

Κλιματισμός με ψυχόμενα ή θερμαινόμενα οικοδομικά στοιχεία ή μεταλλικούς πίνακες

των
Κίμωνα Α.
Αντωνόπουλου,
καθηγητή ΕΜΠ
Χ. Τζιβανίδη,
Δρ. Μηχανολόγου
Μηχανικού ΕΜΠ

1. Εισαγωγή.

Στο πλαίσιο της διεθνούς προσπάθειας για εξοικονόμηση ενέργειας στον οικιακό τομέα, αναζητούνται μη συμβατικά συστήματα κλιματισμού, τα οποία απ' ενός μεν, να πληρούν τις σύγχρονες απαιτήσεις άνεσης και υγιεινής, με χαμηλότερη ενεργειακή δαπάνη, και απ' ετέρου, να είναι δυνατή η ηλιακή υποστήριξή τους, με ικανοποιητικούς βαθμούς απόδοσης.

Το Εργαστήριο Κλιματισμού του Τμήματος Μηχανολόγων, ασχολήθηκε πρόσφατα με την θεωρητική και πειραματική μελέτη της μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας, κατά τον κλιματισμό χώρων με ψυχόμενα ή θερμαινόμενα οικοδομικά στοιχεία ή ακόμα και με μεταλλικούς ψυκτικούς πίνακες. Στην πρώτη περίπτωση, η ψύξη ή θέρμανση, επιτυγχάνεται με διέλευση αντιστοίχως, ψυχρού ή θερμού νερού, από σωλήνες ενσωματωμένους στην δομική μάζα, ενώ στην δεύτερη, οι σωλήνες είναι ενσωματωμένοι σε μεταλλικό έλασμα, που καλύπτει την κάτω επιφάνεια της οροφής ή και τμήμα της επιφάνειας των τοίχων. Με τα συστήματα αυτά, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας, δυνατότητα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης, βελτίωση συνθηκών θερμικής άνεσης και μείωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος, σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα κλιματισμού, όπως περιγράφεται στην επομένη ενότητα.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα, αποτελούν κίνητρο για την μελέτη των συστημάτων αυτών, δεδομένου μάλιστα ότι, τα αντίστοιχα μεταβατικά θερμικά προβλήματα, δεν έχουν επαρκώς εξεταστεί, με αποτέλεσμα την ελλιπή γνώση στοιχείων, για την μελέτη των σχετικών εγκαταστάσεων στην πράξη. Η βιβλιογραφία, επισκόπηση της οποίας παρέχεται από την ASHRAE [1,2], είναι περιορισμένη και ασχολείται κυρίως, με προσομοιώσεις και αναπτύξεις αλγορίθμων σχεδιασμού των σχετικών συστημάτων [3-9].

Για την πειραματική μελέτη των προτεινομένων συστημάτων, κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Κλιματισμού, πραγματικές εγκαταστάσεις, στις οποίες διεξήχθησαν μετρήσεις. Για την θεωρητική (κυρίως υπολογιστική, με χρήση πεπερασμένων διαφορών) ανάλυση των αντιστοίχων θερμικών προβλημάτων, διατυπώθηκε και επιλύθηκε, σύστημα διαφορικών εξισώσεων, που εκφράζει την μεταβατική θερμική συμπεριφορά των κτιρίων. Δεδομένου ότι, θεωρείται το μεταβατικό τριδιάστατο πρόβλημα αγωγής θερμότητας μέσα στα ψυχόμενα ή θερμαινόμενα δομικά στοιχεία, η ανάλυση είναι γενική και συνεπώς, καλύπτει την μελέτη οποιουδήποτε στοιχείου του κτιρίου, π.χ. οροφής, δαπέδου, υποστηλωμάτων, δοκών, ή ακόμα οποιασδήποτε άλλης μάζας του κελύφους ή του εσωτερικού χώρου. Έμφαση δίδεται στην θέρμανση του δαπέδου, αλλά κυρίως, στην ψύξη της οροφής, που παρουσιάζει το μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον.

Η έρευνα υποστηρίχθηκε από δύο ερευνητικά προγράμματα, εκ των οποίων το πρώτο (ΠΙΕΝΕΑ), αναφέρεται στο σύστημα κλιματισμού με εσωτερικά ψυχομένη οροφή, ενώ το δεύτερο (ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗΣ), στον κλιματισμό με μεταλλικούς ψυκτικούς πίνακες οροφής.

2. Πλεονεκτήματα των υπό μελέτη συστημάτων κλιματισμού.

Παρακάτω, αιτιολογείται η εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται με τον κλιματισμό δια ψυχομένων δομικών στοιχείων (π.χ. της οροφής) ή μεταλλικών πινάκων, σε σύγκριση με τον συμβατικό κλιματισμό.

(α) Ο δροσισμός της κεφαλής των ατόμων, με την δι' ακτινοβολίας συναλλαγή θερμότητας με την ψυχρή οροφή, δημιουργεί αίσθηση άνεσης με υψηλότερη θερμοκρασία αέρα εσωτερικού χώρου.

(β) Λόγω των μεγάλων ψυκτικών επιφανειών (ολόκληρη η οροφή ή και το άνω τμήμα των τοίχων), ο απαιτούμενος ρυθμός συναλλαγής θερμότητας, επιτυγχάνεται με υψηλότερες θερμοκρασίες ψυκτικού νερού.

(γ) Ενδείκνυται η χρήση ηλιακών ψυκτικών μηχανών, λόγω των ήπιων θερμοκρασιών ψυκτικού νερού, συμβάλλοντας έτσι, όχι μόνο στην εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και στην μείωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος.

