

«Παραμετρική μελέτη ηλιακής ενδοδαπέδιας
θέρμανσης χώρων και νερού χρήσης κτιρίων με
ενεργητικό σύστημα υλικών αλλαγής φάσης»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία Ευραφά
ΑΜ: 02106016

Επιβλέπων καθηγητής: Κ.Α. Αντωνόπουλος



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

- Αθήνα, Οκτώβριος 2011 -

«Παραμετρική μελέτη ηλιακής ενδοδαπέδιας θέρμανσης χώρων και νερού χρήσης κτιρίων με ενεργητικό σύστημα υλικών αλλαγής φάσης»

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	11
Πρόλογος.....	12
Εισαγωγή	
I. Γενικά.....	13
II. Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.....	17
III. Τα υλικά αλλαγής φάσης.....	20
Κεφάλαιο 1: Τα υλικά αλλαγής φάσης	
1.1 Εισαγωγή.....	22
1.2 Ιδιότητες και κατηγοριοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης.....	24
1.3 Φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων και supercooling.....	31
1.4 Μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων των PCMs.....	33
1.4.1 Διαφορική Θερμιδομετρική Σάρωση (DSC)	33
1.4.2 T- history.....	35
1.4.3 Double-cell.....	36
1.5 Μορφές συσκευασίας και ενσωμάτωσης των PCMs.....	37
1.5.1 Μαζική αποθήκευση.....	38
1.5.2 Ενσωμάτωση σε μικροκάψουλες.....	38
1.5.3 Ενσωμάτωση σε μακροκάψουλες.....	41
1.5.4 Ενσωμάτωση σε τούβλο.....	43
1.6 Μέθοδοι προσομοίωσης της αλλαγής φάσης:	44
1.6.1 Εισαγωγή.....	44
1.6.2 Μέθοδος της ενθαλπίας.....	46
1.6.3 Μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας.....	48

Κεφάλαιο 2: Ενεργητικά και Παθητικά ηλιακά συστήματα παραγωγής ενέργειας

2.1 Εισαγωγή.....	53
2.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα.....	54
2.3 Παθητικά ηλιακά συστήματα.....	58

Κεφάλαιο 3: Εφαρμογές των Υλικών αλλαγής φάσης στα κτίρια – Ενεργητικά και παθητικά συστήματα

3.1 Εισαγωγή.....	63
3.2 Εφαρμογές των Υλικών αλλαγής φάσης σε Παθητικά ηλιακά συστήματα.....	66
3.2.1 Τοίχος Trombe – Michel με PCMs.....	66
3.2.2 Γυψοσανίδες με PCMs.....	70
3.2.3 Πατζούρια με PCMs.....	73
3.2.4 Τοίχος συλλογής ηλιακής θερμότητας με PCMs για αερισμό του κτιρίου.....	74
3.2.5 Πάνελ οροφής με ενσωματωμένα PCMs.....	76
3.2.6 Ενδοδαπέδια θέρμανση με χρήση υλικού αλλαγής φάσης.....	77
3.3 Εφαρμογές των Υλικών αλλαγής φάσης σε Ενεργητικά ηλιακά συστήματα.....	78
3.3.1 Πάνελ οροφής.....	78
3.3.2 Σύστημα θέρμανσης χώρου τοποθετημένο στην οροφή.....	80
3.3.3 Σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με PCM.....	82
3.3.4 Free cooling.....	87
3.3.5 Συνδυασμένο σύστημα θέρμανσης – ψύξης με PCM.....	89

Κεφάλαιο 4: Βιομηχανικές εφαρμογές των Υλικών αλλαγής φάσης

4.1 Εισαγωγή.....	92
4.2 Ηλιακός θερμοσίφωνας με PCM.....	92

4.3 Ηλιακό θερμοκήπιο.....	97
4.4 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης του αέρα.....	100
4.5 Ηλιακοί φούρνοι.....	102
4.6 Συντήρηση και μεταφορά θερμοκρασιακά ευαίσθητων υλικών.....	104
4.7 Χρήση σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές.....	106
4.8 Εφαρμογές σε οχήματα.....	107
4.9 Θερμική ένδυση.....	109
4.10 Ιατρικά προϊόντα.....	111

Κεφάλαιο 5: Ιστορική αναδρομή κτιριακών εφαρμογών με υλικά αλλαγής φάσης

5.1 Εισαγωγή.....	113
5.2 Δρ. Maria Telkes.....	114
5.3 Δρ. Lawrence Gardshire.....	115
5.4 Δρ. Gordon Wilkes.....	116
5.5 Δρ. J.W.Hodgins και Δρ. T.W.Hoffman.....	116
5.6 Δρ. S.Freeman, Δρ. M. Telkes και Δρ. M. Altman.....	118
5.7 Δρ. David Eissenberg και Δρ. Charels Wyman.....	118
5.8 Πρόσφατα στοιχεία.....	118

Κεφάλαιο 6: Ηλεκτρική ενδοδαπέδια θέρμανση με χρήση υλικών αλλαγής φάσης

6.1 Γενικά.....	120
6.2 Πειραματική μελέτη ενδοδαπέδιας ηλεκτρικής θέρμανσης με χρήση πλακών PCM σταθερού σχήματος.....	122
6.2.1 Εισαγωγή.....	122
6.2.2 Η θερμική απόδοση των πλακών PCM σταθερού σχήματος.....	125
6.2.3 Πειραματική έρευνα ενός πρωτότυπου συστήματος.....	127
6.2.4 Αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	131

Κεφάλαιο 7: Μοντελοποίηση και προσομοίωση της θερμικής απόδοσης δαπέδου με χρήση υλικού αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος εφαρμοσμένο σε ηλιακό παθητικό σύστημα κτιρίων

7.1 Εισαγωγή.....	137
7.2 Ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας.....	139
7.2.1 Μοντέλο της μεταφοράς θερμότητας στις πλάκες PCM σταθερού σχήματος.....	139
7.2.2 Ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας του κτιριακού κελύφους.....	142
7.2.3 Μοντέλο του εσωτερικού αέρα.....	144
7.3 Εξακριβωση της εγκυρότητας του μοντέλου.....	145
7.4 Επίδραση διαφόρων παραγόντων στη θερμική απόδοση δωματίου με πλάκες PCM σταθερού σχήματος στο δάπεδο.....	147
7.4.1 Θερμοκρασία τήξης του PCM.....	148
7.4.2 Θερμική αγωγιμότητα.....	152
7.4.3 Θερμότητα τήξης.....	153
7.4.4 Πάχος στρώματος PCM σταθερού σχήματος.....	155
7.4.5 Το κενό αέρος μεταξύ PCM και δαπέδου.....	156
7.4.6 Τα υλικά επίστρωσης δαπέδου.....	157
7.5 Συμπεράσματα.....	158

Κεφάλαιο 8: Σύστημα ηλιακού ζεστού νερού για οικιακή χρήση με υλικά αλλαγής φάσης

8.1 Γενικά.....	160
8.2 Πειραματική μελέτη δεξαμενής νερού ενεργητικού ηλιακού συστήματος με χρήση PCM.....	165
8.2.1 Εισαγωγή.....	165
8.2.2 Περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης.....	167
8.2.3 Η γεωμετρία της συσκευασίας του PCM.....	169
8.2.4 Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε.....	170

8.2.5 Δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο σύστημα.....	171
8.2.6 Αποτελέσματα δοκιμών.....	171
8.2.7 Συμπεράσματα.....	178

Κεφάλαιο 9: Συσκευασία PCM για τη βελτίωση αποθήκευσης της θερμότητας του ζεστού νερού χρήσης σε δεξαμενή διαστρωμάτωσης

9.1 Εισαγωγή.....	180
9.2 Πειραματική διάταξη.....	183
9.3 Αριθμητικό μοντέλο.....	185
9.4 Εξακριβωση της εγκυρότητας του αριθμητικού μοντέλου.....	187
9.5 Πρόσθετες προσομοιώσεις.....	191
9.6 Συμπεράσματα.....	192

Κεφάλαιο 10: Χρήση υλικού αλλαγής φάσης σε ηλιακό ενεργητικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης χώρου

10.1 Εισαγωγή.....	193
10.2 Επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης.....	194
10.3 Υπολογισμός της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους ηλιακούς συλλέκτες.....	195
10.4 Αποτελέσματα και διαγράμματα των υπολογιζόμενων τιμών της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.....	197
10.5 Αποτελέσματα βασικής μελέτης.....	202
10.6 Παραμετρική μελέτη για διάφορες τιμές συλλεκτικής επιφάνειας.....	209
10.7 Παραμετρική μελέτη για διάφορες τιμές του γινομένου FR(τα) των ηλιακών συλλεκτών.....	214
10.8 Παραμετρική μελέτη για διάφορες τιμές της μάζας του PCM.....	219
10.9 Παραμετρική μελέτη για PCM's με διαφορετικές τιμές θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης.....	226

Κεφάλαιο 11: Εφαρμογή ενεργητικού ηλιακού συστήματος με υλικό αλλαγής φάσης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης

11.1 Εισαγωγή.....	231
11.2 Επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης.....	232
11.3 Αποτελέσματα βασικής μελέτης.....	233
11.4 Παραμετρική μελέτη για διάφορες τιμές συλλεκτικής επιφάνειας.....	240
11.5 Παραμετρική μελέτη για διάφορες τιμές της μάζας του PCM.....	245
11.6 Παραμετρική μελέτη για PCM's με διαφορετικές τιμές θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης.....	251
11.7 Παραμετρική μελέτη για ημέρες με διαφορετική ηλιοφάνεια.....	256
11.8 Παραμετρική μελέτη για σταθερή κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης.....	259

Κεφάλαιο 12: Γενικά Συμπεράσματα

12.1 Μελέτη ενεργητικού συστήματος ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης.....	264
12.2 Μελέτη για την παραγωγή ζεστού νερού οικιακής χρήσης με ηλιακό σύστημα.....	266

Παράρτημα.....	268
-----------------------	------------

Βιβλιογραφία.....	274
--------------------------	------------

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την εν λόγω εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω κατά κύριο λόγο τον καθηγητή μου κύριο Κίμωνα Α. Αντωνόπουλο για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, για την αμέριστη κατανόηση και τη βοήθειά του καθώς επίσης και για την ενθάρρυνση, την καθοδήγηση και το χρόνο που διέθεσε για την επιτυχή ολοκλήρωσή της κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επιπλέον, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω το φίλο και συμφοιτητή μου Λαζαρίδη Δημήτριο για την πολύτιμη βοήθειά του και την άριστη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης των διπλωματικών μας εργασιών.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου για τη στήριξη και τη συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλον αυτόν τον καιρό.

Πρόλογος

Η συγκεκριμένη εργασία πραγματεύεται τη μελέτη των υλικών αλλαγής φάσης τόσο σε θεωρητικό όσο και σε υπολογιστικό επίπεδο. Συγκεκριμένα, στο θεωρητικό μέρος, το οποίο και προηγείται του υπολογιστικού, παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες αλλά και ενδεδειγμένες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί γύρω από τα υλικά αλλαγής φάσης, τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητές τους, αλλά και μελέτες που αφορούν τις εφαρμογές τους σε διάφορους τομείς της καθημερινότητας με έμφαση στον κτιριακό τομέα. Στο δε υπολογιστικό τμήμα της εργασίας, εξετάζεται η εφαρμογή ενός ενεργητικού ηλιακού συστήματος σε μία κατοικία με εμβαδόν δαπέδου 100 m² προκειμένου να μελετηθεί η τοποθέτηση υλικών αλλαγής φάσης σε ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης της κατοικίας αλλά και σε μια δεξαμενή προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες της σε ζεστό νερό. Η κατοικία αυτή βρίσκεται στην περιοχή της Αθήνας και προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι ανωτέρω εφαρμογές χρησιμοποιείται ξεχωριστό σύστημα ηλιακών συλλεκτών για κάθε εφαρμογή, με στόχο τη θέρμανση του νερού κατά τη διάρκεια της ημέρας το οποίο ρέει μέσα σε σωλήνες εγκατεστημένους στο δάπεδο και στη δεξαμενή και μεταφέρει τη θερμότητα στο ενδοδαπέδιο στρώμα PCM αλλά και στο PCM που βρίσκεται διάσπαρτο μέσα στη δεξαμενή. Κατά τις νυχτερινές ώρες, διακόπτεται η παροχή νερού και το PCM αποδίδει τη θερμότητα που έχει αποθηκεύσει. Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται κατά την 21^η ημέρα του μήνα Ιανουαρίου. Στο τέλος παρατίθεται και παραμετρική μελέτη η οποία στοχεύει στη βελτιστοποίηση ορισμένων παραμέτρων των δύο εφαρμογών που παρουσιάζονται.

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του κυρίου Κίμωνα Α. Αντωνόπουλου, καθηγητή Ε.Μ.Π. στον τομέα θερμότητας.

Εισαγωγή

I. Γενικά:

Η έννοια της "ενέργειας" προσδιορίζει καθοριστικά την ποιότητα και τη ζωή της ανθρώπινης κοινωνίας του 20ου αιώνα. Ο 20ος αιώνας αποτέλεσε την περίοδο των εντονότερων μεταβολών που έχει καταγράψει ως τώρα η ιστορία. Το θέμα της ενέργειας παραμένει στο επίκεντρο του αιώνα αυτού και θα καθορίσει αναμφίβολα τις εξελίξεις του επόμενου. [1]

Η ανθρωπότητα όλα αυτά τα χρόνια ζούσε και κατανάλωνε ενέργεια χωρίς μέτρο, έως ότου περί το 1960-70 έγινε αντιληπτό ότι τα ορυκτά καύσιμα, άνθρακας και πετρέλαιο, έχουν πεπερασμένα αποθέματα και ότι η καύση τους προξενεί ανεπανόρθωτες αλλοιώσεις στο κλίμα και κατ' επέκταση στη σύσταση και τη μορφή του πλανήτη.

Το οικολογικό πρόβλημα δημιουργείται με την καύση των ορυκτών καυσίμων όπως του άνθρακα, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου και την έκλυση στην ατμόσφαιρα μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα τα οποία είναι υπεύθυνα κατά κύριο λόγο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου που υπερθερμαίνει τον πλανήτη και προκαλεί τις παρατηρούμενες ήδη σήμερα κλιματικές αλλαγές. Παράλληλα η ρύπανση της ατμόσφαιρας με τα δύο αέρια, μαζί και με τα στερεά αιωρούμενα σωματίδια τα οποία επίσης εκλύονται κατά την καύση, ή και από άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες, επιδρούν στη ζωή και την παρουσία πολλών ειδών της χλωρίδας και της πανίδας της γης. [2]

Επιπλέον, ο πληθυσμός των ανθρώπων της γης έχει πια ξεπεράσει τα 6 δισεκατομμύρια και αυξάνεται ολοένα και περισσότερο. Οι άνθρωποι χρειάζονται ενέργεια για να βελτιώσουν το επίπεδο της διαβίωσης τους. Πολλοί επιστήμονες μάλιστα συσχετίζουν την ποιότητα διαβίωσης με την

κατανάλωση ενέργειας. Έτσι, η κατανάλωση ενέργειας γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη. [3]

Οι ενεργειακές ανάγκες παγκοσμίως εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τα ορυκτά καύσιμα και θα συνεχίσουν να εξαρτώνται από αυτά για αρκετές δεκαετίες ακόμα. Οι διαρκώς όμως αυξανόμενες καταναλωτικές τάσεις των ανθρώπων και ο ανταγωνισμός μεταξύ των κρατών οδηγούν σε μια βαθμιαία εξάντληση των φυσικών πόρων της γης. Παίρνουμε από αυτή πολύ περισσότερα απ' όσα έχουμε ανάγκη και απ' όσα μπορεί να μας δώσει. Έτσι μπροστά μας διανοίγεται η ζοφερή προοπτική να εξαντλήσουμε πολύ γρήγορα το φυσικό κεφάλαιο της γης. Τα περισσότερα και τα βασικότερα για τη ζωή του ανθρώπου ορυκτά θα εξαφανιστούν πολύ σύντομα, αν συνεχιστεί με τον ίδιο ρυθμό η εκμετάλλευσή τους.

Εξίσου δυσμενείς είναι οι προοπτικές για τα ορυκτά καύσιμα. Η διαδικασία σχηματισμού των καυσίμων αυτών είναι εξαιρετικά αργή. Στην ουσία πρόκειται για πηγές που δεν ανανεώνονται. Γι' αυτό δεν πρέπει να σπαταλάμε άσκοπα αυτά τα δώρα που μας χάρισαν εκατομμύρια αιώνες. Οι επιστήμονες υπολογίζουν ότι το πετρέλαιο, αν συνεχιστεί με το σημερινό ρυθμό η ανέλκυσή του, θα εξαφανιστεί μέσα σε πενήντα χρόνια. [4]

Το ενεργειακό πρόβλημα άρχισε να δημιουργείται και να εκδηλώνεται ταυτόχρονα με την αλλαγή του κύριου καυσίμου από άνθρακα σε πετρέλαιο, που έγινε μετά τα μέσα του 19ου αιώνα. Μέχρι την εποχή εκείνη οι πηγές της κύριας καύσιμης ύλης (άνθρακας) βρίσκονταν στις κυρίαρχες και οικονομικά αναπτυγμένες χώρες. Αντίθετα, οι πηγές της νέας κύριας καύσιμης ύλης (πετρέλαιο) βρίσκονταν στις αποικίες ή σε χώρες εξαρτημένες, όπως ήταν την εποχή εκείνη η Οθωμανική Αυτοκρατορία. Μέχρι σήμερα οι Δυτικές Κοινωνίες ξοδεύουν ενέργεια αλόγιστα λόγω της ευκολίας στον τρόπο ζωής και πιθανότατα γιατί είναι φθηνή. [5]

Το ενεργειακό πρόβλημα συνίσταται στην έλλειψη ενέργειας και όχι σε αυτή καθ' εαυτή την παρουσία της. Η έλλειψη αυτή, ή εν πάση περιπτώσει η βέβαιη εκτίμηση ότι σε σύντομο σχετικά διάστημα θα στερέψουν τα καύσιμα που παράγουν την ενέργεια, δημιουργεί μια εφιαλτική προοπτική καθολικής κατάρρευσης του επιπέδου ζωής και του πολιτισμού μας, εκτός αν βρεθούν εγκαίρως άλλες πηγές ενέργειας ικανές να καλύψουν το κενό που αναπόφευκτα αργά ή γρήγορα θα δημιουργηθεί. [2]

Είναι αξίωμα «ότι η σπατάλη ενέργειας» είναι εύκολη και ευχάριστη, αντίθετα η εξοικονόμηση ενέργειας δυσάρεστη και προϋποθέτει αλλαγή του τρόπου ζωής. [6]

Επομένως, η ανάγκη της χρήσης ανανεώσιμων ή ήπιων πηγών ενέργειας όπως συχνά αναφέρονται έχει γίνει αντιληπτή σε όλο τον κόσμο και οι περισσότερες χώρες έχουν υπογράψει αντίστοιχες δεσμεύσεις για χρήση των ΑΠΕ. [3]

Οι ήπιες μορφές ενέργειας (ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)), ή νέες πηγές ενέργειας, ή πράσινη ενέργεια) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι οι ΑΠΕ θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη. [7]

Η ενέργεια από τον ήλιο, τον αέρα, τη βιομάζα και άλλες πηγές δεν έχουν τα προβλήματα των άλλων πηγών ενέργειας που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος. Θεωρείται ότι δεν προκαλούν εξαρτήσεις, είναι πρακτικά ανεξάντλητες και ανανεώσιμες και οικολογικά καθαρές. Οι ήπιες μορφές ενέργειας φαίνεται να ικανοποιούν όλες τις απαιτήσεις, ώστε ν' αποτελέσουν τις κύριες πηγές ενέργειας του μέλλοντος.

Στη χώρα μας κυρίαρχες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελούν η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, η ηλιακή ενέργεια είναι κυρίως διαθέσιμη τους καλοκαιρινούς μήνες, οι οποίοι τυγχάνει να είναι και οι περισσότερο απαιτητικοί σε ενέργεια, καθιστώντας με τον τρόπο αυτό την εφαρμογή της ιδιαίτερα χρήσιμη. [5]

Τις μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις έχουν οι κτιριακές εγκαταστάσεις. Γενικά, ο κτιριακός τομέας είναι υπεύθυνος για το 40% περίπου της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Η κατανάλωση αυτή, είτε σε μορφή θερμικής (κυρίως πετρέλαιο) είτε σε μορφή ηλεκτρικής ενέργειας, έχει ως αποτέλεσμα, εκτός της σημαντικής οικονομικής επιβάρυνσης λόγω του υψηλού κόστους της ενέργειας, τη μεγάλη επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με ρύπους, κυρίως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), που ευθύνεται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Στην Ελλάδα οι ανάγκες για θέρμανση των κατοικιών ανέρχονται περίπου στο 70% της συνολικής ενεργειακής τους κατανάλωσης. Η κατανάλωση ενέργειας για τις οικιακές συσκευές, το φωτισμό και τον κλιματισμό ανέρχεται στο 18% του συνολικού ενεργειακού ισοζυγίου. Οι κατοικίες με κεντρικό σύστημα θέρμανσης, το οποίο χρησιμοποιεί ως καύσιμο αποκλειστικά το πετρέλαιο αντιστοιχούν στο 35,5% του συνόλου. Το υπόλοιπο 64% είναι αυτόνομα θερμαινόμενες κατοικίες που χρησιμοποιούν σε ποσοστό 25% πετρέλαιο, 12% ηλεκτρισμό και 18% καυσόξυλα.

Η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια στην Ελλάδα παρουσιάζει αυξητική τάση, λόγω της αύξησης της χρήσης κλιματιστικών και μικροσυσκευών. Η

χρήση των κλιματιστικών αποτελεί σημαντικό παράγοντα αύξησης του ηλεκτρικού φορτίου αιχμής στη χώρα, με τεράστιες οικονομικές συνέπειες και σημαντική επιβάρυνση του καταναλωτή. Επιπλέον τα κλιματιστικά επιδεινώνουν το φαινόμενο της υπερθέρμανσης των αστικών κέντρων και τις συνεπαγόμενες δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν το καλοκαίρι.

Με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι η ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας σ' ένα κτίριο αποτελεί επιτακτική ανάγκη.

Η εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα κτίριο εξασφαλίζεται εν μέρει με τον κατάλληλο σχεδιασμό του κτιρίου και τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών δομικών στοιχείων και συστημάτων αλλά και μέσω της υψηλής αποδοτικότητας των εγκατεστημένων ενεργειακών συστημάτων η οποία προϋποθέτει την άριστη ποιότητα του σχετικού εξοπλισμού και της εγκατάστασής του καθώς και των σχετικών τεχνικών μελετών που τον προδιαγράφουν. [8]

II. Αποθήκευση θερμικής ενέργειας:

Η σημαντική έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί κατά τα τελευταία χρόνια έχει επιτρέψει την ανάπτυξη επιστημονικών μεθόδων, τεχνικών και τεχνολογιών που αφενός εξασφαλίζουν βέλτιστο εσωτερικό περιβάλλον καθώς και τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας. Οι τεχνικές αυτές που κατά βάση κάνουν χρήση ηλιακής ενέργειας έχουν ήδη αποδείξει σε πρακτικό επίπεδο ότι είναι ιδιαίτερα αποδοτικές τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Μία από τις επικρατέστερες αυτές τεχνικές είναι η ανάπτυξη συσκευών αποθήκευσης. Η βασική ιδέα των συστημάτων αποθήκευσης ως μέσα εξοικονόμησης ενέργειας είναι η μετατόπιση των μεγίστων ενεργειακών απαιτήσεων της εγκατάστασης σε ώρες εκτός των περιόδων μέγιστης ζήτησης του συστήματος διανομής ενέργειας ή η εξομάλυνση της καμπύλης

ενεργειακής απαίτησης της εγκατάστασης ώστε να μην παρουσιάζονται σημεία αιχμής κατά την εικοσιτετράωρη λειτουργία της. [9]

Οι βασικοί τύποι των τεχνικών αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας μπορούν να περιγραφούν ως εξής: Αποθήκευση αισθητής θερμότητας, στην οποία η θερμοκρασία της αποθήκευσης υλικών ποικίλλει ανάλογα με το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας, και αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, η οποία κάνει χρήση της ενέργειας που αποθηκεύεται, όταν αλλάζει μια ουσία από τη μία φάση στην άλλη με τήξη (από πάγος σε νερό).

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας επιτυγχάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του μέσου αποθήκευσης. Έτσι, είναι επιθυμητό το μέσο αποθήκευσης να έχει υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα, μακροπρόθεσμη σταθερότητα στο πλαίσιο των θερμικών κύκλων, συμβατότητα με τη συσκευασία φύλαξής του και κυρίως, χαμηλό κόστος.

Αντίθετα, η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας είναι μια ιδιαίτερα ελκυστική τεχνική, δεδομένου ότι παρέχει μια υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και έχει την ικανότητα να αποθηκευτεί η θερμότητα ως λανθάνουσα θερμότητα τήξης σε σταθερή θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία μετάβασης φάσης των υλικών αλλαγής φάσης (PCMs). Για παράδειγμα, στην περίπτωση του νερού, απαιτείται 80 φορές περισσότερη ενέργεια για να λιώσει 1kg πάγου ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του 1kg νερού από 18°C. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται ένα υλικό πολύ μικρότερου βάρους και όγκου για να αποθηκευτεί μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας. [10]

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της θερμότητας είναι υλικά με μεγάλη θερμοχωρητικότητα. Συνήθως είναι οικοδομικά υλικά του φέροντα οργανισμού και του κελύφους γενικότερα ή των εσωτερικών διαχωριστικών τοιχοποιιών, καθώς και υλικά επενδύσεων τοιχοποιιών και δαπέδων.

Τα πιο ικανά υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση της θερμότητας στα ηλιακά παθητικά συστήματα είναι:

- 🖼 το σκυρόδεμα: εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι είναι συγχρόνως υλικό με μεγάλη θερμοχωρητικότητα και στοιχείο του φέροντα οργανισμού.
- 🖼 η πέτρα, οι ωμόπλινθοι, οι οπτόπλινθοι (συμπαγείς και διάτρητοι) και τα κεραμικά πλακίδια είναι τα υλικά που κυρίως χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της θερμότητας. Είναι υλικά φερόντων δομικών στοιχείων ή στοιχείων πληρώσεως ή υλικά επενδύσεως τοίχων και δαπέδων.
- 🖼 το νερό είναι το υλικό με τη μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα, αλλά υπάρχουν κατασκευαστικές δυσκολίες για τη χρησιμοποίησή του σε δομικά στοιχεία. Μπορεί να τοποθετηθεί σε δεξαμενές νερού που ενσωματώνονται στα δομικά στοιχεία (π.χ. σε τμήμα της εξωτερικής τοιχοποιίας), ή σε μεμονωμένα στοιχεία-δοχεία.
- 🖼 τα υλικά αλλαγής φάσης (π.χ. τα εύτηκτα άλατα, όπως το άλας του Glauber), είναι σχετικά νέα υλικά που χρησιμοποιούνται σε επιλεγμένες θέσεις μέσα σε ειδικές δεξαμενές για την αποθήκευση της θερμότητας και αποτελούν αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τα υλικά αυτά αλλάζουν φάση (Phase Change Materials - PCM), δηλαδή αλλάζοντας φυσική κατάσταση (για παράδειγμα, από τη στερεά στην υγρή κατάσταση), αποθηκεύουν θερμότητα, την οποία αποδίδουν για να επιστρέψουν στην αρχική φυσική τους κατάσταση. [11]

III. Τα υλικά αλλαγής φάσης: [10]

Αντίθετα με τις μεθόδους αποθήκευσης αισθητής θερμότητας τα PCMs παρέχουν μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας ενώ παράλληλα η θερμότητα αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται σχεδόν σε μία σταθερή θερμοκρασία. Τα PCMs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παθητικά και ενεργητικά συστήματα ψύξης και θέρμανσης χώρου.

Τα PCMs υφίστανται τους παρακάτω μετασχηματισμούς φάσης: στερεά φάση - στερεά φάση, υγρή φάση - αέρια φάση, και στερεά φάση - υγρή φάση. Κυρίως τα PCMs που πραγματοποιούν το μετασχηματισμό στερεά φάση - στερεά φάση έχει αποδειχτεί ότι έχουν θερμότητα τήξης και μεταβατικές θερμοκρασίες κατάλληλες για εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης. Τα PCMs που υφίστανται το μετασχηματισμό από υγρή σε αέρια φάση συνήθως έχουν υψηλές θερμότητες ωστόσο, λόγω του μεγάλου όγκου κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη για πρακτικές εφαρμογές. Τα PCMs που μετασχηματίζονται από στερεά φάση σε υγρή και αντίστροφα είναι αρκετά χρήσιμα και είναι αυτά που συνήθως συναντώνται σε εφαρμογές, διότι μπορούν να αποθηκεύσουν σχετικά μεγάλη ποσότητα θερμότητας σε ένα στενό εύρος θερμοκρασιών, χωρίς αντίστοιχη μεγάλη μεταβολή του όγκου τους.

Όλα τα PCMs έχουν τη δυνατότητα να ενσωματωθούν μέσα σε κατάλληλες συσκευασίες στα υλικά του κτιρίου όπως το μπετόν, οι γυψοσανίδες στην οροφή και στο δάπεδο με σκοπό την αύξηση της θερμικής αποθηκευτικής τους ικανότητας. Επιπλέον, μπορούν να δεσμεύσουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια ή τη θερμική ενέργεια μέσω φυσικής συναγωγής.

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας εν γένει, και τα υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) ειδικότερα, αποτελούν ένα βασικό θέμα έρευνας τα τελευταία 20 χρόνια, αν και υπάρχει πλήθος πληροφοριών σχετικά με αυτά όντας ευρέως

διαδεδομένα στη βιβλιογραφία, στην πράξη όμως είναι δύσκολο να βρεθούν σε εφαρμογές.

Κεφάλαιο 1

Τα υλικά αλλαγής φάσης

1.1 Εισαγωγή: [12], [13], [14]

Όλα τα υλικά που είναι γνωστά, ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν, μπορούν να βρίσκονται σε μία από τις τρεις φάσεις στερεή, υγρή ή αέρια.

Αν χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο ταξινόμησης ο μηχανισμός αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο υλικό (χαρακτηρίζει σε μεγάλο βαθμό τη γενικότερη θερμική συμπεριφορά του υλικού) τότε θα μπορούσαν να δημιουργηθούν δύο μεγάλες κατηγορίες :

1. Τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή αισθητής θερμότητας σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης τους.
2. Τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας σε ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης τους ενώ στο υπόλοιπο τμήμα συναλλάσσουν θερμότητα με τη μορφή αισθητής θερμότητας.

Για την πρώτη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά τους αποτελεί η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή όγκο, ενώ για τη δεύτερη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται για την αλλαγή φάσης.

Βασική παρατήρηση για τις τιμές των δύο μεγεθών είναι ότι η τιμή της λανθάνουσας θερμότητας είναι πολλαπλάσια της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση ή όγκο.

Τα υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος των θερμοκρασιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται ονομάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία PCMs (**P**hase **C**hange **M**aterials).

Ως υποψήφια PCMs θεωρούνται συνήθως υλικά που αλλάζουν μεταξύ στερεής και υγρής φάσης, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικό επίπεδο και υλικά που μεταβαίνουν από τη μια φάση σε άλλη με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. [12]

Τα υλικά αλλαγής φάσης διαθέτουν μεγάλη ικανότητα συσσώρευσης ενέργειας στη θερμοκρασία τήξης τους, λόγω της λανθάνουσας θερμότητας. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η αποθήκευση της ενέργειας η οποία οφείλεται στην προσωρινή αλλαγή φάσης μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης της θερμικής ενέργειας. Έτσι, πιθανές εφαρμογές είναι τα ηλιακά συστήματα, καθώς και η αποκατάσταση της υπολειπόμενης θερμότητας για τη μετέπειτα χρήση της σε άλλες διαδικασίες. Παρά τη μεγάλη αυτή δυνατότητα, η πρακτική εφαρμογή της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με τη βοήθεια των υλικών αλλαγής φάσης είναι ακόμη περιορισμένη, κυρίως λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας που έχουν. Αυτή η χαμηλή αγωγιμότητα συνεπάγεται μικρούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και, επομένως, οι θερμικοί κύκλοι είναι αργοί και μάλλον ακατάλληλοι για τις περισσότερες πιθανές εφαρμογές. [14]

Πρόσφατο ενδιαφέρον για την τεχνολογία των PCM μπορεί πιθανώς να εντοπιστεί σε εφαρμογές αποθήκευσης ηλιακής θερμότητας για τη θέρμανση χώρου, λίγο μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Η αναζήτηση για εναλλακτικές προσεγγίσεις, περισσότερο αποτελεσματικές από την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, οδήγησε σε έρευνα για συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Σε γενικές γραμμές έχει αποδειχτεί ότι η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Σε αντίθεση με την μέθοδο αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, η μέθοδος αποθήκευσης αυτή παρέχει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης, με μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των φάσεων αποθήκευσης και μετέπειτα απόδοσης της θερμότητας. [13]

Η λειτουργία ενός PCM είναι η ακόλουθη: κατά τη διαδικασία τήξης του μπορεί να απορροφήσει μεγάλο ποσό θερμότητας ψύχοντας το χώρο και να αποδώσει τη θερμότητα που περικλείεται σε αυτό θερμαίνοντας το χώρο κατά τη διαδικασία ψύξης-στερεοποίησης του, η οποία λαμβάνει χώρα σε κάποια ορισμένη θερμοκρασία ή ένα στενό εύρος θερμοκρασίας ανάλογα με την εφαρμογή.

1.2 Ιδιότητες και κατηγοριοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης: [12], [13], [14], [15], [16]

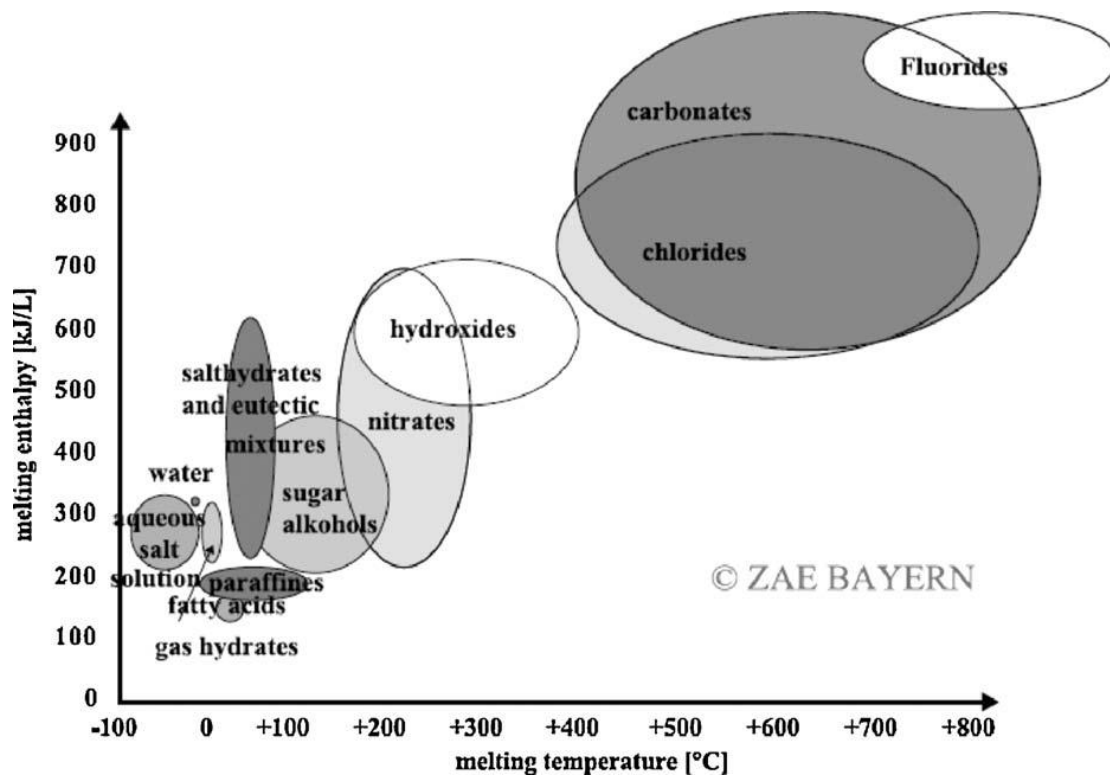
Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν ως υλικά αλλαγής φάσης για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας πρέπει να έχουν μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Θα πρέπει να έχουν σημείο τήξης που να βρίσκεται στο τυπικό φάσμα θερμοκρασιακής λειτουργίας της εφαρμογής, να λιώνουν αμέσως με ελάχιστη υπόψυξη και να είναι χημικώς σταθερά και αδρανή, με χαμηλό κόστος, και μη-διαβρωτικά. Τα υλικά που έχουν μελετηθεί τα τελευταία 40 χρόνια είναι τα ένυδρα άλατα, οι παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και εύτηκτα μίγματα οργανικών και μη οργανικών συστατικών. [13]

Το κύριο κριτήριο για την επιλογή ενός PCM για μια συγκεκριμένη εφαρμογή είναι η θερμοκρασία της αλλαγής φάσης δηλαδή το σημείο τήξης του. Ωστόσο, άλλοι σημαντικές παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται επίσης υπόψη για την ορθή επιλογή του αφορούν: τη λανθάνουσα θερμότητα, τη σταθερότητα κατά την κυκλική απόδοση θερμότητας, και τη θερμική αγωγιμότητα. [14]

Συνοπτικά οι ιδιότητες που κρίνουν την επιλογή των PCM σε εμπορικές εφαρμογές είναι οι παρακάτω:

1. υψηλή αξία της θερμότητας της τήξης και ειδικής θερμότητας τους ανά μονάδα όγκου και βάρους,
2. σημείο τήξης που ταιριάζει με την εκάστοτε εφαρμογή,
3. χαμηλή πίεση ατμού (<1 bar) στη θερμοκρασία λειτουργίας,
4. χημική σταθερότητα και μη-διαβρωτικότητα,
5. να μην είναι επικίνδυνα, ιδιαίτερα εύφλεκτα ή δηλητηριώδη,
6. μια αναπαραγωγίμη κρυστάλλωση χωρίς υποβάθμιση,
7. ένα μικρό βαθμό subcooling και ένα υψηλό ποσοστό ανάπτυξης κρυστάλλων,
8. μικρή διακύμανση του όγκου κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης,
9. υψηλή θερμική αγωγιμότητα, και
10. διαθεσιμότητα και αφθονία. [15]

Τα υλικά που αλλάζουν φάση μπορούν να ομαδοποιηθούν με βάση τη θερμοκρασία τήξης τους και τη λανθάνουσα θερμότητα σε οργανικά, ανόργανα και εότηκτα υλικά. Η κατηγορία των οργανικών υλικών αντιπροσωπεύεται κυρίως από τις παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά (μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 έως και 25), καθώς και από τα λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών, ενώ των ανόργανων υλικών κυρίως από τα διαλύματα ένυδρων αλάτων. Πολλές ουσίες έχουν μελετηθεί ως πιθανά PCMs, αλλά μόνο μερικές από αυτές χρησιμοποιούνται σε εμπορικές εφαρμογές.



Σχήμα 1.2.1: Κλάσεις των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM σε σχέση με το τυπικό φάσμα της θερμοκρασίας τήξης και της ενθαλπίας τήξης τους (γράφημα: ZAE Bayern). [15]

Τα **οργανικά υλικά** αλλαγής φάσης αναλύονται περαιτέρω σε παραφίνες και μη παραφίνες. Η κατηγορία αυτή των υλικών αλλαγής φάσης περιλαμβάνει κατάλληλα μέσα επαναλαμβανόμενης τήξης και στερεοποίησης χωρίς διαχωρισμό φάσης και συνακόλουθη υποβάθμιση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης τους καθώς και αποκρυστάλλωση με μικρή ή σχεδόν μηδενική υπέρψυξη (supercooling) και συνήθως καθόλου διαβρωτικότητα.

Οι παραφίνες αποτελούνται από ένα μίγμα κυρίως ευθείας αλυσίδας nalkanes $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)-CH}_3$. Η κρυστάλλωση της αλυσίδας του (CH_2) απελευθερώνει ένα μεγάλο ποσό λανθάνουσας θερμότητας. Τόσο το σημείο τήξης όσο και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης αυξάνονται με το μήκος της αλυσίδας. Οι παραφίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά αποθήκευσης θερμότητας, λόγω της δυνατότητας τους να λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος

θερμοκρασιών. Από άποψη κόστους, ωστόσο, μόνο τεχνητές παραφίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCMs σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Οι παραφίνες είναι ασφαλείς, αξιόπιστες, προβλέψιμες, λιγότερο ακριβές και μη-διαβρωτικές. Ακόμη είναι χημικά αδρανείς και σταθερές κάτω από τη θερμοκρασία των 500°C, παρουσιάζουν μικρές μεταβολές στον όγκο κατά την τήξη τους και έχουν χαμηλή πίεση ατμού στην τηγμένη μορφή. Με βάση αυτές τις ιδιότητες των παραφινών, τα συστήματα που χρησιμοποιούν παραφίνες συνήθως έχουν αρκετά μεγάλο κύκλο τήξης-στερεοποίησης. Εκτός τα παραπάνω ευνοϊκά χαρακτηριστικά των παραφινών, πρέπει να αναφερθούν και ορισμένες ανεπιθύμητες ιδιότητες, όπως: (i) η χαμηλή θερμική αγωγιμότητά τους, (ii) η μη-συμβατότητά τους με πλαστικά δοχεία αποθήκευσης και (iii) η μερική αναφλεξιμότητά τους. Όλες αυτές οι ανεπιθύμητες ιδιότητες τους μπορεί να ελαττωθούν εν μέρει με μια μικρή τροποποίηση του κεριού και της αποθηκευτικής μονάδας.

Τα οργανικά υλικά που δεν ανήκουν στην κατηγορία των παραφινών (οι μη παραφίνες όπως ονομάζονται) είναι τα πιο πολυάριθμα υλικά αλλαγής φάσης με ποικίλες ιδιότητες. Καθένα από τα υλικά σ' αυτήν την κατηγορία έχει τις δικές του ιδιότητες σε αντίθεση με τις παραφίνες, των οποίων οι ιδιότητες σχεδόν ταυτίζονται. Αυτή είναι η μεγαλύτερη κατηγορία υλικών που είναι υποψηφία για την αποθήκευση της αλλαγής φάσης. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτών των οργανικών υλικών, είναι τα εξής:

- (i) υψηλή θερμοκρασία τήξης,
- (ii) ευφλεκτότητα,
- (iii) χαμηλή θερμική αγωγιμότητα,
- (iv) χαμηλό σημείο ανάφλεξης,
- (v) διαφορετικό επίπεδο τοξικότητας, και
- (vi) αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες.

Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν και τα λιπαρά οξέα, οι εστέρες και οι αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών. Το σημαντικότερό τους μειονέκτημα είναι το κόστος τους, το οποίο είναι 2 έως 2,5 φορές μεγαλύτερο από εκείνο των τεχνητών παραφινών.

Τα **ανόργανα υλικά** αλλαγής φάσης μπορούν να χωριστούν σε ένυδρα άλατα και μεταλλικά. Αυτή η κατηγορία δεν εμφανίζει έντονο φαινόμενο του supercooling και η θερμότητα τήξης τους δε φθίνει κατά τη διάρκεια της κυκλικής αλλαγής φάσης τους.

Τα ένυδρα άλατα μπορούν να θεωρηθούν ως κράματα ανόργανων αλάτων και νερού σχηματίζοντας ένα τυπικό κρυσταλλικό στερεό με γενικό τύπο AB_nH_2O . Τα ένυδρα άλατα αποτελούν την πιο σημαντική ομάδα των PCMs, η οποία έχει μελετηθεί εκτενώς για χρήση σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Οι πιο ελκυστικές ιδιότητες του ένυδρων αλάτων είναι οι ακόλουθες:

- (i) υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου,
- (ii) σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (σχεδόν διπλάσια των παραφινών), και
- (iii) οι μικρές μεταβολές του όγκου κατά τη διάρκεια της τήξης.

Δεν είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά, είναι συμβατά με τα πλαστικά και ελαφρώς τοξικά. Αρκετά ένυδρα άλατα είναι σχετικά φτηνά για χρήση σε συστήματα αποθήκευσης.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στην χρήση ένυδρων αλάτων ως PCMs είναι ότι τα περισσότερα από αυτά τήκονται με δυσανάλογο τρόπο. Καθώς η moles του νερού δεν επαρκούν για να διαλύσουν ένα mole αλατιού κατά την τήξη, το αλάτι έχοντας μεγαλύτερη πυκνότητα κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου αποθήκευσης του PCM με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αναμειχθεί με το νερό κατά την αντίστροφη φάση της στερεοποίησης. Αυτό οδηγεί σε μια

μη αναστρέψιμη διαδικασία τήξης-στερεοποίησης των ένυδρων αλάτων η οποία βαίνει συνεχώς μειούμενη σε κάθε κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης.

Ένα άλλο κοινό πρόβλημα στα ένυδρα άλατα είναι το φαινόμενο της υπέρψυξης ή supercooling. Στη θερμοκρασία τήξης ο ρυθμός σχηματισμού πυρήνων είναι πολύ χαμηλός. Για την επίτευξη ενός λογικού ποσοστού σχηματισμού, η ενέργεια αντί να αποδίδεται στη θερμοκρασία τήξης αποδίδεται σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία. [16]

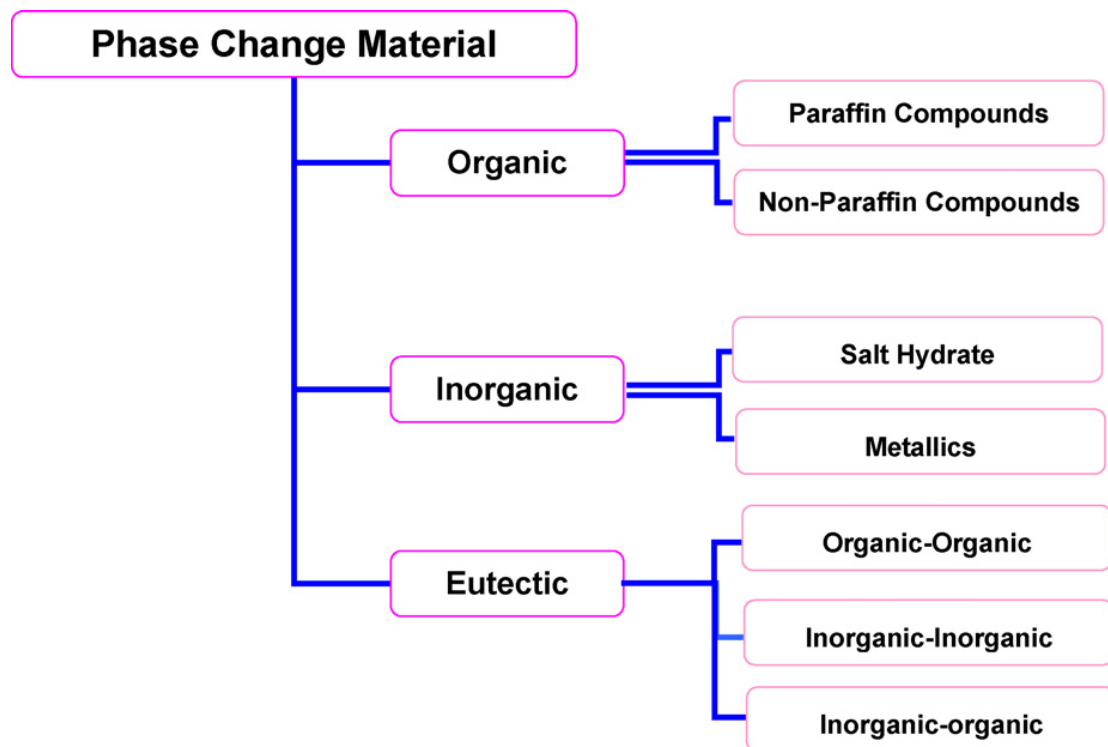
Συμπερασματικά τα κυριότερα προβλήματα που παρουσιάζει η χρήση των ένυδρων αλάτων δημιουργούνται λόγω της ανεπάρκειας σταθερότητας της χημικής σύνθεσης του υλικού και του φαινομένου διάβρωσης μεταξύ του υλικού και του υλικού συσκευασίας. [12]

Η κατηγορία των μεταλλικών ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης περιλαμβάνει τα χαμηλής τήξης μέταλλα αλλά και τα εύτηκτα μέταλλα. Αυτά τα υλικά δεν έχουν θεωρηθεί ακόμη κατάλληλα ως τεχνολογία PCMs κυρίως λόγω του βάρους τους. Ωστόσο, όταν θα απαιτούνται υλικά με μεγάλη συγκέντρωση όγκου, τότε θα επιλεγθούν ως τα καταλληλότερα λόγω της υψηλής θερμότητας τήξης τους ανά μονάδα όγκου. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταλλικών και άλλων PCMs είναι η υψηλή θερμική αγωγιμότητα των πρώτων. Μερικά από τα χαρακτηριστικά των υλικών αυτών είναι τα εξής:

- (ii) χαμηλή θερμοκρασία τήξης ανά μονάδα βάρους
- (ii) υψηλή θερμοκρασία τήξης ανά μονάδα όγκου,
- (ii) υψηλή θερμική αγωγιμότητα,
- (iv) χαμηλή ειδική θερμότητα και
- (v) σχετικά χαμηλή πίεση ατμού .

Τα **εύτηκτα** υλικά αλλαγής φάσης είναι μια σύνθεση δύο ή περισσότερων συστατικών καθένα από τα οποία τήκεται και στερεοποιείται κατάλληλα

σχηματίζοντας ένα μίγμα κρυστάλλων από όλα τα συστατικά κατά τη φάση της κρυσταλλοποίησης. Αυτά τα υλικά τήκονται και στερεοποιούνται σχεδόν πάντα χωρίς διαχωρισμό, δεδομένου ότι σχηματίζουν ένα ομοιογενές μείγμα κρυστάλλων κατά τη στερεοποίηση αφήνοντας ελάχιστα περιθώρια στις συνιστώσες για να διαχωριστούν. Κατά την τήξη οι συνιστώσες υγροποιούνται ταυτόχρονα χωρίς να υπάρχει πάλι διαχωρισμός τους. [16]



Σχήμα 1.2.2: Ταξινόμηση των PCMs. [16]

Άλλου τύπου κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει σύμφωνα με τις εφαρμογές που καλύπτουν. Τα PCMs μπορούν να ομαδοποιηθούν ανάλογα με τη θερμοκρασία ή το εύρος θερμοκρασιών που λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης (από στερεό σε υγρό) σε υλικά που αλλάζουν φάση κάτω από τους 15°C και χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ψύξης σε εφαρμογές κλιματισμού ή μεταφορά ευπαθών υλικών (ιατρικές εφαρμογές) και σε υλικά που αλλάζουν φάση πάνω από τους 90°C και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ψύξης με

απορρόφηση. Όλα τα άλλα υλικά με ενδιαμέσες τιμές της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές θέρμανσης σε συνεργασία με ηλιακά συστήματα ή εφαρμογές ομαλοποίησης των φορτίων κλιματισμού καθώς και για αποθήκευση θερμότητας. [12]

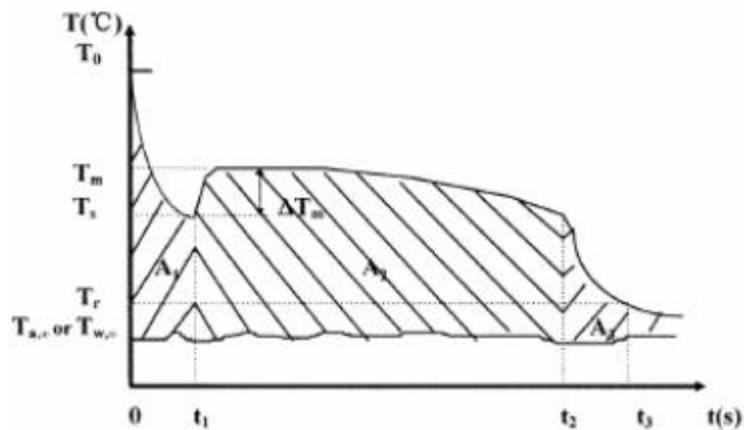
Δεδομένου ότι δεν υπάρχει υλικό που μπορεί να έχει όλες τις απαιτούμενες ιδιότητες ως ιδανικό μέσο θερμικής αποθήκευσης, πρέπει κανείς να χρησιμοποιήσει τα διαθέσιμα υλικά και να προσπαθήσει να αντισταθμίσει τυχούσες αδυναμίες όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες χρησιμοποιώντας ένα επαρκές σύστημα σχεδιασμού. [16]

1.3 Φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων και supercooling: [12]

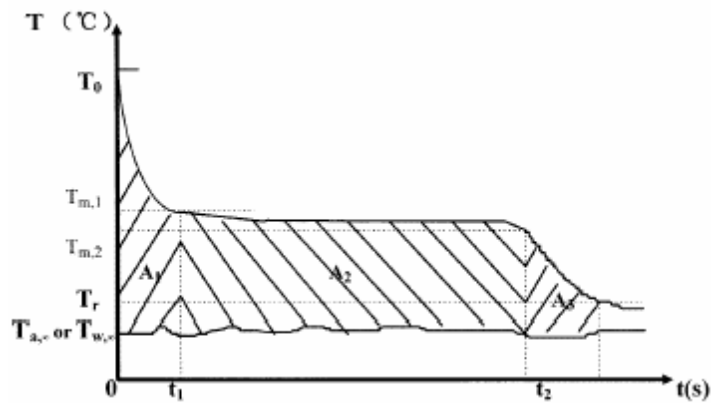
Τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης και κυρίως τα ένυδρα άλατα έχουν πιο περίπλοκη συμπεριφορά από τα οργανικά υλικά, καθώς εκτός από τις φάσεις τήξης και στερεοποίησης περνούν και τα στάδια της ενυδάτωσης και της αφυδάτωσης. Έτσι η μεγάλη θερμοαποθηκευτική ικανότητα των ένυδρων αλάτων είναι δύσκολο να διατηρηθεί και πολλές φορές μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης του υλικού. Κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός άνυδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος. Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα λόγω του ότι τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος, δημιουργώντας μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συνεχή εξασθένιση των ιδιοτήτων τους.

Ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα που αφορά το σύνολο των ανόργανων PCMs αλλά και μέρος των οργανικών είναι το φαινόμενο του supercooling. Το φαινόμενο του supercooling όσο εντείνεται τόσο μη αποδοτικότερη κάνει την αξιοποίηση της αποθηκευμένης θερμότητας. Το φαινόμενο είναι εμφανές αν παρατηρηθεί η καμπύλη θερμοκρασίας - χρόνου, κατά τη ψύξη ενός

δείγματος PCM, όπου παρουσιάζεται πτώση της θερμοκρασίας του υγρού PCM πριν την εκκίνηση της αλλαγής φάσης κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης. Κατά τη συνέχιση της ψύξης η θερμοκρασία του δείγματος αυξάνεται και σταθεροποιείται, τις περισσότερες φορές για μικρό χρονικό διάστημα, στη θερμοκρασία στερεοποίησης καθώς ακολουθεί πτώση της μέχρι την ολοκλήρωση της στερεοποίησης.



Σχήμα 1.3.1: Τυπική καμπύλη ψύξης υλικού με supercooling. [12]



Σχήμα 1.3.2: Τυπική καμπύλη ψύξης υλικού χωρίς supercooling. [12]

Η ύπαρξη supercooling οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης, συνεπώς η λανθάνουσα θερμότητα αποδίδεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή ή σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Βασική παρατήρηση είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ψύξης του δείγματος

τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός του supercooling. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο βαθμός του supercooling δεν είναι φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή αλλά μεταβάλλεται από διάφορες παραμέτρους όπως ο όγκος του δείγματος, η “καθαρότητα” του υλικού, ο ρυθμός ψύξης, η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης.

1.4 Μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων των PCMs:

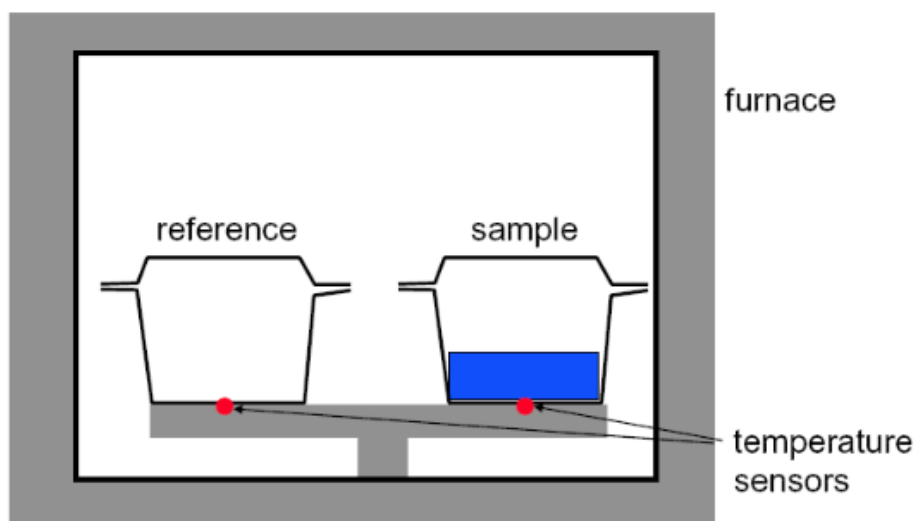
Οι τεχνικές αυτές αφορούν τη μέτρηση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης καθώς και της θερμοκρασίας τήξης των υλικών που χρησιμοποιούνται ως υλικά αλλαγής φάσης. Οι πιο πρόσφατες τεχνικές είναι οι παρακάτω:

1.4.1 Διαφορική Θερμιδομετρική Σάρωση (DSC): [17]

Είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης ιδιοτήτων και αφορά τη μέτρηση θερμικής ικανότητας για πολύ μικρά δείγματα. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην ανίχνευση διαφορών στις θερμικές αντιδράσεις στις οποίες υποβάλλονται το υλικό αναφοράς που εξετάζουμε και ένα δείγμα μέσω ενός θερμοκρασιακού προγράμματος. Για τα υλικά αλλαγής φάσης η μέθοδος DSC υπολογίζει τις καμπύλες τήξης και στερεοποίησης και τις συνδεδεμένες με αυτές τιμές της λανθάνουσας θερμότητας. Υπάρχουν δύο μοντέλα για τη μέθοδο αυτή: το μοντέλο σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης και το μοντέλο ισόθερων βημάτων. Η εφαρμογή της μεθόδου DSC σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης δεν ενδείκνυται για τη μέτρηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας των PCM, γιατί κατά την αλλαγή φάσης, το δείγμα δεν βρίσκεται σε θερμική ισορροπία και παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές της θερμοκρασίας μέσα σε αυτό. Η απόκλιση που πολλές φορές παρατηρείται μεταξύ των αποτελεσμάτων εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος, από το ρυθμό θέρμανσης, από τη θερμοχωρητικότητά του και από την θερμική του αγωγιμότητα. Στη μέθοδο των ισόθερων βημάτων το δείγμα θερμαίνεται σε βήματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η μέθοδος όμως αυτή είναι πιο

χρονοβόρα και πιο περίπλοκη κατά την επεξεργασία από την προηγούμενη μέθοδο. Το μεγάλο της όμως πλεονέκτημα είναι ότι τυχούσες αποκλίσεις στη μέτρηση της θερμοκρασίας του δείγματος είναι γνωστές καθώς έχουν σχέση με το μέγεθος του ισόθερμου βήματος.

DSC – differential scanning calorimetry



Σχήμα 1.4.1.1: Διάταξη μέτρησης με μέθοδο DSC. [17]

Συμπερασματικά η μέθοδος μέτρησης DSC έχει δώσει αρκετά ακριβή αποτελέσματα κάνοντας όμως χρήση δειγμάτων πολύ μικρών διαστάσεων (της τάξης των μm). Σε εμπορικές εφαρμογές όμως η μέθοδος αυτή ενδεχομένως να μη δώσει ασφαλή αποτελέσματα γι' αυτό είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο δείγμα από το συγκεκριμένο υλικό που μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε. Αυτό απαιτείται γιατί όταν επέλθει ένας μεγάλος κύκλος δοκιμών τήξης-στερεοποίησης σε ένα μεγαλύτερο δείγμα είναι πολύ πιθανό αυτό να χάσει την ομοιογένεια των ιδιοτήτων του σε όλη την έκταση του. Για το λόγο αυτό, στις περιπτώσεις των μεγαλύτερων δειγμάτων, προτιμάται η χρήση κάποιας παρεμβατικής μεθόδου δοκιμών για καταγραφή των ιδιοτήτων τους.

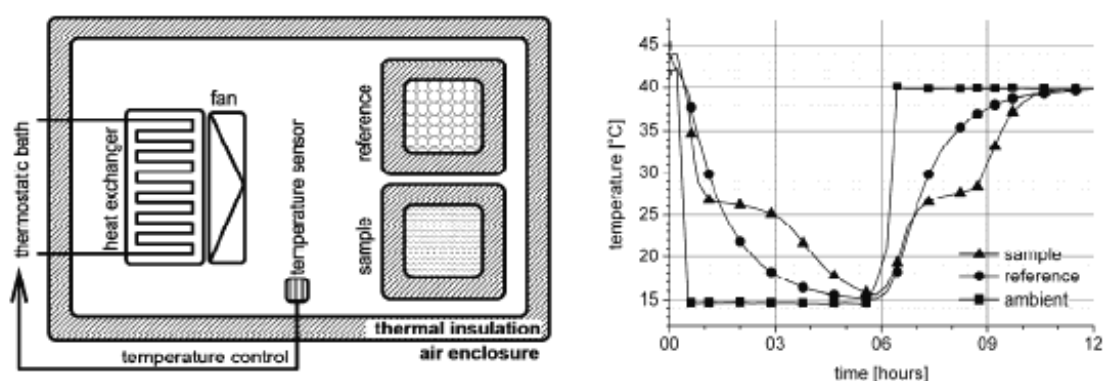
1.4.2 T- history: [17],[18],[19]

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τον Zhang το 1999 και αποτελεί ένα φθινό και εύκολο τρόπο για την αξιολόγηση των PCMs που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε κάποια εφαρμογή έχοντας ως αναφορά την ενθαλπία της αλλαγής φάσης τους. Η μέθοδος αυτή υπέστη βελτιώσεις από διάφορους επιστήμονες (Marin et al. 2003) και είναι πλέον κατάλληλη για τον προσδιορισμό της ειδικής θερμοχωρητικότητας C_p . Συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή υπολογίζει την λανθάνουσα θερμότητα ενός PCM μέσω σύγκρισης της θερμοκρασίας του PCM και ενός υλικού αναφοράς. Η λειτουργία της μεθόδου αυτής περιγράφεται παρακάτω:

Δύο πανομοιότυπες χοάνες που η καθεμία περιέχει το PCM που θέλουμε να μετρήσουμε και το υλικό αναφοράς τοποθετούνται σ' ένα μονωμένο κουτί. Στη συνέχεια, καταγράφονται οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος, του PCM και του υλικού αναφοράς. Έπειτα η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αλλάζει ακαριαία. Η αντίδραση του PCM και του υλικού αναφοράς σ' αυτή την αλλαγή εξαρτάται από τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες. Με τη βοήθεια του υλικού αναφοράς, βαθμονομείται η θερμική αντίσταση μεταξύ των χοανών και του περιβάλλοντος. Έτσι, προσδιορίζονται η ειδική θερμότητα και η ενθαλπία του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, όπως είναι οι συμβατικές θερμοδομετρικές μέθοδοι, η διαφορική θερμική ανάλυση και η διαφορική θερμοδομετρική σάρωση, η μέθοδος που μόλις εξετάστηκε παρουσιάζει τα ακόλουθα κύρια στοιχεία: η πειραματική μονάδα είναι απλή και επιτρέπει τη μέτρηση της θερμοκρασίας τήξης, της ειδικής θερμότητας και της θερμικής αγωγιμότητας των διαφόρων δειγμάτων PCMs ταυτόχρονα καθώς και την παρακολούθηση της διαδικασίας σταδιακής αλλαγής κάθε δείγματος PCM. Στη μέθοδο αυτή, είναι δυνατή η απόκτηση δεδομένων κοντά στις συνθήκες ισορροπίας όσον αφορά δείγματα μεγάλου μεγέθους των οποίων η μέτρηση είναι απαραίτητη

για δύο κυρίως λόγους. Πρώτον, τα περισσότερα δείγματα PCM είναι σύνθετα υλικά και μόνο η μέτρηση μεγάλων δειγμάτων μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα σε ότι αφορά τη σύνθεσή τους. Δεύτερον, αρκετά δείγματα PCM παρουσιάζουν φαινόμενα υπόψυξης τα οποία εξαρτώνται από το μέγεθος των δειγμάτων αυτών. Σε μια τυπική εφαρμογή, το PCM χρησιμοποιείται σε συσκευασίες των 100 ml τουλάχιστον. Το μέγεθος του δείγματος θα πρέπει να είναι ανάλογο, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που αφορούν την υπόψυξη να σχετίζονται με την εκάστοτε εφαρμογή.

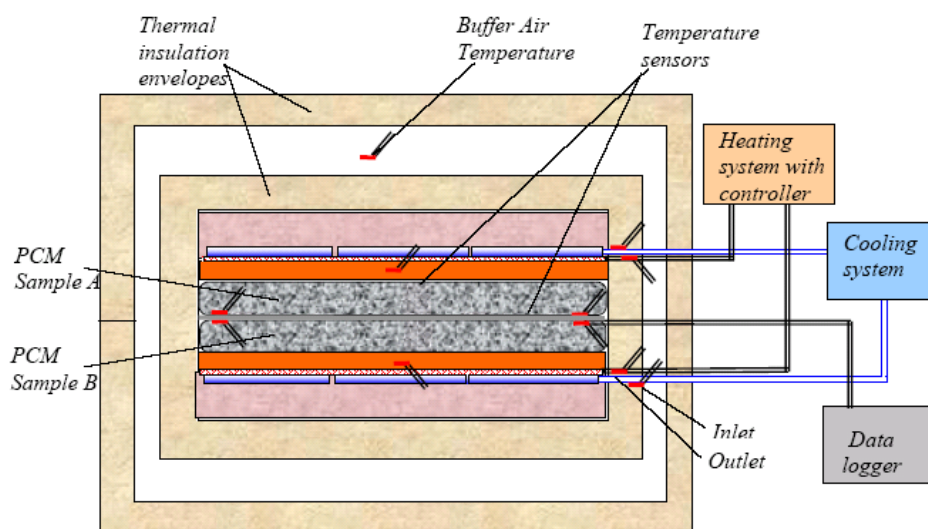


Σχήμα 1.4.2.1: Τυπική μετρητική διάταξη T- history (αριστερά) και τυπικό διάγραμμα μετά από μέτρηση με τη μέθοδο T- history (δεξιά). [17]

1.4.3 Double-cell: [20]

Η μέθοδος αυτή έχει αναπτυχθεί από τους Victor del Valle, Dale Bessete, Lisa Sorpkon, John Zhou και Kaz Szymocha και αποτελεί μια μέθοδο θερμιδομετρικού τύπου που επιτρέπει τη μέτρηση και σύγκριση της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας των υλικών αλλαγής φάσης σε πολλούς κύκλους. Η μέθοδος αυτή αφορά τη συμμετρική θέρμανση και ψύξη κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες ενός μεγάλου δείγματος PCM (1-2 kg) το οποίο έχει τοποθετηθεί στο εσωτερικό ενός πολύ καλά μονωμένου καλύμματος. Παρέχει αρκετά καλές πληροφορίες για τους ερευνητές και κατασκευαστές προϊόντων εμπορικής ή μεγαλύτερης κλίμακας που θέλουν να εξετάσουν την

συμπεριφορά μεγάλων δειγμάτων όσον αφορά την θερμική αποθηκευτική τους ικανότητα σε μεγάλο αριθμό κύκλων, αν και αρκετοί θεωρούν ότι τα αποτελέσματά της δεν είναι ιδιαίτερα ακριβή.



Σχήμα 1.4.3.1: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου double-cell. [20]

1.5 Μορφές συσκευασίας και ενσωμάτωσης των PCMs: [12],[21]

Στις περισσότερες εφαρμογές των PCMs κρίνεται απαραίτητη η προστασία του υλικού σε κάποιο από τα είδη διαθέσιμης συσκευασίας (τοποθέτηση μέσα σε κάψουλες ή σακούλες, ενσωμάτωση στο πορώδες άλλων υλικών, εναλλάκτες θερμότητας ενισχυμένοι με PCMs) ώστε να προφυλαχθεί το υλικό από την επίδραση των συνθηκών του περιβάλλοντος ή και να διευκολύνεται η μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας. Τα διάφορα είδη συσκευασίας θα πρέπει όμως να πληρούν κάποιες βασικές προϋποθέσεις, όπως:

- να καλύπτουν τις απαιτήσεις αντοχής στη διάβρωση και θερμικής σταθερότητας,
- να μην επιτρέπουν την επαφή του περιβάλλοντος με το PCM καθώς και τις αρνητικές συνέπειες που αυτό μπορεί να επιφέρει,
- να παρέχουν επαρκή επιφάνεια για τη μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας,

- να έχουν σταθερή δομή και ευκολία στη χρήση.

Η ενσωμάτωση των PCMs σε συσκευασίες προκάλεσε αρκετό ερευνητικό ενδιαφέρον. Οι διάφορες μορφές ενσωμάτωσης παρουσιάζονται παρακάτω:

1.5.1 Μαζική αποθήκευση: [21]

Αυτός ο τρόπος αποθήκευσης περιλαμβάνει έναν εναλλάκτη θερμότητας με υλικά αλλαγής φάσης και παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τις ήδη υπάρχουσες δεξαμενές αποθήκευσης ενέργειας. Ωστόσο, η βασική τους διαφορά είναι ότι το σύστημα μαζικής αποθήκευσης, λόγω της παρουσίας των PCMs, απαιτεί μια περισσότερο εντατική ανταλλαγή θερμότητας σε σχέση με μια δεξαμενή που δεν περιέχει PCMs. Αυτό συμβαίνει καθώς τα PCMs έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας από οποιοδήποτε άλλο μέσο αποθήκευσης. Επιπλέον, η περιοχή συναλλαγής θερμότητας είναι μικρότερη στο σύστημα μαζικής αποθήκευσης, όμως απαιτεί ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό απελευθέρωσης ή απόκτησης. Οι διάφορες προσεγγίσεις της συγκεκριμένης μεθόδου που εμφανίζουν ευρεία χρήση είναι η προσθήκη πτερυγίων ή η χρήση μορίων υψηλής αγωγιμότητας, οι μεταλλικές δομές, οι ίνες στην πλευρά επαφής με το PCM, οι εναλλάκτες θερμότητας άμεσης επαφής ή η μέθοδος των κυλιόμενων κυλίνδρων.

1.5.2 Ενσωμάτωση σε μικροκάψουλες: [15],[22]

Η συσκευασία σε μικροκάψουλες ή μικροενσωμάτωση όπως αλλιώς ονομάζεται είναι μια τεχνική κατά την οποία μικρά, σφαιρικά ή ραβδοειδή σωματίδια PCMs περικλείονται μέσα σε ένα λεπτό, μεγάλου μοριακού βάρους πολυμερές φιλμ. Τα επιχρισμένα σωματίδια μπορούν στη συνέχεια να ενσωματωθούν σε κάθε κοιλότητα συμβατή με το φιλμ συσκευασίας. Επομένως, το φιλμ αυτό πρέπει να είναι συμβατό τόσο με το PCM όσο και με

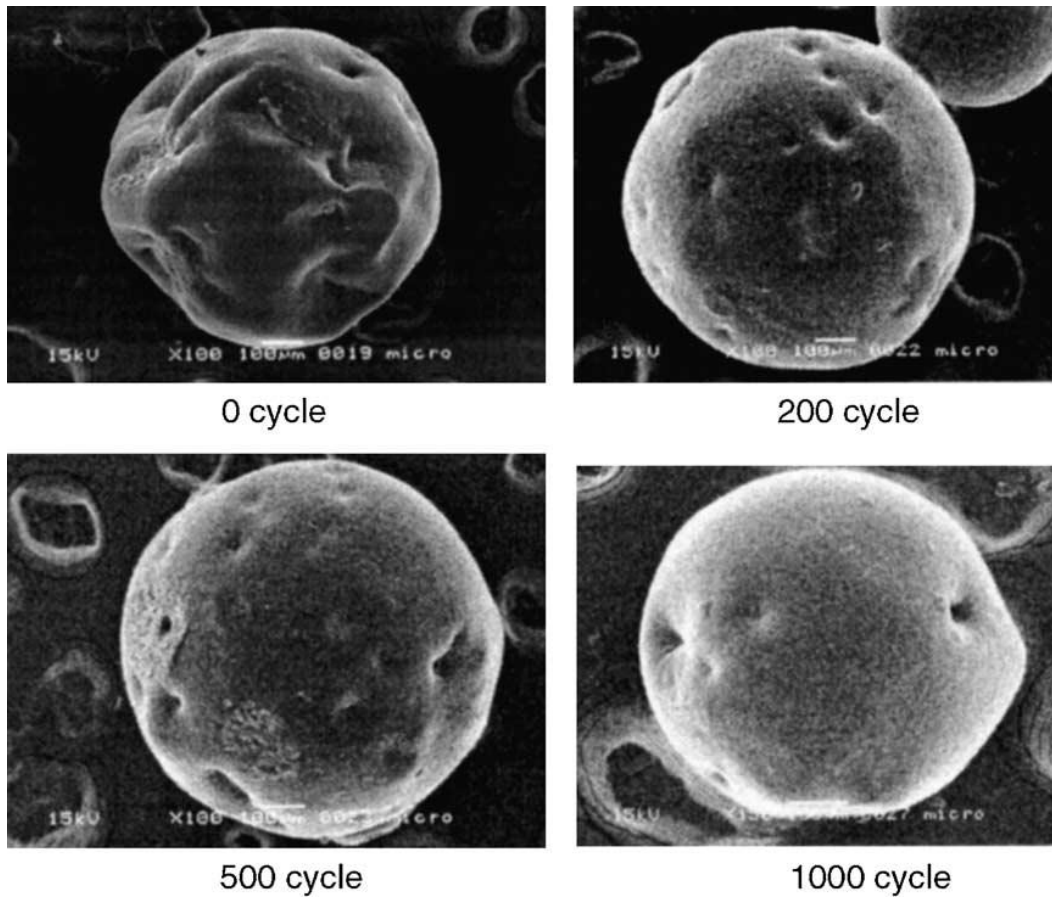
την κουλότητα. Οι μικροκάψουλες διαθέτουν υψηλή αποθήκευση ενέργειας και ικανότητα απελευθέρωσης της τάξεως των 145 - 240 kJ/kg.

