



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ενέργειας, Βιομηχανικών
Διεργασιών & Αντιρρυπαντικής
Τεχνολογίας

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (RADIANT PANELS)

Διπλωματική Εργασία

Μποντίλας Κωνσταντίνος
Παπαδάκος Νικόλαος

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση
του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού
Επιβλέπων: Δρ. Μποντόζογλου Βασίλης

Βόλος, 2021

© 2021 Μποντίλας Κωνσταντίνος
© 2021 Παπαδάκος Νικόλαος

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. Μποντόζογλου Βασίλης
Καθηγητής, Τμήμα
Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής:

Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής:

Δρ. Χαραλάμπους Γεώργιος
Επ. Καθηγητής, Τμήμα
Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όσους μας σταθήκαν και υποστήριξαν στο έργο της περάτωσης των σπουδών μας αλλά και συγκεκριμένα της διπλωματικής εργασίας. Τους συγγενείς, φίλους, συμφοιτητές, καθηγητές μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα υδραυλικά πάνελ για θέρμανση και ψύξη με ακτινοβολία είναι μία ταχύτατα αναπτυσσόμενη εναλλακτική κλιματισμού και παρουσιάζουν ποικίλα οφέλη ως προς την απόδοση αλλά και την εξοικονόμηση ενέργειας. Συγκριτικό τους πλεονέκτημα αποτελεί η εντατικοποίηση της άμεσης εναλλαγής θερμότητας μεταξύ στερεών επιφανειών υποβαθμίζοντας έτσι τη σημασία της ανακυκλοφορίας του αέρα. Οι βελτιώσεις των συστημάτων αυτών τα τελευταία χρόνια, τα καθιστούν τα πλέον κατάλληλα για πολλές κατηγορίες κτιριακών εγκαταστάσεων. Στο πρώτο μέρος, λοιπόν, της εργασίας γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή των συστημάτων αυτών, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας τους, οι διάφορες κατηγορίες και τύποι τους, αναφέρονται τα δομικά υλικά των επιμέρους εξαρτημάτων καθώς και τα συστήματα ελέγχου που επιτρέπουν την ομαλή λειτουργία της εγκατάστασης. Ακόμη εντοπίζονται οι παράμετροι που σχετίζονται με την απόδοση και το κόστος των συστημάτων ακτινοβολίας. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας μελετάται η διδιάστατη μεταφορά θερμότητας σε πάνελ οροφής για ψύξη, δίνοντας έμφαση στις επιπτώσεις της επικάλυψης του αγωγίμου μετάλλου με πρόσθετο στρώμα υλικού. Για την μελέτη αυτή αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε κώδικας MATLAB για τη μοντελοποίηση του προβλήματος. Οι υπολογισμοί αποκαλύπτουν τον τρόπο με τον οποίο οι κατασκευαστικές παράμετροι επηρεάζουν την απόδοση του πάνελ. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και την υπολογιστική μελέτη, καθώς επίσης γίνονται προτάσεις για τις κατασκευαστικές και λειτουργικές παραμέτρους του πάνελ με σκοπό να τη βέλτιστη απόδοση.

Λέξεις-κλειδιά: υδραυλικά πάνελ, ακτινοβολία, θέρμανση, ψύξη, κλιματισμός, μοντελοποίηση λειτουργίας



University of Thessaly
Department of Mechanical Engineering
Division of Energy, Industrial Processes
& Environmental Technology

THERMAL OPERATION MODELING OF HYDRONIC RADIANT PANELS

Diploma Thesis

**Bontilas Konstantinos
Papadakos Nikolaos**

In partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science
in Mechanical Engineering

Supervisor: Dr. Bontozoglou Vasilis

Volos, 2021

ABSTRACT

In this modern era, hydronic panels for radiant heating and cooling are a fast-growing alternative to air conditioning and offer a variety of efficiency and energy saving benefits. Their comparative advantage is the intensification of the direct heat exchange between solid surfaces, thus degrading the importance of air recirculation. Improvements to these systems in recent years make them the most suitable for many categories of building installations. In the first part of this diploma thesis, a brief historical review of these systems is given, their principle of operation is presented, their various categories and types, the building materials of the individual components are mentioned as well as the control systems that allow the smooth operation of the installation. The parameters related to the efficiency and cost of radiation systems are also identified. In the second part of the work, the two-dimensional heat transfer to a roof panel for cooling is studied, emphasizing the effects of coating the conductive metal with an additional layer of material. In the second part of the thesis, the two-dimensional heat transfer to a roof panel for cooling is studied, emphasizing the effects of coating the conductive metal with an additional layer of material. For this study, a simplified MATLAB code was developed and used to model the problem. The calculations reveal how the construction parameters affect the performance of the panel. Finally, the conclusions resulting from the literature review and computational study are presented, as well as suggestions are made for the construction and operational parameters of the panel in order to optimize performance.

Key words: hydronic panels, radiation, heating, cooling, air conditioning, computational model

Παράρτημα Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vii
Παράρτημα Περιεχομένων	viii
Παράρτημα Πινάκων	x
Παράρτημα Εικόνων	xi
Παράρτημα Διαγραμμάτων	xiv
Ακρωνύμια	xv
Ονοματολογία	xvii
Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Ιστορική αναδρομή και παρούσα κατάσταση	1
1.2 Κίνητρο και στόχοι διπλωματικής	5
1.3 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	5
Κεφάλαιο 2. Υδραυλικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία	7
2.1 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία	7
2.2 Αρχή λειτουργίας	8
2.3 Κατηγορίες και τύποι συστημάτων	12
2.3.1 Θερμικά - ενεργά κτίρια (TABS)	13
2.3.2 Ενσωματωμένα συστήματα στην επιφάνεια της δομής	14
2.3.3 Πάνελ ακτινοβολίας	15
2.3.4 Διάταξη σωλήνων	16
2.4 Δομικά υλικά των πάνελ ακτινοβολίας	19
2.4.1 Δομικά υλικά σωλήνων	19
2.4.2 Δομικά υλικά πλάκας	21
2.4.3 Δομικά υλικά επιπρόσθετης επιφάνειας	23

2.4.4	Δομικά υλικά μόνωσης	23
2.5	Σύστημα ελέγχου	25
2.5.1	Ρυθμιστικά εξαρτήματα	26
2.6	Αξιολόγηση συστημάτων ακτινοβολίας	29
2.6.1	Εξοικονόμηση ενέργειας	29
2.6.2	Θερμική Άνεση	31
2.6.3	Πρόβλημα συμπύκνωσης	34
2.6.4	Προβλήματα θορύβου	36
2.7	Κόστος Συστήματος	36
2.8	Εφαρμογές	38
Κεφάλαιο 3.	Μεταφορά θερμότητας σε πάνελ οροφής για ψύξη με ακτινοβολία	42
3.1	Μικτή συναγωγή	42
3.2	Ανάλυση μεταφοράς θερμότητας στο CRCP	43
3.3	Περιγραφή κώδικα MATLAB	49
Κεφάλαιο 4.	Ανάλυση Παραμέτρων	51
4.1	Χαρακτηριστικά πάνελ	51
4.1.1	Επίδραση Πάχους της επιπλέον επιφάνειας	51
4.1.2	Επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας της επιπλέον επιφάνειας του πάνελ στην απόδοση	53
4.1.3	Επίδραση απόστασης των σωλήνων στην απόδοση	56
4.1.4	Επίδραση του πάχους της κύριας επιφάνειας του πάνελ στην απόδοση	58
Κεφάλαιο 5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	59
	Βιβλιογραφία	61
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	65

Παράρτημα Πινάκων

Πίνακας 2-1 Θερμική αγωγιμότητα υλικών που χρησιμοποιούνται συχνά ως μονωτικό υλικό σε πάνελ οροφής (https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html).....	24
Πίνακας 2-2 Παράμετροι που επηρεάζουν την θερμική άνεση	32
Πίνακας 4-1 Σταθερές στον Κώδικα MATLAB	51
Πίνακας 4-2 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων υλικών επιπλέον επιφάνειας	55

Παράρτημα Εικόνων

Εικόνα 1-1 Απεικόνιση ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης ‘ondol’	4
Εικόνα 1-2 Από πάνω αριστερά (i) Bangko International Airport (Thailand). (ii) NREL Research Support Facility. (iii) Manitoba Hydro (Winnipeg, MB, Canada). (iv) David Brower Center (Berkeley, California). (v) Water - Life Museum (Hemet, California). (vi).....	4
Εικόνα 2-1 Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	8
Εικόνα 2-2 Πάνελ οροφής: α) υδραυλικό (αριστερά) β) με ηλεκτρικές αντιστάσεις (δεξιά) (https://www.frenger.co.uk/products.php)	9
Εικόνα 2-3 Ενδεικτικό σχέδιο πτυσσόμενο υδραυλικού πάνελ οροφής της εταιρείας Frenger (https://www.frenger.co.uk/pdfs/ecostrip-v2.3.pdf).....	10
Εικόνα 2-4 Περιοχές υψηλής απόδοσης συναρτήσει του ύψους που τοποθετείται το κρεμάμενο πάνελ οροφής	11
Εικόνα 2-5 Τα σώματα απορροφούν θερμότητα κατευθείαν από το πάνελ (https://www.bekaklima.de/en/cooling-ceilings/).....	11
Εικόνα 2-6 Τα σώματα φτάνουν στην επιθυμητή θερμοκρασία με τον αέρα να βρίσκεται κατά 2-4 οC χαμηλότερα (https://www.international.zehndersystems.com/download/4683/18117/20065.pdf)	12
Εικόνα 2-7 α) Τα σώματα φτάνουν στην επιθυμητή θερμοκρασία με τον αέρα να βρίσκεται κατά 2-4 οC χαμηλότερα (https://www.international.zehndersystems.com/download/4683/18117/20065.pdf)	13
Εικόνα 2-8 Embedded Surface System (Feng, Schiavon and Bauman, 2013).....	14
Εικόνα 2-9 Σωλήνες εντός του σκυροδέματος (https://www.uponor.co.uk/products/ceiling-heating-and-cooling/tabs).....	14
Εικόνα 2-10 Σχηματική απεικόνιση της θέσης των σωλήνων στα TABS (Feng, Schiavon and Bauman, 2013)	14
Εικόνα 2-11 Embedded surface system σε οροφή, τοίχο και δάπεδο (Kazanci, Berk, ; Olesen and Kolarik, 2016)	15
Εικόνα 2-12 Σχηματική απεικόνιση Radiant Ceiling Panel (Feng, Schiavon and Bauman, 2013)	15
Εικόνα 2-13 Μεταλλικό πάνελ οροφής χωρίς μόνωση με σωλήνες χαλκού (μοντέλο GKCU της εταιρείας Emco-klima)	15

Εικόνα 2-14	λλικό πάνελ οροφής με μόνωση (της εταιρείας Zehnder)	16
Εικόνα 2-15	μεταλλικό πάνελ οροφής με σωλήνες παράλληλης ροής (σχέδιο της εταιρείας Zehnder)	17
Εικόνα 2-16	Υδραυλικό πάνελ οροφής με παράλληλη ροή για θέρμανση/ψύξη σε αθλητικές εγκαταστάσεις.....	17
Εικόνα 2-17	Διάταξη σωλήνων σε μορφή σερπαντίνας (http://www.solar365.com/greenhomes/plumbing/layout-patterns-radiant-floortubing)	18
Εικόνα 2-18	Δωμάτιο με υδραυλικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανση με σωλήνες σε διάταξη σερπαντίνας (http://www.nutechrenewables.com/air-source-heatpump-underfloor-heating-install-armagh/).....	18
Εικόνα 2-19	α) μεταλλικό πάνελ οροφής με σωλήνες χαλκού σε διάταξη σερπαντίνας (https://www.bekaklima.de/en/heating-cooling/copper-pipe-technology/)	20
Εικόνα 2-20	Σωλήνες χαλκού σε διάφορα μεγέθη	20
Εικόνα 2-21	Πάνελ πολυστυρενίου με εξοχές για εύκολη τοποθέτηση σωλήνων PEX (https://www.amvicsystem.com/products/ampex/)	21
Εικόνα 2-22	Έγχρωμοι σωλήνες PEX για διαχωρισμό θερμού (κόκκινοι σωλήνες) και ψυχρού (μπλε σωλήνες) ρεύματος, και λευκοί σωλήνες σε περίπτωση που δεν επιθυμούμε σωλήνες με διαφορετικά χρώματα	21
Εικόνα 2-23	Δομικά υλικά πλάκας που συναντώνται στο εμπόριο (http://www.wattsradiant.com/products/flexplate/), (https://www.archiproducts.com/en/products/radiant-ceilingpanels), (https://www.amvicsystem.com/products/ampex/)	22
Εικόνα 2-24	Πάνελ οροφής α)ανοικτού και β)κλειστού τύπου (Mumma, 2001).....	23
Εικόνα 2-25	Υλικά μόνωσης πάνελ i) Fiberglass, ii)Rockwool, iii)Polyethylene foam, iv) XPS σε πλάκα για επιδαπέδια θέρμανση/ψύξη	24
Εικόνα 2-26	Πάνελ Οροφής με μόνωση από υαλοβάμβακα (μοντέλο EcoStrip της εταιρείας Frenger) (https://www.frenger.co.uk/pdfs/ecostrip-v2.3.pdf)	25
Εικόνα 2-27	Βασικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου σε εφαρμογές ενδοδαπέδιας θέρμανσης (ISO 11855-6, 2012).....	27
Εικόνα 2-28	Υδραυλικό manifold της εταιρείας Uronor	28
Εικόνα 2-29	Παράδειγμα σωλήνων PEX και σωλήνων χαλκού συνδεδεμένα σε manifolds ..	28

Εικόνα 2-30 Η ψύξη του κτιρίου που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας διατηρείται το βράδυ λόγω της μεγάλης θερμικής μάζας του κτιρίου και με την βοήθεια του ψυχρότερου αέρα των βραδινών ωρών και του ψυχρού νερού που αντλείται από το έδαφος (Bjarne W. Olesen, 2012).....	30
Εικόνα 2-31 Καμπύλη θερμοκρασίας-ύψους δωματίου i) ενδοδαπέδια θέρμανση, ii) ακτινοβόλο πάνελ οροφής, iii) σύστημα θέρμανσης αέρα με χαμηλή ταχύτητα παροχής, iv) σύστημα θέρμανσης αέρα με υψηλή ταχύτητα παροχής (CIBSE, 2006).....	33
Εικόνα 2-32 Διάγραμμα θερμοκρασίας-ύψους δωματίου για διάφορα συστήματα θέρμανσης (Olesen, 2002)	33
Εικόνα 2-33 Σύγκριση θερμοκρασιακής κατανομής στον χώρο ανάμεσα σε σύστημα θέρμανσης με ακτινοβολία(αριστερά) και με συναγωγή(δεξιά) (https://www.international.zehndersystems.com/download/4683/18117/20065.pdf)	34
Εικόνα 2-34 Ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης με ακτινοβολία συνδυασμένο με σύστημα αερισμού για έλεγχο της υγρασίας (Seo, Song and Lee, 2014).....	35
Εικόνα 2-35 Software Development Block 1 (Hyderabad, India)	37
Εικόνα 2-36 Κάτοψη κτιρίου SDB-1 Αριστερά: σύστημα ψύξης VAV, Δεξιά: υδραυλικό σύστημα ψύξης με ακτινοβολία (Guruprakash Sastry et al., 2014)	38
Εικόνα 2-37 Hunter Museum of American Art (Chattanooga, Tennessee)	38
Εικόνα 2-38 City center Crystals (Las Vegas, Nevada)	39
Εικόνα 2-39 UC Davis Business school	39
Εικόνα 2-40 New Reading (England) train station	40
Εικόνα 2-41 Bangkok international airport (radiant floor cooling).....	40
Εικόνα 2-42 Bandimere Speedway (Arvada,Colorado) Radiant cooling system to absorb heat	41
Εικόνα 2-43 Ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης για αποφυγή πάγου στους δρόμους	41
Εικόνα 3-1 Γεωμετρία CRCP (Jeong and Mumma, 2003).....	43
Εικόνα 3-2 Σκαρίφημα του πάνελ μαζί με επιπλέον επιφάνεια στο κάτω μέρος του	46
Εικόνα 3-3 Διακριτοποιημένο πλέγμα	48
Εικόνα 4-1 Κατανομή θερμοκρασίας στην περιοχή γύρω από σωλήνα σε πάνελ οροφής για ψύξη με ακτινοβολία	56

Παράρτημα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4-1 Πάχος επιπλέον επιφάνειας – Θερμοκρασία Πάνελ	54
Διάγραμμα 4-2 Πάχος επιπλέον επιφάνειας - Ισχύς πάνελ	54
Διάγραμμα 4-3 Απόσταση μεταξύ σωλήνων - Θερμοκρασία Πάνελ	55
Διάγραμμα 4-4 Απόσταση μεταξύ σωλήνων - Ισχύς πάνελ	56
Διάγραμμα 4-5 Θερμική αγωγιμότητα σωλήνων - Θερμοκρασία Πάνελ	57
Διάγραμμα 4-6 Θερμική αγωγιμότητα σωλήνων - Ισχύς πάνελ	57
Διάγραμμα 4-7 Πάχος κύριας επιφάνειας πάνελ - Ισχύς πάνελ	58

Ακρωνύμια

A/C	Air-Conditioning	Κλιματισμός αέρα
ACH	Air Changer per Hour	Ανανέωση του αέρα ανά ώρα
CRCP	Ceiling Radiant Cooling Panel	Πάνελ οροφής για ψύξη με ακτινοβολία
DOAS	Dedicated Outdoor Air Systems	Συστήματα εξωτερικού αέρα
FC	Forced Convection	Εξαναγκασμένη συναγωγή
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning	Θέρμανση, αερισμός και κλιματισμός αέρα
MC	Mixed Convection	Μικτή συναγωγή
MDF	Medium Density Fiberboard	Ινόπλακα μέτριας πυκνότητας
MXV	Mixing Valve	Βαλβίδα ανάμιξης
NC	Natural Convection	Φυσική Συναγωγή
PEX	Cross-linked Polyethylene	Πολυαιθυλένιο με διασταυρωμένους δεσμούς
RHC	Radiant Heating and Cooling	Θέρμανση και ψύξη με ακτινοβολία

SOV	Shut Off Valve	Βαλβίδα διακοπής
TABS	Thermally Active Building Systems	Θερμικά-ενεργά κτίρια
TER	Total Energy Recovery	Ανάκτηση ολικής ενέργειας
VAV	Variable Air Volume systems	Συστήματα μεταβλητής έντασης αέρα

Ονοματολογία

Ap	Επιφάνεια Πάνελ	(m²)
AUST	Μέση θερμοκρασία επιφανειών του χώρου	(°C)
Cp	Ειδική θερμότητα του ρευστού	(kJ/kgK)
De	Χαρακτηριστική διάμετρος δωματίου (4Ac/Pc)	(m)
D	Διάμετρος σωλήνων	(m)
hi	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ ρευστού και σωλήνα	(W/m²K)
h	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	(W/m²K)
k	Θερμική αγωγιμότητα	(W/mK)
M	Ρυθμός μαζικής ροής ρευστού στο πάνελ	(kg/s)
n	Αριθμός σωλήνων	
dx	Μήκος τμήματος, στο διακριτοποιημένο πλέγμα	(m)
dy	Μήκος τμήματος, στο διακριτοποιημένο πλέγμα	(m)

q	Ροή θερμότητας στο πάνελ	(W/m)
T	Θερμοκρασία	(°C)
U_0	Συνολικός συντελεστής μεταφοράς Θερμότητας για το πάνελ	(W/m ² K)
V	Ταχύτητα εξόδου αέρα από τον αεραγωγό	(m/s)
W	Πλάτος αεραγωγού	(m)
L	Απόσταση μεταξύ των σωλήνων	(m)
N_0	Σημείο στη μέση του διακριτοποιημένου πλέγματος	
N_x	Πλήθος σημείων στην x -κατεύθυνση του διακριτοποιημένου πλέγματος	
N_y	Πλήθος σημείων στην y -κατεύθυνση του διακριτοποιημένου πλέγματος	
δ	Πάχος πάνελ	(m)

ΔΕΙΚΤΕΣ

a Αέρας (air)

b Υλικό συγκόλλησης (bond), βάση πτερυγίου (fin base)

c Συναγωγή (convection)

f Εξαναγκασμένη (forced) , ρευστό(fluid)

fin Πτερύγιο

metal Κύρια επιφάνειας πάνελ

l Πρόσθετη επιφάνεια πάνελ

c Σημείο επαφής των δύο επιφανειών

m Μέσος (mean)

n Φυσική (natural)

o Σημείο, στην μέση του πλέγματος

p Πάνελ (panel)

r Ακτινοβολία (radiation)

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

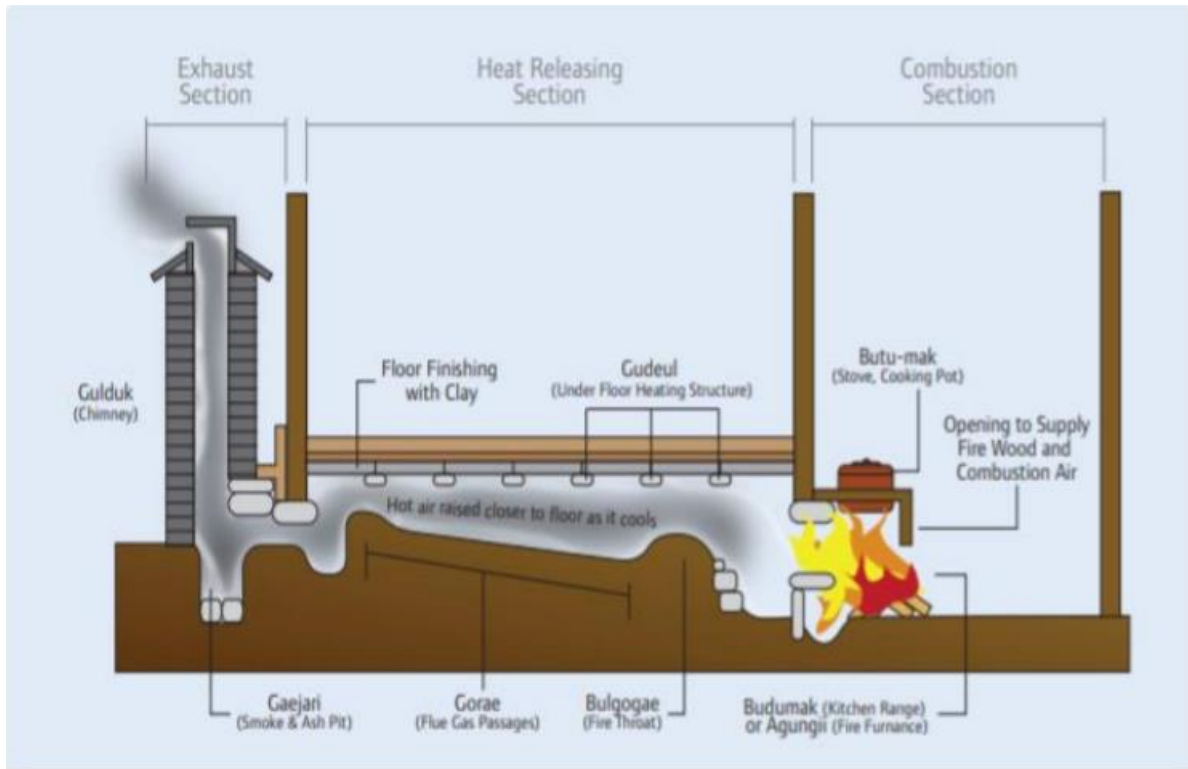
1.1 Ιστορική αναδρομή και παρούσα κατάσταση

Ο κλιματισμός, δηλαδή η ρύθμιση της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της κίνησης και της καθαρότητας του αέρα ενός χώρου ώστε να επιτευχθεί θερμοκρασιακή άνεση, είναι ένα πεδίο που απασχολεί την ανθρωπότητα ήδη από τα αρχαία χρόνια. Οι πρώτες εφαρμογές έγιναν με χρήση απλοϊκών μέσων όπως πχ. σε μοτίβα κατασκευών στην αρχαία Ελλάδα, που συνδύαζαν ενισχυμένους τοίχους και μικρά ανοίγματα στη βόρεια όψη με χρήση κατάλληλων δέντρων (αιθαλών στα βόρεια, φυλλοβόλων στα νότια και δυτικά της οικίας). Έπειτα άρχισαν να χρησιμοποιούνται πρώιμοι ανεμιστήρες καθώς και άλλα συστήματα που εκμεταλλεύονταν την εξάτμιση νερού ως ψυκτικό μέσο (Akbari, H. and Pomerantz, M., 2001).

