



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

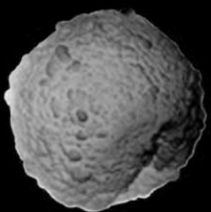
διπλωματική
εργασία

της
Ελένης
Πατρικίου

επιβλέπων
καθηγητής

ο
Κίμων Α.
Αντωνόπουλος

Χρήση υλικών αλλαγής φάσης σε πάνελς οροφής
για ηλιακή ψύξη χώρου στην περιοχή της Αθήνας



**Χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) σε πάνελ οροφής για ηλιακή
ψύξη χώρου στην περιοχή της Αθήνας**

Πατρικίου Ελένη

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα της εργασίας κύριο Κ.Α. Αντωνόπουλο για την αμέριστη και πολύτιμη βοήθειά του καθώς και για την κατανόηση την οποία έδειξε. Χωρίς τη δική του ώθηση δε θα είχε επιτευχθεί αυτό το εξαιρετικό αποτέλεσμα. Ευχαριστίες ανήκουν, επίσης, στις φίλες και συνοδοιπόρους στην προσπάθειά μου αυτή, Ορφανού Ελένη και Ράπτη Πηνελόπη, για τη συμπαράσταση και την αστείρευτη επιστημονική περιέργειά τους, που με οδήγησαν στην εξερεύνηση νέων γνωστικών πεδίων.

Την παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνω αρχικά στη μητέρα μου, Ευγενία, για την απεριόριστη αγάπη που μου δείχνει όλα αυτά τα χρόνια, για την υποστήριξη και την αέναη φροντίδα της. Τέλος, την αφιερώνω στη μνήμη του πατέρα μου, Δημήτρη, τον πιο σημαντικό άνθρωπο που πέρασε μέχρι τώρα από τη ζωή μου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρατίθεται αρχικά ένα θεωρητικό μέρος στο οποίο περιγράφεται γενικά η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) σε διάφορες εφαρμογές. Εφόσον καλυφθεί περιληπτικά αυτό το κομμάτι, παρατίθενται μελέτες συγκεκριμένα για χρήση PCMs σε πάνελ οροφής για ψύξη. Στη συνέχεια, ακολουθεί η δική μου μελέτη, στην οποία εξετάζεται η ψύξη χώρου με εμβαδόν οροφής $20 \times 5 = 100 \text{m}^2$, ύψος 2.5m και συνολική επιφάνεια υαλοπινάκων 8m^2 στο νότιο και δυτικό τοίχος. Το κτίριο βρίσκεται στην Αθήνα με γεωγραφικό πλάτος $\phi = 37.97^\circ$. Στην οροφή του συγκεκριμένου κτιρίου είναι τοποθετημένοι ηλιακοί επίπεδοι συλλέκτες κενού συνολικού εμβαδού 10m^2 και κλίσης 20° με σκοπό τη θέρμανση νερού, το οποίο εισέρχεται σε ψυκτική μηχανή απορρόφησης, ψύχεται και στη συνέχεια ρέει κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας σε σωλήνες εγκατεστημένους μέσα στο πάνελ της οροφής. Κατά τις ώρες μη ηλιοφάνειας διακόπτεται η παροχή του νερού με συνέπεια την υγροποίηση του PCM λόγω της απορρόφησης θερμότητας από τον προς ψύξη χώρο. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι με αυτή την εφαρμογή δεν πραγματοποιείται 100% κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται και άλλα κοινά μέσα ψύξης, όπως κλιματιστικά. Εφόσον σκοπός μας είναι η ψύξη του χώρου η μελέτη θα πραγματοποιηθεί την 21^η ημέρα για τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο). Τέλος, ακολουθεί παραμετρική διερεύνηση για την επιλογή των βέλτιστων τιμών συγκεκριμένων παραμέτρων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Γενικά για τα PCMs

1.1 Εισαγωγή.....	15
1.2 Μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας.....	15
1.2.1 Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας.....	15
1.2.2 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.....	16
1.2.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.....	16
1.2.3.1 Αποθήκευση Αισθητής θερμότητας.....	18
1.2.3.2. Αποθήκευση Λανθάνουσας θερμότητας.....	22

Κεφάλαιο 2: Υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας

2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2 Θερμικές ιδιότητες.....	25
2.3 Φυσικές ιδιότητες.....	26
2.4 Χημικές ιδιότητες.....	26
2.5 Κινητικές ιδιότητες.....	26
2.6 Οικονομικές ιδιότητες.....	27

Κεφάλαιο 3: Ταξινόμηση των PCMs

3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Οργανικά PCMs.....	29
3.3 Ανόργανα PCMs.....	34
3.4 Ευτηκτικά PCMs.....	37

Κεφάλαιο 4: Συσκευασία των PCMs

4.1 Εισαγωγή.....	41
4.2 Ογκώδης αποθήκευση.....	41
4.3 Συσκευασία σε μακροκάψουλες.....	42
4.4 Συσκευασία σε μικροκάψουλες.....	43
4.5 Συσκευασία σε μοριακές κάψουλες.....	43

Κεφάλαιο 5: Εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη χρήση PCMs

5.1 Εισαγωγή.....	47
5.2 Προσθήκη PCMs στον τοίχο του Trombe.....	47

5.3 Προσθήκη PCM's σε τοίχους.....	48
5.4 Προσθήκη PCM's σε πατζούρια.....	49
5.5 Προσθήκη PCM's σε κουρτίνες.....	49
5.6 Προσθήκη PCM's σε συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης.....	50
5.7 Προσθήκη PCM's σε πάνελ οροφής.....	51

Κεφάλαιο 6: Εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης σε σύστημα ηλιακού ζεστού νερού για οικιακή χρήση

6.1 Εισαγωγή.....	53
6.2 Πειραματική μέθοδος.....	54
6.2.1 Υλικά αλλαγής φάσης.....	54
6.2.2 Εξαρτήματα.....	54
6.2.3 Δεξαμενή ζεστού ηλιακού νερού για οικιακή χρήση (SDHW).....	55
6.2.4 Πειραματική διαδικασία.....	56
6.3 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	56
6.4 Συμπεράσματα.....	60

Κεφάλαιο 7: Πειραματική μελέτη ενδοδαπέδιας ηλεκτρικής θέρμανσης με χρήση πλακών PCM σταθερού σχήματος

7.1 Εισαγωγή.....	61
7.2 Πειραματική έρευνα ενός πρότυπου συστήματος.....	65
7.3 Πειράματα και συζήτηση.....	70
7.4 Συμπεράσματα.....	72

Κεφάλαιο 8: Μελέτες για πάνελ τοποθετημένα σε τοίχους

8.1 Μελέτη για το ιδανικό πάχος πάνελ με ενσωματωμένο PCM.....	75
8.2 Μια μελέτη των θερμικών χαρακτηριστικών των PCM σε γύψινα πάνελ για εφαρμογή στα κτίρια.....	76
8.3 Αριθμητική και πειραματική ανάλυση πάνελ για προκατασκευασμένους τοίχους, που περιέχουν ανάμεσά τους PCM.....	78
8.3.1 Τα είδη πάνελ που χρησιμοποιούνται.....	78
8.3.2 Πειραματικές δοκιμές.....	79
8.3.3 Αριθμητική ανάλυση.....	82

8.3.4 Σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα της πειραματικής και της αριθμητικής μεθόδου.....	83
8.4 Πειραματική μελέτη και αξιολόγηση της αποθήκευσης της λανθάνουσας μορφής θερμότητας σε πάνελ με υλικά αλλαγής φάσης.....	84
8.4.1 Λεπτομέρειες της πειραματικής διαδικασίας.....	84
8.4.2 Αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας.....	85
8.4.2.1 Ανάλυση DSC.....	85
8.4.2.2 Ικανότητα θερμικής αποθήκευσης των πάνελ με PCM.....	85
8.5 Συγκριτική μελέτη απλού πάνελ, πάνελ με ενσωματωμένη παραφίνη, πάνελ με ενσωματωμένο polyethylene glycol (peg 600) και PVC με ενσωματωμένο polyethylene glycol (peg 600)	87
8.5.1 Οριακές συνθήκες.....	88
8.5.2 Θερμικός κύκλος του πάνελ αναφοράς.....	88
8.5.3 Θερμικός κύκλος του πάνελ με ενσωματωμένη παραφίνη σε πολύ μικρές διατάξεις.....	89
8.5.3 Θερμικός κύκλος πάνελ με ενσωματωμένο PEG 600.....	91
8.5.4 Θερμικός κύκλος PVC πάνελ με ενσωματωμένο PEG 600.....	92
8.6 Συμπεράσματα.....	92

Κεφάλαιο 9: Ψύξη με PCMs σε πάνελ οροφής

9.1 Εισαγωγή.....	93
9.2 Αξιολόγηση της θερμικής αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιεί υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) και εφαρμογές.....	94

Κεφάλαιο 10: Πειραματική έρευνα αποθήκευσης ψύχους με τη βοήθεια PCM

10.1 Εισαγωγή.....	97
10.2 Η αρχή του free-cooling.....	97
10.3 Πειραματική οργάνωση.....	99
10.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	102
10.5 Συμπεράσματα.....	104

Κεφάλαιο 11: Απόδοση ενός πάνελ οροφής για ψύξη που χρησιμοποιεί υλικά αλλαγής φάσης μέσα σε μίγμα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας

11.1 Εισαγωγή.....	105
--------------------	-----

11.2 Πειραματική συσκευή.....	105
11.3 Αποτελέσματα.....	107
11.4 Συζήτηση.....	107
11.5 Συμπεράσματα.....	109

Κεφάλαιο 12: Πειραματική έρευνα και αριθμητική προσομοίωση της θερμικής απόδοσης της οροφής ενός κτιρίου, η οποία ενσωματώνει ένα υλικό αλλαγής φάσης (PCM) για θερμική διαχείριση

12.1 Εισαγωγή.....	111
12.2 Μοντελοποίηση του συστήματος ενσωμάτωσης του PCM στην οροφή του.....	112
12.2.1 Διατύπωση του προβλήματος.....	112
12.2.2 Μαθηματική διατύπωση.....	113
12.3 Υπολογιστική διαδικασία.....	114
12.4 Πειραματική έρευνα.....	116
12.5 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	117
12.5.1 Πειραματική τεκμηρίωση.....	117
12.5.2 Μεταβολή της θερμοκρασίας της οροφής στα δωμάτια με και χωρίς PCM.....	117
12.5.3 Κατανομή θερμοκρασία κατά μήκος της οροφής.....	119
12.6 Επίδραση της παροχής νερού στους σωλήνες που διατρέχουν το στρώμα του PCM..	120
12.7 Συμπεράσματα.....	120

Κεφάλαιο 13: Αξιοποίηση ενός θερμικά ενεργητικού πάνελ οροφής με PCM για εφαρμογές σε κτίρια εκσυγχρονισμένα και ελαφριάς κατασκευής

13.1 Εισαγωγή.....	123
13.2 Η έννοια του καινούριου πάνελ οροφής.....	124
13.2.1 Η βασική αρχή και οι απαιτήσεις.....	124
13.2.2 Πραγματοποίηση της ιδέας.....	124
13.3 Φυσικές ιδιότητες του πάνελ οροφής με PCM.....	126
13.4 Θερμική μοντελοποίηση συστημάτων με PCMs στους τοίχους.....	126
13.4.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	127
13.4.2 Μοντελοποίηση.....	128
13.5 Θερμικός σχεδιασμός του πάνελ οροφής.....	129
13.5.1 Θερμικές απαιτήσεις για το πάνελ οροφής.....	129

13.5.2 Προσομοιωτικοί υπολογισμοί για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων ιδιοτήτων του πάνελ.....	129
13.5.3 Εξομοιωτικού υπολογισμοί ενσωματωμένοι σε κτίρια.....	130
13.6 Πειραματική μελέτη.....	131
13.6.1 Παραγωγή πρωτοτύπων.....	131
13.6.2 Σχεδιασμός των εργαστηριακών δοκιμών.....	132
13.6.3 Απόδοση των εργαστηριακών δοκιμών.....	133
13.7 Συμπεράσματα.....	134

Κεφάλαιο 14: Απόδοση της ψύξης οροφής όταν χρησιμοποιείται PCM σε μίγμα υγρού

14.1 Εισαγωγή.....	135
14.2 Υλικά αλλαγής φάσης ενσωματωμένα σε μικροκάψουλες μέσα σε ασβεστόγαλα.....	136
14.3 Μεθοδολογία.....	137
14.3.1 Περιγραφή του συστήματος.....	137
14.3.2 Μοντελοποίηση του συνδυαστικού συστήματος.....	138
14.3.3 Το μοντέλο της δεξαμενής του MPCM που αιωρείται στο ασβεστόγαλα.....	138
14.3.4 Βασικά μοντέλα εξοπλισμού.....	139
14.3.5 Προσομοιωτική μελέτη.....	140
14.4 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	140
14.4.1 Εκτίμηση των διαστάσεων της δεξαμενής.....	140
14.4.2 Απαιτούμενος ρυθμός απομάκρυνσης θερμότητας.....	141
14.4.3 Μετατόπιση φορτίου και ηλεκτρική χρέωση.....	143
14.4.4 Ετήσια κατανάλωση ενέργειας και κόστος.....	143
14.5 Συμπεράσματα.....	145

Κεφάλαιο 15: Αύξηση της δυνατότητας ψύξης με εξάτμιση με τη χρήση συνδυαστικής ψύξης οροφής με MPCM σε ασβεστόγαλα

15.1 Εισαγωγή.....	147
15.2 Μεθοδολογία.....	147
15.2.1 Περιγραφή του συστήματος.....	147
15.2.2 Μοντελοποίηση του υβριδικού συστήματος.....	149
15.2.3 Μελέτη προσομοίωσης.....	149
15.3 Ανάλυση διαθεσιμότητας του νερού ψύξης.....	149
15.3.1 Καθορισμός της θερμοκρασίας εξόδου του νερού ψύξης από τον πύργο	

ψύξης.....	149
15.3.2 Ετήσια εμφάνιση της θερμοκρασίας υγρής σφαίρας.....	150
15.3.3 Η επίδραση της APT στην ετήσια διαθεσιμότητα της ψυκτικής πιθανότητας.....	150
15.4 Πιθανότητα εξοικονόμησης ενέργειας του υβριδικού συστήματος.....	152
15.4.1 Αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας του ασβεστογάλματος που περιέχει MPCM του συστήματος ψύξης με εξάτμιση.....	152
15.4.2 Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας του ψύκτη.....	153
15.4.3 Ποσοστό της ετήσιας εξοικονόμησης ενέργειας του ψύκτη ενός υβριδικού συστήματος.....	154
15.4.4 Βέλτιστος σχεδιασμός της δεξαμενής αποθήκευσης.....	156
15.5 Συμπεράσματα.....	157

Κεφάλαιο 16: Προβλεπόμενη απόδοση ηλιακών μονάδων απορρόφησης H₂O-LiBr στην Αθήνα

16.1 Εισαγωγή.....	159
16.2 Υπολογισμός του ψυκτικού κύκλου απορρόφησης H ₂ O-LiBr.....	161
16.2.1 Περιγραφή του κύκλου.....	161
16.3 Εφαρμογή της μεθόδου σε ηλιακές μονάδες στην Αθήνα.....	162
16.3.1 Κλιματολογικά δεδομένα και ηλιακοί συλλέκτες.....	162
16.3.2 Μονάδα ψύξης.....	163
16.3.3 Αντλία θερμότητας.....	165
16.4 Συμπεράσματα.....	167

Κεφάλαιο 17: Χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) σε πάνελ οροφής για ηλιακή ψύξη χώρου στην περιοχή της Αθήνας

17.1 Εισαγωγή.....	169
17.2 Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους συλλέκτες και τους υαλοπίνακες.....	169
17.3 Επιλογή υλικού αλλαγής φάσης (PCM).....	170
17.4 Καθορισμός της διαστρωμάτωσης των τοίχων και της οροφής.....	171
17.4.1 Διαστρωμάτωση τοίχων.....	171
17.4.2 Διαστρωμάτωση οροφής.....	171
17.4.3 Φυσικά χαρακτηριστικά υλικών.....	172
17.5 Μαθηματικό μοντέλο- Αριθμητική προσομοίωση.....	172
17.5.1 Μαθηματικό μοντέλο.....	172

17.5.2 Αριθμητική προσομοίωση.....	175
Κεφάλαιο 18: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της βασικής μελέτης	
18.1 Προσπίπτουσα ακτινοβολία στους ηλιακούς συλλέκτες και τους υαλοπίνακες.....	177
18.2 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της ημέρας.....	180
18.3 Ειδική θερμοχωρητικότητα του PCM.....	183
18.4 Κατανομή της θερμοκρασίας στους κόμβους του PCM.....	186
Κεφάλαιο 19: Παραμετρικές μελέτες	
19.1 Παραμετρική διερεύνηση επιλογής PCM.....	239
19.2 Παραμετρική διερεύνηση επιλογής συντελεστή συναγωγής.....	251
19.3 Παραμετρική διερεύνηση για την επιλογή του υλικού που θα τοποθετηθεί στο πάνελ της οροφής.....	264
19.3.1 Τοποθέτηση μπετόν στο πάνελ της οροφής.....	264
19.3.2 Τοποθέτηση “φανταστικού” υλικού στο πάνελ της οροφής.....	273
19.4 Παραμετρική διερεύνηση άμεσης ψύξης του χώρου χωρίς την τοποθέτηση πάνελ.....	282
Κεφάλαιο 20: Γενικά συμπεράσματα.....	291
Παράρτημα Α: Κώδικας βασικής μελέτης.....	297
Παράρτημα Β: Κώδικας μελέτης χωρίς PCM.....	317
Παράρτημα Γ: Πίνακες Θερμοκρασιών.....	327
Βιβλιογραφία.....	331

Κεφάλαιο 1

Γενικά για τα PCMs

1.1 Εισαγωγή

Η συνεχόμενη αύξηση της εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου και η αλματώδης αύξηση της τιμής των καυσίμων είναι οι βασικές κινητήριες δυνάμεις των προσπαθειών για πιο αποτελεσματική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε πολλά μέρη του κόσμου, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι μία από τις πηγές ενέργειας που έχει προοπτική εξέλιξης. Οι επιστήμονες σε όλο τον κόσμο βρίσκονται σε αναζήτηση νέων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μία επιλογή είναι να αναπτυχθούν συσκευές που θα αποθηκεύουν ενέργεια, οι οποίες είναι εξίσου σημαντικές με την εξέλιξη νέων πηγών ενέργειας. Η αποθήκευση ενέργειας σε κατάλληλες μορφές, η οποία στη συνέχεια θα μετατρέπεται σε κάποιο άλλο απαιτούμενο είδος, είναι μία πρόκληση για τους επιστήμονες σήμερα. Η αποθήκευση ενέργειας όχι μόνο μειώνει τη διαφορά ανάμεσα στην προσφορά και τη ζήτηση, αλλά βελτιώνει επίσης την επίδοση και την αξιοπιστία των ενεργειακών συστημάτων και παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ενέργειας [1]. Οδηγεί επίσης στην εξοικονόμηση καυσίμων και κάνει τα συστήματα πιο αποδοτικά οικονομικά εφόσον μειώνει το ποσοστό απώλειας της ενέργειας και του κεφαλαίου. Για παράδειγμα, η αποθήκευση θα βελτίωνε την επίδοση ενός εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σταθμίζοντας τα φορτία και η υψηλότερη αποδοτικότητα θα οδηγούσε σε διατήρηση της ενέργειας και μικρότερο κόστος παραγωγής. Μία επίδοξη τεχνική αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι η εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης (PCMs). Δυστυχώς, πριν την πρακτική εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα αυτής της τεχνολογίας, είναι απαραίτητο να επιλυθούν πολυάριθμα προβλήματα στα στάδια της έρευνας και της εξέλιξης. Ορισμένοι τρόποι αποθήκευσης ενέργειας δίνονται παρακάτω.

1.2 Μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας

Οι μορφές ενέργειας που μπορούν να αποθηκευτούν είναι η μηχανική, η ηλεκτρική και η θερμική.

1.2.1. Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας [2]

Τα μηχανικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνουν την ελκτική αποθήκευση ενέργειας ή υδροδυναμική αποθήκευση με αντλίες (PHPS), αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (CAES) και σφονδύλους. Οι τεχνολογίες PHPS και CAES

μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, ενώ οι σφόνδυλοι είναι κατάλληλοι για ενδιάμεση αποθήκευση. Η αποθήκευση πραγματοποιείται όταν είναι διαθέσιμο το φθινό, εκτός αιχμής ρεύμα, όπως έχουμε τα σαββατοκύριακα και τη νύχτα. Η ενέργεια αποφορτίζεται όταν χρειάζεται εξαιτίας ανεπαρκούς παροχής από το εργοστάσιο το οποίο παράγει το βασικό φορτίο.

1.2.2. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας [2]

Ένας τρόπος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι μέσω μπαταριών. Η μπαταρία φορτίζεται, όταν τη συνδέσουμε άμεσα με μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και όταν αποφορτίζεται, η αποθηκευμένη χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Πιθανές εφαρμογές μπαταριών είναι η αξιοποίηση του φθινοφύ, εκτός αιχμής ρεύματος, η εξισορρόπηση φορτίου, και η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανεμογεννήτριες ή από φωτοβολταϊκά εργοστάσια. Οι δύο πιο συχνοί τύποι μπαταριών είναι οι μπαταρίες μολύβδου- οξέος και Ni- Cd.

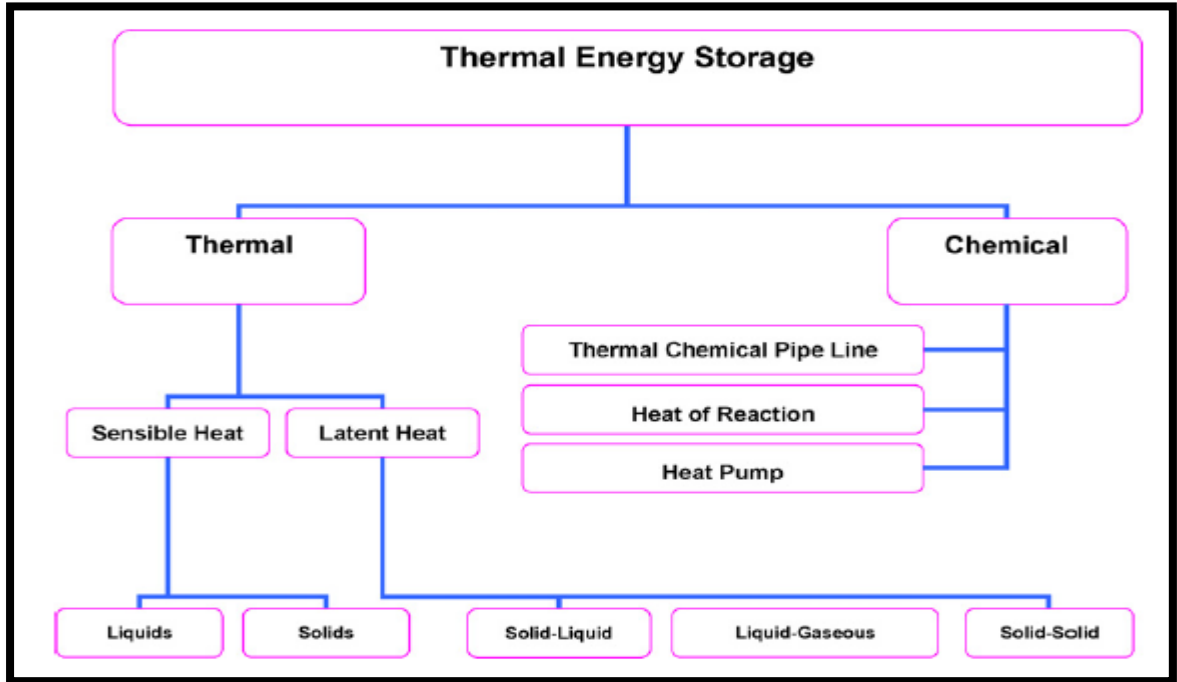
1.2.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας [3]

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας είναι πολύ σημαντική σε πολλές μηχανολογικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, ανάμεσα στα πρακτικά προβλήματα που υπάρχουν στα συστήματα ηλιακής ενέργειας είναι και η ανάγκη ενός μέσου στο οποίο θα αποθηκεύεται η περίσσεια της ηλιακής ενέργειας που συλλέγεται τις ώρες που έχει ηλιοφάνεια, η διατήρησή της, καθώς και η απελευθέρωσή της για μετέπειτα χρήση κατά τη διάρκεια της νύχτας. Μια γενική επισκόπηση της αποθήκευσης της ηλιακής θερμικής ενέργειας φαίνεται στην Εικόνα 1.2.1. Η αποθήκευση της θερμότητας μπορεί να εφαρμοστεί στους περισσότερους τύπους κτιρίων, όπου η ανάγκη για θέρμανση είναι σημαντική και η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει στην αποθήκευση θερμότητας να είναι ανταγωνιστική ανάμεσα σε άλλες μορφές θέρμανσης.

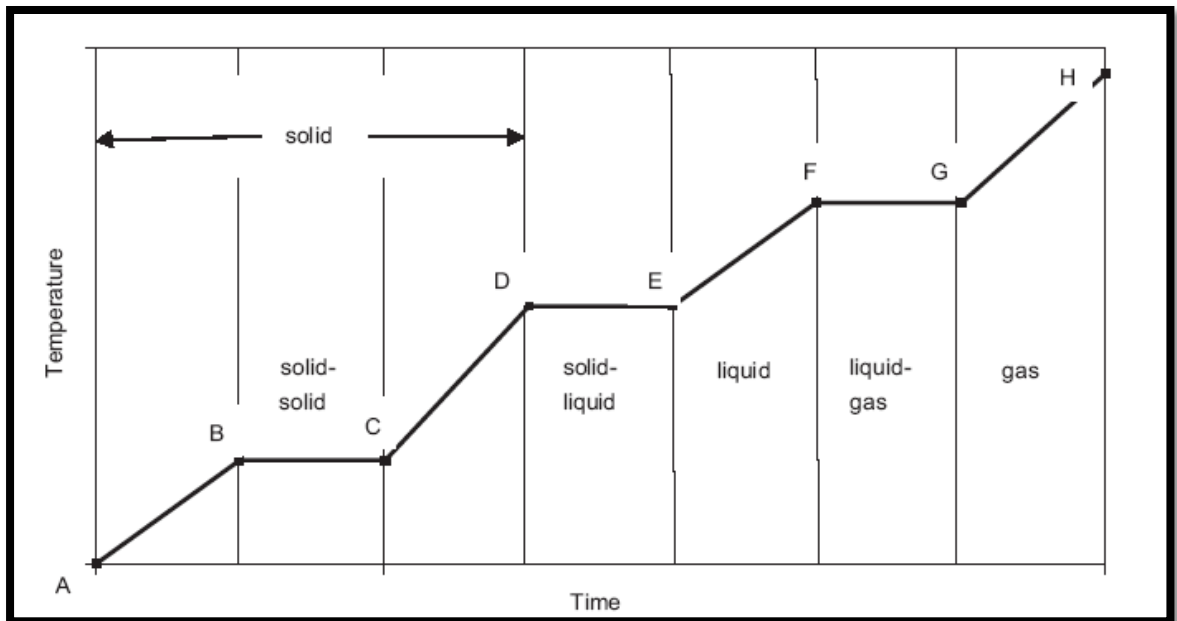
Οι βασικές τεχνικές αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας είναι η Αισθητή αποθήκευση θερμότητας, στην οποία η θερμοκρασία του υλικού αποθήκευσης ποικίλει ανάλογα με την ποσότητα της ενέργειας που αποθηκεύεται και η Λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας, κατά την οποία το υλικό αποθήκευσης αλλάζει φάση.

Η Εικόνα 1.2.2 δείχνει την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας, όταν η ενέργεια υπό μορφή θερμότητας προστίθεται σε μια ουσία. Οι αναμενόμενες συνέπειες είναι η αύξηση της θερμοκρασίας (αισθητή θερμότητα) και η αλλαγή φάσης (λανθάνουσα θερμότητα). Η καμπύλη ξεκινάει από το σημείο Α, το οποίο βρίσκεται σε στερεή φάση. Η προσθήκη

ενέργειας στην ουσία αρχικά ενεργοποιεί την αισθητή θερμότητα (περιοχή A-B) η οποία ακολουθείται από μία αλλαγή φάσης στερεό-στερεό (περιοχή B-C), στη συνέχεια έχουμε πάλι αισθητή θέρμανση του στερεού (περιοχή C-D), αλλαγή φάσης στερεό-υγρό (περιοχή D-E), αισθητή θέρμανση του υγρού (περιοχή E-F), αλλαγή φάσης υγρό- αέριο (περιοχή F-G) και τέλος, αισθητή θέρμανση του αερίου (περιοχή G-H) [4].



Εικόνα 1.2.1 Διαφορετικοί τύποι αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας [2].



Εικόνα 1.2.2 Διάγραμμα χρόνου- θερμοκρασίας για τη θέρμανση μιας ουσίας [2].

1.2.3.1 Αποθήκευση Αισθητής Θερμότητας [3]

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας επιτυγχάνεται αυξάνοντας τη θερμοκρασία του μέσου αποθήκευσης. Για το λόγο αυτό είναι επιθυμητό το μέσο αποθήκευσης να έχει υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα, μακρόχρονη σταθερότητα υπό τους θερμικούς κύκλους, συμβατότητα με το δοχείο και, πιο σημαντικά από όλα, χαμηλό κόστος. Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας κατηγοριοποιείται ανάλογα με το υλικό αποθήκευσης σε υγρά και στερεά μέσα αποθήκευσης.

- Υγρά μέσα αποθήκευσης.

Τα υγρά μέσα αποθήκευσης είναι άφθονα και ανταγωνίσιμα οικονομικά. Παρακάτω δίνονται ορισμένα στοιχεία για επιλεγμένα μέσα.

Αποθήκευση σε νερό. Σε χαμηλές θερμοκρασίες το νερό είναι από τα καλύτερα μέσα αποθήκευσης. Έχει υψηλότερη ειδική θερμότητα από άλλα υλικά, είναι φθινό και ευρέως διαθέσιμο. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της υψηλής τάσης ατμών, απαιτείται μόνωση και ειδικά δοχεία που αντέχουν την πίεση για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες. Το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια ευρεία κλίμακα θερμοκρασιών, περίπου 25-90 °C. Για θερμοκρασιακή αλλαγή 60 °C, το νερό θα αποθηκεύσει 250 kJ/kg ή 2.5kJ/m³. Το ζεστό νερό απαιτείται για το πλύσιμο, για το μπάνιο και συχνά χρησιμοποιείται σε σώματα καλοριφέρ για θέρμανση χώρων. Το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέσο αποθήκευσης και μεταφοράς ενέργειας, όπως για παράδειγμα σε ένα σύστημα ηλιακής ενέργειας. Συνεπώς, χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές για θέρμανση νερού με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας και για θέρμανση χώρων [5],[6].

Η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση σε μία δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας με νερό δημιουργείται εξαιτίας των ανωστικών δυνάμεων, σύμφωνα με τις οποίες η υψηλότερη θερμοκρασία βρίσκεται στο επάνω μέρος της δεξαμενής και η χαμηλότερη στο κάτω μέρος. Η διαστρωμάτωση επιτυγχάνεται μέσω της αποφυγής ανάμιξης κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Έτσι έχουμε ένα διπλό πλεονέκτημα [5],[6]: 1) το ποσό της ενέργειας που συλλέχθηκε μπορεί να αυξηθεί αν η θερμοκρασία του υγρού εισόδου του συλλέκτη είναι χαμηλότερη από τη μικτή θερμοκρασία αποθήκευσης και 2) η αποδοτικότητα με την οποία η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί θα βελτιωθεί εάν προμηθεύεται στο φορτίο στη θερμοκρασία στην οποία συλλέχθηκε και όχι στη χαμηλότερη μικτή θερμοκρασία.

Οι δεξαμενές αποθήκευσης νερού κατασκευάζονται από διάφορα υλικά, όπως ατσάλι, αλουμίνιο, οπλισμένο σκυρόδεμα και fiber glass. Οι δεξαμενές είναι μονωμένες με υαλοβάμβακα, mineral wool και πολυουρεθάνη. Το μέγεθος της δεξαμενής κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες λίτρα έως και μερικές χιλιάδες κυβικά μέτρα.

Για εφαρμογές αποθήκευσης μεγάλων διαστάσεων έχουν εξεταστεί υπόγειοι φυσικού υδροφόροι ορίζοντες. Οι υδροφόροι ορίζοντες είναι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν υπόγειο νερό, προσφέροντας ένα πιθανό τρόπο αποθήκευσης θερμότητας για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Το μέσο αποθήκευσης αποτελείται από χαλίκια ή άμμο εμποτισμένα με νερό. Μεγάλοι αποθηκευτικοί χώροι είναι διαθέσιμοι, μιας και ένας τυπικός υδροφόρος ορίζοντας κυμαίνεται από εκατοντάδες χιλιάδες έως και εκατομμύρια κυβικά μέτρα. Για παράδειγμα, 10^5 m^3 υδροφόρου ορίζοντα μπορούν να αποθηκεύσουν περίπου 3 MJ θερμότητας για κάθε θερμοκρασιακή διαφορά της τάξης των 10°C . Αυτός ο τύπος αποθήκευσης είναι ιδανικός για εποχιακή αποθήκευση, δηλαδή για μεταφορά θερμότητας από την περίοδο του καλοκαιριού στην περίοδο του χειμώνα. Εξαιτίας της ογκώδους φύσης τους, οι υδροφόροι ορίζοντες δεν είναι εφικτό να αποθηκεύσουν μικρά φορτία, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της οικιακής χρήσης. Οι υδροφόροι ορίζοντες είναι αρκετά ελκυστικοί σαν επιλογή λόγω του μικρού κόστους, του υψηλού ποσοστού εισόδου/εξόδου και της υψηλής χωρητικότητας.

Αποθήκευση σε αλμυρό νερό. Οι ηλιακές λίμνες είναι μια απλή και οικονομική μέθοδος για τη συλλογή και την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ηλιακής ενέργειας στη μορφή θερμικής ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας. Έχουν δυνατότητες στη θέρμανση χώρων και σε εφαρμογές ψύξης. Οι ηλιακές λίμνες κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τρεις βασικούς παράγοντες: 1) αν η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή ή συναγωγή, 2) εάν υπάρχουν πολλά επίπεδα ή όχι και 3) αν ο συλλέκτης και η αποθήκευση είναι χωριστά ή εάν είναι μαζί. Παρόλα αυτά, οι περισσότερες έρευνες γίνονται για ηλιακές λίμνες με συντελεστές αγωγής [7],[8],[9]. Σε αυτόν τον τύπο λίμνης, δημιουργείται ένας συντελεστής πυκνότητας χρησιμοποιώντας νερό που περιέχει αλάτι (θαλασσινό νερό), η συγκέντρωση του οποίου αυξάνεται με το βάθος από την επιφάνεια. Η λίμνη αυτή έχει μαύρο ή σκούρο πυθμένα ο οποίος απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού. Η αφαίρεση θερμικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στα κατώτερα στρώματα της λίμνης μπορεί εύκολα να γίνει χωρίς να διαταραχθούν τα ανώτερα στρώματα.

Αποθήκευση σε άλλα υγρά. Τα πιο συνήθη υποκατάστατα του νερού είναι λάδια με βάση το πετρέλαιο και λειωμένα άλατα. Η θερμοχωρητικότητα κατά βάρος είναι περίπου το 25-40% αυτής του νερού. Όμως, τα υποκατάστατα αυτά έχουν χαμηλή τάση ατμών και μπορούν να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 300 °C. Τα λάδια έχουν σαν όριο τους 350 °C για λόγους σταθερότητας και ασφάλειας και έχουν αρκετά υψηλό κόστος. Μερικά τηγμένα μίγματα ανόργανων αλάτων έχουν εξεταστεί για θερμοκρασίες υψηλότερες των 300 °C. Μερικά υγρά μέταλλα έχουν αναφερθεί σαν πιθανό μέσο αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Ενώ οι περισσότερες ιδιότητές τους είναι παρόμοιες με αυτές του νερού, έχουν επίσης χαμηλή ειδική θερμότητα και υψηλότερη πιθανότητα αντίδρασης με το δοχείο. Έχουν όμως, παρόλα αυτά, υψηλή θερμική αγωγιμότητα.

- Στερεά μέσα αποθήκευσης.

Για αποθήκευση τόσο σε υψηλές όσο και σε χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στερεά υλικά όπως πέτρες, μέταλλα, τσιμέντο και άμμος. Σε αυτή την περίπτωση η ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται σε χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες, μιας και τα υλικά δεν πρόκειται να παγώσουν ούτε να βράσουν. Αποθηκεύοντας θερμική ενέργεια υπό μορφή αισθητής θερμότητας σε στερεά, αποφεύγονται οι δυσκολίες που παρουσιάζονται εξαιτίας της υψηλής πίεσης του νερού, καθώς και άλλες δυσκολίες που παρουσιάζουν τα υγρά αποθηκευτικά μέσα. Επιπλέον, τα στερεά δεν κινδυνεύουν να διαρρεύσουν από τα δοχεία τους. Στην κορυφή της λίστας των στερεών αποθηκευτικών μέσων για αποθήκευση αισθητής θερμότητας βρίσκεται ο χυτοσίδηρος, ο οποίος υπερβαίνει το επίπεδο της ενεργειακής πυκνότητας του νερού [10]. Όμως, ο χυτοσίδηρος είναι πιο ακριβός από την πέτρα ή τα τούβλα και έτσι η περίοδος αποπληρωμής είναι μεγαλύτερη. Διατάξεις από βότσαλα και πέτρινες στοίβες προτιμώνται γενικά λόγω του χαμηλού τους κόστους.

Αποθήκευση σε πέτρες. Η διάταξη αυτή αποτελείται από πέτρες ή χαλίκια χαλαρά τοποθετημένα μεταξύ τους σε ένα στρώμα και μέσα από αυτά ρέει το ρευστό που μεταφέρει τη θερμότητα. Η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται στην παραπάνω διάταξη εξαναγκάζοντας ζεστό αέρα να περάσει μέσα από αυτή και χρησιμοποιείται εκ νέου επανακυκλοφορώντας τον περιβάλλοντα αέρα μέσα στο θερμασμένο πλέον “κρεβάτι”. Η ενέργεια που αποθηκεύεται εξαρτάται, εκτός από τις θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού,

από ορισμένες παραμέτρους, όπως είναι το μέγεθος και το σχήμα της πέτρας, η πυκνότητα με την οποία είναι τοποθετημένες οι πέτρες, και το υγρό που μεταφέρει τη θερμότητα.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί επίσης να αποθηκεύεται σε πέτρες ή χαλίκια (στοιβαγμένα σε μονωμένα δοχεία) και είναι πολύ βολικό για χρήση σε κτίρια. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποθήκευσης χρησιμοποιείται συχνά για θερμοκρασίες έως και 100 °C σε συνδυασμό με ηλιακούς θερμαντές αέρα [11]. Συνήθως το χαρακτηριστικό μέγεθος των κομματιών της πέτρας κυμαίνεται μεταξύ 1 και 5 cm. Μια προσεγγιστική εμπειροτεχνική μέθοδος για τη διαστασιολόγηση χρησιμοποιεί 300-500 kg πέτρας ανά τετραγωνικό μέτρο ηλιακού συλλέκτη για εφαρμογές θέρμανσης χώρων. Για μια αλλαγή θερμοκρασίας της τάξης των 50 °C, οι πέτρες και το τσιμέντο θα αποθηκεύσουν 36 kJ/kg ή περίπου 10^5 kJ/m³. Το στρώμα από πέτρα ή χαλίκι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για υψηλότερες θερμοκρασίες, έως και τους 1000 °C. Οι King και Burns [11] χρησιμοποιούν έναν αριθμό χαρακτηριστικών, το τυπικό μέγεθος του μορίου, το κλάσμα του κενού, το μήκος του στρώματος, την επιφανειακή ταχύτητα του αέρα και τον αριθμό Reynolds, με σκοπό να περιγράψουν τις θερμικές και γεωμετρικές ιδιότητες του *raced bed*. Όπως τα στρώματα με πέτρα, έτσι και οι ρευστοποιημένες κλίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ηλιακές εφαρμογές χαμηλών, μεσαίων και υψηλών θερμοκρασιών [12]. Επιπροσθέτως, ο ρυθμός ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του ρευστού που τη μεταφέρει και του μέσου αποθήκευσης είναι πολύ πιο γρήγορος στα ρευστοποιημένα στρώματα, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει πλεονέκτημα σε πολλές εφαρμογές.

Αποθήκευση στον ιστό του κτιρίου. Η αποθήκευση θερμότητας είναι εφαρμόσιμη τόσο σε καινούρια όσο και σε ήδη υπάρχοντα κτίρια και μπορεί να ολοκληρωθεί με συστήματα διανομής αέρα και νερού. Το πιο διαδεδομένο υλικό αποθήκευσης είναι τα κεραμικά τούβλα, τα οποία αποτελούνται από μαγνησίτη, ολιβίνη, θερμομόνωση ή φεολίτη. Η μάζα του κτιρίου καθώς και το δομικό τσιμέντο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παθητικά ή ενεργητικά αποθηκευτικά σχέδια. Η πιο συνήθης διάταξη, η οποία χρησιμοποιεί τη μάζα του κτιρίου για αποθήκευση θερμότητας, βρίσκεται μέσα στο πάτωμα. Το πάτωμα μετατρέπεται σε μία ακτινοβολούσα επιφάνεια χαμηλής θερμοκρασίας, και το τσιμέντο δρα ως μέσο αποθήκευσης της θερμότητας. Το πάτωμα μπορεί να θερμανθεί με ένα υγρό που μεταφέρει θερμότητα, όπως το νερό, με σύρματα ηλεκτρικής αντίστασης ή με αγωγούς αέρα. Το νερό είναι το πιο σύνηθες μέσο μεταφοράς θερμότητας. Πολλά από τα κτίρια που χρησιμοποιούν την υποδαπέδια θέρμανση δεν χρησιμοποιούν το ρεύμα εκτός αιχμής για να φορτίσουν την αποθήκευση, παρόλο που με κάποιες τροποποιήσεις σε ένα σύστημα

ελέγχου θα μπορούσαν να το κάνουν. Ένα εξελιγμένο υλικό αλλαγής φάσης για αποθήκευση θερμότητας στο πάτωμα έχω αναπτυχθεί από ένα Σουηδό κατασκευαστή, με εφαρμογές στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Ισπανία, την Κορέα και την Ιαπωνία [13].

Αποθήκευση σε μέταλλα. Τα περισσότερα υλικά που προτείνονται για αποθήκευση θερμότητας σε υψηλές θερμοκρασίες (120-1400 °C) είναι είτε ανόργανα άλατα είτε μέταλλα [10],[14]. Ορισμένα κατάλληλα μέταλλα είναι το αλουμίνιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος. Η χρήση μετάλλων είναι επωφελής όταν απαιτείται υψηλή θερμική αγωγιμότητα και το κόστος είναι δευτερεύουσας σημασίας. Τα βιομηχανικά στερεά περισεύματα, όπως ελκύσματα χαλκού, σιδήρου, χυτοσιδήρου, αλουμινίου και ρινίσματα χαλκού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν υλικά αποθήκευσης σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

1.2.3.2. Αποθήκευση Λανθάνουσας Θερμότητας

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας είναι μία πολύ ελκυστική τεχνική, εφόσον παρέχει υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας και έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει θερμότητα ως λανθάνουσα θερμότητα τήξης σε σταθερή θερμοκρασία αντίστοιχη της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης του υλικού που χρησιμοποιείται (PCM). Για παράδειγμα, στην περίπτωση του νερού, χρειάζεται 80 φορές περισσότερη ενέργεια για να λιώσει 1 kg πάγου από ότι για να αυξηθεί η θερμοκρασία 1 kg νερού κατά 1 °C. Αυτό σημαίνει ότι για την αποθήκευση ενός συγκεκριμένου ποσού ενέργειας χρειάζονται πολύ μικρότερο βάρος και όγκος υλικού [3].

Η αλλαγή φάσης του υλικού μπορεί να έχει μία από τις παρακάτω μορφές: στερεό-στερεό, στερεό-υγρό, στερεό-αέριο, υγρό-αέριο και αντίστροφα. Στην αλλαγή φάσης στερεό-στερεό, η θερμότητα αποθηκεύεται όταν το υλικό μετατρέπεται από μία κρυσταλλική δομή σε μία άλλη. Οι αλλαγές αυτές γενικά έχουν μικρότερη λανθάνουσα θερμότητα και αλλαγή όγκου από τις αλλαγές στερεό-υγρό. Τα PCM που αλλάζουν φάση από στερεό σε στερεό έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζονται τόσο αυστηρά δομημένα δοχεία, με αποτέλεσμα η σχεδίαση τους να είναι πιο ευέλικτη [15].

Οι αλλαγές από στερεό σε αέριο και από υγρό σε αέριο, παρόλο που έχουν μεγαλύτερη θερμότητα αλλαγής φάσης, έχουν πολλά προβλήματα όσον αφορά την αποθήκευση του υλικού με αποτέλεσμα να αποκλείεται η πιθανή τους χρήση σε συστήματα αποθήκευσης θερμότητας. Οι μεγάλες αλλαγές στον όγκο του υλικού αλλαγής φάσης καθιστούν το σύστημα πολύπλοκο και ελάχιστα πρακτικό [16].

Η αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό έχει συγκριτικά μικρότερη λανθάνουσα θερμότητα από ότι η αλλαγή από υγρό σε αέριο. Παρόλα αυτά, η παραπάνω μορφή αλλαγής φάσης προϋποθέτει πολύ μικρή αλλαγή όγκου (της τάξεως του 10%). Είναι επίσης οικονομικά ελκυστική όσον αφορά τη χρήση της σε συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας [2].

Τα PCM από μόνα τους δεν μπορούν να δράσουν σαν υλικά μεταφοράς θερμότητας. Για το λόγο αυτό είναι σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ένα ξεχωριστό μέσο με έναν εναλλάκτη θερμότητας στο ενδιάμεσο. Ο εναλλάκτης αυτός πρέπει να σχεδιαστεί ειδικά, έχοντας υπόψη τη χαμηλή θερμική διάχυση των PCM γενικά. Το δοχείο που περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης πρέπει να είναι επίσης ειδικά σχεδιασμένο ώστε να μπορεί να απορροφήσει τις αλλαγές του όγκου του υλικού που χρησιμοποιείται, καθώς και να είναι συμβατό με αυτό [17].

Ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας αποτελείται κυρίως από τα τρία παρακάτω στοιχεία: 1) ένα PCM κατάλληλο για το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής, 2) ένα δοχείο που θα περιέχει το υλικό και 3) μια επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας για τη μεταφορά της από την πηγή στο PCM και στη συνέχεια από το PCM στη δεξαμενή θερμότητας [4].

Κεφάλαιο 2

Υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας

2.1 Εισαγωγή

Τα υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Η μεταφορά της θερμικής ενέργειας λαμβάνει χώρα όταν ένα υλικό αλλαγής φάσης μετατρέπεται από στερεό σε υγρό ή το αντίστροφο. Αρχικά τα στερεά-υγρά PCMs αντιδρούν σαν τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης ενέργειας, όσο απορροφούν θερμότητα αυξάνει η θερμοκρασία τους. Αντίθετα όμως με τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης θερμότητας (υλικά που αποθηκεύουν αισθητή θερμότητα), τα PCM απορροφούν και απελευθερώνουν θερμότητα σχεδόν σε σταθερή θερμοκρασία. Αποθηκεύουν περίπου 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα από ότι τα υλικά που αποθηκεύουν αισθητή θερμότητα, όπως το νερό, η τοιχοποιία ή η πέτρα. Ένας μεγάλος αριθμός PCMs είναι γνωστό ότι λιώνει έχοντας θερμότητα τήξης σε κάθε απαιτούμενο εύρος. Ωστόσο, για την αξιοποίησή τους ως υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας τα υλικά αυτά πρέπει να διαθέτουν συγκεκριμένες επιθυμητές θερμικές, κινητικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο οικονομικά κριτήρια, όσο και η εύκολη διαθεσιμότητά τους [2]. Οι επιθυμητές ιδιότητες των PCMs παρατίθενται παρακάτω[2],[4],[18],[19].

2.2 Θερμικές ιδιότητες

- i) η θερμοκρασία αλλαγής φάσης θα πρέπει να είναι συμβατή με τη θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί το σύστημα
- ii) υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα μάζας
- iii) υψηλή ειδική θερμότητα
- iv) υψηλή θερμική αγωγιμότητα τόσο στη υγρή όσο και στην στερεή φάση
- v) ομοιογενές λιώσιμο
- vi) υψηλή αλλαγή ενθαλπίας κοντά στη θερμοκρασία λειτουργίας

Κατά την επιλογή ενός PCM για μία συγκεκριμένη εφαρμογή, θα πρέπει η θερμοκρασία λειτουργίας να ταιριάζει με τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PCM. Η λανθάνουσα θερμότητα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη ώστε να μειωθεί ο φυσικός όγκος του δοχείου θερμότητας. Τέλος, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα θα βοηθήσει στην ενεργειακή φόρτιση και αποφόρτιση.

2.3 Φυσικές ιδιότητες

- i) υψηλή πυκνότητα
- ii) χαμηλή αυξομείωση πυκνότητας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης
- iii) μικρή έως και καθόλου εμφάνιση του φαινομένου supercooling κατά τη διάρκεια της πήξης
- iv) μικρή πίεση ατμών
- v) σταθερότητα φάσης

Η σταθερότητα φάσης κατά τη διάρκεια της πήξης και τήξης του υλικού βοηθά τη διάταξη της αποθήκευσης και η υψηλή πυκνότητα είναι επιθυμητή μιας και επιτρέπει τη χρήση ενός δοχείου αποθήκευσης μικρότερων διαστάσεων. Η μικρή πίεση ατμών και οι μικρές αλλαγές στον όγκο του υλικού, το καθιστούν πιο εύκολο στην αποθήκευση.

2.4 Χημικές ιδιότητες

- i) μακροχρόνια χημική σταθερότητα
- ii) συμβατότητα με τα υλικά της κατασκευής
- iii) να μην είναι δυνατή η υποβάθμιση του υλικού για πολλούς κύκλους τήξης/πήξης
- iv) να μην είναι δυνατός ο διαχωρισμός των φάσεων
- v) το PCM που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να μην είναι: διαβρωτικό, τοξικό, εύφλεκτο, δηλητηριώδες και εκρηκτικό

Τα PCMs υποφέρουν από υποβιβασμό εξαιτίας απώλειας νερού, χημικής αποσύνθεσης ή ασυμβατότητα με το υλικό του δοχείου αποθήκευσης. Η τελευταία ιδιότητα είναι απαραίτητη ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια της κατασκευής και των ατόμων.

2.5 Κινητικές ιδιότητες

- i) μεγάλη ανάπτυξη κρυστάλλων ώστε να μπορεί το σύστημα να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις την ανάκτησης θερμότητας του αποθηκευτικού συστήματος
- ii) υψηλός βαθμός πυρήνωσης με σκοπό να αποφευχθεί το φαινόμενο του supercooling

Το φαινόμενο του supercooling είναι μία διάσταση της εξέλιξης των PCMs η οποία δημιουργεί πολλά προβλήματα, κυρίως στην περίπτωση των ένυδρων αλάτων. Η πτώση της θερμοκρασίας παραπάνω από μερικούς βαθμούς επεμβαίνει στη σωστή αφαίρεση θερμότητας από το σύστημα, και πτώση πάνω από 5-10 °C θα την εμποδίσει εξ' ολοκλήρου.

2.6 Οικονομικές ιδιότητες

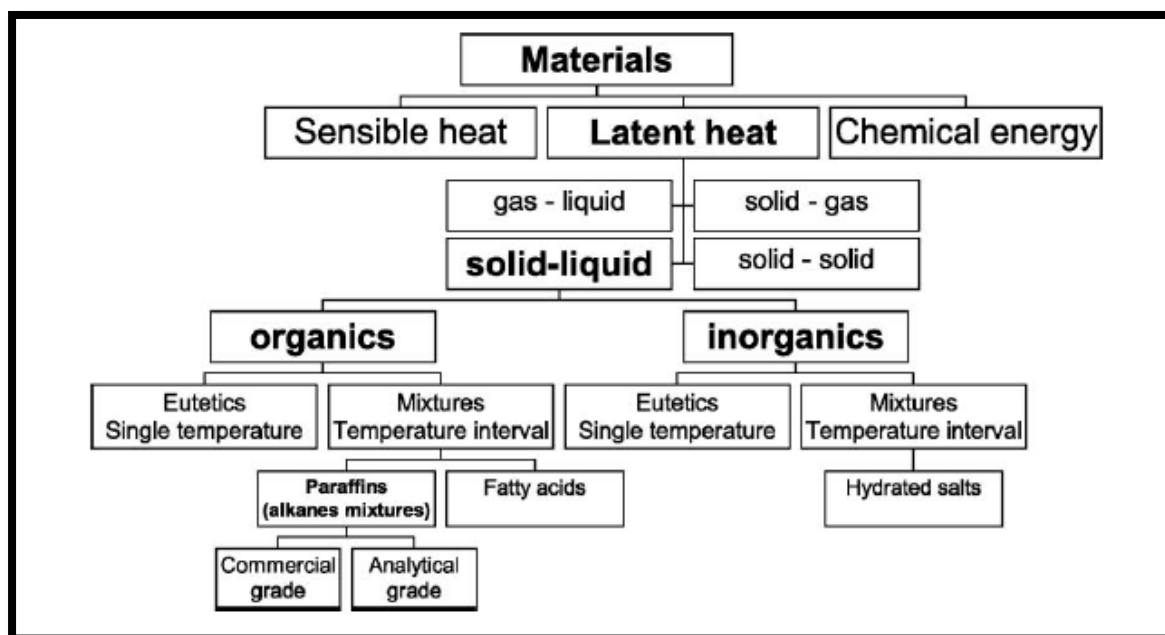
- i) τα PCMs θα πρέπει να είναι φθηνά, διαθέσιμα και να υπάρχουν σε αφθονία

Κεφάλαιο 3

Ταξινόμηση των PCMs

3.1 Εισαγωγή

Τα υλικά αλλαγής φάσης χωρίζονται σε οργανικά, ανόργανα και ευτηκτικά μίγματα οργανικών και ανόργανων ουσιών. Το 1983 ο Abhat [20] έκανε μία πολύ πετυχημένη ταξινόμηση των υλικών που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 3.1.1.



Εικόνα 3.1.1 Ταξινόμηση υλικών αποθήκευσης ενέργειας[20].

Μπορεί κανείς να βρει στη βιβλιογραφία πολλές αναφορές για υλικά τα οποία μπορούν να αποθηκεύσουν θερμική ενέργεια. Κάποια από αυτά φαίνονται στον Πίνακα 3.1.1 που ακολουθεί.

3.2 Οργανικά PCMs [3]

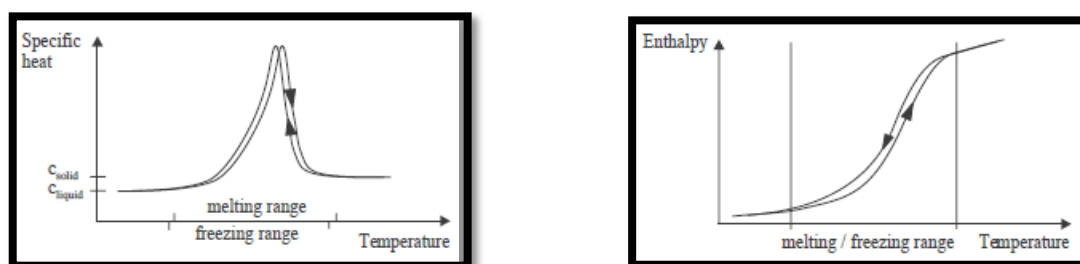
Στην κατηγορία των οργανικών PCMs ανήκουν οι παραφίνες (C_nH_{2n+2}) και τα λιπαρά οξέα ($CH_3(CH_2)_{2n}COOH$). Ανάμεσα στις δύο κατηγορίες, τα λιπαρά οξέα προσελκύουν την προσοχή των ειδικών. Αυτό γιατί είναι σχετικά φθηνά και κατά συνέπεια χρησιμοποιούνται ευρέως σε διαφορετικές περιοχές. Το εύρος της θερμοκρασίας τήξης των λιπαρών οξέων κυμαίνεται από τους -5 έως τους 71 °C, ενώ η λανθάνουσα θερμότητα τήξης από 45 έως 210 kJ/kg. Στον Πίνακα 3.2.1 παρατίθενται ορισμένα λιπαρά οξέα με τις ιδιότητές του.

Πίνακας 3.1.1 Υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας και το θερμοκρασιακό τους εύρος [3]

Temperature Range (°C)	Material	Transition Temperature (°C)	Heat of Fusion (kJ/kg)
0-100	Water	0	335
	Paraffin	20-60	140-280
	Salt hydrate	30-50	170-270
100-400	AlCl ₃	192	280
	LiNO ₃	250	370
	Na ₂ O ₂	360	314
	50LiOH·50LiF	427	5-2
400-800	KClO ₄	527	12-3
	LiH	699	26-8
	LiF	868	9-2
	NaF	993	7-0
800-1500	MgF ₂	1271	9-6
	Si	1415	16-4

Οι παραφίνες εμφανίζουν πολλές επιθυμητές ιδιότητες στη χρήση τους ως PCMs για εφαρμογές αποθήκευσης. Μερικές από αυτές είναι η υψηλή θερμοότητα τήξης, η αμελητέα εμφάνιση supercooling, η χαμηλή πίεση ατμών κατά τη διάρκεια της τήξης, η χημική αδράνεια και η σταθερότητα, δεν υφίστανται διαχωρισμό φάσης και είναι διαθέσιμες στο εμπόριο σε σχετικά προσιτό κόστος [21],[22],[23],[24],[25]. Ωστόσο έχουν και αρκετές μη επιθυμητές ιδιότητες, όπως χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και μεγάλη αλλαγή όγκου κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μεταλλικά πληρωτικά υλικά, μεταλλικές μήτρες, σωλήνες με πτερύγια και πολύ λεπτές φέτες αλουμινίου, ώστε να βελτιωθεί η θερμική τους αγωγιμότητα. Στην Εικόνα 3.2.1 φαίνονται διάφορες τεχνικές βελτίωσης της μετάδοσης της θερμότητας [26]. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μεταβλητότητας του όγκου χρησιμοποιούνται πλαστικά δοχεία διαφόρων γεωμετριών. Οι καθαρές παραφίνες είναι αρκετά ακριβές κι έτσι μόνο τεχνικές παραφίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Στον Πίνακα 3.2.2 φαίνονται οι ιδιότητες ορισμένων παραφινών.

Στην Εικόνα 3.2.2 [27] φαίνεται η γενική συμπεριφορά των οργανικών PCMs. Τα οργανικά PCMs έχουν μεγαλύτερο εύρος τήξης, το οποίο ποικίλει ανάλογα με την καθαρότητα του υλικού, μαζί με αυξημένη θερμοχωρητικότητα σε αυτό το εύρος.

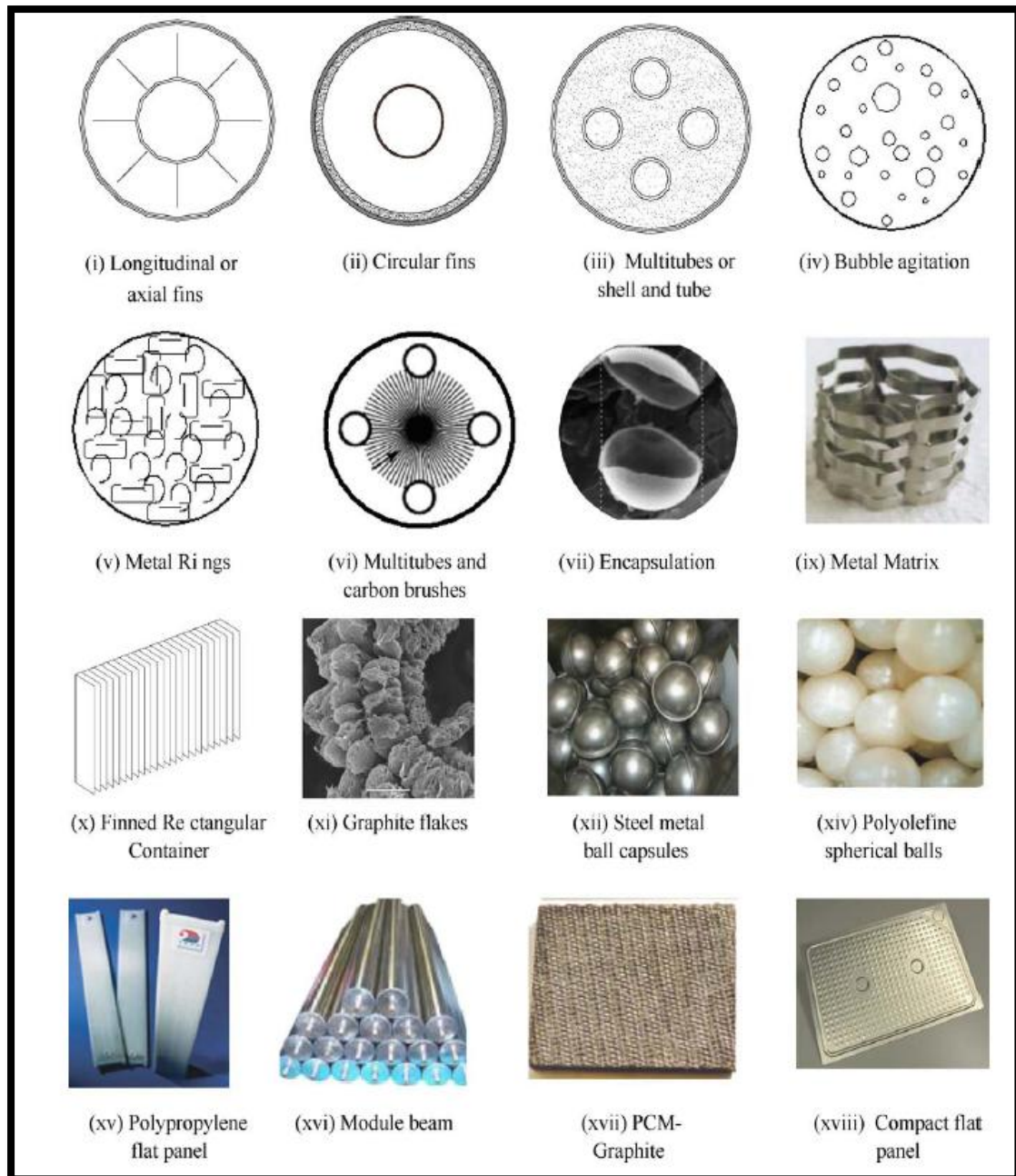


Εικόνα 3.2.2 Κατανομή της ειδικής θερμοχωρητικότητας και ενθαλπίας των οργανικών PCMs [27].

Πίνακας 3.2.1 Λιπαρά οξέα με πιθανή χρήση ως PCM [19]

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
Propyl palmitate	10 [9]	186 [9]	n.a.	n.a.
Isopropyl palmitate	11 [34]	95–100 [34]	n.a.	n.a.
Capric-lauric acid + pentadecane (90:10)	13.3 [35]	142.2 [35]	n.a.	n.a.
Isopropyl stearate	14–18 [34]	140–142 [34]	n.a.	n.a.
Caprylic acid	16 [4,11]	148.5 [4,11]	0.149 (liquid, 38.6 °C) [4,11]	901 (liquid, 30 °C) [4,11]
	16.3 [1]	149 [1]	0.145 (liquid, 67.7 °C) [11]	862 (liquid, 80 °C)
			0.148 (liquid, 20 °C) [1]	981 (solid, 13 °C) [1033 (solid, 10 °C)
Capric-lauric acid (65 mol%–35 mol%)	18.0 [36]	148 [36]	n.a.	n.a.
Butyl stearate	19 [9]	140 [9]	n.a.	n.a.
		123–200 [34]		
Capric-lauric acid (45–55%)	21 [9]	143 [9]	n.a.	n.a.
Dimethyl sabacate	21 [34]	120–135 [34]	n.a.	n.a.
34% Mistic acid + 66% Capric acid	24 [11]	147.7 [11]	0.164 (liquid, 39.1 °C) [11]	888 (liquid, 25 °C)
			0.154 (liquid, 61.2 °C) [11]	1018 (solid, 1 °C)
Vinyl stearate	27–29 [34]	122 [34]	n.a.	n.a.
Capric acid	32 [4,11]	152.7 [4,11]	0.153 (liquid, 38.5 °C) [4,11]	878 (liquid, 45 °C) [4,11]
	31.5 [1]	153 [1]	0.152 (liquid, 55.5 °C) [11]	886 (liquid, 40 °C)
			0.149 (liquid, 40 °C) [1]	1004 (solid, 24 °C) [4,11]
Methyl-12 hydroxy-stearate	42–43 [34]	120–126 [34]	n.a.	n.a.
Lauric acid	42–44 [1]	178 [1]	0.147(liquid, 50 °C) [1]	862 (liquid, 60 °C)
	44 [11]	177.4 [11]		870 (liquid, 50 °C)
				1007 (solid, 24 °C)
Myristic acid	49–51 [37]	204.5 [37]	n.a.	861 (liquid, 55 °C)
	54 [1]	187 [1]		844 (liquid, 80 °C)
	58 [11]	186.6 [11]		990 (solid, 24 °C)
Palmitic acid	64 [4,11]	185.4 [4,11]	0.162 (liquid, 68.4 °C) [4,11]	850 (liquid, 65 °C) [4,11]
	61 [38,39]	203.4 [38,39]	0.159 (liquid, 80.1 °C) [11]	847 (liquid, 80 °C)
	63 [1]	187 [1]	0.165 (liquid, 80 °C) [1]	989 (solid, 24 °C) [1]
Stearic acid	69 [4,11]	202.5 [4,11]	0.172 (liquid, 70 °C) [1]	848 (liquid, 70 °C) [4,11]
	60–61 [39,40]	186.5 [39,40]		965 (solid, 24 °C) [1]
	70 [1]	203 [1]		

% in weight; n.a.: not available.



Εικόνα 3.2.1 Μέθοδοι βελτίωσης της μεταφοράς θερμότητας στα PCMs [26].

Πίνακας 3.2.2 Οργανικές ουσίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCMs [19]

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
Paraffin C ₁₄	4.5 [1]	165 [1]	n.a.	n.a.
Paraffin C ₁₅ -C ₁₆	8 [1]	153 [1]	n.a.	n.a.
Polyglycol E400	8 [4,11]	99.6 [4,11]	0.187 (liquid, 38.6 °C) [4,11] 0.185 (liquid, 69.9 °C) [11]	1125 (liquid, 25 °C) [4,11] 1228 (solid, 3 °C) [4,11]
Dimethyl-sulfoxide (DMS)	16.5 [28]	85.7 [28]	n.a.	1009 (solid and liquid) [28]
Paraffin C ₁₆ -C ₁₈	20-22 [29]	152 [29]	n.a.	n.a.
Polyglycol E600	22 [4,11]	127.2 [4,11]	0.189 (liquid, 38.6 °C) [4,11] 0.187 (liquid, 67.0 °C) [11]	1126 (liquid, 25 °C) [4,11] 1232 (solid, 4 °C) [4,11]
Paraffin C ₁₃ -C ₂₄	22-24 [1]	189 [1]	0.21 (solid) [1]	0.760 (liquid, 70 °C) [1] 0.900 (solid, 20 °C) [1]
1-Dodecanol	26 [9]	200 [9]	n.a.	n.a.
Paraffin C ₁₈	28 [1] 27.5 [30]	244 [1] 243.5 [30]	0.148 (liquid, 40 °C) [30] 0.15 (solid) [1] 0.358 (solid, 25 °C) [30]	0.774 (liquid, 70 °C) [1] 0.814 (solid, 20 °C) [1]
1-Tetradecanol	38 [9]	205 [9]	n.a.	n.a.
Paraffin C ₁₆ -C ₂₈	42-44 [1]	189 [1]	0.21 (solid) [1]	0.765 (liquid, 70 °C) [1] 0.910 (solid, 20 °C) [1]
Paraffin C ₂₀ -C ₃₃	48-50 [1]	189 [1]	0.21 (solid) [1]	0.769 (liquid, 70 °C) [1] 0.912 (solid, 20 °C) [1]
Paraffin C ₂₂ -C ₄₅	58-60 [1]	189 [1]	0.21 (solid) [1]	0.795 (liquid, 70 °C) [1] 0.920 (solid, 20 °C) [1]
Paraffin wax	64 [4,11]	173.6 [4,11] 266 [6]	0.167 (liquid, 63.5 °C) [4,11] 0.346 (solid, 33.6 °C) [4,11] 0.339 (solid, 45.7 °C) [11]	790 (liquid, 65 °C) [4,11] 916 (solid, 24 °C) [4,11]
Polyglycol E6000	66 [4,11]	190.0 [4,11]	n.a.	1085 (liquid, 70 °C) [4,11] 1212 (solid, 25 °C) [4,11]
Paraffin C ₂₁ -C ₅₀	66-68 [1]	189 [1]	0.21 (solid) [1]	0.830 (liquid, 70 °C) [1] 0.930 (solid, 20 °C) [1]
Biphenyl	71 [4,11]	119.2 [4,11]	n.a.	991 (liquid, 73 °C) [4,11] 1166 (solid, 24 °C) [11]
Propionamide	79 [11]	168.2 [11]	n.a.	n.a.
Naphthalene	80 [4,11]	147.7 [4,11]	0.132 (liquid, 83.8 °C) [4,11] 0.341 (solid, 49.9 °C) [4,11] 0.310 (solid, 66.6 °C) [11]	976 (liquid, 84 °C) [4,11] 1145 (solid, 20 °C) [4,11]
Erythritol	118.0 [31]	339.8 [31]	0.326 (liquid, 140 °C) [31] 0.733 (solid, 20 °C) [31]	1300 (liquid, 140 °C) [31] 1480 (solid, 20 °C) [31]
HDPE	100-150 [32]	200 [32]	n.a.	n.a.
Trans-1,4-polybutadiene (TPB)	145 [33]	144 [33]	n.a.	n.a.

n.a.: not available.

Μία τάξη οργανικών υλικών είναι η MCPAM (Phase change materials made up of molecular alloys), η οποία σχηματίζεται από αλκανικά κράματα τα οποία έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι θερμικά ρυθμιζόμενα. Αυτό σημαίνει ότι επιτρέπουν αλλαγές στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης τους μέσω της σύνθεσής τους [28].

Τα πλεονεκτήματα των οργανικών PCMs είναι τα παρακάτω:

- i) είναι διαθέσιμα σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών
- ii) παγώνουν χωρίς την εμφάνιση του φαινομένου του supercooling
- iii) έχουν την ικανότητα να τήκονται ομοιογενώς
- iv) είναι συμβατά με τα συμβατικά υλικά κατασκευής

- v) δεν υφίστανται διαχωρισμό φάσης
- vi) είναι χημικά και θερμικά σταθερά
- vii) έχουν υψηλή θερμότητα τήξης
- viii) είναι ασφαλή και δεν αντιδρούν με άλλες ουσίες
- ix) είναι ανακυκλώσιμα και άρα δε ρυπαίνουν το περιβάλλον
- x) χαμηλό κόστος αγοράς
- xi) παραγωγή των υλικών σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές (σκόνη, κόκκοι, πλάκες)

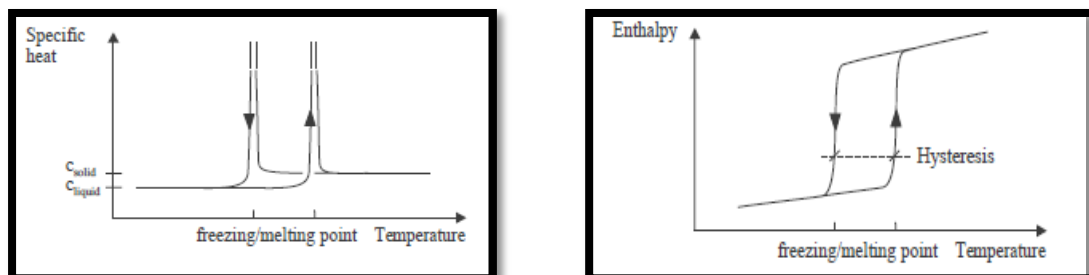
Τα μειονεκτήματα των οργανικών PCMs είναι:

- i) χαμηλή θερμική αγωγιμότητα στη στερεή φάση. Υψηλό ποσοστό μεταφοράς θερμότητας απαιτείται κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης
- ii) χαμηλή ογκομετρική ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας
- iii) είναι εύφλεκτα, γεγονός που μπορεί να μετριαστεί με τη χρήση ειδικών δοχείων αποθήκευσης
- iv) εξαιτίας του κόστους μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυρίως μίγματα παραφινών, από τα οποία έχει αφαιρεθεί τελείως το πετρέλαιο

3.3 Ανόργανα PCMs [3]

Τα ανόργανα υλικά δεν έχουν ερευνηθεί στον ίδιο βαθμό, ως υλικά αποθήκευσης θερμότητας, με τα οργανικά υλικά. Στις ανόργανες ενώσεις περιλαμβάνονται τα υδατικά άλατα, τα άλατα, τα μέταλλα και τα κράματα. Στον Πίνακα 3.3.1 παρατίθενται ορισμένες ανόργανες ουσίες που χρησιμοποιούνται ως PCMs.

Στην Εικόνα 3.3.1 παρουσιάζεται η βασική συμπεριφορά των ανόργανων PCMs. Τα ανόργανα PCMs έχουν μικρό εύρος αλλαγής φάσης και για το λόγο αυτό παραμένουν σε σταθερή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια αυτής.



Εικόνα 3.3.1 Κατανομή της ειδικής θερμοχωρητικότητας και ενθαλπίας των ανόργανων PCMs [27].

Πίνακας 3.3.1 Ανόργανες ουσίες με πιθανή χρήση ως PCMs [19]

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
H ₂ O	0 [1,5]	333 [1] 334 [5]	0.612 (liquid, 20 °C) [1] 0.61 (30 °C) [5]	998 (liquid, 20 °C) [1] 996 (30 °C) [5] 917 (solid, 0 °C) [1]
LiClO ₃ · 3H ₂ O	8.1 [6,7]	253 [6]	n.a.	1720 [6]
ZnCl ₂ · 3H ₂ O	10 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
K ₂ HPO ₄ · 6H ₂ O	13 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
NaOH · 3½H ₂ O	15 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
Na ₂ CrO ₄ · 10H ₂ O	15.4 [7] 18 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
KF · 4H ₂ O	18.5 [1,6,7,9]	231 [1,6,9]	n.a.	1447 (liquid, 20 °C) [1] 1455 (solid, 18 °C) [1] 1480 [6]
Mn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	25.8 [18]	125.9 [10]	n.a.	1738 (liquid, 20 °C) [10] 1728 (liquid, 40 °C) [10] 1795 (solid, 5 °C) [10]
CaCl ₂ · 6H ₂ O	29 [4,11] 29.2 [7] 29.6 [6] 29.7 [1,9] 30 [8] 29–39 [12]	190.8 [4,11] 171 [1,9] 174.4 [12] 192 [6]	0.540 (liquid, 38.7 °C) [4,11] 0.561 (liquid, 61.2 °C) [11] 1.088 (solid, 23 °C) [4,11]	1562 (liquid, 32 °C) [4,11] 1496 (liquid) [1] 1802 (solid, 24 °C) [4,11] 1710 (solid, 25 °C) [1] 1634 [12] 1620 [6]
LiNO ₃ · 3H ₂ O	30 [6]	296 [6]	n.a.	n.a.
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	32.4 [1,7,9] 32 [13] 31–32 [12]	254 [1,9] 251.1 [12]	0.544 [1]	1485 (solid) [1] 1458 [12]
Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	32–36 [12] 33 [6,7]	246.5 [12] 247 [6]	n.a.	1442 [12]
CaBr ₂ · 6H ₂ O	34 [4,7,11]	115.5 [4,11]	n.a.	1956 (liquid, 35 °C) [4,11] 2194 (solid, 24 °C) [4,11] 1522 [12]
Na ₂ HPO ₄ · 12H ₂ O	35.5 [8] 36 [12] 35[6,9] 35.2 [7]	265 [12] 280 [6] 281 [9]	n.a.	
Zn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	36 [4,7,11] 36.4 [1,9]	146.9 [4,11] 147 [1,9]	0.464 (liquid, 39.9 °C) [4,11] 0.469 (liquid, 61.2 °C) [7]	1828 (liquid, 36 °C) [4,11] 1937 (solid, 24 °C) [4,11] 2065 (solid, 14 °C) [1]
KF · 2H ₂ O	41.4 [7]	n.a.	n.a.	n.a.
K(CH ₃ COO) · 1½H ₂ O	42 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
K ₃ PO ₄ · 7H ₂ O	45 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
Zn(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	45.5 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	42.7 [7] 47 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
Na ₂ HPO ₄ · 7H ₂ O	48 [7]	n.a.	n.a.	n.a.

(continued on next page)

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
Na ₂ S ₂ O ₃ · 5H ₂ O	48 [1,6–8]	201 [1]	n.a.	1600 (solid) [1]
	48–49 [12]	209.3 [12] 187 [6]		1666 [12]
Zn(NO ₃) ₂ · 2H ₂ O	54 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
NaOH · H ₂ O	58.0 [7]	n.a.	n.a.	n.a.
Na(CH ₃ COO) · 3H ₂ O	58 [6,13]	264 [14–20]	n.a.	1450 [6]
	58.4 [7,14–20]	226 [6]		
Cd(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	59.5 [7]	n.a.	n.a.	n.a.
Fe(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	60 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
NaOH	64.3 [6]	227.6 [6]	n.a.	1690 [6]
Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O	68.1 [7]	n.a.	n.a.	n.a.
Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O	69 [7]	n.a.	n.a.	n.a.
Na ₂ P ₂ O ₇ · 10H ₂ O	70 [6]	184 [6]	0.653 (liquid, 85.7 °C) [4,11]	1937 (liquid, 84 °C) [4,11]
Ba(OH) ₂ · 8H ₂ O	78	265.7 [4,11]		0.678 (liquid, 98.2 °C) [11]
	[1,4,6,7,11,13]	267 [1]	1.255 (solid, 23 °C) [4,11]	2180 (solid) [1]
		280 [6]	n.a.	n.a.
AlK(SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	80 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
KAl(SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	85.8 [7]	n.a.	n.a.	n.a.
Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18H ₂ O	88 [7]	n.a.	n.a.	n.a.
Al(NO ₃) ₃ · 8H ₂ O	89 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	89 [4,6,11]	162.8 [4,11]	0.490 (liquid, 95 °C) [4,11]	1550 (liquid, 94 °C) [4,11]
	90 [7,8]	149.5 [6]	0.502 (liquid, 110 °C) [11]	1636 (solid, 25 °C) [4,11]
			0.611 (solid, 37 °C) [4,11] 0.669 (solid, 55.6 °C) [11]	1640 [6]
(NH ₄)Al(SO ₄) ₂ · 6H ₂ O	95 [6,8]	269 [6]	n.a.	n.a.
Na ₂ S · 5½H ₂ O	97.5 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
CaBr ₂ · 4H ₂ O	110 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
Al ₂ (SO ₄) ₃ · 16H ₂ O	112 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
MgCl ₂ · 6H ₂ O	117 [4,6,7,11]	168.6 [4,11]	0.570 (liquid, 120 °C) [4,11]	1450 (liquid, 120 °C) [4,11]
	115 [8]	165 [1,6]	0.598 (liquid, 140 °C) [11]	1442 (liquid, 78 °C) [1]
	116 [1]		0.694 (solid, 90 °C) [4,11] 0.704 (solid, 110 °C) [11]	1569 (solid, 20 °C) [4,11] 1570 (solid, 20 °C) [1]
Mg(NO ₃) ₂ · 2H ₂ O	130 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
NaNO ₃	307 [21]	172 [21]	0.5 [22]	2260 [21]
	308 [22,23]	174 [23] 199 [22]		2257 [22]
		266 [22] 116 [23]		2.110 [23]
KNO ₃	333 [22]	266 [22]	0.5 [23]	2.110 [23]
	336 [23]	116 [23]		
KOH	380 [22]	149.7 [22]	0.5 [22]	2.044 [22]
MgCl ₂	714 [21]	452 [21]	n.a.	2140 [21]
NaCl	800 [21]	492 [21]	5 [22]	2160 [21,22]
	802 [22]	466.7 [22]		

Ορισμένα υδατικά διαλύματα, όπως το άλας του Glauber, μελετήθηκαν ευρέως εξαιτίας του χαμηλού τους κόστους. Τα πιο συνηθισμένα προβλήματα που παρουσιάζουν τα υδατικά διαλύματα είναι ο διαχωρισμός των φάσεων και το φαινόμενο supercooling. Για την αντιμετώπιση του supercooling σε ορισμένα υδατικά άλατα προστίθενται αντιδραστήριοι παράγοντες, χρησιμοποιούνται δοχεία αποθήκευσης με τραχεία επιφάνεια ή χρησιμοποιείται η τεχνική "cold finger". Για την αποφυγή του διαχωρισμού των φάσεων έχουν εφαρμοστεί πολλές τεχνικές, όπως περιστρεφόμενες συσκευές αποθήκευσης και μεταφορά θερμότητας με άμεση επαφή [22],[25].

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με χρήση σύνθετων αλάτων-κεραμικών υλικών προσφέρει την πιθανότητα της άμεσης ανταλλαγής θερμότητας με χρήση υλικών αλλαγής φάσης, με συνέπεια τη μείωση του συνολικού κόστους εφόσον δε θα είναι πλέον απαραίτητα υλικά μεταφοράς θερμότητας. Επιπλέον, θα μειωθεί η ποσότητα των αποθηκευτικών υλικών καθώς και το μέγεθος του δοχείου αποθήκευσης.

Τα πλεονεκτήματα των ανόργανων PCMs είναι τα ακόλουθα:

- i) υψηλή ογκομετρική ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας
- ii) χαμηλό κόστος και εύκολη διαθεσιμότητα
- iii) ευδιάκριτο σημείο τήξης
- iv) υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- v) υψηλή θερμότητα τήξης
- vi) μη αναγλέξιμα

Τα μειονεκτήματα των ανόργανων PCMs:

- i) η αλλαγή του όγκου κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης είναι μεγάλη
- ii) εμφάνιση του φαινομένου supercooling κατά την αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό
- iii) χρειάζονται αντιδραστήριοι παράγοντες και συχνά αδρανοποιούνται ύστερα από συνεχόμενους κύκλους

3.4 Ευτηκτικά PCMs [3]

Τα ευτηκτικά PCMs είναι μίγματα δύο ή περισσότερων αλάτων τα οποία έχουν συγκεκριμένα σημεία τήξης/πήξης. Η συμπεριφορά τους είναι ανάλογη των υδατικών αλάτων που λιώνουν ομοιογενώς και έχουν σπουδαίες προοπτικές στις εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Τα ευτηκτικά PCMs κατηγοριοποιούνται σε οργανικά

ευτηκτικά, ανόργανα ευτηκτικά και οργανικά-ανόργανα ευτηκτικά υλικά. Στους Πίνακες 3.4.1 και 3.4.2 παρουσιάζονται αντίστοιχα ορισμένα οργανικά και ανόργανα ευτηκτικά μίγματα.

Πίνακας 3.4.1 Οργανικά ευτηκτικά μίγματα με πιθανή χρήση ως PCMs [19]

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
37.5% Urea + 63.5% acetamide	53 [1]	n.a.	n.a.	n.a.
67.1% Naphthalene + 32.9% benzoic acid	67 [11]	123.4 [11]	0.136 (liquid, 78.5 °C) [11] 0.130 (liquid, 100 °C) [11] 0.282 (solid, 38 °C) [11] 0.257 (solid, 52 °C) [11]	n.a.

% in weight; n.a.: not available.

Τα πλεονεκτήματα των ευτηκτικών PCMs είναι:

- i) έχουν ευδιάκριτο σημείο τήξης παρόμοιο με αυτό της καθαρής ουσίας
- ii) η ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης είναι ελαχίστως μεγαλύτερη από αυτή των οργανικών μιγμάτων

Το μειονέκτημα των ευτηκτικών PCMs είναι:

- i) δεν υπάρχουν πολλά δεδομένα στη βιβλιογραφία για τις θερμοφυσικές ιδιότητες τους, αφού η χρήση τους στις εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι σχετικά πρόσφατη

Πίνακας 3.4.2 Ανόργανα ευτηκτικά μίγματα με πιθανή χρήση ως PCMs [19]

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
66.6% CaCl ₂ · 6H ₂ O + 33.3% MgCl ₂ · 6H ₂ O	25 [6]	127 [6]	n.a.	1590 [6]
48% CaCl ₂ + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3% H ₂ O	26.8 [1,6]	188.0 [6]	n.a.	1640 [6]
47% Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O + 33% Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	30 [1]	136 [1]	n.a.	n.a.
60% Na(CH ₃ COO) · 3H ₂ O + 40% CO(NH ₂) ₂	31.5 [24] 30 [25]	226 [24] 200.5 [25]	n.a.	n.a.
61.5% Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O + 38.5% NH ₄ NO ₃	52 [11]	125.5 [11]	0.494 (liquid, 65.0 °C) [11] 0.515 (liquid, 88.0 °C) [11] 0.552 (solid, 36.0 °C) [11]	1515 (liquid, 65 °C) [11] 1596 (solid, 20 °C) [11]
58.7% Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O + 41.3% MgCl ₂ · 6H ₂ O	59 [11] 58 [6]	132.2 [11] 132 [6]	0.510 (liquid, 65.0 °C) [11] 0.565 (liquid, 85.0 °C) [11] 0.678 (solid, 38.0 °C) [11] 0.678 (solid, 53.0 °C) [11]	1550 (liquid, 50 °C) [11] 1630 (solid, 24 °C) [11]
53% Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O + 47% Al(NO ₃) ₂ · 9H ₂ O	61 [1]	148 [1]	n.a.	n.a.
14% LiNO ₃ + 86% Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	72 [6]	>180 [6]	n.a.	1590 (liquid) [6] 1610 (solid) [6]
66.6% urea + 33.4% NH ₄ Br	76 [11]	161.0 [11]	0.331 (liquid, 79.8 °C) [11] 0.324 (liquid, 92.5 °C) [11] 0.649 (solid, 39.0 °C) [11] 0.682 (solid, 65 °C) [11]	1440 (liquid, 85 °C) [11] 1548 (solid, 24 °C) [11]
11.8% NaF + 54.3% KF + 26.6% LiF + 7.3% MgF ₂	449 [26]	n.a.	n.a.	2160 (liquid) [26]
35.1% LiF + 38.4% NaF + 26.5% CaF ₂	615 [26]	n.a.	n.a.	2225 (liquid) [26] 2820 (solid, 25 °C) [26]
32.5% LiF + 50.5% NaF + 17.0% MgF ₂	632 [26]	n.a.	n.a.	2105 (liquid) [26] 2810 (solid, 25 °C) [26]
51.8% NaF + 34.0% CaF ₂ + 14.2% MgF ₂	645 [26]	n.a.	n.a.	2370 (liquid) [26] 2970 (solid, 25 °C) [26]
48.1% LiF + 51.9% NaF	652 [26]	n.a.	n.a.	1930 (liquid) [26] 2720 (solid, 25 °C) [26]
63.8% KF + 27.9% NaF + 8.3% MgF ₂	685 [26]	n.a.	n.a.	2090 (liquid) [26]
45.8% LiF + 54.2% MgF ₂	746 [26]	n.a.	n.a.	2305 (liquid) [26] 2880 (solid, 25 °C) [26]
53.6% NaF + 28.6% MgF ₂ + 17.8% KF	809 [26]	n.a.	n.a.	2110 (liquid) [26] 2850 (solid, 25 °C) [26]
66.9% NaF + 33.1% MgF ₂	832 [26]	n.a.	n.a.	2190 (liquid) [26] 2940 (solid, 25 °C) [26]

% in weight; n.a.: not available.

Κεφάλαιο 4

Συσκευασία των PCMs

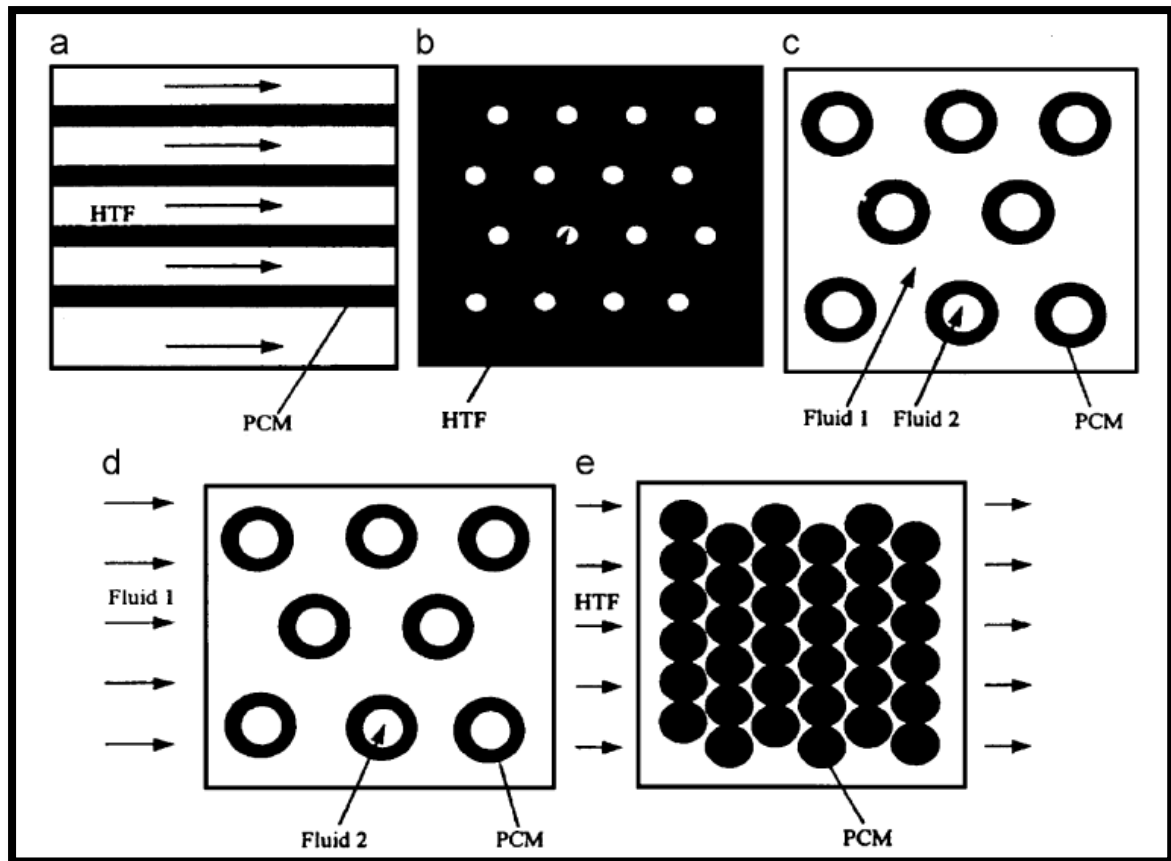
4.1 Εισαγωγή

Η επιτυχημένη χρήση των PCMs σε εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας έγκειται στη σωστή αποθήκευση και συσκευασία τους. Η τοποθέτηση των PCMs σε κάψουλες ή σακούλες διαφορετικών γεωμετριών έχει με τη σειρά της ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ο χώρος συσκευασίας θα πρέπει να έχει τις ακόλουθες προϋποθέσεις: i) να καλύπτει τις απαιτήσεις αντοχής στη διάβρωση, ελαστικότητας, και θερμικής σταθερότητας, ii) να δρα σαν όριο ώστε να αποτρέπει την επαφή του περιβάλλοντος με το PCM, και κάθε αρνητική συνέπεια που αυτό μπορεί να επιφέρει, iii) να προσφέρει ικανοποιητική επιφάνεια για τη μεταφορά θερμότητας και iv) να παρέχει σταθερότητα στη δομή καθώς και εύκολο χειρισμό.

Τα είδη της διαθέσιμης συσκευασίας είναι η ογκώδης αποθήκευση, οι μακροκάψουλες, οι μικροκάψουλες και οι μοριακές κάψουλες. Η Εικόνα 4.1.1 [29] μας δείχνει διάφορες μορφές αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Στον Πίνακα 4.1.1 φαίνονται οι μελέτες που έχουν γίνει για κάψουλες διαφόρων γεωμετριών.

4.2 Ογκώδης αποθήκευση [4]

Ο τρόπος αυτός αποθήκευσης περιλαμβάνει έναν εναλλάκτη θερμότητας με PCMs, η οποία είναι παρόμοιος στο σχεδιασμό με τις ήδη υπάρχουσες δεξαμενές αποθήκευσης ενέργειας, αλλά με ορισμένες σημαντικές διαφορές. Η κεντρική διαφορά είναι ότι τα συστήματα ογκώδους αποθήκευσης χρειάζονται μια πιο εντατική ανταλλαγή θερμότητας σε σχέση με τις δεξαμενές που δεν περιέχουν PCMs. Αυτό συμβαίνει διότι τα PCMs έχουν πολύ υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα μέσα αποθήκευσης. Η περιοχή ανταλλαγής θερμότητας είναι πολύ μικρότερη αλλά εξακολουθεί να απαιτεί ένα υψηλό ποσοστό θερμικής απελευθέρωσης ή απόκτησης. Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται είναι η προσθήκη πτερυγίων ή η χρησιμοποίηση μορίων υψηλής αγωγιμότητας, οι μεταλλικές δομές, ίνες στην πλευρά που έρχεται σε επαφή με το PCM, οι εναλλάκτες θερμότητας άμεσης επαφής ή η μέθοδος των κυλιόμενων κυλίνδρων.



Εικόνα 4.1.1 Σχηματική απεικόνιση τυπικών συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας [29]: a) επίπεδη πλάκα, b) κέλυφος και σωλήνες με εσωτερική ροή, c) κέλυφος και σωλήνες με παράλληλη ροή, d) κέλυφος και σωλήνες με διασταυρούμενη ροή, e) σφαιρική κλίνη

4.3 Συσκευασία σε μακροκάψουλες [4]

Η πιο διαδεδομένη τεχνική αποθήκευσης των PCMs είναι η συσκευασία τους σε μακροκάψουλες, κατά την οποία μία αρκετά μεγάλη ποσότητα PCM τοποθετείται σε μεμονωμένες κάψουλες. Η μάζα που περιέχεται σε κάθε κάψουλα κυμαίνεται από μερικά γραμμάρια έως ένα κιλό. Το βασικό πλεονέκτημα της συσκευασίας σε μακροκάψουλες είναι ότι μπορεί να εφαρμοσθεί σε συστήματα που χρησιμοποιούν ρευστό μεταφοράς θερμότητας τόσο σε υγρή μορφή όσο και σε αέρια φάση. Είναι επίσης εύκολα στο χειρισμό και την μεταφορά. Το σχήμα των καψουλών μπορεί να είναι τετράγωνα πάνελ ή σφαιρικές σακούλες χωρίς καθορισμένο σχήμα. Το κλειδί για μια επιτυχημένη κάψουλα είναι να σχεδιαστεί έτσι ώστε να ταιριάζει πλήρως στην εφαρμογή που εξετάζουμε. Συσκευάζοντας τα PCMs σε μακροκάψουλες μπορούμε: i) να αποφύγουμε τον διαχωρισμό των φάσεων, ii) να αυξήσουμε το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και iii) να προσφέρουμε μια ισχυρή δομή για τα PCMs. Οι πιο φθηνές μέθοδοι συσκευασίας είναι τα πλαστικά μπουκάλια, τα επίπεδα

μεταλλικά κουτιά και τα κουτιά που είναι κατασκευασμένα από ελαφρύ ατσάλι. Το πρόβλημα της διάβρωσης από το οποίο απειλείται η τελευταία μέθοδος συσκευασίας μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση της απαραίτητης μόνωσης.

4.4 Συσκευασία σε μικροκάψουλες [4]

Η συσκευασία σε μικροκάψουλες είναι μία τεχνική κατά την οποία ένας μεγάλος αριθμός μικρών μορίων PCMε εμπεριέχονται σε μία στεγανοποιημένη και συνεχόμενη κοιλότητα. Η μήτρα που περιέχει το PCM θα πρέπει να έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, ειδάλλως τα συστήματα συσκευασίας σε μικροκάψουλες πάσχουν από χαμηλό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Τα ρεύματα συναγωγής αποτρέπονται από τη δυσκαμψία της μήτρας, η οποία αναγκάζει όλη τη μεταφορά θερμότητας να γίνεται με αγωγή. Τα συστήματα που λειτουργούν με συσκευασίες σε μικροκάψουλες είναι αρκετά δαπανηρά σε σχέση με τις άλλες μεθόδους αποθήκευσης, και χρησιμοποιούνται μόνο σε εφαρμογές θερμικού ελέγχου.

4.5 Συσκευασία σε μοριακές κάψουλες [30]

Το σύστημα αυτό αποθήκευσης είναι μία νέα τεχνολογία η οποία έχει αναπτυχθεί από τον Dupont de Nemours, η οποία επιτρέπει την εισαγωγή μίας πολύ μεγάλης συγκέντρωσης PCM μέσα σε ένα πολυμερές μίγμα. Για παράδειγμα, μία σανίδα 5 mm έχει χωρητικότητα αποθήκευσης μέχρι και 515 kJ/m². Η συσκευασία του PCM σε μοριακές κάψουλες καθιστά δυνατή τη διάνοιξη οπών καθώς και την κοπή του υλικού που περιέχει το PCM χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος της διαρροής του.

Πίνακας 4.1.1 Μελέτες μεταφοράς θερμότητας για κάψουλες διαφόρων γεωμετριών [4]

Geometry	Boundary condition	Storage medium	HTF	Mode of operation	Range of parameters	Remarks
Spherical enclosure	Constant temperature	<i>n</i> -Hexadecane	Water	Solidification	$3 < T_c < 13 \text{ }^\circ\text{C}$; $0 < T_{\text{initial}}$ (super heat) $< 9 \text{ }^\circ\text{C}$	Experimental investigation
Spherical shell	Convective	Paraffin wax	Air	Both melting and solidification	$4 < \dot{m}_f < 10 \text{ m/s}$; T_{initial} : ambient (during charging), $60 < T_{\text{initial}} < 90 \text{ }^\circ\text{C}$ (during discharging); $60 < T_h < 90 \text{ }^\circ\text{C}$; T_c : $24 \text{ }^\circ\text{C}$; $20 < d_c < 60 \text{ mm}$	Experimental investigation
Cylindrical/spherical containers	Convective	Water	–	Solidification	$0.01 < Ste < 0.5$; $0.2 < \text{super heat} < 1$; $1 < Bi < 50$	Mathematical modelling
Cylindrical capsule	Convective	Water, Octadecane, Li_2CO_3 , NaCl	Water, helium, air	Melting	$300 < Re < 7500$; T_{initial} : $T_m - 5 \text{ }^\circ\text{C}$; T_h : $T_m + 5 \text{ }^\circ\text{C}$; $6 < d_c < 10 \text{ mm}$	Experimental investigation and mathematical modelling
Spherical capsule	Convective	<i>n</i> -Octadecane	Air	Melting	$150 < Re < 1800$; T_{initial} : 298 K; T_h : 321 K; d_c : 50 mm	Experimental investigation
Slab, cylinder or spherical capsules	Constant temperature	Eutectic mixture of hydrate nitrates of ammonium and magnesium	–	Solidification	$0.25 < Ja < 2$	Mathematical modelling
Plate, cylinder or spherical capsules	Constant temperature	–	–	Solidification	$0.05 < Ste < 2$	Mathematical modelling
Spherical capsule	Convective	Water/ice	Ethanol	Solidification	$5 < T_{\text{initial}} < 35 \text{ }^\circ\text{C}$; $-25 < T_c < -5 \text{ }^\circ\text{C}$; $10 < d_c < 200 \text{ mm}$	Mathematical modelling
Spherical enclosure	Convective	Water/ice	Chilled water	Both melting and solidification	\dot{m}_f : 0.1 m/s; $4.5 < T_h < 12 \text{ }^\circ\text{C}$; $-9.5 < T_c < -4.4 \text{ }^\circ\text{C}$; $62.7 < d_c < 81.4 \text{ mm}$	Experimental investigation

Geometry	Boundary condition	Storage medium	HTF	Mode of operation	Range of parameters	Remarks
Elliptic capsule	Constant temperature	<i>n</i> -Octadecane	–	Melting	T_{initial} : T_m ; Ste: 0.1; $0.2 < \text{Aspect ratio} < 5$	Mathematical modelling
Elastic spherical and cylindrical capsule	Constant temperature	Paraffin	–	Melting	T_{initial} : T_m ; Ste: 0.1	Mathematical modelling
Vertical rectangular enclosure	Constant-rate heating on one of wall during charging, an airflow stream during discharging	Paraffin wax	Air (during discharging)	Both melting and solidification	\dot{m}_f : 0.005488 kg/s; q : 480 W/m ² ; T_c : 19.3 °C; height: 813 mm; length: 623 mm	Experimental investigation and Mathematical modelling
Spherical container	Constant temperature	Paraffin wax	–	Melting	T_{initial} : ambient; $0.008 < Ste < 0.0533$; $20 < d_c < 100 \text{ mm}$	Mathematical modelling
Rectangular and cylindrical containers	Convective	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Air	Melting	T_{initial} : 15 °C; T_h : 60 °C; $5 < d_c < 20 \text{ mm}$	Mathematical modelling
Cylindrical capsule	Convective	Gelled sodium sulfate decahydrate	Water	Solidification	$5 \times 10^{-4} < \text{cooling rate} < 1.6 \times 10^{-3}$; $26 < T_{\text{initial}} < 34 \text{ }^\circ\text{C}$; d_c : 24.3 mm, length: 1220 mm	Experimental investigation and Mathematical modeling
Parallelepipedic capsule	Constant temperature at the top and bottom surfaces and side walls adiabatic	<i>n</i> -Octadecane	–	Melting	$0 < \text{sub cool parameter} < 5$; $0.00926 < Ste < 0.0926$; length: 75 mm, $25 < \text{width} < 225$, height: 30 mm	Mathematical modelling
Spherical capsule	Convective	–	–	Melting	–	Mathematical modelling
Spherical capsule	Convective	Al, NaCl, KNO_3 , Pb, Al-12, Al-25	Nitrogen gas	Both melting and solidification	$2.33 < \dot{m}_f < 4.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$; $573 < T_h < 1173 \text{ K}$; T_c : 298 K; d_c : 40 mm	Experimental investigation and Mathematical modelling

Horizontal rectangular capsule	Constant temperature	Ice, octadecane	–	Melting	$T_{\text{initial}}: (T_m - 2)^\circ\text{C}; 0.0287 < \text{Ste} < 0.251; 1/3 < \text{aspect ratio} < 3$	Experimental investigation and Mathematical modelling
Horizontal cylinder	Convective	Binary mixture of <i>p</i> -dichlorobenzene and <i>p</i> -dibromobenzene	Silicon oil	Melting	$d_c: 36 \text{ mm}$	Experimental investigation
Horizontal cylinder	Constant temperature	Ice	–	Melting	$T_{\text{initial}}: T_m; 4 < T_h < 15^\circ\text{C}$	Mathematical modelling
Circular tube with various inclination angles	Convective	<i>n</i> -Eicosane	Water	Melting	$0.041 < \text{Ste} < 0.25; d_c: 50.8 \text{ mm}, \text{length}: 394 \text{ mm}$	Experimental investigation
Horizontal tube	Convective	<i>n</i> -Octadecane, <i>p</i> -xylene	Water	Melting	$T_{\text{initial}}: T_m - 0.5^\circ\text{C}; 0.05 < \text{Ste} < 0.18; 16 < d_c < 30 \text{ mm}$	Experimental investigation and Mathematical modelling
Horizontal cylinder	Constant temperature	<i>n</i> -Octadecane	Water	Melting	$T_{\text{initial}}: T_m; 0.01 < \text{Ste} < 0.1; d_c: 32 \text{ mm}, \text{length}: 40 \text{ mm}$	Experimental investigation and mathematical modelling
Horizontal cylindrical capsule	Constant temperature	Naphthalene	Water	Both melting and solidification	$86 < T_h < 99.5^\circ\text{C}; 63 < T_c < 73^\circ\text{C}; d_c: 40 \text{ mm}, \text{length}: 300 \text{ mm}$	Experimental investigation and mathematical modelling

Κεφάλαιο 5

Εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη χρήση PCMs

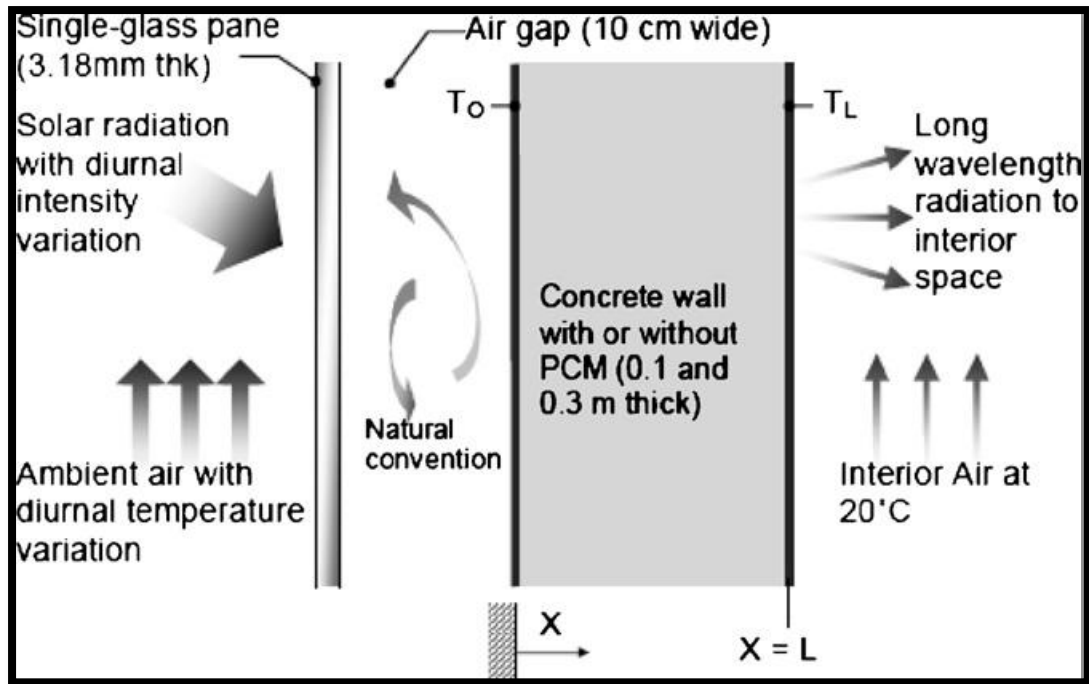
5.1 Εισαγωγή

Τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές όπως: i) σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού, ii) σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα, iii) σε ηλιακές εστίες μαγειρέματος, iv) σε ηλιακά θερμοκήπια και v) σε κτίρια. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τις εφαρμογές των PCMs στα κτίρια και κυρίως στα πάνελ οροφής.

Η χρήση των PCMs στα κτίρια έχει μελετηθεί ακόμα και πριν το 1980. Η έλευση των PCMs και η χρήση τους στον τοίχο του Trombe, σε σανίδες στους τοίχους, σε πατζούρια, σε παράθυρα με κινούμενες κουρτίνες, σε συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης και σε πάνελ στο ταβάνι, βοηθά στη θέρμανση και στην ψύξη των κτιρίων. Η εφαρμογή των PCMs στα κτίρια έχει δύο διαφορετικούς στόχους. Πρώτον, τη χρησιμοποίηση της φυσικής θερμότητας που παρέχει η ηλιακή ενέργεια για θέρμανση ή της παγωνιάς της νύχτας για ψύξη. Δεύτερον, τη χρήση των πηγών θερμότητας ή ψύξης που έχει κατασκευάσει ο άνθρωπος. Σε κάθε περίπτωση, η αποθήκευση της θερμότητας ή του ψύχους είναι απαραίτητη για την εξισορρόπηση της διαθεσιμότητας και της ζήτησης όσον αφορά στον χρόνο και στην ισχύ. Τρεις βασικοί τρόποι για τη χρήση των PCMs στα κτίρια είναι: i) η προσθήκη PCMs στους τοίχους, ii) η προσθήκη PCMs σε άλλα συστατικά του κτιρίου εκτός των τοίχων και iii) η χρήση PCMs σε μονάδες θέρμανσης και ψύξης [2].

5.2 Προσθήκη PCMs στον τοίχο του Trombe [2]

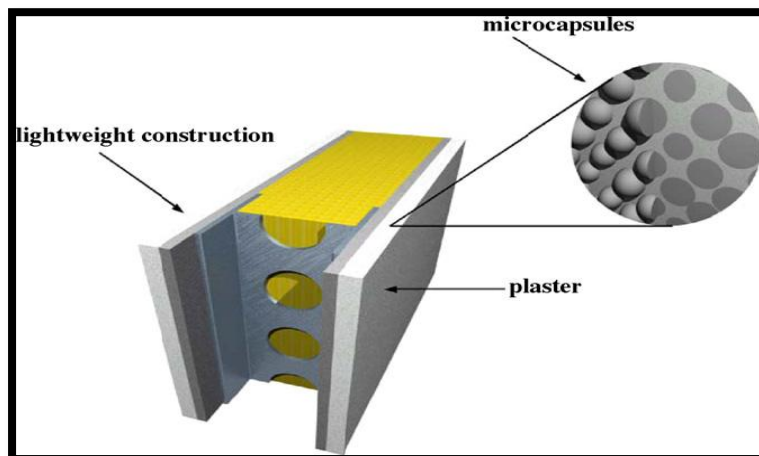
Αρκετοί συγγραφείς έχουν προτείνει την εισαγωγή των υλικών αλλαγής φάσης σε τοίχους, στο ταβάνι σε ψευδοροφές και στο πάτωμα με στόχο τη ρύθμιση της θερμοκρασίας. Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν χρησιμοποιηθεί για να αντικαταστήσουν την τοιχοποιία στον τοίχο του Trombe (Εικόνα 5.2.1). Για μία συγκεκριμένη ποσότητα αποθήκευσης θερμότητας, οι μονάδες που χρησιμοποιούν υλικά αλλαγής φάσης χρειάζονται λιγότερο χώρο από ότι τοίχοι που περιέχουν νερό και είναι πολύ πιο ελαφριές. Για το λόγο αυτό είναι πιο εύκολο να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές εκσυγχρονισμού κτιρίων.



Εικόνα 5.2.1 Σχέδιο ενός τοίχου Trombe με ή χωρίς PCM.

5.3 Προσθήκη PCMs σε τοίχους [2]

Οι τοίχοι από γυψοσανίδα είναι πολύ φθηνοί και χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές, καθιστώντας τους κατάλληλους για τη συσκευασία των PCMs. Ωστόσο, οι αρχές της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε κατάλληλο οικοδομικό υλικό. Η ενσωμάτωση των PCMs σε γυψοσανίδες γίνεται είτε διαποτίζοντας το υγρό PCM στους πόρους της γυψοσανίδας πριν την κατασκευή της, είτε προσθέτοντας το PCM στο στάδιο κατασκευής, κατά το οποίο η γυψοσανίδα βρίσκεται ακόμη σε υγρή φάση. Αρχικά εξετάστηκε η συσκευασία των PCMs σε μακροκάψουλες, αλλά γρήγορα αντικαταστάθηκε από τη χρήση μικροκάψουλών (Εικόνα 5.3.1).



Εικόνα 5.3.1 Σχηματική όψη ενός τοίχου ελαφριάς κατασκευής με χρήση PCM.

5.4 Προσθήκη PCMs σε πατζούρια [2]

Τα πατζούρια που περιέχουν PCMs τοποθετούνται έξω από τα παράθυρα (Εικόνα 5.4.1). Κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι ανοιχτά προς τα έξω και το εσωτερικό τους κομμάτι είναι εκτεθειμένο στην ηλιακή ακτινοβολία, έτσι απορροφάται θερμότητα και το PCM λιώνει. Τη νύχτα τα πατζούρια κλείνουν και η θερμότητα από το PCM ακτινοβολείται στα δωμάτια.



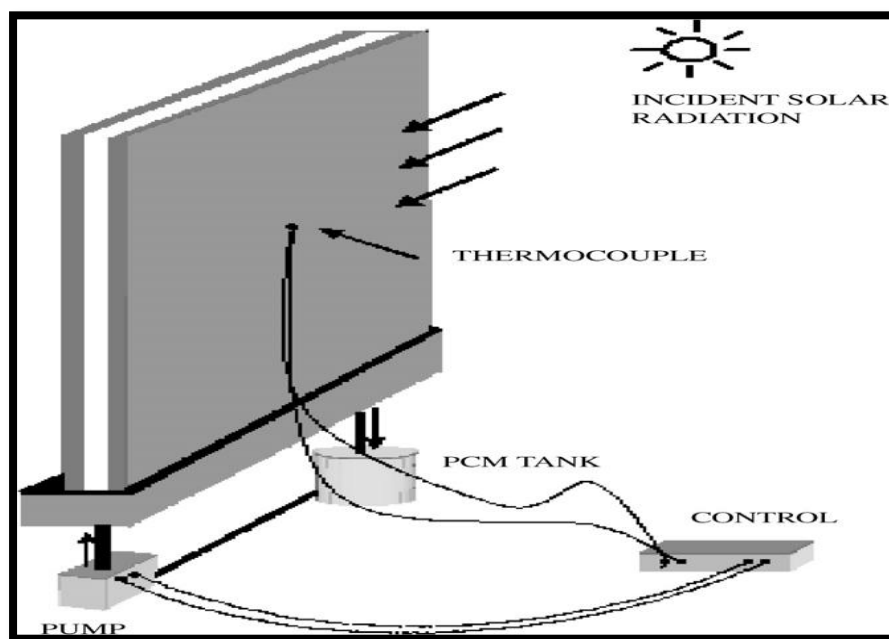
Εικόνα 5.4.1 Σκίαση με ρολά που περιέχουν PCM.

5.5 Προσθήκη PCMs σε κουρτίνες [18]

Ο Ismail και οι συνεργάτες του [31] πρότειναν την προσθήκη PCMs σε κινούμενες κουρτίνες, αξιοποιώντας θερμικά με ένα διαφορετικό τρόπο τα παράθυρα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.5.1 Το παράθυρο έχει δύο στρώματα με κενό στο ενδιάμεσο και μία σχισμή για να διέρχεται ο αέρας στην πάνω γωνία. Οι πλευρές και το κάτω μέρος είναι σφραγισμένα με εξαίρεση δύο τρύπες στο κάτω μέρος, οι οποίες ενώνονται μέσω πλαστικού σωλήνα με μία αντλία και τη δεξαμενή που περιέχει το PCM. Η αντλία με τη σειρά της συνδέεται με τη δεξαμενή που περιέχει το PCM, το οποίο βρίσκεται σε υγρή φάση. Η λειτουργία της αντλίας ελέγχεται από έναν αισθητήρα θερμότητας. Όταν η θερμοκρασιακή διαφορά φτάσει μια προκαθορισμένη τιμή η αντλία ξεκινά τη λειτουργία της και το υγρό PCM απομακρύνεται από τη δεξαμενή για να γεμίσει το κενό μεταξύ των υαλοπινάκων. Το PCM αρχίζει να παγώνει εξαιτίας της χαμηλότερης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας, σχηματίζοντας ένα στερεό στρώμα που αυξάνεται σε πάχος με την πάροδο του χρόνου, κι έτσι εμποδίζει την εσωτερική περιβάλλουσα θερμοκρασία να μειωθεί. Η ίδια διαδικασία συνεχίζεται έως ότου στερεοποιηθεί ολόκληρη η ποσότητα του

PCM. Ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα παραθύρου θα διασφαλίσει ότι η εξωτερική θερμοκρασία θα ξεκινήσει να μειώνεται πριν την ολική στερεοποίηση του PCM.

Η προτεινόμενη αυτή ιδέα είναι εφικτή και θερμικά αποτελεσματική. Επιπλέον, έχει επιβεβαιωθεί ότι η παρουσία του PCM μεταξύ των υαλοπινάκων φιλτράρει την θερμική ακτινοβολία και μειώνει το θερμικό κέρδος ή τις απώλειες, επειδή η περισσότερη ενέργεια που μεταφέρεται απορροφάται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης του PCM. Το διπλό τζάμι που περιέχει PCM είναι πιο αποτελεσματικό από ένα παρόμοιο τζάμι που περιέχει αέρα. Τέλος, το χρωματισμένο PCM είναι πιο αποτελεσματικό όσον αφορά τη μείωση της ακτινοβολίας και το πράσινο χρώμα είναι το πιο αποτελεσματικό από όλα.

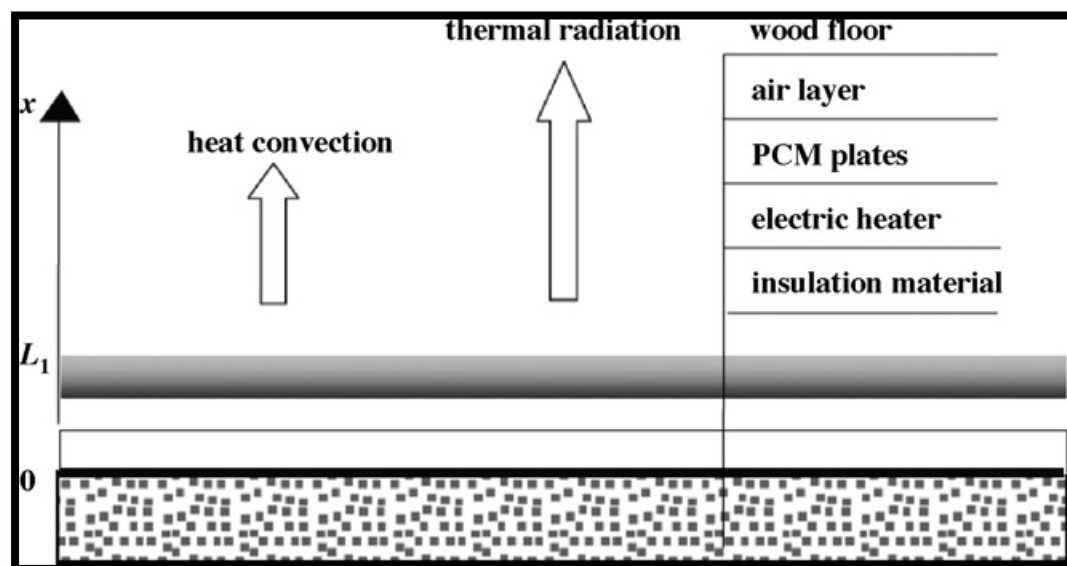


Εικόνα 5.5.1 Σχέδιο παραθύρου με κινητή κουρτίνα.

5.6 Προσθήκη PCMs σε συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης [32]

Η θέρμανση με ακτινοβολία έχει πολύ περισσότερα πλεονεκτήματα από ότι τα συστήματα θέρμανσης με συναγωγή. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται χώρος, μιας και το σύστημα θέρμανσης βρίσκεται μέσα στον ιστό του κτιρίου. Επίσης, η θερμική μάζα η οποία είναι ενσωματωμένη στο δάπεδο χρησιμοποιείται για την αποθήκευση ενέργειας σε ώρες εκτός αιχμής. Συνεπώς, μειώνονται οι αιχμές του φορτίου και μετατοπίζονται στη διάρκεια της νύχτας όταν το ηλεκτρικό ρεύμα είναι πιο φθινό. Από πλευράς εφαρμογής, υλικά με μεγάλη πυκνότητα όπως το τσιμέντο δημιουργούν μεγαλύτερες διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας, ενώ παράλληλα τα PCMs μπορούν να παρέχουν μεγαλύτερη αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας στο στενό εύρος θερμοκρασιών που επικρατεί στα

κτίρια. Έτσι βελτιώνεται το επίπεδο θερμικής άνεσης. Σε ένα σύστημα που αποτελείται από πλάκες PCM, ηλεκτρικούς θερμαντήρες και αέρα, οι ηλεκτρικοί θερμαντήρες λιώνουν το στρώμα του PCM χρησιμοποιώντας το φθινό νυχτερινό ρεύμα και το σύστημα αποθηκεύει θερμότητα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι ηλεκτρικοί θερμαντήρες τίθενται εκτός λειτουργίας και το στρώμα του PCM στερεοποιείται, απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη θερμότητα.



Εικόνα 5.6.1 Ενδοδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με πλάκες PCM.

5.7 Προσθήκη PCMs σε πάνελ οροφής [18]

Η τοποθέτηση PCM σε πάνελ οροφής έχει εξεταστεί από πολλούς επιστήμονες. Η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος αυτού είναι ότι το PCM στα πάνελ οροφής λιώνει κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν εκτίθεται στα θερμικά φορτία και παγώνει κατά τη διάρκεια της νύχτας με τη βοήθεια ενός συστήματος ενσωματωμένων σωλήνων που μεταφέρουν νερό. Η προσωρινή αποθήκευση της θερμικής ενέργειας στο PCM μειώνει το εύρος διακύμανσης των θερμοκρασιών στο κτίριο, ενώ επιτρέπει στη διαδικασία αποβολής της θερμότητας να μην είναι ταυτόχρονη με το κέρδος θερμότητας. Βέβαια, η διάταξη αυτή απαιτεί αυστηρά μέτρα πυροπροστασίας μιας και ελλοχεύει ο κίνδυνος της διαρροής υγρού PCM. Μία λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η συσκευασία του PCM σε μικροκάψουλες, οι οποίες θα είναι τοποθετημένες σε κατάλληλο υλικό-φορέα, όπως ο γύψος. Το PCM θα είναι κλεισμένο σε μία σταθερή κατασκευή και το νερό που περιέχεται στο γύψο δρα σαν κατασταλτικό κάθε εκδήλωσης πυρκαγιάς.

Κεφάλαιο 6

Εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης σε σύστημα ηλιακού ζεστού νερού για οικιακή χρήση

6.1 Εισαγωγή

Η λανθάνουσα θερμότητα στα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιείται για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα βασικά πλεονεκτήματα των PCMs είναι η υψηλή αποθηκευτική ικανότητα και η ισοθερμοκρασιακή λειτουργία. Τα PCMs μπορούν να βρουν εφαρμογή σε δεξαμενές ηλιακού ζεστού νερού για οικιακή χρήση (solar domestic hot water – SDHW) προκειμένου να βελτιώσουν τη διαστρωμάτωση [33-36].

Οι δεξαμενές νερού με θερμική διαστρωμάτωση είναι ευρέως διαδεδομένες. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνά στην ηλιακή ενέργεια και σε συστήματα ανάκτησης θερμότητας [36-40]. Οι απαιτήσεις θερμότητας μπορούν να ικανοποιηθούν από το ανώτερο τμήμα στην υψηλότερη διαθέσιμη θερμοκρασία. Μία χαμηλή θερμοκρασία στον πάτο που είναι συνδεδεμένος με την είσοδο του ηλιακού συλλέκτη θα επιφέρει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στον συλλέκτη [37-41]. Ο Rosen [40] έδειξε ότι η ενέργεια των δεξαμενών με διαστρωμάτωση είναι υψηλότερη από τις πλήρως αναμεμιγμένες δεξαμενές.

Όταν ένα κομμάτι από PCM προστεθεί στο υψηλότερης θερμοκρασίας ανώτερο τμήμα της δεξαμενής, η ενεργειακή πυκνότητα αποθήκευσης θα αυξηθεί [37-41]. Συνεπώς, περισσότερη ενέργεια θα είναι διαθέσιμη για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις για θερμότητα από το ανώτερο τμήμα της δεξαμενής. Η μεταφορά θερμότητας στον κατακόρυφο άξονα μεταξύ των διάφορων στρωμάτων με διαφορετική θερμοκρασία και πυκνότητα είναι πολύ χαμηλή. Το γεγονός αυτό προκαλεί καθυστέρηση στο να επέλθει η θερμική ισορροπία μεταξύ της υψηλότερης θερμοκρασίας του ανώτερου τμήματος και της χαμηλότερης θερμοκρασίας του κατώτερου τμήματος, δηλαδή του στρώματος που βρίσκεται στον πάτο. Συνεπώς, η θερμότητα μπορεί και αποθηκεύεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στο ανώτερο κομμάτι. Όταν προστεθεί το PCM στο ανώτερο κομμάτι, μπορεί να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη διάρκεια αποθήκευσης διατηρώντας την θερμοκρασία πάνω από το σημείο τήξης του PCM. Επιπλέον, όταν αφαιρείται ποσότητα νερού προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες για θέρμανση, η εισαγωγή του κρύου νερού προκαλεί πήξη στο PCM και έτσι μοιραία απελευθερώνει την λανθάνουσα θερμότητα που είχε. Επόμενες δημοσιεύσεις [37-42] έδειξαν ότι η χρήση ένυδρου άλατος νατρίου σαν PCM είχε πολύ καλή απόδοση στις δεξαμενές.

Τα εμπορικά και βιομηχανικά κτίρια, καθώς και οι κατοικίες έχουν συχνά απαιτήσεις ζεστού νερού γύρω στους 60 °C για το πλύσιμο των ανθρώπων, το πλύσιμο των ρούχων και το καθάρισμα σε μία οικία γενικά χρειάζεται θερμοκρασία γύρω στους 50 °C [43]. Τα PCMs με εύρος τήξης 50-60 °C μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε SDHW σύστημα για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των κτιρίων σε ζεστό νερό. Υπάρχουν όμως λίγοι υποψήφιοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν PCMs σε αυτό το θερμοκρασιακό εύρος [44-46].

Σε αυτήν την μελέτη, προτάθηκαν και δοκιμάστηκαν νέα οργανικά μίγματα PCMs σε δεξαμενές. Τα οργανικά μίγματα των PCM με ποσοστιαία αναλογία % βάρους 80:20 που προτάθηκαν είναι: παραφίνες με στεαρικά, παλμιτικά οξέα και μυριστικά οξέα [46]. Η επίδραση της χρήσης αυτών των αναπτυσσόμενων PCMs στην θερμική απόδοση του ζεστού ηλιακού νερού για οικιακή χρήση είναι υπό συζήτηση.

6.2 Πειραματική μέθοδος

6.2.1 Υλικά αλλαγής φάσης

Προτάθηκαν τρία κιλά με 80:20 ποσοστιαία αναλογία βάρους μίγματος από παραφίνη και άλλα λιπαρά οξέα (στεαρικό οξύ (PS), παλμιτικό οξύ (PP), μυριστικό οξύ (SM)). Ο γραφίτης (10% κατά βάρος) προστέθηκε στο μίγμα του PCM προκειμένου να αυξήσει την μεταφορά θερμότητας στα στρώματα. Επίσης παράχθηκε και εκτεταμένος γραφίτης για αυτόν τον σκοπό από το SGL Technologies GmbH [53]. Τα PCMs δημιουργήθηκαν από Rubitherm (παραφίνη RT54) και Panreac Sintesis (λιπαρά οξέα). Οι θερμικές ιδιότητες των μιγμάτων των PCMs μελετήθηκαν επισταμένως.

6.2.2 Εξαρτήματα

Τρία είναι τα βασικά εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν. Κάθε ένα από αυτά είναι κυλινδρικό στην γεωμετρία με εξωτερική διάμετρο 0.176m και ύψος 0.315m. Το PCM θερμάνθηκε 20 °C πάνω από την θερμοκρασία τήξης προτού τοποθετηθεί στα στρώματα προκειμένου να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα που μπορεί να προέκυπταν εξαιτίας της αύξησης του όγκου. Το ποσοστό του όγκου στα στρώματα στην δεξαμενή αποθήκευσης, $V_{module,tank}$ που υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση 6.2.1 ήταν 3%.

