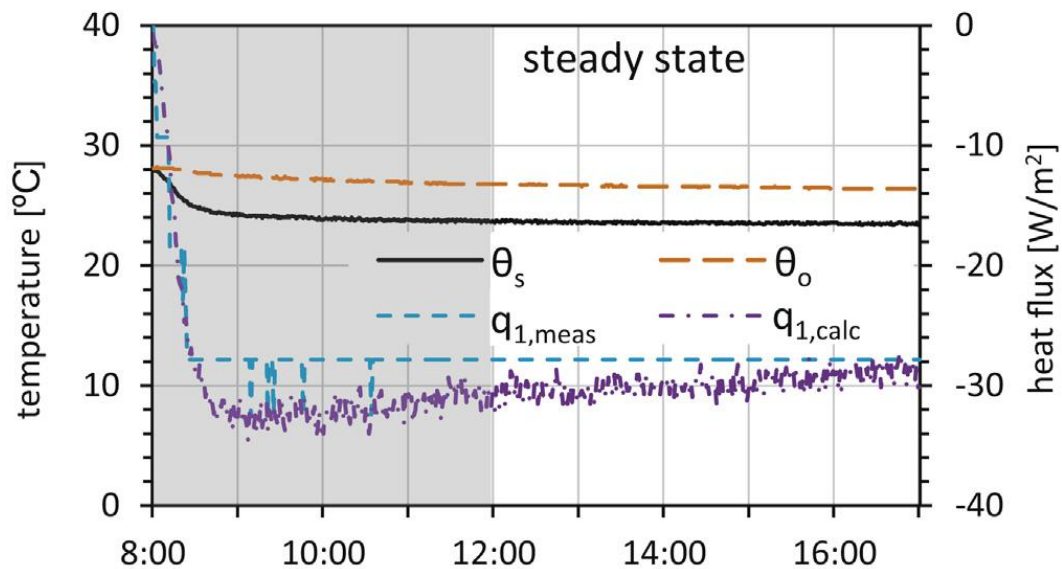
Accuracy of measured heat flux.

	H1	H2	H3	H4	C1	C2	C3
$\theta_s - \theta_o$ [°C]	8.2	8.2	2.5	5.9	-3.7	-3.4	-3.0
Measurement heat flux $q_{1,meas}$ [W/m ²]	49.8	50.80	18.2	35.0	-35.4	-32.0	-27.8
Calculated heat flux $q_{1,calc}$ [W/m ²]	49.0	49.0	15.0	35.3	-38.0	-34.5	-30.0
Relative deviation $ q_{1,meas} - q_{1,calc} /q_{1,calc}$	1.6%	3.6%	21.2%	0.8%	7.0%	7.2%	7.3%

Εικόνα 4-6: Ακρίβεια μετρήσεων ροής θερμότητας (Rongling Li et al, 2013)



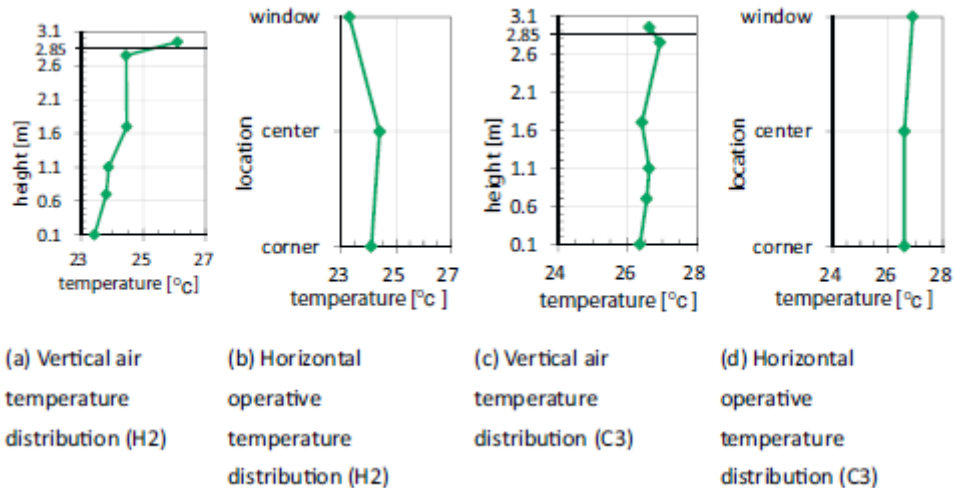
(a) H2



(b) C3

Εικόνα 4-7: Αποτελέσματα μετρήσεων και υπολογισμών για ροή θερμότητας (Rongling Li et al, 2013)

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό.



Εικόνα 4-7: Κατανομή θερμοκρασίας στο εσωτερικό (Rongling Li et al, 2013)

Το διάγραμμα δείχνει τις κατανομές θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου για H2 και C3. Η κάθετη διαφορά θερμοκρασίας αέρα μεταξύ 0,1 m και 1,7 m είναι μικρότερη από 1,5°C. Η απόκλιση από την πλευρά του παραθύρου στο κέντρο του δωματίου και στην εσωτερική γωνία είναι επίσης μικρότερη από 1,5°C. Η θερμοκρασία του αέρα και οι αποδόσεις στο δωμάτιο ήταν εξαιρετικά ομοιόμορφες, η οποία συμβάλλει σε ένα θερμικό περιβάλλον κατηγορίας A (Rongling Li et al, 2013).

Για τις συνθήκες άνεσης έγινε σύγκριση με τις συνθήκες που δίνει το ISO7730 για περιβάλλον κατηγορίας B. Το PD% είναι το ποσοστό των ανθρώπων που δεν είναι ικανοποιημένοι από τη θερμοκρασία του δαπέδου, το οποίο εκτιμάται από μια συνάρτηση που παρέχεται στο ISO 7730. Η θερμοκρασία του δαπέδου της τάξης ήταν περίπου 27°C και 24°C λειτουργία ψύξης και θέρμανσης, αντίστοιχα. Για αυτές τις θερμοκρασίες, το ISO 7730 δίνει PD% μικρότερο από 10% (Rongling Li et al, 2013).

Factors of thermal environment category B [22].

PPD%	PMV	Vertical air temperature difference	Radiant asymmetry	PD% Caused by warm or cool floor	DR%
<10	-0.5 < PMV < +0.5	<5	<5	<10	<20

Εικόνα 4-8: Παράγοντες θερμικού περιβάλλοντος με βάση το ISO7730 (Rongling Li et al, 2013)

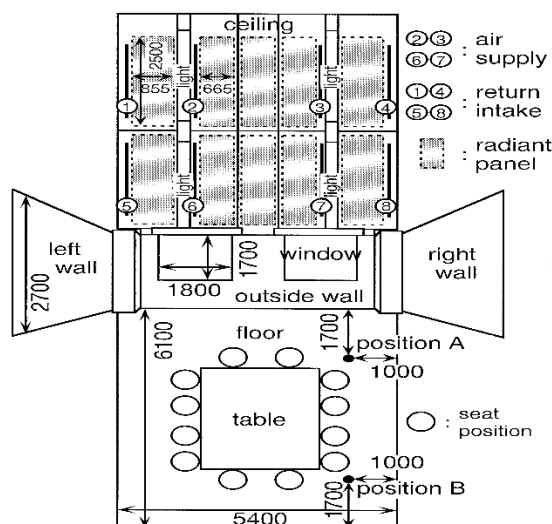
4.2 Περίπτωση μελέτης συνθηκών άνεσης σε χώρο γραφείων

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην Ιαπωνία όπου πέρα από τα επίπεδα της θερμικής άνεσης μελετήθηκε και η εξοικονόμηση ενέργειας από την χρήση συστημάτων πάνελ ακτινοβολίας.