Όσον αφορά τα συστήματα θέρμανσης με ακτινοβολία, η βασική ιδέα πίσω από τη χρήση τους δεν είναι κάτι πρωτοποριακό για τον άνθρωπο, αλλά εντοπίζεται για πρώτη φορά πριν χιλιάδες χρόνια στην αρχαία Κίνα. Οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν ένα δίκτυο σωληνώσεων, για να εκμεταλλευτούν τα ζεστά καυσαέρια της φωτιάς που άναβαν για μαγείρεμα, ώστε να θερμάνουν μια πλατφόρμα (kang), αποτελούμενη από πηλό ή τούβλα. Έπειτα η συγκεκριμένη πλατφόρμα θα χρησιμοποιούνταν στην θέρμανση του χώρου, σε διάφορες εργασίες, αλλά ακόμα και ως θερμαινόμενο κρεβάτι (Bean, R., Olesen, B. W. and Kim, K. W. (2010). Στην Κορέα το 1000 π.Χ. εμφανίστηκε για πρώτη φορά ένα σύστημα που φέρει χαρακτηριστικές ομοιότητες με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα για θέρμανση και ψύξη με ακτινοβολία. Το ondol όπως ονομάστηκε ήταν ένα ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης. Λειτουργούσε εκμεταλλευόμενο την εκπεμπόμενη θερμότητα της φωτιάς, που χρησιμοποιούνταν για διάφορες εργασίες, όπως μαγείρεμα, με σκοπό να θερμάνει άμεσα τον αέρα που περνούσε κάτω από το πάτωμα της οικίας και έμμεσα τον εσωτερικό της χώρο. Μέσα στην πάροδο των χρόνων και άλλοι λαοί, μεταξύ των οποίων Ρωμαίοι και Έλληνες,

δημιούργησαν τα δικά τους συστήματα θέρμανσης με ακτινοβολία με διάφορες παραλλαγές αλλά διατηρώντας πάντα τις ίδιες βασικές αρχές. Στην αρχαία Ρώμη μάλιστα ανακαλύφθηκε το πρώτο σύστημα ψύξης με τη βοήθεια κυκλοφορίας νερού μέσα από σωληνώσεις στους τοίχους. Στη μεταγενέστερη εποχή χρησιμοποιήθηκαν διάφορες εκδοχές των συστημάτων, με μερικά από αυτά να αποτελούν ορόσημα για την επίτευξη της σημερινή κατάσταση των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία (Bean, B. W. Olesen and Kim, 2010). Το 1600, στη Γαλλία ξεκινάει η χρήση θέρμανσης με αγωγούς σε δάπεδα και τοίχους σε θερμοκήπια. Ο Βενιαμίν Φραγκλίνος (1700 μ.Χ.) ύστερα από μελέτη των γαλλικών και κορεάτικων συστημάτων θέρμανσης προχωρά στη δημιουργία της πρώτης θερμάστρας που λειτουργούσε με μεταφορά αέρα. Το 1800, γίνονται πρωτοποριακές αλλαγές σε μπόιλερ και ξεκινούν οι μελέτες σχετικά με τη θερμική αγωγιμότητα των υλικών, τη θερμοχωρητικότητα τους καθώς και τον ρόλο που παίζει η ανακλασιμότητα των επιφανειών. Το 1864, συστήματα όμοια με τα κορεάτικα ondoi χρησιμοποιούνται ευρέως σε νοσοκομεία της Βόρειας Αμερικής κατά τη διάρκεια του εμφυλίου πολέμου. Ο καθηγητής Barker, το 1907, πατεντάρει τα θερμαινόμενα πάνελ με τη χρήση σωλήνων και με τη βοήθεια της εταιρείας Crittal ξεκινάει η εγκατάσταση τους σε κτήρια σε όλη την Αγγλία. Στα τέλη του 1940 στις ΗΠΑ γίνεται εγκατάσταση χιλιάδων συστημάτων ενδοδαπέδιας θέρμανσης που χρησιμοποιούσαν χάλκινους ή ατσάλινους σωλήνες. Παρόλο που τα συστήματα ήταν πλήρως λειτουργικά εμφανίστηκαν ορισμένα προβλήματα. Τα πρώτα συστήματα ψύξης αποτυγχάνουν κατά κύριο λόγο εξαιτίας της εμφάνισης φαινομένων συμπύκνωσης. Το συγκεκριμένο πρόβλημα αποτελεί μέχρι και σήμερα το βασικότερο μειονέκτημα των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία, ωστόσο είναι δυνατόν να ξεπεραστεί με την συνδυαστική χρήση ενός συστήματος για πιο έντονη κυκλοφορία του αέρα. Επιπλέον, στα συστήματα θέρμανσης δαπέδου της εποχής παρουσιάζεται το πρόβλημα της χημικής ασυμβατότητας με το τσιμέντο. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την αδυναμία εύρεσης διαρροών στο σύστημα λόγω του τρόπου κατασκευής οδήγησε το καταναλωτικό κοινό μακριά από την ενδοδαπέδια θέρμανση. Το τελειωτικό χτύπημα ήταν η άφιξη των συστημάτων κλιματισμού του αέρα (A/C), το 1960, τα οποία και εδραιώθηκαν ακαριαία ως πρώτη επιλογή στις εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης. Τα υδραυλικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία επανέρχονται δυναμικά στο προσκήνιο όταν ο Thomas Engel, το 1968, με μια εξαιρετικά καινοτόμο ιδέα έφερε την επανάσταση στα υλικά σωληνώσεων με τη δημιουργία του

διασταυρωμένου πολυαιθυλενίου (PEX). Το PEX αποτελείται από πολυαιθυλένιο με μεσαία έως υψηλή πυκνότητα και περιέχει διασταυρούμενους (cross-link) δεσμούς που εισάγονται στη δομή του πολυμερούς, αλλάζοντάς το από θερμοπλαστικό σε θερμοσκληρυνόμενο. Οι ιδιότητες υψηλής θερμοκρασίας του πολυμερούς βελτιώνονται, η ροή του μειώνεται και η χημική του αντίσταση αυξάνεται. Την επόμενη χρονιά από τη δημιουργία του, η σουηδική Wirsbo έβγαλε σε μαζική παραγωγή σωλήνες από PEX φέρνοντας επανάσταση στα υδραυλικά συστήματα της εποχής, παρέχοντας μια εξαιρετική εναλλακτική στους σωλήνες από χαλκό με σημαντική μείωση στο αρχικό κόστος. Με την πάροδο του χρόνου άρχισαν να παρουσιάζονται περισσότερες επιλογές στο καταναλωτικό κοινό. Το 1980, δημιουργούνται στην Ευρώπη οι πρώτες προδιαγραφές για συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης και μέσα σε λίγα χρόνια καθιερώνεται ως ένας από τους πλέον διαδεδομένους τρόπους θέρμανσης στην Κεντρική Ευρώπη καθώς και στις Σκανδιναβικές χώρες. Παράλληλα, υδραυλικά συστήματα με θέρμανση νερού, τύπου ondo1, εγκαθίστανται στη μεγάλη πλειονότητα των αστικών κέντρων της Κορέας. Μέσα από την παραπάνω διαδρομή, τα συστήματα θέρμανσης με ακτινοβολία έφτασαν να θεωρούνται, στη σημερινή εποχή, μια από τις πιο αποδοτικές και αξιόπιστες επιλογές όσον αφορά τον τρόπο θέρμανσης παγκοσμίως. Πλέον, τόσο το καταναλωτικό κοινό όσο και οι μεγάλες κατασκευαστικές εταιρείες έχουν τη δυνατότητα να επιλέξουν μέσα από έναν διευρυμένο κατάλογο διαφορετικών τύπων συστημάτων θέρμανσης που βρίσκουν εφαρμογή από απλές κατοικίες έως ευφάνταστα και υπερσύγχρονα κτίρια, καλύπτοντας πάντα τις ανάλογες ανάγκες. Σήμερα, η αλματώδης πρόοδος που έχει σημειωθεί στις τεχνολογίες των παραπάνω συστημάτων επέτρεψε να ξεπεραστούν οι περιορισμοί του παρελθόντος και να καταστήσουν τα συστήματα θέρμανσης με ακτινοβολία μια παγκόσμια λύση ανεξαρτήτως κλίματος. (Feng, 2014)



Εικόνα 1-1 Απεικόνιση ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης 'ondol'



Εικόνα 1-2 Από πάνω αριστερά (i) Bangkok International Airport (Thailand). (ii) NREL Research Support Facility. (iii) Manitoba Hydro (Winnipeg, MB, Canada). (iv) David Brower Center (Berkeley, California). (v) Water - Life Museum (Hemet, California). (vi)

1.2 Κίνητρο και στόχοι διπλωματικής

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η μελέτη και ανάλυση των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία, με σκοπό την παρουσίαση παρατηρήσεων σχετικά με την λειτουργία τους. Εκπονήθηκε εκτενής βιβλιογραφική μελέτη σχετικά με τις αρχές που διέπουν την αποτελεσματική λειτουργία τους καθώς και των βασικών φαινομένων μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα. Αρχικά παρουσιάζονται τα πρώιμα στάδια θέρμανσης με ακτινοβολία που χρησιμοποιούνταν στην αρχαιότητα, την εξέλιξη που είχαν στο πέρασμα των χρόνων ως την κατάληξη στην κατάσταση που επικρατεί στην σημερινή εποχή. Γίνεται αναλυτική επεξήγηση της βασικής λειτουργίας, περιγραφή των πιο διαδεδομένων τύπων που συναντώνται, τα δομικά τους υλικά, τις σύγχρονες εφαρμογές καθώς και τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων μεθόδων θέρμανσης και ψύξης. Στη συνέχεια γίνεται λεπτομερής ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση των CRCP (Ceiling Radiant Cooling Panel), για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι διαγραμμάτων.

1.3 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Η μελέτη που εκπονήθηκε στην παρούσα πτυχιακή παρουσιάζεται σε 5 κεφάλαια ως εξής:

Το *Κεφάλαιο 1* περιέχει την εισαγωγή της διπλωματικής, η οποία ξεκινά με μια ιστορική αναδρομή των συστημάτων θέρμανσης με ακτινοβολία, συνεχίζει με τους στόχους που τέθηκαν στο ξεκίνημα αυτής της διπλωματικής και τελειώνει με τη σύνοψη της.

Το *Κεφάλαιο 2* περιέχει τη βασική αρχή λειτουργίας, τύπους συστημάτων, συνήθη υλικά κατασκευής, εφαρμογές στη σημερινή εποχή, ανάλυση του κόστους καθώς και πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα συστήματα.

Το *Κεφάλαιο 3* περιέχει την ανάπτυξη ενός μοντέλου μεταφοράς θερμότητας για την μελέτη του πάνελ σε λειτουργία ψύξης. Γίνεται επεξήγηση τόσο των εξισώσεων που καταστρώθηκαν, όσο και του υπολογιστικού κώδικα που δημιουργήσαμε στο πρόγραμμα MATLAB.

Στο *Κεφάλαιο 4* γίνεται σχολιασμός των λειτουργικών και κατασκευαστικών παραμέτρων του CRCP, ενώ μέσω διαγραμμάτων που προέκυψαν από τον κώδικα εξετάζεται η επιρροή τους στη συνολική απόδοση του πάνελ.

Το *Κεφάλαιο 5* περιέχει προτάσεις όσον αφορά τη βελτιστοποίηση λειτουργίας, καθώς και μια ανακεφαλαίωση των σημαντικότερων σημείων της πτυχιακής.

Κεφάλαιο 2. Υδραυλικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία

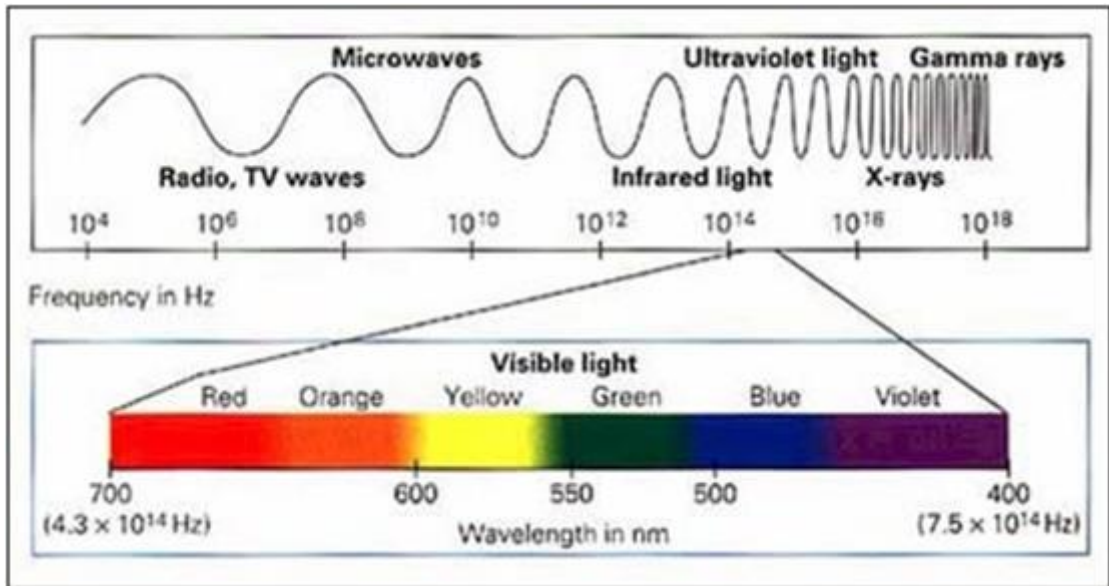
2.1 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Εκτός από τον μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή που συναντάται κυρίως στα παραδοσιακά συστήματα θέρμανσης με αέρα, υπάρχει και η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία. Η ακτινοβολία εκπέμπεται από κάθε σημείο μιας επίπεδης επιφάνειας

Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία σε αντίθεση με την μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή μπορεί να συμβεί χωρίς την ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου. Επίσης είναι πιο γρήγορη καθώς γίνεται με την ταχύτητα του φωτός και δεν υπάρχει εξασθένιση. Η μεταφορά θερμότητας με τον μηχανισμό της ακτινοβολίας μπορεί να συμβεί σε υγρά, αέρια και στερεά. Συνήθως στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης συναντάμε έναν συνδυασμό των τριών μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία). Όμως στο κενό, δηλαδή όταν δεν υπάρχει υλικό μέσο, η μεταφορά θερμότητας μπορεί να λάβει χώρα μόνο με ακτινοβολία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ηλιακή ενέργεια.

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή συμβαίνει πάντα προς την κατεύθυνση μείωσης της θερμοκρασίας, δηλαδή από ένα μέσο με υψηλή προς κάποιο μέσο με χαμηλότερη θερμοκρασία. Αντιθέτως η ακτινοβολία εκπέμπεται από ένα μέσο σε κάποιο άλλο χωρίς απαραίτητα να ακολουθεί την κατεύθυνση μείωσης της θερμοκρασίας. Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί πάλι ως παράδειγμα, λόγω του ότι η ενέργεια που μεταφέρεται από τον ήλιο περνά από κρύα στρώματα σε υψηλά υψόμετρα που έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτήν της γης.

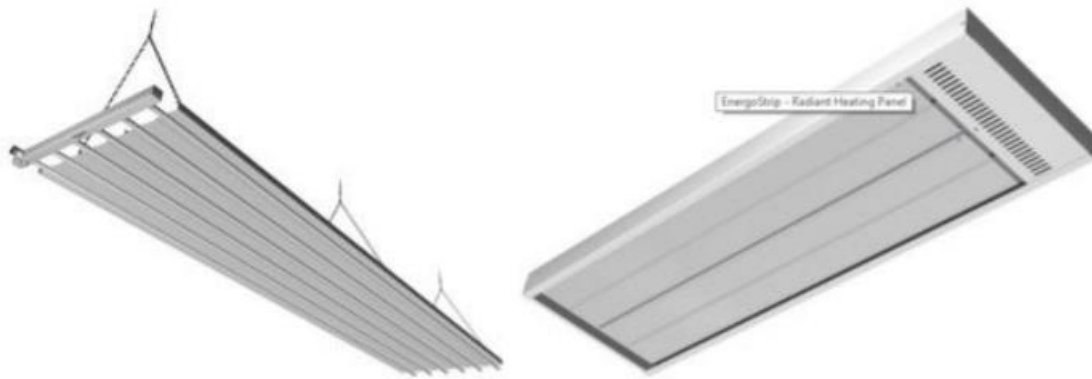
Η θεμελίωση της θεωρίας της ακτινοβολίας έγινε από τον Maxwell. Η θερμική ακτινοβολία είναι το είδος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που σχετίζεται με την μεταφορά θερμότητας.



Εικόνα 2-1 Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

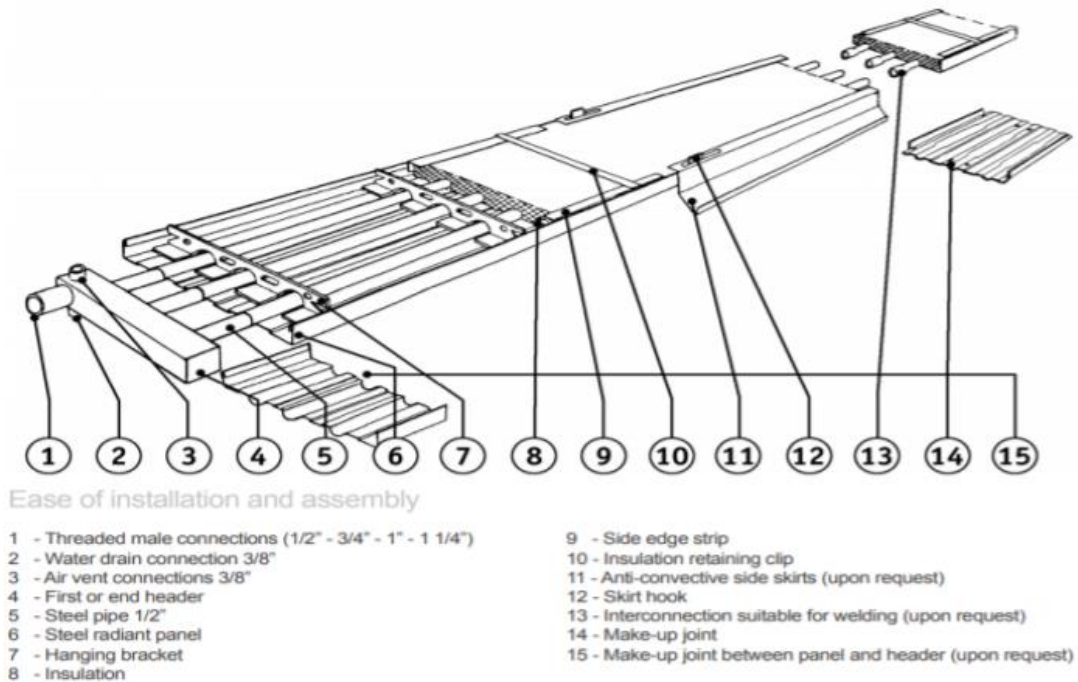
2.2 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας των CRCP βασίζεται σε επιφάνειες που ορίζουμε την θερμοκρασία τους μέσω των οποίων πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας με το περιβάλλον. Οι επιφάνειες αυτές μπορούν να βρίσκονται στο πάτωμα στον τοίχο και στο ταβάνι. Στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης όπως προαναφέρθηκε συναντάμε έναν συνδυασμό των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας, προϋπόθεση για να θεωρήσουμε ένα πάνελ ακτινοβόλο είναι να καλύπτει περισσότερο από το 50% της συνολικής μεταφερόμενης θερμικής ενέργειας (ASHRAE, 2012). Τα συστήματα αυτά είναι υδραυλικά δηλαδή το μέσο που μεταφέρει την θερμική ενέργεια είναι το νερό, σε αντίθεση με άλλα που χρησιμοποιούν ή το ρεύμα (ηλεκτρικές αντιστάσεις για θέρμανση) ή τον αέρα (air condition).



Εικόνα 2-2 Πάνελ οροφής: α) υδραυλικό (αριστερά) β) με ηλεκτρικές αντιστάσεις (δεξιά)
(<https://www.frenger.co.uk/products.php>)

Τα υδραυλικά συστήματα CRCP αποτελούνται από μια λεπτή πλάκα πάνω από την οποία τοποθετείται διάταξη σωλήνων οι οποίοι φέρουν το μέσο μεταφοράς θερμικής ενέργειας δηλαδή το νερό. Πίσω από του σωλήνες μπορεί να τοποθετηθεί μόνωση για να μην έχουμε έντονες θερμικές απώλειες. Το νερό εισέρχεται στον σωλήνα από την μία άκρη της πλάκας και εξέρχεται από την άλλη άκρη της πλάκας, στην συνέχεια το νερό αυτό εισέρχεται στην επόμενη πλάκα.



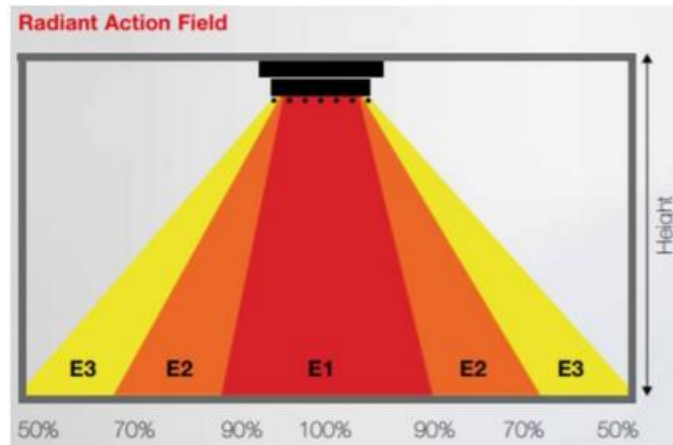
Εικόνα 2-3 Ενδεικτικό σχέδιο πτυσσόμενο υδραυλικού πάνελ οροφής της εταιρείας Frenger (<https://www.frenger.co.uk/pdfs/ecostrip-v2.3.pdf>)

Η επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας του πάνελ είναι σημαντική καθώς καθορίζει την αποτελεσματικότητα με την οποία μεταφέρεται η θερμότητα. Στην περίπτωση της ψύξης εισέρχεται στους σωλήνες κρύο νερό το οποίο ψύχει την πλάκα. Η πλάκα λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας που αποκτά απορροφά θερμότητα μέσω ακτινοβολίας από τα σώματα του χώρου με αποτέλεσμα να ανέβει η θερμοκρασία αυτής καθώς και του νερού και να επιτυγχάνεται η μείωση της θερμοκρασίας των σωμάτων του χώρου. Αντίθετα στην θέρμανση εισέρχεται στους σωλήνες ζεστό νερό το οποίο θερμαίνει την πλάκα. Η πλάκα εκπέμπει θερμότητα στα σώματα του χώρου, με αποτέλεσμα τα ψυχρότερα σώματα να απορροφούν την εκπεμπόμενη ακτινοβολία και να θερμαίνονται.