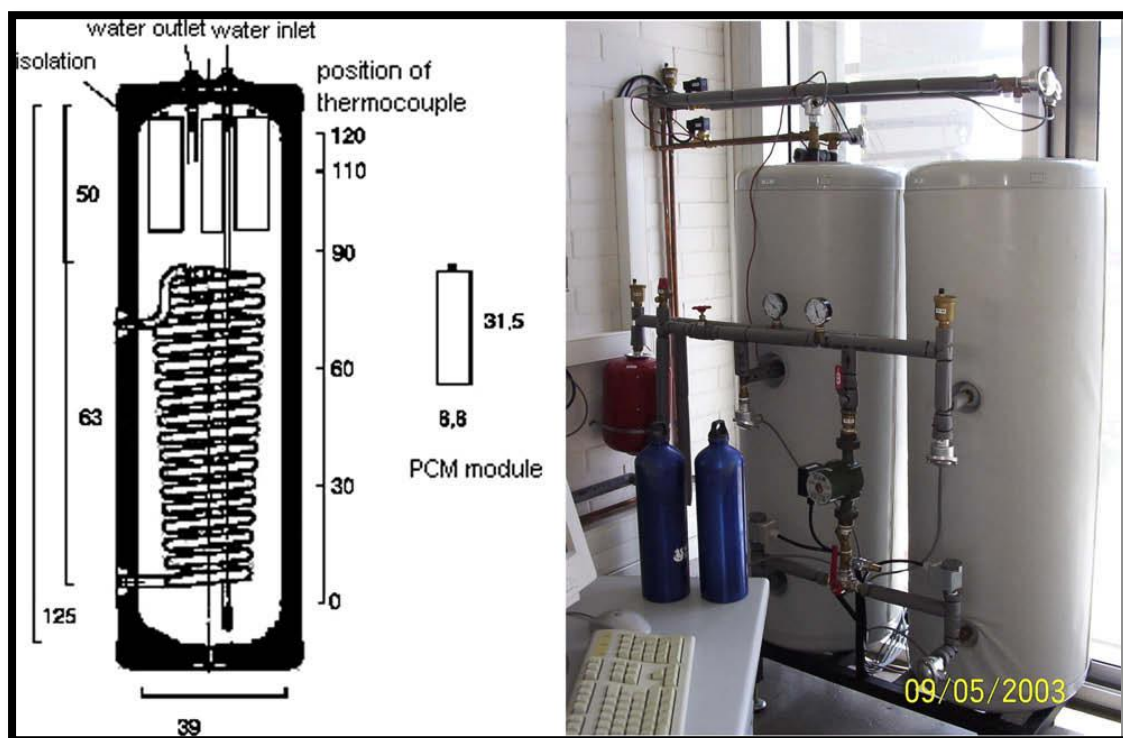
$$\%V_{module,tank} = \frac{V_{module}}{V_{tank}} \times 100 \quad (6.2.1)$$

Το ποσοστό του όγκου στα στρώματα στο ανώτερο τμήμα της δεξαμενής αποθήκευσης, $V_{module,upper}$ που υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση 6.2.2 ήταν 17%.

$$\%V_{module,upper} = \frac{V_{module}}{V_{tank,upper}} \times 100 \quad (6.2.2)$$

6.2.3 Δεξαμενή ζεστού ηλιακού νερού για οικιακή χρήση (SDHW)

Η SDHW δεξαμενή, η οποία χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα είχε 150L χωρητικότητα για νερό [37-41]. Οι διαστάσεις ήταν 0.125m ύψος και 0.78m διάμετρος. Στην Εικόνα 6.2.1 φαίνεται η δεξαμενή ζεστού ηλιακού νερού για οικιακή χρήση και τα στρώματα του PCM. Οι μετρήσεις των θερμοκρασιών έγιναν με ειδικά θερμοστοιχεία τοποθετημένα στον πάτο σε αποστάσεις 0.30, 0.60, 0.90, 1.10 και 1.20m. Επίσης, τοποθετήθηκαν θερμοστοιχεία και στο κέντρο στο εσωτερικό κάθε κομματιού. Η ακρίβεια με την οποία λειτουργούσαν τα θερμοστοιχεία ήταν ± 0.1 °C. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για να καταγράψει τις μετρήσεις ήταν STEP.



Εικόνα 6.2.1 Δεξαμενή ζεστού ηλιακού νερού για οικιακή χρήση και τα στρώματα του PCM που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

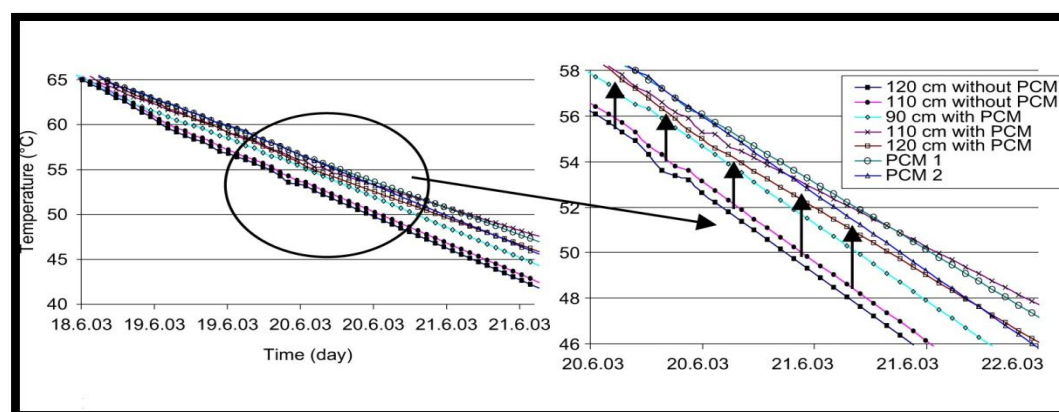
6.2.4 Πειραματική διαδικασία

Τα πειράματα ψύξης άρχισαν πρώτα θερμαίνοντας το νερό στη δεξαμενή σε μία θερμοκρασία περίπου στους 70 °C. Μετά η δεξαμενή αφέθηκε να ψυχθεί μέχρι η θερμοκρασία της να πέσει κάτω από το εύρος της τήξης του PCM. Οι μετρήσεις των θερμοκρασιών πραγματοποιήθηκαν από το STEP με δεκάλεπτα διαλείμματα κατά την διάρκεια της διαδικασίας. Τα πειράματα επαναλήφθηκαν με και χωρίς PCM.

Για τα πειράματα αναθέρμανσης, η SDHW δεξαμενή θερμάνθηκε μέχρι τους 70 °C ξανά και αφαιρέθηκε νερό υψηλής θερμοκρασίας από το ανώτερο τμήμα για 5 με 10 λεπτά προκειμένου να ελεγχθεί η επίδραση του PCM στην θερμική απόδοση της δεξαμενής. Καθώς το χλιαρό νερό αφαιρούνταν, το κρύο νερό αυτομάτως εισαγόταν στο σύστημα από τον πάτο. Οι μετρήσεις των θερμοκρασιών πραγματοποιήθηκαν από το STEP με δεκάλεπτα διαλείμματα κατά την διάρκεια της διαδικασίας.

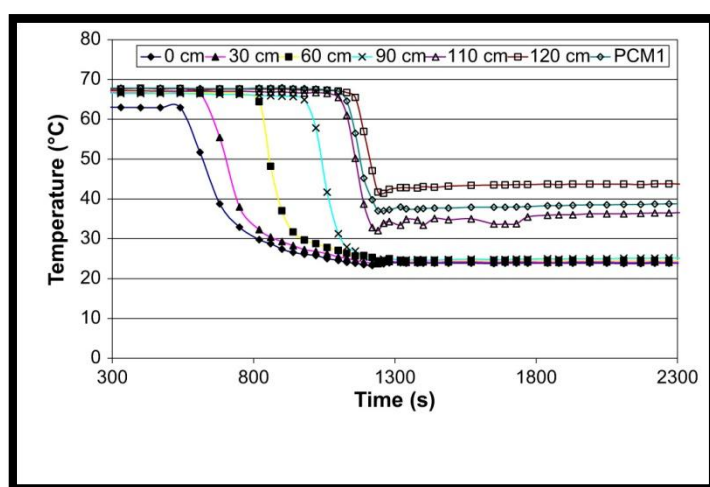
6.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

Στα πειράματα ψύξης η SDHW δεξαμενή θερμάνθηκε από τους 65 °C στους 68 °C και αφέθηκε να ψυχθεί μέχρι τους 40-45 °C. Στην Εικόνα (6.3.1-α) απεικονίζεται η ψυκτική καμπύλη για την SDHW δεξαμενή για τις περιπτώσεις με και χωρίς PCM για μίγματα με παραφίνη και στεατικό οξύ (PS). Το θερμοκρασιακό εύρος της τήξης για το PS μίγμα ήταν 49-53 °C. Μέσα στη ζώνη που ήταν τοποθετημένα τα στρώματα του PCM η θερμοκρασία μειωνόταν από τους 54 °C στους 48 °C, μέσα σε 36h όταν χρησιμοποιούνταν το PCM και μέσα σε 24h όταν δεν υπήρχε. Η παρατήρηση αυτή δείχνει ότι η θερμοκρασία στην δεξαμενή διατηρήθηκε γύρω από το θερμοκρασιακό εύρος τήξης για περισσότερο από 12h. Στην Εικόνα (6.3.1-β) φαίνεται μόνο ένα τμήμα της ψυκτικής καμπύλης, μεγεθυμένο για την διαδικασία της τήξης του μίγματος PS. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι θερμοκρασίες γύρω από το εύρος τήξης είναι υψηλότερες κατά 2.5-3.5 °C στην περίπτωση με PCM.



Εικόνα 6.3.1 Ψυκτικές καμπύλες για το ανώτερο τμήμα της SDHW δεξαμενής.

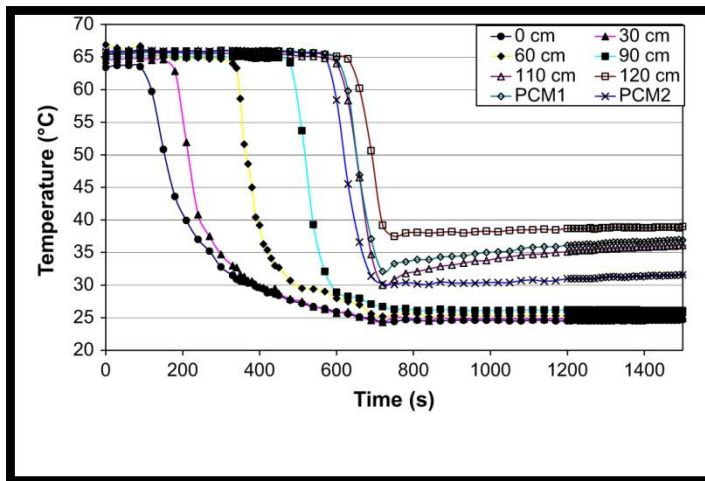
Για το πείραμα της αναθέρμανσης η SDHW δεξαμενή θερμάνθηκε στους 67 °C και μία ποσότητα νερού αφαιρέθηκε από το ανώτερο τμήμα για 10 λεπτά. Στην Εικόνα 6.3.2 δίνεται η θερμοκρασιακή διακύμανση από θερμοστοιχεία που ήταν στις θέσεις 1.10 και 1.20 m, όπου ανταποκρίνεται για το τμήμα της δεξαμενής που είναι το στρώμα του PCM και το PS μίγμα. Παρατηρώντας το διάγραμμα είναι εμφανές ότι υπάρχει μία απότομη πτώση στη θερμοκρασία του νερού, η οποία αντιστοιχεί στην εισαγωγή του κρύου νερού, αλλά καθώς οι θερμοκρασίες πήξης του PCM στις θέσεις 1.10 και 1.20m αυξάνονται κατά 3 και 2.3 °C αντίστοιχα. Για το τμήμα του PCM, η αλλαγή στη θερμοκρασία ήταν 2.5 °C. Ως αναμένετο, οι αλλαγές στις θερμοκρασίες είναι πιο έντονες για τις ζώνες όπου η τοπική θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο PCM και στο νερό παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές.



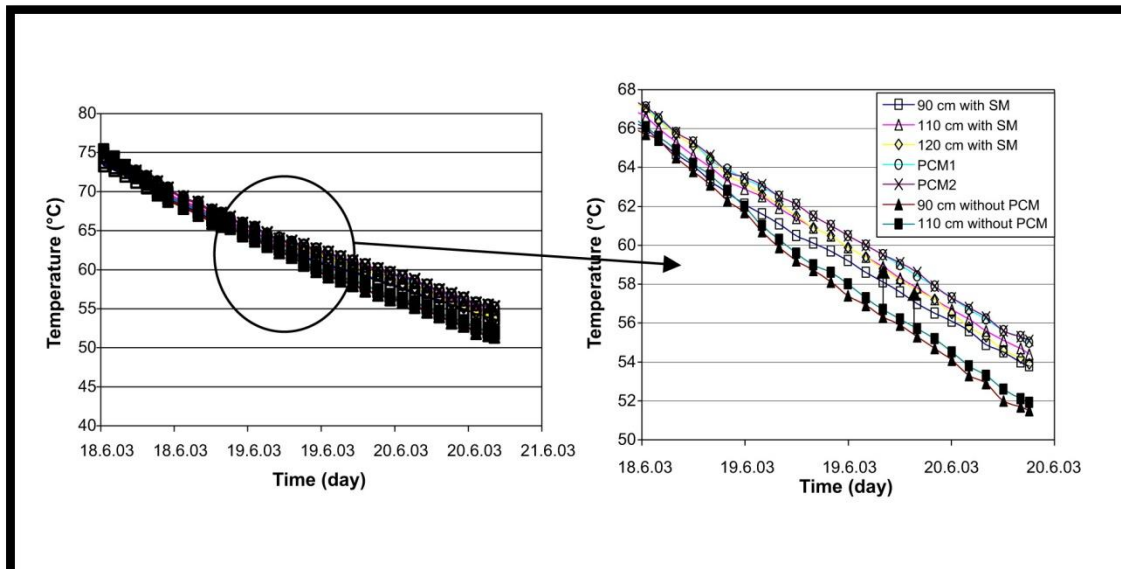
Εικόνα 6.3.2 Κατανομή θερμοκρασίας στην SDHW δεξαμενή στο πείραμα αναθέρμανσης για PS μίγμα.

Στην ψυκτική καμπύλη των πειραμάτων με PP σαν PCM στην SDHW δεξαμενή, η θερμοκρασία πέφτει από τους 54 °C στους 48 °C μέσα σε 23.5h χωρίς PCM και σε 33.5h με PCM. Υπάρχει δηλαδή μία δεκάωρη καθυστέρηση στην πτώση της θερμοκρασίας εξαιτίας της παρουσίας του PCM. Το θερμοκρασιακό εύρος τήξης για το PP είναι 48-52 °C.

Κατά την διάρκεια του πειράματος αναθέρμανσης με PP, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.3.3, οι θερμοκρασιακές αλλαγές στις θέσεις 1.10 και 1.20m είναι 7 και 3 °C αντίστοιχα. Για το στρώμα του PCM η θερμοκρασία ήταν 4.9 °C. Η αντίστοιχη θερμοκρασιακή αλλαγή για το πείραμα της αναθέρμανσης του SM ήταν 1.5 °C στα 1.10m, 1.7 °C στα 1.20m και 1.6 °C για τα στρώματα του PCM, όπως απεικονίζεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 6.3.4.



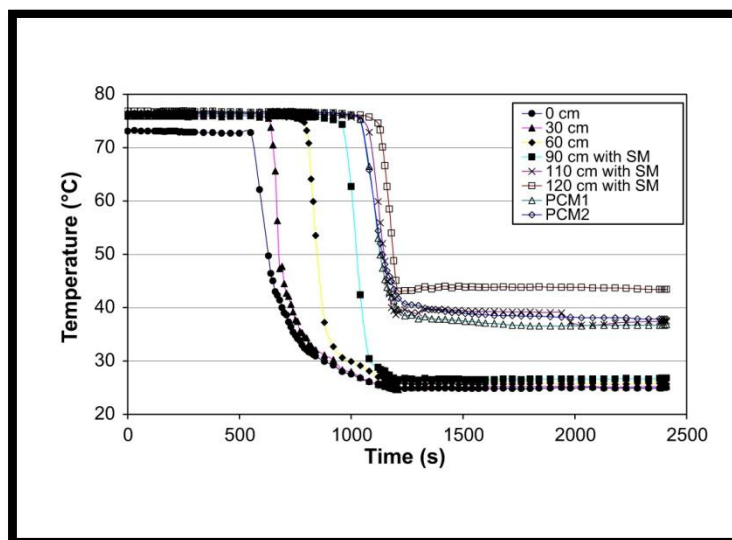
Εικόνα 6.3.3 Κατανομή θερμοκρασίας στην SDHW δεξαμενή στο πείραμα αναθέρμανσης για PP μίγμα.



Εικόνα 6.3.4 Κατανομή θερμοκρασίας στην SDHW δεξαμενή στο πείραμα αναθέρμανσης για SM μίγμα.

Το θερμοκρασιακό εύρος τήξης για το μίγμα SM ήταν 61-65 °C. Συνεπώς, η SDHW δεξαμενή θερμάνθηκε αρχικά σε θερμοκρασίες 75-78 °C για το μίγμα SM στα πειράματα ψύξης και στη συνέχεια αφέθηκε να ψυχθεί μέχρι τους 40-45 °C. Στην Εικόνα 6.3.5 φαίνεται η ψυκτική καμπύλη με και χωρίς PCM. Η θερμοκρασία έπεσε από τους 66 στους 60 °C με PCM μέσα σε 22.5h με μία καθυστέρηση 6h συγκριτικά με τα πειράματα χωρίς PCM. Παρόλο που η θερμότητα της τήξης από το SM μίγμα ήταν υψηλότερη (190.9 kJ/kg), η μικρότερη καθυστέρηση των 6h παρατηρείται για το SM. Το θερμοκρασιακό εύρος τήξης για το μίγμα SM είναι επίσης υψηλότερο σε σχέση με τα άλλα μίγματα PCM που

χρησιμοποιήθηκαν. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη θερμοκρασιακή κλίση ανάμεσα στο περιβάλλον και το PCM και ως εκ τούτου σε ένα σχετικά υψηλότερο δείκτη μεταφοράς θερμότητας. Συνεπώς, η θερμοκρασιακή πτώση προκύπτει σε ένα πιο σύντομο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 6.3.5 Ψυκτικές καμπύλες για το ανώτερο τμήμα (από 0.90 σε 1.20m) στην δεξαμενή SDHW με SM σαν PCM και χωρίς PCM.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η θερμοκρασιακή αύξηση για το μίγμα SM είναι η χαμηλότερη. Ένας λόγος που πιθανόν να μπορεί να το εξηγήσει είναι το υψηλό θερμοκρασιακό εύρος τήξης του SM (61-65 °C) και συνεπώς, το PCM αρχίζει την ψύξη σε ένα νωρίτερο στάδιο συγκριτικά με τα άλλα μίγματα των PCMs. Το μεγαλύτερο μέρος της λανθάνουσας θερμότητάς του απελευθερώνεται όταν φτάσει τους 35-40 °C. Αυτό μπορεί επιπλέον να εξηγηθεί από την μοριακή σκοπιά βάσει των ενδομοριακών δυνάμεων και της επίδρασης της συνεκτικότητας και της πρόσφυσης. Τα PP και PS είναι μίγματα που συνδυάζουν την παραφίνη με τα λιπαρά οξέα. Οι ενδομοριακές δυνάμεις μεταξύ των μορίων των λιπαρών οξέων (στεαρικό και μυριστικό οξύ) είναι πιο δυνατές σε σχέση με τις δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των μορίων των λιπαρών οξέων και των μορίων του υλικού του τοίχου. Όταν το SM μίγμα πήζει δημιουργείται ένα κενό αέρα μεταξύ του τοίχου και του PCM εξαιτίας της επίδρασής του. Ως εκ τούτου, η μεταφορά θερμότητας από το PCM στη δεξαμενή μειώνεται.

Το $\Delta T_{\text{theoretical}}$ αναφέρεται στη θερμοκρασιακή αλλαγή στο ανώτερο τμήμα της δεξαμενής, το οποίο θεωρείται όταν ολόκληρη η λανθάνουσα θερμότητα έχει ανακτηθεί και υπολογίζεται από την σχέση 6.3.1:

$$\Delta T_{theoretical} = \frac{m_{PCM} \times \Delta H_{PCM}}{V_{tank,upper} \times C_{water}} \quad (6.3.1)$$

Τα ΔH_{PCM} και m_{PCM} είναι η λανθάνουσα θερμότητα και η συνολική μάζα του PCM αντίστοιχα. Το C_{water} είναι η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα του νερού σε kJ/L °C.

6.4 Συμπεράσματα

Η επίδραση της χρήσης των PCMs σε μία SDHW δεξαμενή έχει ερευνηθεί. Τρία μίγματα PCM (PP,PS,SM) δοκιμάστηκαν για αυτόν το σκοπό σε πειράματα ψύξης και αναθέρμανσης. Στα πειράματα ψύξης, ο μέσος όρος της θερμοκρασίας του νερού στη δεξαμενή έπεσε κάτω από το εύρος της τήξης του PCM μέσα σε 6-12h. Η μεγαλύτερη πτώση συνέβη στο PS μίγμα και η μικρότερη στο SM μίγμα. Στα πειράματα αναθέρμανσης, παρατηρήθηκε ότι 3kg από PCM μπορούν να αυξήσουν την θερμοκρασία των 14-36L του νερού στο ανώτερο τμήμα της SDHW δεξαμενής κατά 3-4 °C. Το αποτέλεσμα αυτό ήρθε μέσα σε 10-15min. Η θερμοκρασιακή αύξηση στα πειράματα αναθέρμανσης με PP μίγμα ήταν υψηλότερη από ότι με PS μίγμα με παρόμοια θερμότητα και εύρος τήξης. Ωστόσο, η ποσοστιαία αποτελεσματικότητα της ανάκτησης ήταν καλύτερη στο PS από ότι στο PP. Συμπερασματικά, το PS μίγμα έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα για την θερμική απόδοση στην SDHW δεξαμενή.

Κεφάλαιο 7

Πειραματική μελέτη ενδοδαπέδιας ηλεκτρικής θέρμανσης με χρήση πλακών PCM σταθερού σχήματος [47]

7.1 Εισαγωγή

Σχεδόν σε όλες τις πόλεις της βόρειας Κίνας, ο άνθρακας είναι η βασική πηγή ενέργειας για την οικιακή θέρμανση χώρου, ο οποίος προκαλεί σοβαρή μόλυνση του περιβάλλοντος. Το Πεκίνο, το οποίο φιλοξένησε τους ολυμπιακούς αγώνες το 2008, έκλινε στην αναζήτηση άλλης “καθαρής” ενέργειας, όπως η ηλεκτρική αντί του άνθρακα για ηλεκτρική χρήση. Ωστόσο, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρει σημαντικά κατά την διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, γεγονός που δεν συμβαδίζει με την σταθερή παραγωγή ενέργειας από το εργοστάσιο. Προκειμένου να μειωθεί το χάσμα ανάμεσα στις ώρες υψηλής και χαμηλής ζήτησης, έχει επιβληθεί διαφορετική χρέωση για την ημέρα και την νύχτα σε πολλές πόλεις της Κίνας. Η νυχτερινή χρέωση κυμαίνεται στο 1/3-1/5 από αυτήν της ημέρας. Επομένως, η μεταφορά της ηλεκτρικής κατανάλωσης από τις περιόδους αυξημένης ζήτησης στις περιόδους περιορισμένης ζήτησης μπορεί να αποφέρει μεγάλα οικονομικά οφέλη. Επιπλέον, είναι πολύ σημαντικό και για τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να μειώσουν το ηλεκτρικό φορτίο.

Όπως έχει αναφερθεί σε σχετικές έρευνες, η θέρμανση του δαπέδου μέσω ακτινοβολίας μπορεί να αποτελέσει μία εναλλακτική και πολύ οικονομική λύση [48]. Η θέρμανση μέσω ακτινοβολίας έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα θέρμανσης αέρα. Εξασφαλίζει χώρο από την στιγμή που θα ενσωματωθεί στο σκελετό του κτιρίου [49]. Η θερμότητα άνεσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία, η οποία καθορίζεται από τη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα και από τη θερμοκρασία των ακτινοβολούμενων επιφανειών. Συνεπώς, είναι εφικτό να επιτευχθούν συνθήκες άνεσης με μία ψυχρότερη θερμοκρασία αέρα από μία μεγάλης κλίμακας επιφάνεια δαπέδου, η οποία συνεπάγεται μειωμένες απώλειες [48]. Οι διαφορές μεταξύ των θερμοκρασιών στο κεφάλι και τα πόδια είναι μικρές. Επειδή η θερμοκρασία του αέρα δεν είναι μεγαλύτερη από ότι αυτή των τοίχων, δεν δίνεται ιδιαίτερη σημασία στους τοίχους και δεν υπάρχει ανάγκη να υγραίνεται ο αέρας το χειμώνα. Οι διαφορές στις θερμοκρασίες του αέρα είναι ελάχιστες και η μεταφορά του αέρα φαίνεται να είναι αμελητέα και συνεπώς η κίνηση της σκόνης ελαττώνεται. Έτσι, τα συστήματα στο δάπεδο που λειτουργούν μέσω ακτινοβολίας είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον σε σχέση με τα συμβατικά [50].

Η θερμική μάζα σε ένα σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας τις περιόδους περιορισμένης ζήτησης. Επομένως τα μεγάλα φορτία μπορούν να μειωθούν και να μετακινηθούν τη νύχτα όταν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι αισθητά χαμηλότερο [51]. Ο συνδυασμός της ενδοδαπέδιας θέρμανσης μέσω ακτινοβολίας και της θερμικής αποθήκευσης προσφέρει τη δυνατότητα σημαντικής βελτίωσης στην ενεργειακή αποτελεσματικότητα των κτιρίων χωρίς να γίνονται συμβιβασμοί στη θερμική άνεση.

Τα πυκνά υλικά, όπως το σκυρόδεμα, χρησιμοποιούνται συχνά στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας για συστήματα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Ο Athienitis και οι συνεργάτες του περιέγραψαν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης με αποθήκευση θερμικής ενέργειας, με 1cm πάχος άμμου και 4cm πάχος πλακών σκυροδέματος ως την κύρια θερμική μάζα [48]. Ο Bakos εισήγαγε μία ειδική εφαρμογή χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό ενός τοίχου Trombe με ηλιακό παθητικό σύστημα και ενός ηλεκτρικά θερμαινόμενου δαπέδου για να καλύψει τις θερμικές ανάγκες ενός σπιτιού [52].

Από την οπτική αυτής της εφαρμογής, αυτά τα πυκνά υλικά που επιλέχθηκαν μπορεί να προκαλέσουν έντονη διακύμανση στην εσωτερική θερμοκρασία σε σχέση με τα υλικά αλλαγής φάσης. Τα PCMs μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλα ποσά λανθάνουσας θερμότητας με σχετικά περιορισμένο θερμοκρασιακό εύρος σε κτίρια, ούτως ώστε να μπορούν να βελτιώσουν το βαθμό της θερμικής άνεσης.

Οι Farid και Kong εφάρμοσαν ένα είδος ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ενσωματωμένο $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, το οποίο τοποθετήθηκε στο σκυρόδεμα του δαπέδου κατά τη διάρκεια της κατασκευής, και έτσι κατόρθωσε πολύ καλή απόδοση [53]. Ωστόσο, το κοινό στερεό-υγρό PCM που χρησιμοποιείται σε τοίχους ή στο πάτωμα πρέπει κάπου να ενσωματωθεί, όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, συνεπώς οι διαρροές, η επιπρόσθετη θερμική αντίσταση και το επιπλέον κόστος αποτελούν συχνά μεγάλα προβλήματα στην εφαρμογή του PCM.

Ο Haws και οι συνεργάτες του εισήγαγαν την ιδέα της αυξανόμενης θερμικής μάζας του σκυροδέματος αναμιγνύοντάς το με PCM προκειμένου να αποφύγουν την ενσωμάτωση [54],[55]. Ο Athienitis και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν ένα τοίχο από γύψο με 25% κατά βάρος βουτυλικό στεατικό οξύ σε ένα ηλιακό παθητικό σύστημα ενός κτιρίου προκειμένου να μειώσουν τη μέγιστη θερμοκρασία δωματίου κατά τη διάρκεια της ημέρας και να μειώσουν το θερμικό φορτίο κατά τη διάρκεια της νύχτας [56]. Αλλά η θερμότητα της

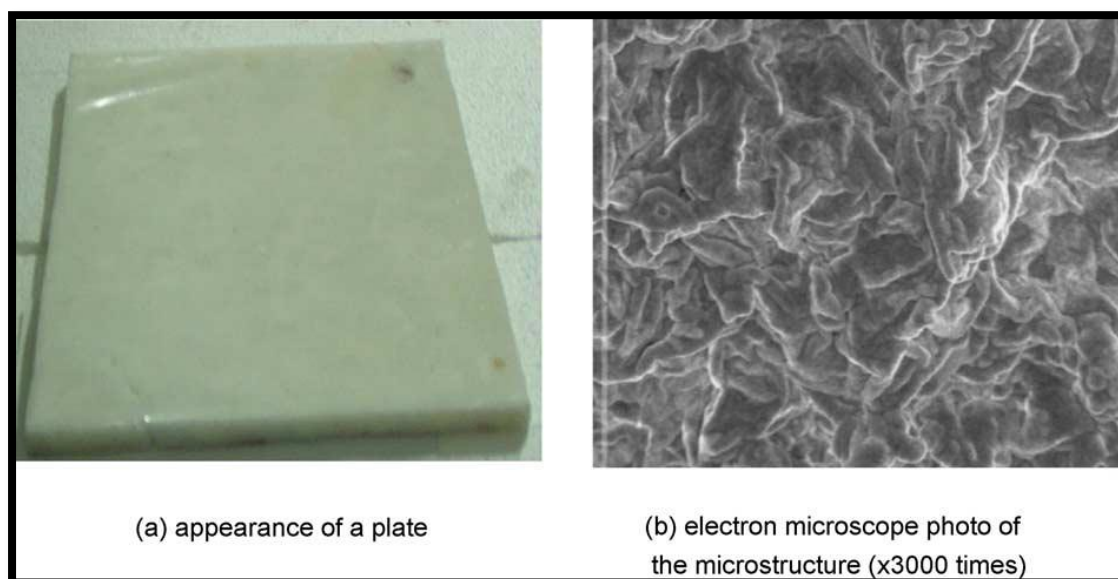
τήξης δεν ήταν τόσο υψηλή εξαιτίας της μικρής αναλογίας PCM που περιείχαν τα συστατικά υλικά.

Το PCM σταθερού σχήματος είναι ένα είδος συνθετικού υλικού PCM και κάποιου άλλου βοηθητικού υλικού με αναλογία του PCM 70-85% κατά βάρος. Όσο η θερμοκρασία λειτουργίας είναι κάτω από το σημείο τήξης του βοηθητικού υλικού, το συνθετικό υλικό μπορεί να κρατήσει το σχήμα του όποτε το PCM αλλάζει φάση και από στερεό γίνεται υγρό. Συνεπώς, ο τύπος του PCM είναι ένα κατάλληλο υλικό για θερμική αποθήκευση σε κτίρια χωρίς ενσωμάτωση. Κάποιοι ερευνητές μελέτησαν την προπαρασκευαστική διαδικασία αυτού του υλικού για το χαμηλό του κόστος και τις εντυπωσιακές θερμικές του ιδιότητες τα τελευταία χρόνια [57],[58].

Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι:

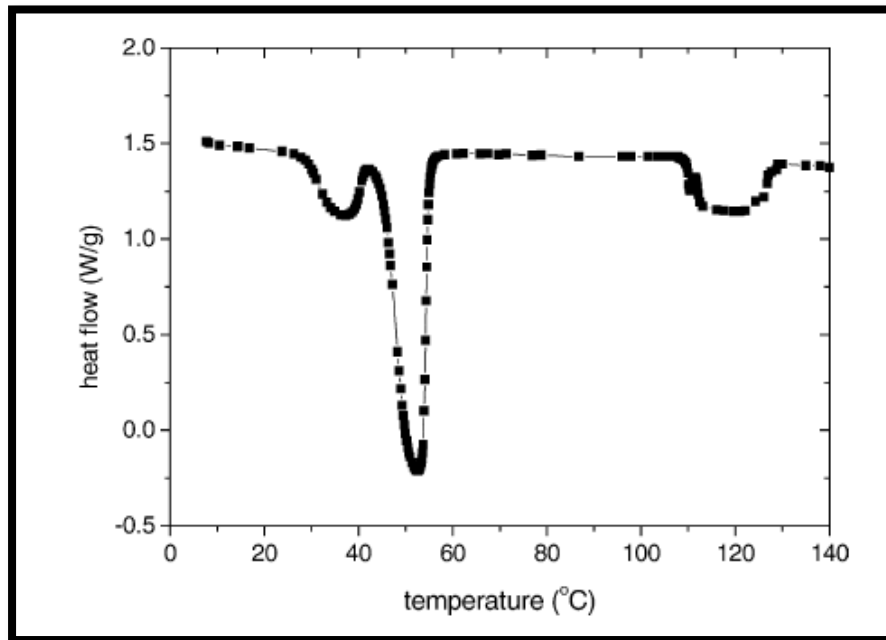
- να εισάγει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης με χρήση πλακών PCM σταθερού σχήματος
- να ερευνηθεί πειραματικά η θερμική του απόδοση και η δυνατότητα εφαρμογής
- να παρουσιαστούν τα πειραματικά δεδομένα για μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός τέτοιου συστήματος.

Επιπλέον, αναπτύχθηκε ένα είδος πλακών σταθερού σχήματος PCM, το οποίο αποτελείται από 25% κατά βάρος παραφίνη σαν ένα διασκορπισμένο PCM και από 25% κατά βάρος πολυαιθυλένιο σαν ένα βοηθητικό υλικό. Η θερμοκρασία που αλλάζει φάση η παραφίνη είναι 52 °C και η θερμότητα τήξης είναι 200 kJ/kg. Στην Εικόνα 7.1.1 φαίνεται η μορφή και η μικροδομή του στρώματος PCM.



Εικόνα 7.1.1 Φωτογραφίες πλακών PCM σταθερού σχήματος.

Για να μετρηθούν η θερμοκρασία αλλαγής φάσης t_m και η θερμότητα τήξης H_m χρησιμοποιήθηκαν ειδικά διαφορικά όργανα μέτρησης θερμότητας, γνωστά και ως θερμιδόμετρα (differential scanning calorimeter-DSC). Οι δύο κορυφές των DSC καμπύλων, Εικόνα 7.1.2, δείχνουν την θερμοκρασία αλλαγής φάσης της παραφίνης και του πολυαιθυλενίου αντίστοιχα. Οι θερμοφυσικές του ιδιότητες μετρήθηκαν και φαίνονται στον Πίνακα 7.1.2.



Εικόνα 7.1.2 Καμπύλες DSC για PCM σταθερού σχήματος.

Πίνακας 7.1.1 Μονάδες μέτρησης

Nomenclature	
ACH	air change per hour (h^{-1})
c_p	specific heat ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
H_m	heat of fusion (kJ kg^{-1})
k	thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
ρ	density (kg m^{-3})

Πίνακας 7.1.2 Θερμοφυσικές ιδιότητες PCM σταθερού σχήματος

ρ (kg m^{-3})	C_p ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	H_m (kJ kg^{-1})	k ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
850	2.0	150	0.15

7.2 Πειραματική έρευνα ενός πρότυπου συστήματος

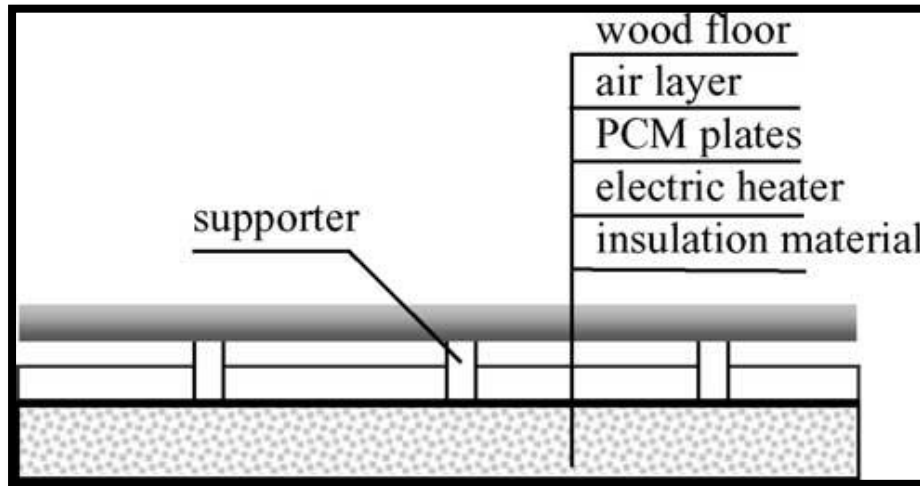
Το σπίτι στο οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα φαίνεται στο σχήμα 7.2.1 και εξοπλίσθηκε με ένα σύστημα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης συμπεριλαμβανομένου του στρώματος PCM. Οι διαστάσεις του πειραματικού σπιτιού ήταν: 3m (βάθος) \times 2m (πλάτος) \times 2m (ύψος).



Εικόνα 7.2.1 Φωτογραφία του πειραματικού σπιτιού.

Επίσης, έχει και έναν υαλοπίνακα με διπλό τζάμι και διαστάσεις 1.6m \times 1.5m με νότιο προσανατολισμό, το οποίο καλύπτεται από μία μαύρη κουρτίνα. Η οροφή και οι τοίχοι αποτελούνται από 100mm πολυστερίνη που είναι ενσωματωμένη σε ένα μεταλλικό περίβλημα. Το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης περιλαμβάνει 120mm πολυστερίνη, ηλεκτρικούς θερμαντές, 15mm PCM, μερικούς ξύλινους υποστηρικτές, 10mm στρώμα αέρα

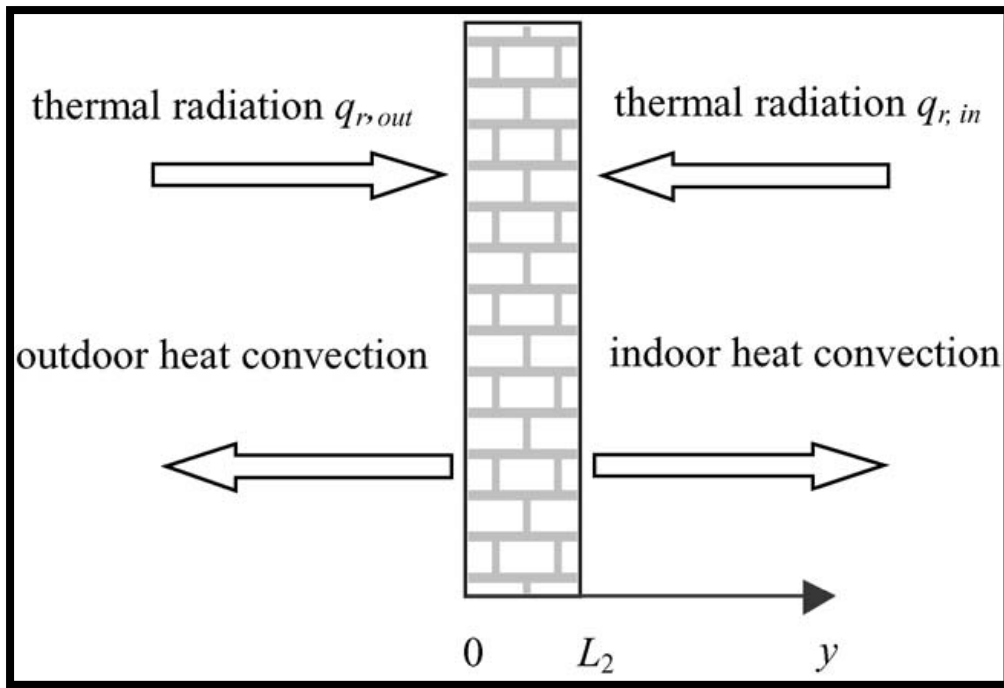
και 8mm ξύλινο πάτωμα. Στην Εικόνα 7.2.2 απεικονίζεται η δομή του συστήματος θέρμανσης. Ενώ στην Εικόνα 7.2.3 φαίνονται φωτογραφίες των θερμαντών, των πλακών του PCM και του ξύλινου πατώματος, τα οποία χρησιμοποιούνται στο ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης.



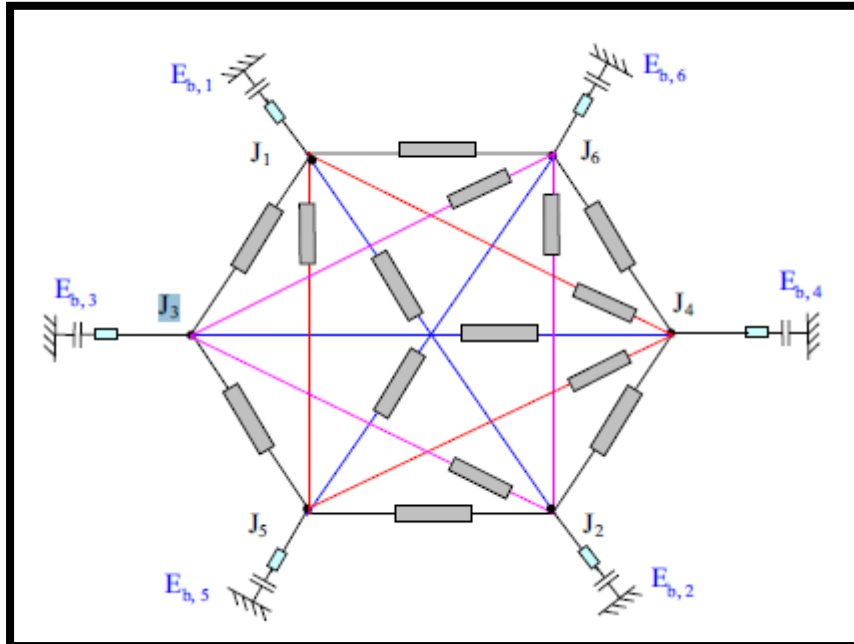
Εικόνα 7.2.2 Σχηματική απεικόνιση του ηλεκτρικού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος.



Εικόνα 7.2.3 Φωτογραφίες από τη δομή του συστήματος.



Εικόνα 7.2.4 Σχηματική απεικόνιση μεταφοράς θερμότητας στις επιφάνειες των εξωτερικών τοίχων [60].

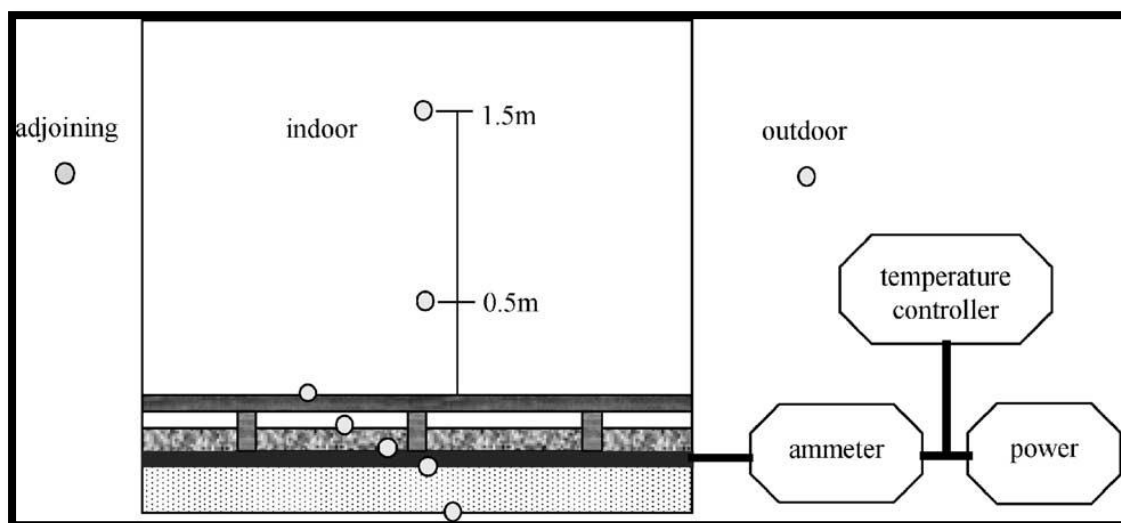


Εικόνα 7.2.5 Σχηματική απεικόνιση της ακτινοβολίας μεταξύ των τοίχων, του δαπέδου και της οροφής του δωματίου [60].

Τα πειράματα είχαν σκοπό τον καθορισμό της θερμικής συμπεριφοράς του θερμαντικού συστήματος και της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου. Η ακόλουθη διάταξη εφαρμόσθηκε για τις μετρήσεις.

- Dataloggers (για την καταγραφή των δεδομένων)
- Υπολογιστές (για την επεξεργασία των δεδομένων)
- Ελεγκτές θερμοκρασίας (για να ελέγχουν πότε είναι σε λειτουργία ο ηλεκτρικός θερμαντής και πότε όχι)
- Θερμικό ραδιόμετρο (για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας)
- Αμπερόμετρο (για την καταγραφή της ηλεκτρικής κατανάλωσης).

Η Εικόνα 7.2.6 παρουσιάζει την κατανομή της θερμοκρασίας και την πειραματική διάταξη. Δύο από τους μετρητές είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικά ύψη (0.5 και 1.5m) στο σπίτι. Οι εναλλαγές του αέρα (ACH) λαμβάνονται από την τεχνική του μεθανίου [59]. Η μετρούμενη ηλιακή ακτινοβολία καταγράφεται κάθε ώρα και προσεγγίζεται χρησιμοποιώντας ένα θερμικό ραδιόμετρο.



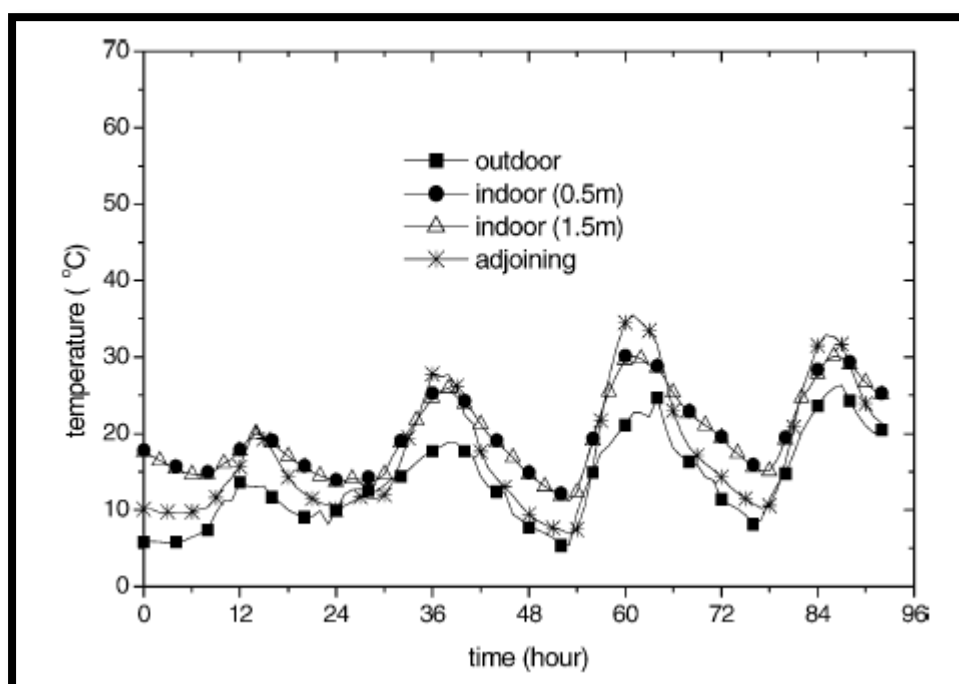
Εικόνα 7.2.6 Πειραματική διάταξη.

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Tsinghua Πανεπιστήμιο τον Απρίλιο του 2003. Η εσωτερική πηγή θερμότητας ήταν περίπου 150W όταν λειτουργούσε ολόκληρη η εγκατάσταση. Η διάταξη δούλεψε για 6 ημέρες με νυκτερινή ηλεκτρική θέρμανση και μετά για 4 ημέρες χωρίς ηλεκτρική θέρμανση. Κατά την διάρκεια των θερμών ημερών οι θερμαντές σταματούσαν να δουλεύουν όταν η θερμοκρασία τους ξεπερνούσε τους 70 °C και λειτουργούσαν εκ νέου όταν η θερμοκρασία τους έπεφτε κάτω από τους 55 °C στην περίοδο που χρειάζεται θέρμανση, η οποία διαρκούσε από τις 23:00 μέχρι τις 08:00.

7.3 Πειράματα και συζήτηση

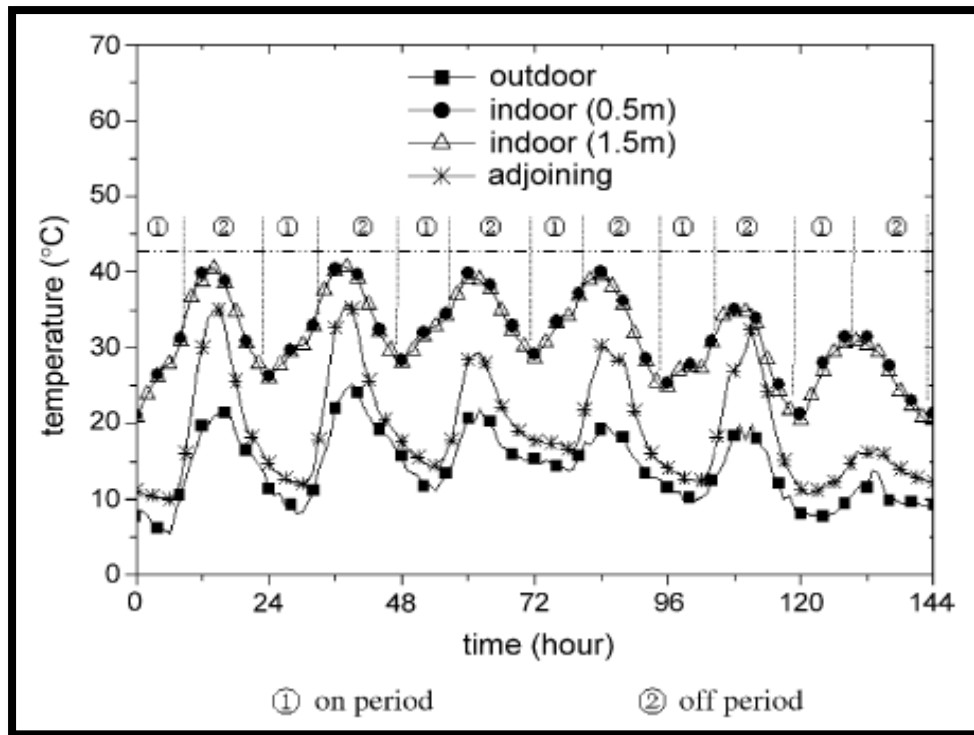
Η περίοδος που χρειάζεται θέρμανση στο Πεκίνο είναι από τις 15 Νοεμβρίου έως τις 15 Μαρτίου. Η μέση θερμοκρασία τις ημέρες αυτές είναι γύρω στους -1.3°C . Ωστόσο, τα πειράματα διεξήχθησαν τον Απρίλιο που η μέση θερμοκρασία είναι 13.6°C . Συνεπώς, η μετρούμενη εσωτερική θερμοκρασία ήταν υψηλή, επειδή και η εξωτερική θερμοκρασία τον Απρίλιο είναι υψηλή και η αλλαγή στις εσωτερικές θερμοκρασίες ήταν μεγάλη εξαιτίας της μικρής θερμικής χωρητικότητας του σπιτιού.

Η Εικόνα 7.3.1 δείχνει ότι η μέση εσωτερική θερμοκρασία ήταν 20°C και η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην ημέρα και στην νύχτα ήταν 12°C χωρίς ηλεκτρική θέρμανση. Από την άλλη, η Εικόνα 7.3.2 δείχνει ότι η μέση εσωτερική θερμοκρασία ήταν 31°C και η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην ημέρα και στην νύχτα παρέμεινε, όπως και πριν, 12°C με νυκτερινή ηλεκτρική θέρμανση. Συνεπώς, το σύστημα αυξάνει την εσωτερική θερμοκρασία χωρίς να μεταβάλλει την τιμή της θερμοκρασιακής διαφοράς.

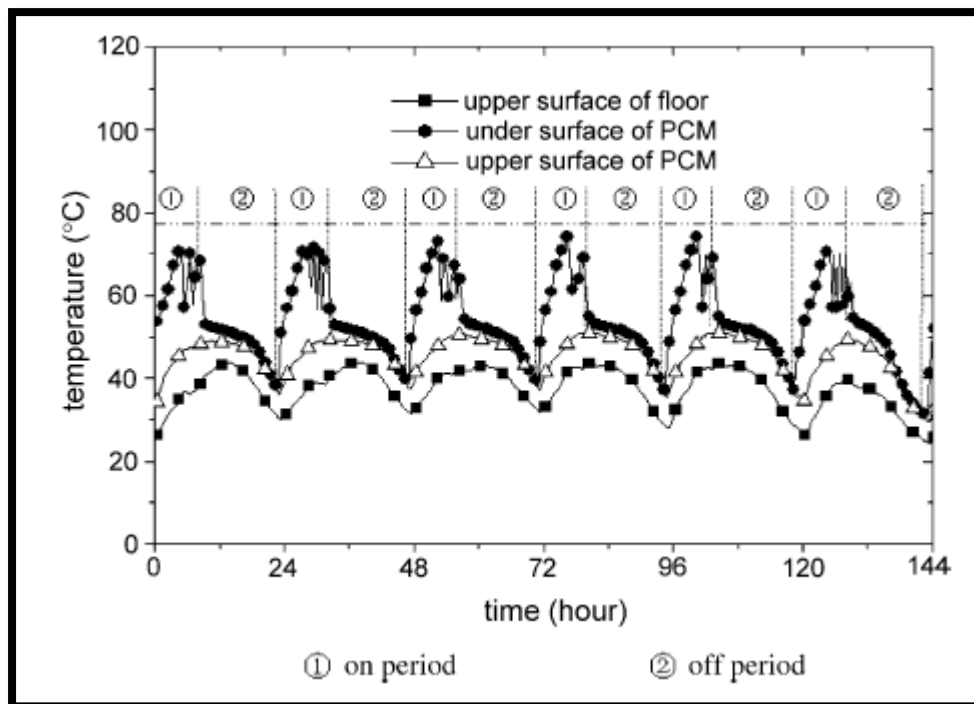


Εικόνα 7.3.1 Κατανομή θερμοκρασίας αέρα χωρίς ηλεκτρική θέρμανση.

Η θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος του PCM στην επιφάνεια κρατήθηκε σταθερή πάνω από τους 45°C για περισσότερο από 10h αφότου σταμάτησαν να δουλεύουν οι θερμαντές στις 08:00, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.3.3. Η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα δύο εσωτερικά σημεία μέτρησης (0.5 και 1.5m) ήταν λιγότερη από 0.5°C , γεγονός που μαρτυρά υψηλό βαθμό θερμικής άνεσης.

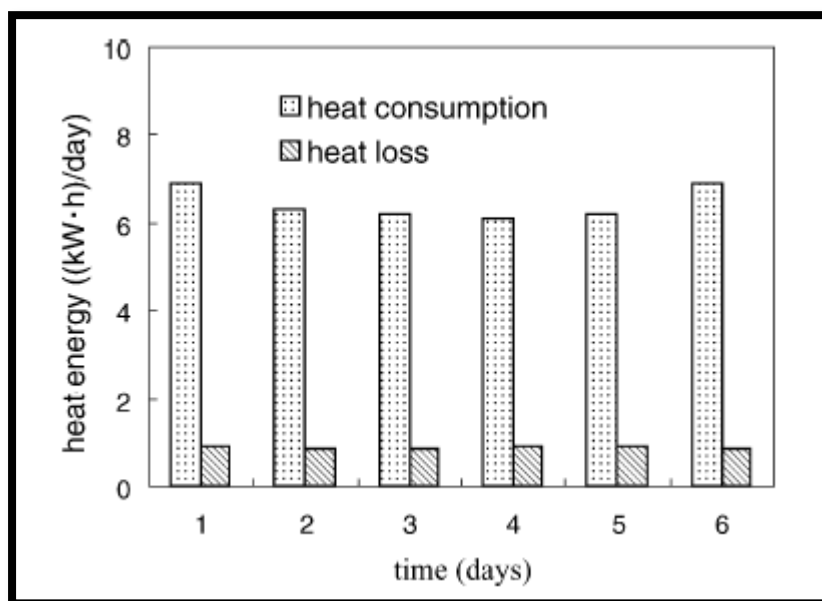


Εικόνα 7.3.2 Κατανομή θερμοκρασίας αέρα με νυκτερινή ηλεκτρική θέρμανση.



Εικόνα 7.3.3 Κατανομή θερμοκρασίας στο πάτωμα και στο PCM με νυκτερινή ηλεκτρική θέρμανση.

Η Εικόνα 7.3.4 δείχνει τη συνολική κατανάλωση θερμότητας του σπιτιού και την απώλεια της θερμότητας μέσω του στρώματος της μόνωσης κάτω από τους θερμαντές. Δεν χάθηκε περισσότερο από 15% της θερμικής ενέργειας μέσω της μόνωσης. Για το δωμάτιο δοκιμής, 3.3 kWh ηλεκτρικής θερμικής ενέργειας μεταφέρονταν από την περίοδο αυξημένης ζήτησης στην περίοδο περιορισμένης ζήτησης κάθε μέρα, που ήταν το 54% της συνολικής κατανάλωσης θερμότητας.



Εικόνα 7.3.4 Κατανάλωση και απώλεια θερμότητας στο πειραματικό σπίτι.

7.4 Συμπεράσματα

Μία νέα δομή ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος ερευνήθηκε σε αυτήν τη μελέτη. Το πειραματικό σπίτι όπου διεξήχθησαν οι δοκιμές τον Απρίλιο του 2003 βρισκόταν στο Πεκίνο. Τα πειραματικά αποτελέσματα έλεγξαν τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα αυτού του συστήματος θέρμανσης. Και παρείχαν δεδομένα για μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός τέτοιου συστήματος. Τα ακόλουθα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν:

- Το σύστημα κατάφερε να αυξήσει την εσωτερική θερμοκρασία χωρίς να μεταβληθεί η θερμοκρασιακή διαφορά.
- Η θερμοκρασία των πλακών του PCM διατηρήθηκε σταθερή στην αλλαγή φάσης για μία μεγάλη χρονική περίοδο αφότου οι θερμαντές σταμάτησαν τη λειτουργία τους. Περισσότερο από το μισό της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας θέρμανσης μεταφέρθηκε από την περίοδο αυξημένης ζήτησης στην περίοδο περιορισμένης

ζήτησης, γεγονός που μπορεί να επιφέρει μεγάλα οικονομικά οφέλη αν λάβει κανείς υπόψη του τη μειωμένη χρέωση κατά τη διάρκεια της νύχτας.

- Η μικρή εσωτερική θερμοκρασιακή διαφορά κατά την κατακόρυφη διεύθυνση εμφανίστηκε επειδή η ενδοδαπέδια θέρμανση μπορεί να θερμάνει τον εσωτερικό αέρα ομοιόμορφα.

Εν κατακλείδι, το σύστημα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης είναι ενεργειακά αποτελεσματικό, προσφέρει στον εσωτερικό χώρο θερμοκρασία άνεσης και κατά επέκταση στους ανθρώπους ένα ευχάριστο περιβάλλον για τη διαβίωσή τους.

Κεφάλαιο 8

Μελέτες για πάνελ τοποθετημένα σε τοίχους [61]

8.1 Μελέτη για το ιδανικό πάχος πάνελ με ενσωματωμένο PCM [62]

Η μελέτη που παρουσιάζεται παρακάτω έχει διεξαχθεί από τους Federick Kuznick, Joseph Virgone και Jean Noel του πανεπιστημίου της Lyon στη Γαλλία, και αντικειμενικός σκοπός αυτής της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας χρησιμοποιώντας τη μικρότερη δυνατή ποσότητα PCM. Υπάρχουν δύο αντικρουόμενες απόψεις σε ότι αφορά τη χρήση των πάνελ με PCM στα κτίρια. Όταν το πάχος γίνεται επαρκώς μικρό τότε το πάνελ με PCM λειτουργεί σχεδόν ισοθερμικά και η διαδικασία αποθήκευσης της ενέργειας ενεργοποιείται μόνο λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών. Έτσι, σε αυτήν την περίπτωση όσο μεγαλύτερο είναι το πάνελ τόσο πιο σημαντική είναι η αποθηκευτική ικανότητα, η οποία είναι ανάλογη του όγκου του υλικού αλλαγής φάσης. Λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι η μεταφορά θερμότητας στα κτίρια γίνεται προς όλες τις κατευθύνσεις, η ενέργεια που αποθηκεύεται στα PCM είναι ανάλογη του πάχους του τοίχου. Όταν το πάχος είναι μεγάλο, ο χρόνος που απαιτείται για να διαπεράσει η θερμότητα το PCM είναι περισσότερος από 12 ώρες και ως εκ τούτου η διαδικασία αποθήκευσης δεν μπορεί να ολοκληρωθεί σε μία μόνο ημέρα. Οι δύο παραπάνω αντικρουόμενες απόψεις καταδεικνύουν την ύπαρξη ενός βέλτιστου πάχους του πάνελ που περιέχει PCM.

Ύστερα από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι όταν το πάχος του πάνελ είναι μεγαλύτερο από το υπολογιζόμενο ως ιδανικό, δεν επηρεάζεται ολόκληρος ο τοίχος από τη ροή της θερμότητας, και αφού μειώνεται η τελευταία μειώνεται και η αποθηκευτική του ικανότητα. Όταν το πάχος του πάνελ είναι αρκετά μεγάλο τότε η ροή θερμότητας δεν μπορεί να διαπεράσει τον τοίχο και τότε το PCM λειτουργεί σαν ημι-άπειρο υλικό.

Σε ότι αφορά το πάχος της μόνωσης, αυτό δεν φαίνεται να επηρεάζει τη βέλτιστη τιμή του πάχους του πάνελ με PCM. Το παραπάνω γίνεται λόγω της περιορισμένης εισροής θερμότητας που μπορεί να περάσει από το εξωτερικό περιβάλλον στο μονωτικό υλικό. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο το πάχος του τοίχου του PCM δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της εξωτερικής θερμοκρασίας.

Από την επίδραση που έχει η αλλαγή φάσης στο πάχος του πάνελ με PCM προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή του κυμαίνεται από 9 mm έως 11.5 mm, ενώ από την

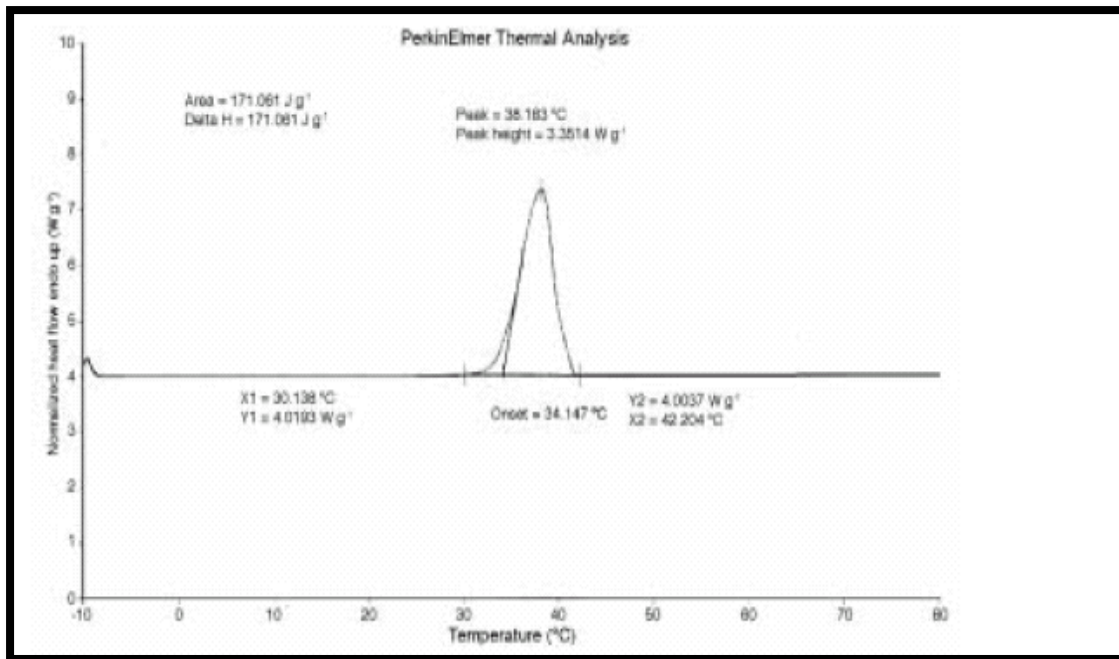
επίδραση των μεταβολών της εσωτερικής θερμοκρασίας προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή του κυμαίνεται από 9 mm έως 15 mm.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που αφορούν στην ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα πάνελ με PCM κατά τη διάρκεια μιας ημέρας πλήρους λειτουργίας του, καταλήγουμε στο ότι το βέλτιστο πάχος είναι 1 cm. Αυτό το 1 cm επιτρέπει το διπλασιασμό της θερμικής αδράνειας του κτιρίου, εμποδίζοντας την υπερθέρμανσή του τις ζεστές ημέρες και αυξάνοντας την ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Εν ολίγοις, περιορίζει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο εσωτερικό των δωματίων.

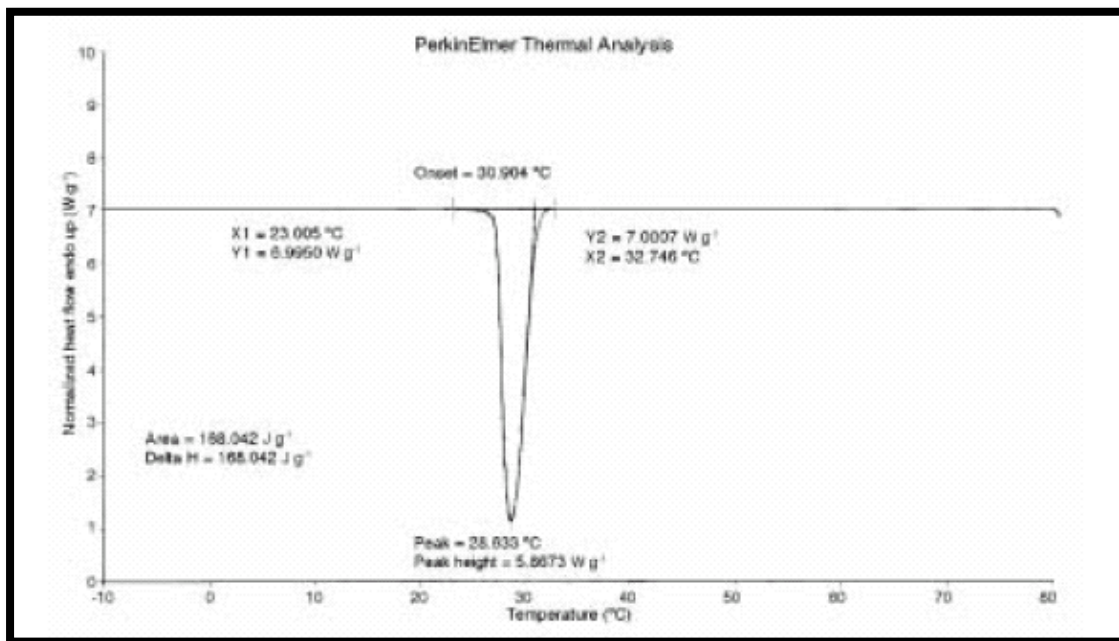
8.2 Μια μελέτη των θερμικών χαρακτηριστικών των PCM σε γύψινα πάνελ για εφαρμογή στα κτίρια [63]

Στην παρούσα μελέτη, γίνεται απλά εμβαπτισμός γύψινων πάνελ σε ευτηκτικό μίγμα από lauric-stearic acids, το οποίο έχει τον ρόλο του PCM για περίπου μία ώρα στους 60° C. Οι θερμικές ιδιότητες του ευτηκτικού μίγματος, όπως το σημείο τήξης, το σημείο στερεοποίησης και η λανθάνουσα θερμότητα, έχουν ήδη καθορισθεί ενώ μετά την εμβάπτιση τα δείγματα απομακρύνονται και αφού στεγνώσουν αναλύονται τα θερμικά τους χαρακτηριστικά.

Η ανάλυση DSC του ευτηκτικού μίγματος του “lauric stearic acids” έδειχνε μια αιχμηρή ακμή, χωρίς την ύπαρξη δεύτερης ή την ύπαρξη κοίλης από τους -10 έως τους +80 °C. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 8.2.1 που παρουσιάζεται παρακάτω η θερμοκρασία τήξης, η λανθάνουσα θερμότητα και το θερμοκρασιακό εύρος τήξης του ευτηκτικού μίγματος είναι 34.1° C, 171.1 J g⁻¹, 30.1 ° C -42.2 ° C αντίστοιχα. Το σημείο τήξης του ευτηκτικού μίγματος ήταν χαμηλότερο συγκριτικά με αυτό των απλών. Παρόλα αυτά η λανθάνουσα θερμότητα ήταν αρκετά υψηλή ώστε να είναι συγκρίσιμη με αυτή των λυτών PCMs, όπως είναι τα ένυδρα άλατα, και οι πολύ-αλκοόλες στα οποία είναι 100-250 J g⁻¹. Τα θερμικά χαρακτηριστικά της στερεοποίησης, όπως καθορίστηκαν από την ανάλυση DSC παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.2.2. Το σημείο στερεοποίησης εντοπίζεται στους 30.9 ° C, λανθάνουσα θερμότητα 168 J g⁻¹ και θερμοκρασιακό εύρος στερεοποίησης 32,7 -23 ° C. Οι θερμοκρασιακές μεταβάσεις ανάμεσα στην τήξη και στη στερεοποίηση ήταν 34.1 ° C και 30.9 ° C, που θεωρούνται πολύ κοντά η μία στην άλλη. Τέλος, η μετάβαση από τη στερεή στην υγρή φάση είναι αναστρέψιμη καθώς η θερμότητα που απορροφάται ως λανθάνουσα θερμότητα τήξης μπορεί να αποδοθεί ως θερμότητα στερεοποίησης, με μικρό θερμικό κόστος.



Εικόνα 8.2.1 Χαρακτηριστικά ευθηκτικού μίγματος κατά τη διάρκεια της τήξης.



Εικόνα 8.2.2 Χαρακτηριστικά ευθηκτικού μίγματος κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης.

Τελειώνοντας, αναφέρεται ότι όταν στο “Iargic steatric acids”, εμβαπτίζεται σε γύψινο πάνελ, τα θερμικά χαρακτηριστικά του μίγματος παρέμειναν πρακτικά αναλλοίωτα, με μία αιχμηρή κορυφή και όχι άλλες διακυμάνσεις, ενώ στην πραγματικότητα, η εμβάπτιση αυτή δεν επηρέασε ούτε τα φυσικά χαρακτηριστικά των γύψινων πάνελ.

8.3 Αριθμητική και πειραματική ανάλυση πάνελ για προκατασκευασμένους τοίχους, που περιέχουν ανάμεσά τους PCM

8.3.1 Τα είδη πάνελ που χρησιμοποιούνται

Σε αυτό το πείραμα εξετάζονται τέσσερα είδη πάνελ, όλα παραλλαγές της ίδιας βασικής τεχνολογίας, με βασικό στόχο τη δημιουργία ενός πάνελ με PCM για προκατασκευασμένους τοίχους. Επιδιώκεται να έχει κατασκευαστική τεχνολογία και διαδικασία εγκατάστασης όμοια με αυτήν των παραδοσιακών πάνελ, και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως σε μεγάλες επιφάνειες ενώ παράλληλα να διατηρεί τα προτερήματα της εύκολης μεταφοράς και της εύκολης συναρμολόγησης. Οι στρώσεις από τις οποίες αποτελείται το πάνελ συνήθως είναι οι εξής: ένα φύλλο μετάλλου ως εσωτερική στρώση, μία στρώση μονωτικού υλικού, και συγκεκριμένα πολυουρεθάνης, μία στρώση PCM με θερμοκρασία τήξης 32° C και ένα εξωτερικό φύλλο μετάλλου ως εξωτερική στρώση, όμοια με την αρχική. Σε δύο από τα τέσσερα πάνελ που εξετάστηκαν, εισήχθηκε ένα στρώμα αέρα. Τα ακριβή χαρακτηριστικά του κάθε πάνελ παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.3.1:

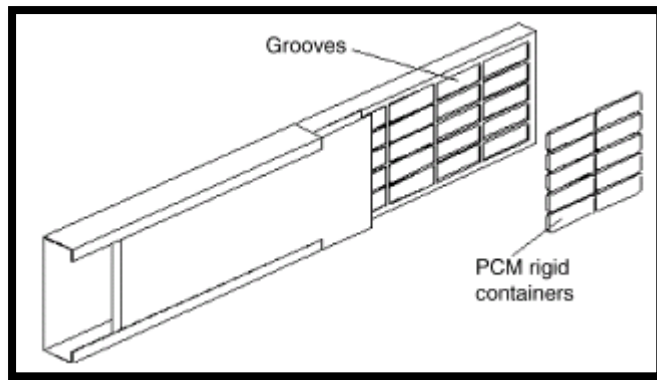
Πίνακας 8.3.1 Χαρακτηριστικά του εκάστοτε πάνελ που μελετάται

Stratifications of the panels				
No.	Insulation thickness (m)	PCM thickness (m)	Air layer thickness (m)	Total thickness (m)
1	0.06	0.03	–	0.09
2	0.06	0.01	0.04	0.11
3	0.12	0.01	0.04	0.17
4	0.06	0.01	–	0.07

Η διαδικασία ενσωμάτωσης του PCM ανάμεσα στα πάνελ ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Δημιουργούνται τρύπες στο στρώμα της μόνωσης
- Εισαγωγή του PCM σε πλαστικά και σταθερά καλύμματα στο εσωτερικό των τρυπών που αναφέρονται παραπάνω
- Εισαγωγή όλου του παραπάνω συστήματος σε μεταλλικό σκελετό

Μια εικόνα της κατασκευής αυτής παρουσιάζεται παρακάτω, ενώ αναφέρεται ότι κάθε πάνελ έχει διαστάσεις 0.5 m x 1.0 m:



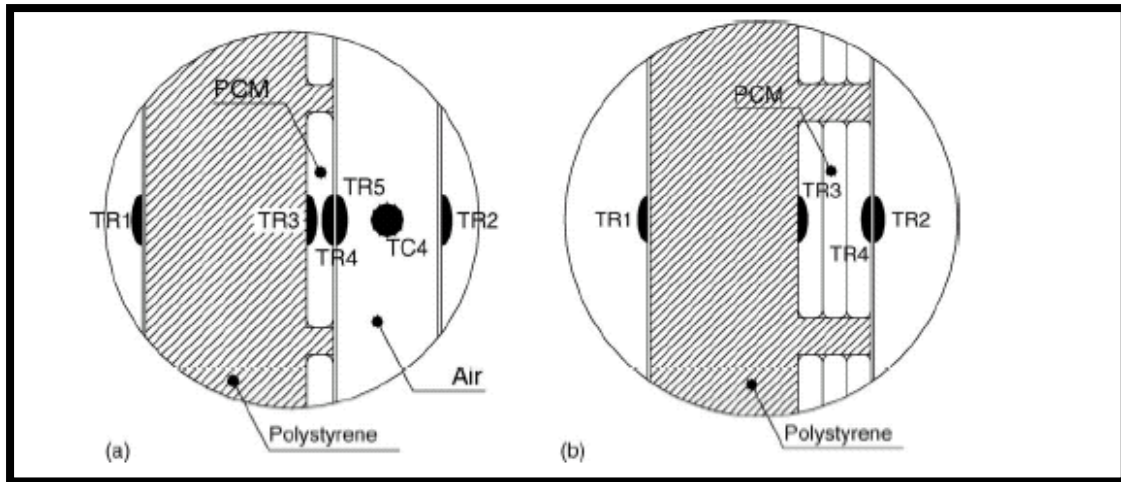
Εικόνα 8.3.2 Ενσωμάτωση του PCM στο πάνελ, για την περίπτωση που αφήνεται ένα στρώμα αέρα.

8.3.2 Πειραματικές δοκιμές

Χρησιμοποιώντας πειραματικό εξοπλισμό τα τέσσερα δοκιμαστικά πάνελ υπόκεινται σε σταθερές οριακές συνθήκες. Καθώς το δωμάτιο δοκιμών είναι εξοπλισμένο με σύστημα κλιματισμού ώστε να μπορεί να ελέγχει τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα, οι δοκιμές έγιναν με την ακόλουθη διαδικασία:

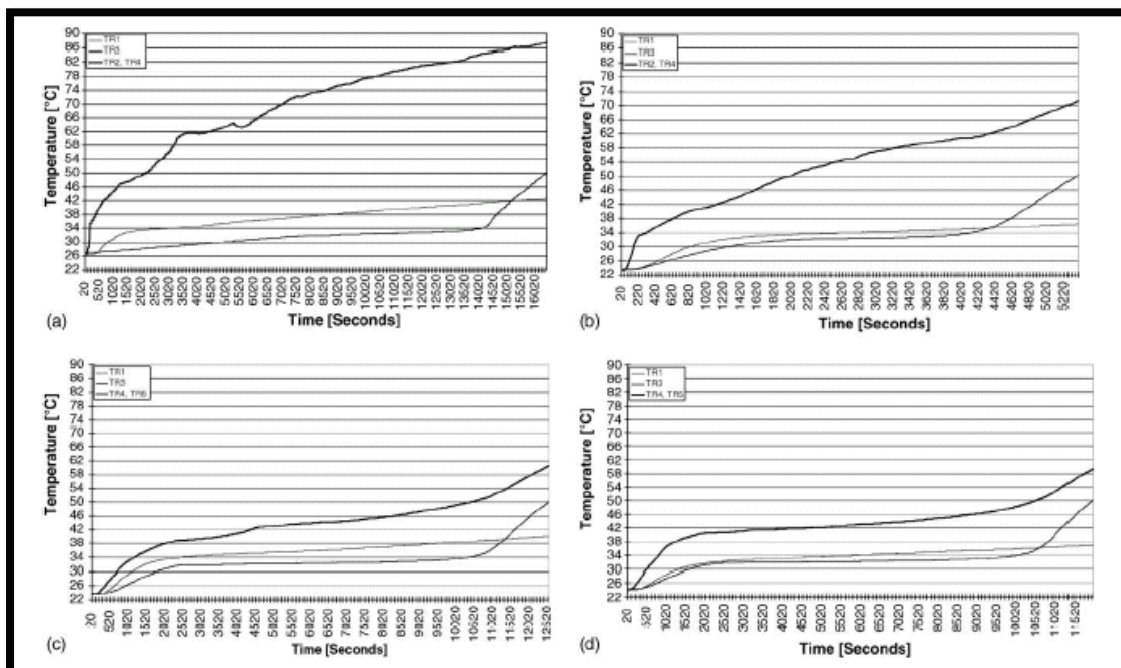
- Ένα δείγμα τοποθετείται στο διαχωριστικό του δωματίου δοκιμών.
- Ένας προσομοιωτής της ηλιακής ακτινοβολίας τοποθετήθηκε σε απόσταση τέτοια ώστε να ακτινοβολείται η μία επιφάνεια του πάνελ με ομογενή και σταθερή ροή θερμότητας $1000\text{W}/\text{m}^2$.
- Συνθήκες του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος αναπαράχθηκαν παράγοντας μία ρεαλιστική ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας που γίνεται μέσω της οροφής ενός κτιρίου.
- Οι πειραματικές δοκιμές έληξαν όταν η εσωτερική θερμοκρασία των πάνελ έφτασε τους 50°C .

Η τιμή της θερμοκρασίας επιλέχθηκε προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή μία παράμετρος σε όλα τα πάνελ υπό δοκιμή και επομένως να γίνει η σύγκριση ανάμεσά τους με βάση το χρόνο που απαιτείται για να φτάσουν σε αυτό το θερμοκρασιακό όριο. Αυτός ο χρόνος, αντικατοπτρίζει και την ικανότητα του πάνελ να αντιμετωπίζει ισχυρή ηλιακή ακτινοβολία, που είναι υπεύθυνη για την υπερθέρμανση των στοιχείων ελαφριών κατασκευών, όπως είναι τα πάνελ.



Εικόνα 8.3.3 (α) Η θέση των RTDs σε πάνελ με στρώμα αέρα, (β) Η θέση των RTDs σε πάνελ χωρίς στρώμα αέρα.

Τα διαγράμματα της επόμενης εικόνας παρουσιάζουν τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις των τεσσάρων πάνελ, όταν τα RTDs (Resistance Thermal Detectors) βρίσκονταν τοποθετημένα στην εσωτερική, στην εξωτερική και στο μέσο της επιφάνειας ανάμεσα στη στρώση PCM και στη στρώση από πολυστερίνη, όπως φαίνονται από την Εικόνα 8.3.4.



Εικόνα 8.3.4 Θερμοκρασιακά διαγράμματα για (α) το πάνελ n.1 ,(β) το πάνελ n.4, (c) το πάνελ n.2, (d) το πάνελ n.3.

Το πρώτο πάνελ (Εικόνα 8.3.4-a) φαίνεται να απορροφά τη ροή θερμότητας που έρχεται από το εξωτερικό, καθώς η θερμοκρασία του PCM διατηρείται σταθερή στους 32 °C, για χρονικό διάστημα περίπου 2 ωρών από τις 4.5 που διήρκησαν συνολικά όλες οι δοκιμές. Για το τέταρτο πάνελ (Εικόνα 8.3.4-b), αυτά τα χρονικά διαστήματα είναι τελείως διαφορετικά, μιας και η θερμοκρασία του PCM διατηρείται σταθερή για διάστημα 0.5 της ώρας από την 1.5 ώρα που διήρκησε συνολικά το πείραμα. Επομένως, είναι εμφανής η επίδραση του πάχους του PCM στην αντιμετώπιση της εξωτερικής ακτινοβολίας και στη μείωση της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι μία στρώση PCM πάχους 3 cm είναι ικανή να αντιμετωπίσει την ηλιακή ακτινοβολία για αρκετό χρόνο.

Το PCM έχει την δυνατότητα να κρατάει τη θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας ενός τοίχου σε χαμηλές τιμές, ακόμα και αν το πάνελ έχει σκούρο εξωτερικό χρώμα και μέτρια μόνωση.

Μία μέθοδος που μπορεί να διασφαλίσει τη χαμηλή θερμοκρασία λόγω ακτινοβολίας είναι η προσθήκη μίας στρώσης αέρα, όπως άλλωστε φαίνεται και από τα σχετικά αποτελέσματα των πάνελ n.2 και n.3, όπου το πρώτο διατηρεί την εσωτερική του θερμοκρασία σε τιμές ακόμα και 3 °C χαμηλότερες από το δεύτερο, προφανώς χάρη στην αύξηση του πάχους του στρώματος πολυστερίνης. Παρ όλα αυτά, και τα δύο είναι ικανά να μπλοκάρουν την ενδιάμεση θερμοκρασία στους 32 °C, πράγμα που συμβαίνει και με το πάνελ n.1.

Προφανώς, η τεχνολογική λύση που εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από το κλίμα στο οποίο αυτή θα λειτουργήσει και από την ανάγκη πλήρους αποφόρτισης της θερμότητας του PCM για να στερεοποιηθεί, η οποία γενικά προκύπτει κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Το πάχος του PCM που θα χρησιμοποιηθεί είναι συνάρτηση και της έντασης και της διάρκειας της ηλιακής ακτινοβολίας, ανάλογα και με το αν λειτουργεί σε οροφή ή σε κατακόρυφα πάνελ.

Συνδυάζοντας τις ικανότητες απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από το PCM με τις μονωτικές ιδιότητες του στρώματος του αέρα, είναι δυνατή η διασφάλιση της καλής θερμικής απόδοσης σε πολλές περιπτώσεις που παρουσιάζουν ειδικά χαρακτηριστικά.

Γενικότερα, η παρουσία ενός στρώματος αέρα, μπορεί να αναβάλλει την έναρξη της διαδικασίας τήξης όσο η ακτινοβολία που προσπίπτει στην εξωτερική επιφάνεια των πάνελ δεν είναι πολύ δυνατή. Αργά το απόγευμα, όταν η θερμοκρασία του PCM είναι τουλάχιστον 32 °C, μία παχιά μονωτική στρώση είναι απαραίτητη για την αποφυγή των υψηλών

θερμοκρασιών στην εσωτερική επιφάνεια των πάνελ. Επιπλέον, βοηθά στην αποβολή της λανθάνουσας μορφής θερμότητας από το PCM προς το περιβάλλον, αποφεύγοντας έτσι και την αύξηση των θερμικών κερδών.

8.3.3 Αριθμητική ανάλυση

Η αριθμητική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη δημιουργία ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων και αντιστοιχεί στη διαμόρφωση του πάνελ κατά μήκος του κάθετου άξονα συμμετρίας, δηλαδή στη θέση στην οποία η ροή θερμότητας κατά την τρίτη κατεύθυνση δε λαμβάνεται υπόψη.

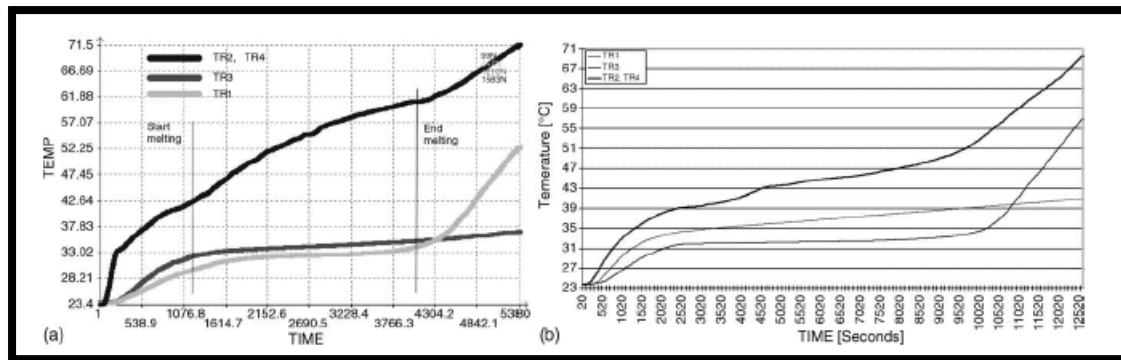
Η μελέτη, σαν συνάρτηση του εσωτερικού και εξωτερικού θερμοκρασιακού χρόνου λήφθηκε από την πειραματική ανάλυση, ενώ η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας στην εξωτερική επιφάνεια των πάνελ, επιβλήθηκε ομοιόμορφα και έλαβε την τιμή των 1000 W/m^2 .

Οι ζώνες που απαρτίζουν τα πάνελ που μελετήθηκαν με τη μέθοδο της αριθμητικής ανάλυσης είναι:

1. Το πάνελ n.4, με 0.0015 m παχύ μεταλλικό φύλλο, 0.06 m παχιά στρώση μόνωσης, 0.01 m παχιά στρώση PCM, 0.015 m παχύ μεταλλικό φύλλο.
2. Το πάνελ n. 2, με 0.0015 m παχύ μεταλλικό φύλλο, 0.06 m παχιά στρώση μόνωσης, 0.01 m παχιά στρώση PCM, 0.04 m παχιά στρώση αέρα, 0.015 m παχύ μεταλλικό φύλλο.

Η πρώτη προσομοίωση διήρκησε για μία ώρα και είκοσι λεπτά και η δεύτερη τρείς ώρες και 29 λεπτά.

Στο διάγραμμα που δίδεται, ως αποτέλεσμα της αριθμητικής αυτής ανάλυσης, παρουσιάζονται οι μετρήσεις των RTDs, όταν αυτά είναι τοποθετημένα στην εξωτερική, στην εσωτερική και στην ενδιάμεση επιφάνεια του PCM και της πολυστερίνης. Όπως παρατηρείται, σε δύο θέσεις, κατά την διάρκεια της τήξης του PCM η θερμοκρασία στο εσωτερικό του όριο (TR3) παραμένει σταθερή, γιατί η ροή θερμότητας που εισέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον, απορροφάται πλήρως όσο το PCM τήκεται.



Εικόνα 8.3.5 Κατανομή της θερμοκρασίας για τα πάνελ (α) n. 4 και (β) n. 2.

Με αυτό τον τρόπο επιβεβαιώνεται και με την αριθμητική μέθοδο η χρησιμότητα του PCM, το οποίο αποδεικνύει ότι μπορεί να διατηρήσει την εσωτερική θερμοκρασία του τοίχου σε μία σταθερή τιμή, όταν η εξωτερική αυξάνεται με ταχύ ρυθμό.

8.3.4 Σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα της πειραματικής και της αριθμητικής μεθόδου

Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν με την αριθμητική μέθοδο. Για το πάνελ n.4, το ποσοστό του λάθους που υπήρχε στην αριθμητική μέθοδο, υπολογιζόταν σε κάθε βήμα της μεθόδου αυτής συγκρίνοντάς το με την πειραματική μέθοδο, όταν τα RTDs ήταν τοποθετημένα στις θέσεις TR1, δηλαδή στην εσωτερική επιφάνεια, και στην TR3, δηλαδή στη διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο PCM και στην πολυστερίνη. Στην πρώτη περίπτωση, η μέση τιμή της μετατόπισης είναι περίπου 0.37%, με τυπική απόκλιση 0.24% και μέγιστο λάθος 1.07%, ενώ στη δεύτερη, η μέση τιμή της μετατόπισης είναι 0.70%, με τυπική απόκλιση 0.98% και μέγιστο σφάλμα ίσο προς 3.61%.

Λαμβάνοντας υπόψη τις χαμηλές τιμές των τυπικών αποκλίσεων από το μέσο σφάλμα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αριθμητική μέθοδος είναι αξιόπιστη για την προσομοίωση του PCM με ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων, εάν υποθέσουμε ότι η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται σε εύρος 1° C.

Για το πάνελ n.2, η μετατόπιση υπολογίστηκε σε τρεις επιφάνειες για κάθε χρονικό βήμα της αριθμητικής ανάλυσης, στην εσωτερική επιφάνεια TR1, στην επιφάνεια διαχωρισμού του PCM από την πολυστερίνη TR3 και ανάμεσα στο PCM και τη στρώση του αέρα TR4. Τα λάθη που σχετίζονται με το μέγιστο ποσοστό λαμβάνουν τις τιμές 3.03%, 15.00% και 14.67 % αντίστοιχα. Παρατηρώντας την ακολουθία των πειραμάτων, τονίζεται ότι το μέγιστο ποσοστό εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της τελευταίας φάσης του πειράματος, δηλαδή όταν οι θερμοκρασίες των πάνελ αυξάνονται ραγδαία και ξεπερνούν

το θερμοκρασιακό πεδίο που είναι κατάλληλο για ένα κατασκευαστικό στοιχείο. Η μέση τιμή των λαθών είναι 1.88%, 2.71% και 4.04% αντίστοιχα και η τυπική απόκλιση 0.95%, 4.67% και 4.72%. Είναι εμφανές, λοιπόν, ότι και οι μέσες τιμές των λαθών και οι τυπικές αποκλίσεις είναι σχετικά σταθερές. Μόνο όταν η διαφορά ανάμεσα στις πειραματικές και στις αριθμητικές πληροφορίες ξεπερνάει το 10%, που συμβαίνει για την περίπτωση που το πάνελ έχει στρώση αέρα και στις μεγάλες θερμοκρασίες, το σφάλμα μπορεί να αποδοθεί κυρίως στον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του φαινομένου.

Τέλος, εξάγεται το συμπέρασμα ότι και οι δύο περιπτώσεις δίνουν τις ζητούμενες πληροφορίες για τις θερμοκρασίες, και μάλιστα τα αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία μεταξύ τους.

8.4 Πειραματική μελέτη και αξιολόγηση της αποθήκευσης της λανθάνουσας μορφής θερμότητας σε πάνελ με υλικά αλλαγής φάσης [64]

Όπως είναι γνωστό, με την αποθήκευση θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη πυκνότητα ενεργειακής αποθήκευσης συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Μια σχετικά μικρή ποσότητα υλικών που αποθηκεύουν θερμότητα υπό λανθάνουσα μορφή (LHS-latent heat storage) μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη θερμική ενέργεια. Σε σχέση με άλλες μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας τα πλεονεκτήματα των LHS υλικών είναι ότι τόσο η αποθήκευση της θερμότητας όσο και η διανομή της, προκύπτουν μέσα σε ένα στενό θερμοκρασιακό εύρος, το οποίο αντιστοιχεί στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και σε σημαντικά μικρότερη μεταβολή του όγκου πριν και μετά τη διαδικασία αλλαγής φάσης. Έτσι, τα PCMs, που αποτελούν ένα είδος LHS υλικού, λιώνουν και στερεοποιούνται σε ένα στενό θερμοκρασιακό εύρος, απορροφώντας και αποδίδοντας υψηλές τιμές θερμότητας, ιδιότητες πολύ σημαντικές για τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στα κτίρια.

Εξαιτίας των παραπάνω πραγματοποιήθηκε μελέτη που αφορά στη λανθάνουσα μορφή θερμότητας που αποθηκεύεται σε πάνελ με ενσωματωμένο PCM, στα Tianjin University, Shenyang Jianzhu University και Nankai University στην Κίνα [65],[66],[67].

8.4.1 Λεπτομέρειες της πειραματικής διαδικασίας

Η μέτρηση της λανθάνουσας μορφής θερμότητας των πάνελ με PCM πραγματοποιήθηκε σε ένα δωμάτιο δοκιμών διαστάσεων 5 m x 3.3 m x 2.8 m με ένα παράθυρο στον νότιο τοίχο διαστάσεων 1.5 m x 1.5 m και μία ξύλινη πόρτα στον βόρειο τοίχο διαστάσεων 1 m x 2 m. Τα πάνελ που απάρτιζαν το παραδοσιακό δωμάτιο ήταν

συνηθισμένα πάνελ από γύψο, ενώ τα πάνελ του δωματίου με PCM αποτελούνταν από γύψο εμποτισμένο με 82%CA (capric acid-18% LA lauric acid), υλικά κατασκευασμένα από την εταιρία Shanghai Chemical Reagent Corporation, China Medicine Group. Τα δωμάτια θερμαίνονταν από μία ηλεκτρική μεμβράνη 2040 W, που ήταν τοποθετημένη στο ταβάνι και πάνω από την οποία υπήρχε θερμομόνωση πάχους 40 mm. Ολόκληρο το δωμάτιο ήταν καλυμμένο με μόνωση πάχους 150 mm και ήταν εξοπλισμένο με έναν ανεμιστήρα για να αναμιγνύει τον αέρα του δωματίου και να σταθεροποιεί τη διανομή της θερμοκρασίας.

8.4.2 Αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας

8.4.2.1 Ανάλυση DSC

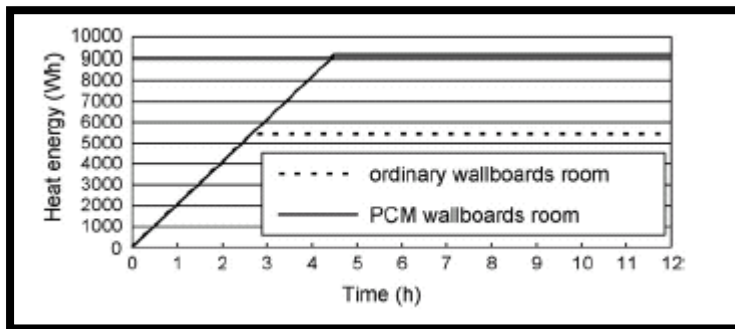
Αφού πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο DSC, τα θερμικά χαρακτηριστικά τόσο του μίγματος CA-LA όσο και των πάνελ με PCM είναι τα ακόλουθα:

- Θερμοκρασία τήξης –στερεοποίησης του μίγματος CA-LA 20.394° C και 10.138° C αντίστοιχα.
- Λανθάνουσα θερμότητα τήξης και στερεοποίησης του μίγματος CA-LA 150.305 J/g και 144.183 J/g αντίστοιχα.
- Θερμοκρασία τήξης –στερεοποίησης του πάνελ με PCM 18.491° C και 18.587° C αντίστοιχα.
- Λανθάνουσα θερμότητα τήξης και στερεοποίησης του πάνελ με PCM 39.126 J/g και 36.965 J/g αντίστοιχα.

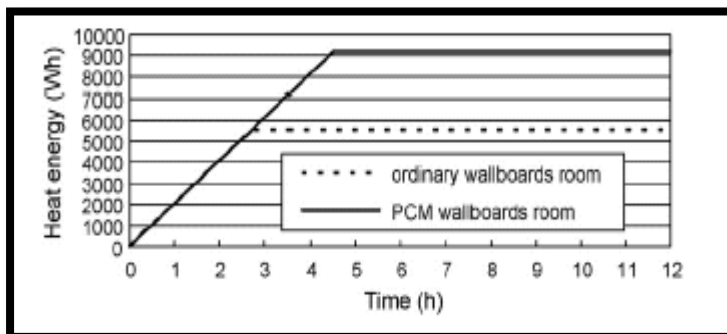
8.4.2.2 Ικανότητα θερμικής αποθήκευσης των πάνελ με PCM

Προκειμένου να υπολογίσουμε τη λανθάνουσα θερμότητα που αποθηκεύεται στα πάνελ με PCM, θεωρείται ίσο το ποσό της ενέργειας που καταναλώθηκε προκειμένου να διατηρηθεί η εσωτερική θερμοκρασία σταθερή, με το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύτηκε στα πάνελ με PCM. Επιπλέον, για λόγους ακρίβειας, η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και οι γενικότερες κλιματολογικές συνθήκες έχουν θεωρηθεί ακριβώς οι ίδιες για όλες τις δοκιμές. Όταν και οι αρχικές εσωτερικές θερμοκρασίες και των δύο δωματίων (το ένα έχει τοίχους κατασκευασμένους από απλό πάνελ και το άλλο από πάνελ με PCM), η ηλεκτρική μεμβράνη που θερμαίνει αρχίζει να λειτουργεί στο πλήρες φορτίο της προκειμένου να αυξήσει τη θερμοκρασία του δωματίου στους 24 °C. Οι διαφορές στη θερμότητα που ουσιαστικά παρέχονται από τις ηλεκτρικές μεμβράνες αποτελούν τις τιμές της λανθάνουσας θερμότητας των πάνελ με PCM. Η θερμότητα που καταναλώθηκε στο εκάστοτε δωμάτιο κάθε ώρα παρουσιάζεται στα

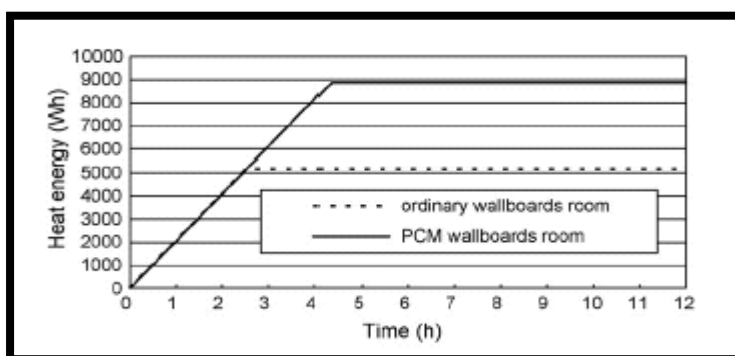
παρακάτω σχήματα. Στα πρώτα δύο η θερμοκρασία δωματίου αυξήθηκε από τους 11 ° C στους 24 ° C, ενώ στο τρίτο από τους 12 ° C στους 24 ° C.



Εικόνα 8.4.1 Καμπύλη παροχής θερμότητας για θερμοκρασία δωματίου από τους 11 ° C έως τους 24 ° C.



Εικόνα 8.4.2 Καμπύλη παροχής θερμότητας για θερμοκρασία δωματίου από τους 11 ° C έως τους 24 ° C.



Εικόνα 8.4.3 Καμπύλη παροχής θερμότητας για θερμοκρασία δωματίου από τους 12 ° C έως τους 24 ° C.

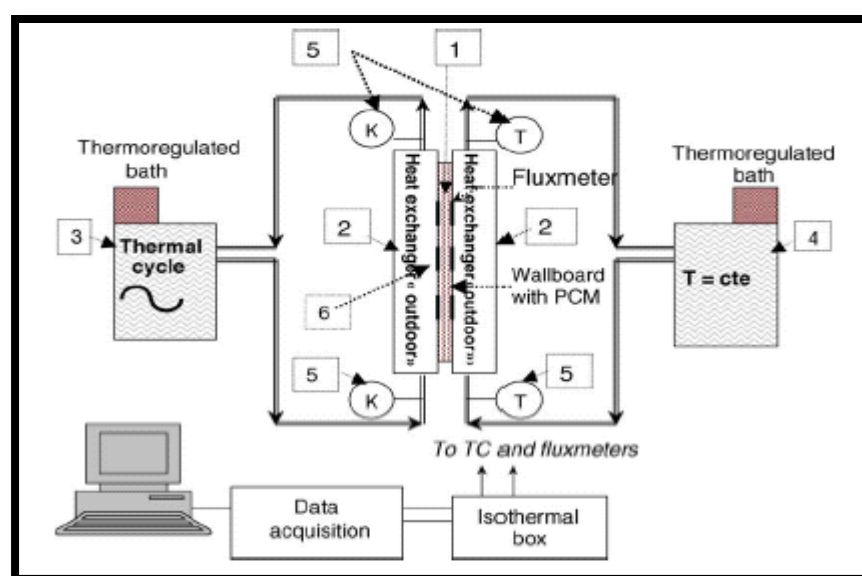
Εξετάζοντας τα στοιχεία που δίνονται από τα διαγράμματα, προκύπτει ότι η μέση τιμή της θερμικής ενέργειας που αποθηκεύεται σε πάνελ με PCM είναι 13.212 kJ. Ακόμα, για το δωμάτιο με το PCM χρησιμοποιήθηκαν 358 kg πάνελ με PCM, και επομένως η

αποθήκευση θερμότητας ανά μονάδα μάζας προκύπτει ίση προς 36.91 kJ/kg, όταν με τη μέθοδο DSC υπολογίσθηκε ίση προς 39.126 kJ/kg. Επομένως εμφανίστηκε μία πολύ μικρή απόκλιση της τάξης του 5.66%, γεγονός που αποδεικνύει ότι η μέθοδος DSC είναι πολύ αποτελεσματική όταν πρόκειται για την επιλογή του PCM που θα τοποθετηθεί στο πάνελ, εφόσον υπολογίζεται με ακρίβεια η θερμική του απόδοση και προβλέπεται και αξιολογείται με ακρίβεια η δυνατότητα χρήσης του για τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια.

8.5 Συγκριτική μελέτη απλού πάνελ, πάνελ με ενσωματωμένη παραφίνη, πάνελ με ενσωματωμένο polyethylene glycol (peg 600) και PVC με ενσωματωμένο polyethylene glycol (peg 600)

Προκειμένου να εξετασθούν τα λεπτά πάνελ και κυρίως η ικανότητά τους να αποθηκεύουν θερμότητα και να μειώνουν τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, πραγματοποιήθηκαν πειράματα στη Γαλλία από τα πανεπιστήμια Centre Scientifique et Technique du Batiment και Universite Joseph Fourier [68].

Σε αυτή την εφαρμογή η θερμοκρασία σε κάθε πλευρά του πάνελ μπορεί είτε να “επιβάλλεται” από εναλλάκτες θερμότητας, είτε αυτό μπορεί να συμβαίνει στην μία πλευρά με τη δεύτερη να έρχεται σε επαφή με τον περιβάλλοντα αέρα. Ένα σκίτσο της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.5.1:



Εικόνα 8.5.1 Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης.

Το πάνελ, όπως φαίνεται, είναι τοποθετημένο ανάμεσα και πολύ κοντά σε δύο εναλλάκτες θερμότητας, και “τροφοδοτείται” από δύο ροές νερού των οποίων η

θερμοκρασία ρυθμίζεται μέσω ενός προγράμματος. Επιπλέον, ανάμεσα στο πάνελ και σε κάθε εναλλάκτη θερμότητας έχουν τοποθετηθεί πέντε μετρητές ροής θερμότητας με πέντε θερμοστοιχεία. Έτσι, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω αποτελούν το μέσο όρο των μετρήσεων από τις πέντε αυτές συσκευές.

Όπως αναφέρεται και στον τίτλο, οι τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες πάνελ που εξετάζονται είναι :

- Ένα πάνελ αναφοράς, χωρίς υλικό αλλαγής φάσης.
- Ένα πάνελ με ενσωματωμένη παραφίνη, σε πολύ μικρές διαστάσεις.
- Ένα πάνελ με polyethylene glycol (PEG 600).
- Ένα πάνελ από PVC με polyethylene glycol (PEG 600).

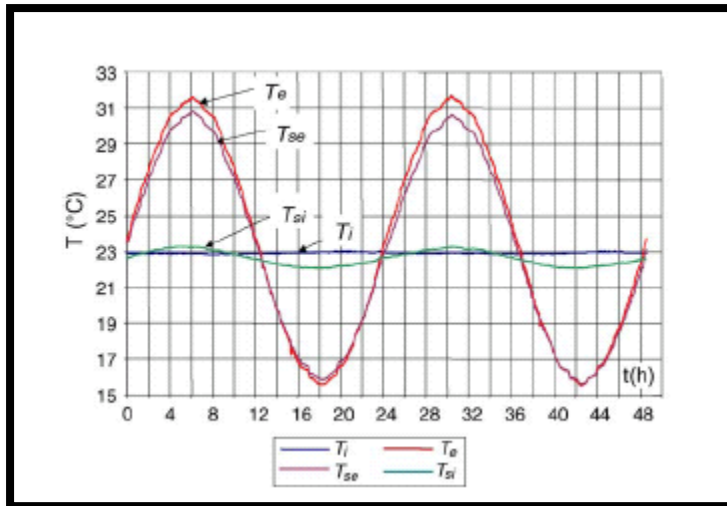
ενώ, τα υλικά αλλαγής φάσης επιλέχθηκαν έτσι ώστε το εύρος της θερμοκρασίας τήξης τους να είναι κοντά, με την παραφίνη να έχει θερμοκρασία τήξης στους 26°C και το PEG 600 από τους 20°C έως τους 25°C .

8.5.1 Οριακές συνθήκες

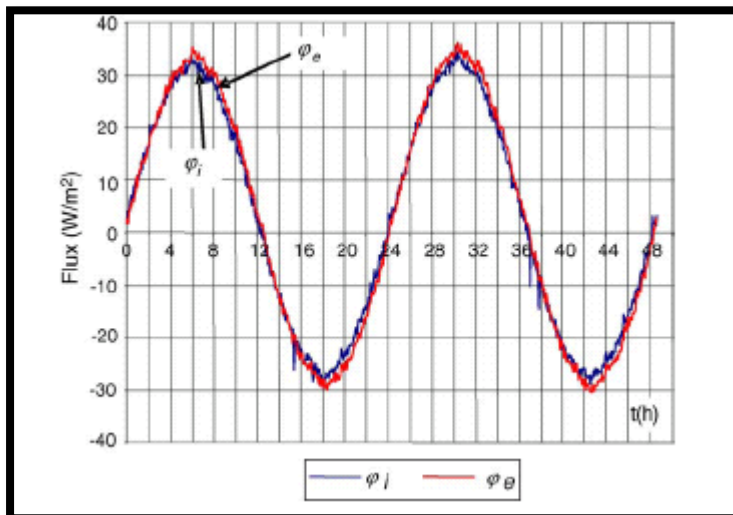
Οι ροές του νερού συντηρούνταν αρκετά υψηλά ώστε να διατηρούνται σταθερές οι θερμοκρασίες των τοίχων και ως εκ τούτου των εναλλακτών θερμότητας. Αυτό, άλλωστε, επιβεβαιώθηκε από τη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στα ρεύματα εισόδου και εξόδου του νερού, η οποία ήταν λιγότερη από 0.2°C . Ακόμα, η θερμοκρασία στο ένα ρεύμα νερού μεταβαλλόταν ημιτονοειδώς, προκειμένου να “επιβάλλει” συγκεκριμένη θερμοκρασία στη μία πλευρά του πάνελ, η οποία και θα ονομάζεται εξωτερική πλευρά και θα συμβολίζεται με το γράμμα e . Στην άλλη πλευρά του πάνελ είτε “επιβάλλεται” μία σταθερή θερμοκρασία, περίπου 23°C είτε η θερμοκρασία της καθορίζεται από φυσική συναγωγή, αφού απομακρυνθεί ο εναλλάκτης θερμότητας.

8.5.2 Θερμικός κύκλος του πάνελ αναφοράς

Σε αυτό το πάνελ, όπως αναφέρεται και παραπάνω, η θερμοκρασία στη μία του πλευρά μεταβάλλεται ημιτονοειδώς ενώ στην άλλη διατηρείται σταθερή στους 23°C . Στην Εικόνα 8.5.2 που δίδεται παρακάτω φαίνονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας του νερού T_e , της εξωτερικής επιφάνειας του πάνελ T_{se} , και της εσωτερικής επιφάνειας του πάνελ T_{si} , ενώ η θερμοκρασία του νερού στην άλλη πλευρά διατηρείται σταθερή και ίση προς T_i .



Εικόνα 8.5.2 Μεταβολές της θερμοκρασίας στο θερμικό κύκλο του πάνελ αναφοράς.

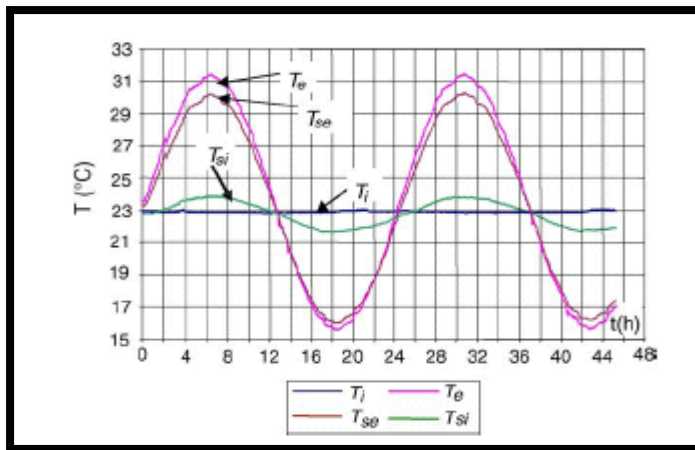


Εικόνα 8.5.3 Μεταβολές της ροής θερμότητας στο θερμικό κύκλο του πάνελ αναφοράς.

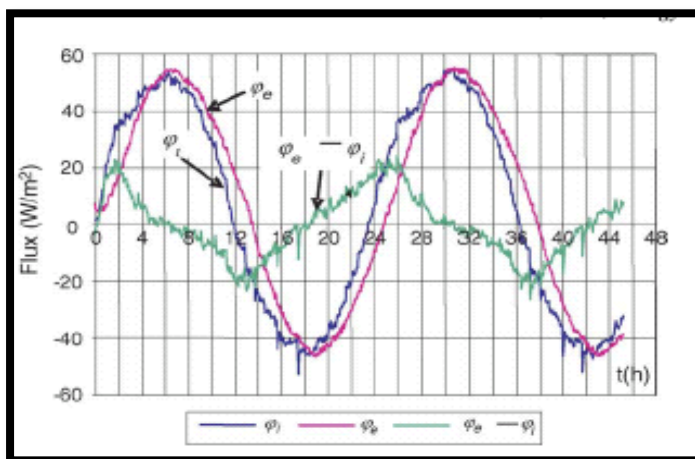
Η μεταβολή της ροής θερμότητας ϕ_e θεωρείται θετική όταν εισέρχεται στο πάνελ από την εξωτερική πλευρά, και η ϕ_i θεωρείται θετική όταν εγκαταλείπει το πάνελ από την εσωτερική του πλευρά, ενώ δεν παρατηρείται χρονική υστέρηση ανάμεσα στις δύο ροές.

8.5.3 Θερμικός κύκλος του πάνελ με ενσωματωμένη παραφίνη σε πολύ μικρές διατάσεις

Ύστερα από εξέταση της συγκεκριμένης περίπτωσης, καταλήγουμε στο ότι δεν υπάρχουν ιδιαίτερες διαφορές στις καμπύλες της θερμοκρασίας με την προσθήκη του PCM, κάτι που όμως δεν συμβαίνει και με τις καμπύλες ροής θερμότητας.



Εικόνα 8.5.4 Μεταβολές της θερμοκρασίας στον θερμικό κύκλο του πάνελ με παραφίνη.



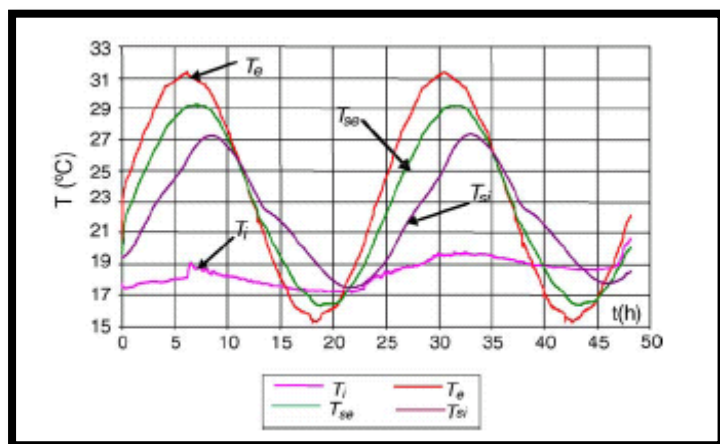
Εικόνα 8.5.5 Μεταβολές της ροής θερμότητας στο θερμικό κύκλο του πάνελ με παραφίνη.

Εάν ϕ_e είναι η εξωτερική ροή θερμότητας, η οποία είναι θετική όταν η θερμότητα εισέρχεται στο πάνελ, η ημιτονοειδής μορφή της είναι εμφανής. Η εσωτερική ροή θερμότητας, από την άλλη, έχει ελαφρώς διαφορετική μορφή, ενώ παρατηρείται μια μικρή χρονική υστέρηση.

Με την αναπαράσταση σε διάγραμμα της διαφοράς $\phi_e - \phi_i$ μπορεί να εκτιμηθεί η αποθήκευση θερμότητας. Σε περίπτωση που η διαφορά είναι θετική τότε θερμότητα αποθηκεύεται και θερμότητα αποδίδεται όταν αυτή είναι αρνητική. Παρόλα αυτά, εάν υπολογίσουμε το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται και αποδίδεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, μέσω της εμβαδομέτρησης, θα δούμε ότι η τιμή της προκύπτει μικρότερη από την αποθηκευτική ικανότητα του υλικού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ολόκληρο το μίγμα του πάνελ μαζί με την παραφίνη δεν επιτρέπει την εύκολη μεταφορά θερμότητας από τη μία πλευρά στην άλλη.

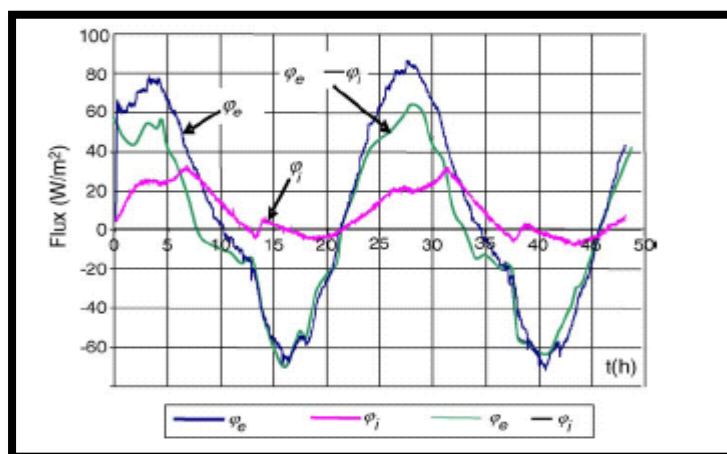
8.5.3 Θερμικός κύκλος πάνελ με ενσωματωμένο PEG 600

Παρόλο που το συγκεκριμένο PCM έχει μεγάλο σχετικά εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης, περίπου 5 °C, επιλέχθηκε για την εφαρμογή αυτή εξαιτίας του χαμηλού του κόστους και της διαθεσιμότητάς του.



Εικόνα 8.5.6 Μεταβολές της θερμοκρασίας στο θερμικό κύκλο πάνελ με ενσωματωμένο PEG600.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8.5.6, η εσωτερική θερμοκρασία του ρεύματος νερού T_i , παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις, ενώ η εσωτερική θερμοκρασία της επιφάνειας T_{si} αν και περιοδική δεν είναι πλέον ημιτονοειδής και έχει σημεία καμπής, τα οποία δείχνουν ξεκάθαρα την παρουσία της αλλαγής φάσης καθώς και την αποθήκευση θερμότητας που συνδέεται με αυτή. Επιπλέον, παρατηρείται μια χρονική υστέρηση της τάξης των 2.5 ωρών και μία σημαντική μείωση της απόστασης μεταξύ των μεγίστων τιμών των T_e και T_{si} , πράγμα που δείχνει την επίδραση του PCM.

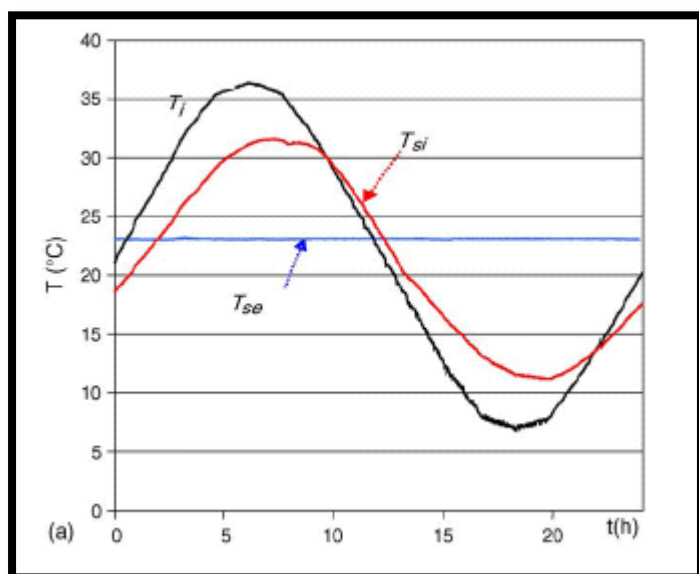


Εικόνα 8.5.7 Μεταβολές της ροής θερμότητας στο θερμικό κύκλο του πάνελ με ενσωματωμένο PEG 600.

Σε ότι αφορά τη ροή θερμότητας, αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.5.7. Με τη χάραξη του διαγράμματος ϕ_e - ϕ_i και τον υπολογισμό του εμβαδού της περιοχής που αυτό καλύπτει, γίνεται εμφανής η σημαντική ποσότητα θερμότητας που αποθηκεύεται σε ολόκληρο το πάνελ.

8.5.4 Θερμικός κύκλος PVC πάνελ με ενσωματωμένο PEG 600

Από τη μελέτη της εφαρμογής αυτής παρατηρείται ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας T_{si} εμφανίζει μεγαλύτερη περίοδο συγκριτικά με τη θερμοκρασία T_i , κάτι που απεικονίζεται στην Εικόνα 8.5.7:



Εικόνα 8.5.8 Μεταβολή της θερμοκρασίας στο θερμικό κύκλο PVC πάνελ με ενσωματωμένο PEG 600.

8.6 Συμπεράσματα

Τελειώνοντας, αναφέρεται ότι διεξάχθηκαν πολλά πειράματα με εξοπλισμό κατασκευασμένο αποκλειστικά για αυτού του είδους τα πάνελ. Είναι φανερό ότι τα πάνελ με ενσωματωμένη παραφίνη ή με PEG 600 δεν ήταν τα καταλληλότερα για τις εφαρμογές σε κτίρια, ενώ PVC πάνελ με ενσωματωμένο PEG 600 έδειξαν ότι έχουν πιο συμβατές ιδιότητες. Ακόμα, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι αν και τα παραπάνω υλικά δοκιμάστηκαν για πάνω από 400 θερμικούς κύκλους, δεν παρατηρήθηκε καμία χειροτέρευση των ιδιοτήτων των υλικών.

Κεφάλαιο 9

Ψύξη με PCMs σε πάνελ οροφής

9.1 Εισαγωγή

Στην Ευρώπη η ζήτηση για εγκαταστάσεις ψύξης χώρων με χρήση πάνελ οροφής έχει αυξηθεί από τις αρχές του 1980, και έχει πάρει τη μορφή μιας εδραιωμένης και ώριμης πλέον τεχνολογίας στη Σκανδιναβία, τη Γερμανία και την Ελβετία. Πολλά από τα τροποποιημένα συστήματα που εγκαταστάθηκαν δρουν επικουρικά στο ήδη υπάρχον σύστημα θέρμανσης των κτιρίων. Σε συνδυασμό με το σύστημα αερισμού οδηγούν στη μείωση του απαιτούμενου χώρου για την τοποθέτηση του εξοπλισμού, και αυξάνουν το επίπεδο θερμικής άνεσης, εισάγοντας ένα ψυκτικό στοιχείο που ακτινοβολεί στην ψυχομετρία του αέρα δωματίου. Ο Feustal [69] επισήμανε τον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα που βασίζονται στη χρήση νερού και ακτινοβολούν μπορούν να παρέχουν θερμικό κλιματισμό σε κτίρια με υψηλό βαθμό άνεσης, να μειώσουν το δομικό κόστος των κτιρίων, ελαχιστοποιώντας τον απαιτούμενο χώρο εγκατάστασης του συστήματος και των αγωγών, καθώς και να μειώσουν δραστικά την απαίτηση για ισχύ παραγόμενη από ανεμιστήρες.

Τα συστήματα ψύξης οροφής μπορούν να μειώσουν κατά 10% την κατανάλωση ενέργειας [70] και αν σχεδιαστούν σωστά μπορούν επίσης να παρέχουν θέρμανση κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών [71]. Τα συστήματα αυτά δεν αφαιρούν μεγάλα ποσά ενέργειας από ένα χώρο, συνήθως της τάξεως των 70-100 W/m², αλλά ένα σύστημα μετατόπισης αερισμού μπορεί να παρέχει επιπλέον 25-65 W/m² ψυκτική ικανότητα. Το πλεονέκτημα ενός συστήματος ψύξης οροφής είναι ότι παρέχει ένα συνδυασμό ψύξης, μέσω ακτινοβολίας και συναγωγής, στο δωμάτιο. Επίσης, είναι αθόρυβα και η λειτουργία τους είναι απαλλαγμένη από ρεύματα αέρα. Η διατήρηση σταθερής και ομοιόμορφης θερμοκρασίας, υψηλότερης από το σημείο δρόσου του χώρου κατά πλάτος του πάνελ, είναι επιτακτική εάν πρέπει να αποφευχθεί η θερμική δυσφορία, όπως επισημαίνουν ο Miriel και οι συνεργάτες του [71], οι Butler και Alamdari [72], ο Alamdari και οι συνεργάτες του [73], και οι Novoselac και Srebric [74]. Τα ρευστά που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ψύξης οροφής είναι παραδοσιακά βασισμένα στο νερό, με σκοπό να αξιοποιήσουν τα κέρδη της αισθητής θερμότητας.

Στο κομμάτι της εργασίας που ακολουθεί παρατίθενται διάφορες έρευνες και πειράματα που έχουν γίνει για τη μελέτη της χρήσης των PCMs σε πάνελ οροφής με σκοπό την ψύξη εσωτερικών χώρων.

9.2 Αξιολόγηση της θερμικής αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιεί υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) και εφαρμογές [2]

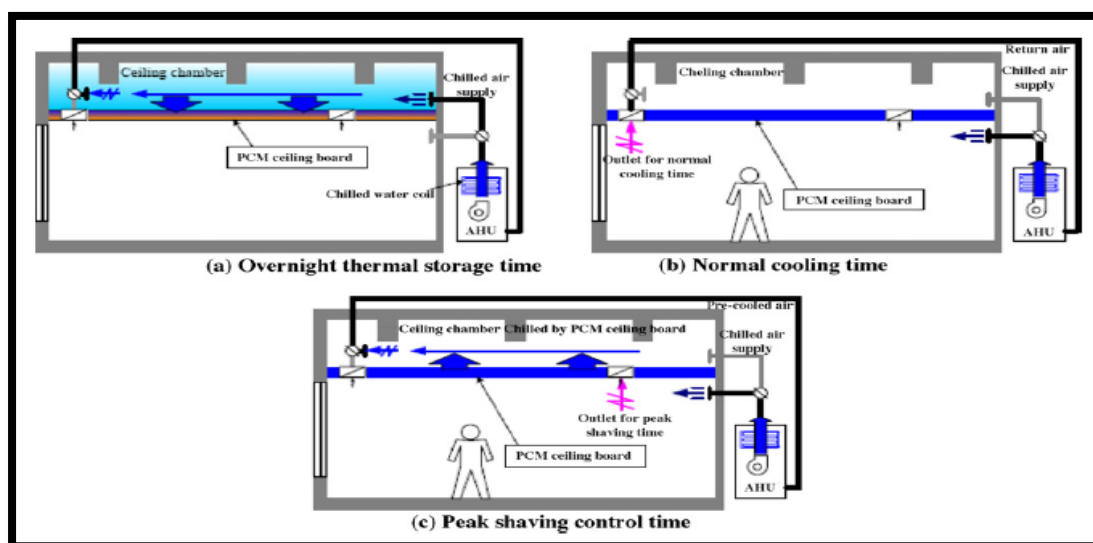
Οι σανίδες οροφής είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του κτιρίου που χρησιμοποιείται για θέρμανση ή για ψύξη. Ο Bruno [75] ανέπτυξε ένα σύστημα, το οποίο αποθηκεύει την ψυχρότητα σε κάποιο υλικό αλλαγής φάσης χρησιμοποιώντας ρεύμα εκτός αιχμής και την απελευθερώνει τις ώρες αιχμής. Η ίδια τεχνική χρησιμοποιήθηκε τοποθετώντας το PCM στην οροφή των κτιρίων. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε είχε εύρος θερμοκρασίας τήξης 20-30 °C, το οποίο ήταν παρόμοιο με τη θερμοκρασία δωματίου που ήταν κατάλληλη για την εφαρμογή αυτή. Η στέγη που αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα χρησιμοποιήθηκε σε ένα χωριό στο Περού για να διατηρηθούν ισοθερμοκρασιακές συνθήκες σε ένα πειραματικό εκτροφείο για κότες. Το εκτροφείο είχε χωρισθεί σε δύο συνδεδεμένα μέρη, ένα αίθριο και ένα θερμαινόμενο περιφραγμένο χώρο. Δύο ημικυκλικά δοχεία που ήταν κλεισμένα στο επάνω μέρος με γυαλί, το καθένα από τα οποία περιείχε 42 kg παραφίνης, ήταν τοποθετημένα κάτω από μία γυάλινη σκεπή, η οποία ήταν αεροστεγώς κλεισμένη. Κατά τη διάρκεια της νύχτας παχιά θερμομονωτικά στρώματα πολυουρεθάνης τοποθετούνταν μεταξύ της γυάλινης σκεπής και των δοχείων παραφίνης, με σκοπό να διατηρήσουν τη θερμοκρασία του περιφραγμένου χώρου μεταξύ των 22 και των 30 °C.