Ο χώρος μελέτης είναι μία αίθουσα συνεδριάσεων περίπου 33m^2 με το ταβάνι να βρίσκεται περίπου $2,70\text{m}$ από το δάπεδο. Τα πάνελ καλύπτουν το 56% της οροφής. οι σωληνώσεις του συστήματος είναι χάλκινες ενώ χρησιμοποιήθηκε και ένας κυκλοφορητής αέρα (Air Handling Unit, AHU) για τον εξαερισμό. Η ίδια μονάδα χρησιμοποιήθηκε και για την προσομοίωση του συμβατικού συστήματος.

Για την σύγκριση του θερμικού περιβάλλοντος και του επιπέδου θερμικής άνεσης πραγματοποιήθηκαν 7 πειράματα. Έγινε διαχωρισμός των συμμετεχόντων σε άνδρες και γυναίκες. Οι άνδρες συμμετείχαν στα πειράματα 1-5 και οι γυναίκες στα πειράματα 6-7. Στα πειράματα 1, 4 και 6 προσομοιώνεται το σύστημα με πάνελ, με σταθερή θερμοκρασία και υγρασία και στα πειράματα 3,5 και 7 προσομοιώνεται το συμβατικό σύστημα. Στο πείραμα 2 προσομοιώνεται το σύστημα ελέγχου υγρασίας που θεωρείται πιο άνετο και πιο ακριβό.

Οι συνθήκες του πειράματος καθορίστηκαν από τον δείκτη PMV σε 2 σημεία του δωματίου και σε ύψος 0.60m .



Εικόνα 4-9: Διάγραμμα αίθουσας συνεδριάσεων

Η θερμοκρασία του πάνελ και του αέρα ήταν ελεγχόμενη ώστε να μην υπάρχει η πιθανότητα συμπύκνωσης στο σύστημα. Για να αποφευχθεί η δυσφορία λόγω της

ασυμετρίας της θερμότητας που ακτινοβολείται, η θερμοκρασία στην επιφάνεια του πάνελ περιορίστηκε στους 18-22°C για την ψύξη και στους 27-30 °C για την θέρμανση.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι συνθήκες του πειράματος και τα στατιστικά στοιχεία των συμμετεχόντων.

Summary of experimental conditions

Experiment	System	Mode	Gender of subjects	Volume of supplied air (m ³ /h) ^b	Room temperature (°C)	Relative humidity (%)	Outside temperature (°C)
1	Ceiling + AHU	Cooling	Male	300	24.0	61.2	29.0
2	AHU with reheater	Cooling	Male	600	23.9	60.2	32.7
3	AHU	Cooling	Male	600	24.2	66.6	26.6
4	Ceiling + AHU ^a	Heating	Male	300	21.9	33.4	8.9
5	AHU	Heating	Male	600	20.3	32.6	8.7
6	Ceiling + AHU	Cooling	Female	300	25.7	61.2	34.3
7	AHU	Cooling	Female	600	25.9	59.8	34.8

^aOnly for ventilation (not heated).

^bSet value.

Εικόνα 4-10: Σύνοψη συνθηκών πειραμάτων

Summary of subjects

Experiment	Gender	Number of subjects	Age					Height		Weight	
			10s	20s	30s	40s	50s	Av	SD	Av	SD
1	Male	36	0	24	8	2	2	171.3	4.8	64.5	11.4
2	Male	15	0	10	3	1	1	170.6	4.7	65.2	15.3
3	Male	11	0	7	2	1	1	172.8	3.2	70.2	13.7
4	Male	66	0	20	21	16	9	170.5	5.9	66.0	9.2
5	Male	23	0	13	8	1	1	172.3	5.5	65.4	8.7
6, 7	Female	74	6	63	5	0	0	158.6	4.4	48.9 ^a	— ^a

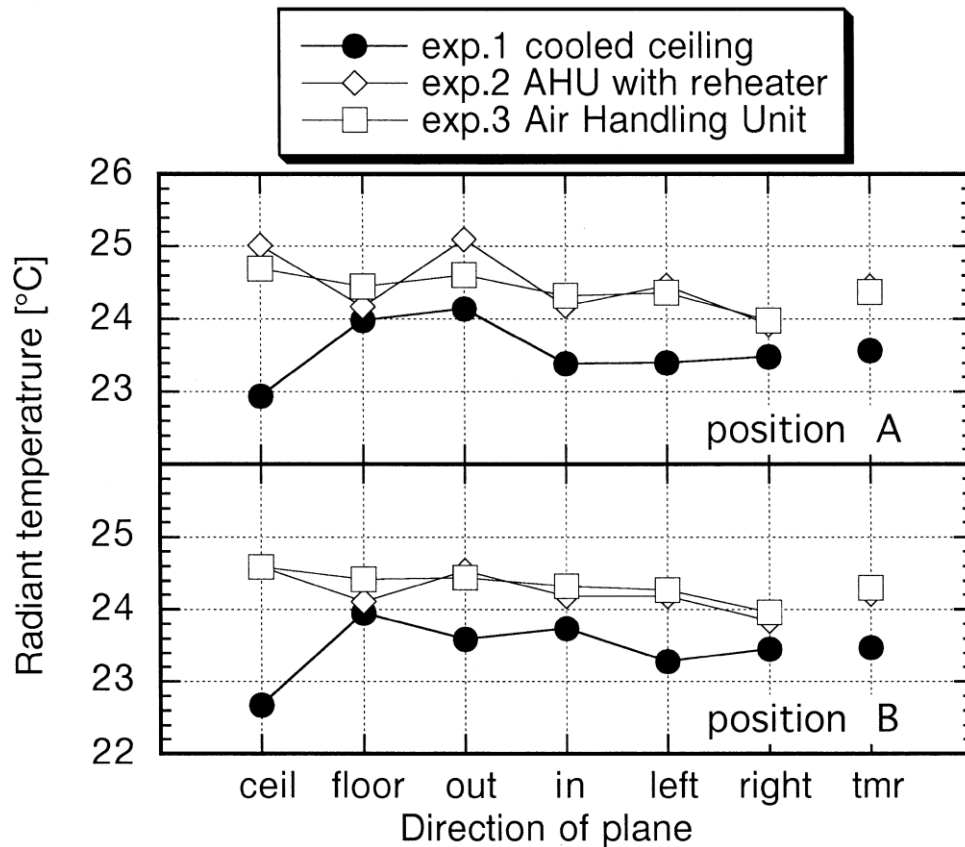
Av: average.

SD: standard deviation.

^aQuestioned with category.

Εικόνα 4-11: Στατιστικά στοιχεία συμμετεχόντων

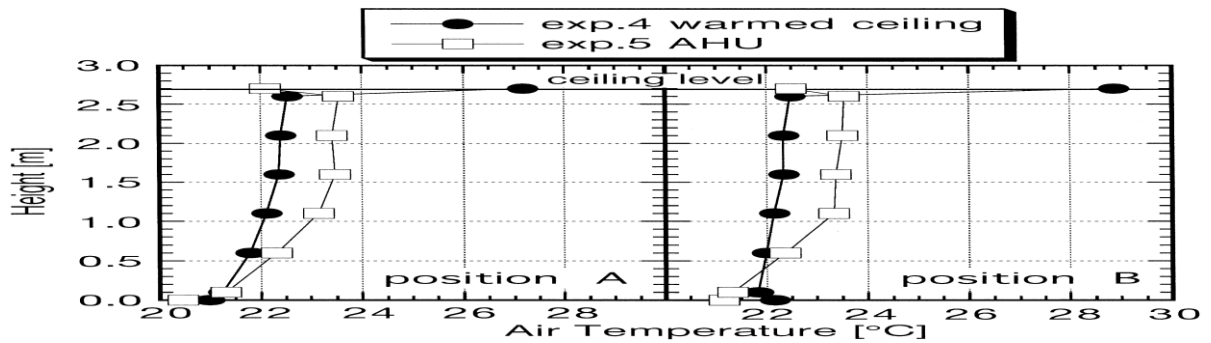
Παρακάτω ακολουθούν διαγράμματα για την τυπική θερμοκρασία του πάνελ (t_{pr}) και την μέγιστη θερμοκρασία ακτινοβολίας (t_{mr}) στις θέσεις A και B όταν τα συστήματα λειτουργούσαν στην ψύξη. Οι παραμετροί προσδιορίστηκαν από την θερμοκρασία των επιφανειών των τοίχων του δαπέδου και της οροφής.