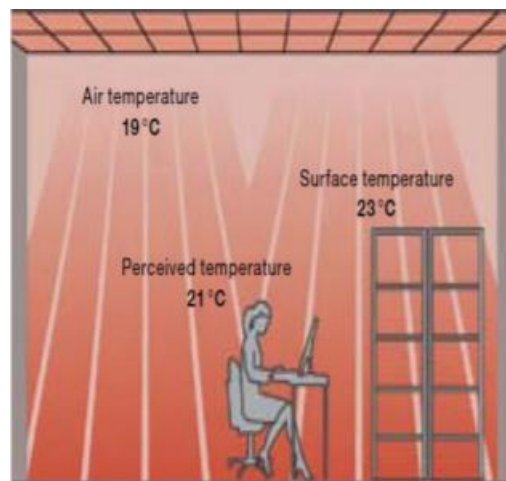
Τα συστήματα που χρησιμοποιούν τον μηχανισμό της ακτινοβολίας για την μεταφορά της θερμικής ενέργειας δεν χρειάζονται κάποιο μέσο (αέρας) για να θερμαίνουν τα σώματα του χώρου. Έτσι όλη η μεταφερόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται για την θέρμανση των σωμάτων και όχι του αέρα (Kazanci, Berk, ; Olesen and Kolarik, 2016). Ενδεικτικό παράδειγμα είναι ότι ένα σύστημα RHC μπορεί να παρέχει το ίδιο επίπεδο θερμικής άνεσης με ένα σύστημα

κλιματισμού με αέρα HVAC (Heating, Ventilation and Air-Conditioning) με την θερμοκρασία του αέρα στον χώρο να είναι κατά 2-4 °C βαθμούς χαμηλότερη (Hao et al., 2007).

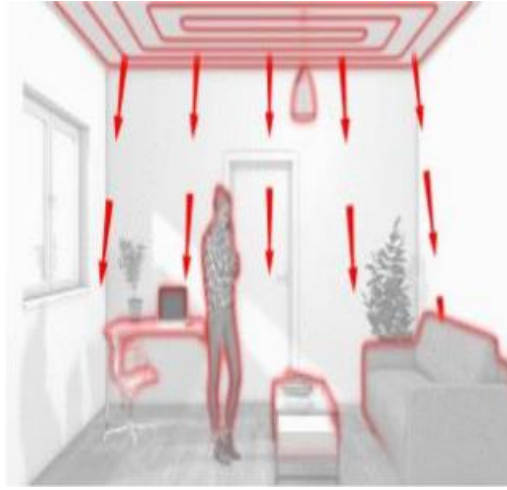
Η θερμική ενέργεια ακτινοβολείται από το πάνελ σε ευθεία διεύθυνση. Από τα παρακάτω σχήμα γίνεται εμφανές ότι τα σώματα του χώρου που βρίσκονται ακριβώς απέναντι από την ακτινοβολούμενη επιφάνεια απορροφούν μεγαλύτερα ποσοστά θερμικής ενέργειας. Επίσης σε πάνελ οροφής όσο πιο ψηλά βρίσκεται τόσο μεγαλύτερος είναι ο χώρος που έχουμε υψηλή απόδοση.



Εικόνα 2-4 Περιοχές υψηλής απόδοσης συναρτήσει του ύψους που τοποθετείται το κρεμάμενο πάνελ οροφής



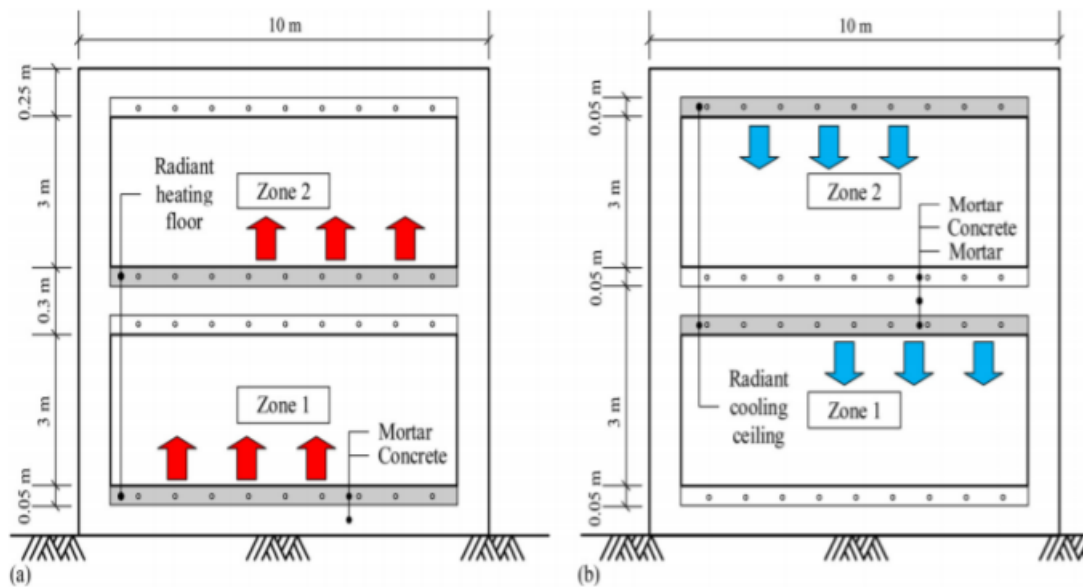
Εικόνα 2-5 Τα σώματα απορροφούν θερμότητα κατευθείαν από το πάνελ (<https://www.bekaklima.de/en/cooling-ceilings/>)



Εικόνα 2-6 Τα σώματα φτάνουν στην επιθυμητή θερμοκρασία με τον αέρα να βρίσκεται κατά 2-4 οC χαμηλότερα (<https://www.international.zehndersystems.com/download/4683/18117/20065.pdf>)

2.3 Κατηγορίες και τύποι συστημάτων

Ανάλογα με τον εκάστοτε χώρο που θέλουμε να εφαρμόσουμε σύστημα θέρμανσης και ψύξης, ανάλογα με τα αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά του χαρακτηριστικά, αλλά και την προτίμηση του κάθε χρήστη επιλέγουμε το κατάλληλο σύστημα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία. Μπορούν να τοποθετηθούν στου τοίχους των κτιρίων, στην οροφή, στο πάτωμα. Αν και όλα τα υδραυλικά συστήματα RHC μπορούν να λειτουργήσουν και για θέρμανση και για ψύξη ανάλογα με το αν θα τροφοδοτηθούν με θερμό ή ψυχρό νερό, συνηθίζουμε για θέρμανση να τοποθετούμε το πάνελ στο πάτωμα και για ψύξη στο ταβάνι. Το σκεπτικό αυτό βασίζεται στον μηχανισμό της συναγωγής καθώς οι ψυχρές μάζες πηγαίνουν προς τα κάτω και θερμές προς τα πάνω.



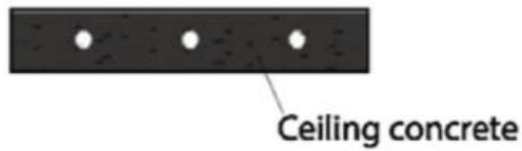
Εικόνα 2-7 α) Τα σώματα φτάνουν στην επιθυμητή θερμοκρασία με τον αέρα να βρίσκεται κατά 2-4 οC χαμηλότερα (<https://www.international.zehndersystems.com/download/4683/18117/20065.pdf>)

Με βάση τη θέση που βρίσκονται στην δομή του κτιρίου μπορούμε να χωρίσουμε τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία σε τρεις βασικές κατηγορίες:

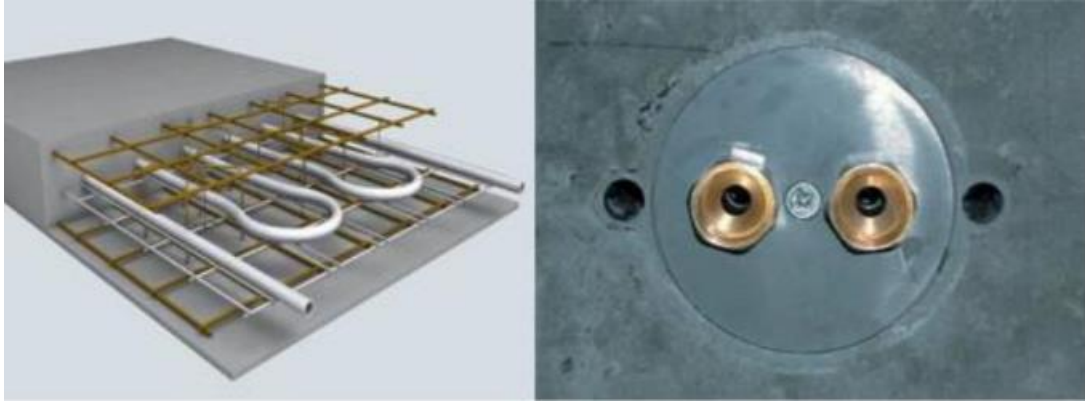
- Θερμικά-Ενεργά κτίρια (Thermally Active Building Systems [TABS])
- Συστήματα ενσωματωμένα στην επιφάνεια της δομής (Embedded Surface Systems)
- Πάνελ ακτινοβολίας (Radiant Panels)

2.3.1 Θερμικά - ενεργά κτίρια (TABS)

Στην αυτήν την περίπτωση οι πλαστικοί σωλήνες είναι τοποθετημένοι στην κύρια δομή του κτιρίου (στο σκυρόδεμα). Το πλεονέκτημα αυτής της εφαρμογής είναι ότι εκμεταλλεύεται την υψηλή θερμική χωρητικότητα του σκυροδέματος. Στα θερμικά-ενεργά κτίρια υπάρχει θερμική άνεση και οι θερμοκρασίες είναι αρκετά σταθερές (Bjarne W Olesen, 2012).



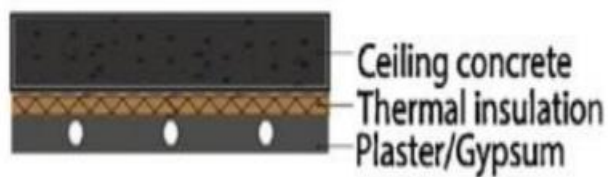
Εικόνα 2-8 Embedded Surface System (Feng, Schiavon and Bauman, 2013)



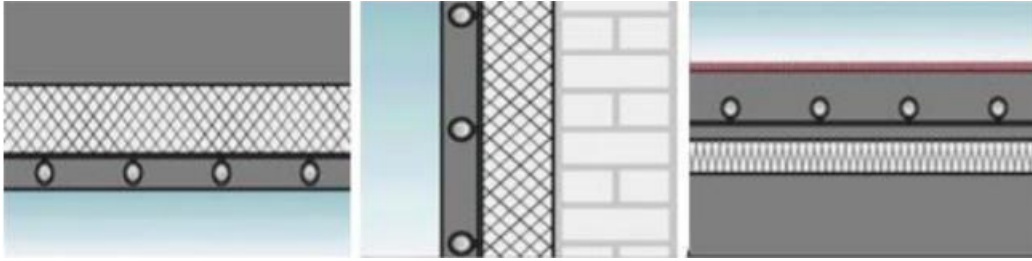
Εικόνα 2-9 Σωλήνες εντός του σκυροδέματος (<https://www.uponor.co.uk/products/ceiling-heating-and-cooling/tabs>)

2.3.2 Ενσωματωμένα συστήματα στην επιφάνεια της δομής

Οι σωλήνες σε αυτή την περίπτωση είναι ενσωματωμένοι σε μία πλάκα κατασκευασμένη συνήθως από γύψο ή πλαστικό και όχι εντός της δομής του κτιρίου(σκυρόδεμα). Η διάταξη αυτή μπορεί να τοποθετηθεί στο ταβάνι στο πάτωμα ή σε τοίχο.



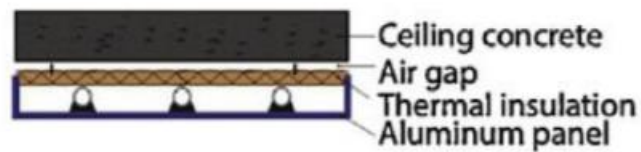
Εικόνα 2-10 Σχηματική απεικόνιση της θέσης των σωλήνων στα TABS (Feng, Schiavon and Bauman, 2013)



Εικόνα 2-11 Embedded surface system σε οροφή, τοίχο και δάπεδο (Kazanci, Berk, ; Olesen and Kolarik, 2016)

2.3.3 Πάνελ ακτινοβολίας

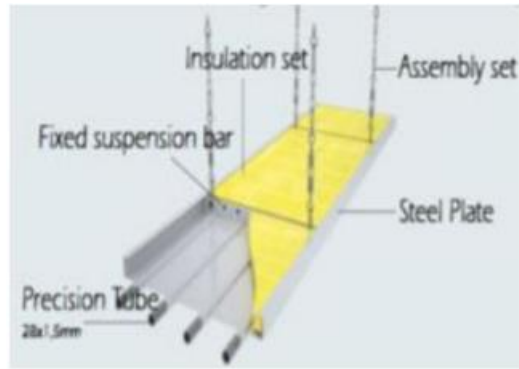
Στα συγκεκριμένα συστήματα οι σωλήνες ενσωματώνονται σε πολύ ελαφριές μεταλλικές πλάκες οι οποίες κρέμονται με μεταλλικές κρεμμάστρες από το ταβάνι, ενώ σπάνια τα συναντάμε αναρτημένα σε τοίχους. Τα πάνελ ακτινοβολίας είναι τελείως αποκομμένα από την δομή του κτιρίου, πράγμα που κάνει πολύ εύκολη την τοποθέτηση αλλά και την επισκευή τους. Στο πίσω μέρος τους τοποθετείται συχνά μονωτικό υλικό για την μείωση των θερμικών απωλειών.



Εικόνα 2-12 Σχηματική απεικόνιση Radiant Ceiling Panel (Feng, Schiavon and Bauman, 2013)



Εικόνα 2-13 Μεταλλικό πάνελ οροφής χωρίς μόνωση με σωλήνες χαλκού (μοντέλο GKCU της εταιρείας Emco-klima)



Εικόνα 2-14 λλικό πάνελ οροφής με μόνωση (της εταιρείας Zehnder)

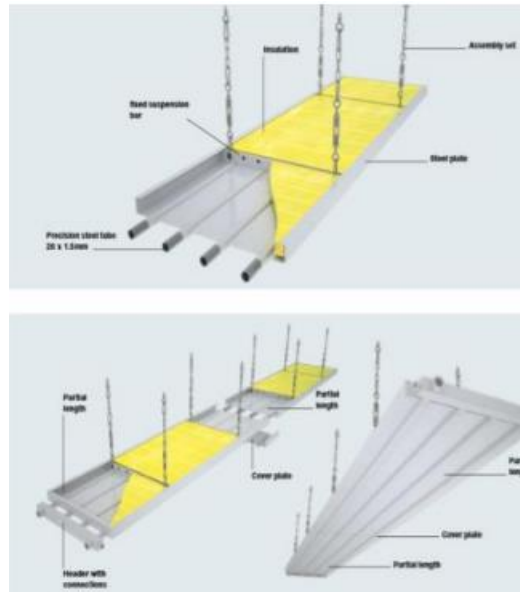
2.3.4 Διάταξη σωλήνων

Ένας ακόμα τρόπος κατηγοριοποίησης των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία είναι η διάταξη των σωλήνων. Συνήθως συναντάμε δύο βασικές διατάξεις: διάταξη παράλληλης ροής και σωλήνες τύπου S(σερπαντίνα).

- **Διάταξη παράλληλης ροής**

Σε αυτήν την περίπτωση οι σωλήνες τοποθετούνται σε ευθεία διάταξη και παράλληλα μεταξύ τους. Στην μία άκρη του πάνελ υπάρχει μία κάθετη κεφαλή στην οποία εισέρχεται το νερό, από εκεί μοιράζεται σε κάθε σωλήνα. Στην άλλη άκρη των σωλήνων το νερό εξέρχεται, εκεί μια κεφαλή όμοια με αυτή της εισόδου συλλέγει το νερό των σωλήνων και το οδηγεί στην έξοδο. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι κατάλληλη για πάνελ που συνδέονται κατά μήκος στην οροφή εσωτερικών χώρων. Λόγω της μεγαλύτερης ροής του νερού μεταφέρεται μεγαλύτερη ποσότητα θερμικής ενέργειας από ή προς τον χώρο, επίσης η διαφορά

Θερμοκρασίας νερού εισόδου και εξόδου είναι μικρότερη από αυτήν που θα είχαν σωλήνες τύπου S(σερπαντίνας).



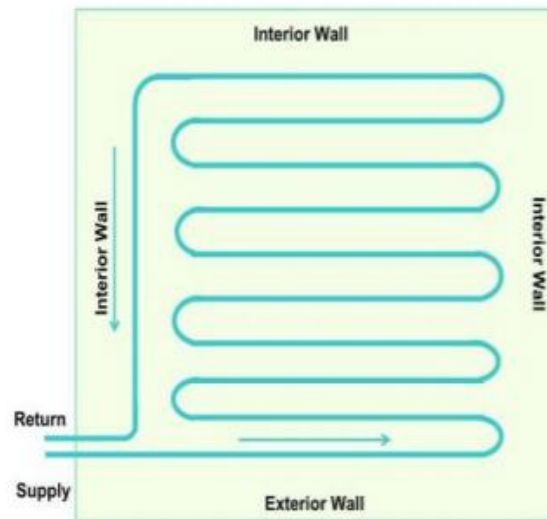
Εικόνα 2-15 μεταλλικό πάνελ οροφής με σωλήνες παράλληλης ροής (σχέδιο της εταιρείας Zehnder)



Εικόνα 2-16 Υδραυλικό πάνελ οροφής με παράλληλη ροή για θέρμανση/ψύξη σε αθλητικές εγκαταστάσεις

- Σωλήνες τύπου-S (σερπαντίνα)

Στην περίπτωση των σωλήνων τύπου S οι σωλήνες απλώνονται στην επιφάνεια της σε διάταξη τύπου σερπαντίνας. Σε κάθε πάνελ υπάρχει ένας σωλήνας, ο οποίος έχει μία είσοδο και μία έξοδο. Η συγκεκριμένη διάταξη συναντάται κυρίως στα ενσωματωμένα συστήματα στην επιφάνεια της δομής και στα TABS, καθώς επιτρέπει την κάλυψη μεγαλύτερης επιφάνειας. Αρκετά συχνά συναντάται επίσης και σε κρεμάμενα πάνελ οροφής. Λόγω της μία εισόδου ανά πάνελ η ροή νερού είναι μικρότερη, με αποτέλεσμα να έχουμε μειωμένη μεταφορά θερμικής ενέργειας σε σύγκριση με την διάταξη παράλληλης ροής.



Εικόνα 2-17 Διάταξη σωλήνων σε μορφή σερπαντίνας (<http://www.solar365.com/greenhomes/plumbing/layout-patterns-radiant-floortubing>)



Εικόνα 2-18 Δωμάτιο με υδραυλικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανση με σωλήνες σε διάταξη σερπαντίνας (<http://www.nutechrenewables.com/air-source-heatpump-underfloor-heating-install-armagh/>)

2.4 Δομικά υλικά των πάνελ ακτινοβολίας

Τα κύρια δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ψύξης και θέρμανσης με ακτινοβολία είναι οι σωλήνες μέσα στους οποίους ρέει το θερμό ή ψυχρό νερό, οι μεταλλικές πλάκες ακτινοβολίας και συχνά η μόνωση και για την αποφυγή θερμικών απωλειών. Πλέον έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στα πάνελ το αλουμίνιο και στους σωλήνες ο χαλκός. Παρόλα αυτά τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ποικίλουν. Η επιλογή των κατάλληλων δομικών υλικών γίνεται με βάση κριτήρια απόδοσης, κόστους και αντοχής για την εκάστοτε εφαρμογή.

2.4.1 Δομικά υλικά σωλήνων

Οι σωλήνες αποτελούν βασικό στοιχείο των υδραυλικών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης καθώς από εκεί ρέει το νερό. Οι σωλήνες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια της πλάκας του πάνελ. Τα δύο υλικά με την πιο συχνή χρήση είναι ο χαλκός και το ΡΕΧ(διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο)

- **Σωλήνες χαλκού**

Οι σωλήνες χαλκού χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την κυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια του πάνελ στα υδραυλικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία. Τα χαρακτηριστικά που καθιστούν ιδανική τη χρήση σωλήνων χαλκού είναι η υψηλή θερμική αγωγιμότητα, το χαμηλό κόστος, η αντοχή στη διάβρωση αλλά και το ότι είναι πολύ ελαφριά σε σύγκριση με άλλα μέταλλα. Έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης σωλήνες από σίδηρο και χάλυβες αλλά πλέον δε χρησιμοποιούνται συχνά. Η ευκολία με την οποία κάμπτεται, κάνει τον μαλακού τύπου L-σωλήνα χαλκού κατάλληλο για χρήση σε υδραυλικά πάνελ ακτινοβολίας, καθώς διαμορφώνεται εύκολα γύρω από τυχόντα εμπόδια που υπάρχουν στην δομή του κτιρίου. Το μέγεθος διαμέτρου και το πάχος τοιχωμάτων των σωλήνων χαλκού επιλέγεται στην εκάστοτε εφαρμογή ανάλογα με τον απαιτούμενο ρυθμό ροής του νερού και την πτώση πίεσης. Τα μεγέθη διαμέτρου των σωλήνων χαλκού που συναντάμε στην αγορά είναι από 1/8 μέχρι 10 ίντσες (0.003m-0.25m) καθώς επίσης υπάρχουν ποικίλα πάχη τοιχωμάτων. Στην περίπτωση των υδραυλικών συστημάτων που μελετάμε χρησιμοποιούνται μικρά μεγέθη σωλήνων ενσωματωμένα στο πάνελ με ράγες συγκόλλησης.



Εικόνα 2-19 α) μεταλλικό πάνελ οροφής με σωλήνες χαλκού σε διάταξη σερπαντίνας (<https://www.bekaklima.de/en/heating-cooling/copper-pipe-technology/>)



Εικόνα 2-20 Σωλήνες χαλκού σε διάφορα μεγέθη

- **Σωλήνες PEX**

Το PEX ή διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο αποτελείται από πολυαιθυλένιο μεσαίας έως υψηλής πυκνότητας με διασταυρούμενους δεσμούς που εισάγονται στην δομή του πολυμερούς και το κάνουν από θερμοπλαστικό θερμοσκληρυνόμενο. Βασικό πλεονέκτημα του PEX είναι το χαμηλό του κόστος, καθώς κοστίζει περίπου το 1/3 της τιμής σε σχέση με τους σωλήνες χαλκού. Το PEX έχει επίσης υψηλότερη αντοχή στην διάβρωση από τον χαλκο, κυρίως σε περιοχές όπου το νερό είναι ιδιαίτερα όξινο. Επίσης σε χαμηλές θερμοκρασίες που το νερό ενδέχεται να παγώσει, οι σωλήνες PEX δεν κινδυνεύουν να σπάσουν σε αντίθεση με τους μεταλλικούς σωλήνες. Αυτό συμβαίνει λόγω της δυνατότητάς τους να διαστέλονται αρκετά και να γυρίζουν στο αρχικό τους μέγεθος όταν το νερό λιώσει ξανά. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι σωλήνες χαλκού σε σύγκριση με σωλήνες άλλων μετάλλων λόγω της ευκαμψίας τους μπορούν να διαμορφωθούν εύκολα ανάλογα με την δομή του κτιρίου. Όμως δεν μπορούν να συγκριθούν με το πλαστικό. Οι σωλήνες PEX είναι εξαιρετικά εύκαμπτοι, πράγμα που τους καθιστά αρκετά εύχρηστους. Επιπλέον η σύνδεση μεταξύ των PEX γίνεται με συνδετικά εξαρτήματα, δηλαδή δεν απαιτείται συγκόλληση όπως στην

περίπτωση των χάλκινων σωλήνων. Επίσης, η έγχρωμη κωδικοποίηση τους βοηθάει τους μηχανικούς, είτε κατά την εγκατάσταση είτε κατά την επισκευή τους, να καταλαβαίνουν ποιες είναι οι ζεστές και ποιες οι κρύες σωληνώσεις. Τέλος οι σωλήνες PEX μειώνουν το συνολικό βάρος του συστήματος. Όμως σε πάνελ θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία που χρησιμοποιούν PEX συναντάμε και χάλκινους σωλήνες σε σημεία που κρίνεται απαραίτητο.