Ο Turnpenny και οι συνεργάτες του [76] ανέπτυξαν μία μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, οποία αποτελείται από σωλήνες που βρίσκονται ενσωματωμένοι στο στρώμα του PCM και μεταφέρουν θερμότητα. Για να μετρηθεί το μέγεθος της μονάδας χρησιμοποιήθηκε ένα μονοδιάστατο μαθηματικό μοντέλο που υπολόγιζε τη μεταφορά θερμότητας από τον αέρα στο PCM. Το σύστημα του Turnpenny αποθήκευε το ψύχος κατά τις νυκτερινές ώρες και το απελευθέρωνε κατά τη διάρκεια της ημέρας για την ψύξη του χώρου.

Οι Kondo και Ibamoto [77] εξέτασαν την εξοικονόμηση ενέργειας ενός κλιματιστικού συστήματος που χρησιμοποιεί υλικό αλλαγής φάσης (PCM) ενσωματώνοντάς το σε σανίδες της οροφής για ένα κτίριο που στεγάζει γραφεία. Οι σανίδες του ταβανιού ενισχύθηκαν με PCM συσκευασμένο σε μικροκάψουλες, το οποίο είχε σημείο τήξης περίπου στους 25 °C σχετικά παρόμοιο με τη θερμοκρασία δωματίου. Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιείται ένα πάνελ από PCM σε αντίθεση με το συμβατικό που αποτελείται από πέτρα και βαμβάκι. Στην Εικόνα 9.2.1 δίνεται μια απεικόνιση του συστήματος αυτού. Κατά τη νυκτερινή αποθήκευση θερμότητας, ο ψυχρός αέρας που προέρχεται από μία μονάδα διαχείρισης αέρα (air handing unit AHU) ρέει μέσα στην κοιλότητα της οροφής και ψύχει το στρώμα του PCM, αποθηκεύοντας με τον τρόπο αυτό θερμική ενέργεια για ψύξη. Η

θερμική αυτή ενέργεια αποθηκεύτηκε χρησιμοποιώντας φθινό ηλεκτρικό ρεύμα (Εικόνα 9.2.1.a). Κατά τη διάρκεια της φυσικής ψύξης, ο αέρας από την AHU ρέει απευθείας μέσα στο δωμάτιο (Εικόνα 9.2.1.b). Κατά τη διάρκεια εξοικονόμησης ηλεκτρικού ρεύματος, όταν το θερμικό φορτίο φτάνει στην αιχμή του, ο αέρας από το δωμάτιο επιστρέφει στην AHU μέσω της κοιλότητας της οροφής. Έτσι, ο θερμός αέρας του δωματίου περνώντας από το ψυχρό πλέον στρώμα PCM προψύχεται στο δρόμο του προς την AHU (Εικόνα 9.2.1.c). Με τον τρόπο αυτό μειώνεται τόσο το θερμικό φορτίο, όσο και η χωρητικότητα της πηγής θερμότητας. Οι ώρες της φυσικής ψύξης είναι από τις 7 π.μ. ως τη 1 μ.μ. Οι ώρες εξοικονόμησης φορτίου είναι από τη 1 μ.μ. έως το πέρας των ωρών λειτουργίας του γραφείου. Στη συγκεκριμένη μελέτη, οι ώρες που αποθηκεύεται η θερμότητα είναι από τις 4 π.μ. έως τις 7 π.μ. Η μειωμένη χρήση του ακριβού ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια των ωρών εξοικονόμησης φορτίου και η χρήση του φθηνού νυχτερινού ρεύματος οδηγεί σε χαμηλότερο ενεργειακό κόστος.

Το παραπάνω σύστημα αποθήκευσης θερμότητας έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα αν συγκριθεί με τα συμβατικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιούν τιμεντένιες πλάκες: i) αναμένεται πιο αποδοτική αποθήκευση θερμότητας, εφόσον ψυχρός αέρας υψηλής πυκνότητας περνά από το στρώμα του PCM που βρίσκεται στον πάτο της κοιλότητας της οροφής, ii) όλη η σανίδα της οροφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση θερμότητας, εφόσον ο ψυχρός αέρας μπορεί να ρέει μέσα στην κοιλότητα χωρίς να εμποδίζεται από δοκάρια και iii) εφόσον η επιφάνεια της πλάκας της οροφής μπορεί να διατηρηθεί στη θερμοκρασία τήξης του PCM για ένα εκτεταμένο χρονικό διάστημα, το εσωτερικό περιβάλλον του δωματίου, συμπεριλαμβανομένου και του τομέα της ακτινοβολίας, μπορεί να βελτιωθεί.



Εικόνα 9.2.1 Απεικόνιση του συστήματος ψύξης με πάνελ οροφής [2].

Κεφάλαιο 10

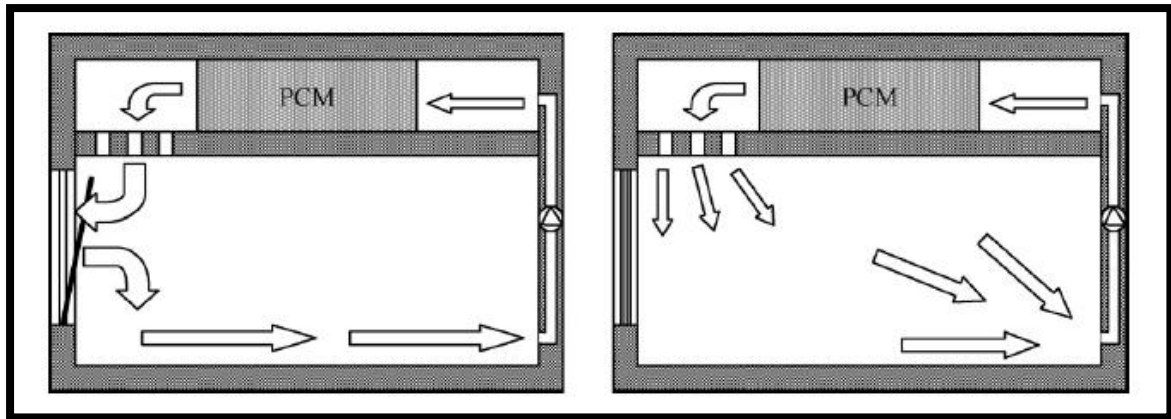
Πειραματική έρευνα αποθήκευσης ψύχους με τη βοήθεια PCM [78]

10.1 Εισαγωγή

Έχουν γίνει πολυάριθμες μελέτες για τη χρήση PCM σε συστήματα ψύξης οροφής. Μία από αυτές έγινε από τους Kondo και Ibamoto [79]. Κατά τη διάρκεια δύο ωρών του χρόνου εξοικονόμησης φορτίου, η αύξηση της θερμοκρασίας του δωματίου ήταν περίπου 5 °C χρησιμοποιώντας μία συμβατική μονάδα ψύξης, ενώ ήταν μόλις 2 °C όταν χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα ψύξης με PCM στην οροφή. Ένα πρωτότυπο σύστημα ψύξης έχει μελετηθεί τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά, με σκοπό τη μείωση της χρήσης κλιματιστικών συσκευών [76],[80]. Αρχικά κατασκευάστηκε ένα θερμικά ενεργοποιούμενο πάνελ οροφής με PCM για εφαρμογές σε κτίρια ελαφριάς κατασκευής καθώς και σε μερικά ανακαινισμένα. Ο σχεδιασμός του πάνελ αυτού εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες της παραφίνης ως υλικό αλλαγής φάσης. Η υψηλή θερμοχωρητικότητα της παραφίνης επιτρέπει την ελαχιστοποίηση του πάχους του πάνελ στα 5 cm. Το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα περιλάμβανε επίσης και ένα αριθμητικό μοντέλο για τη διεξαγωγή των υπολογισμών.

10.2 Η αρχή του free-cooling

Η δωρεάν ψύξη (free-cooling) με τη χρήση PCM είναι μία εναλλακτική μέθοδος ψύξης και αερισμού κτιρίων, η οποία συνδυάζει αυξημένη θερμική μάζα και νυχτερινό αερισμό. Η θερμική αδράνεια ενός κτιρίου προσαρμόζεται ενεργά ενσωματώνοντας PCM στην οροφή του. Ο ψυχρός νυχτερινός αέρας χρησιμοποιείται για να ψύξει το εσωτερικό του κτιρίου και το στρώμα του PCM. Ο εξωτερικός αέρας για νυχτερινή ψύξη μπορεί να εισάγεται στο κτίριο τοπικά μέσω παραθύρων και ανεμιστήρων ή μέσω ενός συστήματος κεντρικής παροχής αέρα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, θερμός αέρας κυκλοφορεί μέσα στη μονάδα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.2.1. Ο στόχος της χρησιμοποίησης προϊόντων PCM είναι η μείωση της ενέργειας που απαιτείται για την ψύξη ενός κτιρίου το οποίο υποφέρει από υπερπαραγωγή θερμότητας.

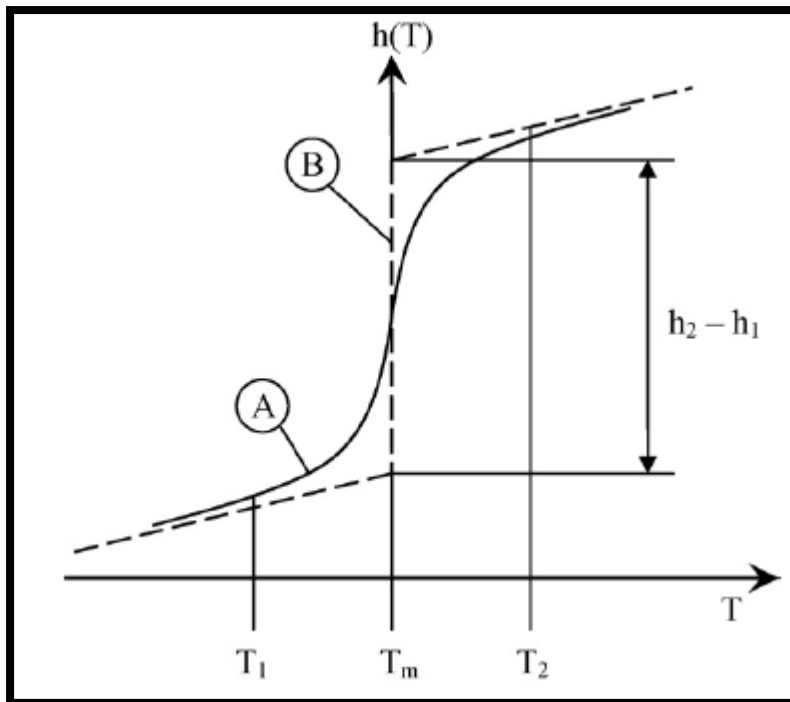


Εικόνα 10.2.1 Κύρια λειτουργία ενός συστήματος free-cooling: (αριστερά) η ψύξη του PCM τη νύχτα και (δεξιά) η ψύξη του κτιρίου κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η βασική αρχή της ψύξης με PCM είναι η απελευθέρωση και λήψη μεγάλης ποσότητας ψύχους κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης σε πολύ χαμηλή θερμοκρασιακή διαφορά και σε σχετικά σταθερή θερμοκρασία. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα κατά τις διαδικασίες στερεοποίησης και τήξης. Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης του ψύχους, το PCM στερεοποιείται ενώ κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απελευθέρωσης υγροποιείται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.2.2. Η καμπύλη Α αναπαριστά μία πραγματική διαδικασία στερεοποίησης και τήξης, όπου η κλίση της καμπύλης αυξάνεται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Ωστόσο, σε θεωρητικές μελέτες η στερεοποίηση και η τήξη λαμβάνουν χώρα σε σταθερή θερμοκρασία, όπως φαίνεται από την καμπύλη Β. Θεωρητικά, η συνολική ποσότητα ψύχους που αποθηκεύεται σε θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T = T_2 - T_1$ δίνεται από την εξίσωση (10.2.1):

$$Q_{PCM} = m \left[\int_{T_1}^{T_m} C_{p,s}(T) dT + (h_2 - h_1) + \int_{T_m}^{T_2} C_{p,l}(T) dT \right] \quad (10.2.1)$$

Για συστήματα free-cooling τα PCMs πρέπει να επιλέγονται ώστε η θερμοκρασία του αέρα που ψύχεται να είναι μέσα στα όρια της ανθρώπινης άνεσης. Το καλοκαίρι, τα όρια της ανθρώπινης άνεσης είναι μεταξύ 23 °C και 27 °C [81]. Προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας, η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στη θερμοκρασία του αέρα και τη θερμοκρασία τήξης του PCM πρέπει να είναι περίπου 3-5 °C. Αυτό σημαίνει ότι για ένα σύστημα ψύξης που λειτουργεί το καλοκαίρι η θερμοκρασία τήξης του PCM πρέπει να κυμαίνεται ανάμεσα στους 19 και τους 24 °C. Ο Πίνακας 10.2.1 μας δίνει κατάλληλα PCM για καλοκαιρινά συστήματα free-cooling, τα οποία είναι επιλεγμένα από τα δεδομένα της IEA-ECES [82],[83],[84].



Εικόνα 10.2.2 Αλλαγή φάσης κατά τη στερεοποίηση ή την τήξη: (Α) πραγματική διεργασία (Β) ιδανική διεργασία.

Πίνακας 10.2.1 Επιλεγμένα PCM για συστήματα free cooling.

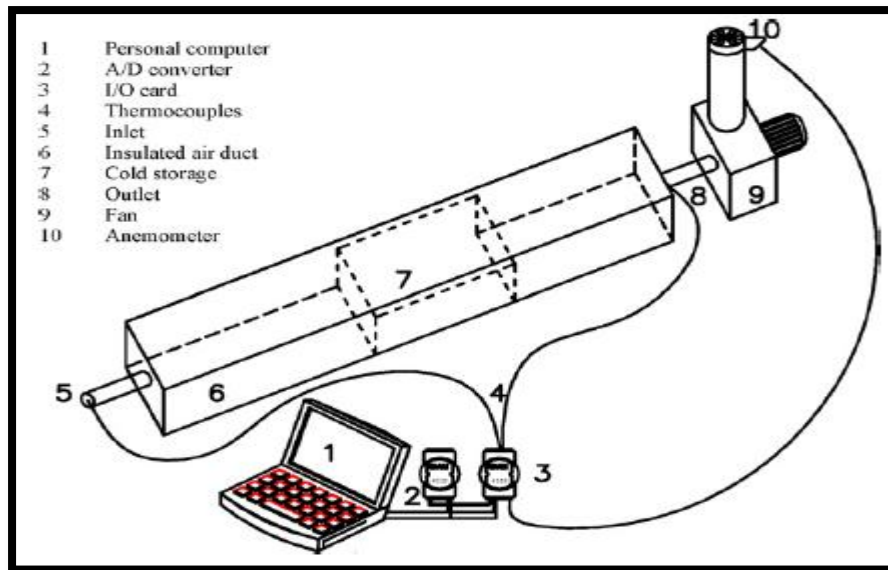
Name of PCM	Type	Temperature		Latent heat L [kJ/kg]
		Melting point [°C]	Operation range [°C]	
E 19	Eutectic	19	19	146
ClimSel C 21	Compound	21	11/31	122
E 21	Eutectic	21	21	150
RUBITHERM [®] RT 20	Paraffin	22	11/26	172
E 23	Eutectic	23	23	155
RUBITHERM [®] SP 22 A4	Blend	24	15/30	165
ClimSel C 24	Compound	24	14/34	180

10.3 Πειραματική οργάνωση

Μία γραμμή εξέτασης μετρήσεων σχεδιάστηκε για την καθημερινή μέτρηση της ικανότητας αποθήκευσης ψύχους. Ο χώρος αποθήκευσης ήταν γεμισμένος με παραφίνη και ήταν τοποθετημένος μέσα σε έναν αεραγωγό, ο οποίος ήταν υπεύθυνος για την εισαγωγή του κρύου νυχτερινού αέρα. Ο κρύος αέρας οδηγούσε στην κρυσταλλοποίηση της παραφίνης και κατ' επέκταση στη συσσώρευση του ψύχους. Κατά τη διάρκεια της ημέρας ζεστός αέρας εισερχόταν μέσω του αεραγωγού, ο οποίος είχε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία εξαιτίας του ψύχους που ήταν αποθηκευμένο. Ο αεραγωγός ήταν μονωμένος ώστε να μειωθεί η ανταλλαγή θερμότητας με τον περιβάλλοντα χώρο.

Το σύστημα αποτελούταν από ένα προσωπικό υπολογιστή (1) στον οποίο μεταφέρονταν τα μετρούμενα δεδομένα μέσω ενός A/D (αναλογικός/ψηφιακό) μετατροπέα (2) και μία κάρτα εισόδου/εξόδου (3). Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της θερμοκρασίας εισόδου (5) και εξόδου (8) μετρήθηκαν με τη βοήθεια θερμοστοιχείων τύπου K (4) και οι ταχύτητες του αέρα μετρήθηκαν με ένα ανεμόμετρο AIRFLOW Edra 6 (10). Ο αέρας εισερχόταν στον μονωμένο αεραγωγό (6) μέσα από μία εσωτερική οπή και μέσω της αποθήκευσης ψύχους (7) οδηγούταν στην εξωτερική οπή (8) με τη βοήθεια ανεμιστήρα (9), όπου και μετριόταν από ένα ανεμόμετρο (10), όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.3.1.

Ο χώρος όπου αποθηκευόταν η ψύξη απαρτιζόταν από ένα μεταλλικό κουτί, του οποίου το σχήμα το καθιστούσε ικανό να τοποθετηθεί στην οροφή. Για να αυξηθεί η αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν δύο βιομηχανικά πτερύγια. Τα πτερύγια αυτά ήταν κατασκευασμένα από αλουμίνιο και ήταν συνδεδεμένα με το μεταλλικό κουτί από τις εσωτερικές και τις εξωτερικές πλευρές στην πάνω και την κάτω πλευρά του κουτιού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.3.2. Το σημείο επαφής των πτερυγίων και του κουτιού γεμίστηκε με ειδική θερμικά αγωγίμη κρέμα. Τα πτερύγια χρησιμοποιήθηκαν για δύο διαφορετικούς λόγους. Στην εξωτερική πλευρά του αποθηκευτικού χώρου τα πτερύγια τοποθετήθηκαν με σκοπό να αυξηθεί η συνολική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, το οποίο οδηγεί σε υψηλότερη συναγωγή ψυχρής ροής. Στην εσωτερική πλευρά του κουτιού, τα πτερύγια τοποθετήθηκαν ώστε να αυξηθεί η αγωγή του συστήματος. Το εσωτερικό του κουτιού ήταν πληρωμένο με την παραφίνη RT 20 της εταιρίας Roubitherm, η οποία έχει θερμοκρασία τήξης τους 22 °C. Η θερμοχωρητικότητα της παραφίνης που χρησιμοποιήθηκε ήταν 172 kJ/kg σε θερμοκρασιακό εύρος 11-26 °C και η ειδική θερμότητα ήταν 1.8/2.4 kJ/kgK. Η παραφίνη RT 20 είναι χημικά αδρανής με τα περισσότερα υλικά και για το λόγο αυτό δεν ελλοχεύει ο κίνδυνος της διάβρωσης.



Εικόνα 10.3.1 Ένα σχήμα μετρήσεως της καθημερινής ικανότητας αποθήκευσης ψύχους.

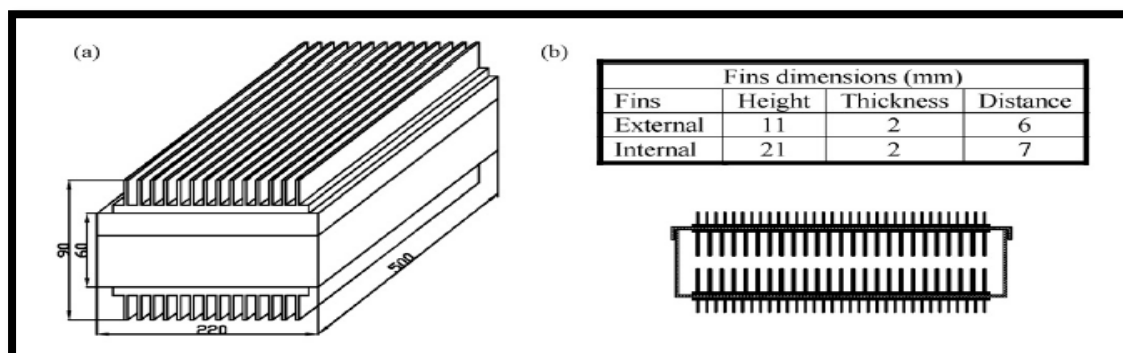
Οι θερμοκρασίες μετρήθηκαν με θερμοστοιχεία K με σφάλμα μετρήσεως $\pm 0,75\%$, ενώ η ταχύτητα του αέρα μετρήθηκε με σφάλμα $\pm 2,0\%$.

Με τη βοήθεια των μετρούμενων θερμοκρασιών και του ρυθμού παροχής μάζας, ο οποίος υπολογίστηκε από τις μετρούμενες ταχύτητες του αέρα, η ροή θερμότητας υπολογίζεται κάθε φορά (j) από την εξίσωση (10.3.1):

$$\Phi_j = \dot{m}_j C_p (T_{i,j} - T_{o,j}) = \rho v_j A C_p (T_{i,j} - T_{o,j}) \quad (10.3.1)$$

Η ποσότητα μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται από την εξίσωση (10.3.2):

$$Q(t) = \int_0^t \Phi(t) dt = \sum_{j=1}^n \Phi_j \Delta t = \sum_{j=1}^n \dot{m}_j C_p ((T_{i,j} - T_{o,j}) \Delta t) \quad (10.3.2)$$



Εικόνα 10.3.2 Το σχήμα (αριστερά) και η τομή (δεξιά) του κουτιού αποθήκευσης του ψύχους με πτερύγια.

10.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων

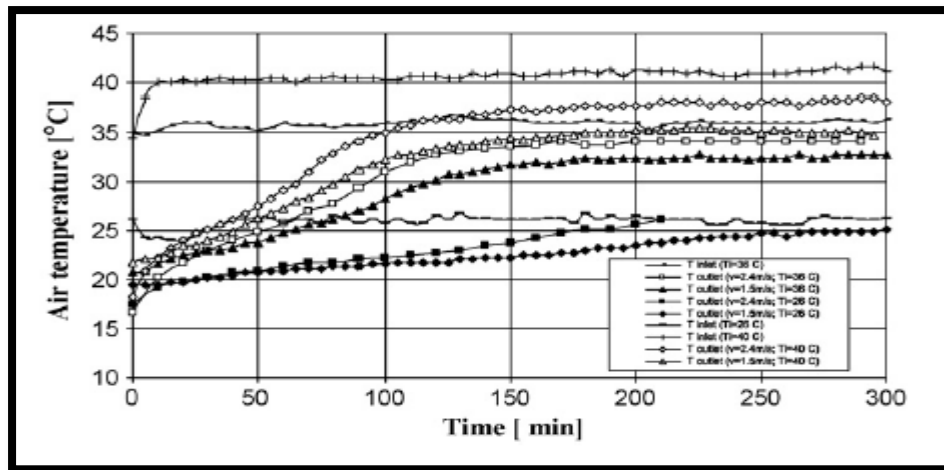
Οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου και η ροή του αέρα μετρήθηκαν τον Απριλίου του 2007, όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα ήταν κάτω από 15 °C. Οι μετρήσεις ξεκινούσαν συνήθως στις 7:30 π.μ. και τελείωναν στις 2 μ.μ. Ο χρόνος που χρειαζόταν το PCM για να παγώσει με τη βοήθεια του εξωτερικού αέρα ήταν περίπου ίδιος σε κάθε μέτρηση. Ήταν αναγκαίο η ίδια ποσότητα ψύχους να είναι αποθηκευμένη σε κάθε μέτρηση ώστε να είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους. Οι μετρήσεις διήρκησαν επτά ημέρες κατά τις οποίες η εξωτερική θερμοκρασία θεωρήθηκε σταθερή.

Στον πίνακα 10.4.1 φαίνονται οι μετρήσεις που έγιναν, με X υποδηλώνονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί.

Πίνακας 10.4.1 Συνδυασμός μετρήσεων

	Inlet air temperature		
Airflow	26 °C	36 °C	40 °C
1.5 m/s	X	X	X
2.4 m/s	X	X	X

Στην Εικόνα 10.4.1 φαίνεται ότι αν χρησιμοποιούσαμε ταχύτητα αέρα 1.5 m/s η θερμοκρασία εξόδου ήταν μικρότερη από όταν είχαμε ταχύτητα αέρα 2.4m/s. Αυτό σημαίνει ότι ο θερμικός αποσβεστήρας που χρησιμοποιήθηκε δεν είχε μήκος κατάλληλο για ροές μεγαλύτερες από 1.5 m/s και θερμοκρασία εισόδου κάτω από 30 °C. Ο λόγος είναι ότι ύστερα από 200 λεπτά η θερμοκρασία εξόδου γίνεται ίση με τη θερμοκρασία εισόδου. Αν έχουμε το συνδυασμό: $T_i = 36\text{ °C}$ και $v = 1.5\text{ m/s}$ η θερμοκρασία εξόδου πλησιάζει αυτήν της εισόδου χωρίς ποτέ να γίνονται ίσες. Αυτό συμβαίνει λόγω των θερμικών απωλειών στον περιβάλλοντα χώρο. Στην περίπτωση μας, η απώλεια έγκειται στη θερμοκρασία δωματίου η οποία ήταν κατά μέσο όρο 23 °C. Αυτό συνιστούσε την πρόσθετη θερμική ροή που έψυχε τον αέρα στο άπειρο. Το ίδιο συνέβη και όταν η θερμοκρασία ήταν $T_i = 40\text{ °C}$, όπου η θερμοκρασιακή ανομοιότητα ήταν πολύ μεγαλύτερη, με συνέπεια και η θερμική ροή να είναι αυξημένη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.4.2.



Εικόνα 10.4.1 Θερμοκρασίες εξόδου για διαφορετικές θερμοκρασίες εισόδου και ταχύτητες ροής.

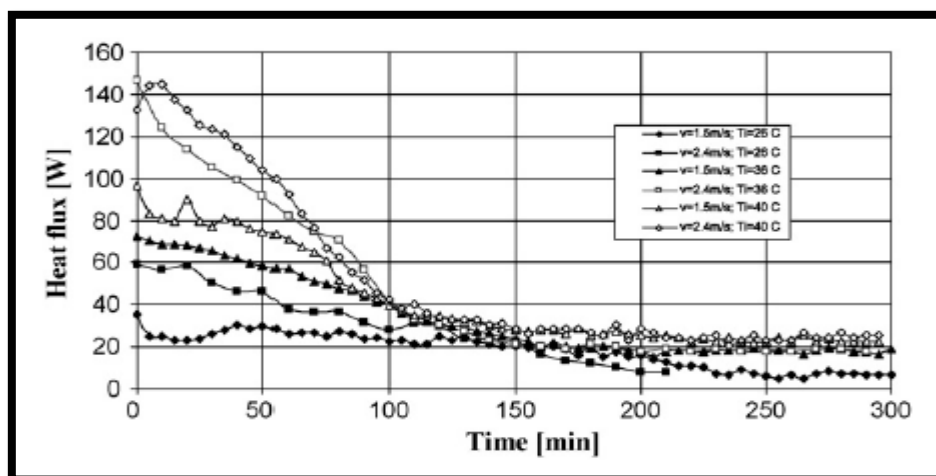
Η Εικόνα 10.4.3 δείχνει την ποσότητα θερμότητας, ή μάλλον του ψύχους, που απελευθερώνει το κουτί κάτω από διαφορετικούς συνδυασμούς δεδομένων. Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό εκτιμήθηκαν οι χρόνοι ψύξης με την υπόθεση ότι οι θερμικές απώλειες είναι αμελητέες.

Ύστερα από υπολογισμούς καταλήξαμε στην εξίσωση (10.4.1) που μας δίνει το χρόνο ψύξης:

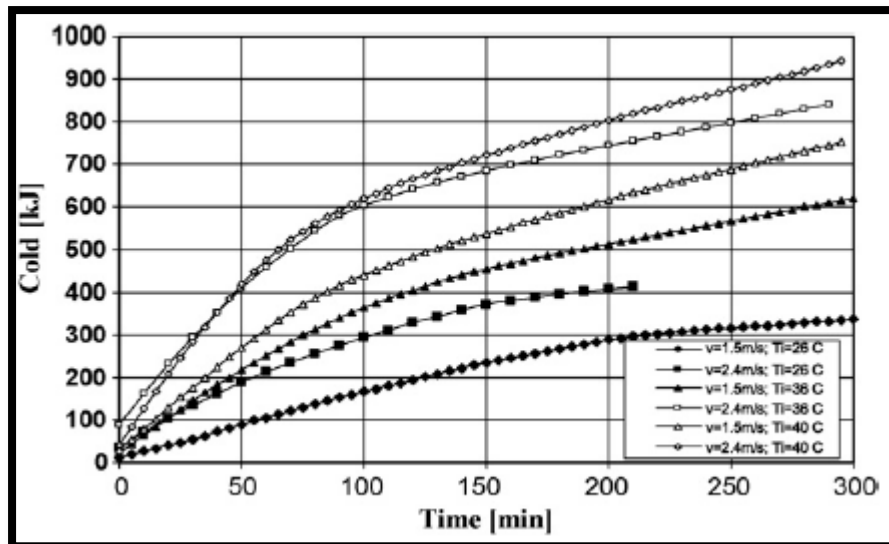
$$t = a + b \cdot T_v + c \cdot T^2 + d + e \cdot v + f \cdot v^2 \quad (10.4.1)$$

Ο συνδυασμός της εξίσωσης (10.4.1) και των δεδομένων από τις μετρήσεις μας οδηγεί στην τελική εξίσωση (10.4.2):

$$t = 214.23 + 6.28 \cdot T_v - 0.21 \cdot T_v^2 + 4.02 \cdot v - 8.37 \cdot v^2 \quad (10.4.2)$$



Εικόνα 10.4.2 Η θερμική ροή για διαφορετικές θερμοκρασίες εισόδου και ταχύτητες ροής.



Εικόνα 10.4.3 Ποσότητα θερμότητας (ψύχους).

10.5 Συμπεράσματα

Τα συστήματα αποθήκευσης ψύχους παρουσιάζουν προβλήματα, εξαιτίας του μέσου στο οποίο μπορεί να αποθηκευτεί το ψύχος καθώς και της ψυκτικής πηγής αυτής καθεαυτής. Για να παρακαμφθεί το πρόβλημα αυτό εξετάζεται ένα σύστημα νυχτερινού αερισμού που ονομάζεται “free cooling”. Αυτός ο τύπος του PCM πρέπει να επιλεγεί ώστε τα σημεία υγροποίησης και στερεοποίησης να είναι τέτοια που να επιτρέπουν την πλήρη υγροποίηση και στερεοποίηση του PCM. Αυτό εξαρτάται βασικά από τις κλιματικές συνθήκες του κάθε τόπου. Εάν επιλεγεί το λάθος PCM, το οποίο δε θα κάνει πλήρη κύκλο, η αποθήκευση του ψύχους δε θα είναι επαρκής. Εξάγεται, επομένως, το συμπέρασμα ότι η επιλογή του PCM είναι σημαντικός παράγοντας για να επιτευχθεί το “free cooling”. Μία επιπλέον εξέλιξη του “free cooling” είναι η ενσωμάτωσή του στη δομή των κτιρίων. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή του συστήματος αποθήκευσης ή τμημάτων αυτού θα είναι πολύ πιο οικονομική.

Κεφάλαιο 11

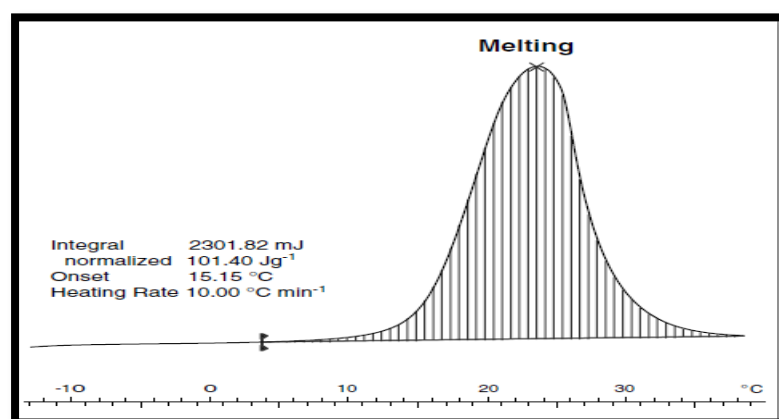
Απόδοση ενός πάνελ οροφής για ψύξη που χρησιμοποιεί υλικά αλλαγής φάσης μέσα σε μίγμα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας [85]

11.1 Εισαγωγή

Τα υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) πλεονεκτούν λόγω της δυναμικής και στατικής αποθήκευσης ενέργειας που παρέχουν. Περικλείοντας το PCM σε στερεό υλικό αρκετά μικρής διαμέτρου, ώστε να είναι δυνατή η αιώρησή του σε ένα υγρό, μπορούν να δημιουργηθούν μερικώς στερεοποιούμενα και τηκόμενα μίγματα με πολύ υψηλές ενεργειακές πυκνότητες και ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας. Τέτοιου είδους μίγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο ως μέσα μεταφοράς όσο και ως μέσα αποθήκευσης ενέργειας, και μπορούν να σχεδιαστούν για ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών.

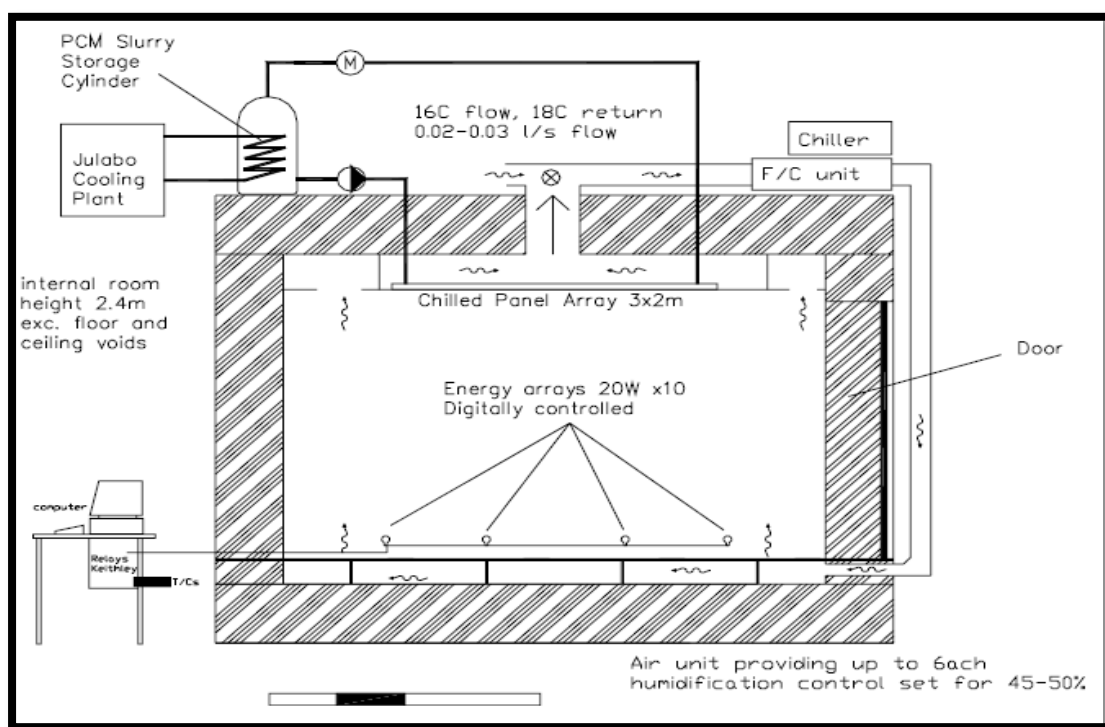
11.2 Πειραματική συσκευή

Η BASF [86] παρήγαγε ένα PCM συσκευασμένο σε μικροκάψουλες, το οποίο έχει θερμοκρασία τήξης τους 18 °C και αναλύθηκε διεξοδικά για τη χρήση του σε ένα σύστημα ψύξης οροφής. Επιλέχθηκε ένα μίγμα PCM με σημείο τήξης στους 18 °C επειδή η θερμοκρασία αυτή είναι πολύ κοντά στη θερμοκρασία λειτουργίας ενός συστήματος ψύξης οροφής. Η Εικόνα 11.2.1 είναι ένα ψηφιακό γράφημα (DSC) της αλλαγής φάσης του PCM μέσα στο μίγμα. Οι μικροκάψουλες είναι πολύ μικρές σε διάμετρο, κατά προσέγγιση 2-8 μm, οι οποίες όταν αιωρούνται στο νερό με συγκέντρωση 40% ή μικρότερη, μπορούν να αντλούνται σε κυκλώματα θέρμανσης και ψύξης χρησιμοποιώντας εμπορικά διαθέσιμες αντλίες.



Εικόνα 11.2.1 Ψηφιακό γράφημα (DSC) της αλλαγής φάσης του PCM μέσα στο μίγμα.

Η ανεπτυγμένη εγκατάσταση ψύξης οροφής είναι η πειραματική μονάδα που απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 11.2.2. Η μονάδα είναι σχεδιασμένη να αναπαράγει μια τυπική εγκατάσταση ψύξης οροφής σε ένα γραφείο, όπου η ικανότητα ψύξης των πάνελ οροφής επαυξάνεται και επικουρείται από ένα μετατοπισμένο σύστημα αερισμού. Τέτοια συστήματα αξιοποιούν σχάρες εισαγωγής δαπέδου και απομακρύνουν τον αέρα διαμέσου των κενών της οροφής. Η μονάδα στεγάζεται μέσα σε ένα ελεγχόμενο εργαστήριο, το οποίο δρα ως θερμικός εξομαλυντής και με τον τρόπο αυτό χειρίζεται τις ενεργειακές απώλειες και το ενεργειακό κέρδος διαμέσου της δομής της πειραματικής μονάδας. Η ενέργεια εισάγεται στην πειραματική μονάδα χρησιμοποιώντας μια σειρά από μικρά χαλάκια θέρμανσης, τα οποία εξομοιώνουν εσωτερικά θερμοκρασιακά κέρδη, όπως ανθρώπους και ηλεκτρικές συσκευές.



Εικόνα 11.2.2 Σχηματικό διάγραμμα της ψυχόμενης οροφής στο θάλαμο δοκιμών.

Θερμοστοιχεία μετρούν τη θερμοκρασία των τοίχων, των πάνελ ψύξης οροφής, των παγωμένων αγωγών εισαγωγής και εξαγωγής, της δεξαμενής αποθήκευσης, των ψυγείων που ψύχουν το μίγμα που περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης και της μονάδας ανεμιστήρας-σπειρώμα. Το υγρό που κυκλοφορεί μέσα στην ψυχόμενη οροφή ρέει από και επιστρέφει σε ένα κύλινδρο αποθήκευσης ο οποίος ψύχεται με τη βοήθεια ενός εσωτερικού ελικοειδή εναλλάκτη θερμότητας. Ο εναλλάκτης θερμότητας συνδέεται με έναν ψύκτη νερού, το σημείο λειτουργίας του οποίου ελέγχεται χρησιμοποιώντας ένα θερμοστοιχείο PT100 εμβαπτισμένο στο υγρό του κυλίνδρου αποθήκευσης. Η μονάδα που χειρίζεται τον αέρα

ήταν ρυθμισμένη για 100% ανακυκλοφορία αέρα κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Η θερμοκρασία δωματίου είχε επιτρεπόμενη διακύμανση από τους 17 έως τους 22 °C. Οι αρχικές δοκιμές διεξάχθηκαν με νερό και στη συνέχεια ακολούθησε μία σειρά δοκιμών μεταβάλλοντας σαν παράμετρο τη συγκέντρωση του παραπάνω PCM.

11.3 Αποτελέσματα

Όταν χρησιμοποιήθηκε νερό ως υγρό μεταφοράς θερμότητας στην ψυχόμενη οροφή ήταν απαραίτητη μία παροχή της τάξεως των 0.7 lt/s για να έχουμε θερμοκρασία εισόδου 16 °C και θερμοκρασία εξόδου 18 °C. Εάν οι ταχύτητες του ρευστού ήταν μεγαλύτερες από την παραπάνω, το ρευστό έρεε μέσα στο πάνελ χωρίς αξιόλογη άνοδο της θερμοκρασίας κατά πλάτος των εισόδων και εξόδων των πάνελ οροφής. Με την ταχύτητα αυτή το νερό ήταν ικανό να αποσπάσει και να απομακρύνει τα ενεργειακά κέρδη του δωματίου και να διατηρήσει τη θερμοκρασία του σταθερή στους 19 °C. Το νερό αντικαταστάθηκε από ένα μίγμα PCM συγκέντρωσης 40% το οποίο ήταν ικανό να διατηρήσει τη θερμοκρασία στους 20- 21 °C με παροχή 0.25 lt/s. Η Εικόνα 11.3.1 δείχνει τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια 14 ημερών και μία αντίστοιχη μετρούμενη ειδική θερμοχωρητικότητα του υγρού, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες και τα κέρδη της σωλήνωσης και των αντλιών κυκλοφορίας. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του μίγματος όταν το PCM είναι στερεό ή πλήρως υγρό είναι σχεδόν ίδια με αυτή του νερού (4.18 kJ/kgK). Όταν οι δοκιμές γίνονταν με θερμοκρασία εισόδου στο πάνελ γύρω στους 16 °C και θερμοκρασία εξόδου περίπου 17.5 °C, μετρήθηκε μία μέση θερμοχωρητικότητα 9 kJ/kgK, η οποία έπαιρνε κατά περιόδους τιμές 11-12 kJ/kgK.

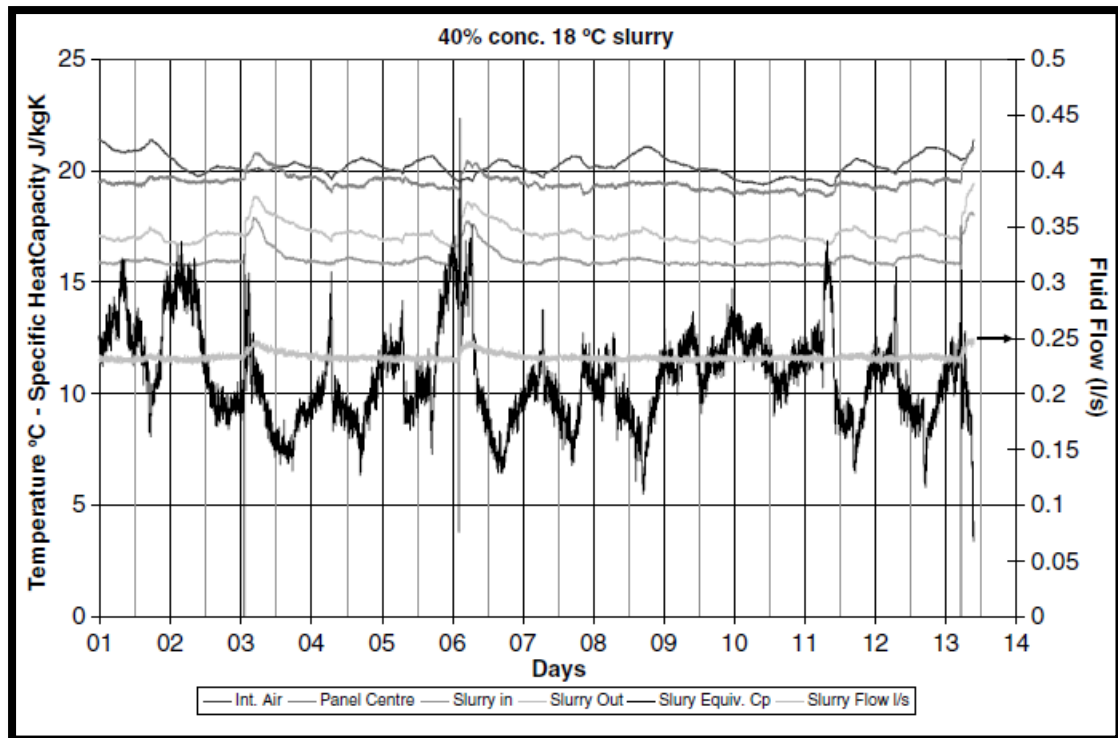
11.4 Συζήτηση

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της πειραματικής μονάδας ψύξης οροφής έχει κάποια δυσκολία εξαιτίας της μικρής διαφοράς των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου, με αποτέλεσμα το σφάλμα ανάγνωσης των θερμοστοιχείων να έχει μεγάλο ποσοστό. Αυτό είναι δύσκολο να υπερνικηθεί εκτός και αν χρησιμοποιηθούν πολύ ακριβά θερμοστοιχεία σε συνδυασμό με εξοπλισμό υψηλής ακρίβειας, τα οποία μπορούν να μειώσουν το μέγιστο σφάλμα από το τρέχων 0.1-0.2 K ανά ανάγνωση θερμοστοιχείου. Για τον ψύκτη ο οποίος ψύχει το μίγμα, αποδείχτηκε δύσκολο να προσδιοριστεί μία κατάλληλη διαδικασία ελέγχου που να τον αποτρέψει να τίθεται εκτός λειτουργίας όταν φτάσει στην προκαθορισμένη θερμοκρασία. Αυτό είναι ένα πρόβλημα, όπως μπορεί να φανεί στα δεδομένα της Εικόνας 11.3.1, μιας και χρειάζονται δώδεκα ώρες ώστε οι θερμοκρασίες να συνέλθουν από την

αύξηση που προκύπτει όταν ο ψύκτης δε λειτουργεί. Μία πιθανή λύση είναι να χρησιμοποιείται ο ψύκτης για να ψύχει μία μεγάλη δεξαμενή εξομάλυνσης, το υγρό της οποίας θα χρησιμοποιείται για να ψύξει το μίγμα.

Η ειδική θερμοχωρητικότητα του υγρού έπεσε σχεδόν σε αυτή του νερού όταν η θερμοκρασία της ροής και της επιστροφής ήταν πάνω από 18 °C. Μία παρόμοια ειδική θερμοχωρητικότητα υπολογίστηκε όταν η θερμοκρασία επιστροφής του μίγματος ήταν κάτω από 16 °C. Μία θερμοκρασία επιστροφής της ροής κάτω από 16 °C θα οδηγούσε σε πολύ μικρή, αν όχι μηδενική, τήξη του PCM μέσα στις μικροκάψουλες, χωρίς απορρόφηση λανθάνουσας θερμότητας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Το ίδιο μπορεί να υποτεθεί και για θερμοκρασία υψηλότερη των 18 °C. Ωστόσο, στήνοντας την πειραματική μονάδα με θερμοκρασία ροής χαμηλότερη των 18 °C και με θερμοκρασία επιστροφής υψηλότερη των 18 °C δεν ήταν η λύση. Στην Εικόνα 11.2.1 η εργαστηριακά μετρούμενη DSC καμπύλη τήξης δείχνει μία θερμοκρασιακή διακύμανση μεταξύ των 14 και 30 °C. Όταν μετράτε πειραματικά, σε εναλλάκτες θερμότητας, τα μίγματα που περιέχουν PCM έχουν πιο απότομο ζενίθ τήξης κοντά στη θερμοκρασία σχεδίασης [87]. Επίσης, οι καμπύλες του μίγματος δείχνουν ότι εάν το PCM έχει λιώσει πλήρως πριν την ψύξη του εμφανίζεται το φαινόμενο του supercooling με τη στερεοποίηση να πραγματοποιείται γύρω στους 5 °C. DSC και πειραματικές παρατηρήσεις έδειξαν ότι εάν το μίγμα του PCM ψυχόταν πριν την πλήρη τήξη του PCM, η παρουσία στερεού υλικού δρούσε σαν αντιδραστήριο κοντά στο οποίο το PCM στερεοποιούνταν σε υψηλότερες θερμοκρασίες [87],[88]. Σαν αποτέλεσμα το σύστημα των ψυχόμενων δοκών βελτιστοποιήθηκε ώστε η θερμοκρασία της ροής επιστροφής να είναι περίπου 17.5 °C. Το μίγμα δεν ψύχεται χαμηλότερα από τους 15 °C ώστε να μεγιστοποιείται η ικανότητα στερεοποίησης του PCM μέσα στο μίγμα.

Αποδείχθηκε ότι το μίγμα που περιέχει PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για να αντικαταστήσει το νερό στις εφαρμογές ψύξης οροφής. Κατά τη διάρκεια ελέγχου δεν υπήρχαν σημάδια κατακάθισης μικροκαψουλών στους σωλήνες, στις καμπές ή γύρω από τις βαλβίδες, και δεν υπήρχε υποβάθμιση του μίγματος. Απλές αντλίες νερού, για παράδειγμα εκείνες που χρησιμοποιούν το υγρό για να λιπαίνουν και να ψύχουν τα εσωτερικά έδρανα δεν είναι κατάλληλες, και έπαψαν να λειτουργούν ύστερα από μερικές βδομάδες χρήσης.



Εικόνα 11.3.1 Υπολογισμένο ισοδύναμο C_p ενός μίγματος PCM με 40% συγκέντρωση όταν χρησιμοποιείται σε πάνελ για ψύξη οροφής.

11.5 Συμπεράσματα

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από την εργαστηριακή μονάδα, ύστερα από τέσσερις μήνες συνεχόμενης λειτουργίας, έδειξαν ότι συγκέντρωση 40% μικροκαψουλών οι οποίες περιέχουν PCM, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο μεταφοράς θερμότητας σε μία εφαρμογή ψύξης οροφής. Απαιτεί ένα σημαντικά μικρότερο ρυθμό ροής, ο οποίος μειώνει τις απαιτήσεις αντλιών και μπορεί να απορροφήσει ενέργεια στο προκαθορισμένο σημείο λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πάνελ όσο αυξάνονται τα κέρδη. Μειωμένοι ρυθμοί ροής θα πρέπει επίσης να οδηγούν σε μειωμένο θόρυβο από τη λειτουργία τέτοιων συστημάτων.

Κεφάλαιο 12

Πειραματική έρευνα και αριθμητική προσομοίωση της θερμικής απόδοσης της οροφής ενός κτιρίου, η οποία ενσωματώνει ένα υλικό αλλαγής φάσης (PCM) για θερμική διαχείριση [89]

12.1 Εισαγωγή

Η θερμική αποθήκευση παίζει σημαντικό ρόλο σε μία ευρεία ποικιλία βιομηχανικών, εμπορικών και αστικών εφαρμογών όταν υπάρχει ανακολουθία μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας. Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας σε ένα υλικό αλλαγής φάσης (PCM) είναι πολύ ελκυστική, εξαιτίας της υψηλής πυκνότητας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και της ισοθερμοκρασιακής συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Πολλές εξελίξεις λαμβάνουν χώρα στο πεδίο της αποθήκευσης θερμότητας με τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σε κτίρια. Έχει αποδειχθεί ότι για την ανάπτυξη ενός συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (LHTS) στον ιστό ενός κτιρίου, η επιλογή του PCM παίζει πολύ σημαντικό ρόλο ξέχωρα από το μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας στο PCM. Με την αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας σε ένα κτίριο ενισχύεται η θερμική άνεση μειώνοντας τη συχνότητα ταλάντωσης της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα, έτσι ώστε η εσωτερική θερμοκρασία να είναι κοντά στα επιθυμητά όρια για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Στην παρούσα εργασία, αναλύεται και συζητάτε μία μελέτη πάνω στη θερμική απόδοση ενός συστήματος αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιεί υλικό αλλαγής φάσης σε ένα κτίριο. Για τη μελέτη της επίδρασης που έχει η ύπαρξη ενός πάνελ στην οροφή με PCM για τη θερμική διαχείριση ενός αστικού κτιρίου, κατασκευάστηκε μία πειραματική εγκατάσταση, η οποία αποτελείται από δύο πανομοιότυπα δωμάτια δοκιμών. Το ένα δωμάτιο κατασκευάστηκε χωρίς PCM στην οροφή για να συγκριθεί με την απόδοση ενός ανόργανου ευτηκτικού PCM (48% CaCl_2 +4.3% NaCl +0.4% KCl +47.3% H_2O), το οποίο έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 26-28 °C. Αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο και για την υπολογιστική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων για τη μελέτη της απόδοσης της οροφής. Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και διάφορες προσομοιωτικές δοκιμές για το μέσο όρο των εξωτερικών συνθηκών για όλους τους μήνες του έτους και για διάφορες άλλες παραμέτρους που είναι αρκετά ενδιαφέρουσες. Κατά τη διάρκεια των μηνών του καλοκαιριού, επειδή το PCM δεν μεταπίπτει στη στερεή του φάση κατά τις νυχτερινές ώρες,

διεξήχθησαν πειράματα για να δοκιμάσουν την πιθανότητα να αφαιρεθεί η θερμότητα από το στρώμα του PCM και της οροφής μέσω κυκλοφορίας νερού μέσα στο πάνελ του PCM.

12.2 Μοντελοποίηση του συστήματος ενσωμάτωσης του PCM στην οροφή του

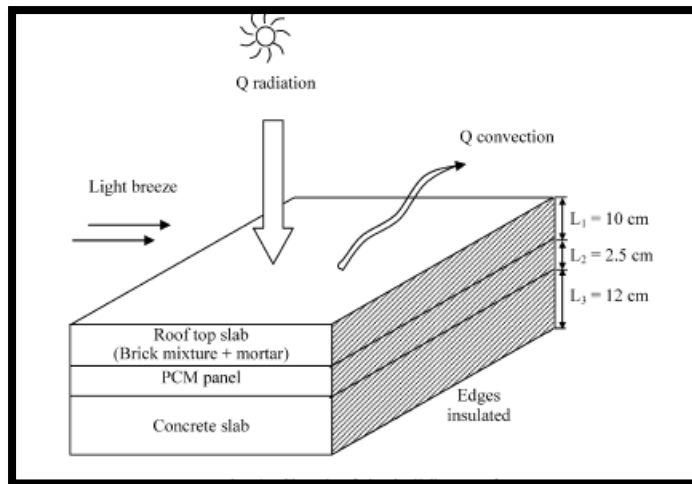
Η μαθηματική διατύπωση και οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης του συστήματος ενσωμάτωσης PCM στην οροφή ενός κτιρίου παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό.

12.2.1 Διατύπωση του προβλήματος

Το φυσικό σύστημα που εξετάζεται είναι ένα πάνελ από ανοξείδωτο ατσάλι (μήκος 2.25m, διάμετρος 6.35mm, αριθμός σωλήνων 12), το οποίο γεμίζεται με PCM, που είναι τοποθετημένο μεταξύ της επάνω πλάκας της οροφής και της κάτω πλάκας από μπετόν, και αποτελεί την οροφή του δωματίου. Σε κάθε κύκλο, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης (τις ώρες ηλιοφάνειας), το PCM που βρίσκεται στο πάνελ μεταπίπτει από τη στερεή στην υγρή κατάσταση. Μιας και η τήξη απαιτεί μεγάλα ποσά θερμότητας όταν φτάσει στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, η θερμοκρασία της τσιμεντένιας πλάκας κανονικά δε θα υπερβεί τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PCM. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποφόρτισης (τις νυχτερινές ώρες), το PCM μεταβαίνει από την υγρή φάση στη στερεή (στερεοποίηση) απορρίπτοντας τη θερμότητά του στο περιβάλλον και στον αέρα που βρίσκεται μέσα στο δωμάτιο. Αυτός ο κύκλος επαναλαμβάνεται κάθε ημέρα.

Ο σύνθετος αυτός τοίχος που παριστάνεται στη Εικόνα 12.2.1, αρχικά διατηρείται σε μία αρχική θερμοκρασία “ T_i ”. Η συνοριακή συνθήκη στην εξωτερική επιφάνεια της στέγης έχει υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη τη συνδυασμένη επίδραση της ακτινοβολίας και της συναγωγής. Για να υπολογισθεί η επίδραση της ακτινοβολίας χρησιμοποιείται η μέση μηνιαία θερμική εναλλαγή ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία είναι διαθέσιμη στο εγχειρίδιο του Tiwari [90] για κάθε ώρα στην πόλη Chennai της Ινδίας. Για τη συναγωγή, η τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (h) υπολογίζεται με βάση την επικρατούσα ταχύτητα του ανέμου χρησιμοποιώντας το συσχετισμό του Nusselt [$Nu_L=0.664(Re_L)^{0.5}(Pr)^{0.33}$].

Η συνοριακή συνθήκη στην εσωτερική επιφάνεια της πλάκας του μπετόν θεωρείται ότι είναι η φυσική συναγωγή. Μιας και η θερμοκρασιακή διαφορά του δωματίου και του τοίχου είναι πολύ μικρή, οι περισσότεροι ερευνητές μέχρι σήμερα έχουν θεωρήσει τον κάτω τοίχο μονωμένο. Ωστόσο, όταν η θερμοκρασιακή διαφορά γίνεται αισθητή, η επίδραση της ροής θερμότητας είναι αξιόλογη, ως εκ τούτου αυτή η επίδραση της συναγωγής λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα ερευνητική εργασία.



Εικόνα 12.2.1 Σκαρίφημα της οροφής του κτιρίου.

12.2.2 Μαθηματική διατύπωση

Για τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος που παρουσιάζεται στην Εικόνα 12.2.1 έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές:

- i) Η αγωγή θερμότητας στο σύνθετο τοίχο είναι μονοδιάστατη και οι τελικές επιδράσεις θεωρούνται αμελητέες.
- ii) Η θερμική αγωγιμότητα της πλάκας του μετόν και του πάνω στρώματος της οροφής θεωρείται σταθερή και δεν μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας.
- iii) Το PCM είναι ομοιογενές και ιστροπικό.
- iv) Η επίδραση της συναγωγής στο τηγμένο PCM θεωρείται αμελητέα.
- v) Η τιμή του συντελεστή C_p του PCM στο πάνελ θεωρείται ότι παίρνει τις παρακάτω τιμές.

$$T < T_m - \varphi, \quad C_p = C_{p,s} \quad (12.2.1)$$

$$T > T_m + \varphi, \quad C_p = C_{p,l} \quad (12.2.2)$$

$$T_m - \varphi < T < T_m + \varphi, \quad C_p = \frac{l}{2\varepsilon} \quad (12.2.3)$$

όπου,

C_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα, l η ιδιότητα της λανθάνουσας θερμότητας, φ το μισό του θερμοκρασιακού εύρους κατά το οποίο λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης και T_m είναι η θερμοκρασία κατά την οποία πραγματοποιείται η αλλαγή φάσης.

- vi) Η τιμή της λανθάνουσας θερμότητας του PCM έχει μοντελοποιηθεί στην παραπάνω εξίσωση ως υψηλή αισθητή θερμότητα κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Κανονικά, όλα τα PCMs αλλάζουν φάση σε ένα εύρος θερμοκρασιών. Στο παρόν

μοντέλο, θεωρείται ότι ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας λαμβάνει μία ομοιόμορφη τιμή κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης, παρόλο που στην πραγματικότητα υπάρχει μεταβολή του C_p μέσα σε αυτό το μικρό εύρος θερμοκρασίας.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές, η επικρατούσα εξίσωση και οι συνοριακές συνθήκες αναπτύσσονται παρακάτω.

Επικρατούσα εξίσωση:

$$k_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} = \rho_m C_{p,m} \frac{\partial T_m}{\partial t} \quad [0 < x, L]; m = 1, 2, 3 \quad (12.2.4)$$

όπου $m=1$ για την επάνω πλάκα της οροφής, $m=2$ για το πάνελ του PCM, $m=3$ για την κάτω πλάκα από μπετόν.

Η ίδια εξίσωση ισχύει και για τις τρεις περιοχές με τα διαφορετικά υλικά, με μόνη αλλαγή τις διαφορετικές τιμές των k, ρ, C_p . Στο εξωτερικό σύνορο ($x=0$) όπου η επιφάνεια εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία η συνοριακή συνθήκη γίνεται:

$$k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=0} = q_{rad} + h_o (T_\infty - T_{x=0}) \quad (12.2.5)$$

Η επίδραση της ακτινοβολίας θεωρείται μόνο κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας. Στο τελευταίο επίπεδο της πλάκας του μπετόν ($x=L$), η συνοριακή συνθήκη είναι:

$$k_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right|_{x=L} = h_i (T_{x=L} - T_{room}) \quad (12.2.6)$$

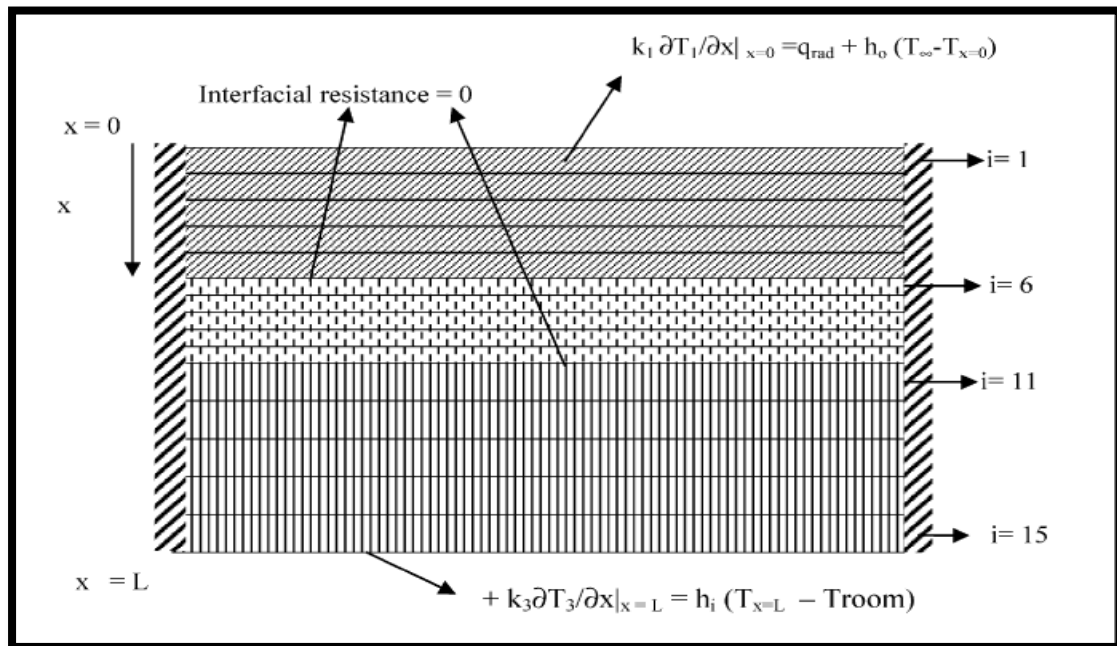
Η στιγμιαία συνέχεια της ροής της θερμότητας και της θερμοκρασίας στις διεπιφάνειες $x=L_1$ και L_2 έχει διατηρηθεί.

Στην Εικόνα 12.2.2 φαίνεται το πλέγμα των πεπερασμένων όγκων που έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση. Κάθε ένα από τα διαφορετικά υλικά του σύνθετου στρώματος έχει χωριστεί σε πέντε ίσους όγκους ελέγχου. Η επικρατούσα εξίσωση έχει διακριτοποιηθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ημι- πεπλεγμένων πεπερασμένων όγκων.

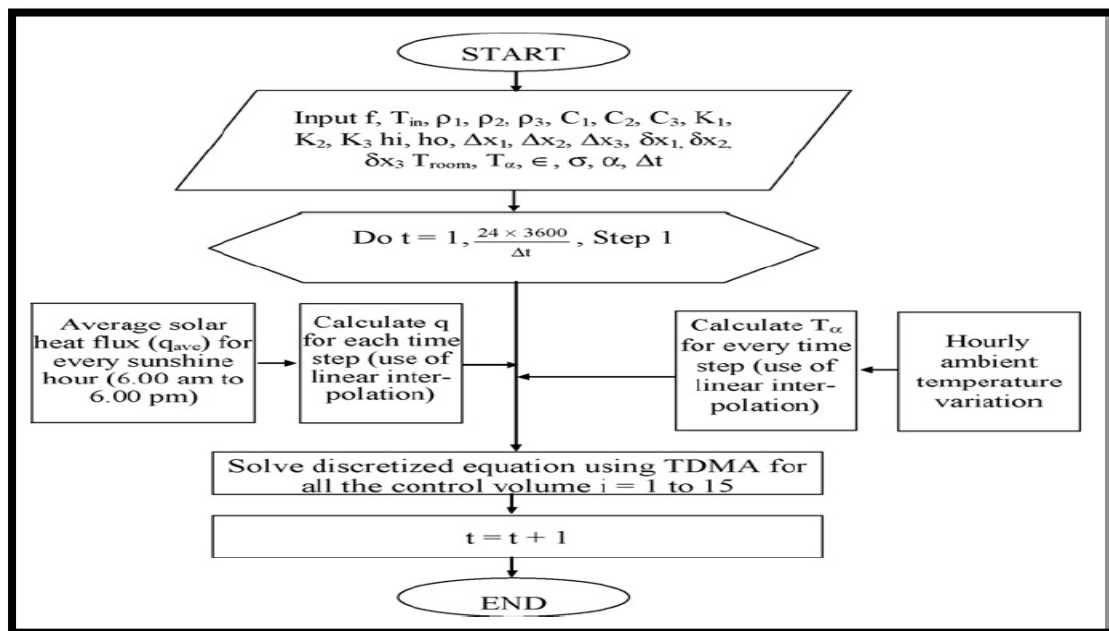
12.3 Υπολογιστική διαδικασία

Η κυριαρχούσα εξίσωση μαζί με τις συνοριακές συνθήκες διακριτοποιούνται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ημι- πεπλεγμένων πεπερασμένων όγκων. Η περιοχή της ανάλυσης έχει χωριστεί σε πέντε όγκους ελέγχου για κάθε υλικό. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε χρονικό βήμα 2. Το σύστημα των εξισώσεων επιλύθηκε με τη χρήση του αλγορίθμου του τριδιαγώνιου πίνακα (TDMA). Η μεθοδολογία της επίλυσης φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 12.3.1. Οι αρχικές τιμές της θερμοκρασίας αποκτούνται ύστερα από

την εκτέλεση του προγράμματος, συνεχόμενα για κάποιες μέρες ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση των αποτελεσμάτων στην ίδια τιμή.



Εικόνα 12.2.2 Πλέγμα πεπερασμένων όγκων για την ανάλυση.



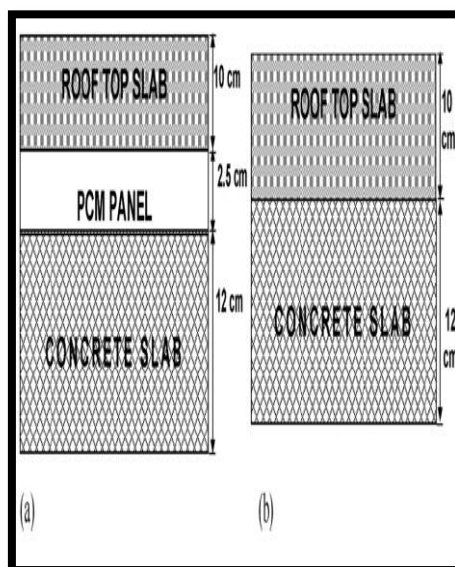
Εικόνα 12.3.1 Διάγραμμα ροής.

12.4 Πειραματική έρευνα

Η πειραματική εγκατάσταση αποτελείται από δύο πανομοιότυπα δωμάτια (1.22m x 1.22m x 2.44m), όπως φαίνεται στην Εικόνα 12.4.1, τα οποία κατασκευάστηκαν για να μελετηθεί η επίδραση της ύπαρξης PCM στην οροφή του κτιρίου. Το ένα δωμάτιο έχει πάνελ με PCM στην οροφή και το άλλο όχι. Έτσι, είναι εφικτή η μελέτη της θερμικής απόδοσης της οροφής με PCM σε σύγκριση με τη συμβατική οροφή.



Εικόνα 12.4.1 Πειραματικά δωμάτια δοκιμών.



Εικόνα 12.4.2 Κατακόρυφη τομή της οροφής α) με πάνελ PCM β) χωρίς πάνελ PCM.

Στην Εικόνα 12.4.2 φαίνονται οι κατακόρυφες τομές της οροφής με και χωρίς PCM. Οι εσωτερικοί τοίχοι, εκτός του ταβανιού, είναι μονωμένοι με κοντραπλακέ πάχους 6mm σε όλες τις πλευρές για να μελετηθεί αποκλειστικά η επίδραση του πάνελ της οροφής. Τα χαρακτηριστικά του PCM που χρησιμοποιείται δίνονται στον Πίνακα 12.4.1 που ακολουθεί.

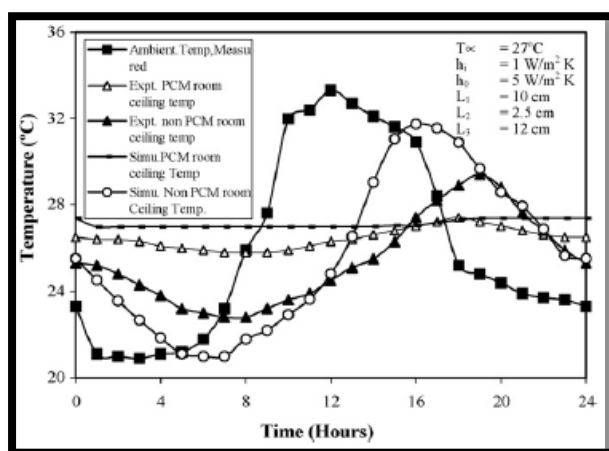
Πίνακας 12.4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του PCM της εφαρμογής

PCM material	48% CaCl ₂ + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3% H ₂ O
Appearance (color)	Grey
Phase change temperature (°C)	26–28
Density (kg/m ³)	1640
Latent heat of fusion (kJ/kg)	188
Thermal conductivity (W/mk)	
Solid	1.09 [0–27 °C]
Liquid	0.54 [28–60 °C]
Specific heat (J/kg K)	1440 [0–26.5 °C], 125,000 [26.5–28 °C], 1440 [28–60 °C]

12.5 Αποτελέσματα και συζήτηση

12.5.1 Πειραματική τεκμηρίωση

Το μοντέλο που παρουσιάζεται στη θεωρητική μελέτη ελέγχεται χρησιμοποιώντας τα πειραματικά αποτελέσματα που αποκτήθηκαν κατά τις δοκιμές που διεξάχθηκαν τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων οι θερμοκρασίες του δωματίου ποικίλουν γύρω από τους 27 ± 3 °C. Στην Εικόνα 12.5.1 φαίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας της κάτω επιφάνειας της πλάκας του μπετόν (ταβάνι) με και χωρίς δωμάτια με PCM, ώστε να γίνει σύγκριση των θεωρητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 12.5.1 Κατανομή της θερμοκρασίας του ταβανιού στα δωμάτια με και χωρίς το πάνελ του PCM για την πειραματική και τη θεωρητική μελέτη.

Οι διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας μεταξύ των πειραματικών και των θεωρητικών αποτελεσμάτων οφείλονται στους ακόλουθους παράγοντες:

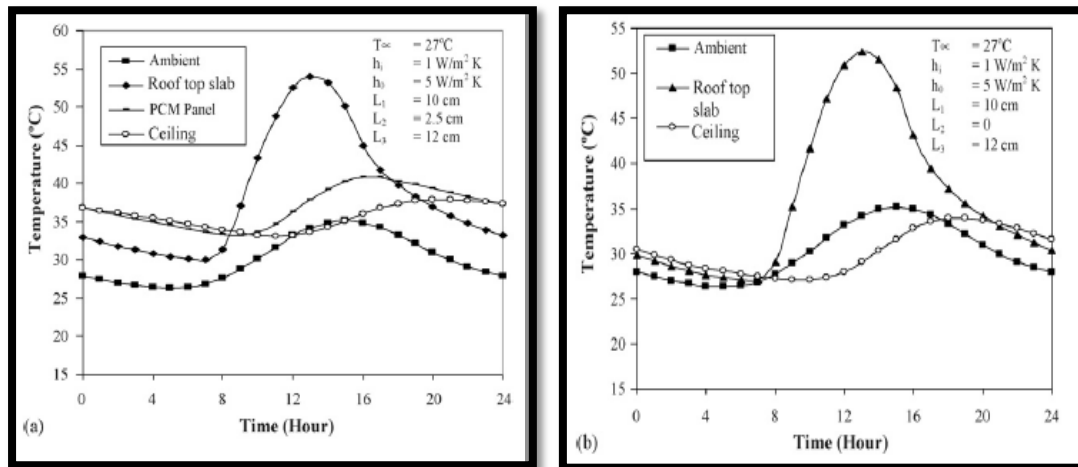
- Στη θεωρητική ανάλυση θεωρείται σταθερή θερμοκρασία, που όμως δεν παρατηρείται κατά τη διάρκεια της πειραματικής.
- Η πραγματική αλλαγή φάσης μπορεί να μη συμβαίνει ακριβώς στο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης που έχει ορισθεί στη θεωρητική ανάλυση.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα, η τάση στα θεωρητικά αποτελέσματα βρίσκεται σε λογική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Συνεπώς, η θεωρητική αυτή μελέτη θα επεκταθεί για όλους τους μήνες του έτους.

12.5.2 Μεταβολή της θερμοκρασίας της οροφής στα δωμάτια με και χωρίς PCM

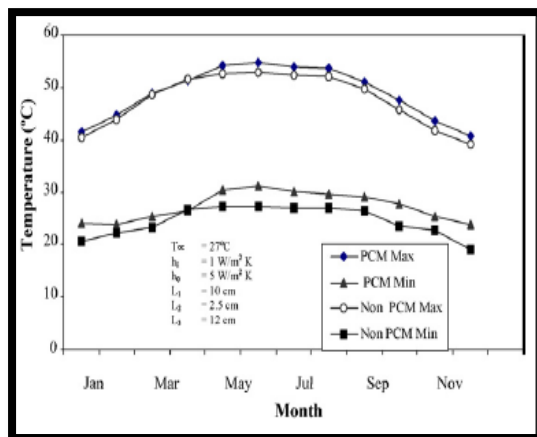
Η διακύμανση της θεωρητικής θερμοκρασίας της οροφής στα δωμάτια με και χωρίς PCM για το μήνα Ιούλιο φαίνεται στην Εικόνα 12.5.2. Επίσης, παρουσιάζονται και η

διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του μήνα, η θερμοκρασία της πλάκας της οροφής, η θερμοκρασία του ταβανιού και η θερμοκρασία του PCM για το δωμάτιο που περιέχει PCM.

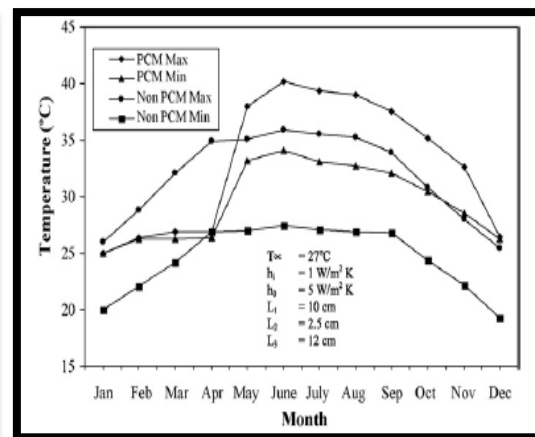


Εικόνα 12.5.2 Θερμοκρασιακή διακύμανση της οροφής το μήνα Ιούλιο, α) στο δωμάτιο με το PCM, β) δωμάτιο χωρίς το PCM.

Οι Εικόνες 12.5.3 και 12.5.4 δείχνουν τη μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασιακή διακύμανση στο δωμάτιο με και χωρίς το PCM για το ταβάνι και την πάνω επιφάνεια της πλάκας της οροφής, αντίστοιχα. Το πάνω μέρος της στέγης φτάνει στη μέγιστη θερμοκρασία το μεσημέρι εξαιτίας της μέγιστης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 12.5.3 Μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασιακή κατανομή στην επιφάνεια της στέγης για το δωμάτιο με και χωρίς PCM.



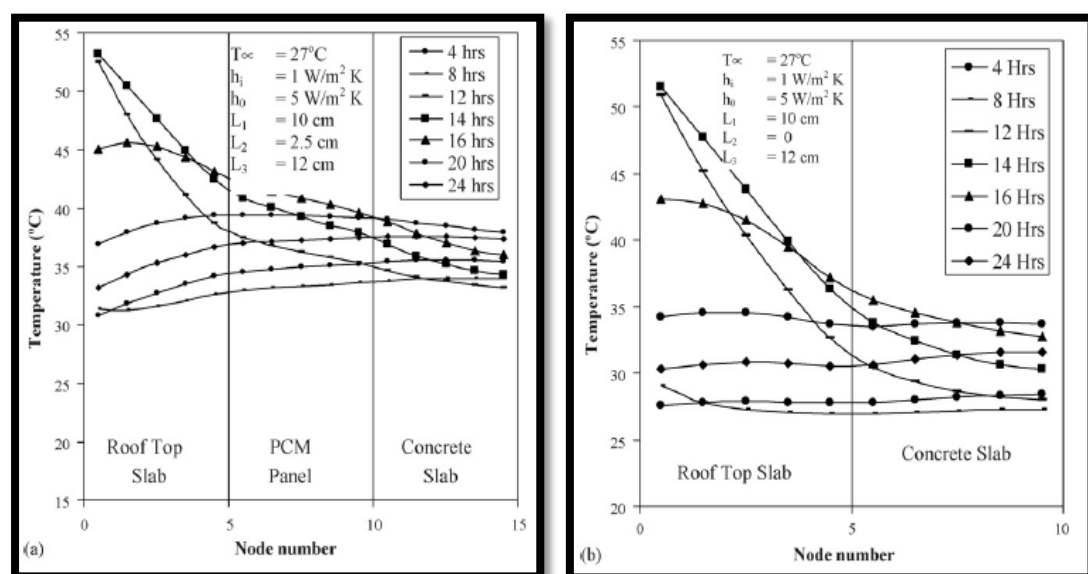
Εικόνα 12.5.4 Μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασιακή κατανομή του ταβανιού στο δωμάτιο με και χωρίς PCM.

Παρατηρείται από όλες τις εικόνες ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας της στέγης είναι ελαφρώς υψηλότερη στο δωμάτιο με το PCM από ότι στο δωμάτιο χωρίς το PCM για όλους τους μήνες. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του υγρού

PCM, η οποία μειώνει τη μετάδοση θερμότητας στο δωμάτιο που με τη σειρά της αυξάνει τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της στέγης στο δωμάτιο που περιέχει PCM. Στο δωμάτιο χωρίς το PCM η θερμοκρασία του ταβανιού φτάνει τη μέγιστη τιμή της στις 18:00, ενώ στο δωμάτιο με το PCM στις 20:00. Αυτό οφείλεται στην αργή απομάκρυνση της θερμότητας από το PCM και τους τοίχους στο περιβάλλον μετά το τέλος των ωρών ηλιοφάνειας.

12.5.3 Κατανομή θερμοκρασία κατά μήκος της οροφής

Η θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος της οροφής σε διάφορα διαστήματα δίνεται στην Εικόνα 12.5.5 για το μήνα Ιούλιο.

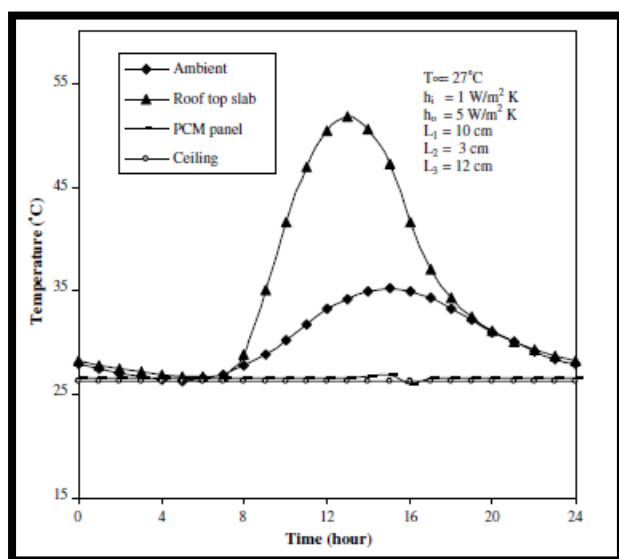


Εικόνα 12.5.5 Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της οροφής για το μήνα Ιούλιο. a) δωμάτιο με PCM, b) δωμάτιο χωρίς PCM.

Για το μήνα Ιούλιο, η διακύμανση της θερμοκρασίας παρατηρείται ακόμη και στο δωμάτιο με το PCM. Επιπλέον, η θερμοκρασία του ταβανιού διατηρείται πάντα σε θερμοκρασία υψηλότερη από εκείνη που υπολογίζεται για το δωμάτιο χωρίς το PCM. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη διάρκεια των μηνών Μάιος-Νοέμβριος, η θερμοκρασία της στέγης είναι πάντα υψηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης του PCM. Συνεπώς, το PCM δεν χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια των μηνών αυτών. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί μία σταθερή θερμοκρασία άνεσης κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι να γίνει εκτεταμένη θεωρητική μελέτη κατά την οποία θα τοποθετηθεί διπλό στρώμα PCM στην οροφή.

12.6 Επίδραση της παροχής νερού στους σωλήνες που διατρέχουν το στρώμα του PCM

Στην παρούσα πειραματική έρευνα, νερό εισέρχεται στους σωλήνες που διαπερνούν το στρώμα του PCM με σκοπό να απομακρύνουν τη θερμότητά του με γρηγορότερο ρυθμό. Στη θεωρητική μελέτη για το μήνα Ιούλιο γύρω στις 16:00, η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται ξαφνικά κατά $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, γεγονός που αντιπροσωπεύει την αφαίρεση της λανθάνουσας θερμότητας από το PCM (περίπου $27\text{ }^{\circ}\text{C}$). Με τον τρόπο αυτό, η θερμοκρασία της κάτω επιφάνειας της πλάκας του σκυροδέματος διατηρείται σε ένα σταθερό επίπεδο των $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ όπως φαίνεται και στην Εικόνα 12.6.1. Η ποσότητα του νερού που απαιτείται για την απομάκρυνση της λανθάνουσας θερμότητας από μία μονάδα επιφάνειας έχει υπολογισθεί 830 kg/m^3 . Βέβαια, τόσο μεγάλη ποσότητα κρύου νερού ανά μονάδα επιφάνειας την καλοκαιρινή περίοδο δεν είναι εύκολα διαθέσιμη. Για το λόγο αυτό μελετάται ένα παθητικό σύστημα, το οποίο έχει ένα παραπάνω στρώμα PCM με διαφορετικό θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης. Το νέο στρώμα είναι τοποθετημένο επάνω από το παλιό και έχει σαν στόχο τη μείωση της μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας.



Εικόνα 12.6.1 Θεωρητική έρευνα για το δωμάτιο με το PCM για το μήνα Ιούλιο με κυκλοφορία νερού.

12.7 Συμπεράσματα

Αρκετές πολλά υποσχόμενες εξελίξεις λαμβάνουν χώρα στον τομέα της αποθήκευσης θερμότητας με τη χρήση PCMs σε κτίρια. Είναι προφανές ότι η θερμική βελτίωση ενός κτιρίου με την εισαγωγή PCMs εξαρτάται από το θερμοκρασιακό εύρος

αλλαγής φάσης του PCM, τον τύπο του PCM, το κλίμα, το σχεδιασμό και τον προσανατολισμό του κτιρίου. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων αυτών είναι θεμελιώδης για την επίτευξη της πιθανότητας επιτυχίας κατά την ενσωμάτωση των PCMs στα δομικά στοιχεία. Μία λεπτομερής μελέτη είναι απαραίτητη για την επιλογή του υλικού και την εφαρμογή του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας με τη βοήθεια PCMs σε κτίρια μιας συγκεκριμένης περιοχής. Το PCM που επιλέγεται με βάση το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης για μία περιοχή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάποια άλλη. Στην παρούσα μελέτη για να βελτιωθεί η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας πρέπει να εξετασθεί η περίπτωση τοποθέτησης ενός επιπλέον στρώματος PCM στην οροφή.

Κεφάλαιο 13

Αξιοποίηση ενός θερμικά ενεργητικού πάνελ οροφής με PCM για εφαρμογές σε κτίρια εκσυγχρονισμένα και ελαφριάς κατασκευής [27]

13.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας, χρησιμοποιούνται κυρίως ψυγεία-συμπιεστές για να παρέχουν την απαραίτητη ψυκτική ενέργεια. Παρόλα αυτά, καινοτόμες λύσεις στοχεύουν στην αξιοποίηση φυσικών πηγών ψύξης. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν τη χρήση εναλλακτών θερμότητας που παίρνουν τη θερμότητα από το έδαφος, του υπεδάφιου νερού ή του εξωτερικού αέρα. Ωστόσο, οι ανανεώσιμες αυτές πηγές ενέργειας συχνά δεν είναι ικανές να παρέχουν την απαραίτητη ψυκτική ισχύ ή η παροχή ενέργειας δε συμπίπτει χρονικά με τη ζήτηση. Παρόλο που ο εξωτερικός αέρας είναι διαθέσιμος παγκοσμίως, για παράδειγμα, η θερμοκρασία του τους καλοκαιρινούς μήνες συνήθως είναι χαμηλή μόνο κατά τη διάρκεια της νύχτας ώστε να είναι δυνατή η χρήση του ως μέσο ψύξης.

Ένα κατάλληλο σύστημα θερμικής αποθήκευσης είναι απαραίτητο ώστε να ξεπεραστεί η παραπάνω χρονική υστέρηση. Τα συνηθισμένα συστήματα νερού αποδοκιμάζονται εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους της εγκατάστασης που απαιτούν καθώς και της κατανομής του χώρου που χρειάζονται για να αποθηκεύσουν ικανοποιητική ενέργεια για να καλύψουν τις καθημερινές ανάγκες. Τα θερμικά ενεργοποιημένα συστήματα κτιρίων (tabs) [91], τα οποία χρησιμοποιούν τη δομή του κτιρίου σαν λεκάνη απόρριψης θερμότητας, είναι μία πιο πρόσφατη προσέγγιση. Τα θερμικά οφέλη κατά τη διάρκεια της ημέρας αποθηκεύονται σε στερεά δάπεδα ή πλάκες, τα οποία με τη σειρά τους ψύχονται εκ νέου σε μία κατάλληλη χρονική στιγμή με τη βοήθεια ενός συστήματος σωληνών νερού. Η ενέργεια που απομακρύνθηκε απορρίπτεται στο εξωτερικό περιβάλλον, για παράδειγμα, διαμέσου ενός πύργου ψύξης. Το σύστημα αυτό μπορεί να ενσωματωθεί σε καινούρια κτίρια, όπου με το σωστό σχεδιασμό οι σωληνώσεις θα περνούν μέσα από το στρώμα του πατώματος. Η τροποποίηση των ήδη υπάρχοντων κτιρίων, από την άλλη, δημιουργεί ορισμένα προβλήματα. Η εγκατάσταση σε ήδη υπάρχοντα κτίρια τέτοιων συστημάτων, όπως αεραγωγοί, συχνά γίνεται στην οροφή με ψευδοροφή, η οποία αποτρέπει τη μεταφορά θερμότητας από την πηγή στα δομικά στοιχεία. Έτσι εξηγείται η έλλειψη μονάδων αποθήκευσης θερμότητας σε ανακαινισμένα κτίρια.

Η παρούσα μελέτη περιγράφει την εξέλιξη ενός θερμικά ενεργητικού πάνελ οροφής όσον αφορά την ενσωμάτωσή του σε κτίρια ανακαινισμένα και ελαφριάς κατασκευής. Ο σχεδιασμός του νέου πάνελ οροφής εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες του υλικού αλλαγής

φάσης (PCM) παραφίνη. Η υψηλή θερμοχωρητικότητά της κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης καθιστά επιτρεπτό το πάχος του πάνελ να μην υπερβαίνει τα 5 cm. Ο ενεργητικός χειρισμός της θερμικής αποθήκευσης επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση σωλήνων νερού στο στρώμα του PCM.

13.2 Η έννοια του καινούριου πάνελ οροφής

13.2.1 Η βασική αρχή και οι απαιτήσεις

Η αρχική προτεραιότητα ήταν η επίτευξη μιας θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας, η οποία θα ήταν κατά προσέγγιση ίση με το θερμικό κέρδος του χώρου κατά τη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου. Επιπλέον, εξαιτίας συγκεκριμένων περιορισμών που επιβάλλονται από τα σχέδια της ανακαίνισης και της μετατροπής του κτιρίου, ο χώρος αποθήκευσης της θερμότητας θα έπρεπε να μπει στο εσωτερικό του κτιρίου και να καταλάβει τον ελάχιστο χώρο.

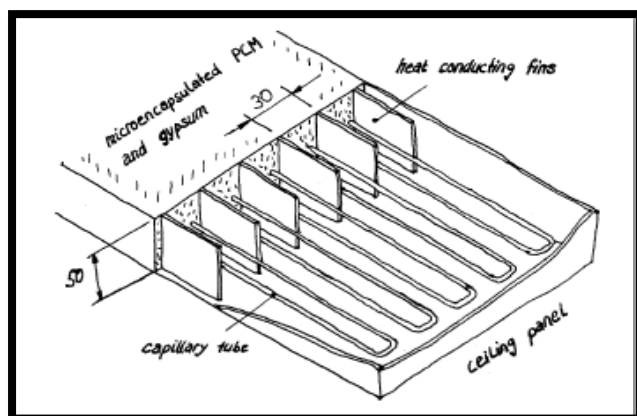
Οι παραπάνω απαιτήσεις σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το ταβάνι προσφέρει τον πιο κατάλληλο χώρο μέσα σε ένα κτίριο για αυτού του είδους την εγκατάσταση, οδήγησαν στην επιλογή του ως το καταλληλότερο αποθηκευτικό μέρος από την αρχή της μελέτης. Το θέμα που απασχόλησε αρκετά ήταν το πώς θα παρεχόταν ικανοποιητική θερμική μάζα μέσα σε ένα πάνελ τόσο μικρού πάχους. Η βέλτιστη λύση που προέκυψε ήταν η χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCMs), μιας και η αλλαγή φάσης επιτρέπει την αποθήκευση και την απελευθέρωση σημαντικής ποσότητας ψυκτικής ενέργειας. Το PCM στο πάνελ της οροφής τήκεται κατά τη διάρκεια των ωρών της ηλιοφάνειας, λόγω της έκθεσής του στα θερμικά φορτία, και στερεοποιείται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν ψύχεται από το σύστημα των ενσωματωμένων σωλήνων νερού. Η προσωρινή αποθήκευση της θερμικής ενέργειας στο PCM έριξε το θερμοκρασιακό εύρος μέσα στο κτίριο, ενώ παράλληλα έγινε εφικτό η διαδικασία απόρριψης της θερμότητας να μην είναι ταυτόχρονη χρονικά με το θερμικό κέρδος.

13.2.2 Πραγματοποίηση της ιδέας

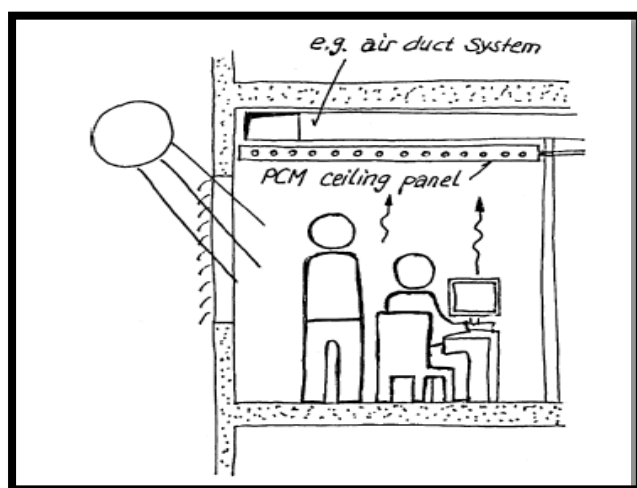
Μία έρευνα σχετικά με τους διάφορους τρόπος ενσωμάτωσης του PCM στο πάνελ της οροφής αποκάλυψε δυσκολίες στη χρήση “καθαρού” PCM. Μία τέτοια διάταξη θα χρειαζόταν πολύ αυστηρά μέτρα πυροπροστασίας για να αποφύγει τη διαρροή της υγρής παραφίνης. Αντί αυτού, επιλέχθηκε παραφίνη μέσα σε μικροκάψουλες, η οποία τοποθετήθηκε μέσα σε ένα κατάλληλο υλικό-φορέα (στην περίπτωση αυτή το υλικό αυτό ήταν ο γύψος). Μέσα στο γύψο το PCM περιβάλλεται από μία σταθερή δομή, ενώ το

οργανικό νερό που εμπεριέχεται σε αυτόν καθυστερεί την εξάπλωση της φλόγας σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Η συνολική ιδέα για το πάνελ οροφής υιοθετεί την παρακάτω διάταξη (Εικόνα 13.2.1): ένα έλασμα από ατσάλι σε μορφή δίσκου περιέχει το συνδυασμό PCM/γύψου, ενώ παρέχει στο πάνελ την απαραίτητη μηχανική σταθερότητα. Ένα μίγμα που αποτελείται από PCM σε μικροκάψουλες και γύψο χύνεται μέσα στο δίσκο. Ο ενεργητικός έλεγχος της θερμικής μάζας επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση ενός συστήματος σωλήνων νερού μέσα στο μίγμα του γύψου. Εάν είναι απαραίτητο, η θερμική αγωγή μέσα στο μίγμα μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη πτερυγίων από αλουμίνιο. Παρά το γεγονός ότι το πάνελ σχεδιάστηκε αρχικά για να τοποθετηθεί στην οροφή, μπορεί εξίσου εύκολα να τοποθετηθεί και στους τοίχους του κτιρίου (Εικόνα 13.2.2).



Εικόνα 13.2.1 Σχηματική απεικόνιση του θερμικά ενεργητικού πάνελ με PCM.



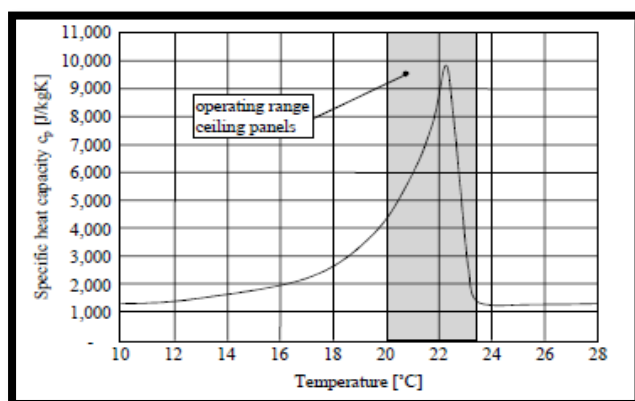
Εικόνα 13.2.2 Εγκατάσταση του πάνελ οροφής στο εσωτερικό ενός κτιρίου σε ψευδοροφή.

13.3 Φυσικές ιδιότητες του πάνελ οροφής με PCM

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανάπτυξης, το σύνθετο υλικό του πάνελ της οροφής βελτιστοποιήθηκε και προσαρμόστηκε ώστε να εξυπηρετεί τις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Ο Πίνακας 13.3.1 και η Εικόνα 13.3.1 παρουσιάζουν τις συνολικές ιδιότητες της τελικής εκδοχής του πάνελ. Αποτέλεσαν, επίσης, τη βάση για τη σύγκριση του μοντέλου με τα εργαστηριακά πειράματα.

Πίνακας 13.3.1 Φυσικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού του πάνελ

Physical properties of the composit ceiling panel	
Quantity	Value
Density (kg/m ³)	1030
Thermal conductivity (W/mK)	1.15
Amount of micro-encapsulated PCM (kg/m ²)	13.3
Melting peak (°C)	22



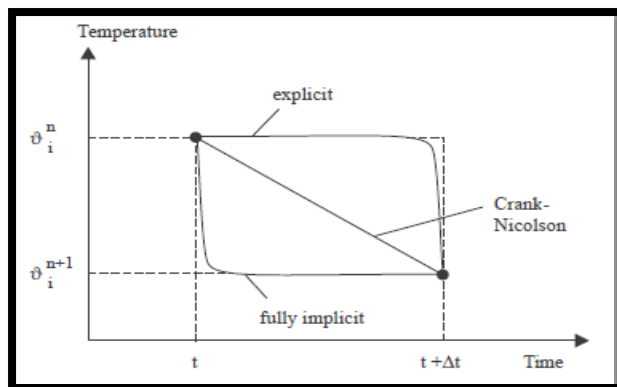
Εικόνα 13.3.1 Η ειδική θερμοχωρητικότητα του πάνελ με το PCM ύστερα από βελτιστοποίηση.

13.4 Θερμική μοντελοποίηση συστημάτων με PCMs στους τοίχους

Για να βοηθηθεί η υπολογιστική ανάλυση του πάνελ, επινοήθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο για να εξομοιωθούν οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Η ενσωμάτωση του μοντέλου στο πρόγραμμα εξομοίωσης TRNSYS [92] επέτρεψε περαιτέρω έρευνα για τη μελέτη της συμπεριφοράς πραγματικών κτιρίων που έχουν πάνελ οροφής με PCM.

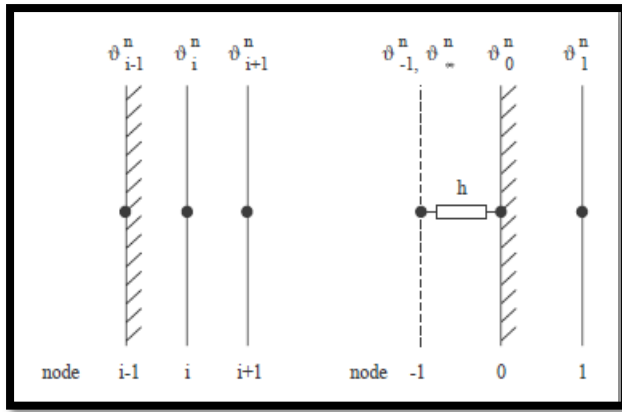
13.4.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται δύο διαφορετικές μέθοδοι προσέγγισης της αλλαγής φάσης από στερεό σε υγρό και αντίστροφα. Στην πρώτη, η ουσία έχει μία διακεκριμένη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και μία αυστηρά οριοθετημένη διεπιφάνεια (ανόργανα PCMs, π.χ. υδατικά άλατα). Στη δεύτερη, η ουσία αλλάζει φάση σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, με μία πολτώδη περιοχή να υπάρχει μεταξύ της στερεής και της υγρής φάσης (οργανικά PCMs, π.χ. παραφίνες). Εφόσον στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάζεται η παραφίνη ως PCM, η εστίαση θα γίνει στη δεύτερη μέθοδο. Θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (FD) για να προσεγγιστούν αριθμητικά οι διαφορικές εξισώσεις (PDE), οι οποίες είναι παρόμοιες με την έρευνα στην αναφορά [93]. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν επιλύθηκαν με τη βοήθεια της αναλυτικής μεθόδου, της μεθόδου Crank-Nicolson και της πλήρως πεπλεγμένης μεθόδου και τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας συγκριτικά και για τρεις παρουσιάζονται στην Εικόνα 13.4.1.



Εικόνα 13.4.1 Διακύμανση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους [94].

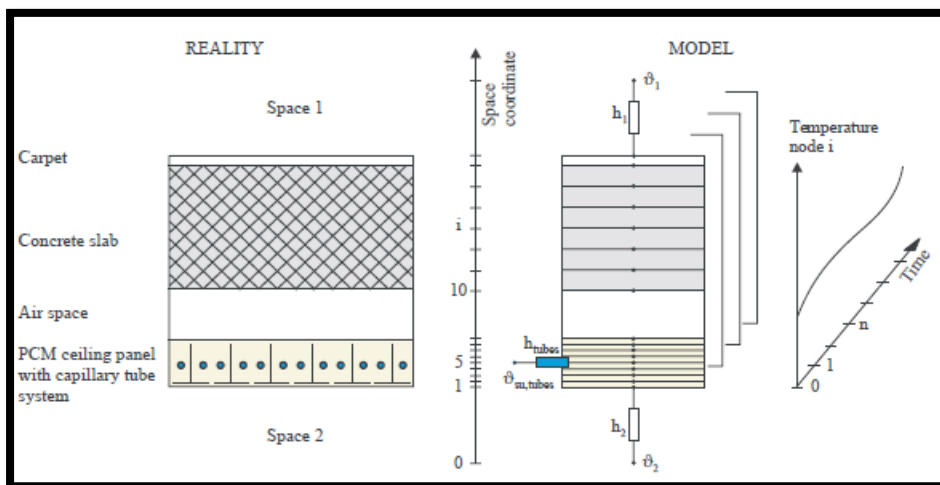
Για τις παραπάνω εξισώσεις εξετάζονται δύο τύπου συνοριακών εξισώσεων. Στην πρώτη περίπτωση, επιβάλλονται γνωστές θερμοκρασίες στους οριακούς κόμβους. Στη δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιούνται συνοριακές συνθήκες συναγωγής θερμότητας στην επιφάνεια. Στην Εικόνα 13.4.2 παρουσιάζονται τρεις κόμβοι για να γίνει κατανοητή η εφαρμογή των δύο διαφορετικών τύπων συνοριακών συνθηκών στους οριακούς κόμβους του πλέγματος.



Εικόνα 13.4.2 Παράδειγμα τριών κόμβων για θερμοκρασίες που έχουν επιβληθεί (αριστερά) και για συνοριακές συνθήκες συναγωγής (δεξιά).

13.4.2 Μοντελοποίηση

Το θεωρητικό μοντέλο μεταφέρθηκε σε ένα κώδικα προγράμματος και ενσωματώθηκε στο TRNSYS [92]. Για την επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας ταυτόχρονα, σε ένα αποδεκτό χρονικό βήμα, χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς η μέθοδος Crank-Nikolson. Η σύζευξη του νέου μοντέλου στον τύπο κτιρίου 56 διεξάχθηκε με συνοριακές συνθήκες συναγωγής. Μία σχηματική παρουσίαση του μοντέλου δίνεται στην Εικόνα 13.4.3. Επιτρέπει τον υπολογισμό της θερμικής συμπεριφοράς ενός μονοδιάστατου συστήματος, το οποίο αποτελείται από κοινά οικοδομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα, το ξύλο ή η μόνωση σε συνδυασμό με το PCM. Οι ιδιότητες των υλικών των μονών στρωμάτων εισάγονται με τη μορφή μαθηματικών συναρτήσεων ή μετρούμενων δεδομένων, ειδικά στην περίπτωση της θερμοχωρητικότητας του PCM. Ένα σύστημα σωλήνων νερού μπορεί να συνδυαστεί σε κάθε κόμβο με σκοπό την ψύξη.



Εικόνα 13.4.3. Μοντέλο υπολογισμού για σύστημα τοίχου με ενσωματωμένο στρώμα PCM.

13.5 Θερμικός σχεδιασμός του πάνελ οροφής

13.5.1 Θερμικές απαιτήσεις για το πάνελ οροφής

Τα πάνελ οροφής σχεδιάστηκαν για χρήση σε πρότυπα κτίρια γραφείων, τα οποία έχουν υψηλά θερμικά φορτία. Για να επιτευχθεί η κατάλληλη θερμική άνεση η θερμοκρασία του δωματίου θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των 21 και 28 °C. Επομένως, για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της χρονικής υστέρησης μέρας/νύχτας η θερμική ικανότητα αποθήκευσης του πάνελ έπρεπε να συμβιβάσει τα θερμικά κέρδη μέσα στο χώρο κατά τη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου. Πρότυπες πλάγιες όψεις κτιρίων με γραφεία και δεδομένα τυπικών προσόψεων οικοδομημάτων με μεγάλες επιφάνειες τζαμιών χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογισθούν τα παρακάτω θερμικά οφέλη μέσα στο κτίριο σε συνάρτηση της επιφάνειας του πατώματος:

High internal thermal loads, open-plan office (Wh/m ² day)	130
Solar gains in summer (Wh/m ² day)	190
Total (Wh/m ² day)	320

Για να απλουστευτεί ο προσδιορισμός των συνοριακών συνθηκών για τις εργαστηριακές δοκιμές υποτέθηκε οκτάωρη έκθεση στο συνολικό θερμικό φορτίο.

13.5.2 Προσομοιωτικοί υπολογισμοί για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων ιδιοτήτων του πάνελ

Προσομοιωτικοί υπολογισμοί διεξάχθηκαν για να καθοριστούν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του πάνελ, βασισμένοι στις ιδιότητες των βασικών υλικών. Οι κύριοι παράμετροι περιλάμβαναν το πάχος του σύνθετου στρώματος του PCM/γύψου, την αναλογία της παραφίνης και τις ελάχιστες απαιτήσεις για το PCM, όπως το εύρος τήξης και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης.

Η διαδικασία σχεδιασμού επικεντρώθηκε σε ένα περιβάλλον γραφείου. Τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν είναι τα ακόλουθα: χρειάζεται ένα πάνελ συνολικού πάχους 5 cm για να αποθηκεύσει συνολικά θερμικά κέρδη 320 Wh/m²day. Η ποσότητα του PCM στο γύψο πρέπει να είναι τουλάχιστον το 25% κατά βάρος.

Για να επιλεχθούν οι θερμοκρασιακές συνοριακές συνθήκες πρέπει το εύρος τήξης της παραφίνης να προσαρμοστεί προσεκτικά στη συγκεκριμένη κατάσταση. Η περιοχή με τις μέγιστες τιμές ειδικής θερμότητας θα πρέπει δηλαδή να αντιστοιχεί σε 21-22 °C.

Για την αποφυγή μεγάλων θερμοκρασιακών κλίσεων μέσα στο υλικό, το πάνελ θα πρέπει να παρουσιάζει καλή θερμική αγωγιμότητα. Στην προκειμένη περίπτωση οι υπολογισμοί έδειξαν την τιμή $k=1.2 \text{ W/mK}$ για το συντελεστή συναγωγής.

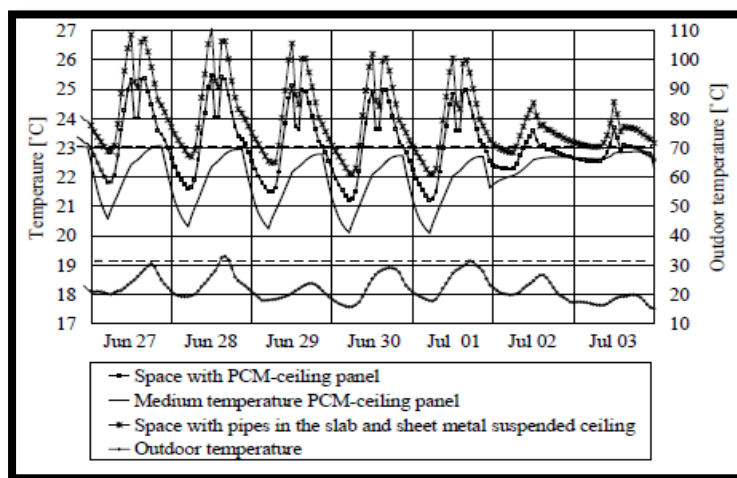
13.5.3 Εξομοιωτικοί υπολογισμοί ενσωματωμένοι σε κτίρια

Για να γίνει έλεγχος ότι το πάνελ με τις παραπάνω ιδιότητες θα λειτουργήσει επιθυμητά κάτω από πραγματικά φορτία και καιρικές συνθήκες, διεξάχθηκαν υπολογιστικές προσομοιώσεις σε κτίρια. Τα δεδομένα του κτιρίου και οι συνοριακές συνθήκες που επιλέχθηκαν για τους υπολογισμούς δίνονται στον Πίνακα 13.5.1. Το περιβάλλον που εξετάζεται έχει μεγάλα εσωτερικά θερμικά φορτία καθώς και υψηλά ηλιακά κέρδη εξαιτίας της σχεδόν εξ' ολοκλήρου γυάλινης πρόσοψής του.

Πίνακας 13.5.1 Κτιριακά δεδομένα και συνοριακές συνθήκες για την προσομοίωση

Building	
Facade orientation	West-south-west
Glazed area (m ²)	8
Thermal transmittance (U), glazing (W/m ² K)	0.7
Solar heat gain coefficient (SHGC), glazing	0.5
Solar heat gain coefficient (SHGC), glazing with solar control	0.05
Floor area (m ²)	24
Concrete floor/slab thickness (cm)	25
Maximum internal heat load (W/m ²)	18
Thermally activated ceiling system	
PCM ceiling panel thickness (cm)	5
Percentage PCM in ceiling panel (% by weight)	25
Capillary tube internal/external diameter (mm)	2/3
Tube spacing (cm)	3
Flow temperature (°C)	18
Specific water mass flow rate in relation to ceiling area (kg/hm ²)	15
Operating time for recooling (h)	22:00–06:00

Όπως δείχνει το γράφημα της Εικόνας 13.5.1, το θερμικά ενεργητικό σύστημα οροφής εξασφαλίζει ότι οι θερμοκρασίες του δωματίου παραμένουν στα όρια θερμικής άνεσης ακόμη και όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές. Η μέση θερμοκρασία του ταβανιού αποδεικνύει ότι το εύρος τήξης της παραφίνης εκμεταλλεύεται πλήρως.



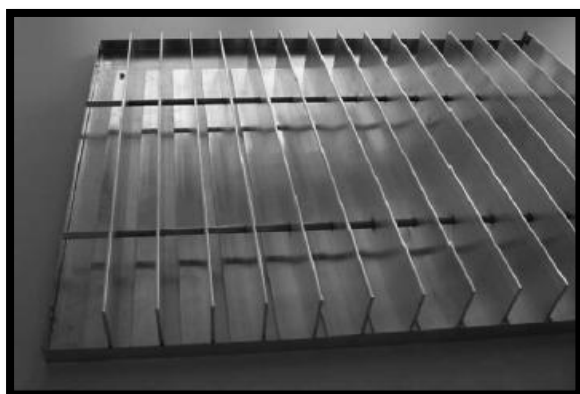
Εικόνα 13.5.1 Θερμοκρασιακό προφίλ σε πραγματικό περιβάλλον με ενσωματωμένο πάνελ οροφής κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας του καλοκαιριού.

Για λόγους σύγκρισης το ίδιο κτίριο υπολογίσθηκε και χωρίς πάνελ με PCM. Έτσι, το συμβατικό σύστημα σωλήνων θεωρήθηκε ότι τοποθετήθηκε στο κέντρο της πλάκας και ένα πάνελ από ασάλινο έλασμα ως αιωρούμενη οροφή εξασφάλισε ίδιες συνοριακές συνθήκες όπως αυτές στην περίπτωση του PCM. Όπως φαίνεται και από τις καμπύλες, η θερμοκρασία του χώρου είναι σαφώς υψηλότερη σε σχέση με αυτή της περίπτωσης του PCM.

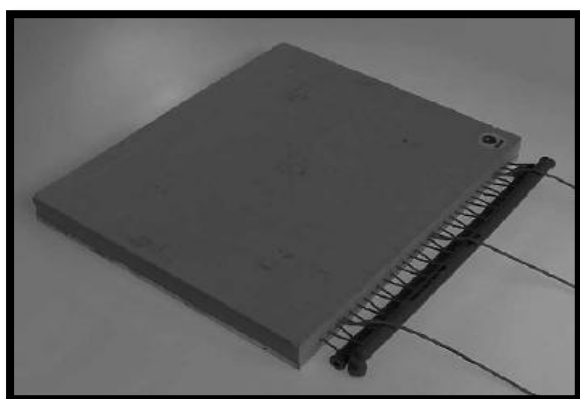
13.6 Πειραματική μελέτη

13.6.1 Παραγωγή πρωτοτύπων

Τα αποτελέσματα από τη διαδικασία της σχεδίασης χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή πρωτοτύπων για τις εργαστηριακές δοκιμές. Η διάταξη που επιλέχθηκε για το πρωτότυπο φαίνεται στην Εικόνα 13.6.1. Η αποτελεσματικότητα της μέτρησης επιβεβαιώθηκε από εργαστηριακές δοκιμές, κατά τις οποίες καταγράφηκαν τιμές από 1.1 έως 1.2 W/mK. Η Εικόνα 13.6.2 παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο πάνελ οροφής προτού τοποθετηθεί στο δοκιμαστικό θάλαμο. Το σύστημα των σωλήνων, το οποίο έχει τοποθετηθεί στο μίγμα PCM/γύψου, είναι καθαρά ορατό στο προσκήνιο.



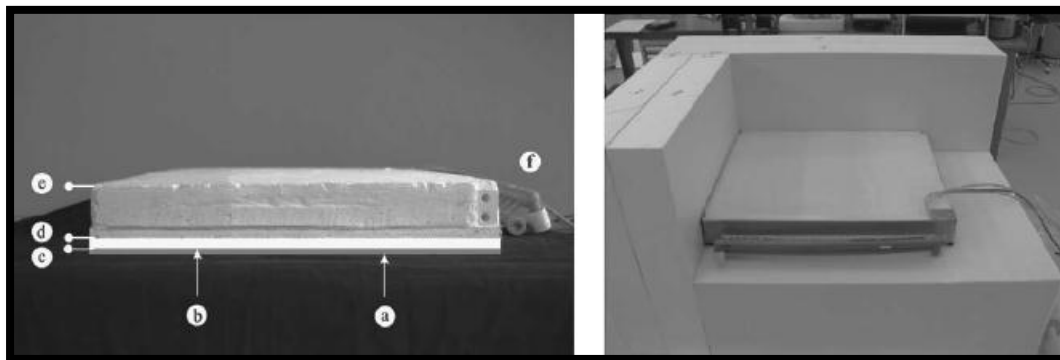
Εικόνα 13.6.1 Πτερύγια από αλουμίνιο για την αύξηση της αγωγιμότητας στο σύνθετο PCM/γύψος.



Εικόνα 13.6.2 Πρωτότυπο πάνελ οροφής 0.25 m² για εργαστηριακές δοκιμές.

13.6.2 Σχεδιασμός των εργαστηριακών δοκιμών

Ο στόχος των εργαστηριακών δοκιμών είναι να επαληθεύσουν την απόδοση του συστήματος πρωτοτύπων ακολουθώντας τη βελτιστοποίησή τους στη διαδικασία προσομοίωσης. Η εγκατάσταση των δοκιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.6.3. Όπου: a) είναι μία ηλεκτρική θερμαντική πλάκα, η οποία χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει τα περιβαλλοντικά θερμικά φορτία. b) είναι το γεινιάζον στρώμα από συνθετικό καουτσούκ, το οποίο είναι αντιστοιχεί στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της θερμοκρασίας του δωματίου και της επιφάνειας ($10 \text{ W/m}^2\text{K}$). c) είναι η πλευρά της θερμαντικής πλάκας στην οποία μετρούταν η θερμοκρασία. d) είναι το κατώτερο στρώμα του πάνελ και e) είναι το ανώτερο στρώμα του πάνελ και f) είναι το σύστημα των σωλήνων νερού, το οποίο σκοπό είχε να ψύχει το στρώμα του PCM.

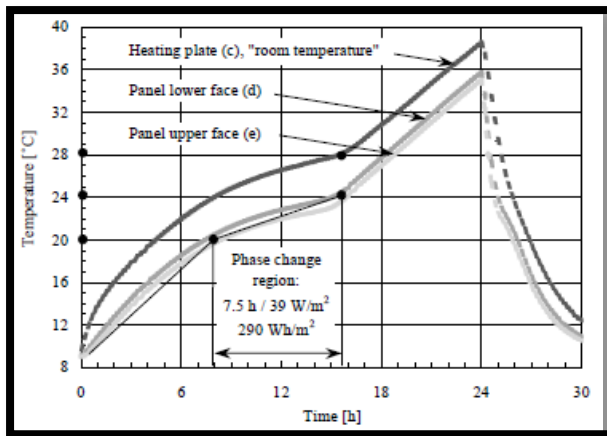


Εικόνα 13.6.3 Εργαστηριακή εγκατάσταση δοκιμών με το πρωτότυπο πάνελ οροφής.

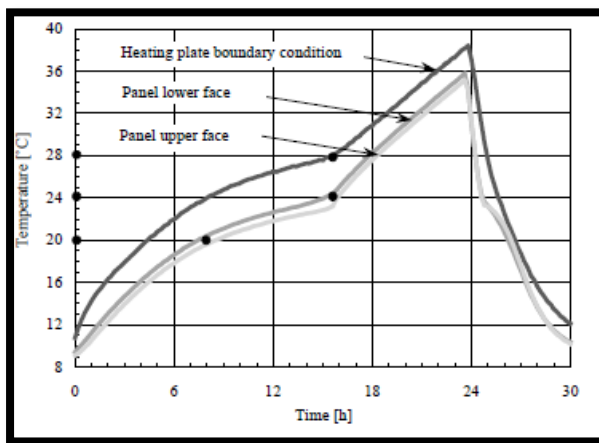
13.6.3 Απόδοση των εργαστηριακών δοκιμών

Στην Εικόνα 13.6.4 παρουσιάζεται ένας κύκλος μετρήσεων του βελτιστοποιημένου πάνελ. Το γράφημα δείχνει τις θερμοκρασιακές καμπύλες του πάνελ από την πλευρά του δωματίου (d) και από το οπίσθιο τμήμα (e), καθώς επίσης και τη θερμοκρασία που μετρήθηκε μεταξύ της θερμαντικής πλάκας και του συνθετικού καουτσούκ (c), η οποία είναι ισοδύναμη της αντίστοιχης θερμοκρασίας του δωματίου.

Ένας προσομοιωτικός υπολογισμός χρησιμοποιώντας τις συνοριακές συνθήκες μεταφερόμενες από την εργαστηριακή δοκιμή στο μοντέλο έδωσε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 13.6.5. Το γεγονός ότι συμφωνούν με τις μετρούμενες τιμές είναι μία περαιτέρω απόδειξη της ακρίβειας του μοντέλου στην προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του πάνελ οροφής.



Εικόνα 13.6.4 Θερμοκρασιακή κατανομή για τον κύκλο των δοκιμών που διεξάχθηκαν στο εργαστήριο.



Εικόνα 13.6.5 Θερμοκρασιακή κατανομή για τον κύκλο των δοκιμών που υπολογίσθηκε με το μοντέλο.

13.7 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη εξετάζει την εφαρμογή ενός θερμικά ενεργητικού συστήματος σε πάνελ οροφής. Ο στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση του συνολικού πάχους του πάνελ παρέχοντας παράλληλα μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος το κάνουν ιδανικό για χρήση σε ελαφριές κατασκευές, η ενσωμάτωση επιπλέον θερμικής μάζας προσφέρει εύρος εσωτερικής θερμοκρασίας μέσα στα όρια της θερμικής άνεσης. Παρά το γεγονός ότι το νερό που κυκλοφορεί στους σωλήνες δρα ανασταλτικά στην εμφάνιση πυρκαγιάς, μία παραπάνω μελέτη θα διεξαχθεί ώστε να διασφαλιστεί η προστασία ενάντια σε πυρκαγιές.

Κεφάλαιο 14

Απόδοση της ψύξης οροφής όταν χρησιμοποιείται PCM σε μίγμα υγρού [95]

14.1 Εισαγωγή

Η παροχή μεγάλης ποσότητας ψύξης με σκοπό την αφαίρεση των θερμικών φορτίων του χώρου οδηγεί σε μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, με τη χρήση ανεμιστήρων, σε αύξηση του όγκου του συστήματος εξαερισμού. Μία εναλλακτική λύση που προσφέρει την πιθανότητα εξοικονόμησης ενέργειας και παρέχει υψηλή ποιότητα εσωτερικού αέρα είναι ένα συνδυασμένο σύστημα ψύξης οροφής (CC) και ογκομετρικού εξαερισμού (DV) [96],[97]. Το σύστημα CC παρέχει τη μέγιστη θερμική άνεση με μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση, ενώ το σύστημα DV προσφέρει καλή ποιότητα αέρα και υψηλή αποτελεσματικότητα εξαερισμού. Τα CFD αποτελέσματα των Νiu και Κοοί έδειξαν ότι το σύστημα CC μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ψυκτική ικανότητα του συστήματος DV [96]. Το σύστημα CC με σχετικά υψηλές θερμοκρασίες κρύου νερού, συνήθως γύρω στους 14-20 °C [98], γεγονός που καθιστά δυνατή την εφαρμογή πολλών τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας, όπως για παράδειγμα ψύξη εδάφους [97], ψύξη με εξάτμιση [99],[100],[101], ψύξη με αφύγρανση [102] και σύστημα αποθήκευσης πάγου[103], για να επιτευχθεί η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιριακών συστημάτων ψύξης. Το ρίσκο της υγροποίησης του νερού είναι ένας μεγάλος κίνδυνος και για το λόγο αυτό άρχισε η εξέταση της χρήσης των PCM για την ψύξη με πάνελ οροφής.

Τα υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) χρησιμοποιούνται πολύ καιρό για θερμική αποθήκευση εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας θερμότητας που μπορούν να απορροφήσουν/απελευθερώσουν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αλλαγής φάσης σε πολύ μικρό θερμοκρασιακό εύρος. Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για τη βελτίωση της ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας των δομικών υλικών για ηλιακές και κτιριακές εφαρμογές με την ενσωμάτωση των PCMs απευθείας μέσα στα υλικά [104]. Ωστόσο, η θερμική απόδοση τέτοιων εφαρμογών δεν είναι σημαντική εξαιτίας της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας των PCMs [105]. Μία νέα προσέγγιση προτάθηκε τα τελευταία χρόνια, στην οποία το PCM τοποθετήθηκε σε κάψουλες και αιωρείται σε ένα μονοφασικό υγρό μεταφοράς θερμότητας σχηματίζοντας ένα μίγμα με PCM (PCM slurry) [106]. Η συσσωμάτωση και κατακράτηση των μορίων του PCM στη ροή δεν επιτρέπεται. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης τους σε ψυκτικές εφαρμογές.

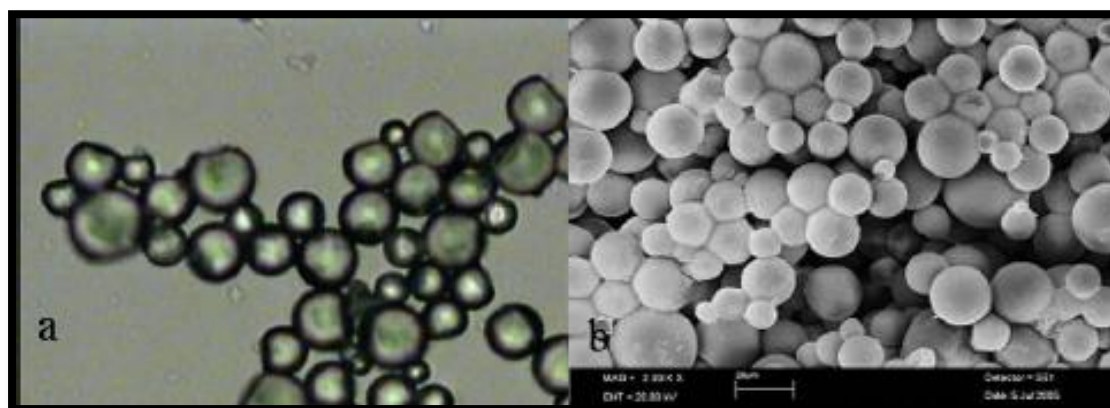
Επομένως, είναι εφικτή η χρήση των MPCM slurry ως αποθηκευτικό και μεταφορικό μέσο θερμότητας, γεγονός που καθιστά δυνατή την αντικατάσταση του νερού στο κύκλωμα

του πάνελ οροφής ως μεταφορικό μέσο. Τα MPCM slurry μπορούν να ψυχθούν και να αποθηκευτούν σε δεξαμενές κατά τη διάρκεια της νύχτας, γεγονός που οδηγεί στη μείωση του φορτίου αιχμής και επιτρέπει τη μετατόπιση του ψυκτικού φορτίου τη νύχτα, όταν το ρεύμα είναι πιο φθινό και ο συντελεστής απόδοσης του ψύκτη είναι υψηλός.

Ο αντικειμενικός στόχος της εργασίας είναι να ερευνηθεί η δυνατότητα υλοποίησης του συνδυασμένου συστήματος CC και MPCM slurry και να καθοριστεί εάν αυτό το ενσωματωμένο σύστημα μπορεί να αποφέρει το επιθυμητό επίπεδο εξοικονόμησης ενέργειας και οικονομικού οφέλους. Η παρούσα εργασία περιγράφει το σχεδιασμό του συστήματος και μορφοποιεί το μαθηματικό μοντέλο για την ανάλυση της απόδοσής του. Τέλος, εκτιμάται η μείωση της ηλεκτρικής ζήτησης αιχμής του ενσωματωμένου συστήματος χρησιμοποιώντας το νυχτερινό, εκτός αιχμής, ρεύμα.

14.2 Υλικά αλλαγής φάσης ενσωματωμένα σε μικροκάψουλες μέσα σε ασβεστόγαλα

Το ασβεστόγαλα με το MPCM κατασκευάστηκε με την τοποθέτηση άριστης ποιότητας μορίων PCM σε μικροκάψουλες, οι οποίες καλύπτονται από πολύ λεπτή μεμβράνη, και στη συνέχεια διασκορπίζοντάς τα μέσα σε ένα υδατικό διάλυμα, το οποίο δρα ως υγρό μεταφοράς. Επομένως, το υλικό του πυρήνα είναι πάντα χωριστά από το υγρό μεταφοράς, με σκοπό την αποφυγή της πήξης μεταξύ των μορίων του PCM. Στην Εικόνα 14.2.1 φαίνεται οπτική μικρογραφία και η φωτογραφία SEM των μικροκαψουλών που παρασκευάστηκαν από το συγγραφέα.



Εικόνα 14.2.1 a) οπτική μικρογραφία, b) φωτογραφία SEM.

Η θερμική αποθήκευση και η μεταφορά θερμότητας από το ασβεστόγαλα με το MPCM στη δεξαμενή σχετίζεται με τις ακόλουθες ιδιότητες: την πυκνότητα, τη θερμική αγωγιμότητα, την ειδική θερμοχωρητικότητα και τη λανθάνουσα θερμότητα, οι οποίες

εξαρτώνται από την επιλογή του PCM, του υλικού της κάψουλας και του μεταφορικού της υγρού και της συγκέντρωσης των μορίων. Οι ιδιότητες αυτές δίνονται στον Πίνακα 14.2.1.