Εικόνα 4-12: Τυπικές τιμές t_{pr} και t_{mr} στο ύψος των 0,60m στις θέσεις A και B σε λειτουργία ψύξης

Το σύστημα του πάνελ ακτινοβολίας παρουσιάζει μειωμένη t_{pr} σε όλες τις κατευθύνσεις λόγω του ότι η θερμοκρασία των τοίχων και του δαπέδου ψυχόταν από την άμεση μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, δημιουργώντας ένα σύστημα όπου «το κεφάλι ήταν κρύο και τα πόδια ζεστά» σε αντίθεση με τα άλλα συστήματα όπου συνέβαινε το αντίθετο.

Όσον αφορά την κατακόρυφη διαφορά θερμοκρασίας σε συνθήκες θέρμανσης, το συμβατικό σύστημα δημιουργούσε υψηλή θερμοκρασία αέρα στα ανώτερα σημεία του δωματίου αποδεικνύοντας ότι το σύστημα με τα πάνελ ακτινοβολίας δημιουργεί μικρότερες κατακόρυφες θερμοκρασιακές διαφορές όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 4-13: Κατακόρυφες θερμοκρασιακές διαφορές σε λειτουργία θέρμανσης

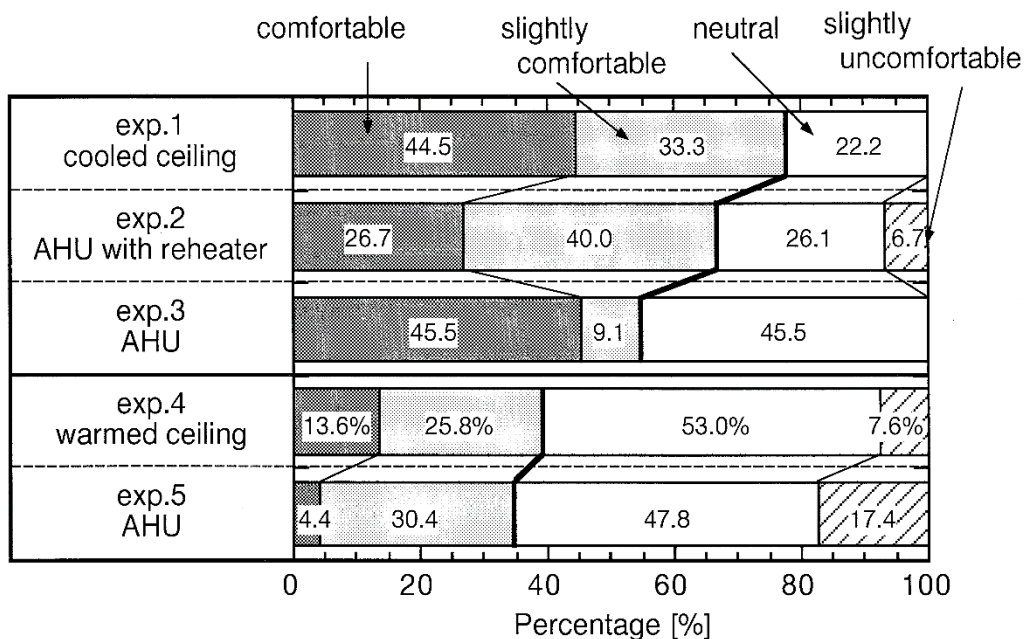
Η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης έγινε σε σύγκριση με τον προτεινόμενο δείκτη άνεσης σύμφωνα με το ISO7730 όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα

Comparison with recommended comfortable factors of ISO7730

Factors	PMV		Vertical temperature difference 0.1–1.1 m		Vertical t_{pr} asymmetry		Surface temperature of floor		Operative temperature	
Recommendation	-0.5 to +0.5		Less than 3°C		Less than 5°C		19°C–26°C		20°C–24°C	
Position	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Experiment 4	-0.4	-0.4	0.9	0.3	3.3	3.9	21.0	22.2	22.2	22.4
Experiment 5	-0.4	-0.4	1.8	2.0	1.5	1.9	20.5	21.2	21.9	22.1

Εικόνα 4-14: Σύγκριση PMV με τους προτεινόμενους δείκτες του ISO7730

Όσον αφορά την θερμική άνεση, στις συνθήκες ψύξης το σύστημα με πάνελ ακτινοβολίας πήρε το σχεδόν 80% των θετικών ψήφων όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα

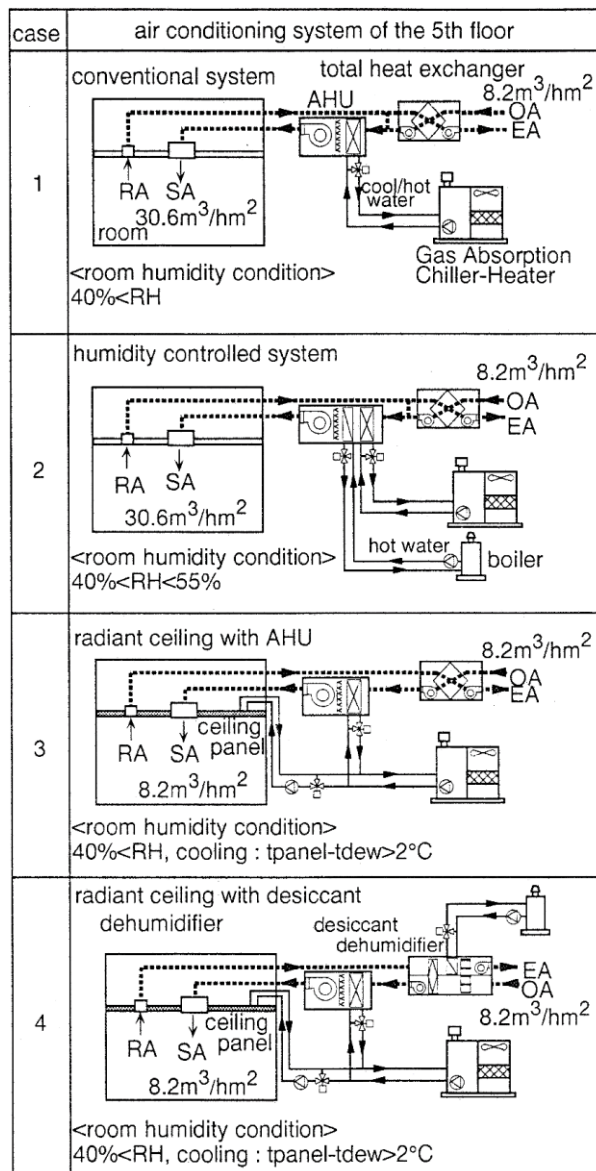


Εικόνα 4-15: Συγκεντρωτική κατάταξη ψήφων ανδρών για τα επίπεδα θερμικής άνεσης

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας και την αποδοτικότητα του κόστους των διάφορων συστημάτων κλιματισμού έγινε προσομοίωση σε χώρους γραφείων