Εικόνα 2-21 Πάνελ πολυστυρενίου με εξοχές για εύκολη τοποθέτηση σωλήνων PEX (<https://www.amvicsystem.com/products/ampex/>)



Εικόνα 2-22 Έγχρωμοι σωλήνες PEX για διαχωρισμό θερμού (κόκκινοι σωλήνες) και ψυχρού (μπλε σωλήνες) ρεύματος, και λευκοί σωλήνες σε περίπτωση που δεν επιθυμούμε σωλήνες με διαφορετικά χρώματα

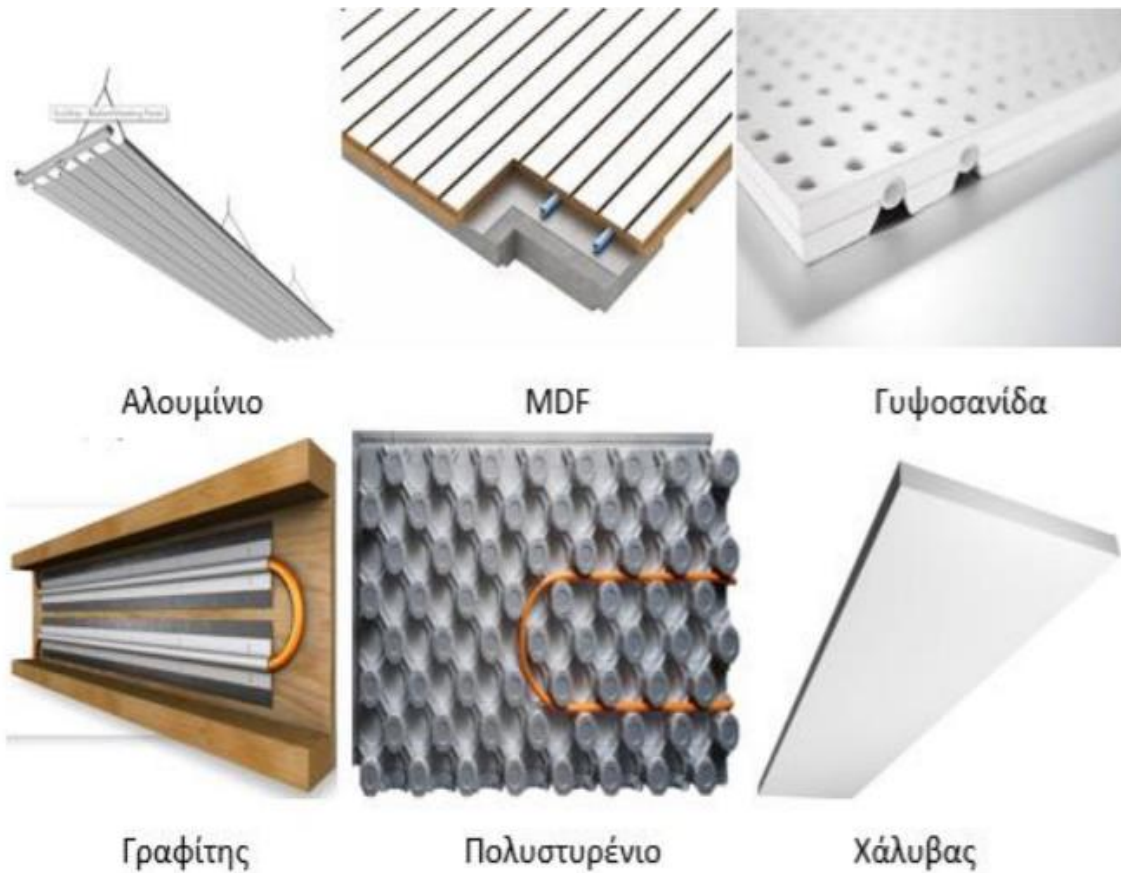
2.4.2 Δομικά υλικά πλάκας

Τα δομικά υλικά της πλάκας του ακτινοβόλου πάνελ ποικίλλουν. Κάποια υλικά είναι τα εξής:

- Αλουμίνιο
- Γραφίτης

- Χάλυβας
- Γυψοσανίδα
- MDF
- Πολυστερένιο

Η επιλογή της κατάλληλης πλάκας στην εκάστοτε εφαρμογή γίνεται με κριτήρια βάρους, κόστους, θερμικής αγωγιμότητας του υλικού, τις ιδιαιτερότητες συναρμολόγησης και τοποθέτησης ακόμα και εμφάνισης αφού τα ακτινοβόλα πάνελ οροφής τοποθετούνται συχνά σε εμφανές σημείο του χώρου. Επίσης πολλές φορές δίνεται βάση σε ιδιότητες του υλικού της πλάκας, όπως είναι η ευφλεκτότητα για την ασφάλεια σε περίπτωση πυρκαγιάς.



Εικόνα 2-23 Δομικά υλικά πλάκας που συναντώνται στο εμπόριο
 (<http://www.wattsradiant.com/products/flexplate/>), (<https://www.archiproducts.com/en/products/radiant-ceilingpanels>),
 (<https://www.amvicsystem.com/products/ampex/>)

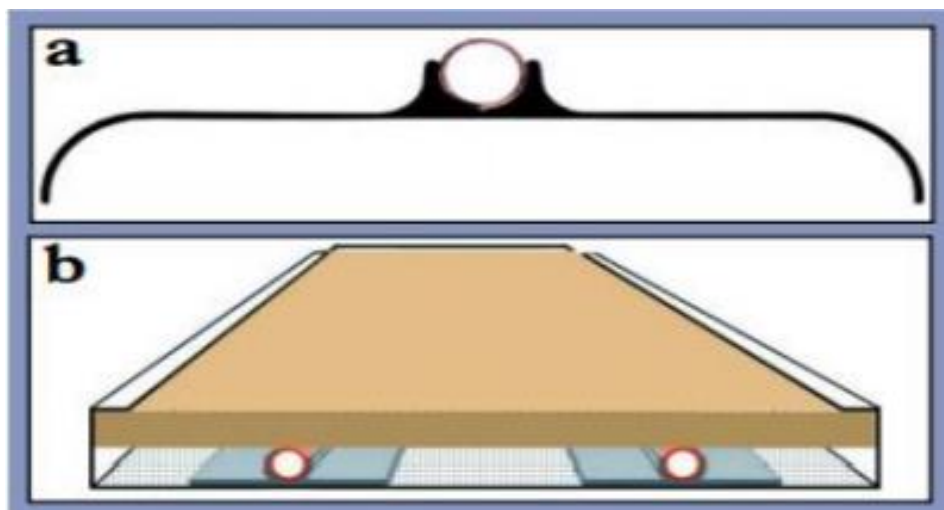
2.4.3 Δομικά υλικά επιπρόσθετης επιφάνειας

Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση που προκαλεί η προσθήκη μίας επιπλέον επιφάνειας στην όψη ενός ακτινοβόλου πάνελ. Η μεταφορά θερμότητας εντός του πάνελ λόγω της επιπλέον επιφάνειας είναι δυσδιάστατη. Όμως, ο μικρός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του υλικού της νέας επιφάνειας μειώνει την αποδοτικότητα. Είναι σύνηθες όταν προστίθεται επιπλέον επιφάνεια να γίνεται για αισθητικούς λόγους με την τοποθέτηση ενός καλαίσθητου υλικού. Τα υλικά που συνήθως συναντάμε είναι:

- Γύψος
- Ασβεστοκονίαμα

2.4.4 Δομικά υλικά μόνωσης

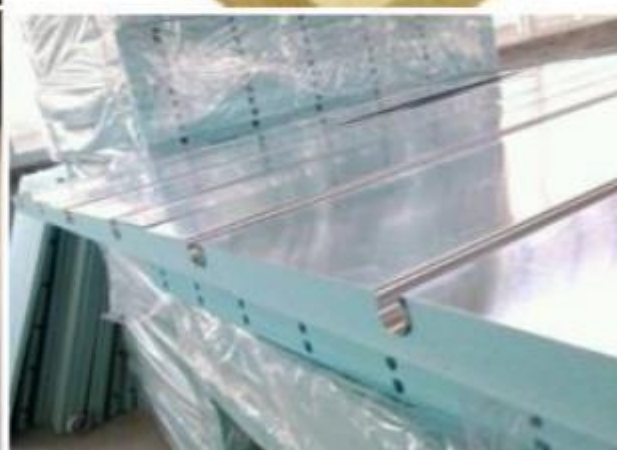
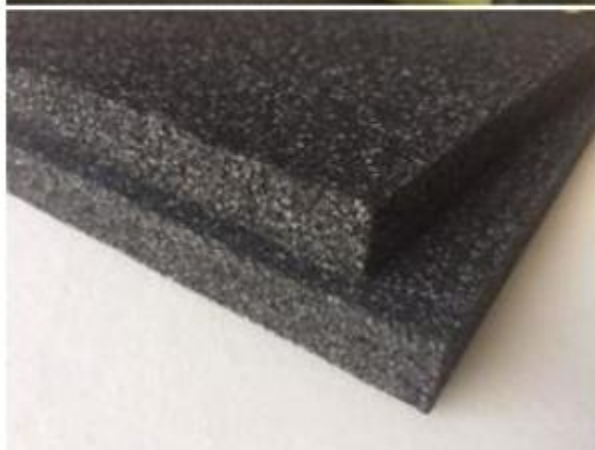
Στα πάνελ οροφής συνήθως τοποθετείται στο πίσω μέρος λεπτό στρώμα μόνωσης, το οποίο εμποδίζει την μεταφορά θερμότητας στο χώρο που θέλουμε να θερμάνουμε ή να ψύξουμε από άλλους χώρους. Αυτά τα πάνελ ονομάζονται κλειστού τύπου. Υπάρχουν όμως και πάνελ που δε διαθέτουν μόνωση, συνήθως αυτό συμβαίνει σε εφαρμογές ψύξης του χώρου. Αυτά τα πάνελ είναι τα πάνελ ανοικτού τύπου. Στα κρεμαστά πάνελ ανοικτού τύπου οι δύο επιφάνειες, η πάνω και η κάτω χρησιμοποιούνται ως επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. Προκύπτει λοιπόν αύξηση της διαθέσιμης επιφάνειας για συναγωγή αλλά ταυτόχρονη έχουμε μείωση της ακτινοβολίας.



Εικόνα 2-24 Πάνελ οροφής α)ανοικτού και β)κλειστού τύπου (Μιμπα, 2001)

Πίνακας 2-1 Θερμική αγωγιμότητα υλικών που χρησιμοποιούνται συχνά ως μονωτικό υλικό σε πάνελ οροφής
 (https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)

Υλικά μόνωσης πάνελ	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
Fiberglass (Υαλοβάμβακας)	0.04
Rockwool (Πετροβάμβακας)	0.045
Polyethylene foam (αφρός πολυαιθυλενίου)	0.04
Extruded Polystyrene foam (XPS) (εξωθημένος αφρός πολυστυρενίου)	0.03



Εικόνα 2-25 Υλικά μόνωσης πάνελ i) Fiberglass, ii) Rockwool, iii) Polyethylene foam, iv) XPS σε πλάκα για επιδαπέδια θέρμανση/ψύξη



Εικόνα 2-26 Πάνελ Οροφής με μόνωση από υαλοβάμβακα (μοντέλο EcoStrip της εταιρείας Frenger)
(<https://www.frenger.co.uk/pdfs/ecostrip-v2.3.pdf>)

2.5 Σύστημα ελέγχου

Στα υδραυλικά πάνελ θέρμανσης και ψύξης η τοποθέτηση αισθητήρων και συστημάτων αυτόματου ελέγχου, είναι απαραίτητα για την κατάλληλη ρύθμιση των βασικών μεταβλητών του συστήματος. Η θερμοκρασία του νερού εισόδου στους σωλήνες και η ταχύτητα του νερού εντός αυτών, αποτελούν τις δύο βασικότερες μεταβλητές που μπορούμε να ελέγξουμε. Λέβητες, ανεμιστήρες, εναλλάκτες θερμότητας, αντλίες θερμότητας αποτελούν ρυθμιστικό μέρος της θερμοκρασίας και της ροής εντός του συστήματος (Mumma and Jeong, 2005).

Βασικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη, για την κατάλληλη ρύθμιση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του νερού εισόδου, είναι η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα. Για αυτόν τον σκοπό τοποθετούνται αισθητήρες στο εξωτερικό του κτιρίου που δίνουν την τιμή της θερμοκρασίας του αέρα. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα ενημερώνεται και

ρυθμίζει κατάλληλα την λειτουργία του για την επίτευξη των επιθυμητών θερμοκρασιών εντός του κτιρίου (Kim and Olesen, 2015), (Ryu et al., 2004).

Στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης, επιθυμούμε την αποφυγή δημιουργίας συμπυκνώματος το οποίο είναι υπεύθυνο για την πτώση της αποδοτικότητας του συστήματος αλλά και για την εμφάνιση μούχλας. Για τον λόγο αυτό γίνεται χρήση αισθητήρων υγρασίας που όταν εντοπίζουν υψηλά ποσοστά υγρασίας στο χώρο σταματούν τη ροή νερού στους σωλήνες και το σύστημα αερισμού διαχειρίζεται το λανθάνον φορτίο του χώρου. Κατάλληλες ρυθμίσεις στο σύστημα του δίνουν την δυνατότητα να διαχειριστεί καταστάσεις όπου η υγρασία του χώρου ανεβαίνει, όπως όταν ανοίγουν τα παράθυρα στον χώρο και σε θερμά, με υψηλά επίπεδα υγρασίας κλίματα (Feustel and Stetiu, 1995).

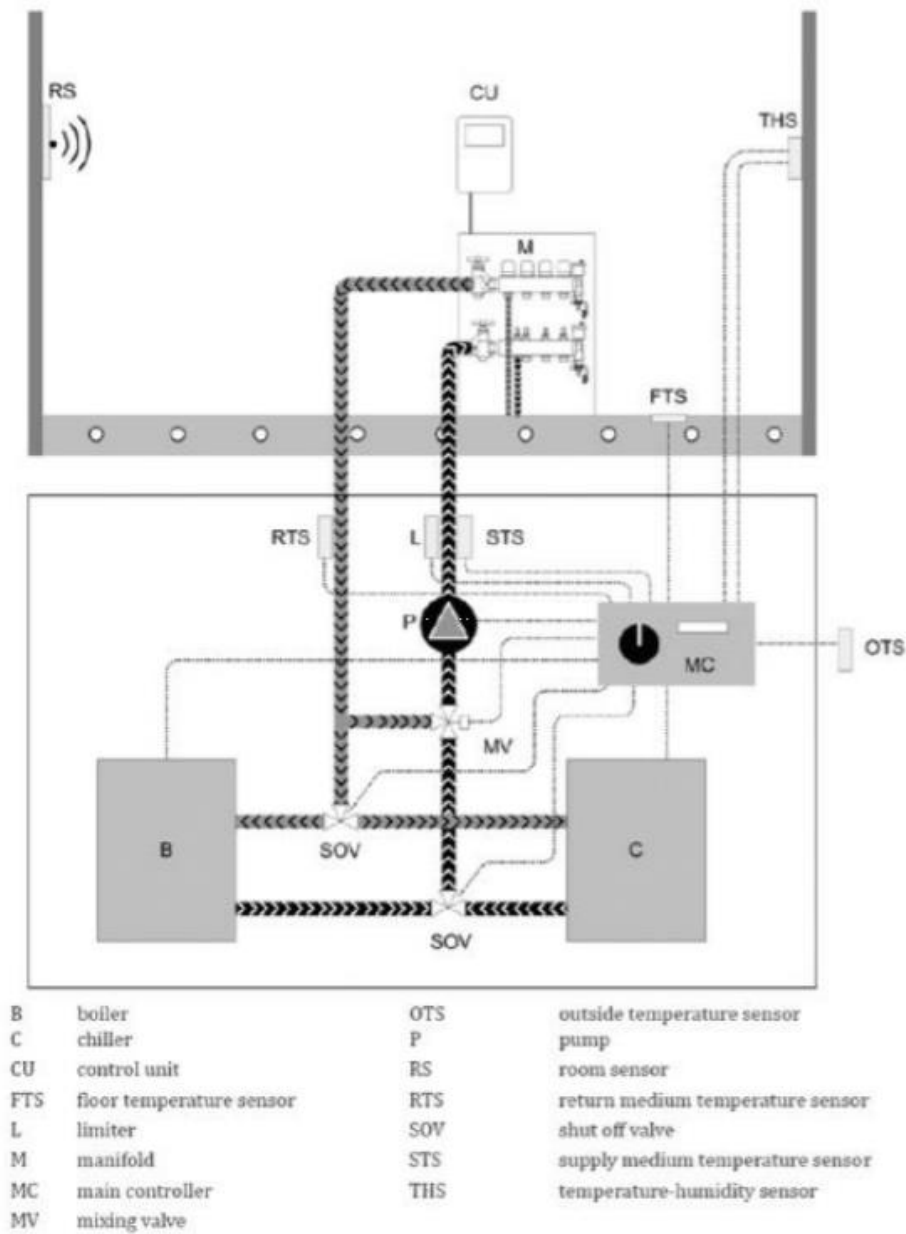
Στην περίπτωση ενδοδαπέδιας θέρμανσης και ψύξης, είναι επίσης σημαντικό να γίνει κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας, για λόγους θερμικής άνεσης αλλά και εξοικονόμησης ενέργειας. Έτσι η χρήση αισθητήρων επιτρέπει την κατάλληλη ρύθμιση του συστήματος, εξασφαλίζοντας κατάλληλη θερμοκρασία του πατώματος για την θερμική άνεση των χρηστών. Επίσης εξασφαλίζει εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς ιδιαίτερες συνθήκες όπως ενίσχυση της θέρμανσης του χώρου από την ηλιακή ακτινοβολία απαιτούν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας για την επίτευξη των επιθυμητών συνθηκών.

2.5.1 Ρυθμιστικά εξαρτήματα

Ρυθμιστικές βαλβίδες

Σε ένα σύστημα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι βαλβίδων για την κατάλληλη ρύθμιση του. Οι βαλβίδες είναι υπεύθυνες για την ρύθμιση της πίεσης, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του νερού εντός των σωλήνων. Κάποιες βαλβίδες βοηθούν στο να μην ξεπεράσει τις ανώτατες τιμές η θερμοκρασία που ρέει στους σωλήνες. Κάποιες άλλες, αποκόπτουν μέρη του συστήματος που μπορεί να χρειάζονται επισκευή ώστε να μην σταματήσει η συνολική λειτουργία του. Ο υδραυλικός συλλέκτης σε συνδυασμό με τις βαλβίδες, ελέγχει την ροή ζεστού (ή κρύου) νερού στις γραμμές διανομής τους συστήματος θέρμανσης (ή ψύξης). Στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία συναντάμε και τη βαλβίδα διακοπής η οποία επιτρέπει την ροή μόνο κρύου η ζεστού νερού

εντός των σωλήνων. Επίσης συναντάμε την βαλβίδα ανάμιξης, όπου αναμιγνύει κρύο και ζεστό νερό κατάλληλα για να επιτύχει το σύστημα την κατάλληλη θερμοκρασία για την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος προσαρμοζόμενη σε παράγοντες όπως η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα.



Εικόνα 2-27 Βασικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου σε εφαρμογές ενδοδαπέδιας θέρμανσης (ISO 11855-6, 2012)

Υδραυλικός συλλέκτης

Ο υδραυλικός συλλέκτης χρησιμοποιείται για την ενσωμάτωση των πολλών γραμμών τροφοδοσίας ή επιστροφής νερού. Επομένως είναι σαφές ότι κάθε υδραυλικό σύστημα ακτινοβολίας χρησιμοποιεί τουλάχιστον δύο είδη συλλεκτών, έναν τροφοδοσίας και έναν επιστροφής. Ο συλλέκτης τροφοδοσίας συλλέγει το νερό από συσκευή θέρμανσης (ή ψύξης) και ο συλλέκτης τροφοδοσίας το επιστρέφει σε αυτήν. Επομένως μέσω των manifolds μπορεί να ρυθμιστεί η ροή του νερού στους σωλήνες του συστήματος ή ακόμα και να διακοπεί αν αυτό χρειαστεί.



Εικόνα 2-28 Υδραυλικό manifold της εταιρείας Uronor



Εικόνα 2-29 Παράδειγμα σωλήνων PEX και σωλήνων χαλκού συνδεδεμένα σε manifolds

2.6 Αξιολόγηση συστημάτων ακτινοβολίας

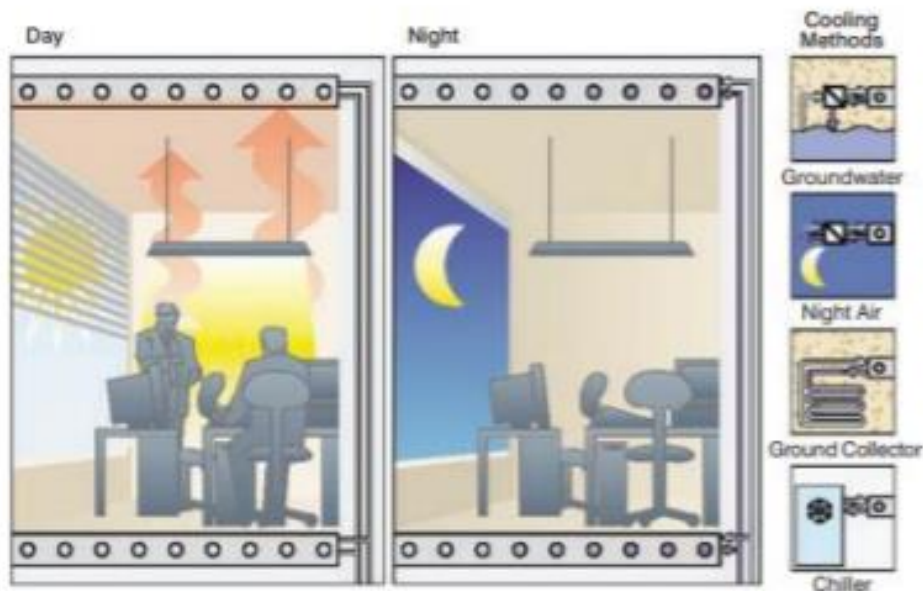
2.6.1 Εξοικονόμηση ενέργειας

- **Θερμικό μέσο με μεγάλη θερμοχωρητικότητα**

Η ειδοποιός διαφορά ενός συστήματος RHC συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα αέρα έγκειται στο χρησιμοποιούμενο μέσο μεταφοράς θερμότητας. Το συγκριτικό πλεονέκτημα του νερού είναι η εξαιρετικά υψηλή του θερμοχωρητικότητα, η οποία είναι περίπου 3.500 φορές μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Στην πράξη μπορούμε να υποθέσουμε πως ένας όγκος νερού μπορεί να μεταφέρει 3.500 φορές μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας απ' όσο ο ίδιος όγκος αέρα.