Πίνακας 14.2.1 Ιδιότητες του MPCM στο ασβεστόγαλα και των συστατικών του

Properties of the MPCM slurry and its components.				
	Density (kg m^{-3})	Specific heat ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	Thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	Latent heat (kJ kg^{-1})
Hexadecane (solid) [32,33]	780	1805	0.4	224
Hexadecane (liquid)	770	2221	0.21	
Urea-formaldehyde [34]	1490	1675	0.433	
Water (at 20 °C) [35]	998	4183	0.599	
MPCM particle (solid)	829	1789	0.382	196
MPCM particle (liquid)	819	2153	0.203	
MPCM slurry (mass fraction)				
$\Phi = 0.1$	987	3945	0.575	19.6
$\Phi = 0.2$	976	3707	0.551	39.2
$\Phi = 0.3$	933	3470	0.528	58.8
$\Phi = 0.4$	911	3232	0.505	78.4

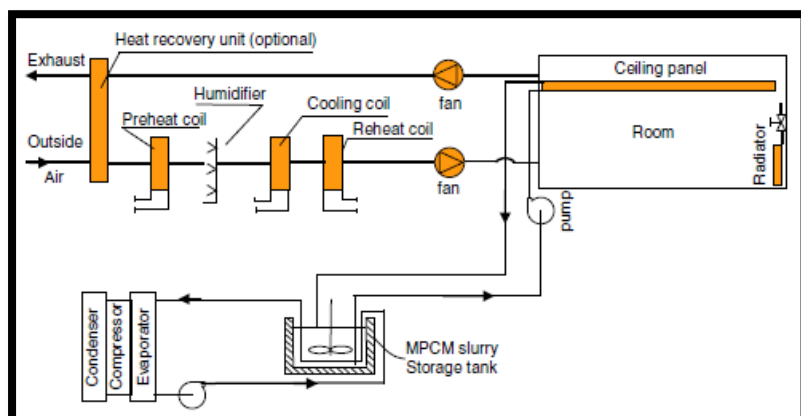
14.3 Μεθοδολογία

14.3.1 Περιγραφή του συστήματος

Ένα συνδυασμένο σύστημα ψύξης οροφής με MPCM σε ασβεστόγαλα δίνεται στη Εικόνα 14.3.1. Πάνελ οροφής που χρησιμοποιούν νερό τοποθετούνται στην οροφή με σκοπό να αφαιρέσουν το αισθητό φορτίο. Ο αέρας ψύχεται και αφυγραίνεται από μία συμβατική μονάδα διαχείρισης αέρα (AHU) και στη συνέχεια παρέχεται στο δωμάτιο με τον ελάχιστο ρυθμό αερισμού για λόγους εξοικονομίας. Για την αποθήκευση του MPCM που επιπλέει μέσα στο ασβεστόγαλα χρησιμοποιείται μία δεξαμενή και ένας αναδευτήρας εγκαθίσταται πάνω από τη δεξαμενή για να διατηρεί το ασβεστόγαλα ιδεατά αναμιγμένο. Η αποθήκευση του MPCM σε δεξαμενή επιτρέπει τη χρήση του ψύκτη κατά τη διάρκεια της νύχτας και να αποθηκεύει την ψύξη υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας στον πυρήνα των μορίων των MPCM. Κατά τη διάρκεια των ωρών λειτουργίας, το μίγμα του MPCM διοχετεύεται απευθείας από τη δεξαμενή στο πάνελ της οροφής με τη βοήθεια μίας πληρωτικής αντλίας, ολοκληρώνει τη διαδικασία αλλαγής φάσης από στερεό σε υγρό και απελευθερώνει τη λανθάνουσα θερμότητα καθώς και ένα μικρό ποσοστό αισθητής θερμότητας. Στη συνέχεια, επιστρέφει στη δεξαμενή και αναμιγνύεται με το υπόλοιπο ασβεστόγαλα που υπάρχει εκεί.

Η διανομή του αέρα παρέχεται από ένα σύστημα DV, το οποίο φέρνει το φρέσκο αέρα από το επίπεδο του δαπέδου με μικρή ταχύτητα και στη συνέχεια ο αέρας διοχετεύεται στο πάνελ. Με τον τρόπο αυτό ο φρέσκος αέρας διοχετεύεται στο πάνελ και οι

οσμές και οι αιωρούμενοι μολυντές παρασύρονται και αποβάλλονται. Έτσι, η ποιότητα του αέρα βελτιώνεται σε σχέση με αυτή ενός απλού συστήματος.



Εικόνα 14.3.1 Σχηματικό διάγραμμα ψύξης οροφής με ενσωματωμένη δεξαμενή που περιέχει MPCM σε ασβεστόγαλα.

14.3.2 Μοντελοποίηση του συνδυαστικού συστήματος

Η απόδοση του συστήματος εκτιμάται χρησιμοποιώντας έναν επικυρωμένο προσομοιωτικό ενεργειακό κώδικα ακρίβειας ACCURCY [96],[99],[107]. Είναι βασισμένος στη μέθοδο ενεργειακής ισορροπίας του δωματίου, και τα πάνελ της οροφής μεταχειρίζονται ως χωριστές επιφάνειες, οι οποίες εναλλάσσουν θερμότητα με το δωμάτιο με συναγωγή και με τις άλλες επιφάνειες μέσω ακτινοβολίας. Η αγωγή θερμότητας μέσα στα πάνελ θεωρείται μονοδιάστατη χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο τριών κομβικών σημείων. Το πρόγραμμα υπολογίζει πέρα από το ψυκτικό φορτίο, την απαιτούμενη θερμοκρασία του νερού παροχής για διαφορετικές τοποθεσίες εγκατάστασης του πάνελ. Υιοθετώντας ένα τέτοιο δυναμικό προσομοιωτικό πρόγραμμα, τα δεδομένα των ψυκτικών και θερμικών φορτίων, της θερμοκρασίας του δωματίου και άλλων παραμέτρων του δωματίου από ώρα σε ώρα, μπορούν να υπολογισθούν με μεγάλη ευκολία. Περισσότερες πληροφορίες για την πειραματική επικύρωση της θερμοκρασίας των επιφανειών, της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου, της θερμοκρασίας των επιφανειών του πάνελ και του ρυθμού της θερμικής απομάκρυνσης από το πάνελ δίνονται αλλού [108],[109].

14.3.3 Το μοντέλο της δεξαμενής του MPCM που αιωρείται στο ασβεστόγαλα

Το ασβεστόγαλα του MPCM που αποθηκεύεται στη δεξαμενή θεωρείται ιδανικά ομοιογενές κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Έτσι, οι ιδιότητες του MPCM που παρέχεται στο πάνελ της οροφής θεωρούνται ίδιες με αυτές του MPCM που βρίσκεται στη δεξαμενή. Τα μόρια του MPCM παραμένουν πάντα στη στερεή φάση, εξαιτίας της

αποθήκευσης του PCM σε μικροκάψουλες από πλαστικό κέλυφος, και το ιξώδες του μίγματος θεωρείται αμετάβλητο κατά τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας του συστήματος. Η δεξαμενή μοντελοποιείται με τη βοήθεια ενεργειακών και μαζικών ισοζυγίων, τα οποία βασίζονται στην ποσότητα και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το ασβεστόγαλα που ρέει από και προς τη δεξαμενή.

Υποτίθεται ότι το ασβεστόγαλα της δεξαμενής φορτίζεται πλήρως από τον ψύκτη κατά τη διάρκεια της νύχτας. Όταν η θερμοκρασία του είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία υγροποίησης, η μεταφορά θερμότητας μέσα στη δεξαμενή παίρνει τη μορφή αισθητής θερμότητας. Όταν η θερμοκρασία του μίγματος γίνει ίση με τη θερμοκρασία υγροποίησης, η μεταφορά θερμότητας που λαμβάνει χώρα στη δεξαμενή παίρνει τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας και η θερμοκρασία του μίγματος παραμένει σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία υγροποίησης. Τέλος, όταν η θερμοκρασία του MPCM μέσα στο ασβεστόγαλα είναι υψηλότερη από αυτή της υγροποίησης, όλοι οι πυρήνες των μορίων του PCM στο ασβεστόγαλα βρίσκονται σε υγρή κατάσταση και τόσο η μεταφορά θερμότητας στη δεξαμενή όσο και στο πάνελ της οροφής παίρνει τη μορφή αισθητής θερμότητας.

14.3.4 Βασικά μοντέλα εξοπλισμού

Για να εκτιμηθεί η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, οι ενεργειακές χρήσεις του εξοπλισμού πρέπει να υπολογισθούν για τα βασικά εξαρτήματα, όπως είναι ο λέβητας, ο συμπιεστής, οι αντλίες νερού και οι ανεμιστήρες αέρος. Σε αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιείται ένα είδος ημι-εμπειρικού μοντέλου για τους υπολογισμούς της ενεργειακής ανάλυσης.

Η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς εισόδου για τον ψύκτη υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Ψυκτική ισχύς} = \frac{Q_c}{COP} \quad (14.3.1)$$

όπου,

Q_c είναι η ψυκτική ικανότητα του ψύκτη και

COP είναι ο συντελεστής απόδοσης του ψύκτη.

Για ένα δεδομένο σύστημα, ο COP είναι συνάρτηση της απαιτούμενης θερμοκρασίας του νερού του ψύκτη, της εξωτερικής θερμοκρασίας και υγρασίας, όπως επίσης και της λειτουργικής ικανότητας.

Η ενέργεια του ανεμιστήρα και της αντλίας είναι σημαντικοί παράγοντες για την εκτίμηση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας σε ένα σύστημα HVAC. Η απόδοση του ανεμιστήρα (αντλίας) μπορεί να χαρακτηριστεί από την αποδοτικότητά του, η οποία

εξαρτάται από το ρυθμό ροής του αέρα. Γενικά, ο αποτιμώμενος ογκομετρικός ρυθμός ροής του αέρα, η αύξηση της πίεσης και η αποδοτικότητα είναι διαθέσιμα από τους κατασκευαστές. Η ισχύς του ανεμιστήρα (αντλίας) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Ισχύς ανεμιστήρα (αντλίας)} = \frac{Q\Delta p}{3600\eta_f} \quad (14.3.2)$$

όπου,

Q είναι ο ογκομετρικός ρυθμός ροής αέρα,

Δp είναι η συνολική αύξηση πίεσης του ανεμιστήρα,

η_f είναι η αποδοτικότητα του ανεμιστήρα.

Ωστόσο, η αποδοτικότητα του βασικού εξοπλισμού φυσιολογικά σχετίζεται με τις συνθήκες σχεδιασμού και λειτουργίας. Για να απλοποιηθεί η ανάλυση οι τιμές της αποτελεσματικότητας, η αποδοτικότητα του ανεμιστήρα και η συνολική αύξηση της πίεσης του ανεμιστήρα θεωρούνται σταθερές.

14.3.5 Προσομοιωτική μελέτη

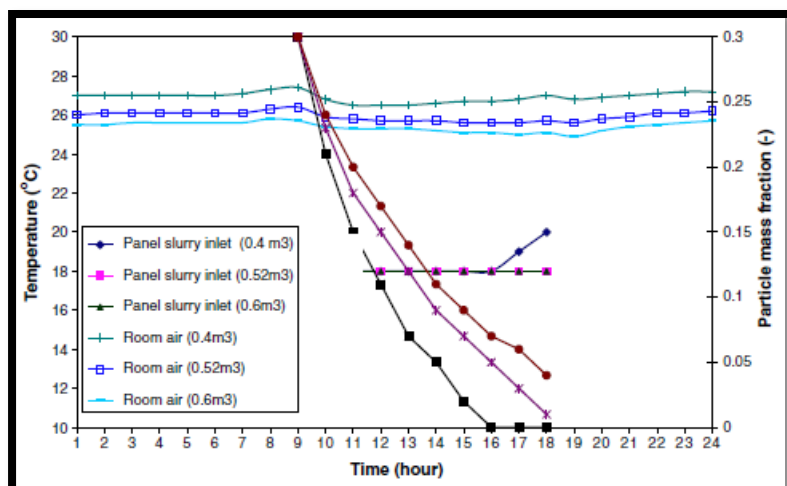
Για να εκτιμηθεί η ενεργειακή απόδοση του συστήματος ψύξης οροφής που λειτουργεί με MPCM μέσα σε ασβεστόγαλα, επιλέχθηκε ένα κτίριο στο Hong Kong. Το δωμάτιο που εξετάζεται βρίσκεται στον ενδιάμεσο όροφο, με πανομοιότυπα διπλανά δωμάτια πάνω και κάτω. Τα παράθυρα είναι εξοπλισμένα με ενετικά στόρια. Έχει αποφασιστεί ότι το 60% του ταβανιού είναι καλυμμένο με πάνελ ψύξης οροφής όταν εφαρμόζεται το σύστημα ψύξης οροφής. Το συγκεκριμένο κτίριο απασχολείται τις ώρες εργασίας από τις 09:00 έως τις 18:00, ώρες κατά τις οποίες λειτουργεί και το πάνελ της οροφής. Το ασβεστόγαλα στη δεξαμενή ψύχεται από τις 22:00 έως τις 08:00 χρησιμοποιώντας νυχτερινό ηλεκτρικό ρεύμα. Η θερμοκρασία τήξης του είναι οι 18 °C. Θεωρείται ότι κατά τις ώρες λειτουργίας του κτιρίου το ψυκτικό φορτίο παρέχεται εξολοκλήρου από το πάνελ της οροφής.

14.4 Αποτελέσματα και συζήτηση

14.4.1 Εκτίμηση των διαστάσεων της δεξαμενής

Το μέγεθος της δεξαμενής καθορίζεται από τις καθημερινές ώρες λειτουργίας και το ωριαίο ψυκτικό φορτίο, τα οποία μπορούν να υπολογισθούν από το δυναμικό μοντέλο του συνδυαστικού συστήματος αποθήκευσης CC και MPCM. Στην Εικόνα 14.4.1 παρουσιάζεται η δυναμική συμπεριφορά του μίγματος και της διακύμανσης της θερμοκρασίας του αέρα σε συνάρτηση των διαφορετικών όγκων της δεξαμενής, για μία τυπική μέρα του Ιουλίου και για ρυθμό ροής του μίγματος 0.03 kg/s. Η θερμοκρασία

εισόδου του μίγματος στο πάνελ, το κλάσμα της μάζας των στερεοποιημένων πυρήνων των μορίων του MPCM και η θερμοκρασία του αέρα δωματίου παρουσιάζονται για 9ωρη καθημερινή λειτουργία.



Εικόνα 14.4.1 Δυναμική συμπεριφορά της δεξαμενής αποθήκευσης και της διακύμανσης της θερμοκρασίας του δωματίου.

Στην Εικόνα 14.4.1 είναι εμφανές ότι όλα τα μόρια του MPCM μέσα στη δεξαμενή, τα οποία έχουν όγκο 0.4 m^3 , ολοκληρώνουν την αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό μέχρι τις 16:00, ενώ μόρια μεγαλύτερης διαμέτρου παραμένουν στη στερεή τους κατάσταση. Όσο μεγαλύτερη η δεξαμενή τόσο περισσότερα είναι τα μόρια του MPCM μέσα στη δεξαμενή που παραμένουν στη στερεή φάση. Η επιλογή του μεγέθους της δεξαμενής γίνεται με βάση κάποιων κριτηρίων: θα πρέπει να υπάρχουν στερεά μόρια MPCM στη δεξαμενή καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας της ψυκτικής εγκατάστασης. Παρά το γεγονός ότι μεγαλύτερο μέγεθος δεξαμενής σημαίνει υψηλότερη ψυκτική ικανότητα κατά τη διάρκεια λειτουργίας, το αντίστοιχο κόστος για την κατασκευή της δεξαμενής και του ίδιου του MPCM είναι πολύ υψηλότερο. Στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκε δεξαμενή με όγκο 0.52 m^3 .

14.4.2 Απαιτούμενος ρυθμός απομάκρυνσης θερμότητας

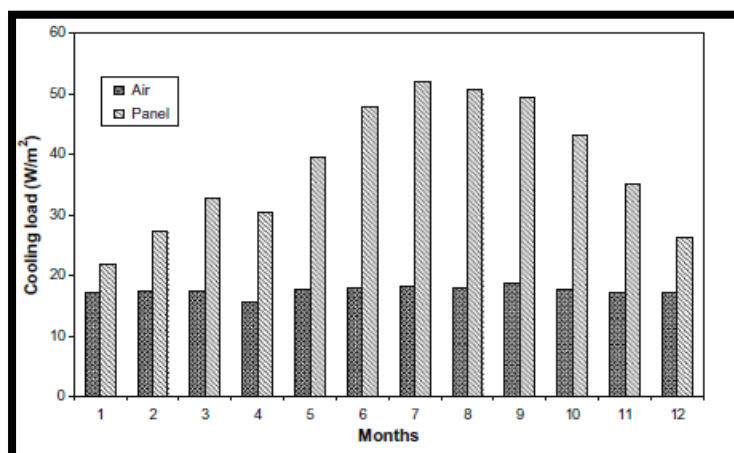
Το ACCURACY υπολογίζει τον απαιτούμενο ρυθμό απομάκρυνσης θερμότητας από το δωμάτιο μαζί με τις θερμοκρασίες απομάκρυνσης, τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του μίγματος στο πάνελ, λαμβάνοντας τις θερμοκρασίες κάθε συστατικού μέσα στο δωμάτιο. Τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται κάθε ώρα. Στον Πίνακα 14.4.1 φαίνονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα μίας ημέρας κατά την οποία λειτουργεί το σύστημα. Παρατηρείται ότι ο ρυθμός απομάκρυνσης της θερμότητας είναι υψηλότερος στο πρώτο μισό της ημέρας, αλλά σχετικά χαμηλός στο δεύτερο μισό, εξαιτίας της αδράνειας των

δομικών στοιχείων. Η άμεση απορρόφηση της ακτινοβολούμενης θερμότητας από το πάνελ μειώνει το ποσό θερμότητας που συσσωρεύεται στους τοίχους.

Πίνακας 14.4.1 Ωριαία απορρόφηση θερμότητας και θερμοκρασία των συστατικών του δωματίου μία ημέρα του Ιουλίου

Hourly heat extraction rates and temperature room component on 15 July.										
Hour	Outside dry bulk (°C)	Panel slurry		Ceiling panels (°C)	Supply air (°C)	Room air (°C)	Solidified MCPM particle fraction	Slurry mass Heat extraction Heat extraction		
		In (°C)	Out (°C)					Flow (kg/s)	By air (W)	By panel (W)
1	28.9			25.9		26				
2	28.8			25.9		26.1				
3	28.6			25.9		26.1				
4	28.4			25.9		26.1				
5	28.3			26.0		26.1				
6	28.0			26.0		26.1				
7	28.2			26.0		26.1				
8	28.7			26.2		26.3				
9	29.4			26.4		26.4	0.30			
10	30.4	18.0	20.5	26.1	13.0	25.9	0.23	0.03	371	1210
11	31.9	18.0	19.8	25.9	13.0	25.8	0.18	0.03	366	1196
12	32.1	18.0	19.6	25.8	13.0	25.7	0.15	0.03	364	1173
13	32.2	18.0	19.7	25.8	13.0	25.7	0.12	0.03	363	1124
14	32.8	18.0	20.0	25.7	13.0	25.7	0.09	0.03	362	1048
15	32.6	18.0	20.4	25.7	13.0	25.6	0.07	0.03	362	946
16	33.0	18.0	20.9	25.7	13.0	25.6	0.05	0.03	362	840
17	32.4	18.0	21.4	25.6	13.0	25.6	0.03	0.03	361	742
18	31.8	18.0	21.9	25.7	13.0	25.7	0.01	0.03	364	665
19	31.3			25.5		25.6				
20	30.8			25.6		25.8				
21	30.8			25.8		25.9				
22	30.7			25.9		26.1				
23	30.0			26.0		26.1				
24	30.6			26.0		26.2				

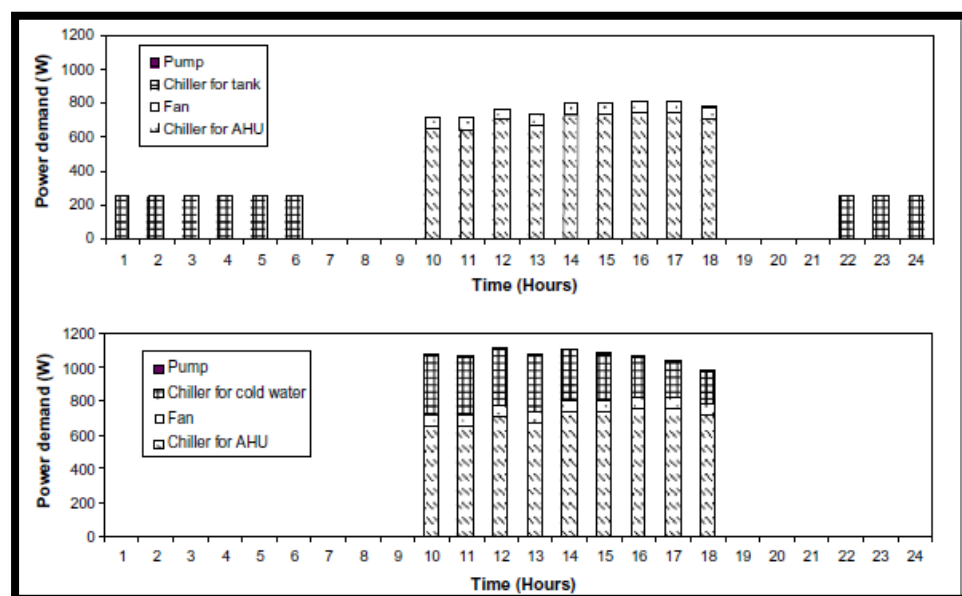
Η μηνιαία απομάκρυνση θερμότητας φαίνεται στην Εικόνα 14.4.2 για το συνδυαστικό σύστημα που αναπτύχθηκε παραπάνω. Ένα μεγάλο κομμάτι της αισθητής θερμότητας απομακρύνεται από το πάνελ οροφής και ένα μικρό μόνο κομμάτι από τον αέρα, ειδικότερα την περίοδο του καλοκαιριού. Το ψυκτικό φορτίο ποικίλει ανάλογα με το μήνα και παίρνει την υψηλότερη τιμή του τον Ιούλιο. Το ψυκτικό φορτίο χρειάζεται όλο το χρόνο μιας και το κλίμα στο Hong Kong είναι πολύ ζεστό.



Εικόνα 14.4.2 Μέσο μηνιαίο ψυκτικό φορτίο από το πάνελ και τον αέρα.

14.4.3 Μετατόπιση φορτίου και ηλεκτρική χρέωση

Η ηλεκτρική ζήτηση για ένα σύστημα CC που λειτουργεί με MPCM μέσα σε ασβεστόγαλα φαίνεται στην Εικόνα 14.4.3 και υπολογίστηκε από το ACCYRCY για την 15^η ημέρα του Ιουλίου.



Εικόνα 14.4.3 Ηλεκτρική ζήτηση συστήματος ψύξης οροφής: α) όταν λειτουργεί με νερό και β) όταν λειτουργεί με MPCM σε ασβεστόγαλα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι πιθανό να μειωθεί η ημερήσια ηλεκτρική ζήτηση κατά περίπου 33% όταν είναι εγκατεστημένο το παραπάνω συνδυαστικό σύστημα. Η ηλεκτρική κατανάλωση της αντλίας είναι σχετικά μικρή σε σχέση με τα υπόλοιπα εξαρτήματα του συστήματος.

14.4.4 Ετήσια κατανάλωση ενέργειας και κόστος

Η ενέργεια που χρειάζεται για τη διαχείριση του αέρα έχει υπολογισθεί ύστερα από ψυχομετρική διαδικασία [99], και στη συνέχεια υπολογίζεται η ενέργεια που χρειάζεται για τη λειτουργία του βασικού εξοπλισμού. Η απόδοση των τριών περιπτώσεων, ονομαστικά, του συστήματος CC που λειτουργεί με νερό, του συστήματος CC που λειτουργεί με MPCM σε ασβεστόγαλα και του συστήματος CC που είναι ενσωματωμένο με αποθήκευση πάγου συγκρίνεται στην παρούσα μελέτη. Στην πρώτη περίπτωση, ο ψύκτης προμηθεύει το ψυκτικό φορτίο για την ψύξη νερού, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στη μονάδα AHU και στο πάνελ οροφής. Στη δεύτερη και την τρίτη περίπτωση, το σύστημα ψύξης οροφής (CC) είναι ενσωματωμένο με το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. Τα

ετήσια αποτελέσματα των βασικών καταναλώσεων ενέργειας και για τρία συστήματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 14.4.2.

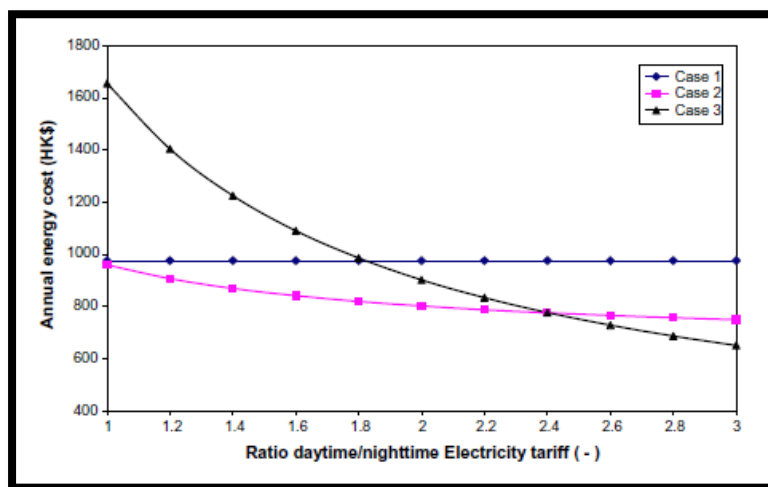
Πίνακας 14.4.2 Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση για τις τρεις περιπτώσεις

Yearly energy consumption of three cases.					
Thermal energy storage medium ^a	Chiller (kW h)		Fan (kW h)	Pump (kW h)	Total (kWh)
	Water/slurry	AHU			
-	377	614	154	23	1167
MPCM slurry (18 °C)	377	614	154	4	1148
Ice storage (0 °C)	1801	0	154	25	1980

^a COP is 4.0 for MPCM slurry storage and 2.2 for ice storage.

Ο Πίνακας 14.4.2 υποδεικνύει ότι η ενέργεια που καταναλώνει η αντλία στη δεύτερη περίπτωση είναι χαμηλότερη από αυτή της πρώτης και της δεύτερης περίπτωσης, παρόλο που δεν είναι σημαντική. Αυτό συμβαίνει διότι το MPCM μέσα στο ασβεστόγαλα έχει συντελεστή μεταφοράς θερμότητας 2-2.5 φορές μεγαλύτερο από αυτόν του καθαρού νερού, όπως έχει φανεί και σε προηγούμενη έρευνα [110], όπου αφαιρώντας την ίδια ποσότητα ψυκτικού φορτίου, το πάνελ οροφής που λειτουργεί με ασβεστόγαλα MPCM έχει μικρότερη παροχή μάζας από ότι αυτό που λειτουργεί με νερό, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση από την αντλία.

Στην Εικόνα 14.4.4 συγκρίνεται το ετήσιο ενεργειακό κόστος τριών συστημάτων κλιματισμού: στον οριζόντιο άξονα παρατίθεται η αναλογία της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος ανάμεσα στη μέρα και τη νύχτα, στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το ετήσιο ενεργειακό κόστος, το οποίο βασίζεται στην ενεργειακή κατανάλωση του βασικού εξοπλισμού.



Εικόνα 14.4.4 Ετήσια ενεργειακή σταθερά σε διάφορα συστήματα και λόγοι ηλεκτρικού κόστους.

14.5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία προτείνεται και μοντελοποιείται ένα πρωτότυπο σχέδιο ενός συστήματος ψύξης οροφής που χρησιμοποιεί MPCM μέσα σε ασβεστόγαλα για την αποθήκευση θερμότητας. Στο σύστημα αυτό, τα πάνελ οροφής, τα οποία διαρρέονται με ασβεστόγαλα που περιέχει MPCM, αφαιρούν την αισθητή θερμότητα και ο αφυγραμένος αέρας, τον οποίο χειρίζεται μία συμβατική μονάδα AHU, αφαιρεί το λανθάνον φορτίο και μέρος της απομείνας αισθητής θερμότητας. Το σύστημα που συνδυάζει ψύξη οροφής με MPCM παρουσιάζει τη μέγιστη ενεργειακή αποδοτικότητα. Έχει αποδειχτεί ότι όταν ο λόγος του ημερήσιου προς το νυχτερινό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλός, το μερικά μετατοπισμένο φορτίο που επιτυγχάνεται από το παραπάνω σύστημα είναι οικονομικά προτιμότερο. Όταν ο παραπάνω λόγος είναι υψηλός, είναι οικονομικά συμφέρουσα η ολική μετατόπιση του φορτίου μόνο κατά την αποθήκευση πάγου.

Η αποθήκευση πάγου δεν προσφέρει περιβαλλοντικά οφέλη εφόσον καταναλώνει περισσότερη ενέργεια. Σε αντιπαράβολή, το σύστημα CC με ασβεστόγαλα προσφέρει ταυτόχρονα εξοικονόμηση ενέργειας και μετατόπιση της ζήτησης, εκμεταλλευόμενο την υψηλή θερμοκρασία στην οποία λειτουργούν τα πάνελ οροφής που σχετίζονται με την αισθητή ψύξη του χώρου και την απομάκρυνση φορτίων. Το σύστημα που μελετήθηκε στην έρευνα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με κατάλληλες προσαρμογές, και σε κτίρια στα οποία επικρατούν διαφορετικές συνθήκες.

Κεφάλαιο 15

Αύξηση της δυνατότητας ψύξης με εξάτμιση με τη χρήση συνδυαστικής ψύξης οροφής με MPCM σε ασβεστόγαλα [111]

15.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία ψύξης με εξάτμιση επιχειρεί την παραγωγή νερού ψύξης σε θερμοκρασία η οποία πλησιάζει τη θερμοκρασία υγρής σφαίρας. Έρευνες στην Ευρώπη έδειξαν ότι είναι δυνατή η παραγωγή νερού ψύξης σε θερμοκρασία χαμηλότερη των 18 °C, με σκοπό τη χρήση του σε συστήματα ψύξης οροφής (CC), με βάση τα μετεωρολογικά αρχεία [101]. Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του πύργου ψύξης έγινε με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFDs) [100],[112]. Με την ενσωμάτωση του πύργου ψύξης σε ένα δυναμικό πρόγραμμα θερμικής ανάλυσης, αξιολογήθηκε η πιθανότητα εξοικονόμησης ενέργειας ενός συνδυαστικού συστήματος CC με πύργο ψύξης από διάφορους ερευνητές για διαφορετικά κλίματα [99],[113].

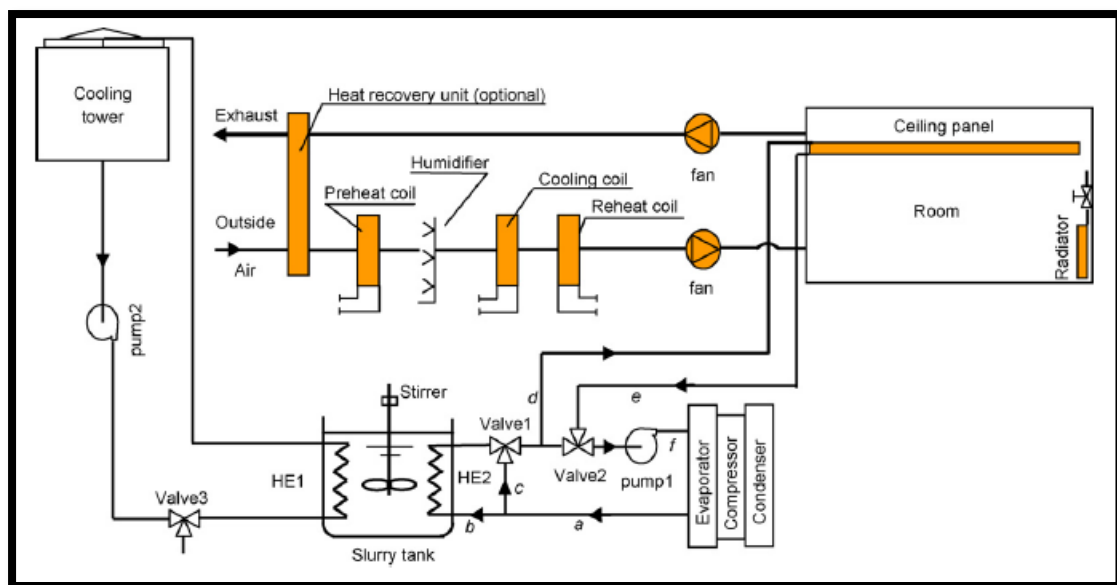
Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να ερευνηθεί η πιθανότητα εξοικονόμησης ενέργειας ενός υβριδικού συστήματος που είναι ο συνδυασμός των τεχνολογιών ψύξης οροφής, αποθήκευσης θερμότητας σε ασβεστόγαλα με MPCM και ψύξης με εξάτμιση. Το ασβεστόγαλα με το MPCM χρησιμοποιείται για να αποθηκεύει την ψυκτική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα ψύξης με εξάτμιση, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της αισθητής θερμότητας από το χώρο μέσω του συστήματος ψύξης οροφής. Με βάση τα μετεωρολογικά τους στοιχεία, εξετάζονται οι πόλεις Χονγκ Κονγκ, Σαγκάη, Πεκίνο, Λάνζου και Ουρούμκι. Υποθέτοντας κατάλληλες τιμές για τη θερμοκρασιακή προσέγγιση, η οποία ορίζεται ως η θερμοκρασιακή διαφορά της θερμοκρασίας υγρής σφαίρας του εξωτερικού αέρα και του νερού ψύξης που παράγεται από το σύστημα ψύξης με εξάτμιση, συγκρίνονται οι πιθανότητες εξοικονόμησης ενέργειας και για τις πέντε παραπάνω πόλεις με τη βοήθεια του προγράμματος ACCURACY. Τέλος, προτείνεται η βέλτιστη μέθοδος σχεδιασμού της δεξαμενής αποθήκευσης του MPCM μέσα στο ασβεστόγαλα.

15.2 Μεθοδολογία

15.2.1 Περιγραφή του συστήματος

Η σχηματική απεικόνιση του συστήματος φαίνεται στην Εικόνα 15.2.1. Τα πάνελ οροφής που χρησιμοποιούν νερό τοποθετούνται για να αποβάλλουν το αισθητό θερμικό φορτίο από το δωμάτιο. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 15.2.1, δύο εναλλάκτες θερμότητας

είναι εμβαπτισμένοι μέσα στη δεξαμενή για να αποθηκεύουν ή να απελευθερώνουν την ψυκτική ενέργεια, ένας αναδευτήρας μεταβλητών ταχυτήτων χρησιμοποιείται για να διατηρεί το ασβεστόγαλα ομοιογενές και για να παράγει τεχνητή μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Για να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος, σχεδιάζεται η λειτουργία του υβριδικού συστήματος για να μεγιστοποιηθεί η χρήση της ψυκτικής ενέργειας που προέρχεται από την εξάτμιση. Όταν η θερμοκρασία του νερού ψύξης στην έξοδο του πύργου ψύξης είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης του PCM στη δεξαμενή, το νερό ψύξης αναγκάζεται να ρέει μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας για να ψύξει το ασβεστόγαλα με το MPCM. Οι πυρήνες των μορίων του MPCM αλλάζουν φάση, από υγρό σε στερεό, και αποθηκεύουν την ψυκτική ενέργεια υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης της ψύξης. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του γραφείου, όταν η θερμοκρασία του μίγματος του MPCM είναι χαμηλότερη ή ίση με τη θερμοκρασία τήξης του PCM, το νερό ψύξης ρέει στο μονοπάτι abdefa της σωλήνωσης για να μεταφέρει ψυκτική ενέργεια στη δεξαμενή με το ασβεστόγαλα μέσω του εναλλάκτη θερμότητας ελέγχοντας τις βαλβίδες τριπλής ροής 1 και 2.



Εικόνα 15.2.1 Σχηματικό διάγραμμα του υβριδικού συστήματος.

Έτσι απελευθερώνεται η ψυκτική ενέργεια του νερού ψύξης στο γραφείο και τα πάνελ οροφής απομακρύνουν την αισθητή θερμότητα. Οι πυρήνες των μορίων του MPCM στη δεξαμενή αλλάζουν φάση, από στερεή σε υγρή, και απελευθερώνουν ψυκτική ενέργεια υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποφόρτισης. Όταν η θερμοκρασία του ασβεστογάλματος είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης του PCM, το σύστημα τήξης ενεργοποιείται, και το νερό ψύξης ρέει στο μονοπάτι acdefa της σωλήνωσης ελέγχοντας τις αντλίες 1 και 2. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ψυκτικού

συστήματος, το νερό ψύξης που παράγεται στον πύργο ψύξης παρακάμπτεται μερικώς στο συμπυκνωτή για να αφαιρεθεί η θερμότητα που παράγεται από τον ψύκτη.

15.2.2 Μοντελοποίηση του υβριδικού συστήματος

Η θερμική απόδοση του υβριδικού συστήματος εκτιμάται από ένα επικυρωμένο προσομοιωτικό ενεργειακό κώδικα για κτίρια, τον ACCURACY [99],[107]. Τα μοντέλα φόρτισης και αποφόρτισης είναι βασισμένα σε μία απλή προσομοίωση των εναλλακτών θερμότητας, οι οποίοι είναι εμβαπτισμένοι μέσα στη δεξαμενή με το ασβεστόγαλα που έχει δεδομένες τιμές ικανότητας μεταφοράς θερμότητας, και μπορούν να υπολογισθούν κάνοντας χρήση της λογαριθμικής μεθόδου μέσης θερμοκρασίας (LMDT)[114].

Η ενεργειακή κατανάλωση του βασικού εξοπλισμού, όπως ο συμπιεστής, ο λέβητας και οι ανεμιστήρες, υπολογίζεται από ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο. Υιοθετώντας τέτοιες προσομοιωτικές τεχνικές υπολογίζονται τα θερμικά και ψυκτικά φορτία για κάθε ώρα καθώς και ο ρυθμός φόρτισης και αποφόρτισης.

15.2.3 Μελέτη προσομοίωσης

Οι ενεργειακές αποδόσεις των βασικών εξαρτημάτων μοντελοποιούνται με τη βοήθεια ορισμένων σταθερών δεικτών [115]: χρησιμοποιούνται δύο τιμές για το συντελεστή απόδοσης COP για την ημερήσια και τη νυχτερινή λειτουργία του ψύκτη. Ο COP παίρνει την τιμή 4.0, όταν η θερμοκρασία εξάτμισης είναι ορισμένη στους 15 °C για τη φόρτιση του MPCM, και την τιμή 3.2, όταν η θερμοκρασία εξάτμισης είναι 7 °C για το χειρισμό του αέρα του εξαερισμού. Ο βαθμός απόδοσης του λέβητα είναι 0.75, του ανεμιστήρα 0.6 και της αντλίας 0.7. Η αύξηση της πίεσης του ανεμιστήρα είναι 1400 Pa για τον αέρα, ενώ η πίεση στην αντλία είναι 0.2 bar για τον εναλλάκτη θερμότητας μέσα στη δεξαμενή και 0.4 bar για τα πάνελ οροφής.

15.3 Ανάλυση διαθεσιμότητας του νερού ψύξης

15.3.1 Καθορισμός της θερμοκρασίας εξόδου του νερού ψύξης από τον πύργο ψύξης

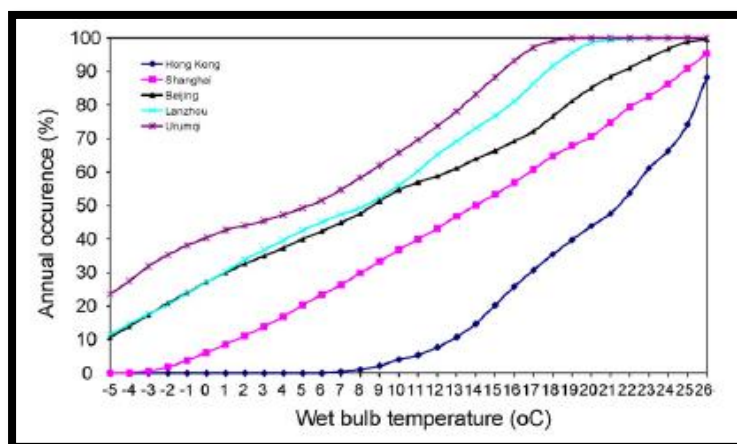
Ένα χαρακτηριστικό ύψιστης σημασίας της τεχνικής ψύξης με εξάτμιση είναι η επίτευξη μικρής θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του υγρού μεταφοράς θερμότητας που φεύγει από τον πύργο ψύξης και της θερμοκρασίας υγρής σφαίρας του εξωτερικού αέρα. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται θερμοκρασία προσέγγισης (APT), η οποία παριστάνει την ικανότητα ενός πύργου ψύξης. Η θερμοκρασία του νερού ψύξης ενός πύργου ψύξης μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$T_{water,out} = T_{w,b} + APT \quad (15.3.1)$$

Για ένα δεδομένο πύργο ψύξης, ο καθορισμός της APT γίνεται σε συνθήκες μέγιστου ψυκτικού φορτίου, και μία τυπική τιμή είναι γύρω στους 3 °C. Είναι δυνατός ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του νερού που διατίθεται από τον πύργο ψύξης για κάθε ώρα χρησιμοποιώντας την εξίσωση 15.3.1 και τοπικά μετεωρολογικά δεδομένα για ένα έτος, τα οποία αποτελούνται από ωριαία δεδομένα θερμοκρασίας όπως είναι η θερμοκρασία υγρής σφαίρας, η θερμοκρασία του σημείου υγροποίησης, η ατμοσφαιρική πίεση, η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου. Τα αρχεία των δεδομένων αποκτήθηκαν με βάση την περίοδο 1982-1997 από τα δεδομένα του Εθνικού Κέντρου Δεδομένων της Κίνας [116].

15.3.2 Ετήσια εμφάνιση της θερμοκρασίας υγρής σφαίρας

Η ετήσια εμφάνιση της θερμοκρασίας υγρής σφαίρας των πέντε χωρών που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή δίνεται στην Εικόνα 15.3.1. παίρνοντας σαν παράδειγμα την εμφάνιση θερμοκρασίας υγρής σφαίρας στους 15 °C, η διαθεσιμότητα της θερμοκρασίας υγρής σφαίρας είναι 20% στο Χονγκ Κονγκ και 88% στο Ουρουμκί.



Εικόνα 15.3.1 Ποσοστό εμφάνισης της θερμοκρασίας υγρής σφαίρας για τις πέντε πόλεις.

15.3.3 Η επίδραση της APT στην ετήσια διαθεσιμότητα της ψυκτικής πιθανότητας

Το ποσοστό της ετήσιας διαθεσιμότητας του νερού ψύξης (A) υπολογίζεται από τη σχέση 15.3.2 που ακολουθεί:

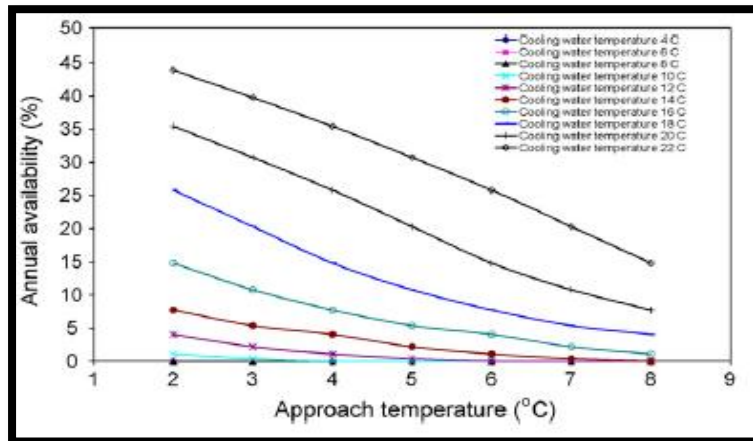
$$A = \frac{100 \sum(H_{tas})}{8760} \quad (15.3.2)$$

όπου,

$\sum(H_{tas})$ είναι ο στατιστικά τυπικός συνολικός αριθμός ωρών του έτους, κατά τη διάρκεια του οποίου η απαιτούμενη θερμοκρασία νερού ψύξης είναι μικρότερη ή ίση της τιμής ($T_{w,b}+APT$) και,

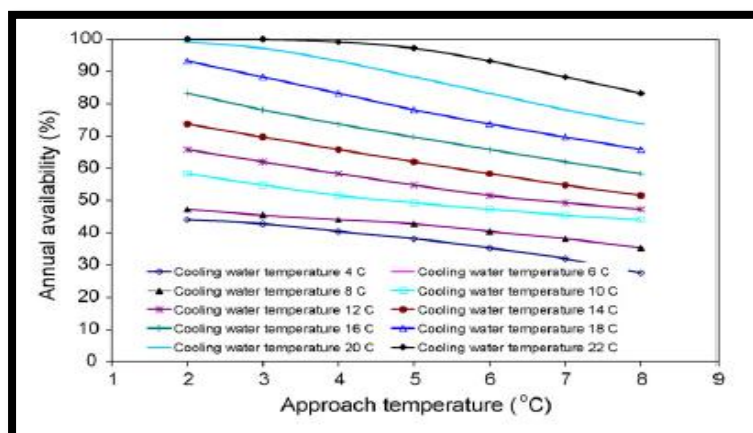
8760 είναι ο συνολικός αριθμός ωρών του έτους.

Στην Εικόνα 15.3.2 φαίνεται η επίπτωση της θερμοκρασίας προσέγγισης στην ετήσια διαθεσιμότητα νερού ψύξης στο Χονγκ Κονγκ. Η διαθεσιμότητα του νερού ψύξης σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία αυξάνεται σημαντικά με τη μείωση της APT. Η διαθεσιμότητα νερού ψύξης στους 18 °C αυξάνεται από 4% σε 26% όταν η APT μειώνεται από 8 °C σε 2 °C. Τα οφέλη που επιτυγχάνονται από τη μείωση της APT είναι πιο έντονα όταν το νερό ψύξης φτάσει τη μέγιστη θερμοκρασία του.



Εικόνα 15.3.2 Επίπτωση της θερμοκρασίας προσέγγισης στο ποσοστό της ετήσιας διαθεσιμότητας νερού ψύξης στο Χονγκ Κονγκ.

Στην Εικόνα 15.3.3 φαίνεται η διαθεσιμότητα νερού ψύξης για διάφορες θερμοκρασίες προσέγγισης για τις κλιματικές συνθήκες του Ουρουγκί. Η διαθεσιμότητα του νερού ψύξης σε μια δεδομένη θερμοκρασία αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας APT. Η διαθεσιμότητα του νερού ψύξης στους 18 °C αυξάνεται από 66% σε 93% όταν η θερμοκρασία APT μειωθεί από τους 8 °C στους 2 °C. Τα οφέλη που επιτυγχάνονται από τη μείωση της APT είναι πιο έντονα όταν το νερό ψύξης φτάσει τη μέγιστη θερμοκρασία του.



Εικόνα 15.3.3 Επίπτωση της θερμοκρασίας προσέγγισης στο ποσοστό της ετήσιας διαθεσιμότητας ψύξης.

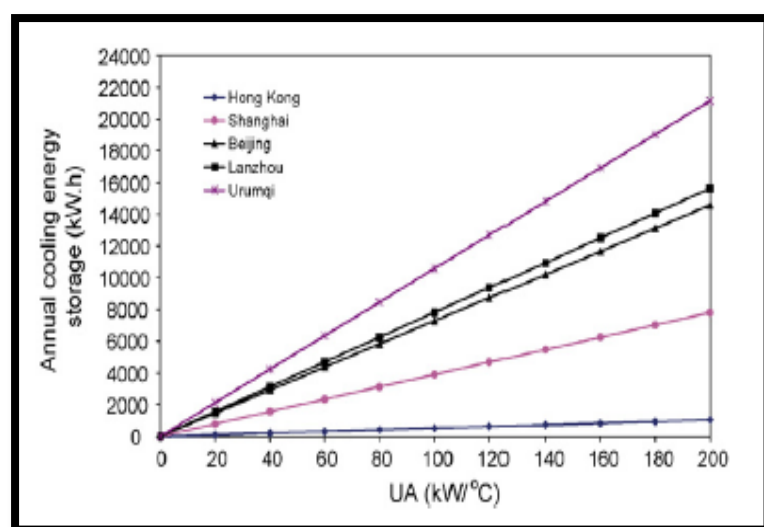
Είναι εμφανές ότι η επίπτωση της APT στην ετήσια διαθεσιμότητα πιθανότητας παραγωγής νερού ψύξης είναι σημαντική για ένα δεδομένο σύστημα ψύξης με εξάτμιση. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της APT, τόσο υψηλότερη είναι η ετήσια διαθεσιμότητα πιθανότητας νερού ψύξης. Ωστόσο, η θερμοκρασία προσέγγισης για ένα δεδομένο σύστημα ψύξης με εξάτμιση περιορίζεται από τις τρέχουσες κατασκευαστικές τεχνικές.

15.4 Πιθανότητα εξοικονόμησης ενέργειας του υβριδικού συστήματος

15.4.1 Αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας του ασβεστογάλματος που περιέχει MPCM του συστήματος ψύξης με εξάτμιση

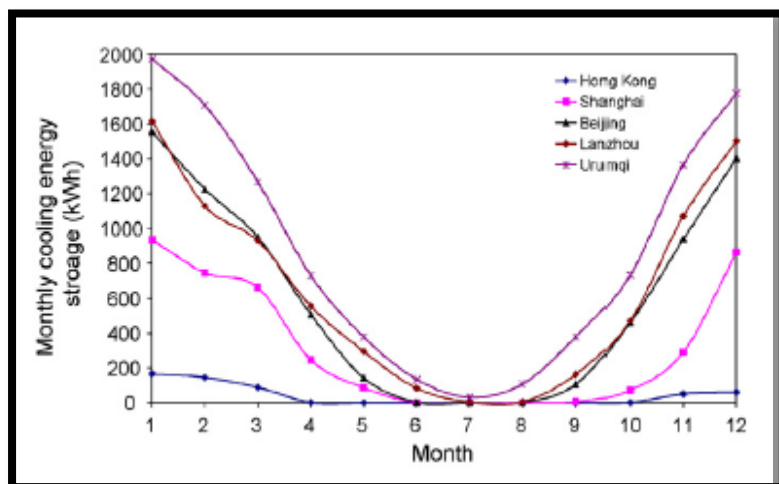
Η δυνατότητα αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας σε μία δεξαμενή με ασβεστόγαλα που περιέχει MPCM της ψύξης με εξάτμιση καθορίζεται από τη θερμοκρασία του νερού ψύξης που παράγεται από τον πύργο ψύξης, την επιδιωκόμενη θερμοκρασία αποθήκευσης του ασβεστογάλματος, το μέγεθος της δεξαμενής και την ικανότητα μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη θερμότητας που είναι εμβαπτισμένος στο ασβεστόγαλα με το MPCM. Υποθέτοντας ένα έμμεσα πολύ μεγάλο μέγεθος δεξαμενής, η θεωρητική ψυκτική αποθήκευση (TCS) περιορίζεται από τη συνολική ικανότητα μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη θερμότητας.

Στην Εικόνα 15.4.1 φαίνεται η ετήσια θεωρητική αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας ενός συστήματος ψύξης με εξάτμιση σε διαφορετικές τιμές (UA) για τις πέντε πόλεις της Κίνας που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η ετήσια TCS αυξάνεται γραμμικά με τις τιμές της μεταβλητής (UA) για τις πέντε περιπτώσεις. Για κάθε δοθείσα τιμή της μεταβλητής (UA) το Ουρούμκι έχει την υψηλότερη TCS και το Χονγκ Κονγκ τη χαμηλότερη.



Εικόνα 15.4.1 Ετήσια αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας του συστήματος ψύξης με εξάτμιση συναρτήσει της μεταβλητής UA.

Στην Εικόνα 15.4.2 φαίνεται η μηνιαία TCS του συστήματος ψύξης με εξάτμιση βασισμένη στην τιμή $(UA) = 100 \text{ kW}/^\circ\text{C}$ για τις πέντε τυπικές πόλεις. Το Ουρούμκι έχει την υψηλότερη και το Χονγκ Κονγκ τη χαμηλότερη TCS για κάθε μήνα. Η τιμή της TCS ποικίλει από μήνα σε μήνα. Η χαμηλότερη τιμή της TCS εμφανίζεται την καλοκαιρινή περίοδο, όπου οι θερμοκρασίες είναι οι υψηλότερες όλου του χρόνου, ενώ τις περιόδους της άνοιξης και του χειμώνα οι τιμές της TCS είναι πολύ πιο σημαντικές.



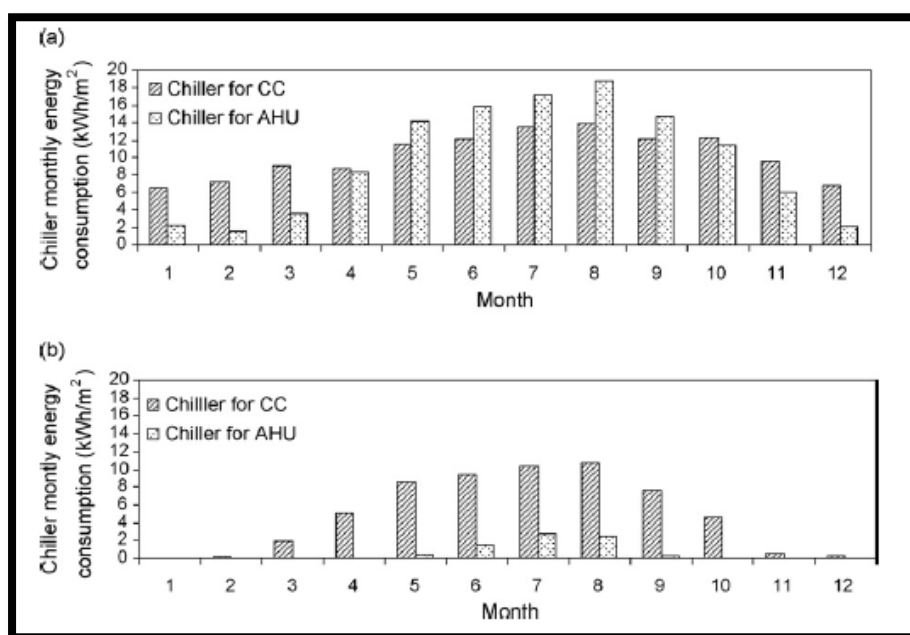
Εικόνα 15.4.2 Μηνιαία αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας του συστήματος ψύξης με εξάτμιση για την τιμή $(UA) = 100 \text{ kW}/^\circ\text{C}$.

15.4.2 Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας του ψύκτη

Η ενεργειακή κατανάλωση του ψύκτη ενός συμβατικού συστήματος ψύξης οροφής (CC) χωρίς αποθήκευση θερμικής ενέργειας μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα. Το πρώτο είναι η ενέργεια που καταναλώνει ο ψύκτης για την παραγωγή του νερού ψύξης για το πηνίο της μονάδας διαχείρισης αέρα (AHU). Το δεύτερο είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή νερού ψύξης για τα πάνελ οροφής με στόχο την αφαίρεση της αισθητής θερμότητας. Ωστόσο, για το σύστημα ψύξης οροφής που χρησιμοποιεί αποθήκευση θερμότητας, μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται από το πάνελ οροφής προμηθεύεται από την ψυκτική ενέργεια που αποθηκεύεται από το σύστημα ψύξης με εξάτμιση, γεγονός που παρέχει την πιθανότητα εξοικονόμησης ενέργειας.

Στην Εικόνα 15.4.3 φαίνεται η μηνιαία κατανάλωση ενέργειας από τον ψύκτη για δύο πανομοιότυπα δωμάτια, τα οποία είναι εξοπλισμένα με συμβατικό σύστημα ψύξης οροφής με νερό χωρίς ενεργειακή αποθήκευση, στο Χονγκ Κονγκ και στο Ουρούμκι. Στην περίπτωση του δωματίου που βρίσκεται στο Χονγκ Κονγκ, η ενεργειακή κατανάλωση του ψύκτη καλύπτει όλο το χρόνο. Ωστόσο, στο Ουρούμκι, εκτός από την καλοκαιρινή περίοδο, σχεδόν δεν παρίσταται ανάγκη ο ψύκτης να καταναλώνει ενέργεια για τη διαχείριση του

αέρα τις άλλες περιόδους. Γενικά, η υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση του ψύκτη συμβαίνει τον Αύγουστο, ενώ η χαμηλότερη το Φεβρουάριο και τον Ιανουάριο τόσο για το Χονγκ Κονγκ όσο και για το Ουρουμκί.



Εικόνα 15.4.3 Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας των συστημάτων ψύξης στο Χονγκ Κονγκ (a) και στο Ουρουμκί (b).

Η μηνιαία ενεργειακή κατανάλωση του ψύκτη για την παραγωγή του νερού ψύξης για τα πάνελ οροφής παρουσιάζει αρκετά διαφορετική τάση από τη μηνιαία TCS του ασβεστογάλματος του συστήματος ψύξης με εξάτμιση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 15.4.2. Με άλλα λόγια, η αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας από το ασβεστόγαλα με το MPCM δε μπορεί να ανταπεξέλθει στην απαιτούμενη αφαίρεση αισθητής θερμότητας από τα πάνελ οροφής την περίοδο του καλοκαιριού. Ο ανεπαρκής τομέας θα πρέπει να προμηθεύεται από την ενέργεια ψύξης που παράγεται από το ψυκτικό σύστημα.

15.4.3 Ποσοστό της ετήσιας εξοικονόμησης ενέργειας του ψύκτη ενός υβριδικού συστήματος

Στην παρούσα μελέτη, υπολογίζεται αρχικά η μηνιαία παροχή ψύξης για τα πάνελ οροφής, με βάση τη μηνιαία TCS που έχει το ασβεστόγαλα με το MPCM και την ενεργειακή ζήτηση που έχουν τα πάνελ οροφής, και στη συνέχεια υπολογίζεται η ετήσια παροχή ψύξης για τα πάνελ οροφής από την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια, με την άθροιση των μηνιαίων τιμών. Ένα παράδειγμα για το Ουρουμκί δίνεται στον Πίνακα 15.4.1 για τιμή (UA)= 100 kW/°C. Έχει παρατηρηθεί ότι η ψύξη με εξάτμιση δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις ψύξης των πάνελ οροφής κατά τη διάρκεια της περιόδου από τον Ιούνιο έως

τον Αύγουστο. Όλο το υπόλοιπο διάστημα του έτους η ψυκτική ενέργεια πρέπει να παρέχεται μόνο από το σύστημα ψύξης με εξάτμιση χωρίς τη χρήση βοηθητικών ψυκτικών συστημάτων για την παραγωγή νερού ψύξης.

Πίνακας 15.4.1 Υπολογισμός της μηνιαίας παροχής ψυκτικής ενέργειας από την αποθήκευση θερμικής ενέργειας στο Ουρουμκι

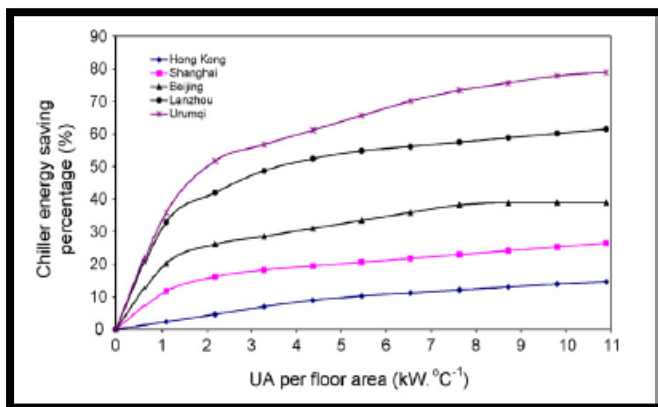
Month	Cooling energy		
	Cooling energy storage (kW h)	Cooling demand of ceiling panels (kW h)	Cooling supply by the cooling storage (kW h)
1	1973	1	1
2	1707	3	3
3	1267	35	35
4	729	93	93
5	378	157	157
6	133	172	133
7	31	190	31
8	107	198	107
9	378	139	139
10	733	85	85
11	1366	10	10
12	1775	4	4

Με σκοπό την ποσοτικοποίηση της πιθανότητας εξοικονόμησης ενέργειας του συστήματος ψύξης με εξάτμιση, προτάθηκε η ιδέα ενός ποσοστού εξοικονόμησης ενέργειας του ψύκτη, το οποίο ορίζεται ως:

Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας ψύκτη

$$= \frac{\text{μειωμένη ενέργεια από το σύστημα ψύξης με εξάτμιση}}{\text{ενεργειακή κατανάλωση του ψύκτη}} \quad (15.4.1)$$

Στην Εικόνα 15.4.4 φαίνεται το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας του δωματίου που είναι εξοπλισμένο με το υβριδικό σύστημα στις πέντε πόλεις της Κίνας για διαφορετικά (UA) ανά μονάδα επιφάνειας, βασισμένο σε θερμοκρασία APT 3 °C. Το ποσοστό αυτό αυξάνεται με την αύξηση της τιμής του (UA) ανά μονάδα επιφάνειας, ωστόσο, το όφελος που επιτυγχάνεται από την αύξηση του (UA) ανά μονάδα επιφάνειας υποβαθμίζεται όσο αυξάνεται το (UA), ειδικότερα σε πολύ υψηλές τιμές του. Το Ουρούμκι έχει το υψηλότερο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας, ενώ το Χονγκ Κονγκ έχει το χαμηλότερο.

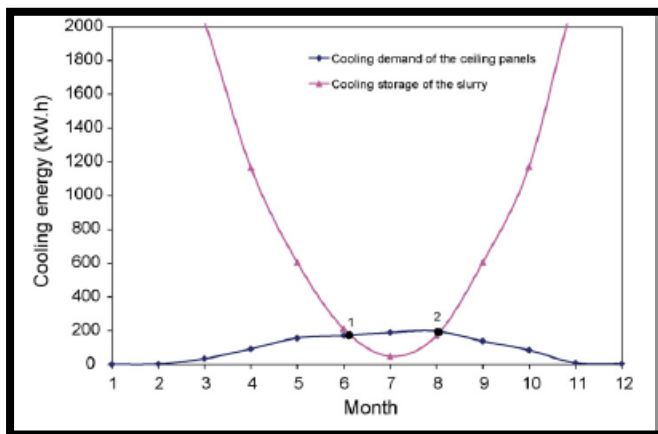


Εικόνα 15.4.4 Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας του ψύκτη στο υβριδικό σύστημα.

15.4.4 Βέλτιστος σχεδιασμός της δεξαμενής αποθήκευσης

Το βέλτιστο μέγεθος της δεξαμενής αποθήκευσης καθορίζεται από τη σύγκριση των συμπεριφορών αποθήκευσης ψύξης της δεξαμενής και των μεταβολών των μηνιαίων απαιτήσεων για ψύξη των πάνελ οροφής.

Στην Εικόνα 15.4.5 φαίνεται η σύγκριση της μηνιαίας TCS που παρουσιάζει το ασβεστόγαλα με το MPCM και της απαίτησης για ψύξη που έχει το πάνελ οροφής για την πόλη του Ουρουγκί. Τα σημεία τομής 1 και 2 παριστάνουν δύο σημεία όπου η μηνιαία TCS, που παρουσιάζει το ασβεστόγαλα με το MPCM στη δεξαμενή, ικανοποιεί την απαίτηση για ψύξη του πάνελ οροφής. Η υψηλότερη τιμή αποθήκευσης των δύο σημείων τομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρηθεί το μέγεθος της δεξαμενής. Εφόσον, η ψύξη με εξάτμιση θα μπορούσε να αποθηκευτεί τόσο το Σάββατο όσο και την Κυριακή και να αποδώσει την ψύξη στο πάνελ οροφής τη Δευτέρα, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί η διήμερη ικανότητα αποθήκευσης ψύξης για να μετρηθεί το μέγεθος της δεξαμενής. Με τις ιδιότητες του MPCM που παρουσιάζεται στον Πίνακα 15.4.2, υπολογίζεται το μέγεθος της δεξαμενής για ικανότητα αποθήκευσης ψύξης ενός μήνα. Μία περίληψη του δοκιμαστικού μήνα και του δοκιμαστικού μεγέθους της δεξαμενής δίνεται στον Πίνακα 15.4.3.



Εικόνα 15.4.5 Σύγκριση της αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας και της ψυκτικής ζήτησης του πάνελ οροφής στο Ουρουγκί.

Πίνακας 15.4.2 Ιδιότητες του ασβεστογάλατος που περιέχει MPCM και των συστατικών του

	Density (kg m^{-3})	Specific heat ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	Thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	Latent heat (kJ kg^{-1})
Hexadecane (solid) [13,14]	780	1805	0.4	224
(Liquid)	770	2221	0.21	
Urea-formaldehyde [15]	1490	1675	0.433	196
Water (at 20 °C) [16]	998	4183	0.599	
MPCM particle (solid)	829	1789	0.382	196
(Liquid)	819	2153	0.203	
MPCM slurry (mass fraction)				
$\phi = 0.1$	987	3945	0.575	19.6
$\phi = 0.2$	976	3707	0.551	39.2
$\phi = 0.3$	933	3470	0.528	58.8
$\phi = 0.4$	911	3232	0.505	78.4

Πίνακας 15.4.3 Σχεδιαστικά μεγέθη της δεξαμενής αποθήκευσης στις πέντε τυπικές πόλεις

	Design month	Design size (m ³ /m ² floor area)
Hong Kong	February	0.0338
Shanghai	April	0.0294
Beijing	May	0.0452
Lanzhou	August	0.0474
Urumqi	August	0.0458

15.5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία προτάθηκε ένα νέο σχέδιο υβριδικού συστήματος που συνδυάζει ένα σύστημα ψύξης οροφής (CC), μία δεξαμενή αποθήκευσης ασβεστογάλματος με MPCM και ένα σύστημα ψύξης με εξάτμιση. Ύστερα από διεξοδική μελέτη του υβριδικού συστήματος εξάγεται το συμπέρασμα ότι είναι κατάλληλο για κλιματικές συνθήκες όπου ο καιρός είναι ξηρός και η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στη μέρα και τη νύχτα είναι υψηλή.

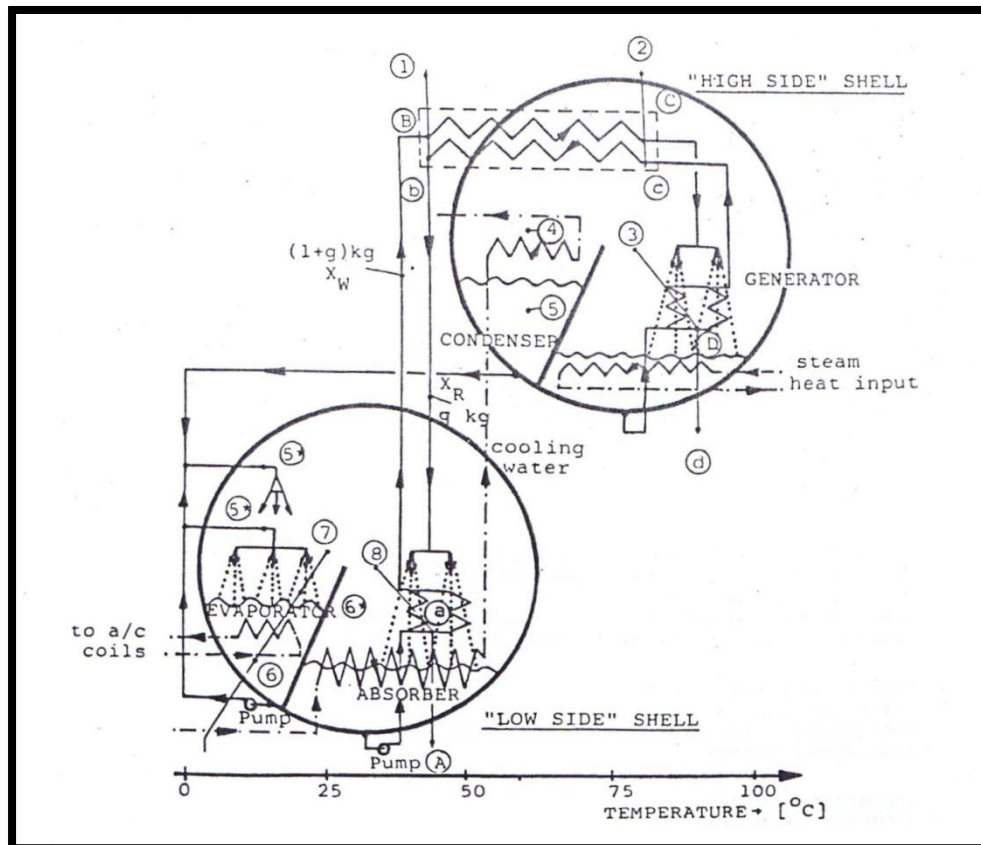
Κεφάλαιο 16

Προβλεπόμενη απόδοση ηλιακών μονάδων απορρόφησης H₂O-LiBr στην Αθήνα [117]

16.1 Εισαγωγή

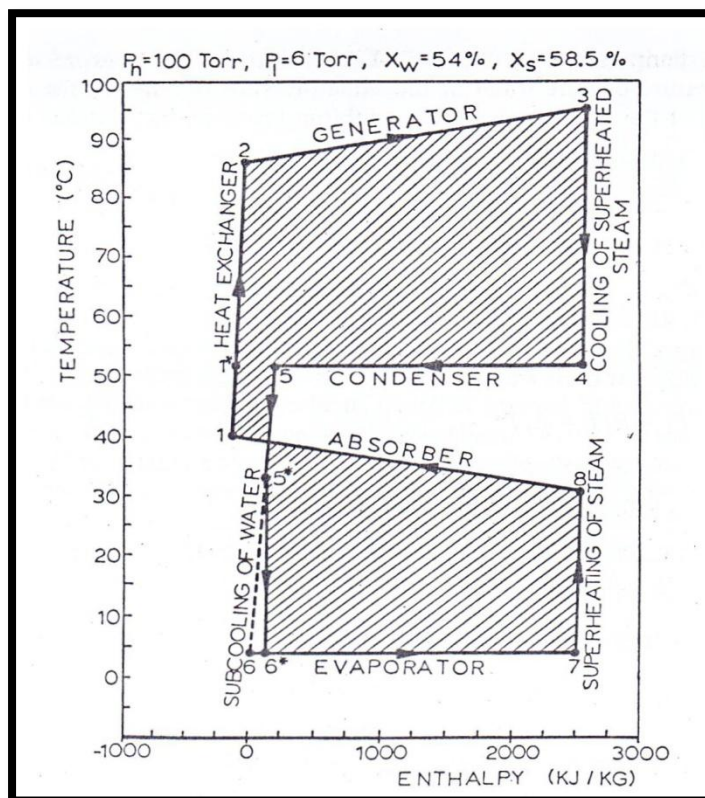
Η απόδοση των μονάδων απορρόφησης H₂O-LiBr, που λειτουργούν ως ψύκτες ή αντλίες θερμότητας, προβλέπεται κατά τη διάρκεια ενός τυπικού έτους στην περιοχή της Αθήνας. Οι υπολογισμοί, οι οποίοι πραγματοποιούνται ανά ώρα, βασίζονται σε μία μέθοδο που προσομοιάζει τη θερμοδυναμική συμπεριφορά της μονάδας απορρόφησης και παρέχει τον ακριβή θερμοδυναμικό της κύκλο. Οι ωριαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και της εξωτερικής θερμοκρασίας ξηρής σφαίρας στην Αθήνα έχουν εκτιμηθεί από αριθμητική επεξεργασία ωριαίων μετρήσεων που λήφθηκαν σε περίοδο 20 ετών. Ανάλογες μελέτες για την απορρόφηση νερού-αμμωνίας μπορούν να βρεθούν σε [118]-[126].

Μία σχηματική αναπαράσταση μονάδων απορρόφησης H₂O-LiBr που λειτουργούν ως ψύκτες ή αντλίες θερμότητας φαίνεται στην Εικόνα 16.1.1.



Εικόνα 16.1.1 Σχηματική αναπαράσταση μονάδων απορρόφησης H₂O-LiBr που λειτουργούν ως ψύκτες ή αντλίες θερμότητας.

Η μονάδα, η οποία δουλεύει με το νερό ως ψυκτικό μέσο και το διάλυμα LiBr ως απορροφητή, λειτουργεί με θερμότητα (στην παρούσα εφαρμογή λειτουργεί με ηλιακή ακτινοβολία) και απαιτεί ένα μικρό ποσό μηχανικής ισχύς για τη λειτουργία των αντλιών. Ολόκληρο το σύστημα έχει κατασκευαστεί σαν ένα κλειστό και σφραγισμένο “πακέτο”, το οποίο λειτουργεί υπό συνθήκες κενού, επειδή ο ατμός του νερού είναι ικανοποιητικό ψυκτικό μέσο μόνο όταν βρίσκεται σε πολύ χαμηλές πιέσεις. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 16.1.1, οι κύριες συσκευές ανταλλαγής συνήθως περιέχονται σε δύο δοχεία, τα οποία είναι το “κάτω” κέλυφος που περιέχει τον απορροφητή και τον εξατμιστή, και το “πάνω” κέλυφος που περιέχει τη γεννήτρια, το συμπυκνωτή και τον εναλλάκτη θερμότητας. Το υγρό νερό-ψυκτικό μέσο λαμβάνει θερμότητα (ψυκτικό φορτίο) στον εξατμιστή, εξατμίζεται και ρέει στον απορροφητή όπου απορροφάται από δυνατή προσροφητική ουσία κλάσματος μάζας X_s (σε % kg LiBr/kg μίγματος), σχηματίζοντας ασθενή προσροφητική ουσία κλάσματος μάζας X_w (σε % kg LiBr/kg μίγματος). Η τελευταία αντλείται στη γεννήτρια όπου και θερμαίνεται, παράγοντας έτσι ατμό σχετικά υψηλής πίεσης (p_h), ο οποίος συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή. Η εναπομείνασα ισχυρή προσροφητική ουσία επιστρέφει στον απορροφητή. Το υγρό νερό-ψυκτικό μέσο ρέει από το συμπυκνωτή στον χαμηλής πίεσης (p_l) εξατμιστή. Ο αντίστοιχος θερμοδυναμικός κύκλος φαίνεται στην Εικόνα 16.1.2.



Εικόνα 16.2.2 Ακριβής θερμοδυναμικός κύκλος ψυκτικής απορρόφησης H₂O-LiBr σε διάγραμμα ενθαλπίας-θερμοκρασίας ($p_h=100$ Torr, $p_l=6$ Torr, $X_w=5.4$, $X_s=58.5\%$).

Η μονάδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για ψύξη είτε για εφαρμογές με αντλίες θερμότητας. Και στις δύο περιπτώσεις λαμβάνει θερμότητα από τους ηλιακούς συλλέκτες σε υψηλό θερμοκρασιακό επίπεδο (εξατμιστής), και παραδίδει το σύνολο σε ένα ενδιάμεσο θερμοκρασιακό επίπεδο (συμπυκνωτής, απορροφητής), όπως φαίνεται στις Εικόνες 16.3.1 και 16.3.2 οι οποίες εξετάζονται παρακάτω.

16.2 Υπολογισμός του ψυκτικού κύκλου απορρόφησης H₂O-LiBr

Μία γρήγορη μέθοδος για τον υπολογισμό του ψυκτικού κύκλου απορρόφησης H₂O-LiBr περιγράφεται παρακάτω και βασίζεται σε μία λεπτομερή θερμοδυναμική ανάλυση, η οποία έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενη δημοσίευση [127]:

16.2.1 Περιγραφή του κύκλου

Η Εικόνα 16.1.2 δείχνει ένα παράδειγμα θερμοδυναμικού κύκλου ψυκτικής απορρόφησης H₂O-LiBr, ο οποίος αντιστοιχεί στις τιμές των βασικών παραμέτρων $p_h=100$ Torr, $p_l=6$ Torr, $X_w=54$, $X_s=58.5\%$. Οι θερμοδυναμικές μεταβολές που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια του κύκλου εξηγούνται παρακάτω:

Μεταβολή 3-4. Ψύξη του υπέρθερμου ατμού. Ο υπέρθερμος ατμός που έρχεται από τη γεννήτρια (σημείο 3) απορρίπτει θερμότητα στο νερό ψύξης. Εάν χρησιμοποιηθεί ένας τριπλός εναλλάκτης θερμότητας, απορρίπτεται θερμότητα και στην ασθενή προσροφητική ουσία που ρέει στη γεννήτρια. Στο σημείο 4 ο ατμός είναι κορεσμένος.

Μεταβολή 4-5. Υγροποίηση του κορεσμένου ατμού και στη συνέχεια φτάνοντας στο σημείο 5 γίνεται κορεσμένο νερό.

Μεταβολή 5-5*. Το κορεσμένο ψυκτικό μέσο (H₂O) ρέει στον εξατμιστή όπου υποψύχεται.

Μεταβολή 5*-6*. Το ψυκτικό μέσο που παρέχεται στον εξατμιστή ψεκάζεται (ισενθαλπικός στραγγαλισμός) από την αντλία ψύξης πάνω σε μία δέσμη σωλήνων μέσα στην οποία ρέει το προς ψύξη νερό.

Μεταβολή 6*-7. Το ψυκτικό μέσο εξατμίζεται στην επιφάνεια των σωλήνων παράγοντας ψυκτική ισχύ.

Μεταβολή 7-8. Υπερθέρμανση του ατμού λαμβάνοντας θερμότητα από το κορεσμένο ψυκτικό μέσο.

Ο υπολογισμός των παραπάνω μεταβολών μπορεί να γίνει πολύ εύκολα από το διάγραμμα h-T μιας και το ψυκτικό μέσο είναι ένας παράγοντας, καθαρό νερό ή ατμός.

Μεταβολή 1-2. Η μεταβολή αντιστοιχεί στον εναλλάκτη θερμότητας του υγρού, το οποίο μεταφέρει θερμότητα από τη θερμή, ισχυρή προσροφητική ουσία, που ρέει στον απορροφητή, στην ασθενή, που ρέει στη γεννήτρια.

Μεταβολή 8-1. Αυτή η μεταβολή αντιστοιχεί στον απορροφητή και είναι θερμοδυναμικά ισοδύναμη των ακόλουθων τριών ρευμάτων: i) της ισχυρής προσροφητικής ουσίας, η οποία ψεκάζεται προς τα κάτω και απορροφά τον ανερχόμενο ρέοντα ατμό, παράγοντας την ασθενή προσροφητική ουσία, ii) τον ατμό που προέρχεται από τον εξατμιστή, ο οποίος ρέει προς τα πάνω σε αντιρροή με την κατερχόμενη προσροφητική ουσία, iii) την ασθενή προσροφητική ουσία, η οποία ρέει μέσα στη δέσμη σωλήνων και λαμβάνει μέρος της θερμότητας που απελευθερώνεται όταν ο ατμός απορροφάται από την ισχυρή προσροφητική ουσία.

Μεταβολή 2-3. Η μεταβολή αυτή αντιστοιχεί στη γεννήτρια και είναι θερμοδυναμικά ισοδύναμη των ακόλουθων τριών ρευμάτων: i) της ισχυρής προσροφητικής ουσίας, η οποία ψεκάζεται προς τα κάτω, ii) του ατμού που παράγεται θερμαίνοντας την ασθενή προσροφητική ουσία με εξωτερικές πηγές θερμότητας, iii) την καταλήγουσα ισχυρή προσροφητική ουσία, η οποία ρέει μέσα στη δέσμη σωλήνων και συνεισφέρει στη θέρμανση της κατερχόμενης ασθενούς προσροφητικής ουσίας.

16.3 Εφαρμογή της μεθόδου σε ηλιακές μονάδες στην Αθήνα

16.3.1 Κλιματολογικά δεδομένα και ηλιακοί συλλέκτες

Η μέση άμεση G_b (kW/m²) και έμμεση G_d (kW/m²) ακτινοβολία, που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο της Αθήνας, έχουν εκτιμηθεί σε προηγούμενες μελέτες [128]-[130], ύστερα από στατιστικές αναλύσεις ωριαίων μετρήσεων της περιόδου 1961-1980, και δίνονται από τις σχέσεις:

$$G_b = M_t + A_t \sin\left(\frac{360}{365} D - P_t\right) \quad (16.3.1)$$

$$G_d = m_t + a_t \sin\left(\frac{360}{365} D - p_t\right) \quad (16.3.2)$$

όπου, $D(=1-365)$ είναι οι ημέρες του χρόνου και οι υπόλοιπες μεταβλητές δίνονται στην έρευνα [129].

Η ημερήσια κατανομή της εξωτερικής μέσης θερμοκρασίας ξηρής σφαίρας T_{amb} (°C) στην Αθήνα για κάθε μέρα ενός τυπικού έτους έχει εκτιμηθεί σε προηγούμενες μελέτες [131],[132], χρησιμοποιώντας μετρήσεις που έγιναν κατά την περίοδο 1952-1962, και δίνεται από τη σχέση:

$$T_{amb} = M + \sum_{i=1}^3 C_i \cos \left[i \frac{360}{24} (t - 0.5) \right] + \sum_{i=1}^3 S_i \sin \left[i \frac{360}{24} (t - 0.5) \right] \quad (16.3.3)$$

Οι ηλιακοί συλλέκτες θεωρούνται επίπεδες πλάκες κενού με βαθμό απόδοσης η , ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{Q_{coll}}{G_t} = 0.71 - 0.00244 \frac{T_{coll} - T_{amb}}{G_t} \quad (16.3.4)$$

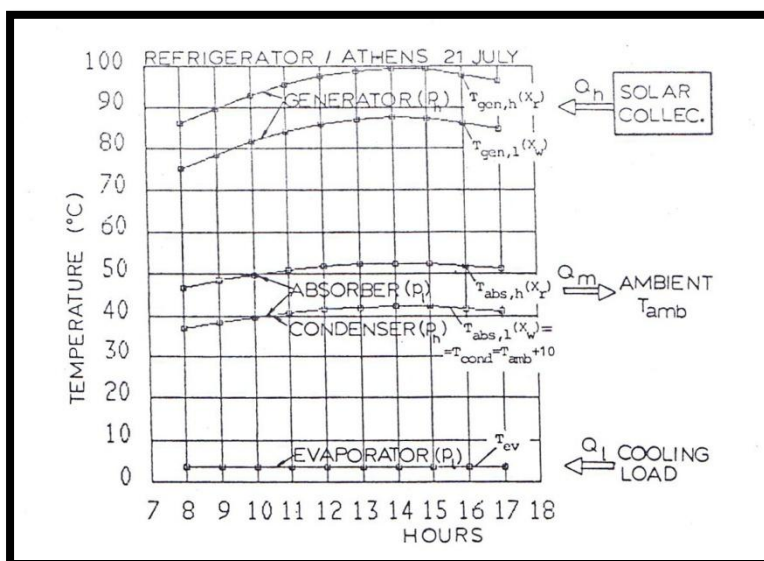
όπου, Q_{coll} (kW/m²) είναι η χρήσιμη θερμότητα ανά μονάδα συλλεκτικής επιφάνειας, G_t (kW/m²) είναι η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους συλλέκτες, και T_{coll} (°C) είναι η θερμοκρασία της πλάκας του συλλέκτη.

Οι συλλέκτες έχουν νότιο προσανατολισμό και κλίση $\beta = \phi - \delta$, όπου $\phi = 37.97^\circ$ είναι το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας και δ η κλίση της ηλιακής ακτινοβολίας.

16.3.2 Μονάδα ψύξης

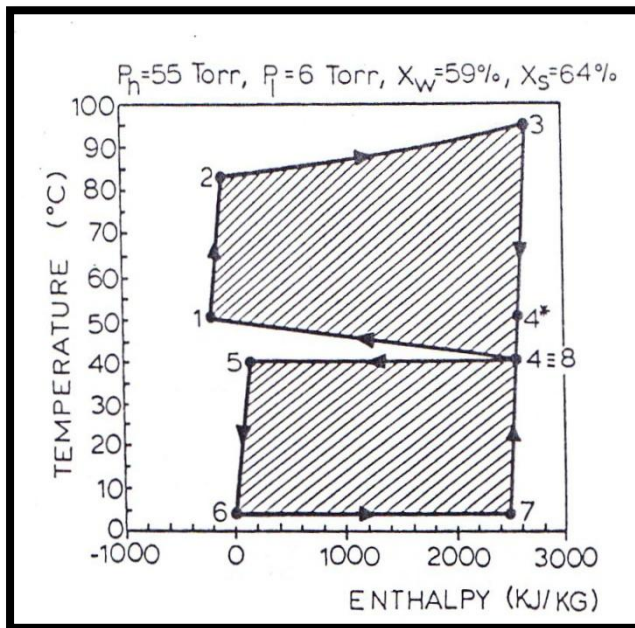
Η θερμοκρασία εξάτμισης είναι $T_{ev} = 3.8^\circ\text{C}$ καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η αντίστοιχη πίεση ισορροπίας, η οποία παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, είναι $p = 6$ Torr.

Για να εξασφαλιστεί η απόρριψη θερμότητας στο ενδιαμέσο θερμοκρασιακό επίπεδο, από το συμπυκνωτή στο περιβάλλον (Εικόνα 16.3.1), η θερμοκρασία υγροποίησης T_{cond} ποικίλει από ώρα σε ώρα ώστε να μένει πάντα 10°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η απόρριψη θερμότητας στο ενδιαμέσο θερμοκρασιακό επίπεδο, από το συμπυκνωτή στο περιβάλλον, έχει θερμοκρασιακό εύρος από $T_{abs,l}$ σε $T_{abs,h}$. Για να γίνεται απόρριψη θερμότητας κάθε ώρα ισχύει $T_{abs,l} = T_{cond} = T_{amb} + 10^\circ\text{C}$.



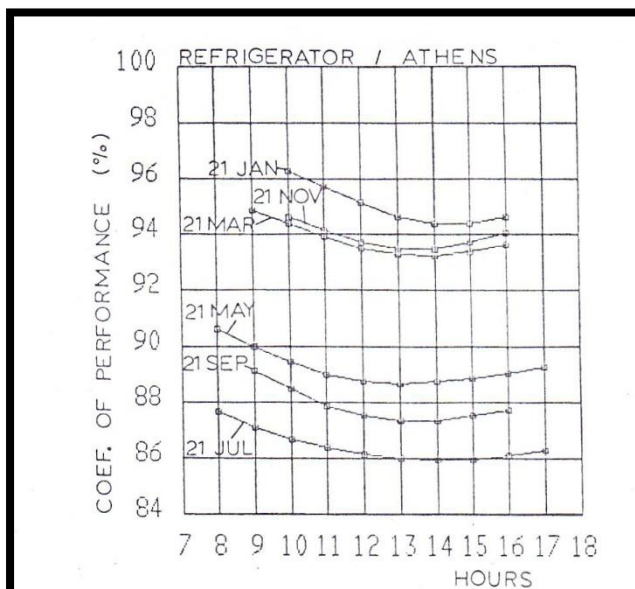
Εικόνα 16.3.1 Ημερήσια κατανομή των χαρακτηριστικών θερμοκρασιών T_{ev} , T_{cond} , $T_{abs,l}$, $T_{abs,h}$, $T_{gen,l}$, $T_{gen,h}$ του απορροφητή ψύξης $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ για την 21^η ημέρα του Ιουλίου στην Αθήνα.

Στην Εικόνα 16.3.2 φαίνεται ο ακριβής θερμοδυναμικός κύκλος ψυκτικής απορρόφησης $H_2O-LiBr$ σε διάγραμμα ενθαλπίας-θερμοκρασίας ($p_h=100$ Torr, $p_l=6$ Torr, $X_w=59$, $X_s=64\%$) στην περίπτωση όπου $T_4=T_8$.

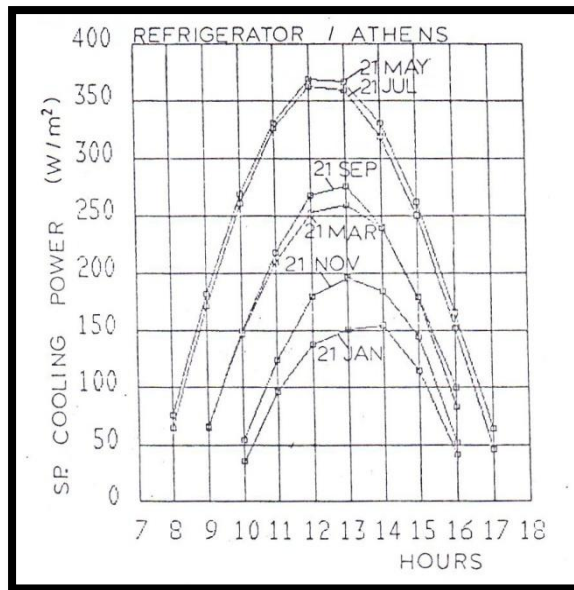


Εικόνα 16.3.2 Ακριβής θερμοδυναμικός κύκλος ψυκτικής απορρόφησης $H_2O-LiBr$ σε διάγραμμα ενθαλπίας-θερμοκρασίας ($p_h=100$ Torr, $p_l=6$ Torr, $X_w=59$, $X_s=64\%$) στην περίπτωση όπου $T_4=T_8$.

Η ημερήσια διακύμανση του βαθμού απόδοσης και της ψυκτικής ισχύς δίνονται στις Εικόνες 16.3.3 και 16.3.4, αντίστοιχα.



Εικόνα 16.3.3 Ωριαίος βαθμός απόδοσης της ψυκτικής μονάδας απορρόφησης $H_2O-LiBr$ για την 21^η ημέρα διαφόρων μηνών στην Αθήνα.



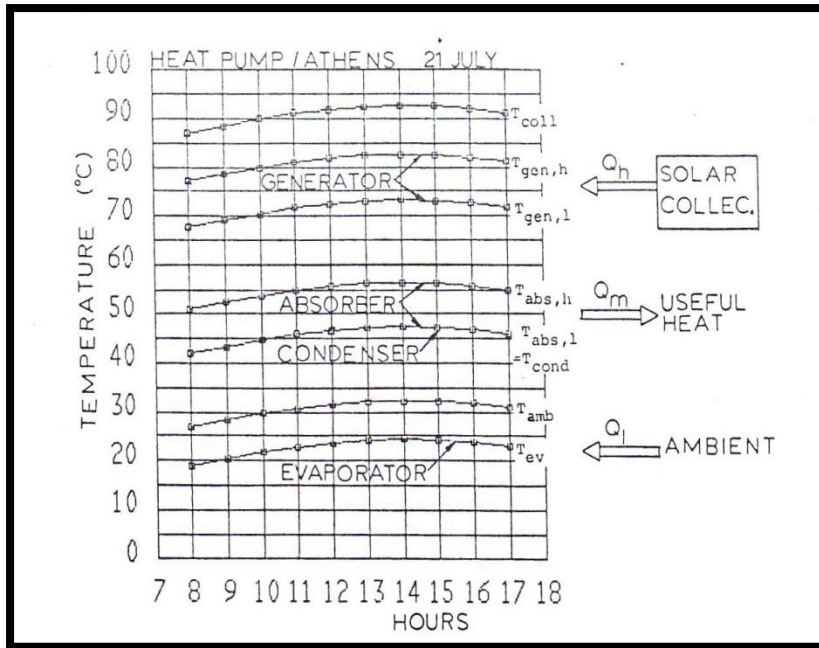
Εικόνα 16.3.4 Ωριαία ψυκτική ισχύς της ψυκτικής μονάδας απορρόφησης H₂O-LiBr, για λειτουργία με επίπεδους συλλέκτες κενού στην Αθήνα κατά τη διάρκεια της 21^η ημέρας διαφόρων μηνών στην Αθήνα.

16.3.3 Αντλία θερμότητας

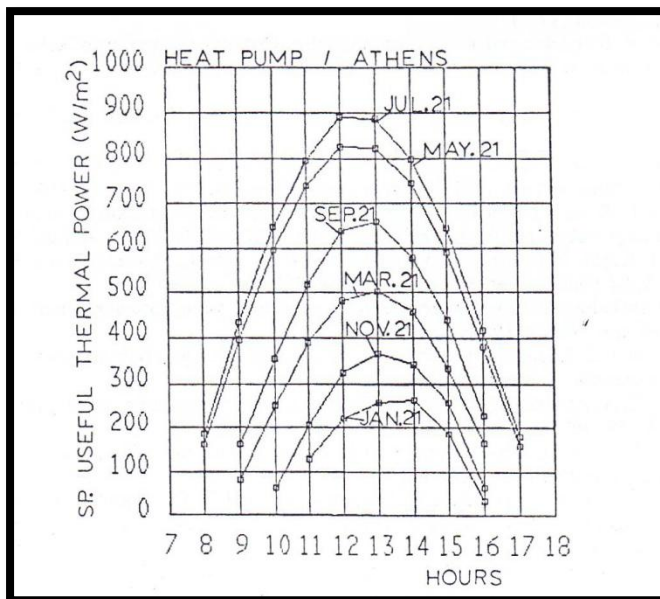
Για τη διασφάλιση εισόδου θερμότητας σε χαμηλό θερμοκρασιακό επίπεδο, από το περιβάλλον στον εξατμιστή, η θερμοκρασία εξάτμισης κυμαίνεται από ώρα σε ώρα ώστε να είναι πάντα 8°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η χρήσιμη θερμότητα δίνεται από το συμπυκνωτή και τον απορροφητή στο ενδιάμεσο θερμοκρασιακό επίπεδο (Εικόνα 16.3.5). Η εισερχόμενη θερμότητα στο υψηλό θερμοκρασιακό επίπεδο από τους ηλιακούς συλλέκτες στη γεννήτρια (Εικόνα 16.3.5) λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες από $T_{abs,l}$ σε $T_{abs,h}$.

Στον Πίνακα 16.3.1 φαίνονται οι βασικές ποσότητες που σχετίζονται με τον υπολογισμό που περιγράφηκε παραπάνω για τον ανά ώρα υπολογισμό των δεδομένων της 21^{ης} ημέρας του Μαρτίου στην Αθήνα.

Στην Εικόνα 16.3.6 φαίνεται η υπολογισθείσα ημερήσια διακύμανση της ωφέλιμης θερμικής ισχύς για την 21^η ημέρα επιλεγμένων μηνών ενός τυπικού έτους στην περιοχή της Αθήνας.



Εικόνα 16.3.5 Ημερήσια διακύμανση των χαρακτηριστικών θερμοκρασιών T_{ev} , T_{amb} , T_{cond} , $T_{abs,l}$, $T_{abs,h}$, $T_{gen,l}$, $T_{gen,h}$ και T_{coll} του απορροφητή ψύξης $H_2O-LiBr$ για την 21^η ημέρα του Ιουλίου στην Αθήνα.



Εικόνα 16.3.6 Ειδική ωφέλιμη θερμική ισχύς συναρτήσει των ωρών του εικοσιτετραώρου, που παράγεται από την αντλία θερμότητας της ψυκτικής μονάδας απορρόφησης $H_2O-LiBr$, για λειτουργία με επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες κενού στην Αθήνα την 21^η ημέρα διαφόρων μηνών.

Πίνακας 16.3.1 Υπολογισμένες χαρακτηριστικές τιμές της ψυκτικής μονάδας απορρόφησης H₂O-LiBr που λειτουργεί σαν αντλία θερμότητας με επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες κενού, για κάθε ώρα της 21^{ης} ημέρας του Μαρτίου στην Αθήνα

Table 1. Calculated characteristic quantities of the H₂O-LiBr absorption unit operating as a heat pump with flat plate evacuated collectors, for each hour of 21 March in Athens

hour	T_{amb} (°C)	T_{ev} (°C)	T_{cond} $T_{gen,i}$ (°C)	$T_{abs,s}$ (°C)	$T_{gen,j}$ (°C)	$T_{gen,s}$ (°C)	X_c	X_s	p_i (Torr)	p_s (Torr)	$Q_{a,m}$ (kJ kg ⁻¹)	Q_i (kJ kg ⁻¹)	$Q_{s,m}$ (kJ kg ⁻¹)	$(HGF)_{th}$ (%)	T_{cath} (°C)	Q_{cath} (W m ⁻²)	$Q_{s,m}$ (W m ⁻²)
9	11.8	3.8	26.9	35.8	52.8	62.2	51.4	56.4	6.0	26.4	2644	2436	5080	192.1	72.2	43	83
10	12.7	4.7	27.7	36.7	53.7	63.1	51.3	56.3	6.4	27.8	2640	2434	5074	192.2	73.1	131	252
11	13.6	5.6	28.6	37.5	54.4	63.8	51.2	56.2	6.8	29.3	2637	2431	5068	192.2	73.8	203	391
12	14.3	6.3	29.3	38.3	55.2	64.6	51.2	56.2	7.1	30.5	2635	2430	5065	192.2	74.6	251	483
13	14.7	6.7	29.7	38.6	55.5	64.9	51.1	56.1	7.3	31.2	2632	2429	5061	192.2	74.9	262	504
14	14.8	6.8	29.8	38.7	55.6	65.0	51.1	56.1	7.4	31.4	2632	2428	5060	192.2	75.0	239	460
15	14.5	6.5	29.5	38.6	55.5	65.0	51.2	56.2	7.3	31.0	2635	2429	5064	192.2	75.0	174	335
16	14.0	6.0	29.0	38.0	55.0	64.4	51.2	56.2	7.0	30.1	2636	2430	5066	192.2	74.4	86	165

16.4 Συμπεράσματα

Η θεωρητική απόδοση μιας μονάδας ψυκτικής απορρόφησης H₂O-LiBr που λειτουργεί ως ψύκτης ή αντλία θερμότητας υπολογίσθηκε για τη διάρκεια ενός έτους στην Αθήνα. Οι βασικές καινοτομίες της μελέτης αυτής ανήκουν στην ανάπτυξη ενός γρήγορου αλγορίθμου που θα προβλέπει την απόδοση της μονάδας και την εφαρμογή του στην Αθήνα χρησιμοποιώντας πραγματικά κλιματολογικά δεδομένα.

Στην περίπτωση λειτουργίας ως ψύκτη, βρέθηκε ότι ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης, COP, κυμαίνεται κατά τη διάρκεια του έτους από 86% έως 89% με τις χαμηλότερες τιμές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και τις υψηλότερες κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 16.3.3. Το ημερήσιο εύρος του COP είναι περίπου 2% και παρουσιάζει ελάχιστη τιμή στις 14:00 και μέγιστη το πρωί, όταν ξεκινά η λειτουργία. Οι υπολογισμένες μέγιστες τιμές της ειδικής ψυκτικής ισχύς για τον Ιανουάριο, Μάρτιο, Μάιο, Ιούλιο, Σεπτέμβριο και Νοέμβριο είναι 155, 260, 369, 363, 277 και 197 W/m² συλλέκτη, αντίστοιχα, για τις ώρες 12:00, 13:00 και 14:00, όπως φαίνεται στην Εικόνα 16.3.4.

Στην περίπτωση λειτουργίας ως αντλία θερμότητας, ο θεωρητικός συντελεστής θερμικού κέρδους είναι σχετικά σταθερός κατά τη διάρκεια του έτους, μιας και κυμαίνεται από 192% έως 196%. Οι υπολογισμένες μέγιστες τιμές της ειδικής ωφέλιμης θερμικής ισχύς για τον Ιανουάριο, Μάρτιο, Μάιο, Ιούλιο, Σεπτέμβριο και Νοέμβριο είναι 264, 504, 825, 890, 658 και 369 W/m² συλλέκτη, αντίστοιχα, για τις ώρες 12:00, 13:00 και 14:00, όπως φαίνεται στην Εικόνα 16.3.6. Η ωφέλιμη θερμική ισχύς των παραπάνω μηνών στη 13:00 παρατηρείται στο θερμοκρασιακό εύρος 27-36, 30-39, 39-48, 47-56, 43-52 και 29-38 °C, αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 17

Χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) σε πάνελ οροφής για ηλιακή ψύξη χώρου στην περιοχή της Αθήνας

17.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα μελέτη θα εξεταστεί η ψύξη χώρου με εμβαδόν οροφής $20 \times 5 = 100 \text{m}^2$, ύψος 2.5m και συνολική επιφάνεια υαλοπινάκων 8m^2 στο νότιο και δυτικό τοίχος. Το κτίριο βρίσκεται στην Αθήνα με γεωγραφικό πλάτος $\phi = 37.97^\circ$. Στην οροφή του συγκεκριμένου κτιρίου είναι τοποθετημένοι ηλιακοί επίπεδοι συλλέκτες κενού συνολικού εμβαδού 10m^2 και κλίσης 20° με σκοπό τη θέρμανση νερού, το οποίο εισέρχεται σε ψυκτική μηχανή απορρόφησης, ψύχεται και στη συνέχεια ρέει κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας σε σωλήνες εγκατεστημένους μέσα στο πάνελ της οροφής. Κατά τις ώρες μη ηλιοφάνειας διακόπτεται η παροχή του νερού με συνέπεια την υγροποίηση του PCM λόγω της απορρόφησης θερμότητας από τον προς ψύξη χώρο. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι με αυτή την εφαρμογή δεν πραγματοποιείται 100% κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται και άλλα κοινά μέσα ψύξης, όπως κλιματιστικά. Εφόσον σκοπός μας είναι η ψύξη του χώρου η μελέτη θα πραγματοποιηθεί την 21^η ημέρα για τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο). Τέλος, ακολουθεί παραμετρική διερεύνηση για την επιλογή των βέλτιστων τιμών συγκεκριμένων παραμέτρων.

17.2 Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους συλλέκτες και τους υαλοπίνακες

[133]

Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας G (W) που προσπίπτει στους ηλιακούς συλλέκτες χρησιμοποιούνται οι σχέσεις της μέση στιγμιαίας άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου:

$$G_b = M_t + A_t \times \sin\left(\frac{360}{365} \times D - P_t\right) \quad (17.2.1)$$

$$G_d = m_t + a_t \times \sin\left(\frac{360}{365} \times D - P_t\right) \quad (17.2.2)$$

Τις οποίες αντικαθιστούμε στη σχέση που ακολουθεί:

$$G_t = G_b \times R_b + G_d \times \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + (G_b + G_d) \times \rho \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (17.2.3)$$

όπου,

- ρ είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους, η οποία για συνηθισμένο έδαφος έχει την τιμή $\rho=0.2$
- $\beta=20^\circ$ η κλίση των ηλιακών συλλεκτών
- $R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$ για νότιο προσανατολισμό ($\gamma = 0^\circ$) με (17.2.4)

$$\cos\theta = \sin\delta \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cos(\varphi - \beta) \cos\omega \quad (17.2.5)$$

$$\cos\theta_z = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega \quad (17.2.6)$$

Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο χώρο από τους υαλοπίνακες που βρίσκονται στο νότιο τοίχο ισχύουν οι παραπάνω σχέσεις με $\beta=90^\circ$.

Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο χώρο από τους υαλοπίνακες που βρίσκονται στο δυτικό τοίχο ισχύουν οι παραπάνω σχέσεις με $\beta=90^\circ$, $\gamma=90^\circ$ και η γωνία πρόσπτωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \cos\theta = \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega \\ + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \quad (17.2.7)$$

17.3 Επιλογή υλικού αλλαγής φάσης (PCM)

Το υλικό αλλαγής φάσης που επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ένα υποθετικό υλικό, του οποίου η κατασκευή απαιτεί περαιτέρω εργαστηριακή έρευνα. Τα χαρακτηριστικά του είναι:

- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης $19-22^\circ\text{C}$
- Λανθάνουσα θερμότητα $H=200\text{ kJ/kg}$
- Πυκνότητα $\rho=1700\text{ kg/m}^3$
- Ειδική θερμική αγωγιμότητα $k=1.2\text{ W/m}^\circ\text{C}$
- Ειδική θερμοχωρητικότητα στερεής και υγρής φάσης $C_{p,s}=C_{p,l}=7000\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Για την προσομοίωση της αλλαγής φάσης κατά τις αριθμητικές επιλύσεις χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας, όπου η θερμοχωρητικότητα του PCM δίνεται από μία συνάρτηση της θερμοκρασίας γνωστή ως “συνάρτηση ενεργού θερμοχωρητικότητας” $C_{p,\text{eff}}(T)$. Επιλέχθηκε το μοντέλο αυτό, επειδή η αλλαγή φάσης ενδιαφέρει μόνο σαν μακροσκοπικό φαινόμενο χωρίς να υπάρχει ανάγκη υπολογισμού περαιτέρω λεπτομερειών στη διφασική περιοχή.

Κατόπιν μετρήσεων στο Εργαστήριο Ψύξης και Κλιματισμού ΕΜΠ, εκτιμήθηκαν οι συναρτήσεις $C_{p,\text{eff}}$ ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$) συναρτήσει της θερμοκρασίας T ($^\circ\text{C}$):

$$C_p = 4 \times (H - b \times C_{p,s}) \times \frac{T - T_s}{b^2} + C_{p,s} \quad \text{για } 18 \leq T \leq 20 \quad (17.3.1)$$

$$C_p = 4 \times (b - C_{p,l} - H) \times \frac{T - T_s - b/2}{b^2} + 2 \times \frac{H}{b} - C_{p,l} \quad \text{για } 20 \leq T \leq 22 \quad (17.3.2)$$

όπου, b είναι το θερμοκρασιακό εύρος ($T_s - T_l$) με T_l και T_s τις θερμοκρασίες στην αρχή και το πέρας της στερεοποίησης αντίστοιχα.

Με αντικατάσταση των τιμών των μεταβλητών οι παραπάνω εξισώσεις λαμβάνουν τη μορφή:

$$C_p = 30500(T - 18) + 7000 \quad \text{για } 18 \leq T \leq 20 \quad (17.3.3)$$

$$C_p = 68000 - 30500(T - 20) \quad \text{για } 20 \leq T \leq 22 \quad (17.3.4)$$

17.4 Καθορισμός της διαστρωμάτωσης των τοίχων και της οροφής

17.4.1 Διαστρωμάτωση τοίχων

Η διαστρωμάτωση των τοίχων είναι ίδια και για τους τέσσερις τοίχους του κτιρίου και παρουσιάζεται παρακάτω:

- Σοβάς 10 mm
- Οπτοπλινθοδομή 60 mm
- Μόνωση: πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης 50 mm
- Οπτοπλινθοδομή 60 mm
- Σοβάς 10 mm

Η θερμική αντίσταση των τοίχων προκύπτει ύστερα από υπολογισμούς ίση με $U=0.69$ $W/m^{\circ}C$, ενώ η θερμική αντίσταση των υαλοπινάκων λαμβάνεται ίση με $U=2.8$ $W/m^{\circ}C$.

17.4.2 Διαστρωμάτωση οροφής

Στο πάνελ της οροφής είναι τοποθετημένο το PCM το οποίο έχει πάχος 50 mm. Πάνω από το PCM είναι τοποθετημένη η μόνωση, η οποία θεωρείτε αδιαβατικό όριο και για το λόγο αυτό δεν εξετάζεται η διαστρωμάτωση της οροφής πάνω από αυτή.

17.4.3 Φυσικά χαρακτηριστικά υλικών

Πίνακας 17.1 Χαρακτηριστικά υλικών

Υλικά	Πυκνότητα ρ (kg/m ³)	Θερμική αγωγιμότητα k (W/m °C)	Ειδική θερμοχωρητικότητα C_p (J/kg °C)
Αέρας	1.2	-	1004
Οπτοπλινθοδομή	1690	0.653	900
Μόνωση τοίχου (πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης)	35	0.04	1210
Μόνωση οροφής (πλάκες εξιλασμένης πολυστερίνης)	27	0.019	1210
Σοβάς	1860	1.2	835

Η τιμή του συντελεστή συναγωγής ανάμεσα στον τοίχο και το περιβάλλον επιλέγεται ίση προς $h_{out}=16$ W/m² °C, η οποία αποτελεί τυπική τιμή που χρησιμοποιείται συχνά στις εφαρμογές. Η ASHRAE προτείνει τιμή για το συντελεστή συναγωγής ανάμεσα στην οροφή και τον εσωτερικό χώρο ίση προς $h_{in}=8$ W/m² °C. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγεται η τιμή $h_{in}=6$ W/m² °C, η οποία δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα. Για λόγους πληρότητας ακολουθεί παραμετρική μελέτη ως προς αυτό τον παράγοντα.

17.5 Μαθηματικό μοντέλο- Αριθμητική προσομοίωση

17.5.1 Μαθηματικό μοντέλο

Το μαθηματικό μοντέλο που ακολουθείται κατά την υπολογιστική διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω:

1. Αρχικά, υπολογίζεται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους συλλέκτες για κάθε ώρα της ηλιοφάνειας (07:00-18:00) από τις εξισώσεις που δίνονται από τις σχέσεις 17.2.1-17.2.3. Επειδή στη μελέτη αυτή το χρονικό βήμα είναι $dt=10$ min, θεωρείται ότι οι τιμές που υπολογίσθηκαν ισοκατανέμονται στο διάστημα της μίας ώρας.
2. Όμοια, υπολογίζεται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους υαλοπίνακες (5m² στο νότιο και 3m² στο δυτικό τοίχο) από τις εξισώσεις που δίνονται από τις σχέσεις 17.2.1-17.2.3, 17.2.7 Επειδή στη μελέτη αυτή το χρονικό βήμα είναι $dt=10$ min θεωρείται ότι οι τιμές που υπολογίσθηκαν ισοκατανέμονται στο διάστημα της μίας ώρας.

3. Γίνεται υπόθεση μιας ενδεικτικής τιμής για την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου T_{in} προκειμένου να γίνουν οι ακόλουθοι υπολογισμοί.
4. Στη συνέχεια υπολογίζεται η πραγματική αποδιδόμενη θερμική ισχύς του συλλέκτη Q_u (W) σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_u = G_t \left(0.71 - 0.00244 \frac{T_{coll} - T_a}{G_t} \right) \quad (17.5.1)$$

όπου,

T_{coll} είναι η θερμοκρασία νερού στο συλλέκτη, η οποία λαμβάνεται από την Εικόνα 16.3.1 [117],

T_a είναι η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος, η οποία λαμβάνεται από πίνακες του βιβλίου του Κλιματισμού για κάθε ώρα του κάθε μήνα [134].

5. Η ψυκτική ισχύς είναι συνάρτηση του συντελεστή απόδοσης της ψυκτικής μηχανής απορρόφησης, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$COP = \frac{Q_\psi}{Q_u} \leftrightarrow Q_\psi = COP \times Q_u \quad (17.5.2)$$

και οι τιμές του λαμβάνονται από την Εικόνα 16.3.3 [117].

Είναι υποχρεωτικό να αξιοποιηθεί όλο το Q_ψ και να απορροφηθεί από το PCM. Σε αντίθετη περίπτωση είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μικρότερη συλλεκτική επιφάνεια (A_c) ή μεγαλύτερη μάζα PCM.

6. Λόγω απλούστευσης των υπολογισμών οι σωλήνες νερού είναι μία ομοιόμορφη κατανεμημένη πηγή σε όλη τη μάζα του PCM. Επομένως, η μόνη μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM γίνεται στην κατακόρυφη κατεύθυνση (y). Το Q_ψ μπαίνει σε κάθε όγκο ελέγχου (control volume) ως πηγή ισχύος S (W/m^3), η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$S = \frac{Q_\psi}{V} \quad (17.5.3)$$

όπου,

V είναι ο όγκος του PCM και είναι ίσος προς $5m^3$

Το Q_ψ έχει προφανώς αρνητικό πρόσημο εφόσον αναφερόμαστε σε ψύξη χώρου.

7. Στην πορεία υπολογίζονται οι θερμικές απώλειες $Q_{απ}$ (W) από τις επιφάνειες των τοίχων και των υαλοπινάκων σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_{απ} = U \times A (T_{ex} - T_{in}) \quad (17.5.4)$$

όπου,

U είναι η αντίστοιχη θερμική αντίσταση,

A είναι η εκάστοτε επιφάνεια,

T_{ex} είναι η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος που λαμβάνεται από πίνακες του βιβλίου του Κλιματισμού για κάθε ώρα του κάθε μήνα [134]. Στην περίπτωση των τοίχων, επειδή δεν υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει, λαμβάνονται προσεγγιστικά οι θερμοκρασίες ηλίου-αέρος. Βέβαια, η παραπάνω σχέση είναι προσεγγιστική. Κανονικά θα έπρεπε να γίνει θερμοκρασιακή ανάλυση στους τοίχους, αλλά κάτι τέτοιο είναι εκτός του πεδίου έρευνας της παρούσας μελέτης.

8. Σειρά έχει η μελέτη της κατανομής της θερμοκρασίας σε όλο το PCM. Η μεταβατική μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας δίνεται από τη διαφορική εξίσωση:

$$\rho \times C_p \times \frac{\partial T}{\partial t} = k \times \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + S \quad (17.5.5)$$

Για την επίλυσή της χρησιμοποιείται η έμμεση διατύπωση της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

9. Μέρος της ψυκτικής ισχύς Q_{ψ} αποθηκεύεται για ψύξη τις ώρες μη ηλιοφάνειας, ενώ το υπόλοιπο ψύχει το χώρο με μορφή θερμορροής Q_p (W) ανάμεσα στην επιφάνεια του PCM και τον εσωτερικό χώρο που δίνεται από τη σχέση:

$$Q_p = h_{in} (T_{οροφής} - T_{in}) \quad (17.5.6)$$

10. Η εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου υπολογίζεται από την επίλυση της παρακάτω εξίσωσης ως προς T_{in} :

$$\rho_{air} \times C_{p,air} \times \frac{T_{in} - T_{in}^o}{dt} = \Sigma q \quad (17.5.7)$$

όπου,

T_{in}^o είναι η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα,

Σq ισούται κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας με τη θερμότητα που έχει απορροφήσει ο αέρας λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας αυξημένη με το ποσό θερμότητας που απορροφάει λόγω της συναγωγής από το πάνελ του PCM προς τον αέρα του εσωτερικού χώρου, μείον τις απώλειες από τους τοίχους και τους υαλοπίνακες.

11. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή για τις δώδεκα ώρες της ηλιοφάνειας (07:00-18:00) επιλύονται εκ νέου οι παραπάνω εξισώσεις χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η πηγή S, δηλαδή θέτοντας εκτός λειτουργίας το σύστημα ηλιακοί συλλέκτες-σωλήνες νερού, για τις επόμενες δώδεκα ώρες της μη

ηλιοφάνειας (19:00-06:00). Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δώδεκα ωρών το ρόλο των πηγών θερμότητας αναλαμβάνει κυρίως το PCM.

12. Μετά το βήμα 11 επαναλαμβάνονται όλα τα βήματα ξανά από το βήμα 4 έως ότου επέλθει η σύγκλιση του προβλήματος σε περιοδικά μόνιμη κατάσταση.

17.5.2 Αριθμητική προσομοίωση[135]

Η αριθμητική προσομοίωση θα γίνει με την επίλυση της γραμμικής εξίσωσης με τριδιαγώνια μορφή (TDMA), χρησιμοποιώντας την έμμεση διατύπωση της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών.

Πιο συγκεκριμένα, το πάνελ του PCM χωρίζεται σε N κόμβους (στη συγκεκριμένη εφαρμογή το PCM χωρίζεται σε 50 κόμβους), οι οποίοι θεωρείται ότι ισαπέχουν (dx σταθερό), η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών γίνεται:

$$A_N \times T_N = A_{N+1} \times T_{N+1} + A_{N-1} \times T_{N-1} + A_N^o \times T_N^o \quad (17.5.8)$$

όπου,

$$A_{N+1} = \frac{k_{N+1}}{dx}$$

$$A_{N-1} = \frac{k_{N-1}}{dx}$$

$$A_N^o = S \times dx + \frac{\rho \times C_p \times dx}{dt}$$

$$A_N = A_{N+1} + A_{N-1} + A_N^o$$

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται όλοι οι συντελεστές (A) των θερμοκρασιών (T), οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την επίλυση του τριδιαγώνιου πίνακα.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δύο οριακές συνθήκες, οι οποίες εφαρμόζονται στον πρώτο και στον τελευταίο κόμβο.

- Ο πρώτος κόμβος του PCM βρίσκεται από την πλευρά της μόνωσης, η οποία θεωρείται αδιαβατικό όριο, κι έτσι εφόσον δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας η πρώτη οριακή συνθήκη είναι η ακόλουθη:

$$T_1 = T_2$$

- Ο τελευταίος κόμβος βρίσκεται από την πλευρά του εσωτερικού χώρου και η δεύτερη οριακή συνθήκη προκύπτει από τη διπλή ολοκλήρωση της εξίσωσης της μεταβατικής μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας και είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} \frac{k_{N-1}}{dx} \times T_{N-1} - \left(h_{in} + \frac{k_N}{dx} + \frac{\rho_N \times C_{p,N} \times dx}{dt} \right) \times T_N \\ = -h_{in} \times T_{in} - \frac{\rho_N \times C_{p,N} \times dx}{dt} \times T_N^o - S \times dx \end{aligned} \quad (17.5.9)$$

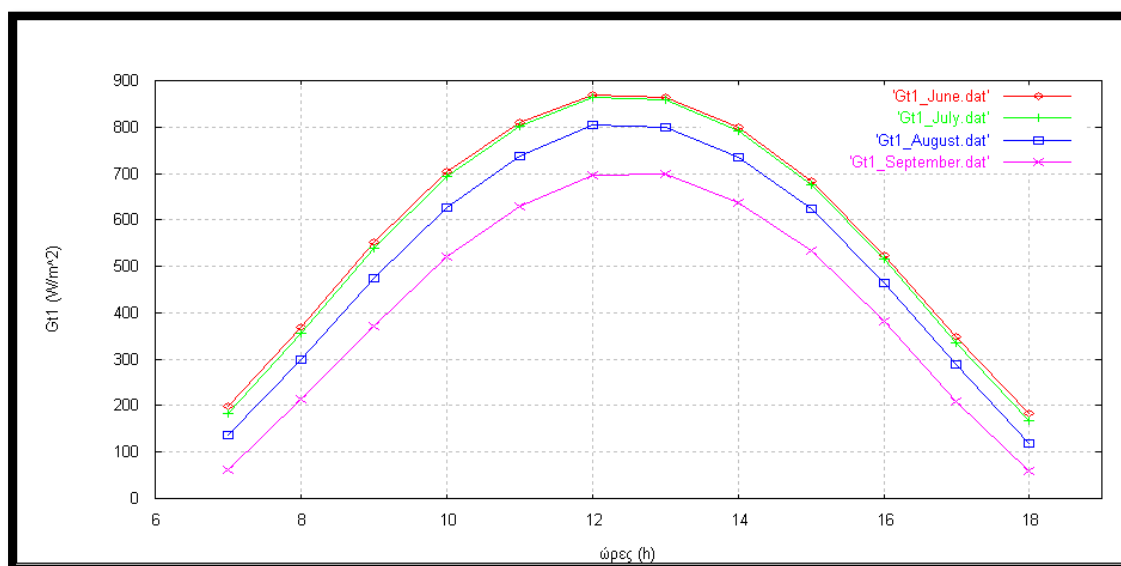
Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε είναι η Fortran 70 και τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 18

Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της βασικής μελέτης

18.1 Προσπίπτουσα ακτινοβολία στους ηλιακούς συλλέκτες και τους υαλοπίνακες

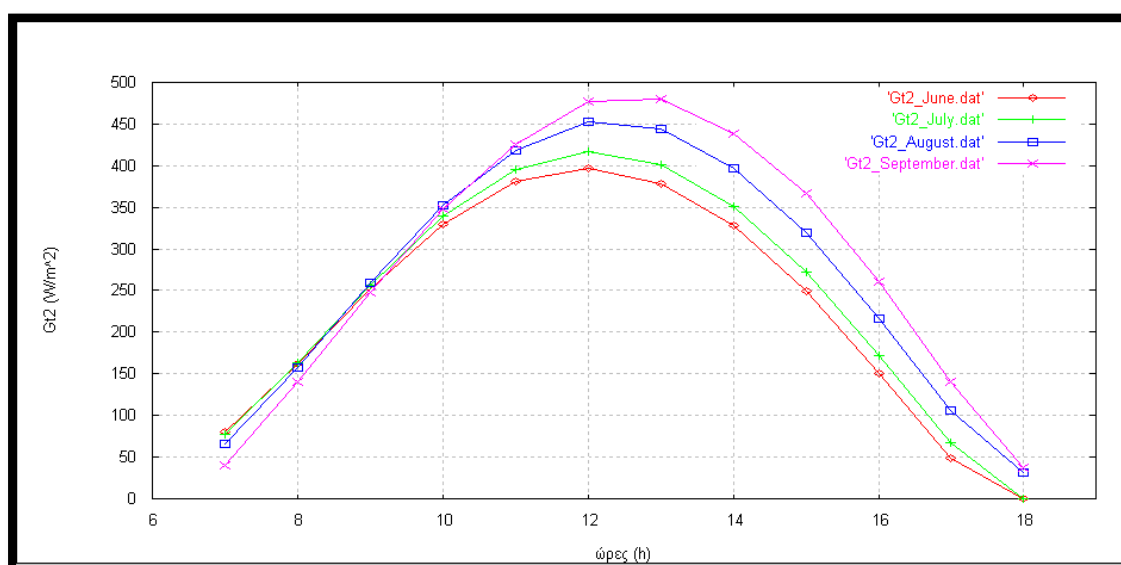
Στα τρία διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται η μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας G_t (W/m^2) στους συλλέκτες και στους υαλοπίνακες συναρτήσει των ωρών της ηλιοφάνειας (07:00-18:00) για τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο.



Εικόνα 18.1.1 Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους συλλέκτες με κλίση $\beta=20^\circ$.

Παρατηρώντας το διάγραμμα είναι εμφανές ότι κατά το μήνα Ιούνιο η προσπίπτουσα ακτινοβολία παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή, ενώ τον Ιούλιο είναι σχεδόν ίση με αυτή του Ιουνίου, γεγονός που εξηγείται από το ότι κατά τη διάρκεια των δύο αυτών μηνών οι τιμές της εξωτερικής θερμοκρασίας είναι σχεδόν ίσες. Ακολουθούν ο Αύγουστος και στη συνέχεια ο Σεπτέμβριος με χαμηλότερες τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η διακύμανση αυτή είναι αναμενόμενη τόσο λόγω των διαφορετικών εξωτερικών θερμοκρασιών όσο και της διαφορετικής καθετότητας των ακτίνων του ηλίου κατά τη διάρκεια των τεσσάρων μηνών. Επίσης, όπως φαίνεται στο διάγραμμα τις ώρες έναρξης (07:00) και λήξης (18:00) της ηλιοφάνειας η τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας δεν είναι μηδέν διότι τους καλοκαιρινούς μήνες το εύρος των ωρών ηλιοφάνειας είναι μεγαλύτερο. Ο υπολογισμός των τιμών της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πριν και μετά τις ώρες της ηλιοφάνειας δεν έγινε λόγω έλλειψης δεδομένων.

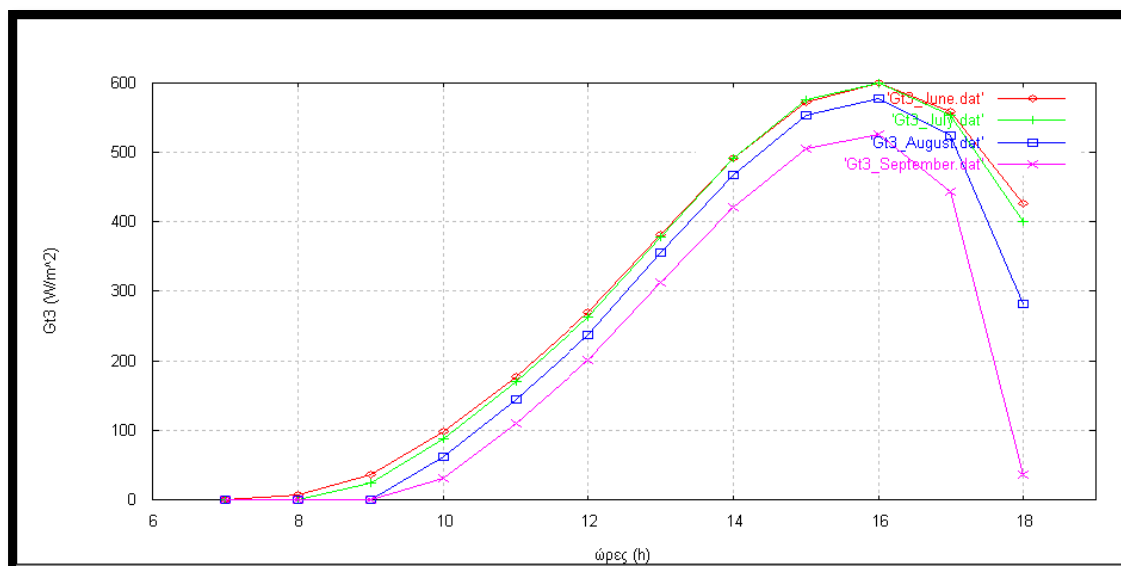
Καθώς διέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία διαμέσου του υαλοπίνακα, το 15% περίπου απορροφάται από τον αέρα και το υπόλοιπο 85% από τους τοίχους και κυρίως από τον απέναντι τοίχο. Μετά από κάποια χρονική υστέρηση οι τοίχοι αποδίδουν στον εσωτερικό χώρο του δωματίου την θερμότητα που έχουν απορροφήσει και έτσι ολόκληρη η θερμότητα που εισήλθε καταλήγει στον αέρα που υπάρχει στο χώρο. Μάλιστα σήμερα υπάρχουν ειδικοί τοίχοι που αποδίδουν τη θερμότητα που απορροφούν στο ελάχιστο δυνατό χρονικό διάστημα. Στη μελέτη αυτή θεωρείται προσεγγιστικά ότι εξαρχής το 100% της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από τον αέρα.



Εικόνα 18.1.2 Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στον υαλοπίνακα με νότιο προσανατολισμό.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι οι τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο νότιο υαλοπίνακα είναι κατά πολύ μικρότερες από εκείνες στους συλλέκτες, κάτι που αναμένεται εξαιτίας της καθετότητας των τοίχων καθώς και τυχόν παρεμβολών ανάμεσα στις ακτίνες του ηλίου και στους υαλοπίνακες, όπως σκίαση από διπλανά κτίρια ή δέντρα. Διακρίνεται επίσης ότι ο Σεπτέμβριος έχει τη μεγαλύτερη προσπίπτουσα ακτινοβολία και ακολουθούν ο Αύγουστος, ο Ιούλιος και ο Ιούνιος. Το γεγονός ότι στην περίπτωση των υαλοπινάκων η σειρά με την οποία οι μήνες έχουν τη μεγαλύτερη τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι αντίθετη από αυτή στην περίπτωση των συλλεκτών οφείλεται στην καθετότητα των ηλιακών ακτινών. Είναι λογικό, για παράδειγμα, τον Ιούνιο η προσπίπτουσα ακτινοβολία στους συλλέκτες να είναι μεγαλύτερη από τους άλλους μήνες, ενώ η προσπίπτουσα ακτινοβολία στους υαλοπίνακες να είναι η μικρότερη, λόγω της μεγάλης καθετότητας των ηλιακών συλλεκτών. Τέλος, όπως

φαίνεται στο διάγραμμα τις ώρες έναρξης (07:00) και λήξης (18:00) της ηλιοφάνειας η τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας δεν είναι μηδέν διότι τους καλοκαιρινούς μήνες το εύρος των ωρών ηλιοφάνειας είναι μεγαλύτερο. Ο υπολογισμός των τιμών της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πριν και μετά τις ώρες της ηλιοφάνειας δεν έγινε λόγω έλλειψης δεδομένων.

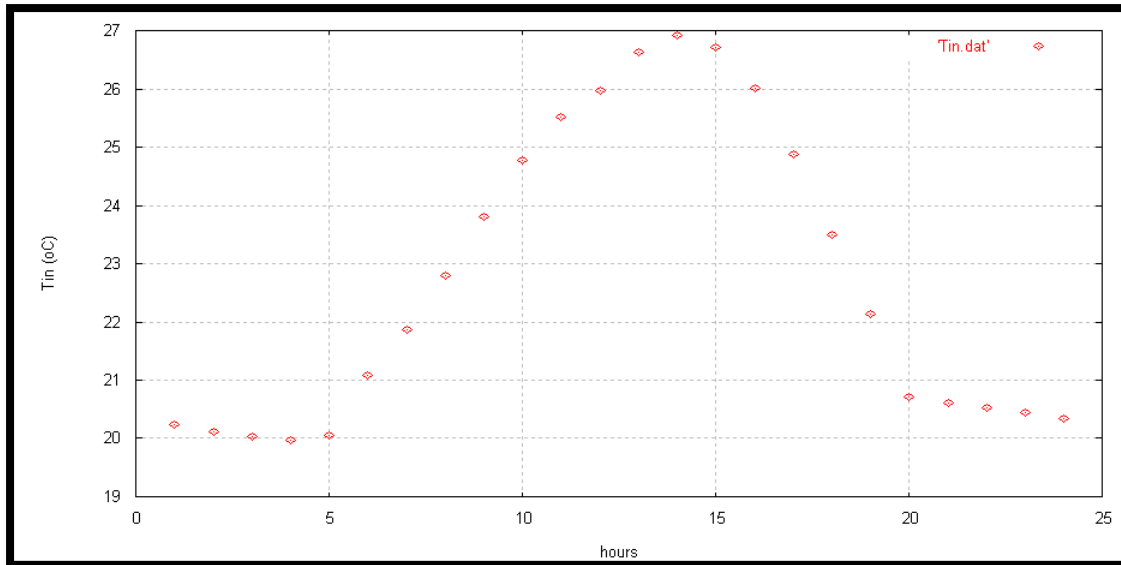


Εικόνα 18.1.3 Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στον υαλοπίνακα με δυτικό προσανατολισμό.