Η μικροενσωμάτωση είναι μια πρόσφατα ανεπτυγμένη μέθοδος ενσωμάτωσης για PCM καθώς αναφέρεται στην ενσωμάτωση σε σωματίδια μικρότερα από διάμετρο 1mm in. Στις μέρες μας μπορεί να εφαρμόζεται μόνο σε υδρόφοβα PCMs. Η μέθοδος αυτή εξυπηρετεί τους παρακάτω σκοπούς:

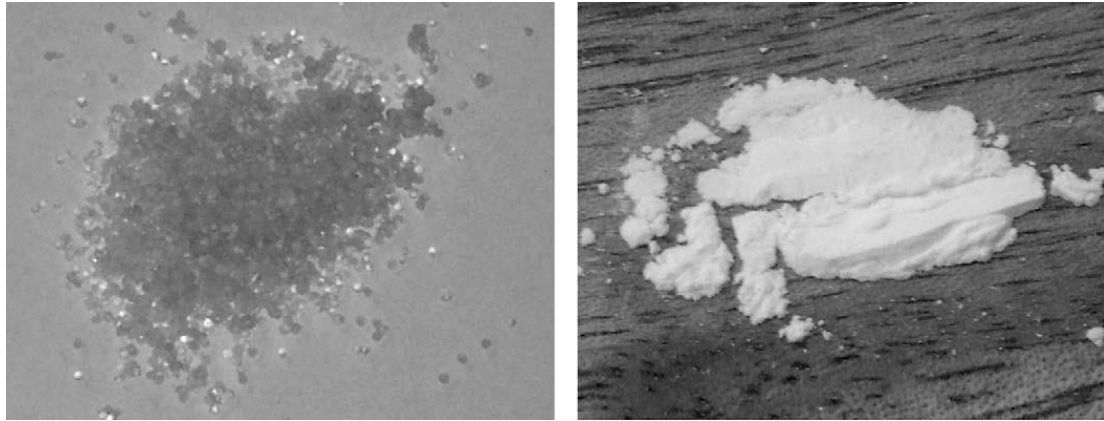
- Βελτιώνει τη συμβατότητα του υλικού αλλαγής φάσης με το περιβάλλον, μέσω ενός φράγματος που δημιουργεί.
- Βελτιώνει το χειρισμό του PCM σε μια εφαρμογή.
- Μειώνει εξωτερικές μεταβολές του όγκου, γεγονός το οποίο είναι συνήθως μια επίσης θετική επίδραση για μια εφαρμογή.
- Βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας προς το περιβάλλον μέσω της μεγάλης αναλογίας επιφάνεια προς όγκος.
- Βελτιώνει τη σταθερότητα του κύκλου των PCMs καθώς ο διαχωρισμός των φάσεων περιορίζεται σε μικροσκοπικές αποστάσεις.

Τα PCMs σε γενικές γραμμές πρέπει να είναι συσκευασμένα, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται αρνητικά η λειτουργία του υλικού κατασκευής. Προηγούμενα πειράματα με συσκευασίες PCMs μεγάλου όγκου ή με PCMs σε μακροκάψουλες απέτυχαν λόγω της χαμηλής αγωγιμότητας των PCMs σ' αυτές τις συσκευασίες. Τη στιγμή που τα PCMs έπρεπε να ανακτήσουν τη θερμότητα από την υγρή τους φάση, εκείνα στερεοποιήθηκαν γύρω από τα άκρα της συσκευασίας και με τον τρόπο αυτό παρεμποδίστηκε η αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας. Με τη μικροενσωμάτωση όμως των PCMs, οι διαστάσεις είναι τόσο μικρές που το φαινόμενο αυτό δεν συμβαίνει. Επιπλέον, η μικροενσωμάτωση επιτρέπει στα PCMs να ενσωματωθούν εύκολα και οικονομικά σε συμβατικά υλικά κατασκευής.

Για πολλές εφαρμογές, τα PCMs έχουν αποθηκευτεί σε μικροκάψουλες, γεγονός το οποίο υπήρξε αντικείμενο μελέτης από αρκετούς ερευνητές και αναπτύχθηκε από εταιρείες όπως η BASF. Παρ' όλα αυτά, η ενδεχόμενη χρήση των μικροκαψουλών PCMs σε διάφορες εφαρμογές θερμικού ελέγχου, όπου κυρίως προτιμούνται, είναι περιορισμένη σε κάποιο βαθμό λόγω του υψηλού κόστους τους.



Σχήμα 1.5.2.1: Προφίλ μικροκαψουλών παραφίνης αξιολογημένα από το SEM σε διάφορους θερμικούς κύκλους. [15]



Σχήμα 1.5.2.2: Μικροκάψουλες PCMs: από το εργαστήριο που κατασκευάζονται (αριστερά) -που εμπορεύεται η BASF (δεξιά). [15]

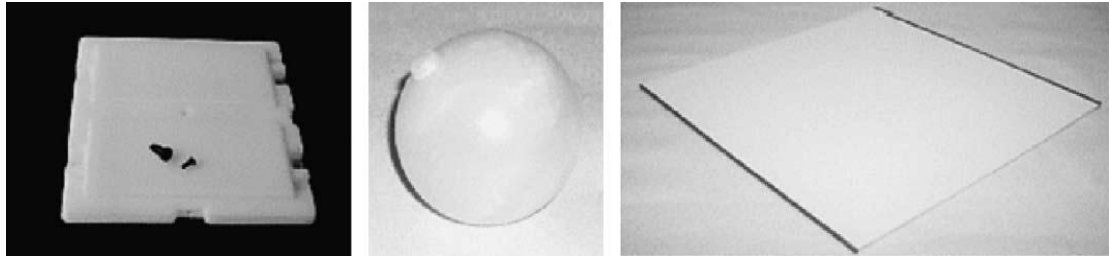
1.5.3 Ενσωμάτωση σε μακροκάψουλες: [15],[21],[22]

Αυτή η μέθοδος ενσωμάτωσης περιλαμβάνει την ένταξη των PCMs σε κάποια μορφή πακέτου όπως σωλήνες, θήκες, σφαίρες, πάνελ ή σε άλλα δοχεία. Τα δοχεία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα, σαν εναλλάκτες θερμότητας ή να ενσωματωθούν σε δομικά προϊόντα. Αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο ενσωμάτωσης καθώς αναφέρεται σε ενσωμάτωση σε δοχεία που συνήθως έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 1 cm in. Εκτός από τη συγκράτηση των υγρών PCMs και την παρεμπόδιση αλλαγών στη σύνθεσή τους μέσω της επαφής με το περιβάλλον, η ενσωμάτωση σε μακροκάψουλες προσφέρει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Βελτιώνει τη συμβατότητα του υλικού αλλαγής φάσης με το περιβάλλον, μέσω ενός φράγματος που δημιουργεί.
- Βελτιώνει το χειρισμό του PCM σε μια εφαρμογή.
- Μειώνει εξωτερικές μεταβολές του όγκου, γεγονός το οποίο είναι συνήθως μια επίσης θετική επίδραση για μια εφαρμογή.

Το βασικό πλεονέκτημα της συσκευασίας σε μακροκάψουλες είναι ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα που χρησιμοποιούν

ρευστό μεταφοράς θερμότητας τόσο σε υγρή μορφή όσο και σε αέρια φάση. Επιπλέον είναι εύκολες στο χειρισμό και τη μεταφορά.



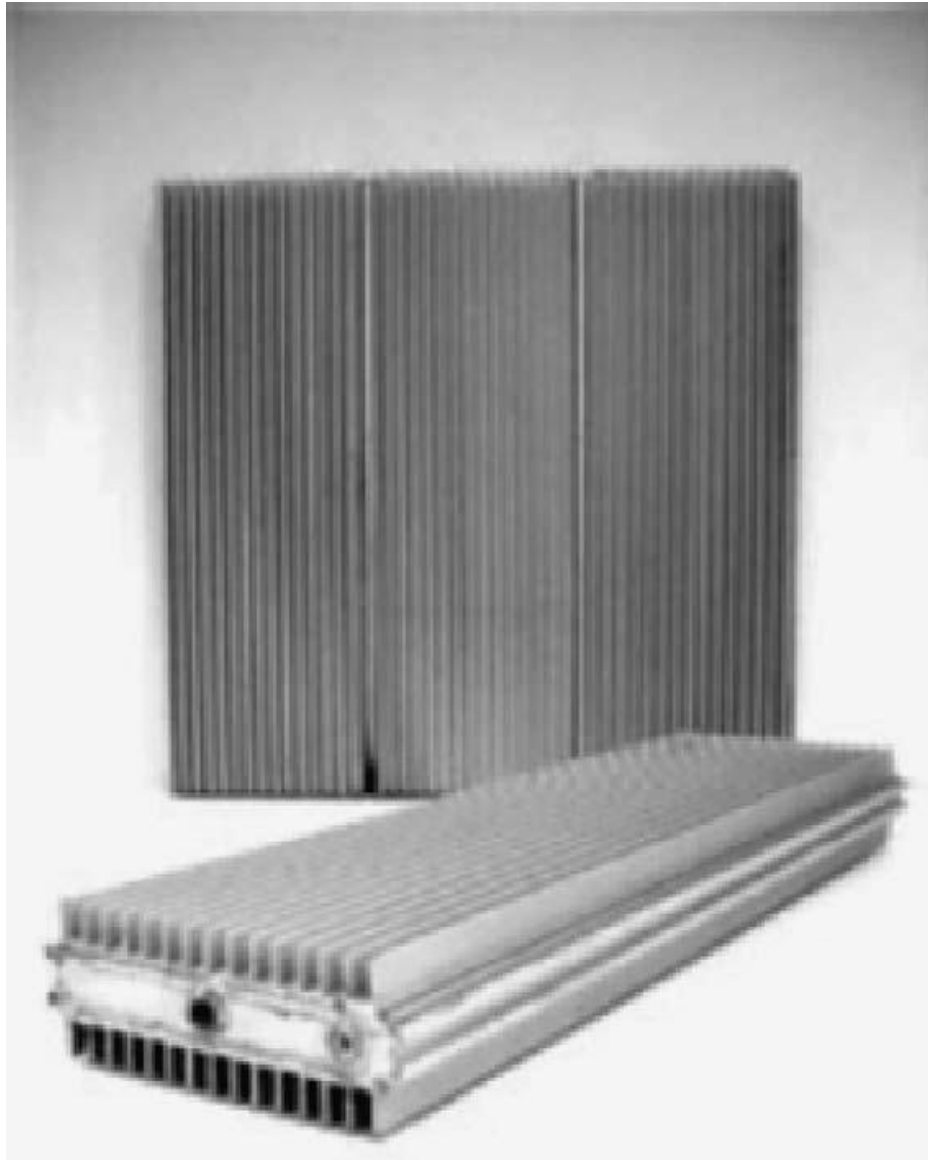
Σχήμα 1.5.3.1: Μακροκάψουλες PCMs: (από αριστερά προς τα δεξιά) επίπεδο δοχείο, σφαίρα, μπάρα διπλής κυκλοφορίας. [15]



Σχήμα 1.5.3.2: Μακροενσωμάτωση PCMs σε θήκες. [15]



Σχήμα 1.5.3.3: Μακροενσωμάτωση PCMs σε λωρίδες καψουλών για ανόργανα PCMs. [15]



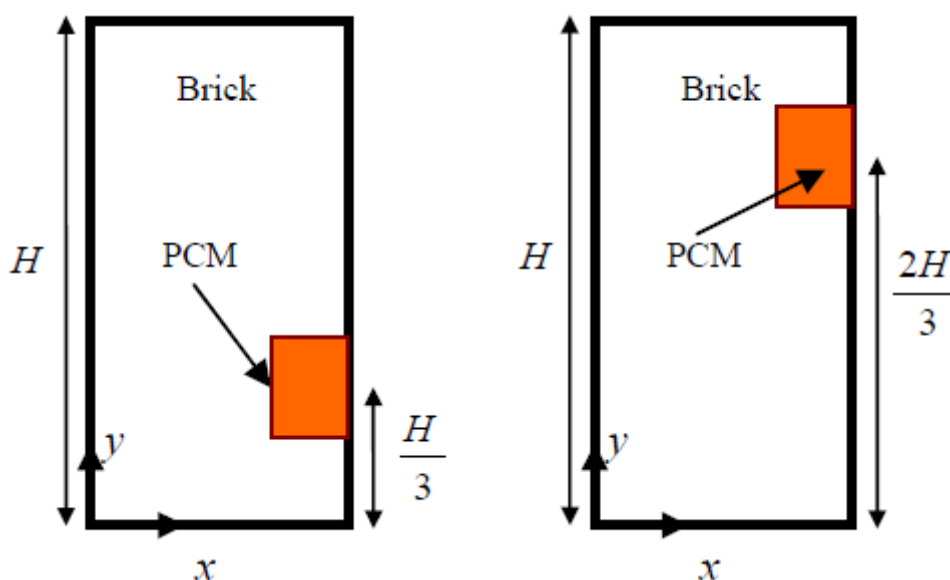
Σχήμα 1.5.3.4: Μακροενσωμάτωση PCMs σε περύγια αλουμινίου για βέλτιστη μεταφορά θερμότητας. [15]

1.5.4 Ενσωμάτωση σε τούβλο: [23]

Αποτελεί μια από τις πιο συνηθισμένες και αποτελεσματικές μεθόδους αποθήκευσης των PCMs για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας στα κτίρια. Ένας από τους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τόσο την οικονομική όσο και τη θερμική απόδοση ενός τούβλου με ενσωματωμένο PCM είναι η ποσότητα του PCM. Γενικά παρατηρείται μια χρονική υστέρηση μεταξύ

της μέγιστης θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας και της μέγιστης ροής θερμότητας εισόδου. Από την άλλη μεριά, το PCM θα μειώσει σημαντικά το ποσοστό αυτό της μέγιστης ροής θερμότητας.

Μια ακόμη παράμετρος που επιδρά στη θερμική αποδοτικότητα αυτής της μεθόδου ενσωμάτωσης είναι η θέση τοποθέτησης του υλικού αλλαγής φάσης μέσα σ' έναν τοίχο από τούβλο. Με βάση διάφορες έρευνες που έχουν γίνει έχει διαπιστωθεί ότι το PCM παρουσιάζει μεγαλύτερη αποδοτικότητα όταν είναι τοποθετημένο στην εξωτερική πλευρά του τοίχου.



Σχήμα 1.5.4.1: Ενσωμάτωση PCM σε τοίχο από τούβλο. [23]

1.6 Μέθοδοι προσομοίωσης της αλλαγής φάσης:

1.6.1 Εισαγωγή: [24]

Όπως είναι γνωστό, η αποθήκευση θερμότητας στα PCMs είναι προτιμότερη από την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, σε εφαρμογές με μικρή ταλάντωση της θερμοκρασίας λόγω του σχεδόν ισόθερμου του μηχανισμού

αποθήκευσης και της υψηλής πυκνότητας αποθήκευσης που διαθέτουν τα υλικά αυτά.

Η μεταφορά θερμότητας για αποθήκευση στα PCMs είναι ένα παροδικό, μη γραμμικό φαινόμενο με μια κινούμενη διεπιφάνεια στερεού-υγρού, που αναφέρεται γενικά ως πρόβλημα «κινούμενου ορίου». Ο μη γραμμικός αυτός χαρακτήρας των προβλημάτων αυτών δημιουργεί αρκετές δυσκολίες και συνεπώς, έχουν αναπτυχθεί αναλυτικές λύσεις για τα προβλήματα αλλαγής φάσης, οι οποίες είναι εφαρμόσιμες μόνο σε ορισμένες φυσικές καταστάσεις που έχουν μια απλή γεωμετρία και απλές συνοριακές συνθήκες. Παρόλα αυτά οι λύσεις αυτές περιλαμβάνουν πολύπλοκες μεθόδους στις οποίες γίνεται η υπόθεση της σταθερής θερμοκρασίας τήξης ή στερεοποίησης. Ωστόσο, η τεχνητή παραφίνη, για παράδειγμα, έχει ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας στα σημεία όπου συμβαίνουν η τήξη και η στερεοποίηση. Επίσης, οι προαναφερθείσες μέθοδοι είναι κατάλληλες μόνο για τον υπολογισμό ημιάπειρης ή άπειρης αποθήκευσης, ενώ, στην πραγματικότητα η αποθήκευση θερμότητας είναι πεπερασμένη και μάλιστα είναι τριών ή τουλάχιστον δύο διαστάσεων, έτσι ώστε να επιτευχθεί μια αρκετά ακριβής λύση. Ως εκ τούτου, πρέπει να χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι για να επιτευχθεί μια αρκετά ακριβής λύση για τη μεταφορά θερμότητας στα PCMs.

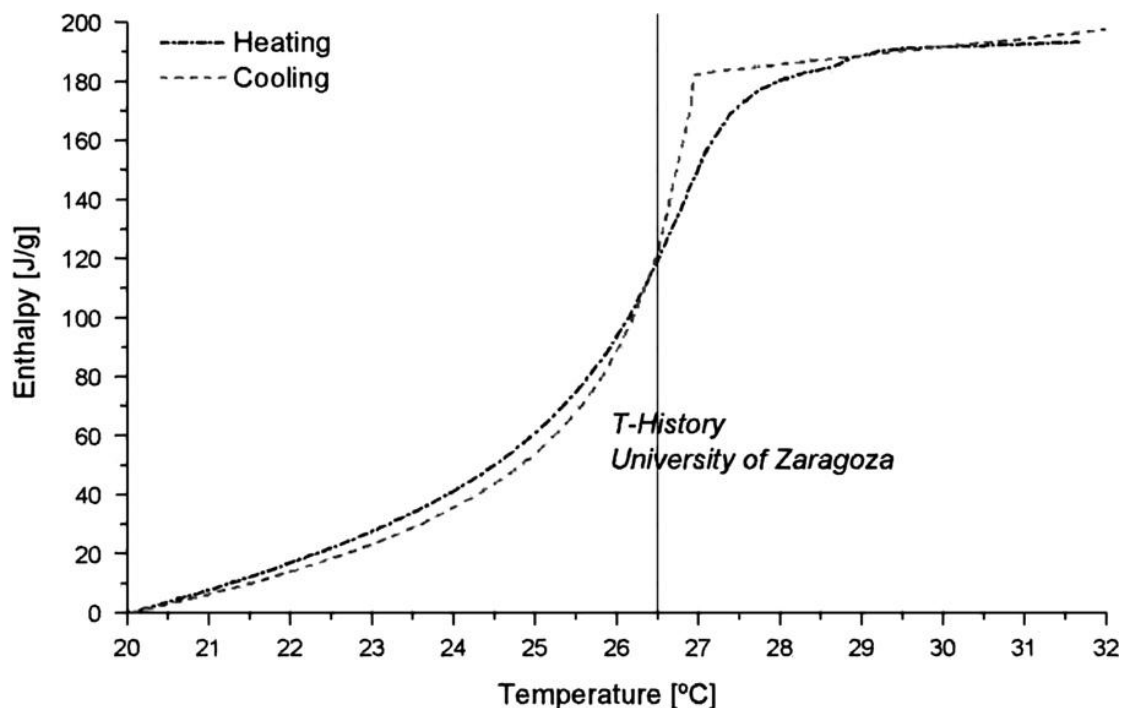
Τα προβλήματα αλλαγής φάσης συνήθως λύνονται με πεπερασμένες διαφορές ή πεπερασμένα στοιχεία, σύμφωνα με την αριθμητική προσέγγιση. Το φαινόμενο αλλαγής φάσης όμως πρέπει να εξεταστεί χωριστά, λόγω της μη γραμμικής φύσης του. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών ειδών αριθμητικών μεθόδων για την επίλυση των προβλημάτων PCMs. Οι πιο συχνές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι η μέθοδος της ενθαλπίας και η μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας. Οι μέθοδοι αυτές είναι σε θέση να χρησιμοποιούν PCMs με ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας αλλαγής φάσης.

Παρακάτω αναλύονται η καθεμία μέθοδος ξεχωριστά.

1.6.2 Μέθοδος της ενθαλπίας: [24], [25], [26], [27], [28]

Το κύριο χαρακτηριστικό των υλικών αλλαγής φάσης είναι η σχέση ενθαλπίας-θερμοκρασίας που καθορίζει την ικανότητά τους να αποθηκεύουν θερμότητα. Η σχέση αυτή καθορίζεται με πειραματικά θερμιδομετρικές μεθόδους. Τα PCMs είναι ιδιαίτερα δύσκολα δείγματα λόγω της μεγάλης θερμικής μάζας τους, αλλά και γιατί συχνά είναι ετερογενή υλικά, ή παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από τον όγκο. Ως εκ τούτου, η απόκτηση θερμιδομετρικών δεδομένων δεν είναι μια αντιπροσωπευτική τυποποιημένη μεθοδολογία, και μάλιστα χωρίς την προσθήκη σχολιασμών στα δεδομένα των μετρήσεων μπορούν εύκολα να δημιουργηθούν παρεξηγήσεις [25]. Επιπλέον, τα PCMs παρουσιάζουν κάποια υστέρηση αλλά και φαινόμενα υπόψυξης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η λανθάνουσα θερμότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα C_p φαίνονται ανεπαρκείς προκειμένου να προσδιορίσουν την ικανότητα αποθήκευσης των PCMs σε κάθε θερμοκρασία. Αντιθέτως, αυτή η πληροφορία δίνεται από την καμπύλη ενθαλπίας-θερμοκρασίας [26]. Στην πραγματικότητα, σε περιπτώσεις αλλαγής φάσης, περισσότερες από μία διεπιφάνειες αλλαγής φάσης μπορεί να συμβούν ή οι διεπιφάνειες αυτές ενδέχεται να εξαφανιστούν εντελώς. Επιπλέον, η αλλαγή φάσης συμβαίνει συνήθως σε μη ισοθερμικό εύρος θερμοκρασίας, όπως στην περίπτωση της παραφίνης. Στις περιπτώσεις αυτές, η παρακολούθηση της διεπιφάνειας στερεού-υγρού μπορεί να είναι δύσκολη ή και αδύνατη. Από υπολογιστική άποψη, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο το πρόβλημα να αναδιατυπωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι διάφορες εξισώσεις που το περιγράφουν να ενσωματωθούν σε μία νέα μορφή εξισώσεων που θα εφαρμόζονται σε όλα τα σταθερά τμήματα του προβλήματος. Αυτό μπορεί να γίνει με τη γνωστή συνάρτηση ενθαλπίας θερμοκρασίας του εκάστοτε υλικού αλλαγής φάσης που χρησιμοποιείται. Η συνάρτηση αυτή καθορίζει το ποσό της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας που απαιτείται για την αλλαγή φάσης. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αδύναμη επίλυση μερικών διαφορετικών εξισώσεων [24].

Μια τυπική καμπύλη της μεθόδου αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.6.2.1: Καμπύλη ενθαλπίας-θερμοκρασίας PCM με τη μέθοδο T-history. [26]

Από την παραπάνω καμπύλη διαπιστώνουμε μια μέση θερμοκρασία αλλαγής φάσης για το PCM γύρω στους 26,5°C [26].

Προκειμένου να γίνει μια τέτοια μοντελοποίηση, χρησιμοποιούνται βασικές παραδοχές για την τήξη και τη στερεοποίηση του PCM, όπως είναι:

- (α) το PCM μπορεί να θεωρηθεί ως ένα συνεχές μέσο από τη μακροσκοπική κλίμακα
- (β) η μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής στο εσωτερικό του PCM είναι αμελητέα
- (γ) οι θερμικές ιδιότητες (θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα) του PCM είναι σταθερές σε κάθε φάση, αλλά η θερμοχωρητικότητα θα μπορούσε να είναι ασυνεχής μεταξύ της στερεής και υγρής φάσης. Αντίθετα, η θερμική αγωγιμότητα υποτίθεται ότι είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση του PCM
- (δ) υφίσταται αλλαγή φάσης υπό σταθερή πίεση

(ε) η υποψύξη είναι αμελητέα και
(στ) για υλικά αλλαγής φάσης πολλών συστατικών που υποβάλλονται σε μετασχηματισμό σε ένα εύρος θερμοκρασιών, δεν θεωρούνται φαινόμενα διαχωρισμού κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης [27].

Από πειράματα που έγιναν από διάφορους μελετητές διαπιστώθηκε ότι όσο οι τιμές της ενθαλπίας ενός PCM αυξάνονται, τόσο αυξάνεται η ενέργεια που προσδίδεται, καθώς επίσης και η μέγιστη ισχύς και η διάρκεια της διαδικασίας. Επιπλέον, κατά το στάδιο τήξεως παρατηρείται μια αλλαγή στο σχήμα της καμπύλης, όπως αυξάνονται οι τιμές της ενθαλπίας, αλλά αυτή η αλλαγή στο σχήμα δεν συμβαίνει και κατά το στάδιο της στερεοποίησης. Αυτή η συμπεριφορά σχετίζεται με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα εισαγωγής και τη μέση μεταβολή φάσης του PCM: όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά αυτή, τόσο πιο γρήγορη είναι η διαδικασία [26].

Οι καμπύλες ενθαλπίας-θερμοκρασίας αντιπροσωπεύουν το πλεονέκτημα της απόκτησης μιας μέσης τιμής των ιδιοτήτων των υλικών δεδομένου ότι επιτρέπουν την αξιολόγηση της διακύμανσης των θερμικών τους ιδιοτήτων σε σχέση με τη θερμοκρασία [28]. Το μεγάλο πλεονέκτημα όμως της μεθόδου ενθαλπίας είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιοδήποτε υλικό και όχι μόνο με τα υλικά αλλαγής φάσης [24].

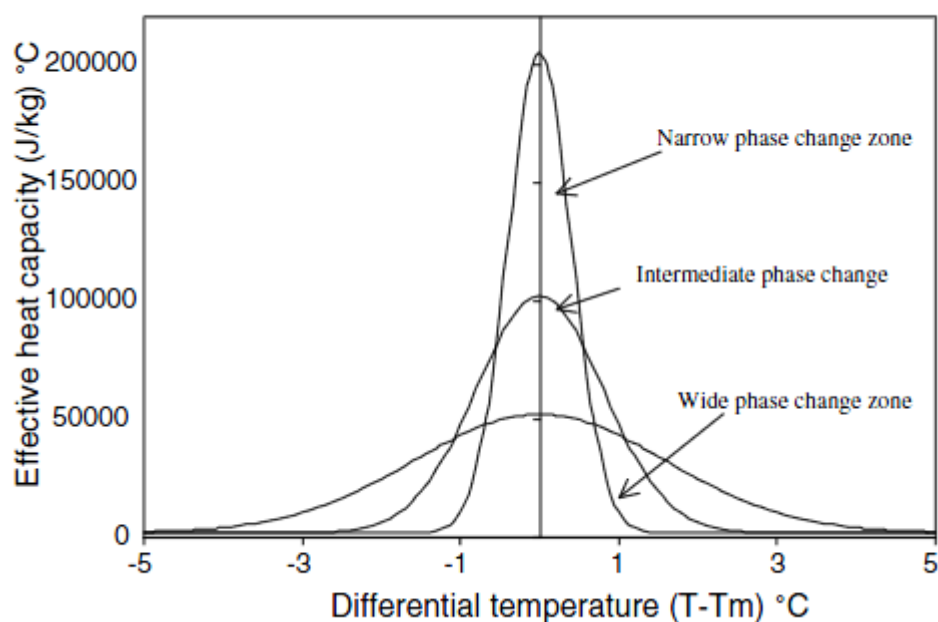
1.6.3 Μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας: [24], [29], [30]

Πολλά υλικά αλλαγής φάσης περιέχουν συστατικά που υποβάλλονται σε χημικές αντιδράσεις όχι μόνο κατά τη φάση της παραγωγής τους, αλλά και μετά την ενσωμάτωσή τους σε δομικά στοιχεία ενός κτιρίου. Η εμφάνιση αυτή των χημικών αντιδράσεων μπορεί να αλλάξει τη θερμική συμπεριφορά ενός συγκεκριμένου υλικού αφού μπορεί να παραχθεί ή να απορροφάται θερμότητα ανάλογα με το είδος της αντίδρασης. Οι διαδικασίες αυτές εντείνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, όταν οι αντιδράσεις γίνονται

γρηγορότερα, και για ορισμένες συνιστώσες του υλικού προκύπτει αυξημένος κίνδυνος πυρκαγιάς.

Μία αντιπροσωπευτική μαθηματική περιγραφή των φαινομένων μεταφοράς στα δομικά υλικά ενός κτιρίου που βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες περιλαμβάνει τη διαμόρφωση ενός σχετικά περίπλοκου προβλήματος της μηχανικής συνεχούς μέσου και της θερμοδυναμικής. Το πρόβλημα αυτό, μπορεί να επιλυθεί με τη βοήθεια της θεωρίας των χημικών αντιδράσεων μιγμάτων και με μια σειρά διαφορικών εξισώσεων. Ωστόσο αυτές οι εξισώσεις δεν ήταν πολύ συχνές σε πρακτικές εφαρμογές μέχρι σήμερα. Έτσι, αναπτύχθηκε το μοντέλο της ενεργού θερμοχωρητικότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, το οποίο περιλαμβάνει τις θερμικές επιδράσεις λόγω των χημικών αντιδράσεων και / ή διεργασίες αλλαγής φάσης [29]. Με τη μέθοδο της ενεργού θερμοχωρητικότητας είναι επίσης δυνατό να περιγραφεί η μη ισοθερμική αλλαγή φάσης ενός PCM. Η ενεργός θερμοχωρητικότητα του υλικού $C_{p,eff}$ είναι ευθέως ανάλογη της αποθηκευμένης ενέργειας, της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης αλλά και της ειδικής θερμότητας. Ωστόσο, είναι αντιστρόφως ανάλογη του θερμοκρασιακού εύρους τήξης ή στερεοποίησης [24].

Το μέγεθος της ενεργού θερμοχωρητικότητας όπως διαπιστώθηκε περιλαμβάνει τις έννοιες των χημικών αντιδράσεων και της αλλαγής φάσης. Αν λάβουμε υπόψη την πολυπλοκότητα των εννοιών αυτών, γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι η ακριβής μέτρηση της ενεργού θερμοχωρητικότητας δεν είναι μια εύκολη διαδικασία, καθώς θα πρέπει να συμπεριλάβουμε τις παραμέτρους των χημικών αντιδράσεων και τα διαγράμματα φάσης τα οποία, για ορισμένες αντιδράσεις και υλικά, δεν έχουν προσδιοριστεί επακριβώς μέχρι τώρα, ιδίως όσον αφορά την ακριβή μαθηματική περιγραφή τους [29]. Παρακάτω απεικονίζεται ένα τυπικό διάγραμμα αυτής της μεθόδου.



Σχήμα 1.6.3.1: Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας με τη διαφορική θερμοκρασία. [30]

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, είναι σαφές ότι, προκειμένου να αποφευχθεί μια άπειρη ικανότητα θερμότητας αλλά και να προωθηθεί η μέγιστη εξέλιξη της λανθάνουσας θερμότητας πρέπει να διατηρηθεί το θερμοκρασιακό εύρος. Ακόμα κι αν η μέθοδος αυτή δεν αποτελεί ένα ακριβές μοντέλο ισοθερμικής διαδικασίας αλλαγής φάσης, η κατανομή Gauss επιτρέπει το φιλτράρισμα των αριθμητικών ταλαντώσεων, μειώνοντας έτσι τα λάθη. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα και των τριών καθορισμένων ζωνών αλλαγής φάσης (στενή, ενδιάμεση και πλατιά) χρησιμοποιούνται στην προσομοιωτική διαδικασία [30].

Έχει διαπιστωθεί με πειραματικές διαδικασίες ότι τα διάφορα υλικά αλλαγής φάσης παρουσιάζουν διαφορετική καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας-θερμοκρασίας. Για συμπαγή, θερμικά σταθερά υλικά όπως το σκυρόδεμα, η ενεργός θερμοχωρητικότητα αυξάνει μονότονα με τη θερμοκρασία, γεγονός που είναι ανάλογο με τα ομοιογενή υλικά, π.χ. τα μέταλλα. Η συμπεριφορά των σχετικά μακροπορώδων υλικών ποικίλλει ανάλογα με το είδος του

υλικού και δεν είναι δυνατόν να γίνει κάποια γενίκευση για τη μορφή της καμπύλης $C_{p,eff}(T)$. Τα υλικά που περιέχουν οργανικές ενώσεις εμφανίζουν δραματικές αλλαγές στην ενεργό θερμοχωρητικότητα στο θερμοκρασιακό εύρος 300-600°C, όταν προσεγγίζεται η θερμοκρασία καύσης. Προφανώς, αυτά τα είδη υλικών δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας και μπορούν να χρησιμοποιούνται σε οικοδομικά έργα, ως θερμομονωτικά υλικά μόνο σε χαμηλότερη θερμοκρασιακή περιοχή, μέχρι και 200°C. Τα υλικά με μικρότερη περιεκτικότητα σε οργανικές ουσίες, συνήθως λιγότερο από 5%, δεν εμφανίζουν δραματικές αλλαγές στην καμπύλη $C_{p,eff}(T)$. Η ενεργός θερμοχωρητικότητα των υλικών που υποβάλλονται σε διαρθρωτικές αλλαγές και /ή χημικές αντιδράσεις που οφείλονται στην αύξηση της θερμοκρασίας, όπως το πορώδες σκυρόδεμα, το Porfix, κλπ., μπορεί είτε να μειωθεί με τη θερμοκρασία είτε να παρουσιάζει μια «ταλαντούμενη» συμπεριφορά.

Η μέθοδος αυτή για τη μέτρηση της ενεργού θερμοχωρητικότητας μπορεί να αποδειχτεί ιδιαίτερη χρήσιμη για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός υλικού, για παράδειγμα, σε ακραίες συνθήκες, όπως η φωτιά σε ένα κτίριο, χωρίς να είναι απαραίτητες οι λεπτομέρειες για την ακριβή του σύσταση.

Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί το είδος και η ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων ανάλογα με τη θερμοκρασία, γεγονός που μπορεί να θεωρηθεί ως μια πρώτη εικόνα διερεύνησης ενός όχι τόσο γνωστού υλικού αλλαγής φάσης. Ειδικότερα, τα ελάχιστα στις καμπύλες $C_{p,eff}(T)$ παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, διότι δείχνουν μια εξώθερμη χημική αντίδραση, όπως η καύση ενός συστατικού που, από την άποψη των θερμομονωτικών ιδιοτήτων του, είναι η πιο επικίνδυνη για ένα δομικό υλικό. Ωστόσο, ο καθορισμός του θερμοκρασιακού εύρους μέσα στο οποίο οι χημικές αντιδράσεις είναι σημαντικές για τη συμπεριφορά ενός ειδικού υλικού σε υψηλότερες θερμοκρασίες, δεν είναι ιδιαίτερα ακριβείς με τη μέθοδο της ενεργού θερμοχωρητικότητας. Στο μόνο σημείο που μπορεί να χρησιμεύσει

είναι ως μια πρόχειρη πρώτη ένδειξη της θερμικής σταθερότητας του υλικού. Ο λόγος είναι ότι οι επιρροές των χημικών αντιδράσεων και των αλλαγών φάσης εκφράστηκαν εν μέρει από το μέγεθος $C_{p_{\text{eff}}}$ [29].

Κεφάλαιο 2

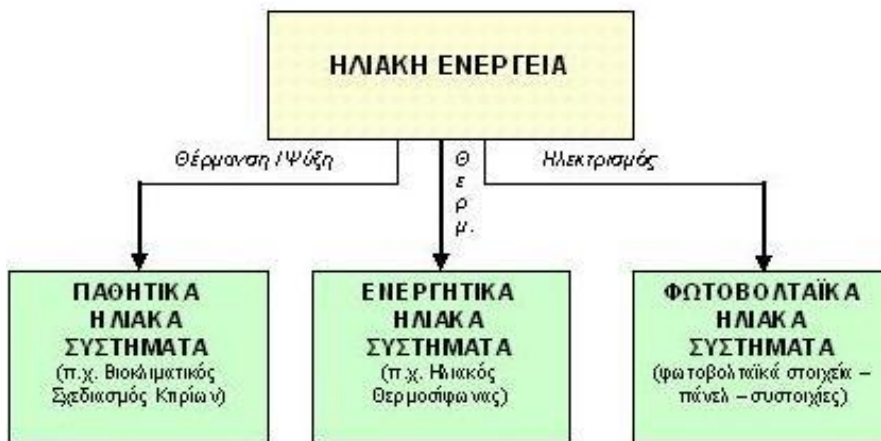
Ενεργητικά και Παθητικά ηλιακά συστήματα παραγωγής ενέργειας

2.1 Εισαγωγή: [31], [32]

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας.

Η ακτινοβολία του ήλιου (ηλιακή ακτινοβολία) αποτελεί την κυριότερη πηγή ενέργειας για τη γη εδώ και πολλά χρόνια με ουσιαστική συμβολή στη δημιουργία των ορυκτών καυσίμων. Η ενέργεια του ήλιου, αποτελεί εδώ και πολλά χρόνια μια σημαντική πηγή ενέργειας, την οποία ο άνθρωπος χρησιμοποίησε είτε άμεσα, (ξήρανση τροφών, στέγνωμα κλπ.), είτε έμμεσα (μέσω της γεωργίας για την παραγωγή σιτηρών).

Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση του νερού (για χρήση σε σπίτια, κτίρια, ή πισίνες) και για θέρμανση χώρου (σπίτια, θερμοκήπια και άλλα κτίρια). Αυτό γίνεται εφικτό με χρήση ηλιακών θερμικών συστημάτων που συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια και τη μετατρέπουν σε θερμότητα. Για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται τα φωτοβολταϊκά και τα ηλιοθερμικά συστήματα.



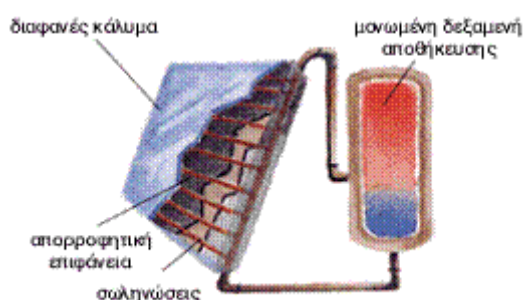
Σχήμα 2.1.1: Συστήματα εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας. [31]

2.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα: [33], [34], [35]

Ενεργητικά ηλιακά συστήματα είναι όσα συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία, και στη συνέχεια τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε νερό, σε αέρα ή σε κάποιο άλλο ρευστό. Η τεχνολογία που εφαρμόζεται είναι αρκετά απλή και υπάρχουν πολλές δυνατότητες εφαρμογής της σε θερμικές χρήσεις χαμηλών θερμοκρασιών. Η πλέον διαδεδομένη εφαρμογή των συστημάτων αυτών είναι η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, οι γνωστοί σε όλους ηλιακοί θερμοσίφωνες.

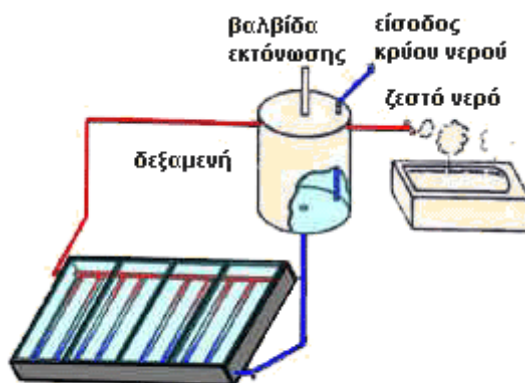
Η "καρδιά" ενός ενεργητικού ηλιακού συστήματος είναι ο ηλιακός συλλέκτης. Ο συλλέκτης αυτός περιλαμβάνει μια μαύρη, συνήθως επίπεδη μεταλλική επιφάνεια, η οποία απορροφά την ακτινοβολία και θερμαίνεται. Πάνω από την απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα (συνήθως από γυαλί ή πλαστικό) που παγιδεύει τη θερμότητα (φαινόμενο θερμοκηπίου). Σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια τοποθετούνται λεπτοί σωλήνες μέσα στους οποίους διοχετεύεται κάποιο υγρό, που απάγει την θερμότητα και τη μεταφέρει, με τη βοήθεια μικρών αντλιών (κυκλοφορητές), σε μια μεμονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως στην οροφή του κτιρίου, με νότιο προσανατολισμό

και κλίση 30° - 60° ως προς τον ορίζοντα, ώστε να μεγιστοποιηθεί το ποσό της ακτινοβολίας που συλλέγεται ετησίως.



Σχήμα 2.1.1: Γενική λειτουργία ενεργητικού ηλιακού συστήματος. [34]

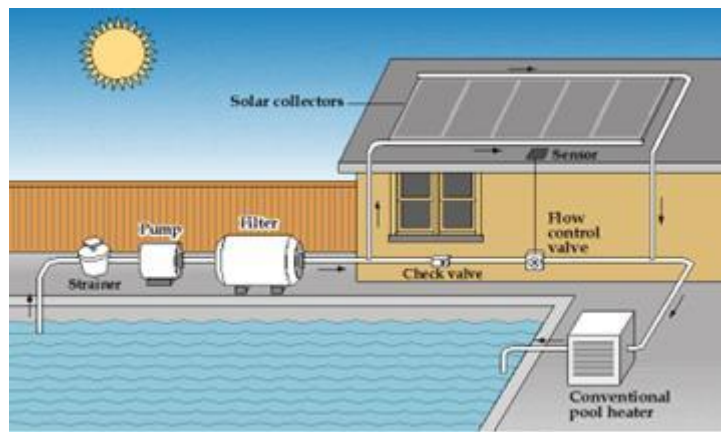
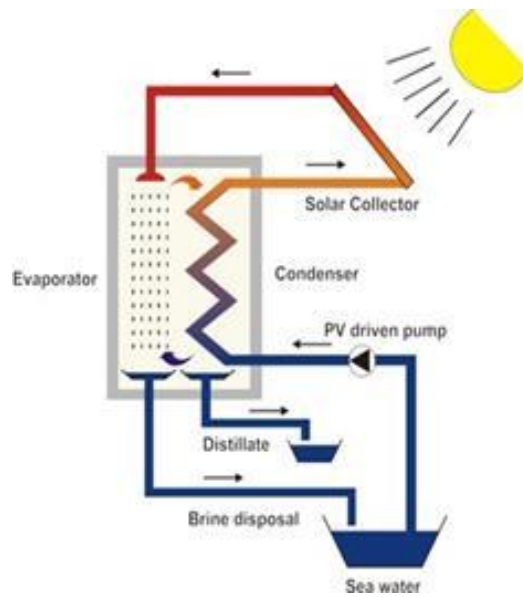
Το πιο απλό και διαδομένο ηλιακό ενεργητικό σύστημα είναι ο ηλιακός θερμοσίφοντας. Η αρχή λειτουργίας του είναι απλή και βασίζεται στο γεγονός ότι το νερό που θερμαίνεται στο συλλέκτη διαστέλλεται και γίνεται ελαφρύτερο από το χαμηλότερης θερμοκρασίας νερό της δεξαμενής. Αυτή η διαφορά πυκνότητας του νερού έχει ως αποτέλεσμα τη φυσική κυκλοφορία του μέσου του συλλέκτη και τη μεταφορά του θερμού νερού στην αποθηκευτική δεξαμενή. Την ίδια στιγμή το κρύο νερό της δεξαμενής ωθείται προς το συλλέκτη. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη φυσική κυκλοφορία του νερού είναι η τοποθέτηση της δεξαμενής σε σημείο ψηλότερο από τους συλλέκτες. Σε περίπτωση που βρίσκεται χαμηλότερα, η κυκλοφορία του νερού γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλου αυτοματισμού.



Σχήμα 2.2.2: Λειτουργία ηλιακού θερμοσίφωνα. [34]

Πέρα από την οικιακή χρήση, η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη σήμερα, ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε απαιτείται θερμότητα χαμηλής θερμοκρασιακής στάθμης. Έτσι, η χρήση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ψύξης, για τον κλιματισμό χώρων και άλλες εφαρμογές, εμφανίζεται ως μία από τις πολλά υποσχόμενες προοπτικές, λόγω της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας ακριβώς την εποχή που απαιτούνται τα ψυκτικά φορτία. Υπάρχουν ήδη μερικές επιτυχημένες εφαρμογές τέτοιων συστημάτων στη χώρα μας και αναμένεται να έχουν ταχεία ανάπτυξη.

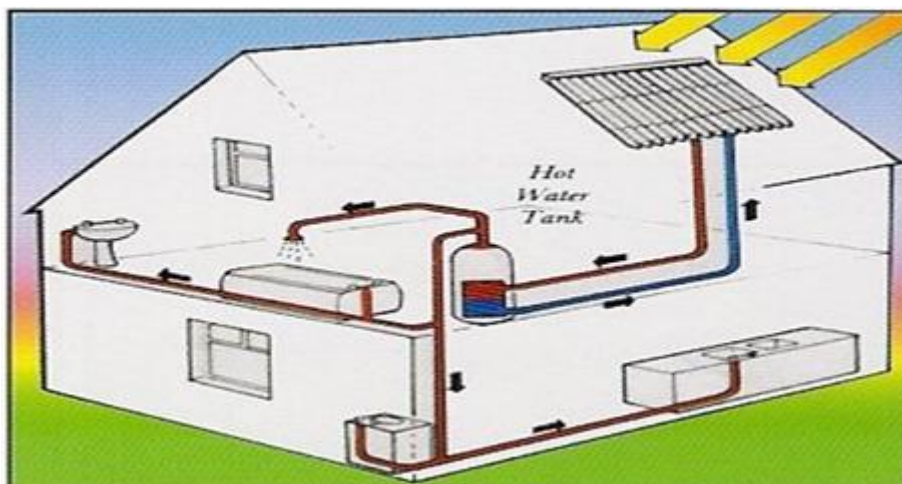
Η τεχνολογία των κεντρικών ηλιακών συστημάτων θεωρείται μια αρκετά αποδοτική λύση για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε κατοικίες, ξενοδοχεία, εστιατόρια, βιομηχανίες κ.ο.κ.



Σχήμα 2.2.3: Γενικές εφαρμογές ενεργητικών ηλιακών συστημάτων. [34]

Μια άλλη εφαρμογή που έχει εξαπλωθεί στην Ευρωπαϊκή αγορά είναι ο συνδυασμός παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης χώρων με ενεργητικά ηλιακά συστήματα. Η χρήση των συστημάτων αυτών στις ελληνικές κλιματικές συνθήκες για τη θέρμανση χώρων, θεωρείται τεχνικά αλλά και οικονομικά αποδοτική, αν συνδυαστεί με την κατάλληλη μελέτη/ κατασκευή του κτιρίου (καλή μόνωση, εκμετάλλευση των παθητικών ηλιακών ωφελειών, κ.λπ.) και τη συνεργασία του χρήστη. Μπορεί να εξοικονομήσει συμβατική ενέργεια σε νέα ή παλιά κτίρια, στα οποία έχουν ληφθεί όλα τα εφικτά μέτρα για την ελαχιστοποίηση των απωλειών και τη μεγιστοποίηση της οικονομικότητας της εγκατάστασης. Είναι πάντως, πολύ σημαντικός ο σωστός σχεδιασμός του ηλιακού συστήματος και η προσεκτική εξέταση της

οικονομικότητας της εγκατάστασης για την αποφυγή λανθασμένων επιλογών και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης.



Σχήμα 2.2.4: Εφαρμογή ενεργητικού ηλιακού συστήματος για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. [34]

2.3 Παθητικά ηλιακά συστήματα: [36], [37], [38], [39]

Σημαντική συνεισφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας για τη θέρμανση ενός κτιρίου αποτελεί η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Όλα τα κτίρια δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία περνάει μέσα από τα ανοίγματα (παράθυρα) στους εσωτερικούς χώρους και τους θερμαίνει.

Για την αποτελεσματική αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, δηλαδή για να υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, θα πρέπει να συντρέχουν οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Να υπάρχουν επαρκείς επιφάνειες ανοίγματα (παράθυρα), που να «βλέπουν» απ' ευθείας τον ήλιο για αρκετές ώρες την ημέρα το χειμώνα. Για το λόγο αυτό συνιστάται ο νότιος προσανατολισμός, ο οποίος είναι ο μόνος που «βλέπει» αρκετές ώρες τον ήλιο το χειμώνα.
- Να είναι το κτίριο καλά θερμομονωμένο, ώστε να μη «χάνεται» θερμότητα από τις εξωτερικές του επιφάνειες (τοιχούς, παράθυρα, οροφές, δάπεδα).

- Να υπάρχουν εσωτερικά στο κτίριο τέτοια υλικά, ώστε να «αποθηκεύεται» μέρος της θερμότητας από την ηλιακή ενέργεια και έτσι να έχουμε χώρους αρκετά (όχι υπερβολικά) θερμούς όλες τις ώρες του εικοσιτετραώρου κατά τις οποίες χρησιμοποιούνται. Τα υλικά αυτά πρέπει να είναι μεγάλης μάζας (όπως κεραμικές πλάκες στο δάπεδο, μπετόν, συμπαγή τούβλα ή πέτρα εσωτερικά στους τοίχους) ώστε να έχουν την απαιτούμενη θερμοχωρητικότητα.
- Να είναι το κτίριο σωστά διαρρυθμισμένο, ώστε οι χώροι που απαιτούν περισσότερη θέρμανση να δέχονται την περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία.

Εν γένει ονομάζουμε παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης τα δομικά στοιχεία του κτιρίου, που, αξιοποιώντας τις αρχές της φυσικής (τους νόμους μεταφοράς θερμότητας) συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν υπό μορφή θερμότητας και τη διανέμουν στο χώρο. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα στα κτίρια αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια για θέρμανση των χώρων το χειμώνα, καθώς και για παροχή φυσικού φωτισμού.

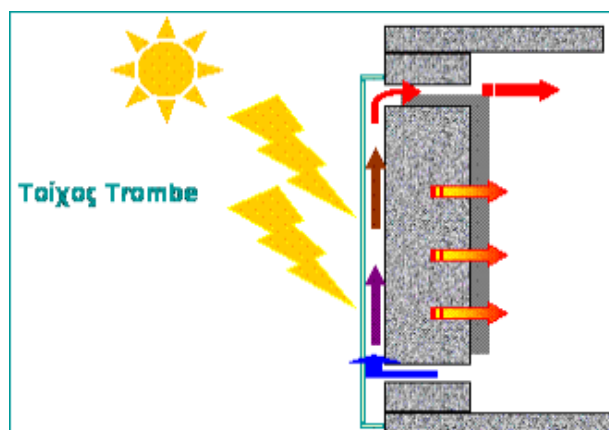
Η συλλογή της ηλιακής ενέργειας βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και ειδικότερα, στην είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του γυαλιού ή άλλου διαφανούς υλικού και τον εγκλωβισμό της προκύπτουσας θερμότητας στο εσωτερικό του χώρου που καλύπτεται από το γυαλί. Όλα τα παθητικά ηλιακά συστήματα πρέπει να έχουν προσανατολισμό περίπου νότιο, ώστε να υπάρχει ηλιακή πρόσπτωση στα ανοίγματα κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας το χειμώνα.

Το συνηθέστερο παθητικό ηλιακό σύστημα (σύστημα άμεσου κέρδους) βασίζεται στην αξιοποίηση των παραθύρων κατάλληλου προσανατολισμού, σε συνδυασμό με την κατάλληλη θερμική μάζα (βαριά υλικά, όπως πέτρα, πλάκες, μπετόν στους τοίχους και στα δάπεδα, χωρίς να είναι καλυμμένα, π.χ. από χαλιά), η οποία απορροφά μέρος της θερμότητας και την «προσφέρει» στο χώρο αργότερα και έτσι διατηρείται ο χώρος θερμός για πολλές ώρες. Ένα

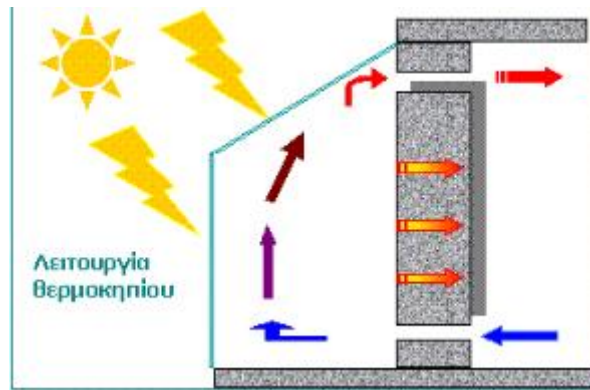
νότιο οριζόντιο σκίαστρο μπορεί να εμποδίσει τον καλοκαιρινό ήλιο που έρχεται από πιο ψηλά να μπει απ' ευθείας στο χώρο.

Τα υπόλοιπα παθητικά συστήματα είναι συστήματα έμμεσου κέρδους και ταξινομούνται στις παρακάτω κατηγορίες:

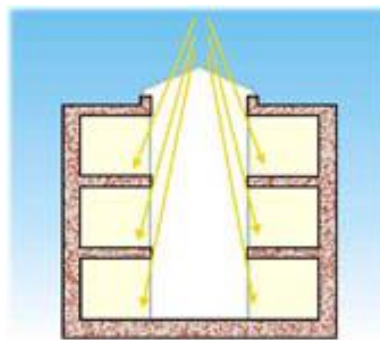
- **Ηλιακοί τοίχοι** : Έχουν στην εξωτερική τους πλευρά, σε μικρή απόσταση από την τοιχοποιία τζάμι (υαλοπίνακα) και λειτουργούν ως ηλιακοί συλλέκτες, μεταφέροντας τη θερμότητα είτε μέσω του υλικού του τοίχου (τοίχος θερμικής αποθήκευσης), είτε μέσω θυρίδων (θερμοσιφωνικό πάνελ) στον εσωτερικό χώρο. Συνδυασμός των δύο λειτουργιών είναι ο τοίχος μάζας με θυρίδες *τοίχος Trombe - Michel* .
- **Θερμοκήπια (ηλιακοί χώροι)** : Είναι κλειστοί χώροι που ενσωματώνονται σε νότια τμήματα του κτιριακού κελύφους και περιβάλλονται από υαλοστάσια. Η ηλιακή θερμότητα από το θερμοκήπιο μεταφέρεται στους κυρίως χώρους του κτιρίου μέσω ανοιγμάτων ή και διαπερνά τον τοίχο.
- **Ηλιακά αίθρια**: είναι εσωτερικοί χώροι του κτιρίου οι οποίοι έχουν στην οροφή τους τζάμι και λειτουργούν όπως τα θερμοκήπια.



Σχήμα 2.3.1: Ηλιακός τοίχος. [39]

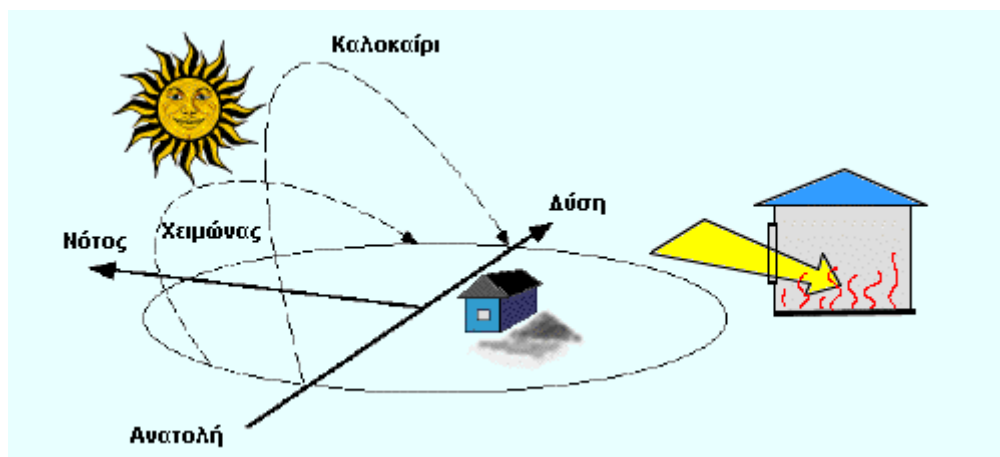


Σχήμα 2.3.2: Θερμοκήπιο. [39]



Σχήμα 2.3.3: Ηλιακό αίθριο. [39]

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα προσαρτώνται σε όψεις του κτιρίου με νότιο προσανατολισμό (με δυνατότητα απόκλισης μέχρι 30° ανατολικά ή δυτικά καθαρού Νότου), οι οποίες θα πρέπει να μη σκιάζονται κατά τη διάρκεια του χειμώνα.



Σχήμα 2.3.4: Νότιος προσανατολισμός του κτιρίου. [38]

Όλα τα Παθητικά Ηλιακά Συστήματα πρέπει να συνδυάζονται με την απαιτούμενη θερμική προστασία (θερμομόνωση) και την απαιτούμενη θερμική μάζα του κτιρίου, η οποία αποθηκεύει και αποδίδει τη θερμότητα στο χώρο με χρονική υστέρηση, ομαλοποιώντας έτσι την κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο εικοσιτετράωρο. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θα πρέπει το καλοκαίρι να συνδυάζονται με ηλιοπροστασία (π.χ. χρήση φυλλοβόλων δέντρων, οριζόντια σκίαση, τέντες, περσίδες) και συχνά με δυνατότητα αερισμού.

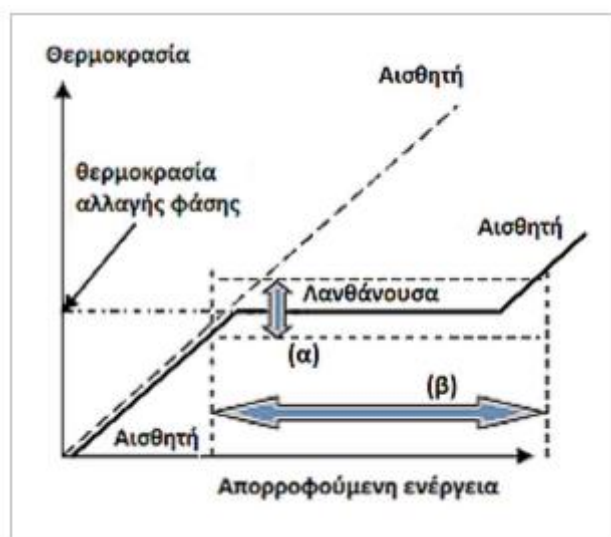
Ένα κτίριο που περιλαμβάνει παθητικά συστήματα θέρμανσης, δροσισμού ή ακόμη και φυσικού φωτισμού, κατασκευασμένο εξ αρχής ή τροποποιημένο, ονομάζεται "βιοκλιματικό κτήριο" και είναι δυνατό να καλύψει μεγάλο μέρος των ενεργειακών του αναγκών από την άμεση ή έμμεση αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.

Κεφάλαιο 3

Εφαρμογές των Υλικών αλλαγής φάσης στα κτίρια – Ενεργητικά και παθητικά συστήματα

3.1 Εισαγωγή: [40], [41], [42]

Η τεχνολογία αξιοποίησης των PCMs σε πρακτικές εφαρμογές ακολουθεί δύο βασικές κατευθύνσεις. Η πρώτη στοχεύει στον έλεγχο της θερμοκρασίας και η δεύτερη στην αποθήκευση θερμότητας. Στο διάγραμμα του παρακάτω σχήματος που παριστάνει τη μεταβολή θερμοκρασίας ενός υλικού αλλαγής φάσης συναρτήσει της απορροφούμενης (ή αποδιδόμενης) θερμικής ενέργειας, σημειώνονται οι δύο αυτές επιλογές.



Σχήμα 3.1.1: Εφαρμογές των PCMs.

(α) για έλεγχο της θερμοκρασίας και (β) για αποθήκευση θερμότητας (ή ψύχους). [40]

Τα PCMs ήδη απαντώνται σε πλήθος εφαρμογών. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται:

- Μεταφορά και αποθήκευση ευαίσθητων σε μεταβολές θερμοκρασίας προϊόντων, όπως τρόφιμα, φάρμακα κλπ. Μεταφορά αίματος για μετάγγιση, οργάνων για μεταμόσχευση.

- Ρύθμιση θερμοκρασίας σώματος (θερμικά τζάκετ, κουβέρτες κλπ). Θεραπείες ζεστού-κρύου.
- Έλεγχος θερμοκρασίας εξώθερμων χημικών αντιδράσεων.
- Θερμική προστασία ηλεκτρικών μηχανών, ηλεκτρονικών διατάξεων, υπολογιστών.

Τα PCMs χρησιμοποιούνται και σε εφαρμογές στα κτίρια. Μεταξύ αυτών, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι εφαρμογές που στοχεύουν στην αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας του κελύφους. Η θερμική μάζα ή θερμοχωρητικότητα του κελύφους των κτιρίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της θερμοκρασίας στο εσωτερικό τους. Σε ένα κτίριο με κέλυφος από υλικά μικρής θερμοχωρητικότητας, οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος γίνονται άμεσα αισθητές στο εσωτερικό του. Σε αντίθεση, σε ένα κτίριο με δομικά υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας, ένα μέρος της θερμότητας κατά τη διάρκεια των υψηλών θερμοκρασιών της ημέρας αποθηκεύεται στα στοιχεία του κελύφους και αυξάνει τη θερμοκρασία τους. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος πέσει (π.χ. κατά τη διάρκεια της νύχτας), η θερμότητα που έχει αποθηκευτεί στα δομικά υλικά αποδίδεται στο περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα, η διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου είναι πιο ομαλή σε σύγκριση με την αντίστοιχη στο περιβάλλον.

Κατά την τελευταία δεκαετία η ενσωμάτωση των PCMs στην κατασκευή τοίχων προκάλεσε μεγάλο ενδιαφέρον με αποτέλεσμα να ξεκινήσουν διάφορα έργα που βρίσκονται σε εξέλιξη αυτή τη στιγμή. Πολλές έρευνες διεξήχθησαν σχετικά με μεθόδους ενσωμάτωσης των PCMs σε άλλα ελαφριά δομικά υλικά εκτός του τούβλου, όπως το κόντρα πλακέ, τα υλικά της οροφής και του δαπέδου.

Η εφαρμογή των PCMs στα κτίρια έχει δύο διαφορετικούς στόχους. Πρώτον, τη χρήση φυσικής θερμότητας που είναι η ηλιακή ενέργεια για θέρμανση ή για ψύξη. Δεύτερον, τη χρήση ανθρωπογενών πηγών θερμότητας και ψύξης.

Σε κάθε περίπτωση, η αποθήκευση θερμότητας ή ψύξης είναι απαραίτητο να ταιριάζει με τη διαθεσιμότητα και τη ζήτηση τόσο ως προς το χρόνο, αλλά και ως προς την ισχύ. Υπάρχουν τρεις βασικοί διαφορετικοί τρόποι για τη χρήση των PCMs για θέρμανση και ψύξη των κτιρίων οι οποίοι είναι:

- Η ενσωμάτωση των PCMs στους τοίχους των κτιρίων
- Η ενσωμάτωση των PCMs σε άλλα δομικά στοιχεία των κτιρίων εκτός από τους τοίχους
- Η ενσωμάτωση των PCMs σε μονάδες αποθήκευσης θερμότητας και ψύξης.

Οι πρώτες δύο κατηγορίες ανήκουν στα παθητικά ηλιακά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, όπου η αποθηκευμένη θερμότητα ή ψύξη απελευθερώνεται αυτόματα όταν η εσωτερική ή εξωτερική θερμοκρασία αυξάνεται ή μειώνεται πέρα από το σημείο τήξης των PCMs. Η τρίτη κατηγορία εφαρμογής αποτελεί ένα ενεργητικό σύστημα αποθήκευσης, όπου η αποθηκευμένη θερμότητα ή ψύξη βρίσκεται σε δοχείο συγκράτησης θερμικά διαχωρισμένο από το κτίριο με μόνωση. Ως εκ τούτου, η θερμότητα ή η ψύξη χρησιμοποιείται μόνο όταν ζητούνται και όχι αυτόματα.

Τα PCMs είναι χρήσιμα σε εύκρατα κλίματα, όπου οι ημερήσιες διακυμάνσεις θερμοκρασίας συχνά υπερβαίνουν τα όρια θερμικής άνεσης. Η χρησιμότητά τους είναι πιο έντονη το καλοκαίρι, όταν οι υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας προκαλούν υπερθέρμανση των κτιρίων. Είναι συνεπώς υλικά που αξίζει να έχουμε υπόψη και να παρακολουθούμε την εξέλιξή τους. Είναι εξαιρετικά πιθανό ότι σύντομα στο μέλλον θα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της ενεργειακής και περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των κτιρίων μας. "Τα PCMs προσφέρουν τεράστιες οικονομικές δυνατότητες. Το 2050 ελπίζουμε να περιοριστεί η κατανάλωση ενέργειας κατά 50 τοις εκατό, και ένα μεγάλο μέρος της εν λόγω εξοικονόμησης ενέργειας θα πρέπει να προέλθει από τα κτίρια. Για να γίνει αυτό αποτελεσματικά, χρειαζόμαστε νέες

τεχνολογίες και τα υλικά μας θα προσφέρουν σημαντική συμβολή στην ανάπτυξή τους, "δηλώνει ο καθηγητής Volker Wittwer με πεποίθηση.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφορες εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης τόσο για τα παθητικά όσο και για τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα αποθήκευσης σε κτιριακές εφαρμογές.

3.2 Εφαρμογές των Υλικών αλλαγής φάσης σε Παθητικά ηλιακά συστήματα:

3.2.1 Τοίχος Trombe - Michel με PCMs: [12], [41]

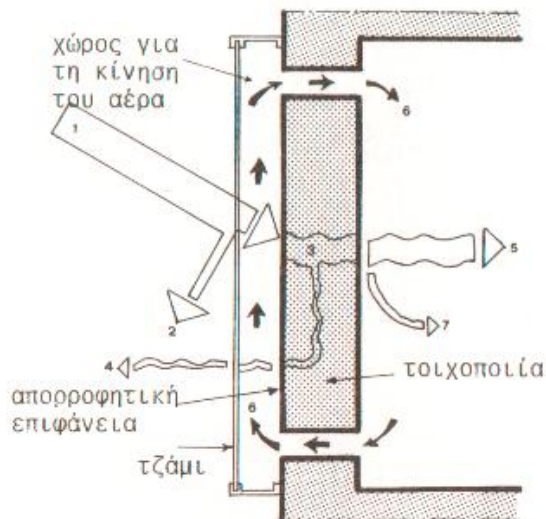
Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τοίχου θερμικής αποθήκευσης είναι ο τοίχος Trombe-Michel που μελετήθηκε στη Γαλλία από τον καθηγητή F. Trombe και τον αρχιτέκτονα J. Michel του ερευνητικού κέντρου C.N.R.S. (Centre National de la Recherche Scientifique). Ο τοίχος αυτός εφαρμόστηκε στα πρώτα πειραματικά ηλιακά σπίτια στο Odeillo της Γαλλίας το 1967.

Ένας τοίχος Trombe είναι ένα πρωταρχικό παράδειγμα ενός συστήματος αποθήκευσης έμμεσου κέρδους. Αποτελείται από ένα παχύ πέτρινο τοίχο στη νότια πλευρά του σπιτιού. Ένα μονό ή διπλό στρώμα από γυάλινο ή πλαστικό υαλοπίνακα τοποθετείται περίπου τέσσερα εκατοστά μπροστά από την επιφάνεια του τοίχου. Η ηλιακή θερμότητα συλλέγεται στο χώρο μεταξύ του τοίχου και του υαλοπίνακα. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου είναι μαύρου χρώματος για να απορροφά τη θερμότητα, η οποία στη συνέχεια αποθηκεύεται στη μάζα του τοίχου. Η θερμότητα διανέμεται από τον τοίχο Trombe στο σπίτι για μια περίοδο αρκετών ωρών. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία πέφτει κάτω από αυτήν της επιφάνειας του τοίχου, η θερμότητα αρχίζει να εκπέμπεται στο δωμάτιο. Η απώλεια θερμότητας από τον τοίχο αυτό μπορεί να ελέγχεται από μία μονωτική κουρτίνα, που κλείνει τη νύχτα στο χώρο μεταξύ του υαλοπίνακα και του τοίχου. Οι παραδοσιακοί

τοίχοι Trombe βασίζονται στην αποθήκευση αισθητής θερμότητας, αλλά λόγω των δυνατοτήτων για μεγαλύτερη αποθήκευση θερμότητας ανά μονάδα μάζας, ο τοίχος Trombe αποτελεί μια ελκυστική ιδέα για επιτυχημένη εφαρμογή.

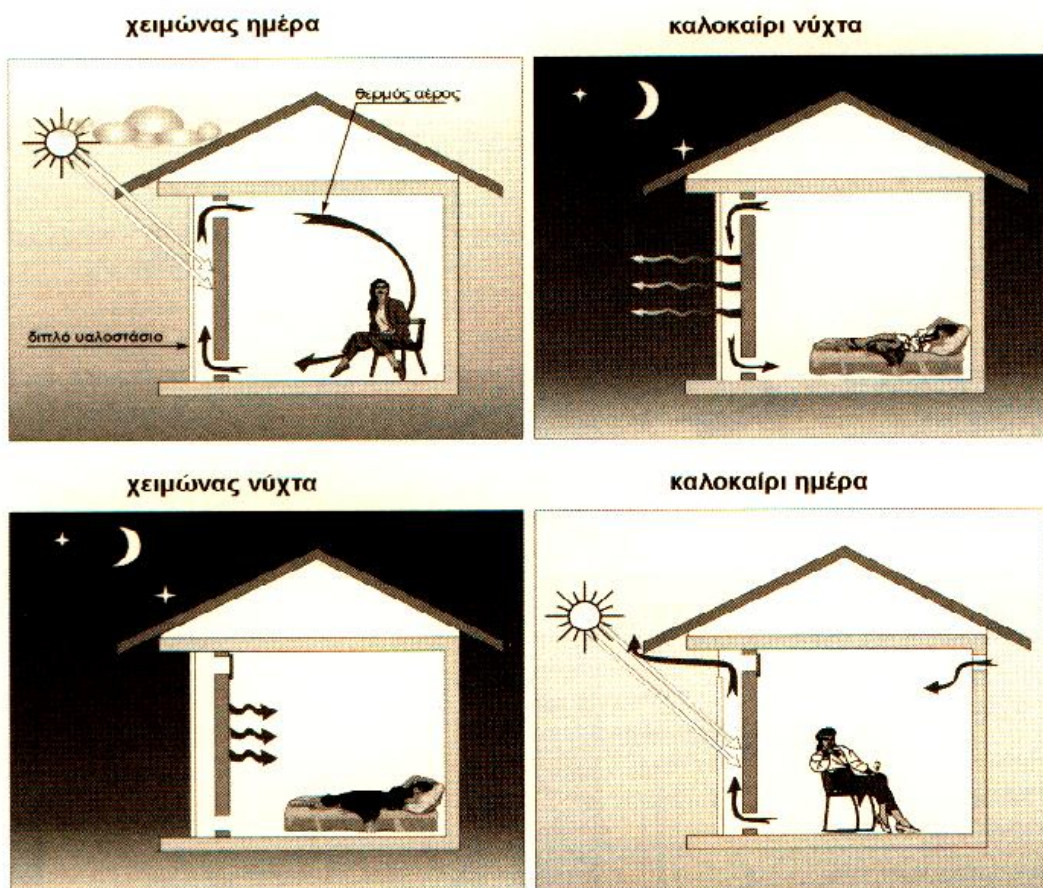
Ένας τοίχος Trombe που γεμίζει με PCM κατασκευάζεται στη νότια πλευρά του παραθύρου του σπιτιού. Η λειτουργία του είναι η εξής: Ο τοίχος θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας από εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, λιώνοντας το PCM. Ο θερμός αέρας κινείται προς τα πάνω και μέσα από τη θυρίδα μπαίνει στον εσωτερικό χώρο. Ταυτόχρονα ψυχρότερος αέρας από τον εσωτερικό χώρο, μπαίνει από την κάτω θυρίδα και αντικαθιστά το κενό που δημιουργήθηκε. Στη διάρκεια της νύχτας η λειτουργία προφανώς αντιστρέφεται. Οι δύο θυρίδες κλείνουν, πάνω και κάτω και η θέρμανση του χώρου πετυχαίνεται με την ακτινοβολία της αποθηκευμένης θερμότητας στον τοίχο.

Το καλοκαίρι η λειτουργία του τοίχου Trombe αντιστρέφεται. Η επάνω θυρίδα κλείνει ενώ ταυτόχρονα ανοίγει ένα τμήμα του υαλοστασίου στο επάνω μέρος έτσι ώστε να απομακρύνεται ο ζεστός αέρας προς τα έξω. Επίσης με απλά συστήματα ηλιοπροστασίας, μια και πρόκειται για νότιο προσανατολισμό, μπορεί να αποκλειστεί εντελώς η άμεση πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας.



1. προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.
2. ανακλώμενη ακτινοβολία από τη γυάλινη επιφάνεια.
3. θερμική ενέργεια απο απορροφάται από τον τοίχο.
4. θερμότητα που χάνεται από τον τοίχο.
5. θερμότητα που ακτινοβολείται από τον τοίχο προς τα μέσα με χρονική καθυστέρηση.
6. θερμότητα που μεταφέρεται από τον αέρα.
7. θερμότητα που μεταφέρεται από την επιφάνεια του τοίχου.