- **Μεγάλη θερμική μάζα για μείωση των μέγιστων φορτίων**

Τα συστήματα RHC δύναται να εγκυβωτιστούν εντός της βασικής δομής του κτιρίου χρησιμοποιώντας έτσι ως συγκριτικό πλεονέκτημα τη θερμοχωρητικότητα όλης της μάζας του κτιρίου για την αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας. Σε συστήματα με υψηλή θερμική μάζα τα μέγιστα φορτία που απαιτούνται για να φέρουν το σύστημα σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας μειώνονται σημαντικά (Koschenez and Dorer, 1999). Μελέτες έδειξαν ότι ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα RHC μπορεί να επωφεληθεί στο μέγιστο από τη θερμική μάζα του κτιρίου και είναι δυνατόν κατά τη διάρκεια της νύχτας να βρίσκεται σε λειτουργία μόνο η αντλία του, καταναλώνοντας ελάχιστη ενέργεια. Η ενέργεια που αποθηκεύεται στη μάζα του κτιρίου κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος την ημέρα αποδίδεται την νύχτα όταν η λειτουργία σταματά. Έτσι το κτίριο την επόμενη μέρα θα χρειαστεί μικρότερο φορτίο για να επανέλθει στις απαιτούμενες συνθήκες λειτουργίας (Bjarne W. Olesen, 2012). Σύμφωνα με άλλες έρευνες, ένας εναλλάκτης θερμότητας που χρησιμοποιείται για την ψύξη του νερού σε κτίριο με TABS μπορεί να επωφεληθεί από την υψηλή θερμική μάζα του κτιρίου μειώνοντας την ενεργειακή του κατανάλωση έως και 50% (Lehmann, Dorer and Koschenez, 2007), (Rijksen, Wisse and van Schijndel, 2010).



Εικόνα 2-30 Η ψύξη του κτιρίου που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας διατηρείται το θράδυ λόγω της μεγάλης θερμικής μάζας του κτιρίου και με την βοήθεια του ψυχρότερου αέρα των βραδινών ωρών και του ψυχρού νερού που αντλείται από το έδαφος (Bjarne W. Olesen, 2012)

- **Χαμηλή θερμοκρασία νερού για θέρμανση - υψηλή για ψύξη**

Η χρήση ενός συστήματος που μεταφέρει την θερμότητα με ακτινοβολία μπορεί να επιφέρει την ίδια θερμική άνεση με ένα σύστημα HVAC με χαμηλότερες ωστόσο απαιτήσεις σε ενέργεια. Απαιτείται γενικά νερό υψηλότερης θερμοκρασίας για ψύξη και χαμηλότερης για θέρμανση λόγω της ύπαρξης μεγάλης επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας με τον χώρο καθώς και λόγω της μικρής ποσότητας ενέργειας που χρειάζεται ώστε να διατηρηθούν οι επιθυμητές θερμοκρασίες σε σταθερά επίπεδα. Σύμφωνα με μελέτες, ένα σύστημα ενδοδαπέδιας ψύξης μπορεί να χρησιμοποιεί νερό θερμοκρασίας 2-4 °C χαμηλότερης της θερμοκρασίας που θέλουμε να πετύχουμε (Olesen, 2008), ενώ ένα πάνελ οροφής για ψύξη μπορεί να πετύχει την ίδια θερμική άνεση με ένα σύστημα HVAC, με τον αέρα του χώρου όμως να είναι 2°C υψηλότερης θερμοκρασίας (Hao et al., 2007).

- **Οι συσκευές του συστήματος λειτουργούν με υψηλή απόδοση**

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του νερού (εναλλάκτης, αντλία θερμότητας, μπόιλερ κτλ.) λειτουργούν με υψηλότερη απόδοση χάρη

στις χαμηλές θερμοκρασίες νερού για θέρμανση και υψηλές για ψύξη. Επίσης για περαιτέρω αύξηση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου μπορεί το κύκλωμα του RHC να συνδεθεί σε σειρά με άλλα υδραυλικά κυκλώματα ώστε να εκμεταλλευτεί επιστροφές ζεστού ή κρύου νερού. Ακόμα υπάρχει η δυνατότητα τα RHC συστήματα να λειτουργούν σε συνεργασία με ανανεώσιμες πηγές θερμότητας, όπως η ηλιακή ή γεωθερμία, εκμεταλλευόμενα το γεγονός πως οι θερμοκρασίες λειτουργίας δεν είναι ακραίες (15-21°C για ψύξη, 25-40°C για θέρμανση) και μπορούν να επιτευχθούν με μικρά ποσά ενέργειας.

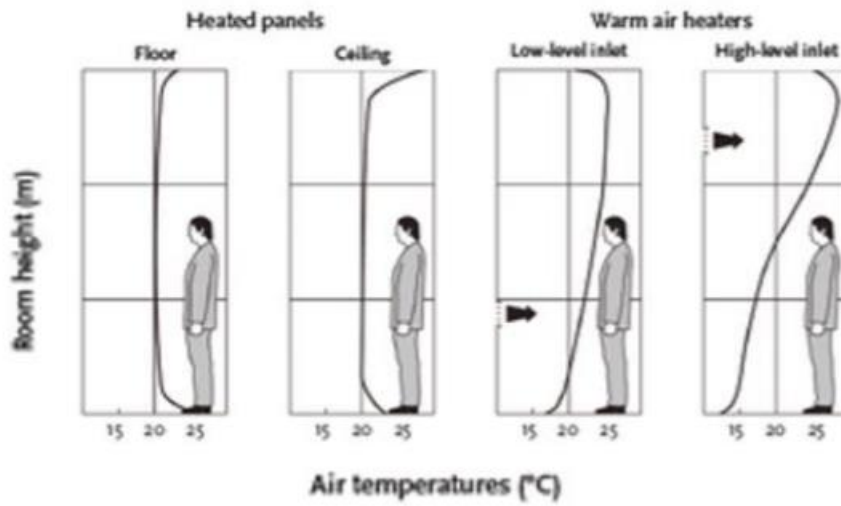
2.6.2 Θερμική Άνεση

Η θερμική άνεση είναι ένας βασικός παράγοντας που πρέπει να πληρούν τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Ως θερμική άνεση ορίζεται η κατάσταση εκείνη κατά την οποία τα άτομα που βρίσκονται σε έναν χώρο δεν επιθυμούν αλλαγές στην θερμοκρασία (ANSI/ASHRAE, 2017). Ο άνθρωπος εκπέμπει ή απορροφά θερμότητα ανάλογα με την διαφορά θερμοκρασίας που έχει σε σύγκριση με τον χώρο στον οποίο βρίσκεται. Αν δηλαδή βρίσκεται σε ψυχρό περιβάλλον τότε αποβάλλει θερμότητα, ενώ αν βρίσκεται σε πολύ ζεστό περιβάλλον δεν αποβάλλει θερμότητα. Οι δύο αυτές περιπτώσεις προκαλούν δυσφορία (Fanger, 1973). Είναι δεδομένο όμως ότι οι συνθήκες κατά τις οποίες ένα άτομο αισθάνεται θερμικά άνετα είναι υποκειμενικές. Όμως με βάση υποκειμενικές αξιολογήσεις που έχουν γίνει (Olesen and Parsons, 2002; ISO 15251, 2007; ANSI/ASHRAE, 2017) μπορούμε να κατανοήσουμε ποιο είναι το εύρος θερμοκρασιών που κάνουν ένα άτομο να νιώθει θερμικά άνετα. Το εύρος αυτό είναι περίπου 22-24°C, ωστόσο αυτό μπορεί να αλλάξει από την επίδραση διαφόρων παραγόντων. Οι παράμετροι που διαδραματίζουν τον σημαντικότερο ρόλο στην θερμική άνεση παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

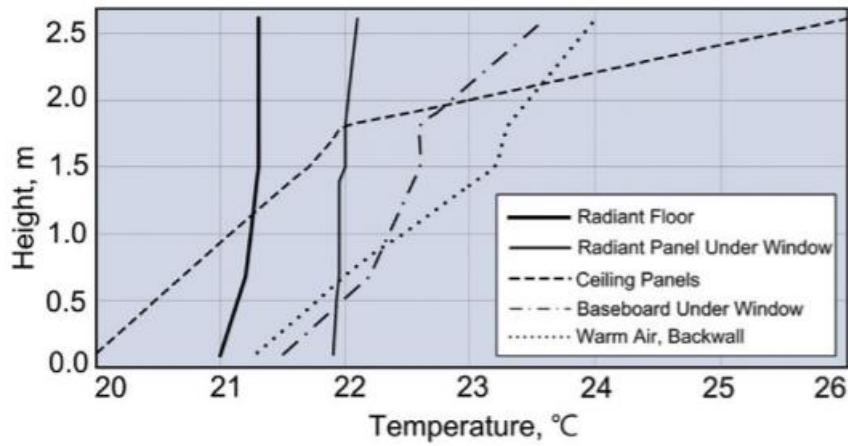
Πίνακας 2-2 Παράμετροι που επηρεάζουν την θερμική άνεση

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΑΤΟΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
Θερμοκρασία αέρα	ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑ: ➤ Φυσιολογική ➤ Ψυχολογική ➤ Φυσική
Σχετική Υγρασία	Φύλλο
Ταχύτητα αέρα	Ηλικία
Μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία(MRT)	Μεταβολισμός
	Επιδερμίδα
	Δραστηριότητες
	Ρουχισμός

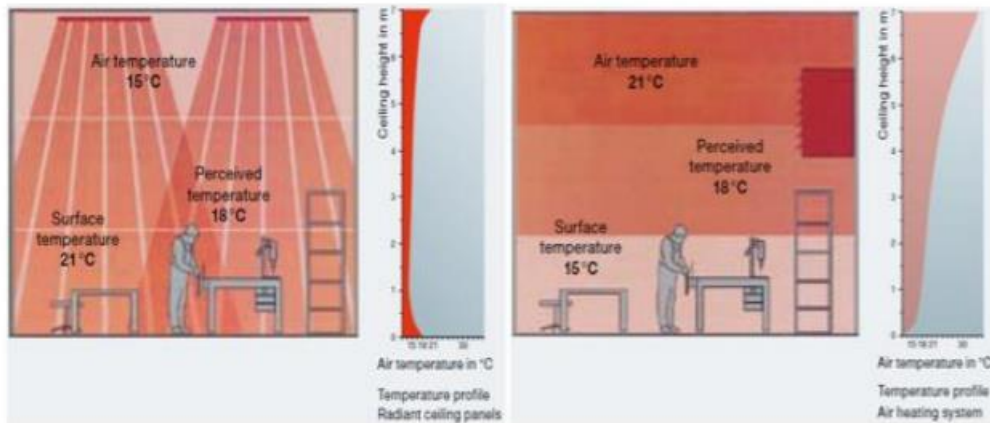
Έρευνες που έχουν γίνει σε χώρους όπου υπάρχει σύστημα θέρμανσης και ψύξης με ακτινοβολία έδειξαν ότι οι χρήστες νιώθουν περισσότερη άνεση και οι συνθήκες θερμικής άνεσης είναι πιο ομοιόμορφες σε όλο το δωμάτιο (Zeiler and Boxem, 2009), (Le Dréau and Heiselberg, 2014). Αυτό οφείλεται στην ιδανική κατακόρυφη γραμμή που προσεγγίζουν στα διαγράμματα ύψους-θερμοκρασίας, το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλο τον χώρο. Αντίθετα στα συστήματα HVAC η κλίση αυτού του διαγράμματος δεν είναι κατακόρυφη, αυτό οφείλεται στην αρχή λειτουργίας μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. Οι θερμές μάζες λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας ανεβαίνουν ψηλά και οι ψυχρές παραμένουν χαμηλά. Μελέτες έδειξαν ότι η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον αστράγαλο και στο κεφάλι των χρηστών είναι περίπου 0.5°C (Tian and Love, 2008). Επίσης πρέπει να δίνεται προσοχή στη θερμοκρασία του πατώματος για να αποφευχθεί η δυσφορία που μπορεί να νιώσει το ανθρώπινο σώμα όταν έρχεται σε επαφή με αυτό. Στα πρότυπα ASHRAE 55 και ISO EN 7730 η συνιστώμενη θερμοκρασία για την επιφάνεια του δαπέδου κυμαίνεται μεταξύ 17°C και 29°C (ASHRAE, 2013), (BSI, 2005).



Εικόνα 2-31 Καμπύλη θερμοκρασίας-ύψους δωματίου i) ενδοδαπέδια θέρμανση, ii) ακτινοβολο πάνελ οροφής, iii) σύστημα θέρμανσης αέρα με χαμηλή ταχύτητα παροχής, iv) σύστημα θέρμανσης αέρα με υψηλή ταχύτητα παροχής (CIBSE, 2006).



Εικόνα 2-32 Διάγραμμα θερμοκρασίας-ύψους δωματίου για διάφορα συστήματα θέρμανσης (Olesen, 2002)



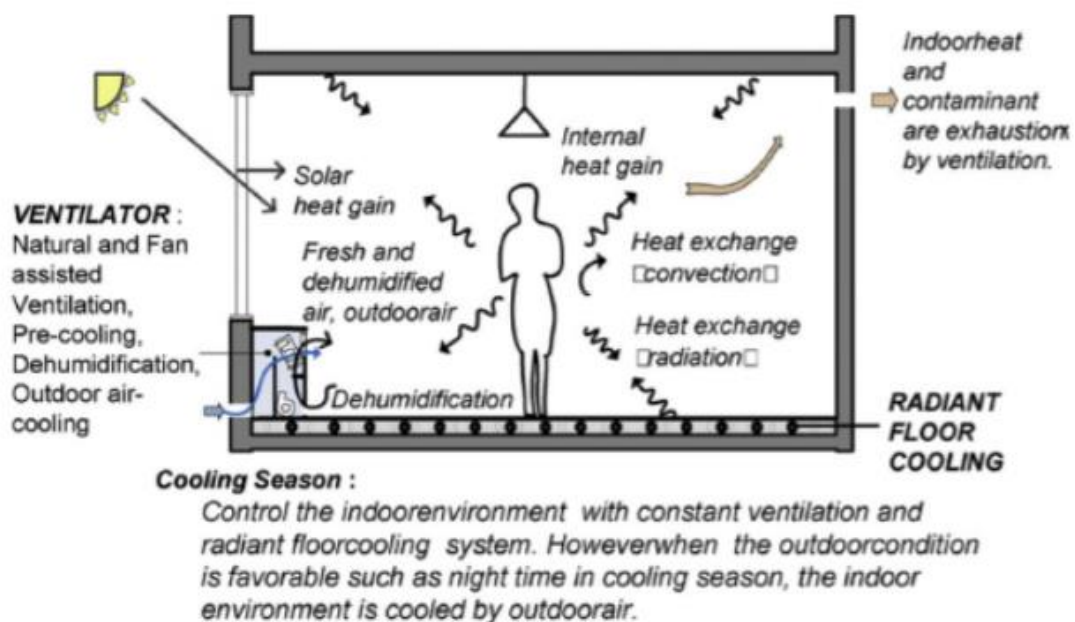
Εικόνα 2-33 Σύγκριση θερμοκρασιακής κατανομής στον χώρο ανάμεσα σε σύστημα θέρμανσης με ακτινοβολία(αριστερά) και με συναγωγή(δεξιά)
 (<https://www.international.zehndersystems.com/download/4683/18117/20065.pdf>)

Η ροή αέρα στα συστήματα RHC είναι αρκετά μικρότερη σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης και ψύξη με συναγωγή, έτσι το κρύο λόγω υπερβολικής κίνησης μειώνεται. Επιπλέον δεν εμφανίζεται ξήρανση του αέρα, κάτι το οποίο παρατηρείται συχνά σε συστήματα θέρμανσης και ψύξης με συναγωγή. Όσον αφορά θέματα υγιεινής, η μειωμένη ροή του αέρα οδηγεί σε μείωση μεταφοράς της σκόνης εντός του χώρου. Είναι όμως σημαντικό ότι λόγω της μειωμένης ροής του αέρα, τα συστήματα αυτά αδυνατούν να διώξουν βλαβερούς μικροοργανισμούς από τον χώρο, καθώς αδυνατούν επίσης να διαχειριστούν το λανθάνον φορτίο του χώρου. Για αυτόν τον λόγο τα συστήματα αυτά συνοδεύονται από επιπλέον συστήματα αερισμού. Η προσθήκη συστημάτων αερισμού, σύμφωνα με μελέτες, βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα καθώς επίσης συνεισφέρουν και στη θερμική άνεση (Behne, 1999), (Causone et al., 2010).

2.6.3 Πρόβλημα συμπύκνωσης

Το βασικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα συστήματα ψύξης με ακτινοβολία είναι η συμπύκνωση υδρατμών στην επιφάνειά τους, γεγονός που περιορίζει αρκετά την απόδοσή τους συν ότι είναι υπεύθυνο για την δημιουργία μούχλας στον χώρο. Αιτία αυτού είναι ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του συστήματος μπορεί να φτάσει και να πέσει κάτω από το σημείο δρόσου του χώρου, με αποτέλεσμα η υγρασία του αέρα να συμπυκνωθεί πάνω στην

κρύα επιφάνεια. Έτσι είναι κύριας σημασίας η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας να μην πέφτει υπό του σημείου δρόσου καθώς και η συνδυαστική χρήση ενός συστήματος αερισμού το οποίο θα διαχειρίζεται τα λανθάνοντα φορτία. Σύμφωνα με μελέτες σε 6 μόλις λεπτά από την έναρξη της λειτουργίας του συστήματος ξεκινά να εντοπίζεται συμπύκνωση στις επιφάνειες ψύξης, ενώ τα επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας στο χώρο σταθεροποιούνται μετά από 60 λεπτά, γι' αυτό συνιστάται το σύστημα αερισμού να τίθεται σε λειτουργία 1 ώρα νωρίτερα από το σύστημα ψύξης (Jin et al., 2015). Όμως, έρευνες σε ένα καλά σφραγισμένο κτίριο με την ανανέωση του αέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας να είναι μικρότερη από $0.05h^{-1}$ (Air Changes per Hour) συνιστούν πως δεν εμφανίζεται συμπύκνωση ακόμα και χωρίς την πρώιμη λειτουργία του συστήματος αερισμού (Zhang and Niu, 2003). Εναλλακτική μέθοδος αποφυγής της συμπύκνωσης είναι η χρήση επαφών στα παράθυρα ώστε να διακόπτεται η παροχή νερού όταν είναι ανοιχτά όπως επίσης γενικότερος συστηματικός έλεγχος των επιπέδων υγρασίας του χώρου και διακοπή λειτουργίας του συστήματος όταν αυξάνονται (Feustel and Stetiu, 1995). Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στον σχεδιασμό όταν το σύστημα θα εγκατασταθεί σε περιοχές με υψηλά επίπεδα υγρασίας και ζεστό κλίμα.



Εικόνα 2-34 Ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης με ακτινοβολία συνδυασμένο με σύστημα αερισμού για έλεγχο της υγρασίας (Seo, Song and Lee, 2014)

2.6.4 Προβλήματα θορύβου

Ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα του χώρου, είναι η ελαχιστοποίηση των θορύβων από τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Σε ένα κτίριο για παράδειγμα με TABS, η ακουστική του δωματίου επιδεινώνεται καθώς συνηθίζεται να μην εγκαθίσταται κάποιο ηχομονωτικό υλικό για την για την μεγιστοποίηση της θερμικής του ισχύς. Ένας τρόπος για να ισορροπήσει η σύγκρουση θερμικής απόδοσης και η ελαχιστοποίηση θορύβων, είναι να μειωθεί η ταχύτητα εντός των σωλήνων. Οι Rage at all. έδειξαν ότι καλύμματα με 60% θερμική μόνωση προκαλούν 15% μείωση της θερμικής απόδοσης και αυξάνουν την θερμοκρασία λειτουργίας κατά 0.9°C (Rage, Kazanci and Olesen, 2016). Βάση αυτών των δεδομένων προτάθηκε για ενεργά θερμικά κτίρια, η προσθήκη κρεμάμενων ηχομονωτικών πλαισίων, καθώς και η προσθήκη ηχομόνωσης στους τοίχους.

2.7 Κόστος Συστήματος

Τα συστήματα RHC παρέχουν ανώτερη ποιότητα εσωτερικού αέρα καθώς και καλύτερα επίπεδα θερμικής άνεσης σε σύγκριση με τα συστήματα HVAC. Τα πλεονεκτήματα αυτά αποτυπώνονται στη μελέτη του 'Lawrence Berkeley National Laboratory', η οποία έδειξε πως οι εταιρείες των ΗΠΑ θα μπορούσαν να εξοικονομούν μέχρι και 58\$ δισεκατομμύρια ετησίως αποφεύγοντας τις ασθένειες στον εργασιακό χώρο και να επωφεληθούν από την αύξηση της παραγωγικότητας με έως και 200\$ δισεκατομμύρια ετησίως. Ωστόσο, το σημαντικότερο κίνητρο για την χρήση του συστήματος έγκειται στο κόστος. Μία ενδεικτική τιμή για πάνελ οροφής ανέρχεται στα 120€/m². Το συνολικό κόστος του συστήματος θέρμανσης και ψύξης καθορίζεται από δύο παράγοντες, το αρχικό κόστος και το κόστος λειτουργίας (Mumma, 2001).

Όσον αφορά το αρχικό κόστος, όλες οι μονάδες που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία και μεταφορά αέρα στο κτίριο (αντλίες, ανεμιστήρες, μονάδα επεξεργασίας αέρα, αγωγοί κλπ.) είναι μικρότερες, σε σύγκριση με των HVAC, λόγω των χαμηλότερων απαιτήσεων του συστήματος αερισμού, επομένως και οικονομικότερες κατά την αγορά τους. Ενδεικτικά, ο ρυθμός ροής αέρα στα συστήματα RHC ισοδυναμεί με το 15%-20% της ροής αέρα των συστημάτων HVAC (Mumma, 2002). Παράλληλα, οι χαμηλές απαιτήσεις αερισμού

μειώνουν αρκετά τον όγκο του κυκλώματος των αγωγών εξοικονομώντας χώρο στην κατασκευή του κτιρίου. Μελέτες έδειξαν ότι το ύψος κάθε ορόφου θα μπορούσε να ελαττωθεί κατά 0.20 m (Feustel and Stetiu, 1995), μια δυνατότητα που μεταφράζεται σε εξοικονόμηση υλικών και εργασίας κατά την κατασκευή του κτιρίου, συνεπώς και σε μείωση του αρχικού κόστους. Τα πάνελ οροφής παρόλο που αποτελούν ένα βασικό έξοδο που συγκαταλέγεται στο αρχικό κόστος του συστήματος, λόγω της μόνωσης που τοποθετείται στο πίσω μέρος τους μπορούν να αντικαταστήσουν τα ηχομονωτικά υλικά που ενσωματώνονται στην δομή του κτιρίου αλλά και τις ψευδοροφές εξοικονομώντας χώρο και χρήματα

Ενδεικτική είναι η μελέτη που διεξήχθη το 2011 στο κτίριο Software Development Block 1 (SDB-1) στην πόλη Hyderabad της Ινδίας (Guruprakash Sastry et al., 2014). Για την λεπτομερή σύγκριση μεταξύ δύο συστημάτων ψύξης, το κτίριο συνολικής έκτασης 23.226m² χωρίστηκε σε δύο απολύτως συμμετρικά τμήματα με ίδιες απαιτήσεις. Στο ένα τμήμα χρησιμοποιήθηκε σύστημα μεταβλητού όγκου αέρα (VAV) για ψύξη του κτιρίου ενώ στο δεύτερο τοποθετήθηκε υδραυλικό σύστημα ψύξης με ακτινοβολία. Για την ακριβή σύγκριση των δύο συστημάτων ψύξης το κτίριο εξοπλίστηκε επαρκώς με αισθητήρες υψηλής ακρίβειας για την μέτρηση των επιπτώσεων και της απόδοσης των δύο συστημάτων ψύξης. Μετά από δύο χρόνια λειτουργίας οι μετρήσεις έδειξαν ότι το σύστημα ψύξης με ακτινοβολία χρησιμοποίησε για την λειτουργία του 34% λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με το σύστημα VAV. Επιπλέον, το αρχικό κόστος του συστήματος ακτινοβολίας ήταν ελαφρώς χαμηλότερο από το κόστος του συστήματος κλιματισμού του αέρα και παράλληλα οι αναλύσεις έδειξαν βελτιωμένη θερμική άνεση στην περίπτωση του πρώτου.