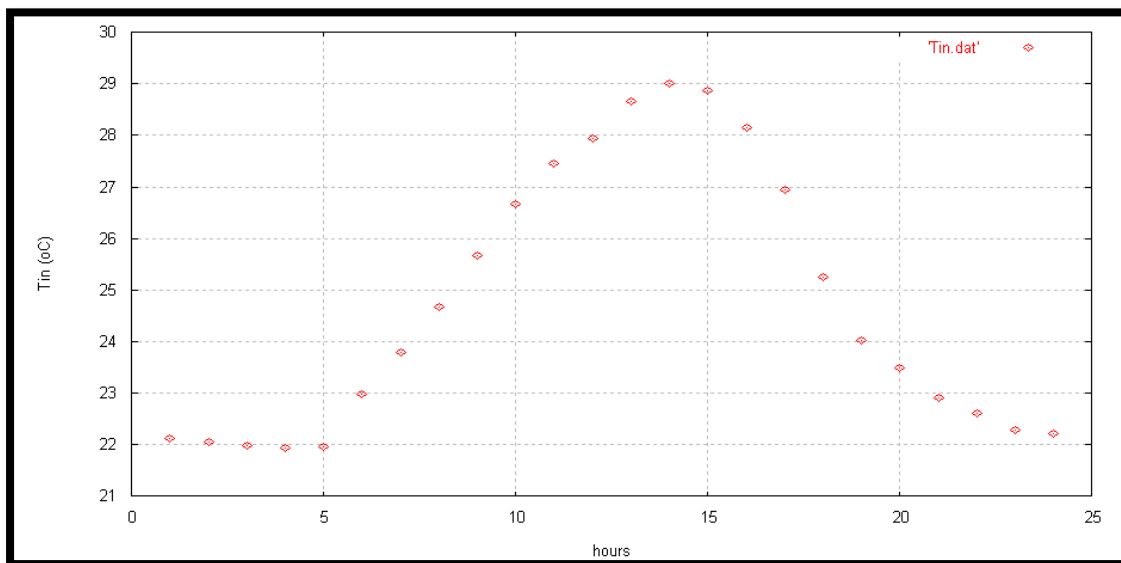
Είναι εμφανές από το παραπάνω διάγραμμα ότι οι ώρες που παρουσιάζεται η μέγιστη προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι οι απογευματινές (15:00-17:00),εφόσον το παράθυρο είναι δυτικό και εκείνες τις ώρες ξεκινάει η δύση του ηλίου. Ο μήνας με τη μεγαλύτερη προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι ο Ιούνιος και ακολουθούν ο Ιούλιος, ο Αύγουστος και ο Σεπτέμβριος, όπως γίνεται και στην Εικόνα 18.1.1. Τέλος, η τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας την ώρα λήξης της ηλιοφάνειας δεν είναι μηδέν, γεγονός που αιτιολογείται αν αναλογισθούμε ότι ο συγκεκριμένος υαλοπίνακας βρίσκεται στην πλευρά δύσης του ηλίου και δέχεται περισσότερη ακτινοβολία τις ώρες αυτές από ότι ο νότιος υαλοπίνακας.

18.2 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της ημέρας

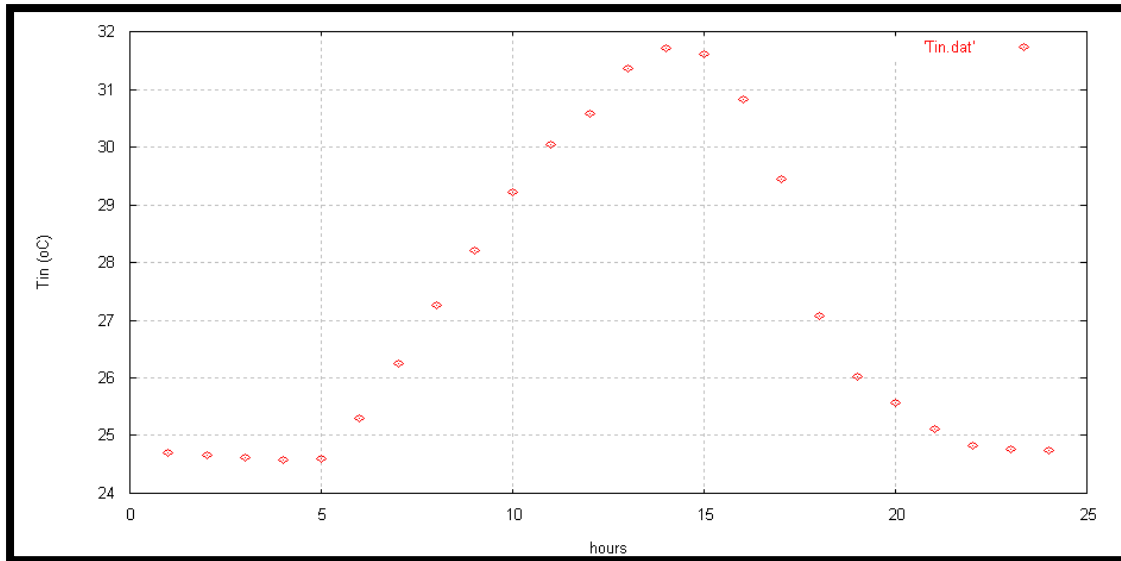
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου την 21^η ημέρα κάθε μήνα. Υπάρχει επίσης και ένα συγκριτικό διάγραμμα της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου για τους τέσσερις μήνες που διεξάγεται η μελέτη.



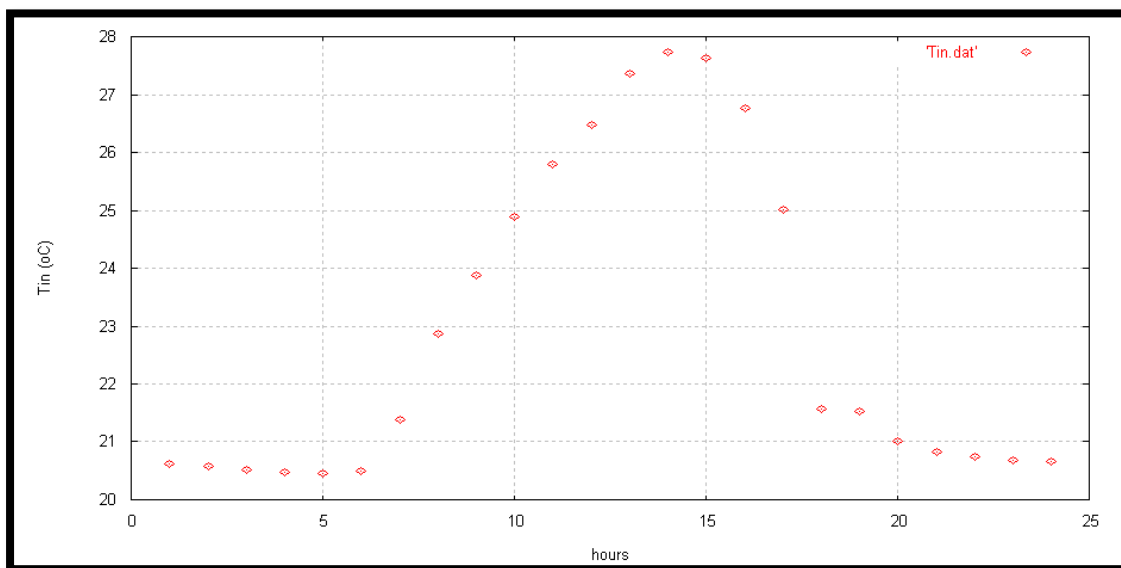
Εικόνα 18.2.1 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας την 21^η ημέρα του Ιουνίου.



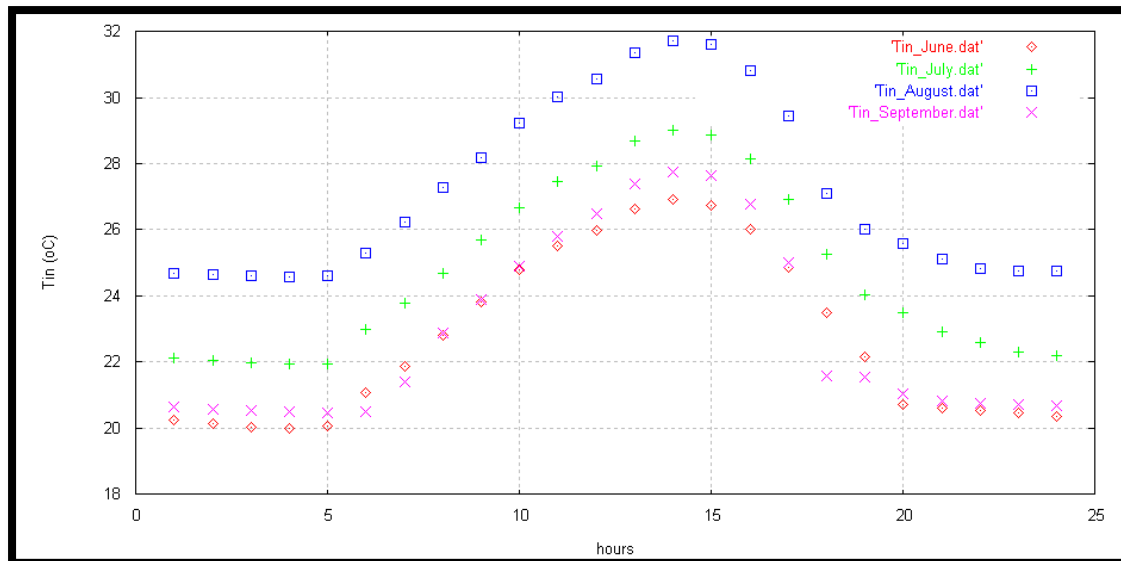
Εικόνα 18.2.2 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας την 21^η ημέρα του Ιουλίου.



Εικόνα 18.2.3 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας την 21^η ημέρα του Αυγούστου.



Εικόνα 18.2.4 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας την 21^η ημέρα του Σεπτεμβρίου.



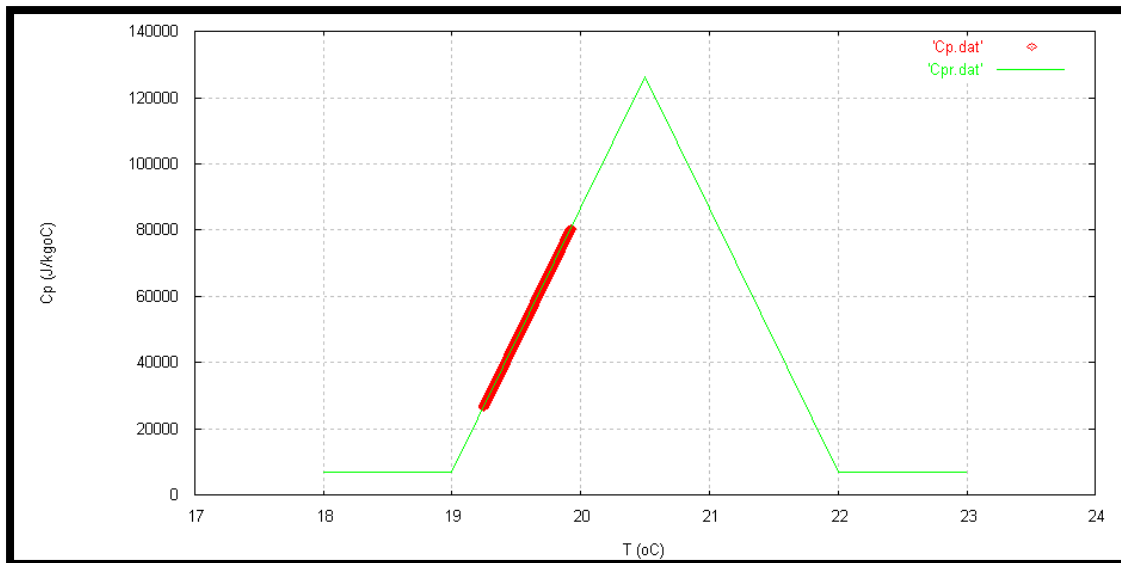
Εικόνα 18.2.5 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου την 21^η ημέρα των μηνών Ιουνίου, Ιουλίου, Αυγούστου και Σεπτεμβρίου.

Παρατηρείται ότι τις ώρες της ηλιοφάνειας υπάρχει μεγάλη άνοδος και πτώση της θερμοκρασίας σε σχέση με τις νυχτερινές ώρες. Η κορύφωση παρουσιάζεται περίπου στις 14:00 και για τους τέσσερις μήνες των υπολογισμών, που είναι αναμενόμενο εφόσον εκείνη την ώρα εισέρχεται περισσότερη ακτινοβολία στο χώρο από τους υαλοπίνακες και η εξωτερική θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλότερη από ότι τις υπόλοιπες ώρες. Αντίθετα, τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία παραμένει σχεδόν σταθερή με τη μικρότερη τιμή να λαμβάνεται περίπου στις 03:00-05:00, εφόσον δεν υπάρχει η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και το PCM δεν επιτρέπει μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας αφού αποθηκεύει ψύξη την ημέρα με σκοπό να την αποδώσει τις νυχτερινές ώρες που η εγκατάσταση είναι εκτός λειτουργίας. Με τη χρήση του PCM, όμως, δεν επιτυγχάνεται 100% κάλυψη των αναγκών για ψύξη του χώρου, ιδιαίτερα του μήνες Ιούλιο και Αύγουστο κατά τους οποίους παρατηρείται η υψηλότερη εξωτερική θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η χρήση συμπληρωματικών πηγών ψύξης, όπως τα κλιματιστικά, κάποιες ώρες του εικοσιτετράωρου με σκοπό την επίτευξη θερμοκρασιακής άνεσης. Τέλος, σύμφωνα με την Εικόνα 18.2.5 ο μήνας που παρουσιάζει τις υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες είναι ο Αύγουστος, τον οποίο ακολουθούν ο Ιούλιος, ο Σεπτέμβριος και ο Ιούνιος που έχει τις χαμηλότερες. Το γεγονός ότι ο Αύγουστος έχει τόσο υψηλές θερμοκρασίες αιτιολογείται από το μεγάλο ποσό ακτινοβολίας που προσπίπτει στο νότιο παράθυρο (Εικόνα 18.1.2), το σχετικά μικρό ποσό αυτής που προσπίπτει στους συλλέκτες (Εικόνα 18.1.1) και από το ότι το υλικό αλλαγής φάσης παραμένει υγρό καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα της θερμοχωρητικότητας

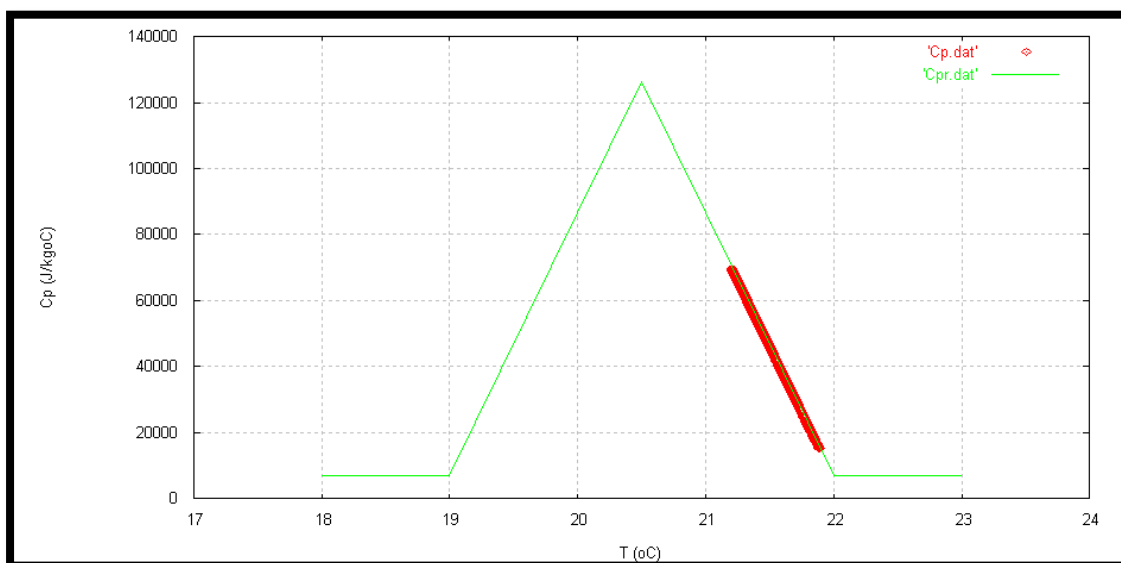
συναρτήσει της θερμοκρασίας (T-Cp) που ακολουθούν. Το εύρος της διακύμανσης της εσωτερικής θερμοκρασίας και για τους τέσσερις μήνες είναι περίπου 7 °C, με τη χαμηλότερη θερμοκρασία να λαμβάνεται τον Ιούνιο (20 °C) και την υψηλότερη τον Αύγουστο (32 °C).

18.3 Ειδική θερμοχωρητικότητα του PCM

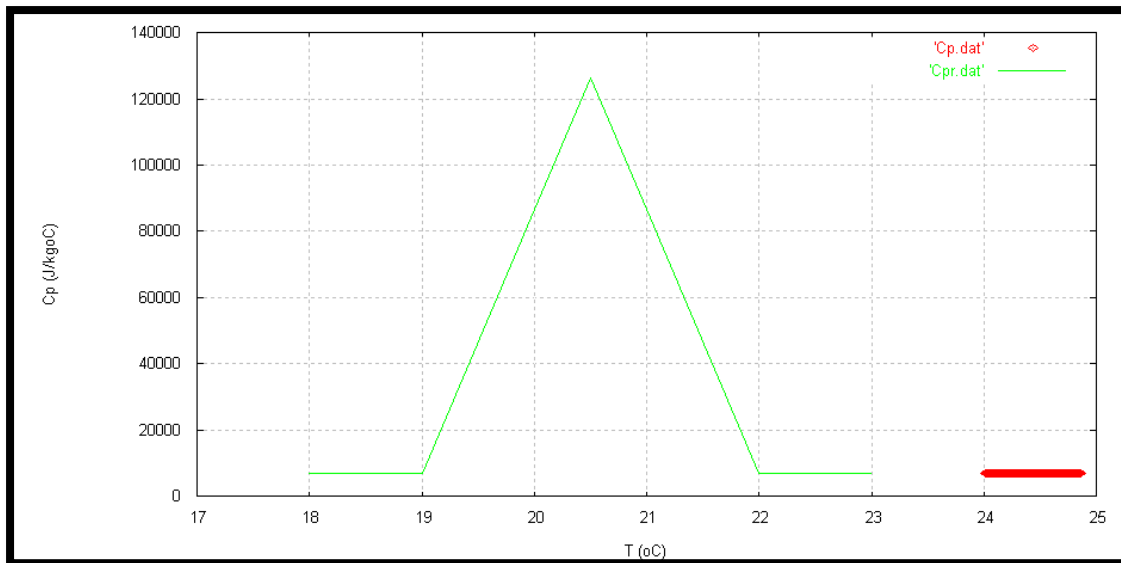
Είναι σκόπιμο να εξετασθεί κατά πόσο αξιοποιείται η ιδιότητα του PCM να αποθηκεύει θερμότητα υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Για το λόγο αυτό, παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM. Το PCM στην αρχή κάθε ημέρας (07:00) βρίσκεται στην υγρή φάση και όσο το κρύο νερό, που ρέει στους σωλήνες οι οποίοι διαρρέουν το PCM, το ψύχει εισέρχεται στη διφασική περιοχή. Στο τέλος των ωρών της ηλιοφάνειας (18:00), τη στιγμή δηλαδή που το σύστημα τίθεται εκτός λειτουργίας, το PCM πρέπει να βρίσκεται σε ολόκληρη τη μάζα του σε στερεή κατάσταση. Έτσι, τις ώρες μη ηλιοφάνειας το στερεό πλέον PCM είναι έτοιμο να απορροφήσει θερμότητα από το χώρο και με τον τρόπο αυτό να μειώσει την εσωτερική θερμοκρασία προσφέροντας θερμική άνεση. Στη λήξη του εικοσιτετραώρου το PCM έχοντας απορροφήσει θερμότητα από το χώρο θα πρέπει να έχει επιστρέψει στην αρχική υγρή του κατάσταση και ο παραπάνω κύκλος θα επαναληφθεί εκ νέου. Αυτό, όμως, συμβαίνει θεωρητικά (κόκκινη καμπύλη) διότι στην πράξη είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί η πλήρης υγροποίηση και στερεοποίηση του PCM κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι δυνατή η εκμετάλλευση ενός μόνο μέρους της ιδιότητας αυτής του PCM (πράσινη καμπύλη), η οποία όμως δίνει αποδεκτά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, στο ακόλουθο διάγραμμα το PCM έχει θερμοκρασιακή μεταβολή από τους 17.3 έως τους 19.1 °C, δηλαδή βρίσκεται στη στερεή και εισέρχεται λίγο στη διφασική περιοχή (πράσινη καμπύλη).



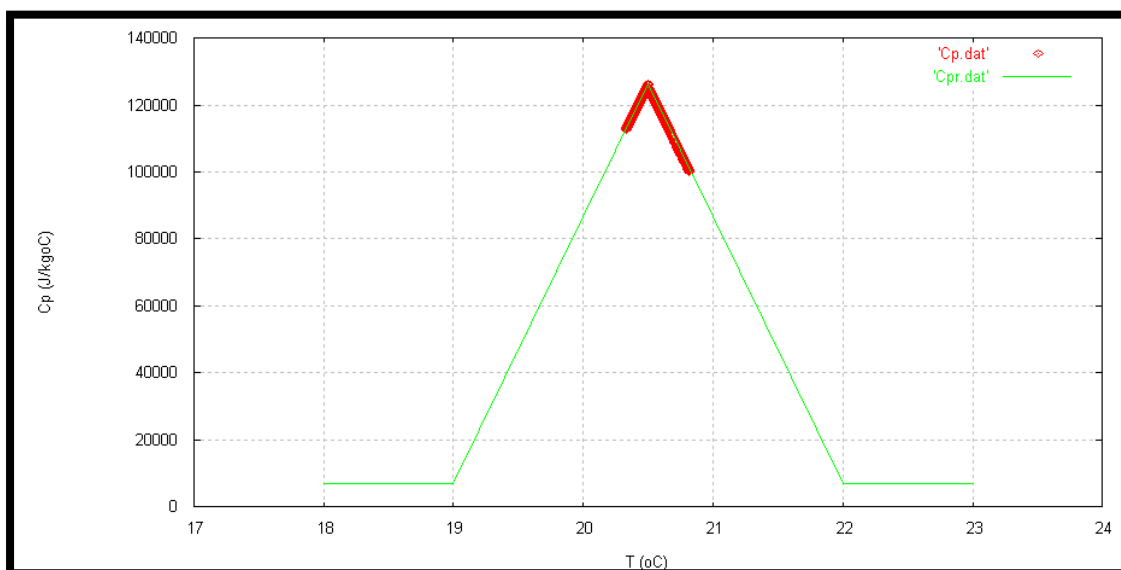
Εικόνα 18.3.1 Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας για το μήνα Ιούνιο.



Εικόνα 18.3.2 Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας για το μήνα Ιούλιο.



Εικόνα 18.3.3 Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας για το μήνα Αύγουστο.



Εικόνα 18.3.4 Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας για το μήνα Σεπτέμβριο.

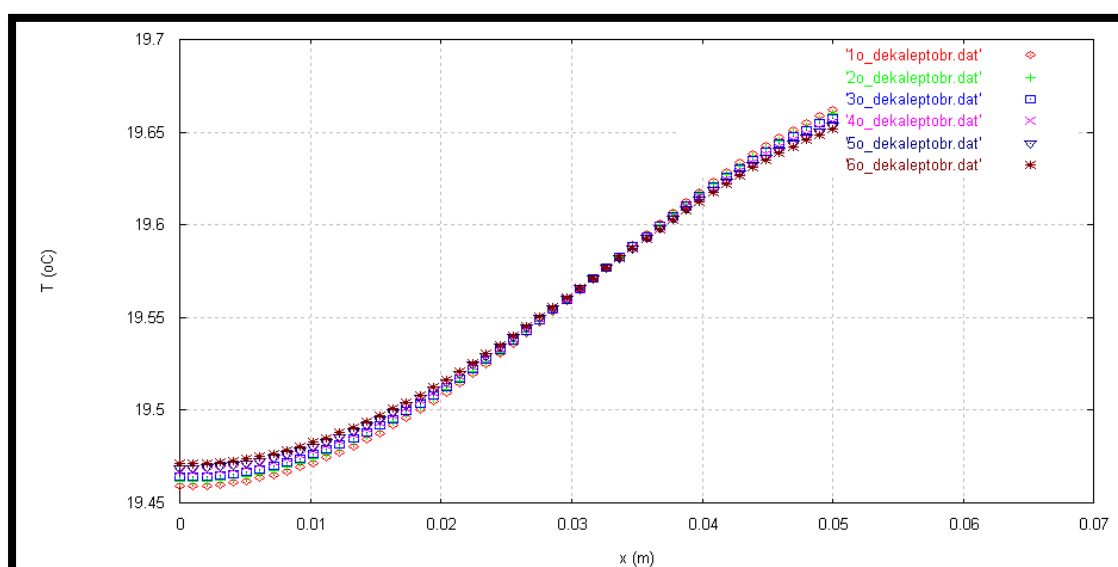
Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι τον Ιούνιο το PCM βρίσκεται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας στη διφασική περιοχή και συγκεκριμένα σε θερμοκρασίες πλησιέστερες σε αυτή της στερεοποίησης. Τον Ιούλιο το PCM βρίσκεται συνέχεια στη διφασική περιοχή, σε θερμοκρασίες όμως κοντά σε αυτή της υγροποίησης, εφόσον δεν περνάει ποτέ τη μέση θερμοκρασία των 20.5 °C. Τον Αύγουστο το PCM δεν αξιοποιείται καθόλου εφόσον, σύμφωνα με την Εικόνα 18.3.3, βρίσκεται συνεχώς στην υγρή κατάσταση. Τέλος, το Σεπτέμβριο το PCM βρίσκεται πλήρως στην διφασική περιοχή έχοντας θερμοκρασίες που πλησιάζουν περισσότερο τη στερεή κατάσταση και λιγότερη την

υγρή. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι εμφανές από τα διαγράμματα ότι δεν αξιοποιείται πλήρως η ιδιότητα του PCM να αποθηκεύει θερμότητα υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Αυτό θα συνέβαινε κάτω από πολύ συγκεκριμένες συνθήκες και ίσως έχοντας κάνει διαφορετικές παραδοχές. Η βελτίωση της απόδοσης του PCM στη συγκεκριμένη μελέτη θα μπορούσε να επιτευχθεί με αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας. Επειδή, όμως, η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας βρίσκεται μέσα στα όρια της θερμικής άνεσης κάτι τέτοιο δεν κρίθηκε απαραίτητο.

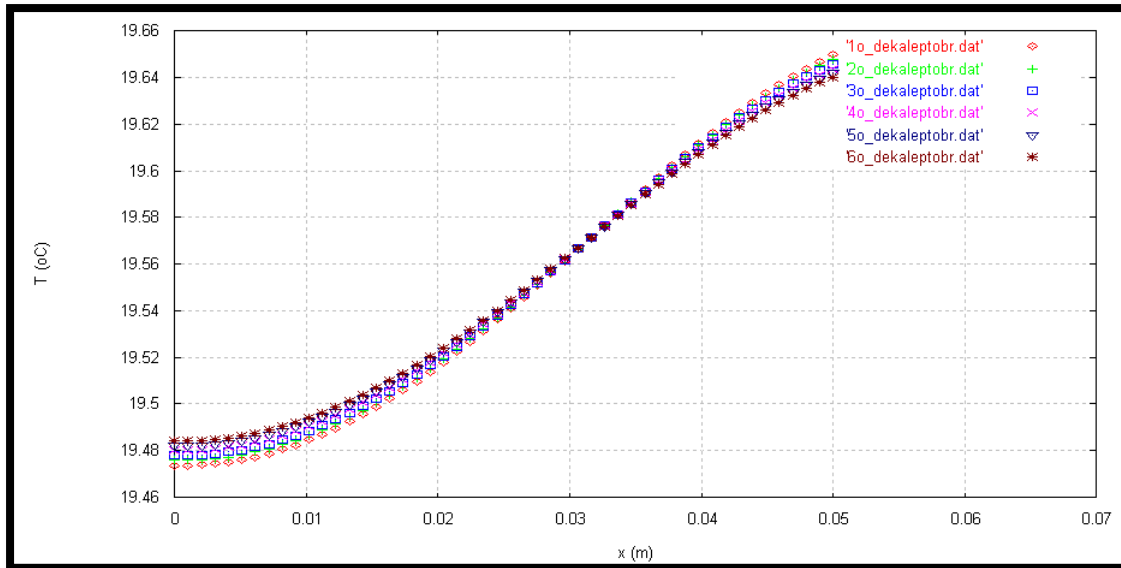
18.4 Κατανομή της θερμοκρασίας στους κόμβους του PCM

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μεταβολής της θερμοκρασίας σε όλους τους κόμβους του PCM για κάθε ώρα της 21^{ης} ημέρας κάθε μήνα. Στη θέση $x=0m$ βρίσκεται το τέλος της μόνωσης, η οποία θεωρείται αδιαβατικό όριο, ενώ στη θέση $x=0.05m$ είναι το τέλος του στρώματος του PCM όπου ξεκινάει το δωμάτιο. Στα παρακάτω διαγράμματα οι έξι καμπύλες αντιστοιχούν σε κάθε ένα δεκάλεπτο της ώρας που αναγράφεται στον τίτλο κάθε διαγράμματος. Πιο συγκεκριμένα, η κόκκινη καμπύλη αναφέρεται στο 1^ο δεκάλεπτο της εκάστοτε ώρας, η πράσινη καμπύλη στο 2^ο δεκάλεπτο, η γαλάζια καμπύλη στο 3^ο δεκάλεπτο, η ροζ καμπύλη στο 4^ο δεκάλεπτο, η μπλε καμπύλη στο 5^ο δεκάλεπτο και η καφέ καμπύλη στο 6^ο δεκάλεπτο.

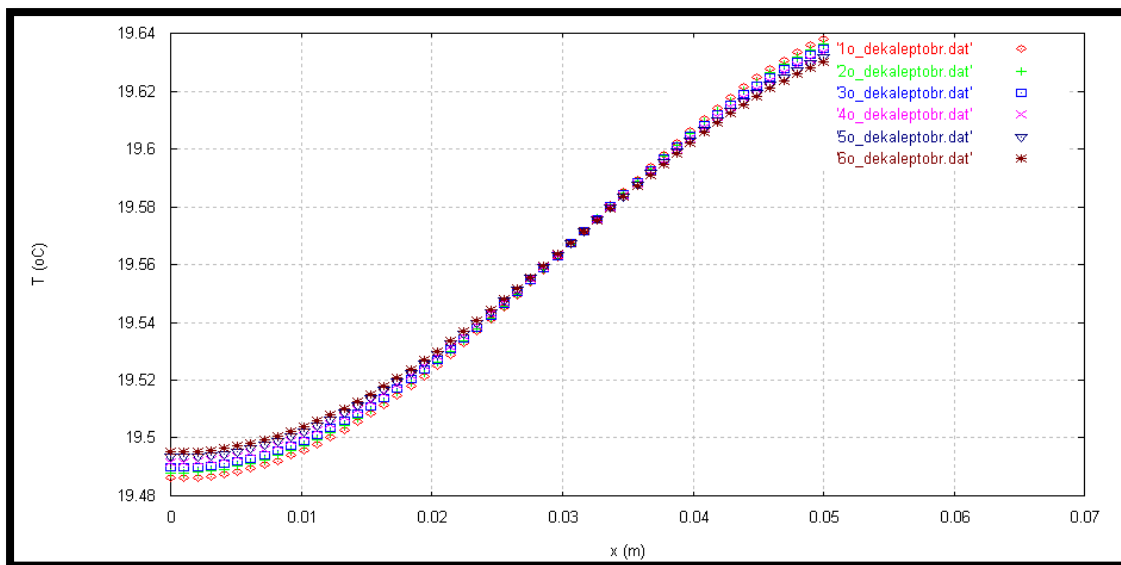
▪ Μήνας Ιούνιος



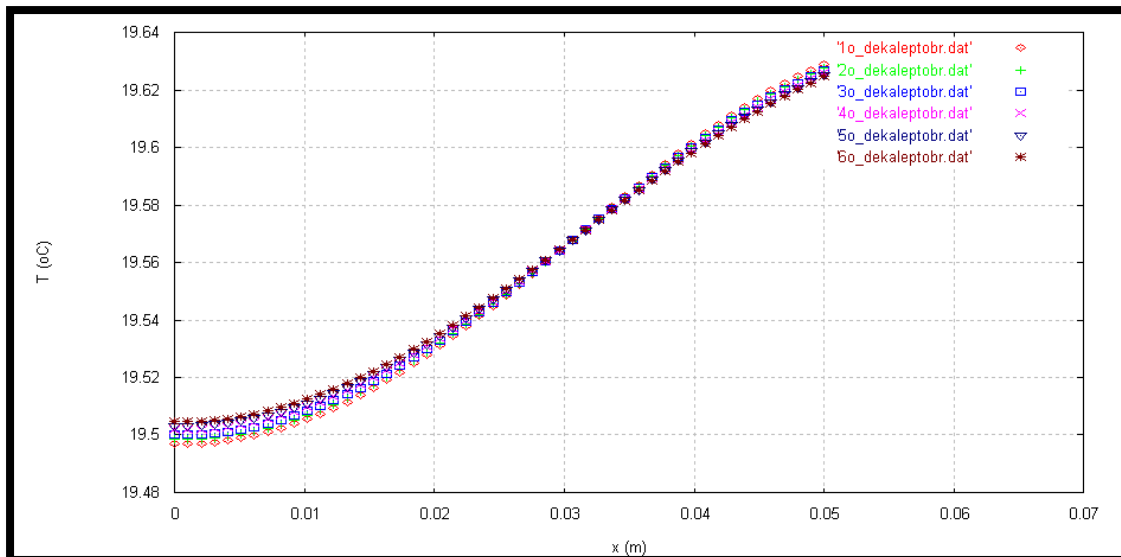
Εικόνα 18.4.1 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 01:00-02:00.



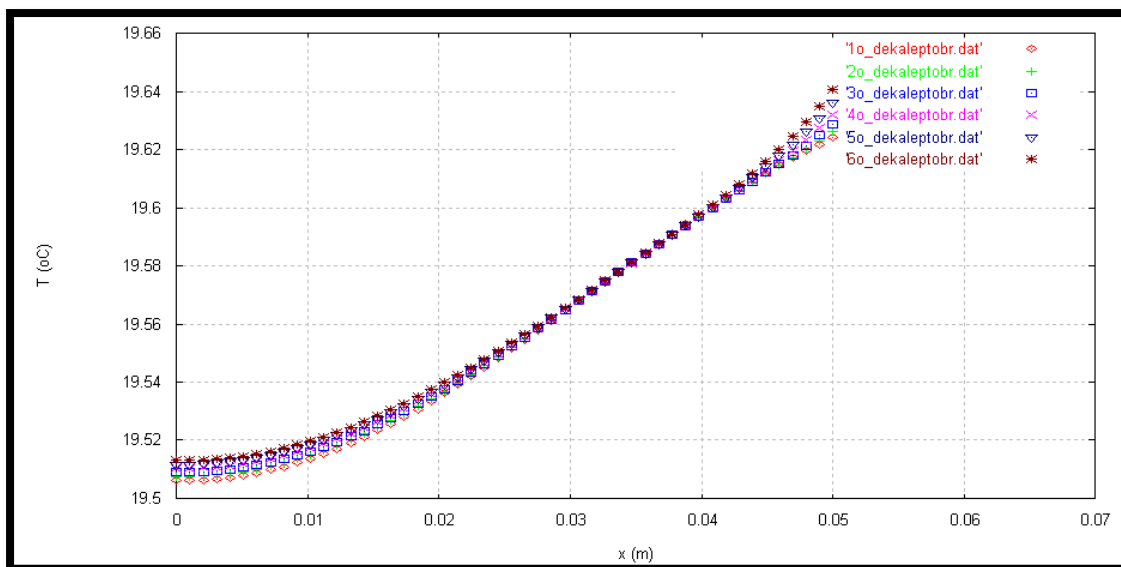
Εικόνα 18.4.2 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 02:00-03:00.



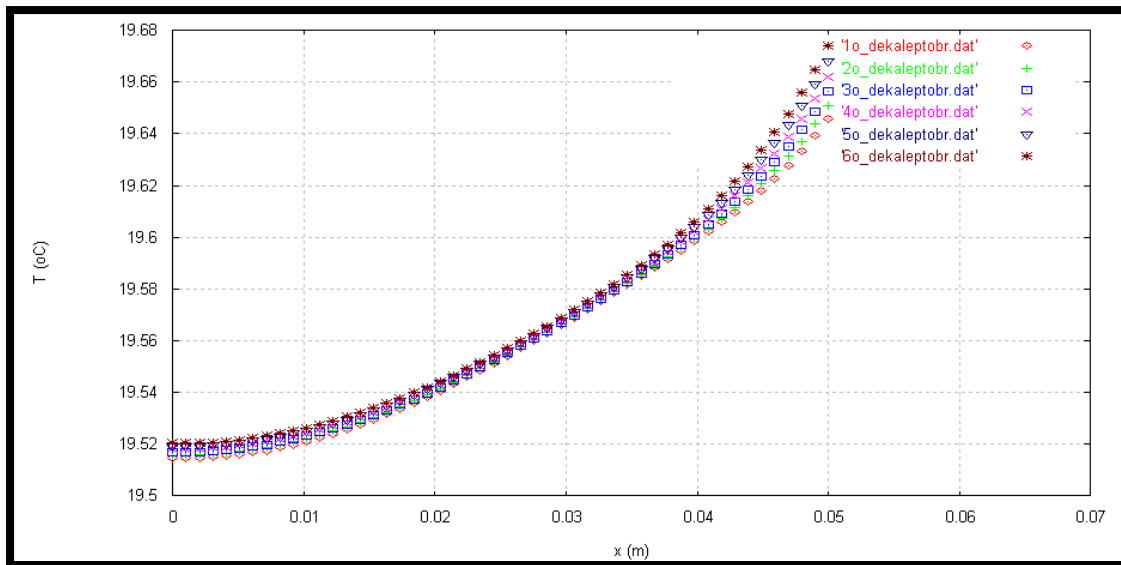
Εικόνα 18.4.3 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 03:00-04:00.



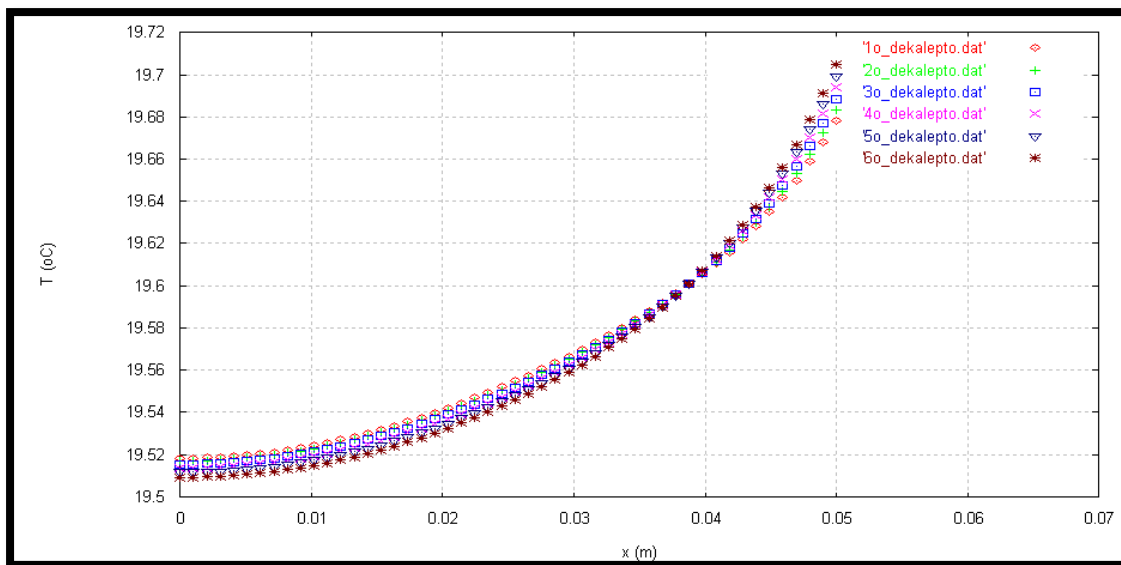
Εικόνα 18.4.4 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 04:00-05:00.



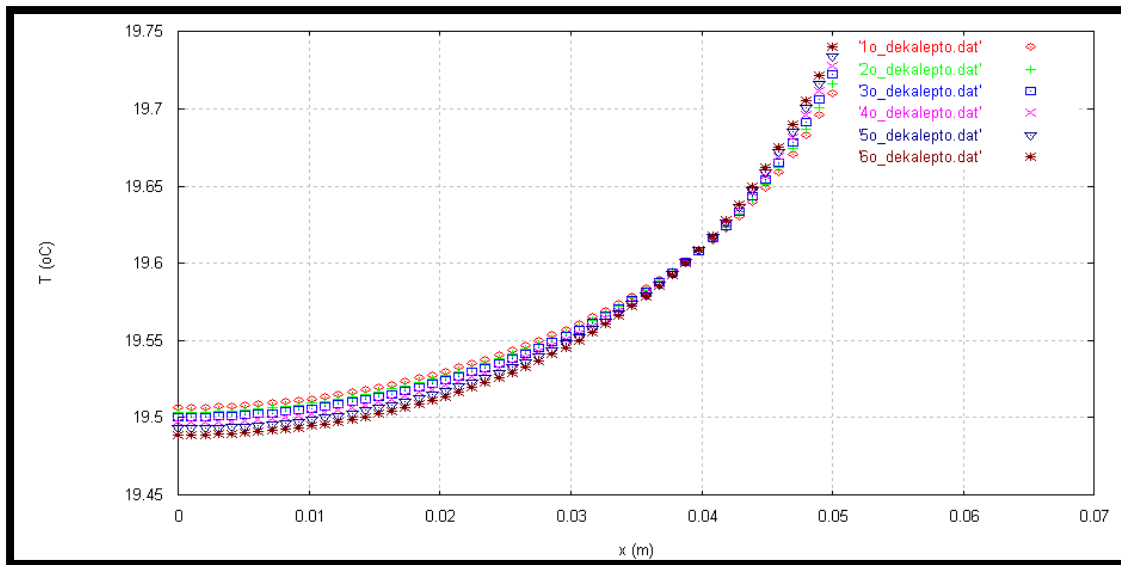
Εικόνα 18.4.5 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 05:00-06:00.



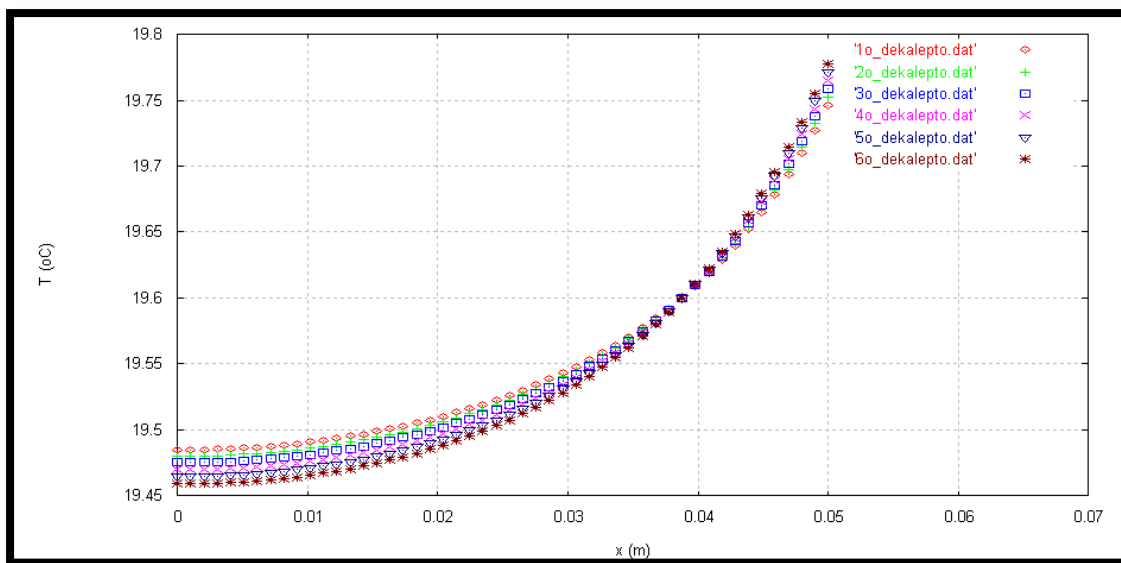
Εικόνα 18.4.6 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 06:00-07:00.



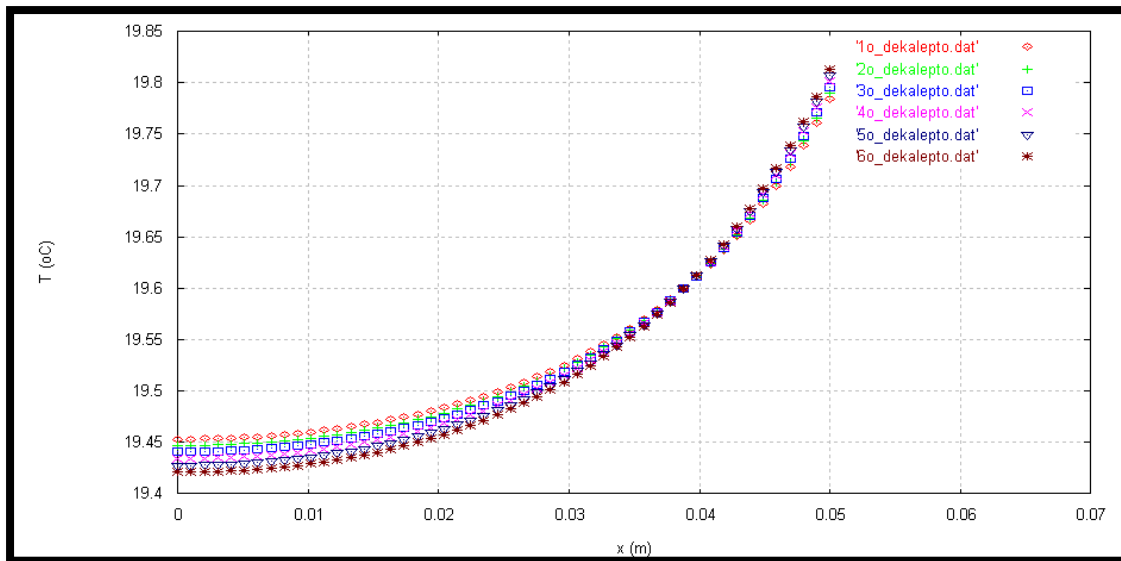
Εικόνα 18.4.7 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 07:00-08:00.



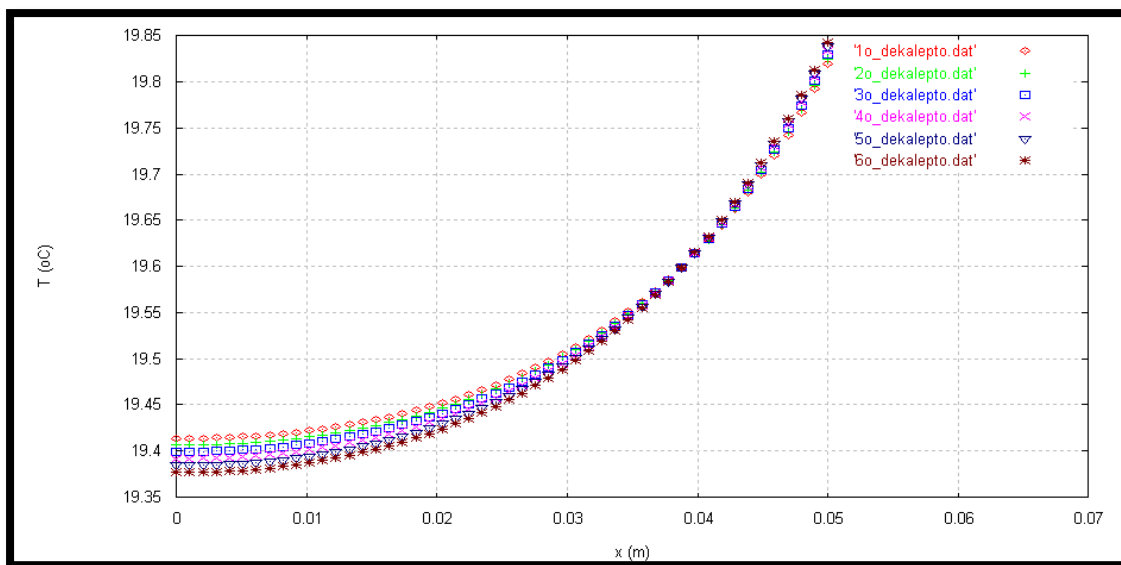
Εικόνα 18.4.8 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 08:00-09:00.



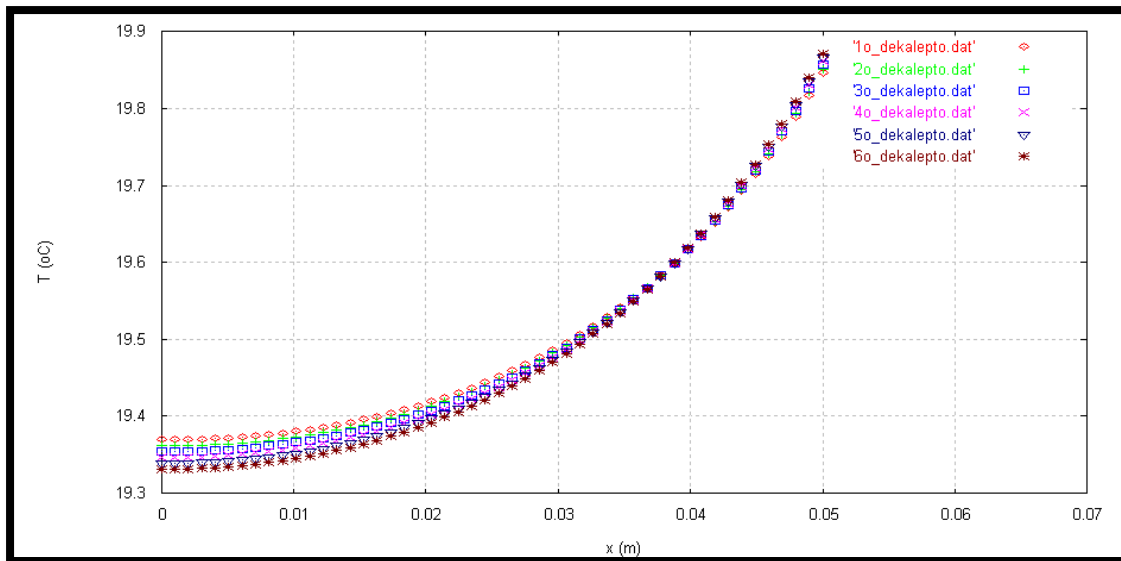
Εικόνα 18.4.9 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 09:00-10:00.



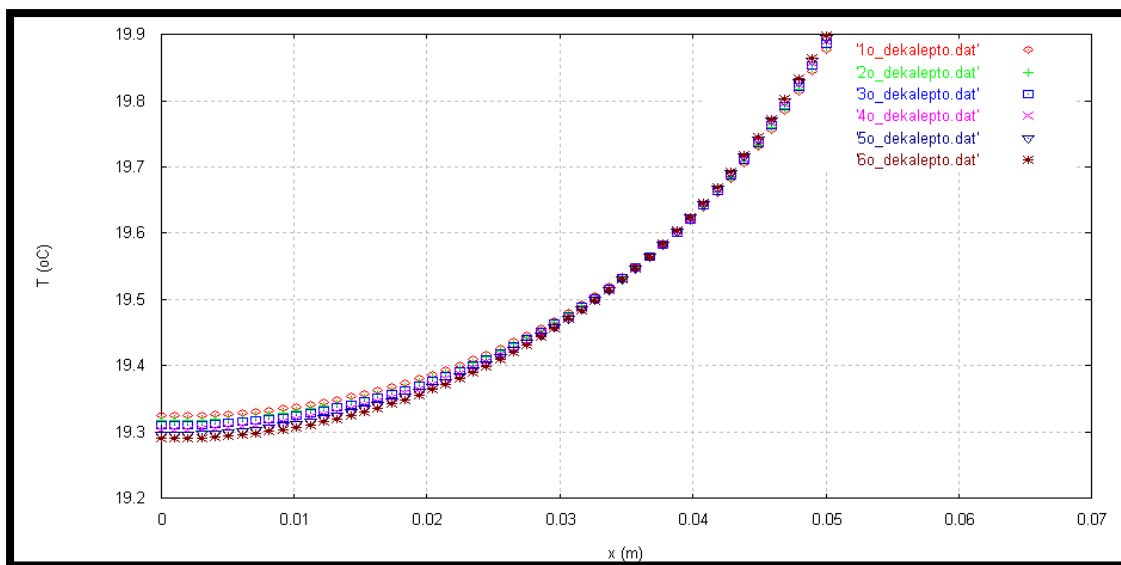
Εικόνα 18.4.10 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 10:00-11:00.



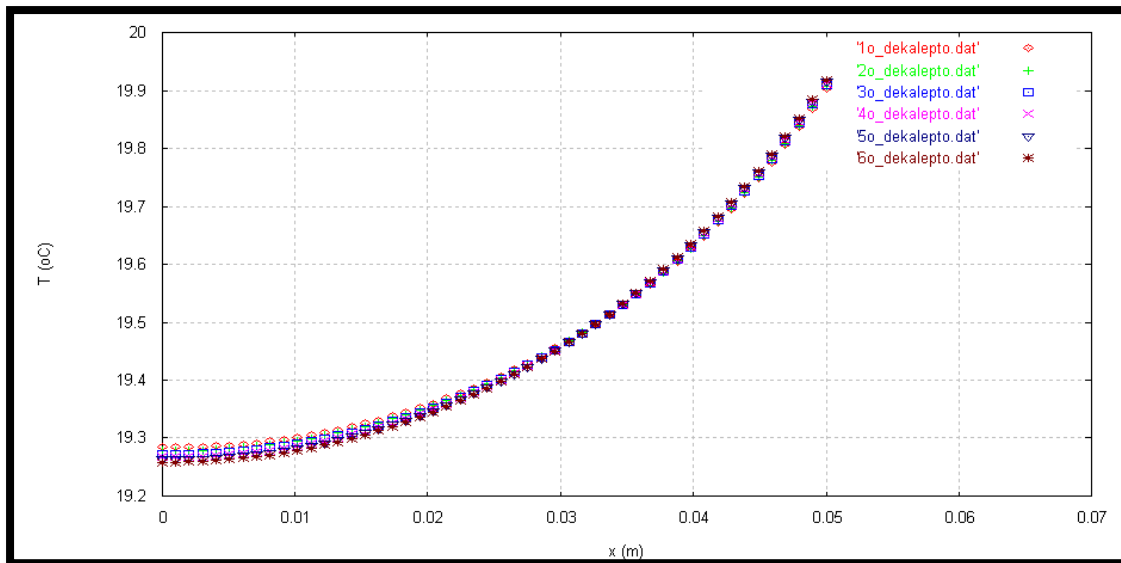
Εικόνα 18.4.11 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 11:00-12:00.



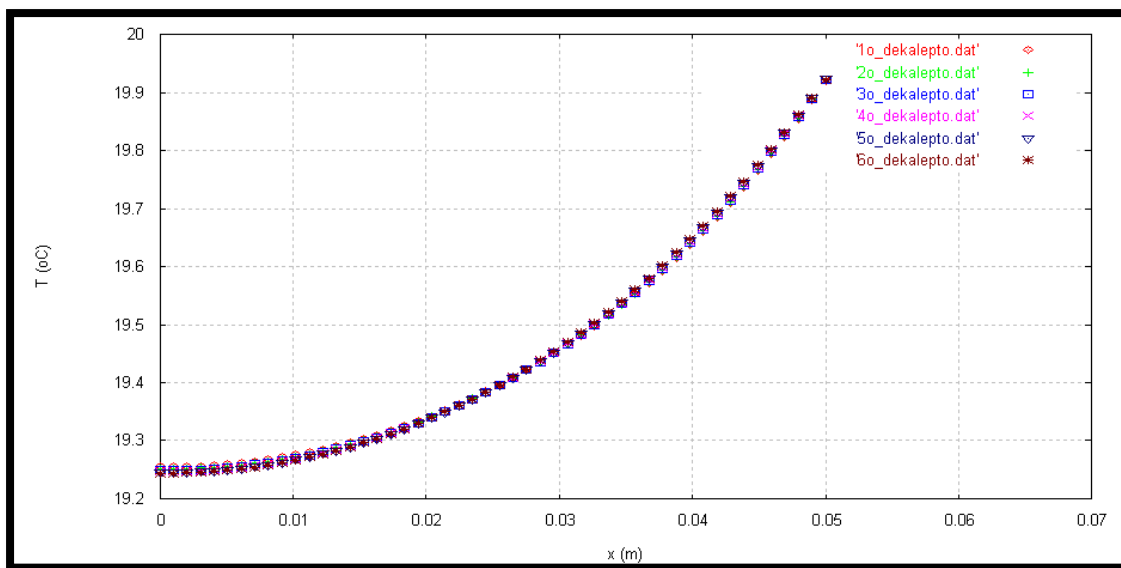
Εικόνα 18.4.12 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 12:00-13:00.



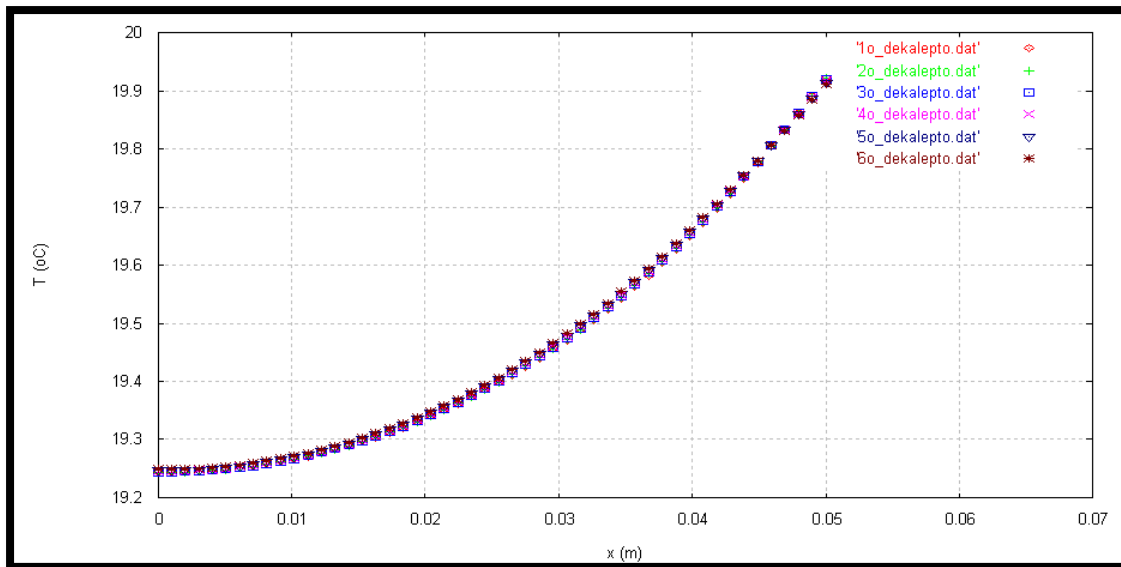
Εικόνα 18.4.13 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 13:00-14:00.



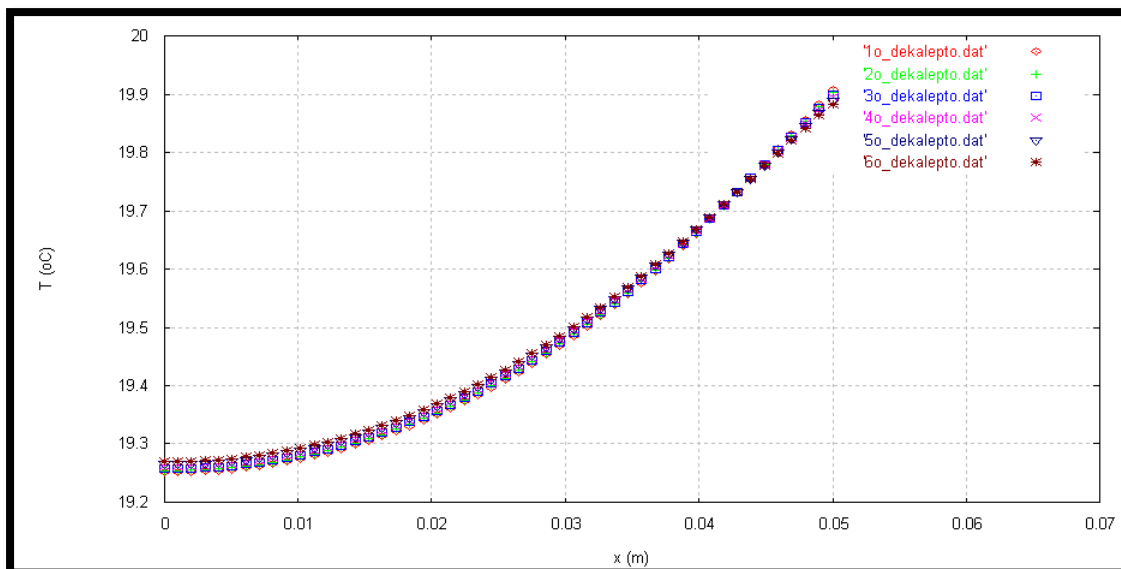
Εικόνα 18.4.14 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 14:00-15:00.



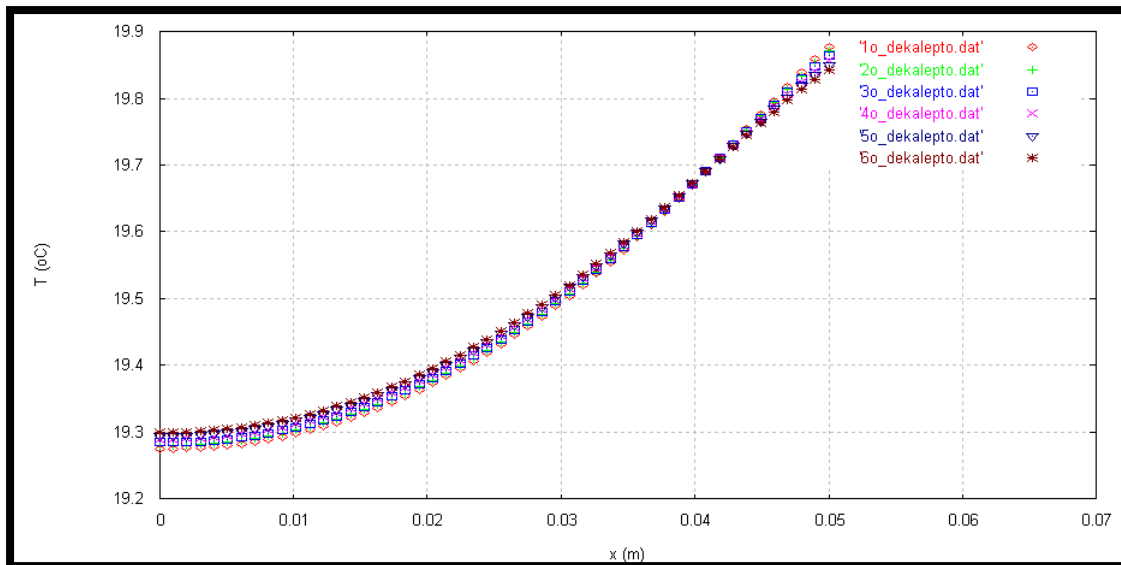
Εικόνα 18.4.15 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 15:00-16:00.



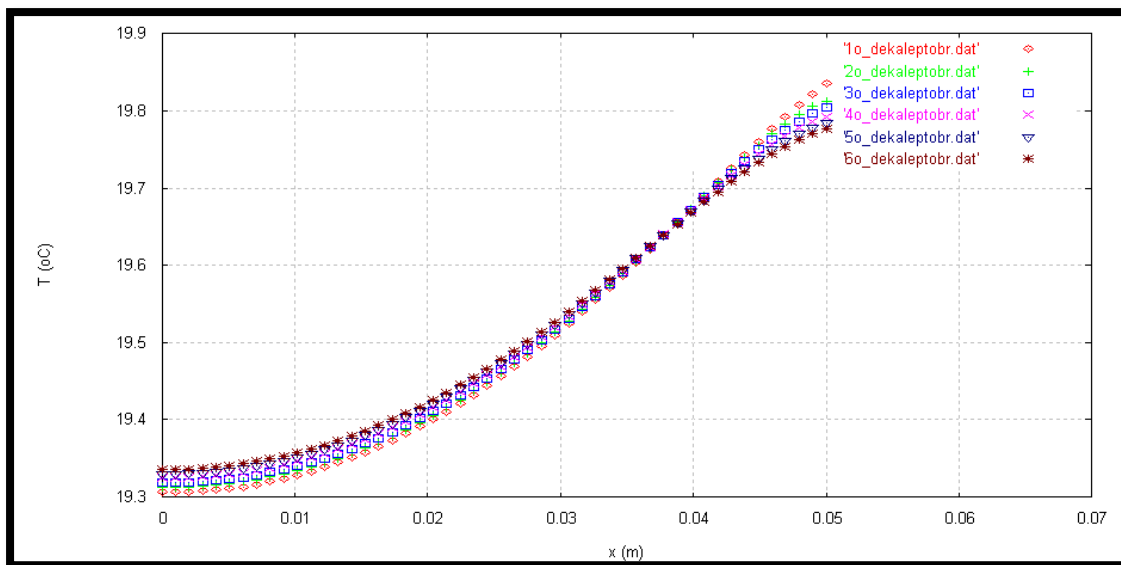
Εικόνα 18.4.16 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 16:00-17:00.



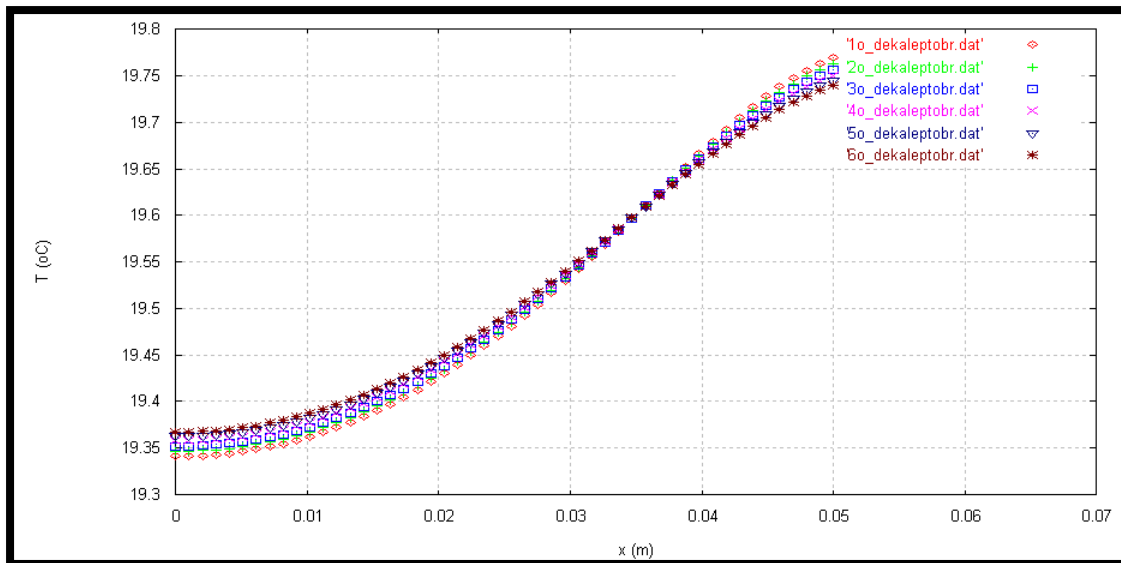
Εικόνα 18.4.17 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 17:00-18:00.



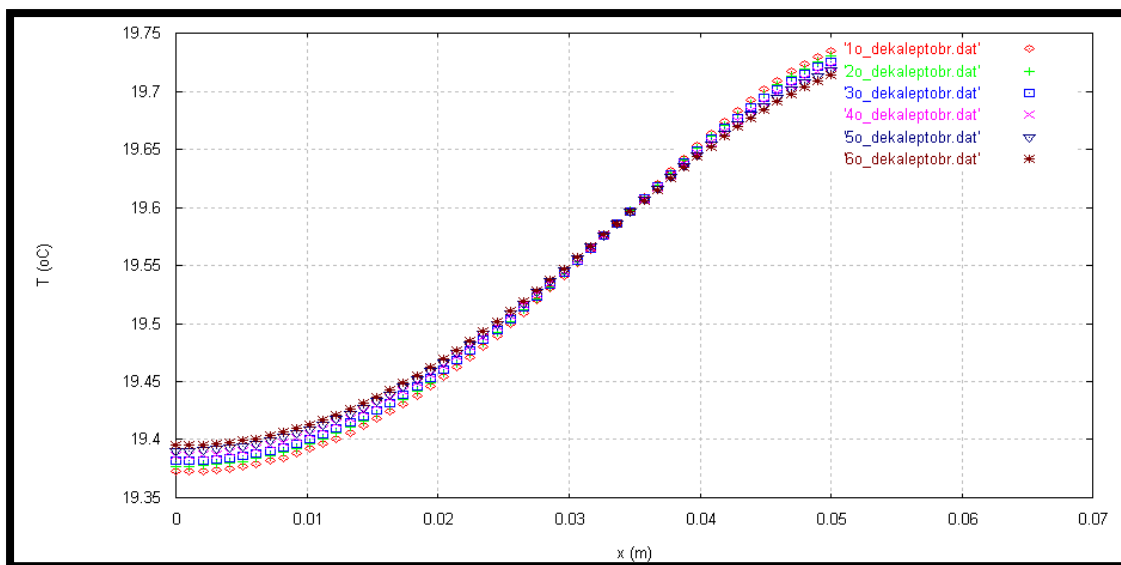
Εικόνα 18.4.18 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 18:00-19:00.



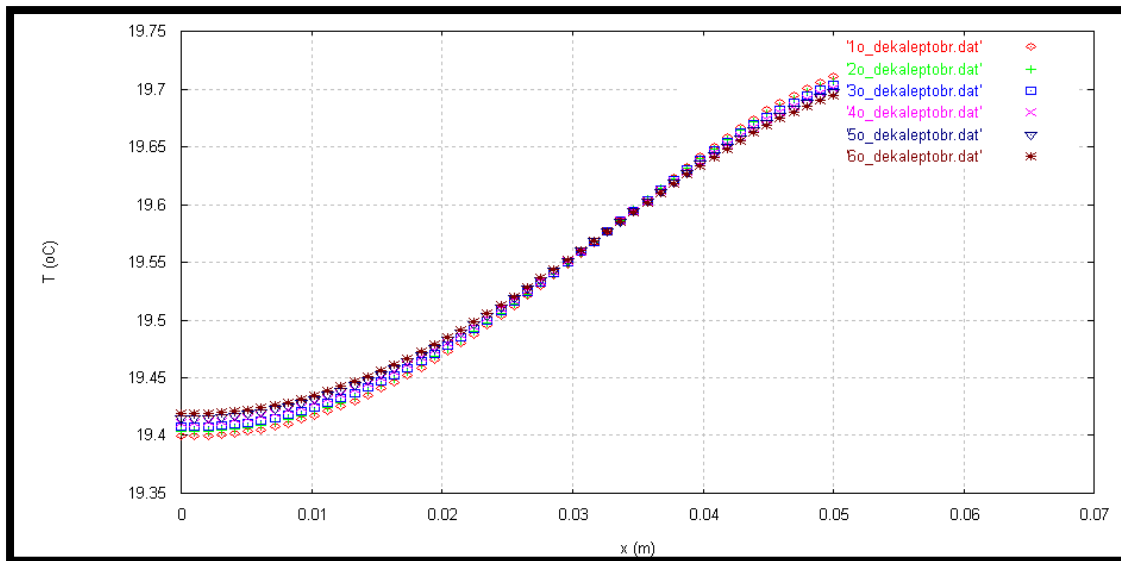
Εικόνα 18.4.19 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 19:00-20:00.



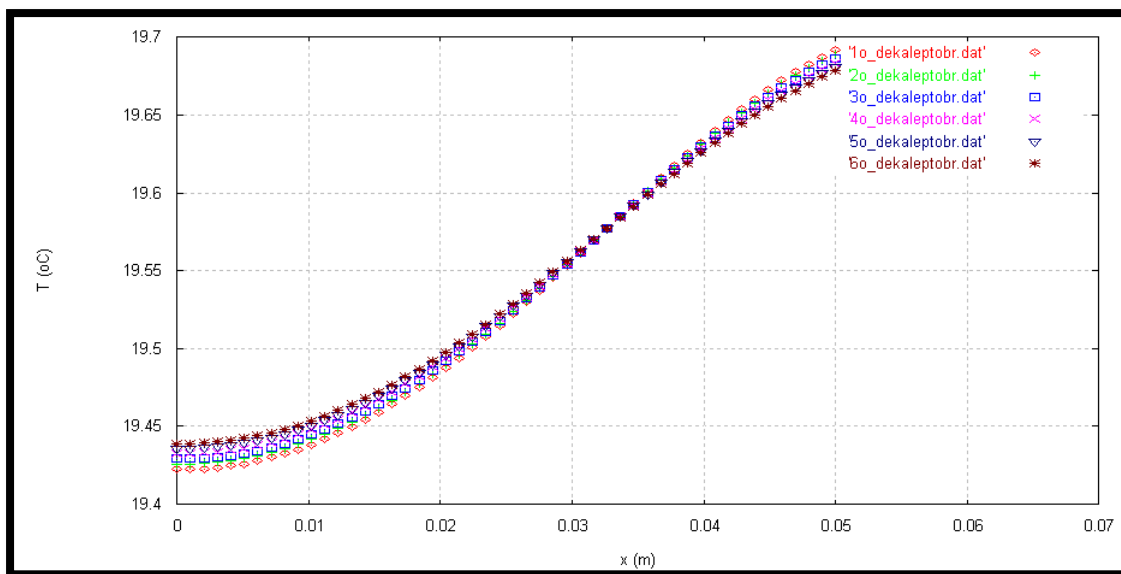
Εικόνα 18.4.20 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 20:00-21:00.



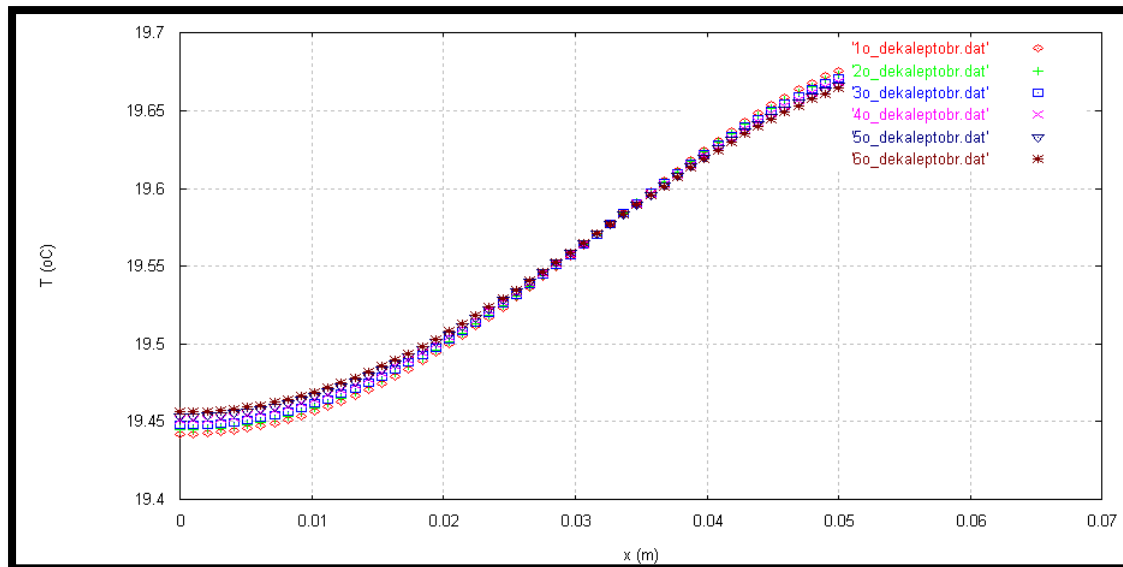
Εικόνα 18.4.21 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 21:00-22:00.



Εικόνα 18.4.22 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 22:00-23:00.

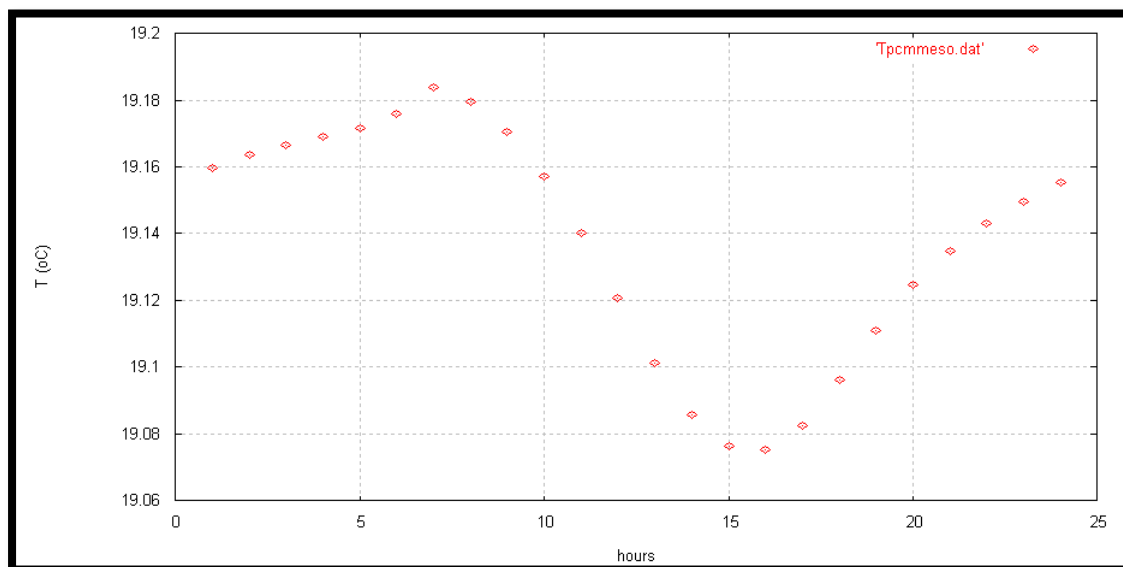


Εικόνα 18.4.23 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 23:00-24:00.



Εικόνα 18.4.24 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουνίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 24:00-01:00.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία όλων των κόμβων του PCM σε κάθε ώρα του εικοσιτετράωρου της 21^{ης} ημέρας του Ιουνίου.



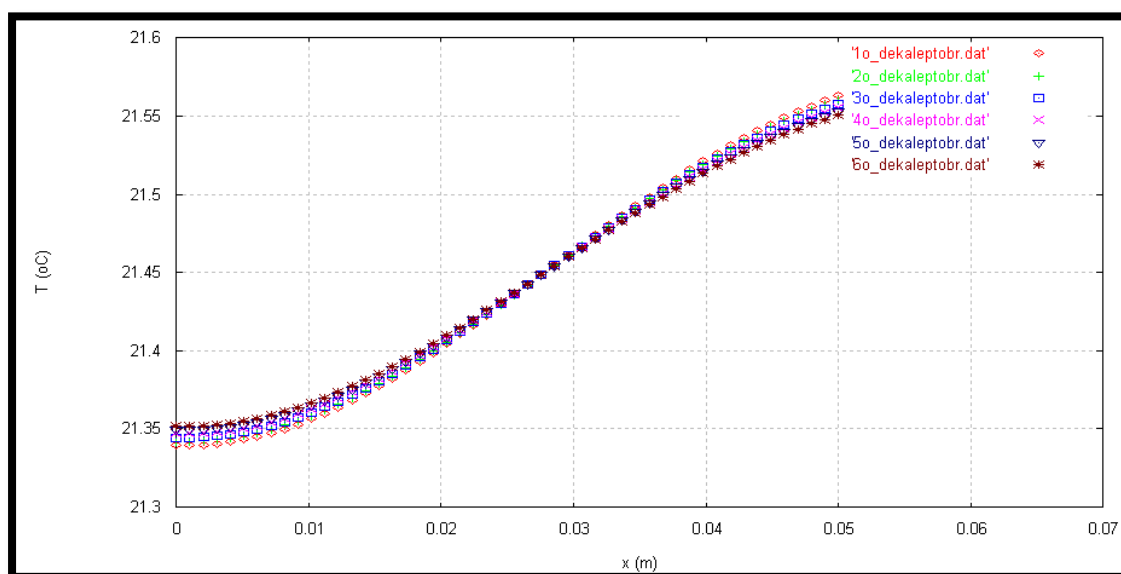
Εικόνα 18.4.25 Κατανομή της μέσης θερμοκρασίας των κόμβων του PCM την 21^η Ιουνίου.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του PCM κοντά στη μόνωση αυξάνεται από τη 01:00 έως τις 07:00, μειώνεται από τις 08:00 έως τις 17:00 και αυξάνεται εκ νέου από τις 18:00 έως τις 24:00. Η θερμοκρασία του PCM στην πλευρά του δωματίου, στον τελευταίο κόμβο του PCM, μειώνεται από τη 01:00 έως τις 05:00, αυξάνεται από τις 06:00 έως τις 17:00 και μειώνεται από τις 18:00 έως τις 24:00. Επίσης, οι θερμοκρασίες του PCM κοντά στη μόνωση διαφέρουν λίγο από το ένα δεκάλεπτο

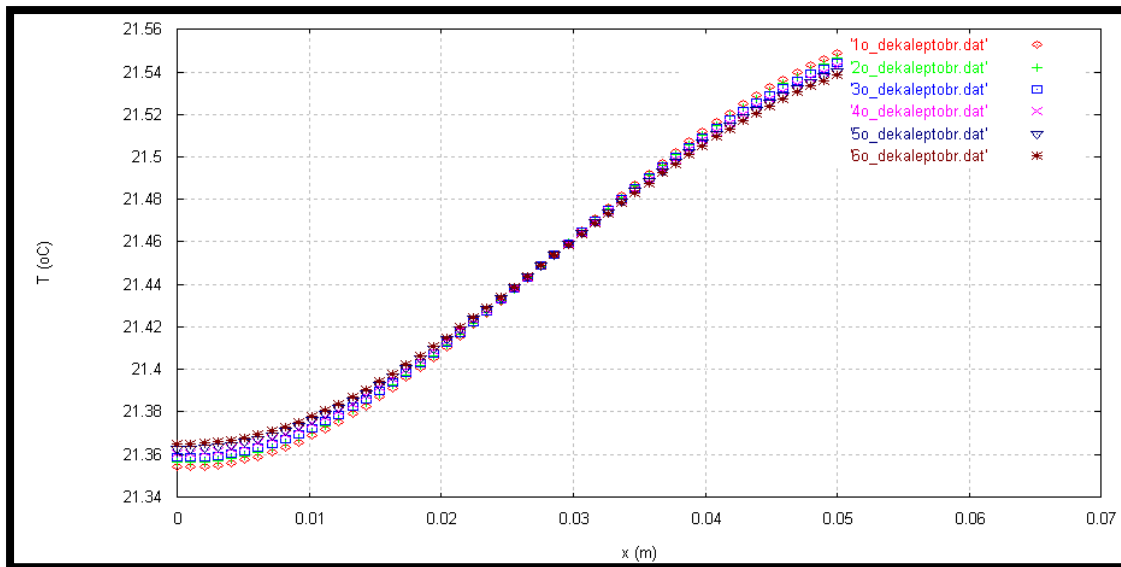
στο άλλο, σε αντίθεση με τις θερμοκρασίες του PCM κοντά στο δωμάτιο οι οποίες συμπίπτουν. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί εάν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η μόνωση λειτουργεί σαν αδιαβατικό όριο. Τέλος, παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του PCM στο ίδιο χρονικό βήμα είναι μικρότερη κοντά στη μόνωση και μεγαλύτερη κοντά στο δωμάτιο, το οποίο είναι και το αναμενόμενο.

Στην Εικόνα 18.4.25 παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασία έχει μία μικρή άνοδο από τη 01:00 έως τις 07:00, ενώ μόλις αρχίσει η ηλιοφάνεια (07:00) η μέση θερμοκρασία παρουσιάζει μεγάλη πτώση έως τις 16:00. Στη συνέχεια αυξάνεται πάλι έως ότου φτάσει τη θερμοκρασία που είχε στη 01:00. Επίσης, η μέση θερμοκρασία του PCM κυμαίνεται από τους 19.075 έως τους 19.182 °C, ενώ η εσωτερική θερμοκρασία του χώρου για το μήνα Ιούνιο κυμαίνεται από τους 20 έως τους 27 °C. Είναι αναμενόμενο η θερμοκρασία του PCM να είναι μικρότερη από εκείνη του εσωτερικού χώρου, γιατί έτσι μόνο έχουμε θερμορροή από το χώρο στο πάνελ του PCM, δηλαδή επιτυγχάνεται η ψύξη του χώρου.

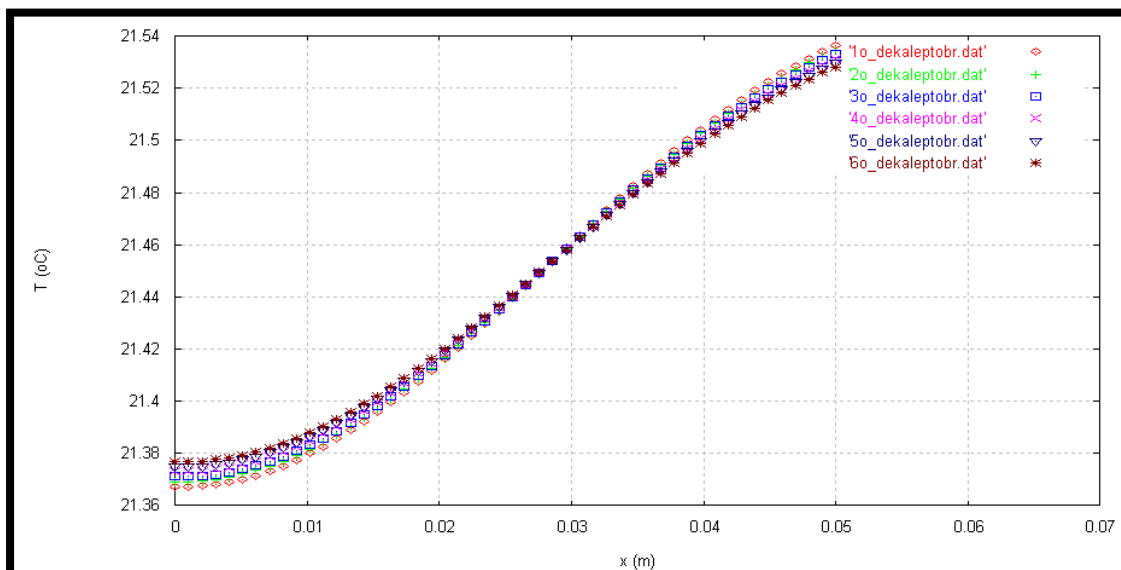
▪ Μήνας Ιούλιος



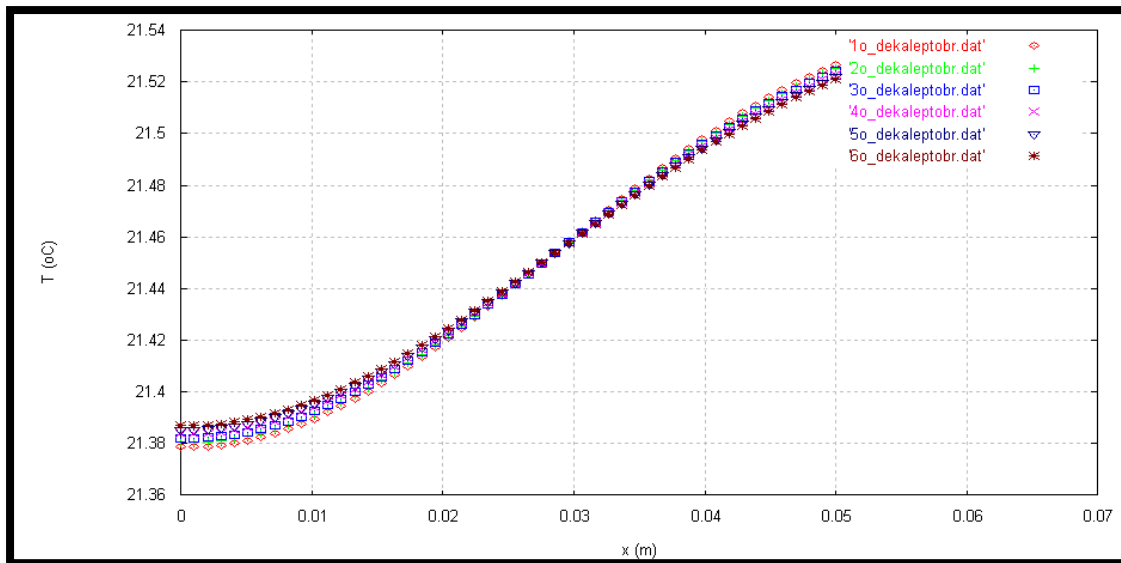
Εικόνα 18.4.26 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 01:00-02:00.



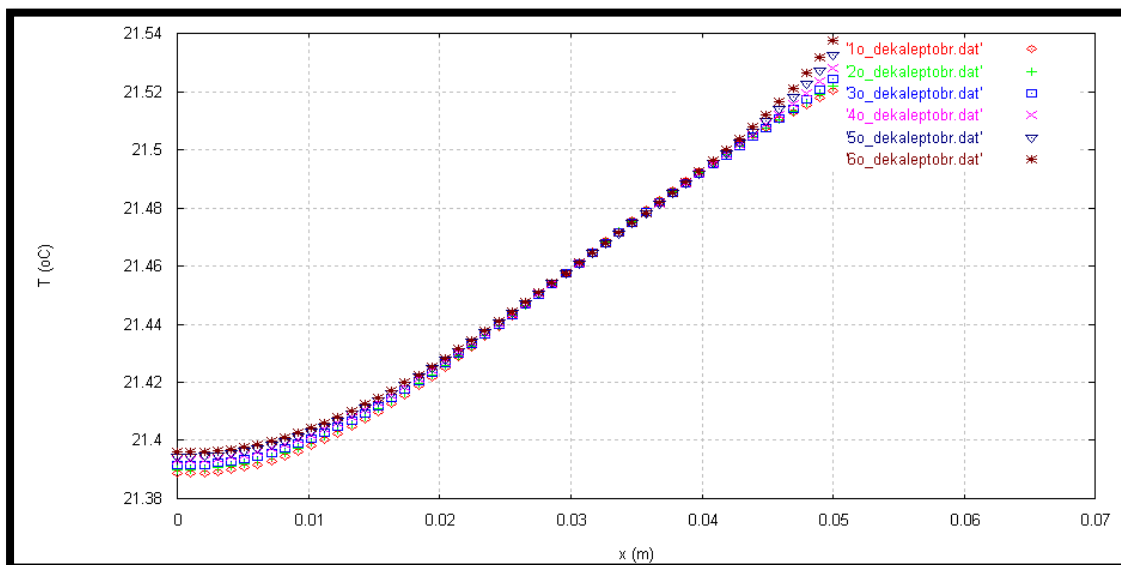
Εικόνα 18.4.27 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 02:00-03:00.



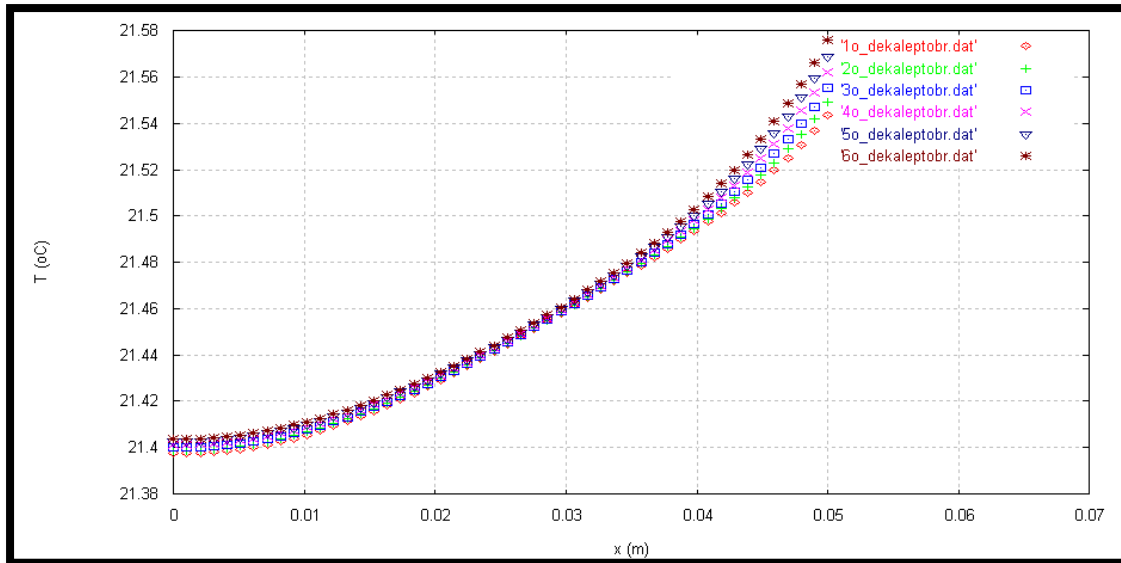
Εικόνα 18.4.28 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 03:00-04:00.



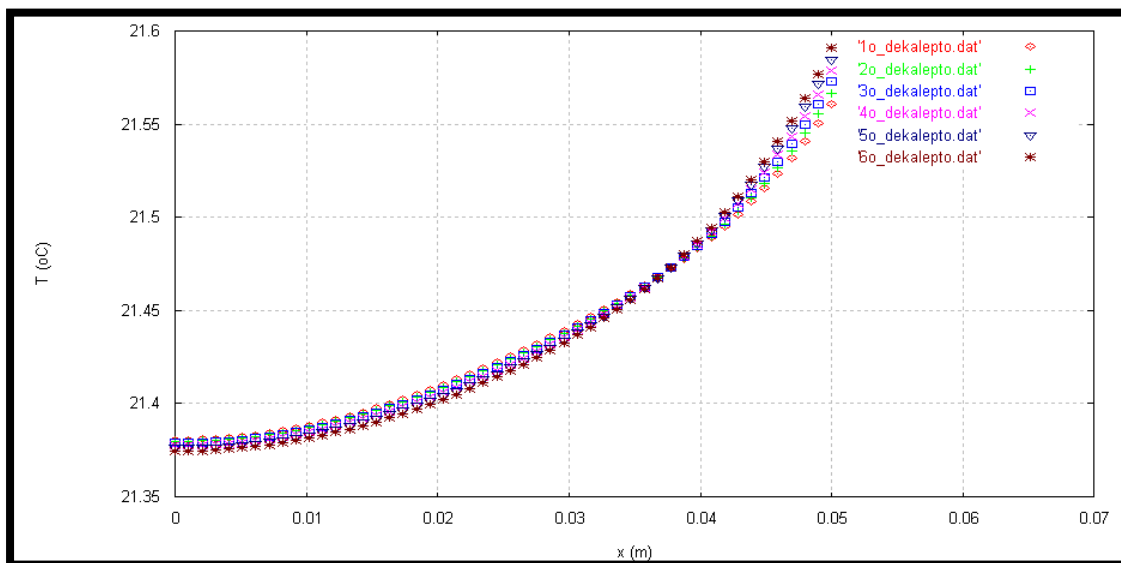
Εικόνα 18.4.29 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 04:00-05:00.



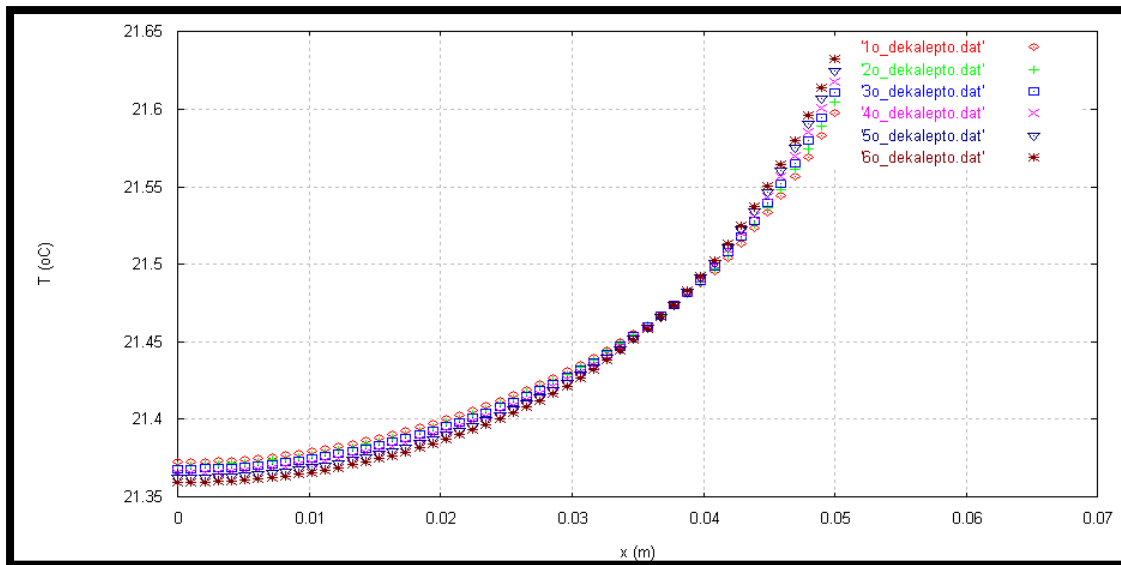
Εικόνα 18.4.30 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 05:00-06:00.



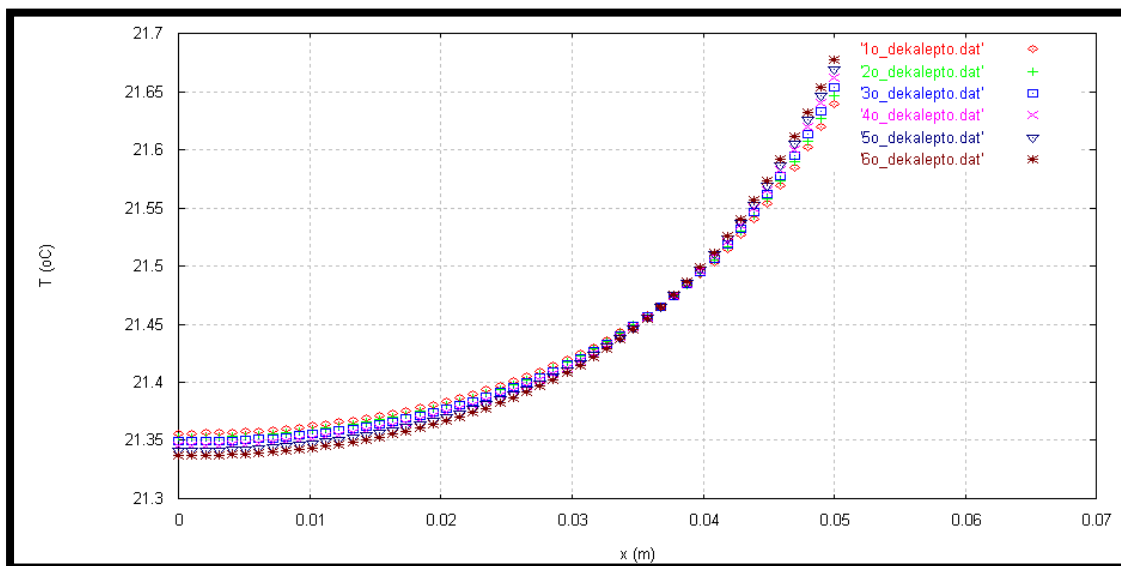
Εικόνα 18.4.31. Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 06:00-07:00.



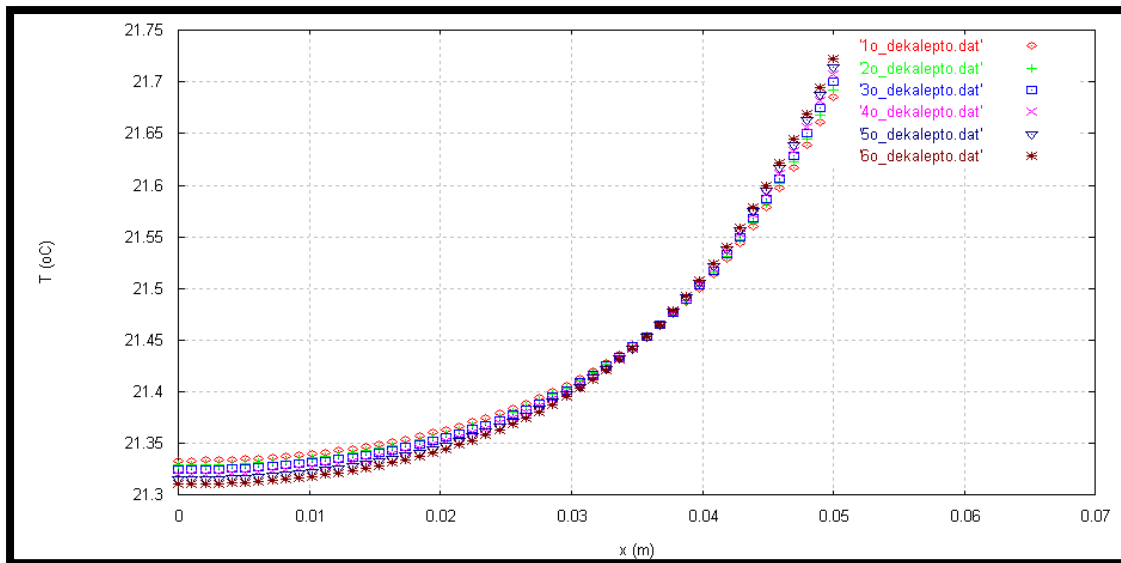
Εικόνα 18.4.32 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 07:00-08:00.



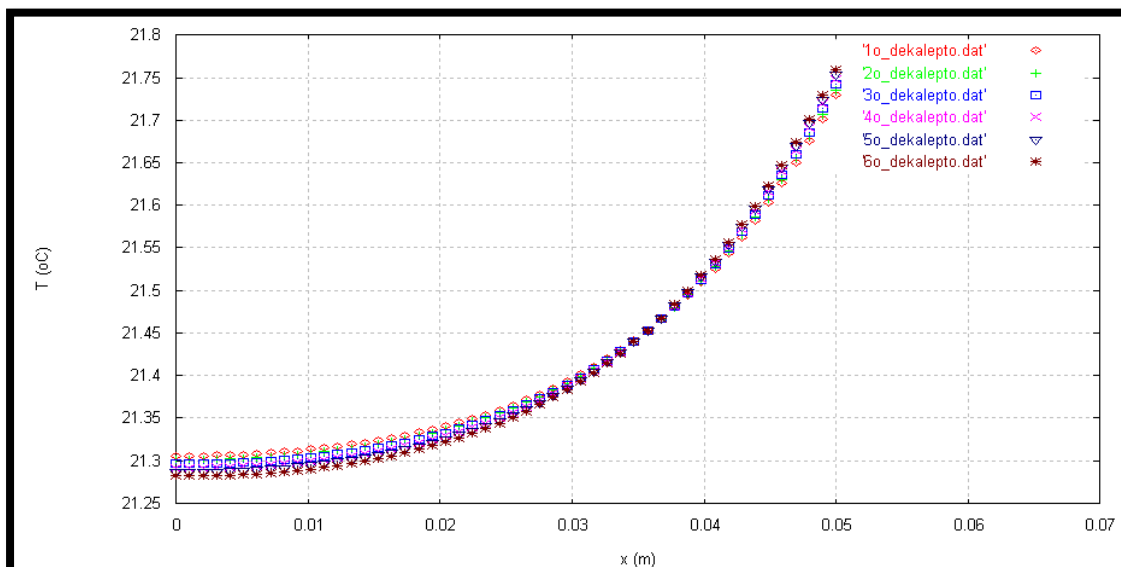
Εικόνα 18.4.33 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 08:00-09:00.



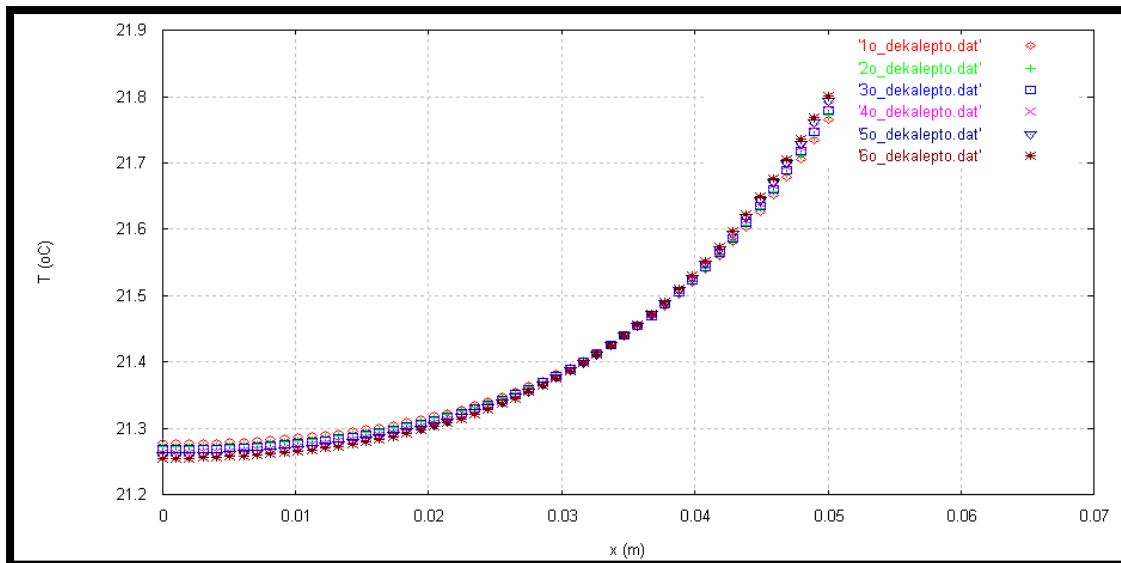
Εικόνα 18.4.34 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 09:00-10:00.



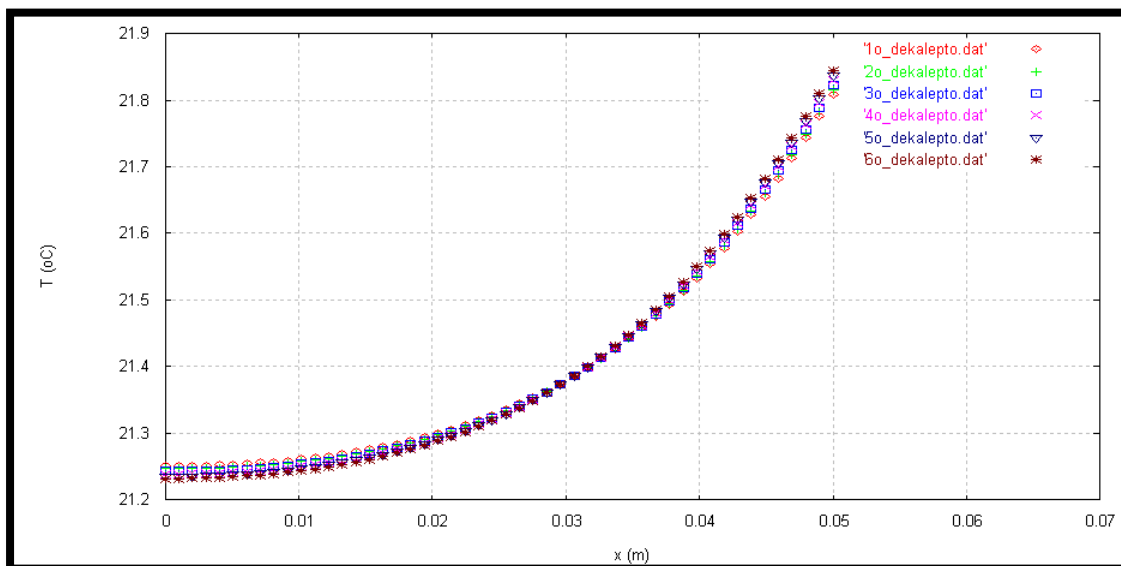
Εικόνα 18.4.35 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 10:00-11:00.



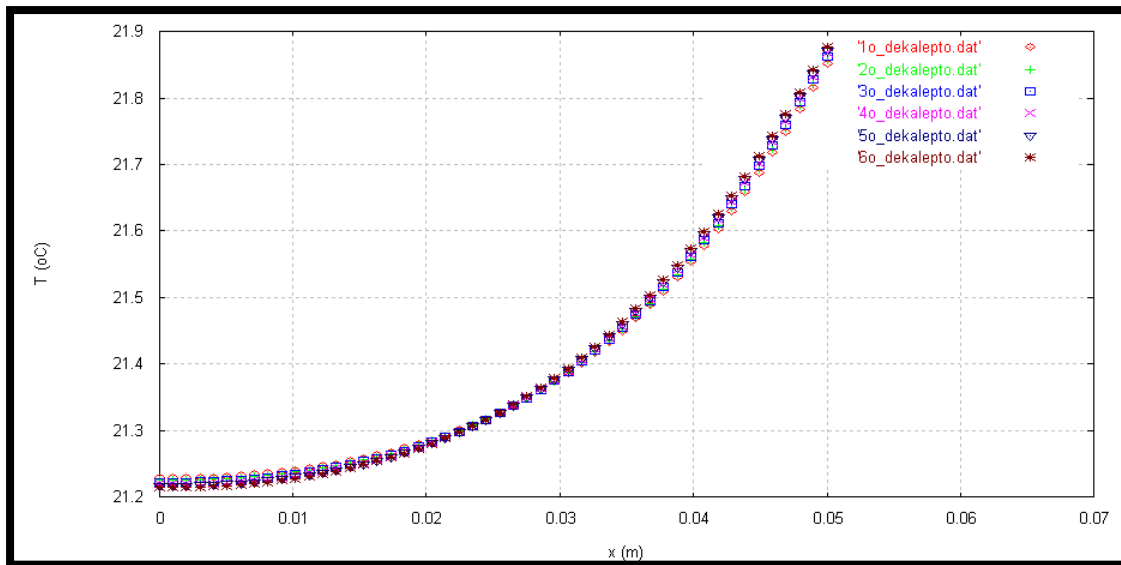
Εικόνα 18.4.36 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 11:00-12:00.



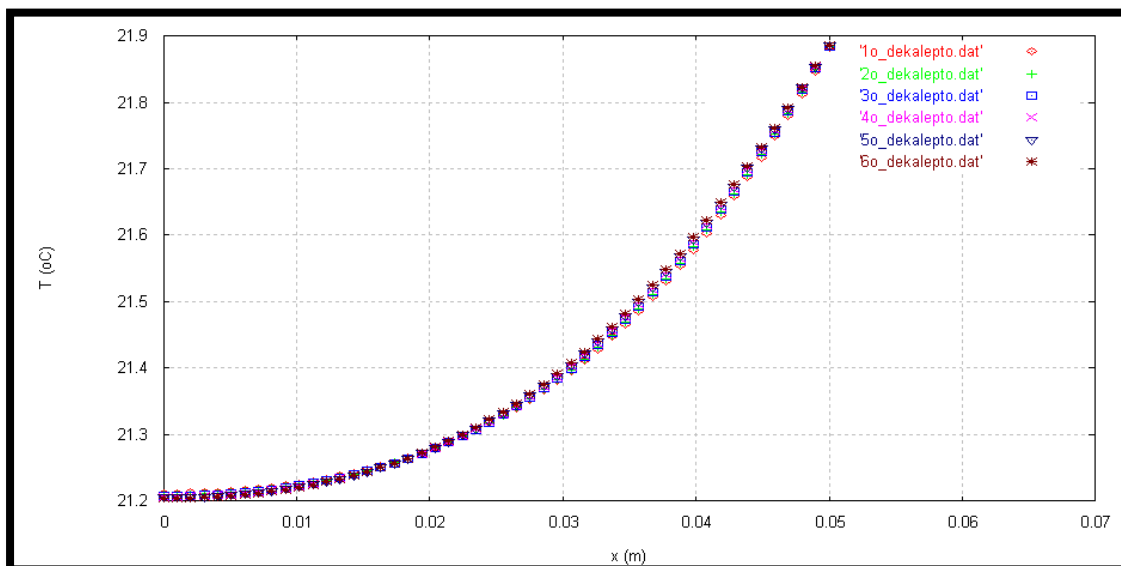
Εικόνα 18.4.37 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 12:00-13:00.



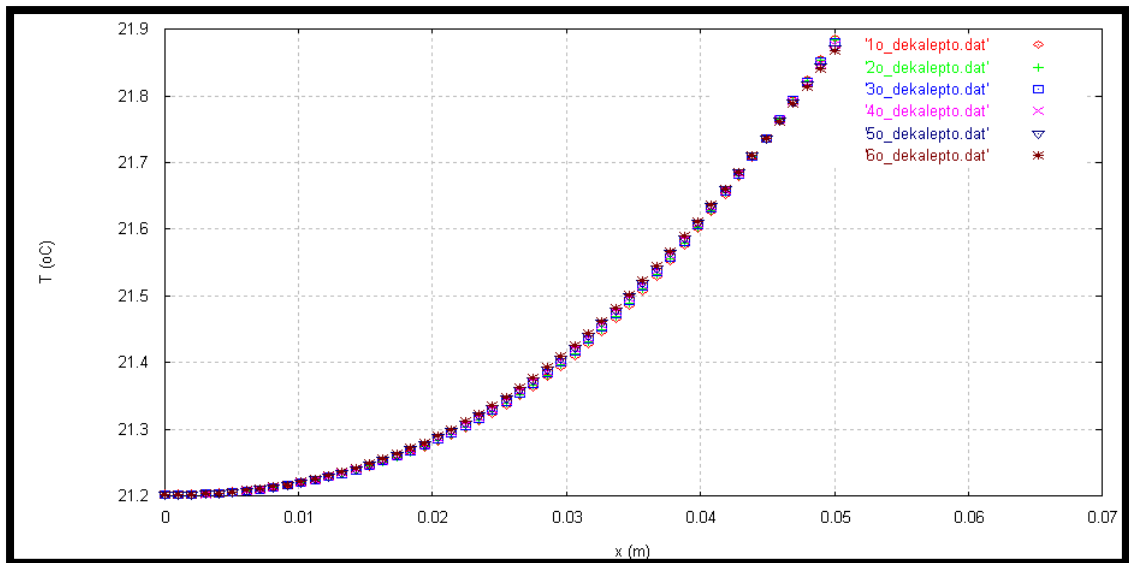
Εικόνα 18.4.38 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 13:00-14:00.



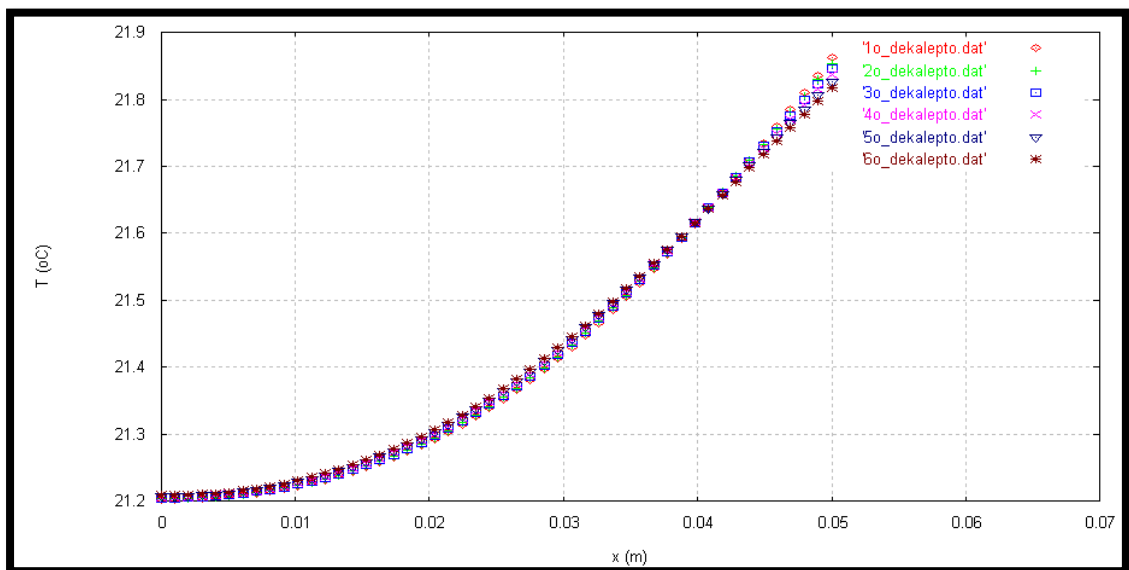
Εικόνα 18.4.39 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 14:00-15:00.



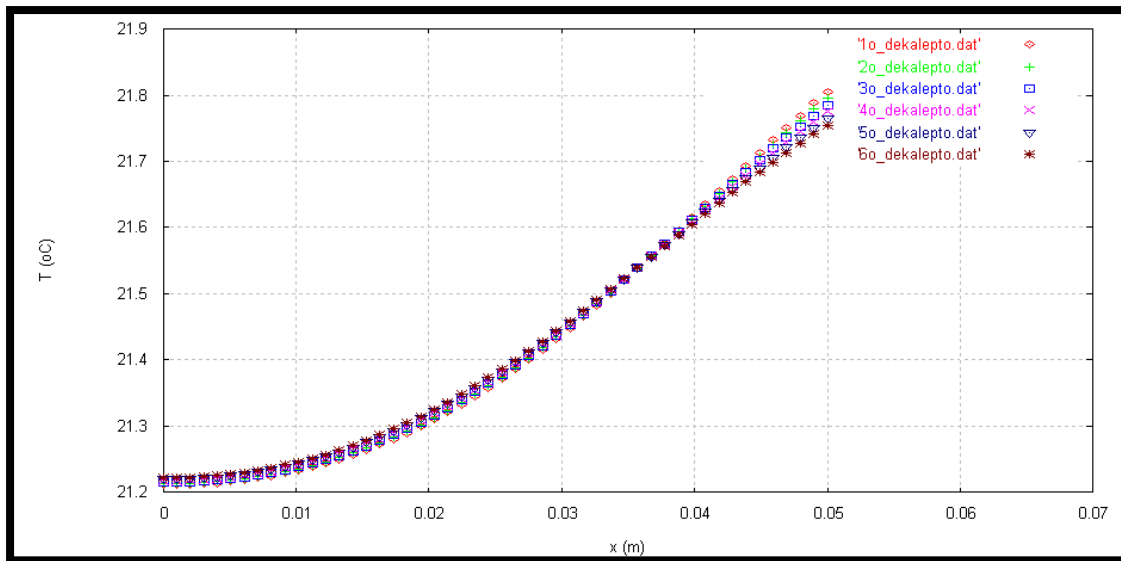
Εικόνα 18.4.40 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 15:00-16:00.



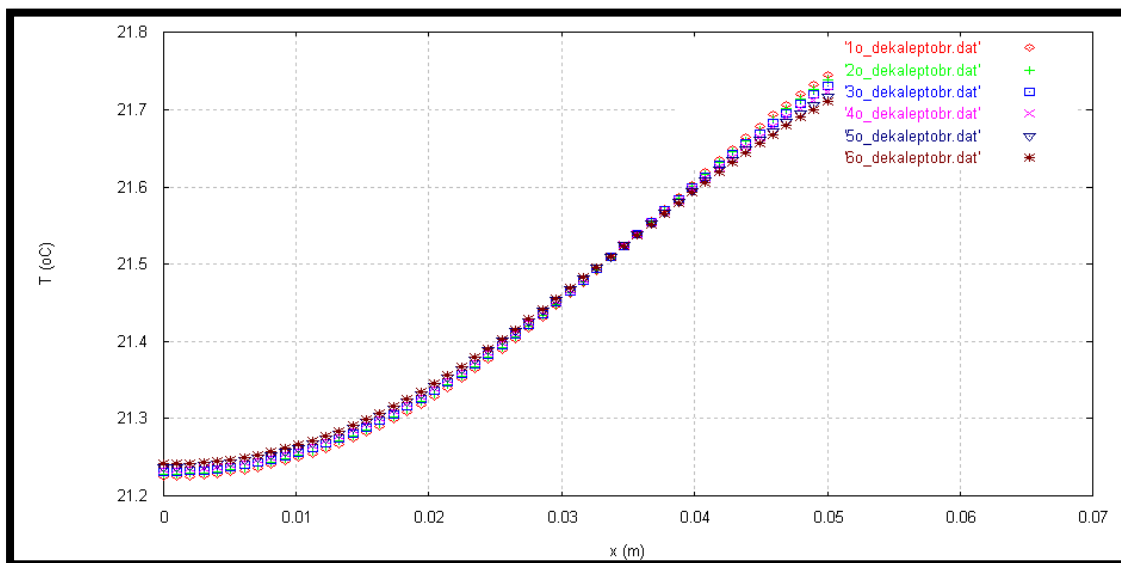
Εικόνα 18.4.41. Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 16:00-17:00.



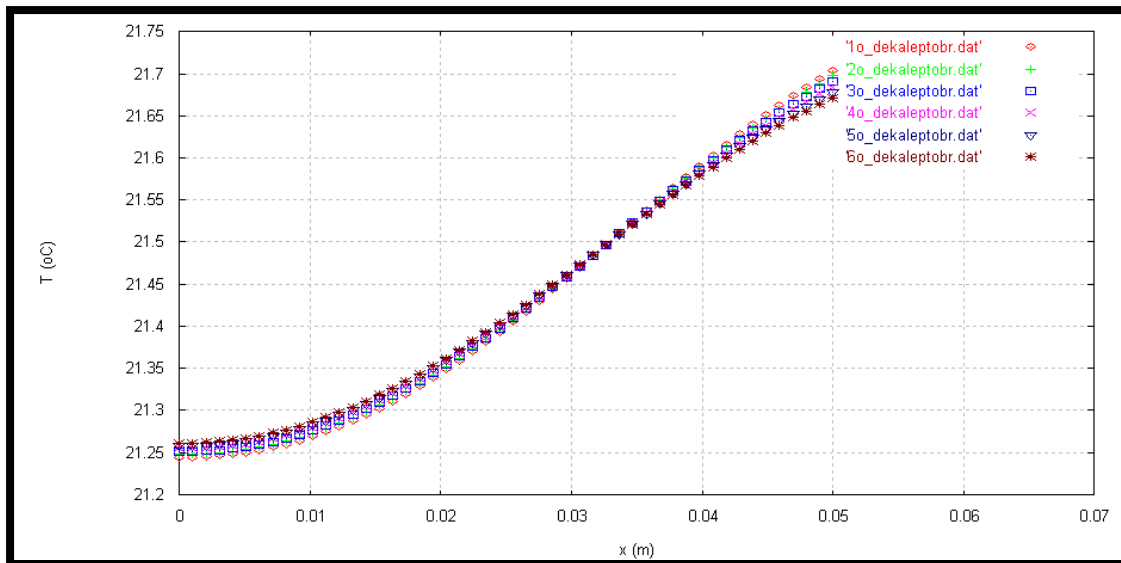
Εικόνα 18.4.42 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 17:00-18:00.



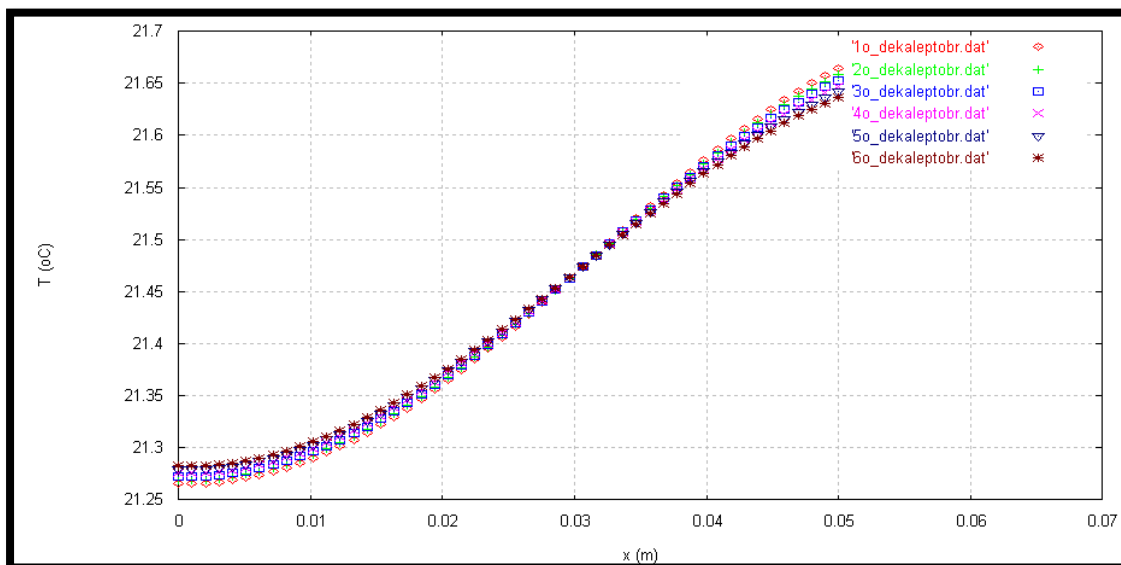
Εικόνα 18.4.43 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 18:00-19:00.