Σχήμα 3.2.1.1: Λειτουργία τοίχου Trombe [12]



Σχήμα 3.2.1.2: Σχηματική παράσταση της λειτουργίας του τοίχου Trombe για χειμώνα - καλοκαίρι, ημέρα και νύχτα. [12]

Για μια δεδομένη ποσότητα αποθήκευσης θερμότητας, οι μονάδες που χρησιμοποιούν υλικά αλλαγής φάσης απαιτούν λιγότερο χώρο από τους τοίχους νερού ή τους ογκώδεις τοίχους Trombe και είναι πολύ μικρότερες σε βάρος. Αυτές είναι, κατά συνέπεια, πολύ βολικό να χρησιμοποιηθούν για τις απαιτήσεις του εκ των υστέρων εξοπλισμού των κτιρίων. Στους τοίχους Trombe, χρησιμοποιούνται υλικά αλλαγής φάσης όπως τα ένυδρα άλατα και οι υδρογονάνθρακες.

Η λειτουργία του τοίχου Trombe προκάλεσε το ενδιαφέρον πολλών μελετητών, μερικοί από τους οποίους παρουσιάζονται παρακάτω:

Η Telkes [43] πρότεινε την τοποθέτηση PCM σε τοίχους, μεσότοιχους, ταβάνια και πατώματα, για να εξυπηρετήσουν σαν ρυθμιστές θερμοκρασίας. Τα PCMs χρησιμοποιήθηκαν για να αντικαταστήσουν τη λιθοποιία σε ένα τοίχο Trombe.

Ο Askew [44] χρησιμοποίησε ένα πίνακα συλλεκτών φτιαγμένο από μια λεπτή πλάκα κεριού παραφίνης και τον τοποθέτησε πίσω από το διπλό τζάμι του κτιρίου και βρήκε ότι η θερμική αποδοτικότητα είναι ανάλογη με τους τυπικούς επίπεδους συλλέκτες.

Οι Farouk και Guceri [45] μελέτησαν τη χρησιμότητα του εγκατεστημένου τοίχου PCM σε ένα κτίριο για νυχτερινή οικιακή θέρμανση, χρησιμοποιώντας ένα μίγμα από το άλας του Glauber και κεριό SUNOCO P-116. Παρατηρήθηκε ότι εάν ο τοίχος PCM ήταν κατάλληλα σχεδιασμένος, περιόριζε μερικά από τα μη επιθυμητά χαρακτηριστικά του κανονικού τοίχου με συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Ο Bourdeau [46] έλεγξε δύο τοίχους συλλογής παθητικής αποθήκευσης χρησιμοποιώντας εξάνυδρο χλωριούχο ασβέστιο (σημείο τήξης 29°C) ως

υλικό αλλαγής φάσης. Κατέληξε ότι ένας τοίχος με PCM πάχους 8,1cm είχε καλύτερη θερμική απόδοση από ένα κανονικό τοίχο πάχους 40cm.

Πειραματικά και θεωρητικά τεστ διεξήχθησαν για να ανακαλύψουν την αξιοπιστία των PCM σε έναν τοίχο Trombe. Οι Swet [47], Ghoneim et al. [48] και Chandra et al. [49] χρησιμοποίησαν δεκαένυδρο θειικό νάτριο (με σημείο τήξης 32°C) ως υλικό αλλαγής φάσης στη νότια πλευρά ενός τοίχου Trombe. Ανέφεραν επίσης ότι τοίχος Trombe με PCM μικρότερου πάχους ήταν περισσότερο επιθυμητός σε σύγκριση με έναν συνηθισμένο λιθινο τοίχο, για την παροχή αποδοτικής θερμικής ενεργειακής αποθήκευσης. Ο Knowler [50] χρησιμοποίησε κερι παραφίνης CG με μεταλλικά πρόσθετα για αύξηση της συνολικής αγωγιμότητας και αποδοτικότητας του τοίχου Trombe.

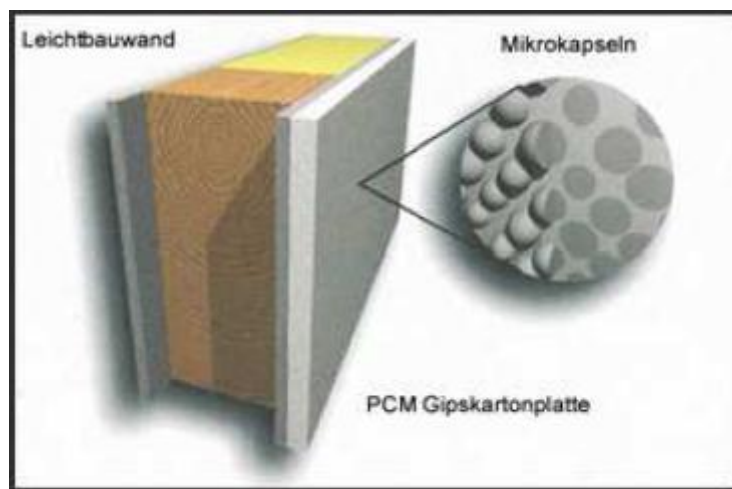
Οι Buddhi και Sharma [51] μέτρησαν την μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω υλικών αλλαγής φάσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πάχη. Ως υλικό αλλαγής φάσης χρησιμοποιήθηκε στεατικό οξύ. Ανακάλυψαν ότι η μετάδοση των PCM ήταν περισσότερη από του γυαλιού για το ίδιο πάχος και πρότειναν μια νέα εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης σε παράθυρα/τοιχούς ως ένα διάφανο υλικό μόνωσης.

Οι Stritih και Novak [52] παρουσίασαν έναν ηλιακό τοίχο για αερισμό κτιρίων, ο οποίος απορροφά ηλιακή ενέργεια σε μαύρο κερι παραφίνης (με σημείο τήξης 25-30°C). Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκε για θέρμανση αέρα για τον αερισμό του σπιτιού. Η αποδοτικότητα της απορρόφησης βρέθηκε να είναι 79%.

3.2.2 Γυψοσανίδες με PCMs: [41], [42]

Οι γυψοσανίδες με PCMs είναι φθηνές και ευρέως χρησιμοποιούμενες σε μια ποικιλία εφαρμογών, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για την ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης με κάψουλες. Ωστόσο, οι αρχές της

λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε κατάλληλο υλικό κτιρίων. Οι γυψοσανίδες αυτές θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές γυψοσανίδες κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή και της ανακαίνισης ενός κτιρίου. Με τον τρόπο αυτό, θα παρέχουν στο κτίριο την αποθήκευση θερμότητας, η οποία θα διανέμεται σε όλη του την έκταση, ενισχύοντας το παθητικό σύστημα και περιορίζοντας τα απαιτούμενα μέγιστα ηλεκτρικά φορτία για θέρμανση-ψύξη.



Σχήμα 3.2.2.1: Γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM. [41]

Τα τελευταία 20 χρόνια, πολλά είδη καψουλών μεγάλων διαστάσεων βγήκαν στο εμπόριο για εφαρμογές τόσο ενεργητικών όσο και παθητικών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων άμεσου κέρδους. Παρόλα αυτά, η επιφάνεια των περισσότερων εμπορικών προϊόντων που είναι αποθηκευμένα σε μορφή κάψουλας, δεν ήταν ικανή να μεταδώσει την θερμότητα στο κτίριο ύστερα από την τήξη του PCM από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, γι' αυτό και έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Ο Shapiro και οι συνεργάτες του [53], ανακάλυψαν μεθόδους για διαποτισμό γύψινου τοίχου και άλλων αρχιτεκτονικών υλικών με PCM. Διαφορετικοί τύποι PCM και των χαρακτηριστικών τους περιγράφηκαν. Ο Shapiro [54]

απέδειξε ότι πολλά PCMs είναι κατάλληλα για εισαγωγή σε γύψινο τοίχο, με πιθανές εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης για το κλίμα της Φλώριντας. Τα υλικά αυτά ήταν μείγματα μεθυλο-εστέρων και μείγματα μικρής αλυσίδας λιπαρών οξέων. Παρά το γεγονός ότι τα υλικά αυτά είχαν σχετικά υψηλή λανθάνουσα θερμότητα, το θερμοκρασιακό εύρος που απαιτείται για την επίτευξη της θερμικής αποθήκευσης δεν εμπίπτει επαρκώς εντός του εύρους της άνεσης για τα κτίρια σε ζεστά κλίματα.

Ο Feldman και οι συνεργάτες του [55-57], διεξήγαγαν εκτενή έρευνα όσον αφορά τη χρήση και τη σταθερότητα των οργανικών συστατικών για τη λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων των λιπαρών οξέων (καπρικού, λαυρικού, παλμιτικού και στεατικού), butyl στεατικό, dodecanol και πολυαιθυλενογλυκόλη 600. Επιπροσθέτως με τις μελέτες των ιδιοτήτων τους, διεξήχθη επίσης έρευνα στα υλικά, τα οποία συμπεριφέρονται ως απορροφητές PCMs. Διάφορα υλικά εξετάστηκαν, συμπεριλαμβανομένων των διαφόρων τύπων σκυροδέματος και γύψου. Η χρήση της αποθηκευμένης λανθάνουσας θερμότητας πάνω από ένα άνετο εσωτερικό θερμοκρασιακό εύρος σε κτίρια μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της ικανότητας θερμικής αποθήκευσης της τάξης του 10-130%.

Ο Neerer [58] ανακάλυψε ότι η θερμική αποθήκευση που παρέχεται από πίνακα τοίχου PCM θα ήταν επαρκής ώστε να επιτρέψει μια μεγάλη ηλιακή θερμική λειτουργία με άμεσο κέρδος.

Οι Stovall και Tomlinson [59] εξέτασαν τη μετατόπιση των φορτίων θέρμανσης και ψύξης σε ώρες χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά έβγαλαν γενικά συμπεράσματα σχετικά με τις βέλτιστες ιδιότητες των PCMs. Για γυψοσανίδες που θερμαίνονται με απορρόφηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, ο Drake [60] έκρινε ότι η βέλτιστη θερμοκρασία τήξης είναι ανάλογη προς την απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια.

Οι Stetiu και Feustel [61] παρουσίασαν ένα πρόγραμμα θερμικής προσομοίωσης κτιρίων βασισμένο σε μια προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών για την αριθμητική αξιολόγηση της απόδοσης αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας των επεξεργασμένων γυψοσανίδων με PCMs. Η θερμική μάζα χρησιμοποιήθηκε για τη μείωση της αιχμής ζήτησης ενέργειας και του μεγέθους της ψύξης ή θέρμανσης.

3.2.3 Πατζούρια με PCMs: [41], [62]

Τα πατζούρια στα οποία είναι ενσωματωμένα PCMs τοποθετούνται έξω από τα παράθυρα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ανοίγουν προς τα έξω και αφήνουν την εξωτερική πλευρά εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία, απορροφάται θερμότητα και το PCM λιώνει. Τη νύχτα τα πατζούρια και τα παράθυρα κλείνουν και η θερμότητα που έχει αποθηκευτεί στο PCM ακτινοβολείται στα δωμάτια.



Σχήμα 3.2.3.1: Παραθυρόφυλλα με PCM. [63]

Οι Buddhi et al. [62] μελέτησαν τη θερμική απόδοση ενός θαλάμου δοκιμής (1m×1m×1m) με και χωρίς υλικό αλλαγής φάσης. Λαυρικό οξύ CG (με σημείο τήξης 49°C) χρησιμοποιήθηκε ως υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Με τον τρόπο αυτό, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας του θαλάμου λόγω της παρουσίας του PCM αυξάνεται έως 4°C για 4 με 5 ώρες, η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της νύχτας.

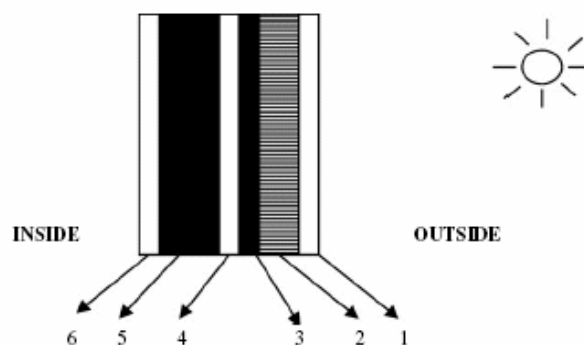
3.2.4 Τοίχος συλλογής ηλιακής θερμότητας με PCMs για αερισμό του κτιρίου: [42]

Ένας τοίχος με ενσωματωμένο PCM έχει τη δυνατότητα να αιχμαλωτίζει μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στους τοίχους και την οροφή ενός κτιρίου. Οι τοίχοι αυτοί με τα ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης επειδή έχουν μεγάλη θερμική μάζα, μπορούν να ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις των διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου που εφαρμόζονται. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί όσον αφορά τη μετατόπιση του φορτίου από τις ώρες αιχμής σε περιόδους μικρότερης ζήτησης.

Οι Arkar και Medved [64] σχεδίασαν και εξέτασαν ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (LTHS) για τον αερισμό ενός κτιρίου. Οι σφαιρικές κάψουλες πολυαιθυλένης τοποθετήθηκαν σε ένα κανάλι του συστήματος αερισμού του κτιρίου και λειτούργησαν ως ένα πορώδες μέσο αποθήκευσης και απορρόφησης. Η θερμότητα που απορροφήθηκε χρησιμοποιήθηκε για να προθερμάνει τον ατμοσφαιρικό αέρα που εισέρχεται στο κτίριο.

Ο «ηλιακός τοίχος» είναι μία άλλη εφαρμογή για την θερμική αποθήκευση με PCMs. Σε αυτή την περίπτωση, η ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο απορροφάται από το PCM και “θάβεται” σε αυτόν. Οι Stritih και Novak [65]

κατασκεύασαν έναν πειραματικό τοίχο, ο οποίος περιείχε μαύρο κερι παραφίνης ως PCM. Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκε για την θέρμανση και τον αερισμό του κτιρίου και τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τους ερευνητές, ήταν αρκετά ενθαρρυντικά. Ο τοίχος αποτελείται από έξι κυρίως μέρη, τα οποία παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.2.4.1: Στοιχεία του PCM ενός «ηλιακού τοίχου». [42]

Η λειτουργία ενός «ηλιακού τοίχου» περιγράφεται παρακάτω: Η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος περνάει μέσα από το τζάμι με το διαφανές μονωτικό υλικό (1,2), το οποίο εμποδίζει τη συναγωγή και τη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία. Στη συνέχεια, το PCM (3), το οποίο βρίσκεται σε μία διαφανή πλαστική θήκη κατασκευασμένη από πολυάνθρακα, απορροφά και αποθηκεύει την ενέργεια, κυρίως με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Ο αέρας για τον αερισμό του κτιρίου θερμαίνεται στο κανάλι (4) και οδηγείται στο δωμάτιο, ενώ η μόνωση (5) και ο γύψος (6) αποτελούν δεδομένα στοιχεία.

Ο «ηλιακός τοίχος» παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα, όπως:

- Την υψηλής απόδοσης μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα, η οποία οφείλεται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατ' ευθείαν από το PCM (παραφίνη) μέσω του διαφανούς πλαστικού τζαμιού, το οποίο ταυτόχρονα

λειτουργεί και ως μονωτικό, εμποδίζοντας τις απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον.

- Οι απώλειες λόγω της αγωγής στο δωμάτιο επίσης μειώνονται στην επιφάνεια τοποθέτησης του τοίχου.

3.2.5 Πάνελ οροφής με ενσωματωμένα PCMs: [41], [42]

Ηλιακή στέγη αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας εφαρμόστηκε σε ένα Περουβιανό χωριό ώστε να διατηρηθούν σχετικά ισοθερμικές συνθήκες σε ένα πειραματικό σπίτι γέννησης κοτόπουλων. Το σπίτι αυτό χωρίστηκε σε δύο στενά συνδεδεμένα μέρη, ένα αίθριο και ένα θερμαινόμενο θάλαμο. Δύο ημικυκλικές δεξαμενές καλυμμένες με γυαλί στο επάνω μέρος, που περιείχαν 42 κιλά παραφίνης η καθεμία, τοποθετήθηκαν κάτω από μια γυάλινη οροφή, η οποία ήταν ερμητικά κλειστή. Για τη νύχτα είχε τοποθετηθεί παχιά μόνωση πολυουρεθάνης μεταξύ της γυάλινης οροφής και των δεξαμενών παραφίνης για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του θαλάμου μεταξύ των 22 και 30°C [66].

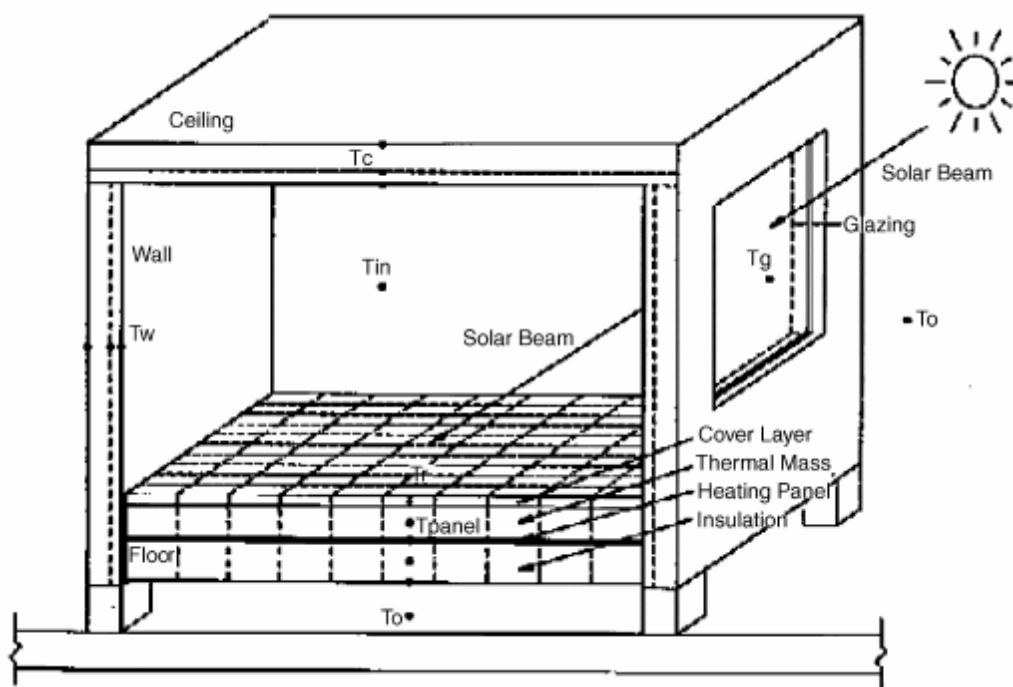
Ένα σύστημα θέρμανσης χώρων που ενσωματώνει PCM το οποίο τοποθετείται στην οροφή αναπτύχθηκε από τους Gutherz και Schiler [67]. Ηλιακοί ανακλαστήρες χρησιμοποιήθηκαν για να κατευθύνουν την ηλιακή ενέργεια που εισέρχεται μέσα από τα παράθυρα πάνω στα PCMs. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού ήταν ότι έδωσε μια μεγάλη περιοχή για την αποθήκευση θερμότητας χωρίς την ανάγκη μεγάλου όγκου που θα απαιτούσαν τα μέσα αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση ενός τέτοιου συστήματος έχει τη δυνατότητα να ανακτήσει 17-36% της θερμότητας που χάνεται κατά τη διάρκεια των αρχικών κερδών. Οι Turnpenny et al. [68] ανέπτυξαν μια μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας που περιλαμβάνει αγωγούς θερμότητας ενσωματωμένους σε υλικό αλλαγής

φάσης. Το σύστημα αυτό αποθήκευε τη δροσιά κατά τη διάρκεια της νύχτας και την απέδιδε το πρωί.

3.2.6 Ενδοδαπέδια θέρμανση με χρήση υλικού αλλαγής φάσης: [41]

Το πάτωμα είναι ένα αρκετά σημαντικό σημείο ενός κτιρίου και για το λόγο αυτό έγιναν κάποιες δοκιμές όσον αφορά τη θέρμανση και την ψύξη του. Οι Ahtienities και Chen [69] έκαναν μελέτη πάνω στη μεταβατική μεταφορά θερμότητας στα συστήματα θέρμανσης του πατώματος. Η μελέτη τους αυτή επικεντρώθηκε στην επίδραση που έχουν το κάλυμμα και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στη θερμοκρασιακή κατανομή του δαπέδου αλλά και στην κατανάλωση ενέργειας. Για το σκοπό αυτό έλαβαν υπόψη περιοχές καλυμμένες ολόκληρες ή και μερικώς από χαλί, καθώς επίσης και περιοχές με σκληρή επικάλυψη τσιμέντου ή μίγματος γύψου-τσιμέντου. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα από προσομοιώσεις για ένα εξωτερικό δωμάτιο δοκιμών, αποδεικνύουν ότι η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας της περιοχής του πατώματος που τη δέχεται κατά 8°C περισσότερο σε σχέση με αυτή που βρίσκεται υπό σκιά. Η μερική κάλυψη δε του πατώματος με χαλί, αυξάνει την θερμοκρασιακή διαφορά του πατώματος στους 15°C όταν απορροφάται ηλιακή ακτινοβολία.

Η ηλιακή ακτινοβολία που αποθηκεύεται στην θερμική μάζα του πατώματος αποδείχτηκε ότι μειώνει την κατανάλωση ενέργειας για θερμότητα κατά 30% ή και περισσότερο. Σε αντίθεση με αυτό, η αύξηση του πάχους της θερμικής μάζας από 5 cm σε 10 cm δε φαίνεται να οδηγεί σε περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας με συμβατικά αναλογικά συστήματα ολοκληρωμένου ελέγχου. Παρακάτω δίνεται η σχηματική αναπαράσταση του δωματίου δοκιμών.



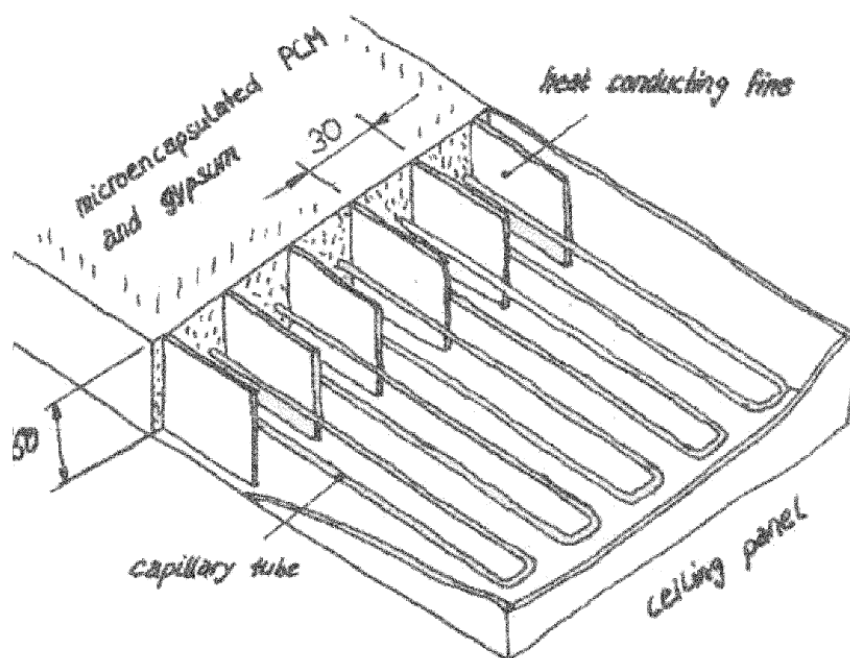
Σχήμα 3.2.6.1: Σχηματική αναπαράσταση του δωματίου δοκιμών με σύστημα διακριτοποίησης. [41]

3.3 Εφαρμογές των Υλικών αλλαγής φάσης σε Ενεργητικά ηλιακά συστήματα:

3.3.1 Πάνελ οροφής: [41],[42]

Προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική αποθήκευση θερμότητας, περίπου ίση με το θερμικό κέρδος, εντός του χώρου κατά τη διάρκεια της ημέρας και το σύστημα αυτό να ενταχθεί στα κτίρια, οι Markus Koschenz και Beat Lehmann [70] ανέπτυξαν την ιδέα των πάνελ οροφής. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, το PCM στα πάνελ οροφής λιώνει κατά τη διάρκεια της ημέρας μετά από έκθεσή του σε θερμικά φορτία και παγώνει κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν ψύχεται με τη βοήθεια ενός ολοκληρωμένου συστήματος σωλήνων νερού. Η προσωρινή αποθήκευση θερμικής ενέργειας στο PCM μειώνει το εύρος της θερμοκρασίας του κτιρίου,

ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει στη διαδικασία απόρριψης θερμότητας να μη γίνεται παράλληλα με το θερμικό κέρδος. Αυτή η διάταξη απαιτεί πολύ αυστηρές προφυλάξεις πυρόσβεσης προκειμένου να αποτραπεί η διαφυγή της υγρής παραφίνης που χρησιμοποιείται συνήθως ως υλικό αλλαγής φάσης. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται πολλές φορές μικροκάψουλες παραφίνης που ενσωματώνονται σε ορισμένα υλικά όπως ο γύψος. Με αυτόν τον τρόπο, το PCM βρίσκεται σε μία σταθερή δομή, ενώ παράλληλα το περιεχόμενο νερό μέσα στο γύψο καθυστερεί την εξάπλωση της φλόγας σε περίπτωση πυρκαγιάς. Παρακάτω παρουσιάζεται μια τυπική μορφή πάνελ οροφής με υλικό αλλαγής φάσης.



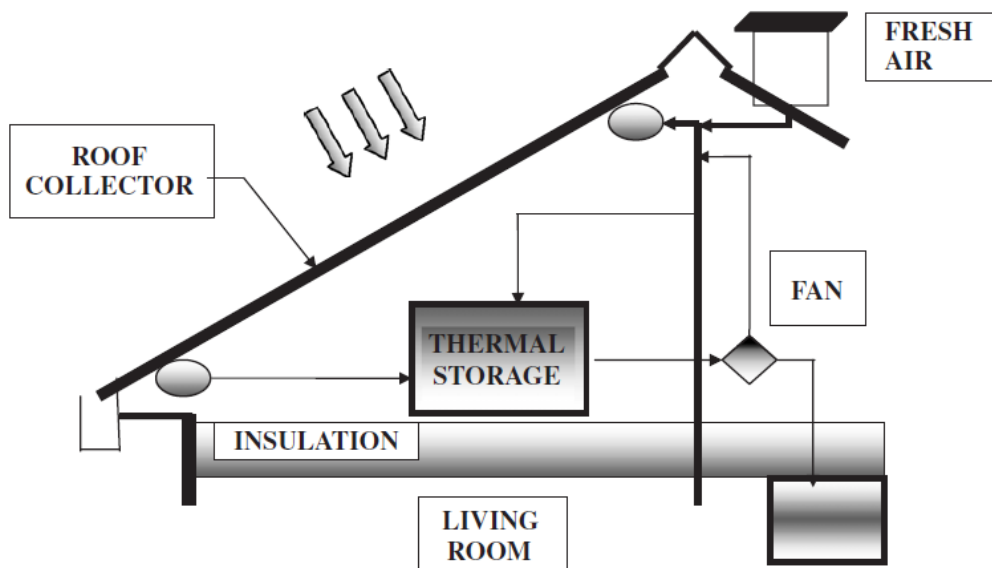
Σχήμα 3.3.1.1: Σχηματική απεικόνιση θερμικά ενεργοποιημένου πάνελ οροφής με PCM. [42]

Τα πάνελ οροφής είναι το σημαντικότερο τμήμα της οροφής, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και ψύξη στα κτίρια. Ο Bruno [71] ανέπτυξε ένα σύστημα, το οποίο αποθήκευε ενέργεια ψύξης σε υλικό αλλαγής φάσης κατά τη διάρκεια ωρών χαμηλής ζήτησης, η οποία απελευθερωνόταν κατά τις ώρες αιχμής. Επιπλέον μελετήθηκαν τα αποτελέσματα του ελέγχου

των συστημάτων κλιματισμού που χρησιμοποιούν PCM σε τμήματα της οροφής του κτιρίου. Το σημείο τήξης του PCM που χρησιμοποιήθηκε βρισκόταν μεταξύ 20 και 30°C, σχεδόν ίσο με την κατάλληλη θερμοκρασία του δωματίου για το σκοπό αυτό. Οι Κόντο και Ibamoto [72] έκαναν μια προσπάθεια για τη μείωση του φορτίου αιχμής του συστήματος κλιματισμού που λειτουργεί με PCMs στην οροφή. Το σημείο τήξης και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης των χρησιμοποιούμενων PCMs ήταν 24,5°C και 174,4 kJ/kg, αντίστοιχα. Το σύστημα ήταν ουσιαστικά ίδιο με το σύστημα του θαλάμου οροφής. Κατά τη διάρκεια της ψύξης, ο δροσερός αέρας από τη μονάδα εισαγωγής αέρα περνούσε από το χώρο του θαλάμου της οροφής για να αποθηκεύσει τη δροσιά στο PCM της οροφής. Η δροσιά ανακτήθηκε κατά τη διάρκεια 2 ωρών αιχμής για την ψύξη του δωματίου. Με τη μέθοδο αυτή, διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του χώρου ήταν μόνο 2°C περίπου σε σχέση με την αύξηση 6°C στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, αν δεν χρησιμοποιούνταν PCM.

3.3.2 Σύστημα θέρμανσης χώρου τοποθετημένο στην οροφή: [42]

Η τοποθέτηση PCMs στην οροφή για τη θέρμανση χώρου έχει εξεταστεί από πολλούς επιστήμονες. Το σύστημα λειτουργεί με τρεις τρόπους. Όταν ο ήλιος λάμπει και η θέρμανση απαιτείται, ο αέρας διέρχεται μέσα από το συλλέκτη και στη συνέχεια μέσα στο σπίτι. Όταν δεν απαιτείται θέρμανση αέρας εισέρχεται στη θερμική μονάδα αποθήκευσης, λιώνει το PCM και το φορτίζει για μελλοντική χρήση. Όταν η ηλιοφάνεια δεν είναι διαθέσιμη, ο αέρας του δωματίου διέρχεται από τη συσκευή αποθήκευσης, θερμαίνεται και στη συνέχεια διοχετεύεται στο σπίτι. Αν η εγκατάσταση αποθήκευσης είναι παγωμένη υπάρχει βοηθητικός θερμοσίφωνας αερίου για τη θέρμανση του σπιτιού. Εισάγονται επαρκείς ποσότητες φρέσκου αέρα όταν το ηλιακό σύστημα θέρμανσης μεταφέρει θερμότητα μέσα στο σπίτι.



Σχήμα 3.3.2.1: Σύστημα οροφής με PCM για θέρμανση χώρου. [42]

Το Πανεπιστήμιο της Νότιας Αυστραλίας (UNISA) [44] έχει αναπτύξει ένα ολοκληρωμένο ηλιακό σύστημα αέρα θέρμανσης/αποθήκευσης ενσωματωμένο στην οροφή, το οποίο χρησιμοποιεί φύλλα σιδήρου στην οροφή ως ηλιακό συλλέκτη για τη θέρμανση του αέρα. Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιείται μια θερμική μονάδα αποθήκευσης PCM για την αποθήκευση θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας, ώστε θερμότητα να μπορεί να παρέχεται τη νύχτα ή όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.

Σύμφωνα με επιστημονικές μελέτες, ένα τέτοιο σύστημα για τη θέρμανση χώρων παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Η επίδραση της αισθητής θερμότητας γίνεται αντιληπτή κατά την αρχική περίοδο των διαδικασιών τήξης και στερεοποίησης. Η επίδραση αυτή αντικατοπτρίζεται στην απότομη αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα κατά την αρχική περίοδο της τήξης και στην απότομη μείωσή της κατά την αρχική περίοδο

της στερεοποίησης. Όσον αφορά τη θέρμανση χώρου, αυτό το φαινόμενο έχει σημαντικές επιπτώσεις θέρμανσης κατά τις αρχικές περιόδους παροχής αέρα στο χώρο. Είναι μια εξαιρετικά συμφέρουσα διαδικασία από άποψη θερμικής άνεσης του χώρου.

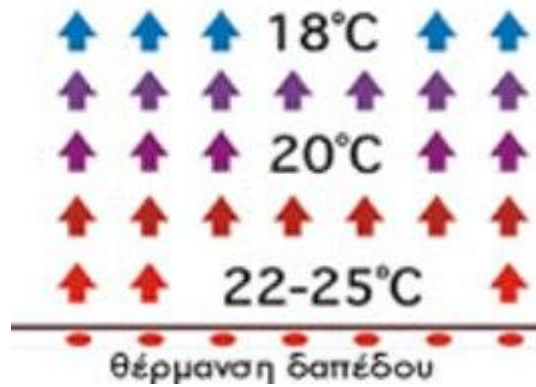
- Η υψηλότερη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής αυξάνει τις ταχύτητες μεταφοράς θερμότητας και μειώνει το χρόνο τήξης. Κατά την αντίστροφη διαδικασία της στερεοποίησης, η χαμηλότερη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής αυξάνει πάλι τις ταχύτητες μεταφοράς θερμότητας και μειώνει το χρόνο στερεοποίησης.
- Ομοίως, ένας υψηλότερος ρυθμός ροής του αέρα αυξάνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και μειώνει το χρόνο τήξης, αλλά αυξάνει τη θερμοκρασία του αέρα εξόδου. Για τη διαδικασία στερεοποίησης, ο υψηλότερος ρυθμός ροής του αέρα αυξάνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και μειώνει το χρόνο στερεοποίησης, αλλά μειώνει τη θερμοκρασία του αέρα εξόδου.

3.3.3 Σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με PCM: [41], [42], [70]

Η ενδοδαπέδια θέρμανση λειτουργεί επιτυχώς στην ηπειρωτική Ευρώπη τα τελευταία 50 χρόνια και οδεύουμε προς την συμπλήρωση 25ετίας από τότε που ξεκίνησε να εφαρμόζεται η θέρμανση δαπέδου στην Ελληνική επικράτεια. Έχουμε φτάσει σήμερα λοιπόν στο σημείο, το σύστημα αυτό της θέρμανσης να έχει γίνει ευρύτερα αποδεκτό. Η θέρμανση δαπέδου με θερμό νερό, είναι αυτή που έχει επικρατήσει με ποσοστό που αγγίζει το 95% στην χώρα μας έναντι άλλων συστημάτων ενδοδαπέδιας θέρμανσης (π.χ. ηλεκτρικής αντίστασης). Η διαδικασία της λειτουργίας της ενδοδαπέδιας θέρμανσης είναι πολύ απλή και έχει ως εξής: Το θερμό νερό προπαρασκευασμένο στην κατάλληλη θερμοκρασία από κάποια πηγή

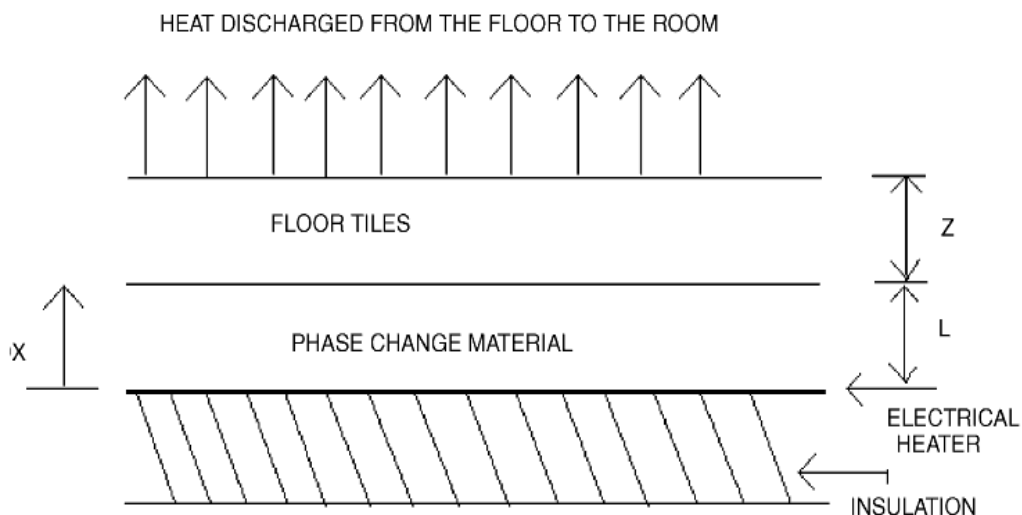
θερμότητας (π.χ. λεβητοστάσιο, αντλία θερμότητας, ηλιακό συγκρότημα κ.τ.λ.) διαρρέοντας το σύστημα των σωληνώσεων του δαπέδου θερμαίνει το θερμομοπετόν, το οποίο θερμοσυσσωρεύει, υψώνει την θερμοκρασία του και θερμαίνει το χώρο. Ένα τέτοιο σύστημα θέρμανσης θερμαίνει ένα χώρο κυρίως ακτινοβολώντας θερμοκρασία (65%) και κατά δεύτερο λόγο με μεταφορά (35%).

Η Ενδοδαπέδια θέρμανση λειτουργεί με νερό χαμηλής θερμοκρασίας, από 30°C έως 45°C, που κυκλοφορεί σε σωλήνες εγκιβωτισμένους στο δάπεδο. Η θέρμανση διαχέεται ομοιόμορφα στο χώρο μέσω ακτινοβολίας ζεσταίνοντάς τον και προσφέροντας μια αίσθηση θερμικής θαλπωρής, με χαμηλότερο λειτουργικό κόστος. Η χρήση του δαπέδου σαν θερμαντικό σώμα είναι το χαρακτηριστικό που προσδίδει σε αυτό το είδος θέρμανσης την πλειοψηφία των πλεονεκτημάτων που εμφανίζει. Στην πραγματικότητα, η ενδοδαπέδια θέρμανση αποτελεί ένα διαφορετικό είδος απόδοσης θερμότητας στον χώρο από αυτό που μπορεί να χρησιμοποιείται ήδη. Κατά την λειτουργία του θερμαντικού σώματος λόγω ακτινοβολίας θερμαίνεται ο αέρας στους 50°C. Το πρόβλημα με αυτό είναι ότι ο καυτός αέρας αυξάνεται και η θερμότητα συσσωρεύεται στο ανώτερο μέρος του χώρου. Έτσι η θερμοκρασία σε ύψος 1,6 m από το δάπεδο που βρίσκεται το κεφάλι η θερμοκρασία είναι 24°C, ενώ στο δάπεδο η θερμοκρασία είναι περίπου 17°C. Αντίθετα, η αρχή λειτουργίας του ενδοδαπέδιου συστήματος βασίζεται στην ικανότητα που έχει το δάπεδο ως ένα τεράστιο θερμαντικό σώμα με μεγάλη θερμοχωρητικότητα να ακτινοβολεί ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις του χώρου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη ροή ζεστού νερού σε χαμηλή θερμοκρασία κάτω από το τελικό δάπεδο. Έτσι, η θερμοκρασία στο δάπεδο είναι 25°C, ενώ σε ύψος 1,6 m η θερμοκρασία είναι 18°C. Κατά αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται ιδανική κατανομή θερμοκρασίας για το ανθρώπινο σώμα, όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 3.3.3.1: Κατανομή θερμοκρασίας. [70]

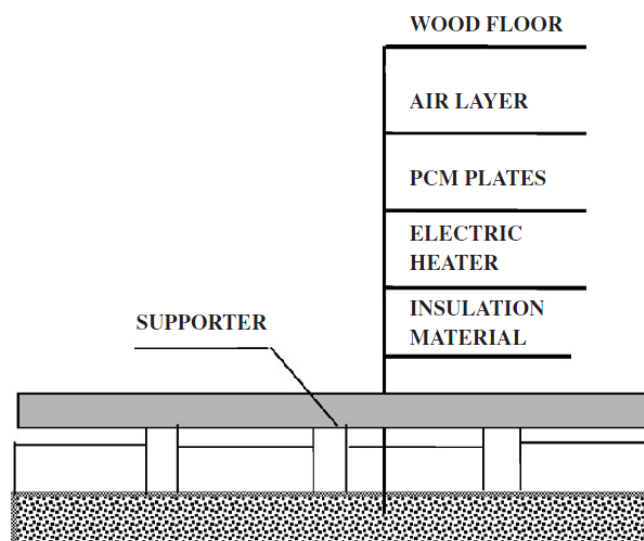
Ένα ηλεκτρικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, έχοντας ως υλικό αλλαγής φάσης κερι παραφίνης (με σημείο τήξης 40°C), πρότειναν οι Farid και Chen [60]. Τοποθέτησαν μια λωρίδα PCM 30mm μεταξύ της επιφάνειας θέρμανσης και των πλακών του πατώματος. Χρησιμοποιώντας προσομοίωση υπολογιστή, ανακάλυψαν ότι η θερμότητα που προέρχεται από το πάτωμα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά από 30 σε 75 W/m^2 , εάν χρησιμοποιηθεί αποθήκευση σε PCM.



Σχήμα 3.3.3.2: Ηλεκτρικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με PCM. [41]

Οι Kunring Lina et al. [73] πρότειναν ένα νέο είδος ηλεκτρικού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης με σταθερού σχήματος πλάκες PCM. Οι εν λόγω πλάκες διαφέρουν από τα συμβατικά PCMs καθώς μπορούν να διατηρήσουν σταθερό το σχήμα τους κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης. Ως εκ τούτου, μπορεί να αποφευχθεί ο κίνδυνος πιθανής διαρροής που παρουσιάζουν τα περισσότερα PCMs. Το σύστημα αυτό μπορεί να επιβάλλει φόρτιση της θερμότητας, χρησιμοποιώντας τη φθηνή ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια της νύχτας και να απορρίπτει την αποθηκευμένη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος χτίστηκε ένα πειραματικό σπίτι στο πανεπιστήμιο Tsinghua στο Πεκίνο της Κίνας. Το σπίτι αυτό ήταν εξοπλισμένο με ηλεκτρικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με σταθερού σχήματος πλάκες PCM. Οι διαστάσεις του ήταν 3 m (βάθος) x 2 m (πλάτος) x 2 m (ύψος). Επιπλέον, είχε διπλά τζάμια παραθύρων νότιου προσανατολισμού με διαστάσεις 1.6x1.5 m², που καλύπτονταν από μαύρη κουρτίνα. Η στέγη και τοίχοι ήταν φτιαγμένοι από 100 mm πάχους πολυστερίνης τυλιγμένη από πλαίσιο μετάλλων. Το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης περιελάμβανε μόνωση πολυστερίνης πάχους 120 mm, ηλεκτρικά καλοριφέρ, PCM πάχους 15 mm, μερικά ξύλινα στηρίγματα, πάχος στρώματος αέρα 10 mm και ξύλινο πάτωμα πάχους 8 mm. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα τμήματα από τα οποία αποτελείται αυτό το σύστημα.



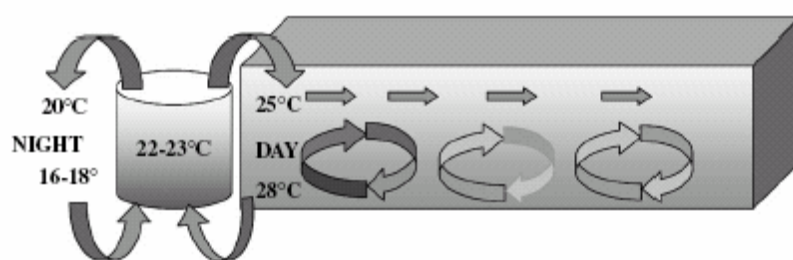
Σχήμα 3.3.3.3: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης που εφαρμόστηκε σε πανεπιστήμιο της Κίνας. [42]

Τα συμπεράσματα από την παραπάνω εφαρμογή ήταν τα ακόλουθα:

- Το σύστημα αυτό αύξησε την εσωτερική θερμοκρασία του χώρου χωρίς να αυξηθεί η θερμοκρασιακή διαφορά.
- Η θερμοκρασία των πλακών PCM διατηρήθηκε στη θερμοκρασία μετάβασης φάσης για αρκετό χρονικό διάστημα από τότε που σταμάτησαν να λειτουργούν τα καλοριφέρ. Περισσότερο από το ήμισυ της ηλεκτρικής θερμικής ενέργειας μεταφέρθηκε από την περίοδο αιχμής σε ώρες εκτός αιχμής, γεγονός που αποτελούσε σημαντικό οικονομικό όφελος αν ληφθούν υπόψη τα διαφορετικά τιμολόγια μεταξύ ημέρας και νύχτας.
- Εμφανίστηκε μικρή διαφορά εσωτερικής θερμοκρασίας κατά μήκος της κάθετης κατεύθυνσης διότι η ενδοδαπέδια θέρμανση μπορούσε να ζεστάνει τον εσωτερικό αέρα ομοιόμορφα. Το σύστημα αυτό θέρμανσης ήταν άνετο και ενεργειακά αποδοτικό.

3.3.4 Free cooling: [42]

Η τεχνική του free cooling που αποτελεί μια μορφή κλιματισμού ερευνήθηκε από το Zalba [74] στο Πανεπιστήμιο της Ζαραγόσα στην Ισπανία. Ο στόχος της έρευνας αυτής ήταν να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί μια πειραματική εγκατάσταση για την μελέτη των PCM με θερμοκρασία τήξης μεταξύ των 20°C και 25°C, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



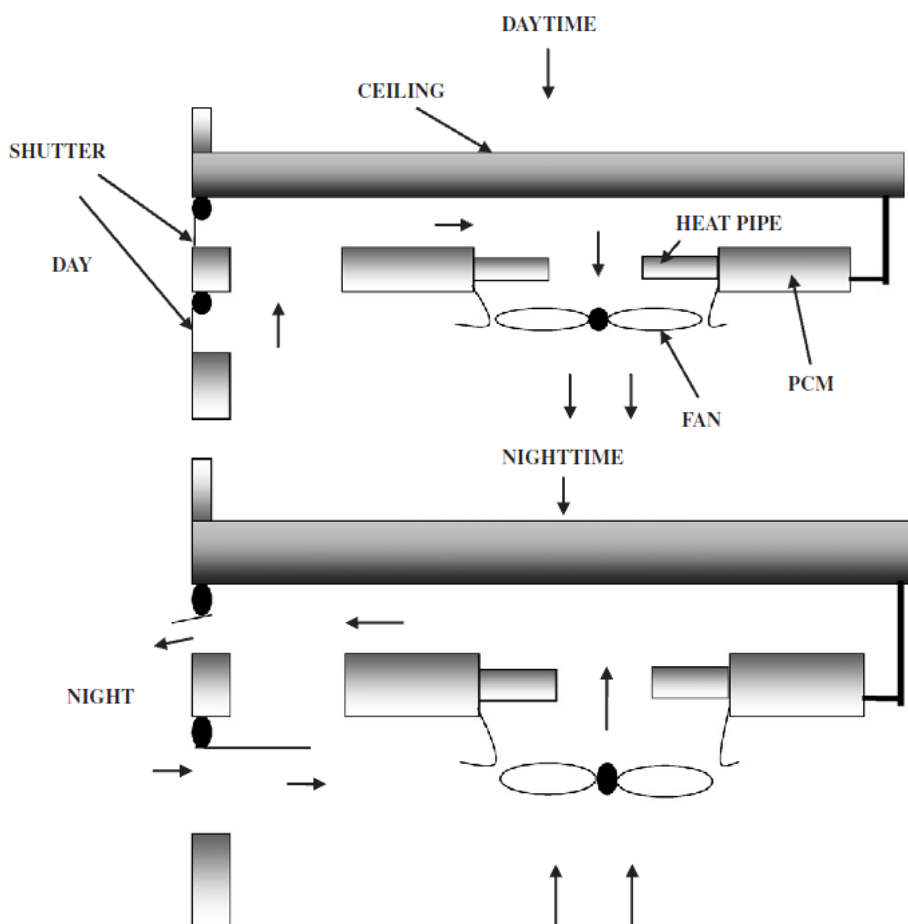
Σχήμα 3.3.4.1: Λειτουργία του Free cooling. [42]

Αυτό το θερμοκρασιακό εύρος φαίνεται να είναι το καταλληλότερο για το free cooling καθώς οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος την νύχτα συνήθως πέφτουν κάτω από τους 20-25°C και έτσι είναι αρκετά χαμηλές ώστε να ψύχουν τον αέρα στα κτίρια. Η εγκατάσταση του free cooling αποθηκεύει το κρύο κατά την διάρκεια της νύχτας και το αποδίδει την ημέρα. Για να λειτουργήσει όμως ικανοποιητικά απαιτεί κλίματα, όπου η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην ημέρα και την νύχτα τους καλοκαιρινούς μήνες, να είναι μεγαλύτερη από 15°C.

Με βάση μια προσέγγιση που έγινε από το Πανεπιστήμιο του Nottingham [75], είναι δυνατή και εύκολη η αντικατάσταση ενός πλήρους συστήματος κλιματισμού με το νέο νυχτερινό σύστημα ψύξης. Αποτελεί ουσιαστικά ένα σύστημα, τοποθετημένο στην οροφή, με ανεμιστήρες που ρίχνουν αέρα στα εκτιθέμενα άκρα των σωλήνων θερμότητας. Το άλλο άκρο των σωλήνων αυτών είναι ένα στοιχείο PCM αποθήκευσης ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της

ημέρας, ο ζεστός αέρας που παράγεται στο χώρο ψύχεται από το PCM το οποίο απορροφά μέρος της θερμότητας του αέρα. Κατά τη διάρκεια όμως της νύχτας, ο ανεμιστήρας αντιστρέφεται και ανοίγουν τα φύλλα του έτσι ώστε ο κρύος αέρας από έξω να περάσει πάνω από τις σωληνώσεις θέρμανσης και να αφαιρέσει την αποθηκευμένη θερμότητα από το PCM. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται κάθε μέρα.

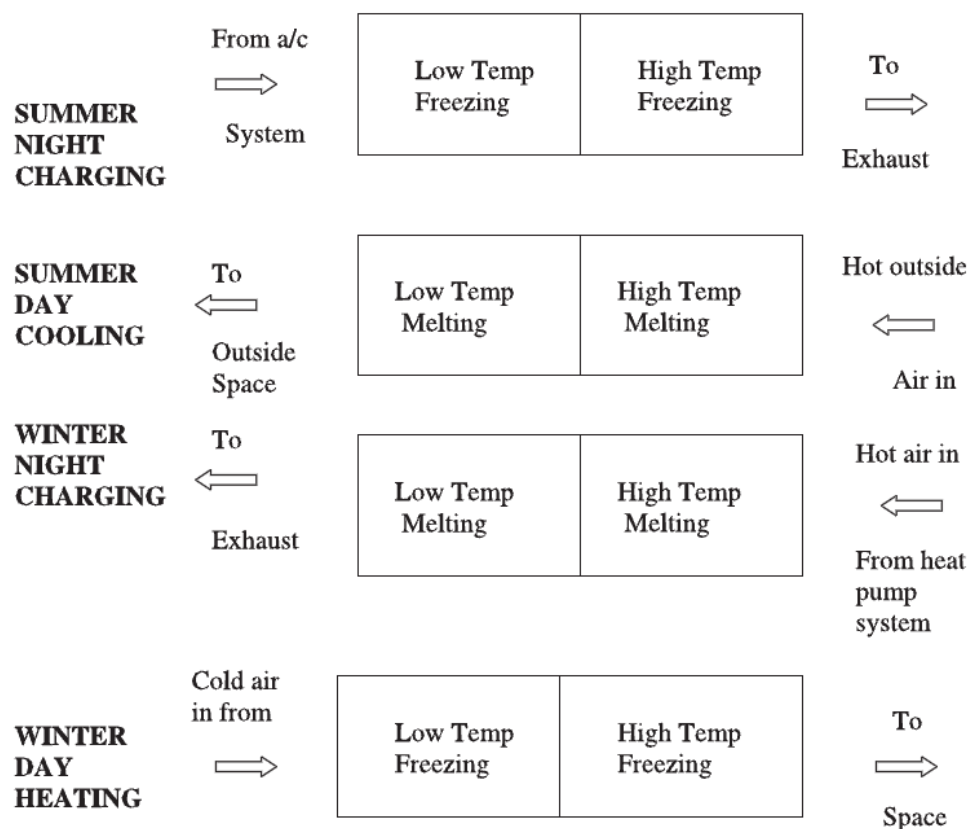
Οι θερμοκρασίες τήξης και στερεοποίησης του PCM είναι περίπου 22 και 20°C αντιστοίχα. Πλήρης τήξη συμβαίνει σε μία περίοδο 8 περίπου ωρών όταν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του PCM και του αέρα είναι 2°C και σε διάστημα 3 ωρών όταν η διαφορά τους είναι 3,5°C. Οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας είναι 80 και 200 W/συσκευή αντιστοίχα ή 800 και 2.000 W για ένα δωμάτιο με 10 συσκευές.



Σχήμα 3.3.4.2: Σύστημα free cooling που προτάθηκε από το Πανεπιστήμιο του Nottingham. [42]

3.3.5 Συνδυασμένο σύστημα θέρμανσης – ψύξης με PCM: [42]

Το Sustainable Energy Centre στη UniSA [76], άρχισε να ασχολείται με τα PCM στην μέση της δεκαετίας του 1990, αναπτύσσοντας μια μονάδα αποθήκευσης, η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για θέρμανση και για ψύξη του χώρου. Η φόρτιση της μονάδας τη νύχτα και η χρήση της την ημέρα, τόσο για τις θερμές όσο και για τις ψυχρές εποχές για ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που αποτελείται από δύο διαφορετικά PCMs, τα οποία είναι ενσωματωμένα σε ένα σύστημα αντιστρεπτού κύκλου, χρησιμοποιεί ενέργεια που δεν παράγεται τις ώρες αιχμής. Καθώς ο αέρας ωθείται στο σύστημα, υπόκειται σε μία διαδικασία θέρμανσης ή ψύξης δύο βημάτων. Πρώτα περνάει από το ένα PCM και μετά από το δεύτερο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.3.5.1: Φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας και χρήση κατά τη διάρκεια της ημέρας, τόσο για θερμές όσο και για ψυχρές εποχές. [42]

Το σημείο τήξης/στερεοποίησης του πρώτου υλικού είναι μικρότερο από τη θερμοκρασία που δημιουργεί την αίσθηση της άνεσης, ενώ το δεύτερο, έχει σημείο τήξης/στερεοποίησης πάνω από αυτή τη θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η ροή του αέρα είναι με τέτοιο τρόπο καθορισμένη ώστε το σύστημα να αποθηκεύει θερμότητα τη νύχτα (με την τήξη και των δύο υλικών) και να αποδίδει την θερμότητα (με τη στερεοποίηση των υλικών αυτών) σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τις συνθήκες άνεσης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το καλοκαίρι, η κατεύθυνση της ροής του αέρα αντιστρέφεται και το σύστημα αποθηκεύει ψυχρή ενέργεια τη νύχτα και αποδίδει τον ψυχρό αέρα σε θερμοκρασία μικρότερη από τη θερμοκρασία άνεσης την ημέρα.

Το ποσοστό μείωσης της απαιτούμενης ικανότητας του κλιματιστικού και τα ποσοστά των θερμών και ψυχρών φορτίων που μεταφέρονται στις περιόδους χαμηλής ζήτησης, έγιναν γνωστά χρησιμοποιώντας ένα υπολογιστικό μοντέλο για το σύστημα αποθήκευσης. Συγκεκριμένα, το μοντέλο αυτό έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει και το ετήσιο κέρδος από την εξοικονόμηση ενέργειας. Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας που περιέχει δύο διαφορετικά PCMs μπορεί να μειώσει την απαιτούμενη ικανότητα και το αρχικό κόστος του κλιματιστικού για μία κατοικία. Επιπλέον μπορεί να μετατοπίσει ένα ποσοστό από τα φορτία θέρμανσης και ψύξης στις ώρες χαμηλής ζήτησης, όπου και η τιμή του ρεύματος είναι χαμηλότερη. Οι υπολογισμοί για ένα τυπικό σπίτι στην Αδελαΐδα έδειξαν ότι το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας που αποτελείται από 100 kg PCM θερμοκρασίας 29°C και από 80 kg PCM θερμοκρασίας 18°C μείωσε το ονομαστικό ποσοστό του φορτίου που απαιτείται για το κλιματιστικό στο 50% του συνολικού φορτίου. Επιπλέον, το ετήσιο ηλεκτρικό κόστος μειώθηκε κατά 32% εξαιτίας της μετατόπισης του φορτίου σε ώρες χαμηλής ζήτησης. Η εταιρία κοινής ωφέλειας θα μπορούσε να επωφεληθεί από τη μετατόπιση του 52% και του 41% των φορτίων κλιματισμού κατά τη διάρκεια των ψυχρών και των θερμών εποχών αντίστοιχα από μειωμένη παραγωγή και δυνατότητες

μετάδοσης εάν το προτεινόμενο σύστημα αποθήκευσης χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα.

Κεφάλαιο 4

Βιομηχανικές εφαρμογές των Υλικών αλλαγής φάσης

4.1 Εισαγωγή: [12]

Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας σε λανθάνουσα μορφή είναι αρκετά εκτεταμένες. Τα πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας με μικρότερη διακύμανση κατά την ανάκτηση της με μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά από την πηγή θερμότητας (μέχρι και ισοθερμοκρασιακά).

Όπως είναι κατανοητό η ελευθερία που δίνει το εύρος θερμοκρασιών που παράγονται τα υλικά δίνει την ευχέρεια εφαρμογής των PCMs σε πλήθος περιπτώσεων στο βιομηχανικό τομέα πέρα από την αξιοποίησή τους στα κτίρια. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, εκμεταλλευόμενα τις ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης.

4.2 Ηλιακός θερμοσίφωνας με PCM: [77]

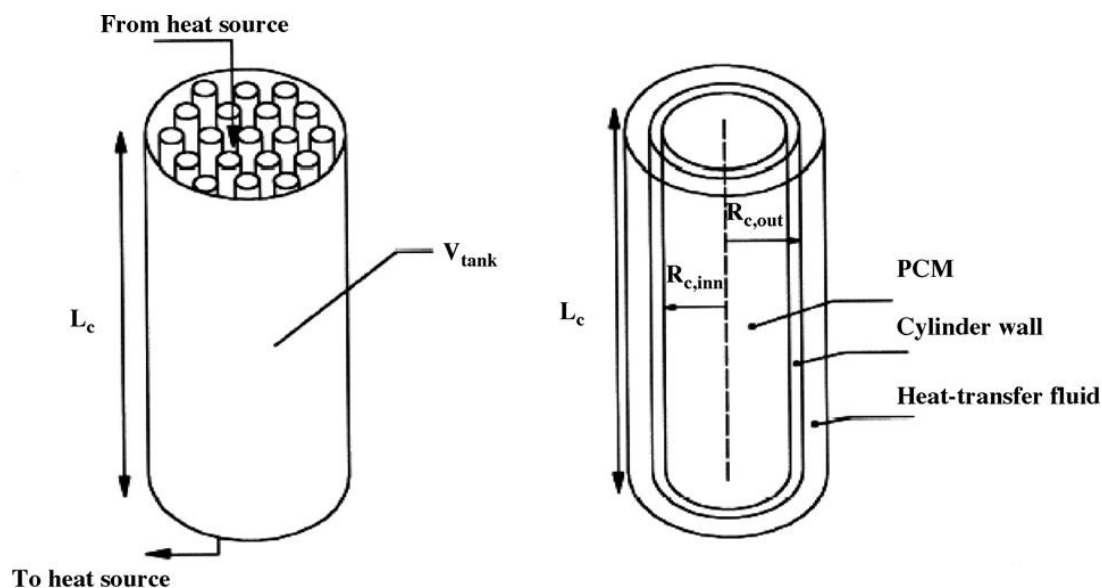
Αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη βοήθεια υλικών αλλαγής φάσης, καθώς έχει μικρό κόστος και είναι εύκολο στην κατασκευή και τη συντήρηση. Οι Prakesh et al. [78] μελέτησαν μια κατασκευή συστήματος αποθήκευσης θερμότητας αποτελούμενο από ένα θερμοσίφωνα που περιέχει ένα στρώμα PCM στο κάτω μέρος. Κατά τη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας, το νερό θερμαίνεται και με τη σειρά του μεταφέρει θερμότητα προς το PCM που βρίσκεται κάτω από αυτό. Το PCM συλλέγει την ενέργεια με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας και λιώνει. Κατά τη διάρκεια ωρών εκτός ηλιοφάνειας, το ζεστό νερό αποσύρεται και αντικαθίσταται από το κρύο νερό, το οποίο αποκτά

ενέργεια από το PCM. Η ενέργεια απελευθερώνεται από το PCM κατά την αλλαγή φάσεων του από υγρό σε στερεό. Αυτός ο τύπος του συστήματος μπορεί να μην είναι αποτελεσματικός λόγω της μικρής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του PCM και του νερού. Μια κυλινδρική μονάδα αποθήκευσης σε κλειστό κύκλωμα με επίπεδο συλλέκτη έχει θεωρητικά μελετηθεί από τους Bansal και Buddhi [79] για τη λειτουργία φόρτισης και αποφόρτισης. Οι υπολογισμοί για τη μετακίνηση του ορίου της διεπιφάνειας και τη θερμοκρασία των υγρών έγιναν με τη χρήση παραφίνης και στεατικού οξέος, σαν υλικά αλλαγής φάσης.

Οι Chaurasia et al. [80] έχουν πραγματοποιήσει μια συγκριτική μελέτη των ηλιακών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας που βασίζονται σε τεχνικές λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας για τη διατήρηση του ζεστού νερού θερμαινόμενου από τον ήλιο για όλη τη διάρκεια της νύχτας. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν δύο πανομοιότυπες μονάδες αποθήκευσης. Η μια μονάδα περιείχε 17,5 kg κερι παραφίνης (με σημείο τήξης 54°C) ως υλικό αποθήκευσης συσκευασμένο μέσα σε έναν εναλλάκτη θερμότητας κατασκευασμένο από σωλήνες αλουμινίου, ενώ η άλλη μονάδα απλά περιείχε το νερό ως υλικό αποθήκευσης σε μια δεξαμενή GI. Και οι δύο μονάδες φορτιζόνταν ξεχωριστά κατά τη διάρκεια της ημέρας με τη βοήθεια επίπεδων ηλιακών συλλεκτών που έχουν μια σχετική περιοχή απορρόφησης. Η μελέτη αυτή απέδειξε ότι το σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έχει μεγαλύτερη απόδοση ζεστού νερού το επόμενο πρωί συγκριτικά με το σύστημα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.

Έχουν γίνει διάφορες συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικού μεγέθους δοχείων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας και δοχείων νερού αποθήκευσης αισθητής θερμότητας με διαφορετικό βαθμό διαστρωμάτωσης [81]. Το δοχείο αποθήκευσης αποτελείται από έναν αριθμό κλειστών κυλινδρικών σωλήνων γεμάτων με υλικό αλλαγής φάσης. Αυτοί οι σωλήνες περιβάλλονται από υγρό

που μεταφέρει θερμότητα. Η διάταξη αυτού του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.2.1: Κυλινδρικό κέλυφος με αποθήκευση PCM. [77]

Οι Bajnoczy et al. [82] μελέτησαν τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας δύο βαθμών ($60-30^{\circ}\text{C}$ και $30-20^{\circ}\text{C}$) με βάση το χλωριούχο εξαϋδρικό ασβέστιο και το χλωριούχο τετραένυδρο ασβέστιο. Οι ερευνητές αυτοί μελέτησαν ακόμη τις αλλαγές στη χωρητικότητα αποθήκευσης κατά τη διάρκεια των κύκλων, καθώς και την πιθανή χρήση ενός ηλιακού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για οικιακό σύστημα θέρμανσης νερού.

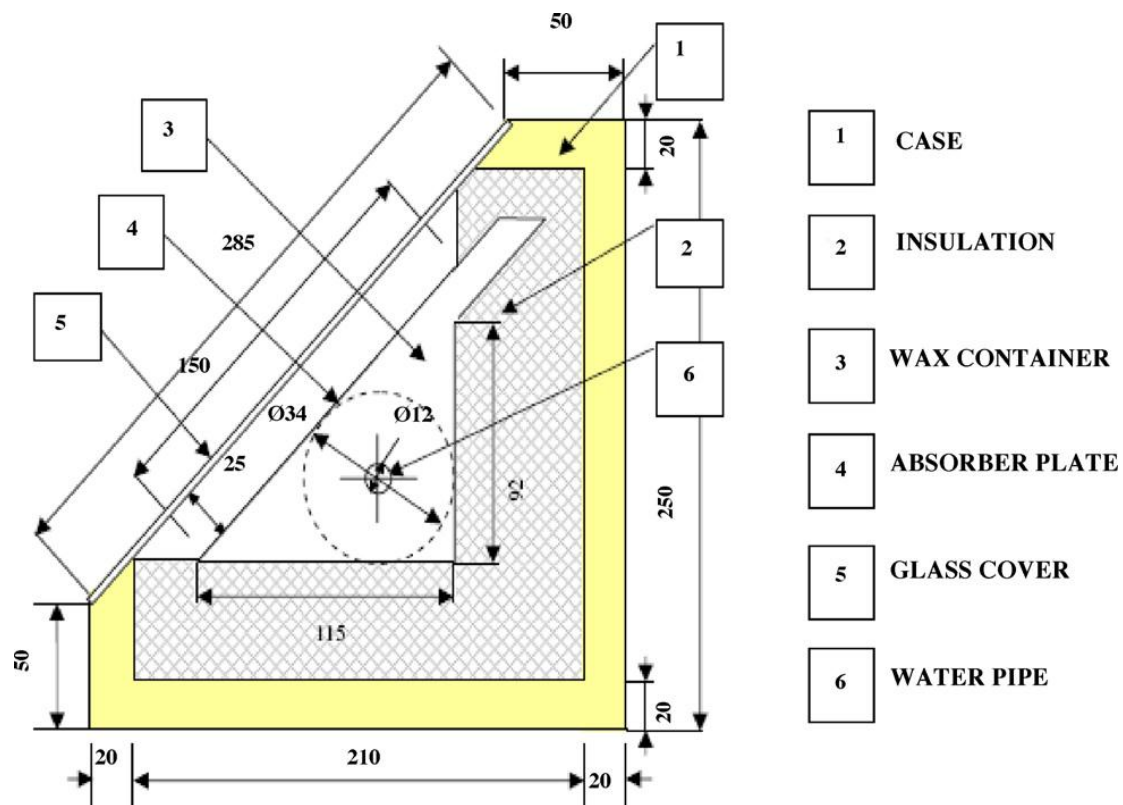
Οι Kamiz Kayguz et al. [83] διεξήγαγαν μια πειραματική και θεωρητική μελέτη για τον καθορισμό των αποδόσεων των υλικών αλλαγής φάσης σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού. Χρησιμοποιήθηκε $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ως υλικό αλλαγής φάσης. Επιπλέον, σύγκριναν την απόδοση των συστημάτων αποθήκευσης με βάση το PCM, το νερό και την πέτρα. Όταν η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη, συλλέγεται και μεταφέρεται στη δεξαμενή αποθήκευσης ενέργειας που είναι γεμάτη από 1500 kg συσκευασμένου υλικού

αλλαγής φάσης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια δεξαμενή τοποθετημένη στην οριζόντια κατεύθυνση, με κυλινδρικούς σωλήνες. Το υλικό αποθήκευσης ενέργειας ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) βρίσκεται εντός των σωλήνων (που κατασκευασμένοι από πλαστικό PVC) και θερμαίνει το μεταφερόμενο υγρό (νερό) το οποίο ρέει παράλληλα με τους σωλήνες αυτούς.

Οι Sharma et al. [84] σχεδίασαν και ανέπτυξαν μια αξιολόγηση ενός συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με απαιτήσεις σε ζεστό νερό με τη βοήθεια ηλιακών συλλεκτών τύπου πλαισίου. Χρησιμοποιήθηκε κερι παραφίνης ως υλικό αλλαγής φάσης (με σημείο τήξης 54°C) και διαπιστώθηκε ότι η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος ήταν πολύ καλή για ζεστό νερό στο επιθυμητό εύρος θερμοκρασίας.

Οι Mettawee και Assassa [85] μελέτησαν τη θερμική απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη με συμπαγές υλικό αλλαγής φάσης το οποίο βασίζεται στην αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Σε αυτόν το συλλέκτη, ο απορροφητήρας - δεξαμενή εκτελεί και τη λειτουργία απορρόφησης ηλιακής ενέργειας και τη λειτουργία αποθήκευσης της στο PCM. Κατά τη μελέτη αυτή, η ηλιακή ενέργεια αποθηκευόταν στο κερι παραφίνης που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό αλλαγής φάσης και απορριπτόταν σε κρύο νερό που έρεε σε σωλήνες που βρίσκονταν στο εσωτερικό του κεριού. Η ενεργός επιφάνεια του συλλέκτη ήταν 1 m^2 και ο συνολικός του όγκος ήταν χωρισμένος σε πέντε τμήματα. Η πειραματική αυτή συσκευή είχε σχεδιαστεί για να προσομοιώσει ένα από τα τμήματα του συλλέκτη, με μία συσκευή-απορροφητήρα ενεργού επιφάνειας $0,2 \text{ m}^2$. Διεξήχθησαν εξωτερικά πειράματα για να αποδειχτεί η δυνατότητα εφαρμογής ενός συστήματος που χρησιμοποιεί ένα συμπαγή ηλιακό συλλέκτη για θέρμανση νερού. Καταγράφηκαν οι θερμοκρασίες του PCM κατά τη διάρκεια των διαδικασιών φόρτισης και αποφόρτισης. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σημειώθηκε κατά τη διαδικασία της φόρτισης. Έγιναν, ακόμη, πειράματα για διαφορετικούς ρυθμούς ροής του νερού από $8,3$ έως $21,7 \text{ kg/h}$. Μελετήθηκε η επίδραση του διαφορετικού ρυθμού ροής του νερού στο

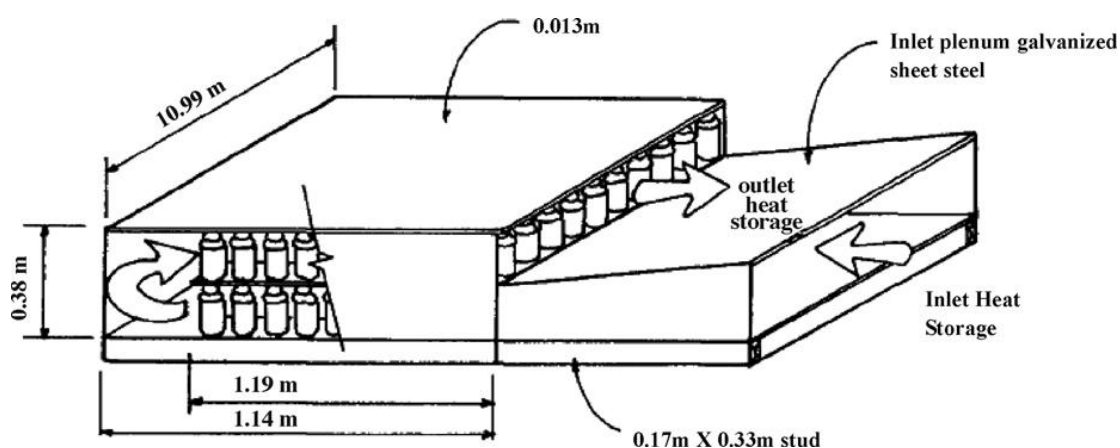
χρήσιμο θερμικό κέρδος. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας υπολογίστηκαν για τη διαδικασία της φόρτισης. Η διάδοση του μετώπου τήξης και στερεοποίησης μελετήθηκε επίσης κατά τη διάρκεια των διαδικασιών φόρτισης και αποφόρτισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι κατά τη διαδικασία φόρτισης, ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται κατακόρυφα με αύξηση του λιωμένου πάχους στρώσης, όσο η φυσική συναγωγή γίνεται εντονότερη. Κατά τη διαδικασία αποφόρτισης, το χρήσιμο θερμικό κέρδος φαίνεται να αυξάνεται καθώς ο ρυθμός ροής της μάζας του νερού αυξάνεται. Η πειραματική διάταξη του συστήματος που περιγράφηκε παραπάνω φαίνεται στο κάτωθι σχήμα.