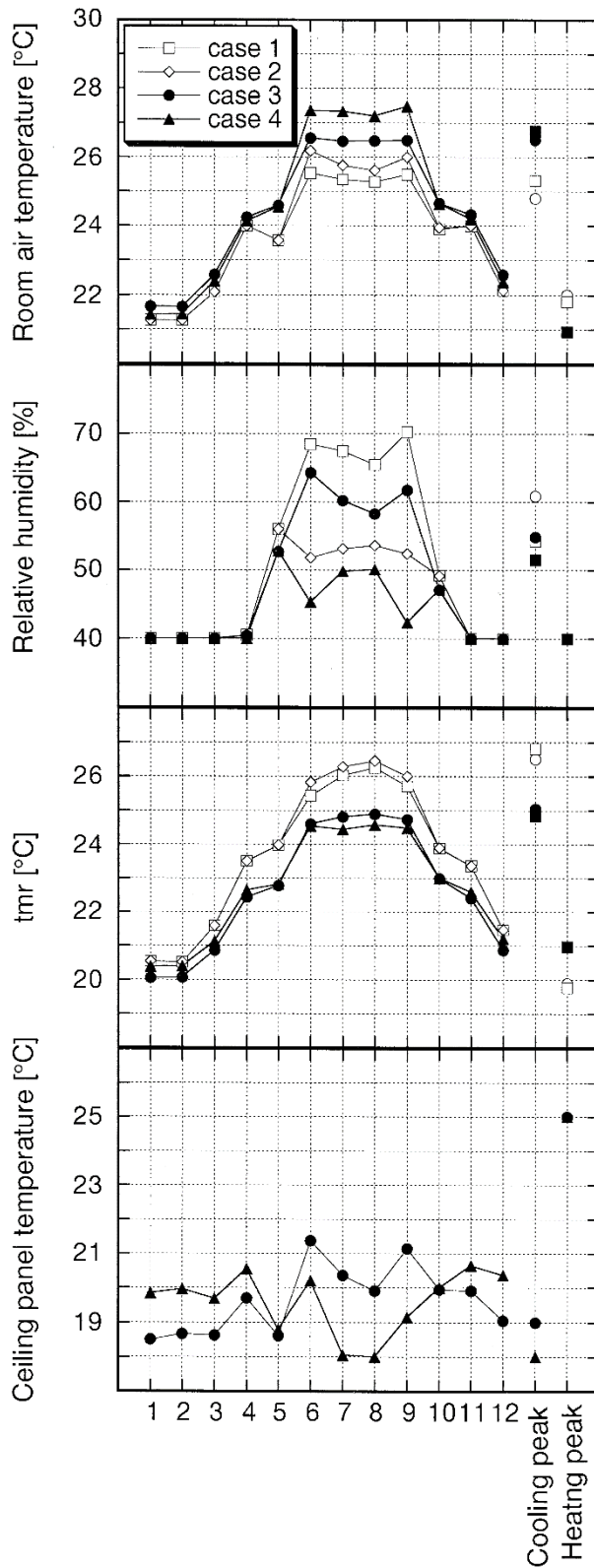
που βρίσκονται στον 3ο, 4ο 5ο και 6ο όροφο ενός κτιρίου στο Τόκιο. Το συνολικό εμβαδόν ήταν 1764m^2 και το 70% της οροφής καλύπτονταν από πάνελ. Η κάλυψη του ορόφου ορίστηκε στα 1 άτομο/ 7m^2 με το συνολικό ποσοστό κάλυψης να φτάνει το 70% και η θερμότητα που παράγεται από τα φώτα και τις ηλεκτρονικές συσκευές υπολογίστηκε στο 37.5W/m^2 .

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τα 4 διαφορετικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν και την απόδοσή τους. Στην 1^η περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το συμβατικό σύστημα αέρα, στην 2^η περίπτωση το σύστημα ελέγχου υγρασίας, στην 3^η περίπτωση το σύστημα πάνελ ακτινοβολίας με AHU και στην 4^η περίπτωση το σύστημα πάνελ ακτινοβολίας με AHU και αφυγραντήρα.



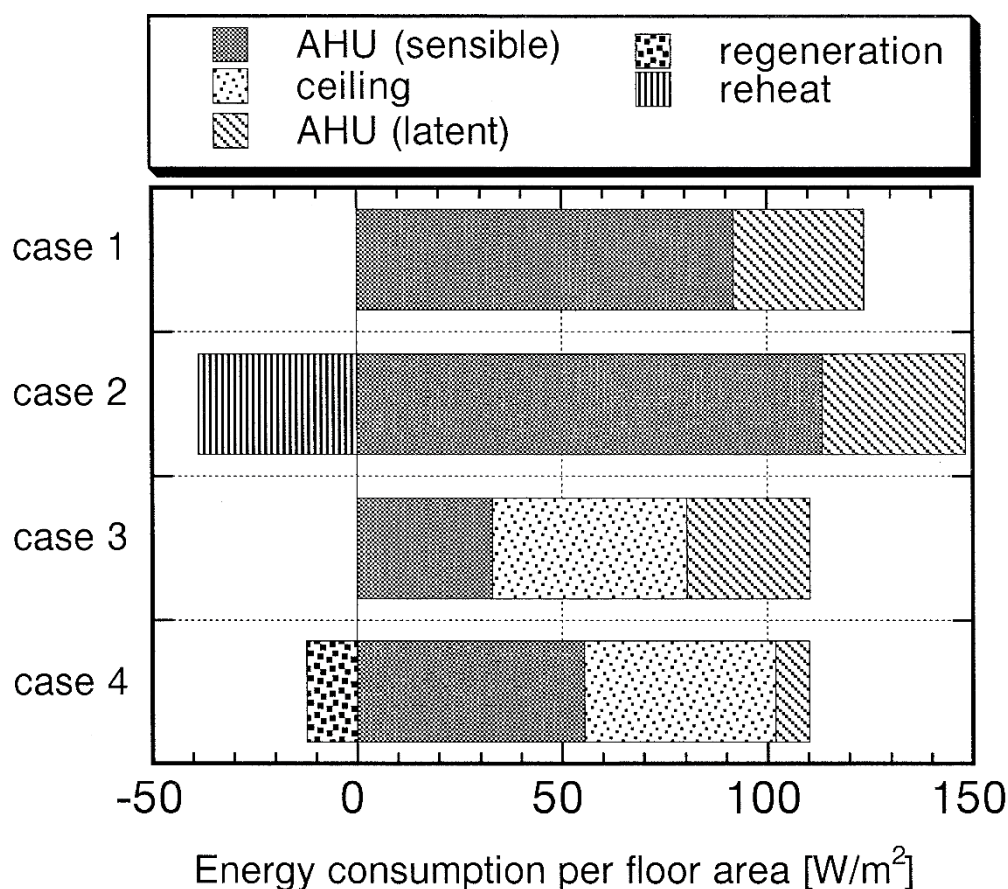
Εικόνα 4-16: προσομοίωση συστημάτων στον 5ο όροφο

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τις θερμοκρασιακές διαφορές του αέρα στις ώρες λειτουργίας του κτιρίου, από τις 8:00 το πρωί έως τις 6:00 το απόγευμα.



Εικόνα 4-17: Θερμοκρασιακές συνθήκες στον 5ο όροφο

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας σε συνθήκες ψύξης δεν λήφθηκε υπόψη η κατανάλωση ενέργειας για την μεταφορά του αέρα. Λαμβάνεται υπόψη επίσης ότι το θερμικό περιβάλλον που δημιουργούσε το κάθε συστημα δεν ήταν πανομοιότυπο με τα άλλα.