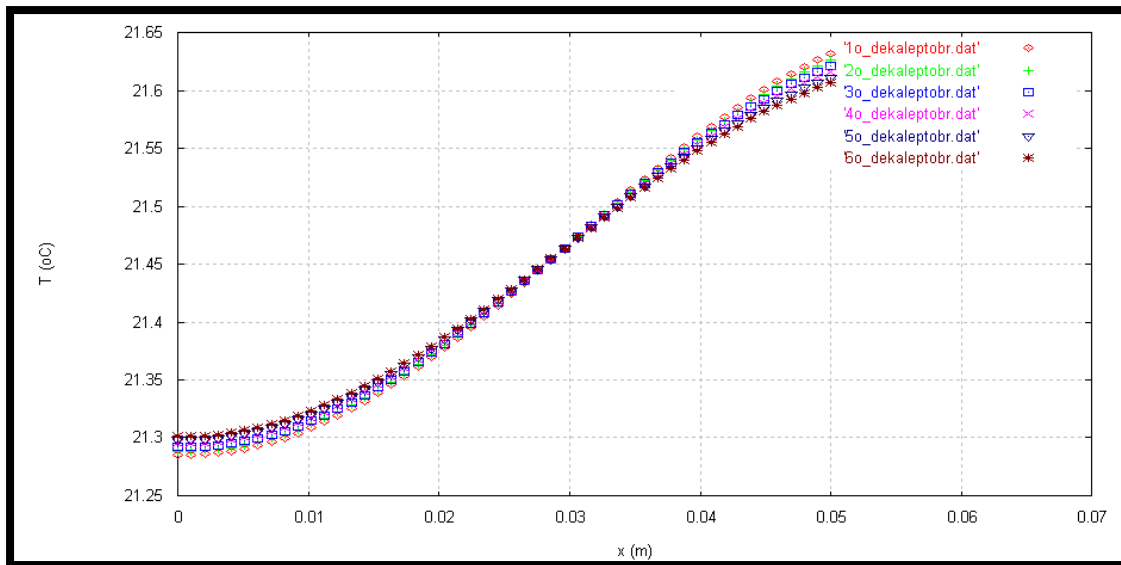
Εικόνα 18.4.44 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 19:00-20:00.



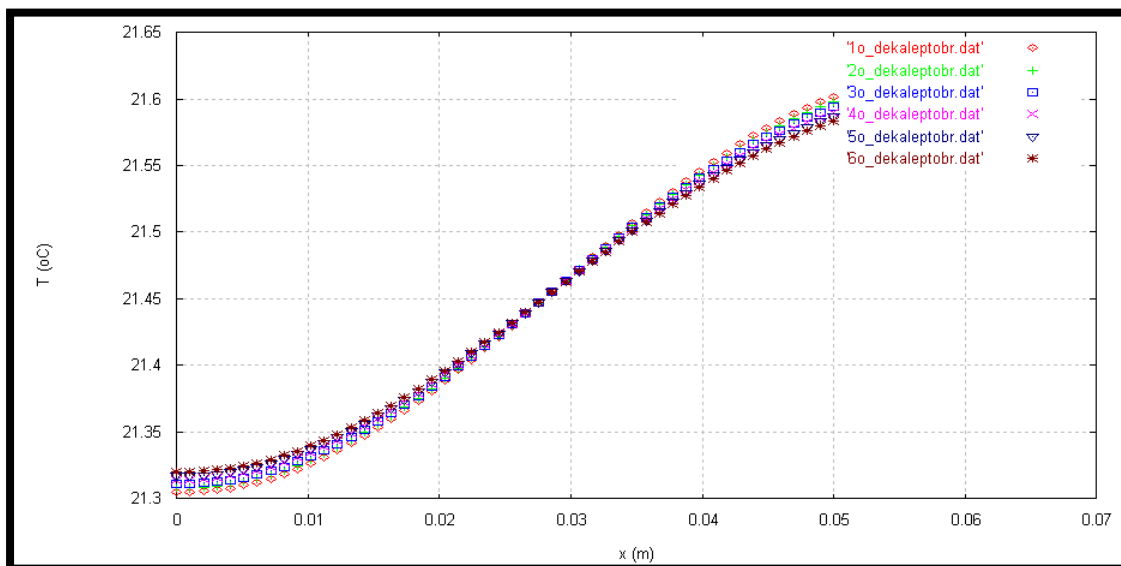
Εικόνα 18.4.45 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 20:00-21:00.



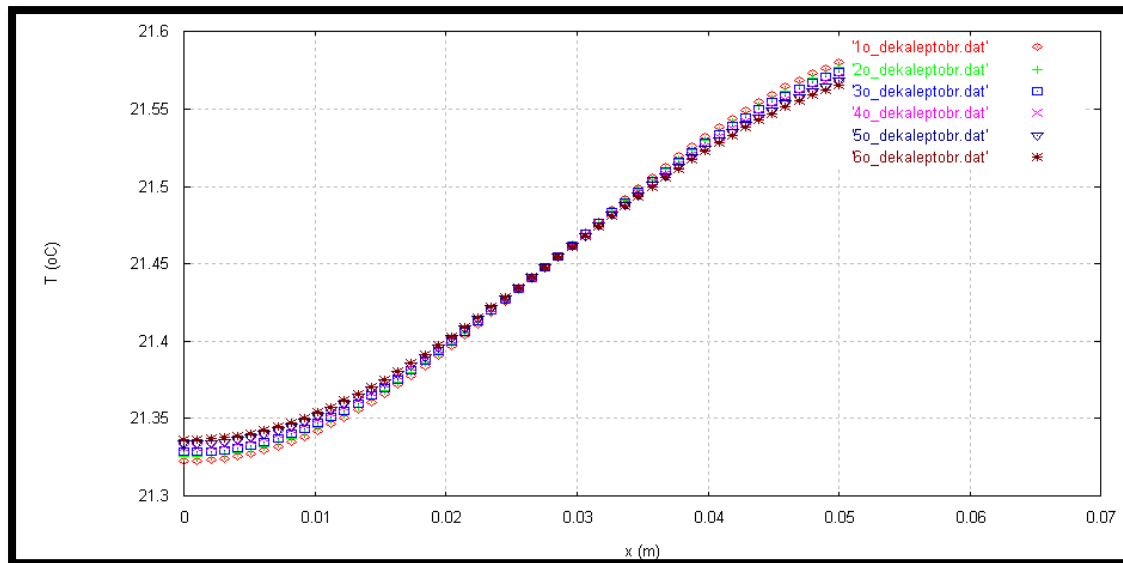
Εικόνα 18.4.46 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 21:00-22:00.



Εικόνα 18.4.47 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 22:00-23:00.

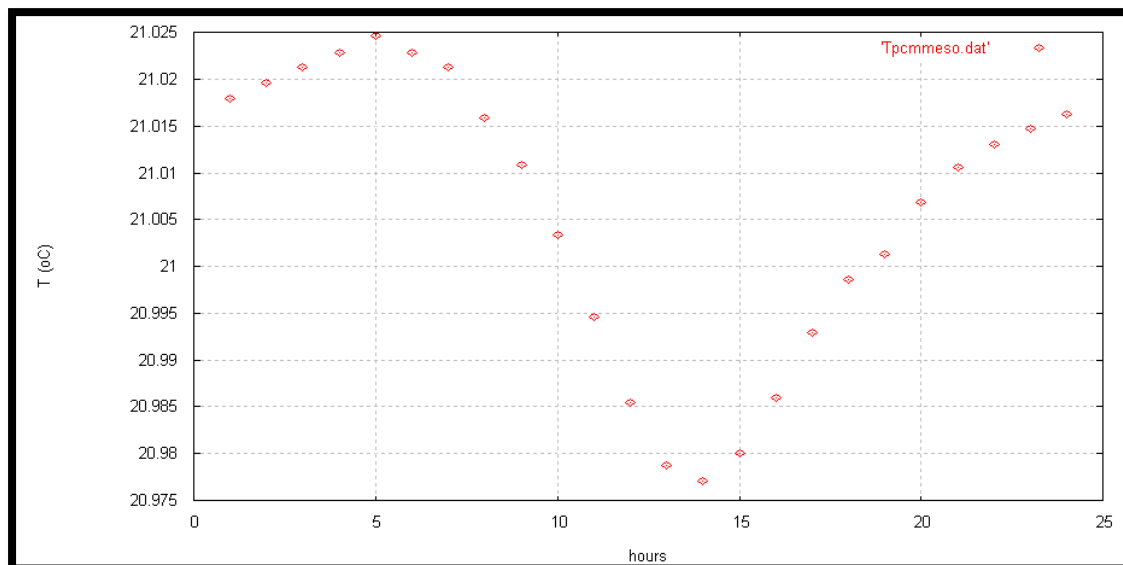


Εικόνα 18.4.48 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 23:00-24:00.



Εικόνα 18.4.49 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Ιουλίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 24:00-01:00.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία των κόμβων του PCM την 21^η ημέρα του Ιουλίου συναρτήσει των ωρών του εικοσιτετραώρου.



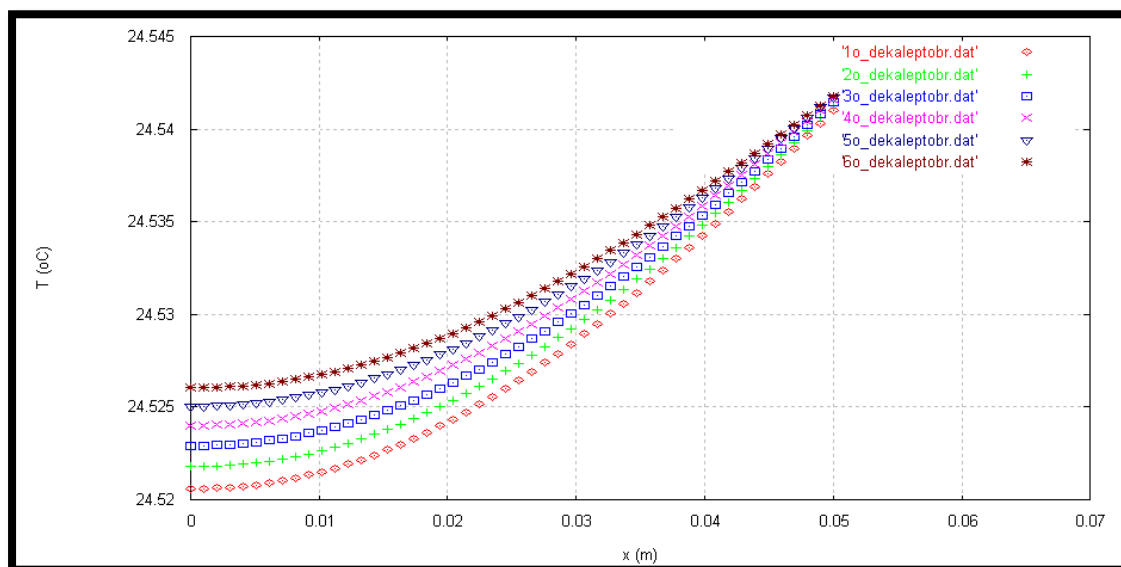
Εικόνα 18.4.50 Κατανομή της μέσης θερμοκρασίας των κόμβων του PCM την 21^η Ιουλίου.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του PCM κοντά στη μόνωση αυξάνεται από τη 01:00 έως τις 07:00, μειώνεται από τις 08:00 έως τις 17:00 και αυξάνεται εκ νέου από τις 18:00 έως τις 24:00. Η θερμοκρασία του PCM στην πλευρά του δωματίου, στον τελευταίο κόμβο του PCM, μειώνεται από τη 01:00 έως τις 05:00, αυξάνεται από τις 06:00 έως τις 16:00 και μειώνεται από τις 17:00 έως τις 24:00. Επίσης, οι θερμοκρασίες του PCM κοντά στη μόνωση διαφέρουν λίγο από το ένα δεκάλεπτο

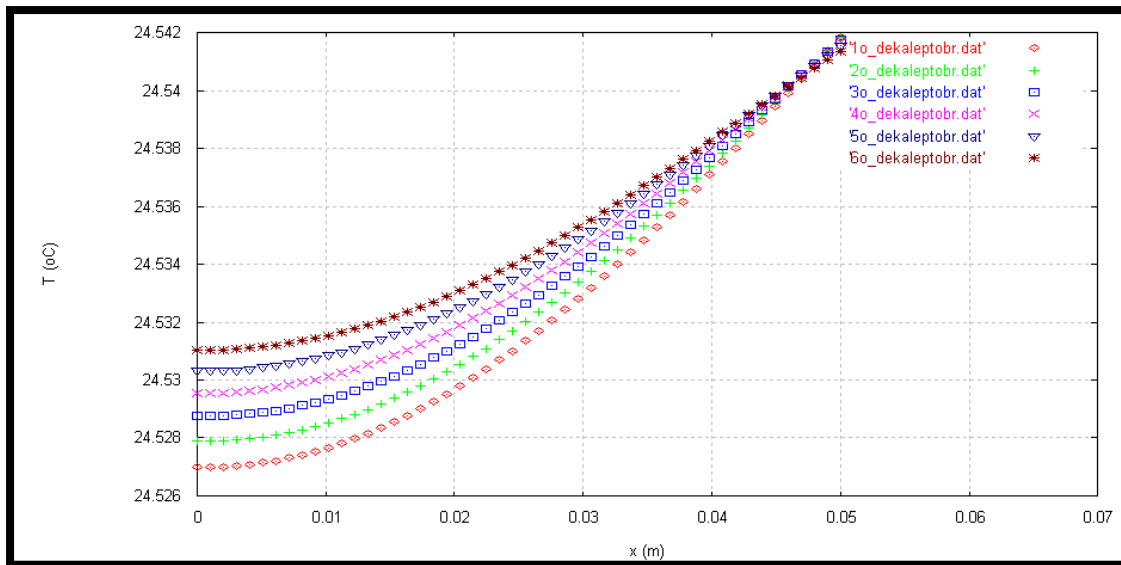
στο άλλο, σε αντίθεση με τις θερμοκρασίες του PCM κοντά στο δωμάτιο οι οποίες συμπίπτουν. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί εάν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η μόνωση λειτουργεί σαν αδιαβατικό όριο. Τέλος, παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του PCM στο ίδιο χρονικό βήμα είναι μικρότερη κοντά στη μόνωση και μεγαλύτερη κοντά στο δωμάτιο, το οποίο είναι και το αναμενόμενο.

Στην Εικόνα 18.4.50 παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασία έχει μία μικρή άνοδο από τη 01:00 έως τις 05:00, ενώ μόλις αρχίσει η ηλιοφάνεια (07:00) η μέση θερμοκρασία παρουσιάζει μεγάλη πτώση έως τις 14:00. Στη συνέχεια αυξάνεται πάλι έως ότου φτάσει τη θερμοκρασία που είχε στη 01:00. Επίσης, η μέση θερμοκρασία του PCM κυμαίνεται από τους 20.977 έως τους 21.025 °C, ενώ η εσωτερική θερμοκρασία του χώρου για το μήνα Ιούλιο κυμαίνεται από τους 22 έως τους 29 °C. Είναι αναμενόμενο η θερμοκρασία του PCM να είναι μικρότερη από εκείνη του εσωτερικού χώρου, γιατί έτσι μόνο έχουμε θερμορροή από το χώρο στο πάνελ του PCM, δηλαδή επιτυγχάνεται η ψύξη του χώρου.

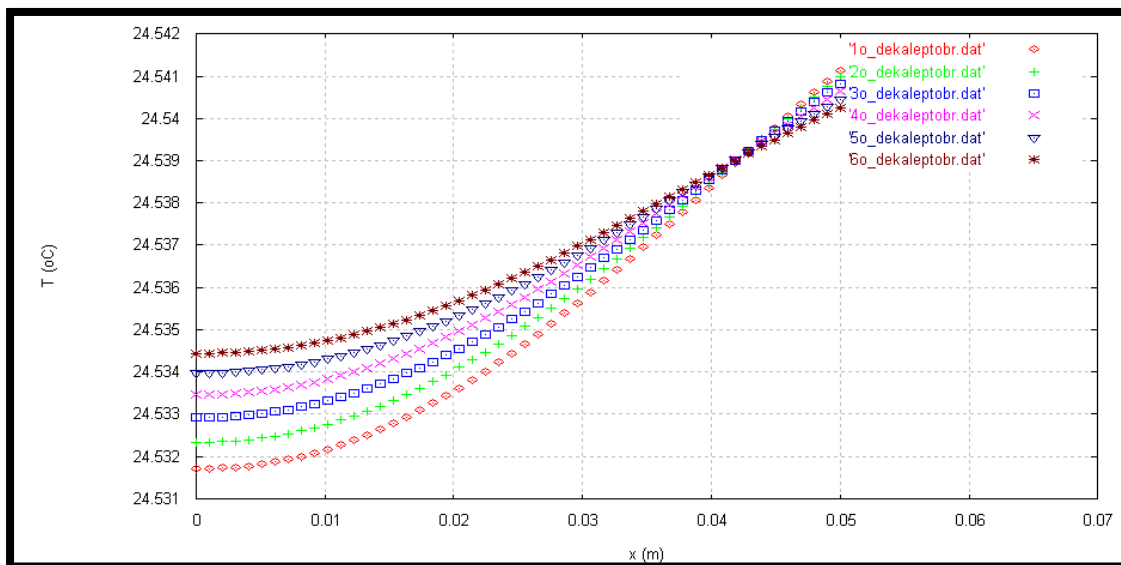
▪ Μήνας Αύγουστος



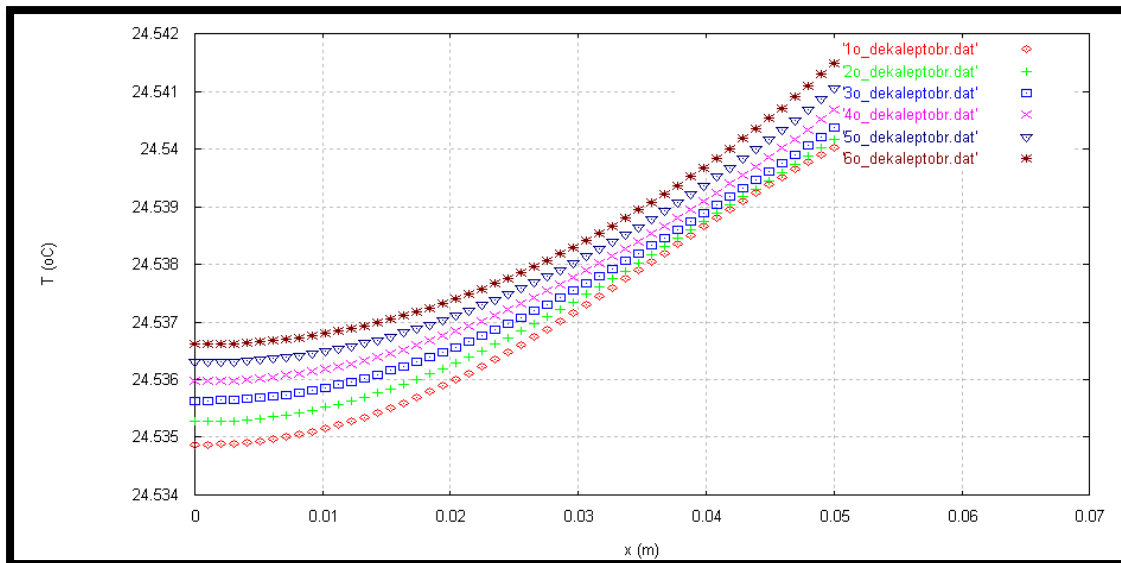
Εικόνα 18.4.51 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 01:00-02:00.



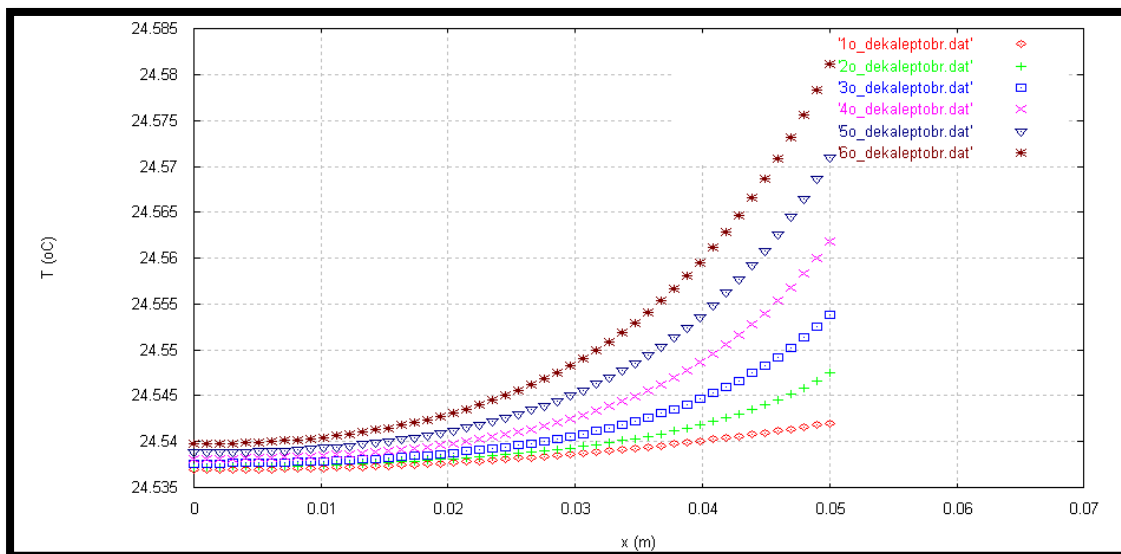
Εικόνα 18.4.52 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 02:00-03:00.



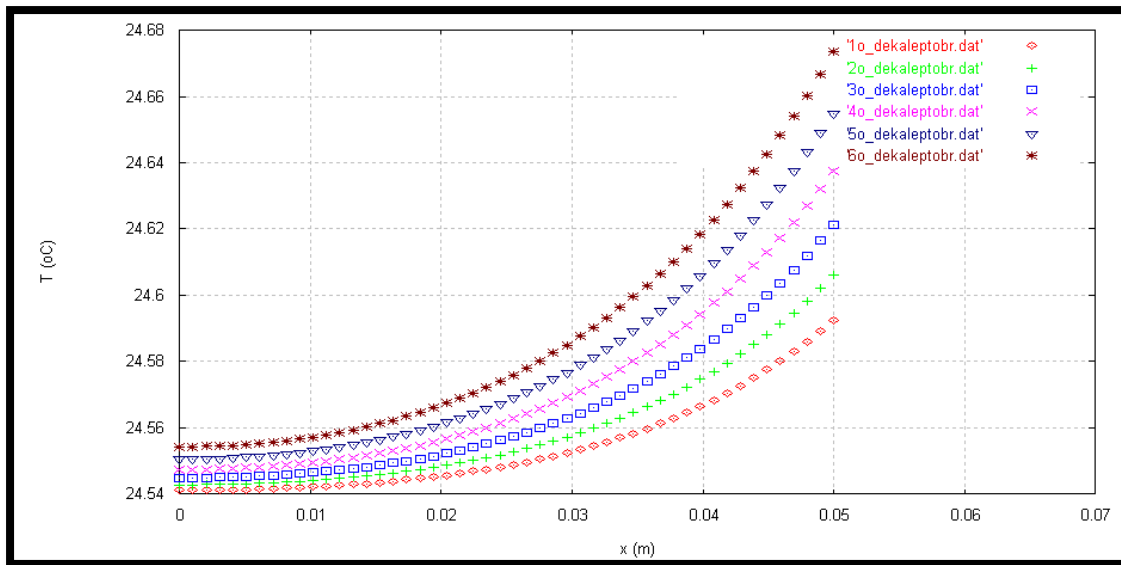
Εικόνα 18.4.53 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 03:00-04:00.



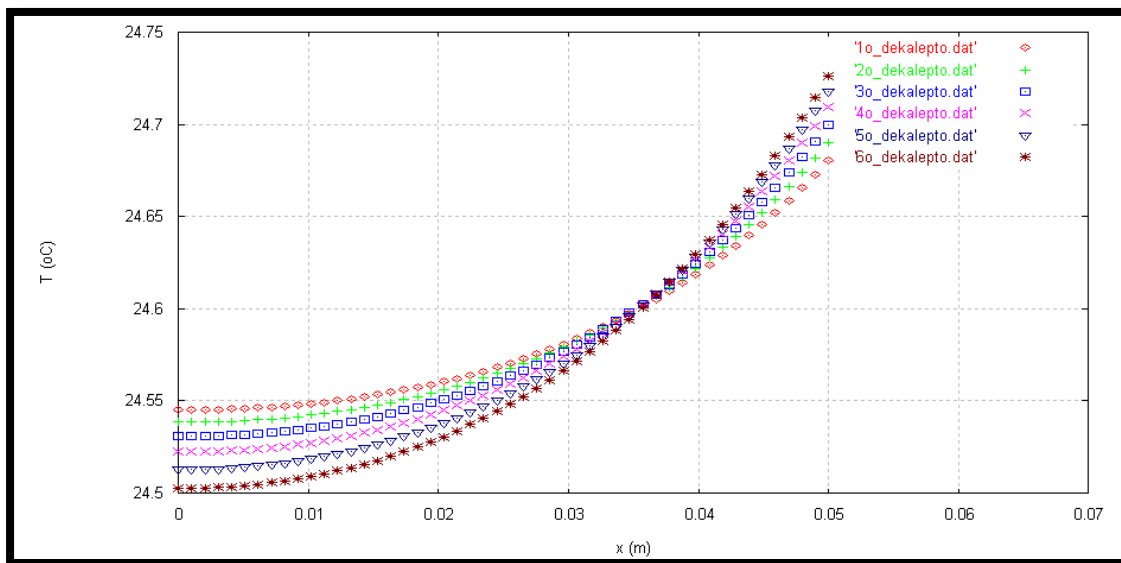
Εικόνα 18.4.54 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 04:00-05:00.



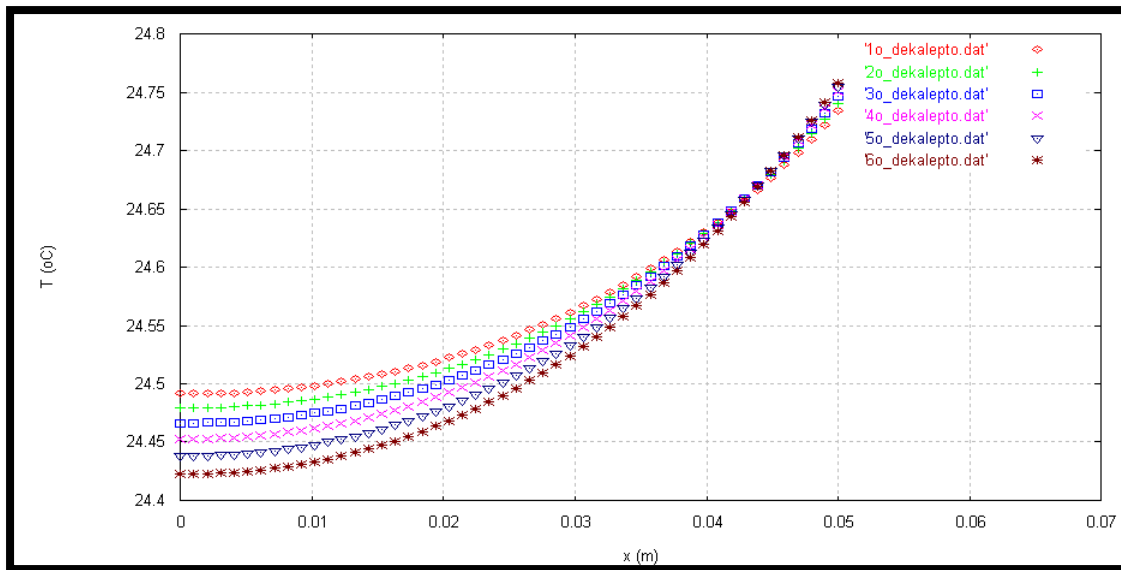
Εικόνα 18.4.55 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 05:00-06:00.



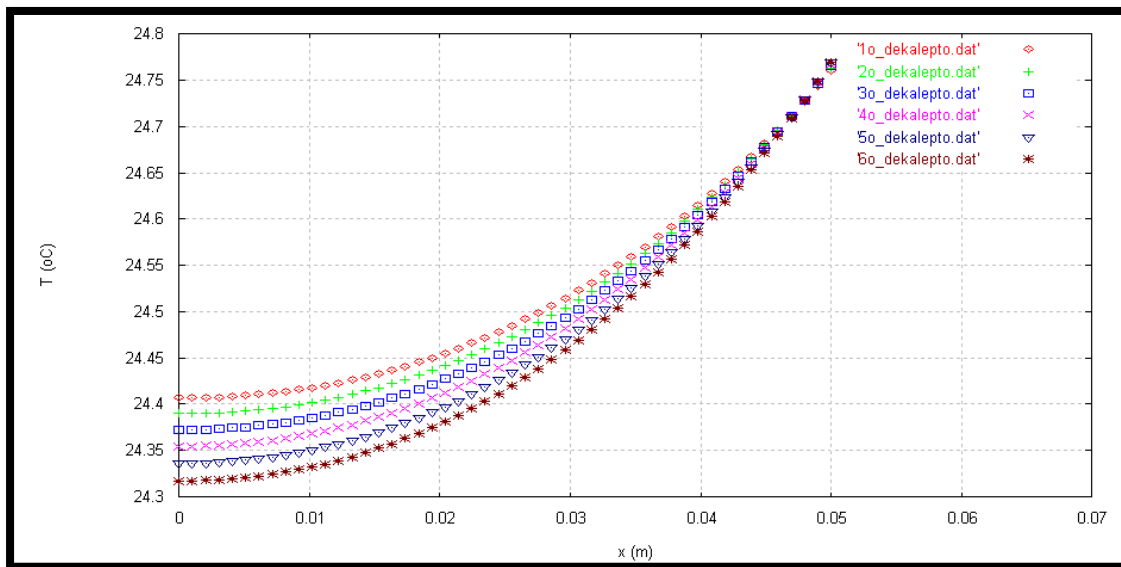
Εικόνα 18.4.56 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 06:00-07:00.



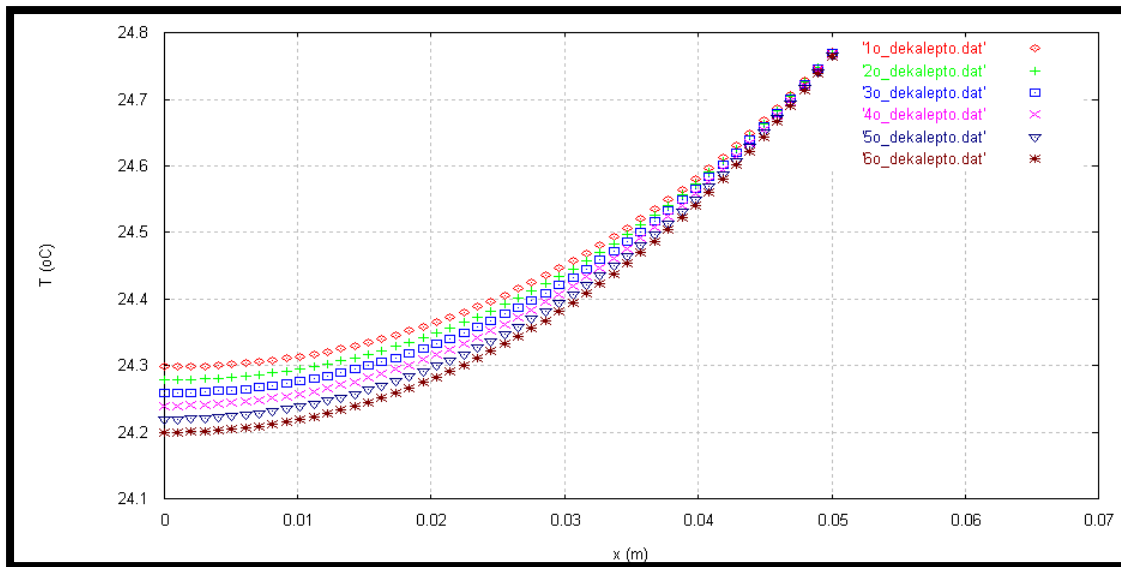
Εικόνα 18.4.57 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 07:00-08:00.



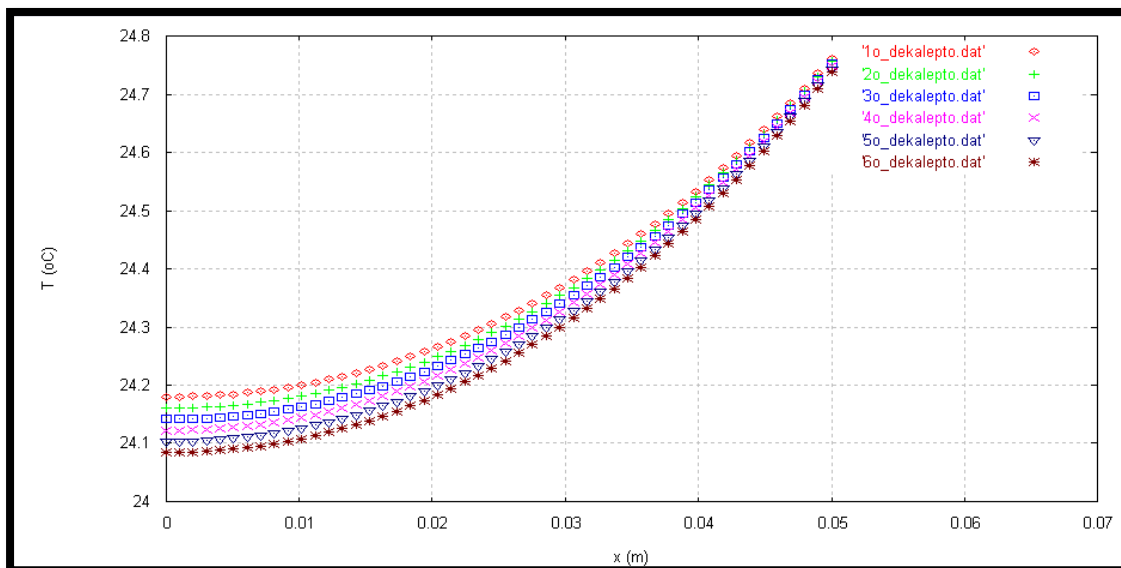
Εικόνα 18.4.58 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 08:00-09:00.



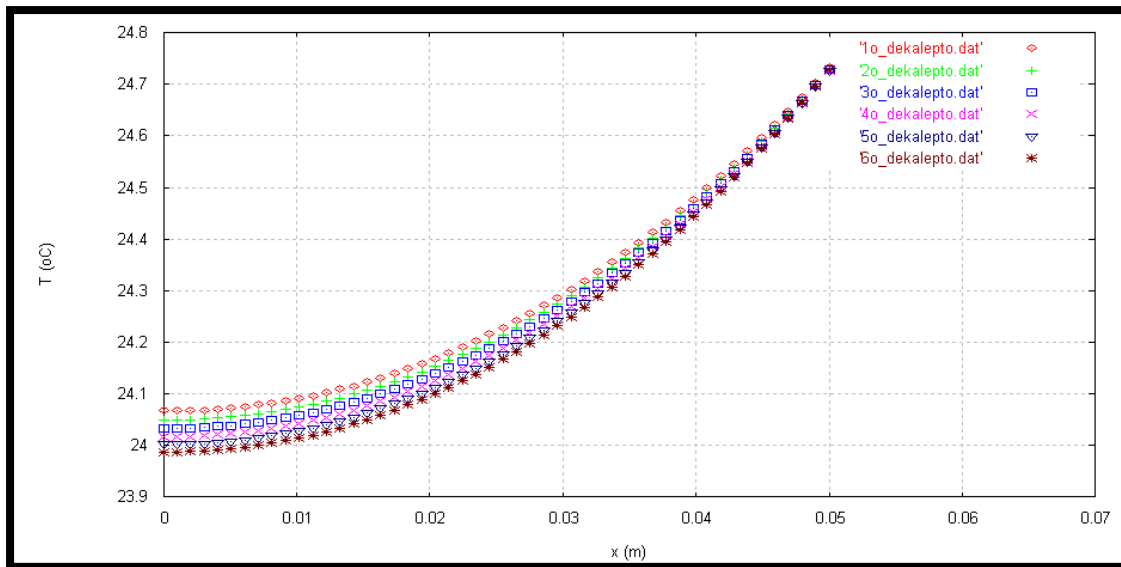
Εικόνα 18.4.59 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 09:00-10:00.



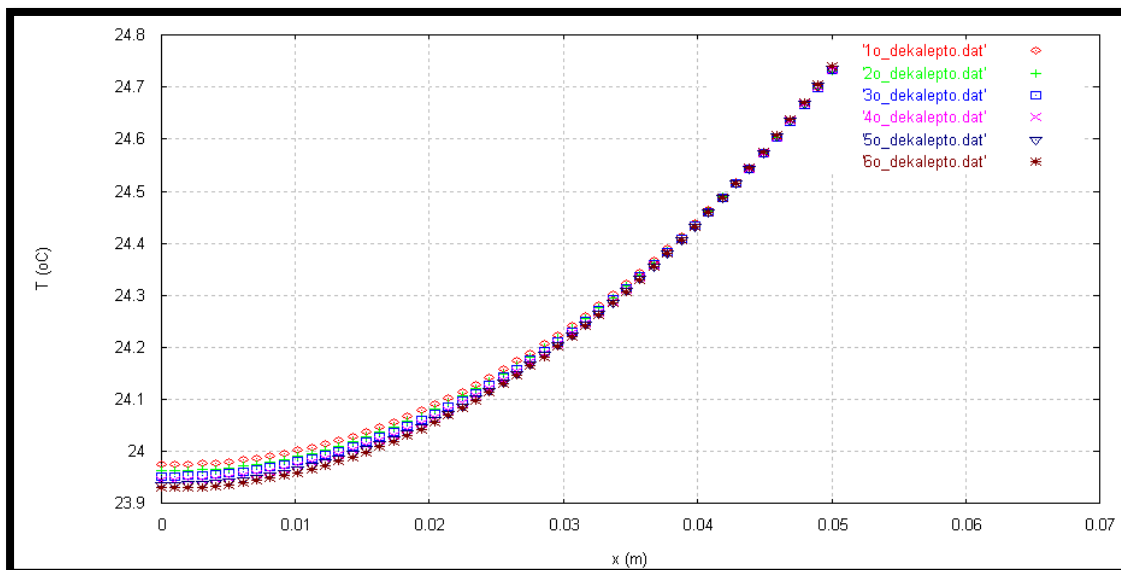
Εικόνα 18.4.60 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 10:00-11:00.



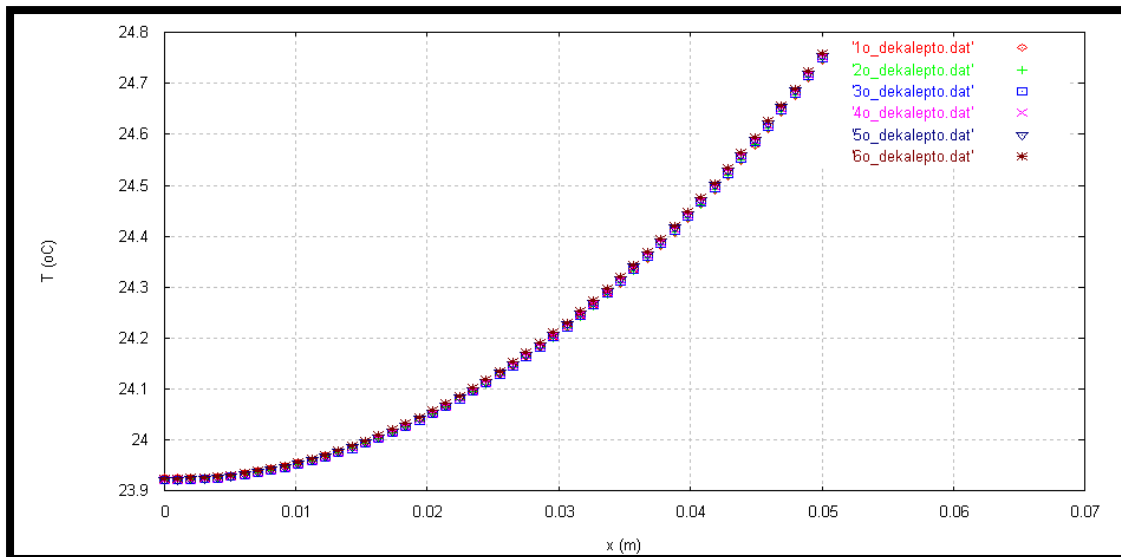
Εικόνα 18.4.61 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 11:00-12:00.



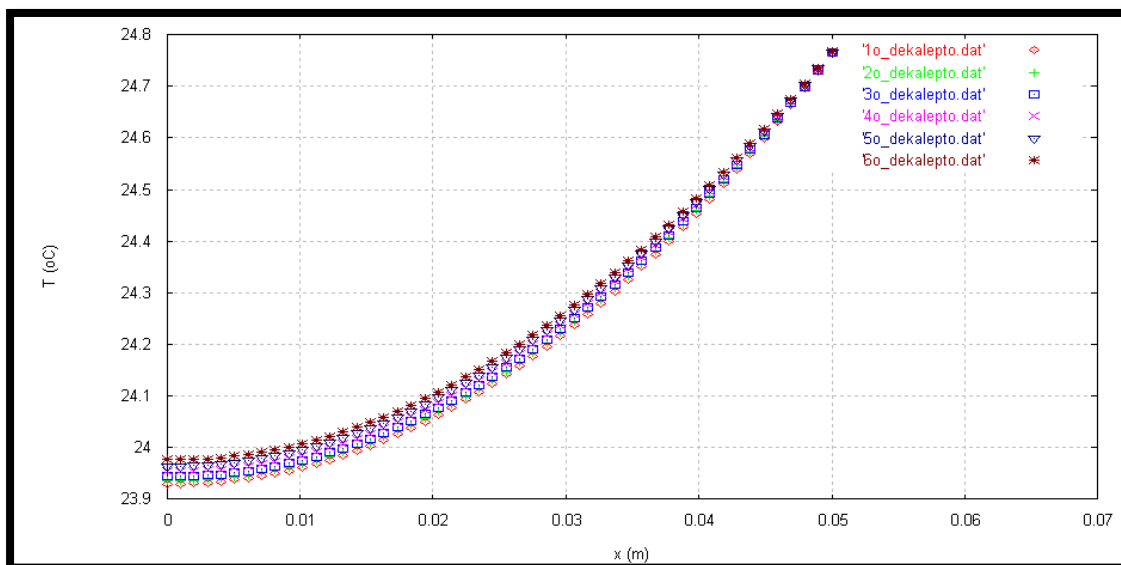
Εικόνα 18.4.62 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 12:00-13:00.



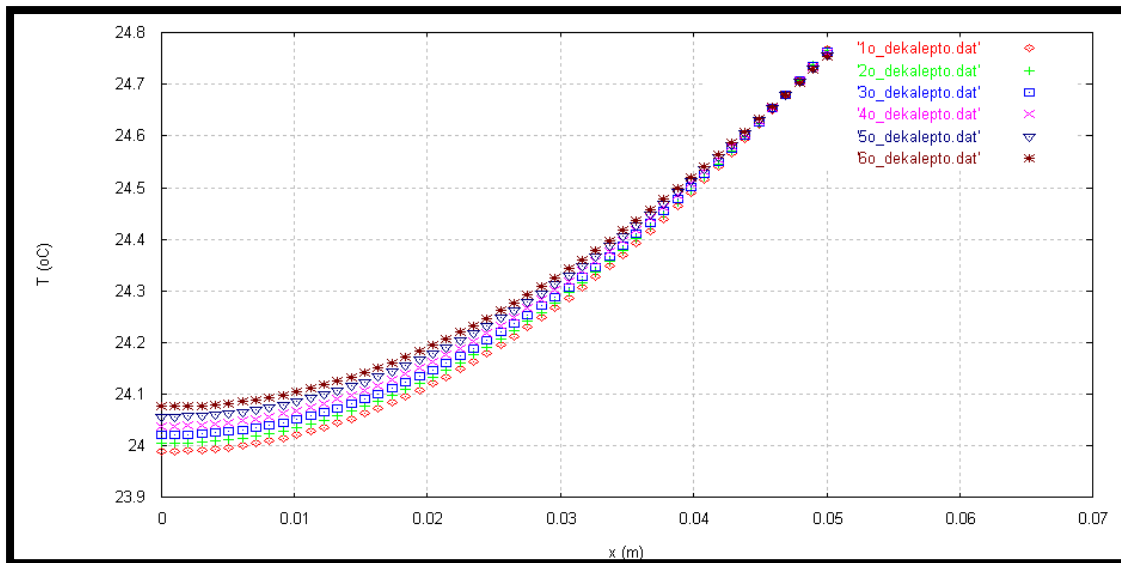
Εικόνα 18.4.63 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 13:00-14:00.



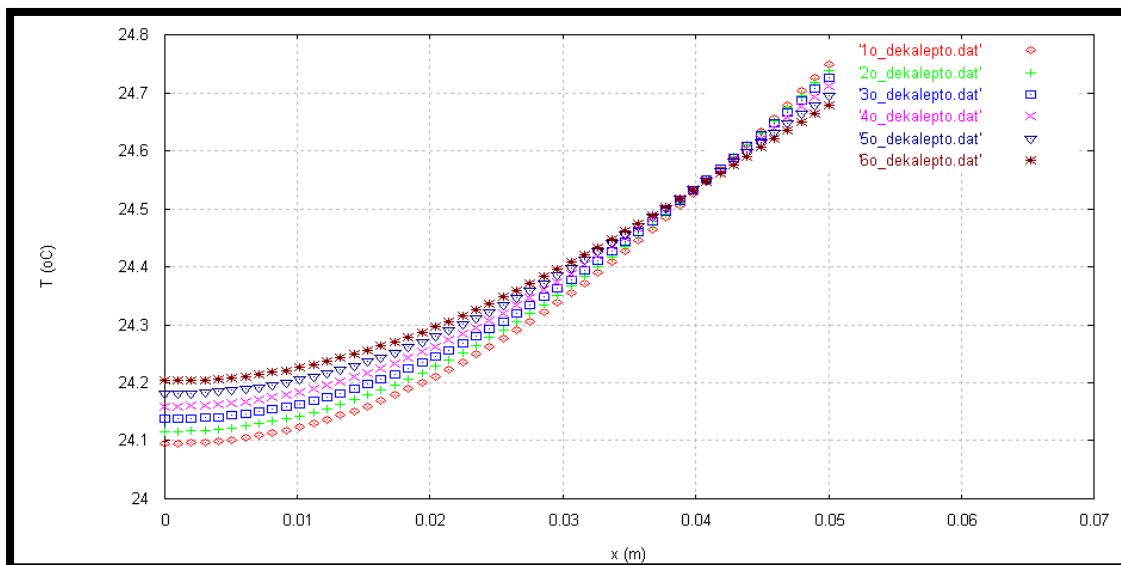
Εικόνα 18.4.64 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 14:00-15:00.



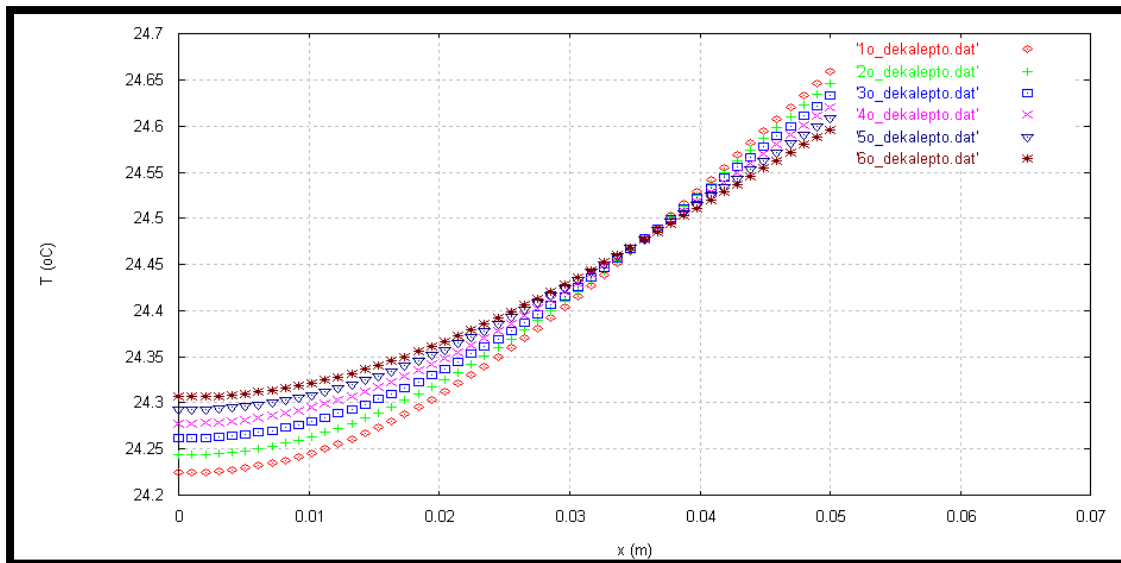
Εικόνα 18.4.65 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 15:00-16:00.



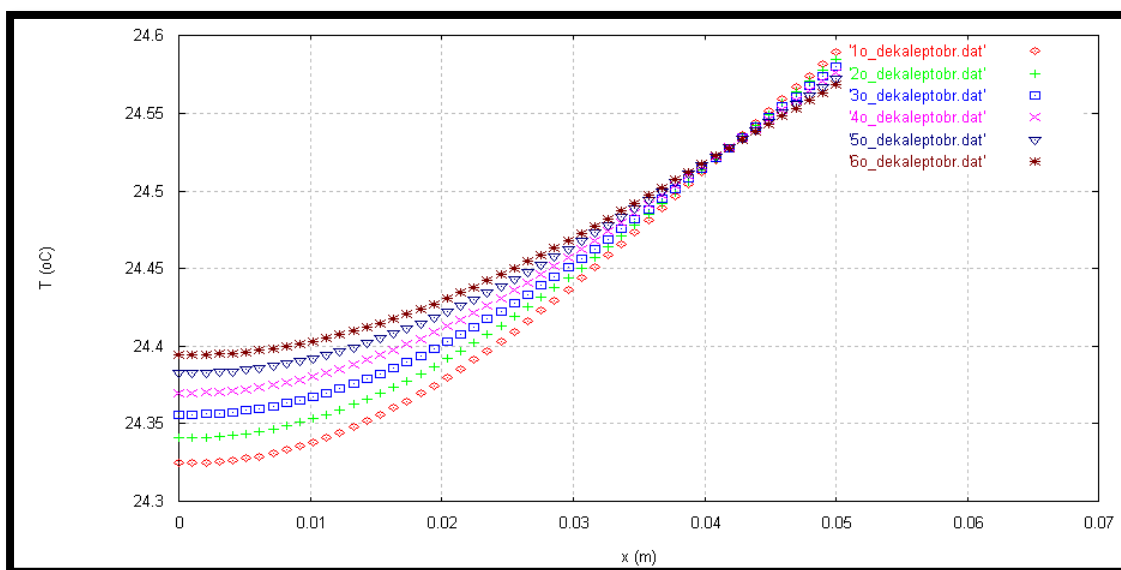
Εικόνα 18.4.66 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 16:00-17:00.



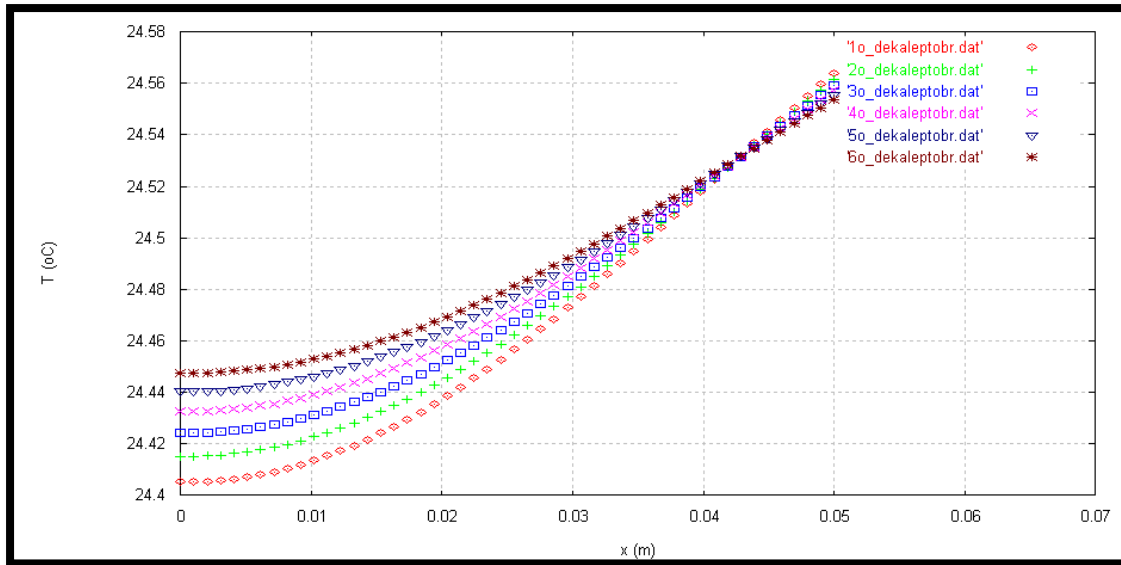
Εικόνα 18.4.67 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 17:00-18:00.



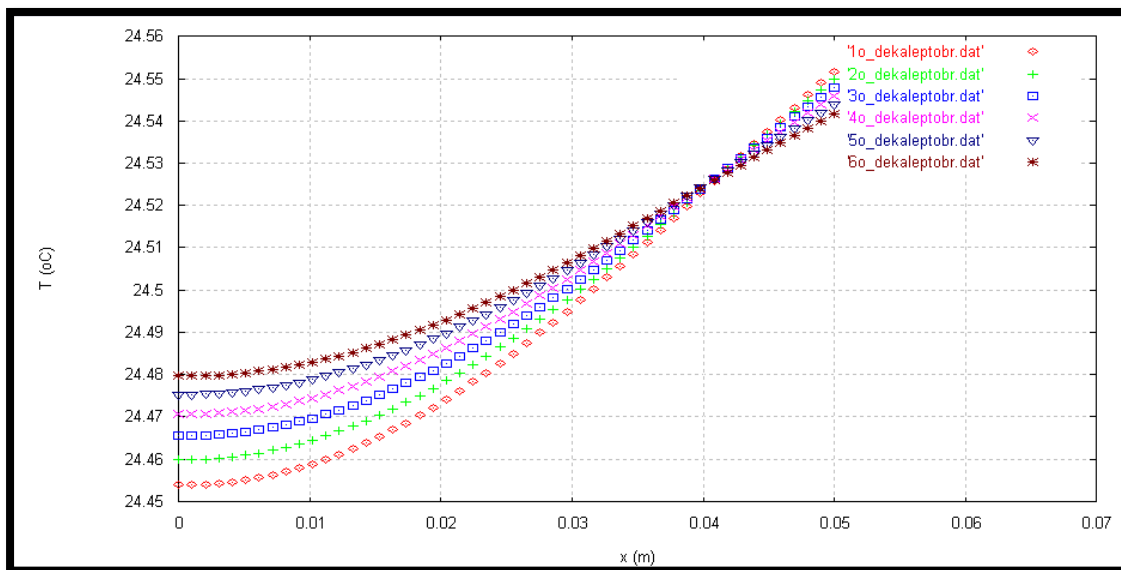
Εικόνα 18.4.68 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 18:00-19:00.



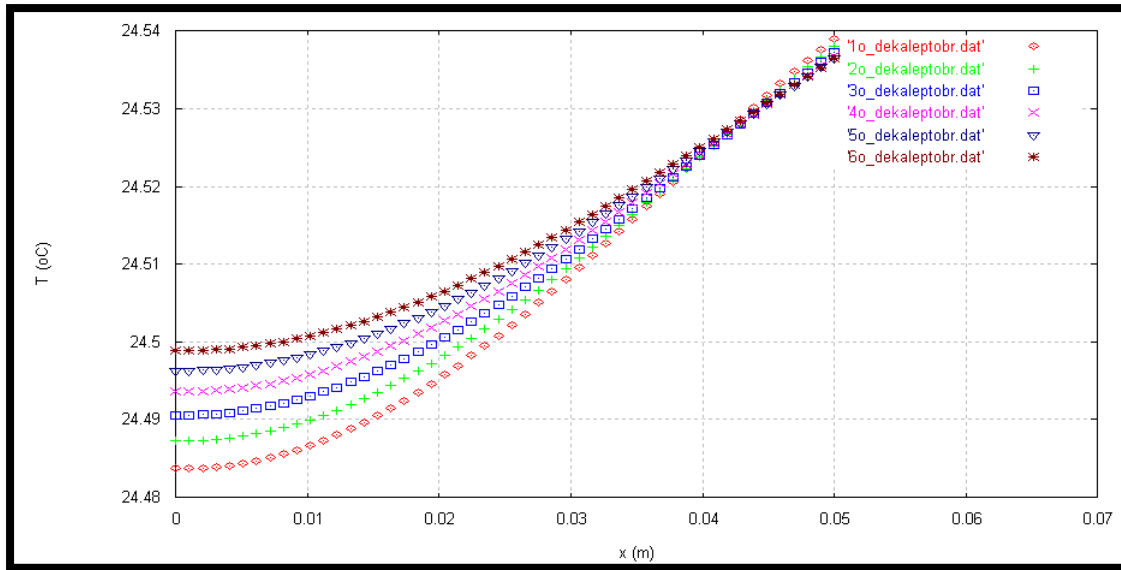
Εικόνα 18.4.69 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 19:00-20:00.



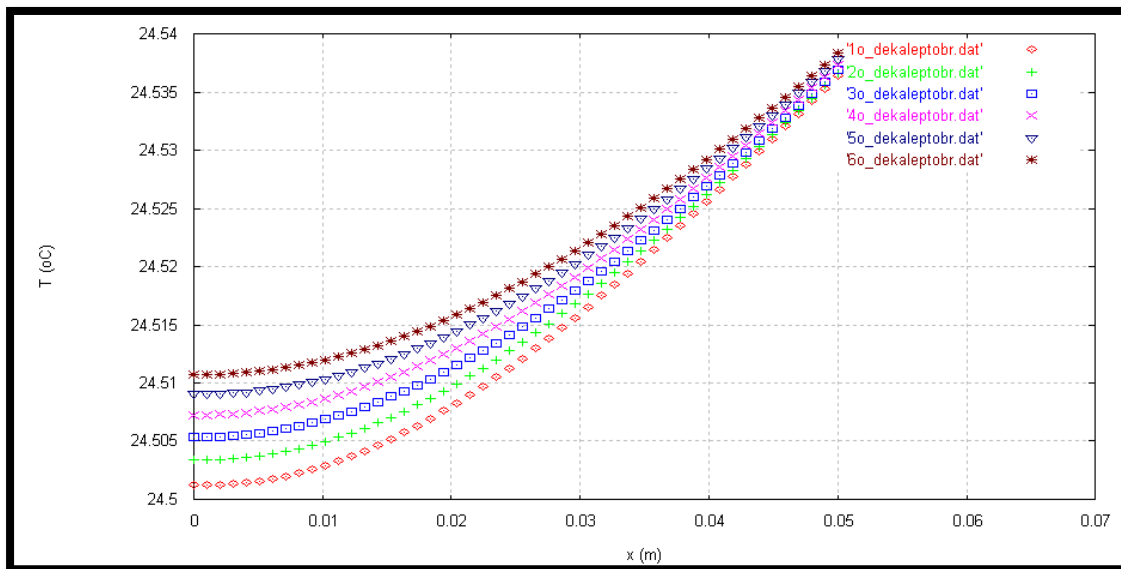
Εικόνα 18.4.70 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 20:00-21:00.



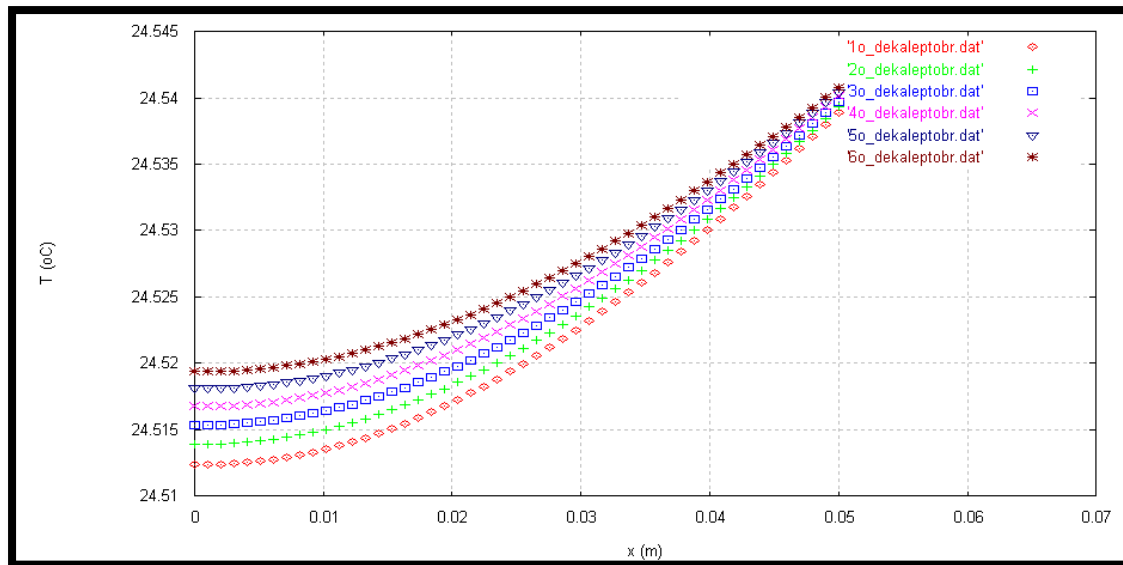
Εικόνα 18.4.71 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 21:00-22:00.



Εικόνα 18.4.72 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 22:00-23:00.

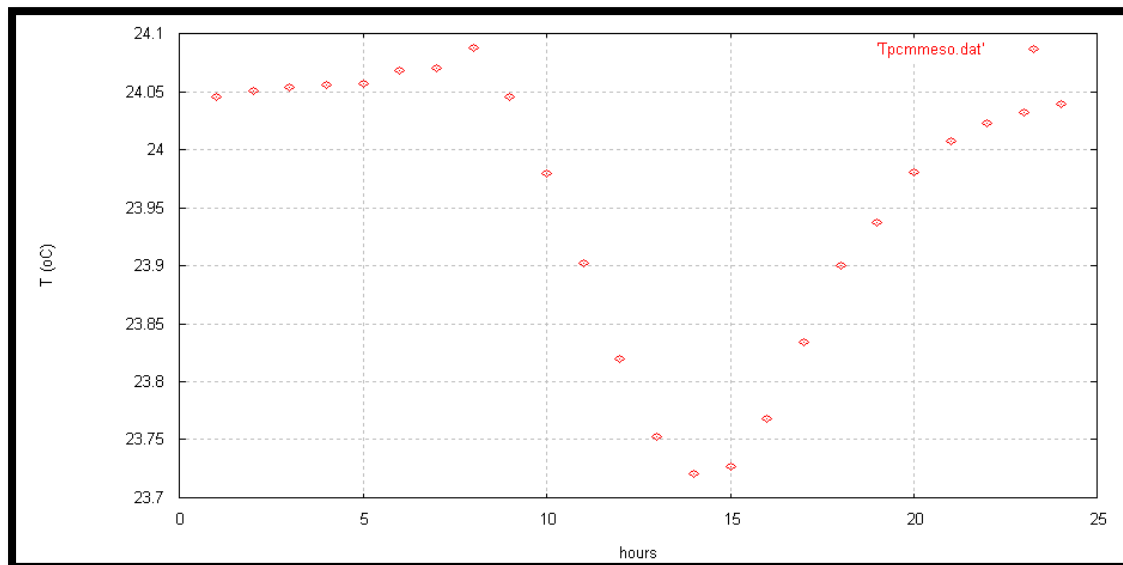


Εικόνα 18.4.73 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 23:00-24:00.



Εικόνα 18.4.74 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Αυγούστου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 24:00-01:00.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή της μέσης θερμοκρασίας των κόμβων του PCM την 21^η ημέρα του Αυγούστου.



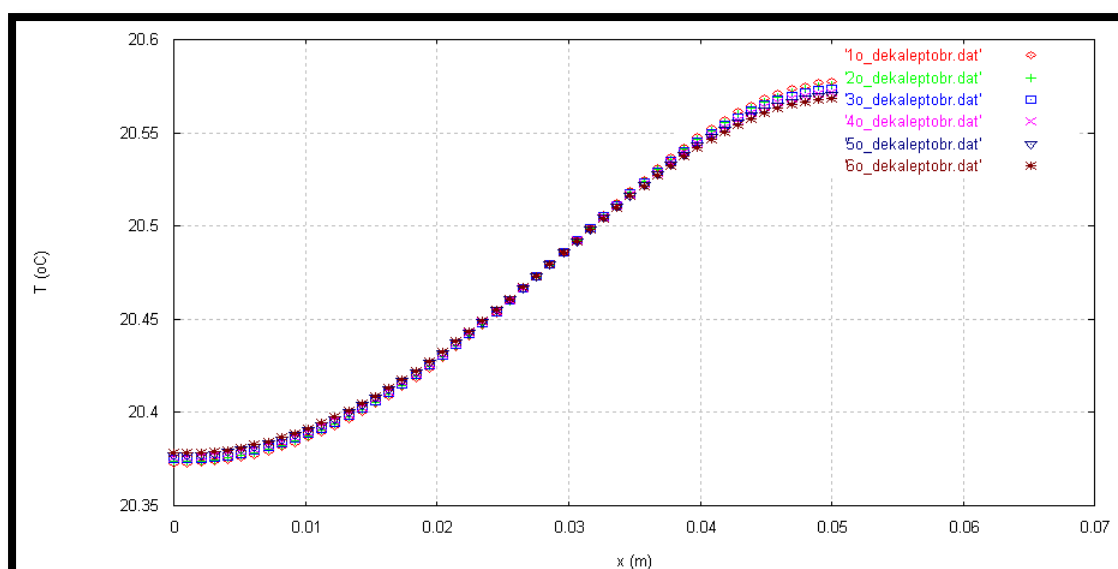
Εικόνα 18.4.75 Κατανομή της μέσης θερμοκρασίας των κόμβων του PCM την 21^η Αυγούστου.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του PCM κοντά στη μόνωση αυξάνεται από τη 01:00 έως τις 07:00, μειώνεται από τις 08:00 έως τις 15:00 και αυξάνεται εκ νέου από τις 16:00 έως τις 24:00. Η θερμοκρασία του PCM στην πλευρά του δωματίου, στον τελευταίο κόμβο του PCM, μειώνεται από τη 01:00 έως τις 04:00, αυξάνεται από τις 05:00 έως τις 16:00 και μειώνεται από 17:00 έως τις 24:00. Επίσης,

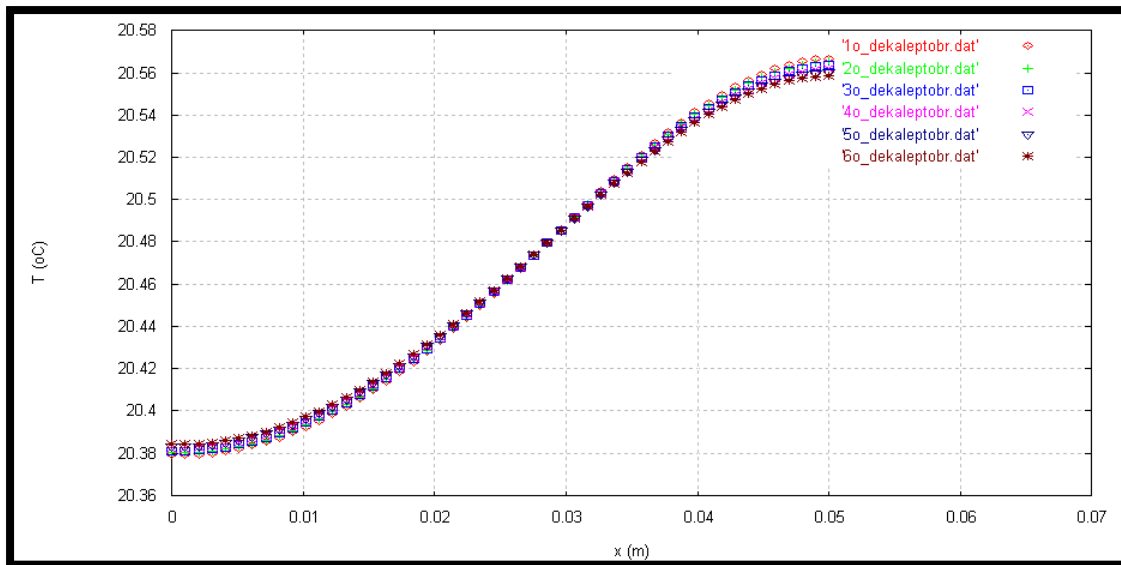
οι θερμοκρασίες του PCM κοντά στη μόνωση διαφέρουν λίγο από το ένα δεκάλεπτο στο άλλο, σε αντίθεση με τις θερμοκρασίες του PCM κοντά στο δωμάτιο οι οποίες συμπίπτουν. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί εάν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η μόνωση λειτουργεί σαν αδιαβατικό όριο. Τέλος, παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του PCM στο ίδιο χρονικό βήμα είναι μικρότερη κοντά στη μόνωση και μεγαλύτερη κοντά στο δωμάτιο, το οποίο είναι και το αναμενόμενο.

Στην Εικόνα 18.4.75 παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασία έχει μία μικρή άνοδο από τη 01:00 έως τις 08:00, ενώ μόλις αρχίσει η ηλιοφάνεια (07:00) η μέση θερμοκρασία παρουσιάζει μεγάλη πτώση έως τις 14:00. Στη συνέχεια αυξάνεται πάλι έως ότου φτάσει τη θερμοκρασία που είχε στη 01:00. Επίσης, η μέση θερμοκρασία του PCM κυμαίνεται από τους 23.7 έως τους 24.1 °C, ενώ η εσωτερική θερμοκρασία του χώρου για το μήνα Ιούλιο κυμαίνεται από τους 24.8 έως τους 31.9 °C. Είναι αναμενόμενο η θερμοκρασία του PCM να είναι μικρότερη από εκείνη του εσωτερικού χώρου, γιατί έτσι μόνο έχουμε θερμορροή από το χώρο στο πάνελ του PCM, δηλαδή επιτυγχάνεται η ψύξη του χώρου. Τέλος, όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, οι εσωτερική θερμοκρασία την 21^η ημέρα του Αυγούστου είναι αρκετά υψηλή σε σχέση με τους άλλους τρεις μήνες που διεξάγεται η μελέτη, μιας και το PCM παραμένει στην υγρή φάση και έτσι δε γίνεται εκμετάλλευση της ιδιότητας αλλαγής φάσης του υλικού.

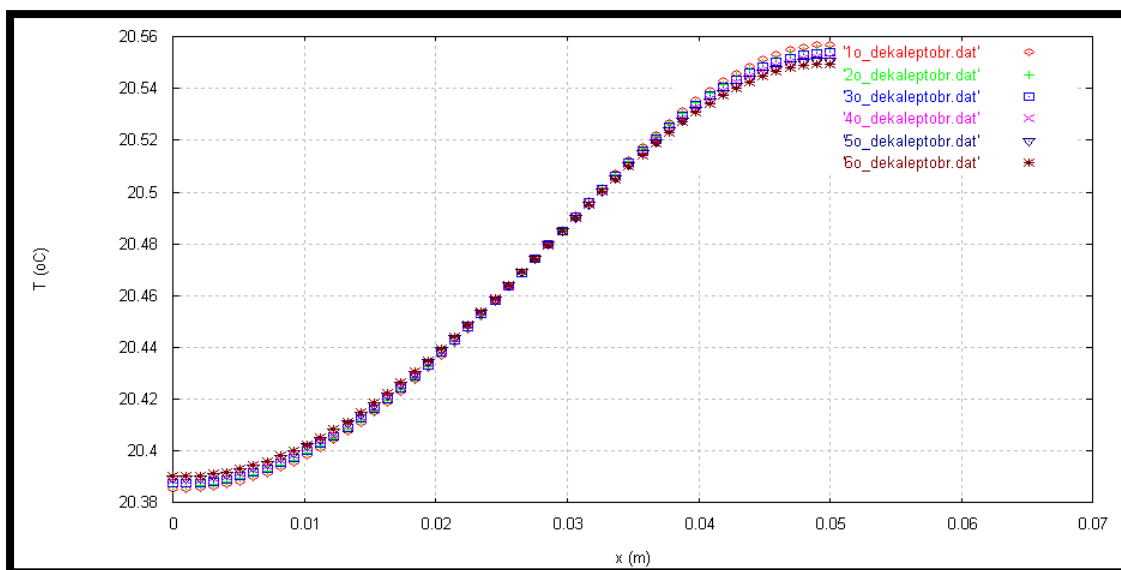
■ Μήνας Σεπτέμβριος



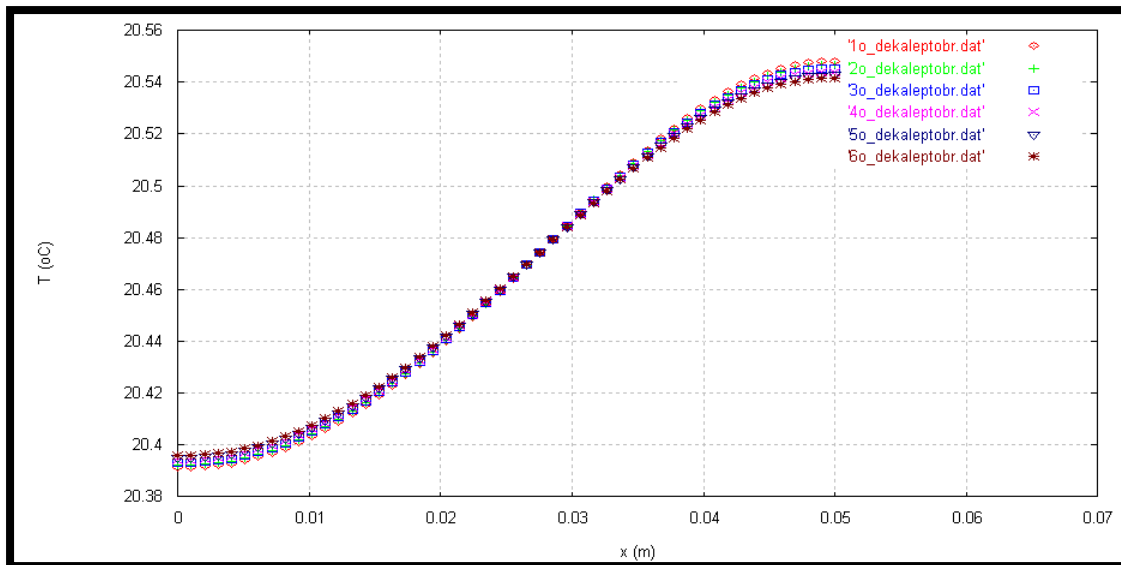
Εικόνα 18.4.76 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 01:00-02:00.



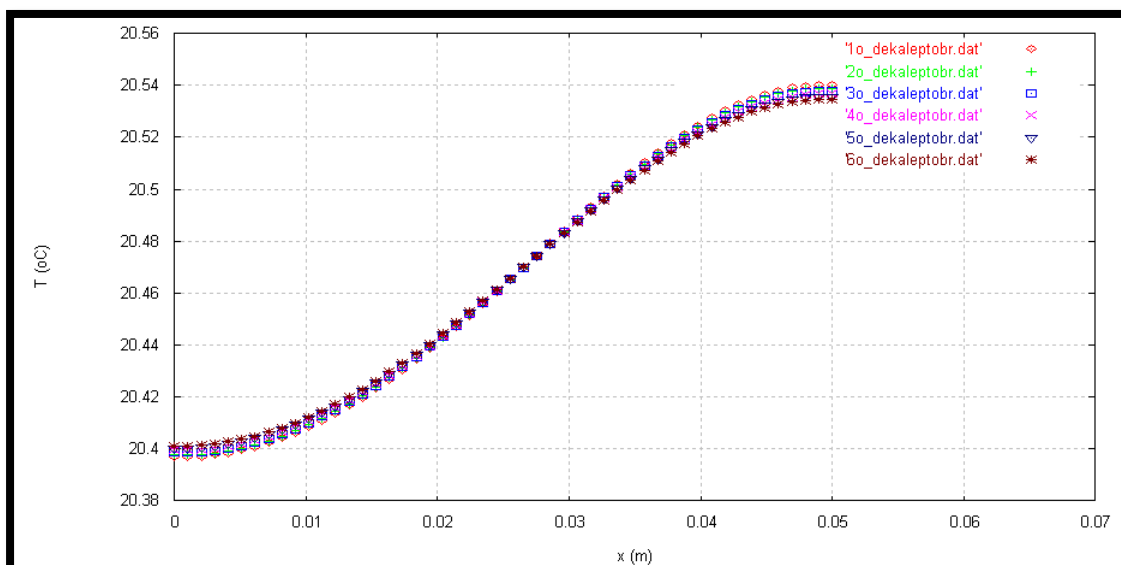
Εικόνα 18.4.77 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 02:00-03:00.



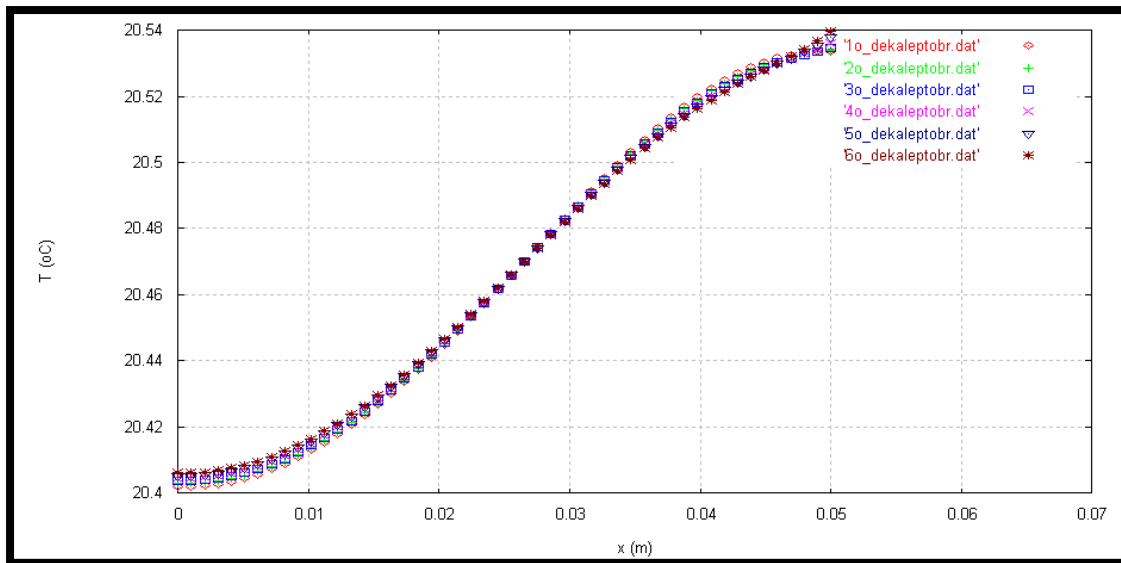
Εικόνα 18.4.78 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 03:00-04:00.



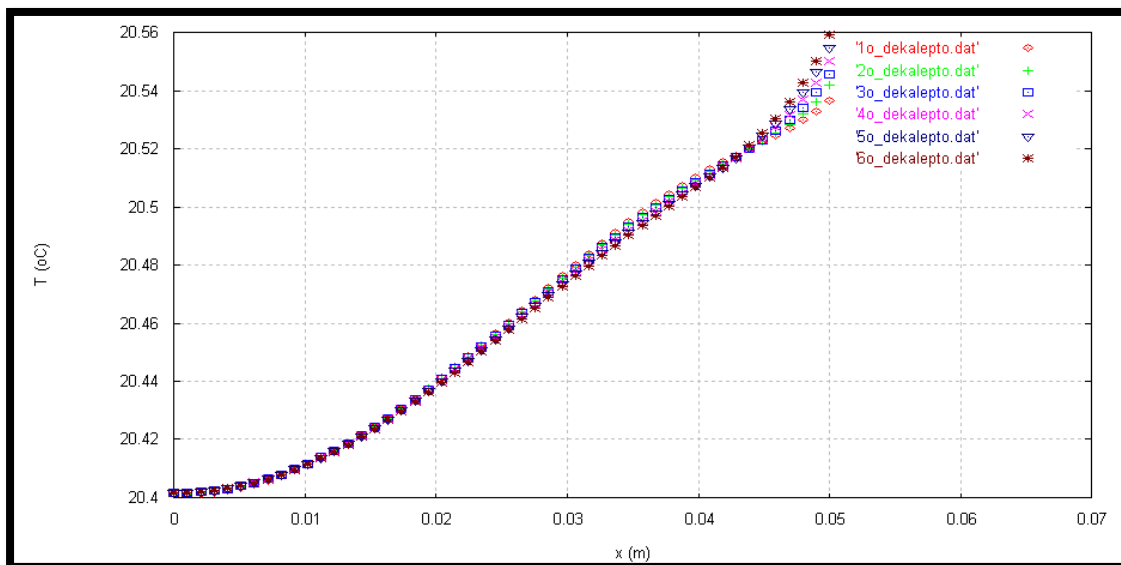
Εικόνα 18.4.79 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 04:00-05:00.



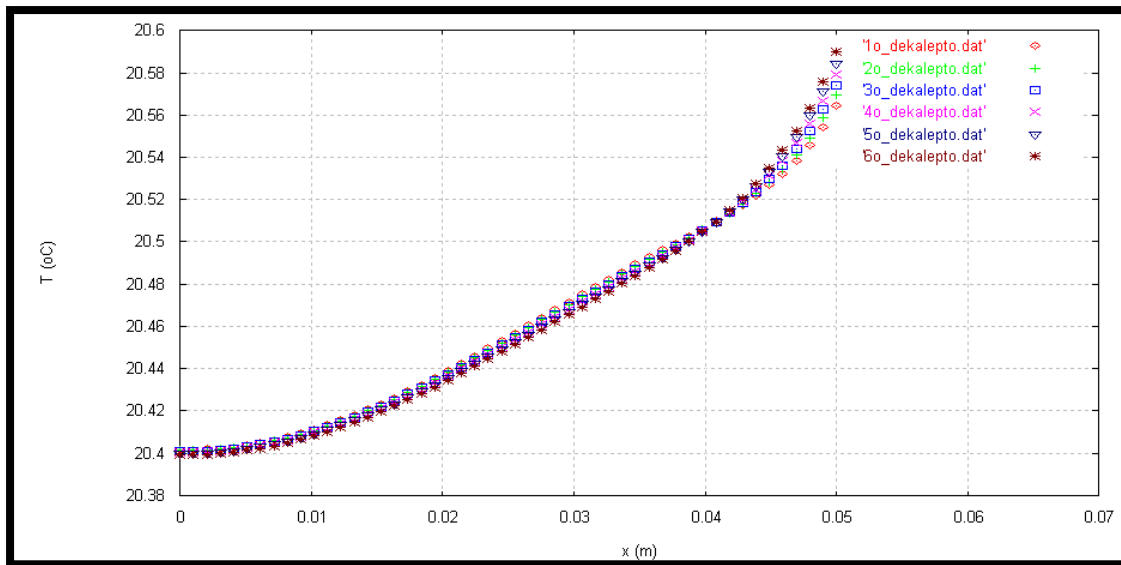
Εικόνα 18.4.80 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 05:00-06:00.



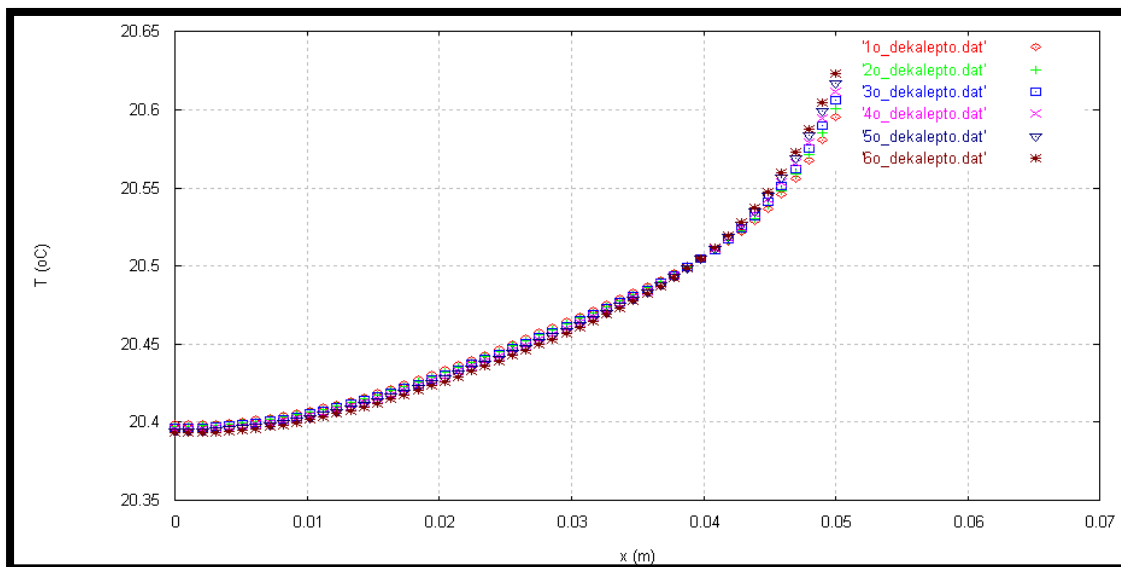
Εικόνα 18.4.81 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 06:00-07:00.



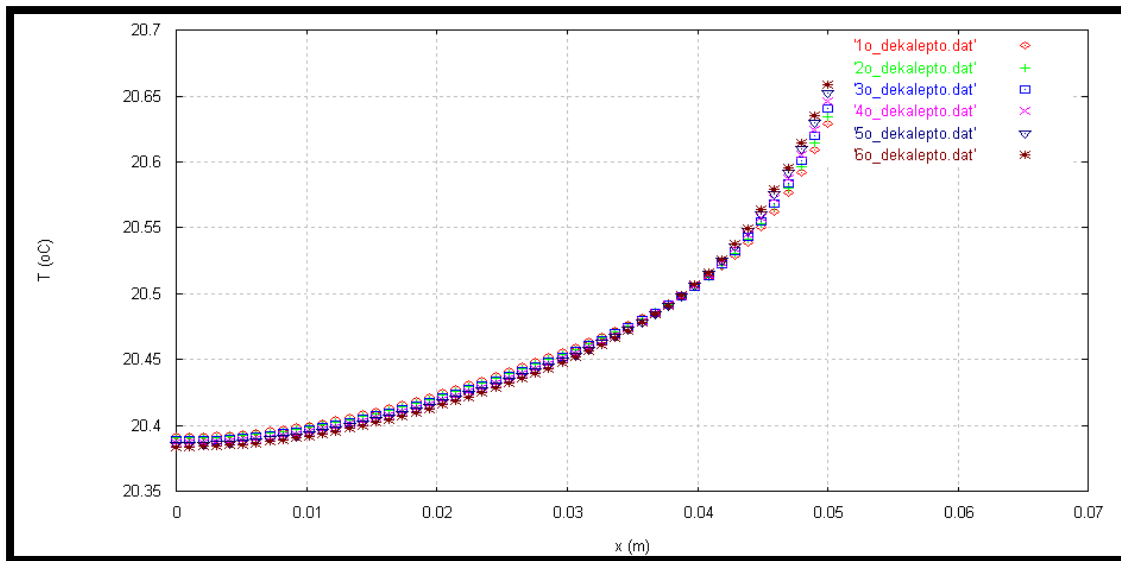
Εικόνα 18.4.82 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 07:00-08:00.



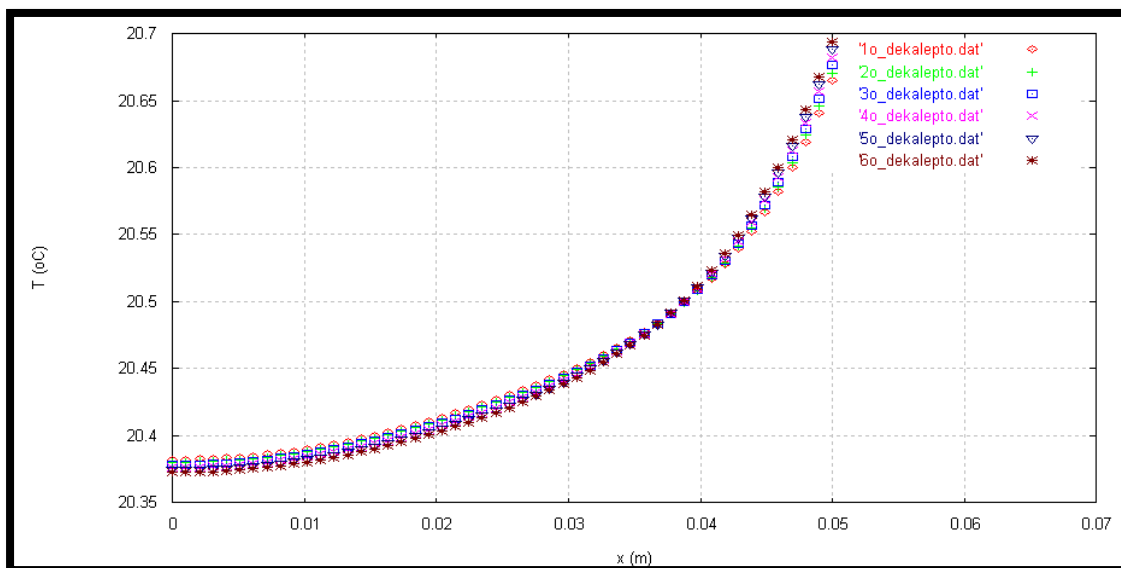
Εικόνα 18.4.83 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 08:00-09:00.



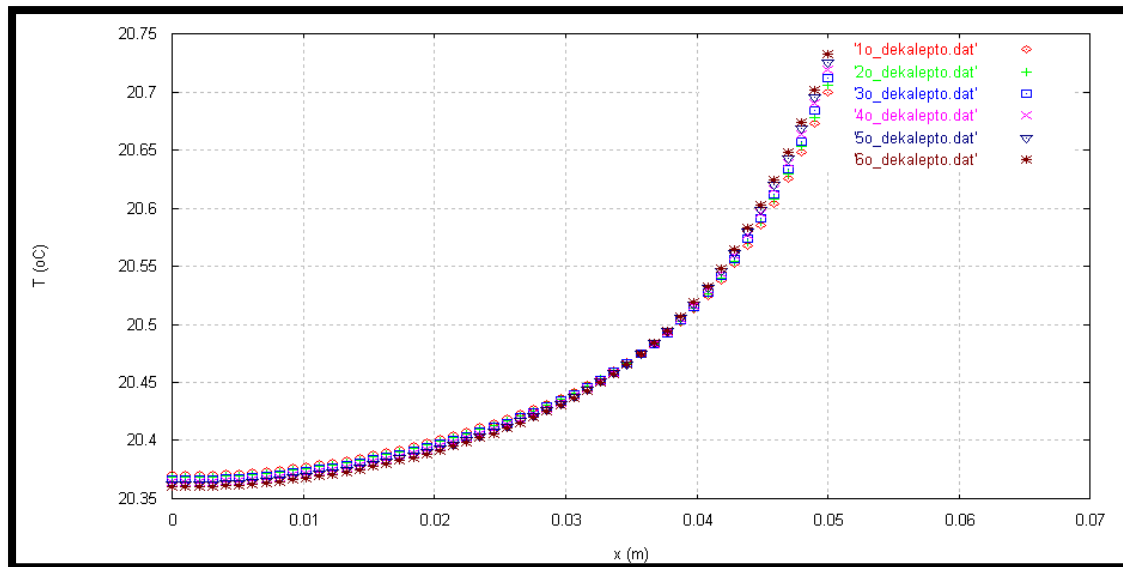
Εικόνα 18.4.84 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 09:00-10:00.



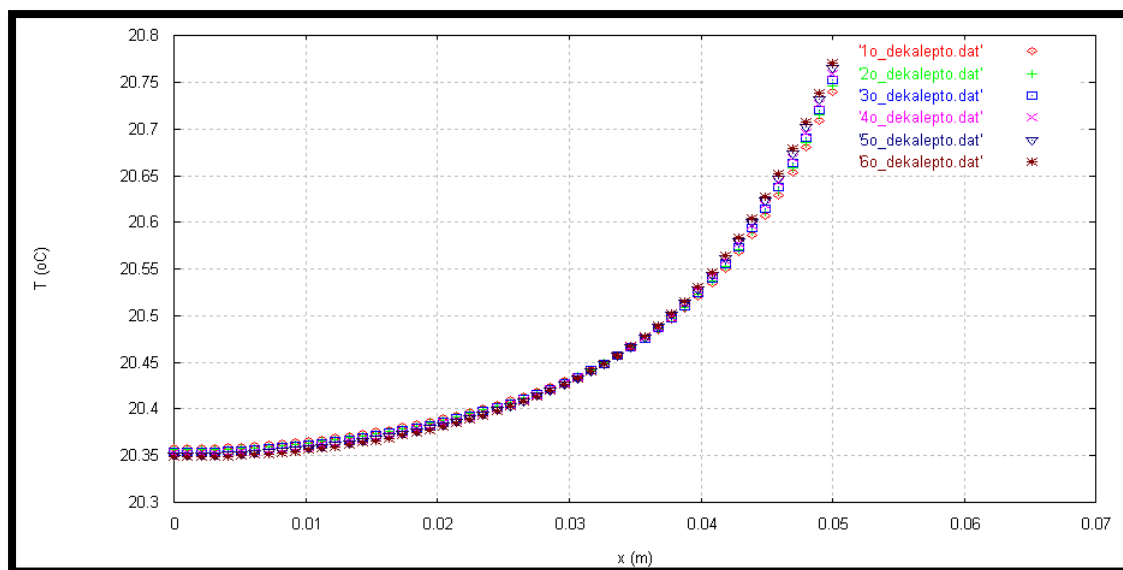
Εικόνα 18.4.85 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 10:00-11:00.



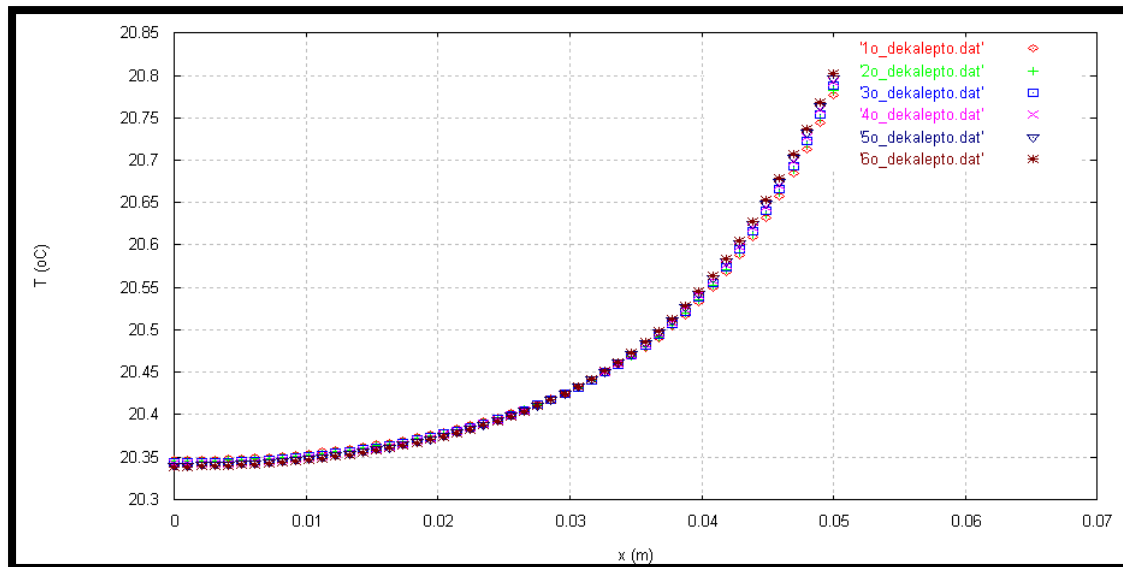
Εικόνα 18.4.86 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 11:00-12:00.



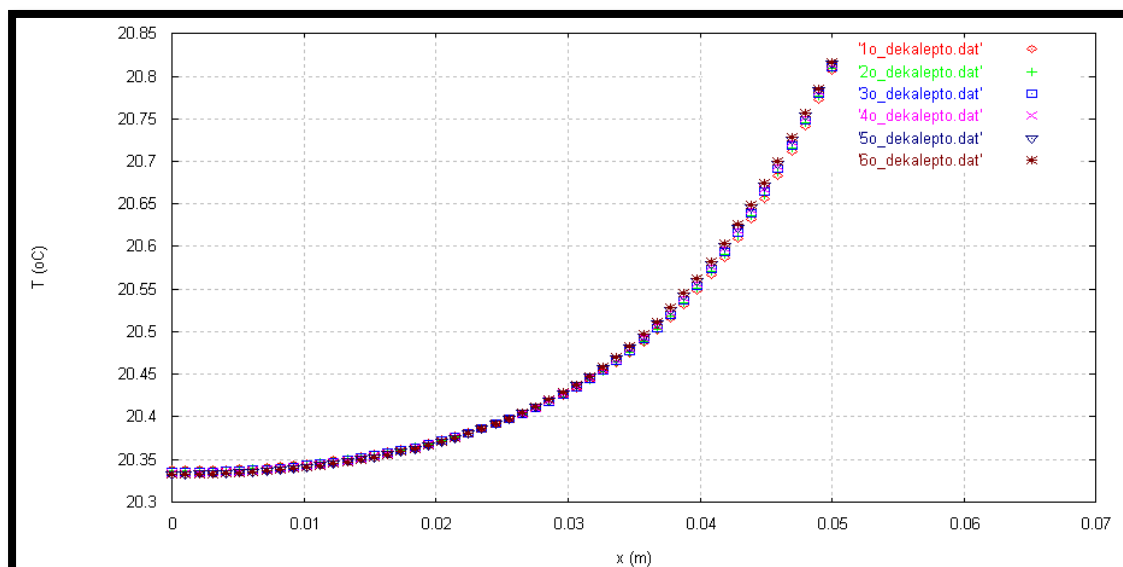
Εικόνα 18.4.87 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 12:00-13:00.



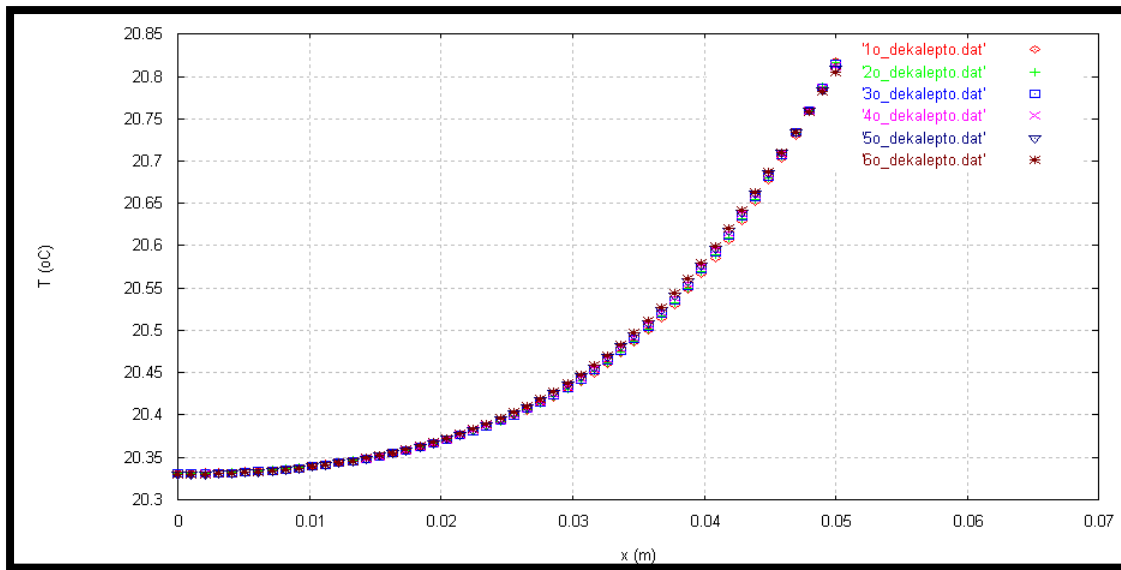
Εικόνα 18.4.88 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 13:00-14:00.



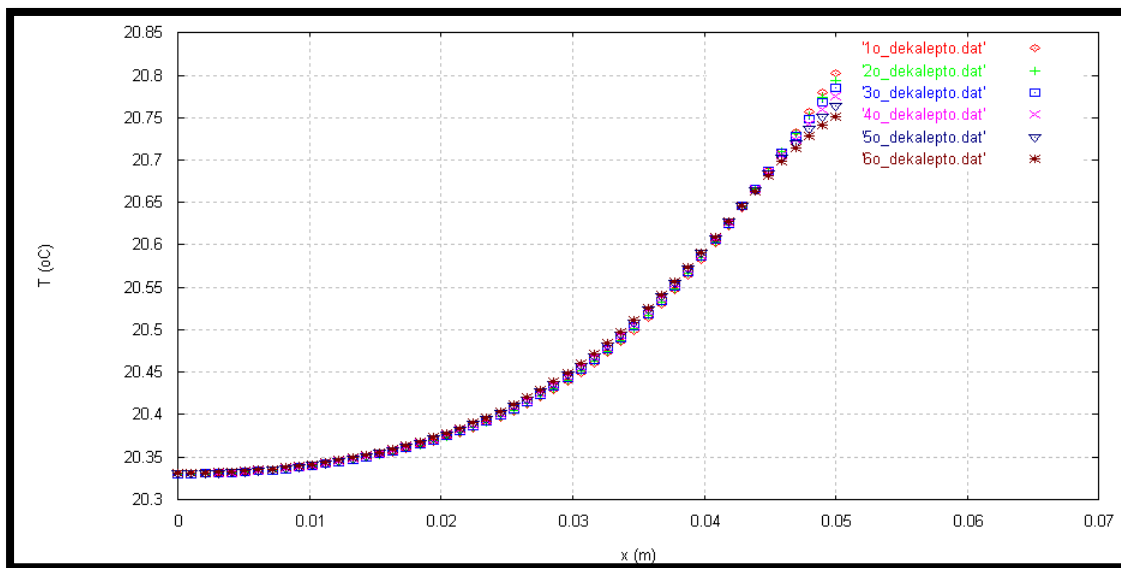
Εικόνα 18.4.89 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 14:00-15:00.



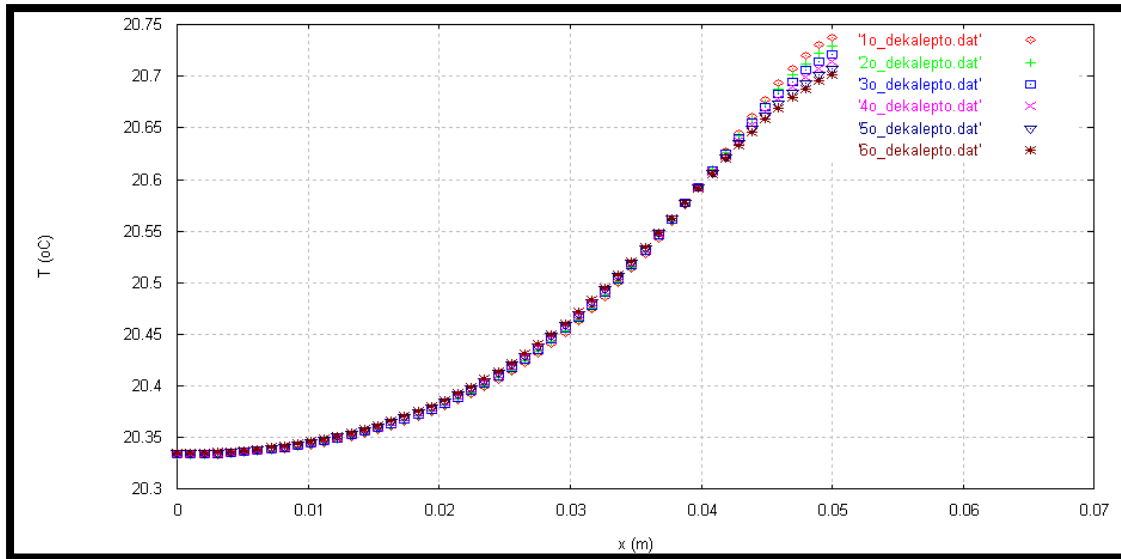
Εικόνα 18.4.90 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 15:00-16:00.



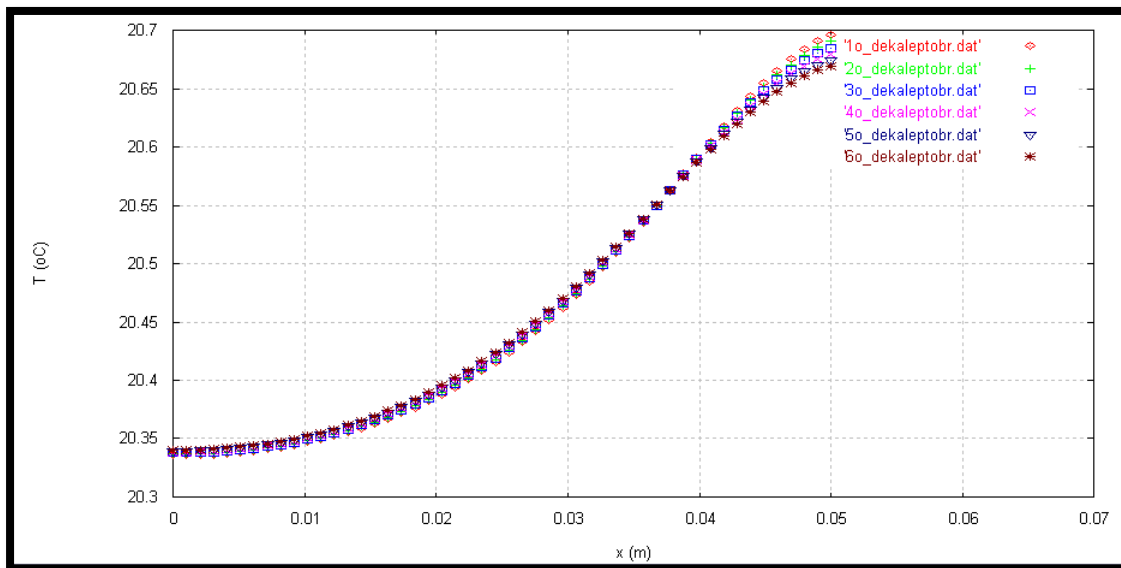
Εικόνα 18.4.91 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 16:00-17:00.



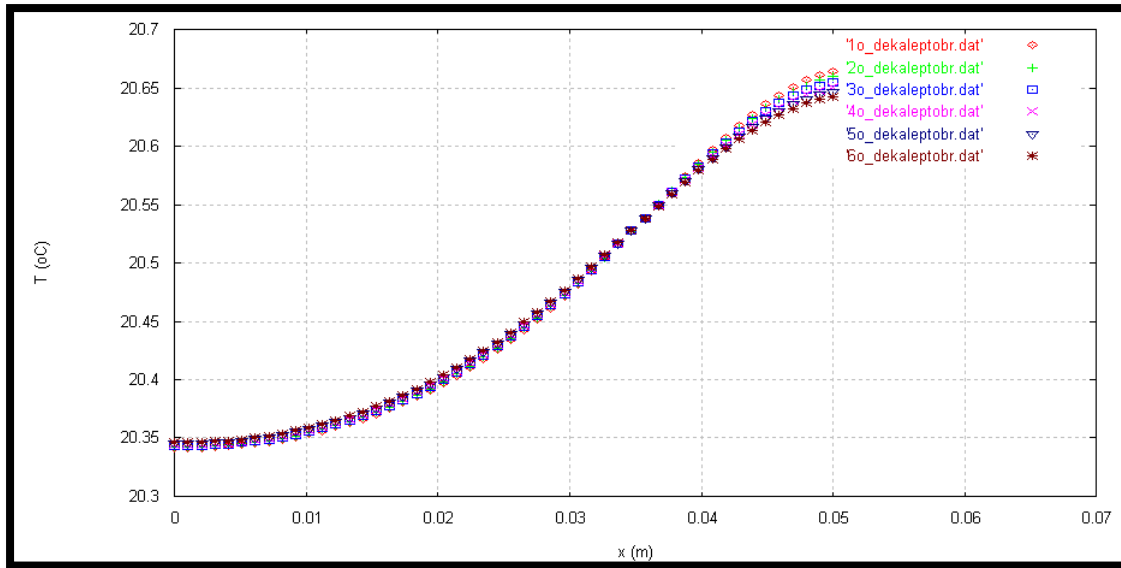
Εικόνα 18.4.92 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 17:00-18:00.



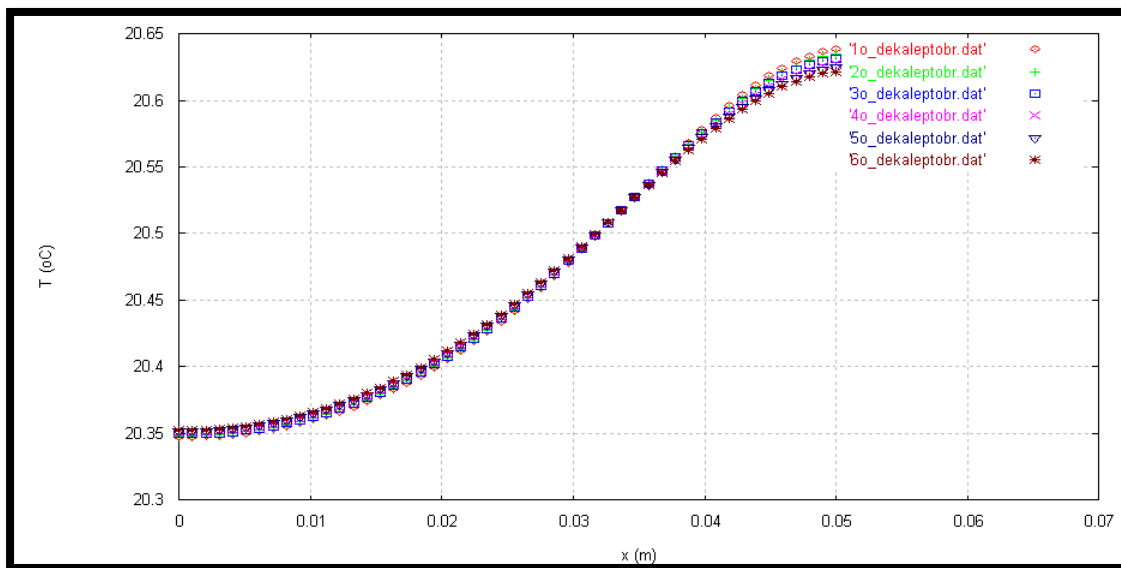
Εικόνα 18.4.93 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 18:00-19:00.



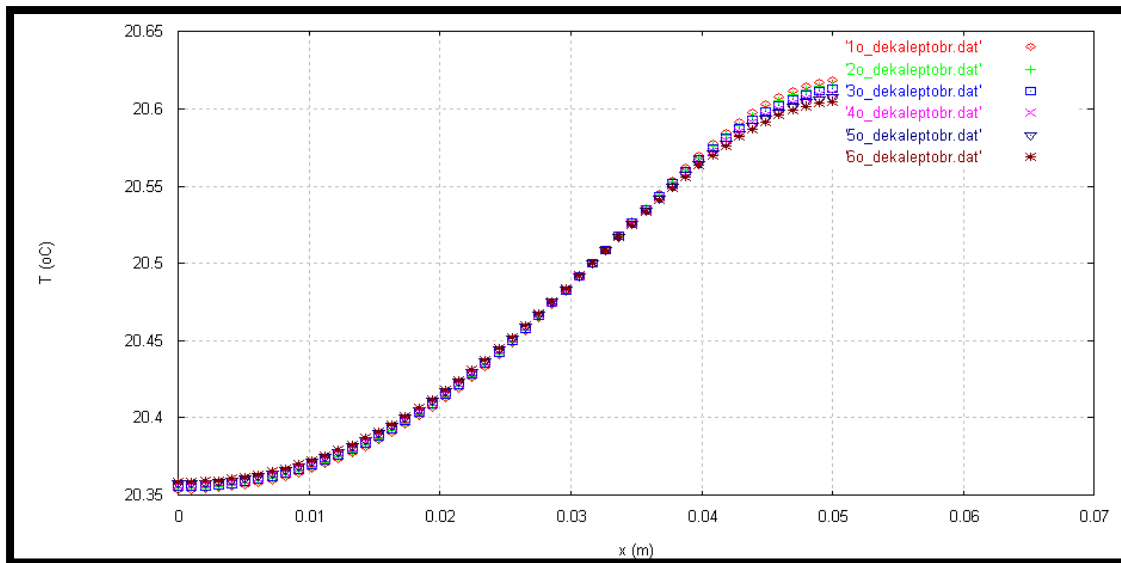
Εικόνα 18.4.94 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 19:00-20:00.



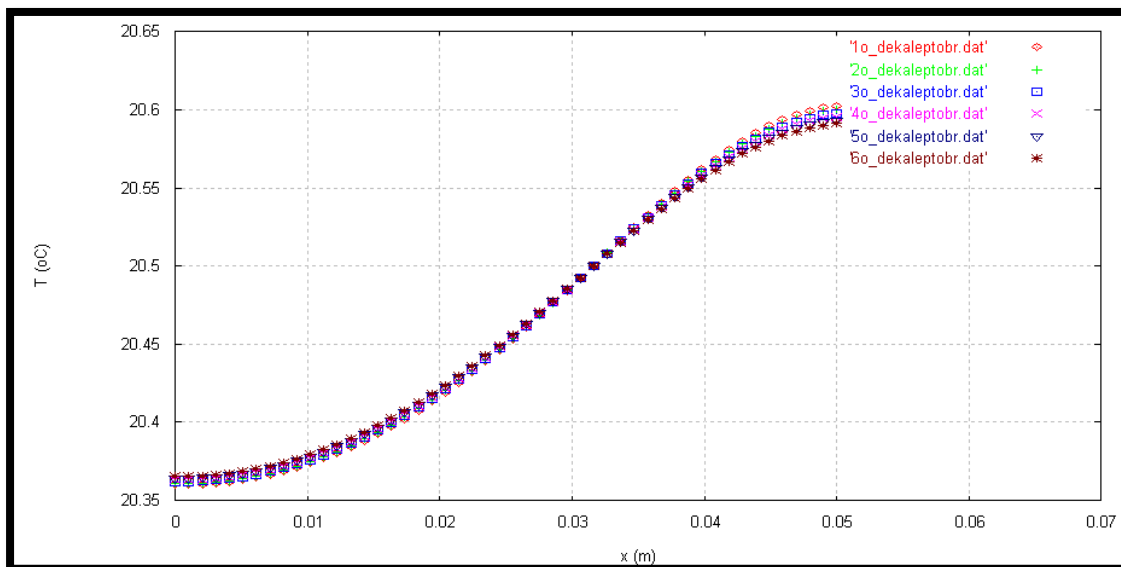
Εικόνα 18.4.95 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 20:00-21:00.



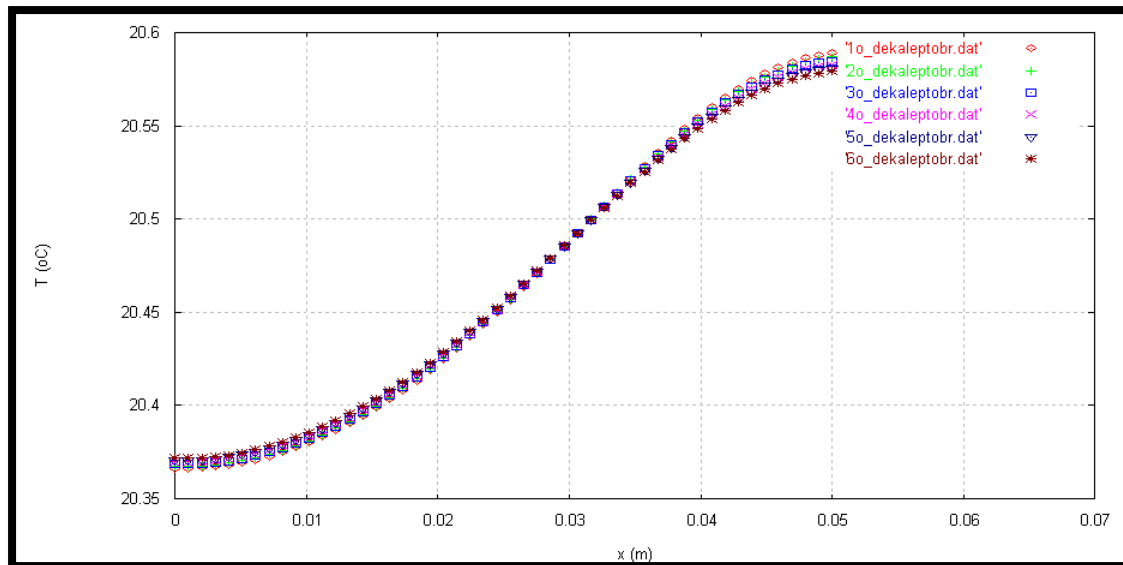
Εικόνα 18.4.96 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 21:00-22:00.



Εικόνα 18.4.97 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 22:00-23:00.

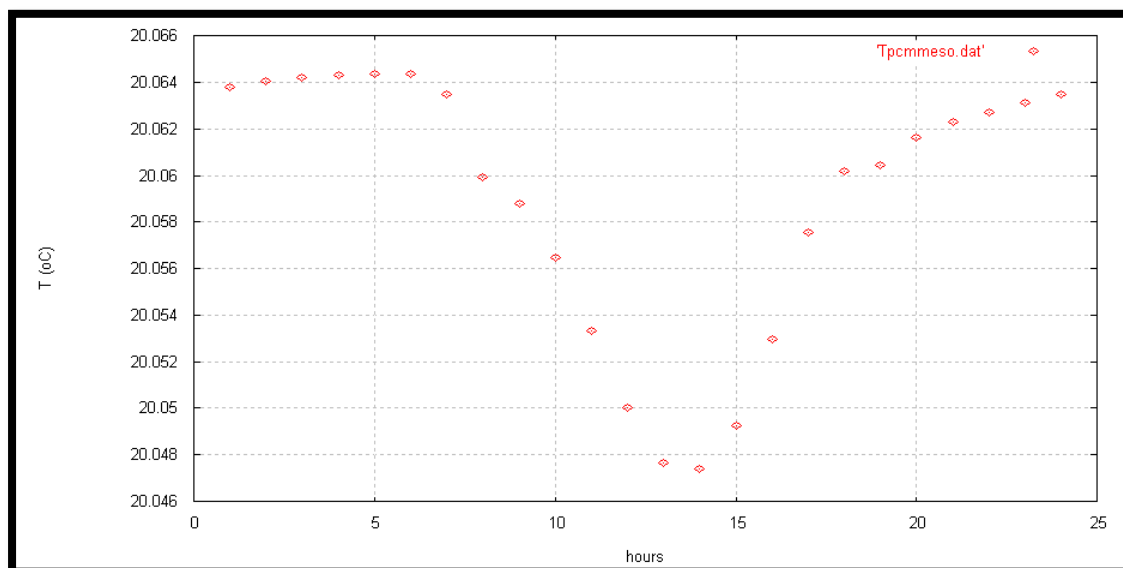


Εικόνα 18.4.98 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 23:00-24:00.



Εικόνα 18.4.99 Κατανομή της θερμοκρασίας στους 50 κόμβους του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου για κάθε δεκάλεπτο της ώρας 24:00-01:00.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η κατανομή της μέσης θερμοκρασίας των κόμβων του PCM την 21^η ημέρα του Σεπτεμβρίου.



Εικόνα 18.4.100 Κατανομή της μέσης θερμοκρασίας των κόμβων του PCM την 21^η Σεπτεμβρίου.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του PCM κοντά στη μόνωση αυξάνεται από τη 01:00 έως τις 09:00, μειώνεται από τις 10:00 έως τις 19:00 και αυξάνεται εκ νέου από τις 20:00 έως τις 24:00. Η θερμοκρασία του PCM στην πλευρά του δωματίου, στον τελευταίο κόμβο του PCM, μειώνεται από τη 01:00 έως τις

05:00, αυξάνεται από τις 06:00 έως τις 16:00 και μειώνεται από τις 17:00 έως τις 24:00. Επίσης, οι θερμοκρασίες του PCM κοντά στη μόνωση διαφέρουν λίγο από το ένα δεκάλεπτο στο άλλο, σε αντίθεση με τις θερμοκρασίες του PCM κοντά στο δωμάτιο οι οποίες συμπίπτουν. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί εάν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η μόνωση λειτουργεί σαν αδιαβατικό όριο. Τέλος, παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του PCM στο ίδιο χρονικό βήμα είναι μικρότερη κοντά στη μόνωση και μεγαλύτερη κοντά στο δωμάτιο, το οποίο είναι και το αναμενόμενο.

Στην Εικόνα 18.4.100 παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασία έχει μία μικρή άνοδο από τη 01:00 έως τις 06:00, ενώ μόλις αρχίσει η ηλιοφάνεια (07:00) η μέση θερμοκρασία παρουσιάζει μεγάλη πτώση έως τις 14:00. Στη συνέχεια αυξάνεται πάλι έως ότου φτάσει τη θερμοκρασία που είχε στη 01:00. Επίσης, η μέση θερμοκρασία του PCM κυμαίνεται από τους 20.047 έως τους 20.065 °C, ενώ η εσωτερική θερμοκρασία του χώρου για το μήνα Ιούλιο κυμαίνεται από τους 20.5 έως τους 27.8 °C. Είναι αναμενόμενο η θερμοκρασία του PCM να είναι μικρότερη από εκείνη του εσωτερικού χώρου, γιατί έτσι μόνο έχουμε θερμοροή από το χώρο στο πάνελ του PCM, δηλαδή επιτυγχάνεται η ψύξη του χώρου.

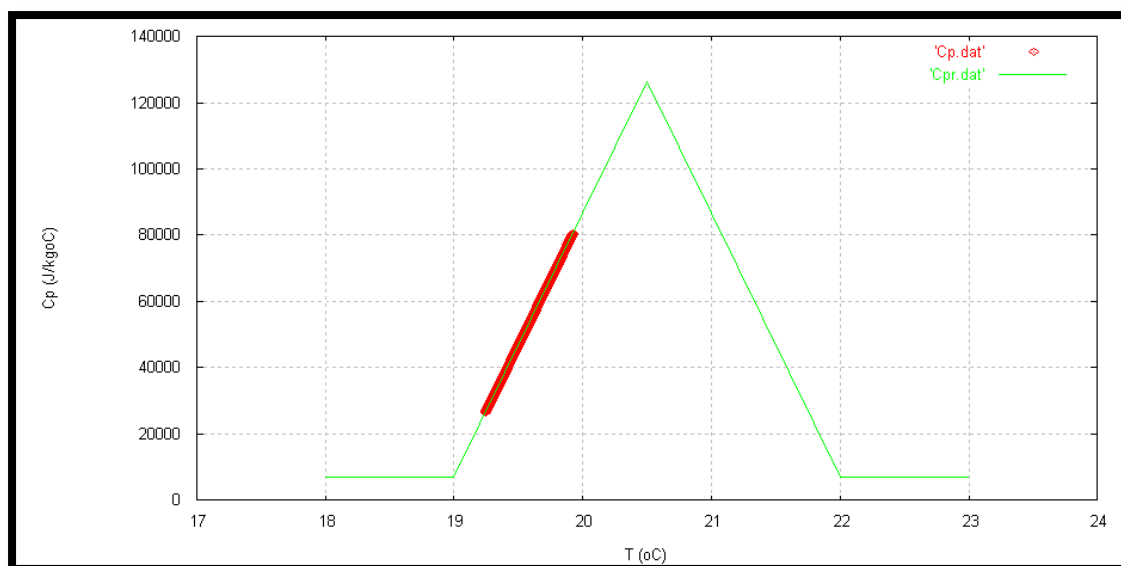
Κεφάλαιο 19

Παραμετρικές μελέτες

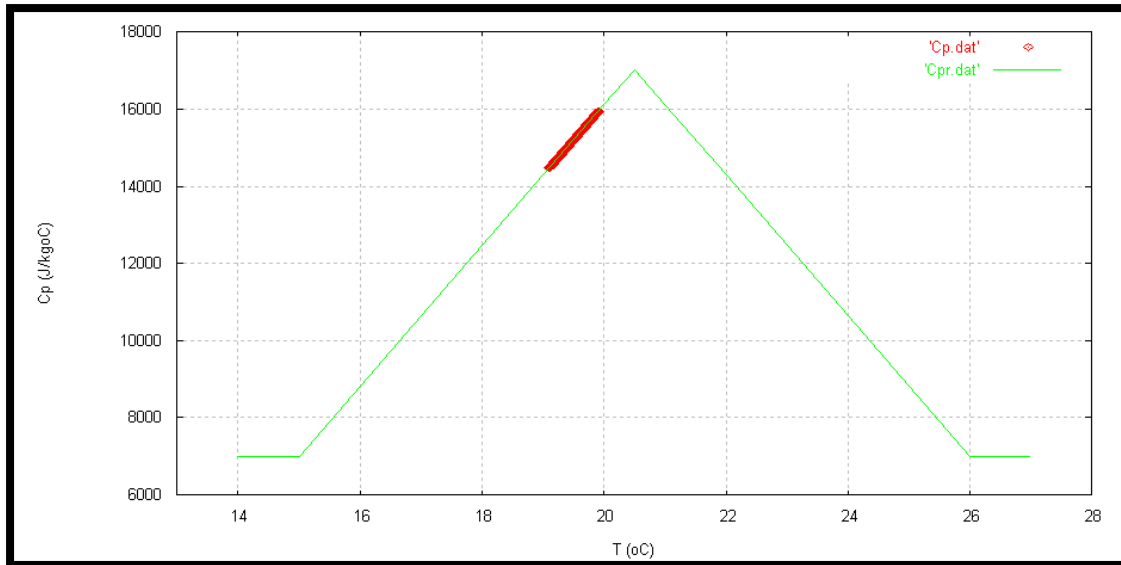
19.1 Παραμετρική διερεύνηση επιλογής PCM

Στην πρώτη παραμετρική διερεύνηση εξετάζονται διάφορα PCMs ώστε να ελεγχθεί εάν κάποιο δίνει καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στην εσωτερική θερμοκρασία του χώρου και το κατά πόσο αξιοποιείται η ιδιότητα αλλαγής φάσης του PCM. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκε ένα ακόμη PCM, το οποίο έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C. Για την επιλογή του PCM με τη βέλτιστη απόδοση συγκρίνονται για κάθε μήνα ξεχωριστά τα διαγράμματα C_p-T_{PCM} καθώς και τα διαγράμματα T_{in} -hours για τα δύο υλικά αλλαγής φάσης που μελετήθηκαν. Με τον τρόπο αυτό επιλέγεται το βέλτιστο PCM για κάθε μήνα αλλά και το καταλληλότερο PCM για τους τέσσερις μήνες συνολικά. Τα διαγράμματα αυτά παρατίθενται παρακάτω μαζί με ένα συγκριτικό διάγραμμα για τις εσωτερικές θερμοκρασίες του χώρου για τα δύο PCMs για κάθε μήνα.