Σχήμα 4.2.2: Πειραματική διάταξη ηλιακού συλλέκτη με συμπαγές υλικό αλλαγής φάσης. [77]

4.3 Ηλιακό θερμοκήπιο: [77]

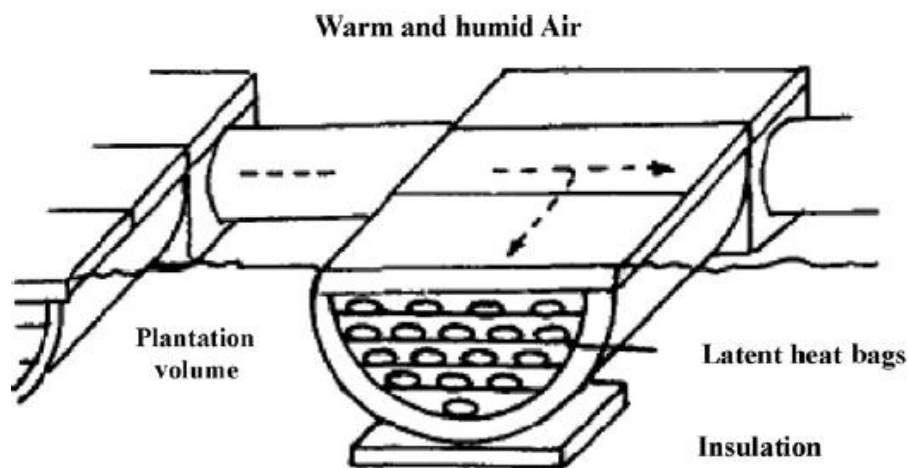
Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε θερμοκήπια για την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας για την ωρίμανση και τη διαδικασία της ξήρανσης και τη φυτική παραγωγή [86]. Οι Kern και Aldrich [87] χρησιμοποίησαν 1.650 kg $\text{CaC}_{12} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ σε δοχεία αεροζόλ με βάρος 0,74 κιλά το καθένα για να διερευνήσουν τις δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας τόσο εντός όσο και έξω από ένα θερμοκήπιο επιφάνειας 36 m² που καλύπτεται με δέσμη φύλλων Tedlar επικαλυμμένα με λεπτό υαλόνημα. Κάψουλες με PCM ήταν τοποθετημένες σε ένα δοχείο σε απόσταση 22,86 χιλιοστά και δύο δοχεία, με διαφορετικές ποσότητες PCM, το ένα μέσα και το άλλο έξω από το θερμοκήπιο. Ενώ η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο θερμοκήπιο μπορούσε να συλλέγει θερμό αέρα από την κορυφή του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας, η κατεύθυνση της ροής του αέρα αντιστρεφόταν κατά τη διαδικασία απελευθέρωσης ενέργειας το βράδυ. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.3.1: Μονάδα αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο θερμοκήπιο. [77]

Οι Hung και Toksoy [88] είχαν σχεδιάσει και κατασκευάσει ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με δύο διαφορετικές διαμορφώσεις βάσης και ο αέρας εμπλεκόταν ως αναπόσπαστο μέρος του συστήματος

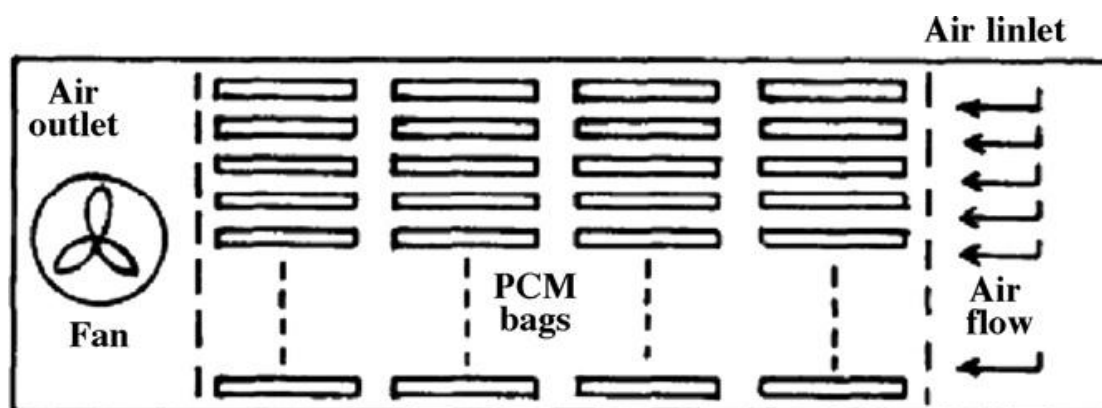
ηλιακού θερμοκηπίου. Εμπορικές κυλινδρικές ράβδοι αποθήκευσης χρησιμοποιήθηκαν ως πρωτογενή στοιχεία αποθήκευσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα σχεδιασμένα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας ενέργειας επιδείκνυαν σημαντικά υψηλότερη συμπαγή χωρητικότητα αποθήκευσης από την αποθήκευση σε νερό. Αποκαλύφθηκε ακόμη ότι οι σπειροειδείς ράβδοι της μονάδας αποθήκευσης είχαν καλύτερη απόδοση από τις σταυρωτές ράβδους. Χρησιμοποιώντας υλικό αλλαγής φάσης, διεξήχθησαν πειράματα σε θερμοκήπιο με μόνο τζάμι και επιφάνεια 500 m² για την παραγωγή τριαντάφυλλων στη Γαλλία. Η ηλιακή θερμότητα που εκλυόταν στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μεταφερόταν και αποθηκεύονταν με ανακύκλωση του αέρα μέσα από υπόγειους επίπεδους εναλλάκτες θερμότητας που είναι γεμάτοι με PCM. Η απόδοση του ηλιακού θερμοκηπίου με αποθήκευση PCM συγκρίθηκε με ένα παραδοσιακό θερμοκήπιο όμοιας γεωμετρίας που παράγει το ίδιο φυτό. Το θερμοκήπιο που χρησιμοποιούσε PCM μπορούσε να πετύχει εξοικονόμηση αερίου προπανίου της τάξεως του 80% σε σύγκριση με το παραδοσιακό θερμοκήπιο με την ίδια θερμοκρασία. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.3.2: Υπόγειο τούνελ με PCM. [77]

Το υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορεί να επίσης, να στοιβάζεται σε ράφια σε ένα θερμοκήπιο που θερμαίνεται άμεσα από την

ηλιακή ακτινοβολία [89]. Στο σύστημα αυτό, ο ζεστός αέρας κυκλοφορεί στο θερμοκήπιο μέσω της αποθήκευσης για να αυξάνεται ο ρυθμός φόρτισης/αποφόρτισης του PCM. Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιείται τις ώρες που δεν έχει ήλιο προκειμένου να διατηρείται η επιθυμητή θερμοκρασία στο θερμοκήπιο. Οι Nishina and Takakura [90] χρησιμοποίησαν ως υλικό αλλαγής φάσης το $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ με διάφορες προσμίξεις για να αποτρέψουν το φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων και κατ' επέκταση τη μειωμένη απόδοση θερμότητας σε θερμοκήπιο στην Ιαπωνία. Έτσι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι απελευθερώθηκε το 40-60% της λανθάνουσας θερμότητας του PCM, γεγονός που υποδεικνύει ότι σχεδόν το μισό PCM δε χρησιμοποιήθηκε επαρκώς κατά τη διαδικασία ανταλλαγής θερμότητας. Η πειραματική τους διάταξη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.3.3: Γενική εικόνα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας αλλαγής φάσης σε θερμοκήπιο. [77]

Οι Takakura και Nishina [91] δοκίμασαν τη πολυαιθυλενογλυκόλη και το $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ως υλικά αλλαγής φάσης για θέρμανση σε θερμοκήπιο επιφάνειας $7,2 \text{ m}^2$. Συνέκριναν τα συμβατικά θερμοκήπια με θερμοκήπια αποθήκευσης τύπου PCM. Η αποδοτικότητα ενός συστήματος θερμοκηπίου με αποθήκευση PCM και με ηλιακό συλλέκτη ήταν 59% το οποίο ήταν σε θέση να διατηρήσει 8°C μέσα το θερμοκήπιο τη νύχτα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία έπεσε στους $-0,6^\circ\text{C}$. Αναπτύχθηκε ένα σύστημα ελέγχου με

μικροϋπολογιστή με σκοπό τον πιο ακριβή και πιο εξελιγμένο έλεγχο για τα ηλιακά συστήματα του θερμοκηπίου.

4.4 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης του αέρα: [77]

Οι Morrison, Abdel Khalik και Jurinak [92,93] στις διαφορετικές μελέτες τους αξιολόγησαν τις επιδόσεις συστημάτων αέρα που βασίζονται στην ηλιακή θέρμανση και χρησιμοποιούν ενεργειακές μονάδες αποθήκευσης με υλικό αλλαγής φάσης. Οι κύριοι στόχοι της εργασίας τους ήταν:

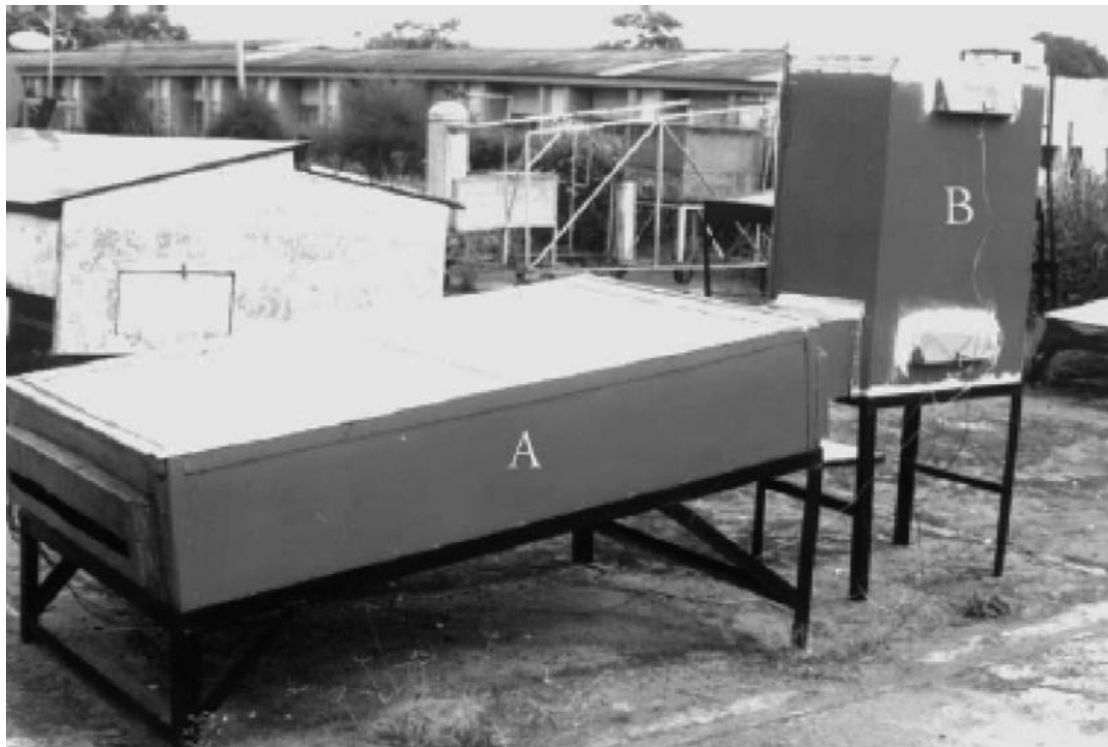
- να προσδιοριστεί η επίδραση της λανθάνουσας θερμότητας και της θερμοκρασία τήξης του PCM στη θερμική απόδοση των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης αέρα και
- να αναπτυχθεί εμπειρικό μοντέλο των σημαντικών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας μέσω αλλαγής φάσης.

Το βασικό συμπέρασμα ήταν ότι το PCM θα πρέπει να επιλέγεται με βάση το σημείο τήξης και όχι τη λανθάνουσα θερμότητα καθώς επίσης και ότι ένα σύστημα αέρα που χρησιμοποιεί θειικό δεκαένυδρο νάτριο ως μέσο αποθήκευσης απαιτεί περίπου το ένα δεύτερο του όγκου αποθήκευσης μιας δεξαμενής νερού.

Οι Ghoneim και Klein [94] σύγκριναν θεωρητικά την απόδοση της αποθήκευσης θερμότητας αλλαγής φάσης και αισθητής θερμότητας σε συστήματα ηλιακής θέρμανσης με αέρα και με νερό. Χρησιμοποίησαν θειικό δεκαένυδρο νάτριο και παραφίνες ως υλικά αλλαγής φάσης και σημείωσαν παρόμοια αποτελέσματα, όπως οι Jurnik και Adbel Khalik [93].

Ο Enibe [95] σχεδίασε, ανέπτυξε και αξιολόγησε επιτυχώς έναν ηλιακό θερμοσίφωνα αέρα φυσικής συναγωγής με αποθήκευση ενέργειας σε υλικό αλλαγής φάσης. Η ημερήσια απόδοση του συστήματος σε συνθήκες μηδενικού φορτίου δοκιμάστηκε κάτω από φυσικές συνθήκες περιβάλλοντος οδηγώντας

σε μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην περιοχή 19-41°C και καθημερινή παγκόσμια ακτινοβολία στην περιοχή 4,9-19,9 MJ m⁻². Η μέγιστη θερμοκρασιακή αύξηση του θερμαινόμενου αέρα ήταν 15 K, ενώ η μέγιστη αθροιστικά ωφέλιμη απόδοση ήταν 50%. Το σύστημα αυτό είναι κατάλληλο για χρήση ως ηλιακός στεγνωτήρας για την καλλιέργεια αρωματικών φυτών, φαρμακευτικών φυτών και άλλων καλλιεργειών, τα οποία δεν απαιτούν άμεση έκθεση στο ηλιακό φως. Ένα τέτοιο σύστημα απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.4.1: Φωτογραφία του συστήματος θέρμανσης του αέρα. (A) Συλλέκτης με υποσυστήματα αποθήκευσης ενέργειας και θέρμανσης αέρα (B) Θερμαινόμενος χώρος.[77]

Οι Zhou et al. [96] εξέτασαν αριθμητικά την απόδοση ενός υβριδικού συστήματος θέρμανσης σε συνδυασμό με θερμική αποθήκευση από σταθεροποιημένου σχήματος πλάκες υλικού αλλαγής φάσης (SSPCM). Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε στο Πεκίνο ένα παθητικό ηλιακό σπίτι άμεσου

κέρδους. Η κατασκευή αυτή περιείχε τις πλάκες αυτές (SSPCM) στις εσωτερικές επενδύσεις των τοίχων και της οροφής. Πραγματοποιήθηκε ασταθής προσομοίωση χρησιμοποιώντας ένα αποδεδειγμένο μοντέλο ενθαλπίας με μια χρονική περίοδο που καλύπτει η θέρμανση το χειμώνα. Δόθηκε πρόσθετη παροχή θερμότητας κατά τις ώρες φόρτισης αργά τη νύχτα και νωρίς το πρωί ή κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας για να διατηρηθεί η ελάχιστη εσωτερική θερμοκρασία του αέρα πάνω από 18°C. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν τη θερμική αποθήκευση στις SSPCM πλάκες, η οποία βελτιώνει το εσωτερικό επίπεδο θερμικής άνεσης και εξοικονομεί περίπου το 47% της χρήσης της ενέργειας κατά τις κανονικές ώρες και τις ώρες αιχμής και το 12% των συνολικής κατανάλωσης ενέργειας το χειμώνα. Αυτό το υβριδικό σύστημα θέρμανσης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει το ηλεκτρικό φορτίο σε μονάδες παραγωγής ενέργειας και να παράσχει σημαντικά οικονομικά οφέλη σε περιοχές όπου ισχύει διαφορετική τιμολογιακή πολιτική ηλεκτρισμού τη νύχτα από την ημέρα.

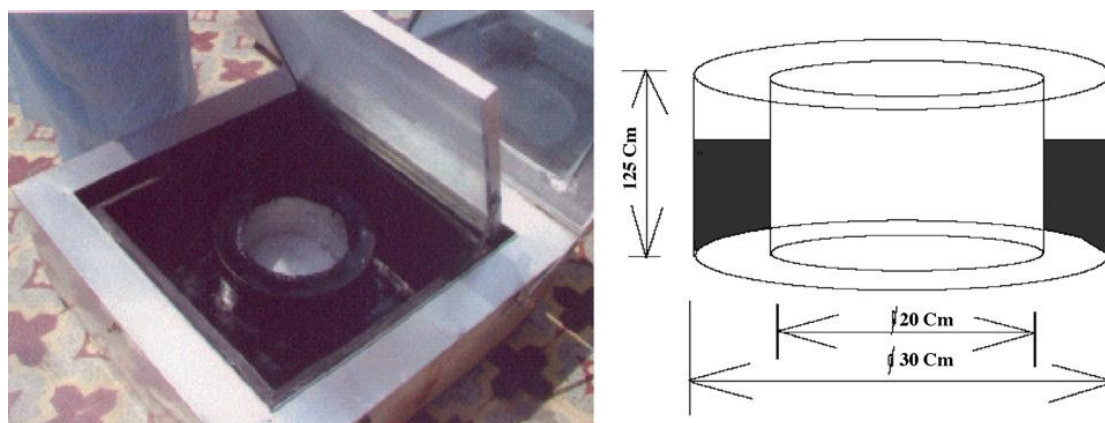
4.5 Ηλιακοί φούρνοι: [77]

Μια από τις σημαντικότερες χρήσεις της ηλιακής ενέργειας είναι στη μαγειρική χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους ηλιακών φούρνων. Η χρήση αυτών των ηλιακών φούρνων είναι περιορισμένη, καθώς το μαγείρεμα των τροφίμων δεν είναι δυνατό το βράδυ. Αν σε έναν ηλιακό φούρνο παρέχεται αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας, η χρησιμότητα και η αξιοπιστία αυτών των ηλιακών φούρνων θα αυξηθεί. Λίγες μελέτες έχουν γίνει με υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε μια ηλιακή κουζίνα που μαγειρεύει το φαγητό αργά το βράδυ.

Οι Domanski et al. [97] έχουν μελετήσει τη χρήση ενός PCM, ως μέσο αποθήκευσης για έναν τύπο ηλιακού φούρνου που έχει σχεδιαστεί για να μαγειρεύει το φαγητό αργά το βράδυ ή και κατά τη διάρκεια ωρών που δεν

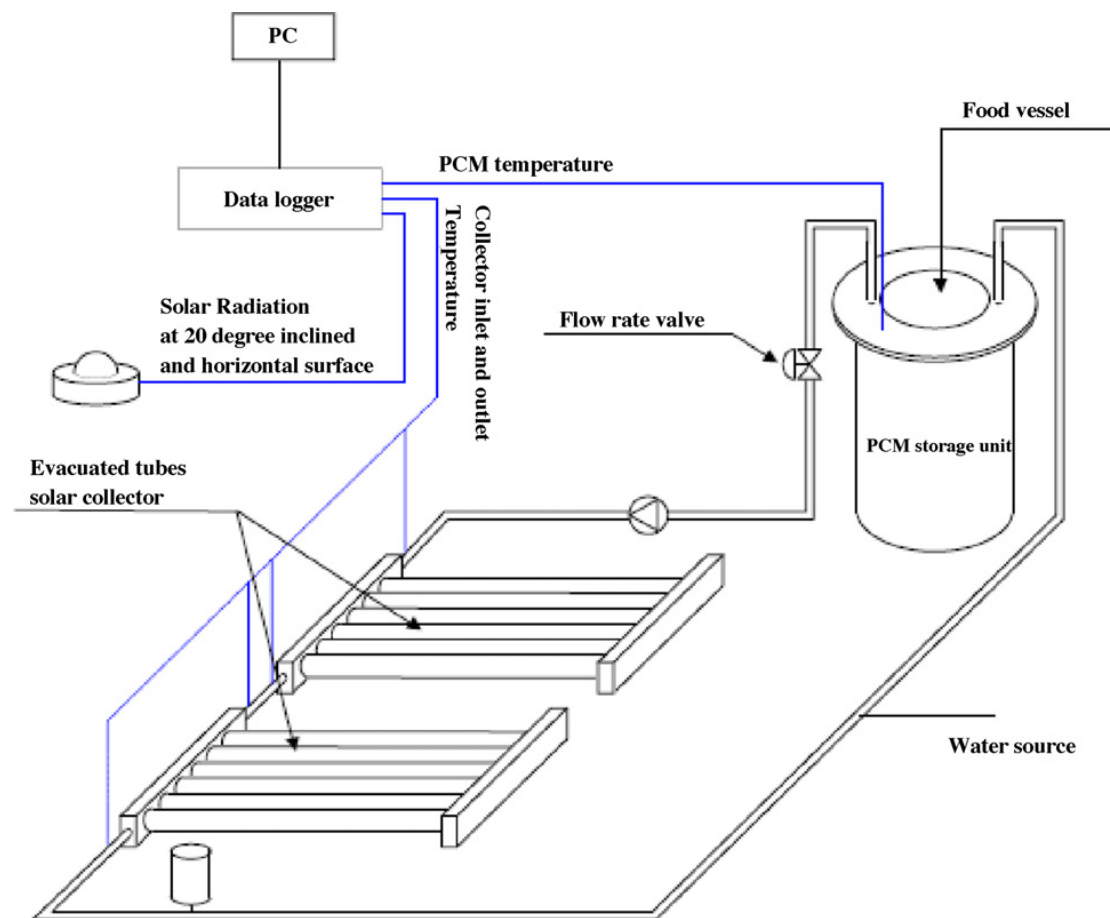
έχει ηλιοφάνεια. Χρησιμοποίησαν νιτρικό εξαϋδρικό μαγνήσιο ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) ως PCM για την αποθήκευση θερμότητας.

Οι Buddhi και Sahoo [98] τοποθέτησαν ένα είδος στεατικού οξέος κάτω από την απορροφητική πινακίδα ενός ηλιακού φούρνου. Οι Sharma et al. [99] ανέπτυξαν μια μονάδα αποθήκευσης PCM με ακεταμίδιο για έναν τύπο ηλιακής κουζίνας για το μαγείρεμα φαγητού αργά το βράδυ. Πρότειναν ότι η θερμοκρασία τήξης του PCM θα πρέπει να είναι μεταξύ 105 και 110°C για το μαγείρεμα το βράδυ. Αργότερα, οι Buddhi et al. [100] ανέπτυξαν μια μονάδα αποθήκευσης με ακετανιλίδιο για έναν τύπο ηλιακού φούρνου για την αποθήκευση μεγαλύτερης ποσότητας θερμότητας μέσω PCM, έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται τρεις ανακλαστήρες για να απορροφάται περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία. Αλλά γενικά σε ένα τύπο ηλιακού φούρνου χρησιμοποιείται μόνο ένας ανακλαστήρας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας τύπος ηλιακού φούρνου.



Σχήμα 4.5.1: Σχηματικό διάγραμμα του πλαισίου ενός ηλιακού φούρνου με αποθήκευση. [77]

Οι Sharma et al. [101], χρησιμοποίησαν ερυθριτόλη ως υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για ηλιακό φούρνο που βασίζεται σε ηλιακό συλλέκτη απομονωμένου σωλήνα. Η διάταξη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.5.2: Διάρθρωση ενός πρωτοτύπου ηλιακού φούρνου με βάση απομονωμένου σωλήνα ηλιακού συλλέκτη με μονάδα αποθήκευσης PCM. [77]

4.6 Συντήρηση και μεταφορά θερμοκρασιακά ευαίσθητων υλικών: [102]

Κατά τη μεταφορά των τροφίμων, σε πολλές περιπτώσεις, η θερμοκρασία τους πρέπει να διατηρείται πάνω από ένα ορισμένο επίπεδο ή αν πρόκειται για κατεψυγμένα τρόφιμα η απόψυξη πρέπει να αποφεύγεται. Η κατάσταση είναι παρόμοια όταν μεταφέρονται ευαίσθητα θερμοκρασιακά φάρμακα. Και στις δύο περιπτώσεις εφαρμογών μπορούν να χρησιμοποιούν και PCMs, χάρη στην ικανότητά τους να αποθηκεύουν θερμότητα και ψύξη σε ένα εύρος συγκεκριμένων μόνο βαθμών. Τέτοιες εφαρμογές μπορεί ήδη να βρίσκονται

στην αγορά με πολλές εταιρείες να εμπορεύονται κιβώτια μεταφοράς ευαίσθητων υλικών [103,104,105]. Μερικές από αυτές τις εταιρείες είναι οι παρακάτω: va-Q-tec GmbH [106], Rubitherm GmbH [107], Sofrigam [108], TCP RELIABLE [109], PCM Thermal Solutions [110], Bio Trans [103], κ.λπ.



Σχήμα 4.6.1: Κιβώτια μεταφοράς ευαίσθητων υλικών με χρήση PCM. [102]

Ηλεκτρονικά στοιχεία τείνουν να αποτυγχάνουν πολύ γρήγορα όταν η θερμοκρασία λειτουργίας τους εκτείνεται πέρα από ένα κρίσιμο όριο. Η εφαρμογή των PCMs για να περιοριστεί η μέγιστη θερμοκρασία των ηλεκτρονικών στοιχείων φαίνεται πολύ ελπιδοφόρα, ειδικά καθώς

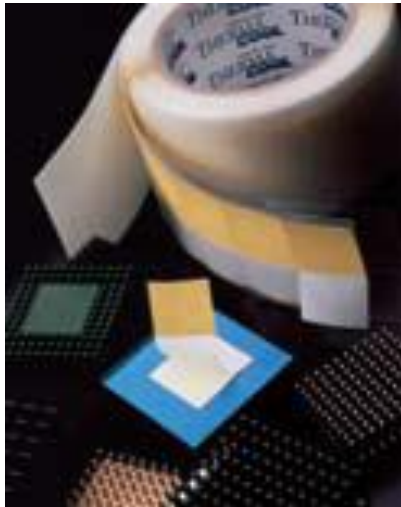
ενεργούν ως παθητικά στοιχεία και συνεπώς, δεν χρειάζεται καμία πρόσθετη πηγή ενέργειας [111-113]. Πολλές εφαρμογές συναντώνται ήδη στην αγορά [114], από τις εταιρείες: TEAP [115], Climator [116], και EPS [117].

Όταν οι κινητήρες και τα υδραυλικά μηχανήματα ξεκινούν από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, η κατανάλωση ενέργειας και η τριβή έχουν υψηλές τιμές. Ως εκ τούτου, αρκετές επιχειρήσεις έχουν ήδη ερευνήσει και επενδύσει σε μονάδες αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για οχήματα με κινητήρα [118-122]. Σε αυτή την εφαρμογή, η μονάδα αποθήκευσης θερμότητας θερμαίνεται από το ψυκτικό υγρό, ενώ ο κινητήρας λειτουργεί. Όταν σταματήσει ο κινητήρας, η θερμότητα αποθηκεύεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προθέρμανση του κινητήρα σε ένα νέο ξεκίνημα. Χρησιμοποιώντας τη μονάδα αποθήκευσης θερμότητας είναι δυνατή η επίτευξη βέλτιστης θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κινητήρα σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα από ό,τι χωρίς τη μονάδα αποθήκευσης θερμότητας [123].

4.7 Χρήση σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές: [116], [124], [125]

Τα υλικά αλλαγής φάσης ενδείκνυνται και για την ψύξη των επεξεργαστών των ηλεκτρονικών υπολογιστών, καθώς αποτελούν προϊόντα αρκετά ανεπτυγμένα τα οποία αντικαθιστούν πλήρως τα μεταλλικά πτερύγια ψύξης του επεξεργαστή. Παρόλο που το κόστος τους είναι αρκετά αυξημένο, λόγω κυρίως του μικρού μεγέθους τους, η λειτουργία τους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και συμφέρουσα από οικονομικής πλευράς, και ειδικά για αυξημένο αριθμό επεξεργαστών ο οποίος οδηγεί σε αυξημένη απαιτούμενη ισχύ για τη λειτουργία τους, άρα και σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα.

Αρκετά πρωτότυπη και έξυπνη είναι η ιδέα ανάπτυξης μίας εύκαμπτης επιφάνειας πάχους 8-10 mm, η οποία περιέχει υλικό αλλαγής φάσης στο εσωτερικό της και προορίζεται για χρήση σε φορητούς υπολογιστές. Η λειτουργία της είναι πολύ απλή: Απλώς τοποθετείται ο φορητός υπολογιστής επάνω της και το προϊόν αναλαμβάνει να απορροφήσει μεγάλο μέρος των θερμικών φορτίων που αναπτύσσονται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας του Η/Υ.



Σχήμα 4.7.1: Προϊόντα για ψύξη επεξεργαστών ηλεκτρονικών πλακετών. [116]

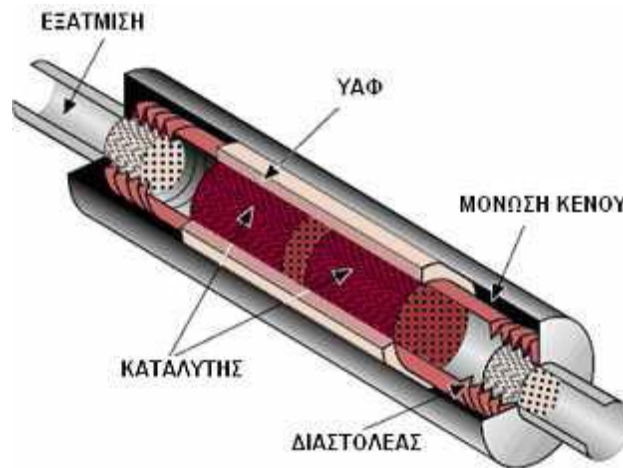
4.8 Εφαρμογές σε οχήματα: [126-130]

Τα υλικά αλλαγής φάσης με τις αξιοσημείωτες δυνατότητες βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς διαφόρων συστημάτων που παρουσιάζουν, εφαρμόζονται με εξαιρετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα και στον τομέα των οχημάτων. Αρκετά ενδιαφέροντα στοιχεία προκύπτουν από την αυτοκινητοβιομηχανία, στα πλαίσια της οποίας έχουν γίνει δοκιμές με τα υλικά αυτά σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται ήδη σήμερα σε μία μπαταρία λανθάνουσας θερμότητας, την οποία προσφέρει η BMW σαν προαιρετικό

εξοπλισμό στα μοντέλα της σειράς 5. Η αρχή λειτουργίας είναι αρκετά απλή. Το υλικό αποθήκευσης ενέργειας είναι συνδεδεμένο με το ψυγείο του αυτοκινήτου και αποθηκεύει την πλεονάζουσα θερμότητα όταν ο κινητήρας λειτουργεί στα θερμοκρασιακά όρια σχεδίασης. Αυτή η θερμότητα είναι μετά διαθέσιμη στο επόμενο ξεκίνημα του οχήματος με κρύο κινητήρα, ώστε να θερμανθεί ο κινητήρας γρηγορότερα, οπότε βελτιώνει το συνολικό συντελεστή κατανάλωσης καυσίμου (km/lt καυσίμου), όπως επίσης και για τη θέρμανση της καμπίνας του οχήματος (οδηγική άνεση-θερμική άνεση). Χάρη στην εξαιρετική της μόνωση, η μπαταρία αυτή μπορεί να διατηρήσει την αποθηκευμένη ενέργεια με το όχημα σταματημένο σε περιβάλλον -20°C για τουλάχιστον δύο εικοσιτετράωρα.

Μία ακόμη εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης είναι στο σύστημα εξαγωγής του οχήματος. Με χρήση των υλικών αυτών διατηρείται ο καταλύτης στη θερμοκρασία σχεδιασμού, ελαττώνοντας με τον τρόπο αυτό τις αναγκαστικά αυξημένες εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων κατά το ξεκίνημα του κρύου κινητήρα. Ο καταλύτης (καταλυτικός μετατροπέας) μετατρέπει μέσω οξείδωσης χάρη στα ευγενή μέταλλα που περιέχει (Ρόδιο, Παλλάδιο, Λευκόχρυσος) τα μονοξειδία αζώτου και άνθρακα από την καύση του καυσίμου στον κύλινδρο, σε λιγότερο βλαβερά και σίγουρα όχι δηλητηριώδη διοξείδια. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει η θερμοκρασία του καταλύτη να είναι πολύ υψηλή, καθώς για την εν λόγω χημική διαδικασία η μεγάλη θερμοκρασία είναι απαραίτητος παράγοντας. Αυτή όμως η θερμοκρασία δεν αναπτύσσεται άμεσα κατά την εκκίνηση του αυτοκινήτου, αλλά μετά από λίγα λεπτά. Έχει παρατηρηθεί ότι κατά την περίοδο της «κρύας εκκίνησης» εκλύεται το 60%-80% των τοξικών καυσαερίων.



Σχήμα 4.8.1: Υλικό αλλαγής φάσης σε καταλύτη αυτοκινητού. [130]

Η ιδιότητα των υλικών αλλαγής φάσης να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά θερμότητας μπορεί επιπλέον να αξιοποιηθεί τεχνικά στον κλιματισμό ενός οχήματος. Στις ΗΠΑ, ιδιαίτερα, είναι σύνηθες για τους οδηγούς φορτηγών να αφήνουν τον κινητήρα τους στο ρελαντί κατά τη διάρκεια της νύχτας, ώστε να ψυχθούν οι θάλαμοι των οχημάτων τους με το σύστημα κλιματισμού ανοιχτό. Αυτή η κίνηση, που είναι οικολογικά καταστροφική, μπορεί να περιοριστεί με κρύες μονάδες αποθήκευσης που βασίζονται στα PCMs. Στο κέντρο της νέας τεχνολογίας για την ψύξη των θαλάμων των φορτηγών είναι ένα καινοτόμο σύστημα ψυχρής αποθήκευσης ECOPHIT[®], από την SGL Group.

4.9 Θερμική ένδυση: [131], [132]

Η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα έχει ως στόχο να παρέχουν θερμική άνεση, ομοιόμορφα κατανεμημένη θερμοκρασία και λιγότερο ιδρώτα.

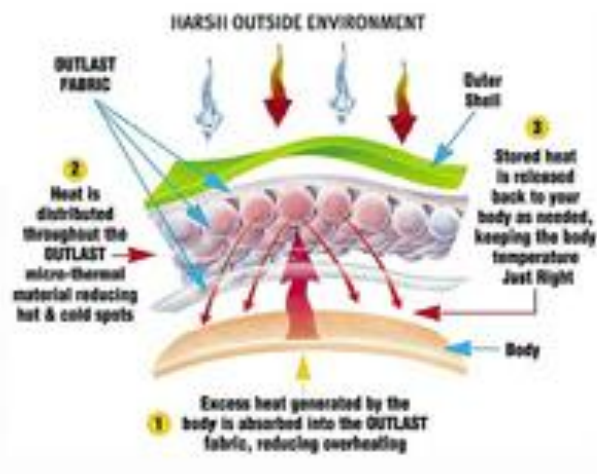
Η εισαγωγή των υλικών αυτών σε ρούχα ξεκίνησε από διαστημικές εφαρμογές, στις στολές των αστροναυτών, για τη προστασία τους από τις

απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές. Σήμερα οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης έχουν επεκταθεί στα ρούχα και γενικότερα στα υφάσματα. Χρησιμοποιούνται σε στολές που εκτίθενται σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα σε πυροσβεστικές, ορειβατικές και αγωνιστικές (F1) στολές. Η χρήση τους όμως έχει εξαπλωθεί και σε καθημερινά ρούχα και άλλα υφάσματα, όπως κουβέρτες, κάλτσες, παπούτσια κλπ.

Στα ενδύματα χρησιμοποιούνται κυρίως οργανικά υλικά αλλαγής φάσης σε μικροκάψουλες, για να μην εμφανίζονται διαρροές κατά τη μετάβαση στην υγρή φάση. Τα υλικά αυτά όταν προστίθενται στις υφασμάτινες ίνες ή ανάμεσα στα στρώματα των ενδυμάτων, μπορούν να ελαττώσουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και μπορούν να αυξήσουν τη θερμοχωρητικότητα του ενδύματος περίπου 10 φορές.



Σχήμα 4.9.1: Εμπορικά ενδύματα με υλικά αλλαγής φάσης. [132]



Σχήμα 4.9.2: Μεταφορά θερμότητας με ενδύματα με PCMs. [131]

4.10 Ιατρικά προϊόντα: [133], [134], [135]

Η τεχνολογία των υλικών αλλαγής φάσης χρησιμοποιείται και στον ιατρικό εξοπλισμό κυρίως για εφαρμογές που απαιτούν μια παθητική διαχείριση της θερμοκρασίας στο ανθρώπινο σώμα. Χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της θερμικής άνεσης σε εφαρμογές στις οποίες δεν είναι εφικτή η συχνή κίνηση, για την ανακούφιση των ασθενών, όπως για παράδειγμα οι ζώνες αντιμετώπισης ορθοπεδικών προβλημάτων και τα καλύμματα για την πλάτη και το κάθισμα αναπηρικών αμαξιδίων.

Επιπλέον, τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται σαν παθητικά συστήματα ψύξης για τη συντήρηση ανθρώπινων οργάνων κατά τη μεταφορά τους με κάποιο μεταφορικό μέσο. Η διατήρηση μιας χαμηλής θερμοκρασίας είναι ζωτικής σημασίας κατά τη μεταφορά των ευπαθών σε θερμοκρασίες ανθρώπινων οργάνων ή του ανθρώπινου αίματος. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους στις εφαρμογές αυτές είναι η μεγάλη αξιοπιστία τους, καθώς στις είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μην εμφανίζεται διακύμανση της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.10.1: Υλικά αλλαγής φάσης για μεταφορά αίματος. [116]



Σχήμα 4.10.2: Υλικά αλλαγής φάσης σε καθίσματα αμαξιδίων. [116]

Κεφάλαιο 5

Ιστορική αναδρομή κτιριακών εφαρμογών με υλικά αλλαγής φάσης

5.1 Εισαγωγή: [136], [137]

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, τα οποία συνδυάζουν τη χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα λόγω της μεγάλης αποθηκευτικής τους ικανότητας. Για το λόγο αυτό, συναντώνται σε πλήθος εφαρμογών και κυρίως στον κτιριακό τομέα, όπου στοχεύουν στην εξασφάλιση συνθηκών θερμικής άνεσης.

Η πρώτη ιστορικά χρήση των υλικών αλλαγής φάσης αποτελεί ο πάγος. Μεγάλα κομμάτια πάγου από την παγωμένη επιφάνεια ποταμών χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή ιγκλού δηλαδή σπιτιών από πάγο στις χώρες του Βόρειου και του Νότιου πόλου. Μερικά χρόνια αργότερα όμως ο πάγος χρησιμοποιήθηκε και από τις βιομηχανίες τροφίμων για τη διατήρηση των επιθυμητών θερμοκρασιών σε αυτά. Ωστόσο, με το πέρασμα των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας, χρησιμοποιήθηκαν νέες τεχνικές. Για παράδειγμα, κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση τροφίμων, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά δοχεία μεγάλου πλάτους και μικρού αντίστοιχα πάχους, γεμάτα με στερεοποιημένα μίγματα αλάτων, τα οποία άλλαζαν φάση κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση του τροφίμου, απορροφώντας θερμότητα και διατηρώντας το εσωτερικό στην επιθυμητή θερμοκρασία.

Τα συγκεκριμένα υλικά χρησιμοποιήθηκαν και στη βιομηχανία φαρμάκων, σε πλαστικά δοχεία, ώστε να διατηρούν τα θερμοκρασιακά επίπεδα χημικών και φαρμάκων, κατά τη μεταφορά ή την αποθήκευσή τους.

Στη συνέχεια, η επιστημονική κοινότητα άρχισε να κάνει έρευνες και μελέτες σχετικά με τις δυνατότητες των υλικών αλλαγής φάσης με αποτέλεσμα να έρθουν στο προσκήνιο υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες. Έτσι, τα υλικά αυτά άρχισαν να συναντώνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως για παράδειγμα τα ανεπτυγμένα θερμικά συστήματα σε διάφορες κτιριακές εγκαταστάσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες ερευνητικές δραστηριότητες που έγιναν πάνω στις εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στον κτιριακό τομέα.

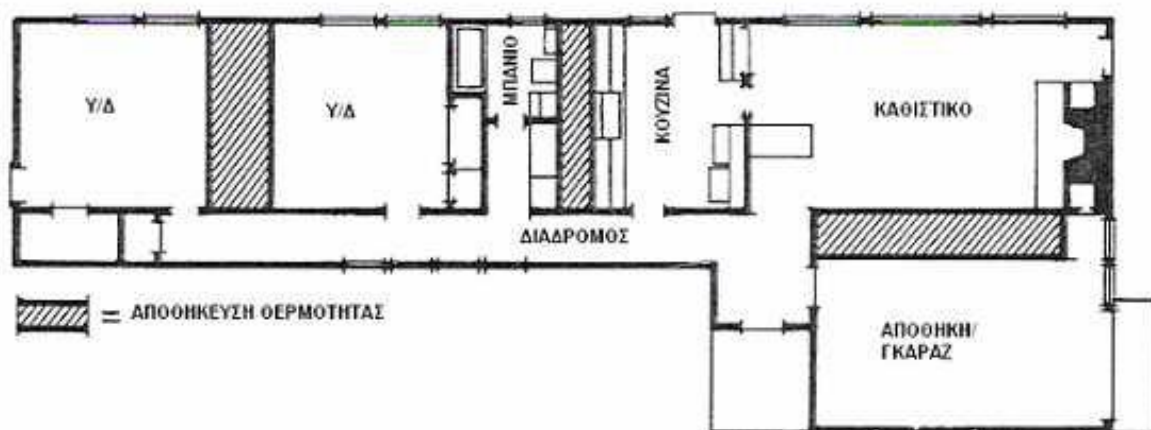
5.2 Δρ. Maria Telkes: [136], [137]

Ήταν η πρώτη ερευνήτρια που αποφάσισε να ασχοληθεί με την εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης σε κτίρια. Το 1948 κατασκευάστηκε το πρώτο μεγάλης κλίμακας πείραμά της, στην περιοχή Dover Mass, στη Βοστώνη των ΗΠΑ. Η περιοχή επελέγη από την Telkes για τα ετήσια επίπεδα ηλιοφάνειας, που για την περιοχή ήταν πάνω από τις μέσες τιμές, γεγονός που εξασφάλιζε τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του ηλιακού συστήματος.

Το σπίτι που κατασκευάστηκε ήταν ενός ορόφου και αποτελούνταν από πέντε δωμάτια που το καθένα είχε επιφάνεια 135 m². Η ηλιακή ακτινοβολία παρείχε θερμότητα στο χώρο μέσω 28 ηλιακών συλλεκτών, η οποία ακολούθως με τη βοήθεια ανεμιστήρων οδηγούνταν σε τρία δοχεία αποθήκευσης θερμότητας. Τα δοχεία αυτά χρησιμοποιούσαν άλας του Glauber ως υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Συνολικά περιλαμβάνονταν 21 τόνοι υλικού αλλαγής φάσης, συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας 11 MJ και σημείου τήξης 32 βαθμών Κελσίου.

Για την εποχή εκείνη, η συγκεκριμένη κατασκευή εκτός από πρωτοποριακή ήταν και αρκετά δαπανηρή, αφού το συνολικό της κόστος ανερχόταν στα 20.000 δολάρια εκ των οποίων τα 3.000 δολάρια αποτελούσαν το κόστος του θερμαντικού συστήματος.

Τα δύο πρώτα χρόνια λειτουργίας, το σύστημα θέρμανσης αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό ακόμα και σε περιόδους με επτά ημέρες συνεχόμενης συννεφιάς. Το σύστημα λειτούργησε με επιτυχία παρέχοντας ένα άνετο περιβάλλον γύρω στους 21°C, χωρίς να χρειαστεί οποιοδήποτε βοηθητικό σύστημα θέρμανσης. Κατά τη διάρκεια του τρίτου χρόνου όμως, το σύστημα άρχισε να παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα, καθώς το άλας του Glauber είχε διαχωριστεί σε διάλυμα και άνυδρο άλας (Na_2SO_4), χάνοντας έτσι την αποθηκευτική του ικανότητα. Παρατηρήθηκε ακόμη ότι τα δοχεία αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται δραματικά οι απώλειες του συστήματος.



Σχήμα 5.2.1: Κάτοψη σπιτιού που κατασκεύασε η Δρ. Telkes. [136]

5.3 Δρ. Lawrence Gardshire: [136], [137]

Το 1953 ο Lawrence Gardshire κατασκεύασε ένα ηλιακό σπίτι με υλικό αλλαγής φάσης στη περιοχή του New Mexico. Το κτίριο αποτελούνταν από δύο ορόφους και κάθε όροφος είχε επιφάνεια 102 m².

Ο Gardshire, ακολουθώντας το παράδειγμα της Telkes, χρησιμοποίησε δοχεία αποθήκευσης με υλικό αλλαγής φάσης χωρητικότητας 1,9 m³, μόνο που αντι

να τα εγκαταστήσει ανάμεσα στα δωμάτια όπως η Telkes, τα εγκατέστησε στη στέγη δίπλα στους ηλιακούς συλλέκτες.

Η καινοτομία ήταν ότι πρόσθεσε διφθορικό νάτριο στο άλας του Glauber σαν πηκτικό παράγοντα, το οποίο συμβάλλει στη στερεοποίηση του άλατος και αποφύγει όσο το δυνατόν περισσότερο το διαχωρισμό.

Παρόλα αυτά, και η συγκεκριμένη κατασκευή αντιμετώπισε τα ίδια προβλήματα με την κατασκευή της Telkes, με μια μικρή χρονική καθυστέρηση βέβαια, λόγω της αύξησης του χρόνου ζωής του υλικού αλλαγής φάσης από την προσθήκη του πηκτικού παράγοντα.

5.4 Δρ. Gordon Wilkes: [138], [139], [140]

Το 1954 ο Δρ Gordon Wilkes από το MIT με τη βοήθεια των αμερικάνικων εταιριών «Edison Illuminating and Edison Electric companies» πειραματίστηκε με το υλικό DSP ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) το οποίο αρχικά χρησιμοποιούνταν σε αντλίες θερμότητας. Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης αυτού του νέου υλικού αλλαγής φάσης ήταν γύρω στους 36 βαθμούς Κελσίου, η οποία θεωρητικά ήταν κατάλληλη για εφαρμογές στα κτίρια, όμως τα πειράματα έδειξαν ότι ο κύκλος της αλλαγής φάσης του υλικού αυτού δεν ήταν εντελώς αντιστρέψιμος. Το γεγονός αυτό μείωσε σημαντικά την αναμενόμενη ικανότητα αποθήκευσης και η έρευνα στράφηκε σε άλλα υλικά αλλαγής φάσης.

5.5 Δρ.J.W.Hodgins και Δρ.T.W.Hoffman: [136], [137]

Η επόμενη μεγάλη προσπάθεια για την κατασκευή ενός ηλιακού σπιτιού με υλικό αλλαγής φάσης πραγματοποιήθηκε το 1959 από τους J.Hodgins και T.Hoffman στον Καναδά. Το κτίριο που κατασκευάστηκε αποτελούνταν από

δύο ορόφους, επιφάνειας 111 m² ο καθένας. Το σχεδιασμό του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας τον ανέλαβε η M.Telkes λόγω της προηγούμενης εμπειρίας της. Και στην εν λόγω εφαρμογή, η Telkes χρησιμοποίησε ως υλικό αλλαγής φάσης το άλας του Glauber (ένυδρο άλας, Na₂SO₄ · 10H₂O, με σημείο τήξης στους 32°C).

Προκειμένου όμως να μη δημιουργηθούν τα προηγούμενα προβλήματα, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας εκτός από 12 τόνους υλικού αλλαγής φάσης που περιελάμβανε, ήταν εμπλουτισμένο με πυριτικό άλας νατρίου και χρώμιο, ουσία που εμποδίζει τη διάβρωση. Το υλικό αλλαγής φάσης ήταν ενσωματωμένο σε κυλινδρικά δοχεία χάλυβα, διαμέτρου 0,1 m και ύψους 0,6 m, τα οποία ήταν τοποθετημένα κάθετα στους τοίχους.

Παρόλο που τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, οι προσπάθειες δε συνεχίστηκαν από αυτή την ομάδα επιστημόνων.



Σχήμα 5.5.1: Το σπίτι που σχεδίασε η Telkes για τους Hodgins και Hoffman. [136]

5.6 Δρ. S.Freeman, Δρ. M. Telkes και Δρ. M. Altman: [138], [139], [140]

Το 1971 οι ερευνητές αυτοί συμμετείχαν σε ένα εκτεταμένο ερευνητικό πρόγραμμα στο Πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνιας, με σκοπό να μελετήσουν τις ιδιότητες των οργανικών και των ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης και να τα ταξινομήσουν σε κατηγορίες. Από το 1973, ξεκίνησαν διάφορες μελέτες που αφορούσαν τις εφαρμογές των PCMs στην Αμερική, στο Ηνωμένο Βασίλειο, στη Γερμανία και τη Γαλλία, οι οποίες μάλιστα χρηματοδοτούνταν από το εκάστοτε κράτος.

5.7 Δρ. David Eissenberg και Δρ. Charels Wyman: [138], [139], [140]

Το 1980 οι ερευνητές David Eissenberg και Charels Wyman συγκέντρωσαν όλα τα διαθέσιμα επιτεύγματα που αφορούσαν τα υλικά αλλαγής φάσης στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν ήταν ότι για τις εφαρμογές των PCMs σε μη παθητικά ηλιακά συστήματα το ενδιαφέρον εστιάζεται στη μείωση του αρχικού κόστους, ενώ σε ότι αφορά τα παθητικά ηλιακά συστήματα με PCMs η έρευνα θα πρέπει να εστιάσει στη διαδικασία τοποθέτησης των υλικών αυτών στο εσωτερικό των υλικών των κτιρίων.

5.8 Πρόσφατα στοιχεία: [138], [139], [140]

Οι πιο πρόσφατες έρευνες (1991-1997) δείχνουν ότι η κατασκευή δομικών στοιχείων με ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης έχει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα. Γενικά η ενσωμάτωση των PCMs στα δομικά στοιχεία μπορεί να βελτιώσει αρκετά τα χαρακτηριστικά αποθήκευσης ενέργειας, να μειώσει τα ενεργειακά μέγιστα και να προσφέρει μια πιο γενική ποικιλία των θερμικών φορτίων σε σχέση με το χρόνο.

Κατά τη διάρκεια των 20 τελευταίων ετών τα υλικά αλλαγής φάσης άρχισαν να καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών εκτός από τον κτιριακό τομέα, όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα.

Κεφάλαιο 6

Ηλεκτρική ενδοδαπέδια θέρμανση με χρήση υλικών αλλαγής φάσης

6.1 Γενικά: [141]

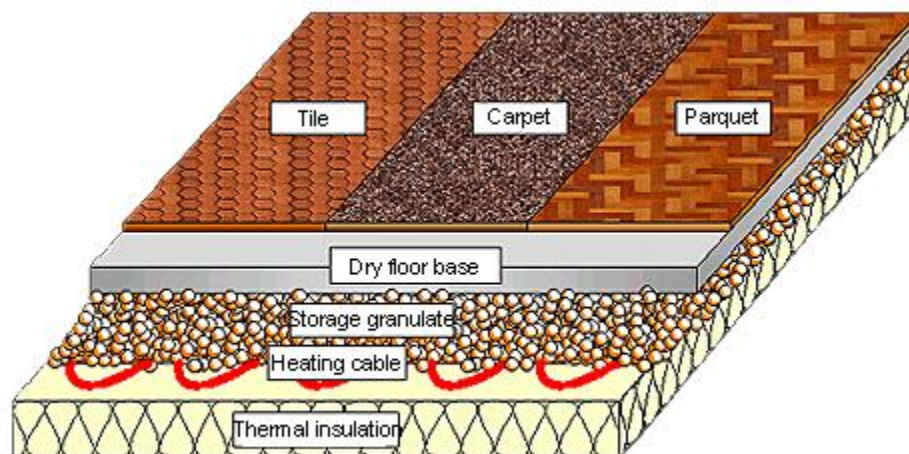
Τα ηλεκτρικά συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, για αποθήκευση θερμικής ενέργειας, είναι σχεδιασμένα να αξιοποιούν την ενέργεια χαμηλού κόστους (κυρίως τη νύχτα), εφόσον υπάρχει, ώστε να αποθηκεύουν θερμική ενέργεια και να την αποδίδουν στο χώρο, όταν χρειάζεται. Το βασικό χαρακτηριστικό ενός τέτοιου συστήματος είναι η απόδοση της θερμικής αποθήκευσης της κατασκευής του δαπέδου. Τα συμβατικά συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης παρουσιάζουν θερμική ικανότητα αποθήκευσης μόνο με τη χρήση θερμικής μάζας που είναι συνυφασμένη με ένα εξαιρετικά παχύ επιδαπέδιο στρώμα μεταξύ 8 και 14 cm. Αυτό περιορίζει σημαντικά τη δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός ηλεκτρικού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης λόγω της μεγάλης υλικής μάζας και των μεγάλων θερμοκρασιακών κλίσεων μέσω της βάσης δαπέδου.



Σχήμα 6.1.1: Σύστημα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης. [141]

Η καινοτομία ενός τέτοιου συστήματος είναι η χρήση υλικού αλλαγής φάσης για την αποθήκευση της ενέργειας. Με το υλικό αυτό μειώνεται το συνολικό πάχος της κατασκευής του δαπέδου έως και 50%. Οι δεσμοί των κόκκων στο εσωτερικό του PCM παρέχουν ένα σχετικά σταθερό επίπεδο θερμοκρασίας κατά την κατασκευή δαπέδων και, συνεπώς, εξαλείφουν την υπερθέρμανση τόσο στην πηγή θερμότητας όσο και στην επιφάνεια του δαπέδου.

Το λεπτό στρώμα και, συνεπώς, η ελαφριά δομή του συστήματος επιτρέπει επίσης την εγκατάσταση ενδοδαπέδιας θέρμανσης στο πλαίσιο ανακαίνισης ενός κτιρίου, όπου ο διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος είναι περιορισμένος. Όλο το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης αποτελεί μια στεγνή κατασκευή, πράγμα που σημαίνει ότι δεν απαιτούνται μεγάλα χρονικά διαστήματα θέρμανσης για την ξήρανση του σκυροδέματος (συνήθως 6 έως 8 εβδομάδες).



Σχήμα 6.1.2: Σύστημα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης με PCM. [141]

6.2 Πειραματική μελέτη ενδοδαπέδιας ηλεκτρικής θέρμανσης με χρήση πλακών PCM σταθερού σχήματος: [142]

6.2.1 Εισαγωγή:

Στις περισσότερες πόλεις της βόρειας Κίνας, η βασική πηγή ενέργειας για τη θέρμανση σε οικιακούς χώρους εξακολουθεί να είναι ο άνθρακας, ο οποίος προκαλεί σοβαρή μόλυνση του περιβάλλοντος. Το Πεκίνο, το οποίο φιλοξένησε τους Ολυμπιακούς Αγώνες το 2008, άρχισε να αναζητά μια άλλη «καθαρή» μορφή ενέργειας για ηλεκτρική χρήση αντί του άνθρακα, όπως η ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρει σημαντικά την ημέρα με τη νύχτα, γεγονός που δε συμβαδίζει με την παραγωγή ενέργειας από το εργοστάσιο. Προκειμένου λοιπόν να μειωθεί το χάσμα ανάμεσα στις ώρες υψηλής και χαμηλής ζήτησης, έχει επιβληθεί διαφορετική χρέωση για την ημέρα και τη 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. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό και για τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία θα μπορούσαν με τον τρόπο αυτό να μειώσουν το ηλεκτρικό φορτίο.

Όπως έχει διαπιστωθεί σε πρόσφατες έρευνες, η θέρμανση του δαπέδου μέσω ακτινοβολίας μπορεί να αποτελέσει μία εναλλακτική και πολύ οικονομική λύση σε σχέση με άλλες κοινές μορφές θέρμανσης [143]. Η θέρμανση μέσω ακτινοβολίας έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με συμβατικά συστήματα θέρμανσης αέρα. Εξασφαλίζει περισσότερο χώρο εφόσον ενσωματώνεται στο σκελετό του κτιρίου [144]. Η θερμότητα άνεσης εξαρτάται από την έννοια της ενεργούς θερμοκρασίας, η οποία αποτελεί συνάρτηση της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα και της θερμοκρασίας των ακτινοβολούμενων επιφανειών. Επομένως, είναι εφικτό να επιτευχθούν συνθήκες άνεσης, μια ψυχρότερη

θερμοκρασία αέρα από μια επιφάνεια δαπέδου μεγάλης κλίμακας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών θερμότητας [143]. Οι διαφορές θερμοκρασίας στα πόδια και στο κεφάλι είναι μικρές. Επειδή η θερμοκρασία του αέρα δεν είναι μεγαλύτερη από αυτή των τοίχων, δεν παρατηρείται συμπύκνωση 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, οπότε η κίνηση της σκόνης είναι μειωμένη. Έτσι, τα ενδοδαπέδια συστήματα που λειτουργούν μέσω ακτινοβολίας φαίνονται να είναι περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον σε σχέση με τα συμβατικά [145].

Η θερμική μάζα σε ένα σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας τις περιόδους χαμηλής ζήτησης. Επομένως τα μεγάλα φορτία μπορούν να μειωθούν και να μετακινηθούν τη νύχτα, όπου το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά χαμηλότερο [146]. Ο συνδυασμός της ενδοδαπέδιας θέρμανσης μέσω ακτινοβολίας και της θερμικής αποθήκευσης προσφέρει τη δυνατότητα σημαντικής βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης 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. Οι Athienitis και οι συνεργάτες του περιέγραψαν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης με αποθήκευση θερμικής ενέργειας, με 1 cm πάχος άμμου και 4 cm πάχος πλακών σκυροδέματος ως κύρια θερμική μάζα [143]. Ο Bakos εισήγαγε μια 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 [147].

Από την οπτική γωνία της εφαρμογής αυτής, 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 στα κτίρια, έτσι ώστε να μπορούν να βελτιώσουν το βαθμό της θερμικής άνεσης.

Οι Farid και Kong εφάρμοσαν ένα είδος συστήματος 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 [148]. Ωστόσο, το κοινό υγρό-στερεό PCM που χρησιμοποιείται σε τοίχους ή στο πάτωμα πρέπει κάπου να ενσωματωθεί, 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 [149,150]. Ο Athienitis και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν ένα τοίχο από γύψο με 25% κατά βάρος βουτυλικό στεατικό σε ένα ηλιακό παθητικό σύστημα ενός κτιρίου προκειμένου να μειώσουν τη μέγιστη θερμοκρασία δωματίου κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και το θερμικό φορτίο κατά τη διάρκεια της νύχτας [151]. Όμως, η θερμότητα της τήξης δεν ήταν τόσο υψηλή εξαιτίας της μικρής αναλογίας PCM που περιείχαν τα υλικά συστατικά.

Τα PCMs σταθερού σχήματος είναι ένα είδος συνθετικού υλικού PCM και κάποιου άλλου βοηθητικού υλικού με αναλογία 70-85% κατά βάρος. Όσο η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του βοηθητικού υλικού, το σύνθετο υλικό μπορεί να κρατήσει το σχήμα του ακόμα και όταν το PCM αλλάζει φάση και από στερεό γίνεται υγρό. Επομένως, αυτός ο τύπος PCM είναι ένα κατάλληλο υλικό για θερμική

αποθήκευση σε κτίρια χωρίς ενσωμάτωση. Μερικοί ερευνητές μελέτησαν την προπαρασκευαστική διαδικασία αυτού του υλικού για το χαμηλό του κόστος και τις εντυπωσιακές θερμικές του ιδιότητες τα τελευταία χρόνια [152,153].

Ο σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης είναι:

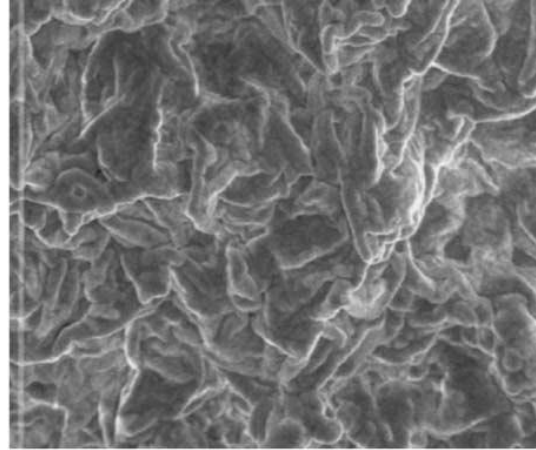
- να εισάγει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης με χρήση πλακών PCM σταθερού σχήματος
- να ερευνηθεί πειραματικά η θερμική του απόδοση και η δυνατότητα εφαρμογής
- να παρουσιαστούν τα πειραματικά δεδομένα για μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός τέτοιου συστήματος.

6.2.2 Η θερμική απόδοση των πλακών PCM σταθερού σχήματος:

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 βοηθητικό υλικό. Η θερμοκρασία που αλλάζει φάση η παραφίνη είναι 52°C και η θερμότητα τήξης είναι 200 kJ/kg. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η μορφή και η μικροδομή του στρώματος PCM.



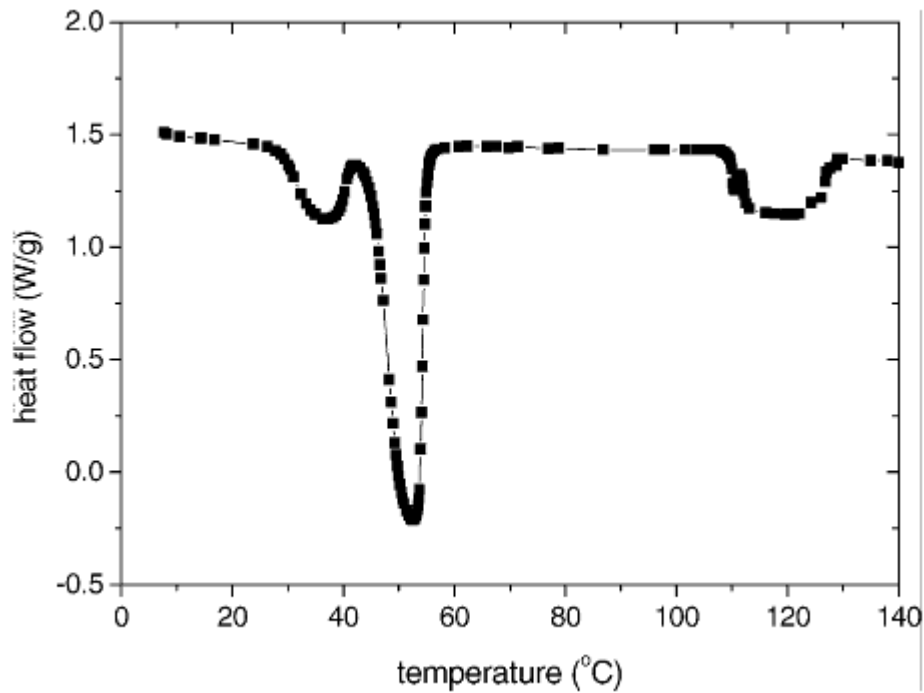
(a) appearance of a plate



(b) electron microscope photo of the microstructure (x3000 times)

Σχήμα 6.2.2.1: Φωτογραφίες πλακών PCM σταθερού σχήματος. [142]

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 καμπυλών DSC, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, δείχνουν τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης της παραφίνης και του πολυαιθυλενίου αντίστοιχα. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες της πλάκας σταθερού σχήματος PCM μετρήθηκαν και φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.



Σχήμα 6.2.2.2: Καμπύλες DSC για πλάκες σταθερού σχήματος PCM [142]

Πίνακας 6.2.2.1: Θερμοφυσικές ιδιότητες πλακών σταθερού σχήματος PCM [142]

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

6.2.3 Πειραματική έρευνα ενός πρωτότυπου συστήματος:

Προκειμένου να διερευνηθεί η θερμική απόδοση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος, χτίστηκε ένα πειραματικό σπίτι στο πανεπιστήμιο Tsinghua στο Πεκίνο της Κίνας.

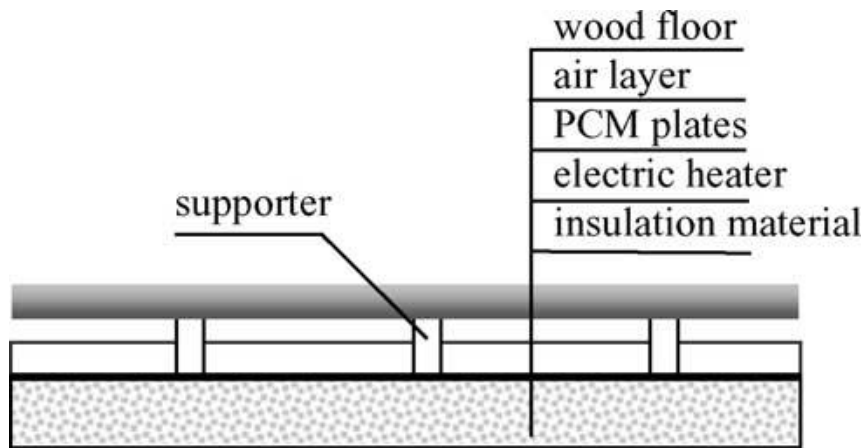
Το σπίτι στο οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και εξοπλίστηκε με ένα σύστημα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης

που περιελάμβανε το στρώμα PCM. Οι διαστάσεις του πειραματικού σπιτιού ήταν: 3 m (βάθος) x 2 m (πλάτος) x 2 m (ύψος).



Σχήμα 6.2.3.1: Φωτογραφία του πειραματικού σπιτιού [142]

Το σπίτι αυτό είχε και έναν υαλοπίνακα με διπλό τζάμι και διαστάσεις 1,6 m x 1,5 m με νότιο προσανατολισμό, το οποίο καλυπτόταν από μία μαύρη κουρτίνα. Η οροφή και οι τοίχοι αποτελούνταν από 100 mm πολυστερίνη που ήταν ενσωματωμένη σε ένα μεταλλικό περίβλημα. Το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης περιελάμβανε 120 mm πολυστερίνη, ηλεκτρικούς θερμαντές, 15 mm PCM, μερικά ξύλινα στηρίγματα, 10 mm στρώμα αέρα και 8 mm ξύλινο πάτωμα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η δομή του συστήματος θέρμανσης. Ενώ στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται φωτογραφίες των θερμαντών, των πλακών του PCM και του ξύλινου πατώματος, τα οποία χρησιμοποιούνταν στο ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης.



Σχήμα 6.2.3.2: Σχηματική απεικόνιση του ηλεκτρικού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος. [142]



(a)



(b)



(c)

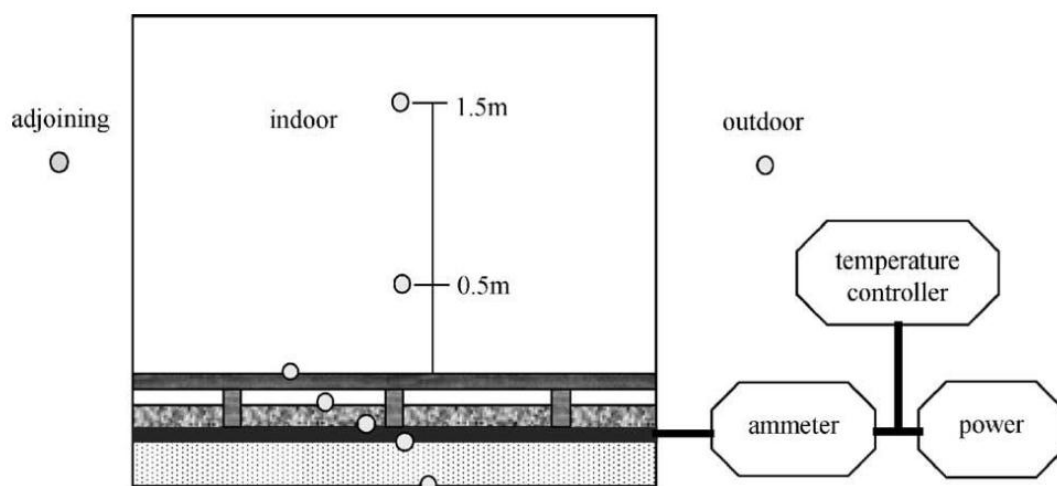
(a) electric heaters (b) shape-stabilized PCM plates (c) wood floor

Σχήμα 6.2.3.3: Φωτογραφίες της δομής του συστήματος. [142]

Τα πειράματα είχαν σκοπό τον καθορισμό της θερμικής συμπεριφοράς του θερμαντικού συστήματος και της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου. Χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω συσκευές για να γίνουν οι 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).

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας και η πειραματική διάταξη. Όπως φαίνεται, δύο από τους μετρητές ήταν τοποθετημένοι σε διαφορετικά ύψη (0,5 και 1,5 m) στο σπίτι. Οι εναλλαγές του αέρα (ACH) λαμβάνονταν από την τεχνική του μεθανίου [154]. Η μετρούμενη ηλιακή ακτινοβολία καταγραφόταν κάθε ώρα και προσεγγιζόταν με τη χρήση ενός θερμικού ραδιόμετρου.



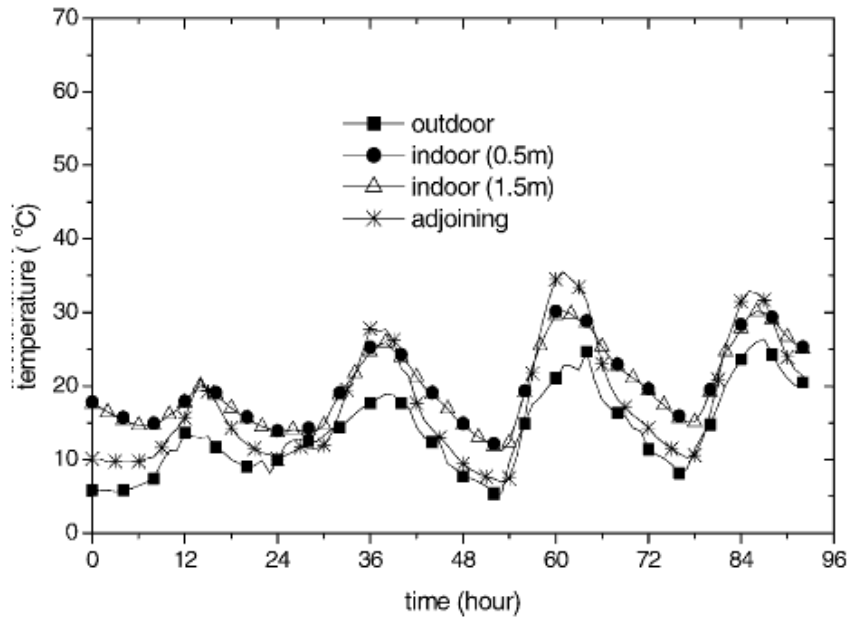
Σχήμα 6.2.3.4: Πειραματική διάταξη και κατανομή θερμοκρασίας. [142]

6.2.4 Αποτελέσματα και συμπεράσματα:

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

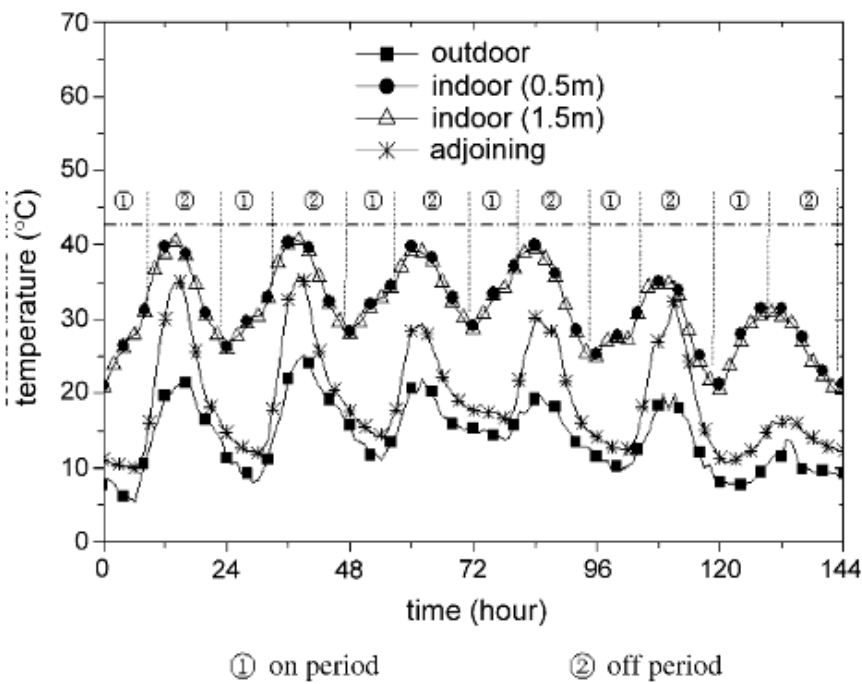
Η περίοδος που η θέρμανση στο Πεκίνο είναι αναγκαία ξεκινάει στις 15 Νοεμβρίου και τελειώνει στις 15 Μαρτίου. Η μέση θερμοκρασία των ημερών αυτών είναι γύρω στους -1,3°C. Παρόλα αυτά, τα πειράματα διεξήχθησαν τον Απρίλιο που η μέση θερμοκρασία είναι 13,6°C. Επομένως, η μετρούμενη εσωτερική θερμοκρασία ήταν υψηλή, εξαιτίας της υψηλής εξωτερικής θερμοκρασίας τον Απρίλιο και η αλλαγή στις εσωτερικές θερμοκρασίες ήταν μεγάλη εξαιτίας της μικρής θερμικής χωρητικότητας του σπιτιού.

Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει ότι η μέση εσωτερική θερμοκρασία ήταν 20°C και η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην ημέρα και τη νύχτα ήταν 12°C χωρίς ηλεκτρική θέρμανση.



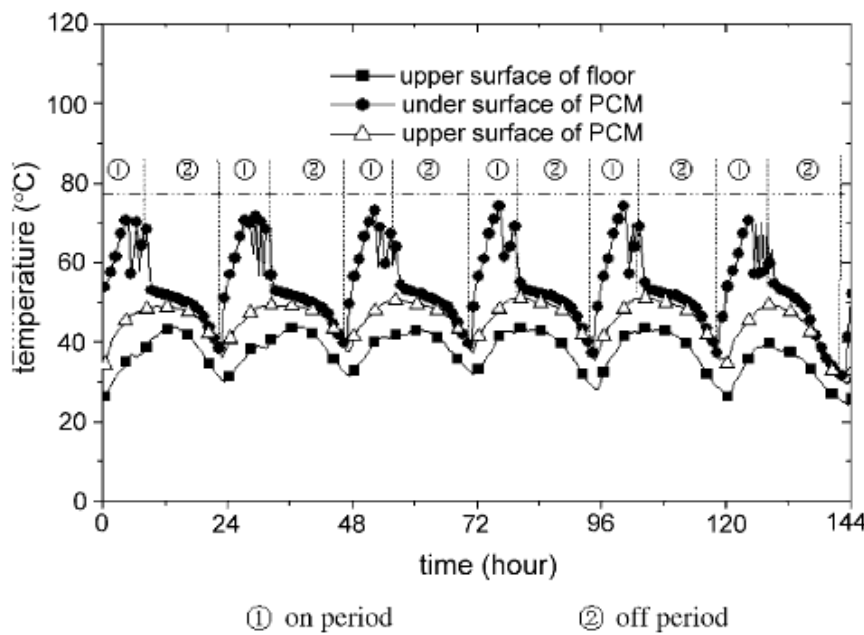
Σχήμα 6.2.4.1: Κατανομή θερμοκρασίας αέρα χωρίς ηλεκτρική θέρμανση. [142]

Από την άλλη μεριά, το παρακάτω διάγραμμα δείχνει ότι η μέση εσωτερική θερμοκρασία ήταν 31°C και η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην ημέρα και τη νύχτα παρέμεινε, όπως και πριν, 12°C με νυχτερινή ηλεκτρική θέρμανση. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα αυξάνει την εσωτερική θερμοκρασία χωρίς να μεταβάλλει την τιμή της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ ημέρας και νύχτας.