Εικόνα 2-35 Software Development Block 1 (Hyderabad, India)



Εικόνα 2-36 Κάτοψη κτιρίου SDB-1 Αριστερά: σύστημα ψύξης VAV, Δεξιά: υδραυλικό σύστημα ψύξης με ακτινοβολία (Guruprakash Sastry et al., 2014)

2.8 Εφαρμογές

Η δομή και ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων RHC τα καθιστούν ιδανικά για χρησιμοποίηση σε μια πληθώρα εφαρμογών όπως είναι βιομηχανικές εγκαταστάσεις, δημόσια κτίρια (υπηρεσίες, σχολεία, πανεπιστήμια), νοσοκομεία, αθλητικές εγκαταστάσεις, αεροδρόμια, πολιτιστικά κέντρα (μουσεία, θέατρα) και άλλα κτίρια.



Εικόνα 2-37 Hunter Museum of American Art (Chattanooga, Tennessee)



Εικόνα 2-38 City center Crystals (Las Vegas, Nevada)



Εικόνα 2-39 UC Davis Business school



Εικόνα 2-40 New Reading (England) train station



Εικόνα 2-41 Bangkok international airport (radiant floor cooling)

Επίσης δεν είναι σπάνια η χρήση των ενδοδαπέδιων RHC σε εξωτερικούς χώρους, όπως για την αποφυγή του σχηματισμού πάγου σε δρόμους και οροφές σε περιοχές με αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες καθώς και για την απαγωγή θερμότητας από οδόστρωμα, συνήθως σε πίστες αγώνων ταχύτητας.

Όσον αφορά τις οικιακές εγκαταστάσεις, η χρήση των RHC είναι δυνατή και συστήνεται με τη προϋπόθεση ότι η σχεδίαση του θα είναι αρκετά ακριβής και λεπτομερής. Τα προβλήματα συμπύκνωσης είναι ο κύριος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν καθώς το επίπεδο υγρασίας εντός της οικίας μπορεί να είναι αρκετά ευμετάβλητο. Έτσι, είναι καίριας σημασίας να εκτιμηθούν οι ιδιαιτερότητες του χώρου, οι κλιματολογικές συνθήκες και το σύστημα

αερισμού που χρησιμοποιείται ώστε να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί ο κατάλληλος τύπος συστήματος ακτινοβολίας για την εκάστοτε εφαρμογή.



Εικόνα 2-42 Bandimere Speedway (Arvada, Colorado) Radiant cooling system to absorb heat



Εικόνα 2-43 Ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης για αποφυγή πάγου στους δρόμους

Κεφάλαιο 3. Μεταφορά θερμότητας σε πάνελ οροφής για ψύξη με ακτινοβολία

3.1 Μικτή συναγωγή

Όπως έχουμε προαναφέρει τα πάνελ οροφής χρησιμοποιούν δύο μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας, την ακτινοβολία και την συναγωγή. Αυτό που χαρακτηρίζει ένα πάνελ ακτινοβόλο είναι η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία να ξεπερνά το 50%. Ο μηχανισμός της συναγωγής επομένως παραμένει σημαντικός, ιδιαίτερα σε πάνελ ανοικτού τύπου που η επιφάνεια επικοινωνίας με τον χώρο είναι μεγάλη. Για τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία έχουν προταθεί διάφοροι τύποι (ASHRAE, 2000). Στην περίπτωση της συναγωγής η μελέτη του συντελεστή μεταφοράς είναι δυσκολότερη καθώς έχουμε τρεις διαφορετικούς τύπους συναγωγής, φυσική, εξαναγκασμένη και μικτή. Παράγοντες που καθορίζουν τον τύπο της συναγωγής είναι η ταχύτητα του αέρα και η επίδρασή του στην μεταφορά θερμότητας.

Συντελεστής φυσικής συναγωγής (NC)

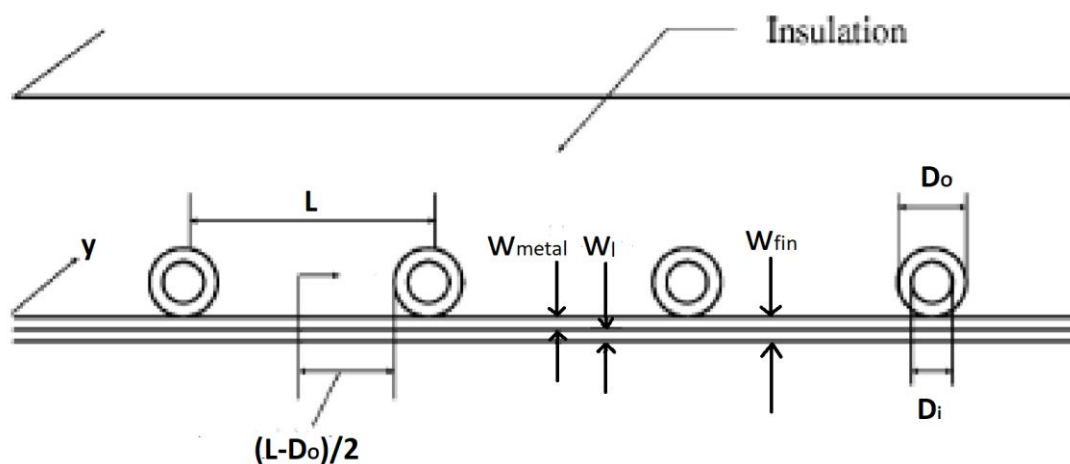
Για τον υπολογισμό του ποσοστού μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή σε πάνελ οροφής για ψύξη με ακτινοβολία σε μη αεριζόμενο χώρο μπορούν να χρησιμοποιηθούν συντελεστές μεταφοράς φυσικής συναγωγής (NC). Ωστόσο σε μηχανικά αεριζόμενο δωμάτιο το ποσοστό μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή αυξάνεται, επομένως η χρήση συντελεστών φυσικής συναγωγής (NC) είναι ανεπαρκής. Πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν συντελεστές φυσικής συναγωγής για τη μεταφορά θερμότητας σε πάνελ με ακτινοβολία. Ακόμα και το ευρωπαϊκό πρότυπο DIN 4715 (DIN 4715 (1997)) για την αξιολόγηση της ισχύος των CRCP η φυσική συναγωγή αποτελεί βασική δοκιμαστική συνθήκη. Σύμφωνα με το ASHARE (2000) το φαινόμενο της φυσικής συναγωγής που προκαλείται από την αέρα που μπαίνει στον χώρο, την κίνηση των ατόμων και τα συστήματα μηχανικού εξαερισμού δεν αυξάνει σημαντικά την ισχύ του CRCP. Η σύγκριση μετρήσεων που έγιναν σε μηχανικά αεριζόμενο δωμάτιο με τα αποτελέσματα των δοκιμών του DIN 7415 (1997) έδειξαν ότι η μεταφορά θερμότητας

ενισχύεται κατά 10-15%. Επιπλέον η σύγκριση τους έδειξε ότι σε πραγματικά κτίρια η ενίσχυση στην μεταφορά θερμότητας φτάνει το 25%. Λαμβάνοντας υπόψη μας την υψηλότερη αποδοτικότητα που προκύπτει λόγω της εξαναγκασμένης συναγωγής οδηγούμαστε σε σωστό σχεδιασμό του CRCP, καθώς δεν προστίθεται περιττή επιφάνεια και υπάρχει εξοικονόμηση στο αρχικό κόστος και στο κόστος λειτουργίας.

Συντελεστής μικτής συναγωγής (MC)

Σε περιπτώσεις που στον χώρο υπάρχει σύστημα αερισμού χρησιμοποιούμε συντελεστή μικτής συναγωγής (MC). Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης. Η πιο αξιοσημείωτη από αυτές είναι αυτή των Awbi και Hatton (2000) όπου προτάθηκε συντελεστής μικτής συναγωγής για πάνελ θέρμανσης και ψύξης. Συγκεκριμένα η μελέτη έγινε με την τοποθέτηση θερμών πάνελ στις επιφάνειες καλά μονωμένου θαλάμου μεγέθους γραφείου. Σε έναν άκρο των θερμών πάνελ τοποθετήθηκε ανεμιστήρας για να προκαλέσει εξαναγκασμένη συναγωγή. Από τον συνδυασμό φυσικής και εξαναγκασμένης συναγωγής, προέκυψε ένα μοντέλο υπολογισμού του συντελεστή μικτής συναγωγής (MC) ως συνάρτηση τεσσάρων μεγεθών. Τα μεγέθη αυτά είναι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του πάνελ και του χώρου (ΔT), η χαρακτηριστική διάμετρος του χώρου (D_e), το πλάτος του αεραγωγού (W) και η ταχύτητα που έχει ο αέρας στην έξοδο του αεραγωγού.

3.2 Ανάλυση μεταφοράς θερμότητας στο CRCP



Εικόνα 3-1 Γεωμετρία CRCP (Jeong and Mumma, 2003)

Η προσθήκη επιπλέον επιφάνειας στο πάνελ μας αποτρέπει από το να πάρουμε την παραδοχή του αδιαβατικού πτερυγίου και να θεωρήσουμε ότι έχουμε μεταφορά θερμότητας μόνο στη x-διεύθυνση της πλάκας. Επομένως έχουμε μεταφορά θερμότητας στην x και στην y- διεύθυνση. Η μεταφορά θερμότητας εντός της πλάκας, είναι υπεύθυνη για την διαφορετική θερμοκρασία που φέρουν τα διάφορα σημεία της. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς όσο πιο απομακρυσμένο είναι ένα σημείο από τον σωλήνα τόσο υψηλότερη θερμοκρασία θα έχει στην περίπτωση της ψύξης και χαμηλότερη στην περίπτωση της θέρμανσης.

Η ανάλυση της μεταφοράς

Η μεταφορά θερμότητας στο πάνελ είναι το άθροισμα της συνολικής μεταφοράς λόγω ακτινοβολία και της συνολικής μεταφοράς λόγω συναγωγής.

$$q_0 = q_r + q_c \quad \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad \text{Total}$$

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

$$q_c = h_c * (T_a - T_{pm}) \quad \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad \text{Convection}$$

Επομένως προσθέτοντας κατά μέλη της δύο παραπάνω σχέσεις η συνολική μεταφορά θερμότητας προκύπτει:

$$q_0 = h_r * (AUST - T_{pm}) + h_c * (T_a - T_{pm}) \quad \left(\frac{W}{m^2}\right)$$

$$q_0 = U_0 * (T_a - T_{pm}) \quad \left(\frac{W}{m^2}\right)$$

$$U_0 = h_c + h_r * \frac{(AUST - T_{pm})}{(T_a - T_{pm})} \quad \left(\frac{W}{m^2 * K}\right)$$

Ο U_0 είναι ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο πάνελ και συμπεριλαμβάνει την συνεισφορά και των δύο μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας προς το πάνελ, της συναγωγή και της ακτινοβολίας.

Συντελεστής ακτινοβολίας

Σύμφωνα με το ASHRAE (2000) η τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

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

Η τιμή για το AUST υπολογίζεται σύμφωνα με τον Kilakis et al. (1994) από τον τύπο:

$$AUST \approx T_a - d * z \quad (K)$$

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

Ο δείκτης d σχετίζεται με την θέση που βρίσκεται ο χώρος

$d_o = 0.5$, για εσωτερικό χώρο

$d = 1$, για δωμάτιο με την μία πλευρά εκτεθειμένη σε εξωτερικό χώρο και παράθυρα επιφάνειας μικρότερης από το 5% της συνολικής επιφάνειας του δωματίου

$d = 2$, για δωμάτιο με παράθυρα συνολικής επιφάνειας μεγαλύτερη από το 5% της επιφάνειας του σωματίου

$d = 3$, για δωμάτιο με δύο η περισσότερες πλευρές εκτεθειμένες σε εξωτερικό χώρο

Συντελεστής μικτής συναγωγής

Από την μελέτη των Awbi και Hatton (2000) ο υπολογισμός του συντελεστή μικτής συναγωγής δίνεται από τις εξισώσεις:

$$h_c = (h_{cn}^{3.2} + h_{cf}^{3.2})^{\frac{1}{3.2}} \quad \left(\frac{W}{m^2 * K}\right) \quad \text{Mixed convection (MC)}$$

$$h_{cn} = \frac{2.175}{De^{0.076}} * (T_a - T_{pm})^{0.308} \quad \left(\frac{W}{m^2 * K}\right) \quad \text{Natural Convection (NC)}$$

$$h_{cf} = 4.25 * W^{0.575} * \nu^{0.557} \quad \left(\frac{W}{m^2 * K}\right) \quad \text{Forced Convection (FC)}$$

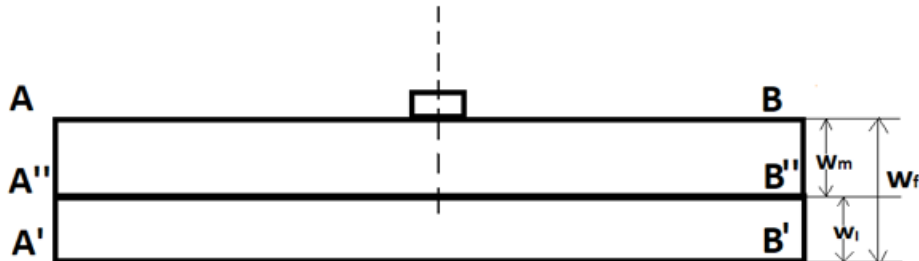
Στην περίπτωση που στο πάνελ είχαμε μόνο ένα υλικό θα μπορούσαμε να πάρουμε την εκδοχή του αδιαβατικού άκρου πτερυγίου. Επομένως θα μπορούσαμε να μελετήσουμε το πρόβλημα με την χρήση του παρακάτω τύπου, που αντιστοιχεί στην μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας:

$$Q = k * A * \frac{dT}{dx}$$

Η προσθήκη επιπλέον επιφάνειας διαφορετικού υλικού στο πάνελ άρα και διαφορετικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, έχει ως αποτέλεσμα τη διδιάστατη μεταφορά

θερμότητας εντός του. Για τον λόγο αυτό θα μελετήσουμε την μεταφορά θερμότητας υπολογιστικά, διακριτοποιώντας τμήμα της πρόσοψης του πάνελ.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$



Εικόνα 3-2 Σκαρίφημα του πάνελ μαζί με επιπλέον επιφάνεια στο κάτω μέρος του

Η απόσταση μεταξύ δύο χαλκοσωλήνων είναι ίση με L .

Το πάχος της άνω επιφάνειας του πάνελ είναι w_{metal} , το πάχος της κάτω επιφάνειας είναι w_i και το συνολικό πάχος του πάνελ είναι το άθροισμα των δύο w_{fin} .

$$w_{fin} = w_{metal} + w_i$$

Καταστρώνουμε τις συνοριακές συνθήκες για κάθε πλευρά του πάνελ καθώς και για το σημείο επαφής των δύο υλικών.

Άνω πλευρά:

Χωρίζουμε την άνω πλευρά στο κομμάτι της επιφάνειας που είναι σε επαφή με τη μόνωση και στο κομμάτι που είναι σε επαφή με τους χαλκοσωλήνες.

Στην επαφή του πάνελ με τους σωλήνες, η θερμοκρασία θα ισούται με την θερμοκρασία του σωλήνα.

$$\text{Για } y=0 \text{ και } -\delta \leq x \leq \delta : T(x, 0) = T_b$$

Στην επαφή του πάνελ με τη μόνωση η μεταφορά θερμότητας είναι μηδενική.

$$\text{Για } x > \delta \text{ και } x < -\delta : \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0$$

Πλάγιες πλευρές:

Στις πλάγιες πλευρές δηλαδή στο μισό της απόστασης μεταξύ 2 σωλήνων έχουμε συμμετρία επομένως η μεταφορά θερμότητας θα είναι μηδενική.

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-L} = 0 \text{ συμμετρία}$$

Κάτω πλευρά:

Στην επιφάνεια του πάνελ που είναι σε επαφή με τον αέρα του δωματίου θα έχουμε μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.

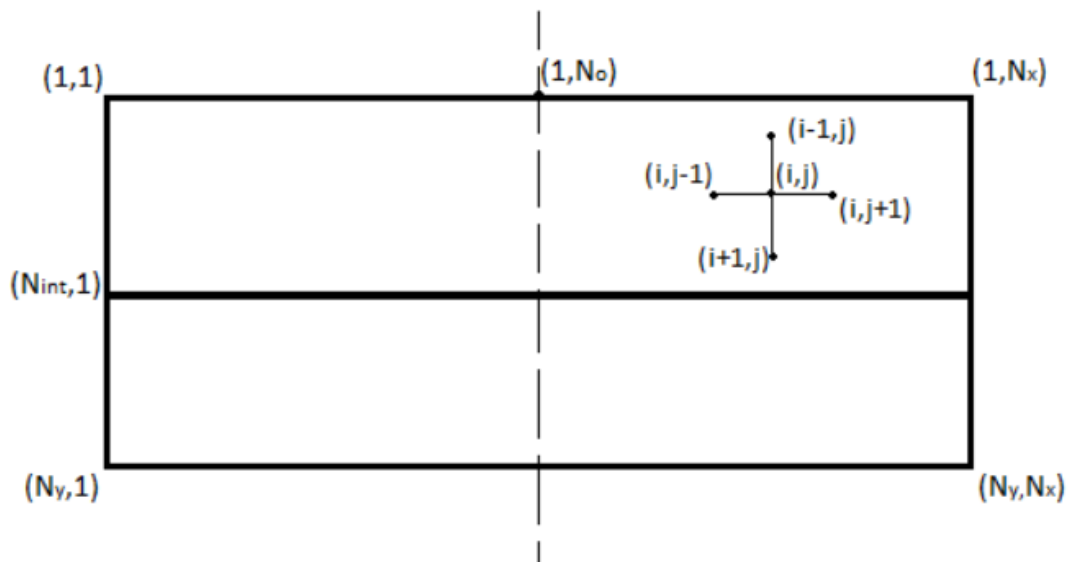
$$Q = h_a * (T - T_a)$$

Επομένως η μεταφορά θερμότητας στην επαφή του πάνελ με τον αέρα δωματίου θα είναι ίση με Q.

$$-k_l * \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=w_f} = h_a * (T - T_a)$$

Διαχωριστικό:

$$-k_m * \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=w_m^-} = -k_l * \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=w_m^+}$$



Εικόνα 3-3 Διακριτοποιημένο πλέγμα

Διακριτοποίηση

Έχουμε το διακριτοποιημένο πλέγμα που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Στην διεύθυνση x έχουμε N_x σημεία, στην διεύθυνση y έχουμε N_y σημεία. Το σημείο N_o βρίσκεται στην μέση της επιφάνειας στην x -κατεύθυνση.

$$N_c = \frac{N_x - 1}{2} + 1$$

$$N_c = \frac{N_x + 1}{2} \quad (1)$$

Το κάθε τμήμα στην x -διεύθυνση έχει μήκος ίσο με dx .

$$dx = \frac{L_{fin}}{N_x - 1} \quad (2)$$

Το κάθε τμήμα στην y -διεύθυνση έχει μήκος ίσο με dy .

$$dy = \frac{w_{fin}}{N_y - 1} \quad (3)$$

$$\frac{dy}{dx} = x_{yr} \quad (4)$$

Στην πλάκα του πάνελ έχουμε δισδιάστατη μεταφορά θερμότητας

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

Η διακριτοποίηση εντός του πλέγματος εκτός του σημείου επαφής των δύο υλικών γίνεται με σχήμα κεντρικών διαφορών:

$$\frac{T_{i,j-1} - 2*T_{i,j} + T_{i,j+1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i-1,j} - 2*T_{i,j} + T_{i+1,j}}{\Delta y^2} = 0 \quad (5)$$

Μονόπλευρη παράγωγος

Για διακριτοποίηση της περιμέτρου του πλέγματος παίρνουμε την μονόπλευρη παράγωγο.

$$T_{n-1} = T_n - \Delta x * \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_n + \frac{1}{2} * \Delta x^2 * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_n$$

$$T_{n-2} = T_n - 2 * (\Delta x) * \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_n + \frac{1}{2} * 4 * \Delta x^2 * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_n$$

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_n = \frac{3*T_n - 4*T_{n-1} + T_{n-2}}{2*(\Delta x)} \quad (6)$$

$$Q = h_a * dx * \frac{\sum_{i=1}^{N_x-1} [T_a - T(N_y, N_i)]}{L_{fin}} \quad (7)$$

Εισάγουμε τους τύπους (1)-(7) στον κώδικα.

3.3 Περιγραφή κώδικα MATLAB

Χρησιμοποιήθηκε κώδικας MATLAB, για την μελέτη της δισδιάστατης μεταφοράς θερμότητας. Στον κώδικα υπάρχουν οι διακριτοποιημένες εξισώσεις που βοηθούν στην ανάλυση του προβλήματος. Επίσης λαμβάνονται υπόψη οι συνοριακές, οι οποίες έχουν προστεθεί και αυτές στη διακριτοποιημένη τους μορφή. Ο κώδικας μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, υπολογίζει σε κάθε σημείο του διακριτοποιημένου πλέγματος την θερμοκρασία. Έπειτα υπολογίζεται ο μέσος όρος αυτών και προκύπτει έτσι η μέση

θερμοκρασία του πάνελ T_{pm} . Με την χρήση της μέσης θερμοκρασίας του πάνελ T_{pm} , υπολογίζεται η θερμότητα που απορροφά το πάνελ από τον χώρο. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι στον παρόντα κώδικα, χρησιμοποιείται μια ενδεικτική τιμή για τον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, και δεν πραγματοποιείται η εύρεση με την χρήση του αντίστοιχου τύπου. Αυτό συμβαίνει διότι τα συμπεράσματα που θέλουμε να εξάγουμε, αφορούν την επίδραση της επιπλέον επιφάνειας στην αποδοτικότητα του πάνελ, οπότε η χρήση ενδεικτικών σταθερών τιμών για κάποιες παραμέτρους είναι ικανοποιητική.

Ο κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο παράρτημα.

Κεφάλαιο 4. Ανάλυση Παραμέτρων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι εξισώσεις που περιγράφουν την μεταφορά θερμότητας στο CRCP. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί, βάση αυτών των εξισώσεων, πως οι παράμετροι του συστήματος επηρεάζουν τη λειτουργία και απόδοσή του.

Αρχικά μελετάται η επίδραση της προσθήκης επιπλέον επιφάνειας, για διάφορα πάχη και συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας αυτής. Έπειτα, με δεδομένη την προσθήκη δευτερεύουσας επιφάνειας, εξετάζεται η επίδραση της γεωμετρίας του πάνελ και συγκεκριμένα η απόσταση των σωλήνων και το πάχος της κύριας επιφάνειας.

Για τους υπολογισμούς ορίστηκε θερμοκρασία δωματίου ίση με 26 °C, θερμική αγωγιμότητα κύριας επιφάνειας 205 W/mK και σταθερή απόσταση μεταξύ σωλήνων 0.15m (εκτός της υποενότητας που μελετάται η επίδραση της απόστασης μεταξύ των σωλήνων).