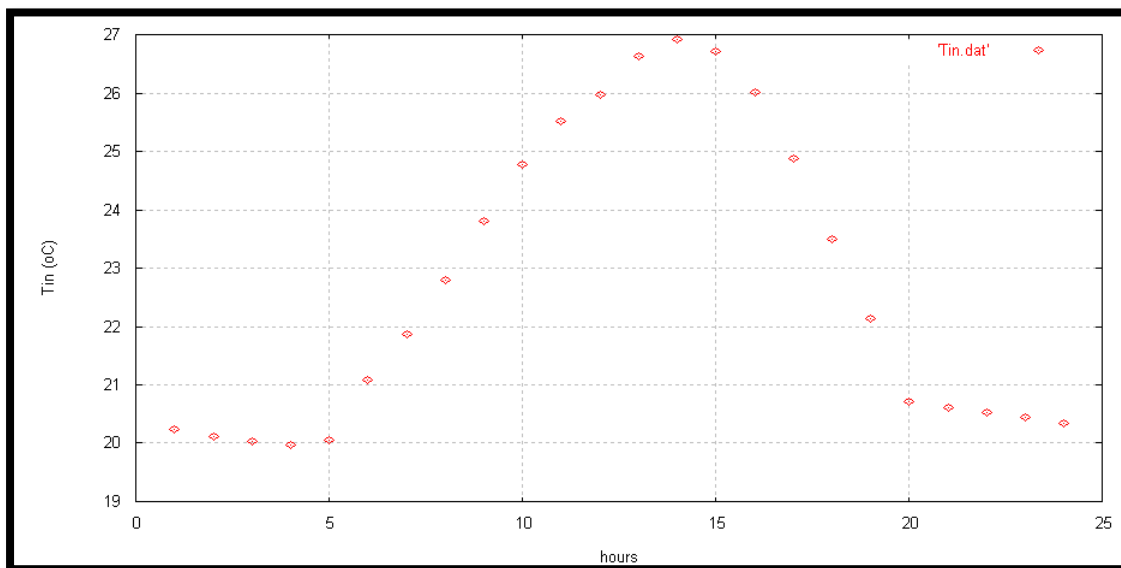
▪ Μήνας Ιούνιος



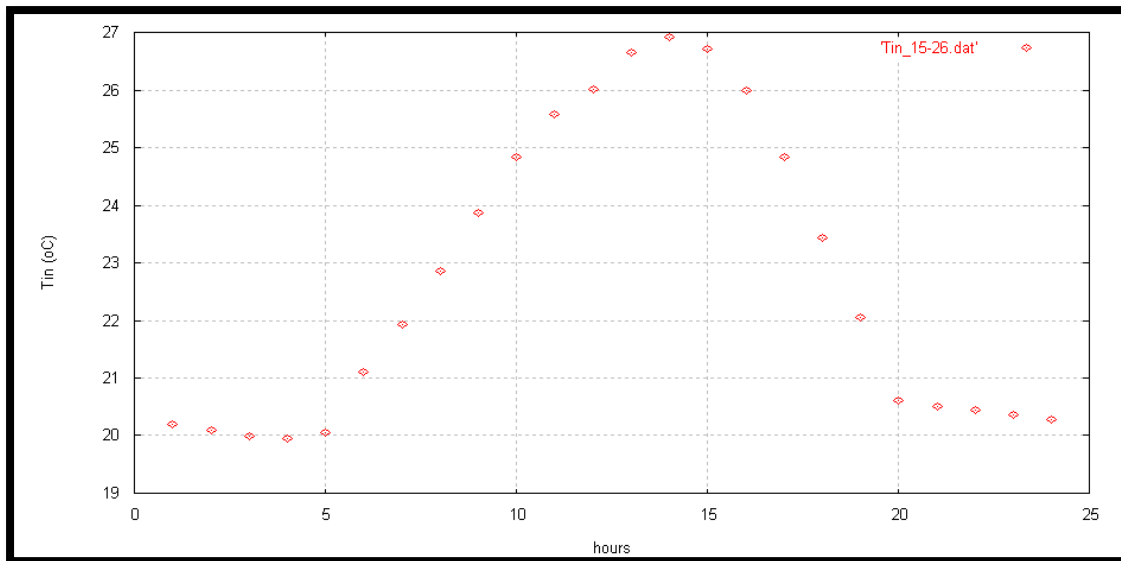
Εικόνα 19.1.1 Θερμοχωρητικότητα του PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C.



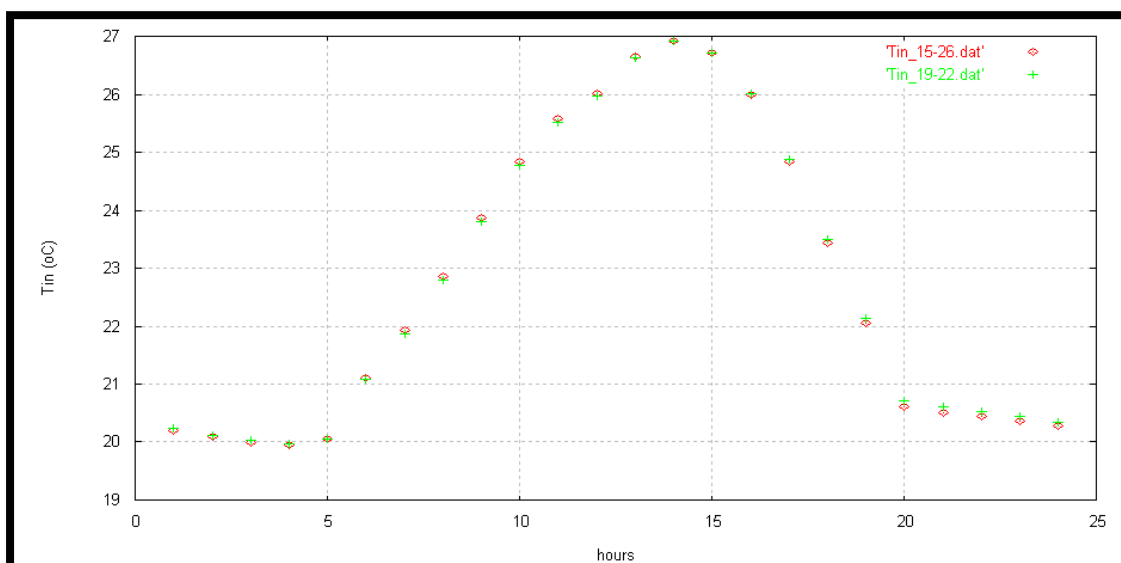
Εικόνα 19.1.2 Θερμοχωρητικότητα του PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C.



Εικόνα 19.1.3 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Ιουνίου χρησιμοποιώντας PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C.



Εικόνα 19.1.4 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Ιουνίου χρησιμοποιώντας PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C.

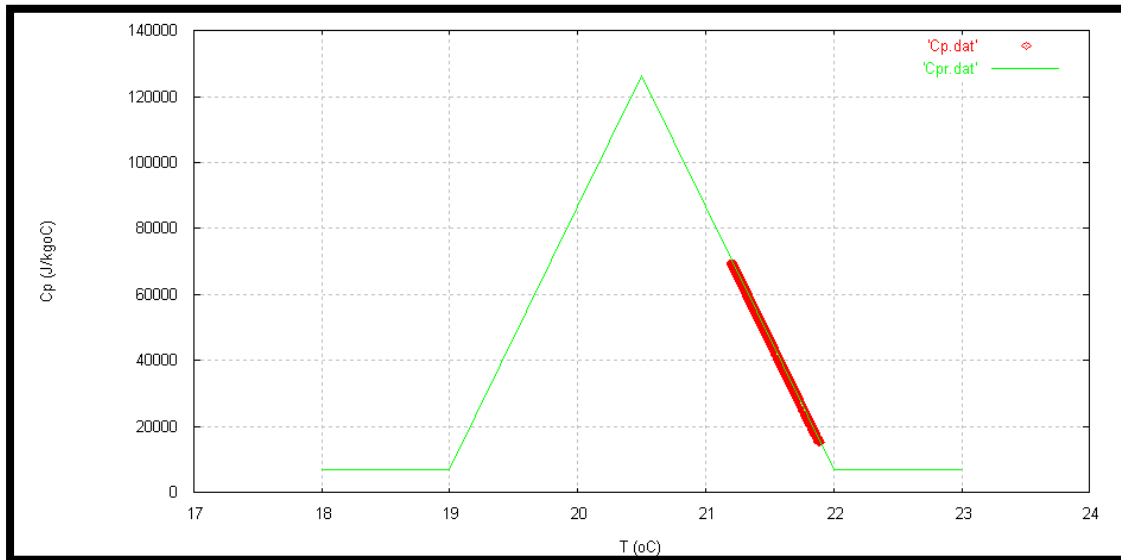


Εικόνα 19.1.5 Συγκριτικό διάγραμμα των εσωτερικών θερμοκρασιών του χώρου για τα δύο PCMs που μελετήθηκαν.

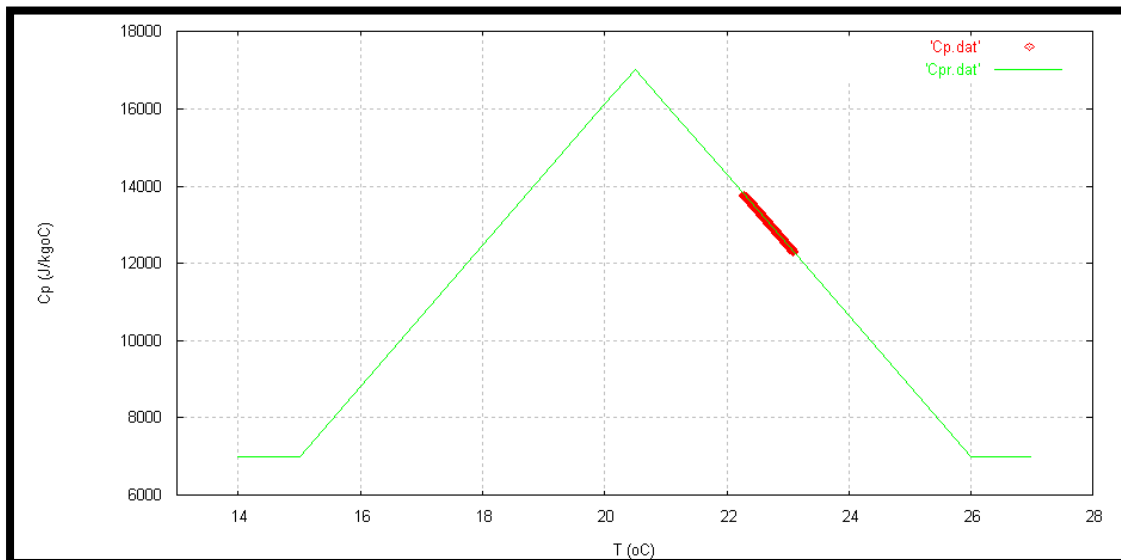
Εξετάζοντας τα διαγράμματα C_p-T_{PCM} παρατηρείται ότι το PCM που έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C καλύπτει μεγαλύτερο κομμάτι της διφασικής περιοχής από εκείνο που καλύπτει το PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C. Σύμφωνα με την Εικόνα 19.1.5 και τα δύο υλικά αλλαγής φάσης δίνουν

παρόμοιες τιμές εσωτερικής θερμοκρασίας. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τα διαγράμματα C_p-T_{PCM} , εξάγεται το συμπέρασμα ότι για το μήνα Ιούνιο είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί ένα PCM το οποίο έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C.

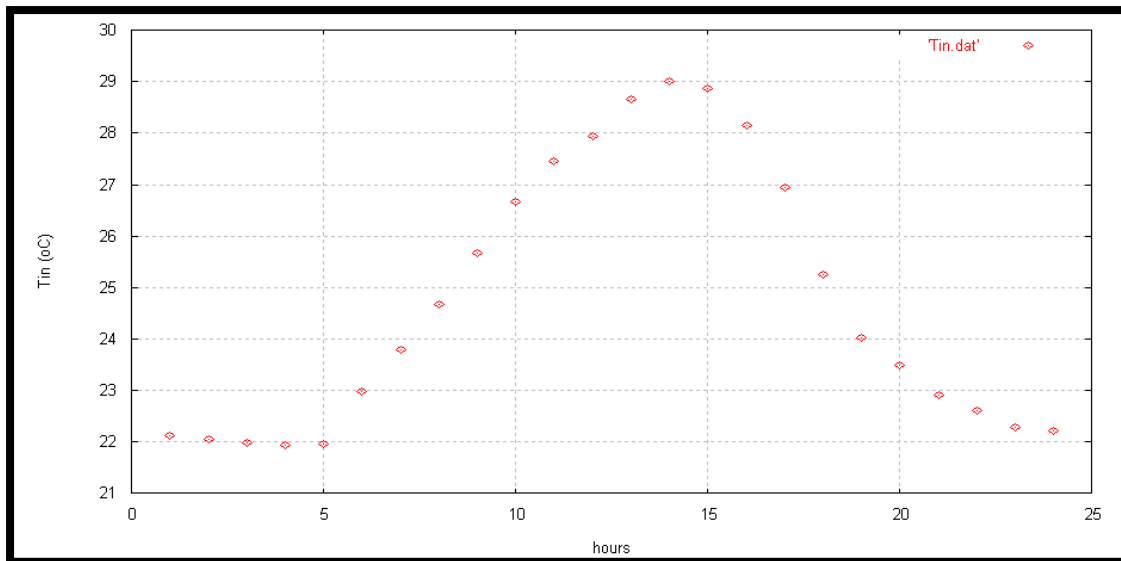
- Μήνας Ιούλιος



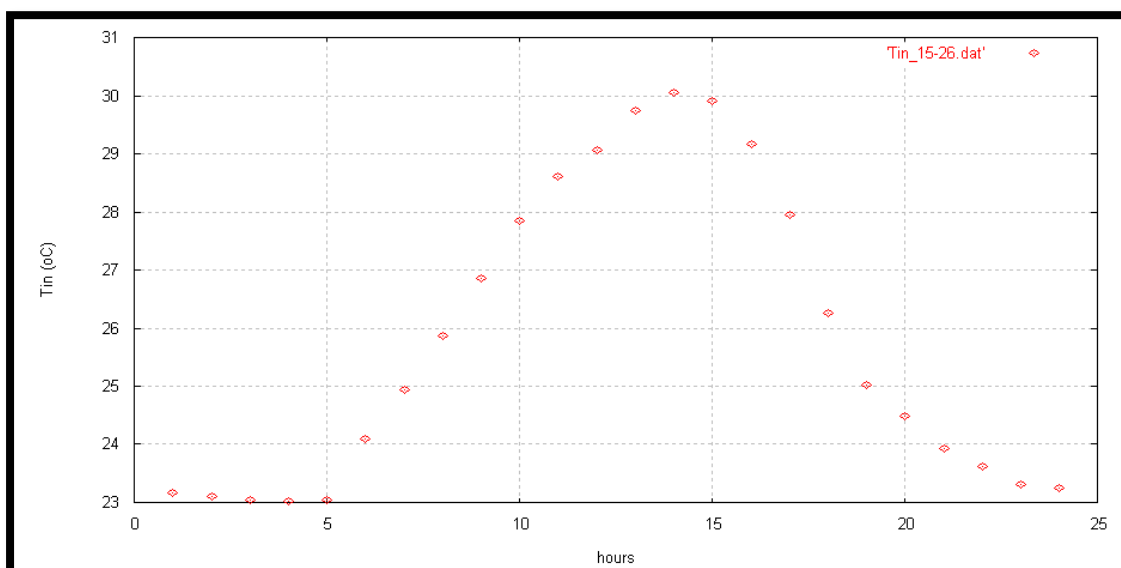
Εικόνα 19.1.6 Θερμοχωρητικότητα του PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C.



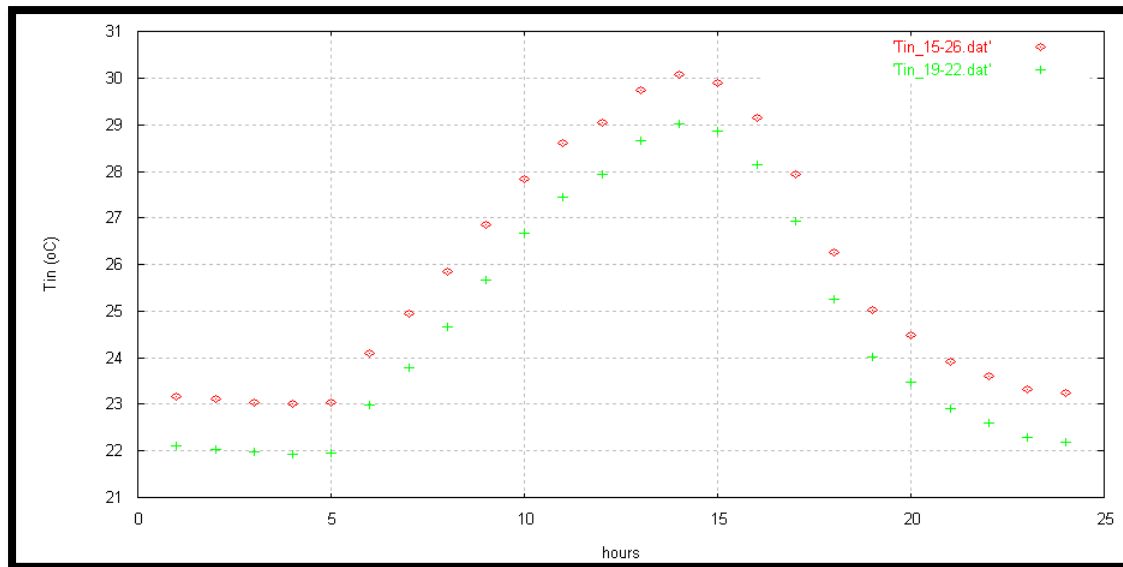
Εικόνα 19.1.7 Θερμοχωρητικότητα του PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C.



Εικόνα 19.1.8 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Ιουλίου χρησιμοποιώντας PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C.



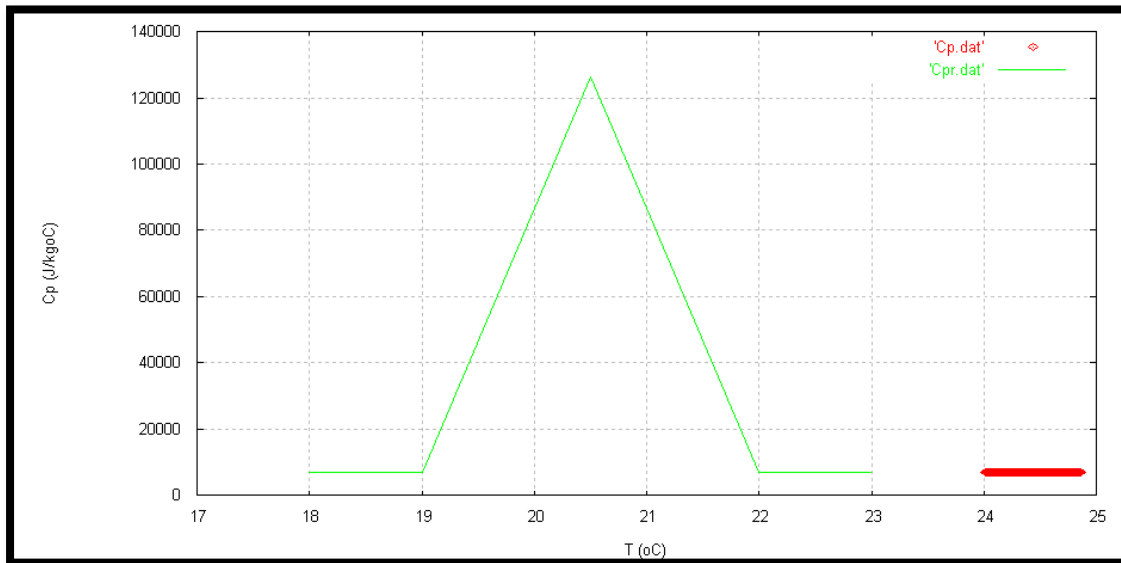
Εικόνα 19.1.9 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Ιουλίου χρησιμοποιώντας PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C.



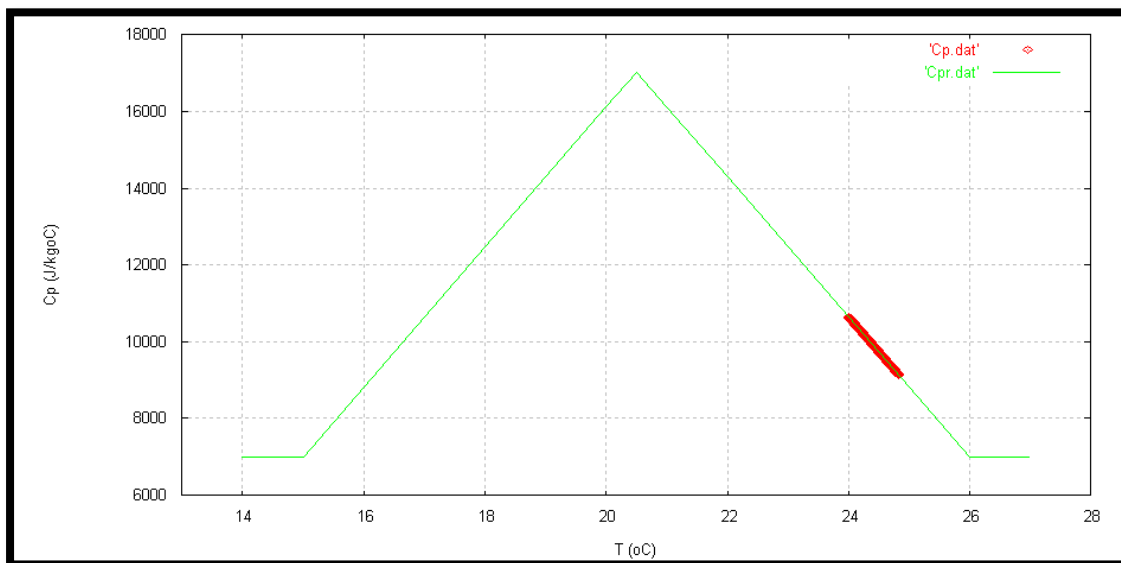
Εικόνα 19.1.10 Συγκριτικό διάγραμμα των εσωτερικών θερμοκρασιών του χώρου για τα δύο PCMs που μελετήθηκαν.

Εξετάζοντας τα διαγράμματα C_p-T_{PCM} παρατηρείται ότι το PCM που έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C καλύπτει μεγαλύτερο κομμάτι της διφασικής περιοχής από εκείνο που καλύπτει το PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C, δηλαδή εκμεταλλεύεται περισσότερο την ιδιότητα των PCMs να αποθηκεύουν λανθάνουσα θερμότητα. Σύμφωνα με την Εικόνα 19.1.10 είναι εμφανές ότι όταν χρησιμοποιείται το PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C οι εσωτερικές θερμοκρασίες είναι κατά 1 °C υψηλότερες από ότι όταν χρησιμοποιείται το PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C. Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι για το μήνα Ιούλιο είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί ένα PCM το οποίο έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C, εφόσον δίνει μικρότερες θερμοκρασίες.

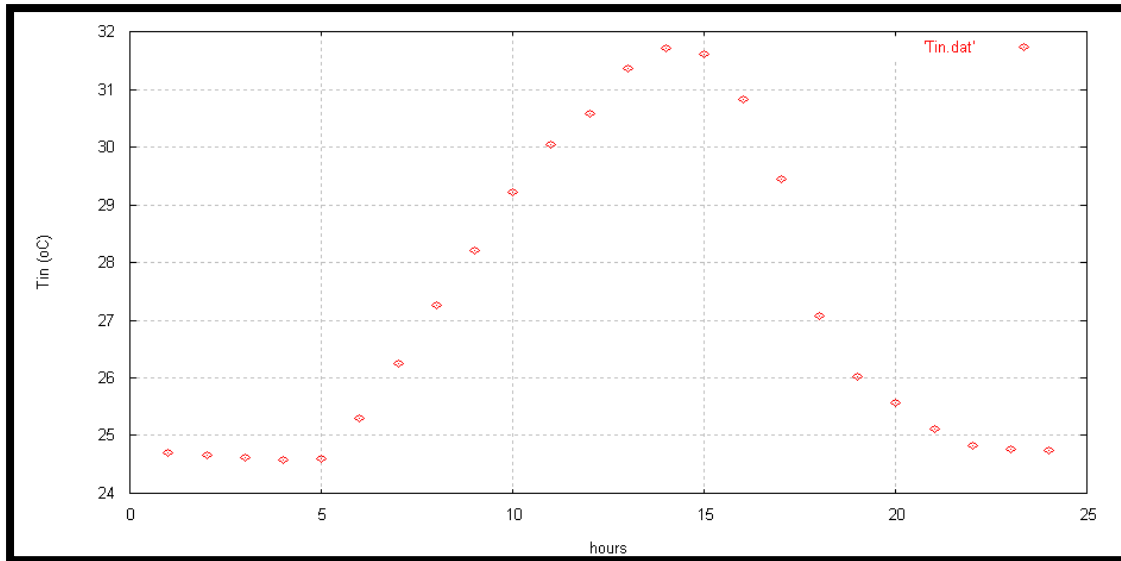
▪ Μήνας Αύγουστος



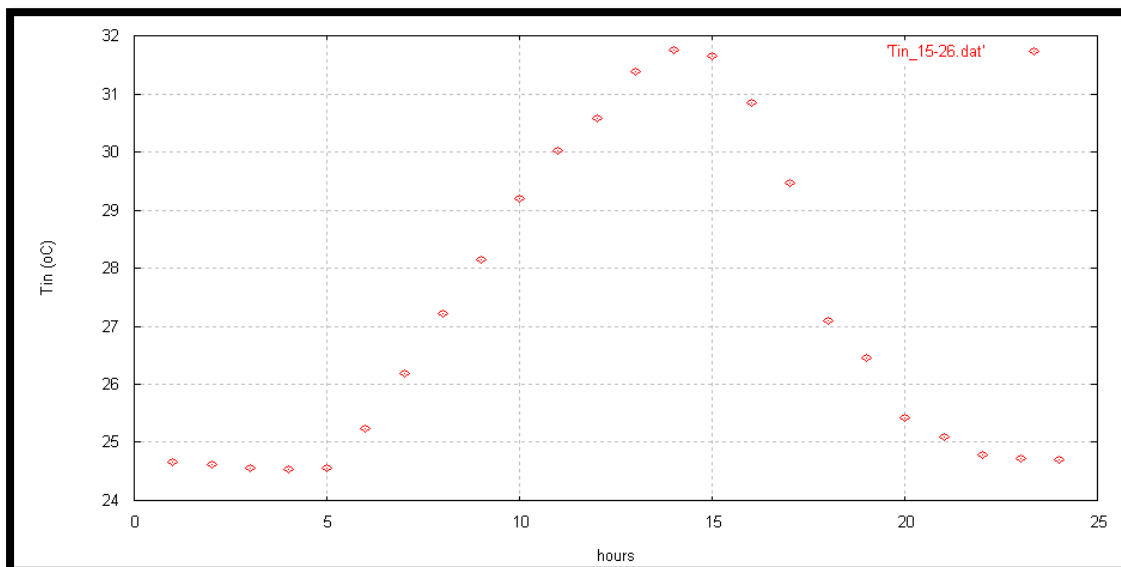
Εικόνα 19.1.11 Θερμοχωρητικότητα του PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C.



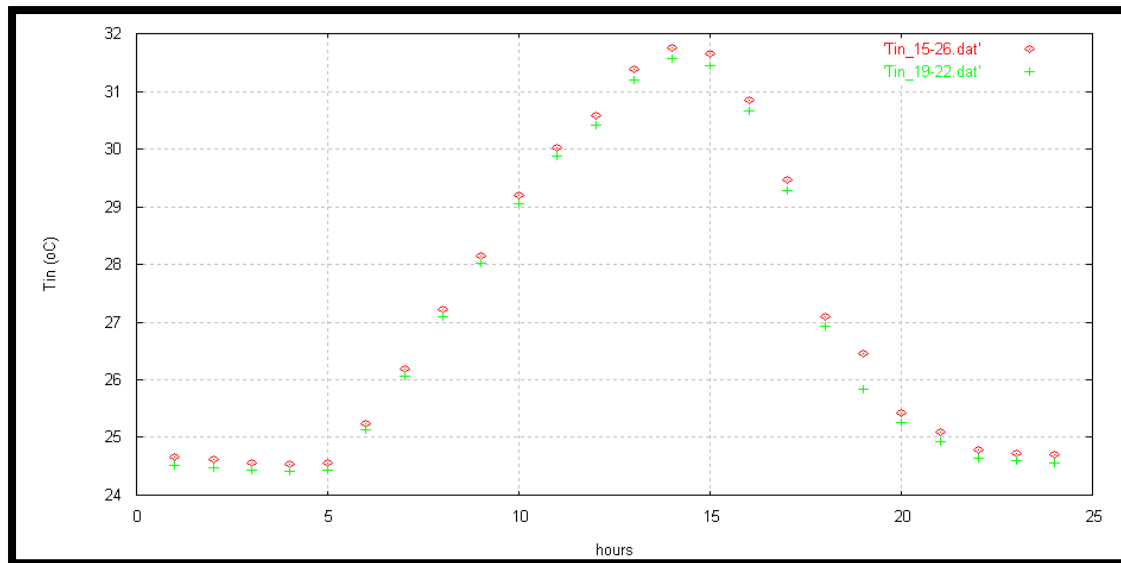
Εικόνα 19.1.12 Θερμοχωρητικότητα του PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C.



Εικόνα 19.1.13 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Αυγούστου χρησιμοποιώντας PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C.



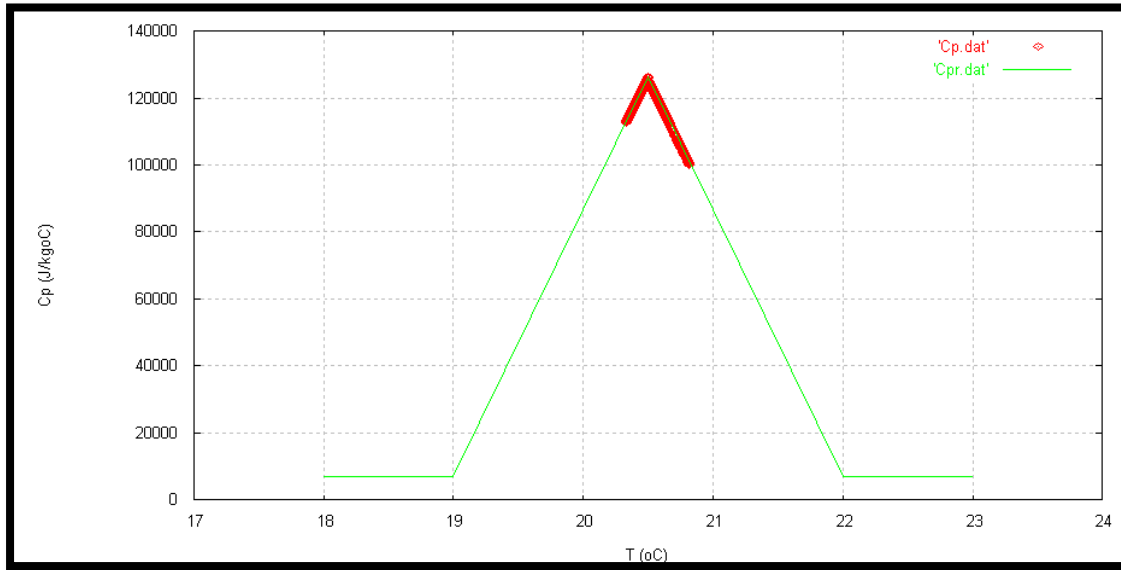
Εικόνα 19.1.14 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Αυγούστου χρησιμοποιώντας PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C.



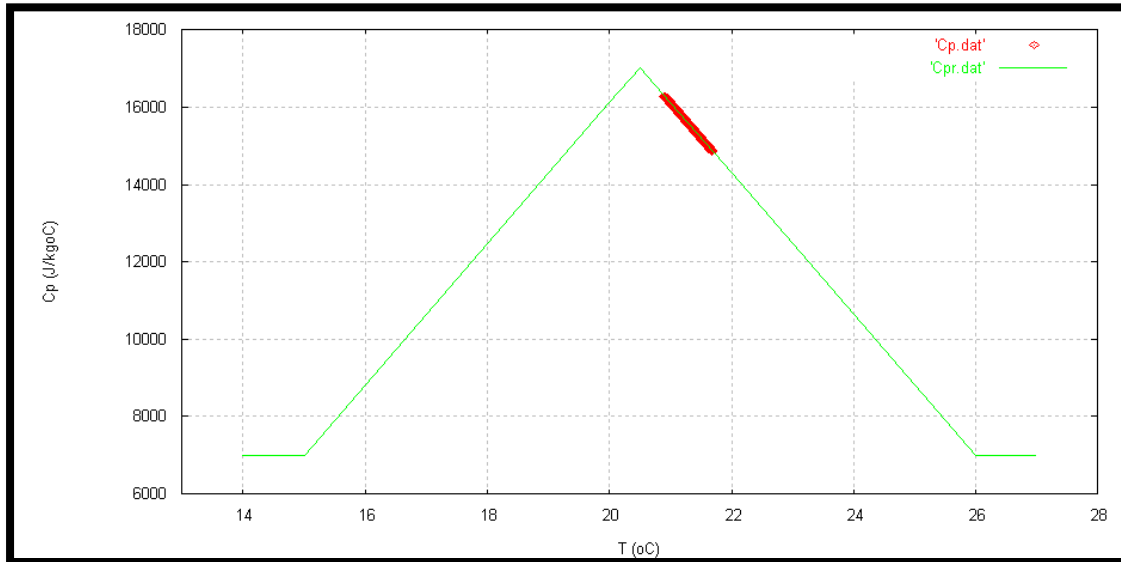
Εικόνα 19.1.15 Συγκριτικό διάγραμμα των εσωτερικών θερμοκρασιών του χώρου για τα δύο PCMs που μελετήθηκαν.

Εξετάζοντας τα διαγράμματα C_p-T_{PCM} παρατηρείται ότι το PCM που έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C δεν εισέρχεται καθόλου στη διφασική περιοχή, σε αντίθεση με το PCM που έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C, το οποίο καλύπτει ένα μικρό κομμάτι της διφασικής περιοχής. Σύμφωνα με την Εικόνα 19.1.15 είναι εμφανές ότι όταν χρησιμοποιείται το PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C οι εσωτερικές θερμοκρασίες είναι ελάχιστα υψηλότερες από ότι όταν χρησιμοποιείται το PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C. Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι για το μήνα Αύγουστο είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί ένα PCM το οποίο έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C, εφόσον δίνει (έστω και ελάχιστα) μικρότερες θερμοκρασίες.

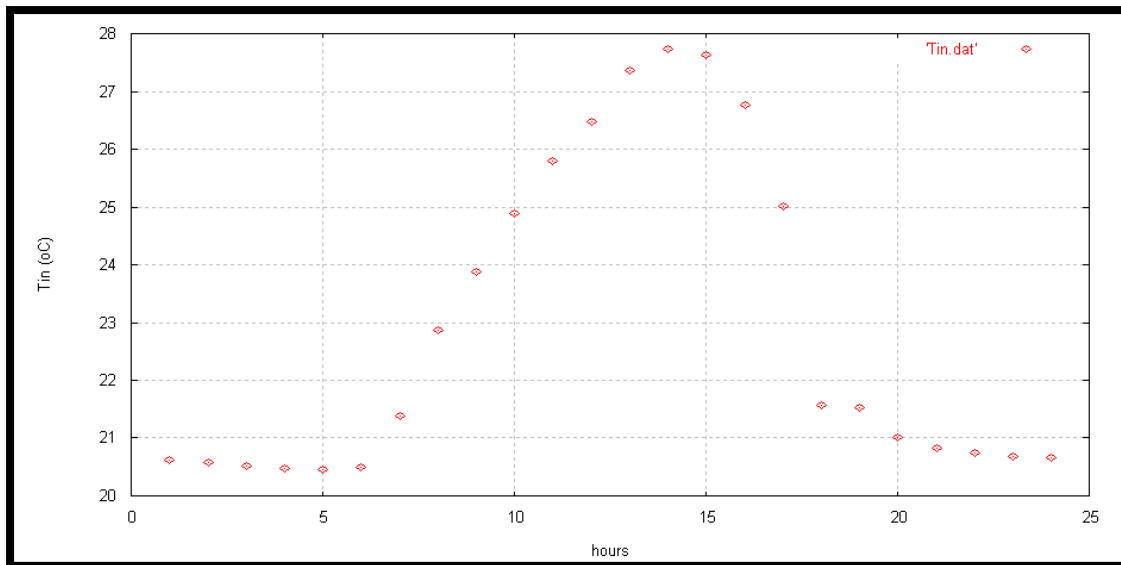
- Μήνας Σεπτέμβριος



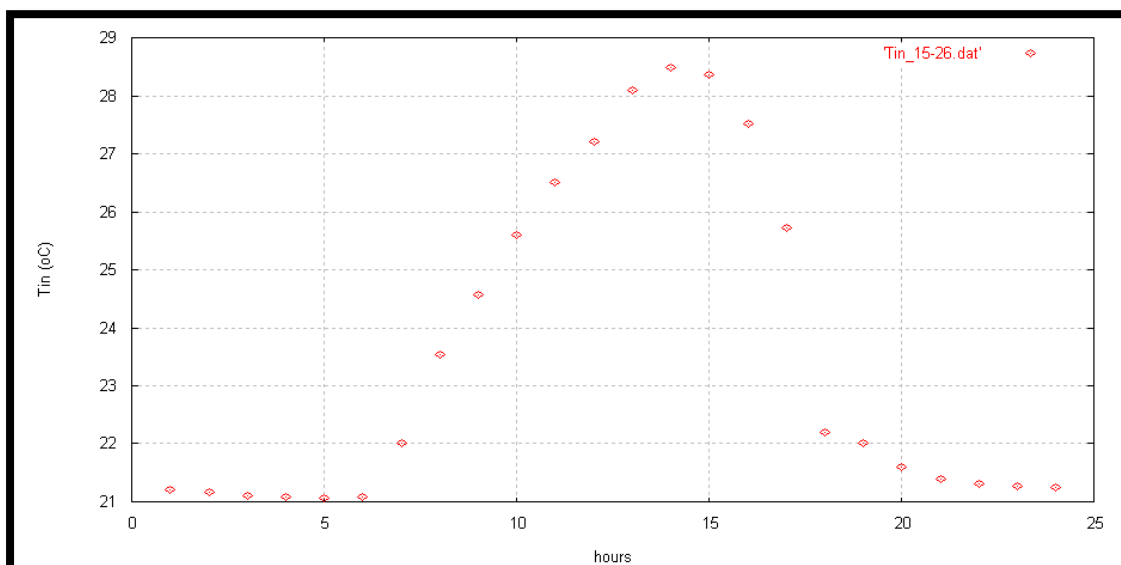
Εικόνα 19.1.16 Θερμοχωρητικότητα του PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C.



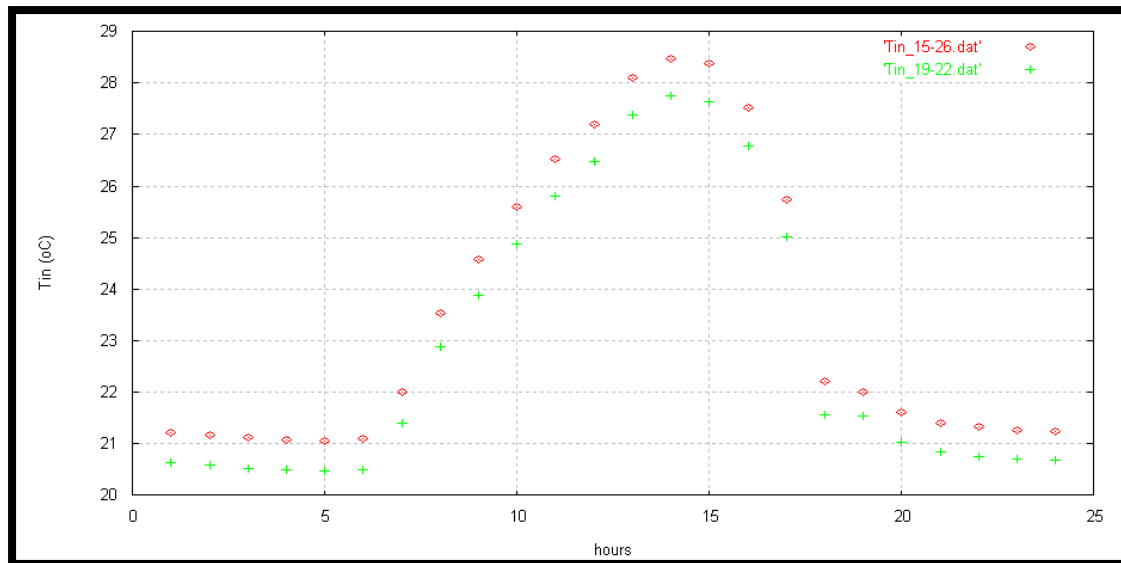
Εικόνα 19.1.17 Θερμοχωρητικότητα του PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C.



Εικόνα 19.1.18 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Σεπτεμβρίου χρησιμοποιώντας PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C.



Εικόνα 19.1.19 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Σεπτεμβρίου χρησιμοποιώντας PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26°C.



Εικόνα 19.1.20 Συγκριτικό διάγραμμα των εσωτερικών θερμοκρασιών του χώρου για τα δύο PCMs που μελετήθηκαν.

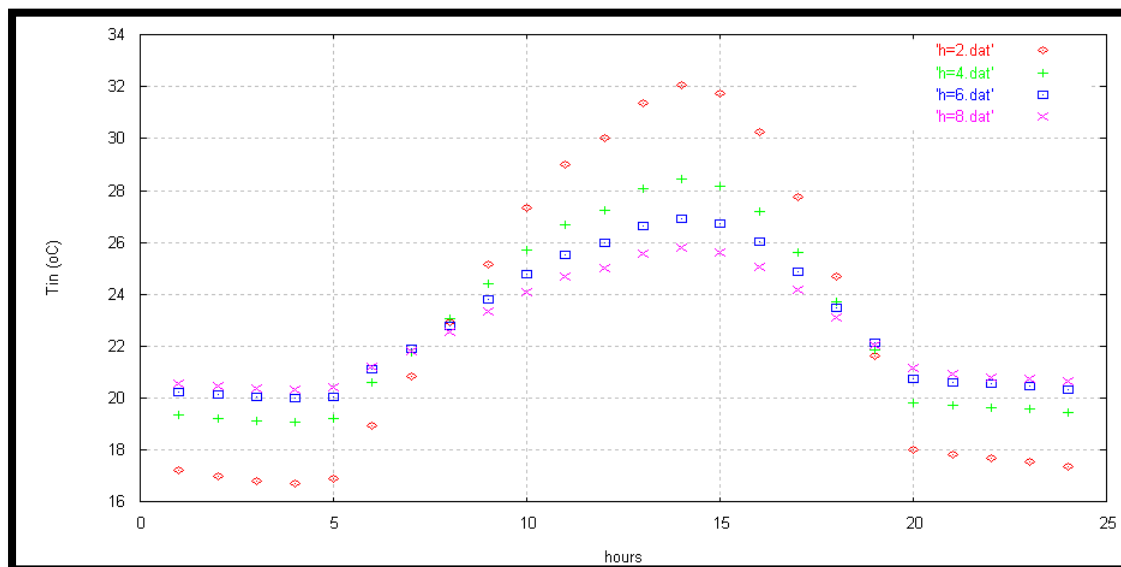
Εξετάζοντας τα διαγράμματα C_p-T_{PCM} παρατηρείται ότι το PCM που έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C καλύπτει μεγαλύτερο κομμάτι της διφασικής περιοχής από εκείνο που καλύπτει το PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C, δηλαδή εκμεταλλεύεται περισσότερο την ιδιότητα των PCMs να αποθηκεύουν λανθάνουσα θερμότητα. Σύμφωνα με την Εικόνα 19.1.20 είναι εμφανές ότι όταν χρησιμοποιείται το PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C οι εσωτερικές θερμοκρασίες είναι κατά 0.5 °C περίπου υψηλότερες από ότι όταν χρησιμοποιείται το PCM με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C. Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι για το μήνα Σεπτέμβριο είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί ένα PCM το οποίο έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C, εφόσον δίνει μικρότερες θερμοκρασίες.

Επομένως, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή που μελετάται επιλέγεται ως βέλτιστο υλικό αλλαγής φάσης συνολικά και για τους τέσσερις μήνες λειτουργίας εκείνο που έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C, διότι αυτό δίνει πιο χαμηλές εσωτερικές θερμοκρασίες, οι οποίες παρέχουν θερμική άνεση.

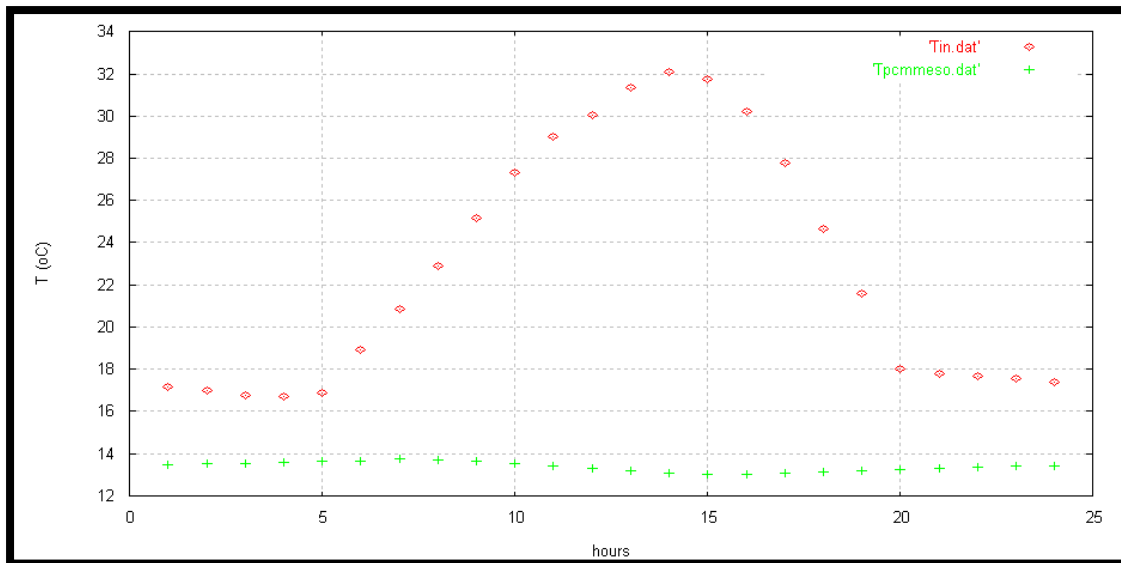
19.2 Παραμετρική διερεύνηση επιλογής συντελεστή συναγωγής

Στη δεύτερη παραμετρική διερεύνηση εξετάζεται ποιος είναι ο καταλληλότερος συντελεστής συναγωγής h . Οι τιμές του συντελεστή που εξετάστηκαν είναι 2,4,6 και 8 $W/m^2 \cdot ^\circ C$. Τα διαγράμματα που βοηθούν στην επιλογή του συντελεστή είναι τα T_{in} -hours για κάθε μήνα, τα οποία παρουσιάζουν συγκριτικά τις τιμές τις εσωτερικής θερμοκρασίας για τις τέσσερις τιμές του συντελεστή συναγωγής. Ακολουθούν, επίσης, και συγκριτικά διαγράμματα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασίας του PCM.

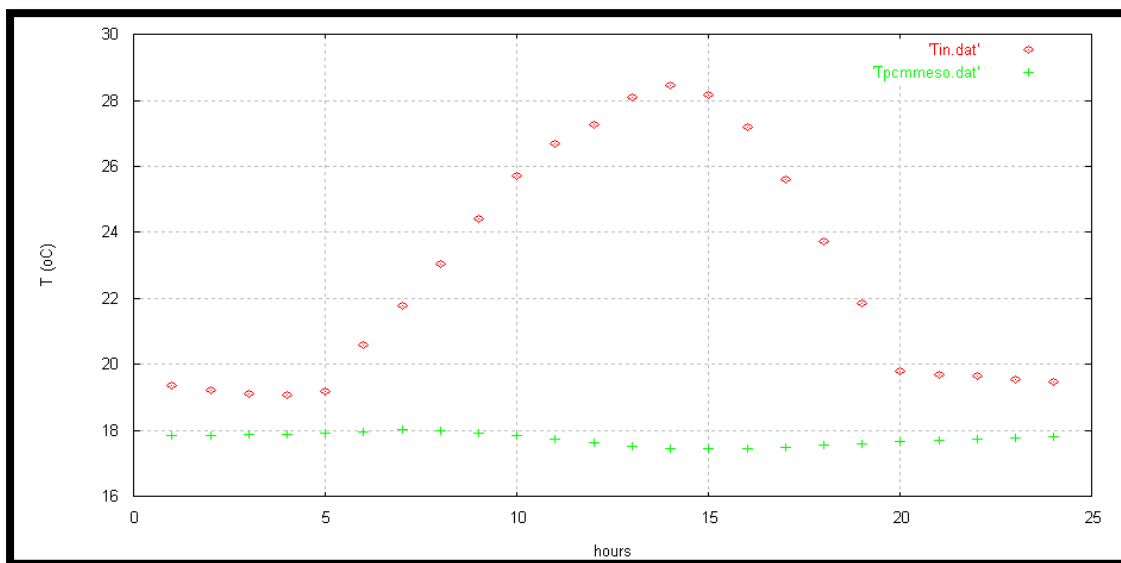
▪ Μήνας Ιούνιος



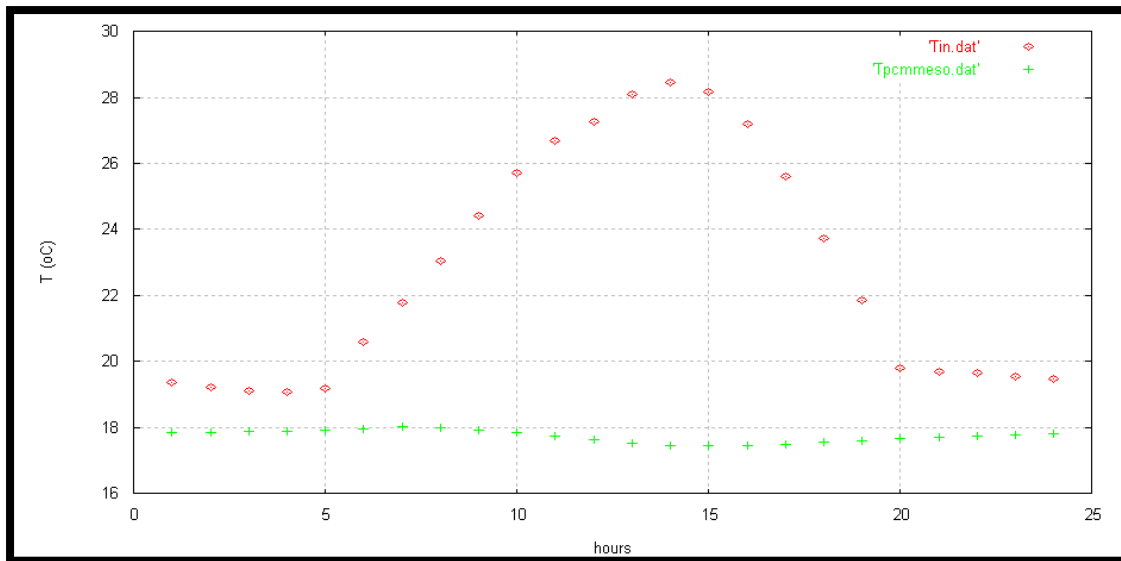
Εικόνα 19.2.1 Συγκριτικό διάγραμμα της εσωτερικής θερμοκρασίας της 21^{ης} ημέρας του Ιουνίου για τις τέσσερις τιμές του συντελεστή συναγωγής.



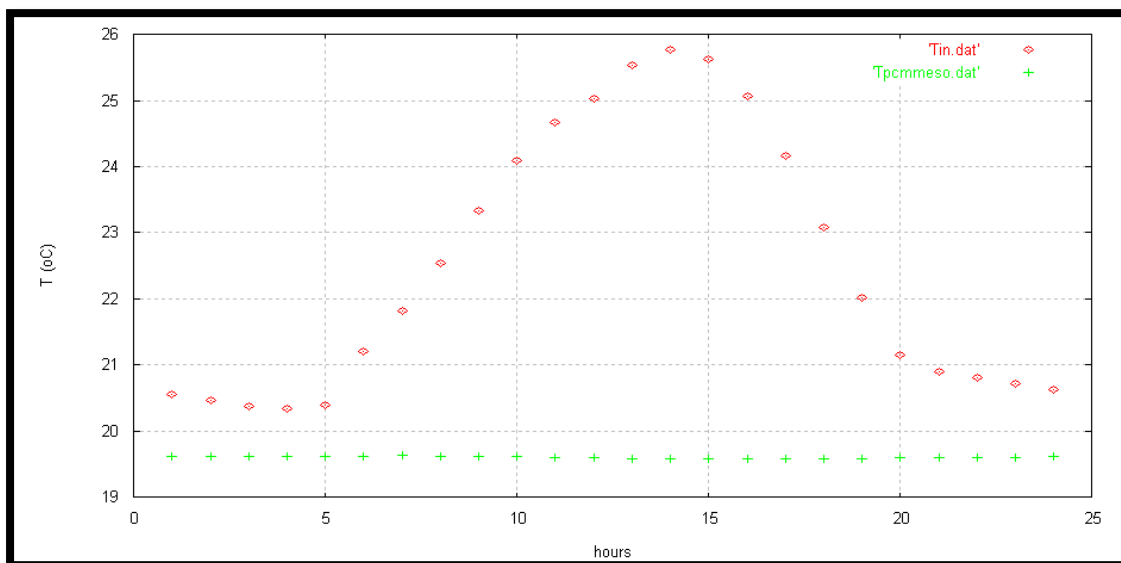
Εικόνα 19.2.2 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=2 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



Εικόνα 19.2.3 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=4 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



Εικόνα 19.2.4 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=6 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



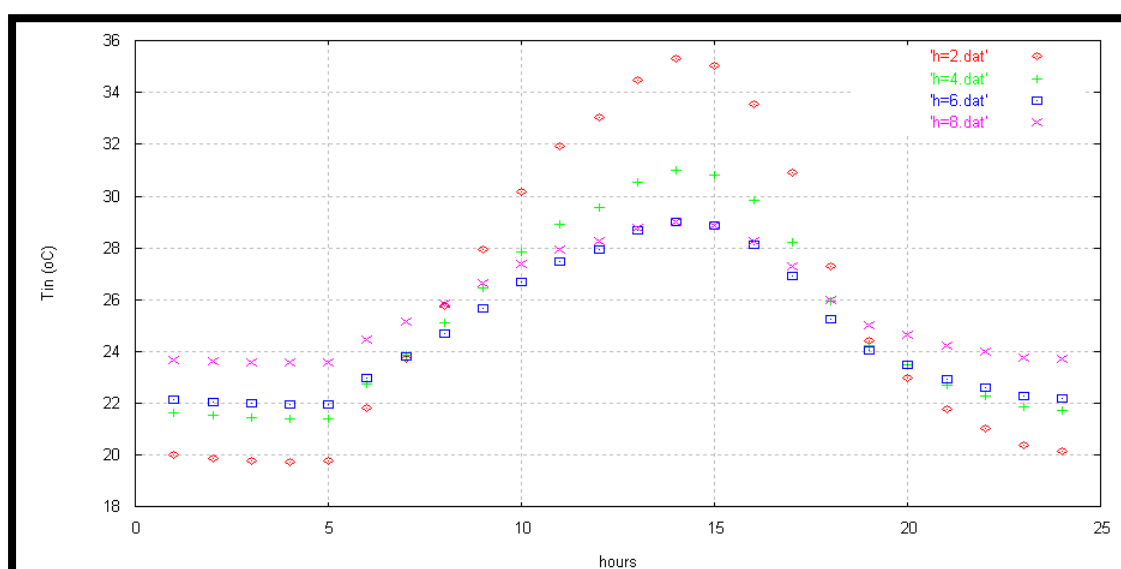
Εικόνα 19.2.5 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=8 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 19.2.1, οι τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας για $h=2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ είναι αρκετά υψηλές, πολύ πάνω από τη θερμοκρασία άνεσης, όπως επίσης συμβαίνει και για το συντελεστή συναγωγής $h=4 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Ο συντελεστής συναγωγής $h=8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ δίνει σχετικά χαμηλές εσωτερικές θερμοκρασίες. Επομένως, επιλέγεται ως

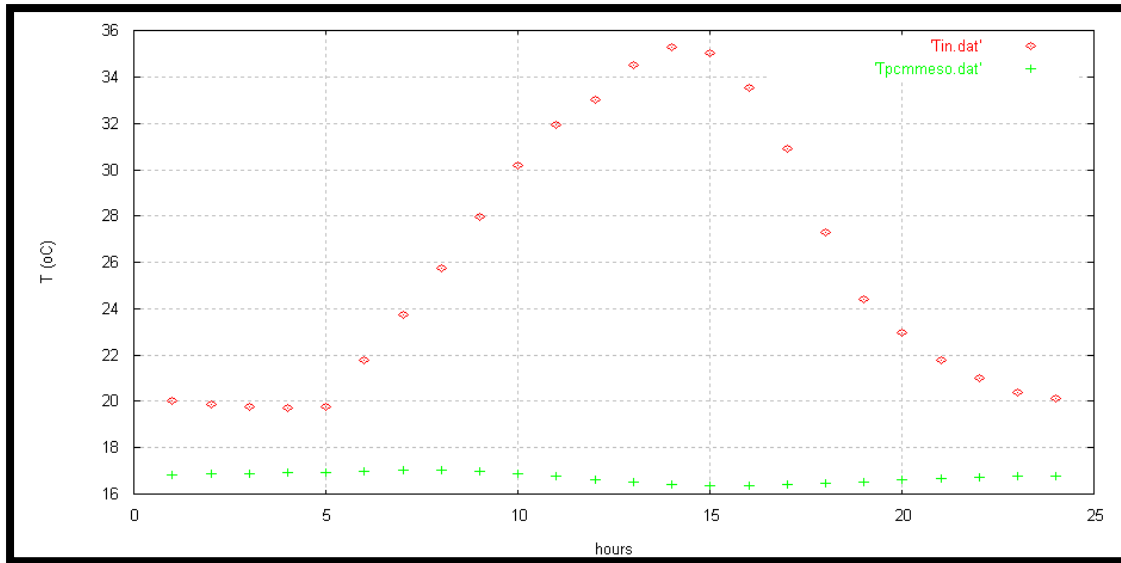
καταλληλότερος συντελεστής συναγωγής για το μήνα Ιούνιο ο $h=6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, ο οποίος δίνει και καλύτερα αποτελέσματα.

Είναι λογικό που για χαμηλότερο συντελεστή συναγωγής παρατηρούνται υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες τις ώρες της ηλιοφάνειας (07:00-18:00), εφόσον έχουμε μικρότερη συναλλαγή θερμότητας (θερμορροή) μεταξύ του πάνελ με το PCM και του δωματίου. Έτσι, το PCM δε μπορεί να μεταφέρει με ευκολία την ψύξη του στο χώρο, με αποτέλεσμα ο χώρος να θερμαίνεται περισσότερο. Το ίδιο θα περιμέναμε να συμβαίνει και κατά τη διάρκεια των ωρών μη ηλιοφάνειας (19:00-06:00). Συμβαίνει όμως το αντίθετο. Τις ώρες μη ηλιοφάνειας ο μικρότερος συντελεστής συναγωγής δίνει πιο μικρές εσωτερικές θερμοκρασίες. Εξετάζοντας τις Εικόνες 19.2.2-19.2.5 παρατηρείται ότι όταν χρησιμοποιείται ο μικρότερος συντελεστής συναγωγής η θερμοκρασία του PCM πέφτει αρκετά σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές. Με τον τρόπο αυτό παρασύρεται και το δωμάτιο να ακολουθήσει την πτώση αυτή της θερμοκρασίας. Έτσι, παρά το γεγονός ότι η διαφορά θερμοκρασίας του PCM και του δωματίου είναι περίπου $3.5 \text{ }^\circ\text{C}$ τις πρωινές ώρες, δεν είναι αρκετή ώστε να αυξήσει τόσο την εσωτερική θερμοκρασία. Έτσι, λοιπόν, εξηγείται το ότι όσο μικραίνει ο συντελεστής συναγωγής, τόσο μικραίνει και η εσωτερική θερμοκρασία τις ώρες μη ηλιοφάνειας.

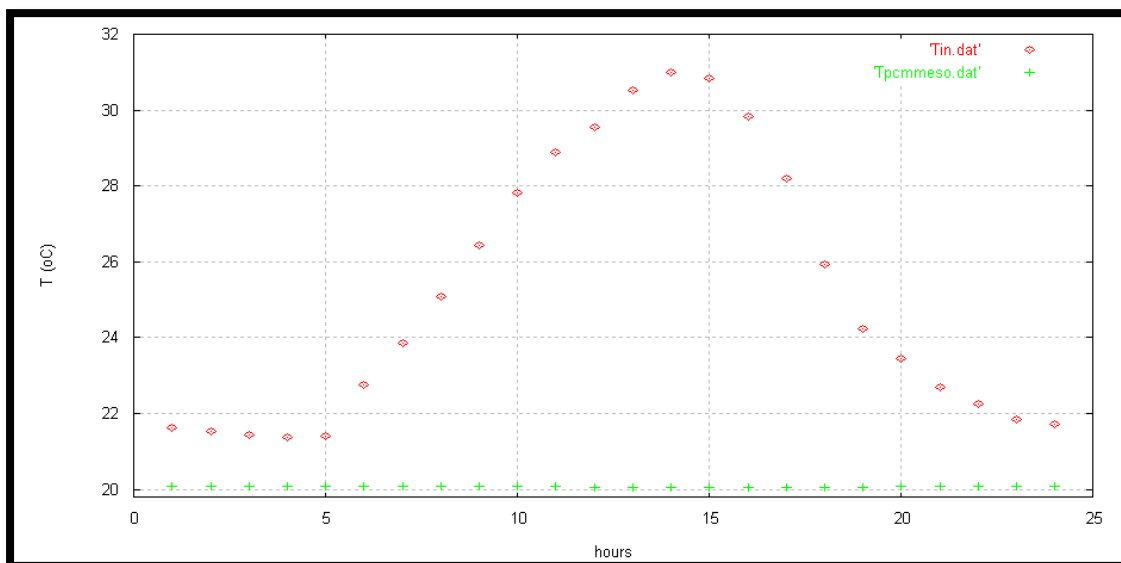
▪ Μήνας Ιούλιος



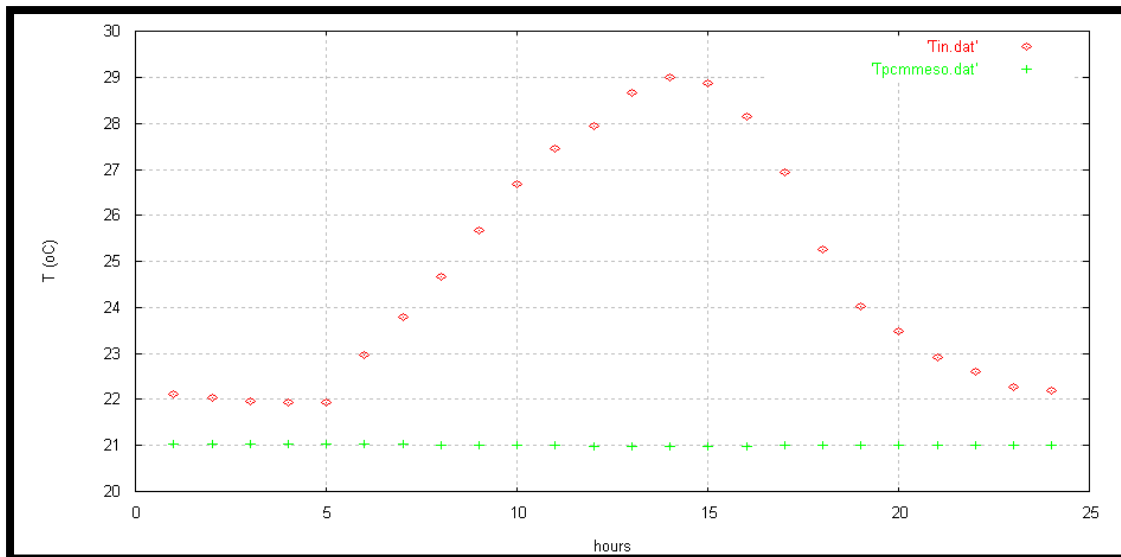
Εικόνα 19.2.6 Συγκριτικό διάγραμμα της εσωτερικής θερμοκρασίας της 21^{ης} ημέρας του Ιουλίου για τις τέσσερις τιμές του συντελεστή συναγωγής.



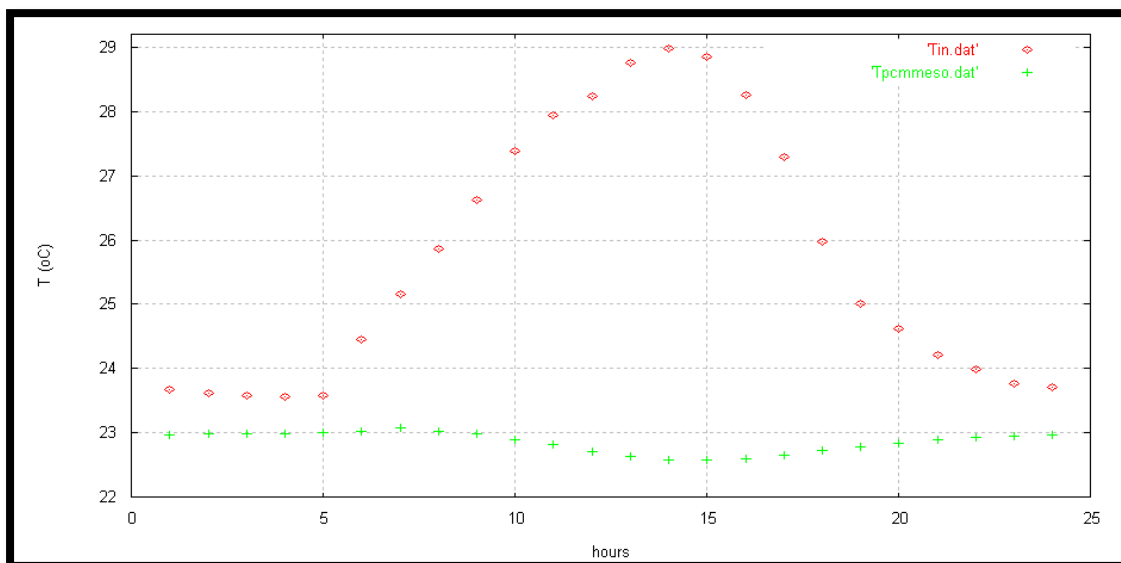
Εικόνα 19.2.7 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=2 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



Εικόνα 19.2.8 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=4 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



Εικόνα 19.2.9 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=6 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



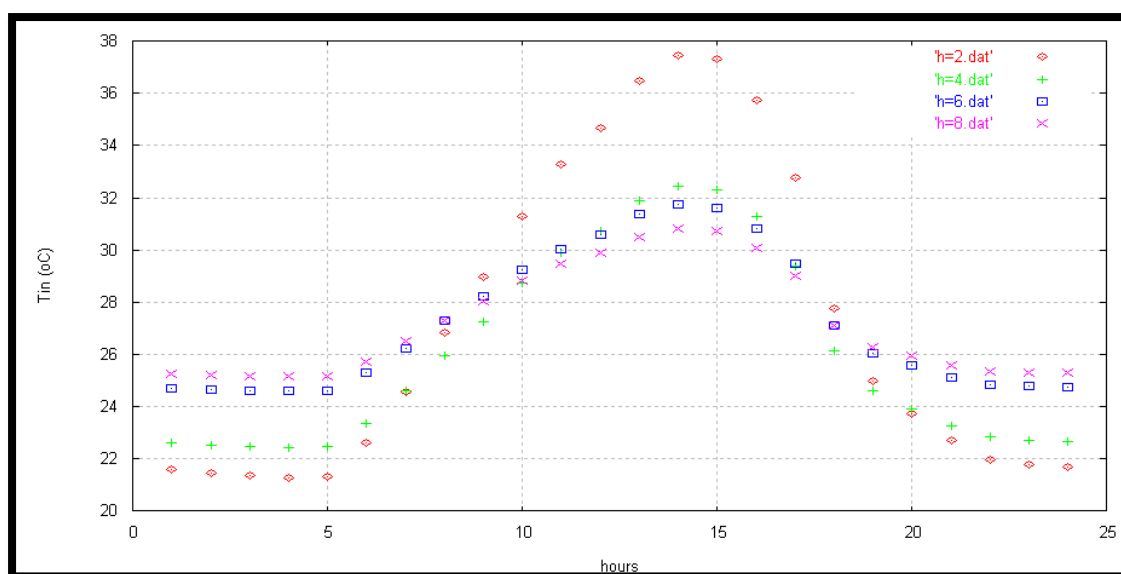
Εικόνα 19.2.10 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=8 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 19.2.6, οι τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας για $h=2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ είναι αρκετά υψηλές, πολύ πάνω από τη θερμοκρασία άνεσης, όπως επίσης συμβαίνει και για το συντελεστή συναγωγής $h=4 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Ο συντελεστής συναγωγής $h=8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ δίνει τις ίδιες εσωτερικές θερμοκρασίες για τις ώρες της ηλιοφάνειας, ενώ για τις ώρες μη ηλιοφάνειας δίνει μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που δίνει ο

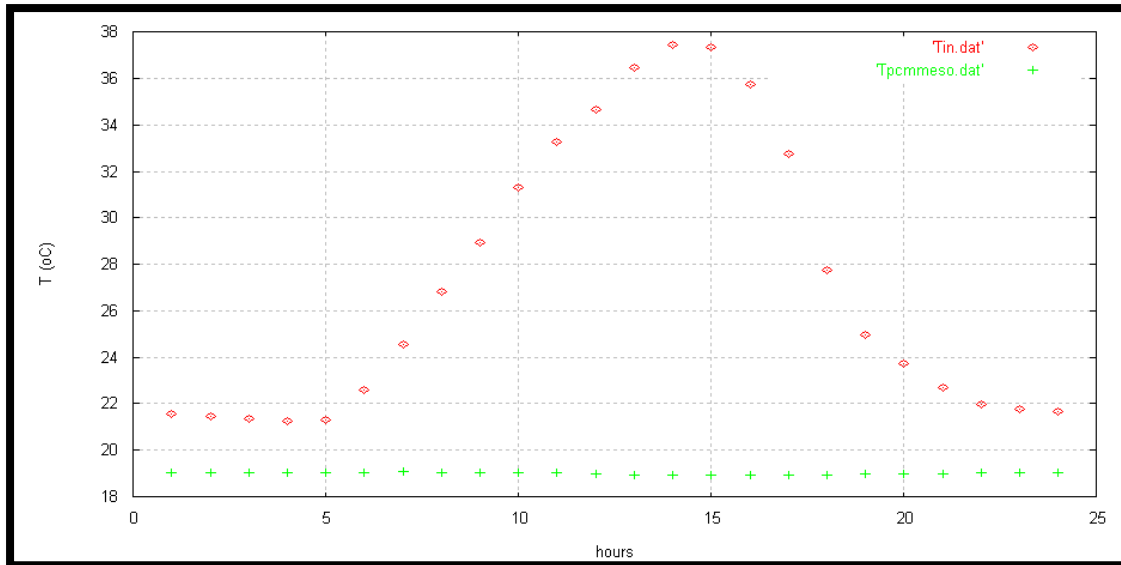
συντελεστής $h=6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Επομένως, επιλέγεται ως καταλληλότερος συντελεστής συναγωγής για το μήνα Ιούλιο ο $h=6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, ο οποίος δίνει και καλύτερα αποτελέσματα.

Είναι λογικό που για χαμηλότερο συντελεστή συναγωγής παρατηρούνται υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες τις ώρες της ηλιοφάνειας (07:00-18:00), εφόσον έχουμε μικρότερη συναλλαγή θερμότητας (θερμορροή) μεταξύ του πάνελ με το PCM και του δωματίου. Έτσι, το PCM δε μπορεί να μεταφέρει με ευκολία την ψύξη του στο χώρο, με αποτέλεσμα ο χώρος να θερμαίνεται περισσότερο. Το ίδιο θα περιμέναμε να συμβαίνει και κατά τη διάρκεια των ωρών μη ηλιοφάνειας (19:00-06:00). Συμβαίνει όμως το αντίθετο. Τις ώρες μη ηλιοφάνειας ο μικρότερος συντελεστής συναγωγής δίνει πιο μικρές εσωτερικές θερμοκρασίες. Εξετάζοντας τις Εικόνες 19.2.7-19.2.10 παρατηρείται ότι όταν χρησιμοποιείται ο μικρότερος συντελεστής συναγωγής η θερμοκρασία του PCM πέφτει αρκετά σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές. Με τον τρόπο αυτό παρασύρεται και το δωμάτιο να ακολουθήσει την πτώση αυτή της θερμοκρασίας. Έτσι, παρά το γεγονός ότι η διαφορά θερμοκρασίας του PCM και του δωματίου είναι περίπου $3 \text{ }^\circ\text{C}$ τις πρωινές ώρες, δεν είναι αρκετή ώστε να αυξήσει τόσο την εσωτερική θερμοκρασία. Έτσι, λοιπόν, εξηγείται το ότι όσο μικραίνει ο συντελεστής συναγωγής, τόσο μικραίνει και η εσωτερική θερμοκρασία τις ώρες μη ηλιοφάνειας.

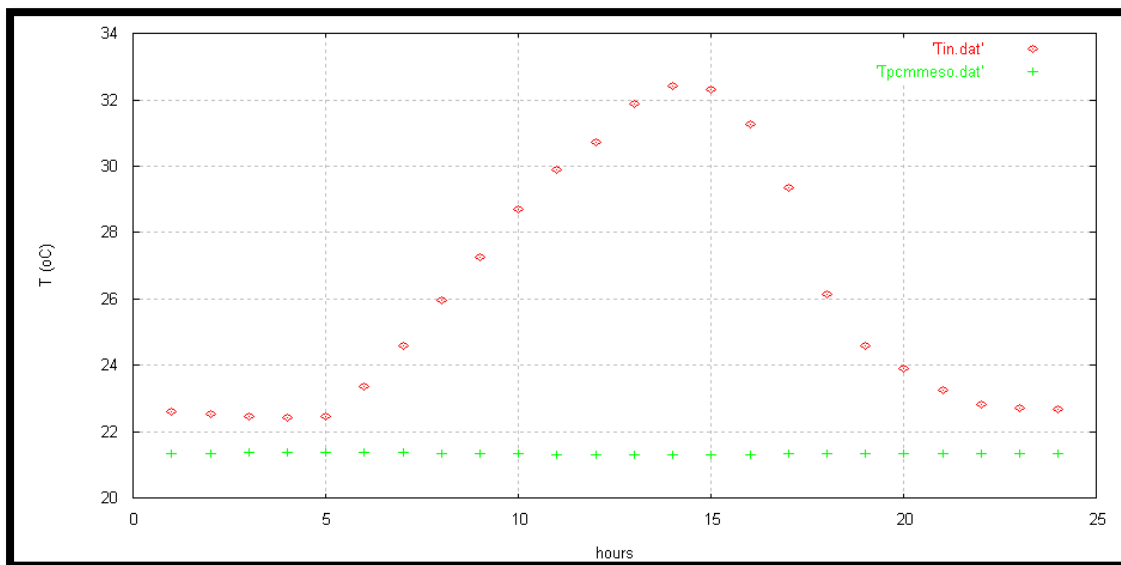
■ Μήνας Αύγουστος



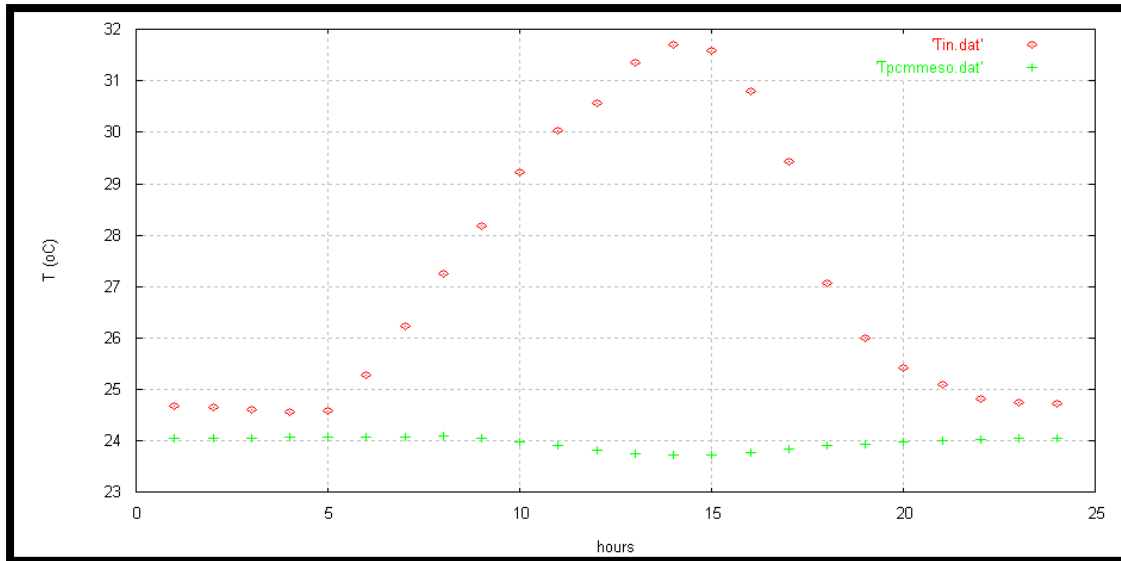
Εικόνα 19.2.11 Συγκριτικό διάγραμμα της εσωτερικής θερμοκρασίας της 21^{ης} ημέρας του Αυγούστου για τις τέσσερις τιμές του συντελεστή συναγωγής.



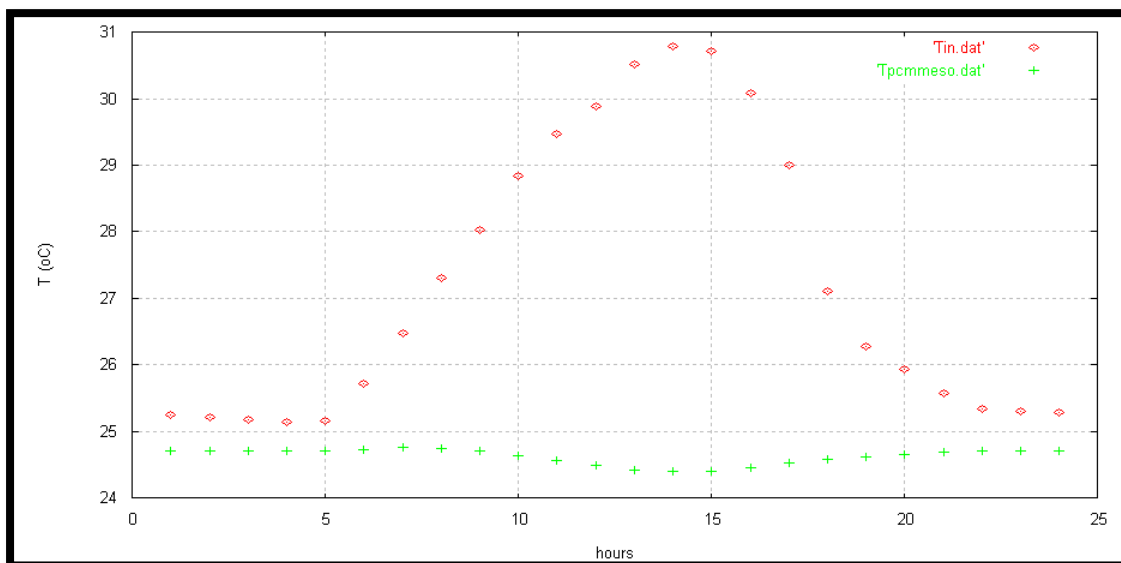
Εικόνα 19.2.12 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=2 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



Εικόνα 19.2.13 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=4 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



Εικόνα 19.2.14 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=6 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



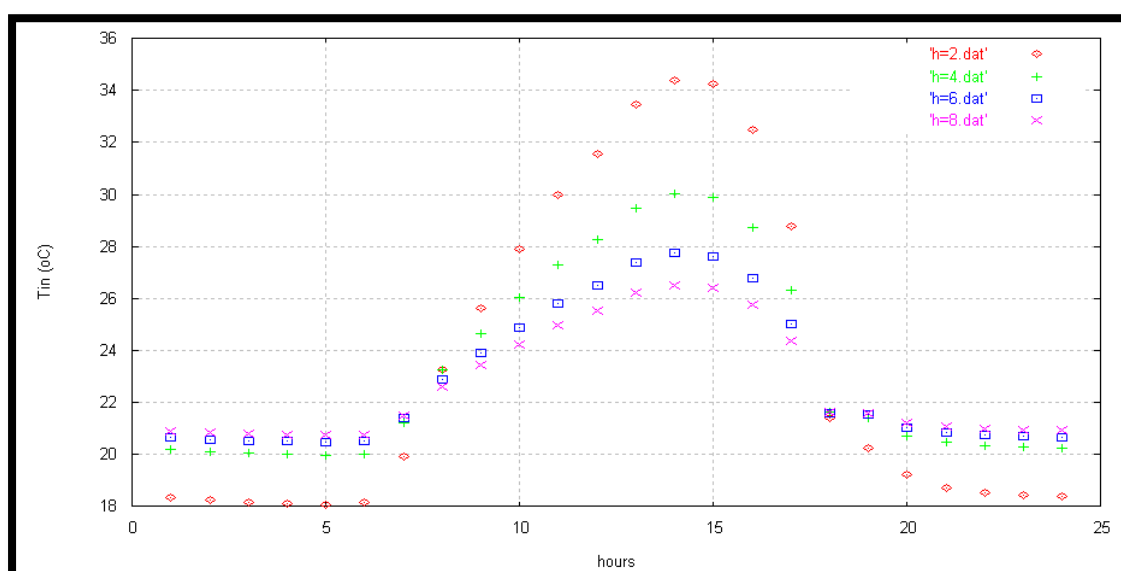
Εικόνα 19.2.15 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=8 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 19.2.11, οι τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας για $h=2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ είναι αρκετά υψηλές, πολύ πάνω από τη θερμοκρασία άνεσης, όπως επίσης συμβαίνει και για το συντελεστή συναγωγής $h=4 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Ο συντελεστής συναγωγής $h=8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ δίνει τις ίδιες εσωτερικές θερμοκρασίες για τις ώρες της ηλιοφάνειας, ενώ για τις ώρες μη ηλιοφάνειας δίνει μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που δίνει ο

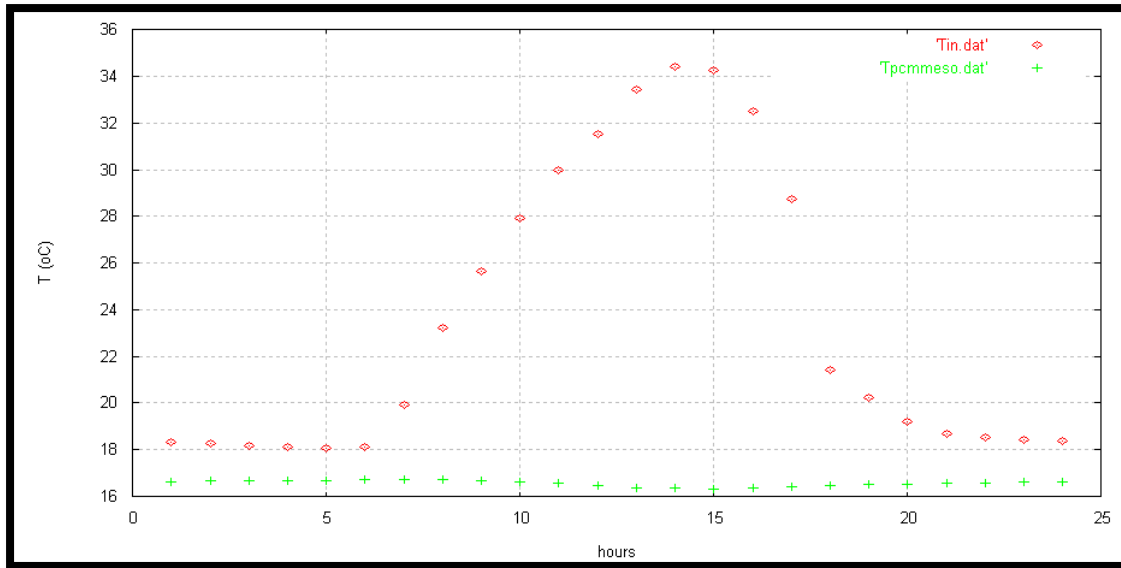
συντελεστής $h=6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Επομένως, επιλέγεται ως καταλληλότερος συντελεστής συναγωγής για το μήνα Ιούλιο ο $h=6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, ο οποίος δίνει και καλύτερα αποτελέσματα.

Είναι λογικό που για χαμηλότερο συντελεστή συναγωγής παρατηρούνται υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες τις ώρες της ηλιοφάνειας (07:00-18:00), εφόσον έχουμε μικρότερη συναλλαγή θερμότητας (θερμορροή) μεταξύ του πάνελ με το PCM και του δωματίου. Έτσι, το PCM δε μπορεί να μεταφέρει με ευκολία την ψύξη του στο χώρο, με αποτέλεσμα ο χώρος να θερμαίνεται περισσότερο. Το ίδιο θα περιμέναμε να συμβαίνει και κατά τη διάρκεια των ωρών μη ηλιοφάνειας (19:00-06:00). Συμβαίνει όμως το αντίθετο. Τις ώρες μη ηλιοφάνειας ο μικρότερος συντελεστής συναγωγής δίνει πιο μικρές εσωτερικές θερμοκρασίες. Εξετάζοντας τις Εικόνες 19.2.10-19.2.15 παρατηρείται ότι όταν χρησιμοποιείται ο μικρότερος συντελεστής συναγωγής η θερμοκρασία του PCM πέφτει αρκετά σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές. Με τον τρόπο αυτό παρασύρεται και το δωμάτιο να ακολουθήσει την πτώση αυτή της θερμοκρασίας. Έτσι, παρά το γεγονός ότι η διαφορά θερμοκρασίας του PCM και του δωματίου είναι περίπου $2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ τις πρωινές ώρες, δεν είναι αρκετή ώστε να αυξήσει τόσο την εσωτερική θερμοκρασία. Έτσι, λοιπόν, εξηγείται το ότι όσο μικραίνει ο συντελεστής συναγωγής, τόσο μικραίνει και η εσωτερική θερμοκρασία τις ώρες μη ηλιοφάνειας.

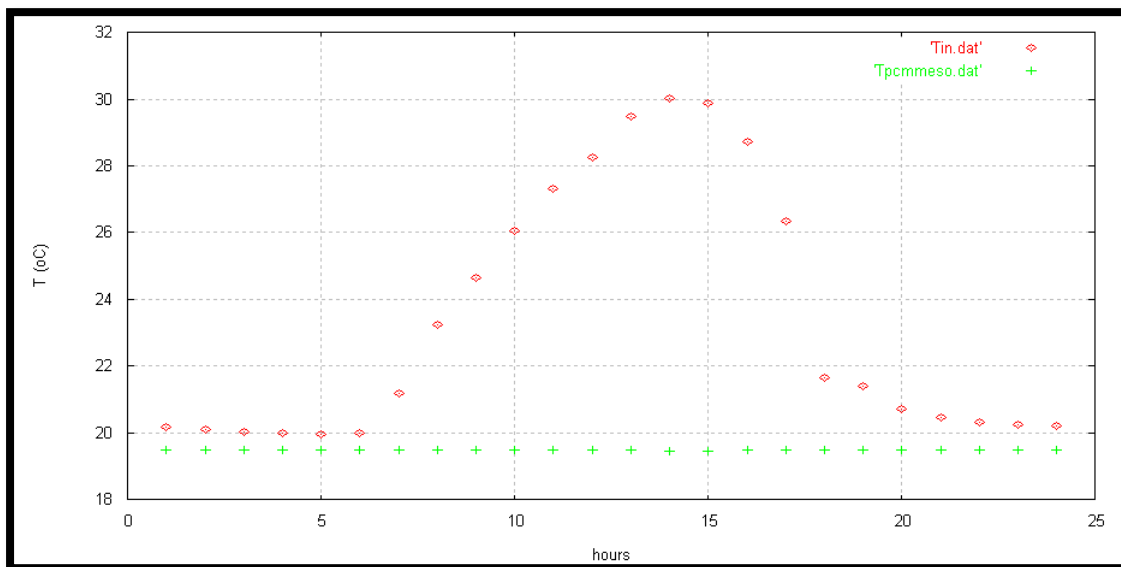
▪ Μήνας Σεπτέμβριος



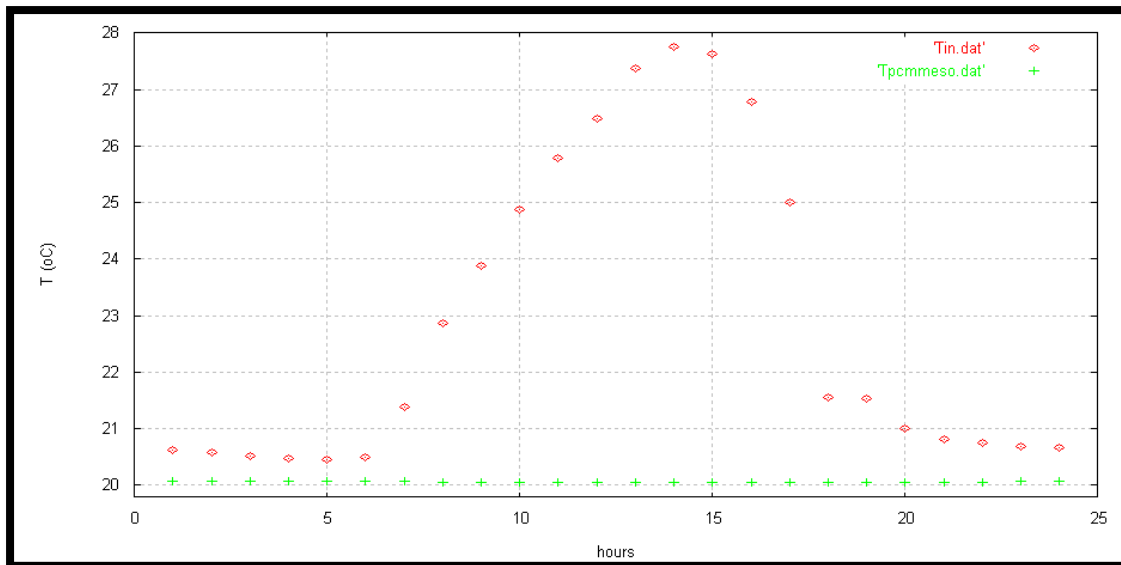
Εικόνα 19.2.16 Συγκριτικό διάγραμμα της εσωτερικής θερμοκρασίας της 21^{ης} ημέρας του Σεπτεμβρίου για τις τέσσερις τιμές του συντελεστή συναγωγής.



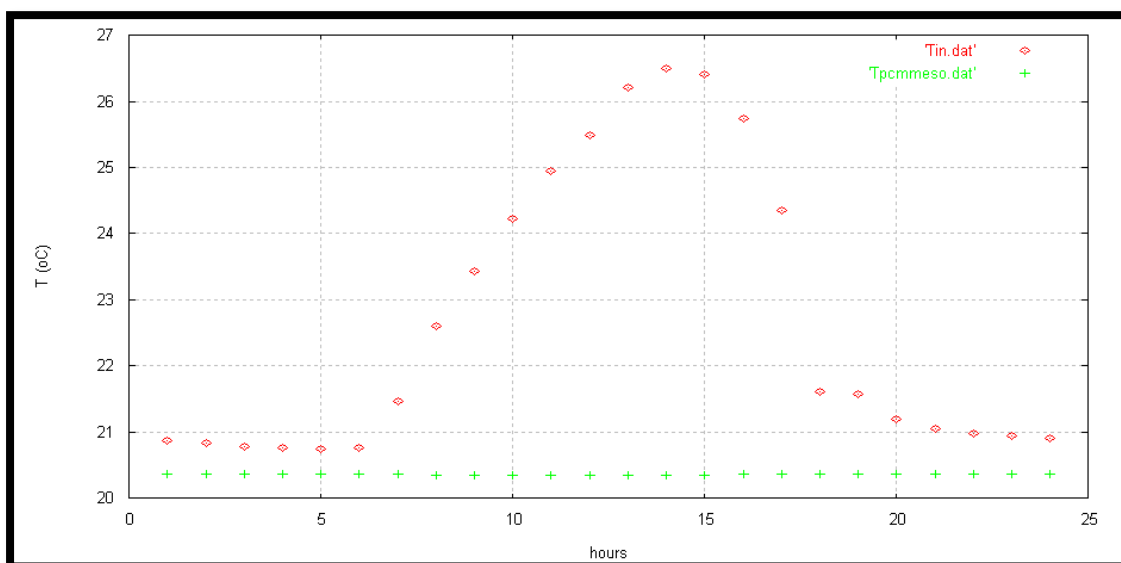
Εικόνα 19.2.17 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=2 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



Εικόνα 19.2.18 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=4 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



Εικόνα 19.2.19 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=6 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



Εικόνα 19.2.20 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασία του PCM για συντελεστή συναγωγής $h=8 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 19.2.16, οι τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας για $h=2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ είναι αρκετά υψηλές, πολύ πάνω από τη θερμοκρασία άνεσης, όπως επίσης συμβαίνει και για το συντελεστή συναγωγής $h=4 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Ο συντελεστής συναγωγής $h=8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ δίνει σχετικά χαμηλές εσωτερικές θερμοκρασίες. Επομένως, επιλέγεται ως καταλληλότερος συντελεστής συναγωγής για το μήνα Ιούνιο ο $h=6 \text{ W/m}^2\text{°C}$, ο οποίος δίνει και καλύτερα αποτελέσματα.

Είναι λογικό που για χαμηλότερο συντελεστή συναγωγής παρατηρούνται υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες τις ώρες της ηλιοφάνειας (07:00-18:00), εφόσον έχουμε μικρότερη συναλλαγή θερμότητας (θερμορροή) μεταξύ του πάνελ με το PCM και του δωματίου. Έτσι, το PCM δε μπορεί να μεταφέρει με ευκολία την ψύξη του στο χώρο, με αποτέλεσμα ο χώρος να θερμαίνεται περισσότερο. Το ίδιο θα περιμέναμε να συμβαίνει και κατά τη διάρκεια των ωρών μη ηλιοφάνειας (19:00-06:00). Συμβαίνει όμως το αντίθετο. Τις ώρες μη ηλιοφάνειας ο μικρότερος συντελεστής συναγωγής δίνει πιο μικρές εσωτερικές θερμοκρασίες. Εξετάζοντας τις Εικόνες 19.2.17-19.2.20 παρατηρείται ότι όταν χρησιμοποιείται ο μικρότερος συντελεστής συναγωγής η θερμοκρασία του PCM πέφτει αρκετά σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές. Με τον τρόπο αυτό παρασύρεται και το δωμάτιο να ακολουθήσει την πτώση αυτή της θερμοκρασίας και παρά το γεγονός ότι η διαφορά θερμοκρασίας του PCM και του δωματίου είναι περίπου 2 °C, δεν είναι αρκετή ώστε να αυξήσει τόσο την εσωτερική θερμοκρασία. Έτσι, λοιπόν, εξηγείται το ότι όσο μικραίνει ο συντελεστής συναγωγής, τόσο μικραίνει και η εσωτερική θερμοκρασία τις ώρες μη ηλιοφάνειας.

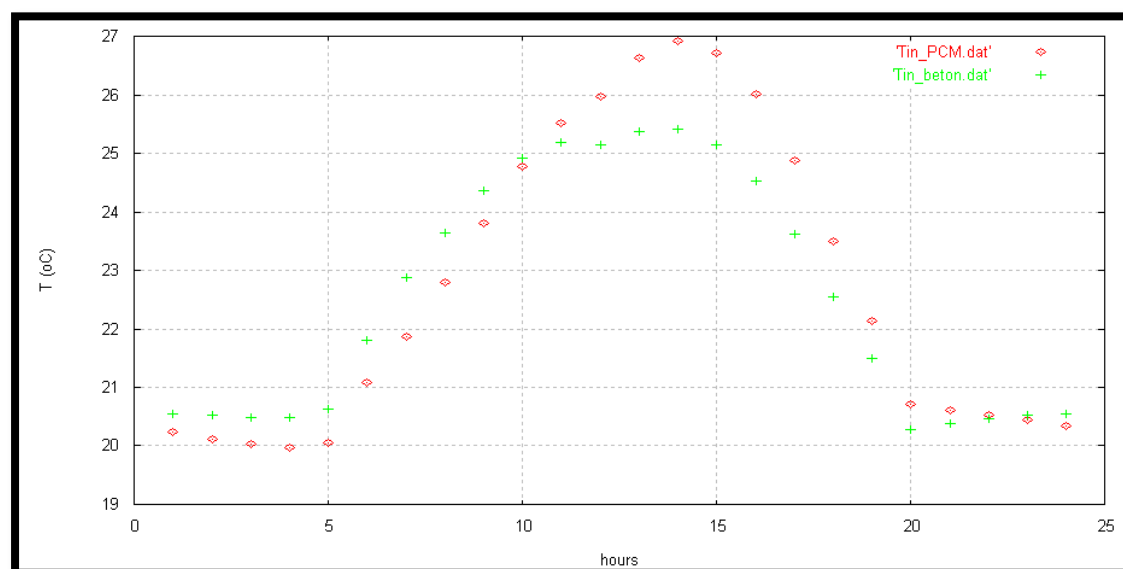
19.3 Παραμετρική διερεύνηση για την επιλογή του υλικού που θα τοποθετηθεί στο πάνελ της οροφής

Στην τρίτη παραμετρική μελέτη εξετάζεται η πιθανότητα να αντικατασταθεί το PCM με ένα άλλο υλικό το οποίο δεν αλλάζει φάση. Ο σκοπός αυτού του πειράματος είναι να εξαχθεί ένα συμπέρασμα για το κατά πόσο η αλλαγή φάσης οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα, δηλαδή εάν πλησιάζεται η θερμική άνεση. Για το σκοπό αυτό έχουν επιλεγεί δύο διαφορετικά υλικά. Το ένα είναι το μπετόν, το οποίο έχει πυκνότητα 2300 kg/m^3 , θερμική αγωγιμότητα $2.2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ και θερμοχωρητικότητα 880 kJ/kgK και το δεύτερο είναι ένα “φανταστικό” υλικό, το οποίο έχει τις ιδιότητες του PCM (πυκνότητα 1700 kg/m^3 , θερμική αγωγιμότητα $1.2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ και θερμοχωρητικότητα 7000 kJ/kgK) χωρίς όμως να παρουσιάζει αλλαγή φάσης, έχει δηλαδή σταθερή θερμοχωρητικότητα.

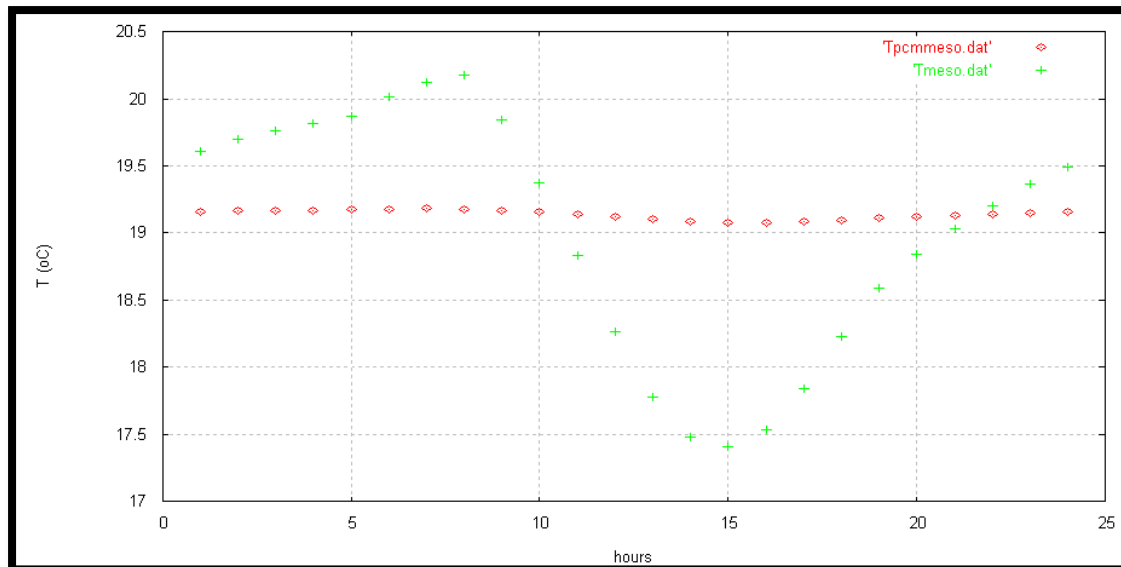
19.3.1 Τοποθέτηση μπετόν στο πάνελ της οροφής

Παρακάτω δίνονται συγκριτικά διαγράμματα της κατανομής της θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας του υλικού, όταν χρησιμοποιείται μπετόν και όταν χρησιμοποιείται PCM και για τους τέσσερις μήνες που διεξάγεται συνολικά η μελέτη.

▪ Μήνας Ιούνιος



Εικόνα 19.3.1 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Ιουνίου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια μπετόν (πράσινη καμπύλη).



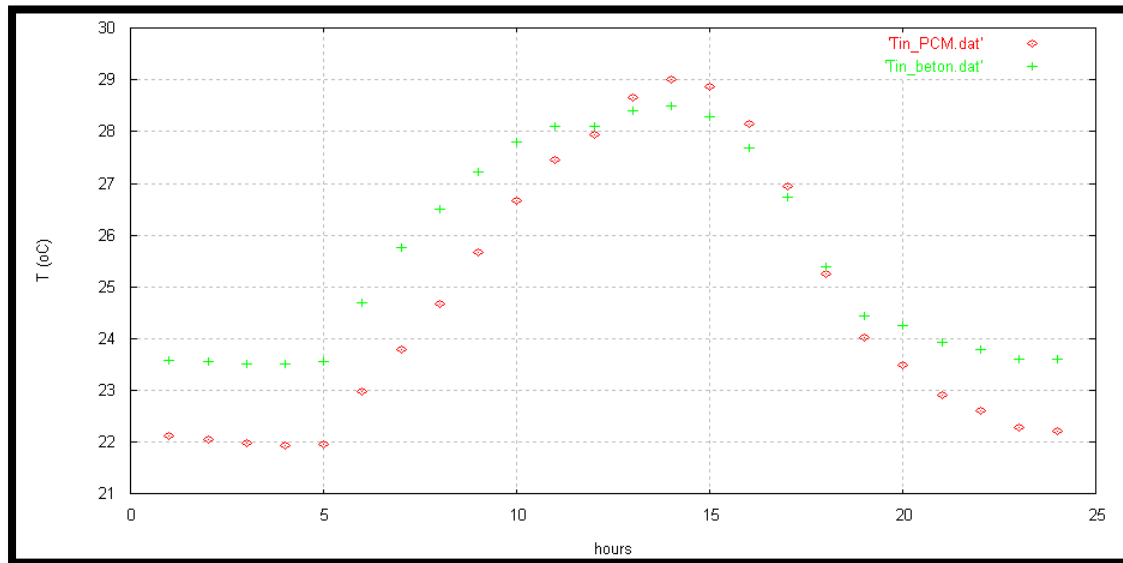
Εικόνα 19.3.2 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της θερμοκρασίας του υλικού κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Ιουνίου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια μπετόν (πράσινη καμπύλη).

Παρατηρώντας την Εικόνα 19.3.1 είναι εμφανές ότι όταν χρησιμοποιείται μπετόν η θερμοκρασία του δωματίου είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή που υπολογίζεται όταν χρησιμοποιείται PCM τις ώρες 22:00-10:00 για το μήνα Ιούνιο. Αυτό συμβαίνει διότι το μπετόν υστερεί σε σχέση με το PCM ως προς την αποθηκευτική του ικανότητα, χάνει δηλαδή πολύ πιο γρήγορα την ψύξη του εφόσον είναι και θερμικά πιο αγωγίμο από το PCM. Έτσι παρουσιάζει πολύ υψηλότερες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας τις ώρες αυτές από ότι το PCM. Κατά τη διάρκεια των ωρών 10:00-22:00, όμως, η εσωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη όταν χρησιμοποιείται μπετόν. Αυτό συμβαίνει γιατί το μπετόν έχει μεγαλύτερο συντελεστή αγωγής από ότι το PCM με αποτέλεσμα να μπορεί να διοχετεύει καλύτερα την ψύξη σε όλη τη μάζα του. Έτσι, τις ώρες της μεγάλης ηλιοφάνειας το μπετόν μπορεί και ψύχεται καλύτερα από ότι το PCM, γεγονός που δικαιολογεί τις χαμηλότερες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των ωρών αυτών.

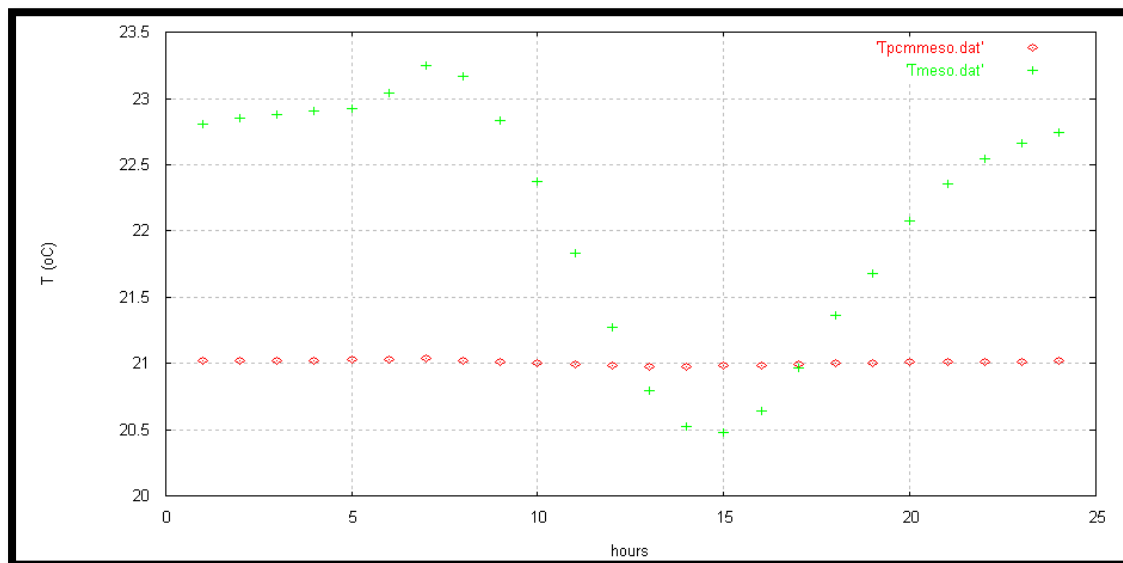
Παρατηρώντας την Εικόνα 19.3.2 είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του PCM είναι σχεδόν σταθερή όλο το εικοσιτετράωρο, που είναι και το ιδανικό. Η θερμοκρασία του μπετόν το μήνα Ιούνιο αυξάνεται έως τις 08:00, μειώνεται στη συνέχεια έως τις 15:00 σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτές του PCM και αυξάνεται εκ νέου μέχρι να φτάσει τη θερμοκρασία που είχε στη 01:00. Αυτό συμβαίνει γιατί το PCM χρησιμοποιεί τη θερμότητα που δέχεται για να αλλάξει φάση με συνέπεια η θερμοκρασία του να παραμένει σταθερή. Το μπετόν, αντίθετα, δεν έχει τη δυνατότητα να αλλάξει φάση κι έτσι όλη η θερμότητα που δέχεται χρησιμοποιείται μόνο για την ψύξη του, γεγονός που επικουρείται από την καλή

θερμική του αγωγιμότητα. Έτσι το μπετόν φτάνει σε πολύ υψηλότερες και χαμηλότερες θερμοκρασίες από το PCM, λόγω της κακής αποθηκευτικής του ικανότητας και της μεγάλης του αγωγιμότητας αντίστοιχα.

- Μήνας Ιούλιος



Εικόνα 19.3.3 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Ιουλίου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια μπετόν (πράσινη καμπύλη).



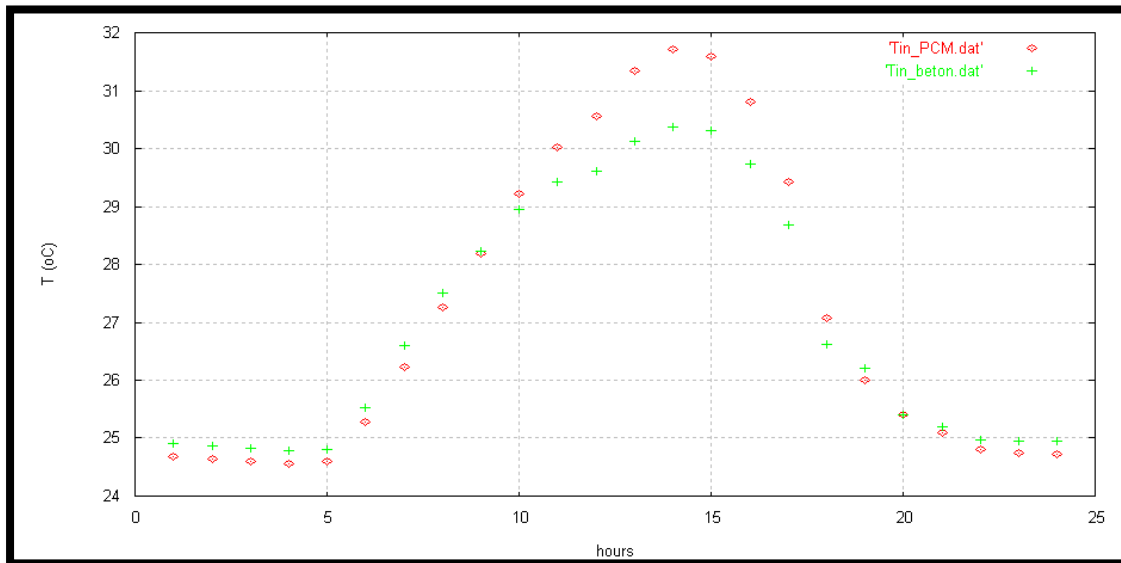
Εικόνα 19.3.4 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της θερμοκρασίας του υλικού κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Ιουλίου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια μπετόν (πράσινη καμπύλη).

Παρατηρώντας την Εικόνα 19.3.3 είναι εμφανές ότι όταν χρησιμοποιείται μπετόν η θερμοκρασία του δωματίου είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή που υπολογίζεται όταν χρησιμοποιείται PCM τις ώρες 18:00-10:00 για το μήνα Ιούλιο. Αυτό συμβαίνει διότι το

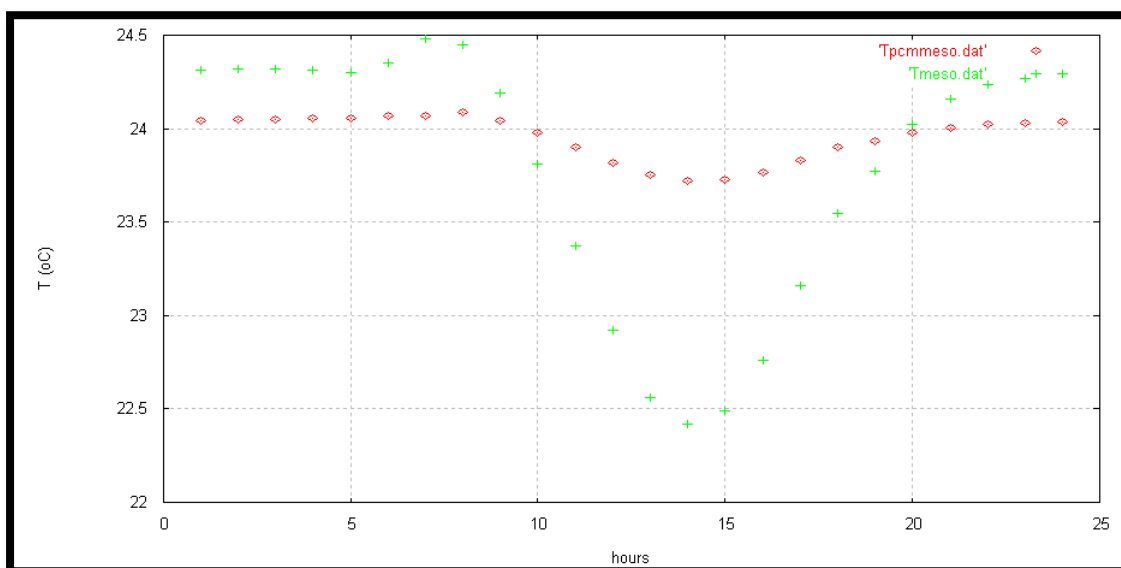
μπετόν υστερεί σε σχέση με το PCM ως προς την αποθηκευτική του ικανότητα, χάνει δηλαδή πολύ πιο γρήγορα την ψύξη του εφόσον είναι και θερμικά πιο αγώγιμο από το PCM. Έτσι παρουσιάζει πολύ υψηλότερες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας τις ώρες αυτές από ότι το PCM. Κατά τη διάρκεια των ωρών 11:00-17:00, όμως, η εσωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη όταν χρησιμοποιείται μπετόν. Αυτό συμβαίνει γιατί το μπετόν έχει μεγαλύτερο συντελεστή αγωγής από ότι το PCM με αποτέλεσμα να μπορεί να διοχετεύει καλύτερα την ψύξη σε όλη τη μάζα του. Έτσι, τις ώρες της μεγάλης ηλιοφάνειας το μπετόν μπορεί και ψύχεται καλύτερα από ότι το PCM, γεγονός που δικαιολογεί τις χαμηλότερες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των ωρών αυτών.

Παρατηρώντας την Εικόνα 19.3.4 είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του PCM είναι σχεδόν σταθερή όλο το εικοσιτετράωρο, που είναι και το ιδανικό. Η θερμοκρασία του μπετόν το μήνα Ιούλιο αυξάνεται έως τις 07:00, μειώνεται στη συνέχεια έως τις 15:00 σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτές του PCM και αυξάνεται εκ νέου μέχρι να φτάσει τη θερμοκρασία που είχε στη 01:00. Αυτό συμβαίνει γιατί το PCM χρησιμοποιεί τη θερμότητα που δέχεται για να αλλάξει φάση με συνέπεια η θερμοκρασία του να παραμένει σταθερή. Το μπετόν, αντίθετα, δεν έχει τη δυνατότητα να αλλάξει φάση κι έτσι όλη η θερμότητα που δέχεται χρησιμοποιείται μόνο για την ψύξη του, γεγονός που επικουρείται από την καλή θερμική του αγωγιμότητα. Έτσι το μπετόν φτάνει σε πολύ υψηλότερες και χαμηλότερες θερμοκρασίες από το PCM, λόγω της κακής αποθηκευτικής του ικανότητας και της μεγάλης του αγωγιμότητας αντίστοιχα.

- Μήνας Αύγουστος



Εικόνα 19.3.5 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Αυγούστου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια μπετόν (πράσινη καμπύλη).



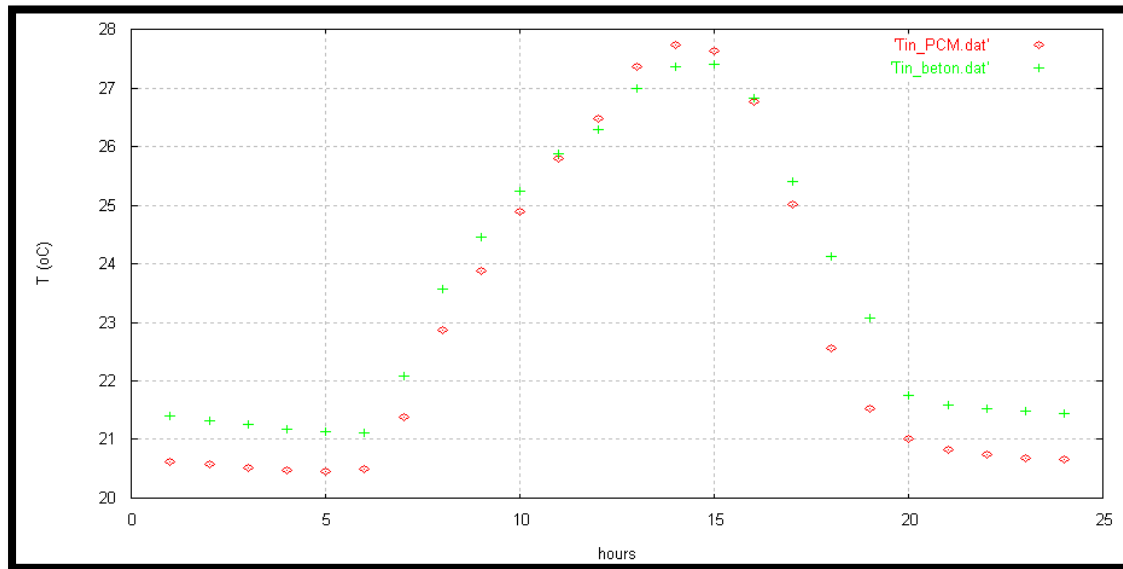
Εικόνα 19.3.6 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της θερμοκρασίας του υλικού κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Αυγούστου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια μπετόν (πράσινη καμπύλη).

Παρατηρώντας την Εικόνα 19.3.5 είναι εμφανές ότι όταν χρησιμοποιείται μπετόν η θερμοκρασία του δωματίου είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή που υπολογίζεται όταν χρησιμοποιείται PCM τις ώρες 17:00-10:00 για το μήνα Αύγουστο. Αυτό συμβαίνει διότι το

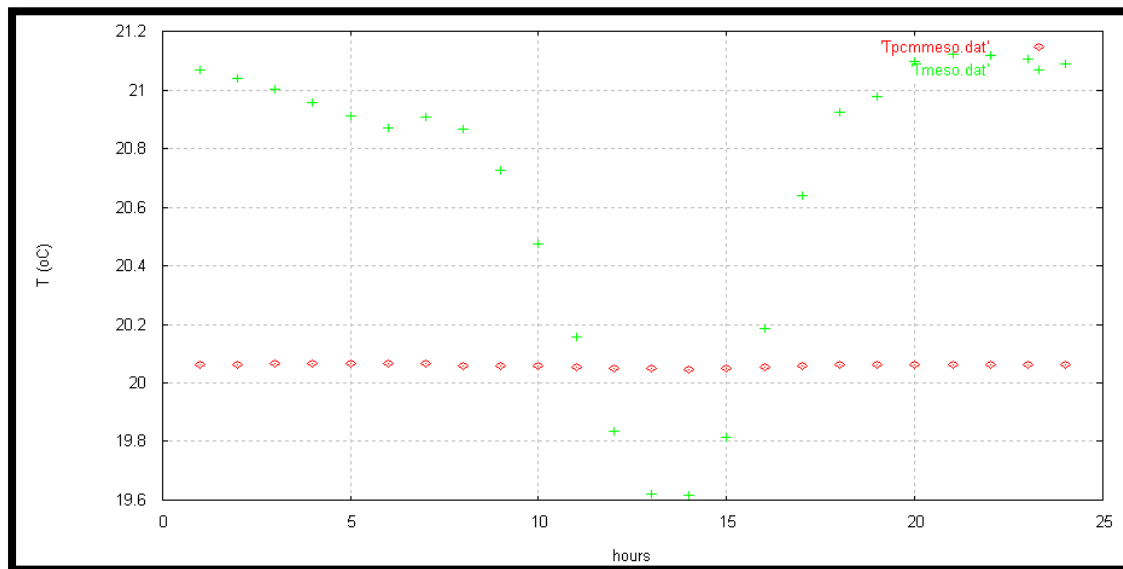
μπετόν υστερεί σε σχέση με το PCM ως προς την αποθηκευτική του ικανότητα, χάνει δηλαδή πολύ πιο γρήγορα την ψύξη του εφόσον είναι και θερμικά πιο αγώγιμο από το PCM. Έτσι παρουσιάζει πολύ υψηλότερες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας τις ώρες αυτές από ότι το PCM. Κατά τη διάρκεια των ωρών 10:00-16:00, όμως, η εσωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη όταν χρησιμοποιείται μπετόν. Αυτό συμβαίνει γιατί το μπετόν έχει μεγαλύτερο συντελεστή αγωγής από ότι το PCM με αποτέλεσμα να μπορεί να διοχετεύει καλύτερα την ψύξη σε όλη τη μάζα του. Έτσι, τις ώρες της μεγάλης ηλιοφάνειας το μπετόν μπορεί και ψύχεται καλύτερα από ότι το PCM, γεγονός που δικαιολογεί τις χαμηλότερες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των ωρών αυτών.

Παρατηρώντας την Εικόνα 19.3.6 είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του PCM είναι σχεδόν σταθερή όλο το εικοσιτετράωρο, που είναι και το ιδανικό. Η θερμοκρασία του μπετόν το μήνα Αύγουστο αυξάνεται έως τις 07:00, μειώνεται στη συνέχεια έως τις 14:00 σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτές του PCM και αυξάνεται εκ νέου μέχρι να φτάσει τη θερμοκρασία που είχε στη 01:00. Αυτό συμβαίνει γιατί το PCM χρησιμοποιεί τη θερμότητα που δέχεται για να αλλάξει φάση με συνέπεια η θερμοκρασία του να παραμένει σταθερή. Το μπετόν, αντίθετα, δεν έχει τη δυνατότητα να αλλάξει φάση κι έτσι όλη η θερμότητα που δέχεται χρησιμοποιείται μόνο για την ψύξη του, γεγονός που επικουρείται από την καλή θερμική του αγωγιμότητα. Έτσι το μπετόν φτάνει σε πολύ υψηλότερες και χαμηλότερες θερμοκρασίες από το PCM, λόγω της κακής αποθηκευτικής του ικανότητας και της μεγάλης του αγωγιμότητας αντίστοιχα.

- Μήνας Σεπτέμβριος



Εικόνα 19.3.7 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Σεπτεμβρίου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια μπετόν (πράσινη καμπύλη).



Εικόνα 19.3.8 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της θερμοκρασίας του υλικού κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Σεπτεμβρίου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια μπετόν (πράσινη καμπύλη).

Παρατηρώντας την Εικόνα 19.3.7 είναι εμφανές ότι όταν χρησιμοποιείται μπετόν η θερμοκρασία του δωματίου είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή που υπολογίζεται όταν

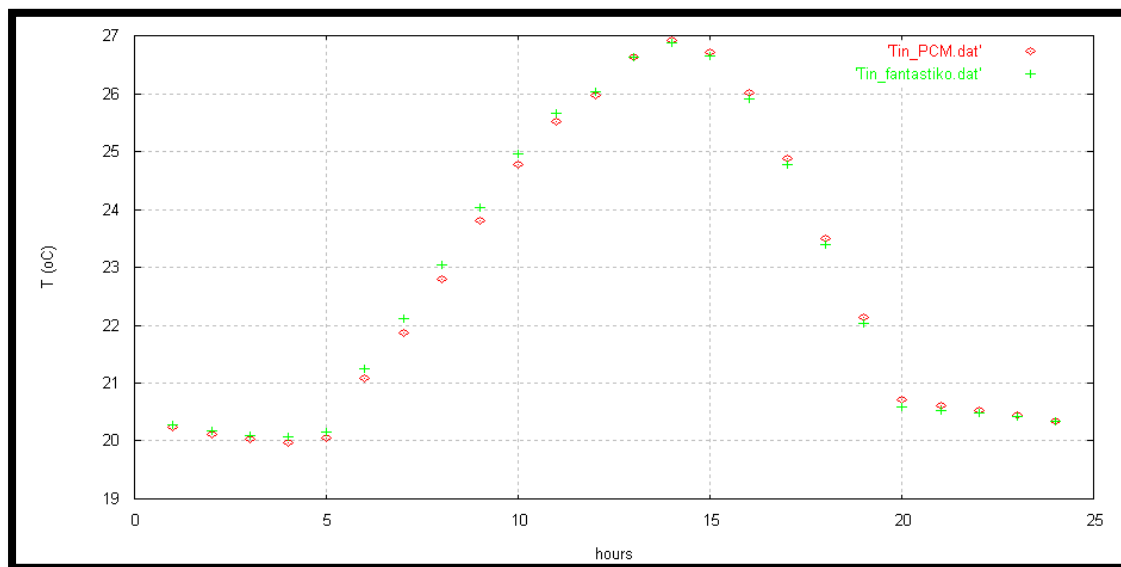
χρησιμοποιείται PCM τις ώρες 17:00-10:00 για το μήνα Σεπτέμβριο. Αυτό συμβαίνει διότι το μπετόν υστερεί σε σχέση με το PCM ως προς την αποθηκευτική του ικανότητα, χάνει δηλαδή πολύ πιο γρήγορα την ψύξη του εφόσον είναι και θερμικά πιο αγώγιμο από το PCM. Έτσι παρουσιάζει πολύ υψηλότερες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας τις ώρες αυτές από ότι το PCM. Κατά τη διάρκεια των ωρών 11:00-16:00, όμως, η εσωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη όταν χρησιμοποιείται μπετόν. Αυτό συμβαίνει γιατί το μπετόν έχει μεγαλύτερο συντελεστή αγωγής από ότι το PCM με αποτέλεσμα να μπορεί να διοχετεύει καλύτερα την ψύξη σε όλη τη μάζα του. Έτσι, τις ώρες της μεγάλης ηλιοφάνειας το μπετόν μπορεί και ψύχεται καλύτερα από ότι το PCM, γεγονός που δικαιολογεί τις χαμηλότερες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των ωρών αυτών.

Παρατηρώντας την Εικόνα 19.3.8 είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του PCM είναι σχεδόν σταθερή όλο το εικοσιτετράωρο, που είναι και το ιδανικό. Το Σεπτέμβριο η θερμοκρασία του μπετόν μειώνεται μέχρι τις 14:00, φτάνοντας σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτές του PCM, και αυξάνεται πάλι μέχρι τη 01:00. Αυτό συμβαίνει γιατί το PCM χρησιμοποιεί τη θερμότητα που δέχεται για να αλλάξει φάση με συνέπεια η θερμοκρασία του να παραμένει σταθερή. Το μπετόν, αντίθετα, δεν έχει τη δυνατότητα να αλλάξει φάση κι έτσι όλη η θερμότητα που δέχεται χρησιμοποιείται μόνο για την ψύξη του, γεγονός που επικουρείται από την καλή θερμική του αγωγιμότητα. Έτσι το μπετόν φτάνει σε πολύ υψηλότερες και χαμηλότερες θερμοκρασίες από το PCM, λόγω της κακής αποθηκευτικής του ικανότητας και της μεγάλης του αγωγιμότητας αντίστοιχα.

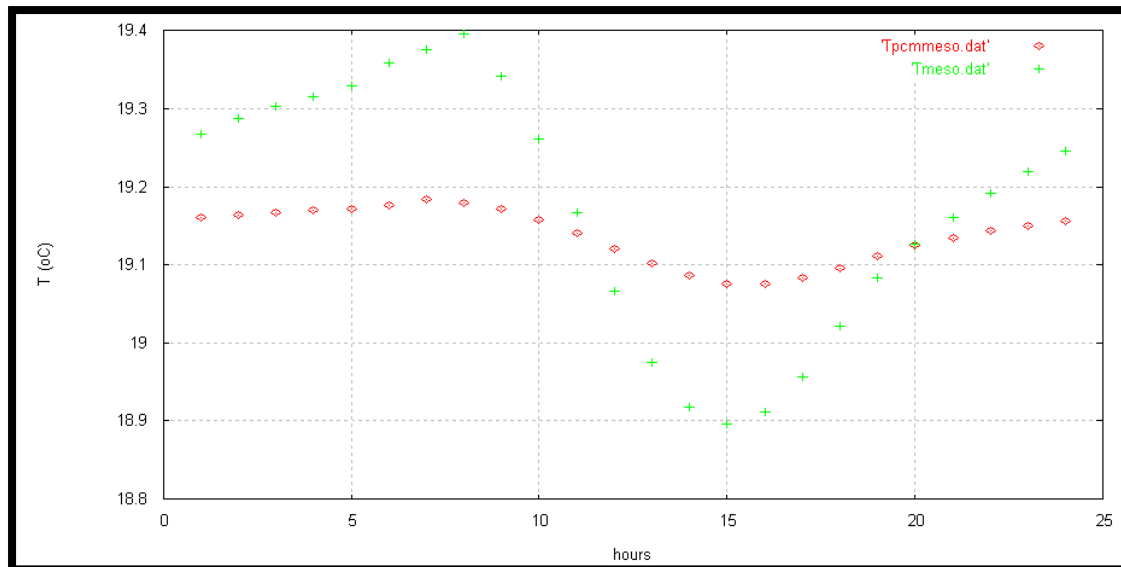
19.3.2 Τοποθέτηση “φανταστικού” υλικού στο πάνελ της οροφής

Παρακάτω δίνονται συγκριτικά διαγράμματα της κατανομής της θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας του υλικού, όταν χρησιμοποιείται “φανταστικό” υλικό και όταν χρησιμοποιείται PCM και για τους τέσσερις που διεξάγεται συνολικά η μελέτη.