(δ) Λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας του ψυκτικού νερού, αυξάνεται η απόδοση, τόσο της ηλιακής ψυκτικής μηχανής, όσο και του ηλιακού συλλέκτη, δεδομένου ότι, επαρκούν χαμηλότερες θερμοκρασίες διέγερσης της ατιμογεννητήριας της ψυκτικής μηχανής απορρόφησης.

(ε) Με την εσωτερική ψύξη ή θέρμανση δομικών στοιχείων, επιτυγχάνεται θερμική αξιοποίηση της μάζας του κτιρίου, ανώτερη από αυτήν που παρατηρείται κατά τον συμβατικό κλιματισμό. Έτσι, μειώνονται σημαντικά τα φορτία αιχμής.

(στ) Με τα ψυχόμενα ή θερμαινόμενα δομικά στοιχεία, επιτυγχάνεται η επιθυμητή χρονική μετατόπιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τις αντλίες θερμότητας και συνεπώς, αποφεύγεται η επικίνδυνη για την ΔΕΗ αιχμή φορτίου. Συγχρόνως, ο καταναλωτής, έχει άμεσο οικονομικό όφελος, καθώς μεταφέρει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, σε χρόνους μειωμένου τιμολογίου.

(ζ) Κατά την θέρμανση χώρων με θερμές δομικές επιφάνειες ή πίνακες, σημαντικό μέρος της μεταφοράς θερμότητας γίνεται δι' ακτινοβολίας. Αποτέλεσμα είναι, η μείωση των απωλειών προς το εξωτερικό περιβάλλον, λόγω διαδοχικών ανακλάσεων της ακτινοβολίας στις εσωτερικές επιφάνειες των δομικών στοιχείων του χώρου. Επιπρόσθετη μείωση των απωλειών προς το εξωτερικό περιβάλλον,

επιτυγχάνεται διότι οι υαλοπίνακες του χώρου, είναι αδιαπέραστοι από την μεγάλο μήκος κύματος ακτινοβολία, που εκπέμπεται από τις εσωτερικές επιφάνειες ελεγχόμενης θερμοκρασίας (δομικές επιφάνειες ή πίνακες).

Εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας και την μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, λόγω δυνατότητας χρήσης ηλιακής ενέργειας, τα προτεινόμενα συστήματα κλιματισμού, προσφέρουν και υψηλότερο βαθμό συνθηκών θερμικής άνεσης, διότι:

(i) Ελαχιστοποιείται η ενοχλητική κίνηση αέρος στον χώρο.

(ii) Μηδενίζεται ο θόρυβος που σχετίζεται με τοπικές κλιματιστικές μονάδες.

(iii) Αυξάνεται ο έλεγχος της θερμοκρασίας των εσωτερικών επιφανειών του χώρου και έτσι, αποφεύγονται οι δυσάρεστες διαφορές θερμοκρασίας των επιφανειών, οι οποίες παρατηρούνται στα συναγωγικά συστήματα κλιματισμού.

3. Θεωρητική και πειραματική ανάλυση.

Το θερμικό πρόβλημα του κλιματισμού χώρων, με ψυχόμενα ή θερμανόμενα οικοδομικά στοιχεία ή πίνακες, προσεγγίζεται πειραματικά και θεωρητικά.

Για την πειραματική προσέγγιση, κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Κλιματισμού, μονωμένος θάλαμος με οροφή από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος, με ενσωματωμένους σωλήνες, από τους οποίους διέρχεται ψυχρό νερό (Σχήμα 1).

Διεξήχθησαν μετρήσεις της θερμοκρασίας σε διάφορες θέσεις κατά μήκος των σωλήνων, στην επιφάνεια και εντός της πλάκας οροφής, καθώς και μέσα στον κλιματιζόμενο θάλαμο [10-12]. Μετρήσεις έγιναν και στην περίπτωση μεταλλικού ψυκτικού πίνακα, τοποθετημένου στην κάτω επιφάνεια της οροφής (Σχήμα 2). Στην περίπτωση αυτή, το ψυκτικό νερό δεν ρέει δια των σωλήνων εντός της πλάκας οροφής, αλλά δια σωλήνων ενσωματωμένων στο έλασμα του ψυκτικού πίνακα [13,14]. Και στις δύο περιπτώσεις, οι μετρήσεις κάλυψαν διάφορες συνθήκες και τιμές των παραμέτρων του προβλήματος, με σκοπό:



Σχήμα 1. Πλάκα οροφής με διανομέα και ψυκτικούς σωλήνες, πάνω σε μεταλλικό πλαίσιο στήριξης.

(α) Την διαπίστωση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθόδου κλιματισμού και τον εντοπισμό προβλημάτων, που ενδεχομένως προκύπτουν, όπως π.χ. η εφίδρωση της πλάκας οροφής ή του ψυκτικού πίνακα.

(β) Την διεξαγωγή πειραματικής παραμετρικής μελέτης.

(γ) Τον έλεγχο θεωρητικών μοντέλων και αντιστοίχων αλγορίθμων, που ανεπτύχθησαν, δια συγκρίσεως με τα πειραματικά δεδομένα.

Η θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος, περιλαμβάνει αναλυτικό και υπολογιστικό μέρος. Λόγω της πολυπλοκότητας του θερμικού προβλήματος, η αναλυτική επίλυση των σχετικών διαφορικών εξισώσεων, είναι εφικτή, μόνο υπό απλουστευτικές παραδοχές, οι οποίες απομακρύνουν από την πραγματικότητα. Για τον λόγο αυτό, οι αναλυτικές επιλύσεις χρησιμοποιούνται βοηθητικά και το κύριο βάρος εστιάζονται οι υπολογιστικές επιλύσεις των διαφορικών εξισώσεων με την τεχνική των πεπερασμένων διαφορών [15,16].