Εικόνα 4-18: Κατανάλωση ενέργειας στον 5ο όροφο σε λειτουργία ψύξης

Initial cost ratio to case 1

	Heat source appliances	Air handling units	Ducting and piping	Control and electrical equipment	Ceiling panels	Other	Total
Case 1	0.166	0.328	0.334	0.081	–	0.091	1.000
Case 2	0.179	0.375	0.354	0.109	–	0.102	1.117
Case 3	0.167	0.280	0.310	0.098	0.057	0.091	1.003
Case 4	0.178	0.259	0.317	0.104	0.057	0.091	1.006

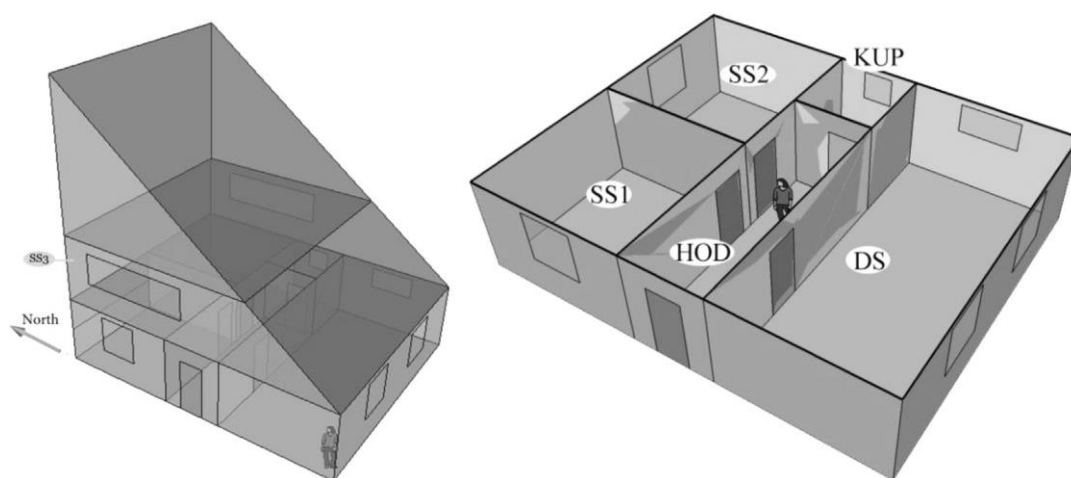
Εικόνα 4-19: Ποσοστό κόστους των τεσσάρων συστημάτων

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας δείχνει ότι σε έναν χρόνο τα 2 συστήματα με πάνελ ακτινοβολίας (περιπτώσεις 3 και 4) κατανάλωσαν 20% λιγότερη ενέργεια σε σχέση με τα συστήματα των άλλων περιπτώσεων. Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι το σύστημα πανελ ακτινοβολίας δημιουργεί ένα περιβάλλον πιο άνετο, με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

4.3 Περίπτωση μελέτης κατανάλωσης ενέργειας, εκπομπών CO₂ και κόστους λειτουργίας

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στην Σερβία από τους Milorad, Dragan, Vesna, Mirko και Zorica (2013) με σκοπό να συγκρίνει τέσσερα είδη συστημάτων πάνελ ακτινοβολίας, επιδαπέδια, επίτοιχα, οροφής και οροφής –δαπέδου του οποίου το νερό ζεσταίνεται από μπόιλερ φυσικού αερίου. Η προσομοίωση έγινε για συνθήκες θέρμανσης σε διώροφο κτίριο κατοικίας και υπολογίστηκαν η κατανάλωση ενέργειας, οι εκπομπές CO₂ και το κόστος λειτουργίας.

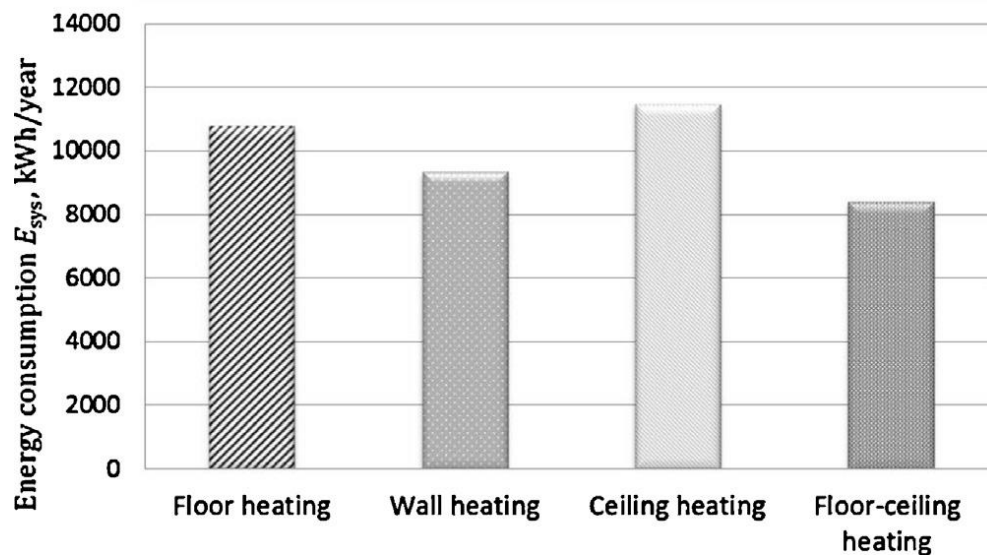
Το σπίτι βρίσκεται στο Kragujevac της Σερβίας, έχει συνολικό εμβαδόν 190m² και είναι σχεδιασμένο για στεγάζει μία οικογένεια. Το περίβλημά του έχει εμβαδόν 264m² και αποτελείται από τούβλα 19cm, 5cm μόνωσης και 2cm ασβεστοκονίαμα ($U=0.57 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) και έχει κουφώματα με διπλούς υαλοπίνακες ($U=2.72 \text{ W/m}^2 \text{ K}$). Τα επιδαπέδια πάνελ καλύπτουν την συνολική επιφάνεια των 190m² ενώ τα επίτοιχα βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια και έχουν εμβαδόν 210 m². Τα πάνελ οροφής είναι εγκατεστημένα και στους 2 ορόφους και καλύπτουν το συνολικό εμβαδόν, ενώ το σύστημα οροφής –δαπέδου καλύπτει εμβαδόν 95 m² και θερμαίνει την οροφή του 1^{ου} ορόφου και το δάπεδο του 2^{ου}. Η θερμοκρασία εισόδου του νερού και στα 4 συστήματα είναι 37°C. Και στις 4 περιπτώσεις το νερό ζεσταίνεται από μπόιλερ φυσικού αερίου.