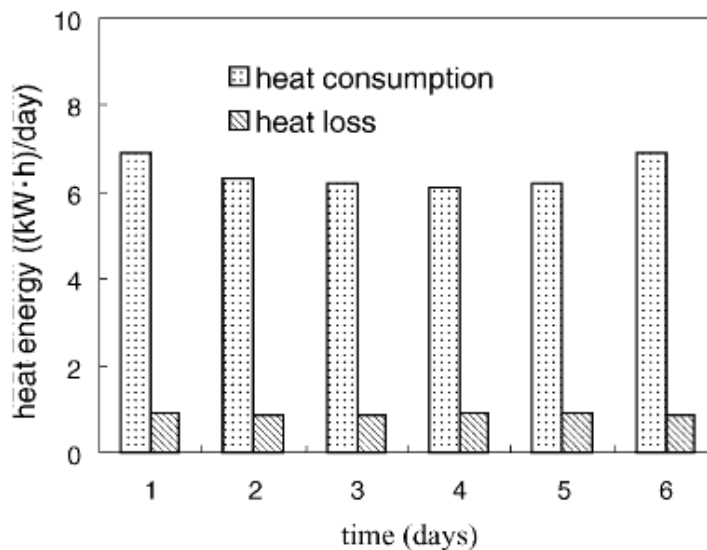
Σχήμα 6.2.4.2: Κατανομή θερμοκρασίας αέρα με νυχτερινή ηλεκτρική θέρμανση.[142]

Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος του PCM στην επιφάνεια παρέμεινε σταθερή πάνω από τους 45°C για περισσότερο από 10 ώρες από τις 08:00 που σταμάτησαν να δουλεύουν οι θερμαντές, όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα δύο εσωτερικά σημεία μέτρησης (0,5 και 1,5 m) ήταν μικρότερη από 0,5°C, γεγονός το οποίο υποδηλώνει υψηλό βαθμό θερμικής άνεσης.



Σχήμα 6.2.4.3: Μετρούμενη κατανομή θερμοκρασίας στο πάτωμα και στο PCM με νυχτερινή ηλεκτρική θέρμανση. [142]

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τη συνολική κατανάλωση θερμότητας του σπιτιού αλλά και την απώλεια 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 χαμηλής ζήτησης κάθε μέρα, που ήταν το 54% της συνολικής κατανάλωσης θερμότητας.



Σχήμα 6.2.4.4: Κατανάλωση και απώλεια θερμότητας στο πειραματικό σπίτι. [142]

Μία νέα δομή ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος ερευνήθηκε σε αυτή τη μελέτη. Το πειραματικό σπίτι, που δημιουργήθηκε για να γίνουν οι δοκιμές τον Απρίλιο του 2003, βρισκόταν στο Πεκίνο. Τα πειραματικά αποτελέσματα έλεγξαν τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα του συγκεκριμένου συστήματος θέρμανσης, τα οποία παρείχαν δεδομένα για τη μοντελοποίηση και την προσομοίωσή του. Έτσι μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Το σύστημα αύξησε την εσωτερική θερμοκρασία χωρίς να αυξήσει τη θερμοκρασιακή διαφορά.
- Η θερμοκρασία των πλακών PCM παρέμεινε σταθερή στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης για μεγάλο χρονικό διάστημα από τότε που οι θερμαντές σταμάτησαν να λειτουργούν. Περισσότερο από το μισό της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας θέρμανσης μεταφέρθηκε από την περίοδο αυξημένης ζήτησης στην περίοδο χαμηλής ζήτησης, γεγονός που μπορεί να επιφέρει μεγάλα οικονομικά οφέλη αν λάβει κανείς υπόψη του τη μειωμένη χρέωση ηλεκτρικής ενέργειας 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 γένει, το ηλεκτρικό ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης είναι ενεργειακά αποδοτικό και προσφέρει στον εσωτερικό χώρο συνθήκες άνεσης.

Κεφάλαιο 7

Μοντελοποίηση και προσομοίωση της θερμικής απόδοσης δαπέδου με χρήση υλικού αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος εφαρμοσμένο σε ηλιακό παθητικό σύστημα κτιρίων [155]

7.1 Εισαγωγή:

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί μια χρονικά εξαρτώμενη πηγή ενέργειας με διακοπτόμενο χαρακτήρα και η κορύφωσή της συμβαίνει περίπου στις μεσημεριανές ώρες. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μπορεί να προσφέρει ένα ρεζερβουάρ ενέργειας για να προσαρμόσει τις αλλαγές της ηλιακής ενέργειας [156]. Η αποθήκευση ενέργειας στους τοίχους, στην οροφή και στο δάπεδο μπορεί να βελτιωθεί, όπως έχουμε διαπιστώσει, με την ενσωμάτωση κατάλληλου υλικού αλλαγής φάσης σε αυτά. Τα υλικά αυτά με τις ιδιότητες που διαθέτουν μπορούν να βελτιώσουν το επίπεδο άνεσης στο χώρο μειώνοντας την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα και διατηρώντας την σε ένα επιθυμητό εύρος για μεγάλη χρονική περίοδο.

Όπως είδαμε και στην εφαρμογή του προηγούμενου κεφαλαίου, τα PCMs σταθερού σχήματος είναι ένα είδος PCM αποτελούμενο από ένα μακρομοριακό υλικό ως βοηθητικό και από παραφίνη που θεωρείται διασκορπισμένο PCM. Επειδή η παραφίνη τοποθετείται σε μικροκάψουλες στο εσωτερικό του βοηθητικού υλικού, το σύνθετο αυτό υλικό μπορεί να διατηρήσει το σταθερό του σχήμα όταν η παραφίνη υφίσταται αλλαγή φάσης. Σε σχέση με τα συμβατικά PCMs, αυτά με το σταθερό σχήμα ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο διαρροών του υγρού PCM, την επιπλέον θερμική αντίσταση και το κόστος του δοχείου αποθήκευσης. Το υλικό αυτό μπορεί να έχει τη μορφή πλακών ή να προστεθεί σε οπλισμένο σκυρόδεμα για να εφαρμοστεί απευθείας στο δάπεδο ή στον τοίχο. Τα τελευταία χρόνια ορισμένοι ερευνητές

μελέτησαν την προπαρασκευαστική διαδικασία του συγκεκριμένου υλικού για το χαμηλό του κόστος και τις εντυπωσιακές θερμικές του ιδιότητες [157-159].

Σε αυτή τη μελέτη δημιουργήθηκε ένα καινούριο είδος PCM σταθερού σχήματος, το οποίο περιέχει 70% κατά βάρος παραφίνη σαν διασκορπισμένο PCM, 15% κατά βάρος πολυαιθυλένιο και 15% στυρένιο-βουταδιένιο-στυρένιο (SBS) τεμάχιο συμπολυμερούς ως βοηθητικά υλικά. Το υλικό αυτό, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τοποθετήθηκε σε ένα είδος ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης και μελετήθηκε η θερμική του απόδοση [142,160]

Ένα παρόμοιο είδος πλακών PCM σταθερού σχήματος εγκατεστημένων στο δάπεδο εφαρμόστηκε και σε ένα παθητικό ηλιακό σύστημα σε κτίρια και μελετήθηκε πειραματικά [161]. Παρόλα αυτά, είναι αδύνατον να μελετηθεί η θερμική απόδοση διαφόρων κτιρίων σε άλλες περιοχές, μόνο μέσα από πειράματα που γίνονται σε ένα σπίτι. Επιπλέον, είναι δύσκολο να διαχωριστούν οι επιδράσεις που έχουν οι διάφοροι παράγοντες στη θερμική απόδοση τέτοιων ενδοδαπέδιων συστημάτων χωρίς μοντελοποίηση και προσομοίωση, διαδικασίες απαραίτητες σε παθητικά ηλιακά συστήματα.

Οι Farid και Kong εφάρμοσαν μία μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή για να περιγράψουν τη θερμότητα που μεταφέρθηκε τόσο στο σκυρόδεμα όσο και στα στρώματα σκυροδέματος με PCM. Υπέθεσαν ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα του PCM ήταν ανάλογη με τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της τήξης και της στερεοποίησης [148].

Οι στόχοι που επεδίωκε η μελέτη του παθητικού ηλιακού συστήματος ήταν:

- Η ανάπτυξη ενός μοντέλου ανάλυσης της θερμικής απόδοσης των πλακών PCM σταθερού σχήματος εγκατεστημένων στο δάπεδο.

- Η μελέτη των επιδράσεων διαφόρων παραγόντων στη θερμική απόδοση του συστήματος.
- Η εξέταση της δυνατότητας εφαρμογής του συστήματος αυτού σε περιοχές της Κίνας με διαφορετικό κλίμα.
- Η δημιουργία ενός εργαλείου προσομοίωσης για το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων.

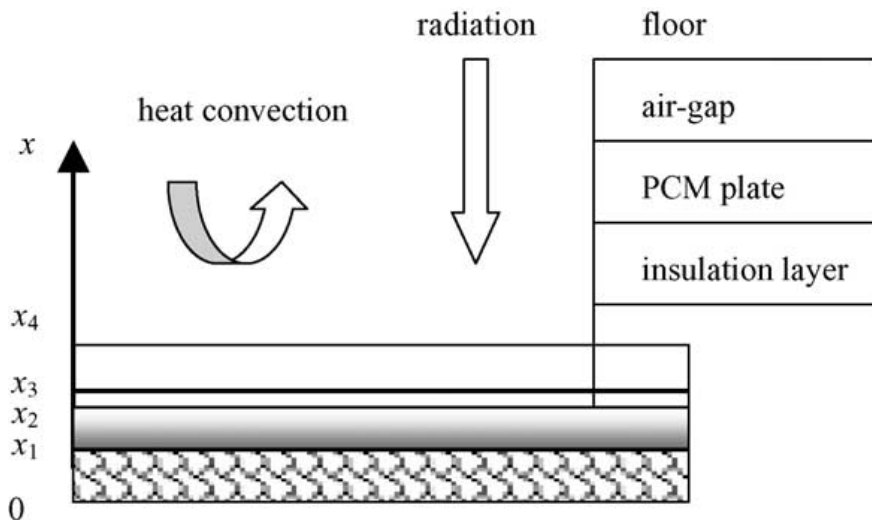
7.2 Ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας:

Προκειμένου να απλοποιηθεί η ανάλυση, έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Η μεταφορά θερμότητας μέσω των τοίχων, της οροφής και του δαπέδου θεωρείται μονοδιάστατη.
- Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών του κτιριακού κελύφους είναι σταθερές εκτός από την ειδική θερμότητα του PCM κατά τη διάρκεια των διαδικασιών τήξης και στερεοποίησης.
- Οι πλάκες PCM σταθερού σχήματος κάτω από την επιφάνεια είναι θερμικά μονωμένες.

7.2.1 Μοντέλο της μεταφοράς θερμότητας στις πλάκες PCM σταθερού σχήματος:

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το παθητικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με τις πλάκες PCM σταθερού σχήματος.



Σχήμα 7.2.1.1: Σχηματική απεικόνιση του δαπέδου με τις πλάκες PCM σταθερού σχήματος. [155]

Με βάση τις παραδοχές που αναφέρθηκαν παραπάνω η εξίσωση της μεταβατικής μεταφοράς θερμότητας στο δάπεδο είναι:

$$\rho_f c_{p,f} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = k_f \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (7.2.1)$$

με οριακή συνθήκη:

$$k_f \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} = h_f (T_{in}(\tau) - T(x, \tau)) + q_r(\tau) \quad \text{at } x = x_4 \quad (7.2.1\alpha)$$

όπου $q_r(\tau)$ είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία διέρχεται διαμέσου του υαλοπίνακα και η θερμότητα λόγω ακτινοβολίας από τους τοίχους και την οροφή στην ανώτερη επιφάνεια του δαπέδου.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δια συναγωγής του δαπέδου h_f υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση [162]:

$$h_f = 2.5 \times \sqrt[4]{T(x_4, \tau) - T_{in}(\tau)} \quad (7.2.1\beta)$$

$$k_f \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} = q_{\text{gap}}(\tau) + \varepsilon \sigma ((T_{x_2}, \tau)^4 - T(T_{x_2}, \tau)^4) \quad (7.2.1\gamma)$$

Για το κενό του αέρα, η μεταφορά θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση [163]:

$$q_{\text{gap}}(\tau) = \text{Nu} \frac{k_a}{L_{\text{gap}}} (T(x_2, \tau) - T(x_3 - \tau)) \quad (7.2.2)$$

όπου:

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0.212(\text{GrPr})^{1/4} \\ \text{Gr} &= 1 \times 10^4 \text{ to } 4.6 \times 10^5 \end{aligned} \quad (7.2.2\alpha)$$

$$\text{Nu} = 0.061(\text{GrPr})^{1/3}, \quad \text{Gr} > 4.6 \times 10^5 \quad (7.2.2\beta)$$

$$\text{Nu} = 1, \quad \text{GrPr} \leq 1700 \quad (7.2.2\gamma)$$

$$\text{Gr} = \frac{g\alpha(T(x_2, \tau) - T(x_3, \tau))L_{\text{gap}}^3}{V^2} \quad (7.2.3)$$

Η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας της πλάκας του PCM σταθερού σχήματος είναι:

$$\rho_{\text{PCM}} \frac{\partial H}{\partial \tau} = k_{\text{PCM}} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (7.2.4)$$

όπου η ενθαλπία του PCM είναι:

$$H = \int_{T_0}^{T_1} c_{p,s} dT + \int_{T_1}^{T_2} c_{p,m} dT$$

και το θερμοκρασιακό εύρος της αλλαγής φάσης κυμαίνεται μεταξύ T_1 και T_2 .

Η εξίσωση (7.2.1.4) υποβάλλεται στις ακόλουθες οριακές συνθήκες:

$$k_{PCM} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} = -q_{\text{gap}}(\tau) + \varepsilon \sigma ((T_{x_3, \tau})^4 - T(T_{x_2, \tau})^4) \quad \text{at } x = x_2 \quad (7.2.4\alpha)$$

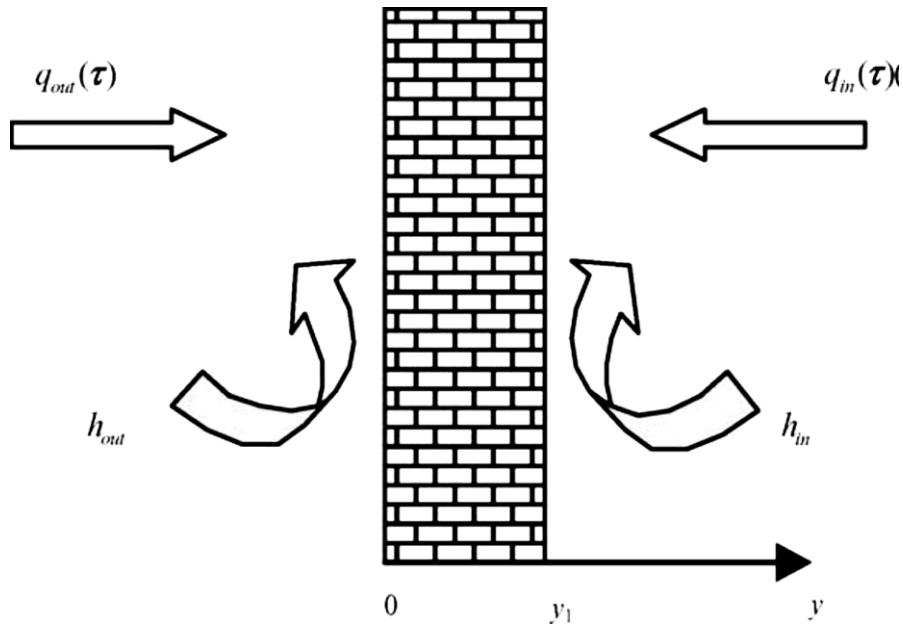
$$k_{PCM} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} = 0, \quad \text{at } x = x_1 \quad (7.2.4\beta)$$

Η αρχική συνθήκη είναι:

$$T(x, \tau)|_{\tau=0} = T_{\text{init}} \quad (7.2.5)$$

7.2.2 Ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας του κτιριακού κελύφους:

Η μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια των τοίχων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 7.2.2.1: Σχηματική απεικόνιση της μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια των τοίχων. [155]

Η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας για τους τοίχους είναι:

$$\rho_w c_{p,w} \frac{\partial T(y, \tau)}{\partial \tau} = k_w \frac{\partial^2 T(y, \tau)}{\partial y^2} \quad (7.2.6)$$

με οριακές συνθήκες:

$$q_{out}(\tau) + h_{out}(T_{out}(\tau) - T(y, \tau)) = -k_w \frac{\partial T(y, \tau)}{\partial y}, \text{ at } y = 0 \quad (7.2.6\alpha)$$

$$q_{in}(\tau) + h_{in}(T_{in}(\tau) - T(y, \tau)) = -k_w \frac{\partial T(y, \tau)}{\partial y}, \text{ at } y = y_1 \quad (7.2.6\beta)$$

Η αρχική συνθήκη είναι:

$$T(y, \tau)|_{\tau=0} = T_{init} \quad (7.2.7)$$

Για τον εξωτερικό τοίχο, q_{in} και q_{out} είναι η εσωτερική και εξωτερική συνολική θερμική ακτινοβολία αντίστοιχα, όπως δείχνει και το σχήμα 7.2.2.1.

7.2.3 Μοντέλο του εσωτερικού αέρα:

Βασίζεται στην εξίσωση:

$$c_{p,a}\rho_a V_R \frac{dT_a(\tau)}{d\tau} = \sum_{i=1}^N Q_{w,s}^i + Q_{leak} + Q_{win} \quad (7.2.8)$$

όπου:

- V_R είναι ο όγκος του δωματίου
- $Q_{w,s}$ είναι ο δείκτης μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του αέρα και των εσωτερικών επιφανειών του δωματίου
- Q_{leak} είναι ο δείκτης μεταφοράς θερμότητας για τη διαρροή του αέρα
- Q_{win} είναι ο δείκτης μεταφοράς θερμότητας διαμέσου των παραθύρων.

Οι δείκτες $Q_{w,s}$, Q_{leak} , Q_{win} υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$Q_{w,s} = h_{in} \times (T_{w,s}(\tau) - T_{in}(\tau)) \times A_{w,s} \quad (7.2.9)$$

$$Q_{leak} = c_{p,a}\rho_a V_R \times ACH \times (T_{out}(\tau) - T_{in}(\tau))/3600 \quad (7.2.10)$$

$$Q_{win} = U_{win} \times (T_{out}(\tau) - T_{in}(\tau)) \times A_{win} \quad (7.2.11)$$

όπου:

- $T_{w,s}$ είναι η θερμοκρασία στην επιφάνεια του τοίχου, της οροφής ή του δαπέδου

- $A_{w,s}$ είναι η επιφάνεια
- U_{win} είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας των υαλοπινάκων
- A_{win} είναι η επιφάνεια των υαλοπινάκων

Οι εξισώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να επιλυθούν αριθμητικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Gauss-Seidel. Έτσι, για τη συγκεκριμένη μελέτη εφαρμόστηκε ένα πλήρως πεπλεγμένο διαφορικά ορισμένο σχήμα και ελέγχθηκε πλήθος πλεγμάτων προκειμένου να διασφαλιστεί η απαιτούμενη ακρίβεια και να ελαχιστοποιηθούν τα αρχικά λάθη.

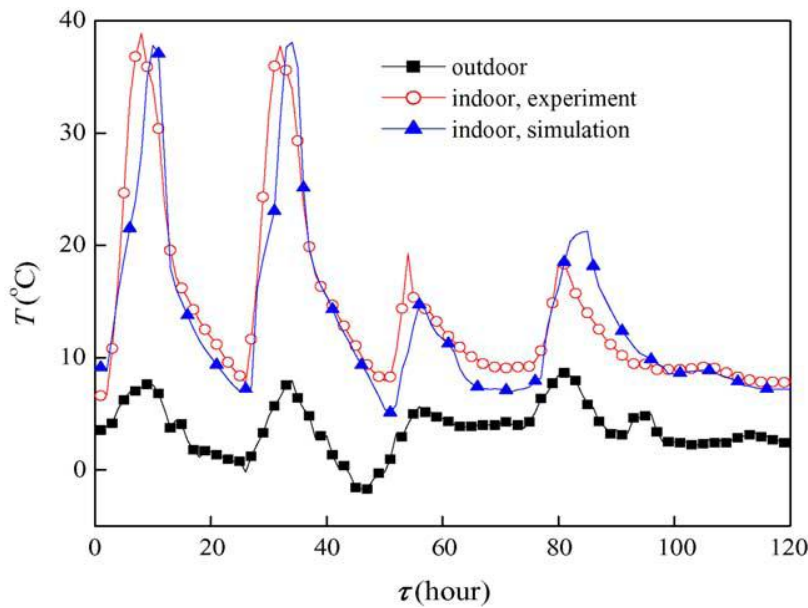
7.3 Εξακρίβωση της εγκυρότητας του μοντέλου:

Για τον έλεγχο της εγκυρότητας του μοντέλου που παρουσιάστηκε κατασκευάστηκε ένα πειραματικό δωμάτιο με πλάκες PCM σταθερού σχήματος στο Πανεπιστήμιο Tsinghua του Πεκίνου. Οι διαστάσεις του δωματίου αυτού ήταν 3 m (βάθος) x 2 m (πλάτος) x 2 m (ύψος). Στο δωμάτιο υπήρχε ένας υαλοπίνακας με διπλό τζάμι και διαστάσεις 1,6 m x 1,5 m και νότιο προσανατολισμό. Η οροφή και οι τοίχοι περιείχαν 100 mm πολυστερίνη. Το δάπεδο αποτελούνταν από ένα στρώμα 8 mm PCM σταθερού σχήματος και ένα στρώμα 50 mm πολυστερίνης, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν από τις 15 Οκτωβρίου μέχρι τις 15 Δεκεμβρίου 2003.



Σχήμα 7.3.1: Φωτογραφία του δαπέδου. [155]

Η εξωτερική θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία μετρήθηκαν και εισήχθησαν ως δεδομένα για το μοντέλο της προσομοίωσης προκειμένου να υπολογιστούν οι στιγμιαίες εσωτερικές θερμοκρασίες. Τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί. Όπως φαίνεται τα αποτελέσματα συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό. Παρόλα αυτά, η μεταβολή στην εσωτερική θερμοκρασία του πειραματικού δωματίου ήταν αρκετά υψηλή, επειδή οι τοίχοι του δωματίου και η οροφή περιείχαν πολυστερίνη και οι θερμοχωρητικότητές τους ήταν πολύ μικρές, και επειδή η ποσότητα του PCM δεν ήταν επαρκής.



Σχήμα 7.3.2: Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων από την προσομοίωση και των μετρούμενων αποτελεσμάτων του πειραματικού δωματίου. [155]

7.4 Επίδραση διαφόρων παραγόντων στη θερμική απόδοση δωματίου με πλάκες PCM σταθερού σχήματος στο δάπεδο:

Η θερμική απόδοση ενός δωματίου με τοποθετημένες πλάκες PCM σταθερού σχήματος στο δάπεδο επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες μεταξύ των οποίων είναι η θερμοκρασία τήξης, η θερμότητα τήξης, η θερμική αγωγιμότητα και το πάχος του στρώματος του PCM. Με τη βοήθεια των παραμετρικών μελετών μπορεί να διευκρινιστεί η επιρροή κάθε παράγοντα στη θερμική απόδοση, γεγονός ιδιαίτερα χρήσιμο για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση του συστήματος με το ενδοδαπέδιες πλάκες PCM σταθερού σχήματος για δεδομένες συνθήκες.

Οι διαστάσεις του δωματίου προσομοίωσης ήταν 5 m (βάθος) x 5 m (πλάτος) x 3 m (ύψος). Υπήρχαν επίσης ένας τοίχος με γυάλινη κουρτίνα και νότιο προσανατολισμό και τρεις τοίχοι με γύψο πάχους 100 mm σε αυτό το δωμάτιο. Το σύστημα του δαπέδου περιελάμβανε στρώμα μόνωσης πολυστερίνης πάχους 50 mm, στρώμα πλακών PCM πάχους 20 mm και

στρώμα πλακιδίων πάχους 10 mm. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των τοίχων και του PCM παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 7.4.1: Θερμοφυσικές ιδιότητες των τοίχων και του PCM. [155]

Material	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg K)	H_m (kJ/kg)	k (W/m K)	K (W/(m ² K))
Shape-stabilized PCM	850	1.0	1.20	0.2	-
Glass curtain wall	2000	0.8	-	-	1.4
Gypsum wall	1500	0.8	-	0.3	-

Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Medpha (Meteorological Data Producer for HVAC Analysis) για να δοθούν τα κλιματικά δεδομένα του χειμώνα (συμπεριλαμβανομένης της εξωτερικής θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας) για τη μελέτη προσομοίωσης.

7.4.1 Θερμοκρασία τήξης του PCM:

Το κλειδί στην εφαρμογή των πλακών PCM σταθερού σχήματος στο δάπεδο κτιρίου είναι η επιλογή PCM με κατάλληλη θερμοκρασία τήξης. Για δεδομένα κτίρια και δεδομένες κλιματικές συνθήκες, αν η θερμοκρασία τήξης είναι υπερβολικά υψηλή, τότε η ποσότητα της θερμότητας που αποθηκεύει το PCM από την ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ μικρή. Από την άλλη μεριά, αν η θερμοκρασία τήξης είναι υπερβολικά χαμηλή, τότε είναι δύσκολο να διατηρηθεί η εσωτερική θερμοκρασία σε ένα επίπεδο θερμικής άνεσης κατά τη διάρκεια της νύχτας. Επομένως, για δεδομένο κλίμα μίας περιοχής, πρέπει να υπάρχει μία βέλτιστη θερμοκρασία τήξης του PCM. Χρησιμοποιώντας υλικό αλλαγής φάσης στο δάπεδο με κατάλληλη θερμοκρασία τήξης η εσωτερική θερμοκρασία μπορεί να διατηρείται σε ένα επίπεδο σχετικής θερμικής άνεσης. Προφανώς, για περιοχές με διαφορετικά κλίματα οι βέλτιστες θερμοκρασίες τήξης διαφέρουν. Σε αυτή τη μελέτη εξετάστηκαν τρεις πόλεις (Urumchi,

Πεκίνο και Shanghai). Το κτίριο που μελετάται εδώ δε διαθέτει συμπληρωματικό σύστημα θέρμανσης.

Με βάση την ανάλυση της στιγμιαίας εσωτερικής θερμοκρασίας αέρα χωρίς τη χρήση PCM, έχει καθοριστεί αρχικά το θερμοκρασιακό εύρος τήξης του PCM για τις τρεις πόλεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπως φαίνεται στον πίνακα 7.4.2. Η επιλογή της κατάλληλης θερμοκρασίας τήξης έγινε με κριτήριο τη μικρότερη διακύμανση στην εσωτερική θερμοκρασία του αέρα ανάμεσα στις περιπτώσεις με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 7.4.3.

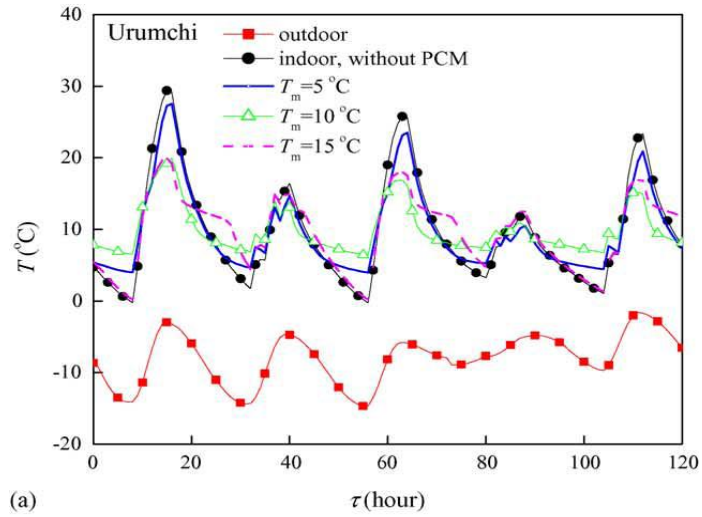
Πίνακας 7.4.2: Εσωτερικές θερμοκρασίες χωρίς PCM και εύρος σημείων τήξης. [155]

	Urumchi	Beijing	Shanghai
Indoor temperature without PCM (°C)	-0.3-29.4	8.5-37.2	11.6-45.8
(Range of melting point (°C)	5-15	15-23	23-30

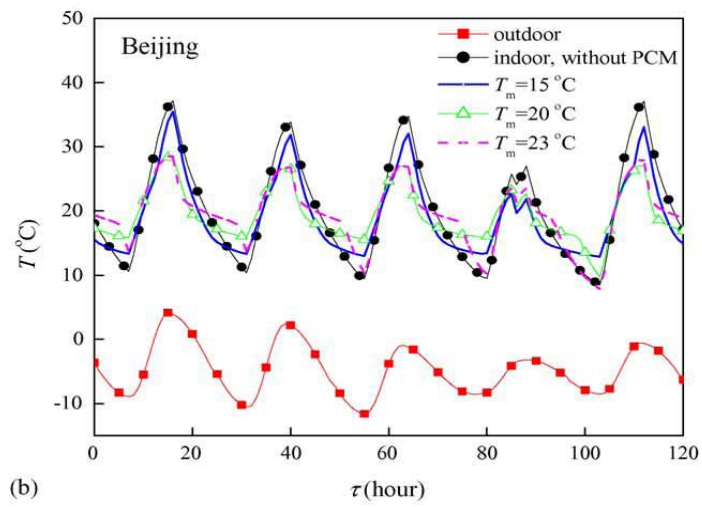
Πίνακας 7.4.3: Εσωτερικές θερμοκρασίες με PCM με διαφορετικά σημεία τήξης στις τρεις πόλεις. [155]

Melting point (°C)	5	10	15
(a) Urumchi			
Indoor temperature with PCM (°C)	4-27.5	6.4-19.9	0.2-19.9
Melting point (°C)	15	20	23
(b) Beijing			
Indoor temperature with PCM (°C)	12.9~35.5	9.7-28.4	7.8-28.5
Melting point (°C)	23	25	30
(c) Shanghai			
Indoor temperature with PCM (°C)	13.2-41.4	12.5-36.4	11.8-35.7

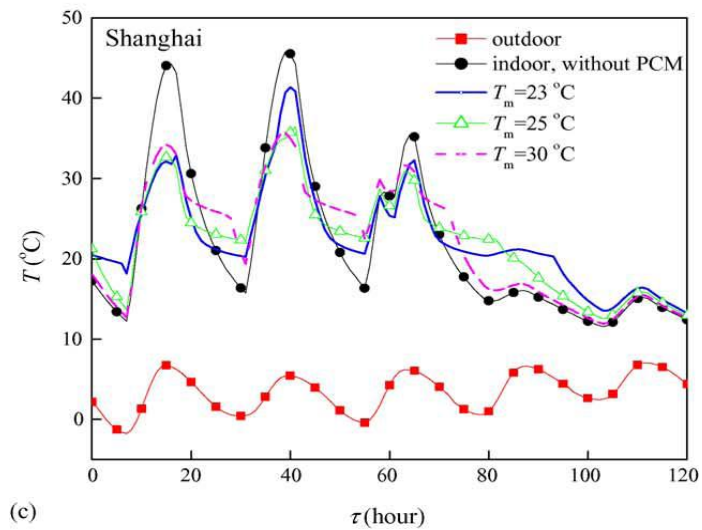
Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι οι βέλτιστες θερμοκρασίες τήξης για τις πόλεις Urumchi, Πεκίνο και Shanghai είναι 10, 20 και 25°C αντίστοιχα. Η βέλτιστη τιμή της θερμοκρασίας τήξης είναι προσεγγιστικά ίση με τη μέση θερμοκρασία ενός δωματίου στη Shanghai, η οποία ποικίλει ανάλογα με το κέλυφος του εκάστοτε κτιρίου, την εποχή του χρόνου και την ηλιακή ακτινοβολία. Για παράδειγμα, η μέση εσωτερική θερμοκρασία του αέρα για τις 5 ημέρες ήταν 20°C, όπως φαίνεται στα σχήματα που ακολουθούν, αλλά τις δύο τελευταίες ημέρες (από 73 μέχρι 120h) επικρατούσε συννεφιά, γι' αυτό οι ημέρες αυτές πρέπει να διαγραφούν από τη στατιστική ανάλυση. Παρατηρήθηκε ακόμη ότι η μέση εσωτερική θερμοκρασία του αέρα για τις τρεις πρώτες ημέρες ήταν 25°C, η οποία συμπίπτει ακριβώς με τις τιμές της κατάλληλης θερμοκρασίας τήξης για την περιοχή της Shanghai. Ο λόγος για τον οποίο λαμβάνονται υπόψη μόνο οι ημέρες με ηλιοφάνεια είναι ότι η ηλιακή ακτινοβολία στις συννεφιασμένες ημέρες δεν μπορεί να απορροφηθεί με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας από τις πλάκες PCM.



(a)



(b)

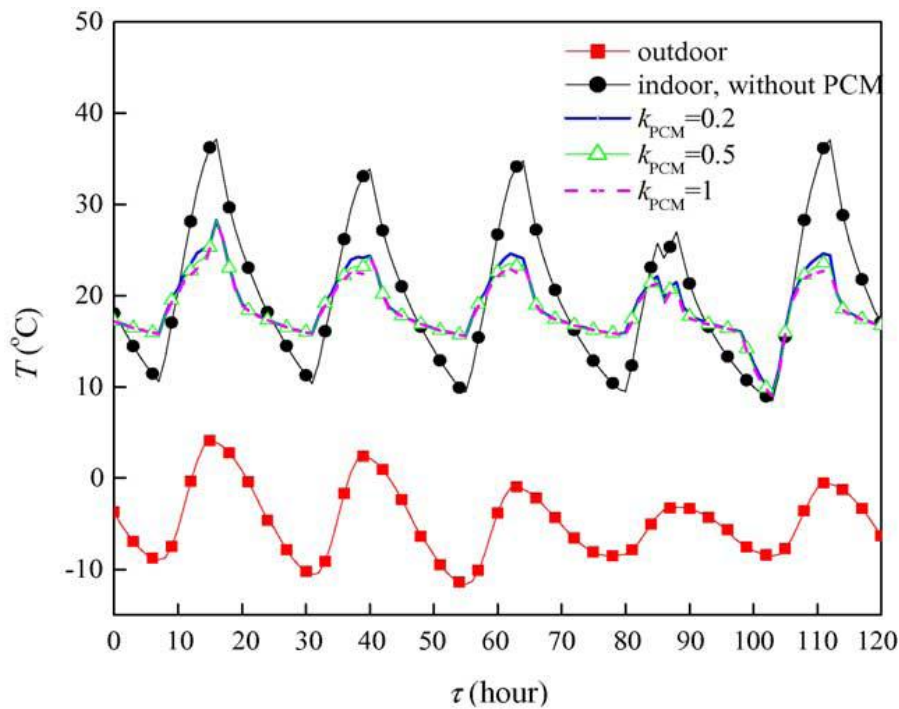


(c)

Σχήμα 7.4.1.1: Κατανομή θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης PCM στις τρεις πόλεις. [155]

7.4.2 Θερμική αγωγιμότητα:

Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε η θερμική αγωγιμότητα των $0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $0,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ και $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ προκειμένου να υπολογιστεί η εσωτερική θερμοκρασία για μερικές ημέρες υπό τις συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια του χειμώνα στο Πεκίνο, όπως παρατηρούμε στην εικόνα 7.4.2.1. Κατά τη διαδικασία απελευθέρωσης θερμότητας, η θερμική αγωγιμότητα δε φαίνεται να έχει κάποια επίδραση στην εσωτερική θερμοκρασία του χώρου. Παρόλα αυτά, μπορεί να επηρεάσει την εσωτερική θερμοκρασία όταν οι πλάκες PCM σταθερού σχήματος απορροφούν θερμότητα. Βελτιώνοντας τη θερμική αγωγιμότητα μπορεί να επιταχυνθεί η διαδικασία απορρόφησης ηλιακής ενέργειας από τις πλάκες PCM και να έχει μία μικρή επίδραση στη μείωση της κορύφωσης της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επομένως συμπεραίνουμε πως όταν η θερμική αγωγιμότητα έχει τιμή πάνω από $0,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, δε φαίνεται να υπάρχει κάποια επίδραση στην εσωτερική θερμοκρασία του αέρα.



Σχήμα 7.4.2.1: Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα με διαφορετικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας. [155]

7.4.3 Θερμότητα τήξης:

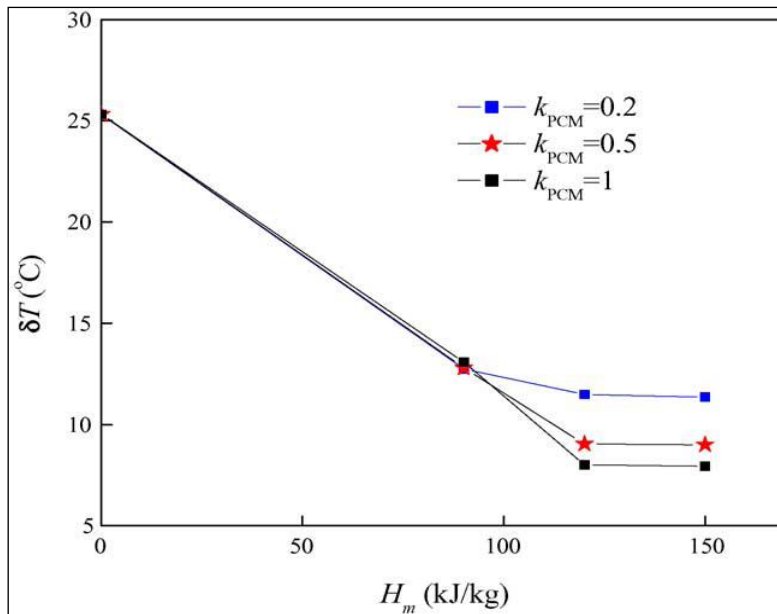
Η θερμότητα τήξης είναι ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ικανότητα αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας του PCM του δαπέδου. Μελετήθηκαν πλάκες PCM σταθερού σχήματος τοποθετημένες στο δάπεδο με θερμότητες τήξης 90, 120 και 150 kJ/kg σε διαφορετικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας 0,2, 0,5 και 1 W/m·K. Το ΔT ορίστηκε ως η διαφορά μεταξύ της υψηλότερης και της χαμηλότερης τιμής της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα σε μία τυπική χειμωνιάτικη ημέρα. Για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν αποδείχτηκε ότι:

- Όταν η θερμότητα τήξης είναι μικρότερη από 90 kJ/kg, το ΔT μειώνεται με την αύξηση της θερμότητας τήξης, ενώ η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του PCM οδηγεί σε πολύ μικρή

μεταβολή στην εσωτερική θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.4.3.1.

- Όταν η θερμότητα τήξης κυμαίνεται από 90 μέχρι 120 kJ/kg, το δT μειώνεται με την αύξηση της θερμότητας τήξης, ενώ η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του PCM οδηγεί σε μείωση της μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα.
- Όταν η θερμότητα τήξης είναι μεγαλύτερη από 120 kJ/kg, το δT σχεδόν δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές στην θερμότητα τήξης, αλλά μειώνεται με την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του PCM.

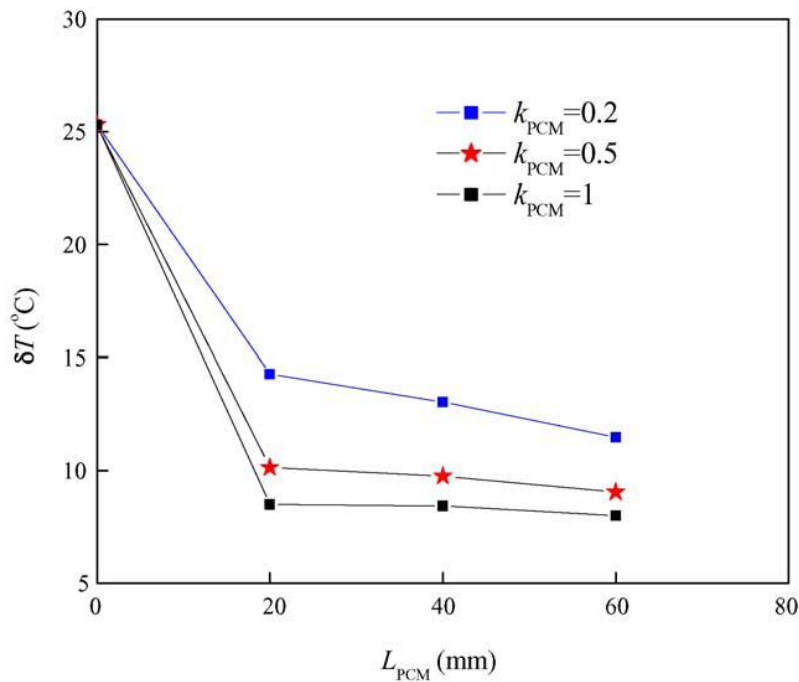
Τα παραπάνω αποτελούν πολύ χρήσιμα κριτήρια επιλογής ή ετοιμασίας του δαπέδου στο οποίο πρόκειται να τοποθετηθεί το PCM. Αν η αναλογία βάρους του PCM είναι πολύ χαμηλή, η θερμότητα τήξης δεν είναι υψηλή. Από την άλλη μεριά, αν η αναλογία βάρους του PCM είναι πολύ υψηλή, η θερμική αγωγιμότητα δεν είναι αρκετά υψηλή, επειδή η παραφίνη είναι υλικό με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Επομένως, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ισορροπία μεταξύ θερμότητας τήξης και θερμικής αγωγιμότητας όταν πρόκειται να εφαρμοστεί στην πραγματικότητα αυτό το σύστημα στο δάπεδο. Σε γενικές γραμμές, προκειμένου να περιοριστεί το εύρος διακύμανσης της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα, η θερμότητα τήξης του σύνθετου PCM που θα τοποθετηθεί στο δάπεδο πρέπει να είναι υψηλότερη από 120 kJ/kg και η θερμική αγωγιμότητα πρέπει να είναι υψηλότερη από 0,5 W/m·K.



Σχήμα 7.4.3.1: Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα με διαφορετικές τιμές της θερμότητας τήξης. [155]

7.4.4 Πάχος στρώματος PCM σταθερού σχήματος:

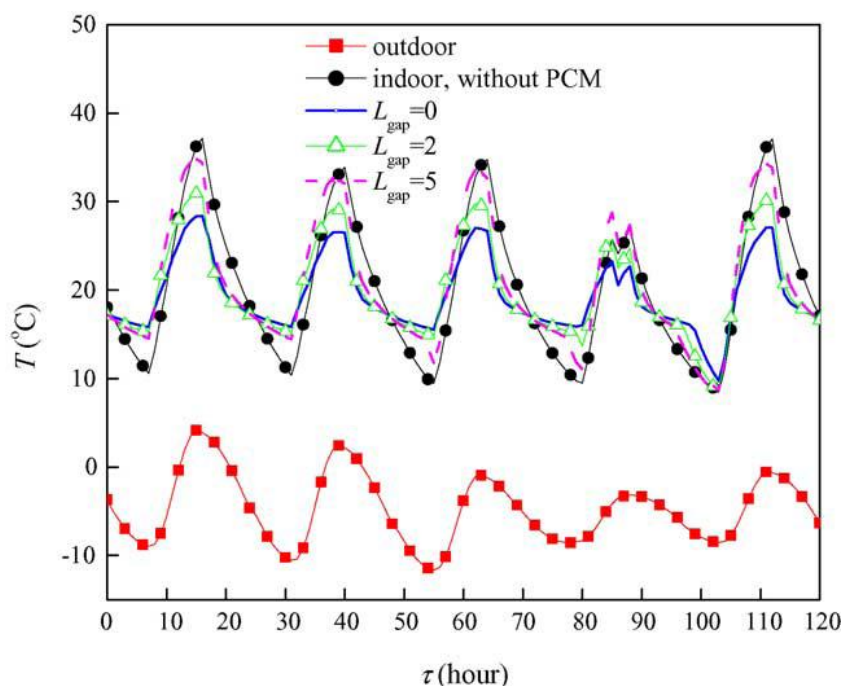
Το πάχος του στρώματος του σταθερού σχήματος PCM είναι μία ακόμη παράμετρος που επηρεάζει τη θερμική απόδοση του PCM που είναι τοποθετημένο στο δάπεδο. Το σχήμα 7.4.4.1 δείχνει τη σχέση μεταξύ της μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα, του δT και του πάχους του στρώματος PCM, L_{PCM} , για διαφορετικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας. Παρατηρήθηκε ότι το δT δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από το L_{PCM} , όταν το L_{PCM} είναι μεγαλύτερο από 20 mm για την περίπτωση που μελετάται εδώ. Επομένως σε πρακτικές εφαρμογές και υπό τις συνθήκες στις οποίες πραγματοποιήθηκε το συγκεκριμένο πείραμα, η τιμή του πάχους του PCM πρέπει να είναι κοντά στα 20 mm και όχι μεγαλύτερη.



Σχήμα 7.4.4.1: Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα με διαφορετικές τιμές του πάχους του στρώματος PCM. [155]

7.4.5 Το κενό αέρος μεταξύ PCM και δαπέδου:

Οι πλάκες PCM σταθερού σχήματος είναι τοποθετημένες κάτω από την επίστρωση του δαπέδου. Στο σημείο αυτό δημιουργούνται κενά αέρος, τα οποία προκαλούν πρόσθετη θερμική αντίσταση. Το κενό αέρος μειώνει την αποτελεσματικότητα του PCM στο να αποθηκεύει ηλιακή ενέργεια και ενισχύει τη μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Επομένως, όταν τοποθετούνται πλάκες PCM σταθερού σχήματος, αυτά τα κενά αέρος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερα.



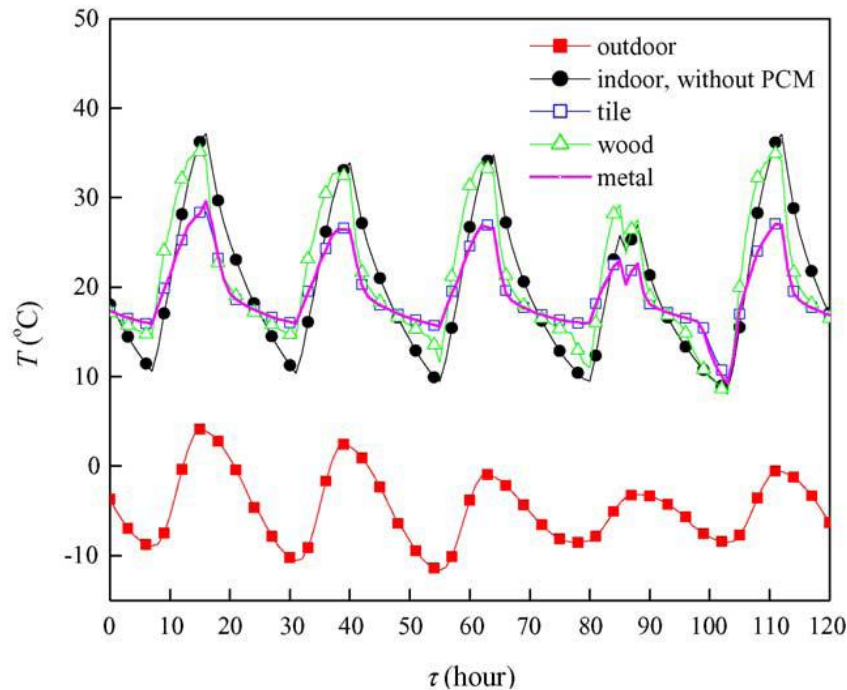
Σχήμα 7.4.5.1: Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα με διαφορετικά πάχη κενών αέρος. [155]

7.4.6 Τα υλικά επίστρωσης δαπέδου:

Επειδή οι θερμοφυσικές ιδιότητες των διάφορων υλικών επίστρωσης του δαπέδου διαφέρουν, η θερμική απόδοση του PCM του δαπέδου, επηρεάζεται από τα υλικά επίστρωσης του δαπέδου. Τρία τυπικά υλικά επίστρωσης δαπέδου προσομοιάστηκαν στη μελέτη αυτή. Οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες παρουσιάζονται στον πίνακα 7.4. Από την εικόνα 7.4.6.1 φαίνεται ότι τα πλακάκια ή το μεταλλικό δάπεδο είναι καλύτερα από το ξύλινο δάπεδο, επειδή τα πρώτα έχουν μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από το ξύλο.

Πίνακας 7.4: Θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών επίστρωσης του δαπέδου. [155]

Floor material	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg K)	k (W/m K)	L_f (mm)
Tile	2000	1.0	1.1	10
Wood	250	2	0.05	10
Metal	5000	0.5	5	10



Σχήμα 7.4.6.1: Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα με διαφορετικά υλικά επίστρωσης του δαπέδου. [155]

7.5 Συμπεράσματα:

Το μοντέλο ανάλυσης της θερμικής απόδοσης των πλακών σταθερού σχήματος που μελετήθηκε πιστοποιήθηκε και από τα πειραματικά αποτελέσματα. Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο αναλύθηκε η επίδραση που έχουν οι διάφοροι παράγοντες όπως το πάχος στρώματος PCM, η θερμοκρασία τήξης, η θερμότητα τήξης, η θερμική αγωγιμότητα κ.α. στη θερμική απόδοση του συστήματος.

Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγει η εν λόγω μελέτη είναι τα εξής:

- Προκειμένου να μειωθεί η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας, για μία συγκεκριμένη τοποθεσία ή κλιματική συνθήκη, η κατάλληλη θερμοκρασία τήξης του PCM λαμβάνεται

σχεδόν ίση με τη μέση τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των ημερών του χειμώνα με ηλιοφάνεια.

- Η θερμότητα τήξης και η θερμική αγωγιμότητα πρέπει να λαμβάνουν τιμές μεγαλύτερες από 120 kJ/kg και 0,5 W/m·K αντίστοιχα.
- Το πάχος των πλακών PCM σταθερού σχήματος που είναι τοποθετημένες στο δάπεδο δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 20 mm.
- Σε σχέση με το ξύλο, το πλακάκι ή το μέταλλο είναι προτιμότερα ως υλικά επίστρωσης του δαπέδου.
- Το κενό αέρος που δημιουργείται μεταξύ του PCM και του δαπέδου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.

Το συγκεκριμένο μοντέλο και η ανάλυση που προηγήθηκε αποτελούν πολύ χρήσιμα εργαλεία για την εγκατάσταση πλακών PCM σταθερού σχήματος σε ηλιακό παθητικό σύστημα δαπέδου σε κτιριακές εφαρμογές.

Κεφάλαιο 8

Σύστημα ηλιακού ζεστού νερού για οικιακή χρήση με υλικά αλλαγής φάσης

8.1 Γενικά: [164], [165]

Η λειτουργία των ηλιακών συστημάτων είναι συνυφασμένη με αποθήκευση της θερμότητας και αυτό διότι η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ η ζήτηση θερμότητας ή ενέργειας γενικότερα εκτείνεται σε όλες τις ώρες του 24ώρου. Επιπροσθέτως, η ηλιακή ενέργεια είναι ένα στοχαστικό φαινόμενο και είναι δυνατόν να υπάρχουν περίοδοι όπου το επίπεδο της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας είναι κάτω από ένα κατώφλι ωφέλιμης απόδοσης. Απαιτείται λοιπόν, η αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας ώστε να αποσβέννονται οι περίοδοι της νύχτας και της χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, με τη χρήση θερμικής αποθήκευσης είναι δυνατόν να μεγιστοποιηθεί η λειτουργικότητα του ηλιακού συστήματος διότι σε περιπτώσεις μεγάλης ηλιακής απολαβής, οπότε υπάρχει πλήρης κάλυψη του φορτίου, το πλεόνασμα ενέργειας το οποίο είναι δυνατόν να συλλεχθεί, δεν αποβάλλεται αλλά αποθηκεύεται, ώστε να χρησιμοποιηθεί σε κάποια μελλοντική χρονική στιγμή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι δεξαμενές διεποχιακής αποθήκευσης οι οποίες είναι δεξαμενές μεγάλης μάζας νερού, οι οποίες αποθηκεύουν την θερμότητα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και την αποδίδουν κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών οπότε η ζήτηση είναι μεγαλύτερη και η ηλιακή ενέργεια μικρότερη.

Η επιλογή του αποθηκευτικού μέσου εξαρτάται από την φύση της εφαρμογής. Στις περιπτώσεις θέρμανσης ζεστού νερού η χρησιμοποίηση του νερού ως αποθηκευτικού μέσου είναι αρκετά λογική και συνήθως ενδείκνυται. Το νερό είναι ένα μέσο το οποίο έχει γνωστή θερμοδυναμική συμπεριφορά, έχει υψηλή θερμική χωρητικότητα ($C_p=4,2 \text{ kJ/kg K}$), και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Στην περίπτωση ηλιακών συλλεκτών αέρα, η θερμότητα

αποθηκεύεται συνήθως σε κλίνη βότσαλων. Αυτή είναι μία δεξαμενή, θερμικά μονωμένη, η οποία περιέχει βότσαλα μικρής σχετικά διαμέτρου και ο αέρας οδηγούμενος μέσα σε αυτά αποβάλλει τη θερμότητα του και εξέρχεται από την έξοδο με χαμηλότερη θερμοκρασία. Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι οι δεξαμενές από βότσαλα προσφέρουν θερμική διαστρωμάτωση, ενώ στις περιπτώσεις δεξαμενής νερού η θερμική διαστρωμάτωση είναι πολύ δύσκολο να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση παθητικών ηλιακών συστημάτων χρησιμοποιούνται τα ίδια τα δομικά στοιχεία ως αποθηκευτικά μέσα, ενώ στα φωτοβολταϊκά συστήματα η ενέργεια αποθηκεύεται υπό την μορφή χημικής ενέργειας. Τέλος, υπάρχουν αποθηκευτικά μέσα τα οποία στηρίζονται στην αλλαγή φάσης. Αυτά κατά τη διάρκεια της φόρτισης τήκονται, ενώ κατά την αποφόρτιση, όταν δηλαδή αποδίδουν την αποθηκευμένη θερμότητα, αλλάζουν φάση και στερεοποιούνται.

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι:

- α) η χωρητικότητα ανά μονάδα όγκου ή βάρους
- β) το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας
- γ) το μέσο με το οποίο γίνεται η προσαγωγή και η απαγωγή της θερμότητας
- δ) η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση στο σύστημα
- ε) οι απαιτήσεις ισχύος για την προσαγωγή και απαγωγή της θερμότητας
- στ) τα στοιχεία κατασκευής της δεξαμενής
- ζ) οι θερμικές απώλειες
- η) το κόστος

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα ανήκουν στα ενεργητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης χώρων, τα οποία βασίζονται σε ηλιακούς συλλέκτες για τη συλλογή και τη διανομή της θερμότητας. Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό σύστημα παραγωγής ζεστού νερού είναι ο ηλιακός συλλέκτης, το κύκλωμα μεταφοράς της θερμότητας προς το φορτίο

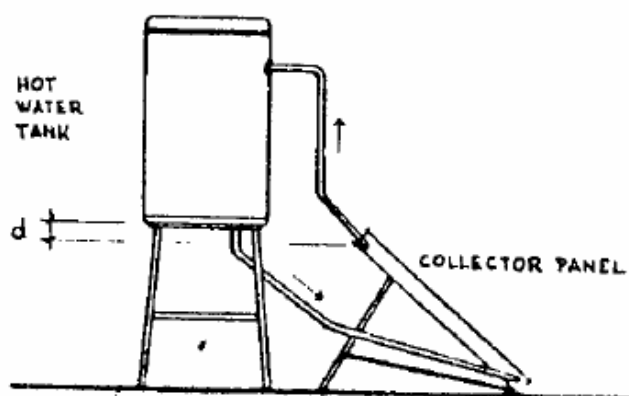
(σωληνώσεις / αεραγωγοί, αντλίες, διακόπτες κλπ), η αποθηκευτική μονάδα (νερό, βότσαλα, υλικό αλλαγής φάσης), και πιθανώς κάποιο υποσύστημα αυτομάτου ελέγχου της λειτουργίας. Το παραγόμενο ζεστό νερό χρήσης από θερμικά ηλιακά συστήματα αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές προκειμένου στη συνέχεια να καταναλωθεί σε διάφορα σημεία (ντους, κουζίνες, πλυντήρια κλπ.) του κτιρίου στο οποίο βρίσκεται η εγκατάσταση.



Σχήμα 8.1.1: Οικιακή εγκατάσταση για ζεστό νερό χρήσης. [165]

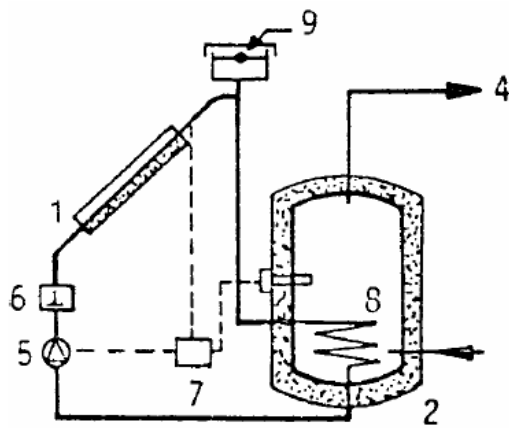
Στα απλά θερμοσιφωνικά συστήματα, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, υπάρχει μόνο ο συλλέκτης και η δεξαμενή αποθήκευσης που είναι καλά θερμομονωμένη. Η είσοδος του κρύου νερού γίνεται από το κάτω μέρος της δεξαμενής και η έξοδος του ζεστού νερού από το συλλέκτη οδηγείται στο επάνω μέρος της δεξαμενής. Το κύκλωμα αυτό είναι ανεξάρτητο, δεν έρχεται δηλαδή σε επαφή με το νερό χρήσης (σε περιοχές με χαμηλή θερμοκρασία μάλιστα έχει και αντιψυκτικό για την αποφυγή θραύσεων από παγετό), ενώ η τροφοδοσία του κρύου νερού γίνεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής και η έξοδος του αφού θερμανθεί από το επάνω. Ενδιάμεσα υπάρχει συνήθως ηλεκτρική αντίσταση η οποία χρησιμεύει για να θερμάνει το νερό στην

επιθυμητή θερμοκρασία στην περίπτωση που η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί. Η κυκλοφορία του νερού από τον συλλέκτη και η μεταφορά της θερμότητας επιτυγχάνεται με τη φυσική κυκλοφορία που εγκαθίσταται μόλις ο ηλιακός συλλέκτης και το νερό που περιέχει θερμανθούν με την ηλιακή ακτινοβολία. Το θερμό νερό στο σωλήνα εξόδου είναι ελαφρύτερο από το κρύο νερό στο σωλήνα εισόδου και επομένως υπάρχει μια συνεχής ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας ανάμεσα στα δύο τμήματα. Αυτό εξηγεί και το γεγονός ότι η δεξαμενή αποθήκευσης θα πρέπει να είναι πάντα σε υψηλότερο σημείο από τον ηλιακό συλλέκτη.



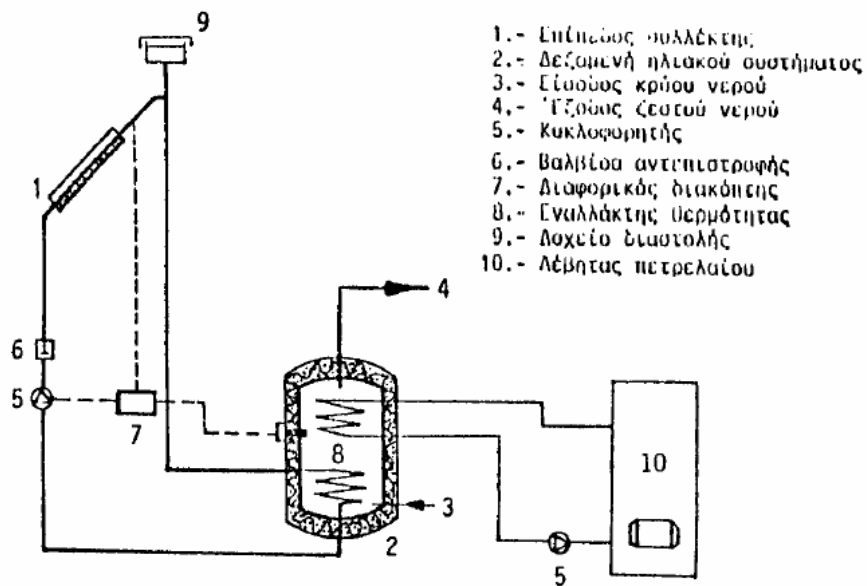
Σχήμα 8.1.2: Θερμοσιφωνικό σύστημα ηλιακής ενέργειας με συλλέκτη και δεξαμενή. [164]

Στην περίπτωση μεγάλου ηλιακού συστήματος (π.χ. Θέρμανση νερού σε ξενοδοχεία) οι συλλέκτες τοποθετούνται στην ταράτσα, ενώ η αποθηκευτική δεξαμενή στο λεβητοστάσιο (συνήθως στο υπόγειο του κτιρίου). Το ζεστό νερό κυκλοφορεί με αντλίες και η έναρξη και η διακοπή λειτουργίας δίνεται με σύστημα αυτομάτου ελέγχου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το σύστημα ελέγχου δίνει το σήμα έναρξης λειτουργίας της αντλίας μόλις η θερμοκρασία εξόδου στο συλλέκτη υπερβεί κάποια θερμοκρασία, ενώ σταματά μόλις η θερμοκρασία στη δεξαμενή ξεπεράσει κάποιο επιτρεπτό όριο.



Σχήμα 8.1.3: Ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού με αντλία. [164]

Ως συμπληρωματική πηγή θέρμανσης μπορεί να χρησιμοποιείται είτε η ηλεκτρική ενέργεια, είτε ένα συμβατικό σύστημα καυστήρα-λέβητα πετρελαίου, όπως βλέπουμε στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 8.1.4: Ηλιακό σύστημα σε συνδυασμό με λέβητα πετρελαίου. [164]

8.2 Πειραματική μελέτη δεξαμενής νερού ενεργητικού ηλιακού συστήματος με χρήση PCM: [166]

8.2.1 Εισαγωγή: [166]

Η αποθήκευση θερμότητας, όπως διαπιστώθηκε παραπάνω, αποτελεί ένα μείζον θέμα για της μεγάλης κλίμακας και μακροπρόθεσμη ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας για οικιακή θέρμανση και ψύξη υπό όλα τα κλίματα. Τα περισσότερα συστήματα αποθήκευσης που είναι διαθέσιμα στην αγορά χρησιμοποιούν το νερό ως μέσο αποθήκευσης. Η ενίσχυση της απόδοσης αποθήκευσης είναι απαραίτητη για να αυξηθεί η απόδοση των περισσότερων συστημάτων. Αυτό μπορεί να γίνει είτε μέσω αύξησης της πυκνότητας αποθήκευσης (ίδιος όγκος αποθήκευσης, αλλά περισσότερη ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να καταναλωθεί μετά), είτε μειώνοντας το κόστος της αποθήκευσης (μείωση των απωλειών, χρήση άλλων υλικών, χρήση άλλων σχεδίων).

Οι θερμικά διαστρωματοποιημένες δεξαμενές αποθήκευσης αποτελούν μια αποτελεσματική τεχνική αποθήκευσης θερμότητας και είναι ευρέως διαδεδομένες για την εξοικονόμηση ενέργειας και τις εφαρμογές διαχείρισης φορτίου. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα ηλιακής ενέργειας, αλλά και σε άλλες εφαρμογές, όπως η επαναχρησιμοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας.

Η θερμική διαστρωμάτωση προκύπτει όταν νερό διαφορετικών θερμοκρασιών περιέχεται σε μια δεξαμενή, επειδή μια μεταβολή θερμοκρασίας στο νερό οδηγεί σε διακύμανση της πυκνότητας, καθώς το ζεστό και το κρύο νερό διαχωρίζονται με τη βοήθεια βαρυτικής επίδρασης. Τα φαινόμενα διαστρωμάτωσης μπορούν να χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των δεξαμενών αποθήκευσης.

Παρά το γεγονός ότι το νερό είναι ένα φθινό και αποτελεσματικό μέσο για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας [167-171], υπάρχουν άλλες μέθοδοι που βρίσκονται υπό μελέτη σήμερα. Μέσα σε αυτές τις νέες τεχνολογίες, η χρήση αποθηκευτικών μέσων λανθάνουσας θερμότητας είναι η πιο δημοφιλής [172-178].

Για το λόγο αυτό, μελετήθηκε η προσθήκη ενός υλικού αλλαγής φάσης (PCM) στην κορυφή μιας δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού με διαστρωμάτωση. Τα πλεονεκτήματα της διαστρωμάτωσης εξακολουθούν να παραμένουν στο νέο αυτό σύστημα, αλλά η προσθήκη του PCM θα δώσει μεγαλύτερη πυκνότητα στην ανώτερη στρώση. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του τύπου συσσώρευσης θερμότητας είναι η καλή χρήση των χαμηλών θερμοκρασιών της θερμότητας ή / και της θερμότητας των αποβλήτων [179].

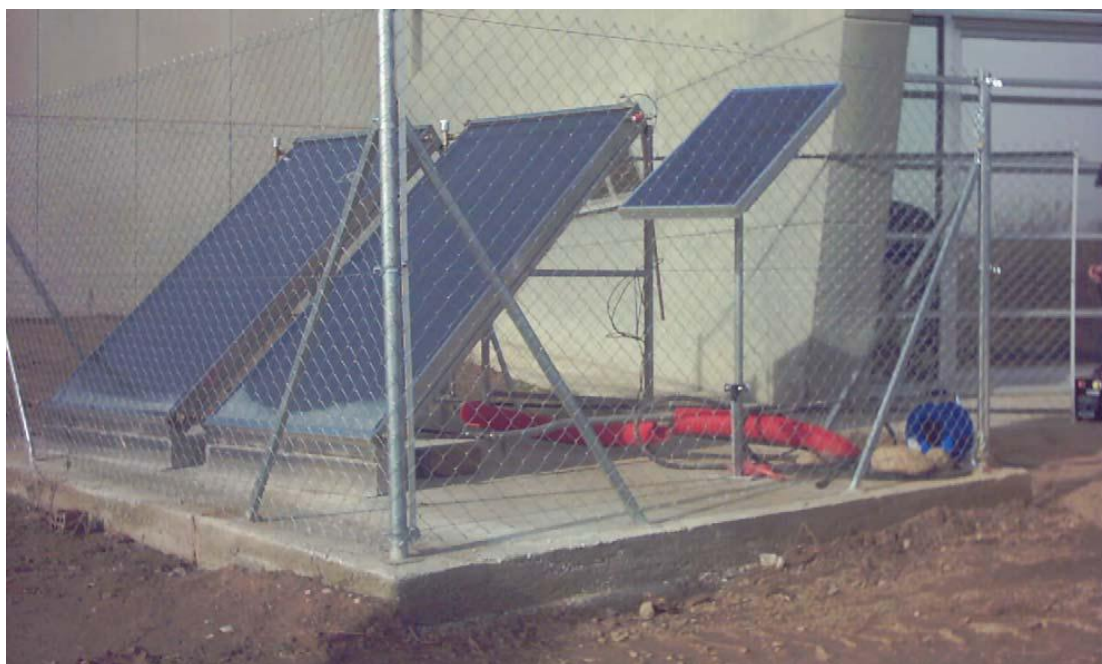
Το PCM, όπως γνωρίζουμε είναι ένα υλικό που αποθηκεύει ή παρέχει θερμότητα στη θερμοκρασία τήξης / στερεοποίησης του χρησιμοποιώντας την υψηλή του θερμική πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου, με τη βοήθεια λανθάνουσας θερμότητας, η οποία είναι μεγαλύτερη από την αισθητή θερμότητα. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η λανθάνουσα θερμότητα των μετασχηματισμών στερεού-αερίου, στερεού-υγρού και υγρού-αερίου αν και χρησιμοποιείται κυρίως ο μετασχηματισμός στερεού-υγρού λόγω της χαμηλότερης μεταβολής του όγκου του [180].

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας με PCM παρέχει υψηλής πυκνότητας αποθήκευση θερμότητας σε μικρή θερμοκρασιακή διαφορά, όπως συμβαίνει στο ανώτερο στρώμα μιας δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού με διαστρωμάτωση. Αυτό επιτρέπει τον ευνοϊκό συνδυασμό των δύο τεχνολογιών. Η χαμηλή τιμή και υψηλή ισχύς του νερού ως μέσο αποθήκευσης παραμένουν, ενώ μικρές ποσότητες PCM αυξάνουν σημαντικά την ικανότητα αποθήκευσης του ανώτερου στρώματος και βελτιώνουν την απόδοση της αποθήκευσης ειδικών φορτίων.

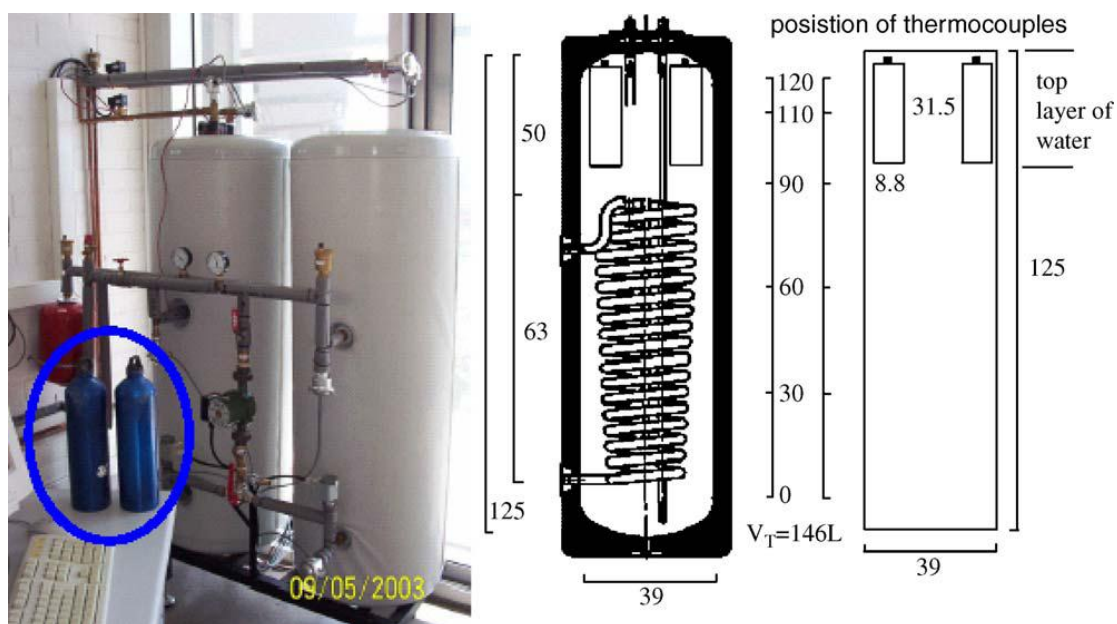
Το έργο που μελετάται εδώ είναι η ενσωμάτωση μιας μονάδας PCM σε μια δεξαμενή νερού σε μία πλήρη πιλοτική μονάδα ηλιακού συστήματος, όπου παρουσιάζεται η απόδοση της δεξαμενής νερού με διαφορετικές ποσότητες PCM.

8.2.2 Περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης:

Για να εξεταστεί η χρήση PCMs σε ένα πραγματικό σύστημα, κατασκευάστηκε ένα πειραματικό ηλιακό περίπτερο στο Πανεπιστήμιο της Lleida. Οι δύο παρακάτω εικόνες 8.2.2.1 και 8.2.2.2 απεικονίζουν την εγκατάσταση. Το περίπτερο είχε δύο θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες, δύο δεξαμενές ζεστού νερού από 146 lt η καθεμία και μια ηλεκτρική θερμάστρα έξω από τις δεξαμενές που προκαλούσε ηλεκτρική θέρμανση με γνωστή δύναμη όταν χρειαζόταν. Οι δύο δεξαμενές νερού ήταν πανομοιότυπες, αλλά η μία είχε τροποποιηθεί για να εισάγεται η συσκευασία του PCM. Η δεξιά δεξαμενή ήταν εξοπλισμένη με θερμοστοιχεία όπως δείχνει το σχήμα 8.2.2.2 για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στο νερό, σε διάφορα επίπεδα. Αυτό χρησίμευε στο να ελέγχεται κατά πόσον το νερό στη δεξαμενή παραμένει διαστρωματοποιημένο. Τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν στον κατακόρυφο σωλήνα που εκτείνεται στο εσωτερικό της δεξαμενής και λειτουργεί ως είσοδος ψυχρού ύδατος [179].



Σχήμα 8.2.2.1: Ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες από την Takama. [166]



Σχήμα 8.2.2.2: Δεξαμενές ζεστού νερού από την Lapresa και συσκευασίες PCM. [166]

Η πιλοτική μονάδα θα μπορούσε να λειτουργήσει συνεχώς με το ηλιακό σύστημα, γνωρίζοντας ότι η πρωτεύουσα αντλία λειτουργεί όταν η

θερμοκρασία του νερού της δεξαμενής είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία των συλλεκτών. Από την άλλη πλευρά, το σύστημα θα μπορούσε να λειτουργήσει και περιστασιακά με τη βοήθεια της ηλεκτρικής θερμάστρας.

Η ηλιακή εγκατάσταση σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε ένα πρωινό ντους ή ένα ζεστό μπάνιο το βράδυ μπορεί να προσομοιωθεί. Ένα πρόγραμμα υπολογιστή επέτρεπε τον έλεγχο του συστήματος ώστε να προσομοιώνεται μια συνηθισμένη λειτουργία των νοικοκυριών.