Πίνακας 4-1 Σταθερές στον Κώδικα MATLAB

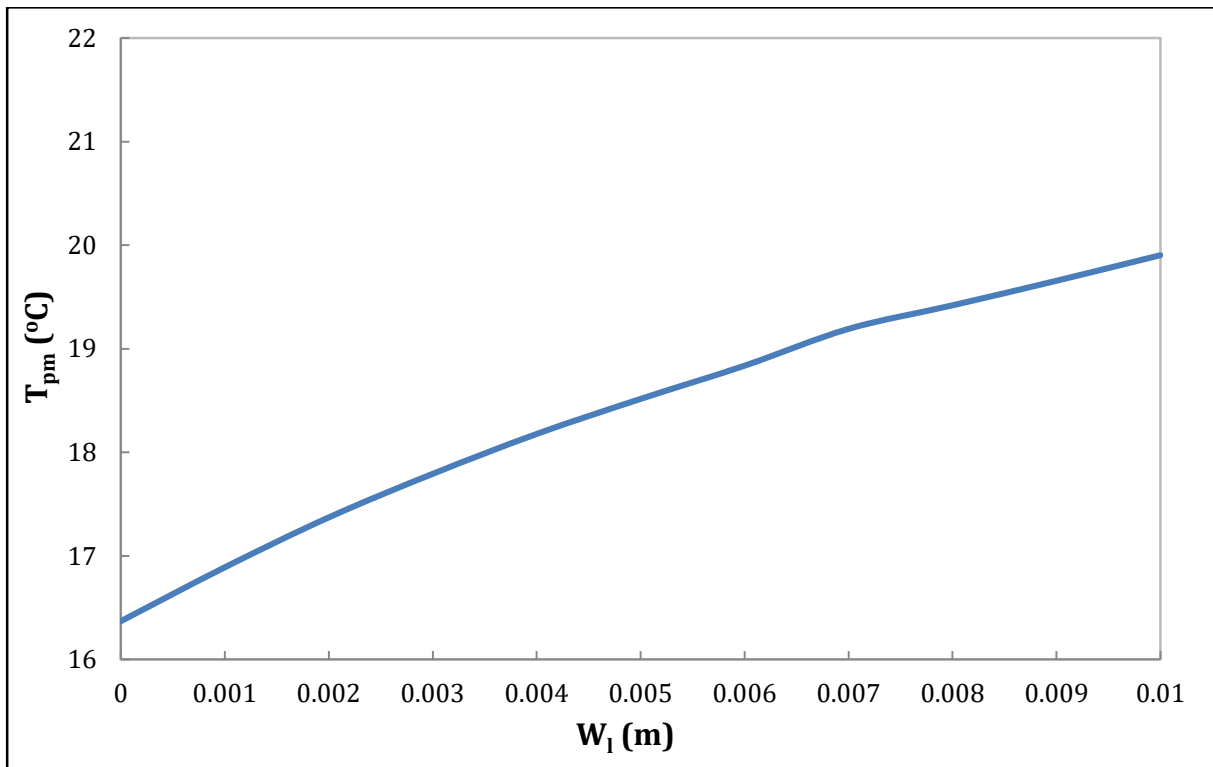
ΜΕΓΕΘΟΣ	ΤΙΜΗ
Θερμοκρασία δωματίου	26 °C
Θερμική αγωγιμότητα κύριας επιφάνειας	205 W/mK (αλουμίνιο)
Απόσταση μεταξύ σωλήνων (για υποενότητες 4.1.1 και 4.1.2)	0.15 m

4.1 Χαρακτηριστικά πάνελ

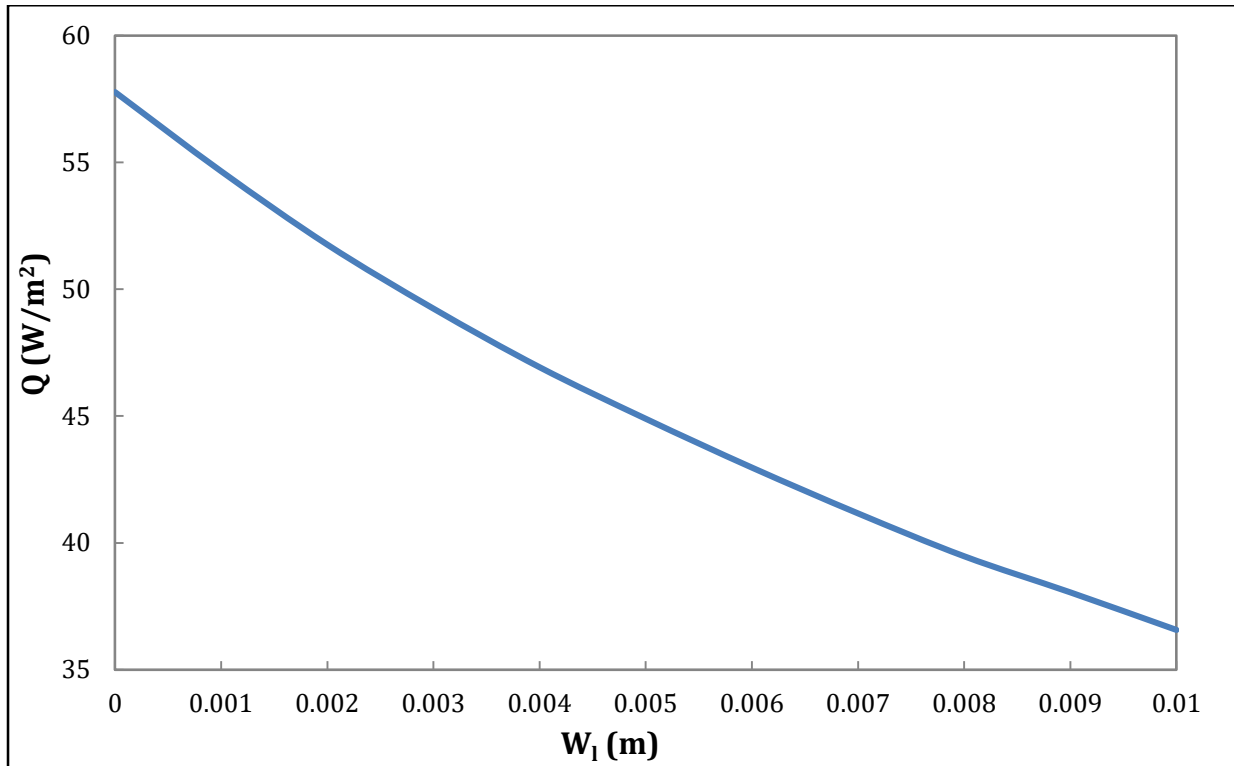
4.1.1 Επίδραση Πάχους της επιπλέον επιφάνειας

Σε αυτό το σημείο μελετήθηκε υπολογιστικά η προσθήκης μίας επιπλέον επιφάνειας καθώς και η επίδραση της αύξησης του πάχους αυτής. Η επιπλέον επιφάνεια έχει πολύ μικρότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας συγκριτικά με την κύρια και τοποθετείται στο κάτω μέρος του πάνελ. Όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα (4-1, 4-2) επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα στην ψυκτική ικανότητα του συστήματος. Συγκεκριμένα, για πάχος πρόσθετης επιφάνειας μέχρι 0.002m (2 χιλιοστά) δεν υπάρχει σημαντική αύξηση της μέσης

θερμοκρασίας του πάνελ T_{pm} , ενώ για μεγαλύτερα πάχη, η T_{pm} αυξάνεται αρκετά (περίπου 0.5°C ανά mm) και η ψυκτική ικανότητα μειώνεται ραγδαία. Επομένως, η επίδραση της προσθήκης μιας επιφάνειας με μικρό πάχος μπορεί να εξισορροπηθεί με μείωση της θερμοκρασίας νερού εισόδου ή την ελάττωση της απόστασης μεταξύ των σωλήνων ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας, άλλα όσο αυξάνεται το πάχος της η εξισορρόπηση γίνεται περισσότερο κοστοβόρα ως και ασύμφορη.



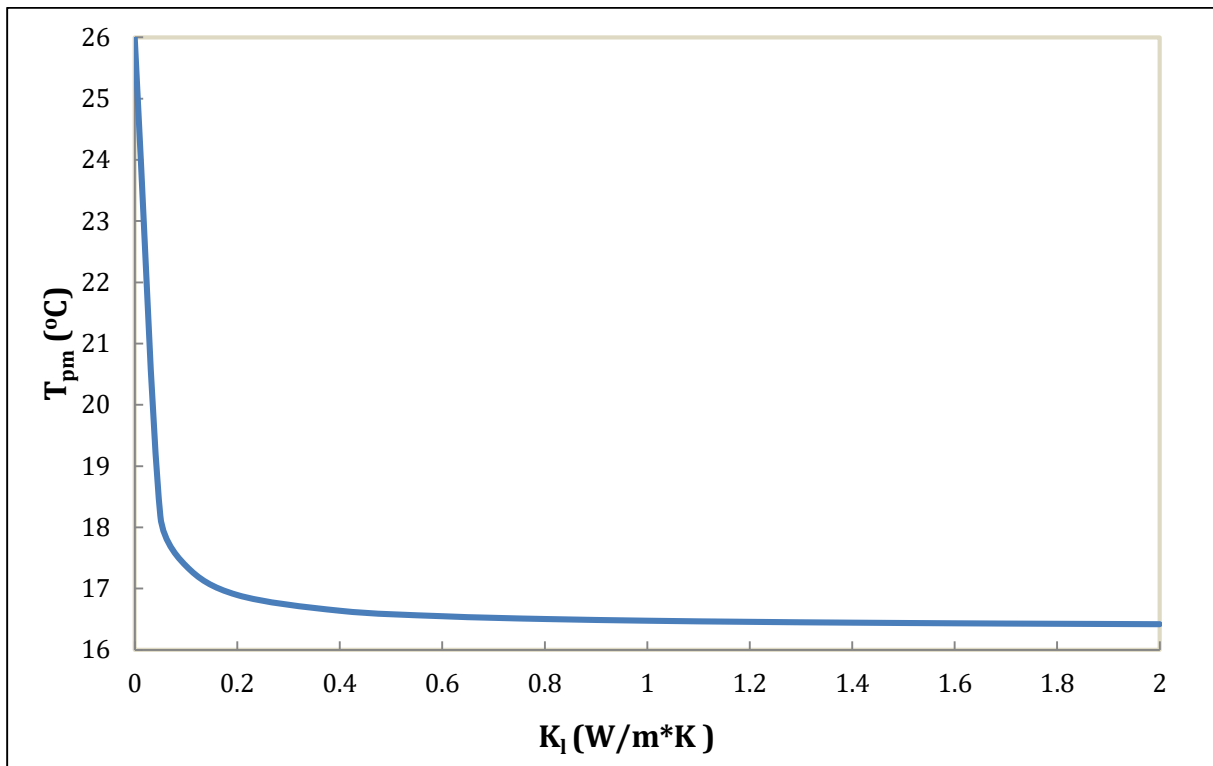
Διάγραμμα 4-1 Πάχος επιπλέον επιφάνειας – Θερμοκρασία Πάνελ



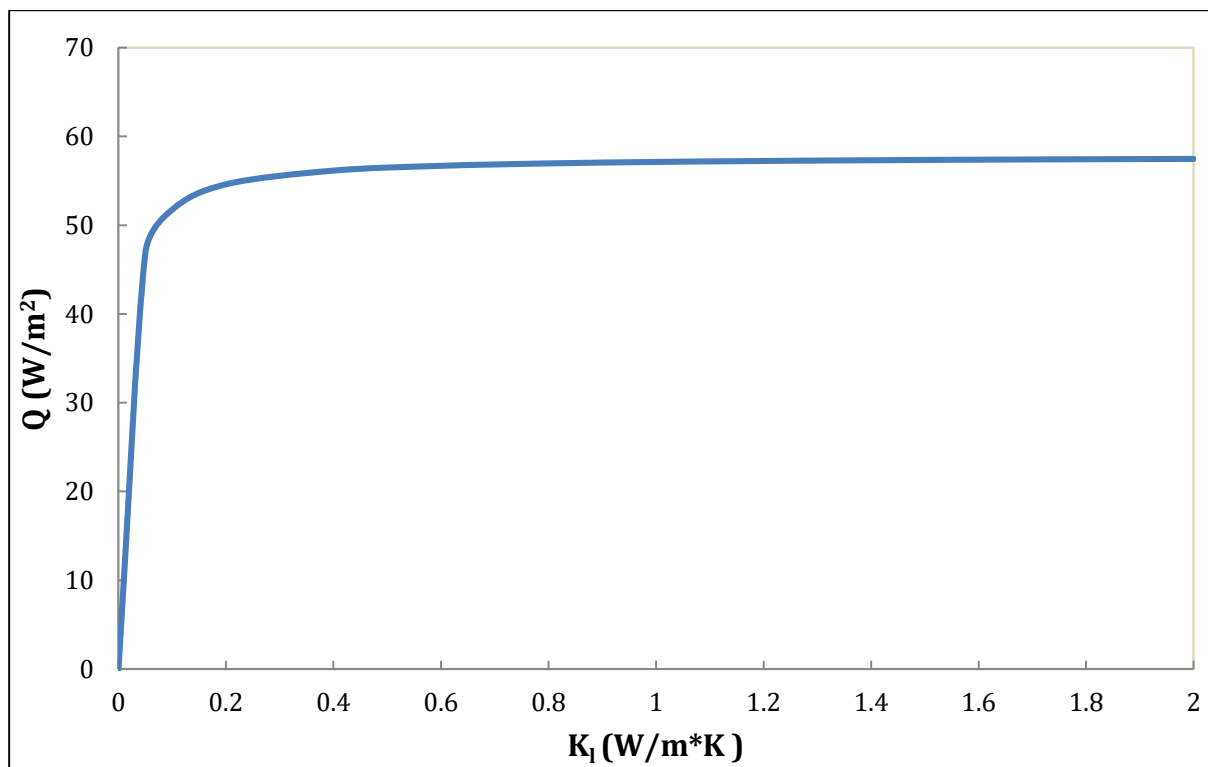
Διάγραμμα 4-2 Πάχος επιπλέον επιφάνειας - Ισχύς πάνελ

4.1.2 Επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας της επιπλέον επιφάνειας του πάνελ στην απόδοση

Όπως αναφέρθηκε η προσθήκη της επιπλέον επιφάνειας στο ακτινοβόλο πάνελ μειώνει την απόδοση του, καθώς ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της είναι κατά πολύ μικρότερος από αυτόν της κύριας επιφάνειας του πάνελ. Ωστόσο είναι επιθυμητό ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας της επιπλέον επιφάνειας να είναι όσο μεγαλύτερος γίνεται ώστε να μην έχουμε σημαντική μείωση στην απόδοση. Όπως παρατηρούμε από το παρακάτω διάγραμμα, για εύρος τιμών θερμικής αγωγιμότητας 0-0.1 W/mK, η αύξηση της απόδοσης είναι κατακόρυφη, για τιμές μεγαλύτερες του 0.1 W/mK ως 0.2 W/mK, η απόδοση σταθεροποιείται, ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 0.2 W/mK η επίδραση που προκαλεί η επιπλέον επιφάνεια στην μέση θερμοκρασία και στην απόδοση του πάνελ δεν είναι σημαντική. Επομένως επιθυμούμε συντελεστή μεταφορά θερμότητας με τιμή μεγαλύτερη από 0.2 W/mK. Υπενθυμίζεται πως ο λόγος που επιλέγεται να τοποθετηθεί η επιπλέον επιφάνεια είναι κυρίως αισθητικός



Διάγραμμα 4-5 Θερμική αγωγιμότητα υλικού επιπλέον επιφάνειας - Θερμοκρασία Πάνελ



Διάγραμμα 4-6 Θερμική αγωγιμότητα υλικού επιπλέον επιφάνειας - Ισχύς πάνελ

Σε αυτό το σημείο να υπενθυμίσουμε πως η τοποθέτηση της επιφάνειας γίνεται ως επί το πλείστον για αισθητικούς λόγους κι έτσι επιλέγονται καλαίσθητα υλικά.

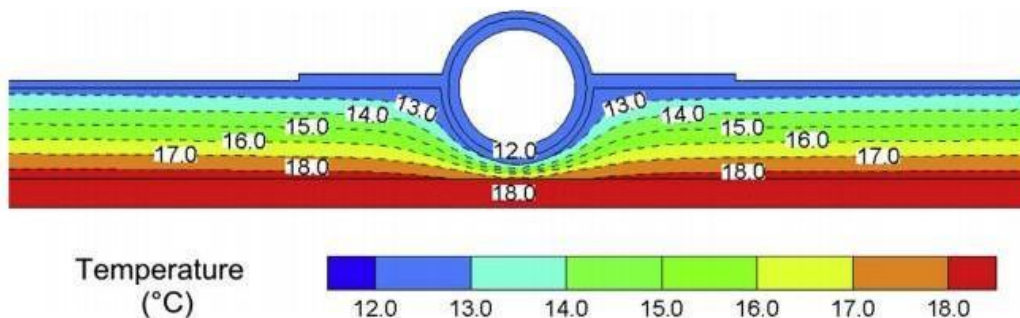
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές (τιμές σχεδιασμού) του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως ως πρόσθετη στρώση.

Πίνακας 4-2 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων υλικών επιπλέον επιφάνειας

ΥΛΙΚΟ	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/m/K)
Γυψοσανίδες	0.210-0.360
Ασβεστοκονίαμα	0.870
Ξυλεία (γενικώς)	0.120-0.210

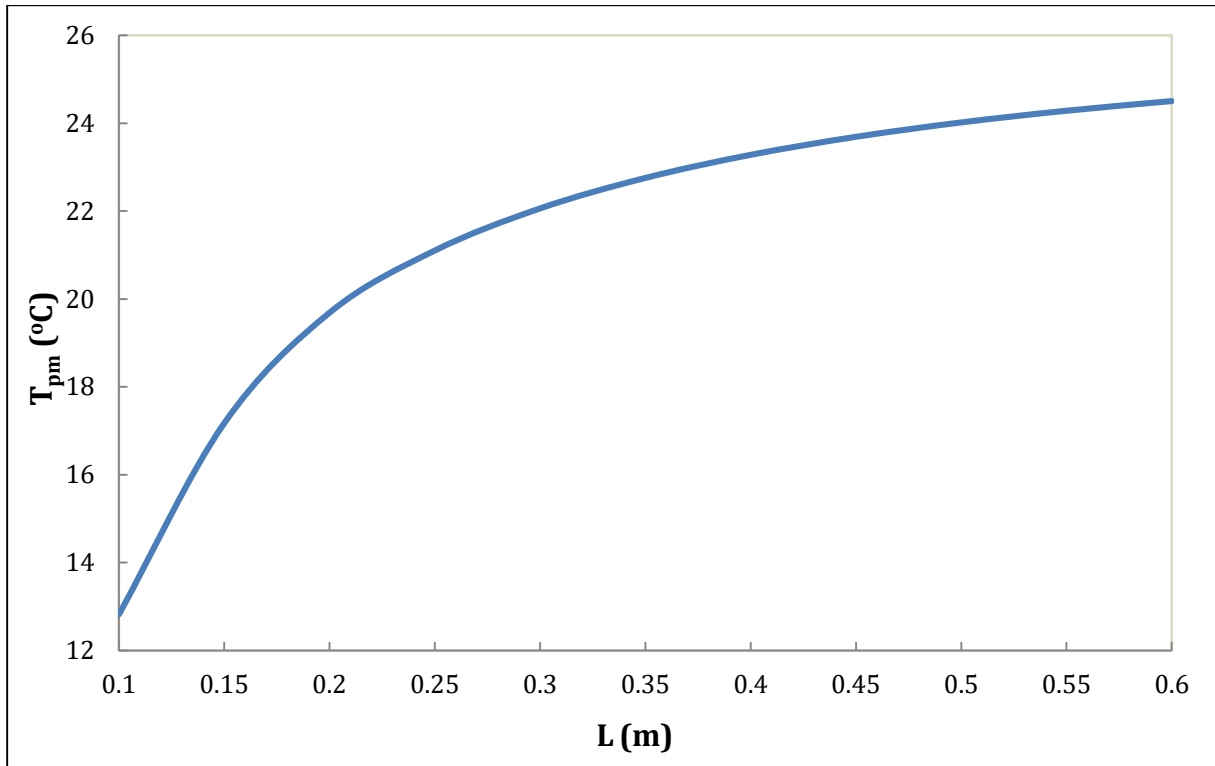
4.1.3 Επίδραση απόστασης των σωλήνων στην απόδοση

Η απόσταση μεταξύ των σωλήνων είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση καθώς και το κόστος του CRCP. Το τμήμα του πάνελ που βρίσκεται κοντά στους σωλήνες επηρεάζεται από το ψυχρό νερό, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία στο τμήμα αυτό να είναι χαμηλότερη (εικόνα 4-1). Όσο απομακρυνόμαστε από τον σωλήνα η θερμοκρασία αυξάνεται (διάγραμμα 4-3) και έτσι μειώνεται η ψυκτική ικανότητα του CRCP (διάγραμμα 4-4).

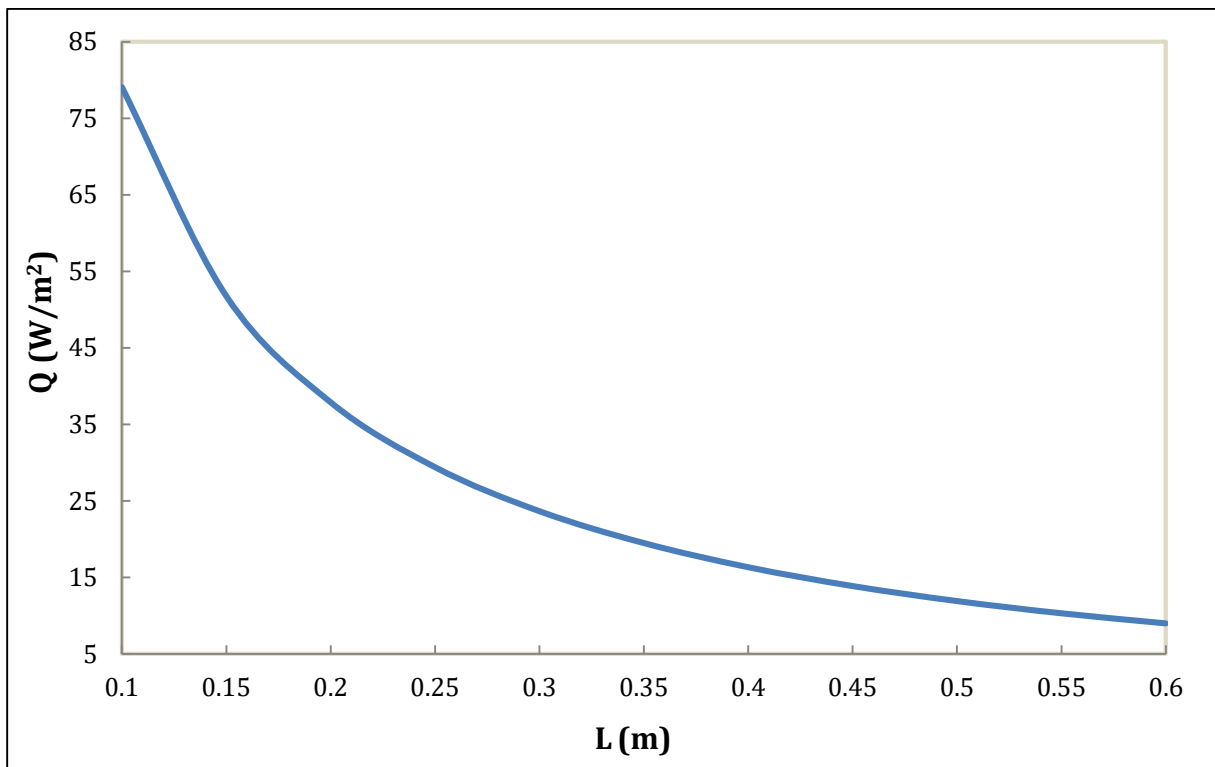


Εικόνα 4-1 Κατανομή θερμοκρασίας στην περιοχή γύρω από σωλήνα σε πάνελ οροφής για ψύξη με ακτινοβολία

Επομένως για μεγάλη απόσταση μεταξύ των σωλήνων, η περιοχή ανάμεσα τους θα ψύχεται πιο δύσκολα, αποδίδοντας μειωμένη ψυκτική ικανότητα. Από την άλλη, πολύ μικρή απόσταση μεταξύ των σωλήνων δημιουργεί μεν χαμηλότερη μέση θερμοκρασία στο πάνελ χωρίς όμως αυτή να μεταφράζεται σε ανάλογη αύξηση της ψυκτικής ισχύος. Επίσης η χρήση περισσότερων σωλήνων, που απαιτούνται για να μειωθεί η μεταξύ τους απόσταση, συνεπάγεται υψηλότερο αρχικό κόστος εγκατάστασης. Άρα, πρέπει να επιλέξουμε απόσταση μεταξύ των σωλήνων τέτοια ώστε να συνδυάζεται το χαμηλό κόστος με την επιθυμητή απόδοση του CRCP. Από τα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούμε ότι μια επαρκής απόσταση είναι 0.15m – 0.20m.