Εικόνα 4-20: Κάτοψη και προσανατολισμός της κατοικίας (Milorad et.al, 2013)

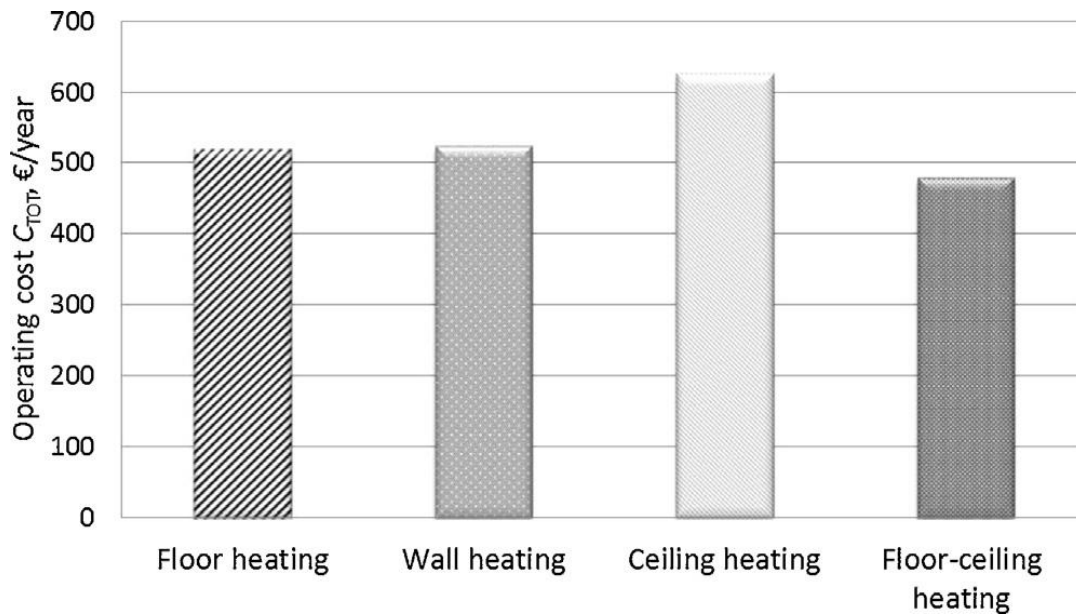
Στον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας συνυπολογίζεται και κατανάλωση ενέργειας της αντλίας για την κυκλοφορία του νερού στο σύστημα. Στις εκπομπές του CO₂ συνυπολογίζονται όλες οι εκπομπές του κτιρίου καθώς και οι εκπομπές από την καύση του φυσικού αερίου. Αντίστοιχα συνυπολογίζεται στο κόστος λειτουργίας το κόστος του φυσικού αερίου.

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η κατανάλωση ενέργειας των τεσσάρων συστημάτων.



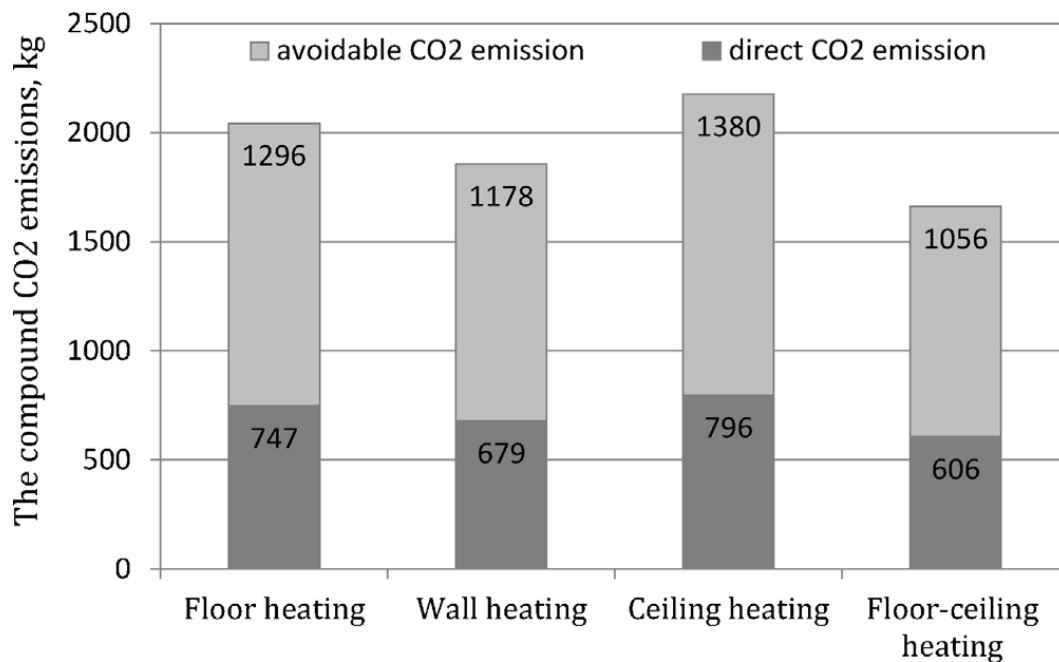
Εικόνα 4-21: Κατανάλωση ενέργειας κατά την περίοδο θέρμανσης (Milorad et.al, 2013)

Το σύστημα δαπέδου-οροφής έχει την μικρότερη κατανάλωση (8310 kWh/έτος), ενώ το σύστημα οροφής την μεγαλύτερη (11,420 kWh/έτος). Η διαφορά τους είναι περίπου 27%, με το σύστημα δαπέδου-οροφής να έχει 10% μικρότερη κατανάλωση από το επίτοιχο σύστημα και 22% από το επιδαπέδιο (Milorad et.al, 2013).



Εικόνα 4-22: Κόστος θέρμανσης (Milorad et.al, 2013).

Το σύστημα οροφής, με την μεγαλύτερη κατανάλωση, είναι αυτό που έχει το μεγαλύτερο κόστος (624€) ενώ το σύστημα οροφής-δαπέδου κοστίζει 475€. Στον υπολογισμό του κόστους συμπεριλαμβάνονται και επικρατούσες λοιπές χρεώσεις (πάγια, φόροι, τέλη, κ.α) (Milorad et.al, 2013).



Εικόνα4-23: Άμεσες και αποφευχθείς εκπομπές CO₂ του κτιρίου υπολογισμένες για τον μήνα Ιανουάριο (Milorad et.al, 2013).

Πέρα από το μεγαλύτερο κόστος και την μεγαλύτερη κατανάλωση το σύστημα οροφής είναι αυτό που έχει και τις περισσότερες εκπομπές CO₂ (2176 kgCO₂). Αντίστοιχα το σύστημα οροφής-δαπέδου είναι αυτό που έχει τις χαμηλότερες εκπομπές (1662 kgCO₂). Αυτό ισχύει και για τις άμεσες και για τις αποφευχθείς εκπομπές των δύο συστημάτων.

5 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Δεδομένου ότι το σύστημα θέρμανσης - ψύξης με πάνελ ακτινοβολίας είναι σωστά σχεδιασμένο για την εκάστοτε εφαρμογή που χρησιμοποιείται προκύπτει το συμπέρασμα ότι συστήματα αυτού του είδους επιτυγχάνουν καλύτερα επίπεδα θερμικής άνεσης από άλλα συστήματα στα οποία η μεταφορά θερμότητας γίνεται με συναγωγή. Ταυτόχρονα παρόλο που το κόστος εγκατάστασής τους είναι παρόμοιο με αυτό των συμβατικών μονάδων κλιματισμού, οι ενεργειακές τους απαιτήσεις είναι πολύ μικρότερες με αποτέλεσμα να μειώνεται το συνολικό κόστος του συστήματος.

Από πειραματικές διατάξεις προκύπτει ότι η απόδοση του συστήματος ψύξης επηρεάζεται από τον σωλήνα όταν η θερμική αγωγιμότητα του σωλήνα είναι χαμηλή.

Η επίδραση της ταχύτητας του νερού στην απόδοση του συστήματος ψύξης δεν είναι μεγάλη. Επομένως, η κατανάλωση ενέργειας της αντλίας μπορεί να μειωθεί, μειώνοντας την ταχύτητα του νερού.

Τα συστήματα με πάνελ ακτινοβολίας δημιουργούν πολύ καλές θερμικές συνθήκες άνεσης σε λειτουργία ψύξης.