8.2.3 Η γεωμετρία της συσκευασίας του PCM:

Το πρώτο βήμα ήταν να αναλυθεί η σωστή γεωμετρία της συσκευασίας PCM και η επιρροή της στην απόδοση της δεξαμενής νερού. Προσομοιώθηκε η διαδικασία ψύξης του νερού από 65°C στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Το νερό ψυχόταν λόγω των θερμικών απωλειών στο περιβάλλον, με μόνωση 1,5 W/m² K. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις του συστήματος [180].

Από τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων, η λύση που επελέγη ήταν η χρήση διαφόρων κυλίνδρων στο πάνω μέρος της δεξαμενής νερού και όχι μόνο ένας. Ως εκ τούτου, πολλά πειράματα πραγματοποιήθηκαν με δύο, τέσσερις και έξι συσκευασίες PCM στην πραγματική εγκατάσταση που χτίστηκε στο Πανεπιστήμιο της Lleida.

Οι συσκευασίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν εμπορικές φιάλες αλουμινίου γεμάτες με σχεδόν ίσες ποσότητες του σύνθετου υλικού γραφίτη PCM. Οι διαστάσεις των φιαλών αυτών ήταν 8,8 cm διάμετρος και 31,5 cm ύψος, με χωρητικότητα 1,5 lt.

8.2.4 Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε:

Όπως και σε οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή, η επιλογή του PCM που χρησιμοποιείται είναι ένα κρίσιμο σημείο. Η θερμοκρασία του νερού προκειμένου αυτό να αποθηκευτεί ως ζεστό νερό οικιακής χρήσης είναι περίπου 60°C και ως εκ τούτου, η θερμοκρασία τήξεως του PCM θα πρέπει να είναι περίπου 60°C. Στην αγορά, μπορούν να εντοπιστούν διαφορετικά PCMs με αυτή τη θερμοκρασία τήξης [176]. Έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν πειράματα με παραφίνες, οξικό τριυδρικό νάτριο ακόμη και με λιπαρά οξέα [177,179,181] και, τελικά, το οξικό τριυδρικό νάτριο επιλέχθηκε για τα πειράματα που παρουσιάζονται εδώ.

Η υψηλή ταχύτητα μεταφοράς θερμότητας στο PCM είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση αυτού του νέου συστήματος [179]. Προηγούμενα πειράματα έδειξαν ότι αν και υπάρχουν πολλοί τρόποι για την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας στα PCMs, ο γραφίτης είναι η καλύτερη επιλογή σε αυτού του είδους τις εφαρμογές [182]. Κατά συνέπεια, τα κοκκώδη PCMs σύνθετου γραφίτη, που περιέχουν περίπου 90% κατ' όγκον οξικό νάτριο και 10% κατ' όγκον γραφίτη, επιλέχθηκαν ως PCMs. Τα υλικά αυτά επιλέχθηκαν και για τα κατάλληλα θερμικά τους δεδομένα καθώς επίσης και για τη χαμηλή τιμή τους.

Δεδομένα του σύνθετου γραφίτη PCM δόθηκαν από τους κατασκευαστές και περιλαμβάνουν: πυκνότητα 1,35-1,4 kg/lit, σημείο τήξης 58°C, θερμοχωρητικότητα 2,5 kJ/kg·K, ενθαλπία 180-200 kJ/kg και θερμική αγωγιμότητα 2-5 W/m·K.

8.2.5 Δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο σύστημα:

Αρκετές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν κατά το τελευταίο έτος για το συγκεκριμένο σύστημα. Οι δοκιμές αυτές είχαν ταξινομηθεί ως διαδικασίες ψύξης, αναθέρμανσης και ηλιακής ενέργειας.

Η διαδικασία ψύξης περιελάμβανε τη θέρμανση της δεξαμενής νερού έως τους 80°C και στη συνέχεια την ψύξη της με φυσική συναγωγή, μέσω του τοιχώματος της δεξαμενής. Η δοκιμή αυτή γινόταν χωρίς τη χρήση ηλιακών συλλεκτών.

Στη δοκιμή αναθέρμανσης η δεξαμενή νερού θερμαινόταν μέχρι τους 80°C ώστε να διασφαλιστεί ότι το PCM είχε λιώσει, και στη συνέχεια η δεξαμενή άδειαζε και ξαναγέμιζε με καθαρό κρύο νερό. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, αυξανόταν η θερμοκρασία του νερού στο πάνω μέρος της δεξαμενής, το οποίο αναθερμαίνονταν από τη συσκευασία του PCM.

Η τρίτη σειρά δοκιμών έγινε με το ηλιακό σύστημα. Η εγκατάσταση λειτουργούσε με τους ηλιακούς συλλέκτες, τις αντλίες και τις δεξαμενές. Όταν το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε με τους ηλιακούς συλλέκτες, προσομοιώθηκε ένα πρωινό πεντάλεπτο ντους για να αποφορτίσει το σύστημα. Στη συνέχεια, το κρύο νερό έρεε στη δεξαμενή και η κορυφή της δεξαμενής αναθερμαίνονταν από την ενέργεια που είχε αποθηκευτεί στις συσκευασίες των PCMs.

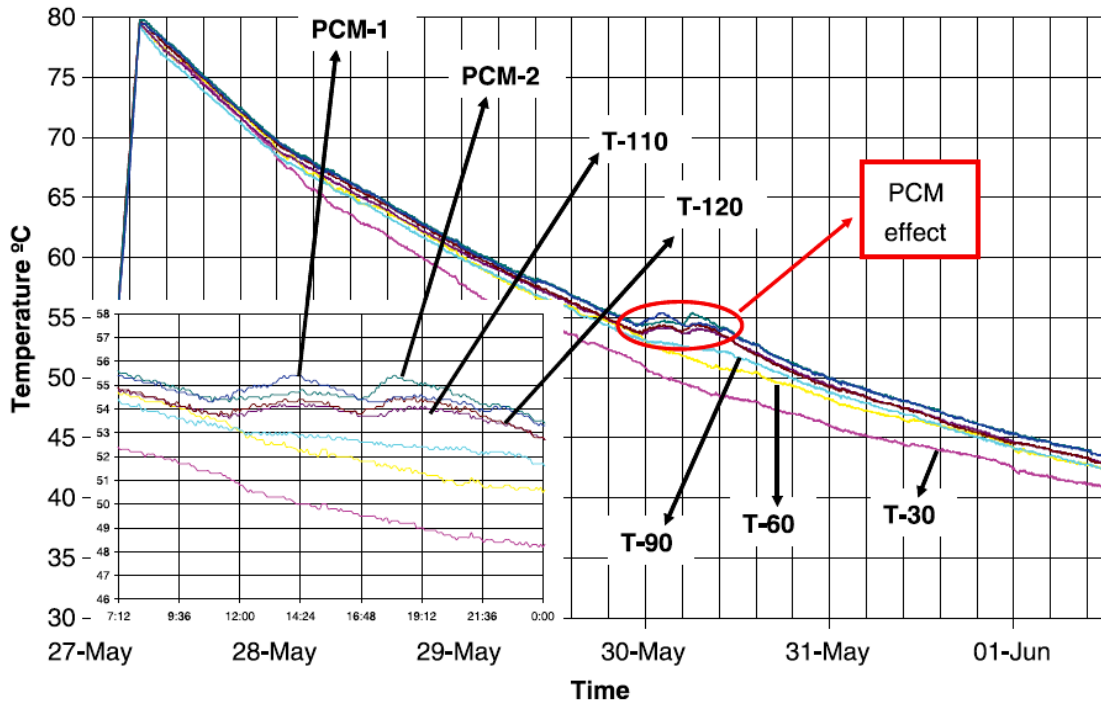
8.2.6 Αποτελέσματα δοκιμών:

Η εικόνα 8.2.6.1 δείχνει τα πρώτα αποτελέσματα των δοκιμών. Αυτά τα πειράματα έγιναν με τη χρήση δύο συσκευασιών PCM συνολικής ποσότητας περίπου 2,1 kg, όγκου 3 lt και 2,05% κατ' όγκον του συνολικού όγκου της δεξαμενής. Με βάση τα πειράματα αυτά υπολογίστηκε αύξηση της

ενεργειακής πυκνότητας της δεξαμενής της τάξης του 40%. Αυτή η ενεργειακή πυκνότητα υπολογίζεται συγκρίνοντας την αισθητή θερμότητα που αποθηκεύεται στη δεξαμενή όταν υπάρχει μόνο νερό εκεί, με την αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα που αποθηκεύεται στο νερό, όταν υπάρχουν συσκευασίες PCM. Η διαφορά θερμοκρασίας που εξετάζεται στην παρούσα δοκιμή είναι 1K. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας θεωρείται 8K (όπως φαίνεται στην εικόνα 8.2.6.3), τότε η ενεργειακή πυκνότητα αυξάνεται 6%.

Με τέσσερις συσκευασίες, δηλαδή 4,2 kg PCM, 6 lt και 4,1% κατ' όγκον του συνολικού όγκου της δεξαμενής, η αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας της δεξαμενής ήταν περίπου 57,2% με 1K διαφορά θερμοκρασίας, και 12% με διαφορά θερμοκρασίας 8K. Με έξι συσκευασίες, που σημαίνει 6,3 kg PCM, 9 lt και 6,16% κατ' όγκον του συνολικού όγκου της δεξαμενής, η αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας της δεξαμενής ήταν περίπου 66,7% με διαφορά θερμοκρασίας 1K, και 16% με θερμοκρασιακή διαφορά 8K. Ο πίνακας 8.2.6.1 παρουσιάζει μια περίληψη αυτών των συνδυασμών.

Στις δοκιμές ψύξης με δύο συσκευασίες, η επίδραση ήταν αισθητή στα στρώματα 110 και 120 εκατοστών της δεξαμενής νερού (μηδέν εκατοστά θεωρείται στο κάτω μέρος της δεξαμενής), αλλά όχι στο στρώμα 90 εκατοστών, όπως φαίνεται στην εικόνα 8.2.6.1. Λαμβάνοντας υπόψη την αρχική θερμοκρασία της αλλαγής φάσης για στερεά κατάσταση στους 54°C, μπορεί να διαπιστωθεί ότι στα δύο ανώτερα στρώματα η θερμοκρασία διατηρούνταν κοντά στους 54°C για κάποιο χρονικό διάστημα μεταξύ 10 και 12 ωρών, σε αντίθεση με τα επόμενα στρώματα.



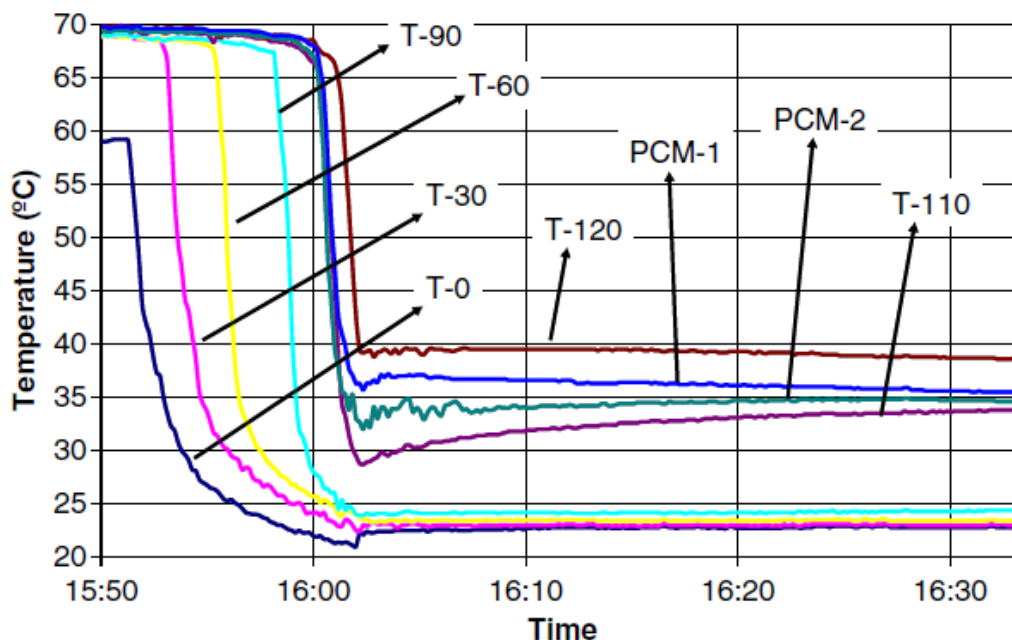
Σχήμα 8.2.6.1: Δοκιμή ψύξης σε δεξαμενή δύο συσκευασιών PCM. [166]

Πίνακας 8.2.6.1: Συσκευασίες PCM στους προτεινόμενους συνδυασμούς. [166]

No. modules	PCM mass (kg)	Volume occupied (%)	Energy density increase (%) ($\Delta T = 1 \text{ K}$)	Energy density increase (%) ($\Delta T = 8 \text{ K}$)
2	2.1	2.05	40	6
4	4.2	4.1	57.2	12
6	6.3	6.16	66.7	16.4

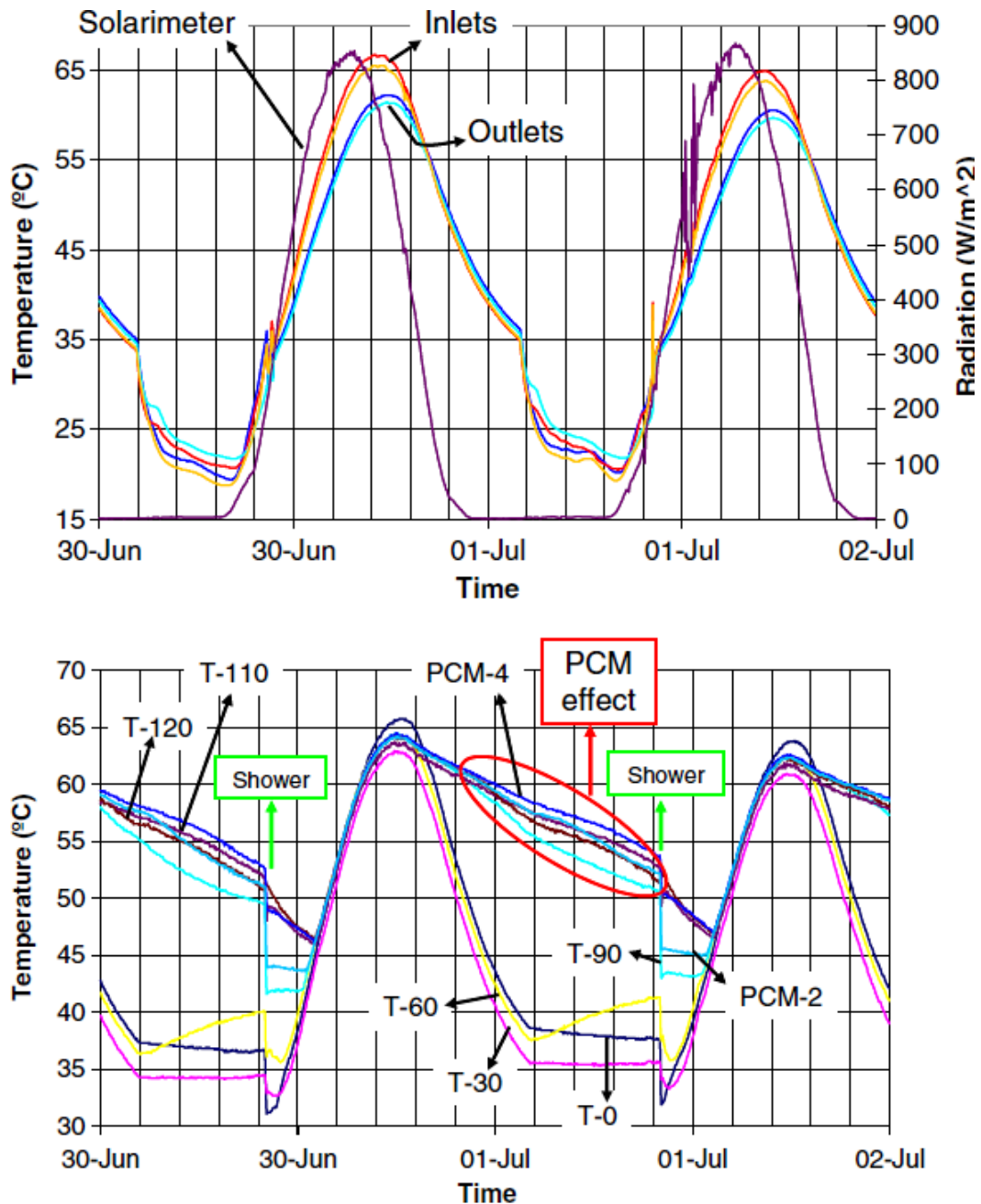
Εν γένει όταν πραγματοποιείται ένα πείραμα αναθέρμανσης, το κρύο νερό μέσα στη δεξαμενή θα αυξήσει τη θερμοκρασία του. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας ονομάζεται θεωρητική θερμοκρασία αντιστάθμισης. Στο πείραμα που περιγράφεται παραπάνω, η θεωρητική θερμοκρασία αντιστάθμισης των $3,18^{\circ}\text{C}$ επιτεύχθηκε στα στρώματα που καταλαμβάνονταν από τις συσκευασίες των PCM. Η εικόνα 8.2.6.2 δείχνει ότι υπήρχε πρόσθετος

χρόνος περίπου 30 λεπτών με ζεστό νερό (γύρω στους 35°C) το οποίο θερμάνθηκε με την αποθηκευμένη ενέργεια στις συσκευασίες PCM.



Σχήμα 8.2.6.2: Δεξαμενή αναθέρμανσης με δύο συσκευασίες PCM μετά την πλήρη εκκένωσή της. [166]

Η ηλιακή ακτινοβολία έχει άμεσες επιπτώσεις στη θερμοκρασία των συλλεκτών, όπως διαπιστώθηκε από τις ηλιακές δοκιμές με τέσσερις συσκευασίες PCM (εικόνα 8.2.6.3), και κατά συνέπεια επηρεάζει τη θερμοκρασία της δεξαμενής. Το νερό που βρίσκεται σε επαφή με το PCM κρυώνει πιο αργά από το υπόλοιπο όταν δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό οφείλεται στο ότι το PCM ζεσταίνει το νερό γύρω από τη συσκευή παρόλο που η θερμοκρασία μειώνεται συνεχώς, διότι οι θερμικές απώλειες είναι μεγαλύτερες από την ενέργεια που δίνει το PCM στο νερό. Η προσομοίωση που έγινε στα πλαίσια των δοκιμών αυτών έδειξε την ξαφνική μείωση της θερμοκρασίας στα ανώτερα στρώματα.

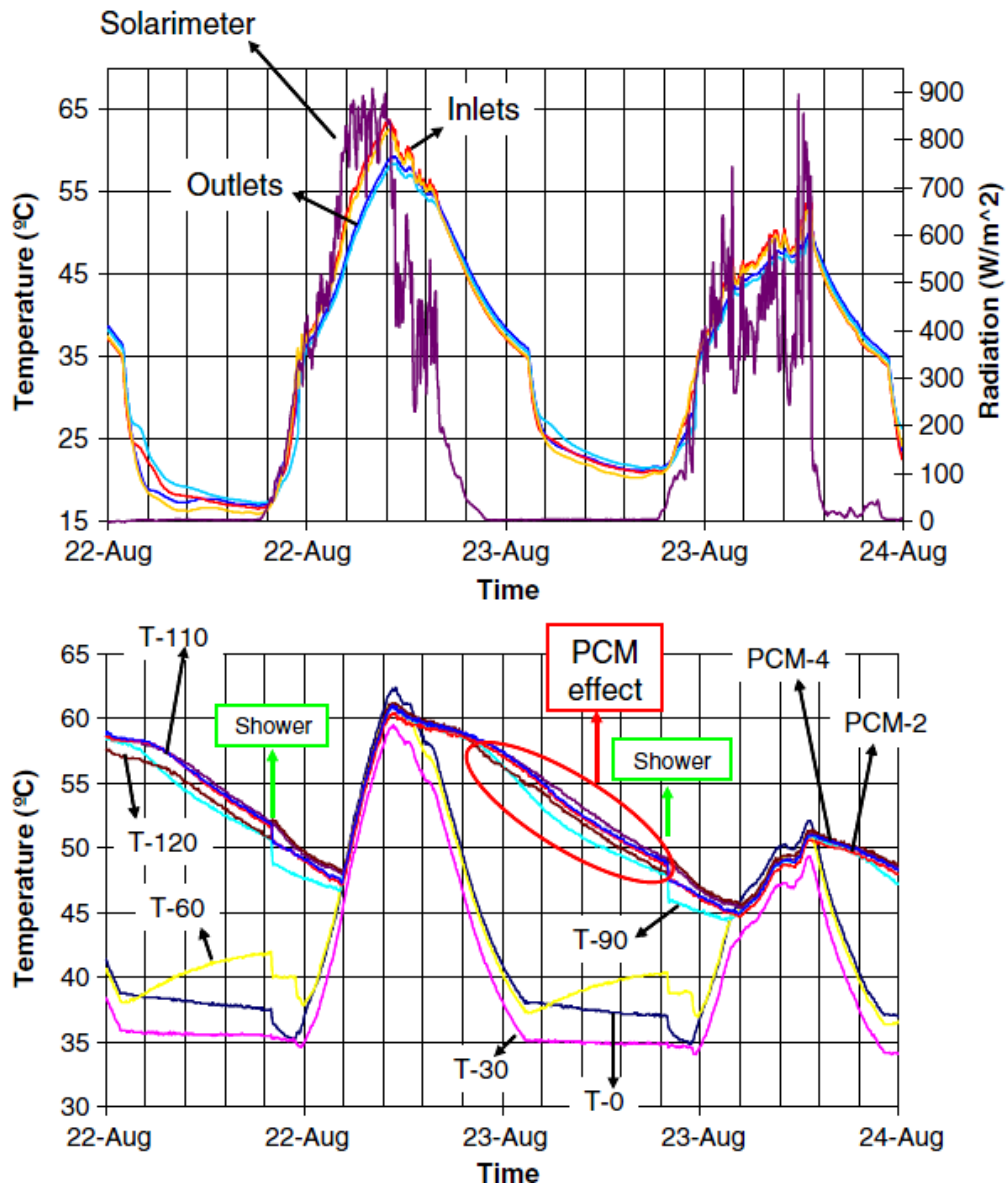


Σχήμα 8.2.6.3: Αποτελέσματα με τέσσερις συσκευασίες PCM στο ηλιακό σύστημα.

Πάνω: ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ηλιακών συλλεκτών. Κάτω: PCM και στρώματα θερμοκρασιών. [166]

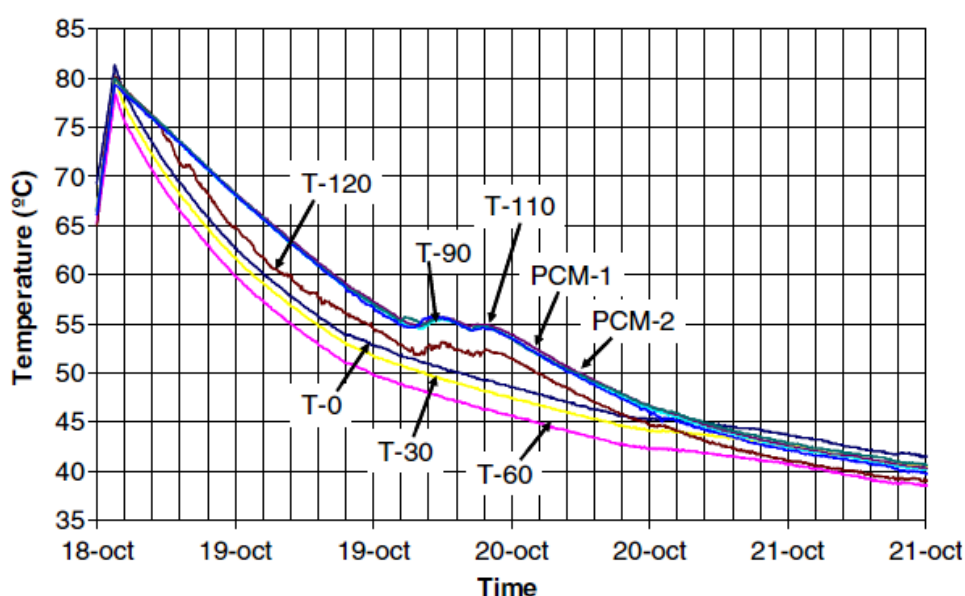
Με έξι συσκευασίες, οι δοκιμές έδειξαν παρόμοια αποτελέσματα όπως φαίνεται στην εικόνα 8.2.6.4. Μια διαφορά που παρατηρήθηκε είναι ότι η θερμοκρασία στα 90 εκατοστά ήταν πολύ κοντά στη θερμοκρασία των ανώτερων στρωμάτων. Αυτό το φαινόμενο δεν παρατηρήθηκε στα πειράματα

των τεσσάρων συσκευασιών. Ωστόσο, δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στη λειτουργία του ηλιακού συστήματος με τέσσερις ή με έξι συσκευασίες PCM.



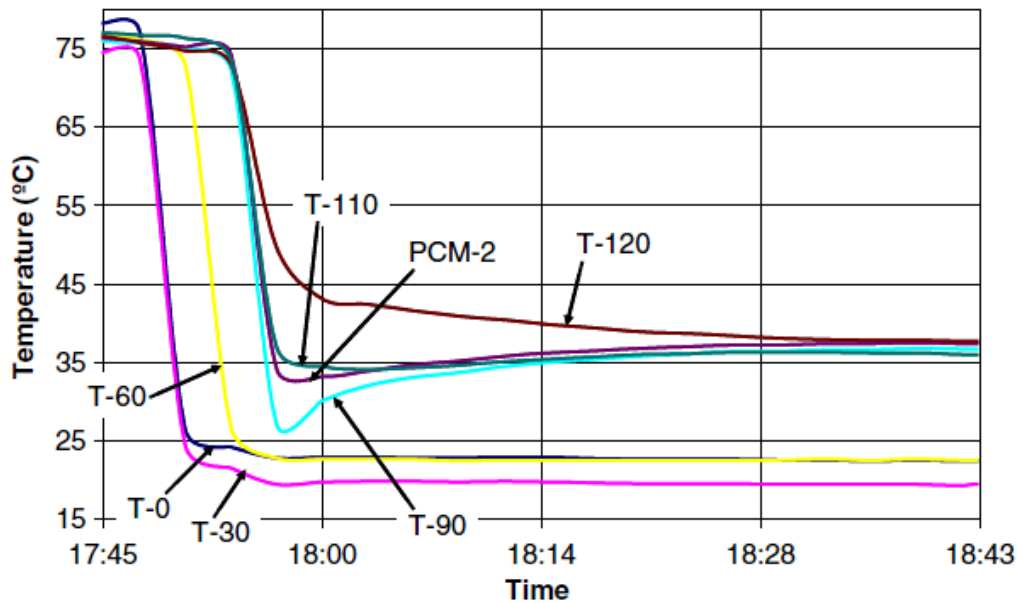
Σχήμα 8.2.6.4: Αποτελέσματα με έξι συσκευασίες PCM στο ηλιακό σύστημα. Πάνω: ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ηλιακών συλλεκτών. Κάτω: PCM και στρώματα θερμοκρασιών. [166]

Στις δοκιμές ψύξης με έξι συσκευασίες PCM, η επίδραση ήταν αισθητή στα 90, 110 και 120 εκατοστά των στρώματων της δεξαμενής νερού, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Λαμβάνοντας υπόψη την αρχική θερμοκρασία της αλλαγής φάσης σε στερεή κατάσταση που είναι 54°C, όπως και στην περίπτωση με τις δύο συσκευασίες, υπάρχει μια χρονική περίοδος μεταξύ 10-12 ωρών, όπου τα στρώματα στα εκατοστά 90, 110 και 120 ήταν θερμότερα από τους 54°C. Είναι σημαντικό να επισημάνουμε αυτό το αποτέλεσμα, διότι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε αυτή τη δοκιμή ήταν χαμηλότερη από εκείνη του πειράματος με τις δύο συσκευασίες, επομένως οι θερμικές απώλειες ήταν υψηλότερες σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 8.2.6.5: Δοκιμή ψύξης σε δεξαμενή έξι συσκευασιών PCM. [166]

Εξάλλου, μια θεωρητική θερμοκρασία αντιστάθμισης γύρω στους 12,6°C θα μπορούσε να επιτευχθεί στα στρώματα που καταλαμβάνονται από τις συσκευασίες PCM. Η παρακάτω εικόνα δείχνει ότι υπήρχε ένα επιπλέον χρονικό διάστημα περίπου 45 λεπτών με ζεστό νερό (γύρω στους 36-38°C) το οποίο θερμάνθηκε με την αποθηκευμένη ενέργεια στις συσκευασίες PCM.



Σχήμα 8.2.6.6: Δεξαμενή αναθέρμανσης με έξι συσκευασίες PCM μετά την πλήρη εκκένωσή της. [166]

8.2.7 Συμπεράσματα:

Μια πειραματική πλοτική ηλιακή μονάδα κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο της Lleida προκειμένου να δοκιμαστεί η συμπεριφορά των PCMs σε πραγματικές συνθήκες, τα οποία θα μπορούσαν να εργάζονται συνεχώς με το ηλιακό σύστημα, ή να συνεργάζονται με μια ηλεκτρική θερμάστρα. Η γεωμετρία των χρησιμοποιούμενων συσκευασιών PCM αποτελούνταν από διάφορους κυλίνδρους στο πάνω μέρος της δεξαμενής νερού. Αρκετά πειράματα με δύο, τέσσερις και έξι συσκευασίες PCM πραγματοποιήθηκαν στην εγκατάσταση αυτή. Ως υλικό αλλαγής φάσης για τα εν λόγω πειράματα επιλέχθηκε ένα κοκκώδες PCM από σύνθετο γραφίτη με σύσταση περίπου 90% κατ' όγκον τριυδρικό οξικό νάτριο και 10% κατ' όγκον γραφίτη.

Πραγματοποιήθηκαν αρκετές δοκιμές οι οποίες είχαν ταξινομηθεί ως διαδικασίες ψύξης, αναθέρμανσης και ηλιακή λειτουργία. Χρησιμοποιώντας

δύο συσκευασίες (περίπου 2,1 kg PCM), σε όγκο 3 lt (2,05% κατ' όγκον της δεξαμενής), υπολογίστηκε μια αύξηση της τάξης του 40% της ενεργειακής πυκνότητας της δεξαμενής (με διαφορά θερμοκρασίας 1K), και 6% με διαφορά θερμοκρασίας 8K. Λαμβάνοντας υπόψη την αρχική θερμοκρασία της αλλαγής φάσης σε στερεά κατάσταση, στους 54°C, μπορεί να διαπιστωθεί ότι τα δύο ανώτερα στρώματα διατηρούν τη θερμοκρασία κοντά στους 54°C για ένα χρονικό διάστημα μεταξύ 10 και 12 ωρών.

Με τέσσερις συσκευασίες (4,2 kg PCM), 6 lt, 4,1% κατ' όγκον, η αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας με διαφορά θερμοκρασίας 1K ήταν περίπου 57,2%, και με διαφορά θερμοκρασίας 8K ήταν 12%. Τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια σε ηλιακή λειτουργία για τέσσερις και έξι συσκευασίες. Με έξι συσκευασίες (6,3 kg PCM), 9 lt, 6,16% κατ' όγκον, η ενεργειακή πυκνότητα αυξήθηκε περίπου στο 66,7% με διαφορά θερμοκρασίας 1K, και στο 16,4% με διαφορά θερμοκρασίας 8K για μια χρονική περίοδο, μεταξύ 10-12 ωρών, όταν τα στρώματα των 90, 110 και 120 εκατοστών ήταν κοντά στους 54°C, αλλά με υψηλότερες θερμικές απώλειες, και για ένα επιπλέον χρονικό διάστημα περίπου 45 λεπτών με ζεστό νερό (γύρω στους 36-38°C) το οποίο θερμαίνεται από τις συσκευασίες PCM.

Τα πειράματα αυτά έδειξαν ότι η συσκευασία PCM σε δεξαμενές νερού για οικιακή παροχή ζεστού νερού είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία. Θα επιτρέψει την παροχή ζεστού νερού για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, ακόμη και χωρίς εξωτερική παροχή ενέργειας, ή τη χρήση μικρότερων δεξαμενών για τον ίδιο σκοπό.

Κεφάλαιο 9

Συσκευασία PCM για τη βελτίωση αποθήκευσης της θερμότητας του ζεστού νερού χρήσης σε δεξαμενή διαστρωμάτωσης [183]

9.1 Εισαγωγή:

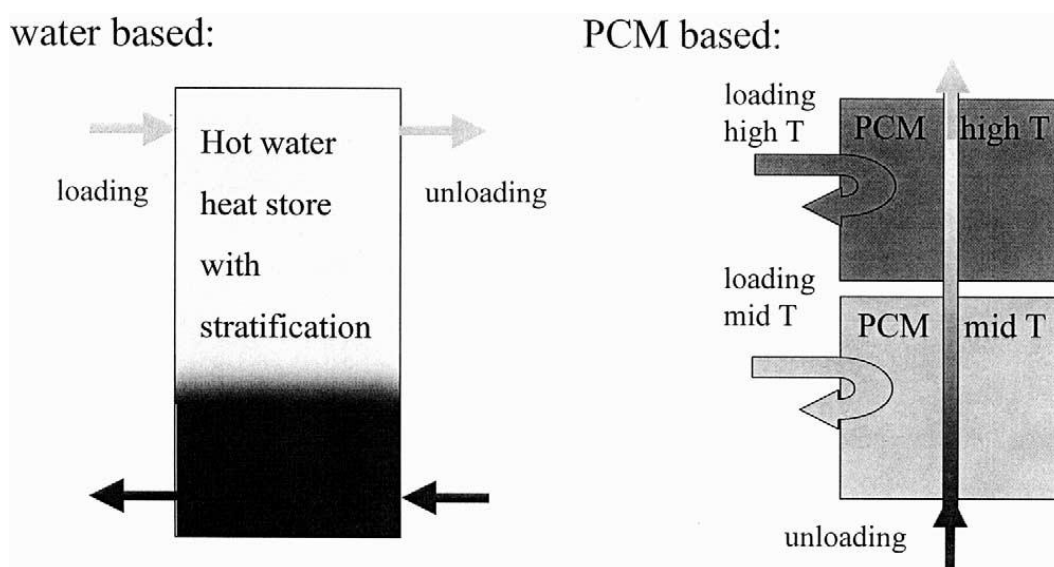
Οι διαστρωματοποιημένες δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας αποτελούν μια ιδιαίτερα αποτελεσματική τεχνική, ευρέως διαδεδομένη σε εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας και μετατόπισης φορτίου. Όπως διαπιστώσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι δεξαμενές αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως σε ηλιακά συστήματα αλλά και σε άλλες εφαρμογές όπως η επαναχρησιμοποίηση αποβαλλόμενης θερμότητας.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε γνωστό πως όταν νερό διαφορετικών θερμοκρασιών βρίσκεται σε μία δεξαμενή, προκαλείται θερμική διαστρωμάτωση επειδή οι ποικίλες θερμοκρασίες δημιουργούν διαφορά πυκνότητας στο νερό αυτό. Έτσι, το ζεστό νερό βρίσκεται στην κορυφή της δεξαμενής και το κρύο στον πάτο όπως εξηγείται από τα φαινόμενα βαρύτητας. Η θερμική αυτή διαστρωμάτωση, όπως θα αποδειχτεί μέσω της συγκεκριμένης μελέτης, χρησιμοποιείται για να βελτιώσει την απόδοση των δεξαμενών αποθήκευσης καθώς η θερμότητα σε μια ενδιάμεση θερμοκρασία, όχι ιδιαίτερα υψηλή ώστε να θερμάνει περαιτέρω το ανώτερο ζεστό στρώμα της δεξαμενής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να θερμάνει τα κατώτερα κρύα στρώματα.

Έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμα πειράματα και μελέτες για την απόδοση αυτού του είδους των δεξαμενών χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικές συνθήκες και διαφορετικές σχεδιαστικές παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν εσωτερικές και εξωτερικές τοποθεσίες, το σχήμα του εσωτερικού διαχύτη, εσωτερικές ταχύτητες και θερμοκρασίες κ.α. Οι παράμετροι όμως που επηρεάζουν περισσότερο τη μείωση της θερμικής

διαστρωμάτωσης είναι η συναγωγή θερμότητας στην επιφάνεια της δεξαμενής και οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον.

Από τη μελέτη του προηγούμενου κεφαλαίου διαπιστώθηκε ότι η αποθήκευση θερμότητας με διαφορετικές θερμοκρασίες σε αυτές τις δεξαμενές μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση δύο ή περισσότερων συσκευασιών υλικών αλλαγής φάσης. Η αποθήκευση της θερμότητας μπορεί να γίνει σε κάθε συσκευή ξεχωριστά έχοντας την κατάλληλη θερμοκρασία, ενώ η απόδοση της θερμότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια ενός σωλήνα, ο οποίος διαπερνά τις συσκευασίες αυτές, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



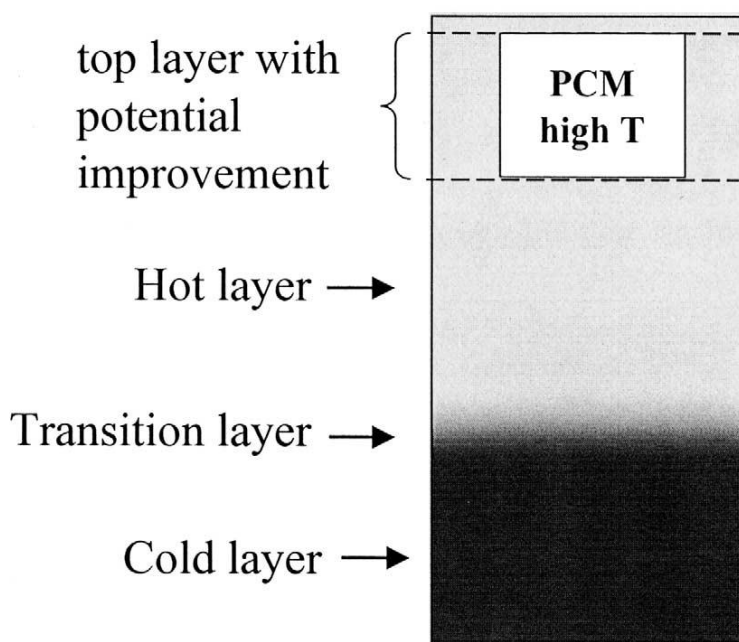
Σχήμα 9.1.1: Αποθήκευση θερμότητας σε διαφορετικά θερμοκρασιακά επίπεδα.

Αριστερά: σε δεξαμενή νερού.

Δεξιά: σε δεξαμενή με PCM. [183]

Το παραπάνω σύστημα αποθήκευσης θερμότητας παρουσιάζει το πλεονέκτημα της καλής χρήσης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας ή / και αποβαλλόμενης θερμότητας.

Το PCM είναι κατάλληλο για υψηλή ενεργειακή πυκνότητα όταν υπάρχει μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας, επειδή τότε η λανθάνουσα θερμότητα είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αισθητή. Από την άλλη μεριά, η μεταβολή θερμοκρασίας στο ανώτερο στρώμα μιας δεξαμενής αποθήκευσης με διαστρωμάτωση είναι συνήθως μικρή καθώς επιδιώκεται να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στη θερμοκρασία χρήσης. Στη συγκεκριμένη μελέτη, προστέθηκε μια συσκευασία PCM στην κορυφή μιας δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού με διαστρωμάτωση. Τα πλεονεκτήματα της διαστρωμάτωσης εξακολουθούν να ισχύουν σε αυτή την περίπτωση, αλλά η προσθήκη του PCM θα προσφέρει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης στο ανώτερο στρώμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.1.2.



Σχήμα 9.1.2: Αποθήκευση θερμότητας σε δεξαμενή με PCM. [183]

Τα πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος γίνονται φανερά με το παρακάτω παράδειγμα. Στην κορυφή μιας δεξαμενής τοποθετείται PCM το οποίο καλύπτει το 50% της ακτίνας της δεξαμενής και το 25% του ύψους της δηλ. το 6% του συνολικού όγκου καλύπτεται από το PCM. Έτσι, στο ανώτερο

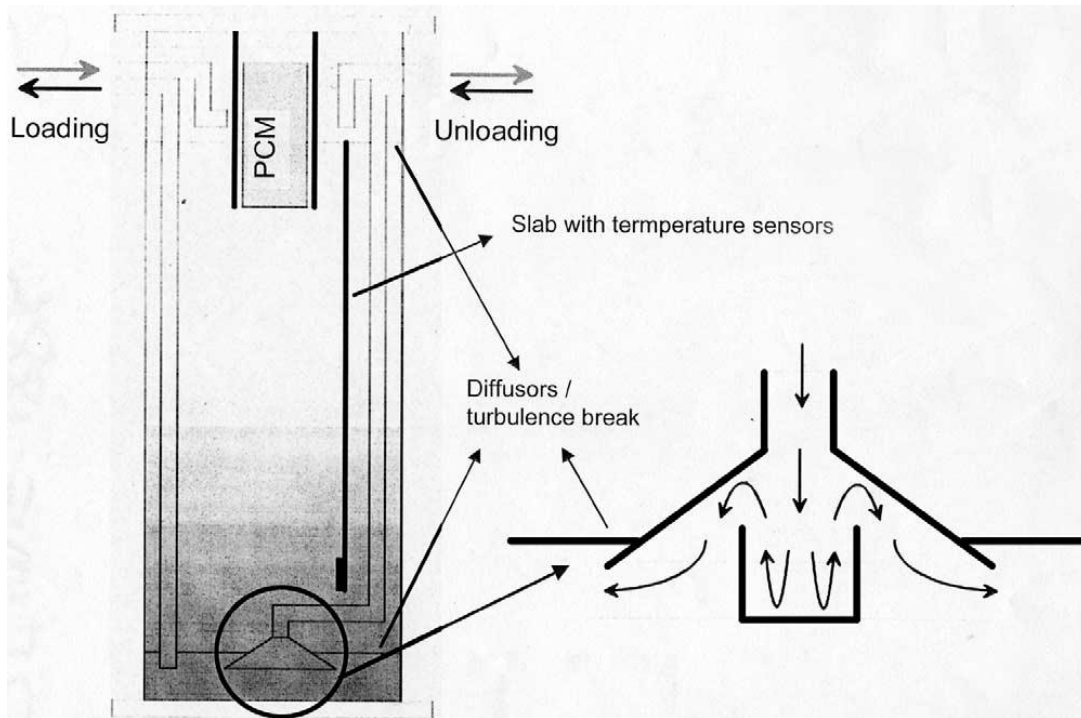
στρώμα το ένα τέταρτο του όγκου αποτελεί το PCM και το υπόλοιπο είναι νερό.

Αν υποθέσουμε ότι το PCM έχει ενθαλπία ίση με 300 kJ/lt, τότε η λανθάνουσα θερμότητα της συσκευασίας PCM μπορεί να θερμάνει το νερό στην κορυφή της δεξαμενής, το οποίο έχει όγκο τριπλάσιο από το PCM, σε θερμοκρασία 25°C. Επομένως, για το σύστημα αποθήκευσης προκύπτουν αμέσως τρία πλεονεκτήματα:

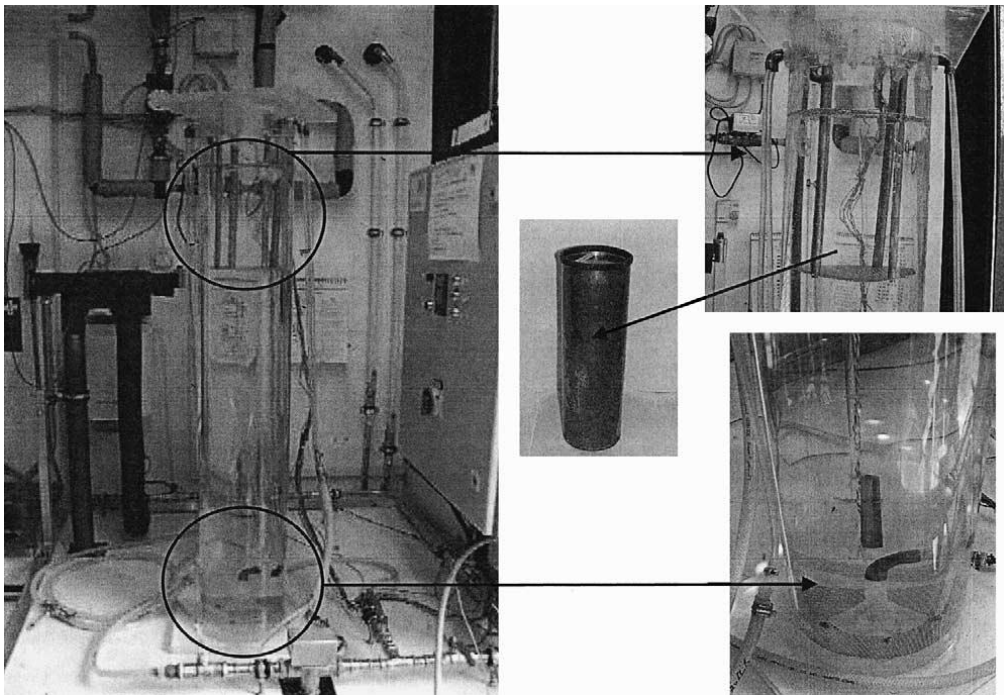
- Αυξήθηκε η πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας της δεξαμενής.
- Η απώλεια θερμότητας των 25°C μπορεί να αντισταθμιστεί από τη λανθάνουσα θερμότητα της συσκευασίας PCM.
- Είναι δυνατό να αναθερμανθεί το μεταβατικό στρώμα μετά την απόδοση της θερμότητας.

9.2 Πειραματική διάταξη:

Για να πραγματοποιηθούν τα πειράματα, κατασκευάστηκε μια κυλινδρική κατακόρυφη δεξαμενή όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Η δεξαμενή έχει διάμετρο 20 cm και ύψος 120 cm. Το υλικό κατασκευής της είναι μεθακρυλίτης και παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα: έχει τη δυνατότητα να φαίνεται το εσωτερικό της δεξαμενής και να ελαχιστοποιείται η μεταφορά θερμότητας προς το περίβλημα της δεξαμενής. Για τα εν λόγω πειράματα η δεξαμενή είναι μονωμένη με δύο διαφορετικά υλικά με συντελεστές απώλειας θερμότητας 5 W/m²·K και 1,5 W/m²·K. Στο εσωτερικό της δεξαμενής τοποθετήθηκαν 10 θερμοστοιχεία, σε απόσταση 10 cm μεταξύ τους, προκειμένου να καταγράψουν τη θερμοκρασία των διαφόρων στρωμάτων. Ακόμη, καταγράφηκαν οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του νερού καθώς επίσης και η θερμοκρασία του δωματίου.



Σχήμα 9.2.1: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης. [183]



Σχήμα 9.2.2: Η πειραματική διάταξη. [183]

Όλα τα στόμια εισόδου και εξόδου έχουν εισαχθεί από την κορυφή της δεξαμενής. Το κρύο νερό μεταφέρεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής με ένα σωλήνα από καουτσούκ, μέσα σε ένα σωλήνα ακρυλικό γυαλί. Το κάτω στόμιο εξόδου ήταν σχεδιασμένο για να ελαχιστοποιεί την τυρβώδη ροή κατά τη διάρκεια λειτουργίας της εγκατάστασης, και επιπλέον είχε συμπεριληφθεί ένα φρένο στο μηχανισμό της τυρβώδους ροής.

Η συσκευασία PCM προσαρτήθηκε στη δεξαμενή χρησιμοποιώντας ένα ράφι που της επέτρεπε να αλλάζει φάση εύκολα. Οι συσκευασίες αποτελούνται από έναν ορειχάλκινο κύλινδρο, με διάμετρο 10 cm και ύψος 30 cm και γεμίζουν με PCM (6% του συνολικού όγκου των δεξαμενών περιέχει PCM). Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ένα σύνθετο υλικό PCM και γραφίτη με βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα μεταξύ 20 W/m·K και 30 W/m·K [13, 16, 184]. Η θερμοκρασία του PCM καταγράφηκε στο πάνω μέρος της συσκευασίας του.

9.3 Αριθμητικό μοντέλο:

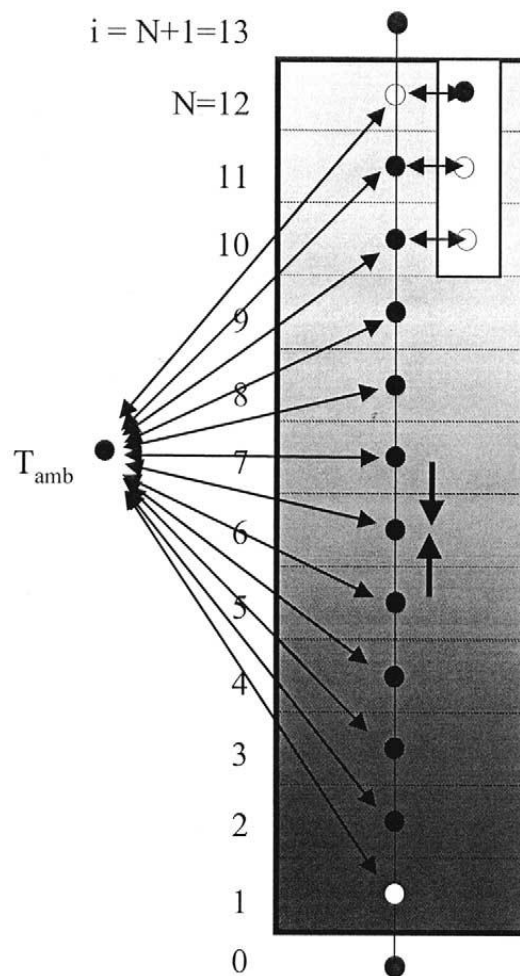
Επινοήθηκε μία αριθμητική μέθοδος για την προσομοίωση της απόδοσης της αποθήκευσης ενέργειας στη συσκευασία PCM χρησιμοποιώντας μία εξειδικευμένη διαφορική μέθοδο [14].

Η διακριτοποίηση του μοντέλου παρουσιάζεται στην εικόνα 9.3.1. Η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας ύψους 120 cm και διαμέτρου 20 cm, όπως περιγράφηκε παραπάνω, χωρίζεται σε 12 στρώματα, πάχους 10 cm το καθένα. Κάθε στρώμα αντιπροσωπεύεται από ένα βήμα με μια θερμοκρασία. Τα τρία ανώτερα στρώματα περιέχουν τις συσκευασίες PCM και αναπαριστώνται με τον ίδιο τρόπο όπως τα στρώματα νερού.

Τα θερμικά φαινόμενα που λαμβάνονται υπόψη στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι τα ακόλουθα:

- Μεταφορά θερμότητας από το ένα στρώμα νερού στο επόμενο.
- Θερμικές απώλειες από το νερό στο περιβάλλον.
- Μεταφορά θερμότητας μεταξύ PCM και νερού.
- Θερμικές απώλειες από το PCM.

Οι θερμοκρασίες διακριτοποιούνται ως T_{ij} όπου το j αντιστοιχεί στο χρονικό βήμα και το i στο χωρικό βήμα. Οι μαύρες τελείες στην εικόνα 9.5 είναι τα βήματα όπου τα θερμοστοιχεία καταγράφουν τις θερμοκρασίες στα πειράματα.



Σχήμα 9.3.1: Μοντελοποίηση της κάθετης κυλινδρικής δεξαμενής που χρησιμοποιείται στα πειράματα. [183]

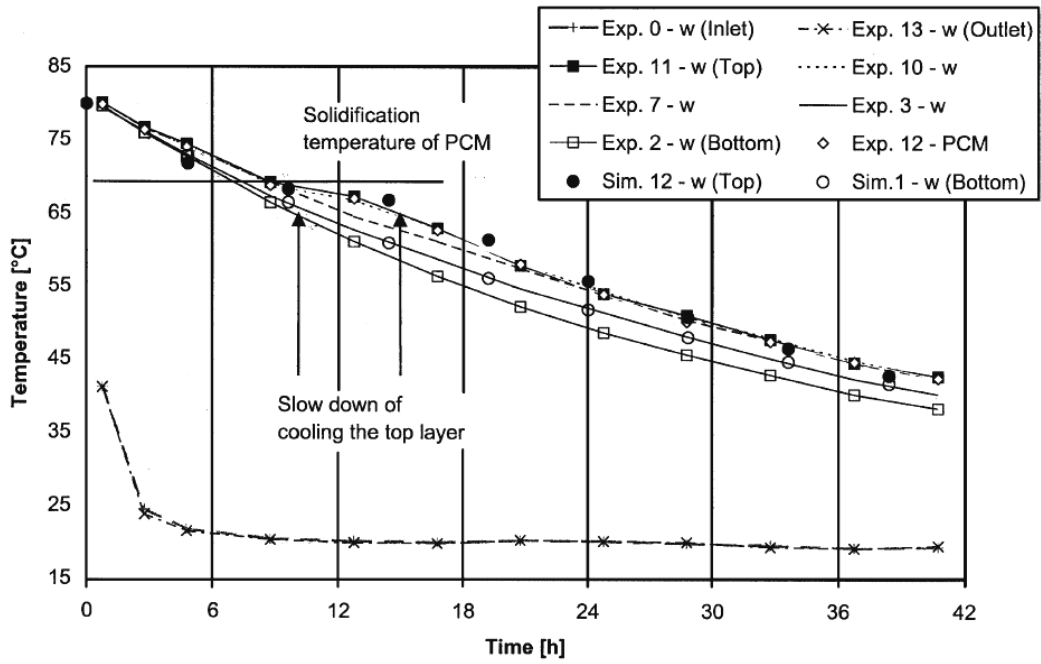
9.4 Εξακρίβωση της εγκυρότητας του αριθμητικού μοντέλου:

Κατ' αρχήν, η πειραματική διάταξη ελέγχθηκε πραγματοποιώντας διάφορα πειράματα. Τα πρώτα πραγματοποιήθηκαν χωρίς να υπάρχουν οι συσκευασίες PCM στη δεξαμενή νερού. Αυτά τα πειράματα περιελάμβαναν φόρτιση και αποφόρτιση της δεξαμενής, θερμική χαλάρωση του μεταβατικού στρώματος, ψύξη χωρίς μόνωση ($7,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) και με μόνωση ($5,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Επίσης πραγματοποιήθηκε πείραμα ψύξης της δεξαμενής όταν βρισκόταν μέσα η συσκευασία PCM με παραφίνη RT50. Τα παραπάνω πειράματα έδειξαν ότι οι απώλειες θερμότητας ήταν αρκετά μεγαλύτερες από τα συμβατικά μέσα αποθήκευσης, επομένως μετά τα πειράματα, η μόνωση της δεξαμενής αυξήθηκε στο $1,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

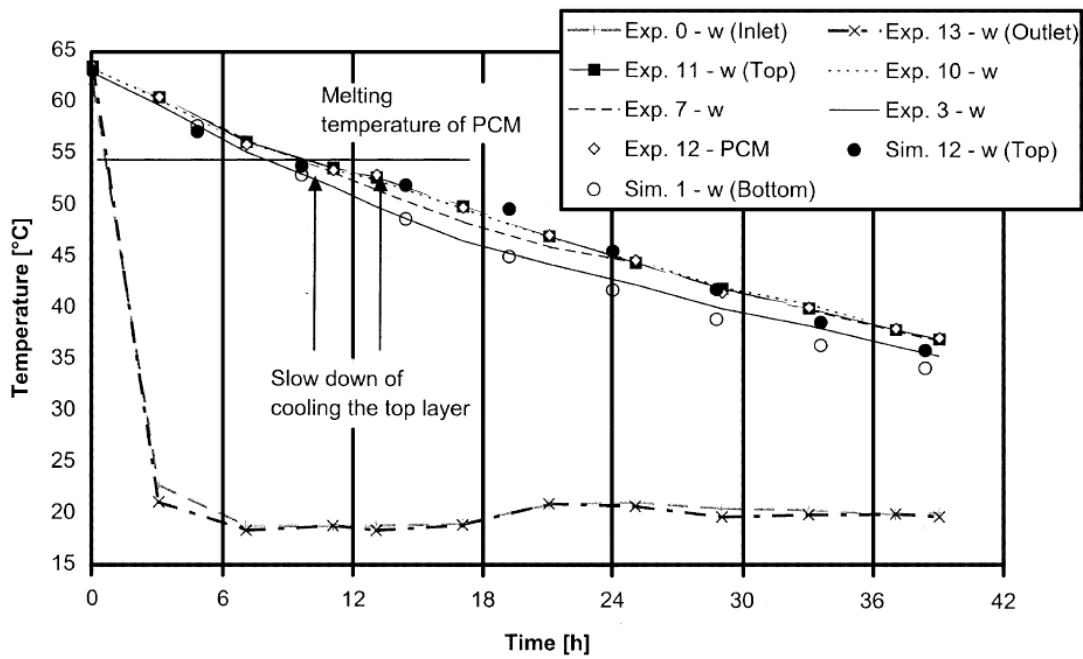
Η εγκυρότητα του μοντέλου εξακριβώθηκε πραγματοποιώντας αρκετά ακόμη πειράματα.

Το πρώτο πείραμα αφορούσε την ψύξη του νερού της δεξαμενής αφού πρώτα είχε θερμανθεί στους 80°C . Η δεξαμενή περιείχε μια συσκευασία με μίγμα PCM72 και σύνθετου γραφίτη, το οποίο έχει θερμοκρασία τήξης 72°C και ενθαλπία 290 kJ/l . Το συγκεκριμένο πείραμα έδειξε τη σχετική ομοιότητα μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 9.4.1, αν θεωρηθεί ως ελάχιστη θερμοκρασία χρήσης οι 65°C , η ενσωμάτωση της συσκευασίας PCM στη δεξαμενή αυξάνει το χρόνο που απαιτεί η ανώτερη στρώση του νερού για να ψυχθεί περίπου έως και 60%. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να γίνει ακόμη φανερό αν το ίδιο πείραμα πραγματοποιηθεί με συσκευασία PCM με μίγμα RT50 και σύνθετου γραφίτη, το οποίο έχει θερμοκρασία τήξης 54°C και ειδική θερμοχωρητική ικανότητα 156 kJ/l , όπως φαίνεται στο σχήμα 9.4.2.



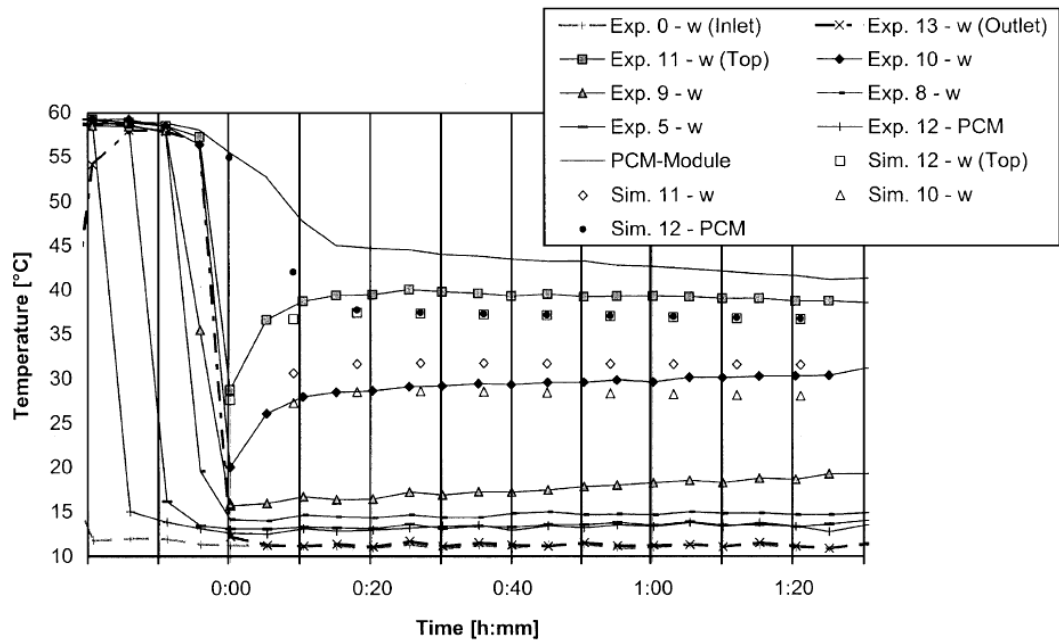
Σχήμα 9.4.1: Ψύξη του νερού της δεξαμενής που περιέχει μίγμα PCM72 και σύνθετου γραφίτη. [183]



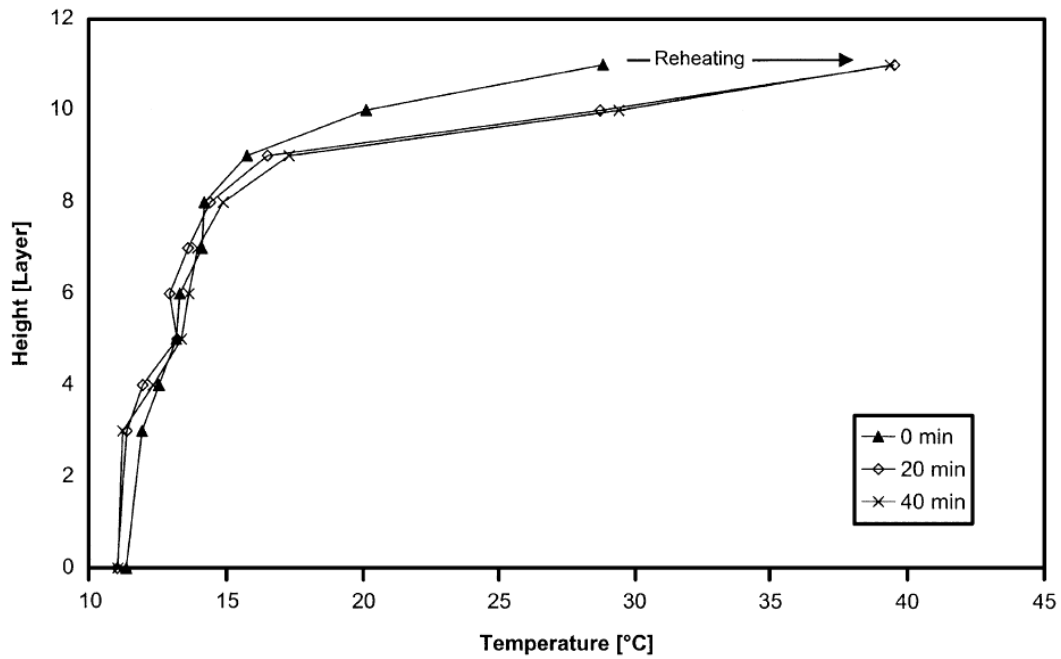
Σχήμα 9.4.2: Ψύξη του νερού της δεξαμενής που περιέχει μίγμα RT50 και σύνθετου γραφίτη. [183]

Το τελευταίο πείραμα που πραγματοποιήθηκε για την πιστοποίηση του μοντέλου αφορούσε την αναθέρμανση του νερού της δεξαμενής μετά από μερική αποφόρτιση της, όταν περιείχε συσκευασία PCM με μίγμα RT50 και σύνθετου γραφίτη, όπως φαίνεται και από το σχήμα 9.4.3. Ολόκληρη η δεξαμενή θερμάνθηκε αρχικά στους 65°C. Στη συνέχεια, αποφορτίστηκε με κρύο νερό από τον πυθμένα ώσπου το ανώτερο στρώμα νερού να φτάσει τη θερμοκρασία των 27°C και έπειτα υποβαλλόταν σε θερμική χαλάρωση. Σε αυτό το σημείο (σημείο μηδέν) η συσκευασία με το PCM εξακολουθούσε να βρίσκεται σε θερμοκρασία 55°C, να έχει ακόμα το μεγαλύτερο μέρος της λανθάνουσας θερμότητάς της με αποτέλεσμα τα ανώτερα στρώματα νερού της δεξαμενής που επικοινωνούν με τη συσκευασία PCM να αναθερμαίνονται. Η εικόνα 9.4.4 δείχνει πως τα στρώματα 10 και 11 θερμαίνονται από τους 20°C έως τους 29°C και από τους 27°C έως τους 40°C αντίστοιχα, μέσα σε 20 λεπτά. Η εικόνα 9.4.3 δείχνει ότι αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά παραμένει ακόμα και μία ώρα αργότερα.

Στο συγκεκριμένο πείραμα γίνεται φανερό ότι η αριθμητική προσομοίωση χρειάζεται βελτίωση επειδή οι θερμοκρασίες που προσομοιώθηκαν και μετρήθηκαν στο ανώτερο στρώμα διέφεραν αισθητά, όπως παρατηρούμε και στο σχήμα 9.4.3. Στο εν λόγω μοντέλο, η συναγωγή θεωρήθηκε αμελητέα και μόνο η μεταφορά θερμότητας λήφθηκε υπόψη. Στο πείραμα, φαίνεται ότι η συναγωγή γύρω από τη συσκευασία PCM είναι αρκετά μεγάλη για να παρουσιάσει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των στρωμάτων του νερού που βρίσκονται σε επαφή με τη συσκευασία PCM. Επιπλέον, η θερμοκρασία του PCM μέσα στη συσκευασία μετρήθηκε μόνο στο ανώτερο στρώμα της και μελετήθηκε σαν να ήταν ισοθερμική.



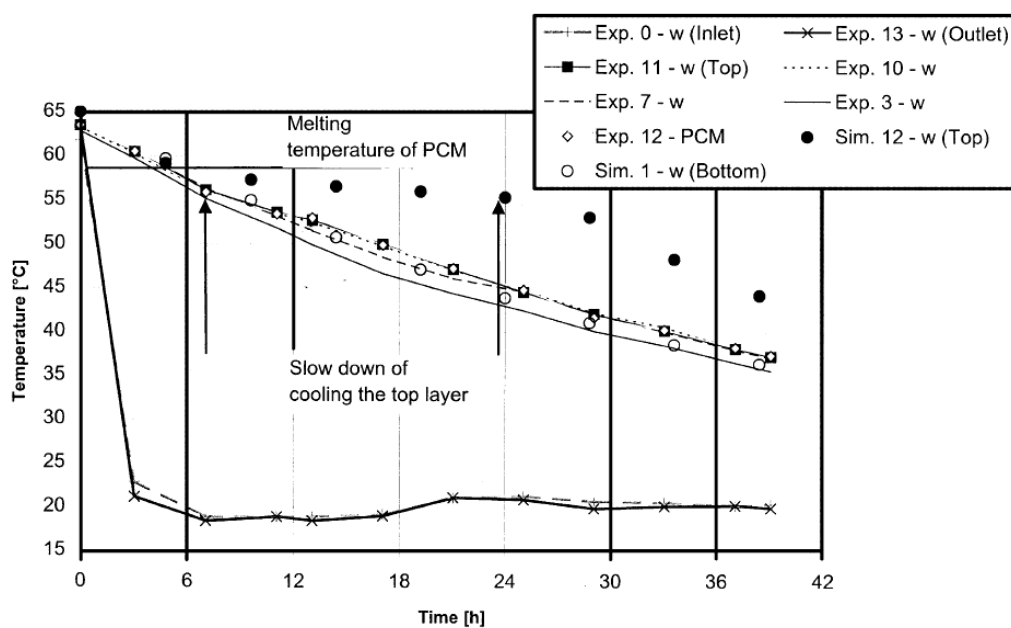
Σχήμα 9.4.3: Αναθέρμανση του νερού της δεξαμενής που περιέχει μίγμα RT50 και σύνθετου γραφίτη. [183]



Σχήμα 9.4.4: Θερμοκρασία του νερού της δεξαμενής που περιέχει μίγμα RT50 και σύνθετου γραφίτη μετά από αναθέρμανση. [183]

9.5 Πρόσθετες προσομοιώσεις:

Από τότε που εξακριβώθηκε η εγκυρότητα του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω προσομοιώσεις. Για παράδειγμα, πραγματοποιήθηκε ξανά το πείραμα της ψύξης του νερού της δεξαμενής αφού αυτό είχε πρώτα θερμανθεί, αλλά η δεξαμενή αυτή τη φορά περιείχε μίγμα όξινου τριυδρικού νατρίου και σύνθετου γραφίτη με καλή λανθάνουσα θερμότητα (ενθαλπία 328 kJ/lt και $C_p = 4,04$ kJ/lt·K) και σημείο τήξης στους 58°C. Το σχήμα 9.5.1 παρουσιάζει αυτή την προσομοίωση συγκρινόμενη με το πείραμα που χρησιμοποιούσε μίγμα RT50 και σύνθετου γραφίτη που περιγράφηκε παραπάνω. Όπως φαίνεται, η ψύξη του ανώτερου στρώματος του νερού κάτω από τους 55°C παρεμποδίζεται από τη συσκευασία PCM κατά 200% (ενώ στο προηγούμενο πείραμα το ποσοστό αυτό έφτανε μόνο το 25%).



Σχήμα 9.5.1: Ψύξη του νερού της δεξαμενής που περιέχει μίγμα $\text{NaOAc} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ και σύνθετου γραφίτη συγκρινόμενη με τα πειράματα με RT50. [183]

9.6 Συμπεράσματα:

Οι δεξαμενές αποθήκευσης ζεστού νερού με θερμική διαστρωμάτωση χρησιμοποιούνται ευρέως στα ηλιακά συστήματα ενέργειας και στην επαναχρησιμοποίηση της αποβαλλόμενης θερμότητας. Η τεχνική της προσθήκης μιας συσκευασίας PCM στην κορυφή της δεξαμενής αποδείχτηκε ότι παρέχει στο σύστημα μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης, επιτρέποντας παράλληλα την αναθέρμανση του μεταβατικού στρώματος μετά από μερική αποφόρτιση του αλλά και την αντιστάθμιση των απωλειών θερμότητας του ανώτερου στρώματος για ένα εύλογο χρονικό διάστημα.

Τα πειράματα και οι προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν σε αυτή τη μελέτη απέδειξαν ότι η ενεργειακή πυκνότητα μπορούσε να βελτιωθεί από 20 έως 40%, τα μετρούμενα οφέλη από τις απώλειες θερμότητας ήταν της τάξεως του 50-200% και η αναθέρμανση πιστοποιήθηκε να είναι της χρονικής κλίμακας των 20 λεπτών.

Κεφάλαιο 10

Χρήση υλικού αλλαγής φάσης σε ηλιακό ενεργητικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης χώρου

10.1 Εισαγωγή:

Στην παρούσα εργασία γίνεται η μελέτη ενός συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης ενός σπιτιού με εμβαδόν δαπέδου $10 \times 10 = 100 \text{ m}^2$, με χρήση της ηλιακής ενέργειας. Το σπίτι βρίσκεται στην περιοχή της Αθήνας με γεωγραφικό πλάτος $\Phi = 37,97^\circ$, ενώ για τις ανάγκες της θέρμανσής του έχουν τοποθετηθεί στην οροφή του σπιτιού ηλιακοί συλλέκτες νοτίου προσανατολισμού, υπό κλίση $\beta = 53^\circ$ και με χαρακτηριστικά $F_R \cdot (\tau\alpha) = 0,85$ και $F_R \cdot U_L = 3,6 \text{ (W/m}^2\text{)/}^\circ\text{C}$. Η επιφάνεια των συλλεκτών έχει συνολικό εμβαδόν $A_c = 55 \text{ m}^2$, το οποίο θεωρείται αρκετά επαρκές για να καλύψει τις ανάγκες του σπιτιού για θέρμανση. Οι συγκεκριμένοι συλλέκτες έχουν συνδεθεί παράλληλα μεταξύ τους με συνολική παροχή νερού που διέρχεται από αυτούς ίση με $m_w = 0,01 \text{ kg/s}$ και ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού ίση με $C_{p_w} = 4.180 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.

Κατά τη διάρκεια λοιπόν της ημέρας όπου υπάρχει έντονη ηλιοφάνεια το νερό που περνάει μέσα από τις σωληνώσεις των συλλεκτών αυτών θερμαίνεται και κατ' επέκταση θερμαίνει το στρώμα υλικού αλλαγής φάσης το οποίο είναι τοποθετημένο κάτω από το στρώμα του δαπέδου του σπιτιού που μελετάται. Όπως έχουμε εξηγήσει σε προηγούμενη ενότητα, το στρώμα του PCM, που έρχεται σε πολύ καλή επαφή με τους σωλήνες του ζεστού νερού από τους συλλέκτες, απορροφά θερμότητα και από στερεό υλικό αλλαγής φάσης μετατρέπεται σε υγρό. Κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου το στρώμα του PCM αποδίδει τη θερμότητα που έχει αποθηκεύσει κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας στο χώρο, το PCM αυτό μεταπίπτει στη στερεή κατάσταση πάλι. Για λόγους απλότητας των υπολογισμών κάνουμε την παραδοχή ότι το στρώμα PCM που βρίσκεται ενσωματωμένο στο δάπεδο έχει πάχος της τάξης των 3 cm . Από

το γεγονός αυτό προκύπτει ότι η συνολική ποσότητα του PCM που είναι τοποθετημένη στο δάπεδο είναι περίπου 3.000 kg αν λάβουμε μια μέση τιμή της πυκνότητας του PCM $\rho_{PCM} = 1.000 \text{ kg/m}^3$. Αξιζει να αναφέρουμε στο σημείο αυτό ότι με την εφαρμογή του εν λόγω ηλιακού συστήματος ενδεχομένως να μην καλύπτεται το 100% των αναγκών θέρμανσης του σπιτιού. Επομένως, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία άνεσης στο εσωτερικό του σπιτιού ενδεχομένως να χρησιμοποιούνται κατά διαστήματα άλλα συμπληρωματικά μέσα, όπως μία πρόσθετη βοηθητική πηγή η οποία αυξάνει τη θερμοκρασία από τους συλλέκτες. Τέλος, να αναφέρουμε ότι η συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε την 21^η Ιανουαρίου.