3.1. Κλιματισμός με εσωτερικός ψυχόμενα ή θερμαινόμενα οικοδομικά στοιχεία.

Γενικώς, η επίλυση της μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας στα κτίρια, αποτελεί δυσκολώτατο πρόβλημα, αφ' ενός λόγω του γεωμετρικώς πολυπλό-

κου σχήματος αυτών και της ποιότητας των υλικών από τα οποία αποτελούνται, και αφ' ετέρου λόγω των χρονικά μεταβαλλόμενων οριακών (εσωτερικών και εξωτερικών) συνθηκών. Η διέλευση ψυχρού ή θερμού νερού, από σωλήνες ενσωματωμένους στα δομικά στοιχεία, δυσχεραίνει ακόμα περισσότερο την επίλυση του προβλήματος. Στην παρούσα προσέγγιση του θέματος, αναπτύχθηκε πρωτότυπη μέθοδος επίλυσης, η οποία βασίζεται στην διατύπωση συστήματος διαφορικών εξισώσεων, που περιγράφουν την μεταβατική μετάδοση θερμότητας στα δομικά στοιχεία, στο ψυχρό ή θερμό νερό, που ρέει μέσα σε αυτά και στον εσωτερικό χώρο [17]. Για την επίλυση του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική των πεπερασμένων διαφορών. Η μέθοδος αντιμετωπίζει με πρωτότυπο αριθμητικό τρόπο, τόσο τα μεταβατικά ψυχομετρικά φαινόμενα, όσο και την δι' ακτινοβολίας μετάδοση θερμότητας.

Το αναπτυχθέν μεταβατικό τριδιάστατο μοντέλο και το αντίστοιχο λογισμικό καθώς και άλλες απλούστερες και ταχύτερες διδιάστατες προσεγγίσεις, ελέγχθηκαν δια συγκρίσεως με τα πειραματικά δεδομένα υπό διάφορες συνθήκες. Από τις συγκρίσεις, προέκυψε ότι, η συμφωνία μεταξύ μετρήσεων και υπολογισμών είναι ικανοποιητική.

Οι παραπάνω μέθοδοι, κυρίως το μεταβατικό τριδιάστατο μοντέλο που επιτυγχάνει την μεγαλύτερη ακρίβεια, χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή

εκτεταμένης παραμετρικής μελέτης για διάφορες περιπτώσεις θέρμανσης και ψύξης δομικών στοιχείων. Παρακάτω, συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα για τις περιπτώσεις θέρμανσης δαπέδου [18] και κυρίως, ψύξης οροφής [14], οι οποίες παρουσιάζουν το μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον.

(α) Η μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος κατά την ψύξη οροφής, μπορεί να χαρακτηριστεί, κατά μέσον όρο, ως εξής: Εάν η αποκατάσταση του μόνιμου θερμοκρασιακού πεδίου μέσα στην πλάκα οροφής απαιτεί χρόνο t_0 , τότε οι αντίστοιχοι χρόνοι για την αποκατάσταση του μόνιμου πεδίου στο ψυκτικό νερό και στον εσωτερικό χώρο, είναι αντιστοίχως $t_0/2$ και $t_0/4$.

(β) Κατά την μόνιμη κατάσταση, η θερμοκρασία της κάτω επιφάνειας της οροφής, είναι πρακτικά ομοιόμορφη, όταν οι ψυκτικοί σωλήνες ευρίσκονται σε μεγάλο βάθος εντός της οροφής ($d > 4$ cm, μετρούμενο από την κάτω επιφάνεια) και η απόσταση μεταξύ αυτών είναι μικρή ($S < 15$ cm). Κατά την μεταβατική λειτουργία, παρατηρούνται ήπιες θερμοκρασιακές διαφορές ΔT_x στην κάτω επιφάνεια της οροφής, κατά την κάθετη προς τους σωλήνες κατεύθυνση x (Σχήμα 3).

(γ) Οι θερμοκρασιακές διαφορές ΔT_x γίνονται σημαντικές όταν οι ψυκτικοί σωλήνες ευρίσκονται σε μέτριο ή μικρό βάθος ($d < 4$ cm) και η απόσταση μεταξύ αυτών είναι μεγάλη ($S > 20$ cm), π.χ. για $d = 3$ cm και $S = 20$ cm ή 30 cm, το ΔT_x φθάνει τους 3°C ή 6°C , αντιστοίχως. Για την δημιουργία συνθηκών άνεσης, οι θερμοκρασιακές διαφορές των εσωτερικών επιφανειών, πρέπει να διατηρούνται όσο το δυνατό μικρότερες.

(δ) Η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT_z της ψυχόμενης οροφής κατά την κατεύθυνση ροής z (Σχήμα 3) είναι, γενικώς, πολύ μικρή ($\Delta T_z < 0.5^\circ\text{C/m}$) και ακολουθεί τη θερμοκρασιακή διαφορά του εξερχομένου - εισερχομένου ψυκτικού νερού $\Delta T_f = T_{f0} - T_{fi}$, η οποία εξαρτάται από το συνολικό εσωτερικό φορτίο και την ταχύτητα του ψυκτικού νερού.