Στην περίπτωση των κρεμάμενων πάνελ θα πρέπει να είναι πολύ καλά μονωμένη η οροφή και τα σημεία πρόσδεσης των πάνελ σε αυτή ώστε να έχουμε όσο το δυνατό μικρότερες απώλειες.

Επειδή τα θερμικά φορτία που εξαρτώνται από τον καιρό διαφέρουν η θερμοκρασία του νερού του συστήματος δεν πρέπει να είναι σταθερή.

Δημιουργούν μικρότερες κατακόρυφες μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα στην θέρμανση, σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα.

Λόγω του ότι τα θερμικά φορτία που διαχειρίζεται το πάνελ είναι αισθητά, μπορεί να μειωθεί ο όγκος του αέρα που διοχετεύεται στο σύστημα για την λειτουργία του και επομένως μπορούμε να πετύχουμε μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Επίσης μικρότερη κατανάλωση ενέργειας μπορούμε να πετύχουμε και με συνδυασμό των συστημάτων ακτινοβολίας με άλλα συστήματα πηγών ανανεώσιμης ενέργειας.

Ο χρόνος απόσβεσης της εγκατάστασης μπορεί να είναι 1 έτος, ανάλογα με τις τιμές των πάνελ που επικρατούν στην αγορά.

Το σύστημα θέρμανσης με πάνελ δαπέδου- οροφής έχει τις καλύτερες αποδόσεις. Έχει την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, τις λιγότερες εκπομπές CO₂ και το μικρότερο κόστος λειτουργίας.

Το επίτοιχο σύστημα πάνελ ακτινοβολίας έχει και αυτό καλή απόδοση σε λειτουργία θέρμανσης (χαμηλό κόστος λειτουργίας, μικρή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλές εκπομπές CO₂).

Τα συστήματα πάνελ ακτινοβολίας δημιουργούν ομοιόμορφο θερμοκρασιακό περιβάλλον, παρέχοντας έτσι υψηλές συνθήκες άνεσης.

Βιβλιογραφία

- ANSI/ASHRAE (2017). ANSI/ASHRAE 55:2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *Ashrae*. doi: 10.1007/s11926-011-0203-9.
- ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΥ Ι., Α.Ι. (2013). *ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ*.
- Archiproducts. (n.d.). *Radiant ceiling panels / Radiant walls and floors*. [online] Available at: <https://www.archiproducts.com/en/products/radiant-ceiling-panels> [Accessed 30 Jun. 2021].
- ASHRAE (2000). Systems and Equipment Handbook. In: *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc*. Atlanta.GA.
- ASHRAE (2012). *Handbook. HVAC Systems and Equipment. Chapter 6. Panel Heating and Cooling*. American Society of Heating, Refrigeration and Air conditioning Engineers.
- Athienitis, A.K. (1997). Investigation of thermal performance of a passive solar building with floor radiant heating. *Solar Energy*, 61(5), pp.337–345.
- Awbi, H.B. and Hatton, A. (2000). Mixed convection from heated room surfaces. *Energy and Buildings*, 32(2), pp.153–166.
- Beausoleil-Morrison, I. (2001). An algorithm for calculating convection coefficients for internal building surfaces for the case of mixed flow in rooms. *Energy and Buildings*, 33(4), pp.351–361.
- BEAUTIFUL PLANET GREEN. (n.d.). *ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ & ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ*. [online] Available at: http://www.ffi-fueleconomygreece.com/epsilon_rhoomegatauetasigma_epsiloniotasigma--alphapialphanutauetasigma_epsiloniotasigma.html [Accessed 30 Jun. 2021].
- Chen, Q., Mayers, C. and Kooi, J. v.d (1989). Convective heat transfer in rooms with mixed convection. In: *International Seminar on Indoor Air Flow Patterns in Ventilated Spaces*. Liege, Belgium, p.pp. 69–82.
- Conceição, E.Z.E. and Lúcio, M.M.J.R. (2011). Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom equipped with radiant cooling systems and subjected to

uniform convective environment. *Applied Mathematical Modelling*, 35(3), pp.1292–1305.

Due-Line. (n.d.). *Σωλήνα Δικτυωμένου Πολυαιθυλαενίου PEX-b*. [online] Available at: <https://www.due-line.gr/proionta/swlhna-diktywmenoy-polyai8ylaenioy-pex-b/> [Accessed 30 Jun. 2021].

ΒΡΑΖΑΛΗΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ-ΜΑΡΙΟΣ ΓΕΩΡΓΟΠΟΥΛΟΣ ΜΙΧΑΛΗΣ.
(2019). *ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΠΑΝΕΛ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ & ΨΥΞΗ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙ*,
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Feng, J. (Dove), Bauman, F. and Schiavon, S. (2014). Experimental comparison of zone cooling load between radiant and air systems. *Energy and Buildings*, [online] 84, pp.152–159. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877881400629X?via%3Dihub> [Accessed 12 Apr. 2021].

Feng, J. (Dove), Schiavon, S. and Bauman, F. (2013). Cooling load differences between radiant and air systems. *Energy and Buildings*, 65, pp.310–321.

Feustel, H.E. and Stetiu, C. (1995). Hydronic radiant cooling — preliminary assessment. *Energy and Buildings*, 22(3), pp.193–205.

Fisher, D.E. and Pedersen, C.O. (n.d.). Convective heat transfer in building energy and thermal load calculations. In: : ASHRAE Transactions, pp.137–148.

Fonseca Díaz, N.F.D. and Cuevas, C.C. (2010). Testing and thermal modeling of radiant panels systems as commissioning tool. *Energy Conversion and Management*, [online] 51(12), pp.2663–2677. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890410002116?via%3Dihub> [Accessed 12 Apr. 2021].

Fonseca, N., Cuevas, C. and Lemort, V. (2010). Dynamic Modeling and Validation of Radiant Ceiling Systems Coupled to its Environment. *International High Performance Buildings Conference*. [online] Available at: <https://docs.lib.purdue.edu/ihpbc/2/> [Accessed 12 Apr. 2021].

Γαρμπής, Α. (2019). *Μετάβαση από τα ενεργοβόρα κτήρια σε κτήρια μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης*, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΥ, Μ. and ΚΟΥΤΣΟΥΡΑΔΗ, Α. (2019). *ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΟΠΙΑΣΣΑΛΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΑΡΓΙΛΙΚΟ ΕΛΑΦΟΣ*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ.

Imanari, T., Omori, T. and Bogaki, K. (1999). Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system. *Energy and Buildings*, 30(2), pp.167–175.

Jeong, J.-W. and Mumma, S.A. (2003). Ceiling radiant cooling panel capacity enhanced by mixed convection in mechanically ventilated spaces. *Applied Thermal Engineering*, 23(18), pp.2293–2306.

Jeong, J.-W. and Mumma, S.A. (2007). Practical cooling capacity estimation model for a suspended metal ceiling radiant cooling panel. *Building and Environment*, 42(9), pp.3176–3185.

Jin, X., Zhang, X., Luo, Y. and Cao, R. (2010). Numerical simulation of radiant floor cooling system: The effects of thermal resistance of pipe and water velocity on the performance. *Building and Environment*, [online] 45(11), pp.2545–2552. Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036013231000154X?via%3Dihub> [Accessed 12 Apr. 2021].

Kilkis, Í.B., Sager, S.S. and Uludag, M. (1994). A simplified model for radiant heating and cooling panels. *Simulation Practice and Theory*, 2(2), pp.61–76.

Kim, K.W. and Olesen, B.W. (2015). Radiant heating and cooling systems. : ASHRAE Journal, p.pp. 28–37.

Kochendoerfer, C. (1996). *Standardized Testing of Cooling Panels and Their Use in System Planning*.