10.2 Επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης:

Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ένα υποθετικό υλικό το οποίο παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 20-26 °C
- Θερμότητα της αλλαγής φάσης $H=150.000 \text{ J/kg}$
- Πυκνότητα $\rho=1.000 \text{ kg/m}^3$
- Ειδική θερμοχωρητικότητα στερεής φάσης, ειδική θερμοχωρητικότητα υγρής φάσης: $C_{p_s} = C_{p_l} = 5.000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Προκειμένου να γίνει η προσομοίωση της αλλαγής φάσης επιλέχθηκε το μαθηματικό μοντέλο της ενεργού θερμοχωρητικότητας $C_{p_{eff}}$ ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$) συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM T_{PCM} ($^\circ\text{C}$), διότι η αλλαγή φάσης μας ενδιαφέρει μόνο σαν μακροσκοπικό φαινόμενο και δεν είναι αναγκαίος ο υπολογισμός λεπτομερειακών δεδομένων στη διφασική περιοχή του PCM.

Με βάση αυτό το μοντέλο λοιπόν, οι εξισώσεις της ενεργού θερμοχωρητικότητας $C_{p_{eff}}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{PCM} είναι οι ακόλουθες [185]:

$$\blacksquare C_{p_{eff}} = 4 \cdot (H - b \cdot C_{p_s}) \cdot \left(\frac{T - T_s}{b^2} \right) + C_{p_s} \quad \text{για } T_s \leq T \leq T_c$$

$$\blacksquare C_{p_{eff}} = 4 \cdot (b \cdot C_{p_l} - H) \cdot \left(\frac{T - T_s - \frac{b}{2}}{b^2} \right) + \frac{2 \cdot H}{b} - C_{p_s} \quad \text{για } T_c \leq T \leq T_l$$

όπου στη συγκεκριμένη εφαρμογή έχουμε:

- ✘ Θερμοκρασία στην αρχή της στερεοποίησης $T_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- ✘ Θερμοκρασία στο τέλος της στερεοποίησης $T_l = 26 \text{ }^\circ\text{C}$
- ✘ Θερμοκρασία στο μέσον του εύρους αλλαγής φάσης $T_c = (T_s + T_l) / 2 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$
- ✘ Θερμοκρασιακό εύρος της αλλαγής φάσης $b = T_l - T_s = 6 \text{ }^\circ\text{C}$

Με αντικατάσταση των δεδομένων του PCM οι παραπάνω εξισώσεις παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$\blacksquare C_{p_{eff}} = \left(\frac{120000}{9} \right) \cdot (T - 20) + 5000 \quad \text{για } T_s \leq T \leq T_c \quad (10.2.1)$$

$$\blacksquare C_{p_{eff}} = - \left(\frac{120000}{9} \right) \cdot (T - 23) + 45000 \quad \text{για } T_c \leq T \leq T_l \quad (10.2.2)$$

10.3 Υπολογισμός της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους ηλιακούς συλλέκτες:

Προκειμένου να υπολογίσουμε τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν σε αυτή τη μελέτη κρίνεται αναγκαίος ο υπολογισμός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στους ηλιακούς συλλέκτες. Για να υπολογίσουμε επομένως την άμεση,

διάχυτη και ολική ακτινοβολία που προσπίπτει στους ηλιακούς συλλέκτες χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις των οποίων τα μεγέθη αφορούν την περιοχή της Αθήνας [186]:

$$G_b = M_t + A_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot D - P_t\right) \quad (10.3.1)$$

$$G_d = m_t + a_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot D - P_t\right) \quad (10.3.2)$$

$$G_T = G_b \cdot R_b + G_d \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + (G_b + G_d) \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (10.3.3)$$

όπου:

- Οι όροι M_t , m_t , A_t , a_t , P_t έχουν ληφθεί από πίνακα του βιβλίου «Θερμικά-Ηλιακά συστήματα» ανάλογα με τις ώρες της ημέρας για την περιοχή της Αθήνας. [186]
- D είναι η ημέρα του έτους για την οποία υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία και παίρνει τιμές $1 \div 365$.
- Ο λόγος R_b της άμεσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο οριζοντίου επιπέδου δίνεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{\sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega}{\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega} \quad (10.3.4)$$

με γεωγραφικό πλάτος $\Phi=37,97^\circ$ για την περιοχή της Αθήνας και επλεγμένη κλίση συλλέκτη $\beta=53^\circ$,

ωριαία γωνία ηλίου υπολογισμένη από τη σχέση:

$$\omega = 0,25 \cdot (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (10.3.5)$$

και ηλιακή απόκλιση δ υπολογιζόμενη από τη σχέση:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad (10.3.6)$$

όπου n είναι η μέρα του έτους για την οποία υπολογίζεται η ηλιακή απόκλιση και παίρνει τιμές $1 \div 365$.

10.4 Αποτελέσματα και διαγράμματα των υπολογιζόμενων τιμών της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας:

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίστηκαν η άμεση, διάχυτη και ολική ηλιακή ακτινοβολία σε συνάρτηση με την ώρα για την 21^η ημέρα των μηνών Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου. Παρακάτω παρατίθενται οι σχετικοί πίνακες με τα αποτελέσματα και τα αντίστοιχα διαγράμματα για όλους τους μήνες που αναφέρθηκαν. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε ότι για τους μήνες αυτούς ο υπολογισμός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας έγινε για τις ώρες 7:00 έως 18:00 καθώς τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Ακόμη, να σημειώσουμε πως σε ορισμένες περιπτώσεις προέκυπταν αρνητικές τιμές για τα μεγέθη G_b ή/ και G_d και επειδή κάτι τέτοιο δεν έχει φυσική σημασία οι τιμές αυτές μηδενίζονταν.

21^η μέρα Νοεμβρίου

Πίνακας 10.4.1 Τιμές της άμεσης, διάχυτης και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για την 21^η μέρα του μήνα Νοεμβρίου.

Ωρα	G_b [kW/m ²]	G_d [kW/m ²]	R_b	G_t [kW/m ²]
7:00	0,0000	0,0000	0,000000	0,0000
8:00	0,0025	0,0262	3,515185	0,0304
9:00	0,0364	0,0970	2,375726	0,1667
10:00	0,0890	0,1554	2,057806	0,3125
11:00	0,1388	0,1878	1,934577	0,4253
12:00	0,1815	0,1872	1,900486	0,5022
13:00	0,1940	0,1739	1,934577	0,5218
14:00	0,1782	0,1434	2,057806	0,4880
15:00	0,1341	0,1084	2,375726	0,4103
16:00	0,0577	0,0771	3,515185	0,2674
17:00	0,0000	0,0439	0,000000	0,0360
18:00	0,0000	0,0000	0,000000	0,0000

21^η μέρα Δεκεμβρίου

Πίνακας 10.4.2 Τιμές της άμεσης, διάχυτης και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για την 21^η μέρα του μήνα Δεκεμβρίου.

Ωρα	G_b [kW/m ²]	G_d [kW/m ²]	R_b	G_t [kW/m ²]
7:00	0,0000	0,0000	0,000000	0,0000
8:00	0,0000	0,0071	4,677495	0,0058
9:00	0,0160	0,0753	2,737529	0,1058
10:00	0,0633	0,1326	2,281875	0,2546
11:00	0,1070	0,1666	2,113603	0,3650
12:00	0,1413	0,1721	2,067834	0,4363
13:00	0,1514	0,1620	2,113603	0,4559
14:00	0,1434	0,1276	2,281875	0,4348
15:00	0,1039	0,0902	2,737529	0,3606
16:00	0,0361	0,0578	4,677495	0,2169
17:00	0,0000	0,0264	0,000000	0,0217
18:00	0,0000	0,0000	0,000000	0,0000

21^η μέρα Ιανουαρίου

Πίνακας 10.4.3 Τιμές της άμεσης , διάχυτης και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για την 21^η μέρα του μήνα Ιανουαρίου.

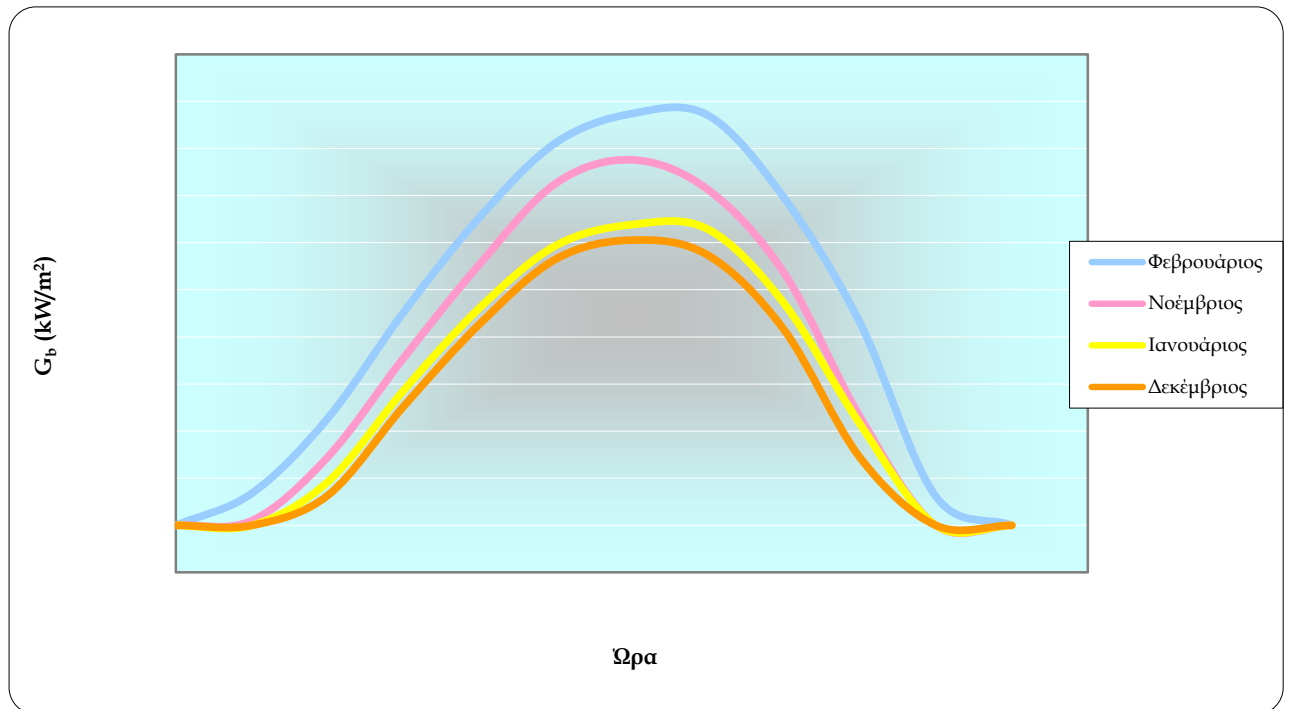
Ωρα	G_b [kW/m ²]	G_d [kW/m ²]	R_b	G_t [kW/m ²]
7:00	0,0000	0,0000	0,000000	0,0000
8:00	0,0000	0,0221	3,42965	0,0182
9:00	0,0231	0,0893	2,344855	0,1279
10:00	0,0717	0,1442	2,037944	0,2660
11:00	0,1155	0,1767	1,918476	0,3689
12:00	0,1485	0,1836	1,885376	0,4336
13:00	0,1596	0,1720	1,918476	0,4505
14:00	0,1572	0,1339	2,037944	0,4333
15:00	0,1179	0,0949	2,344855	0,3568
16:00	0,0540	0,0606	3,42965	0,2358
17:00	0,0000	0,0296	0,000000	0,0243
18:00	0,0000	0,0000	0,000000	0,0000

21^η μέρα Φεβρουαρίου

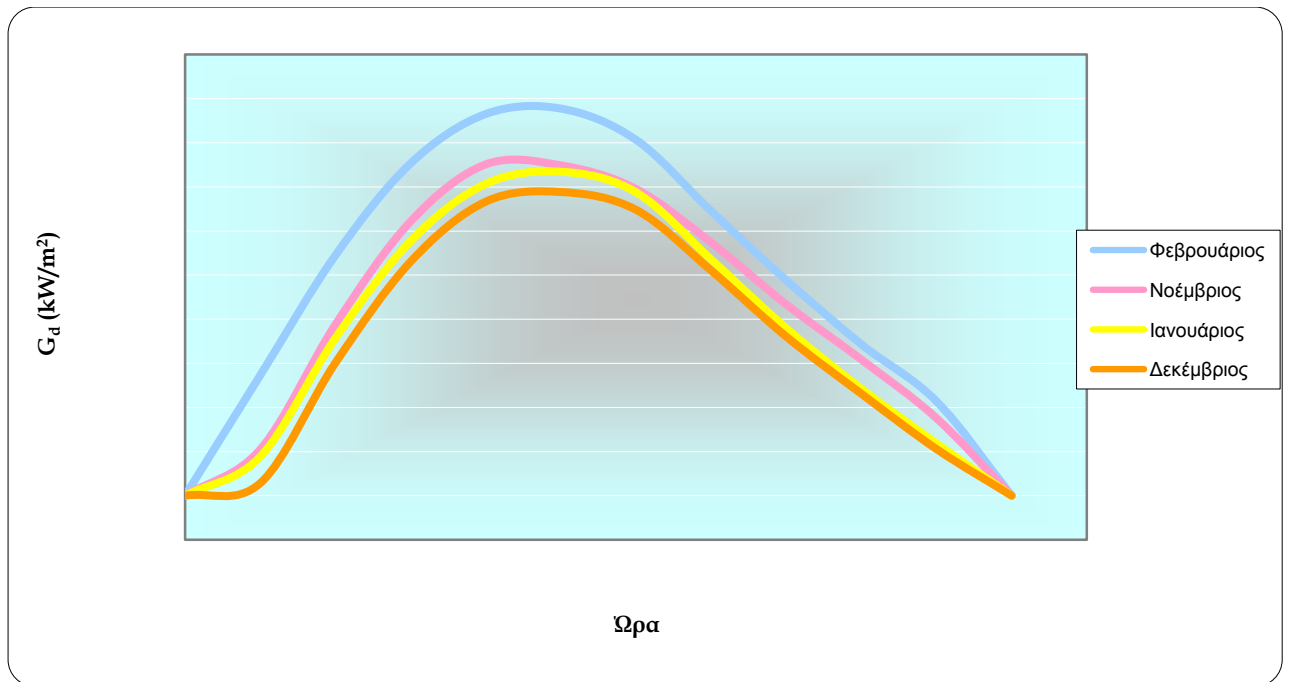
Πίνακας 10.4.4 Τιμές της άμεσης , διάχυτης και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για την 21^η μέρα του μήνα Φεβρουαρίου.

Ωρα	G_b [kW/m ²]	G_d [kW/m ²]	R_b	G_t [kW/m ²]
7:00	0,0000	0,0000	3,681731	0,0000
8:00	0,0170	0,0683	1,964581	0,0898
9:00	0,0569	0,1362	1,687209	0,2090
10:00	0,1133	0,1883	1,583932	0,3363
11:00	0,1637	0,2163	1,53973	0,4328
12:00	0,2031	0,2194	1,527043	0,4942
13:00	0,2185	0,2017	1,53973	0,5064
14:00	0,2176	0,1613	1,583932	0,4814
15:00	0,1739	0,1221	1,687209	0,3972
16:00	0,1077	0,0858	1,964581	0,2841
17:00	0,0154	0,0535	3,681731	0,1008
18:00	0,0000	0,0000	0,00000	0,0000

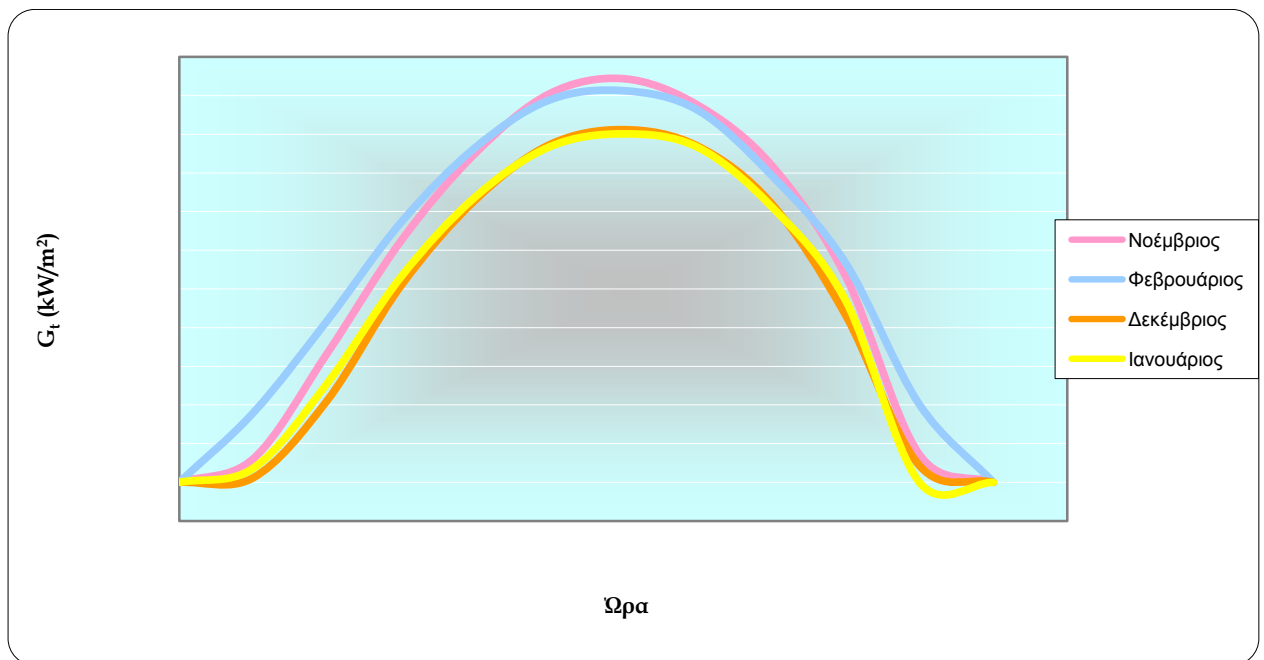
Παρακάτω παρατίθενται σε διαγράμματα οι τιμές της άμεσης, διάχυτης και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου και για τους τέσσερις μήνες προκειμένου να γίνουν οι επιθυμητές συγκρίσεις.



Σχήμα 10.4.1: Διάγραμμα της άμεσης ακτινοβολίας G_b οριζοντίου επιπέδου για τους τέσσερις μήνες συναρτήσει της ώρας.



Σχήμα 10.4.2: Διάγραμμα της διάχυτης ακτινοβολίας G_d οριζοντίου επιπέδου για τους τέσσερις μήνες συναρτήσει της ώρας .



Σχήμα 10.4.3: Διάγραμμα της ολικής ακτινοβολίας G_t οριζοντίου επιπέδου για τους τέσσερις μήνες συναρτήσει της ώρας .

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα ηλιακής ακτινοβολίας για τους τέσσερις χειμερινούς μήνες καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι τιμές της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για τους μήνες Φεβρουάριο και Δεκέμβριο είναι οι μέγιστες και οι ελάχιστες αντίστοιχα για όλο το εύρος ωρών του 24ώρου. Αντίθετα, από το σχήμα 10.4.3 της ολικής ακτινοβολίας παρατηρούμε ότι η τάση αυτή δεν ακολουθείται και μάλιστα κατά τις μεσημεριανές ώρες οι τιμές της ολικής ακτινοβολίας του μήνα Νοεμβρίου είναι μεγαλύτερες των τιμών της ολικής ακτινοβολίας του μήνα Φεβρουαρίου, με εξαίρεση τις πολύ πρωινές και απογευματινές ώρες. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως στην ηλιοφάνεια και στις υψηλότερες θερμοκρασίες του περιβάλλοντος που επικρατούν κατά το μήνα αυτό, όπως επίσης και στην κλίση που έχει ο ήλιος σε σχέση με τη γη. Αναλυτικότερα κατά το μήνα Νοέμβριο ο ήλιος βρίσκεται πιο χαμηλά και έτσι οι ακτίνες του έχουν μεγαλύτερη καθετότητα ως προς το επίπεδο των ηλιακών συλλεκτών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προσπίπτει μεγαλύτερο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας στους συλλέκτες κατά τη διάρκεια αυτού του μήνα. Τέλος, παρατηρείται ότι οι τιμές για τους μήνες Ιανουάριο και Δεκέμβριο είναι σχεδόν ταυτόσημες με εξαίρεση κάποια σημεία στα οποία διαφέρουν μεταξύ τους.

10.5 Αποτελέσματα βασικής μελέτης:

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιήθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab προκειμένου να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του PCM στο τέλος κάθε ώρας. Στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι επειδή μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε το φαινόμενο αυτό μακροσκοπικά κάνουμε την παραδοχή ότι στο τέλος κάθε ώρας η θερμοκρασία του PCM είναι η ίδια για το σύνολο της μάζας του και για την επόμενη ώρα η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη ($T_{\#}$) έχει τη θερμοκρασία του PCM της προηγούμενης ώρας.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι παρακάτω:

- Ωφέλιμη ισχύς συλλέκτη:

$$Q_u = A_c \cdot [G_T \cdot F_R \tau_a - F_R U_1 \cdot (T_{fi} - T_a)] \quad (10.5.1)$$

όπου T_a είναι η μέση θερμοκρασία κάθε ώρας για την 21^η Ιανουαρίου [187]

- Θερμότητα που δίνει το PCM στο χώρο:

$$Q_{\chi\acute{o}\rho\omicron\upsilon} = U \cdot A_{\delta\alpha\pi} \cdot (T_{PCM} - T_{\chi\acute{o}\rho\omicron\upsilon}) \quad (10.5.2)$$

όπου θεωρούμε $T_{\chi\acute{o}\rho\omicron\upsilon} = 20^\circ\text{C}$ σταθερή για λόγους απλότητας, συντελεστής ολικής θερμικής διαπερατότητας $U = 8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ο οποίος συσχετίζεται με τα μεγέθη: συντελεστής συναγωγής h [$\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$], συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας k_1, k_2 [$\text{W/m }^\circ\text{C}$] που αντιστοιχούν στα πάχη των πλακιδίων και του υποστρώματος του δαπέδου $l_1 = 1 \text{ cm}$ και $l_2 = 2 \text{ cm}$ αντίστοιχα και όλα μαζί εκφράζονται

από τη σχέση $\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2}$ και T_{PCM} είναι η θερμοκρασία του

PCM στην αρχή της ώρας.

- Θερμότητα που παίρνει το PCM για να ανεβάσει τη θερμοκρασία του:

$$Q_{PCM} = m_{PCM} \cdot C_{p,eff} \cdot (T_{PCM,τελικό} - T_{PCM,αρχικό}) \quad (10.5.3)$$

όπου $T_{PCM,αρχικό}$ είναι η θερμοκρασία του PCM στην αρχή της ώρας και $T_{PCM,τελικό}$ είναι η θερμοκρασία του PCM στο τέλος της ώρας.

- Η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον ηλιακό συλλέκτη δίνεται από τη σχέση :

$$Q_u = \dot{m}_w \cdot C_{P_w} \cdot (T_{fo} - T_{fi}) \quad (10.5.4)$$

Έτσι κατά τη διάρκεια της ημέρας η εξίσωση που εκφράζει τη συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του PCM και του χώρου που θερμαίνεται είναι:

$$Q_u - Q_{\chiώρου} = Q_{PCM} \quad (10.5.5)$$

Ενώ, κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία και άρα η ωφέλιμη ισχύς του συλλέκτη ($Q_u=0$) η εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$Q_{\chiώρου} = - Q_{PCM} \quad (10.5.6)$$

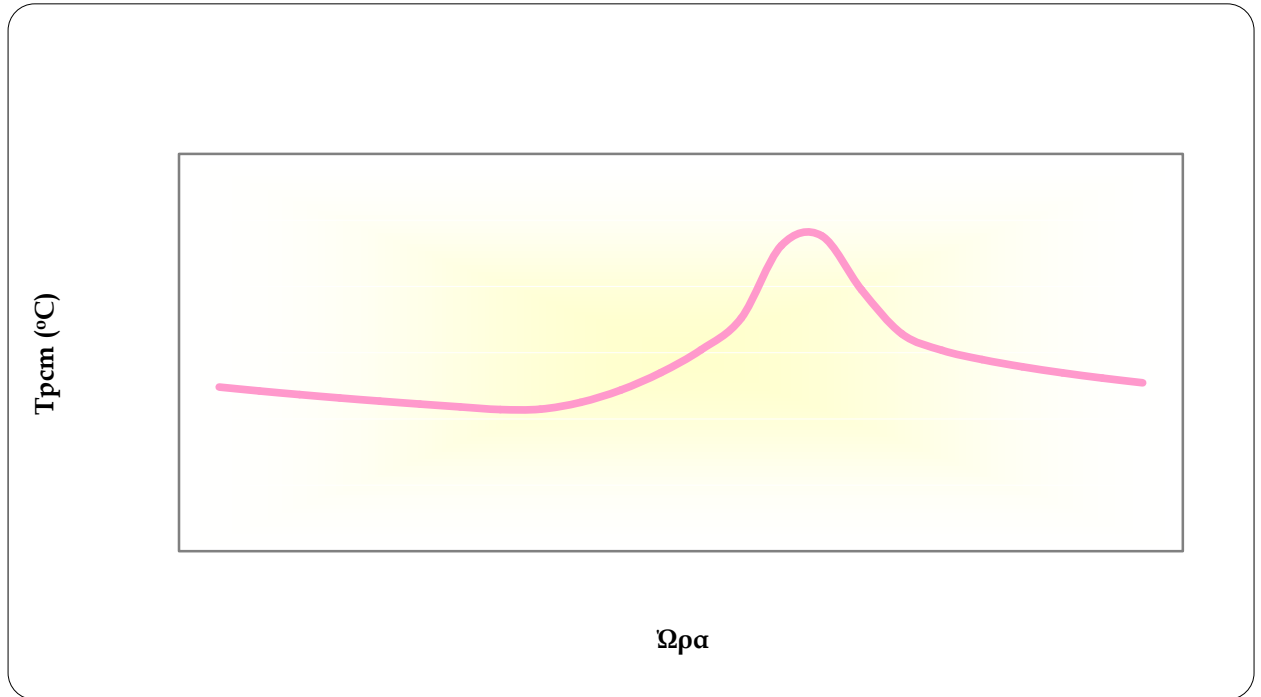
Από τις παραπάνω εξισώσεις στόχος μας είναι να υπολογίσουμε για κάθε ώρα της ημέρας και της νύχτας τη θερμοκρασία του PCM.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου από τον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε. Εκτός από τη θερμοκρασία του PCM υπολογίσαμε για κάθε ώρα τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη T_{fo} (°C), την ωφέλιμη ισχύ του συλλέκτη Q_u (W) και την ενεργό θερμοχωρητικότητα του PCM, $C_{p\text{eff}}$ (J/kg °C).

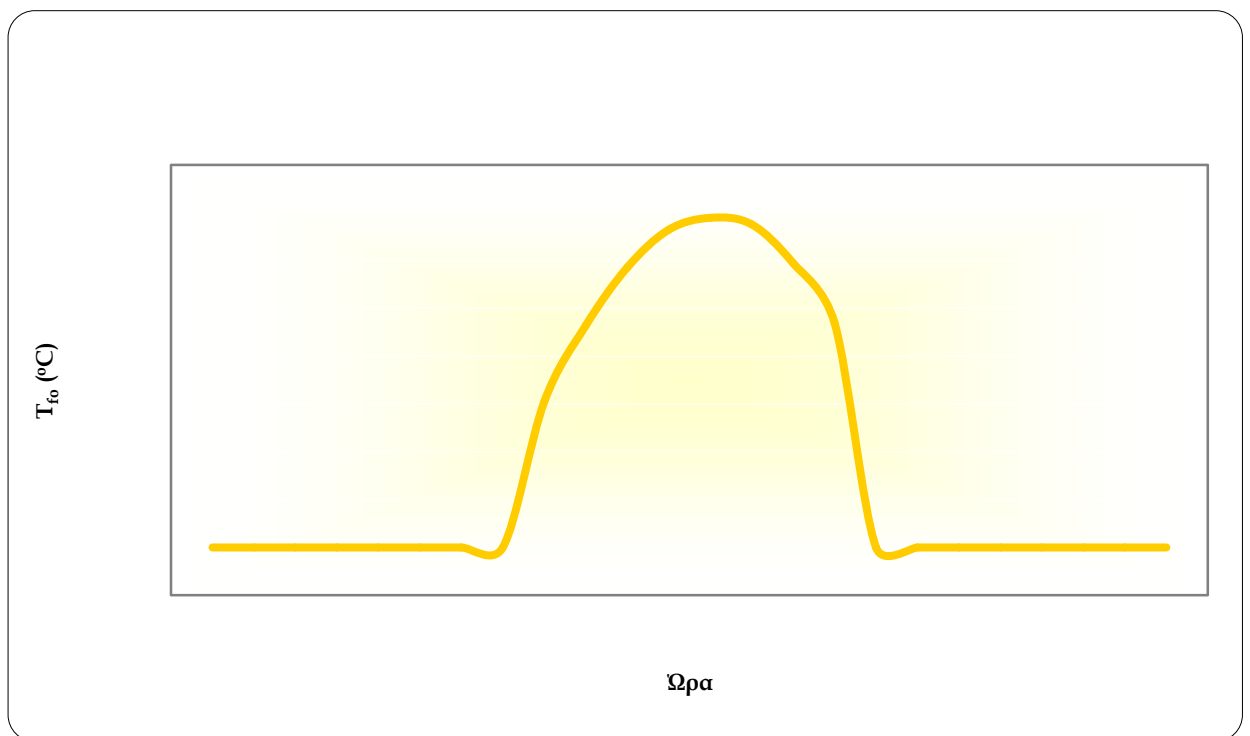
Πίνακας 10.5.1: Αποτελέσματα ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης για την 21^η Ιανουαρίου.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	$C_{p\text{eff}}$ (J/kg °C)
1:00	23,9607	0	0	32190,501
2:00	23,8426	0	0	33765,410
3:00	23,7333	0	0	35222,085
4:00	23,6316	0	0	36578,813
5:00	23,5363	0	0	37849,612
6:00	23,4466	0	0	39045,513
7:00	23,3618	0	0	40175,382
8:00	23,2815	0	0	41246,476
9:00	23,2928	30,4903	3013,259	41095,948
10:00	23,4981	46,4121	9663,877	38359,081
11:00	23,8689	58,5547	14653,686	33414,132
12:00	24,3971	66,4562	17801,461	26372,173
13:00	25,0845	68,9563	18625,747	17206,102
14:00	26,0400	67,5892	17766,960	5000,000
15:00	28,2351	59,4810	13978,345	5000,000
16:00	28,5333	46,9687	7830,662	5000,000
17:00	26,8949	0	0	5000,000
18:00	25,5711	0	0	10718,713
19:00	25,0721	0	0	17371,567
20:00	24,7918	0	0	21108,898
21:00	24,5739	0	0	24014,567
22:00	24,3911	0	0	26452,504
23:00	24,2317	0	0	28577,278
24:00	24,0895	0	0	30472,694

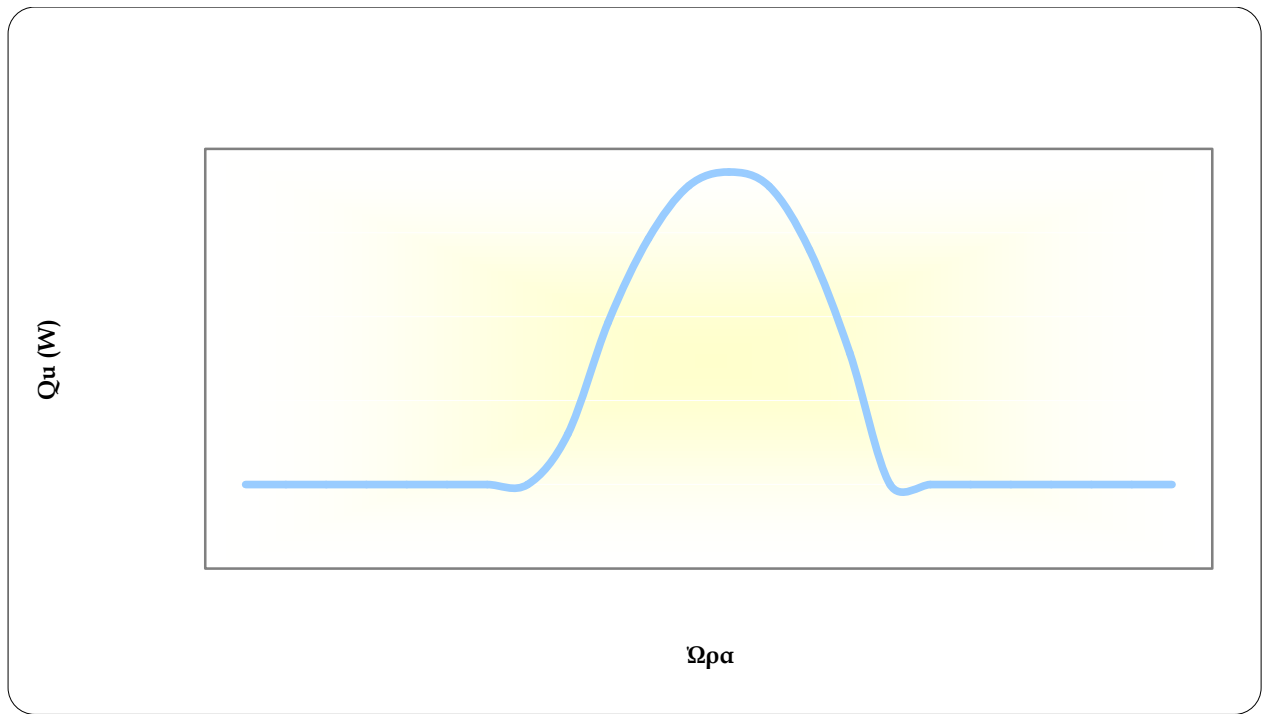
Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές του παραπάνω πίνακα σε διαγράμματα προκειμένου να παρουσιαστούν οι μεταβολές των μεγεθών που υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια του 24ώρου.



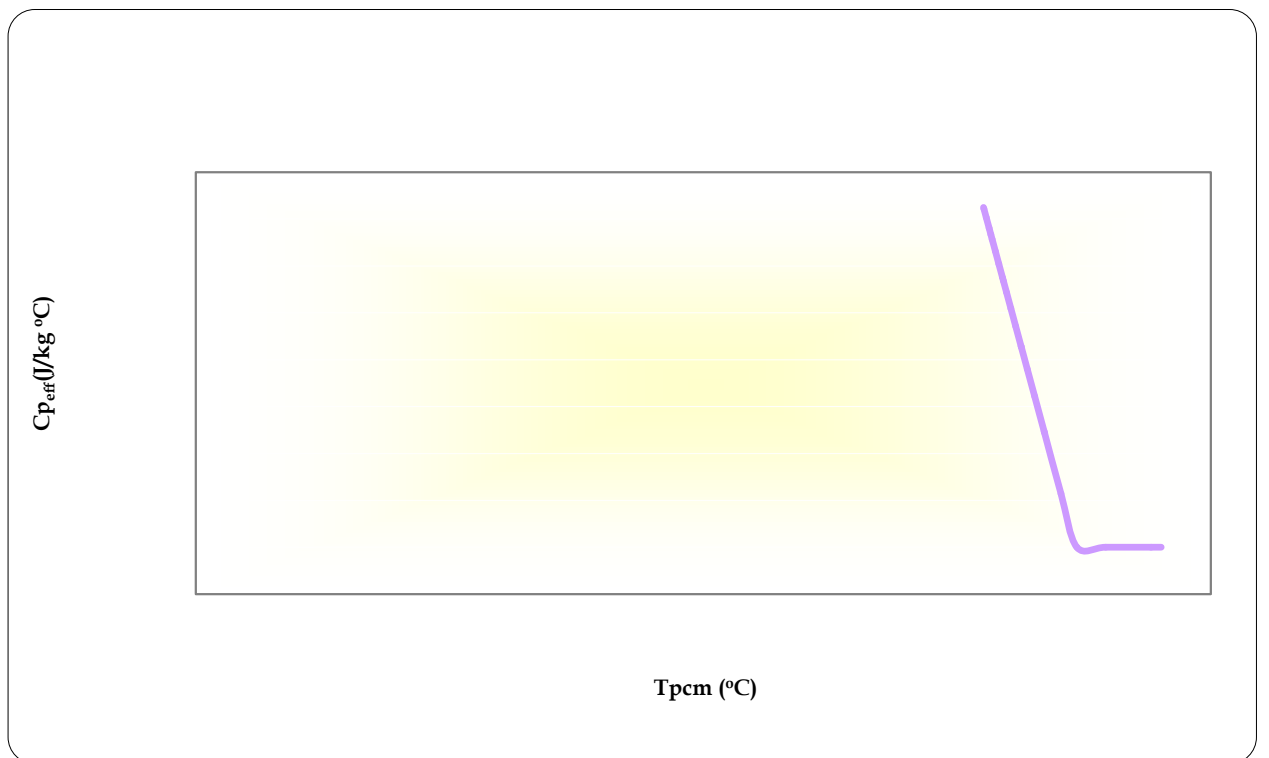
Σχήμα 10.5.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM συναρτήσει της ώρας.



Σχήμα 10.5.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού συναρτήσει της ώρας.



Σχήμα 10.5.3: Διάγραμμα ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη συναρτήσει της ώρας.



Σχήμα 10.5.4: Διάγραμμα ενεργού θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη για το μήνα Ιανουάριο κατά την οποία θα εξεταστούν οι μεταβολές που θα παρατηρηθούν στα υπολογιζόμενα μεγέθη κατά την αλλαγή κάποιων συγκεκριμένων παραμέτρων. Κάθε φορά αλλάζει μια μόνο παράμετρος και οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές έτσι ώστε να γίνει μια αποτελεσματική σύγκριση των αποτελεσμάτων και να βγουν ακριβή συμπεράσματα.

10.6 Παραμετρική μελέτη για διάφορες τιμές συλλεκτικής επιφάνειας:

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 45 \text{ m}^2$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

Πίνακας 10.6.1: Αποτελέσματα μελέτης ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης για την 21^η Ιανουαρίου με συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 45 \text{ m}^2$.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	23,7339	0	0	35215,084
2:00	23,6321	0	0	36572,272
3:00	23,5367	0	0	37843,471
4:00	23,4470	0	0	39039,721
5:00	23,3623	0	0	40169,900
6:00	23,2819	0	0	41241,272
7:00	23,2055	0	0	42259,872
8:00	23,1327	0	0	43230,782
9:00	23,1322	29,0884	2489,503	43236,945
10:00	23,2829	42,1103	7932,821	41228,648
11:00	23,5564	52,0490	12024,245	37581,489
12:00	23,9322	58,5216	14615,465	32570,361
13:00	24,3806	60,5699	15314,555	26592,520
14:00	24,8835	59,4300	14650,649	19886,153
15:00	25,3492	52,6926	11624,169	13676,937
16:00	25,5769	41,7952	6874,416	10641,132
17:00	25,0738	0	0	17349,489
18:00	24,7930	0	0	21092,798
19:00	24,5749	0	0	24001,417
20:00	24,3919	0	0	26441,216
21:00	24,2325	0	0	28567,307
22:00	24,0902	0	0	30463,719
23:00	23,9613	0	0	32182,315
24:00	23,8432	0	0	33757,869

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 50 \text{ m}^2$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και $C_{p\text{eff}}$.

Πίνακας 10.6.2: Αποτελέσματα μελέτης ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης για την 21^η Ιανουαρίου με συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 50 \text{ m}^2$.

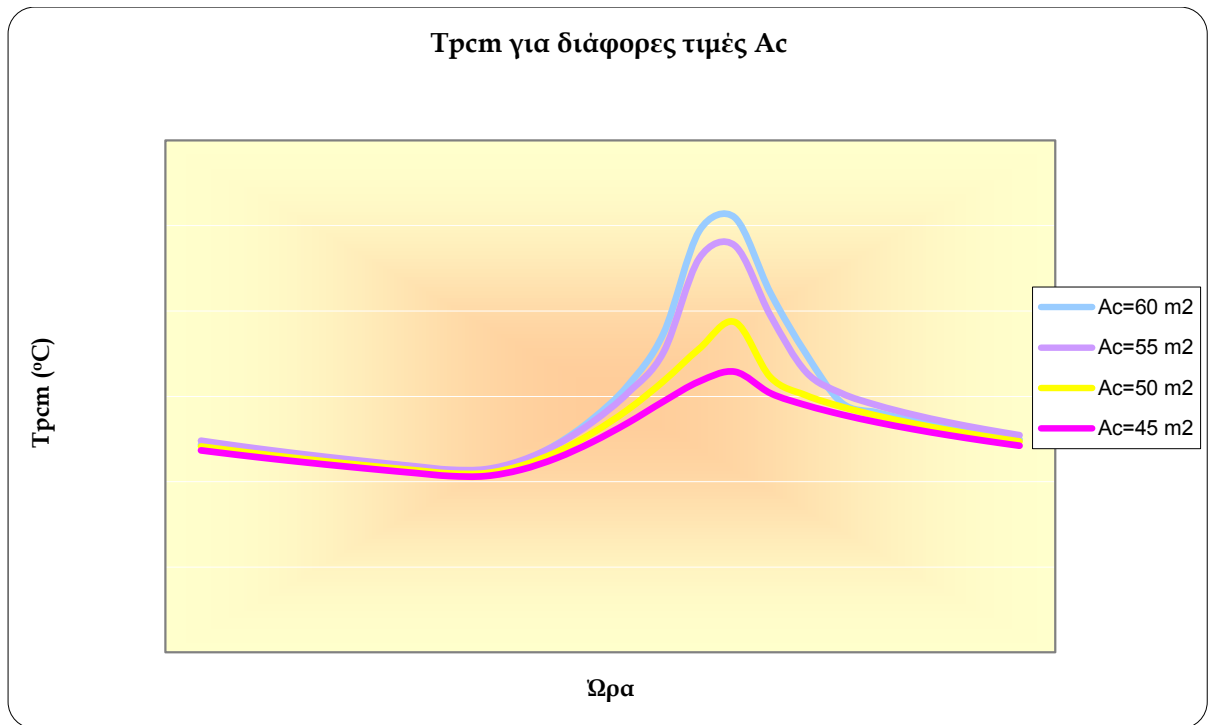
Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	$C_{p\text{eff}}$ (J/kg °C)
1:00	23,8259	0	0	33987,696
2:00	23,7179	0	0	35428,565
3:00	23,6171	0	0	36771,791
4:00	23,5227	0	0	38030,883
5:00	23,4338	0	0	39216,508
6:00	23,3497	0	0	40337,264
7:00	23,2700	0	0	41400,208
8:00	23,1942	0	0	42411,212
9:00	23,1998	29,7852	2755,050	42335,865
10:00	23,3767	44,2574	8802,082	39976,737
11:00	23,6962	55,2987	13343,371	35717,470
12:00	24,1416	62,4862	16214,242	29778,733
13:00	24,6923	64,7600	16978,485	22436,468
14:00	25,3591	63,5018	16222,392	13544,815
15:00	26,1160	56,0532	12830,136	5000,000
16:00	26,7418	44,0591	7500,223	5000,000
17:00	25,4474	0	0	12368,640
18:00	25,0246	0	0	18005,970
19:00	24,7567	0	0	21577,800
20:00	24,5450	0	0	24399,465
21:00	24,3662	0	0	26783,800
22:00	24,2097	0	0	28870,418
23:00	24,0697	0	0	30736,841
24:00	23,9426	0	0	32431,635

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 60 \text{ m}^2$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

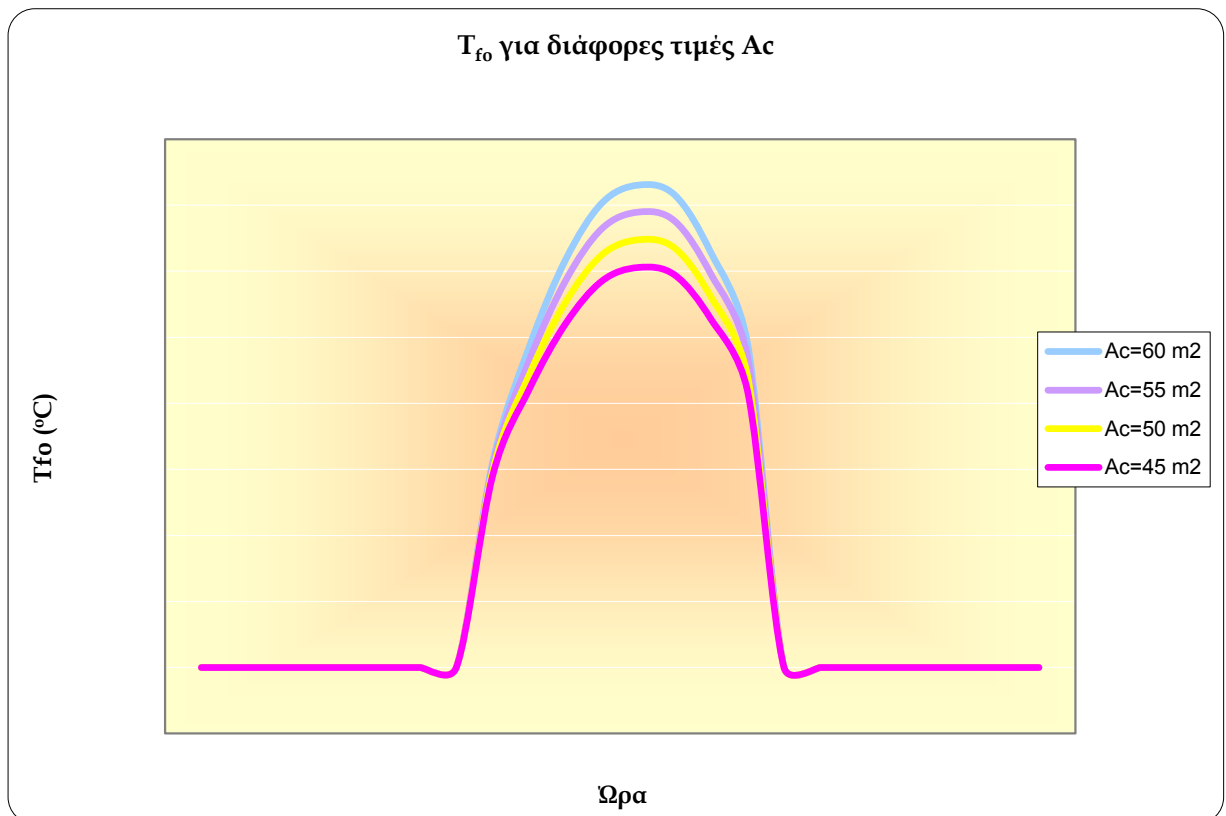
Πίνακας 10.6.3: Αποτελέσματα μελέτης ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης για την 21^η Ιανουαρίου με συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 60 \text{ m}^2$.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	23,8695	0	0	33406,704
2:00	23,7583	0	0	34889,327
3:00	23,6549	0	0	36268,151
4:00	23,5581	0	0	37558,059
5:00	23,4672	0	0	38770,695
6:00	23,3813	0	0	39915,378
7:00	23,3000	0	0	40999,703
8:00	23,2228	0	0	42029,961
9:00	23,2434	31,1172	3299,884	41755,231
10:00	23,4721	48,4900	10553,092	38705,685
11:00	23,8817	61,7291	15991,454	33243,419
12:00	24,4705	70,3339	19417,011	25392,667
13:00	25,2610	73,0426	20303,128	14853,128
14:00	26,4838	71,5386	19344,021	5000,000
15:00	28,8757	62,7356	15153,235	5000,000
16:00	29,1886	48,9814	8404,172	5000,000
17:00	27,4244	0	0	5000,000
18:00	25,9989	0	0	5014,938
19:00	24,8505	0	0	20326,326
20:00	24,6214	0	0	23380,824
21:00	24,4317	0	0	25910,864
22:00	24,2675	0	0	28100,122
23:00	24,1217	0	0	30044,024
24:00	23,9900	0	0	31800,038

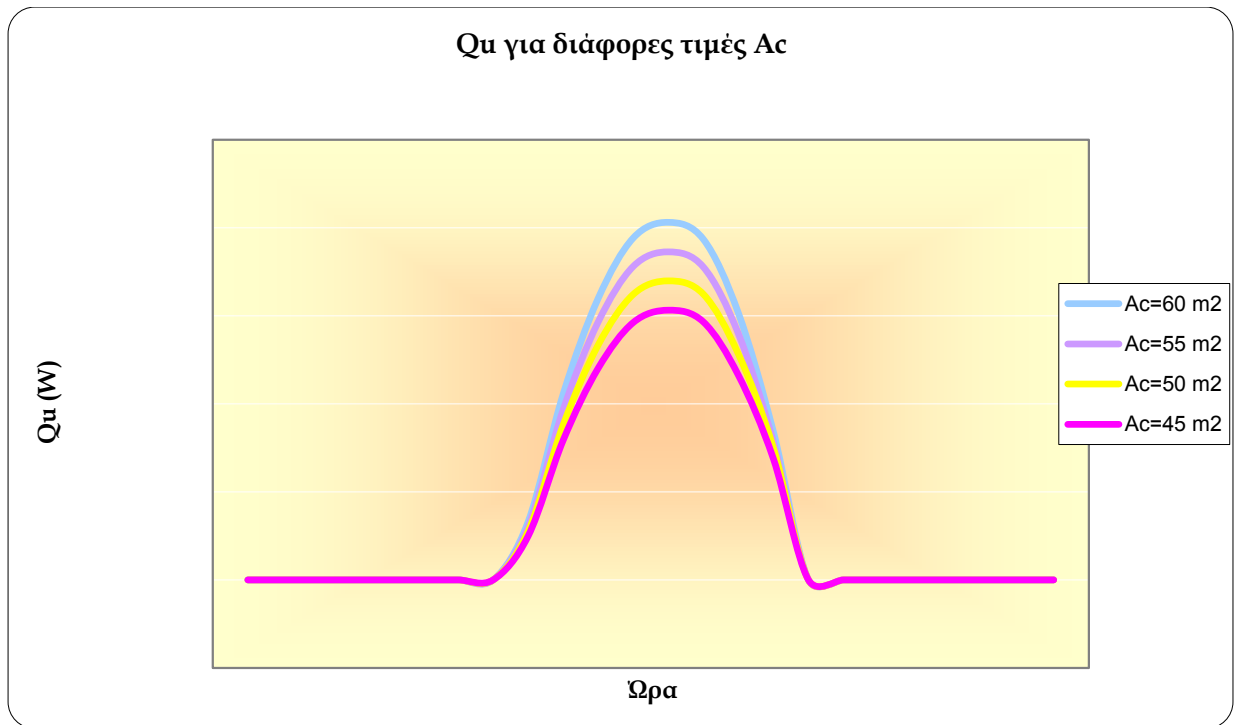
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι τιμές των παραπάνω πινάκων της παραμετρικής μελέτης αλλά και της βασικής μελέτης για το μήνα Ιανουάριο προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



Σχήμα 10.6.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές συλλεκτικής επιφάνειας.



Σχήμα 10.6.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές συλλεκτικής επιφάνειας.



Σχήμα 10.6.3: Διάγραμμα ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές συλλεκτικής επιφάνειας.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η συλλεκτική επιφάνεια τόσο αυξάνονται οι τιμές των υπολογιζόμενων μεγεθών T_{pcm} , T_{fo} , Q_u . Η τάση αυτή είναι λογική καθώς όσο μεγαλώνει η τιμή της συλλεκτικής επιφάνειας και εφόσον η μάζα του PCM που είναι ενσωματωμένη στο δάπεδο παραμένει σταθερή, αυξάνεται η ενέργεια που λαμβάνει το υλικό αλλαγής φάσης με αποτέλεσμα να αυξάνονται τόσο η θερμοκρασία του όσο και η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη με το οποίο το υλικό αλλαγής φάσης έρχεται σε άμεση επαφή.

10.7 Παραμετρική μελέτη για διάφορες τιμές του γινομένου $F_R(\tau\alpha)$ των ηλιακών συλλεκτών:

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για τιμή $F_R(\tau\alpha) = 0,95$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

Πίνακας 10.7.1: Αποτελέσματα μελέτης ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης για την 21^η Ιανουαρίου με γινόμενο $F_R(\tau\alpha) = 0,95$.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	24,0458	0	0	31056,306
2:00	23,9207	0	0	32723,792
3:00	23,8057	0	0	34257,390
4:00	23,6990	0	0	35679,358
5:00	23,5995	0	0	37006,395
6:00	23,5061	0	0	38251,419
7:00	23,4181	0	0	39424,673
8:00	23,3349	0	0	40534,443
9:00	23,3657	32,2013	3706,167	40124,625
10:00	23,6175	49,9502	11112,329	36767,163
11:00	24,0667	63,4718	16659,117	30776,971
12:00	24,7254	72,2654	20147,042	21994,477
13:00	25,6670	75,0566	21038,452	9439,966
14:00	27,6375	73,5976	20035,010	5000,000
15:00	29,9209	65,0162	15624,270	5000,000
16:00	30,1267	50,9592	8793,971	5000,000
17:00	28,1824	0	0	5000,000
18:00	26,6113	0	0	5000,000
19:00	25,3420	0	0	13773,790
20:00	24,9696	0	0	18738,085
21:00	24,7150	0	0	22132,852
22:00	24,5105	0	0	24859,680
23:00	24,3363	0	0	27182,103
24:00	24,1832	0	0	29224,078

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για τιμή $F_R(\tau_a) = 0,75$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

Πίνακας 10.7.2: Αποτελέσματα μελέτης ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης για την 21^η Ιανουαρίου με γινόμενο $F_R(\tau_a) = 0,75$.

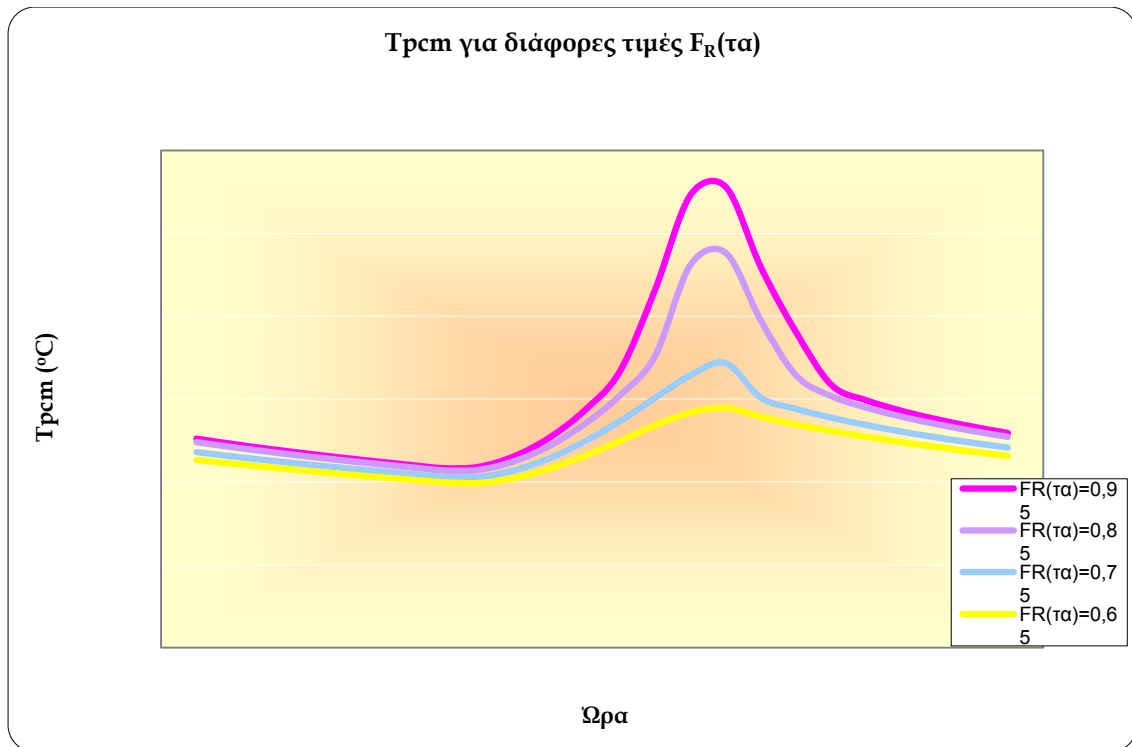
Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	23,7217	0	0	35377,279
2:00	23,6207	0	0	36723,845
3:00	23,5261	0	0	37985,834
4:00	23,4369	0	0	39174,003
5:00	23,3527	0	0	40297,017
6:00	23,2729	0	0	41361,981
7:00	23,1969	0	0	42374,807
8:00	23,1245	0	0	43340,480
9:00	23,1201	28,7246	2340,872	43399,067
10:00	23,2788	42,8215	8235,202	41283,207
11:00	23,5707	53,5851	12668,038	37390,087
12:00	23,9757	60,5941	15475,762	31990,081
13:00	24,4653	62,8070	16231,458	25462,627
14:00	25,0277	61,5615	15506,193	17963,667
15:00	25,5751	54,2539	12216,527	10665,070
16:00	25,8677	42,4656	7060,230	6764,285
17:00	25,0349	0	0	17867,644
18:00	24,7644	0	0	21474,559
19:00	24,5514	0	0	24314,404
20:00	24,3717	0	0	26710,439
21:00	24,2146	0	0	28805,425
22:00	24,0741	0	0	30678,224
23:00	23,9466	0	0	32378,091
24:00	23,8296	0	0	33938,314

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για τιμή $F_R(\tau_a) = 0,65$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

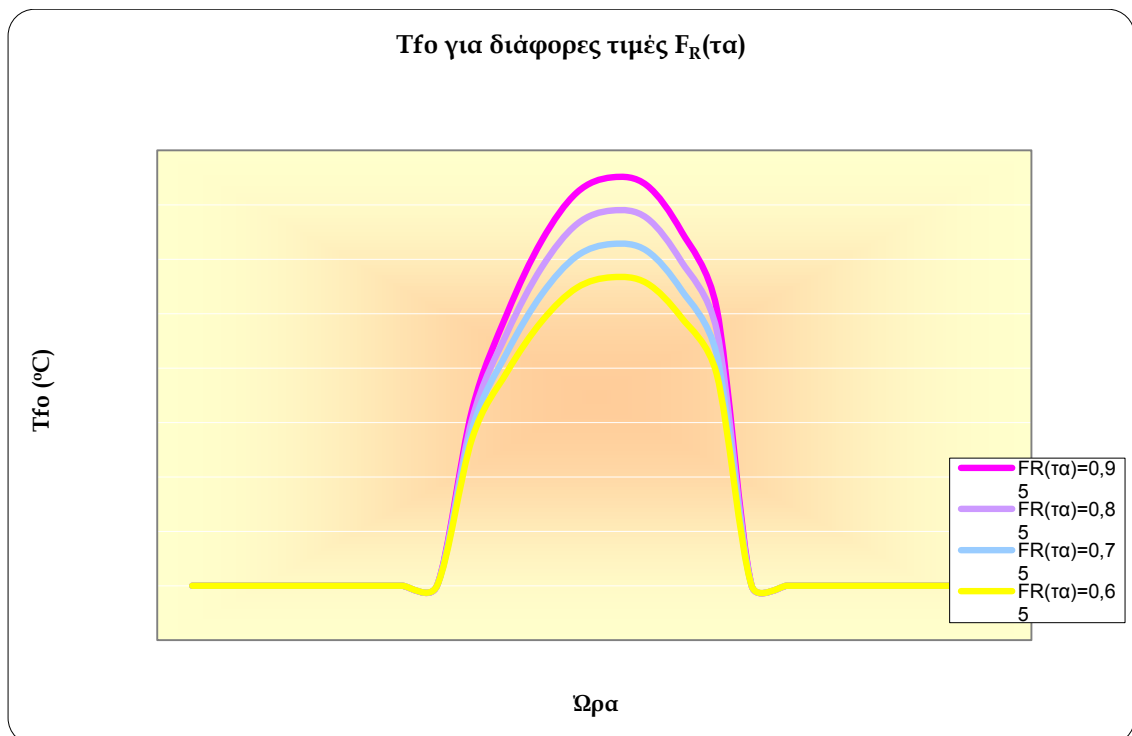
Πίνακας 10.7.3: Αποτελέσματα μελέτης ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης για την 21^η Ιανουαρίου με γινόμενο $F_R(\tau_a) = 0,65$.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	23,5353	0	0	37862,136
2:00	23,4457	0	0	39057,323
3:00	23,3610	0	0	40186,560
4:00	23,2807	0	0	41257,090
5:00	23,2044	0	0	42274,932
6:00	23,1316	0	0	43245,153
7:00	23,0621	0	0	44172,070
8:00	22,9955	0	0	44940,609
9:00	22,9760	26,9738	1662,916	44679,457
10:00	23,0947	39,2460	6800,859	43737,680
11:00	23,3196	48,6339	10675,416	40738,096
12:00	23,6285	54,7568	13140,737	36620,075
13:00	23,9863	56,6967	13822,500	31849,050
14:00	24,3642	55,6075	13217,655	26810,986
15:00	24,6728	49,2103	10385,667	22696,656
16:00	24,7893	38,8876	5941,792	21143,235
17:00	24,5718	0	0	24042,626
18:00	24,3893	0	0	26476,598
19:00	24,2301	0	0	28598,565
20:00	24,0881	0	0	30491,855
21:00	23,9594	0	0	32207,979
22:00	23,8414	0	0	33781,513
23:00	23,7322	0	0	35237,035
24:00	23,6305	0	0	36592,781

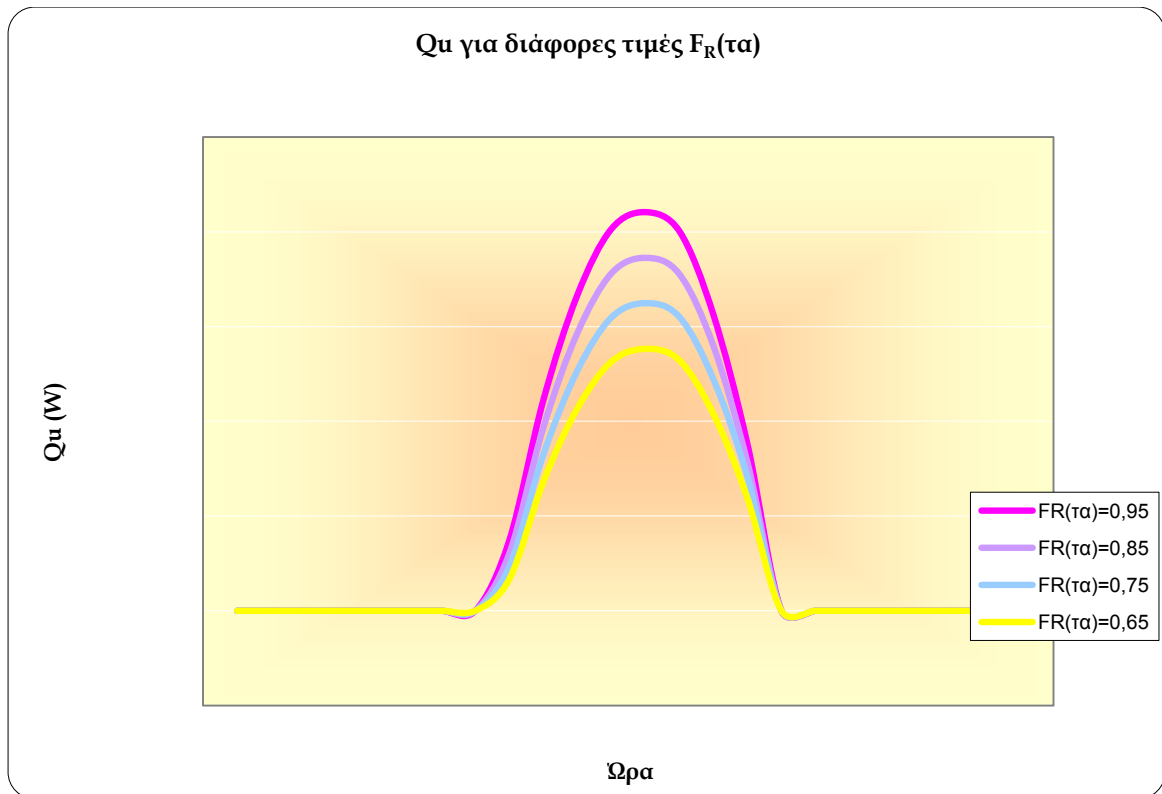
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι τιμές των παραπάνω πινάκων της παραμετρικής μελέτης αλλά και της βασικής μελέτης για το μήνα Ιανουάριο προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



Σχήμα 10.7.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές του γινομένου $F_R(\tau_a)$.

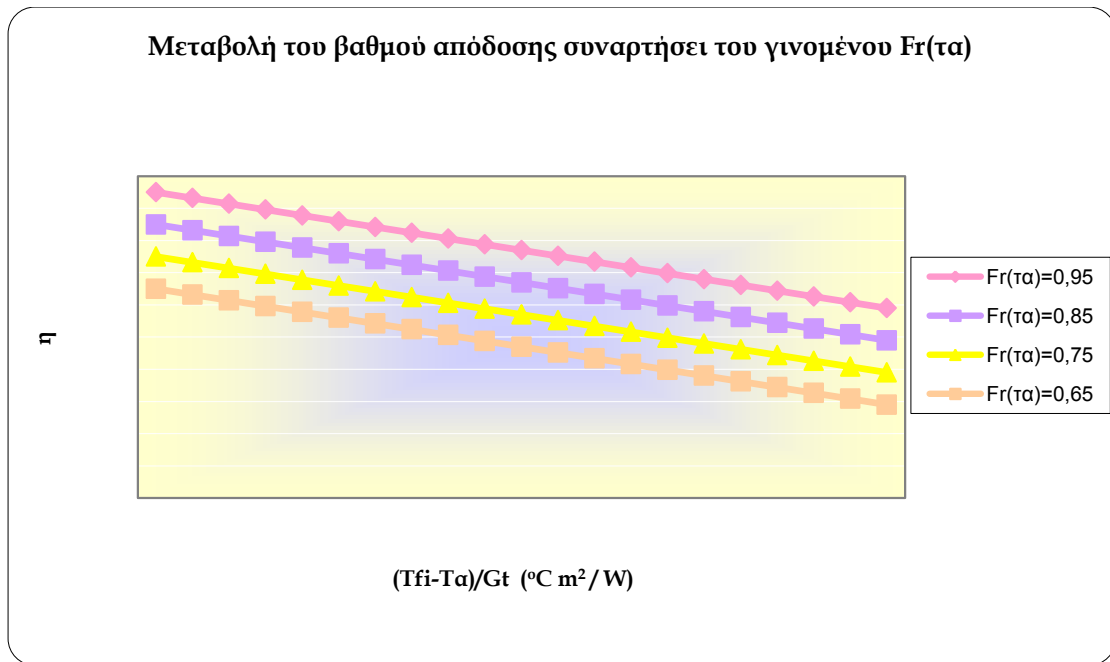


Σχήμα 10.7.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές του γινομένου $F_R(\tau_a)$.



Σχήμα 10.7.3: Διάγραμμα ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές του γινομένου $F_R(\tau\alpha)$.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όσο μεγαλώνει η τιμή του γινομένου $F_R(\tau\alpha)$ τόσο μεγαλώνουν οι τιμές των υπολογιζόμενων μεγεθών T_{pcm} , T_{fo} , Q_u . Αυτό είναι λογικό καθώς το μέγεθος $F_R(\tau\alpha)$ συνδέεται άμεσα με τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη. Συγκεκριμένα, το γινόμενο $F_R(\tau\alpha)$ έχει αντίθετη επίδραση από το γινόμενο $F_R U_1$ και τα δύο μαζί σχετίζονται με το βαθμό απόδοσης του συλλέκτη. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση της απόδοσης του συλλέκτη έχοντας ως δεδομένες κάθε φορά τις τιμές των γινομένων $F_R(\tau\alpha)$ και $F_R U_1$.



Σχήμα 10.7.4: Διάγραμμα απόδοσης συλλέκτη συναρτήσει του γινομένου $F_R(\tau\alpha)$.

Στην εν λόγω μελέτη, μεταβάλλουμε την τιμή του $F_R(\tau\alpha)$ κρατώντας σταθερό το γινόμενο $F_R U_L$. Έτσι, όσο αυξάνεται το $F_R(\tau\alpha)$ και δεδομένου ότι το $F_R U_L$ έχει σταθερή τιμή, τόσο αυξάνεται η απόδοση του συλλέκτη και κατ' επέκταση η ωφέλιμη ισχύς που δέχεται καθώς και οι θερμοκρασίες τόσο του PCM όσο και του νερού στην έξοδο του συλλέκτη.

10.8 Παραμετρική μελέτη για διάφορες τιμές της μάζας του PCM:

Αλλάζοντας τις τιμές της εν λόγω παραμέτρου παρατηρήθηκε ότι οι μεταβολές αυτές είχαν πολύ μικρή επίδραση στα υπολογιζόμενα μεγέθη της μελέτης. Για αυτό το λόγο, η μάζα του PCM στην παραμετρική μελέτη πήρε υπερβολικά μεγάλες και μικρές τιμές, οι οποίες είναι εντελώς εξωπραγματικές από φυσικής πλευράς, προκειμένου να γίνουν φανερές οι αλλαγές που η συγκεκριμένη παράμετρος επιφέρει στα υπολογιζόμενα μεγέθη.

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και $m_{pcm} = 1.000 \text{ kg}$ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

Πίνακας 10.8.1: Αποτελέσματα μελέτης ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης για την 21^η Ιανουαρίου με $m_{pcm} = 1.000 \text{ kg}$.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	22,3837	0	0	36782,685
2:00	22,1971	0	0	34294,173
3:00	22,0126	0	0	31834,070
4:00	21,8305	0	0	29406,415
5:00	21,6512	0	0	27016,104
6:00	21,4752	0	0	24669,120
7:00	21,3030	0	0	22372,846
8:00	21,1352	0	0	20136,483
9:00	21,5876	29,3606	3438,222	26167,406
10:00	22,7888	45,5146	10001,516	42183,921
11:00	23,8609	58,1814	14794,123	33520,865
12:00	25,4412	66,4520	17803,046	12450,814
13:00	29,5082	69,5058	18419,014	5000,000
14:00	36,1931	69,9175	16891,073	5000,000
15:00	35,4828	64,8247	11968,034	5000,000
16:00	31,1696	50,7833	6395,609	5000,000
17:00	24,7359	0	0	21854,740
18:00	24,1118	0	0	30175,971
19:00	23,7194	0	0	35408,386
20:00	23,4168	0	0	39442,003
21:00	23,1674	0	0	42768,584
22:00	22,9541	0	0	44387,588
23:00	22,7624	0	0	41832,003
24:00	22,5722	0	0	39296,237

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και $m_{pcm} = 8.000 \text{ kg}$ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και $C_{p,eff}$.

Πίνακας 10.8.2: Αποτελέσματα μελέτης ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης για την 21^η Ιανουαρίου με $m_{pcm} = 8.000 \text{ kg}$.

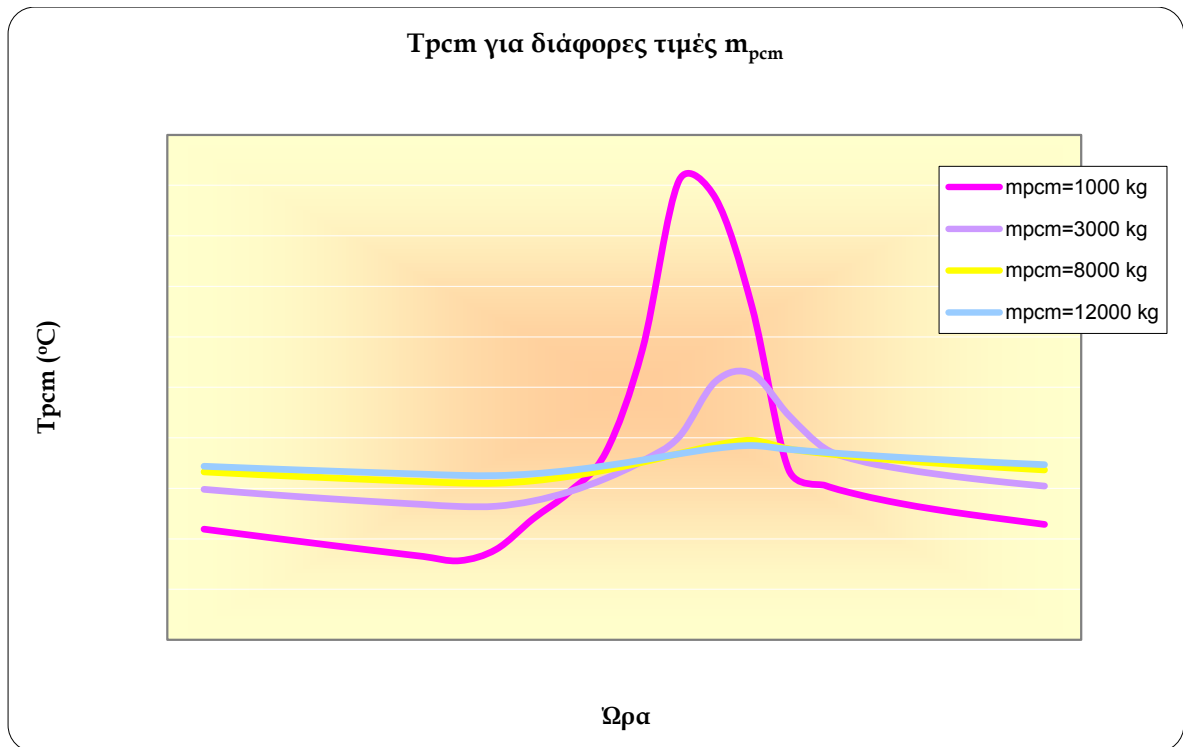
Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	24,6517	0	0	22977,258
2:00	24,5788	0	0	23949,010
3:00	24,5100	0	0	24866,724
4:00	24,4447	0	0	25737,284
5:00	24,3825	0	0	26566,221
6:00	24,3231	0	0	27358,060
7:00	24,2663	0	0	28116,560
8:00	24,2116	0	0	28844,887
9:00	24,2032	30,9798	2829,095	28957,256
10:00	24,2983	46,8913	9483,617	27688,962
11:00	24,4780	58,9759	14495,235	25293,081
12:00	24,7289	66,7767	17680,864	21948,661
13:00	25,0318	69,1309	18560,057	17909,150
14:00	25,3774	67,5615	17777,401	13301,913
15:00	25,7091	59,1322	14109,542	8878,042
16:00	25,8999	45,6393	8330,800	6334,588
17:00	25,5646	0	0	10805,210
18:00	25,3792	0	0	13277,177
19:00	25,2334	0	0	15221,884
20:00	25,1096	0	0	16872,148
21:00	25,0006	0	0	18325,787
22:00	24,9023	0	0	19635,566
23:00	24,8125	0	0	20833,962
24:00	24,7293	0	0	21942,718

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και $m_{pcm} = 12.000 \text{ kg}$ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και $C_{p,eff}$.