(ε) Η μεγίστη θερμοκρασιακή διαφορά ΔT_y κατά την κατεύθυνση y

του πάχους της οροφής (Σχήμα 3) παρατηρείται μεταξύ της περιφέρειας των σωλήνων και της κάτω επιφάνειας της οροφής. Κατά προσέγγιση, η ΔT_y στη μόνιμη κατάσταση μπορεί να εκφραστεί ως $\Delta T_y = q_{id}/k$, όπου q_i είναι η πυκνότης του ολικού εσωτερικού φορτίου (σε W/m^2) και k η ειδική θερμική αγωγιμότητα του υλικού πάχους d . Υπό συνήθεις συνθήκες, στην μόνιμη κατάσταση η ΔT_y μπορεί να φθάσει τους 10°C .

(στ) Σύμφωνα με την διεξαχθείσα παραμετρική μελέτη, οι περισσότεροι σημαντικές παραμέτροι του προβλήματος, είναι η απόσταση S μεταξύ των παραλλήλων σωλήνων, το βάθος αυτών d , εντός της δομικής πλάκας, η θερμοκρασία εισόδου T_{fi} του ψυκτικού ή θερμαντικού νερού, η επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού αέρα T_i , και το συνολικό φορτίο χώρου q_i . Οι υπόλοιπες παράμετροι, ασκούν μικρή επιρροή, είτε διότι μεταβάλλονται σε περιορισμένες περιοχές τιμών, είτε διότι η επίδρασή τους είναι πραγματικά μικρή, αν και η περιοχή τιμών στην οποία μεταβάλλονται είναι εκτεταμένη.

(ζ) Ενδιαφέρον μέγεθος στην πράξη, είναι η ψυκτική ικανότητα της οροφής q_s (σε W/m^2), δηλαδή η μέση πυκνότης θερμορροής, την οποία απορροφά η κάτω επιφάνεια της οροφής, κατά την μόνιμη κατάσταση, συναρτήσει των κυρίων παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή η συνάρτηση $q_s = f(S, d, T_{fi}, T_i)$, όπου το q_i δεν ελήφθη υπόψη ως ανεξάρτητη μεταβλητή, διότι κατά την μόνιμη κατάσταση, είναι ίσο προς το q_s .

Χρησιμοποιώντας μεγάλο πλήθος αποτελεσμάτων, ανεπτύχθη αλγεβρική έκφραση της παραπάνω συνάρτησης, με πολύ καλή ακρίβεια (μέγιστο σφάλμα 1%), η οποία παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον στις πρακτικές εφαρμογές [10,12].

3.2 Κλιματισμός με ψυκτικούς πίνακες οροφής.

Για την επίλυση του θερμικού προβλήματος, κατά τον κλιματισμό με μεταλλικούς ψυκτικούς πίνακες οροφής, ανεπτύχθη μέθοδος, η οποία συνδυάζει αναλυτικά και υπολογιστικά στοιχεία. Παρέχει, συναρτήσει του χρόνου, την κατανομή της θερμοκρα-

σίας στον ψυκτικό πίνακα, στο ψυκτικό νερό, την θερμοκρασία εσωτερικού αέρα, την τοπική και μέση ψυκτική ισχύ του πίνακα και άλλα χρήσιμα στοιχεία [19].

Η αναπτυχθείσα μέθοδος, λόγω των αναλυτικών χαρακτηριστικών της, απαιτεί ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο και παρέχει πολύ καλή ακρίβεια, όπως προκύπτει από τις συγκρίσεις των αποτελεσμάτων με τις μετρήσεις, υπό διάφορες συνθήκες (μέγιστο σφάλμα 1°C). Δια χρήσεως της μεθόδου, διεξήχθη εκτενής παραμετρική μελέτη, στην οποία, μεταξύ άλλων, ευρέθη ότι οι περισσότεροι σημαντικές παράμετροι του προβλήματος, είναι η απόσταση S μεταξύ των παραλλήλων σωλήνων του ψυκτικού πίνακα, η θερμοκρασία εισόδου T_{fi} και η παροχή m του ψυκτικού νερού, η επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού χώρου T_i και το συνολικό φορτίο q_i του χώρου. Οι υπόλοιπες παράμετροι, ασκούν μικρή επιρροή, είτε διότι μεταβάλλονται σε περιορισμένες περιοχές τιμών, είτε διότι η επίδρασή τους είναι μικρή, λόγω της φυσικής του προβλήματος, αν και οι περιοχές τιμών, στις οποίες μεταβάλλονται, είναι εκτεταμένες.

Ενδιαφέρον μέγεθος στην πράξη, είναι η ψυκτική ικανότητα του πίνακα q_s (σε W/m^2), δηλαδή η μέση πυκνότης θερμορροής, την οποία απορροφά ο πίνακας κατά την μόνιμη κατάσταση. Για την ψυκτική ικανότητα q_s , ανεπτύχθη συσχέτιση με μεγάλη ακρίβεια (σφάλμα 1%), πολύ χρήσιμη σε πρακτικές εφαρμογές [12,15].

4. Αξιολόγηση των προτεινομένων συστημάτων κλιματισμού.

4.1 Ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας.

Επαληθεύτηκε πειραματικά και θεωρητικά, η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται με τον κλιματισμό δια ψυχόμενης οροφής, σε σύγκριση με τον συμβατικό κλιματισμό [14].