Li, R., Yoshidomi, T., Ooka, R. and Olesen, B.W. (2015). Field evaluation of performance of radiant heating/cooling ceiling panel system. *Energy and Buildings*, 86, pp.58–65.

Lienhard, J. (2000). *A Heat Transfer Textbook Third Edition*. [online] . Available at: <http://www.mie.uth.gr/labs/lte/grk/pubs/ahtt.pdf>.

light.physics.auth.gr. (n.d.). *Light Website : To H/M φάσμα*. [online] Available at: <http://light.physics.auth.gr/history/two/spectrum.html> [Accessed 26 Jun. 2021].

Liu, Y., Wang, D. and Liu, J. (2012). Study on heat transfer process for in-slab heating floor. *Building and Environment*, [online] 54, pp.77–85. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132312000467?via%3DiHub> [Accessed 12 Apr. 2021].

LLC, C. (n.d.). *Σωλήνας χαλκού για κλιματιστικά (κουλούρα)*. [online] balkanenergy.gr. Available at: <https://www.balkanenergy.gr/product/coiled-copper-pipe-for-air-conditioners> [Accessed 30 Jun. 2021].

Μηδενικής, Κ., Ενέργειας, Κ., Σχεδιασμός, Β., Εξοικονόμηση Ενέργειας, Συστήματα, Η., Δημήτριος, Θ. and Παπανδρέου (2015). *ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ*. <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/40925/%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE.pdf?sequence=1> [Accessed 29 Jun. 2021].

Milorad, B., Dragan, C. c, Vesna, M. c, Mirko, B. c and Zorica, D. (2013). Performances of low temperature radiant heating systems. *Energy and Buildings*, [online] 61, pp.233–238. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778813001096?via%3DiHub> [Accessed 29 Jun. 2021].

Moore, T., Bauman, F. and Huizenga, C. (2006). *RADIANT COOLING RESEARCH SCOPING STUDY*.

Ning, B., Chen, Y., Liu, H. and Zhang, S. (2016). Cooling capacity improvement for a radiant ceiling panel with uniform surface temperature distribution. *Building and Environment*, 102, pp.64–72.

Norton, B. and Probert, S.D. (1982). Natural-circulation solar-energy stimulated systems for heating water. *Applied Energy*, 11(3), pp.167–196.

Okamoto, S., Kitora, H., Yamaguchi, H. and Oka, T. (2010). A simplified calculation method for estimating heat flux from ceiling radiant panels. *Energy and Buildings*, 42(1), pp.29–33.

Olesen, B.W. (2002). Radiant floor heating in theory and practice. *ASHRAE Journal*.

Olesen, B.W. (2008). Radiant floor cooling systems. *ASHRAE Journal*.

Olesen, B.W. (2021). Thermo Active Building Systems: Using Building Mass To Heat and Cool. *ASHRAE Journal*, 54(2), pp.44–52.

Olesen, B.W. (n.d.). Using building mass to heat and cool. *ASHRAE Journal*.

Olesen, B.W. and Parsons, K.C. (2002). Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings*, 34(6), pp.537–548.

Αριστείδης Ζδέτσος ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ[online] . Available at:

https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/PHY1961/%CE%91.%20%CE%96%CE%B4%CE%AD%CF%84%CF%83%CE%B7%CF%82_%CE%95%CE%B9%CF%83%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CF%83%CF%84%CE%B7%20%CE%A3%CF%8D%CE%B3%CF%87%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B7%20%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%91.pdf [Accessed 30 Jun. 2021].

Rhee, K.-N. and Kim, K.W. (2015). A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment. *Building and Environment*, [online] 91, pp.166–190. Available at:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315001584?casa_token=s3R35XNdrdsAAAAA:KwASapg4RIk1QaJ-RFI6AQuD9dtFZJOx78z0zGw-uM7xpo0MqoKpVWprOsTtVPiKpjsPg6iWdSM [Accessed 31 Jan. 2021].

Rhee, K.-N., Olesen, B.W. and Kim, K.W. (2017). Ten questions about radiant heating and cooling systems. *Building and Environment*, 112, pp.367–381.

Spitler, J.D., Pedersen, C.O. and Fisher, D.E. (1991). Interior convective heat transfer in buildings with large ventilative flow rates. *ASHRAE Transactions*, 97(1), pp.505–515.

Su, L., Li, N., Zhang, X., Sun, Y. and Qian, J. (2015). Heat transfer and cooling characteristics of concrete ceiling radiant cooling panel. *Applied Thermal Engineering*, [online] 84, pp.170–179. Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431115002690#:~:text=Indoor%20air%20and%20surfaces%20transferred> [Accessed 25 Jan. 2021].

Tang, H., Zhang, T., Liu, X. and Jiang, Y. (2017). Study on the pulsed flow control on radiant cooling and heating systems in part load. *Procedia Engineering*, [online] 205, pp.11–18. Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817344867?via%3Dihub>.

Tian, Z. and Love, J.A. (2008). A field study of occupant thermal comfort and thermal environments with radiant slab cooling. *Building and Environment*, 43(10), pp.1658–1670.

Tye-Gingras, M. and Gosselin, L. (2011). Investigation on heat transfer modeling assumptions for radiant panels with serpentine layout. *Energy and Buildings*, 43(7), pp.1598–1608.

Wu, X., Olesen, B.W., Fang, L. and Zhao, J. (2013). A nodal model to predict vertical temperature distribution in a room with floor heating and displacement ventilation. *Building and Environment*, 59, pp.626–634.

Wu, X., Zhao, J., Olesen, B.W., Fang, L. and Wang, F. (2015). A new simplified model to calculate surface temperature and heat transfer of radiant floor heating and cooling systems. *Energy and Buildings*, [online] 105, pp.285–293. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778815301675?via%3Dihub> [Accessed 12 Apr. 2021].

www.kaffe.gr. (n.d.). *ΠΑΝΕΛ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΟΡΟΦΗΣ*. [online] Available at: <https://www.kaffe.gr/product.asp?catid=512> [Accessed 30 Jun. 2021].

www.uponorgroup.com. (n.d.). *Plumbing, heating, cooling and infrastructure / Uponor*. [online] Available at: <https://www.uponorgroup.com/en-en> [Accessed 26 Jun. 2021].

www.wattsradiant.com. (n.d.). *Watts Radiant - Floor Heating & Snow Melting*. [online] Available at: <http://www.wattsradiant.com/products/flexplate/> [Accessed 30 Jun. 2021].

www.zehndergroup.com. (n.d.). *Geschäftsfelder und Produktlinien*. [online] Available at: <https://www.zehndergroup.com/de/produkte-und-loesungen/geschaeftsfelder-und-produktlinien> [Accessed 30 Jun. 2021].

Ξηρόκης, Ε.Ν. (2010). *ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.*,
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Yin, Y.L., Wang, R.Z., Zhai, X.Q. and Ishugah, T.F. (2014). Experimental investigation on the heat transfer performance and water condensation phenomenon of radiant cooling panels. *Building and Environment*, 71, pp.15–23.

Yu, G., Xiong, L., Du, C. and Chen, H. (2018). Simplified model and performance analysis for top insulated metal ceiling radiant cooling panels with serpentine tube arrangement. *Case Studies in Thermal Engineering*, [online] 11, pp.35–42. Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X17302472?via%3Dihub>

[Accessed 12 Apr. 2021].

Zeiler, W. and Boxem, G. (2009). Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter. *Building and Environment*, 44(11), pp.2308–2317.

Zhang, L.Z. and Niu, J.L. (2003). Indoor humidity behaviors associated with decoupled cooling in hot and humid climates. *Building and Environment*, 38(1), pp.99–107.