▪ Μήνας Ιούνιος



Εικόνα 19.3.9 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Ιουνίου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια το “φανταστικό” υλικό (πράσινη καμπύλη).



Εικόνα 19.3.10 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της θερμοκρασίας του υλικού κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Ιουνίου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια το “φανταστικό” υλικό (πράσινη καμπύλη).

Εξετάζοντας την Εικόνα 19.3.9 παρατηρείται ότι η εσωτερική θερμοκρασία είναι σχεδόν ίση με αυτή που επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιείται το “φανταστικό” υλικό, σε σχέση με αυτή που υπολογίζεται στην περίπτωση του PCM, σε όλο το εικοσιτετράωρο. Αυτό συμβαίνει διότι τον Ιούνιο οι εξωτερικές θερμοκρασίες δεν είναι τόσο υψηλές και τα φορτία στο χώρο είναι μικρότερα. Έτσι το PCM δε χρησιμοποιεί σε μεγάλο βαθμό την ιδιότητά του να αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα και γι’ αυτό οι τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας των δύο υλικών είναι παραπλήσιες.

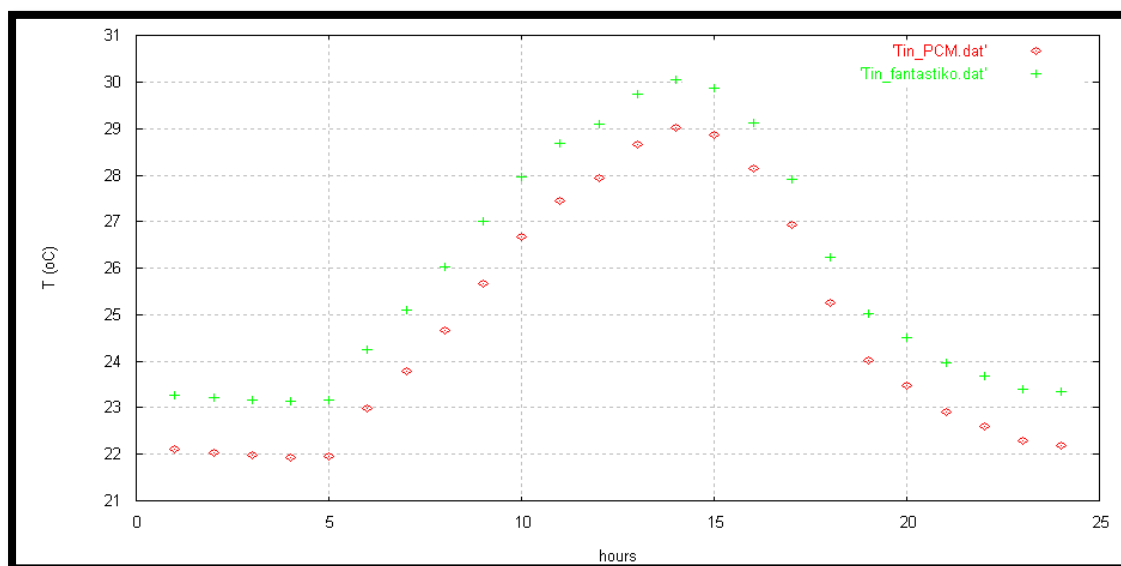
Παρατηρώντας την Εικόνα 19.3.10 είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του “φανταστικού” υλικού είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή του PCM κατά τη διάρκεια των ωρών 20:00-11:00. Αυτό συμβαίνει διότι το PCM όταν εισέρχεται στη διφασική περιοχή έχει πολύ μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα, μπορεί δηλαδή να απορροφήσει μεγαλύτερα ποσά ψύξης, με αποτέλεσμα να έχει μικρότερη θερμοκρασία. Επίσης, δεν παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στη θερμοκρασία του, αντίθετα με το “φανταστικό” υλικό, το οποίο τις ώρες της ηλιοφάνειας παρουσιάζει πτώση της θερμοκρασίας του. Αυτό αιτιολογείται εάν αναλογισθεί κανείς ότι το “φανταστικό” υλικό δεν χρησιμοποιεί την ψύξη του για να αλλάξει φάση, τη χρησιμοποιεί εξ’ ολοκλήρου για να ψυχθεί. Είναι αναμενόμενο ότι τις ώρες 12:00-19:00 το “φανταστικό” υλικό πέφτει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτές του PCM, διότι εκείνες τις ώρες η ψύξη είναι μεγαλύτερη. Η θερμοκρασία του “φανταστικού” υλικού πέφτει σε χαμηλότερες τιμές από αυτές του PCM, γιατί το PCM χρησιμοποιεί ένα μέρος της θερμότητας για να αλλάξει φάση κι έτσι η θερμοκρασία του δε

μειώνεται σε τόσο μεγάλο βαθμό, είναι σχεδόν σταθερή, σε αντίθεση με το “φανταστικό” υλικό που ψύχεται περισσότερο εφόσον δεν αλλάζει φάση.

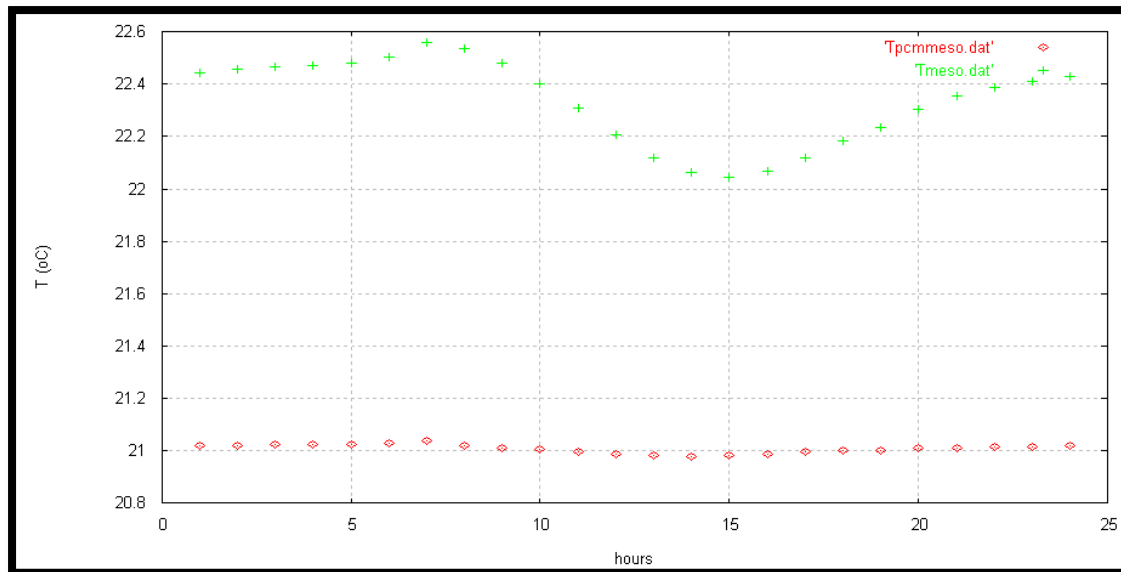
Συγκρίνοντας τις Εικόνες 19.3.2 και 19.3.10 παρατηρείται ότι η μικρότερη θερμοκρασία του μπετόν είναι 17.4 °C ενώ του “φανταστικού υλικού” είναι 18.9 °C. Είναι λογικό το μπετόν, που έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, να ψύχεται περισσότερο από ότι το “φανταστικό” υλικό.

Συνολικά εξάγεται το συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερη η χρήση του μπετόν σε σύγκριση με το “φανταστικό” υλικό, εφόσον παρουσιάζεται καλύτερη κατανομή εσωτερικής θερμοκρασίας (πιο κοντά στα όρια θερμικής άνεσης). Αυτό ισχύει γιατί το μπετόν έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και μπορεί να ψυχθεί πολύ πιο εύκολα σε όλη του τη μάζα. Σε σύγκριση, όμως, με το PCM δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικό. Τις περισσότερες ώρες του εικοσιτετράωρου δίνει υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία, γεγονός που αιτιολογείται από τη μεγαλύτερη αποθήκευση ψύξης που καταφέρνει το PCM λόγω της αλλαγής φάσης του.

▪ Μήνας Ιούλιος



Εικόνα 19.3.11 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Ιουλίου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια το “φανταστικό” υλικό (πράσινη καμπύλη).



Εικόνα 19.3.12 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της θερμοκρασίας του υλικού κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Ιουλίου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια το “φανταστικό” υλικό (πράσινη καμπύλη).

Εξετάζοντας την Εικόνα 19.3.11 παρατηρείται ότι η εσωτερική θερμοκρασία είναι καθ’ όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου είναι περίπου 1 °C υψηλότερη όταν χρησιμοποιείται το “φανταστικό” υλικό, σε σχέση με αυτή που υπολογίζεται στην περίπτωση του PCM. Αυτό συμβαίνει διότι το “φανταστικό” υλικό έχει σταθερή θερμοχωρητικότητα και σχετικά μικρή εάν συγκριθεί με εκείνη του PCM. Έτσι δεν μπορεί να απορροφήσει τόσο μεγάλα ποσά ψύξης, με αποτέλεσμα να αποδίδει πολύ λιγότερη ψύξη στο χώρο.

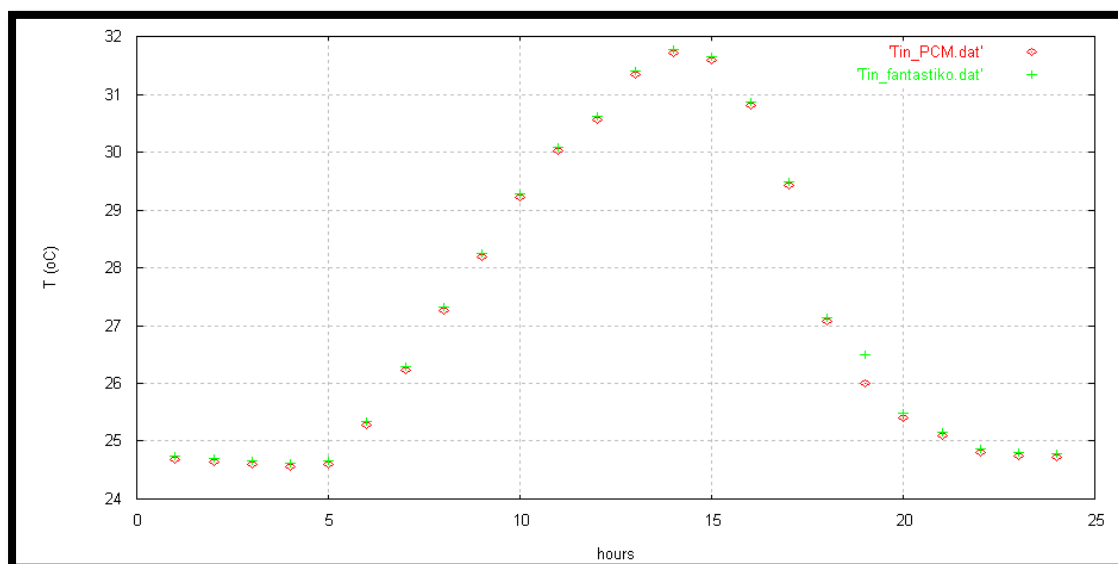
Παρατηρώντας την Εικόνα 19.3.10 είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του “φανταστικού” υλικού είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή του PCM. Αυτό συμβαίνει διότι το PCM όταν εισέρχεται στη διφασική περιοχή έχει πολύ μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα, μπορεί δηλαδή να απορροφήσει μεγαλύτερα ποσά ψύξης, με αποτέλεσμα να έχει μικρότερη θερμοκρασία. Επίσης, δεν παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στη θερμοκρασία του, αντίθετα με το “φανταστικό” υλικό, το οποίο τις ώρες της ηλιοφάνειας παρουσιάζει πτώση της θερμοκρασίας του. Αυτό αιτιολογείται εάν αναλογισθεί κανείς ότι το “φανταστικό” υλικό δεν χρησιμοποιεί την ψύξη του για να αλλάξει φάση, τη χρησιμοποιεί εξ’ ολοκλήρου για να ψυχθεί. Θεωρητικά θα έπρεπε κάποιες ώρες η θερμοκρασία του “φανταστικού” υλικού να ήταν μικρότερη από αυτή του PCM, δεδομένου ότι το PCM χρησιμοποιεί ένα μέρος της θερμότητας για να αλλάξει φάση με αποτέλεσμα να ψύχεται λιγότερο. Αυτό δε συμβαίνει στην περίπτωση του Ιουλίου εξαιτίας των μεγάλων θερμικών

φορτίων που δέχεται ο χώρος, τα οποία θερμαίνουν σε ένα μέρος και το “φανταστικό” υλικό, εκτός από το εσωτερικό του χώρου.

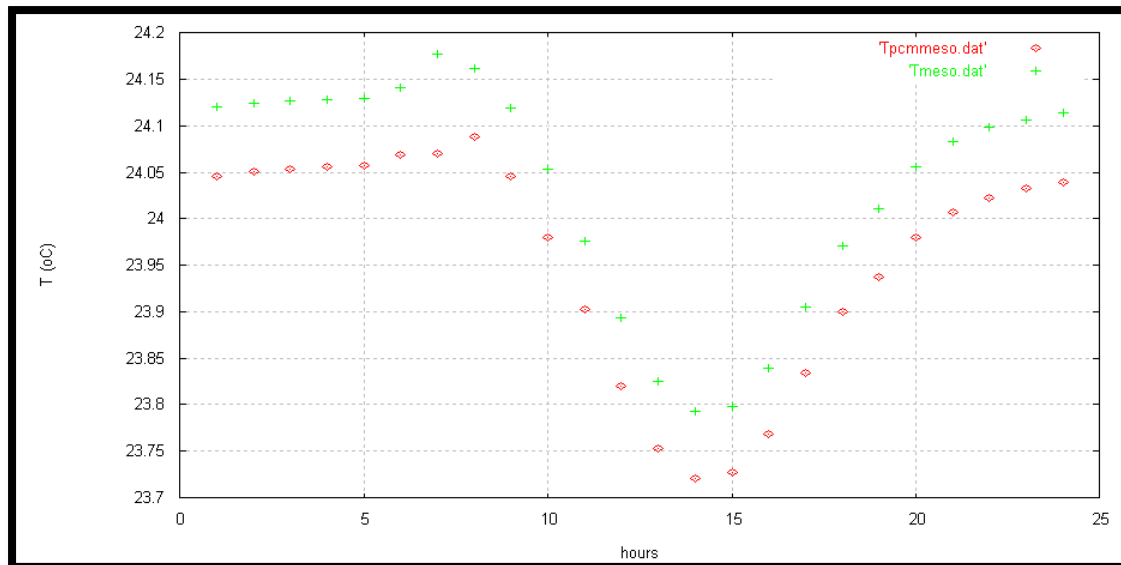
Συγκρίνοντας τις Εικόνες 19.3.4 και 19.3.12 παρατηρείται ότι η μικρότερη θερμοκρασία του μπετόν είναι 20.5 °C ενώ του “φανταστικού υλικού” είναι 22 °C. Είναι λογικό το μπετόν, που έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, να ψύχεται περισσότερο από ότι το “φανταστικό” υλικό.

Συνολικά εξάγεται το συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερη η χρήση του μπετόν σε σύγκριση με το “φανταστικό” υλικό, εφόσον παρουσιάζεται καλύτερη κατανομή εσωτερικής θερμοκρασίας (πιο κοντά στα όρια θερμικής άνεσης). Αυτό ισχύει γιατί το μπετόν έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και μπορεί να ψυχθεί πολύ πιο εύκολα σε όλη του τη μάζα. Σε σύγκριση, όμως, με το PCM δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικό. Τις περισσότερες ώρες του εικοσιτετράωρου δίνει υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία, γεγονός που αιτιολογείται από τη μεγαλύτερη αποθήκευση ψύξης που καταφέρνει το PCM λόγω της αλλαγής φάσης του.

▪ Μήνας Αύγουστος



Εικόνα 19.3.13 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Αυγούστου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια το “φανταστικό” υλικό (πράσινη καμπύλη).



Εικόνα 19.3.14 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της θερμοκρασίας του υλικού κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Αυγούστου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια το “φανταστικό” υλικό (πράσινη καμπύλη).

Εξετάζοντας την Εικόνα 19.3.13 παρατηρείται ότι η εσωτερική θερμοκρασία είναι σχεδόν ίση με αυτή που επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιείται το “φανταστικό” υλικό, σε σχέση με αυτή που υπολογίζεται στην περίπτωση του PCM, σε όλο το εικοσιτετράωρο. Αυτό συμβαίνει διότι τον Ιούνιο οι εξωτερικές θερμοκρασίες δεν είναι τόσο υψηλές και τα φορτία στο χώρο είναι μικρότερα. Έτσι το PCM δε χρησιμοποιεί σε μεγάλο βαθμό την ιδιότητά του να αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα και γι’ αυτό οι τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας των δύο υλικών είναι παραπλήσιες.

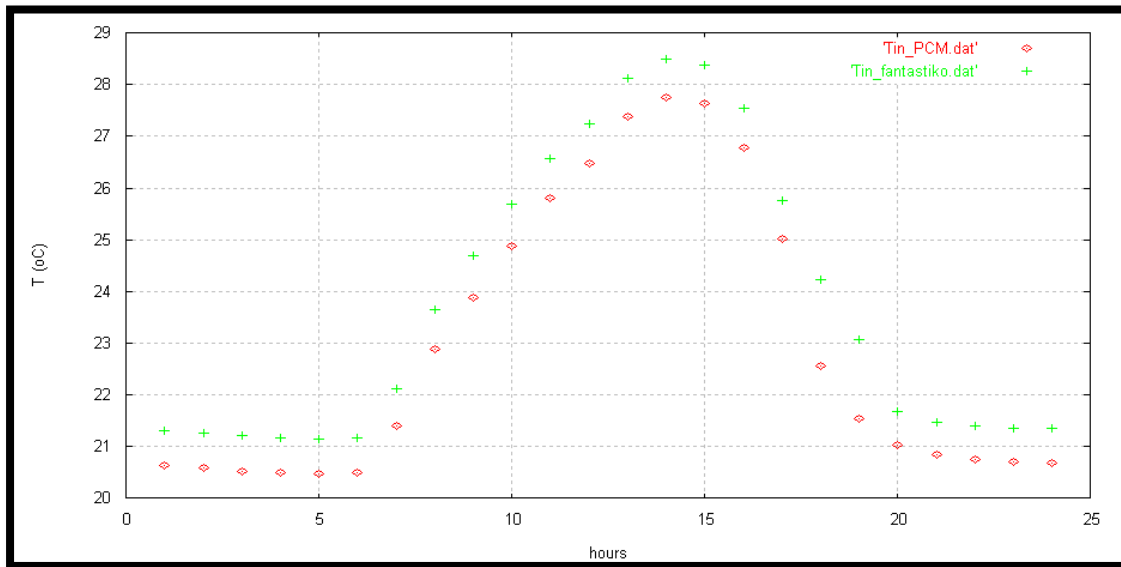
Παρατηρώντας την Εικόνα 19.3.14 είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του “φανταστικού” υλικού είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή του PCM. Αυτό συμβαίνει διότι το PCM όταν εισέρχεται στη διφασική περιοχή έχει πολύ μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα, μπορεί δηλαδή να απορροφήσει μεγαλύτερα ποσά ψύξης, με αποτέλεσμα να έχει μικρότερη θερμοκρασία. Επίσης, δεν παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στη θερμοκρασία του, αντίθετα με το “φανταστικό” υλικό, το οποίο τις ώρες της ηλιοφάνειας παρουσιάζει πτώση της θερμοκρασίας του. Αυτό αιτιολογείται εάν αναλογισθεί κανείς ότι το “φανταστικό” υλικό δεν χρησιμοποιεί την ψύξη του για να αλλάξει φάση, τη χρησιμοποιεί εξ’ ολοκλήρου για να ψυχθεί. Θεωρητικά θα έπρεπε κάποιες ώρες η θερμοκρασία του “φανταστικού” υλικού να ήταν μικρότερη από αυτή του PCM, δεδομένου ότι το PCM χρησιμοποιεί ένα μέρος της θερμότητας για να αλλάξει φάση με αποτέλεσμα να ψύχεται λιγότερο. Αυτό δε συμβαίνει στην περίπτωση του Ιουλίου εξαιτίας των μεγάλων θερμικών φορτίων που δέχεται ο χώρος, τα οποία θερμαίνουν σε ένα μέρος και το “φανταστικό”

υλικό, εκτός από το εσωτερικό του χώρου. Τέλος, είναι εμφανές ότι τα δύο υλικά βρίσκονται πολύ κοντά θερμοκρασιακά σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, γεγονός που αιτιολογείται από το ότι το PCM τον Αύγουστο δεν χρησιμοποιείται καθόλου σαν υλικό αλλαγής φάσης. Άρα χρησιμοποιεί όλη τη θερμότητα που δέχεται για να θερμανθεί και όχι για να αλλάξει φάση, όπως ακριβώς συμβαίνει και με το “φανταστικό” υλικό.

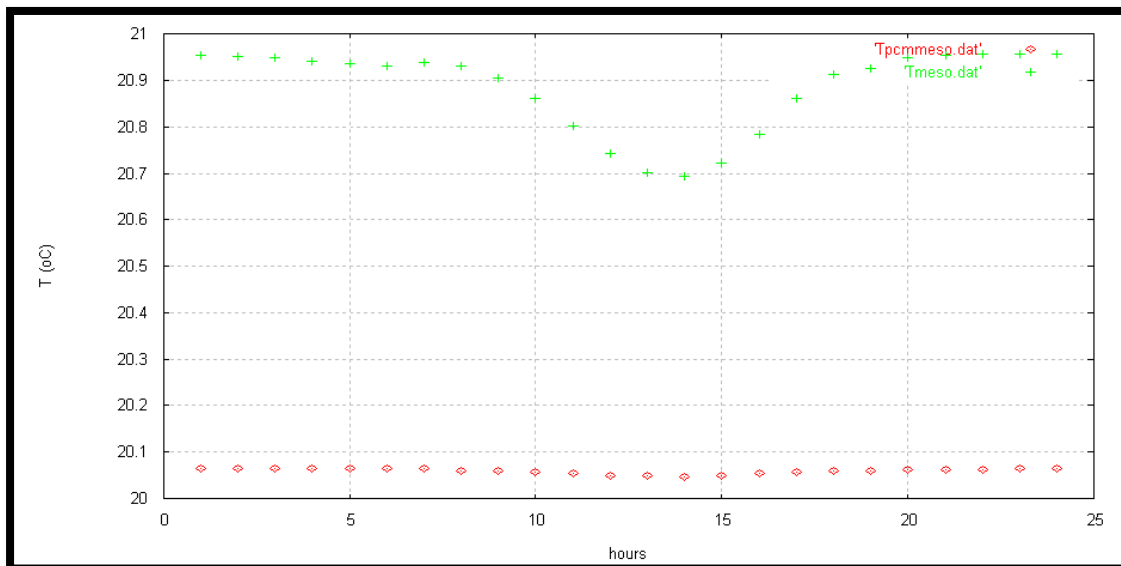
Συγκρίνοντας τις Εικόνες 19.3.6 και 19.3.14 παρατηρείται ότι η μικρότερη θερμοκρασία του μπετόν είναι 22.4 °C ενώ του “φανταστικού υλικού” είναι 23.71 °C. Είναι λογικό το μπετόν, που έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, να ψύχεται περισσότερο από ότι το “φανταστικό” υλικό.

Συνολικά εξάγεται το συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερη η χρήση του μπετόν σε σύγκριση με το “φανταστικό” υλικό, εφόσον παρουσιάζεται καλύτερη κατανομή εσωτερικής θερμοκρασίας (πιο κοντά στα όρια θερμικής άνεσης). Αυτό ισχύει γιατί το μπετόν έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και μπορεί να ψυχθεί πολύ πιο εύκολα σε όλη του τη μάζα. Σε σύγκριση, όμως, με το PCM δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικό. Τις περισσότερες ώρες του εικοσιτετράωρου δίνει υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία, γεγονός που αιτιολογείται από τη μεγαλύτερη αποθήκευση ψύξης που καταφέρνει το PCM λόγω της αλλαγής φάσης του.

- Μήνας Σεπτέμβριος



Εικόνα 19.3.15 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Σεπτεμβρίου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια το “φανταστικό” υλικό (πράσινη καμπύλη).



Εικόνα 19.3.16 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της θερμοκρασίας του υλικού κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Σεπτεμβρίου, χρησιμοποιώντας αρχικά PCM (κόκκινη καμπύλη) και στη συνέχεια το “φανταστικό” υλικό (πράσινη καμπύλη).

Εξετάζοντας την Εικόνα 19.3.15 παρατηρείται ότι η εσωτερική θερμοκρασία είναι καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου είναι περίπου 1 °C υψηλότερη όταν χρησιμοποιείται το “φανταστικό” υλικό, σε σχέση με αυτή που υπολογίζεται στην περίπτωση του PCM. Αυτό συμβαίνει διότι το “φανταστικό” υλικό έχει σταθερή θερμοχωρητικότητα και σχετικά μικρή εάν συγκριθεί με εκείνη του PCM. Έτσι δεν μπορεί να απορροφήσει τόσο μεγάλα ποσά ψύξης, με αποτέλεσμα να αποδίδει πολύ λιγότερη ψύξη στο χώρο.

Παρατηρώντας την Εικόνα 19.3.16 είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του “φανταστικού” υλικού είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή του PCM. Αυτό συμβαίνει διότι το PCM όταν εισέρχεται στη διαφασική περιοχή έχει πολύ μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα, μπορεί δηλαδή να απορροφήσει μεγαλύτερα ποσά ψύξης, με αποτέλεσμα να έχει μικρότερη θερμοκρασία. Επίσης, δεν παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στη θερμοκρασία του, αντίθετα με το “φανταστικό” υλικό, το οποίο τις ώρες της ηλιοφάνειας παρουσιάζει πτώση της θερμοκρασίας του. Αυτό αιτιολογείται εάν αναλογισθεί κανείς ότι το “φανταστικό” υλικό δεν χρησιμοποιεί την ψύξη του για να αλλάξει φάση, τη χρησιμοποιεί εξ' ολοκλήρου για να ψυχθεί. Θεωρητικά θα έπρεπε κάποιες ώρες η θερμοκρασία του “φανταστικού” υλικού να ήταν μικρότερη από αυτή του PCM, δεδομένου ότι το PCM χρησιμοποιεί ένα μέρος της θερμότητας για να αλλάξει φάση με αποτέλεσμα να ψύχεται λιγότερο. Αυτό δε συμβαίνει στην περίπτωση του Ιουλίου εξαιτίας των μεγάλων θερμικών φορτίων που δέχεται ο χώρος, τα οποία θερμαίνουν σε ένα μέρος και το “φανταστικό” υλικό, εκτός από το εσωτερικό του χώρου.

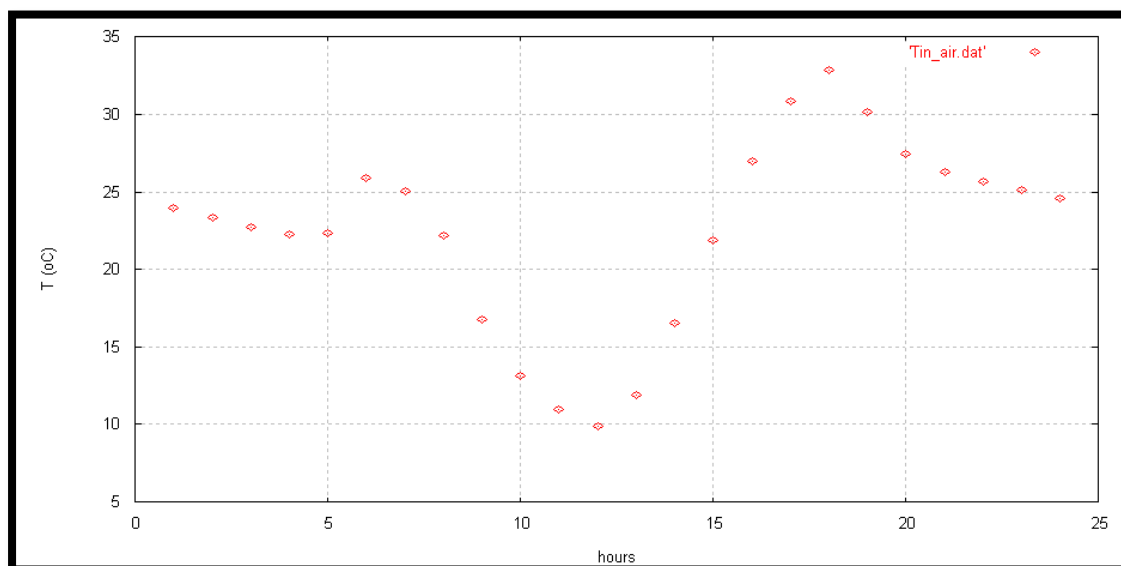
Συγκρίνοντας τις Εικόνες 19.3.8 και 19.3.16 παρατηρείται ότι η μικρότερη θερμοκρασία του μπετόν είναι 19.6 °C ενώ του “φανταστικού υλικού” είναι 20.2 °C. Είναι λογικό το μπετόν, που έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, να ψύχεται περισσότερο από ότι το “φανταστικό” υλικό.

Συνολικά εξάγεται το συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερη η χρήση του μπετόν σε σύγκριση με το “φανταστικό” υλικό, εφόσον παρουσιάζεται καλύτερη κατανομή εσωτερικής θερμοκρασίας (πιο κοντά στα όρια θερμικής άνεσης). Αυτό ισχύει γιατί το μπετόν έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και μπορεί να ψυχθεί πολύ πιο εύκολα σε όλη του τη μάζα. Σε σύγκριση, όμως, με το PCM δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικό. Τις περισσότερες ώρες του εικοσιτετραώρου δίνει υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία, γεγονός που αιτιολογείται από τη μεγαλύτερη αποθήκευση ψύξης που καταφέρνει το PCM λόγω της αλλαγής φάσης του.

19.4 Παραμετρική διερεύνηση άμεσης ψύξης του χώρου χωρίς την τοποθέτηση πάνελ

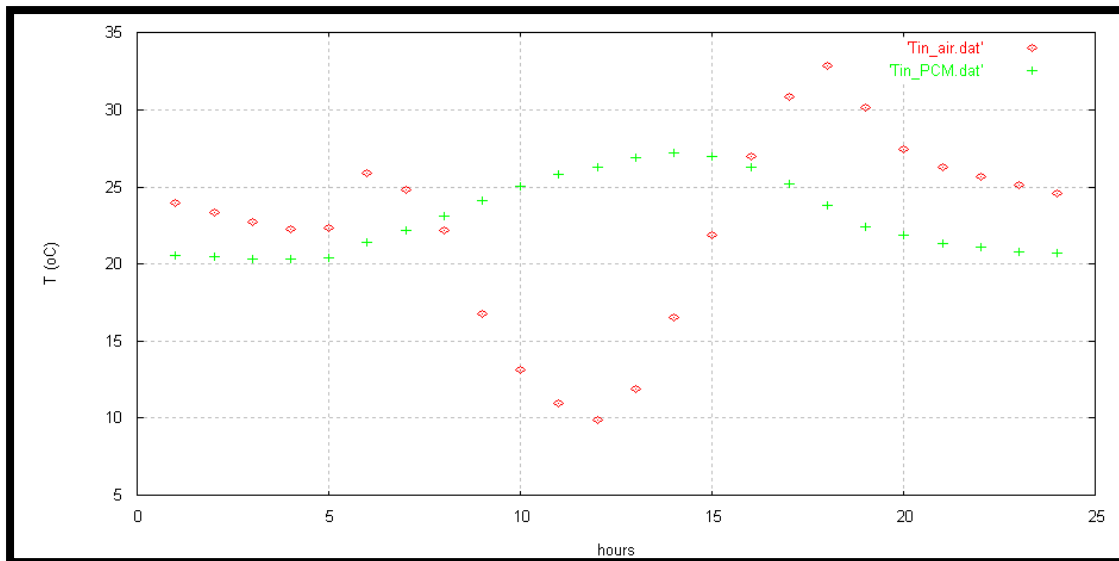
Στην παραμετρική αυτή μελέτη θα εξετασθεί η περίπτωση να αφαιρεθεί εξ' ολοκλήρου το πάνελ της οροφής και η ψύξη να εισέρχεται κατευθείαν στο χώρο. Με τον τρόπο αυτό τα αποτελέσματα της ψύξης θα είναι περισσότερο εμφανή εφόσον δε θα χάνεται κάποιο ποσό για να ψύξει το υλικό του πάνελ. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας και για τους τέσσερις μήνες που διεξάγεται συνολικά η μελέτη.

▪ Μήνας Ιούνιος



Εικόνα 19.4.1 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας την 21^η ημέρα του Ιουνίου όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο.

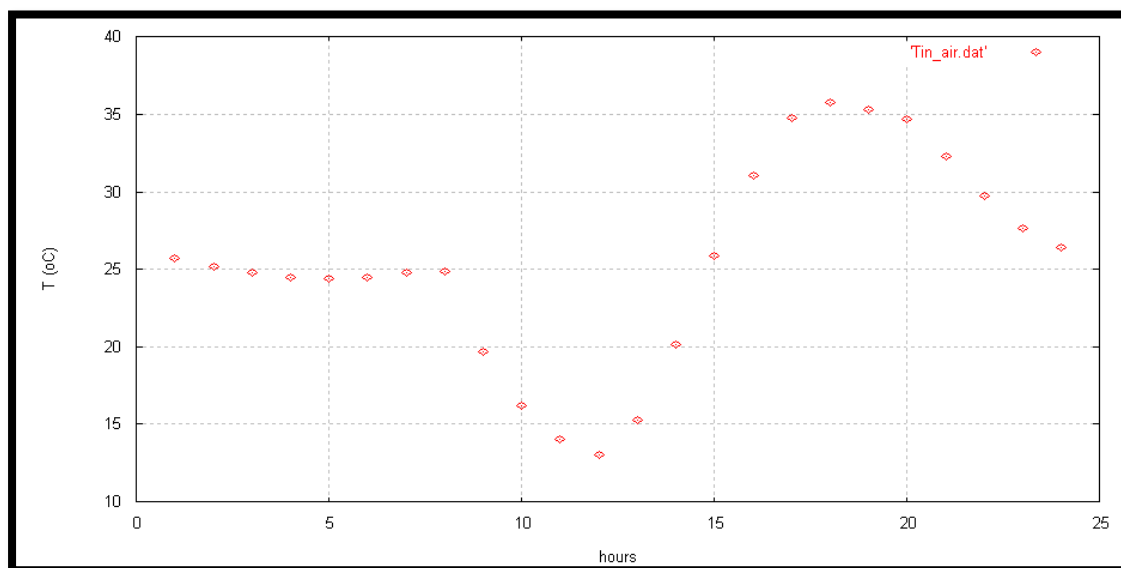
Παρατηρώντας την Εικόνα 19.4.1 είναι εμφανές ότι τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία έχει πολύ υψηλές τιμές. Στην αρχή της ηλιοφάνειας (07:00) αρχίζει η πτώση της εσωτερικής θερμοκρασίας μέχρι περίπου τους 10 °C στις 12:00, όπου και παρουσιάζεται η μεγαλύτερη προσπίπτουσα ακτινοβολία στους συλλέκτες, άρα και η μεγαλύτερη ψύξη. Στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξάνεται έως το πέρας των ωρών της ηλιοφάνειας (18:00) και στη συνέχεια μειώνεται έως ότου φτάσει τη θερμοκρασία που είχε ο χώρος στην αρχή της νύχτας (01:00). Είναι γεγονός ότι τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή, ενώ τις ώρες της ψύξης φτάνει σε πολύ χαμηλές τιμές. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει κάποιο υλικό το οποίο θα αποθηκεύει την ψύξη και θα εξισορροπεί τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.



Εικόνα 19.4.2 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας για ψύξη του χώρου με χρήση PCM (πράσινη καμπύλη) και άμεση ψύξη (κόκκινη καμπύλη).

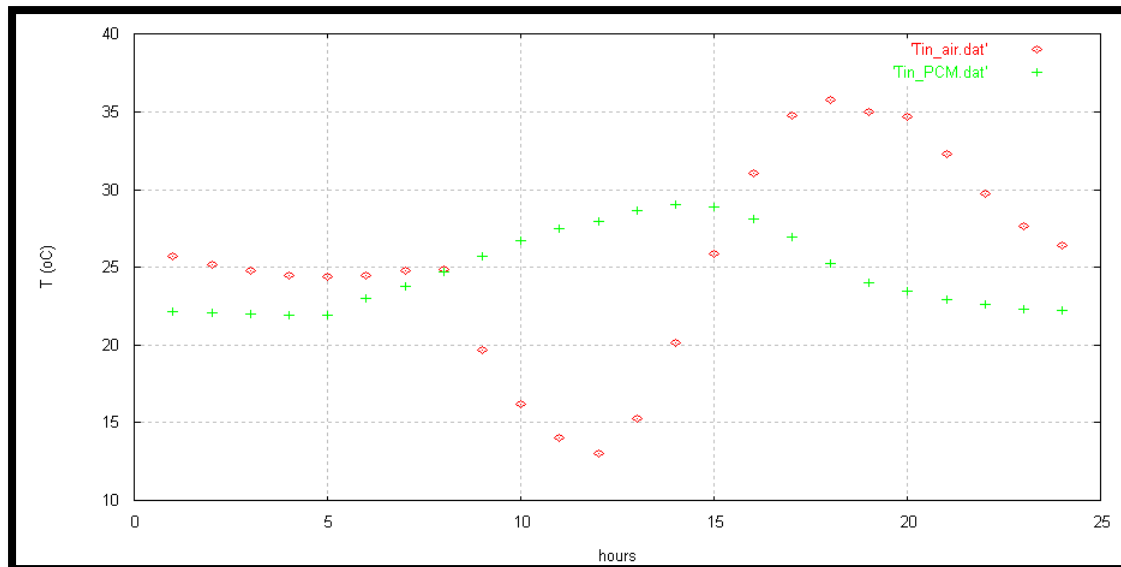
Παρατηρώντας την Εικόνα 19.4.2 είναι εμφανές ότι με τη χρήση του PCM η κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι περισσότερο ομαλή από αυτή που προκύπτει όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο. Επίσης, η εσωτερική θερμοκρασία φτάνει σε τιμές πολύ υψηλότερες από εκείνες που υπολογίζονται όταν χρησιμοποιείται το PCM. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, αυτό ισχύει διότι το PCM αποθηκεύει ψύξη και την προσφέρει στο χώρο σταδιακά χωρίς να την εξαντλεί. Οπότε ακόμη και τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία παραμένει σε χαμηλές τιμές, εφόσον το PCM μπορεί και ψύχει ακόμη το χώρο. Αντίθετα, όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο με το πέρας των ωρών ηλιοφάνειας, όταν δηλαδή το σύστημα τίθεται εκτός λειτουργίας, η εσωτερική θερμοκρασία αυξάνεται αισθητά. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση του PCM σε πάνελ οροφής δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από όταν η ψύξη εισέρχεται κατευθείαν στο χώρο, αποτελέσματα που προσφέρουν θερμική άνεση.

▪ Μήνας Ιούλιος



Εικόνα 19.4.3 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας την 21^η ημέρα του Ιουλίου όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο.

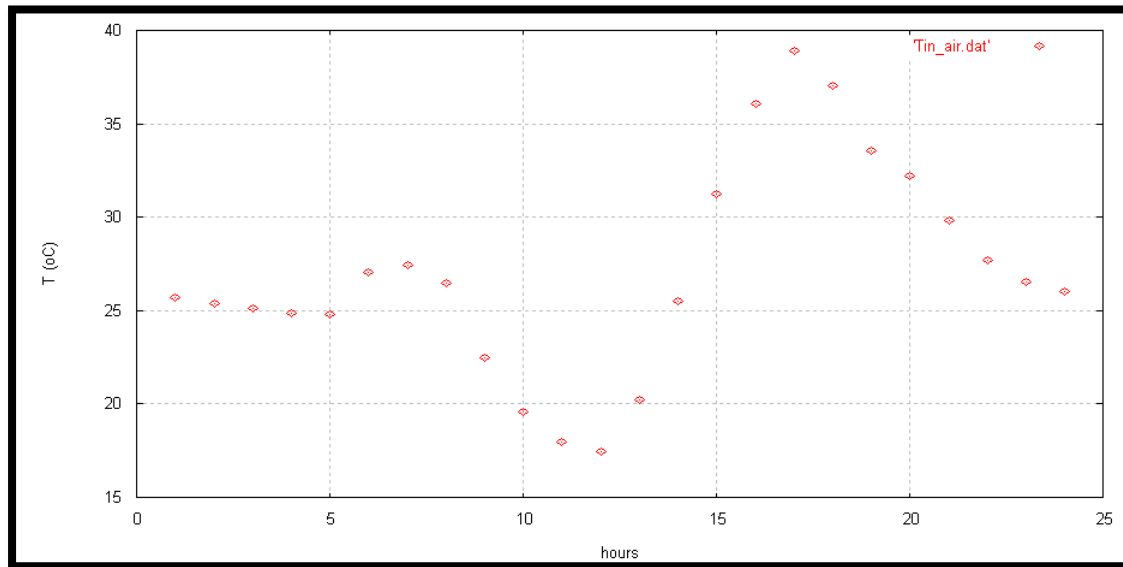
Παρατηρώντας την Εικόνα 19.4.3 είναι εμφανές ότι τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία έχει πολύ υψηλές τιμές. Στην αρχή της ηλιοφάνειας (07:00) αρχίζει η πτώση της εσωτερικής θερμοκρασίας μέχρι περίπου τους 13 °C στις 12:00, όπου και παρουσιάζεται η μεγαλύτερη προσπίπτουσα ακτινοβολία στους συλλέκτες, άρα και η μεγαλύτερη ψύξη. Στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξάνεται έως το πέρας των ωρών της ηλιοφάνειας (18:00) και στη συνέχεια μειώνεται έως ότου φτάσει τη θερμοκρασία που είχε ο χώρος στην αρχή της νύχτας (01:00). Είναι γεγονός ότι τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή, ενώ τις ώρες της ψύξης φτάνει σε πολύ χαμηλές τιμές. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει κάποιο υλικό το οποίο θα αποθηκεύει την ψύξη και θα εξισορροπεί τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.



Εικόνα 19.4.4 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας για ψύξη του χώρου με χρήση PCM (πράσινη καμπύλη) και άμεση ψύξη (κόκκινη καμπύλη).

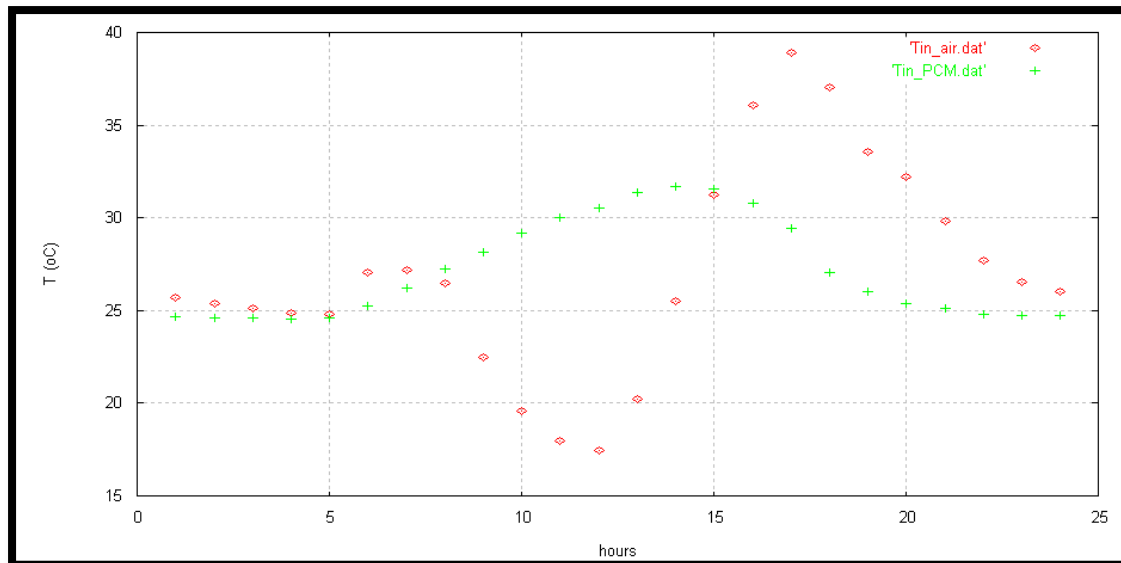
Παρατηρώντας την Εικόνα 19.4.4 είναι εμφανές ότι με τη χρήση του PCM η κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι περισσότερο ομαλή από αυτή που προκύπτει όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο. Επίσης, η εσωτερική θερμοκρασία φτάνει σε τιμές πολύ υψηλότερες από εκείνες που υπολογίζονται όταν χρησιμοποιείται το PCM. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, αυτό ισχύει διότι το PCM αποθηκεύει ψύξη και την προσφέρει στο χώρο σταδιακά χωρίς να την εξαντλεί. Οπότε ακόμη και τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία παραμένει σε χαμηλές τιμές, εφόσον το PCM μπορεί και ψύχει ακόμη το χώρο. Αντίθετα, όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο με το πέρας των ωρών ηλιοφάνειας, όταν δηλαδή το σύστημα τίθεται εκτός λειτουργίας, η εσωτερική θερμοκρασία αυξάνεται αισθητά. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση του PCM σε πάνελ οροφής δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από όταν η ψύξη εισέρχεται κατευθείαν στο χώρο, αποτελέσματα που προσφέρουν θερμική άνεση.

- Μήνας Αύγουστος



Εικόνα 19.4.5 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας την 21^η ημέρα του Αυγούστου όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο.

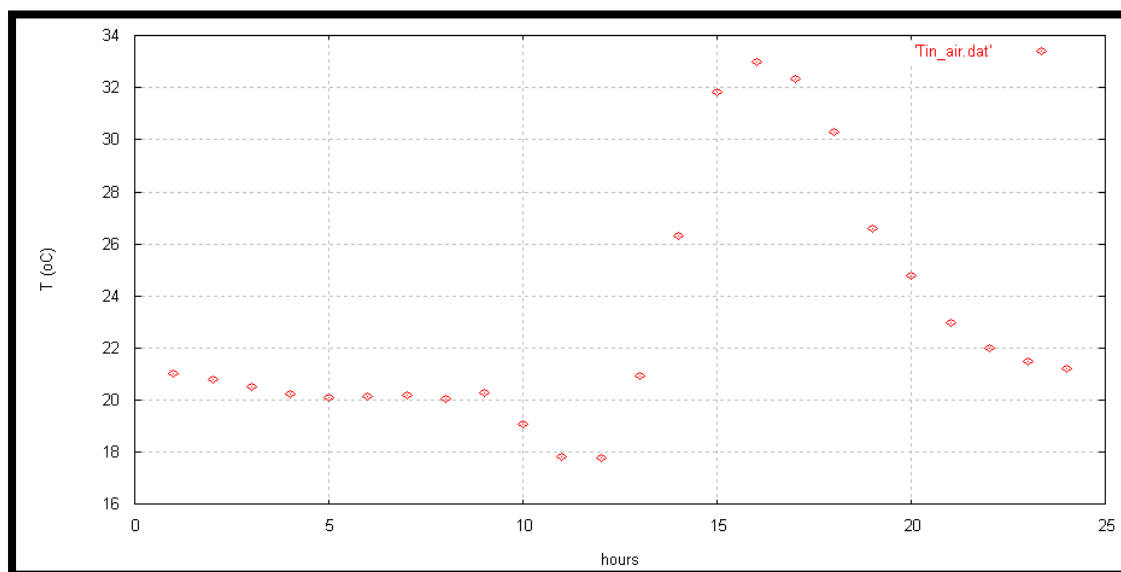
Παρατηρώντας την Εικόνα 19.4.5 είναι εμφανές ότι τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία έχει πολύ υψηλές τιμές. Στην αρχή της ηλιοφάνειας (07:00) αρχίζει η πτώση της εσωτερικής θερμοκρασίας μέχρι περίπου τους 17.5 °C στις 12:00, όπου και παρουσιάζεται η μεγαλύτερη προσπίπτουσα ακτινοβολία στους συλλέκτες, άρα και η μεγαλύτερη ψύξη. Στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξάνεται έως το πέρας των ωρών της ηλιοφάνειας (18:00) και στη συνέχεια μειώνεται έως ότου φτάσει τη θερμοκρασία που είχε ο χώρος στην αρχή της νύχτας (01:00). Είναι γεγονός ότι τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή, ενώ τις ώρες της ψύξης φτάνει σε πολύ χαμηλές τιμές. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει κάποιο υλικό το οποίο θα αποθηκεύει την ψύξη και θα εξισορροπεί τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.



Εικόνα 19.4.6 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας για ψύξη του χώρου με χρήση PCM (πράσινη καμπύλη) και άμεση ψύξη (κόκκινη καμπύλη).

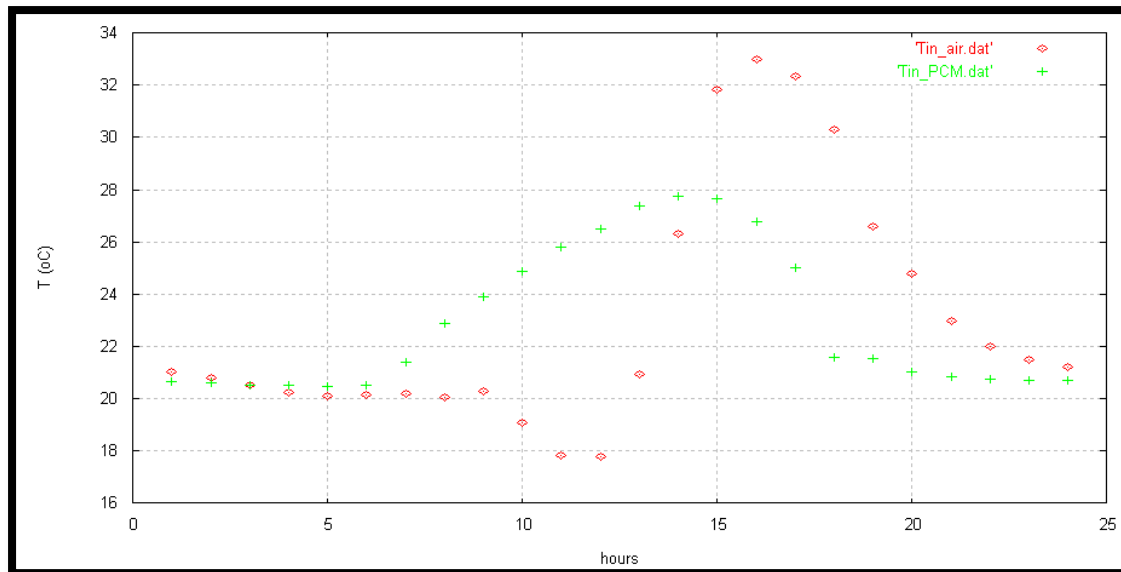
Παρατηρώντας την Εικόνα 19.4.6 είναι εμφανές ότι με τη χρήση του PCM η κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι περισσότερο ομαλή από αυτή που προκύπτει όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο. Επίσης, η εσωτερική θερμοκρασία φτάνει σε τιμές πολύ υψηλότερες από εκείνες που υπολογίζονται όταν χρησιμοποιείται το PCM. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, αυτό ισχύει διότι το PCM αποθηκεύει ψύξη και την προσφέρει στο χώρο σταδιακά χωρίς να την εξαντλεί. Οπότε ακόμη και τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία παραμένει σε χαμηλές τιμές, εφόσον το PCM μπορεί και ψύχει ακόμη το χώρο. Αντίθετα, όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο με το πέρας των ωρών ηλιοφάνειας, όταν δηλαδή το σύστημα τίθεται εκτός λειτουργίας, η εσωτερική θερμοκρασία αυξάνεται αισθητά. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση του PCM σε πάνελ οροφής δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από όταν η ψύξη εισέρχεται κατευθείαν στο χώρο, αποτελέσματα που προσφέρουν θερμική άνεση.

▪ Μήνας Σεπτέμβριος



Εικόνα 19.4.7 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας την 21^η ημέρα του Σεπτεμβρίου όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο.

Παρατηρώντας την Εικόνα 19.4.7 είναι εμφανές ότι τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία έχει πολύ υψηλές τιμές. Στην αρχή της ηλιοφάνειας (07:00) αρχίζει η πτώση της εσωτερικής θερμοκρασίας μέχρι περίπου τους 18 °C στις 12:00, όπου και παρουσιάζεται η μεγαλύτερη προσπίπτουσα ακτινοβολία στους συλλέκτες, άρα και η μεγαλύτερη ψύξη. Στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξάνεται έως το πέρας των ωρών της ηλιοφάνειας (18:00) και στη συνέχεια μειώνεται έως ότου φτάσει τη θερμοκρασία που είχε ο χώρος στην αρχή της νύχτας (01:00). Είναι γεγονός ότι τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή, ενώ τις ώρες της ψύξης φτάνει σε πολύ χαμηλές τιμές. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει κάποιο υλικό το οποίο θα αποθηκεύει την ψύξη και θα εξισορροπεί τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.



Εικόνα 19.4.8 Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας για ψύξη του χώρου με χρήση PCM (πράσινη καμπύλη) και άμεση ψύξη (κόκκινη καμπύλη).

Παρατηρώντας την Εικόνα 19.4.8 είναι εμφανές ότι με τη χρήση του PCM η κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι περισσότερο ομαλή από αυτή που προκύπτει όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο. Επίσης, η εσωτερική θερμοκρασία φτάνει σε τιμές πολύ υψηλότερες από εκείνες που υπολογίζονται όταν χρησιμοποιείται το PCM. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, αυτό ισχύει διότι το PCM αποθηκεύει ψύξη και την προσφέρει στο χώρο σταδιακά χωρίς να την εξαντλεί. Οπότε ακόμη και τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία παραμένει σε χαμηλές τιμές, εφόσον το PCM μπορεί και ψύχει ακόμη το χώρο. Αντίθετα, όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο με το πέρας των ωρών ηλιοφάνειας, όταν δηλαδή το σύστημα τίθεται εκτός λειτουργίας, η εσωτερική θερμοκρασία αυξάνεται αισθητά. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση του PCM σε πάνελ οροφής δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από όταν η ψύξη εισέρχεται κατευθείαν στο χώρο, αποτελέσματα που προσφέρουν θερμική άνεση.

Κεφάλαιο 20

Γενικά συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η τοποθέτηση πάνελ που περιέχουν PCMs στην οροφή με σκοπό την ψύξη χώρων χωρίς την επιβάρυνση του περιβάλλοντος, όπως γίνεται με τα συμβατικά μέσα κλιματισμού. Η χρήση της μεθόδου αυτής βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο και υπάρχουν πολλοί τομείς που επιδέχονται βελτιώσεις. Η μελέτη που διεξάχθηκε ήταν προσεγγιστική, έγιναν πολλές παραδοχές και το πρόβλημα επιλύθηκε μονοδιάστατα.

Στη βασική μελέτη υπολογίσθηκε η εσωτερική θερμοκρασία του χώρου καθώς και η θερμοκρασία του PCM. Τα αποτελέσματα και για τους τέσσερις μήνες είναι ικανοποιητικά, παρά το γεγονός ότι δεν αξιοποιούνται πλήρως οι ιδιότητες του PCM μιας και δεν έχουμε την πλήρη υγραποίηση και στερεοποίηση του υλικού αλλαγής φάσης κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου. Η εσωτερική θερμοκρασία φτάνει τη μέγιστη τιμή της τον Αύγουστο, η οποία είναι της τάξεως των 32 °C. Η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι της τάξεως των 7 °C και για τους τέσσερις μήνες των υπολογισμών. Εφόσον η βασική μελέτη ήταν επιτυχής τέσσερις παραμετρικές μελέτες διεξήχθησαν, με σκοπό την περαιτέρω ανάλυση του θέματος.

Στην πρώτη παραμετρική μελέτη δοκιμάστηκε ένα επιπλέον PCM με σκοπό να ερευνηθεί αν κάποιο θα έδινε καλύτερα αποτελέσματα από αυτό που επιλέχθηκε αρχικά. Το PCM που δοκιμάστηκε είχε θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C. Μελετώντας τα αποτελέσματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι το PCM που επιλέχθηκε αρχικά, εκείνο που έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 19-22 °C, δίνει την καλύτερη εσωτερική θερμοκρασία.

Στη δεύτερη παραμετρική μελέτη δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές για το συντελεστή συναγωγής h . Από τους συντελεστές $h=2,4,6$ και $8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ εκείνος που δίνει την καλύτερη κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι ο $h=6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Παρατηρείται ότι τις ώρες της ηλιοφάνειας όσο μικραίνει ο συντελεστή συναγωγής τόσο αυξάνεται η εσωτερική θερμοκρασία, ενώ τις ώρες μη ηλιοφάνειας όσο μικρότερος ο συντελεστής συναγωγής τόσο μικρότερη είναι η εσωτερική θερμοκρασία. Είναι λογικό που για χαμηλότερο συντελεστή συναγωγής παρατηρούνται υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες τις ώρες της ηλιοφάνειας (07:00-18:00), εφόσον έχουμε μικρότερη συναλλαγή θερμότητας (θερμορροή) μεταξύ του πάνελ με το PCM και του δωματίου. Έτσι, το PCM δεν μπορεί να μεταφέρει με ευκολία την ψύξη του στο χώρο, με αποτέλεσμα ο χώρος να θερμαίνεται περισσότερο. Το ίδιο θα περιμέναμε να συμβαίνει και κατά τη διάρκεια των ωρών μη ηλιοφάνειας (19:00-

06:00). Συμβαίνει όμως το αντίθετο. Τις ώρες μη ηλιοφάνειας ο μικρότερος συντελεστής συναγωγής δίνει πιο μικρές εσωτερικές θερμοκρασίες. Όταν χρησιμοποιείται ο μικρότερος συντελεστής συναγωγής η θερμοκρασία του PCM πέφτει αρκετά σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές. Με τον τρόπο αυτό παρασύρεται και το δωμάτιο να ακολουθήσει την πτώση αυτή της θερμοκρασίας. Έτσι, παρά το γεγονός ότι η διαφορά θερμοκρασίας του PCM και του δωματίου είναι περίπου 3.5 °C τις πρωινές ώρες, δεν είναι αρκετή ώστε να αυξήσει τόσο την εσωτερική θερμοκρασία. Έτσι, λοιπόν, εξηγείται το ότι όσο μικραίνει ο συντελεστής συναγωγής, τόσο μικραίνει και η εσωτερική θερμοκρασία τις ώρες μη ηλιοφάνειας.

Στην τρίτη παραμετρική μελέτη εξετάζεται η πιθανότητα να αφαιρεθεί το PCM από το πάνελ της οροφής και στη θέση του να τοποθετηθεί αρχικά μπετόν και στη συνέχεια ένα “φανταστικό” υλικό, το οποίο έχει όλες τις ιδιότητές του ίδιες με το PCM μόνο που η θερμοχωρητικότητά του παραμένει σταθερή και ίση προς 7000 kJ/kgK.

Όταν χρησιμοποιείται μπετόν η θερμοκρασία του δωματίου είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή που υπολογίζεται όταν χρησιμοποιείται PCM τις ώρες 18:00-10:00 για όλους τους μήνες κατά τους οποίους διεξάγεται η μελέτη. Αυτό συμβαίνει διότι το μπετόν υστερεί σε σχέση με το PCM ως προς την αποθηκευτική του ικανότητα, χάνει δηλαδή πολύ πιο γρήγορα την ψύξη του εφόσον είναι και θερμικά πιο αγωγίμο από το PCM. Έτσι παρουσιάζει πολύ υψηλότερες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας τις ώρες αυτές από ότι το PCM. Κατά τη διάρκεια των ωρών 11:00-17:00, όμως, η εσωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη όταν χρησιμοποιείται μπετόν. Αυτό συμβαίνει γιατί το μπετόν έχει μεγαλύτερο συντελεστή αγωγής από ότι το PCM με αποτέλεσμα να μπορεί να διοχετεύει καλύτερα την ψύξη σε όλη τη μάζα του. Έτσι, τις ώρες της μεγάλης ηλιοφάνειας το μπετόν μπορεί και ψύχεται καλύτερα από ότι το PCM, γεγονός που δικαιολογεί τις χαμηλότερες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των ωρών αυτών.

Η εσωτερική θερμοκρασία είναι καθ’ όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου είναι περίπου 1 °C υψηλότερη, ή ίση, όταν χρησιμοποιείται το “φανταστικό” υλικό, σε σχέση με αυτή που υπολογίζεται στην περίπτωση του PCM. Αυτό συμβαίνει διότι το “φανταστικό” υλικό έχει σταθερή θερμοχωρητικότητα και σχετικά μικρή εάν συγκριθεί με εκείνη του PCM. Έτσι δεν μπορεί να απορροφήσει τόσο μεγάλα ποσά ψύξης, με αποτέλεσμα να αποδίδει πολύ λιγότερη ψύξη στο χώρο.

Η θερμοκρασία του PCM είναι σχεδόν σταθερή όλο το εικοσιτετράωρο, που είναι και το ιδανικό. Η θερμοκρασία του μπετόν αυξάνεται έως τις 07:00, μειώνεται στη συνέχεια έως τις 15:00 σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτές του PCM και αυξάνεται εκ νέου μέχρι να φτάσει τη θερμοκρασία που είχε στη 01:00. Αυτό συμβαίνει γιατί το PCM

χρησιμοποιεί τη θερμότητα που δέχεται για να αλλάξει φάση με συνέπεια η θερμοκρασία του να παραμένει σταθερή. Το μπετόν, αντίθετα, δεν έχει τη δυνατότητα να αλλάξει φάση κι έτσι όλη η θερμότητα που δέχεται χρησιμοποιείται μόνο για την ψύξη του, γεγονός που επικουρείται από την καλή θερμική του αγωγιμότητα. Έτσι το μπετόν φτάνει σε πολύ υψηλότερες και χαμηλότερες θερμοκρασίες από το PCM, λόγω της κακής αποθηκευτικής του ικανότητας και της μεγάλης του αγωγιμότητας αντίστοιχα.

Σε μερικούς μήνες η θερμοκρασία του “φανταστικού” υλικού είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή του PCM κατά τη διάρκεια ολόκληρου του εικοσιτετραώρου. Αυτό συμβαίνει διότι το PCM όταν εισέρχεται στη διφασική περιοχή έχει πολύ μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα, μπορεί δηλαδή να απορροφήσει μεγαλύτερα ποσά ψύξης, με αποτέλεσμα να έχει μικρότερη θερμοκρασία. Επίσης, δεν παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στη θερμοκρασία του, αντίθετα με το “φανταστικό” υλικό, το οποίο τις ώρες της ηλιοφάνειας παρουσιάζει πτώση της θερμοκρασίας του. Αυτό αιτιολογείται εάν αναλογισθεί κανείς ότι το “φανταστικό” υλικό δεν χρησιμοποιεί την ψύξη του για να αλλάξει φάση, τη χρησιμοποιεί εξ’ ολοκλήρου για να ψυχθεί. Θεωρητικά θα έπρεπε κάποιες ώρες η θερμοκρασία του “φανταστικού” υλικού να ήταν μικρότερη από αυτή του PCM, όπως συμβαίνει τον Ιούνιο, δεδομένου ότι το PCM χρησιμοποιεί ένα μέρος της θερμότητας για να αλλάξει φάση με αποτέλεσμα να ψύχεται λιγότερο. Αυτό δε συμβαίνει στην περίπτωση του Ιουλίου, του Αυγούστου και του Σεπτεμβρίου, εξαιτίας των μεγάλων θερμικών φορτίων που δέχεται ο χώρος, τα οποία θερμαίνουν σε ένα μέρος και το “φανταστικό” υλικό, εκτός από το εσωτερικό του χώρου.

Παρατηρείται ότι το μπετόν φθάνει σε χαμηλότερες τιμές από ότι η θερμοκρασία του “φανταστικού υλικού”. Είναι λογικό το μπετόν, που έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, να ψύχεται περισσότερο από ότι το “φανταστικό” υλικό.

Συνολικά εξάγεται το συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερη η χρήση του μπετόν σε σύγκριση με το “φανταστικό” υλικό, εφόσον παρουσιάζεται καλύτερη κατανομή εσωτερικής θερμοκρασίας (πιο κοντά στα όρια θερμικής άνεσης). Αυτό ισχύει γιατί το μπετόν έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και μπορεί να ψυχθεί πολύ πιο εύκολα σε όλη του τη μάζα. Σε σύγκριση, όμως, με το PCM δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικό. Τις περισσότερες ώρες του εικοσιτετραώρου δίνει υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία, γεγονός που αιτιολογείται από τη μεγαλύτερη αποθήκευση ψύξης που καταφέρνει το PCM λόγω της αλλαγής φάσης του.

Στην τελευταία παραμετρική μελέτη εξετάζεται η περίπτωση να αφαιρεθεί τελείως το πάνελ της οροφής και η ψύξη που παράγεται από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών

και της ψυκτικής συσκευής απορρόφησης να εισάγεται απευθείας μέσα στο δωμάτιο. Με την εφαρμογή της παραπάνω πρότασης, η εσωτερική θερμοκρασία έχει πολύ υψηλές τιμές τις ώρες μη ηλιοφάνειας. Στην αρχή της ηλιοφάνειας (07:00) αρχίζει η πτώση της εσωτερικής θερμοκρασίας μέχρι περίπου τους 12 °C στις 12:00, όπου και παρουσιάζεται η μεγαλύτερη προσπίπτουσα ακτινοβολία στους συλλέκτες, άρα και η μεγαλύτερη ψύξη. Στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξάνεται έως το πέρας των ωρών της ηλιοφάνειας (18:00) και στη συνέχεια μειώνεται έως ότου φτάσει τη θερμοκρασία που είχε ο χώρος στην αρχή της νύχτας (01:00). Είναι γεγονός ότι τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή, ενώ της ώρες της ψύξης φτάνει σε πολύ χαμηλές τιμές. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει κάποιο υλικό το οποίο θα αποθηκεύει την ψύξη και θα εξισορροπεί τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.

Είναι εμφανές ότι με τη χρήση του PCM η κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι περισσότερο ομαλή από αυτή που προκύπτει όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο. Επίσης, η εσωτερική θερμοκρασία φτάνει σε τιμές πολύ υψηλότερες από εκείνες που υπολογίζονται όταν χρησιμοποιείται το PCM. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, αυτό ισχύει διότι το PCM αποθηκεύει ψύξη και την προσφέρει στο χώρο σταδιακά χωρίς να την εξαντλεί. Οπότε ακόμη και τις ώρες μη ηλιοφάνειας η εσωτερική θερμοκρασία παραμένει σε χαμηλές τιμές, εφόσον το PCM μπορεί και ψύχει ακόμη το χώρο. Αντίθετα, όταν η ψύξη εισέρχεται άμεσα στο χώρο με το πέρας των ωρών ηλιοφάνειας, όταν δηλαδή το σύστημα τίθεται εκτός λειτουργίας, η εσωτερική θερμοκρασία αυξάνεται αισθητά. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση του PCM σε πάνελ οροφής δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από όταν η ψύξη εισέρχεται κατευθείαν στο χώρο, αποτελέσματα που προσφέρουν θερμική άνεση.

Συνοψίζοντας, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η χρήση των PCMs σε πάνελ οροφής για ενεργητική ψύξη χώρων προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά, το PCM καθιστά εφικτή την ομαλότερη κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας, σε επίπεδα που πλησιάζουν τη θερμική άνεση. Είναι προφανές ότι μόνο η χρήση του συστήματος ψύξης με PCM δεν είναι αρκετή για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Κάποιες ώρες τους πιο θερμούς μήνες χρειάζεται η χρήση συμβατικών μεθόδων ψύξης, μιας και δεν υπάρχει 100% κάλυψη συλλεκτών. Εξάγεται, επομένως, το συμπέρασμα ότι είναι αποδοτική η τοποθέτηση PCM σε πάνελ οροφής για ψύξη χώρου στην περιοχή της Αθήνας με δεδομένες τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α. Κώδικας βασικής μελέτης

Ακολουθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran 70 ο κώδικας της βασικής μελέτης. Στον κώδικα αυτό γίνεται μονοδιάστατη ανάλυση του πλέγματος των κόμβων του PCM, και χρησιμοποιείται η υπορουτίνα του τριδιαγώνιου πίνακα για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών των κόμβων του PCM. Στη συνέχεια υπολογίζεται η εσωτερική θερμοκρασία του χώρου για όλο το εικοσιτετράωρο.

```
program july

real fi, delta, omega, Rb, bit, z, dx, hi, w, dt, Epif, meres, U
real Upar, Texoteriko, Qw, Qe, Qn, Qs, Qparn
dimension x(300), B(300), C(300), Qu(300), S(300), Cp(300), To(300)
dimension R(300), A(300), T(300), Qp(300), Tes(300), E(300), Gt3(13)
dimension Tex(13), Texw(13), Texe(13), Teks(13), Texn(13)
dimension x1(12), x2(12), x3(12), x4(12), x5(12), x6(12), x7(12)
dimension Gd(12), Gb(12), Gt1(13), Qus(300), Tcoll(13), cop(13)
dimension Abr(300), Bbr(300), Cbr(300), Rbr(300), Ebr(300), Gt2(13)
dimension Texbrw(14), Texbre(14), Texbrs(14), Texbrn(14), Texbr(14)
dimension Gt1br(14), Gt2br(14), Gt3br(14), Qubr(300), Sbr(300)
dimension Tcollbr(14), copbr(14), Tr(7), Cpr(7)

integer i, j, k, m, N, Code

N=50
z=0.05
dx=z/(N-1)
x(1)=0
x(N)=z
hi=6
dt=600
```

```
s3=3.14/180
fi=37.97*s3
bit=20*s3
Epif=10
meres=202
U=0.69
Upar=2.8
open (1,file='A.dat') ! open files to save factors
open (2,file='B.dat')
open (3,file='C.dat')
open (4,file='Temp_triang.dat')
open (5,file='R.dat')
open (7,file='pepe.dat')
open (10,file='thermothta.dat')
open (11,file='Tex.dat')
open (12,file='Tin.dat')
open (13,file='Texw.dat')
open (14,file='Texs.dat')
open (15,file='Texe.dat')
open (16,file='Texn.dat')
open (17,file='Abr.dat')
open (18,file='Bbr.dat')
open (19,file='Cbr.dat')
open (20,file='Rbr.dat')
open (21,file='Cpbr.dat')
open (22,file='Temp_triang_br.dat')
open (23,file='Tinbr.dat')
open (24,file='thermothta2.dat')
open (25,file='Cp.dat')
open (26,file='dokimes.dat')
```

open (27,file='Texbr.dat')
open (28,file='Texbrw.dat')
open (29,file='Texbrs.dat')
open (30,file='Texbre.dat')
open (31,file='Texbrn.dat')
open (32,file='1o_dekalepto.dat')
open (33,file='2o_dekalepto.dat')
open (34,file='3o_dekalepto.dat')
open (35,file='4o_dekalepto.dat')
open (36,file='5o_dekalepto.dat')
open (37,file='6o_dekalepto.dat')
open (38,file='Tcoll.dat')
open (39,file='cop.dat')
open (41,file='1o_dekaleptobr.dat')
open (42,file='2o_dekaleptobr.dat')
open (43,file='3o_dekaleptobr.dat')
open (44,file='4o_dekaleptobr.dat')
open (45,file='5o_dekaleptobr.dat')
open (46,file='6o_dekaleptobr.dat')
open (47,file='thermothta3.dat')
open (48,file='thermothtabr.dat')
open (49,file='thermothta2br.dat')
open (50,file='thermothta3br.dat')
open (51,file='Tcollbr.dat')
open (52,file='copbr.dat')
open (53,file='Cpr.dat')
open (54,file='Tr.dat')
open (55,file='Tpcmmeso.dat')


```

do j=1,7
  read(54,*) Tr(j)
  if (j.eq.1) then
    Cpr(j)=7000
  elseif (j.ge.2 .and. j.le.4) then
    Cpr(j)=7000+79555.55*(Tr(j)-19)
  elseif (j.ge.5 .and. j.le.6) then
    Cpr(j)=126333.33-79555.55*(Tr(j)-20.5)
  else
    Cpr(j)=7000
  endif
  write(53,*) Tr(j),Cpr(j)
enddo

```

```

do j=1,12
  read(7,*) x1(j), x2(j), x3(j), x4(j), x5(j), x6(j), x7(j)
enddo

```

```

do j=1,13
  read(11,*) Tex(j)
  read(13,*) Texw(j)
  read(14,*) Texs(j)
  read(15,*) Texe(j)
  read(16,*) Texn(j)
  read(27,*) Texbr(j)
  read(28,*) Texbrw(j)
  read(29,*) Texbrs(j)
  read(30,*) Texbre(j)
  read(31,*) Texbrn(j)
  read(38,*) Tcoll(j)

```

```

read(39,*) cop(j)
read(48,*) Gt1br(j)
read(49,*) Gt2br(j)
read(50,*) Gt3br(j)
read(51,*) Tcollbr(j)
read(52,*) copbr(j)
enddo

```

!!PROI!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!!AKTINOBOLIA GIA TOUW SYLLEKTES!!!!!!!!!!!!

```

do j=1,12
  Gb(j)= x1(j)+x2(j)*sin((0.9863*meres-x3(j))*s3) !opou 360/365=0.9863
  Gd(j)= x4(j)+x5(j)*sin((0.9863*meres-x6(j))*s3)
  if (Gb(j) .lt. 0) then
    Gb(j)=0
  endif
  if (Gd(j) .lt.0) then
    Gd(j)=0
  endif
  !Ypologismos Rb
  delta=23.45*sin(0.9863*(284+meres)*s3)
  omega=0.25*(x7(j)-12)*60
  aa=sin(delta*s3)*sin(fi-bit)+ cos(delta*s3)* cos(fi-bit)*cos(omega*s3)
  bb=sin(delta*s3)*sin(fi)+cos(delta*s3)*cos(fi)* cos(omega*s3)
  Rb=aa/bb
  Gt1(j)=1000*(Gb(j)*Rb+Gd(j)*(1+cos(bit))/2+ (Gb(j)+Gd(j))*(1-cos(bit))*0.2/2)
  if (Gt1(j).lt.0) then
    Gt1(j)=0
  endif
enddo

```

!!!!!!!!!!!!!!AKTINOBOLIA GIA TO NOTIO PARATHYRO!!!!!!!!!!!!!!

```
do j=1,12
  Gb(j)= x1(j)+x2(j)*sin((0.9863*meres-x3(j))*s3)
  Gd(j)= x4(j)+x5(j)*sin((0.9863*meres-x6(j))*s3)
  if (Gb(j) .lt. 0) then
    Gb(j)=0
  endif
  if (Gd(j) .lt.0) then
    Gd(j)=0
  endif
endif
```

!--Ypologismos Rb

```
delta=23.45*sin(0.9863*(284+meres)*s3)
omega=0.25*(x7(j)-12)*60
aa=-sin(delta*s3)*cos(fi)+cos(delta*s3)*sin(fi)*cos(omega*s3)
bb=sin(delta*s3)*sin(fi)+cos(delta*s3)*cos(fi)*cos(omega*s3)
Rb=aa/bb
Gt2(j)=1000*(Gb(j)*Rb+Gd(j))/2+ (Gb(j)+Gd(j))*0.2/2
if (Gt2(j).lt.0) then
  Gt2(j)=0
endif
enddo
```

!!!!!!!!!!!!!!AKTINOBOLIA GIA TO DYTIKO PARATHYRO!!!!!!!!!!!!!!

```
do j=1,12
  Gb(j)= x1(j)+x2(j)*sin((0.9863*meres-x3(j))*s3)
  Gd(j)= x4(j)+x5(j)*sin((0.9863*meres-x6(j))*s3)
  if (Gb(j) .lt. 0) then
    Gb(j)=0
  endif
  if (Gd(j) .lt.0) then
    Gd(j)=0
  endif
endif
```

```

endif

!Ypologismos Rb

delta=23.45*sin(0.9863*(284+meres)*s3)

omega=0.25*(x7(j)-12)*60

aa=cos(delta*s3)*sin(omega*s3)

bb=sin(delta*s3)*sin(fi)+cos(delta*s3)*cos(fi)*cos(omega*s3)

Rb=aa/bb

Gt3(j)=1000*(Gb(j)*Rb+Gd(j)/2+ (Gb(j)+Gd(j))*0.2/2)

if (Gt3(j).lt.0) then
    Gt3(j)=0
endif

enddo

Gt1(13)=100
Gt2(13)=0
Gt3(13)=300
do j=1,13
    kappa=j+6
    write(47,*) kappa,Gt3(j)
    write(24,*) kappa, Gt2(j)
    write(10,*) kappa, Gt1(j)
enddo

Tin=25
cal=20
par=1
wres=8
do m=1,N
    Cp(m)=7000
    To(m)=16

```

enddo

do i=1,100

Gtu1=Gt1(1)

Gtu2=Gt2(1)

Gtu3=Gt3(1)

Texoteriko=Tex(1)

Texwest=Texw(1)

Texnorth=Texn(1)

Texeast=Texe(1)

Texsouth=Texs(1)

Tcollk=Tcoll(1)

copk=cop(1)

do j=1,12

do k=1,6

Texwest=Texwest+(Texw(j+1)-Texw(j))/6

Texnorth=Texnorth+(Texn(j+1)-Texn(j))/6

Texeast=Texeast+(Texe(j+1)-Texe(j))/6

Texsouth=Texsouth+(Texs(j+1)-Texs(j))/6

Gtu1=Gtu1+(Gt1(j+1)-Gt1(j))/6

Gtu2=Gtu2+(Gt2(j+1)-Gt2(j))/6

Gtu3=Gtu3+(Gt3(j+1)-Gt3(j))/6

Texoteriko=Texoteriko+(Tex(j+1)-Tex(j))/6

Tcollk=Tcollk+(Tcoll(j+1)-Tcoll(j))/6

copk=copk+(cop(j+1)-cop(j))/6

!Ypologismos thermothtas sullekth

$Qu(k)=E_{pif} \cdot Gtu1 \cdot (0.71 - 0.00244 \cdot (Tcollk - Texoteriko) / Gtu1)!!!!$ **se watt**

$S(k)=-copk \cdot Qu(k) / (z \cdot 100)!!!!$ **se watt/m^3**

!Ypologismos apwleiw n apo tous toixous kai ta parathura

$Qw=U \cdot 47 \cdot (Texwest - Tin)$

$$Q_n = U * 12.5 * (T_{\text{exnorth}} - T_{\text{in}})$$

$$Q_e = U * 50 * (T_{\text{exeast}} - T_{\text{in}})$$

$$Q_s = U * 7.5 * (T_{\text{exsouth}} - T_{\text{in}})$$

$$Q_{\text{pars}} = U_{\text{par}} * 5 * (T_{\text{exoteriko}} - T_{\text{in}})$$

$$Q_{\text{parw}} = U_{\text{par}} * 3 * (T_{\text{exoteriko}} - T_{\text{in}})$$

$$A(1) = 0$$

$$C(N) = 0$$

$$B(1) = -1$$

$$C(1) = 1$$

$$R(1) = 0$$

$$A(N) = 1.2 / dx$$

$$B(N) = -1.2 / dx - h_i - 1700 * C_p(N) * dx / dt$$

$$R(N) = -T_o(N) * 1700 * C_p(N) * dx / dt - h_i * T_{\text{in}} - S(k) * dx$$

do m=2,N-1

$$x(m) = (m-1) * dx$$

$$cond = 1.2$$

$$dens = 1700$$

$$A(m) = cond / dx$$

$$E(m) = - dens * C_p(m) * dx * T_o(m) / dt$$

$$C(m) = cond / dx$$

$$B(m) = -(A(m) + dens * C_p(m) * dx / dt + C(m))$$

$$R(m) = E(m) - S(k) * dx$$

enddo

call TRIDAG(A,B,C,R,T,N,Code)

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!PCM APO 19-22!!

$$sum1 = 0$$

do m=1,N

```

if (T(m).lt.19) then
  Cp(m)=7000
else if ((T(m).ge.19) .and. (T(m).le.20.5)) then
  Cp(m)=7000+79555.55*(T(m)-19)
else if ((T(m).gt.20.5) .and. (T(m).le.22)) then
  Cp(m)=125333.33-79555.55*(T(m)-20.5)
else
  Cp(m)=7000
endif

```

```

if(i.eq.100) then
write(25,*) T(m),Cp(m)
endif
sum1=sum1+T(m)
enddo
Tmo=sum1/(N+1)
if (i.eq.100) then
if ((j.eq.12).and.(k.eq.1)) then
do m=1,N
  write(32,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.2)) then
do m=1,N
  write(33,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.3)) then
do m=1,N
  write(34,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.4)) then

```

```

do m=1,N
    write(35,*) x(m),T(m)
enddo

elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.5)) then
do m=1,N
    write(36,*) x(m),T(m)
enddo

elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.6)) then
do m=1,N
    write(37,*) x(m),T(m)
enddo
endif
endif

do m=1,N
To(m)=T(m)
write(1,*)m, A(m) !!!save factors to file
write(2,*)m, B(m)
write(5,*)m, R(m)
write(3,*)m, C(m)
enddo

if (i.eq.100) then
do m=1,N
    write(4,*)i,j,k,m,x(m),T(m)
enddo
endif

Qp(k)=hi*(T(N)-Tin)*100
Tin=Tin+(Qp(k)+(Qw+Qe+Qn+Qs+Qpars+Qparw+Gtu2*5+Gtu3*3))

```



```
1  *dt/(250*1204.8)
```

```
if (i.eq.100 .and. k.eq.6) then
```

```
write(12,*) wres,Tin
```

```
write(55,*) wres,Tmo
```

```
wres=wres+1
```

```
endif
```

```
enddo
```

```
enddo
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!BRADY!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
Texotrikobr=Texbr(1)
```

```
Texbrwest=Texbrw(1)
```

```
Texbrnorth=Texbrn(1)
```

```
Texbreast=Texbre(1)
```

```
Texbrsouth=Texbrs(1)
```

```
Gtu1br=Gt1br(1)
```

```
Gtu2br=Gt2br(1)
```

```
Gtu3br=Gt3br(1)
```

```
Tcollkbr=Tcollbr(1)
```

```
copkbr=copbr(1)
```

```
do j=1,12
```

```
do k=1,6
```

```
Gtu1br=Gtu1br+(Gt1br(j+1)-Gt1br(j))/6
```

```
Gtu2br=Gtu2br+(Gt2br(j+1)-Gt2br(j))/6
```

```
Gtu3br=Gtu3br+(Gt3br(j+1)-Gt3br(j))/6
```

```
Texotrikobr=Texotrikobr+(Texbr(j+1)-Texbr(j))/6
```

```
Texbrwest=Texbrwest+(Texbrw(j+1)-Texbrw(j))/6
```

```
Texbrnorth=Texbrnorth+(Texbrn(j+1)-Texbrn(j))/6
```

```
Texbreast=Texbreast+(Texbre(j+1)-Texbre(j))/6
```

```
Texbrsouth=Texbrsouth+(Texbrs(j+1)-Texbrs(j))/6
```

$$Tcollkbr = Tcollkbr + (Tcollbr(j+1) - Tcollbr(j)) / 6$$

$$copkbr = copkbr + (copbr(j+1) - copbr(j)) / 6$$

!Ypologismos apwleiwv apo tous toixous kai ta parathura

$$Qbrw = U * 47 * (Texbrwest - Tin)$$

$$Qbrn = U * 12.5 * (Texbrnorth - Tin)$$

$$Qbre = U * 50 * (Texbreast - Tin)$$

$$Qbrs = U * 7.5 * (Texbrsouth - Tin)$$

$$Qbrpars = Upar * 5 * (Texoterikobr - Tin)$$

$$Qbrparw = Upar * 3 * (Texoterikobr - Tin)$$

$$Abr(1) = 0$$

$$Cbr(N) = 0$$

$$Bbr(1) = -1$$

$$Cbr(1) = 1$$

$$Rbr(1) = 0$$

$$Abr(N) = 1.2 / dx$$

$$Bbr(N) = -1.2 / dx - hi - 1700 * Cp(N) * dx / dt$$

$$Rbr(N) = -To(N) * 1700 * Cp(N) * dx / dt - hi * Tin$$

do m=2,N-1

$$x(m) = (m-1) * dx$$

$$cond = 1.2$$

$$dens = 1700$$

$$Abr(m) = cond / dx$$

$$Ebr(m) = - dens * Cp(m) * dx * To(m) / dt$$

$$Cbr(m) = cond / dx$$

$$Bbr(m) = -(Abr(m) + dens * Cp(m) * dx / dt + Cbr(m))$$

$$Rbr(m) = Ebr(m)$$

enddo

```

call TRIDAG(Abr,Bbr,Cbr,Rbr,T,N,Code)

sum2=0

do m=1,N

  if (T(m).lt.19) then

    Cp(m)=7000

  else if ((T(m).ge.19) .and. (T(m).le.20.5))then

    Cp(m)=7000+79555.55*(T(m)-19)

  else if ((T(m).gt.20.5) .and. (T(m).le.22)) then

    Cp(m)=126333.33-79555.55*(T(m)-20.5)

  else

    Cp(m)=7000

  endif

  if (i.eq.100) then

    write(21,*) T(m),Cp(m)

  endif

  sum2=sum2+T(m)

enddo

Tmo=sum2/(N+1)

if (i.eq.100) then

  if ((j.eq.12).and.(k.eq.1)) then

    do m=1,N

      write(41,*) x(m),T(m)

    enddo

  elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.2)) then

    do m=1,N

      write(42,*) x(m),T(m)

    enddo

  endif

endif

```

```

elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.3)) then
do m=1,N
    write(43,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.4)) then
do m=1,N
    write(44,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.5)) then
do m=1,N
    write(45,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.6)) then
do m=1,N
    write(46,*) x(m),T(m)
enddo
endif
endif

```

```

do m=1,N
To(m)=T(m)
write(17,*)m, Abr(m)
write(18,*)m, Bbr(m)
write(20,*)m, Rbr(m)
write(19,*)m, Cbr(m)
enddo

```

```

if (i.eq.100) then
do m=1,N
write(22,*)i,j,k,m,x(m),T(m)

```

```

        enddo
    endif

    Qp(k)=hi*(T(N)-Tin)*100
    Tin=Tin+(Qp(k)+(Qbrw+Qbre+Qbrn+Qbrs+Qbrpars+Qbrparw
1 +Gtu2br*5+Gtu3br*3)) *dt/(250*1204.8)

    if (i.eq.100 .and. k.eq.6) then
        if (j.ge.1 .and. j.le.5) then
            write(12,*) cal,Tin
            write(55,*) cal,Tmo
            cal=cal+1
        else
            write(12,*) par,Tin
            write(55,*) par,Tmo
            par=par+1
        endif
    endif
enddo
enddo
enddo

close (1)
close (2)
close (3)
close (4)
close (5)
close (7)
close (10)
close (11)

```

close (12)
close (13)
close (14)
close (15)
close (16)
close (17)
close (18)
close (19)
close (20)
close (21)
close (22)
close (23)
close (25)
close (26)
close (27)
close (28)
close (29)
close (30)
close (31)
close (32)
close (33)
close (34)
close (35)
close (36)
close (37)
close (38)
close (39)
close (41)
close (42)
close (43)

```
close (44)
close (45)
close (46)
close (47)
close (48)
close (49)
close (50)
close (51)
close (52)
close (53)
close (54)
```

```
end
```

```
Subroutine TRIDAG(A,B,C,R,U,N,CODE)
```

```
!*****
```

```
! Solves for a vector U of length N the tridiagonal linear set
```

```
!  $M U = R$ , where A, B and C are the three main diagonals of matrix
```

```
!  $M(N,N)$ , the other terms are 0. R is the right side vector.
```

```
!*****
```

```
REAL BET,GAM(N),A(N),B(N),C(N),R(N),U(N)
```

```
INTEGER CODE,N,J
```

```
IF(B(1).EQ.0.) THEN
```

```
CODE=1
```

```
RETURN
```

```
ENDIF
```

```

BET=B(1)
U(1)=R(1)/BET
DO J=2,N          !Decomposition and forward substitution
  GAM(J)=C(J-1)/BET
  BET=B(J)-A(J)*GAM(J)
  IF(BET.EQ.0.) THEN      !Algorithm fails
    CODE=2
    RETURN
  ENDIF
  U(J)=(R(J)-A(J)*U(J-1))/BET
END DO

DO J=N-1,1,-1      !Back substitution
  U(J)=U(J)-GAM(J+1)*U(J+1)
END DO

!U(1)=U(2)
!U(N)=(R(N)-A(N)*U(N-1))/B(N)
CODE=0

return
end

```

Στην πρώτη παραμετρική μελέτη εξετάζεται ένα ακόμη υλικό αλλαγής φάσης (PCM) για να αποφασισθεί πιο από τα δύο είναι εκείνο που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Το PCM που χρησιμοποιείτε για τη σύγκριση έχει θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-26 °C. Η μοναδική διαφορά στον κώδικα όταν χρησιμοποιείτε το δεύτερο PCM βρίσκεται στις εξισώσεις του C_p . Το κομμάτι του κώδικα που αλλάζει είναι εκείνο που υπολογίζει τη θερμοχωρητικότητα του νέου PCM και παρατίθεται παρακάτω:

```
do m=1,N
```



```
if (T(m).lt.15) then
    Cp(m)=7000
else if ((T(m).ge.15) .and. (T(m).le.20.5)) then
    Cp(m)=7000+1821.49*(T(m)-15)
else if ((T(m).gt.20.5) .and. (T(m).le.26)) then
    Cp(m)=17018.18-1821.49*(T(m)-20.5)
else
    Cp(m)=7000
endif
enddo
```

Παράρτημα Β. Κώδικας μελέτης χωρίς PCM

Στο παράρτημα αυτό παρατίθεται ο κώδικας (σε Fortran 70) που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των δεδομένων της τελευταίας παραμετρικής μελέτης. Σε αυτή τη μελέτη δεν υπάρχει καθόλου PCM, η ψύξη εισάγεται κατευθείαν στο δωμάτιο. Έτσι, στον κώδικα δεν χρησιμοποιούνται πεπερασμένες διαφορές και δεν καλείται η υπορουτίνα του τριδιαγώνιου πίνακα.

```
program july

real fi,delta,omega,Rb,bit,s1,s2,pos,z,dx,hi,w,dt,Epif,meres,U
real Upar, Texoteriko, Qw, Qe, Qn, Qs, Qparn
dimension Qu(300),S(300),To(300),T(300),Qp(300),Gt3(13)
dimension Texbrw(14), Texbre(14),Texbrs(14),Texbrn(14),Texbr(14)
dimension Tex(13), Texw(13),Texe(13),Texs(13),Texn(13)
dimension x1(12),x2(12),x3(12), x4(12), x5(12),x6(12),x7(12)
dimension Gd(12), Gb(12), Gt1(13),Qus(300),Tcoll(13),cop(13)
dimension Gt2(13),Tcollbr(14),copbr(14),Tr(7),Cpr(7)
dimension Gt1br(14),Gt2br(14),Gt3br(14),Qubr(300),Sbr(300)

hi=6
s3=3.14/180
fi=37.97*s3
bit=20*s3
Epif=10
meres=202
U=0.69
Upar=2.8

open (7,file='pepe.dat')
open (10,file='thermothta.dat')
```

```
open (11,file='Tex.dat')
open (12,file='Tin_air.dat')
open (13,file='Texw.dat')
open (14,file='Texs.dat')
open (15,file='Texe.dat')
open (16,file='Texn.dat')
open (24,file='thermothta2.dat')
open (27,file='Texbr.dat')
open (28,file='Texbrw.dat')
open (29,file='Texbrs.dat')
open (30,file='Texbre.dat')
open (31,file='Texbrn.dat')
open (38,file='Tcoll.dat')
open (39,file='cop.dat')
open (47,file='thermothta3.dat')
open (48,file='thermothtabr.dat')
open (49,file='thermothta2br.dat')
open (50,file='thermothta3br.dat')
open (51,file='Tcollbr.dat')
open (52,file='copbr.dat')
open (55,file='Tpcmmeso.dat')
```

```
do j=1,12
    read(7,*) x1(j), x2(j), x3(j), x4(j), x5(j), x6(j),x7(j)
enddo
do j=1,13
    read(11,*) Tex(j)
    read(13,*) Texw(j)
    read(14,*) Texs(j)
```

```

read(15,*) Texe(j)
read(16,*) Texn(j)
read(27,*) Texbr(j)
read(28,*) Texbrw(j)
read(29,*) Texbrs(j)
read(30,*) Texbre(j)
read(31,*) Texbrn(j)
read(38,*) Tcoll(j)
read(39,*) cop(j)
read(48,*) Gt1br(j)
read(49,*) Gt2br(j)
read(50,*) Gt3br(j)
read(51,*) Tcollbr(j)
read(52,*) copbr(j)

enddo

```

!!PROI!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!!AKTINOBOLIA GIA TOUW SYLLEKTES!!!!!!!!!!!!

```

do j=1,12
  Gb(j)= x1(j)+x2(j)*sin ((0.9863*meres-x3(j))*s3) !opou 360/365=0.9863
  Gd(j)= x4(j)+x5(j)*sin((0.9863*meres-x6(j))*s3)
  if (Gb(j) .lt. 0) then
    Gb(j)=0
  endif
  if (Gd(j) .lt.0) then
    Gd(j)=0
  endif
  !Ypologismos Rb
  delta=23.45*sin(0.9863*(284+meres)*s3)
  omega=0.25*(x7(j)-12)*60

```

```

aa=sin(delta*s3)*sin(fi-bit)+cos(delta*s3)*
1 cos(fi-bit)*cos(omega*s3)
bb=sin(delta*s3)*sin(fi)+cos(delta*s3)*cos(fi)*
1 cos(omega*s3)
Rb=aa/bb
Gt1(j)=1000*(Gb(j)*Rb+Gd(j)*(1+cos(bit))/2+
1 (Gb(j)+Gd(j))*(1-cos(bit))*0.2/2)
if (Gt1(j).lt.0) then
  Gt1(j)=0
endif
enddo

```

!!!!!!!!!!!!!!!!AKTINOBOLIA GIA TO NOTIO PARATHYRO!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

do j=1,12
  Gb(j)= x1(j)+x2(j)*sin((0.9863*meres-x3(j))*s3)
  Gd(j)= x4(j)+x5(j)*sin((0.9863*meres-x6(j))*s3)
  if (Gb(j) .lt. 0) then
    Gb(j)=0
  endif
  if (Gd(j) .lt.0) then
    Gd(j)=0
  endif
endif

```

!Ypologismos Rb

```

delta=23.45*sin(0.9863*(284+meres)*s3)
omega=0.25*(x7(j)-12)*60
aa=-sin(delta*s3)*cos(fi)+cos(delta*s3)*sin(fi)*cos(omega*s3)
bb=sin(delta*s3)*sin(fi)+cos(delta*s3)*cos(fi)*cos(omega*s3)
Rb=aa/bb
Gt2(j)=1000*(Gb(j)*Rb+Gd(j))/2+ (Gb(j)+Gd(j))*0.2/2)
if (Gt2(j).lt.0) then

```

```

Gt2(j)=0
endif
enddo

```

!!!!!!!!!!!!!!AKTINOBOLIA GIA TO DYTIKO PARATHYRO!!!!!!!!!!!!!!

```

do j=1,12
Gb(j)= x1(j)+x2(j)*sin ((0.9863*meres-x3(j))*s3)
Gd(j)= x4(j)+x5(j)*sin((0.9863*meres-x6(j))*s3)
if (Gb(j) .lt. 0) then
Gb(j)=0
endif
if (Gd(j) .lt.0) then
Gd(j)=0
endif

```

!Ypologismos Rb

```

delta=23.45*sin(0.9863*(284+meres)*s3)
omega=0.25*(x7(j)-12)*60
aa=cos(delta*s3)*sin(omega*s3)
bb=sin(delta*s3)*sin(fi)+cos(delta*s3)*cos(fi)*cos(omega*s3)
Rb=aa/bb
Gt3(j)=1000*(Gb(j)*Rb+Gd(j)/2+ (Gb(j)+Gd(j))*0.2/2)
if (Gt3(j).lt.0) then
Gt3(j)=0
endif
enddo

```

```

Gt1(13)=100
Gt2(13)=0
Gt3(13)=300
do j=1,13

```

```
kappa=j+6
write(47,*)kappa,Gt3(j)
write(24,*) kappa, Gt2(j)
write(10,*) kappa, Gt1(j)
enddo
```

```
Tin=25
```

```
cal=20
```

```
par=1
```

```
wres=8
```

```
do i=1,100
```

```
  Gtu1=Gt1(1)
```

```
  Gtu2=Gt2(1)
```

```
  Gtu3=Gt3(1)
```

```
  Texoteriko=Tex(1)
```

```
  Texwest=Texw(1)
```

```
  Texnorth=Texn(1)
```

```
  Texeast=Texe(1)
```

```
  Texsouth=Texs(1)
```

```
  Tcollk=Tcoll(1)
```

```
  copk=cop(1)
```

```
do j=1,12
```

```
do k=1,6
```

```
  Texwest=Texwest+(Texw(j+1)-Texw(j))/6
```

```
  Texnorth=Texnorth+(Texn(j+1)-Texn(j))/6
```

```
  Texeast=Texeast+(Texe(j+1)-Texe(j))/6
```

```
  Texsouth=Texsouth+(Texs(j+1)-Texs(j))/6
```

```
  Gtu1=Gtu1+(Gt1(j+1)-Gt1(j))/6
```

```
  Gtu2=Gtu2+(Gt2(j+1)-Gt2(j))/6
```

$$Gtu3=Gtu3+(Gt3(j+1)-Gt3(j))/6$$

$$Texoteriko=Texoteriko+(Tex(j+1)-Tex(j))/6$$

$$Tcollk=Tcollk+(Tcoll(j+1)-Tcoll(j))/6$$

$$copk=copk+(cop(j+1)-cop(j))/6$$

!Ypologismos thermohtas sullekth

$$Qu(k)=Epif*Gtu1*(0.71-0.00244*(Tcollk-Texoteriko)/Gtu1)!!!!se watt$$

$$S(k)=-copk*Qu(k)!!!!se watt$$

!Ypologismos apwleiwn apo tous toixous kai ta parathura

$$Qw=U*47*(Texwest-Tin)$$

$$Qn=U*12.5*(Texnorth-Tin)$$

$$Qe=U*50*(Txeast-Tin)$$

$$Qs=U*7.5*(Texsouth-Tin)$$

$$Qpars=Upar*5*(Texoteriko-Tin)$$

$$Qparw=Upar*3*(Texoteriko-Tin)$$

$$Tin=Tin+(S(k)+(Qw+Qe+Qn+Qs+Qpars+Qparw+Gtu2*5+Gtu3*3))$$

$$1 *600/(250*1204.8)$$

if (i.eq.100 .and. k.eq.6) then

write(12,*) wres,Tin

wres=wres+1

endif

enddo

enddo

!!BRADY!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

$$Texoterikobr=Texbr(1)$$

$$Texbrwest=Texbrw(1)$$

Texbrnorth=Texbrn(1)

Texbreast=Texbre(1)

Texbrsouth=Texbrs(1)

Gtu1br=Gt1br(1)

Gtu2br=Gt2br(1)

Gtu3br=Gt3br(1)

Tcollkbr=Tcollbr(1)

copkbr=copbr(1)

do j=1,12

do k=1,6

Gtu1br=Gtu1br+(Gt1br(j+1)-Gt1br(j))/6

Gtu2br=Gtu2br+(Gt2br(j+1)-Gt2br(j))/6

Gtu3br=Gtu3br+(Gt3br(j+1)-Gt3br(j))/6

Texoterikobr=Texoterikobr+(Texbr(j+1)-Texbr(j))/6

Texbrwest=Texbrwest+(Texbrw(j+1)-Texbrw(j))/6

Texbrnorth=Texbrnorth+(Texbrn(j+1)-Texbrn(j))/6

Texbreast=Texbreast+(Texbre(j+1)-Texbre(j))/6

Texbrsouth=Texbrsouth+(Texbrs(j+1)-Texbrs(j))/6

Tcollkbr=Tcollkbr+(Tcollbr(j+1)-Tcollbr(j))/6

copkbr=copkbr+(copbr(j+1)-copbr(j))/6

[!Ypologismos apwleiw n apo tous toixous kai ta parathura](#)

Qbrw=U*47*(Texbrwest-Tin)

Qbrn=U*12.5*(Texbrnorth-Tin)

Qbre=U*50*(Texbreast-Tin)

Qbrs=U*7.5*(Texbrsouth-Tin)

Qbrpars=Upar*5*(Texoterikobr-Tin)

Qbrparw=Upar*3*(Texoterikobr-Tin)

Tin=Tin+((Qbrw+Qbre+Qbrn+Qbrs+Qbrpars+Qbrparw

1 +Gtu2br*5+Gtu3br*3)) *600/(250*1204.8)

```
if (i.eq.100 .and. k.eq.6) then
  if (j.ge.1 .and. j.le.5) then
    write(12,*) cal,Tin
    cal=cal+1
  else
    write(12,*) par,Tin
    par=par+1
  endif
endif

enddo

enddo

enddo

close (7)
close (10)
close (11)
close (12)
close (13)
close (14)
close (15)
close (16)
close (24)
close (27)
close (28)
close (29)
close (30)
close (31)
close (38)
```

close (39)

close (47)

close (48)

close (49)

close (50)

close (51)

close (52)

close (55)

end

Παράρτημα Γ. Πίνακες Θερμοκρασιών [134]

Ισοδύναμη θερμοκρασία Αθηνών κατά την 21^η Ιουνίου για επιφάνειες ανοιχτού χρώματος ($h_o/a=38 \text{ W/m}^2\text{C}$).

Hours	Ambient Temp.	N	E	S	W
1	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6
2	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9
3	22.3	22.3	22.3	22.3	22.3
4	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0
5	22.0	22.4	22.7	22.1	22.1
6	22.5	27.6	34.3	24.1	24.1
7	23.4	28.9	40.3	26.2	26.2
8	24.8	28.9	42.8	28.2	28.2
9	26.4	30.4	43.1	32.0	30.4
10	28.0	32.4	41.7	35.9	32.4
11	29.4	34	38.9	38.8	34.0
12	30.4	35.1	35.1	40.3	35.1
13	30.9	35.5	35.5	40.3	40.4
14	30.9	35.3	35.3	38.8	44.6
15	30.4	34.4	34.4	36.1	47.1
16	29.6	33.7	33.1	33.1	47.6
17	28.6	34.1	31.4	31.4	45.6
18	27.7	32.9	29.4	29.4	39.5
19	26.9	27.3	27	27.0	27.6
20	26.2	26.2	26.2	26.2	26.2
21	25.7	25.7	25.7	25.7	25.7
22	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3
23	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8
24	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2

Ισοδύναμη θερμοκρασία Αθηνών κατά την 21^η Ιουλίου για επιφάνειες ανοιχτού χρώματος ($h_o/a=38 \text{ W/m}^2\text{C}$).

Hours	Ambient Temp.	N	E	S	W
1	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3
2	24.9	24.9	24.9	24.9	24.9
3	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5
4	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3
5	24.4	24.4	24.4	24.4	24.4
6	24.8	29.1	35.6	26.3	26.3
7	25.6	30.3	42.4	28.3	28.3
8	26.8	30.2	44.9	30.5	30.2
9	28.1	32.1	45.0	34.6	32.1
10	29.6	33.9	43.4	38.4	33.9
11	30.9	35.4	40.5	41.2	35.4
12	31.9	36.5	36.6	42.7	36.6
13	32.5	37.1	37.1	42.8	42.1
14	32.6	37.0	37.0	41.5	46.5
15	32.4	36.3	36.3	38.8	49.3
16	31.7	35.1	35.1	35.5	49.8
17	30.8	35.4	33.4	33.4	47.5
18	29.8	34.1	31.3	31.3	40.6
19	28.9	28.9	28.9	28.9	28.9
20	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1
21	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4
22	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8
23	26.3	26.3	26.3	26.3	26.3
24	25.8	25.8	25.8	25.8	25.8

Ισοδύναμη θερμοκρασία Αθηνών κατά την 21^η Αυγούστου για επιφάνειες ανοιχτού χρώματος ($h_o/a=38 \text{ W/m}^2\text{C}$).

Hours	Ambient Temp.	N	E	S	W
1	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5
2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2
3	24.9	24.9	24.9	24.9	24.9
4	24.7	24.7	24.7	24.7	24.7
5	24.6	24.6	24.6	24.6	24.6
6	24.8	26.6	31.3	25.6	25.6
7	25.3	27.9	41.3	27.6	27.6
8	26.3	29.4	44.6	31.8	29.4
9	27.5	31.2	44.8	36.3	31.2
10	28.9	33.0	43.1	40.3	33.0
11	30.3	34.6	40.0	43.3	34.6
12	31.4	35.9	35.9	45.0	35.9
13	32.2	36.6	36.6	45.2	41.9
14	32.5	36.6	36.6	43.8	46.7
15	32.3	36.0	36.0	41.0	49.6
16	31.6	34.7	34.7	37.1	49.9
17	30.6	33.1	32.9	32.9	46.6
18	29.5	31.3	30.3	30.3	36.1
19	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5
20	27.6	27.6	27.6	27.6	27.6
21	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9
22	26.4	26.4	26.4	26.4	26.4
23	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0
24	25.8	25.8	25.8	25.8	25.8

Ισοδύναμη θερμοκρασία Αθηνών κατά την 21^η Σεπτεμβρίου για επιφάνειες ανοιχτού χρώματος ($h_o/a=38 \text{ W/m}^2\text{C}$).

Hours	Ambient Temp.	N	E	S	W
1	20.9	20.9	20.9	20.9	20.9
2	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6
3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3
4	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1
5	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
6	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2
7	20.9	22.3	33.3	24.1	22.3
8	21.9	24.4	39.3	29.7	24.4
9	23.2	26.3	40.3	34.9	26.3
10	24.6	28.3	38.7	39.4	28.3
11	26.0	29.9	35.5	42.6	29.9
12	27.2	31.2	31.2	44.4	31.2
13	27.9	31.8	31.8	44.5	37.3
14	28.0	31.6	31.6	42.7	42.1
15	27.6	30.8	30.8	39.4	44.7
16	26.8	29.3	29.3	34.6	44.3
17	25.7	27.1	27.1	28.9	38.1
18	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5
19	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4
20	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
21	21.8	21.8	21.8	21.8	21.8
22	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5
23	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2
24	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1

Βιβλιογραφία

- [1] Garg HP, Mullick SC, Bhargava AK. Solar thermal energy storage. D. Reidel Publishing Co; 1985] [Project Report. Energy conservation through thermal energy storage. An AICTE project.
- [2] Sharma A et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and application, *Renew Sustain Energy Rev*, 2008.
- [3] S.M. Hasnain. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part 1: Heat storage materials and techniques; 1996.
- [4] A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules:A review; 2007.
- [5] Duffle. J. A. and Beckman. W.A., *Solar energy thermal processes*, John Wiley & Sons; 1989.
- [6] Wyman, C. Cestle, J. and Kreith, F., *Solar energy*, 1980, 24, 517.
- [7] Hasnain, S.M. and Smiai, M., *Journal of Science and Technology*, King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST), 1995, 34, 34.
- [8] Hasnain, S.M., *Energy Research Institute- R&D Project Proposal*, KACST, Riyadh, Saudi Arabia, 1995.
- [9] Lodhi, M.A.K.,*Energy Convers. Mgmt.*, 1996, 37(12), 1677.
- [10] Hasnain, S.M., Smiai M., Al-Saedi, Y. And Al-Khaldi, M., *Energy Research Institute- Internal Report*, KACST, Riyardh, Saudi Arabia, 1996.
- [11] King, R. and Burns., A.P., in *Proc. Intl. Conj. On Energy Storage*, Brighton, U.K., 1981, p. 231.
- [12] Weast, T.E., Shannon, L.J. and Ananth, K.P., in *proc. 15th Int. Energy Conver. Engi. Conf.*, 1980.
- [13] Noppel, R., *Noppel Enginnering*, Preveregew, Switzerland, 1990.
- [14] A. Shitzer and M. Levy. *Solar enerhy engineering*, 1983, 105, 200] [Petri, Ong E.T. and Marianowski, L.G., in *Proc. 12th Enegy Technical Conference*, USA, 1985.
- [15] Pillai KK, Brinkwarth BJ. The storage of low grade thermal energy using phase change materials. *Appl Energy* 1976;2:205-16.
- [16] Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage. In: Beghi C, editor. *Thermal energy storage*. Dordrect, Holland:D. Reidel Publication Co.; 1981.
- [17] Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R.Chen, D. Buddhi. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications; 2007.

- [18] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj. Phase change material- based building architecture for thermal management in residential and commercial establishment;2006.
- [19] Belen Zalba, Jose Marin, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling. Review on thermal energy storage with phase change: materials heat transfer analysis and applications,2002.
- [20] A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, *Solar Energy* 30, 1983, 313-332.
- [21] S. M. Hasnain, in *Energex '93, Proc. 5th Intl. Energy Conference*, Seoul, Korea,1993.
- [22] G.A. Lane, *Solar heat storage; Latent heat materials*, Vol 1, CRC Press Inc., USA,1983.
- [23] A. Abhat, *Solar energy*, 1983, 30(4),313.
- [24] S.M. Hasnain and B.M. Gibbs, *Clean and Save Energy Forever*, 1989,1,601.
- [25] S.M. Hasnain, Ph.D. Dissertation. Dept. of fuel and energy, University of Leeds, UK, 1990.
- [26] Francis Agyenim, Neil Hewitt, Philip Eames, Mervyn Smyth. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), 2009.
- [27] Markus Koschenz, Beat Lehmann. Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. 10 January 2004.
- [28] M. Samai, Y. Jarny, D. Delaunay, An optimization method using an adjoint equation to identify solidification front location, *Numer. Heat transfer, Part B23*, 1993,67-89.
- [29] Yanbing K, Yinping Z, Yi J, Xin ZY. A general model for analyzing the thermal characteristics of a class of Latent Heat Thermal Energy Storage Systems, *ASME J Sol Energy Eng* 1999;121:185-93.
- [30] Wikipedia.
- [31] Ismail KAR, Henriquez JR. Thermally effective windows with moving phase change material curtains. *Appl Thermal Eng* 2001;21:1909-23.
- [32] Yinping Zhang, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, Hongfa Di. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook.
- [33] Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar Energy* 1983;30:313-32.
- [34] Farid MM, Khudhair AM, Razack SAK, Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management* 2004;45:1597-615.

- [35] Zalba B, Mari'n JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering* 2003;23:251–83.
- [36] Dincer I, Rosen MA. *Thermal energy storage, systems and applications*. Chichester (England): John Wiley and Sons; 2002.
- [37] Cabeza LF, Iba'n~ez M, Sole' C, Roca J, Nogue' s M. Experimentation with a water tank including a PCM module. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2006;90:1273–82.
- [38] Gretarsson SP, Pedersen CO, Strand RK. Development of a fundamentally based stratified thermal storage tank model for energy analysis calculations. *ASHRAE Transactions* 1994;100:1213–20.
- [39] Nelson JEB, Balakrishnan AR, Murthy SS. Experiments on stratified chilled water tanks. *International Journal of Refrigeration* 1999;22(3):216–34.
- [40] Rosen MA. The exergy of stratified thermal energy storages. *Solar Energy* 2001;71(3):173–85.
- [41] Mehling H, Cabeza LF, Hippeli S, Hiebler S. PCM-module to improve hot water heat stores with stratification. *Renewable Energy* 2003;28(5):699–711.
- [42] Iban~ez M, Cabeza LF, Sole' C, Roca J, Nogue' s M. Modelization of a water tank including a PCM module. *Applied Thermal Engineering* 2006;26:1328–33.
- [43] Dharuman C, Arakeri JH, Srinivasan K. Performance evaluation of an integrated solar water heater as an option for building energy conservation. *Energy and Buildings* 2006;38:214–9.
- [44] Feldman D, Shapiro MM, Banu D. Organic phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials* 1986;13:1–10.
- [45] Mazman M., Cabeza L.F., Mehling H., Evliya H., Paksoy H.O". Gu" nes, Enerjisiyle Su Isitma Sistemlerinde Faz Deg'is, tiren Madde Kullanımı. In: *Proceedings at UTES 2004*, Istanbul, Turkey; 2004.
- [46] Mazman M, Cabeza LF, Mehling H, Evliya H, Paksoy HO" . Heat transfer enhancement of fatty acids when used as PCMs in thermal energy storage. *International Journal of Energy Research* 2007;32(2):135–43.
- [47] Kunping Lin, Yinping Zhang, Xu Xu , Hongfa Di,Rui Yang, Penghua Qin, Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates.
- [48] A.K. Athienitis, T.Y. Chen, Experimental and theoretical investigation of floor heating with thermal storage, *ASHRAE Transactions* 99 (1) (1993) 1049–1057.

- [49] J.D. Dale, M.Y. Ackerman, Proceeding of 15 Annual SESCI Conference, Acomparison of radiant floor and forced air heating, 1989, pp.15–18.
- [50] L.H. Lafontaine, Radiant heating and cooling, Heating, Piping and Air Conditioning 62 (3) (1990) 71–78.
- [51] J. Braun, Reducing energy costs and peak electrical demand through optimal control of building thermal storage, ASHRAE Transactions 96 (2) (1990) 876–888.
- [52] G. Bakos, Energy management method for auxiliary energy saving in a passive-solar-heated residence using low-cost off-peak electricity, Energy and Buildings 31 (3) (2000) 237-241.
- [53] M. Farid, W.J. Kong, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Under-floor heating with latent heat storage, 2001, pp. 601– 609.
- [54] D.W. Hawes, D. Feldman, Absorption of phase change materials in concrete, Solar Energy Materials and Solar Cells 27 (2) (1992) 91–101.
- [55] D.W. Hawes, D. Banu, D. Feldman, Stability of phase change materials in concrete, Solar Energy Materials and Solar Cells 27 (2) (1992)103–118.
- [56] A.K. Anthienitis, et al., Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage, Building and Environment 32 (5) (1997) 405–410.
- [57] H. Ye, X. Ge, Preparation of polyethylene-paraffin compound as a form-stable solid–liquid phase change material, Solar Energy Materials and Solar Cells 64 (1) (2000) 37–44.
- [58] M. Xiao, B. Feng, K. Gong, Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity, Energy Conversion and Management 43 (1) (2002) 103–108.
- [59] M.H. Sherman, Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone, Building and Environment 25 (4) (1990) 365–374.
- [60] Kunping Lin, Yinping Zhang, Xu Xu, Hongfa Di, Rui Yang, Penghua Qin, Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates.
- [61] A. Carbonari, M de Grassi. Department of Architecture ,Construction And Structures, Faculty of Engineering, Polytechnic University of Marche, Ancona, Italy.
- [62] Federick Kuznick, Joseph Virgone, Jean Noel. Study for the ideal thickness with integrated PCM. Lyon, France.

- [63] Rozanna,D.,Salmiah,A.,Chuah,T.G.,Medyan, R., Thomas Choong, S.Y., Sa'ari , M. Department of Chemical and Environmental Engineering, Faculty of Engineering,Universiti Putra Malaysia and Malaysian Palm Oil Board.
- [64] Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prafabricated walls, 2005.
- [65] Lv.Shilei, Zhu Neng. School of Environment Science and Technology, Tianjin University, China.
- [66] Feng Guohui, Shenyang Jianzhu. University, Shenyang, China.
- [67] Dongyan Li. School of Economics, Nankai Universit , Tianjin, China.
- [68] Maha Ahmad, Andre Bontemps, Hebert Salee, Daniel Quenard. Centre Scientifique et Technique du Batiment και Universite Joseph Fourier , 2005.
- [69] H.E. Feustal, Editorial, Energy and Buildings 33(1999),117-120.
- [70] T. Imanari, T. Omori, K. Bogaki, Thermal comfort and energy consumption og the radiant ceiling panel system: comparison with the conventional all-air system, Energy and Buildings 30 (1999) 167-175.
- [71] J. Miriel, L. Serres, A. Trombe, Radiant ceiling panel heating- cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumritions, Applied Thermal Engineering 22 (2002) 1861-1873.
- [72] [D.J.G. Butler, F. Alamdari, Chilled ceiling and beams- opportunities for free cooling, Proceedings of the Institute of Refrigeration 95 (7) (1999) 1-8.
- [73] F. Alamdari, D.J.G. Butler, P.F. Grigg, M.R. Shaw, Chilled ceilings and displacement ventilation, Rewable Energy 15 (1998) 300-305.
- [74] A. Novoselac, J. Srebric, A critical review on the performance and design of combined cooling ceiling and displacement ventilation systems, Energy and Buildings 34 (2002) 497-509.
- [75] Frank B. Phase change material for space heating and cooling. Sustainable Energy Center: University of South Australia; Presentation 2002.
- [76] Turnpenny JR, Etheridge DW, Reay DA. Noval ventilation system for reducing air conditioning in buildings. Part I. Testing and theoretical modeling. Appl Then Eng 2000;20:1019-37.
- [77] Kondo T, Ibamoto T. Research on using the PCM for ceiling board, IEA ECESIA, Annex 17, 3rd workshop, Tokyo, Japan. October 1-2, 2002.
- [78] Vincenc Butala , Urosˇ Stritih. Experimental investigation of PCM cold storage. 29 October 2008.

- [79] T. Kondo, T. Ibamoto. Research on using the PCM for ceiling board, in: Proceeding of the 9th International Conference on Thermal Energy Storage- futurestock, Warsaw, 2003.
- [80] J.R. Turnpenny, D.W. Etheridge, D.A. Reay. Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings. Part II: testing and prototype, Applied Thermal Engineering 21(2001) 1203-1217.
- [81] 2001 ASHRE Handbook, Fundamentals, SI Edition, 2001.
- [82] International Energy Agency, Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage, Advanced Thermal Energy Storage through Phase Change Materials and Chemicals Reactions-Feasibility Studies and Demonstration projects, Annex 17, Final Report, 2005.
- [83] U. Stritih, A. Dolenc, V. Butala. PCM cold storage to ventilate buildings, in: Proceeding of the 8th REHVA Congress on High Tech, Low Energy, Clims 2005, Lausanne, October 9-12, 2005.
- [84] U. Stritih, V. Butala. Energy saving in building with PCM cold storage, International Journal of Energy Research 31(15), 2007;1532-1544.
- [85] P.W. Griffiths, P.C. Eames. Performance of chilled ceiling panels using phase change material slurries as the heat transport medium. 12 September 2006.
- [86] Anon., Data Hazard Sheet, BASF, Ludwigshafen, Germany, 2003.
- [87] P. Schossig, S. Gschwander, Private Communication, Fraunhofer-ISE, Freiburg, Germany, 2004.
- [88] W. Streicher, A. Heinz, Private Communication, TU-Graz, Graz, Austria, 2003.
- [89] A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj, R.V. Seeniraj. Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management. 10 May 2007.
- [90] G.N. Tiwari, Solar Energy of Fundamentals, Design, Modeling and Applications, Handbook of Narosa publishing house, New Delhi, 2005.
- [91] M. Koschenz, B. Lehmann, Thermoaktive Bauteilsysteme tabs, EMPA, Duebendorf Switzerland, ISBN 3-905594-19-6, 2000 (German only).
- [92] TRNSYS 15, Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory (SEL), University of Wisconsin, Madison, USA, 2000.
- [93] P.W. Egolf, M. Koschenz, B. Lehmann, Latentwärmespeicher für die Sonnenenergienutzung: Lade- und Entladevorgänge, Schlussbericht NEFF 515, 1997 (German only).

- [94] S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1980.
- [95] Xichun Wang, Jianlei Niu. Performance of cooled-ceiling operating with MPCM slurry. 28 October 2008.
- [96] Niu J, Kooi JVD. Indoor climate rooms with cooled ceiling systems. *Build Environ* 1994;29:283–90.
- [97] Alamdari F, Butler DJG, Grigg PF, Shaw MR. Chilled ceilings and displacement ventilation. *Renew Energy* 1998;15:300–5.
- [98] Novoselac A, Srebric J. A critical review on the performance and design of combined ceiling and displacement ventilation systems. *Energy Build* 2002;34:497–509.
- [99] Niu J, Kooi JVD, Ree HVD. Energy saving possibility with cooled-ceiling systems. *Energy Build* 1995;23:147–58.
- [100] G. Gan, S.B. Riffat, Numerical simulation of closed wet cooling towers for chilled systems, *Applied Thermal Engineering* 19 (12) (1999) 1279–1296.
- [101] Costelloe B, Finn D. Indirect evaporative cooling potential in air–water systems in temperate climates. *Energy Build* 2003;35:573–91.
- [102] Niu JL, Zhang LZ, Zuo HG. Energy savings potential of chilled-ceiling combined with desiccant cooling in hot and humid climates. *Energy Build* 2002;34: 487–95.
- [103] Matsuki N, Nakano Y, Miyanaga T, Yokoo N, Oka T. Performance of radiant cooling system integrated with ice storage. *Energy Build* 1999;10:177–83.
- [104] Farid MM, Khudhair AM, Razack SAK, AL-Hallaj S. A review on phase change energy storage: material and applications. *Energy Convers Manage* 2004;45: 1597–615.
- [105] Wang F, Maidment G, Missenden J, Tozer R. A review of research concerning the use of PCMs in air conditioning and refrigeration engineering. *Adv Build Technol* 2002;2:1273–80.
- [106] Kasza KE, Chen MM. Improvement of the Performance of solar energy or waste heat utilization systems by using phase-change slurry as an enhancement heat-transfer storage fluid. *J Solar Energy Eng* 1985;107:229–36.
- [107] Chen Q, Kooi JVD. Accuracy: a computer program for combined problems of energy analysis, indoor air flow and air quality. *ASHRAE Transac* 1988;94:196–214.
- [108] Niu J, Kooi JVD. Cooling load dynamics of rooms with cooled ceilings. *Build Serv Eng Res Technol* 1997;18:B11–18.

- [109] Niu J, Kooi JVD. A dynamic cooling load program for cooling ceiling system and its validation in a climate room. Internal report. Laboratory of Refrigeration and Climate Technology, Delft University of Technology, 1994.
- [110] Wang X et al. Flow and heat transfer behaviors of phase change material slurries in a horizontal circular tube. *Int J Heat Mass Transfer* 2007;50:2480–91.
- [111] Xichun Wang, Jianlei Niu, A.H.C. van Paassen. Raising evaporative cooling potentials using combined cooled ceiling and MPCM slurry storage. 26 February 2008.
- [112] J. Facao, A.C. Oliveira, Thermal behavior of closed wet cooling towers for use with chilled ceilings, *Applied Thermal Engineering* 20 (2000) 1225–1236.
- [113] P. Vangtook, S. Chirarattananon, Application of radiant cooling as a passive cooling option in hot humid climate, *Building and Environment* 42 (2) (2007) 543–556.
- [114] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, *Introduction to heat transfer*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
- [115] AHRAE, ASHREA Handbook: Fundamentals, ASHRAE, Atlanta, 2001.
- [116] U.S. Department of Energy: Energy Efficiency and Renewable Energy, See: http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.html.
- [117] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos and E. Rogdakis. Predicted performance of solar driven H₂O-LiBr absorption units in Athens. 1 August 1988.
- [118] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos and E. Rogdakis. Performance of solar NH₃/H₂O absorption cycles in the Athens area, *Sol. Energy* 39,187-195 (1987).
- [119] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos and E. Rogdakis. On the expected performance of solar driven NH₃/H₂O absorption refrigeration units in the Athens/Greece area, *Proc. 24th Int. Conf. of the Mediterranean Cooperation for Solar Energy*, pp. 539-547. Verona, Italy, 1986.
- [120] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos and E. Rogdakis. The heat gain factor of the solar driven heat transformer working with an inversed NH₃/H₂O absorption cycle in the Athens/Greece area, *Proc. 24th Int. Conf. of the Mediterranean Cooperation for Solar Energy*, pp. 529-527. Verona, Italy, 1986.
- [121] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos and E. Rogdakis. Modeling of the performance of a solar driven NH₃/H₂O absorption unit operating as a heat pump in Athens/Greece, *Proc. Int. AMSE Conf. on Modeling and simulation*, Vol 3, pp. 303-314. Sorrento, Italy (1986).

- [122] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos and E. Rogdakis. Predicted behavior of NH₃/H₂O absorption refrigerators working with various types of solar collectors, Proc. XVIIth Int. Congress of Refrigeration, Vol. B, pp. 715-721. Wien, Austria (1987).
- [123] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos and E. Rogdakis. Optimal adaptation of solar driven absorption NH₃/H₂O heat transformers to the solar collectors, Proc. XVIIth Int. Congress of Refrigeration, Vol. B, pp. 720-727. Wien, Austria (1987).
- [124] D.A. Kouremenos. A tutorial on reserved NH₃/H₂O absorption cycles for solar applications, Sol. Energy 34, 101-115 (1985).
- [125] D.A. Kouremenos, E. Rogdakis. Device modeling and simulation of NH₃/H₂O absorption units for refrigeration, heat pumps and heat transformers, ASME Winter Annual meeting, Vol. 2, pp. 97-106. Anaheim, California (1986).
- [126] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos and E. Rogdakis. Transient operation of solar driven NH₃/H₂O absorption units during single days, submitted for presentation at 1988 ASME Winter Annual Meeting. Chicago, Illinois.
- [127] D.A. Kouremenos, E. Rogdakis. Thermodynamic cycles for refrigeration and heat transformer units H₂O-LiBr, VDI Forsch. Ingenieurwesen (in press).
- [128] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos and E.S. Domazakis. Solar radiation correlations for the Athens/Greece area, Sol. Energy 35, 259-269 (1985).
- [129] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos and S. Doulgerakis. Direct and diffuse solar radiation correlations for tilted surfaces in Athens, Greece, Sol. Energy 38, 203-217 (1987).
- [130] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos, E.S. Domazakis and S. Doulgerakis. Statistical determination of solar radiation characteristics in the Athens/Greece area, Proc. 23rd Int. Conf. of Mediterranean Cooperation for Solar Energy, pp. 79-84. Sevilla, Spain (1985).
- [131] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos. Daily change of climatological ambient conditions for the Athens/Greece region, Proc. 24th Int. Conf. of the Mediterranean Cooperation for Solar Energy, pp.87-95, Verona, Italy (1986).
- [132] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos. A daily variation model for the outdoor temperature and relative humidity in Athens, Greece, Proc. Int AMSE Conf. on Modeling and Simulation, Vol 4.1, pp.77-88, Sorrento, Italy (1986).
- [133] Κίμωνας Αντωνόπουλος. Θερμικά – Ηλιακό Συστήματα. Αθήνα 2004.
- [134] Κίμωνας Αντωνόπουλος. Κλιματισμός. Αθήνα 2004.

[135] Κίμωνας Αντωνόπουλος. Υπολογιστικές μέθοδοι φαινομένων μεταφοράς. Αθήνα 2008.