Συγκεκριμένα, ο δροσισμός της κεφαλής των ατόμων και η δ' ακτινοβολίας συναλλαγή θερμότητας με την ψυχρή οροφή, δημιουργεί αίσθηση άνεσης, με υψηλότερη θερμοκρασία αέρα εσωτερικού χώρου. Σχετικές δοκιμές στον πειραματικό θάλαμο,

έδειξαν ότι ο κλιματισμός με ψυχόμενη οροφή, επιτρέπει την μετατόπιση της θερινής περιοχής άνεσης στον ψυχομετρικό χώρο, κατά ANSI/ASHRAE Standard 55 προς τις υψηλότερες θερμοκρασίες κατά 2°C. Υπολογίστηκε ότι τούτο συνεπάγεται, υπό συνθήκες συνθήκες, μείωση της απαιτούμενης ενέργειας, κατά 12%. Επιπλέον, οικονομία προκύπτει, λόγω των μεγάλων ψυκτικών επιφανειών (ολόκληρη η οροφή), οι οποίες επιτυγχάνουν τον απαιτούμενο ρυθμό συναλλαγής θερμότητας με υψηλότερες θερμοκρασίες ψυκτικού νερού. Πειραματικά, επιβεβαιώθηκαν θερμοκρασίες ψυκτικού νερού, μέχρι 16°C, υπό συνθήκη φορτία χώρων. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες ψυκτικού νερού, συνεπάγονται την δυνατότητα χρήσης ηλιακών ψυκτικών συστημάτων, με αυξημένη απόδοση, τόσο της ψυκτικής μηχανής, όσο και του ηλιακού συλλέκτη και συνεπώς, προκύπτει εξοικονόμηση ενέργειας, σε σύγκριση με ηλιακά συστήματα ψύξης, που συνδυάζονται με τις συμβατικές μεθόδους κλιματισμού [20].



Σχήμα 2. Τμήμα μεταλλικού ψυκτικού πίνακα, τοποθετημένου στην κάτω επιφάνεια της πλάκας οροφής.

διάρκεια θερμικής άνεσης, δεν υπερβαίνει τις 2 ώρες (ενδεικτική τιμή).

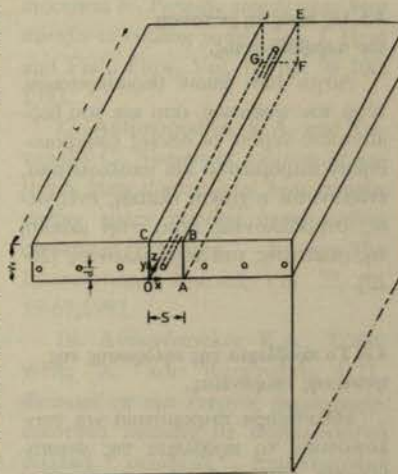
Η πρακτική σημασία των παραπάνω ευρημάτων, είναι προφανής στην περίπτωση αντλιών θερμότητας (θέρμανση ή ψύξη).

Με τα εσωτερικώς θερμαινόμενα ή ψυχόμενα δομικά στοιχεία, επιτυγχάνεται η επιθυμητή χρονική μετατόπιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και συνεπώς, αποφεύγεται η επικίνδυνη για τη ΔΕΗ αιχμή φορτίου. Συγχρόνως, ο καταναλωτής έχει άμεσο οικονομικό όφελος, καθώς μεταφέρει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση ή ψύξη, σε χρόνους μειωμένου τιμολογίου.

4.3. Ως προς τη δυναμική συμπεριφορά και ανταπόκριση στις μεταβολές φορτίου.

Τόσο η πειραματική όσο και η θεωρητική ανάλυση, έδειξαν ότι η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος είναι ικανοποιητική για τις κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδας [10,13,14]. Ο χρόνος ανταπόκρισης, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για την είσοδο στην περιοχή θερμικής άνεσης, ξεκινώντας από τις συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος είναι, γενικώς, ικανοποιητικός και μπορεί εύκολα να αυξομειωθεί κατά βούληση, με ρύθμιση της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού νερού $T_{f,i}$. Ενδεικτικές τιμές του χρόνου ανταπόκρισης του συστήματος, για τα

κλιματολογικά δεδομένα της Αθήνας (Ιούνιος), συνοψίζονται ως εξής: Για μικρά φορτία χώρου, ο απαιτούμενος χρόνος είναι μικρότερος των 3 min για $T_{f,i} < 10^\circ\text{C}$, και μικρότερος των 10 min για $T_{f,i} < 15^\circ\text{C}$. Για μέτρια και μεγάλα φορτία χώρου, οι αντίστοιχοι χρόνοι διπλασιάζονται. Για τις παραπάνω ενδεικτικές τιμές, ελήφθη ως περιοχή θερμικής άνεσης, η οριζομένη σύμφωνα με τον κανονισμό ANSI/ASHRAE



Σχήμα 3. Σχηματική απεικόνιση χώρου και πλάκας οροφής με τους εντός αυτής ψυκτικούς σωλήνες, και σύστημα συντεταγμένων x,y,z.

4.2. Ως προς το βαθμό αξιοποίησης της θερμικής μάζας.

Επαληθεύτηκε ότι, με την εσωτερική θέρμανση ή ψύξη δομικών στοιχείων, επιτυγχάνεται θερμική αξιοποίηση της μάζας του κτιρίου, κατά πολύ ανώτερη από αυτήν, που παρατηρείται κατά τους συμβατικούς τρόπους κλιματισμού [18,21].