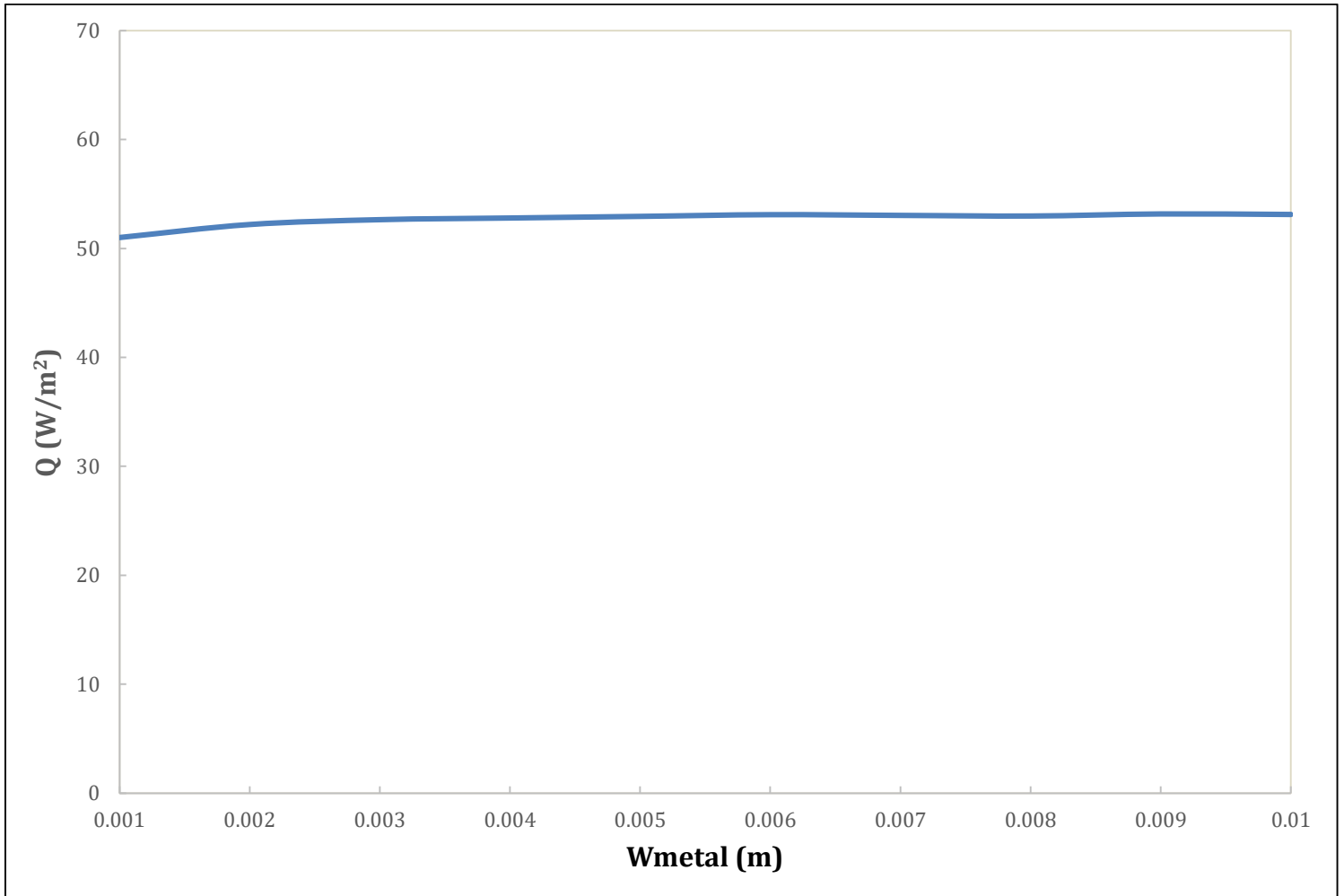
Διάγραμμα 4-3 Απόσταση μεταξύ σωλήνων - Θερμοκρασία Πάνελ



Διάγραμμα 4-4 Απόσταση μεταξύ σωλήνων - Ισχύς πάνελ

4.1.4 Επίδραση του πάχους της κύριας επιφάνειας του πάνελ στην απόδοση

Στην περίπτωση που μελετάμε, παρατηρούμε από το παρακάτω διάγραμμα ότι το πάχος της κύριας επιφάνειας δεν παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος. Συνήθως η επιφάνεια αυτή αποτελείται από αλουμίνιο που έχει υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (205 W/mK).



Διάγραμμα 4-7 Πάχος κύριας επιφάνειας πάνελ - Ισχύς πάνελ

Από το βιβλιογραφικό κομμάτι της διπλωματικής εξάγουμε το συμπέρασμα ότι τα CRCP παρουσιάζουν το ίδιο κόστος κατασκευής με αυτό των συμβατικών συστημάτων κλιματισμού αέρα (με κύριο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας τη συναγωγή). Επιπλέον παρατηρούμε ότι λόγω της βασικής αρχής λειτουργίας τους, της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία, τα συστήματα αυτά (CRCP) επιδεικνύουν υψηλότερη απόδοση κάτι που προσφέρει μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις άρα χαμηλότερο λειτουργικό κόστος, καθώς επίσης και υψηλότερα επίπεδα θερμικής άνεσης. Βασική προϋπόθεση ώστε να συμβούν τα παραπάνω είναι ο προσεκτικός σχεδιασμός του συστήματος στην εκάστοτε εφαρμογή.

Στο υπολογιστικό κομμάτι, η προσθήκη επιπλέον επιφάνειας δε μας επιτρέπει να κάνουμε την παραδοχή του αδιαβατικού πτερυγίου, για αυτόν το λόγο το σύστημα μελετήθηκε για δισδιάστατη μεταφορά θερμότητας. Προέκυψαν κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα όσον αφορά την βελτιστοποίηση της απόδοσής του.

Αρχικά η προσθήκη της επιπλέον επιφάνειας λειτουργεί σαν μόνωση δυσχεραίνοντας το έργο της εγκατάστασης. Έπειτα, σχετικά με το πάχος της επιπλέον επιφάνειας παρατηρούμε ότι η αύξησή του προκαλεί μείωση της απόδοσης του συστήματος. Παρόλα αυτά για πάχος μέχρι 2mm, η μείωση της απόδοσης δεν είναι σημαντική και εύκολα εξισορροπείται π.χ. με χρήση νερού χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Η θερμική αγωγιμότητα της επιπλέον επιφάνειας είναι πολύ χαμηλότερη σε σύγκριση με αυτή της κύριας επιφάνειας του πάνελ ψύξης. Η επιπλέον επιφάνεια συνήθως αποτελείται είτε από δομικό υλικό είτε υλικό που χρησιμοποιείται για λόγους καλαισθησίας. Παρατηρούμε ότι για εύρος τιμών θερμικής αγωγιμότητας 0-0.1 W/mK, η αύξηση της απόδοσης είναι κατακόρυφη, για τιμές μεγαλύτερες του 0.1 W/mK ως 0.2 W/mK, η απόδοση σταθεροποιείται, ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 0.2 W/mK οι μεταβολές στην απόδοση του πάνελ είναι αμελητέες. Επομένως προτείνεται να χρησιμοποιείται υλικό με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας τουλάχιστον 0.2 W/mK. Παρουσιάστηκαν κάποια υλικά που

μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετο στρώμα, παρ' όλ' αυτά η λίστα μπορεί να επεκταθεί και να μελετηθεί από πιο εξειδικευμένους επιστήμονες, όπως οι μηχανικοί υλικών.

Όσον αφορά την απόσταση των σωλήνων, είναι σαφές ότι η αύξηση της οδηγεί σε μείωση της απόδοσης του συστήματος. Από την άλλη όσο μικραίνει η απόσταση αυξάνεται και το κατασκευαστικό κόστος καθώς χρειάζονται περισσότεροι σωλήνες. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση ένα εύρος αποστάσεων 0.15-0.20m είναι αρκετά ικανοποιητικό ως προς την απόδοση και παράλληλα διατηρεί το κόστος σε προσιτά επίπεδα.

Επιπλέον φαίνεται ότι η αύξηση του πάχους της κύριας επιφάνειας του πάνελ δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Έτσι, εφόσον συνήθως χρησιμοποιείται αλουμίνιο, είναι θεμιτό να περιορίζεται το πάχος της ώστε να μειώνεται το κόστος.

Τέλος, από τη γενική μελέτη γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η απόδοση του πάνελ εξαρτάται από μια πληθώρα μεταβλητών οπότε η αδυναμία να δοθεί η επιθυμητή τιμή για μια μεταβλητή μπορεί να προσπεραστεί παρεμβαίνοντας σε κάποια άλλη λειτουργική ή κατασκευαστική παράμετρο. Το παραπάνω προσδίδει μία ευελιξία κατά την εκπόνηση μελέτης για την εγκατάσταση του συστήματος καθώς επίσης κάνει τη διαδικασία πιο ενδιαφέρουσα για τον μηχανικό.

- [1] ANSI/ASHRAE (2017) 'ANSI/ASHRAE 55:2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy', Ashrae. doi: 10.1007/s11926-011-0203-9.
- [2] ASHRAE (2000) 'Systems and Equipment Handbook', in American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc. Atlanta. GA.
- [3] ASHRAE (2012) 'Handbook. HVAC Systems and Equipment. Chapter 6. Panel Heating and Cooling', American Society of Heating, Refrigeration and Air conditioning Engineers.
- [4] Athienitis, A. K. (1997) 'Investigation of thermal performance of a passive solar building with floor radiant heating', *Solar Energy*. Pergamon, 61(5), pp. 337–345. doi: 10.1016/S0038-092X(97)00077-7.
- [5] Awbi, H. B. and Hatton, A. (2000) 'Mixed convection from heated room surfaces', *Energy and Buildings*, 32, pp. 153–166. doi: 10.1016/S0098-8472(99)00063-5.
- [6] Bean, R., Olesen, B. and Kim, K. (2010) 'History of Radiant Heating and Cooling', *ASHRAE Journal*.
- [7] Bean, R., Olesen, B. W. and Kim, K. W. (2010) 'Part 2 history of radiant heating & cooling systems', *ASHRAE Journal*.
- [8] Behne, M. (1999) 'Indoor air quality in rooms with cooled ceilings.: Mixing ventilation or rather displacement ventilation?', *Energy and Buildings*. Elsevier, 30(2), pp. 155–166. doi: 10.1016/S0378-7788(98)00083-8.
- [9] Causone, F. et al. (2010) 'Floor heating and cooling combined with displacement ventilation: Possibilities and limitations', *Energy and Buildings*. Elsevier, 42(12), pp. 2338–2352. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2010.08.001.
- [10] CIBSE (2006) *Environment Design: CIBSE Guide A*, Environmental design: CIBSE Guide A. doi: 10.1016/B978-0-240-81224-3.00016-9.
- [11] DIN 4715 (1997) 'Cooling surfaces for rooms; part 1: measuring of the performance with free flow', *Deutsches Institut fur Normung*.
- [12] Le Dréau, J. and Heiselberg, P. (2014) 'Sensitivity analysis of the thermal performance of radiant and convective terminals for cooling buildings', *Energy and Buildings*. Elsevier, 82, pp. 482–491. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2014.07.002.
- [13] Fanger, P. O. (1973) 'Assessment of man's thermal comfort in practice', *Occupational and Environmental Medicine*. doi: 10.1136/oem.30.4.313.
- [14] Feng, J. (2014) *Design and Control of Hydronic Radiant Cooling Systems*.
- [15] Feng, J. (Dove), Schiavon, S. and Bauman, F. (2013) 'Cooling load differences between radiant and air systems', *Energy and Buildings*, 65, pp. 310–321. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.06.009.
- [16] Feustel, H. E. and Stetiu, C. (1995) 'Hydronic radiant cooling — preliminary assessment', *Energy and Buildings*. Elsevier, 22(3), pp. 193–205. doi: 10.1016/0378-7788(95)00922-K.

- [17] Guruprakash Sastry, B. et al. (2014) 'VAV vs Radiant Side-by-Side Comparison', ASHRAE Journal. Available at: www.ashrae.org. (Accessed: 12 February 2019).
- [18] Hao, X. et al. (2007) 'A combined system of chilled ceiling, displacement ventilation and desiccant dehumidification', *Building and Environment*. Pergamon, 42(9), pp. 3298–3308. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2006.08.020.
- [19] ISO 11855-6 (2012) 'Building Environment Design-Design, Dimensioning, Installation and Control of Embedded Radiant Heating and Cooling Systems. Part 6: Control', International Organization for Standard, Geneva, Switzerland.
- [20] ISO 15251 (2007) Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, Cense. doi: 10.1016/j.cstda.2008.11.014.
- [21] 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. doi: 10.1016/S1359-4311(03)00211-4.
- [22] Jin, W. et al. (2015) 'Study on Condensation Features of Radiant Cooling Ceiling', *Procedia Engineering*, 121, pp. 1682–1688. doi: 10.1016/j.proeng.2015.09.117.
- [23] Karmann, C., Schiavon, S. and Bauman, F. (2014) 'ONLINE MAP OF BUILDINGS USING RADIANT TECHNOLOGIES', *Proceedings of Indoor Air 2014*. Available at: <http://bit.ly/RadiantFormCBE>.
- [24] Kazanci, O., Berk, ; Olesen, B. W. . and Kolarik, J. (2016) 'Low Temperature Heating and High Temperature Cooling in Buildings', Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, No. R-356. Available at: www.byg.dtu.dk.
- [25] Kessling, W. et al. (2004) 'Innovative Design Concept for the New Bangkok International Airport, NBIA', in *Proceedings of the Fourteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates*. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/79624089.pdf>.
- [26] 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. doi: 10.1016/0928-4869(94)90014-0.
- [27] Kim, K. W. and Olesen, B. W. (2015) 'Radiant heating and cooling systems', *ASHRAE Journal*, 57, pp. 28–37.
- [28] Kochendoerfer, C. (1996) 'Standardized Testing of Cooling Panels and Their Use in System Planning', *ASHRAE Transactions*, 102(1), pp. 651–658.
- [29] Koschenz, M. and Dorer, V. (1999) 'Interaction of an air system with concrete core conditioning', *Energy and Buildings*. Elsevier, 30(2), pp. 139–145. doi: 10.1016/S0378-7788(98)00081-4.
- [30] Lehmann, B., Dorer, V. and Koschenz, M. (2007) 'Application range of thermally activated building systems tabs', *Energy and Buildings*. Elsevier, 39(5), pp. 593–598. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2006.09.009.

- [31] Lienhard IV, J. H. and Lienhard V, J. H. (2017) 'A HEAT TRANSFER TEXTBOOK, fourth edition', Phlogiston Press. doi: 978-04864793161.
- [32] Meierhans, R. and Olesen, B. W. (2002) 'Art museum in Bregenz - Soft HVAC for a strong architecture', ASHRAE Transactions, 108 Part 2, pp. 1–6.
- [33] Mumma, S. A. (2001) 'Ceiling panel cooling systems', ASHRAE Journal, 43(11), pp. 28–32.
- [34] Mumma, S. A. (2002) 'Chilled ceilings in parallel with dedicated outdoor air systems: Addressing the concerns of condensation, capacity, and cost', ASHRAE Transactions, 8, PART 2, pp. 220–231.
- [35] Mumma, S. A. and Jeong, J. W. (2005) 'Field experience controlling a dedicated outdoor air system', ASHRAE Transactions, 111.
- [36] Ning, B. et al. (2016) 'Cooling capacity improvement for a radiant ceiling panel with uniform surface temperature distribution', Building and Environment, 102, pp. 64–72. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.03.009.
- [37] Olesen, B. (2008) 'Radiant floor cooling systems', ASHRAE Journal.
- [38] Olesen, B. W. (2002) 'Radiant floor heating in theory and practice', ASHRAE Journal.
- [39] Olesen, B. W. (2012) 'Thermo Active Building Systems: Using Building Mass To Heat and Cool', ASHRAE Journal, 54(2), pp. 44–52.
- [40] Olesen, B. W. (2012) 'Using building mass to heat and cool', ASHRAE Journal.
- [41] 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. Elsevier, 34(6), pp. 537–548. doi: 10.1016/S0378-7788(02)00004-X.
- [42] Park, B. and Krarti, M. (2016) 'Analysis of Integrated Radiant Slab Heating and Cooling Systems for Residential Buildings', Journal of Architectural Engineering, 22(1). doi: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000189.
- [43] Rage, N., Kazanci, O. B. and Olesen, B. W. (2016) 'Numerical simulation of the effects of hanging sound absorbers on TABS cooling performance'. Available at: [http://orbit.dtu.dk/en/publications/numerical-simulation-of-the-effects-of-hangingsound-absorbers-on-tabs-cooling-performance\(9033d354-e360-4ed1-a0f5-caaf2b49121a\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/numerical-simulation-of-the-effects-of-hangingsound-absorbers-on-tabs-cooling-performance(9033d354-e360-4ed1-a0f5-caaf2b49121a).html) (Accessed: 14 January 2019).
- [44] Rijksen, D. O., Wisse, C. J. and van Schijndel, A. W. M. (2010) 'Reducing peak 75 requirements for cooling by using thermally activated building systems', Energy and Buildings. doi: 10.1016/j.enbuild.2009.09.007.
- [45] Ryu, S. R. et al. (2004) 'A Study on the control methods for radiant floor heating and cooling system in residential building', ASHRAE Transactions, 110 PART I, pp. 106– 116.
- [46] Van Der Schee, W. G. (2011) 'Measurement of the noise production in water pipes', in SYMPOSIUM CIB W062. AVEIRO PORTUGAL. Available at: http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC24000.pdf (Accessed: 14 February 2019).

- [47] Seo, J.-M., Song, D. and Lee, K. H. (2014) 'Possibility of coupling outdoor air cooling and radiant floor cooling under hot and humid climate conditions', *Energy and Buildings*. Elsevier, 81, pp. 219–226. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2014.06.023.
- [48] Su, L. et al. (2015) 'Heat transfer and cooling characteristics of concrete ceiling radiant cooling panel', *Applied Thermal Engineering*, 84, pp. 170–179. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.03.045.
- [49] Tian, Z. and Love, J. A. (2008) 'A field study of occupant thermal comfort and thermal environments with radiant slab cooling', *Building and Environment*. Pergamon, 43(10), pp. 1658–1670. doi: 10.1016/j.buildenv.2007.10.012.
- [50] Zeiler, W. and Boxem, G. (2009) 'Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter', *Building and Environment*. Pergamon, 44(11), pp. 2308–2317. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2009.05.005.
- [51] Zhang, L. Z. and Niu, J. L. (2003) 'Indoor humidity behaviors associated with decoupled cooling in hot and humid climates', *Building and Environment*. Pergamon, 38(1), pp. 99–107. doi: 10.1016/S0360-1323(02)00018-5.
- [52] Akbari, H. and Pomerantz, M. (2001) 'Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas', DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00089-X

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ο υπολογιστικός κώδικας που συντάχθηκε με τη χρήση MATLAB.

```
% Tmax plane in the middle.

% Width of tube contact with the fin = 2*n_contact*dx

clear all

Ta=26

Lfin=0.15;    % distance between consecutive tubes

Wfin=0.0035; % total thickness of the fin

Wmetal=0.0015;    % thickness of the metal layer

km=205;    % thermal conductivity of metal

kl=0.1;    % thermal conductivity of additional layer

ha=6;    % convection (+radiation) coefficient in the air

Nx=101;    % number of points along the fin

Nc=(Nx+1)/2; % point at the center (symmetry plane) counting in the x-direction

Ny=69;    % number of points across the fin

dx=Lfin/(Nx-1); % x-discretization

dy=Wfin/(Ny-1); % y-discretization

xyr=dy/dx;

xyr2=xyr^2;

Nint=round(Wmetal/dy+1); % point at the metal/layer interface, counting in the y-direction
```

```
% Width of contact between fin and tube = 2*n_contact*dx
```

```
n_contact=1;
```

```
Nc1=Nc-n_contact;
```

```
Nc2=Nc+n_contact;
```

```
Nt=Nx*Ny;
```

```
A=zeros(Nt,Nt);
```

```
B=zeros(Nt,1);
```

```
T=zeros(Ny,Nx);
```

```
% BC on top (insulated) wall
```

```
for i=1:Nc1
```

```
    A(i,i)=3;
```

```
    A(i,i+Nx)=-4;
```

```
    A(i,i+2*Nx)=1;
```

```
end
```

```
for i=Nc2:Nx
```

```
    A(i,i)=3;
```

```
    A(i,i+Nx)=-4;
```

```
    A(i,i+2*Nx)=1;
```

```
end
```

```
% BC down symmetry planes
```

```
for j=2:Ny-1
```

```
    k=(j-1)*Nx+1;
```

```
    kk=j*Nx;
```

```
    A(k,k)=3;
```

```
    A(k,k+1)=-4;
```

```
    A(k,k+2)=1;
```

```
    A(kk,kk)=3;
```

```
    A(kk,kk-1)=-4;
```

```
    A(kk,kk-2)=1;
```

```
end
```

```
% Laplace eqn, everywhere except along interface
```

```
for j=2:Ny-1
```

```
    for i=2:Nx-1
```

```
        k=Nx*(j-1)+i;
```

```
        if Wfin==Wmetal
```

```
            A(k,k)=-2*(xyr2+1);
```

```
            A(k,k+1)=xyr2;
```

```
            A(k,k-1)=xyr2;
```

```
            A(k,k+Nx)=1;
```

```
            A(k,k-Nx)=1;
```

```
        else
```

```
if j~=Nint
    A(k,k)=-2*(xyr2+1);
    A(k,k+1)=xyr2;
    A(k,k-1)=xyr2;
    A(k,k+Nx)=1;
    A(k,k-Nx)=1;
else
    A(k,k)=3*(km+kl);
    A(k,k-Nx)=-4*km;
    A(k,k+Nx)=-4*kl;
    A(k,k-2*Nx)=km;
    A(k,k+2*Nx)=kl;
end
end
end
end

% BC along bottom (convecting) wall
for i=1:Nx
    if Wmetal==Wfin
        k=Nx*(Ny-1)+i;
        coef=km/2/dy;
        A(k,k)=3*coef+ha;
```

```

A(k,k-Nx)=-4*coef;

A(k,k-2*Nx)=coef;

B(k)=ha*Ta;

else

k=Nx*(Ny-1)+i;

coef=kl/2/dy;

A(k,k)=3*coef+ha;

A(k,k-Nx)=-4*coef;

A(k,k-2*Nx)=coef;

B(k)=ha*Ta;

end

end

for i=Nc1+1:Nc2-1

    A(i,i)=1;

    B(i)=16;

end

X=A\B;

for i=1:Ny

    for j=1:Nx

        k=(i-1)*Nx+j;

```



```
T(i,j)=X(k);  
  
end  
  
end  
  
Q=ha*dx*sum(Ta-(T(Ny,1:Nx-1)))/Lfin;  
T_pm=Ta-Q/ha;  
[Q T_pm]
```