Οι υπολογισμοί στην περίπτωση της ενδοδαπέδιας θέρμανσης, έδειξαν ότι, υπό συνθήκες συνθήκες, οι θερμοκρασίες θερμικής άνεσης, διατηρούνται στον χώρο για πολλά 24ωρα μετά την διακοπή διέλευσης θερμού νερού από το δάπεδο. Αντίθετα, η αντίστοιχη διάρκεια θερμικής άνεσης στα συμβατικά συστήματα θέρμανσης, μπορεί να υπερβεί τις 2 ώρες (ενδεικτική τιμή), μόνο με υπερθέρμανση του χώρου προ της διακοπής. Κατά τον κλιματισμό με ψυχόμενη πλάκα οροφής, υπό συνθήκες συνθήκες, η θερμική άνεση διατηρείται στον χώρο μέχρι και δύο 24ωρα μετά τη διακοπή διέλευσης ψυχρού νερού από τους ψυκτικούς σωλήνες, οι οποίοι ευρίσκονται ενσωματωμένοι στην οροφή. Αντίθετα, στα συμβατικά συστήματα κλιματισμού, η αντίστοιχη

Standard 55, ο οποίος αντιστοιχεί σε συμβατικά συστήματα κλιματισμού. Δεδομένου ότι, για τα προτεινόμενα συστήματα ψύξης οροφής, η περιοχή θερμικής άνεσης, μπορεί να μετατοπισθεί προς τις υψηλότερες θερμοκρασίες κατά 2°C, προκύπτει περαιτέρω μείωση των παραπάνω αναφερομένων χρόνων ανταπόκρισης.

4.4. Ως προς τη θερμική άνεση.

Επαληθεύτηκε πειραματικά η θερμική άνεση, την οποία προσφέρουν τα υπό μελέτη συστήματα κλιματισμού [10,13,14]. Η υπεροχή τους έναντι των συμβατικών συστημάτων, συνοψίζεται:

(α) στην ελαχιστοποίηση της ενοχλητικής κίνησης αέρα στον χώρο,

(β) στον μηδενισμό του θορύβου, που σχετίζεται με τοπικές κλιματιστικές μονάδες,

(γ) στην ελαχιστοποίηση των ενοχλητικών θερμοκρασιακών διαφορών στο χώρο, η οποία προκύπτει από την σταθερή θερμοκρασία ολόκληρης της επιφάνειας της οροφής, και

(δ) στην ελαχιστοποίηση των δυσάρεστων διαφορών θερμοκρασίας των επιφανιών, οι οποίες παρατηρούνται στα συναγωγικά συστήματα κλιματισμού.

4.5. Ως προς τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Λόγω των ήπιων θερμοκρασιών, τόσο του ψυκτικού, όσο και του θερμαντικού νερού, οι οποίες επιβεβαιώθηκαν πειραματικά και υπολογιστικά, ενδείκνυται η χρήση ηλιακής ενέργειας, συμβάλλοντας έτσι, στην μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος [20-23].

4.6. Το πρόβλημα της εφίδρωσης της ψυκτικής επιφάνειας.

Μελετήθηκε πειραματικά και υπολογιστικά, το πρόβλημα της συμπύκνωσης των υδρατμών, πάνω στην ψυχρή επιφάνεια των δομικών στοιχείων ή του ψυκτικού πίνακα και υπολογίστηκε η μάζα του συμπυκνωμένου υδρατμού, συναρτήσει του χρόνου υπό διάφορες συνθήκες. Για την απομάκρυνση του συμπυκνώματος, προτείνεται η χρήση κεκλιμένων ή κατακορύ-

φων ψυκτικών επιφανιών (δομικών ή πινάκων) ή και ο συνδυασμός, του υπό μελέτη συστήματος, με κατάλληλο συμβατικό σύστημα κλιματισμού [14].

5. Συμπέρασμα.

Μελετήθηκε θεωρητικά και πειραματικά, η μεταβατική μετάδοση θερμότητας κατά τον κλιματισμό χώρων, ο οποίος επιτυγχάνεται:

(α) με εσωτερικά ψυχόμενα ή θερμαινόμενα δομικά στοιχεία, ή

(β) με μεταλλικούς ψυκτικούς ή θερμαντικούς πίνακες, οι οποίοι καλύπτουν τις δομικές επιφάνειες.

Στην πρώτη περίπτωση, η ψύξη ή θέρμανση των δομικών στοιχείων, γίνεται με διέλευση ψυχρού ή θερμού νερού, αντιστοίχως, από σωλήνες ενσωματωμένους σε αυτά. Στην δεύτερη, οι σωλήνες δεν βρίσκονται μέσα στα δομικά στοιχεία αλλά είναι ενσωματωμένοι στον μεταλλικό πίνακα. Και στις δύο περιπτώσεις, απεδείχθη θεωρητικά και πειραματικά ότι επιτυγχάνεται, σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα κλιματισμού, εξοικονόμηση ενέργειας, πιο αποτελεσματική αξιοποίηση της θερμικής μάζας, βελτίωση των συνθηκών θερμικής άνεσης και μείωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Παρά τα παραπάνω πλεονεκτήματα, από την βιβλιογραφία διεπιστώθη ότι, τα αντίστοιχα μεταβατικά θερμικά προβλήματα, έχουν μελετηθεί ελάχιστα, με συνέπεια την έλλειψη στοιχείων για την κατανόηση των σχετικών θερμικών διεργασιών και την εκπόνηση μελετών σχετικών εγκαταστάσεων. Η διεξαχθείσα έρευνα στο Εργαστήριο Κλιματισμού, συμβάλλει στην κάλυψη των κενών αυτών, στην θεωρία και την πράξη.

Για την μείωση του υπολογιστικού χρόνου, που απαιτήθηκε για την γενική (μεταβατική, τριδιάστατη) διαδικασία επίλυσης, στην περίπτωση των εσωτερικά ψυχόμενων ή θερμαινόμενων οικοδομικών στοιχείων, επινοήθηκαν απλούστερες μορφές της μεθόδου, με μεγάλη ευελιξία και σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου αλλά και με μικρότερη ακρίβεια, η οποία όμως είναι ικανοποιητική για πρακτικές εφαρμογές. Για την περίπτωση των μεταλλικών πινάκων, ανεπτύχθη νέα ταχύτατη μέθοδος, η οποία παρουσιάζει ιδιαί-

τερο ενδιαφέρον και πρωτοτυπία, διότι συνδυάζει αναλυτικά και υπολογιστικά στοιχεία, με συνέπεια την επίτευξη ακριβείας, η οποία θα απαιτούσε πολλαπλασιώς λεπτομερέστερα υπολογιστικά πλέγματα.

Για τον έλεγχο της ακριβείας των μεθόδων που ανεπτύχθησαν, έγινε επιτυχής σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα. Στην συνέχεια, διεξήχθη εκτενής παραμετρική μελέτη, η οποία συντελεί στην προαγωγή της γνώσης στην περιοχή του κλιματισμού, με επιφάνειες ελεγχόμενης θερμοκρασίας και βοηθά στην κατανόηση των σχετικών θερμικών διεργασιών.

Η πειραματική προσέγγιση, περιέλαβε την κατασκευή μονωμένου πειραματικού θαλάμου, με οροφή από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος, με ενσωματωμένους σωλήνες, από τους οποίους διέρχεται ψυχρό νερό. Διεξήχθησαν μετρήσεις της θερμοκρασίας σε διάφορες θέσεις, κατά μήκος των σωλήνων, στην επιφάνεια και εντός της πλάκας οροφής, καθώς και μέσα στον κλιματιζόμενο θάλαμο. Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν, για την περίπτωση μεταλλικού ψυκτικού πίνακα, τοποθετημένου στην κάτω επιφάνεια της οροφής. Στην περίπτωση αυτή, το ψυκτικό νερό δεν ρέει δια των σωλήνων εντός της πλάκας οροφής, αλλά δια σωλήνων ενσωματωμένων στο έλασμα του ψυκτικού πίνακα. Και στις δύο περιπτώσεις, οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν για διάφορες συνθήκες και τιμές των παραμέτρων του προβλήματος, με σκοπό, αφ' ενός τον έλεγχο της ακριβείας των μεθόδων επίλυσης και αφ' ετέρου την παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας και των μειονεκτημάτων, των υπό μελέτη συστημάτων κλιματισμού στην πράξη.

Με την θεωρητική και πειραματική μελέτη, αξιολογήθηκε θετικά το σύστημα κλιματισμού με ψυχόμενα ή θερμαινόμενα δομικά στοιχεία ή μεταλλικούς πίνακες, ως προς:

(α) την εξοικονόμηση ενέργειας,

(β) τον βαθμό αξιοποίησης της θερμικής μάζας των κτιρίων,

(γ) την δυναμική συμπεριφορά και ανταπόκριση στις μεταβολές φορτίου,

(δ) την επιτυγχανομένη θερμική άνεση,

(ε) την ρύπανση του περιβάλλοντος, και

(στ) το πρόβλημα της εφίδρωσης της ψυκτικής επιφάνειας, για το οποίο προετάθησαν λύσεις.

Επίσης, ανεπτυχθήσαν και εδόθησαν για πρώτη φορά στους Μελετητές Μηχανικούς, νομογραφήματα, εύρηστες συσχετίσεις και λογισμικό, για την μελέτη σχετικών εγκαταστάσεων κλιματισμού.

Συμπεραίνεται ότι, η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, είναι ικανοποιητική για τις κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδας. Η δι' ακτινοβολίας συναλλαγή θερμότητας, με την ψυχρή οροφή, δημιουργεί αίσθηση άνεσης με υψηλότερη θερμοκρασία εσωτερικού αέρα κατά 2°C, με συνέπεια την μείωση της απαιτούμενης ενέργειας, υπό συνθήκες συνθήκες, κατά 12%. Επιπλέον, οικονομία προκύπτει, λόγω των μεγάλων ψυκτικών επιφανειών, με τις οποίες επιτυγχάνεται ο απαιτούμενος ρυθμός συναλλαγής θερμότητας, με θερμοκρασία ψυχρού νερού, μέχρι και 16°C. Λόγω των ήπιων θερμοκρασιών ψυκτικού και θερμαντικού νερού, ενδείκνυται η χρήση ηλιακής ενέργειας και μάλιστα, επιτυγχάνονται υψηλοί βαθμοί απόδοσης του συλλέκτη και της ηλιακής ψυκτικής μηχανής, με αποτέλεσμα, την επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας και την μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος.

Ως προς την αξιοποίηση της παρειακής θερμικής μάζας, ενδεικτικά αναφέρεται ότι, με την εσωτερική θέρμανση ή ψύξη δομικών στοιχείων, η θερμική άνεση στον χώρο, μπορεί να διατηρηθεί για δύο τουλάχιστον 24ωρα, μετά τη διακοπή λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης ή ψύξης, ενώ ο αντίστοιχος χρόνος θερμικής άνεσης, κατά τον συμβατικό κλιματισμό, μπορεί να υπερβεί τις 2 ώρες, μόνο με υπερθέρμανση ή υπέρψυξη του χώρου, προ της διακοπής. Με την χρονική μετατόπιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, την οποία επιτυγχάνει το υπό μελέτη σύστημα, αποφεύγεται η επικίνδυνη για την ΔΕΗ αιχμή φορτίου και συγχρόνως, ο καταναλωτής έχει άμεσο οικονομικό όφελος, καθώς μεταφέρει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για κλιματισμό, σε χρόνους μειωμένου τιμολογίου.

Βιβλιογραφία.

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers *ASHRAE HVAC Systems and Equipment*, ASHRAE, Atlanta, GA, 1993.

2. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE HVAC Applications*, Atlanta, GA, 1995.

3. Kilkis, B., *Radiant ceiling cooling with solar energy, Fundamentals, modeling and a case design*, ASHRAE Transactions, Vol. 99, pp. 521-533, 1993.

4. Kilkis, B., *Panel cooling and heating of buildings using solar energy*, ASME Winter Meeting: Solar energy in the 1990s, Vol. 10, pp. 1-7, 1990.

5. Wilkins, C.K. and Kosonen, R., *Cool ceiling system: A European air-conditioning alternative*, ASHRAE Journal, Vol. 34, pp. 41-45, 1992.

6. Kilkis, B., *Enhancement of heat pump performance using radiant floor heating systems*, ASME Winter Meeting, Advanced Energy Systems, Recent Research in Heat Pump Design, Analysis and Application, Vol. 28, pp. 119-127, 1992.

7. Berglund, L., Rascati, R. and Markel, M.L., *Radiant Heating and control for comfort during transient conditions*, ASHRAE Transactions, Vol. 88, pp. 765-775, 1982.

8. Hogan, R.E. Jr. and Blackwell, B., *Comparison of numerical model with ASHRAE designed procedure for warm water concrete floor heating panels*, ASHRAE Transactions, Vol. 92, pp. 589-601, 1986.

9. Steinman, M., Kalisperis, L.N. and Summers, L.H., *The MRT-correction method - An improved method for radiant heat exchange*, ASHRAE Transactions, Vol. 96, pp. 765-775, 1989.

10. Antonopoulos, K.A., Vrachopoulos, M. and Tzivanidis, C., *Experimental and theoretical studies of space cooling using ceiling-embedded piping*, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, pp. 351-367, 1997.

11. Αντωνόπουλος, Κ.Α., Τζιβανίδης, Χ. και Βραχόπουλος, Μ.,

Κλιματισμός κτιρίων δια ψυχομένου δομικού στοιχείου της οροφής, Τεχν. Χρονικά ΤΕΕ, IV, Τεύχος 2, σελ. 49-59, 1997.

12. Αντωνόπουλος Κ.Α., Βραχόπουλος Μ. και Τζιβανίδης Χ., *Εξοικονόμηση ενέργειας στον κλιματισμό: Ψύξη οροφής*, Δελτίο Πανελληνίου Συλλόγου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, Τεύχος 294, σελ. 61-68, 1997.

13. Antonopoulos, K.A., Vrachopoulos, M. and Tzivanidis, C., *Experimental evaluation of energy savings in air-conditioning using metal ceiling panels*, Proc. of the Int. Conf. on Energy and the Environment, Vol. 2, pp. 549-556, Limassol, Cyprus, organized by Brunel University and the I Mech E, 1997.

14. Antonopoulos, K.A., Vrachopoulos, M. and Tzivanidis C., *Experimental evaluation of energy savings in air-conditioning using metal ceiling panels*, *Applied Thermal Engineering* Vol. 18, pp. 1129-1138, 1998.

15. Antonopoulos, K.A., *Analytical and numerical heat transfer in cooling panels*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, pp. 2777-2782, 1992.

16. Antonopoulos, K.A. and Democritou F., *Periodic steady state heat transfer in cooling panels*, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 14, pp. 94-100, 1993.

17. Antonopoulos, K.A. and Tzivanidis C., *Numerical solution of unsteady three-dimensional heat transfer during space cooling using ceiling embedded piping*, Energy-The International Journal, Vol. 22, pp. 59-67, 1997.

18. Αντωνόπουλος Κ.Α., Τζιβανίδης Χ. και Κορωνάκη Ε.Π., *Φαινόμενη και ενεργός θερμοχωρητικότητα κτιρίων με θερμαινόμενα δομικά στοιχεία*, Επιστημονική Έκδοση Κτίριο, Β/1998 σελ. 65-70.

19. Antonopoulos, K.A. and Tzivanidis, C., *A combined analytical / numerical solution of unsteady heat transfer during panel cooling of buildings*, Proc. of the Int. Conf. on Energy and the Environment, Vol. 2,

pp. 541-548, October 1997, Limassol, Cyprus, organized by Brunel University and the I Mech E.

20. Rogdakis, E.D. and Antonopoulos, K.A., *Performance of a solar driven H₂O/LiBr absorption panel cooling system*, Proc. of the winter annual meeting of the American Society of Mechanical Engineers, Anaheim, California, AES -Vol. 27, HTD-Vol. 228, pp. 135-140, 1992.

21. Antonopoulos, K.A., Koronaki, E.P, and Tzivanidis, C., *Effects of building thermal mass during space cooling using ceiling-embedded piping*, Congress ECOS '98, Vol. II, pp. 865-871, Nancy, France, 1998.

22. Antonopoulos, K.A. and Rogdakis, E.D., *A trifluoroethanol/n-methyl-pyrrolidinone absorption heat pump for floor heating*, Proc. of the winter annual meeting of the

American Society of Mechanical Engineers, Anaheim, California, AES -Vol. 27, HTD-Vol. 228, pp. 309-314, 1992.

23. Antonopoulos, K.A. and Tzivanidis C., *Evaluation of building solar heating in Athens using floor-embedded piping*, Proc. of the 3rd European Conference "Rebuild the city of tomorrow", Barcelona, October 1999.