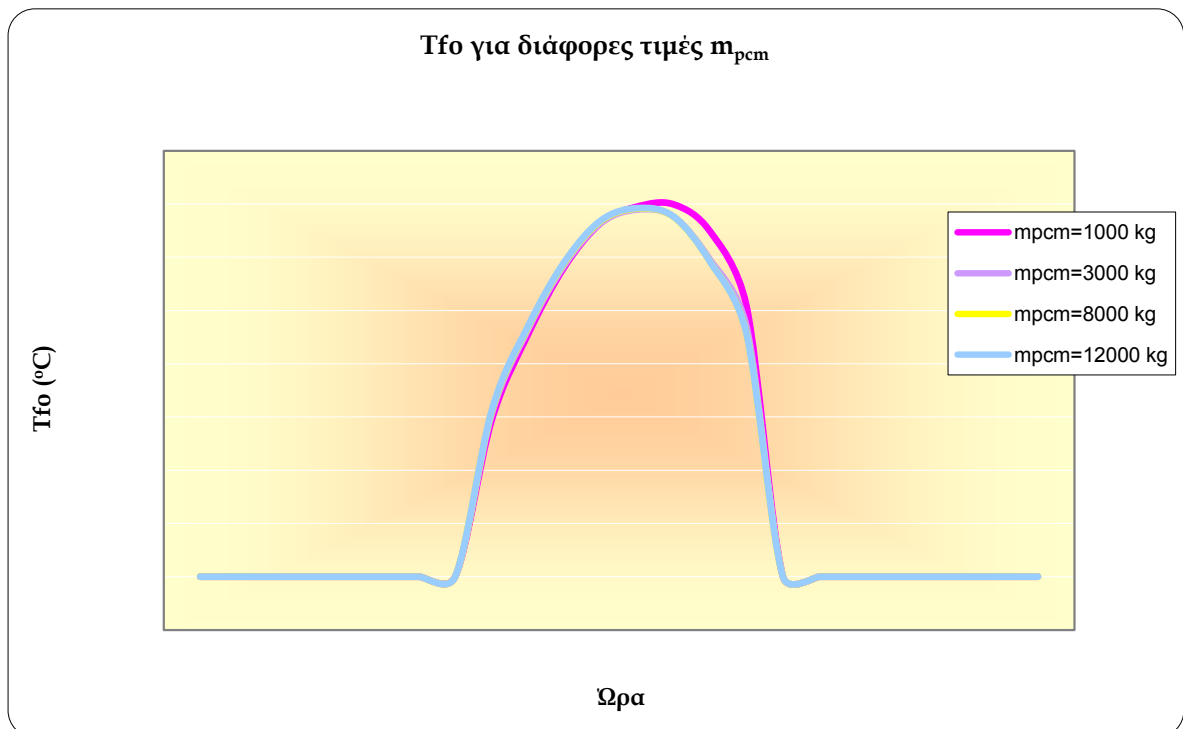
Πίνακας 10.8.3: Αποτελέσματα μελέτης ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης για την 21^η Ιανουαρίου με $m_{pcm} = 12.000 \text{ kg}$.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	24,8751	0	0	19998,774
2:00	24,8166	0	0	20778,837
3:00	24,7610	0	0	21520,605
4:00	24,7079	0	0	22228,534
5:00	24,6570	0	0	22906,273
6:00	24,6082	0	0	23556,859
7:00	24,5613	0	0	24182,849
8:00	24,5160	0	0	24786,422
9:00	24,5058	31,1400	2768,827	24922,623
10:00	24,5758	47,0505	9423,703	23988,683
11:00	24,7107	59,1220	14440,286	22191,234
12:00	24,8981	66,8992	17634,801	19691,819
13:00	25,1207	69,2200	18526,543	16724,485
14:00	25,3658	67,6082	17759,808	13456,635
15:00	25,5847	59,1261	14111,840	10537,856
16:00	25,6953	45,5738	8355,448	9062,140
17:00	25,5445	0	0	11073,264
18:00	25,4243	0	0	12675,539
19:00	25,3216	0	0	14044,938
20:00	25,2307	0	0	15257,419
21:00	25,1484	0	0	16354,473
22:00	25,0729	0	0	17361,838
23:00	25,0027	0	0	18296,829
24:00	24,9371	0	0	19171,776

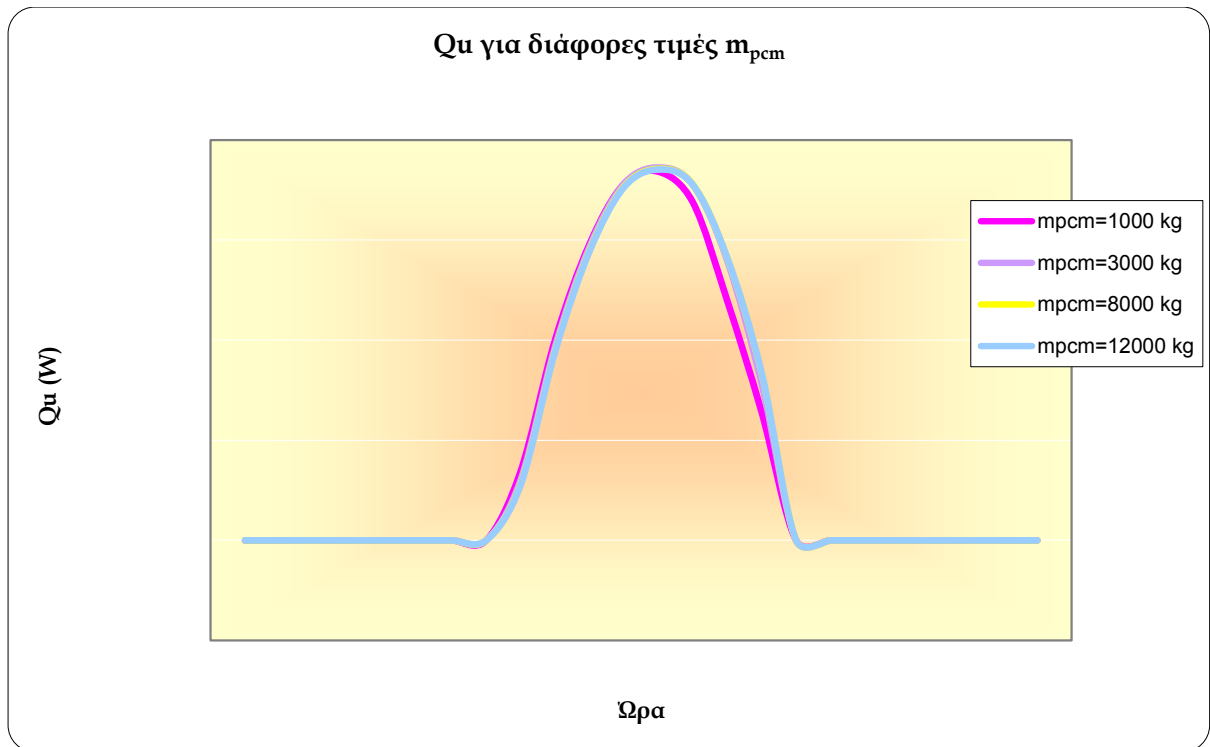
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι τιμές των παραπάνω πινάκων της παραμετρικής μελέτης αλλά και της βασικής μελέτης για το μήνα Ιανουάριο προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



Σχήμα 10.8.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές της μάζας PCM.



Σχήμα 10.8.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές της μάζας PCM.



Σχήμα 10.8.3: Διάγραμμα ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές της μάζας PCM.

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται σαφές ότι η επίδραση της μάζας του PCM στα υπολογιζόμενα μεγέθη παρουσιάζει μια έντονη μεταβολή στο καθένα ξεχωριστά. Αναλυτικότερα, στο σχήμα 10.8.1 βλέπουμε ότι κατά τη διάρκεια της νύχτας όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του PCM έχει μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα και διατηρεί μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Αντίθετα, παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας η θερμότητα από τον ήλιο χρησιμοποιείται περισσότερο για την αλλαγή φάσης παρά για την αύξηση της θερμοκρασίας του PCM άρα όταν η μάζα του PCM είναι μεγάλη είναι περισσότερο δύσκολο να αυξηθεί η θερμοκρασία του και η T_{pcm} μειώνεται με αύξηση της μάζας του. Αντιθέτως, στα υπόλοιπα διαγράμματα δεν παρατηρείται η τάση αυτή για όλες τις ώρες. Συγκεκριμένα, για το διάγραμμα 10.8.2 γνωρίζουμε ότι η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη T_{fo} εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη T_{fi} όσο και από την ωφέλιμη ισχύ του συλλέκτη Q_u , μεγέθη τα οποία εξαρτώνται με τη σειρά τους από τη μάζα του PCM και από την T_{fi} λόγω απωλειών προς το

περιβάλλον αντίστοιχα. Οι επιδράσεις λοιπόν των T_{fi} και Q_u είναι αντίθετες γι' αυτό και η επίδραση της μάζας του PCM στην T_{fo} είναι μικρή. Όσον αφορά στο διάγραμμα 10.8.3 έχουμε να αναφέρουμε ότι η μεγαλύτερη μάζα του PCM του προκαλεί μικρότερη θερμοκρασία με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μικρότερες απώλειες προς το περιβάλλον και συνεπώς να αυξάνεται η τιμή της ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη Q_u .

10.9 Παραμετρική μελέτη για PCMs με διαφορετικές τιμές θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης:

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για PCM με εύρος αλλαγής φάσης $T_s = 14^{\circ}\text{C} - T_l = 20^{\circ}\text{C}$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

Πίνακας 10.9.1: Αποτελέσματα μελέτης ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης για την 21^η Ιανουαρίου με εύρος αλλαγής φάσης $T_s = 14^{\circ}\text{C} - T_l = 20^{\circ}\text{C}$.

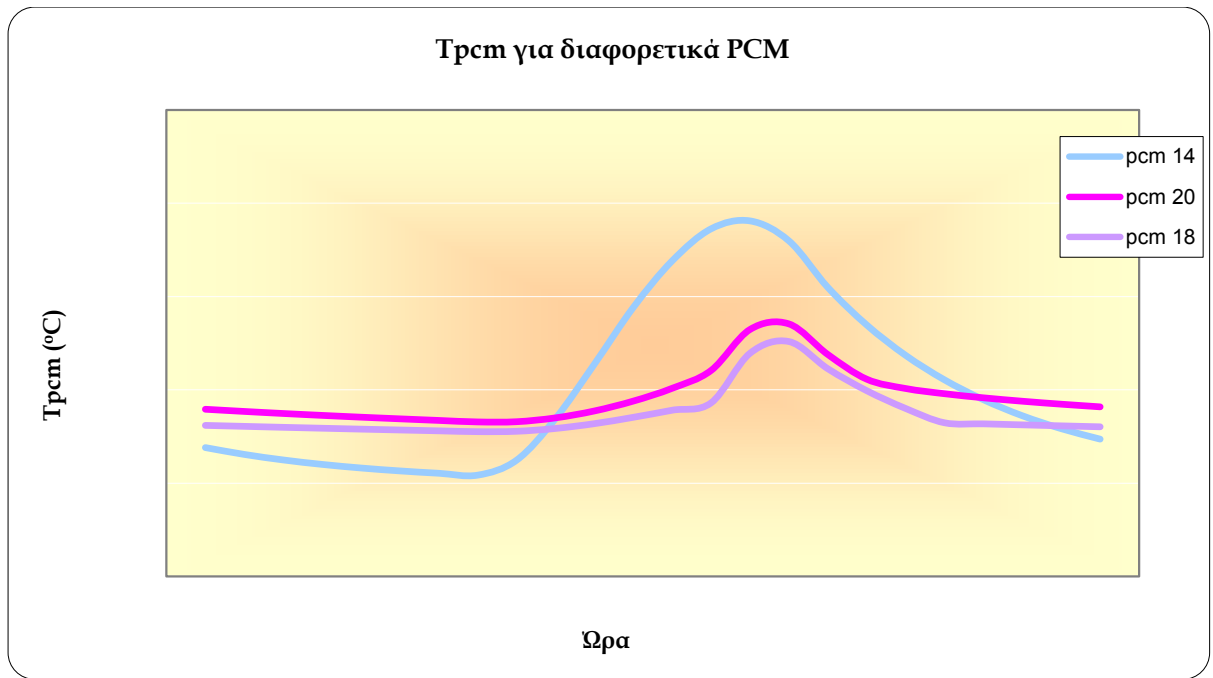
Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	21,9059	0	0	5000
2:00	21,5400	0	0	5000
3:00	21,2443	0	0	5000
4:00	21,0054	0	0	5000
5:00	20,8123	0	0	5000
6:00	20,6564	0	0	5000
7:00	20,5304	0	0	5000
8:00	20,4285	0	0	5000
9:00	21,2302	29,2397	3683,065	5000
10:00	23,4596	45,8077	10273,414	5000
11:00	26,3794	59,1852	14933,293	5000
12:00	29,4151	68,8489	17752,286	5000
13:00	31,9130	72,3340	17940,107	5000
14:00	33,6300	71,8284	16684,619	5000
15:00	34,0542	63,9442	12671,338	5000
16:00	32,9835	50,2800	6782,379	5000
17:00	30,4907	0	0	5000
18:00	28,4765	0	0	5000
19:00	26,8490	0	0	5000
20:00	25,5340	0	0	5000
21:00	24,4715	0	0	5000
22:00	23,6129	0	0	5000
23:00	22,9193	0	0	5000
24:00	22,3588	0	0	5000

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για PCM με εύρος αλλαγής φάσης $T_s = 18^\circ\text{C} - T_l = 24^\circ\text{C}$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και $C_{p\text{eff}}$.

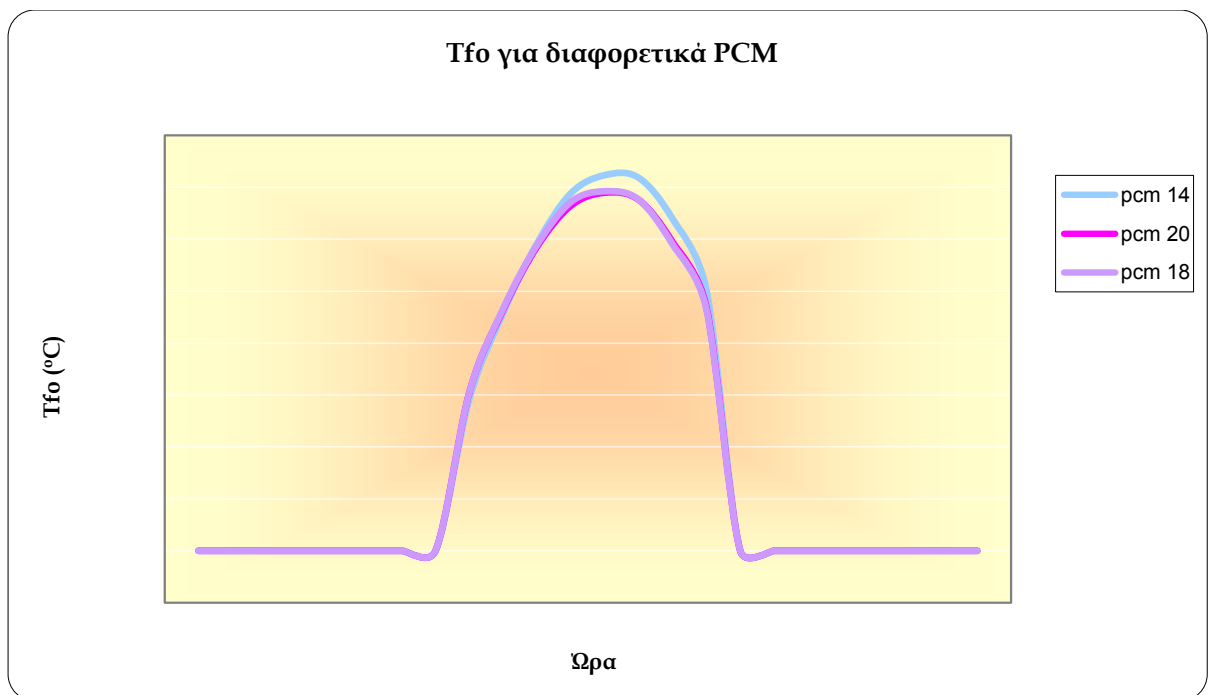
Πίνακας 10.9.2: Αποτελέσματα μελέτης ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης για την 21^η Ιανουαρίου με εύρος αλλαγής φάσης $T_s = 18^\circ\text{C} - T_l = 24^\circ\text{C}$.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	$C_{p\text{eff}}$ (J/kg °C)
1:00	23,0953	0	0	57062,2
2:00	23,0433	0	0	57756,53
3:00	22,9927	0	0	58430,98
4:00	22,9435	0	0	59086,56
5:00	22,8957	0	0	59724,22
6:00	22,8491	0	0	60344,81
7:00	22,8038	0	0	60949,16
8:00	22,7597	0	0	61537,99
9:00	22,7794	30,4666	3221,502	61274,4
10:00	22,9311	46,6231	9966,665	59252,51
11:00	23,1881	58,9070	15037,945	55824,99
12:00	23,5285	67,1693	18384,149	51286,91
13:00	23,9095	69,2358	19105,651	46207,13
14:00	24,3027	67,6160	18269,318	5000
15:00	26,9609	59,0351	14518,146	5000
16:00	27,5893	46,5467	8186,840	5000
17:00	26,1321	0	0	5000
18:00	24,9548	0	0	5000
19:00	24,0035	0	0	5000
20:00	23,2348	0	0	55202,83
21:00	23,1785	0	0	55952,89
22:00	23,1240	0	0	56680,02
23:00	23,0711	0	0	57385,51
24:00	23,0197	0	0	58070,52

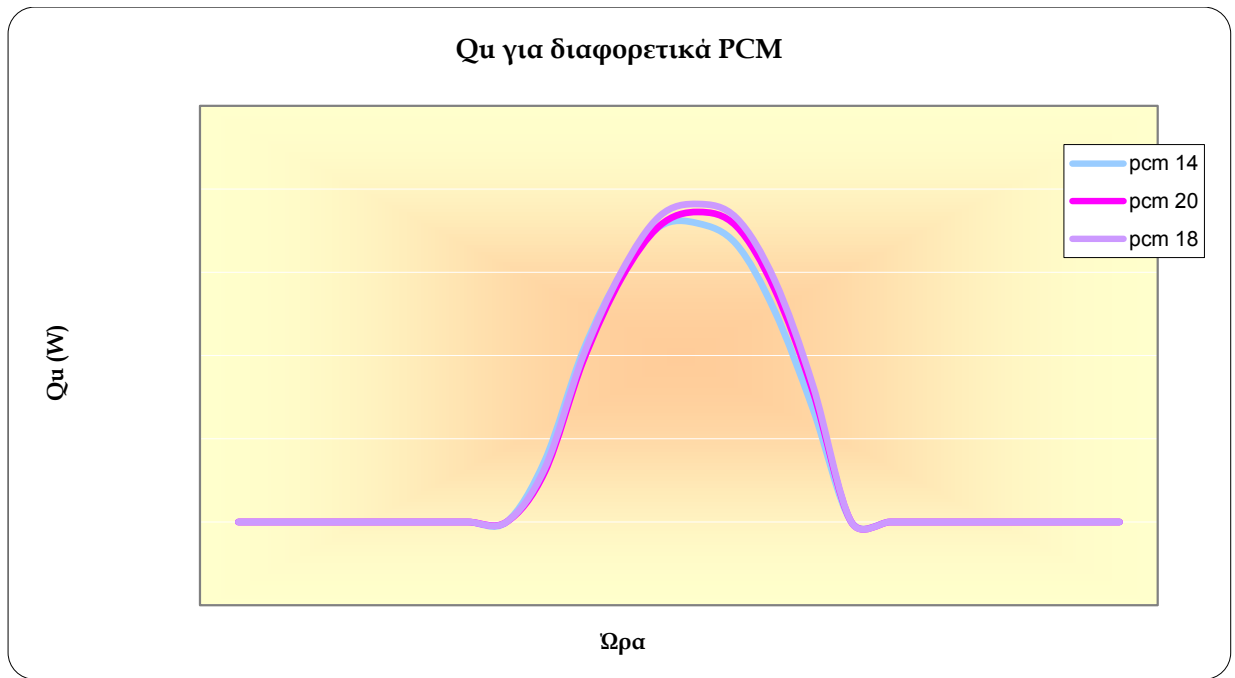
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι τιμές των παραπάνω πινάκων της παραμετρικής μελέτης αλλά και της βασικής μελέτης για το μήνα Ιανουάριο προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



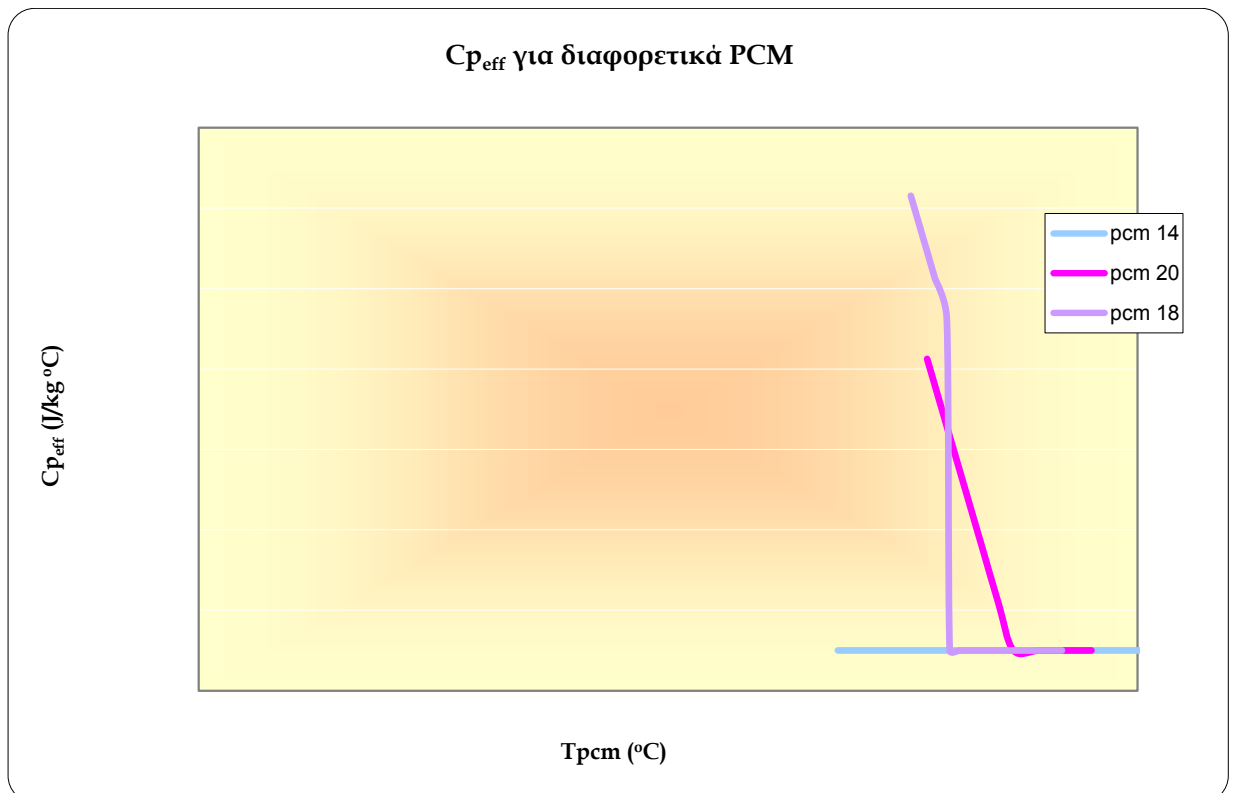
Σχήμα 10.9.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM συναρτήσει της ώρας για PCM με διαφορετικές τιμές εύρους αλλαγής φάσης.



Σχήμα 10.9.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού συναρτήσει της ώρας για PCM με διαφορετικές τιμές εύρους αλλαγής φάσης.



Σχήμα 10.9.3: Διάγραμμα ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη συναρτήσει της ώρας για PCM με διαφορετικές τιμές εύρους αλλαγής φάσης.



Σχήμα 10.9.4: Διάγραμμα ενεργού θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για διαφορετικές τιμές εύρους αλλαγής φάσης.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα καταλήξαμε σε διαφορετικά συμπεράσματα για το καθένα. Αναλυτικότερα, στο διάγραμμα 10.9.1 παρατηρούμε ότι για εύρος αλλαγής φάσης 14-20°C δεν υφίσταται μεγάλη αλλαγή φάσης το συγκεκριμένο PCM καθώς οι θερμοκρασίες του είναι αρκετά υψηλές. Προκειμένου να εξυπηρετήσουμε τις ανάγκες μας για αποθήκευση περισσότερης θερμότητας, που είναι και ο βασικός στόχος του PCM, προτιμούμε το υλικό του οποίου οι θερμοκρασίες να βρίσκονται μέσα στο εύρος αλλαγής φάσης έτσι ώστε η θερμότητα που δίνεται από το ζεστό νερό του συλλέκτη να επιτρέπει την αλλαγή φάσης και να μην αυξάνει τη θερμοκρασία του PCM και αυτό δεν είναι άλλο από το PCM με εύρος αλλαγής φάσης 18-24°C. Όσον αφορά στο διάγραμμα 10.9.2 τα συμπεράσματα είναι παρεμφερή με αυτά που προέκυψαν και στο διάγραμμα 10.8.2. Με άλλα λόγια, η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη T_{fo} εξαρτάται από δύο παραμέτρους, την T_{fi} και την Q_u , που έχουν αντίθετες επιδράσεις με αποτέλεσμα να μην παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στο μέγεθος αυτό για οποιοδήποτε υλικό αλλαγής φάσης. Ακόμη από το διάγραμμα 10.9.3 συμπεραίνουμε ότι το PCM με εύρος αλλαγής φάσης μεταξύ των τιμών 18-24°C είναι προτιμότερο καθώς εκμεταλλεύεται καλύτερα την ηλιακή ενέργεια διότι αναπτύσσει μεγαλύτερο ωφέλιμο φορτίο Q_u . Τέλος, για το σχήμα 10.9.4 αναφέρουμε ότι παρατηρείται κάποια αλλαγή στις τιμές της ενεργού θερμοχωρητικότητας για τα διαφορετικά PCM που μελετήθηκαν καθώς το μέγεθος αυτό εξαρτάται άμεσα από τις θερμοκρασίες του εύρους αλλαγής φάσης.

Κεφάλαιο 11

Εφαρμογή ενεργητικού ηλιακού συστήματος με υλικό αλλαγής φάσης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης

11.1 Εισαγωγή:

Στην παρούσα εργασία μελετάται η εγκατάσταση ενός ηλιακού συστήματος με υλικό αλλαγής φάσης το οποίο προορίζεται για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης σε ένα σπίτι συνολικού εμβαδού 100 m². Το ηλιακό αυτό σύστημα αποτελεί ανεξάρτητο τμήμα του συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης του εν λόγω σπιτιού. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το σπίτι αυτό βρίσκεται στην περιοχή της Αθήνας με γεωγραφικό πλάτος $\Phi=37,97^\circ$, ενώ για την εφαρμογή του συστήματος ζεστού νερού έχουν τοποθετηθεί στην οροφή του σπιτιού ηλιακοί συλλέκτες νοτίου προσανατολισμού, υπό κλίση $\beta=53^\circ$ και με χαρακτηριστικά $F_R \cdot (\tau\alpha) = 0,85$ και $F_R \cdot U_L = 3,6$ (W/m²)/°C. Η επιφάνεια των συλλεκτών έχει συνολικό εμβαδόν $A_c=6$ m², το οποίο θεωρείται αρκετά επαρκές για να καλύψει τις ανάγκες του σπιτιού για ζεστό νερό. Οι συγκεκριμένοι συλλέκτες έχουν συνδεθεί παράλληλα μεταξύ τους με συνολική παροχή νερού που διέρχεται από αυτούς ίση με $m_w = 0,005$ kg/s και ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού ίση με $C_{p_w}=4.180$ J/kg°C.

Κατά τη διάρκεια λοιπόν της ημέρας όπου υπάρχει έντονη ηλιοφάνεια το νερό που περνάει μέσα από τις σωληνώσεις των συλλεκτών αυτών θερμαίνεται και κατ' επέκταση θερμαίνει το υλικό αλλαγής φάσης το οποίο είναι τοποθετημένο διάσπαρτο μέσα στη δεξαμενή η οποία χρησιμοποιείται για να καλύψει τις ανάγκες σε ζεστό νερό του σπιτιού που μελετάται. Έτσι, το PCM, που έρχεται σε πολύ καλή επαφή με τους σωλήνες του ζεστού νερού από τους συλλέκτες, απορροφά θερμότητα και από στερεό υλικό αλλαγής φάσης μετατρέπεται σε υγρό. Κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου το PCM αποδίδει τη θερμότητα που έχει αποθηκεύσει κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας, το PCM αυτό

μεταπίπτει στη στερεή κατάσταση πάλι. Η συνολική ποσότητα PCM που περιέχεται στη δεξαμενή θεωρείται ίση με 100 kg, ενώ η μάζα του νερού που παρέχεται για κατανάλωση σε οικιακές εφαρμογές είναι ανάλογη του όγκου του νερού V_w που χρησιμοποιείται (ο οποίος ποικίλει ανάλογα με την ώρα) αλλά και της πυκνότητας του νερού $\rho_w = 1.000 \text{ kg/m}^3$. Χάρην απλότητας, θεωρούμε ότι το νερό στη δεξαμενή που περιέχει το PCM, η οποία στην ουσία αποτελεί έναν εναλλάκτη θερμότητας, έρχεται σε τόσο καλή επαφή με το PCM με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του προς κατανάλωση νερού να έχει τη θερμοκρασία του PCM μέσα στη δεξαμενή.

Αξιζει να αναφέρουμε στο σημείο αυτό ότι με την εφαρμογή του εν λόγω ηλιακού συστήματος ενδεχομένως να μην καλύπτεται το 100% των αναγκών για παραγωγή ζεστού νερού του σπιτιού αλλά ένα αρκετά ικανοποιητικό μέρος αυτών. Επομένως, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία στο νερό που χρησιμοποιείται για να καλύψει τις καθημερινές ανάγκες των ανθρώπων του σπιτιού ενδεχομένως να χρησιμοποιούνται κατά διαστήματα άλλα συμπληρωματικά μέσα, όπως μία πρόσθετη βοηθητική πηγή η οποία αυξάνει τη θερμοκρασία από τους συλλέκτες. Τέλος, να αναφέρουμε ότι η συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε την 21^η Ιανουαρίου.

11.2 Επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης:

Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ένα υποθετικό υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στην προηγούμενη εφαρμογή και παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά:

- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 20-26 °C
- Θερμότητα της αλλαγής φάσης $H=150.000 \text{ J/kg}$
- Πυκνότητα $\rho=1.000 \text{ kg/m}^3$

- Ειδική θερμοχωρητικότητα στερεής φάσης, ειδική θερμοχωρητικότητα υγρής φάσης: $C_{p_s} = C_{p_l} = 5.000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Προκειμένου να γίνει η προσομοίωση της αλλαγής φάσης επιλέχθηκε το μαθηματικό μοντέλο της ενεργού θερμοχωρητικότητας $C_{p_{\text{eff}}}$ ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$) συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM T_{pcm} ($^\circ\text{C}$), διότι η αλλαγή φάσης μας ενδιαφέρει μόνο σαν μακροσκοπικό φαινόμενο και δεν είναι αναγκαίος ο υπολογισμός λεπτομερειακών δεδομένων στη διφασική περιοχή του PCM.

Επομένως και στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται οι ίδιες εξισώσεις της ενεργού θερμοχωρητικότητας $C_{p_{\text{eff}}}$ και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας όπως και προηγουμένως.

11.3 Αποτελέσματα βασικής μελέτης:

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την περίπτωση μελέτης κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab προκειμένου να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του PCM στο τέλος κάθε ώρας. Στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι επειδή μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε το φαινόμενο αυτό μακροσκοπικά κάνουμε την παραδοχή ότι στο τέλος κάθε ώρας η θερμοκρασία του PCM είναι η ίδια για το σύνολο της μάζας του και για την επόμενη ώρα η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη (T_{fi}) έχει τη θερμοκρασία του PCM της προηγούμενης ώρας.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι παρακάτω:

- Ωφέλιμη ισχύς συλλέκτη:

$$Q_u = A_c \cdot [G_T \cdot F_R \tau_\alpha - F_R U_1 \cdot (T_{fi} - T_\alpha)] \quad (11.3.1)$$

όπου T_a είναι η μέση θερμοκρασία κάθε ώρας για την 21^η Ιανουαρίου [187]

- Θερμότητα που παίρνει το PCM για να ανεβάσει τη θερμοκρασία του:

$$Q_{\text{PCM}} = m_{\text{PCM}} \cdot C_{p_{\text{eff}}} \cdot (T_{\text{PCM,τελικό}} - T_{\text{PCM,αρχικό}}) \quad (11.3.2)$$

όπου $T_{\text{PCM,αρχικό}}$ είναι η θερμοκρασία του PCM στην αρχή της ώρας και $T_{\text{PCM,τελικό}}$ είναι η θερμοκρασία του PCM στο τέλος της ώρας.

- Θερμότητα που καταναλώνεται από τη χρήση ζεστού νερού σε οικιακές εφαρμογές:

$$Q_{\text{καταν.}} = V_w \cdot \rho_w \cdot C_{p_w} \cdot (T_{\text{PCM,αρχικό}} - T_{\text{δικτύου}}) \quad (11.3.3)$$

όπου V_w είναι η ωριαία κατανάλωση νερού στο σπίτι [186], θεωρώντας μια μέση μηνιαία κατανάλωση 50 m^3 , και παρουσιάζεται στον πίνακα 11.3.1 και $T_{\text{δικτύου}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον ηλιακό συλλέκτη δίνεται από τη σχέση :

$$Q_u = \dot{m}_w \cdot C_{p_w} \cdot (T_{fo} - T_{fi}) \quad (11.3.4)$$

Έτσι κατά τη διάρκεια της ημέρας η εξίσωση που εκφράζει τη συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του PCM και του νερού που θερμαίνεται είναι:

$$Q_u - Q_{\text{καταν.}} = Q_{\text{PCM}} \quad (11.3.5)$$

Ενώ, κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία και άρα η ωφέλιμη ισχύς του συλλέκτη ($Q_u=0$) η εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$Q_{\text{καταν.}} = - Q_{\text{PCM}} \quad (11.3.6)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις στόχος μας είναι να υπολογίσουμε για κάθε ώρα της ημέρας και της νύχτας τη θερμοκρασία του PCM.

Πίνακας 11.3.1: Ωριαία κατανάλωση νερού.

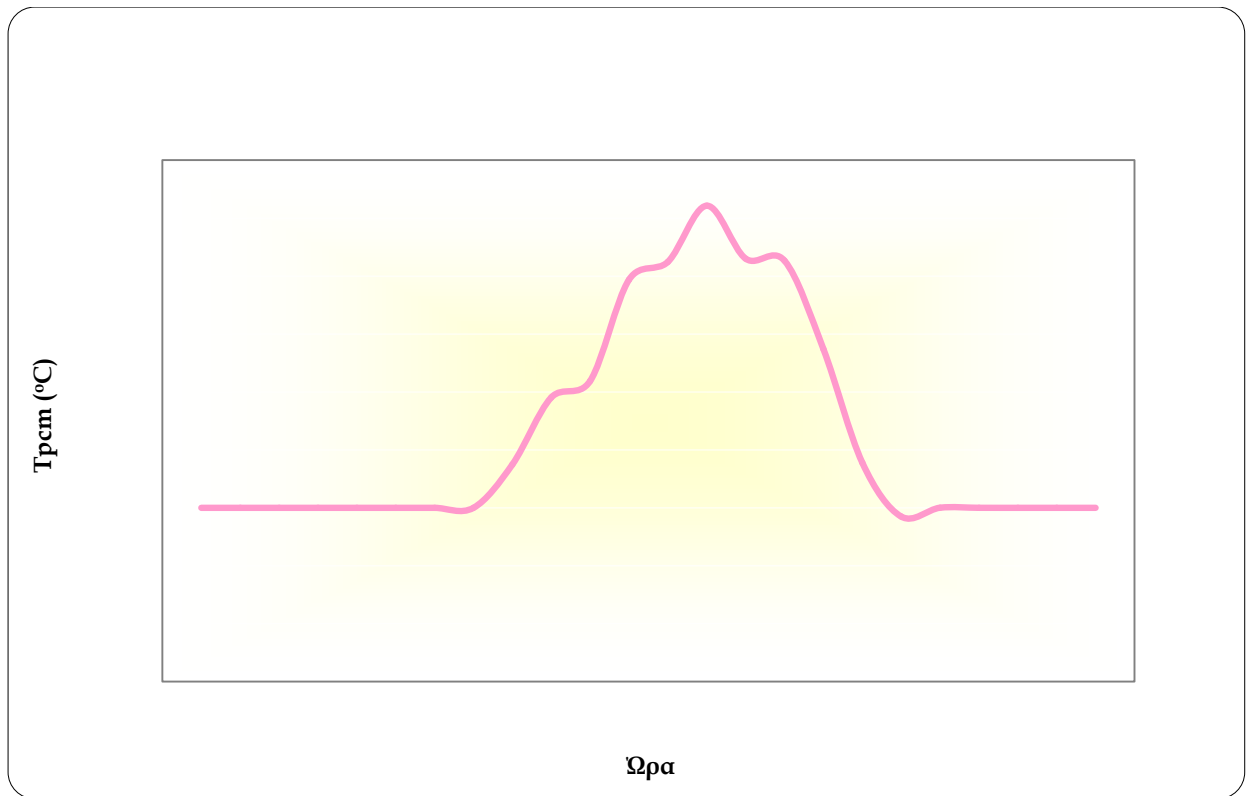
Ωρα	Ποσοστό (%)	Κατανάλωση Vw (m ³)
1:00	2,139	0,03565067
2:00	0	0
3:00	0	0
4:00	0	0
5:00	0	0
6:00	1,182	0,03030307
7:00	4,278	0,07130133
8:00	6,738	0,1122996
9:00	8,235	0,13725507
10:00	6,417	0,106952
11:00	4,278	0,07130133
12:00	3,209	0,053476
13:00	5,348	0,08912667
14:00	3,209	0,053476
15:00	4,599	0,07664893
16:00	2,139	0,03565067
17:00	3,209	0,053476
18:00	6,417	0,106952
19:00	10,695	0,17825333
20:00	9,091	0,15151533
21:00	6,417	0,106952
22:00	5,348	0,08912667
23:00	4,278	0,07130133
24:00	2,139	0,03565067

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου από τον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε. Εκτός από τη θερμοκρασία του PCM υπολογίσαμε για κάθε ώρα τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη T_{fo} (°C), την ωφέλιμη ισχύ του συλλέκτη Q_u (W) και την ενεργό θερμοχωρητικότητα του PCM, $C_{p\text{eff}}$ (J/kg °C).

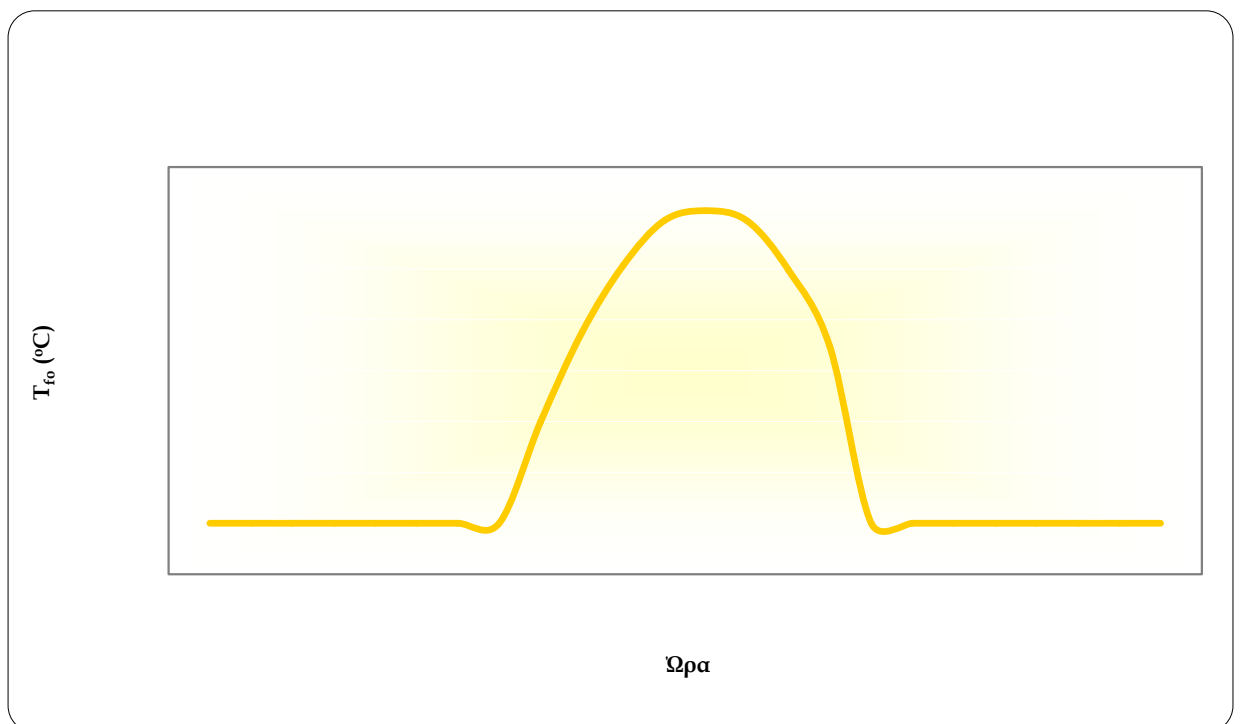
Πίνακας 11.3.2: Αποτελέσματα ηλιακού συστήματος παραγωγής ζεστού νερού χρήσης για την 21^η Ιανουαρίου.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	$C_{p\text{eff}}$ (J/kg °C)
1:00	15,000349	0	0	5000
2:00	15,000349	0	0	5000
3:00	15,000349	0	0	5000
4:00	15,000349	0	0	5000
5:00	15,000349	0	0	5000
6:00	15,000278	0	0	5000
7:00	15,000145	0	0	5000
8:00	15,000036	0	0	5000
9:00	18,737121	519,044	39,835	5000
10:00	24,520998	1174,586	74,937	24720,031
11:00	25,941736	1606,160	101,371	5776,848
12:00	34,682131	1946,065	119,055	5000
13:00	36,222028	1843,334	122,880	5000
14:00	41,066892	1727,065	118,857	5000
15:00	36,500448	1221,691	99,521	5000
16:00	36,320866	687,056	69,374	5000
17:00	28,695512	0	0	5000
18:00	18,899181	0	0	5000
19:00	14,25074	0	0	5000
20:00	15,009991	0	0	5000
21:00	15,002845	0	0	5000
22:00	15,001149	0	0	5000
23:00	15,000601	0	0	5000
24:00	15,000458	0	0	5000

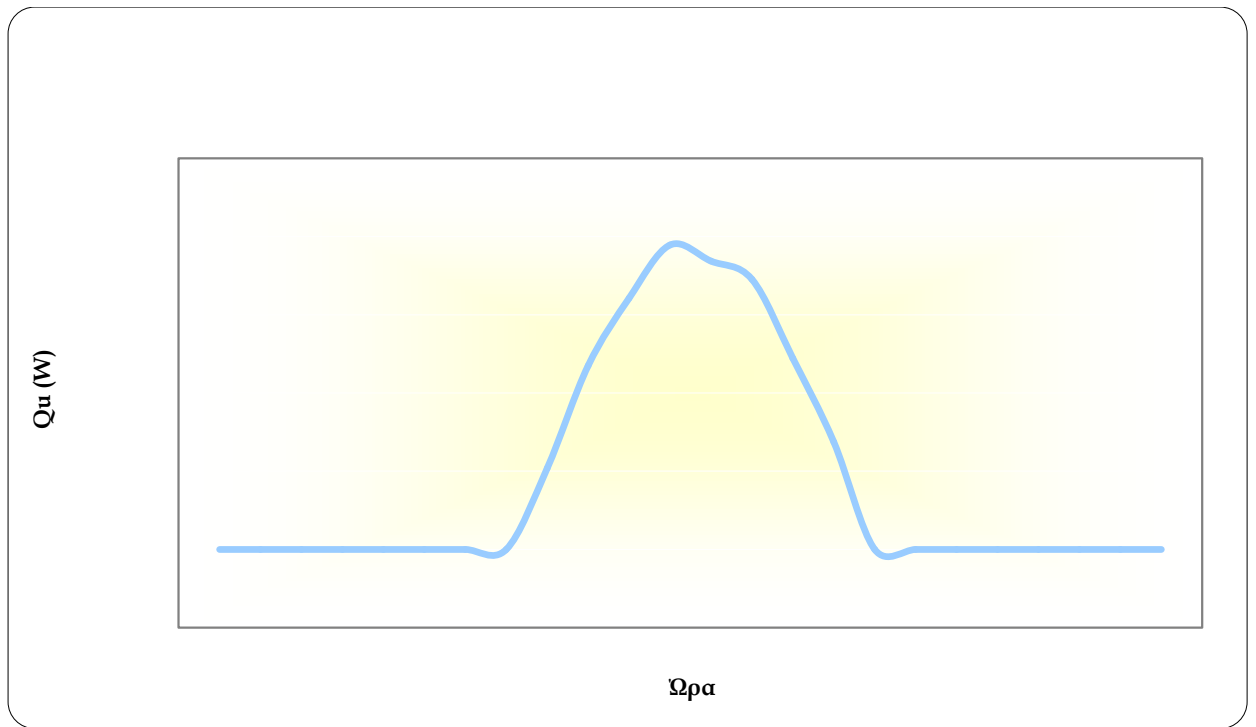
Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές του παραπάνω πίνακα σε διαγράμματα προκειμένου να παρουσιαστούν οι μεταβολές των μεγεθών που υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια του 24ώρου.



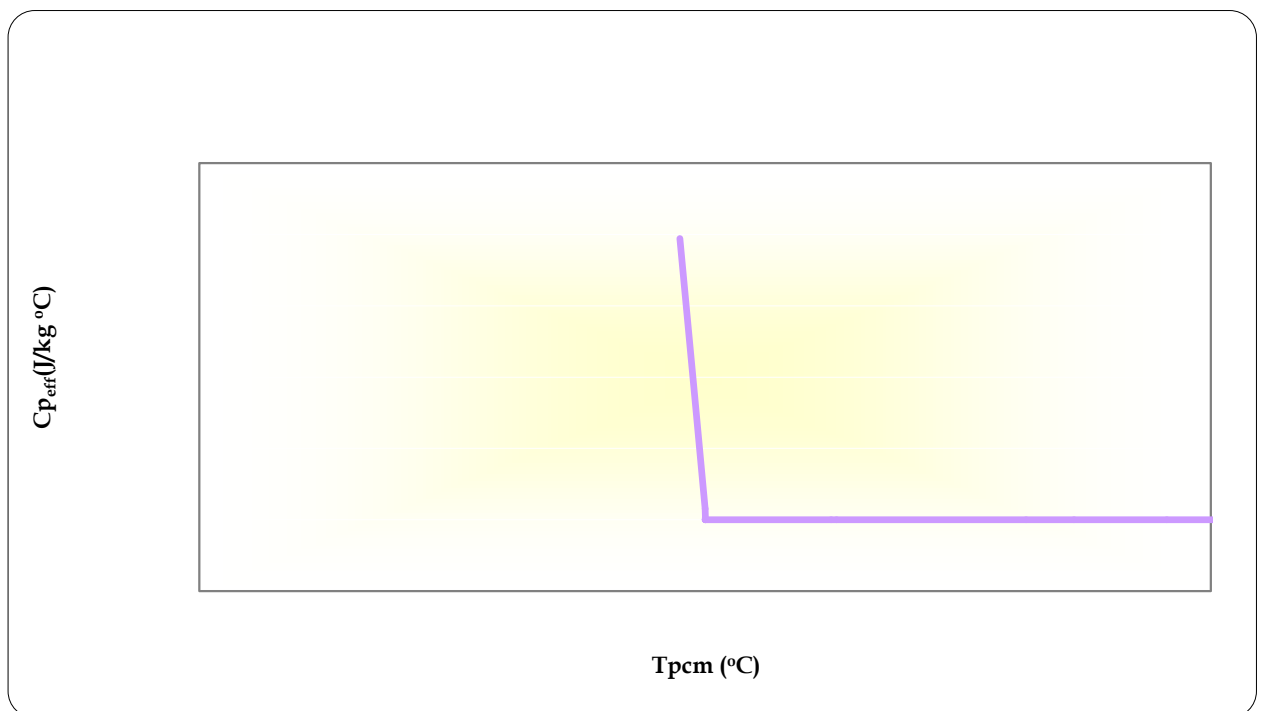
Σχήμα 11.3.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM συναρτήσει της ώρας.



Σχήμα 11.3.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού συναρτήσει της ώρας.



Σχήμα 11.3.3: Διάγραμμα ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη συναρτήσει της ώρας.



Σχήμα 11.3.4: Διάγραμμα ενεργού θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη για το μήνα Ιανουάριο κατά την οποία θα εξεταστούν οι μεταβολές που θα παρατηρηθούν στα υπολογιζόμενα μεγέθη κατά την αλλαγή κάποιων συγκεκριμένων παραμέτρων. Κάθε φορά αλλάζει μια μόνο παράμετρος και οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές έτσι ώστε να γίνει μια αποτελεσματική σύγκριση των αποτελεσμάτων και να βγουν ακριβή συμπεράσματα.

11.4 Παραμετρική μελέτη για διάφορες τιμές συλλεκτικής επιφάνειας:

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 3 \text{ m}^2$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

Πίνακας 11.4.1: Αποτελέσματα μελέτης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό σύστημα για την 21^η Ιανουαρίου με συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 3 \text{ m}^2$.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	15,1582	0	0	5000
2:00	15,1582	0	0	5000
3:00	15,1582	0	0	5000
4:00	15,1582	0	0	5000
5:00	15,1582	0	0	5000
6:00	15,1261	0	0	5000
7:00	15,0660	0	0	5000
8:00	15,0164	0	0	5000
9:00	16,8686	27,4253	259,345	5000
10:00	19,9058	45,9343	607,473	5000
11:00	23,7075	60,7156	852,924	35567,132
12:00	24,2790	71,4186	997,163	27947,045
13:00	24,6214	73,7537	1034,021	23381,385
14:00	25,4080	71,9333	988,819	12893,179
15:00	25,5167	62,7267	779,961	11443,918
16:00	25,8750	47,6293	462,153	6667,099
17:00	22,9581	0	0	44441,376
18:00	22,3177	0	0	35902,199
19:00	21,1027	0	0	19702,978
20:00	19,5334	0	0	5000
21:00	16,2907	0	0	5000
22:00	15,5213	0	0	5000
23:00	15,2727	0	0	5000
24:00	15,2077	0	0	5000

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 4 \text{ m}^2$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

Πίνακας 11.4.2: Αποτελέσματα μελέτης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό σύστημα για την 21^η Ιανουαρίου με συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 4 \text{ m}^2$.

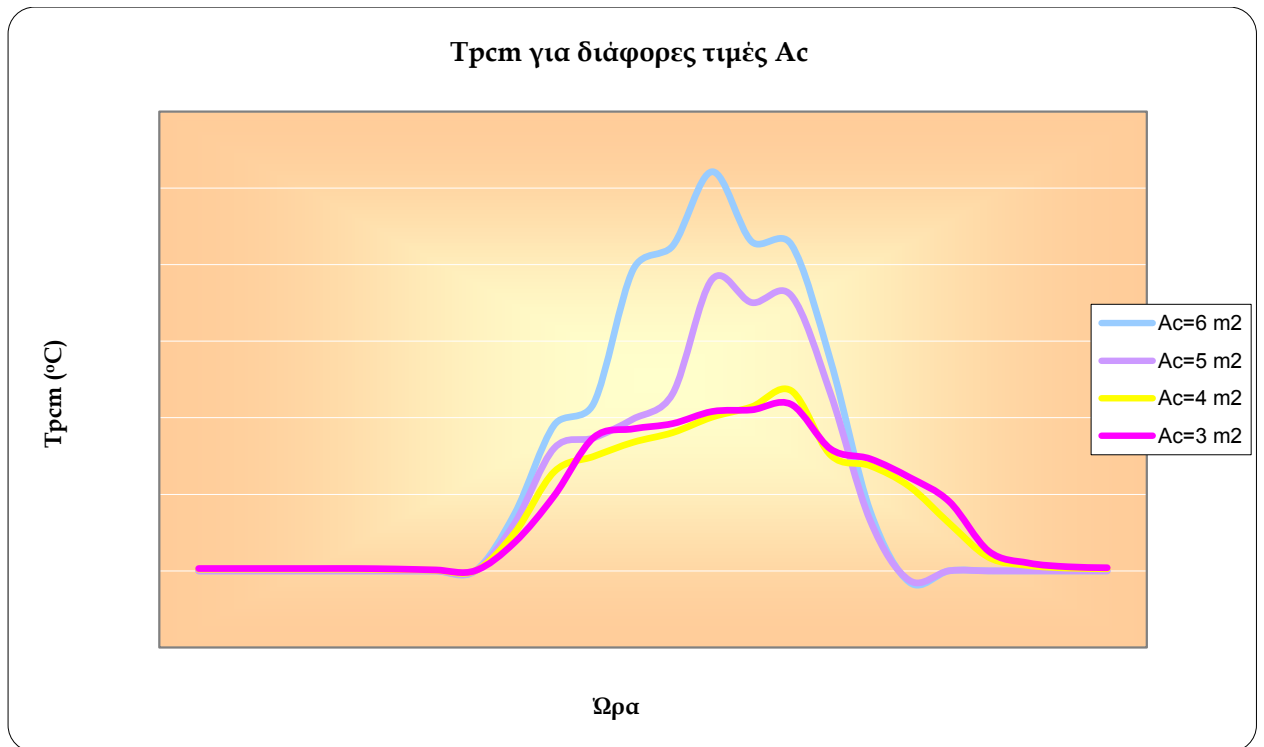
Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	15,1087	0	0	5000
2:00	15,1087	0	0	5000
3:00	15,1087	0	0	5000
4:00	15,1087	0	0	5000
5:00	15,1087	0	0	5000
6:00	15,0867	0	0	5000
7:00	15,0453	0	0	5000
8:00	15,0113	0	0	5000
9:00	17,4912	31,5600	345,867	5000
10:00	21,4764	55,8165	800,999	24685,904
11:00	22,4764	74,8073	1114,615	38018,348
12:00	23,4005	86,9394	1347,278	39660,415
13:00	24,0321	89,9720	1391,345	31238,346
14:00	25,0443	87,5207	1326,911	17743,296
15:00	25,7139	75,0532	1045,187	8814,557
16:00	26,7699	55,0615	613,364	5000
17:00	22,5604	0	0	39139,308
18:00	21,8696	0	0	29927,851
19:00	20,5014	0	0	11684,784
20:00	18,1159	0	0	5000
21:00	15,8871	0	0	5000
22:00	15,3583	0	0	5000
23:00	15,1875	0	0	5000
24:00	15,1428	0	0	5000

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 5 \text{ m}^2$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

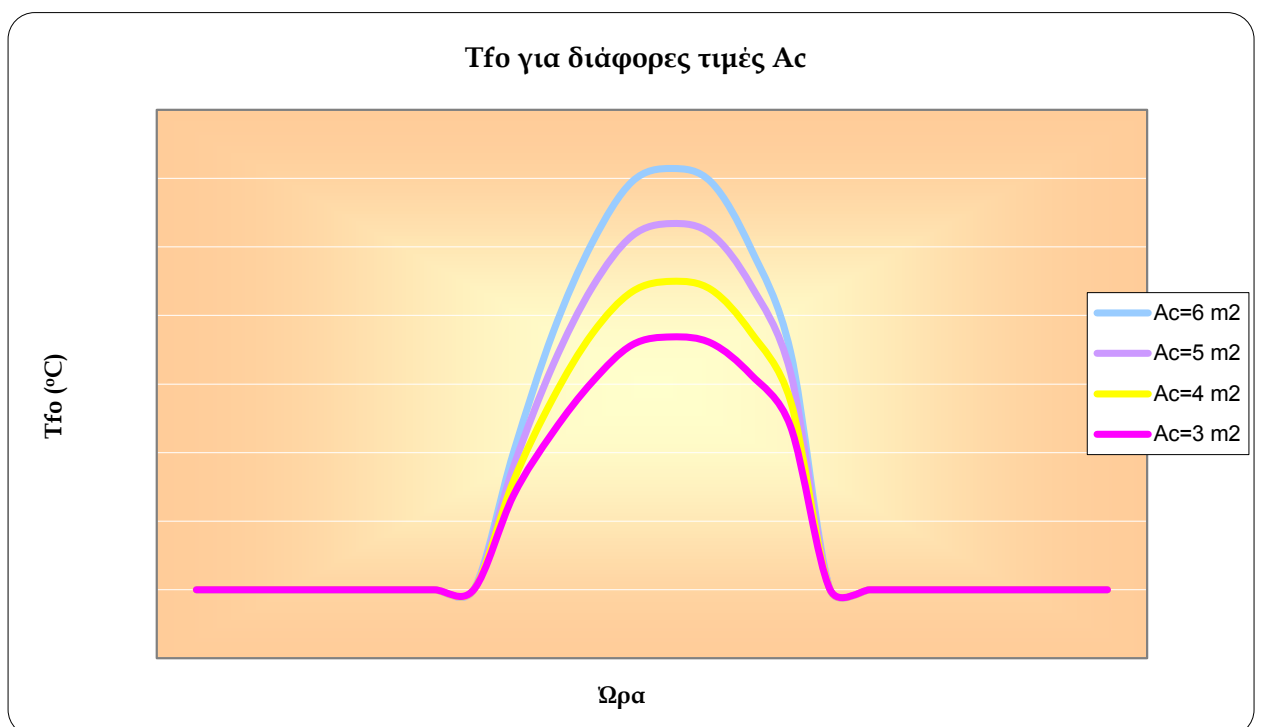
Πίνακας 11.4.3: Αποτελέσματα μελέτης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό σύστημα για την 21^η Ιανουαρίου με συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 5 \text{ m}^2$.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	15,0003	0	0	5000
2:00	15,0003	0	0	5000
3:00	15,0003	0	0	5000
4:00	15,0003	0	0	5000
5:00	15,0003	0	0	5000
6:00	15,0002	0	0	5000
7:00	15,0001	0	0	5000
8:00	15,0000	0	0	5000
9:00	18,1143	35,6956	432,537	5000
10:00	23,0149	65,4843	990,033	44801,511
11:00	23,6856	88,3535	1365,577	35858,138
12:00	24,9214	103,2230	1662,331	19381,384
13:00	26,5753	106,8259	1711,805	5000
14:00	34,0480	103,7457	1612,862	5000
15:00	32,5233	88,8048	1144,415	5000
16:00	32,9829	63,3432	644,136	5000
17:00	26,5514	0	0	5000
18:00	18,2887	0	0	5000
19:00	14,3680	0	0	5000
20:00	15,0084	0	0	5000
21:00	15,0024	0	0	5000
22:00	15,0010	0	0	5000
23:00	15,0005	0	0	5000
24:00	15,0004	0	0	5000

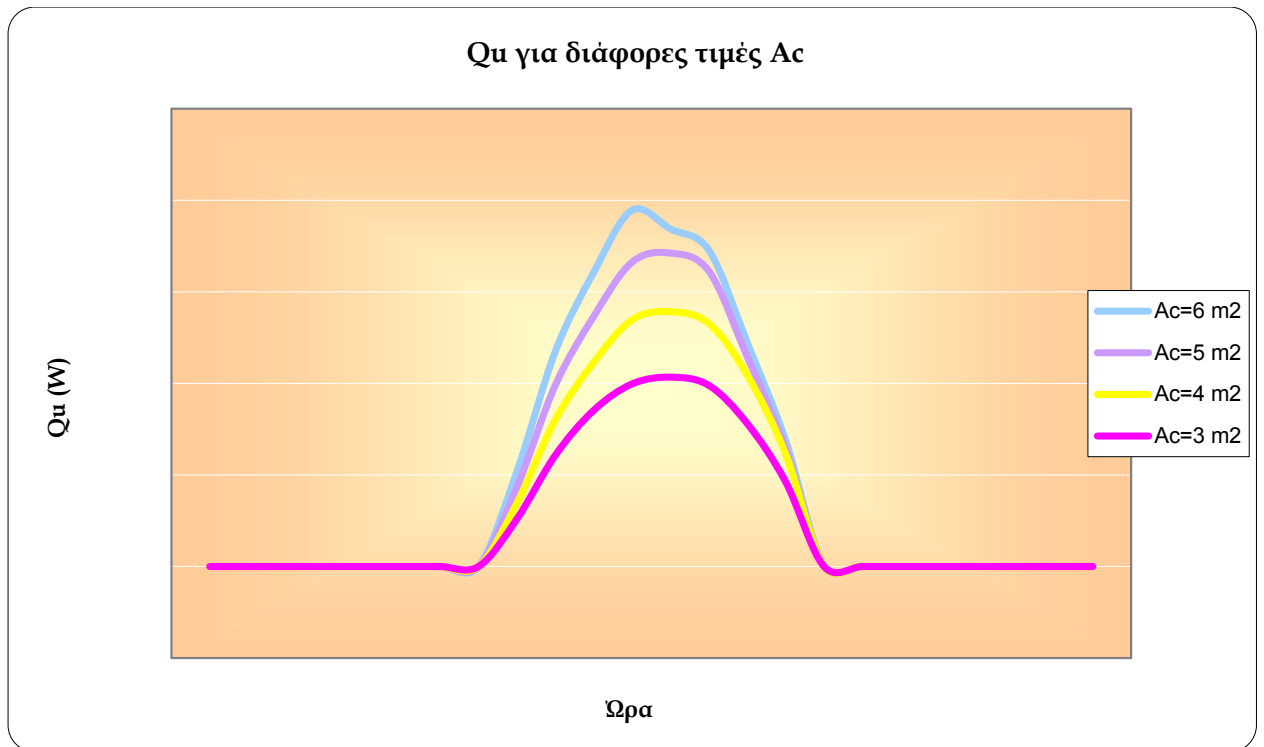
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι τιμές των παραπάνω πινάκων της παραμετρικής μελέτης αλλά και της βασικής μελέτης για το μήνα Ιανουάριο προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



Σχήμα 11.4.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές συλλεκτικής επιφάνειας.



Σχήμα 11.4.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές συλλεκτικής επιφάνειας.



Σχήμα 11.4.3: Διάγραμμα ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές συλλεκτικής επιφάνειας.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται η συλλεκτική επιφάνεια τόσο αυξάνονται οι τιμές των υπολογιζόμενων μεγεθών T_{pcm} , T_{fo} , Q_u . Το φαινόμενο αυτό είναι λογικό καθώς όσο μεγαλώνει η τιμή της συλλεκτικής επιφάνειας και εφόσον η μάζα του PCM που βρίσκεται στη δεξαμενή παραμένει σταθερή, αυξάνεται η ενέργεια που λαμβάνει το υλικό αλλαγής φάσης με αποτέλεσμα να αυξάνονται τόσο η θερμοκρασία του όσο και η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη με το οποίο το υλικό αλλαγής φάσης έρχεται σε άμεση επαφή.

11.5 Παραμετρική μελέτη για διάφορες τιμές της μάζας του PCM:

Αλλάζοντας τις τιμές της εν λόγω παραμέτρου παρατηρήθηκε ότι οι μεταβολές αυτές είχαν πολύ μικρή επίδραση στα υπολογιζόμενα μεγέθη της μελέτης. Για αυτό το λόγο, η μάζα του PCM στην παραμετρική μελέτη πήρε διαφορετικές σε εύρος τιμές, προκειμένου να γίνουν φανερές οι αλλαγές που η συγκεκριμένη παράμετρος επιφέρει στα υπολογιζόμενα μεγέθη.

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και $m_{\text{pcm}} = 60 \text{ kg}$ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

Πίνακας 11.5.1: Αποτελέσματα μελέτης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό σύστημα για την 21^η Ιανουαρίου με $m_{\text{pcm}} = 60 \text{ kg}$.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	15,0003	0	0	5000
2:00	15,0003	0	0	5000
3:00	15,0003	0	0	5000
4:00	15,0003	0	0	5000
5:00	15,0003	0	0	5000
6:00	15,0002	0	0	5000
7:00	15,0000	0	0	5000
8:00	15,0000	0	0	5000
9:00	21,2285	39,8347	519,045	21380,644
10:00	22,6373	74,8540	1120,771	40163,492
11:00	24,3418	101,4339	1646,849	27108,892
12:00	27,6985	119,1085	1980,623	5000
13:00	39,0132	123,1138	1994,181	5000
14:00	44,7007	118,7632	1666,777	5000
15:00	33,0434	99,3993	1143,200	5000
16:00	35,0140	69,4897	761,728	5000
17:00	23,0841	0	0	43879,294
18:00	21,9859	0	0	31478,309
19:00	19,7811	0	0	5000
20:00	11,7063	0	0	5000
21:00	15,6329	0	0	5000
22:00	15,0041	0	0	5000
23:00	15,0008	0	0	5000
24:00	15,0005	0	0	5000

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και $m_{pcm} = 140 \text{ kg}$ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

Πίνακας 11.5.2: Αποτελέσματα μελέτης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό σύστημα για την 21^η Ιανουαρίου με $m_{pcm} = 140 \text{ kg}$.

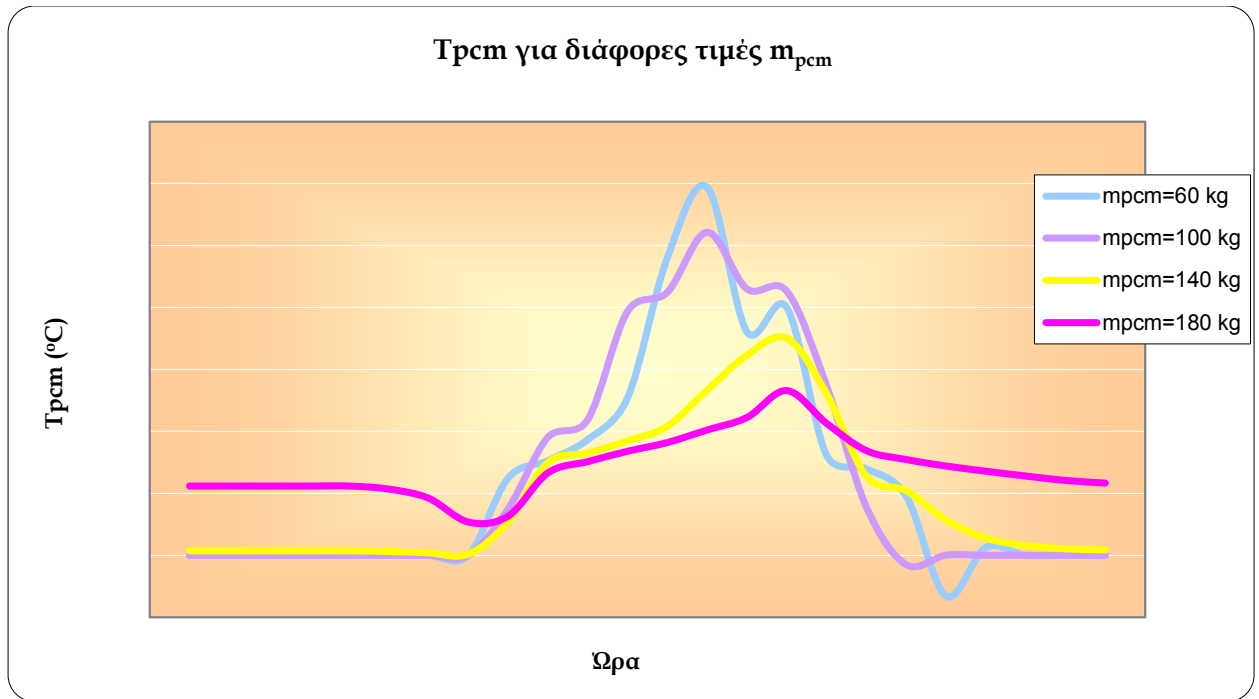
Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	15,3628	0	0	5000
2:00	15,3628	0	0	5000
3:00	15,3628	0	0	5000
4:00	15,3628	0	0	5000
5:00	15,3628	0	0	5000
6:00	15,3103	0	0	5000
7:00	15,2046	0	0	5000
8:00	15,0948	0	0	5000
9:00	17,6915	39,8315	516,997	5000
10:00	22,4732	74,9724	1197,172	37976,337
11:00	23,2556	101,4394	1650,392	41592,208
12:00	24,2411	119,1449	2004,086	28452,346
13:00	25,4194	123,2296	2068,861	12741,220
14:00	28,3313	119,2185	1960,402	5000
15:00	31,1476	99,9476	1496,779	5000
16:00	32,5256	69,5532	802,677	5000
17:00	28,0485	0	0	5000
18:00	21,3817	0	0	23422,377
19:00	20,2216	0	0	7954,933
20:00	17,8461	0	0	5000
21:00	16,3919	0	0	5000
22:00	15,7993	0	0	5000
23:00	15,5270	0	0	5000
24:00	15,4373	0	0	5000

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και $m_{pcm} = 180 \text{ kg}$ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και $C_{p,eff}$.

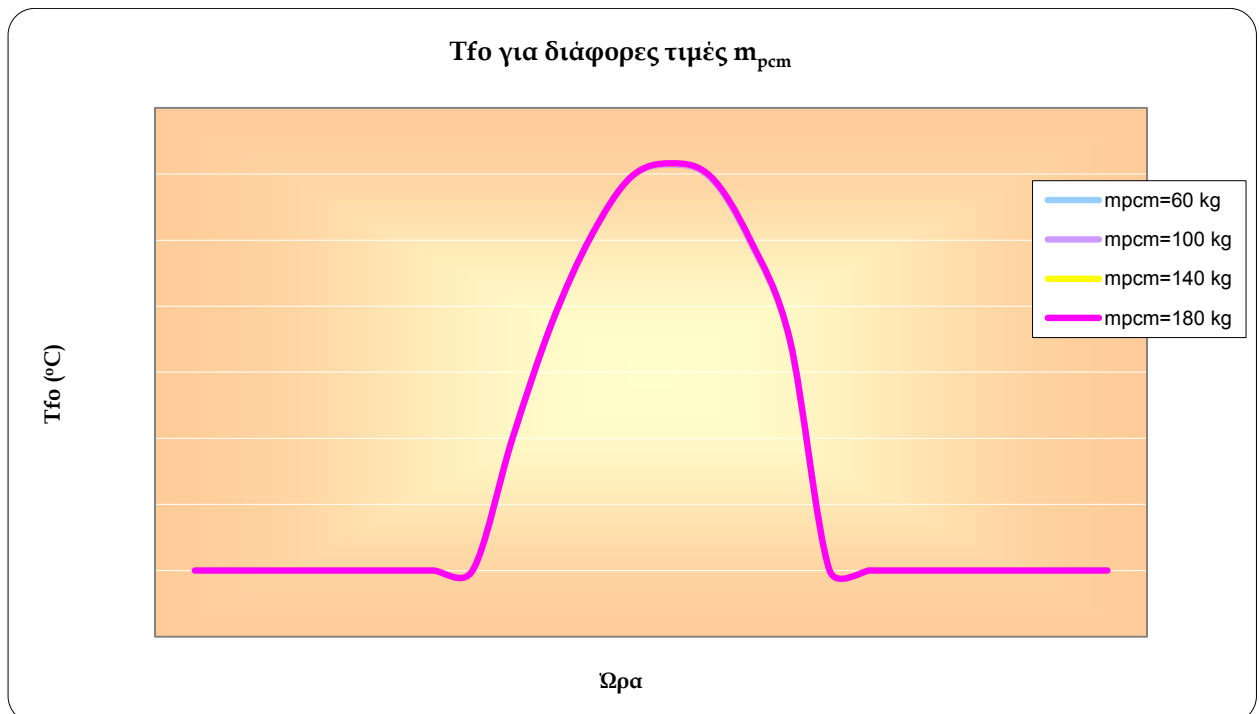
Πίνακας 11.5.3: Αποτελέσματα μελέτης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό σύστημα για την 21^η Ιανουαρίου με $m_{pcm} = 180 \text{ kg}$.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	20,5933	0	0	12911,094
2:00	20,5933	0	0	12911,094
3:00	20,5933	0	0	12911,094
4:00	20,5933	0	0	12911,094
5:00	20,5933	0	0	12911,094
6:00	20,3494	0	0	9659,273
7:00	19,6159	0	0	5000,000
8:00	17,6899	0	0	5000,000
9:00	18,1619	39,7446	460,944	5000,000
10:00	21,6534	74,9567	1187,012	27045,746
11:00	22,5611	101,4668	1668,100	39148,069
12:00	23,4007	119,1681	2019,087	39656,811
13:00	24,1025	123,2578	2087,012	30299,696
14:00	25,1169	119,2626	1988,847	16775,296
15:00	26,1254	100,0552	1566,212	5000,000
16:00	28,2963	69,7214	911,158	5000,000
17:00	25,6544	0	0	9607,626
18:00	23,4510	0	0	38986,521
19:00	22,7332	0	0	41442,324
20:00	22,2079	0	0	34439,023
21:00	21,7921	0	0	28894,286
22:00	21,4029	0	0	23704,727
23:00	21,0451	0	0	18934,173
24:00	20,8336	0	0	16114,786

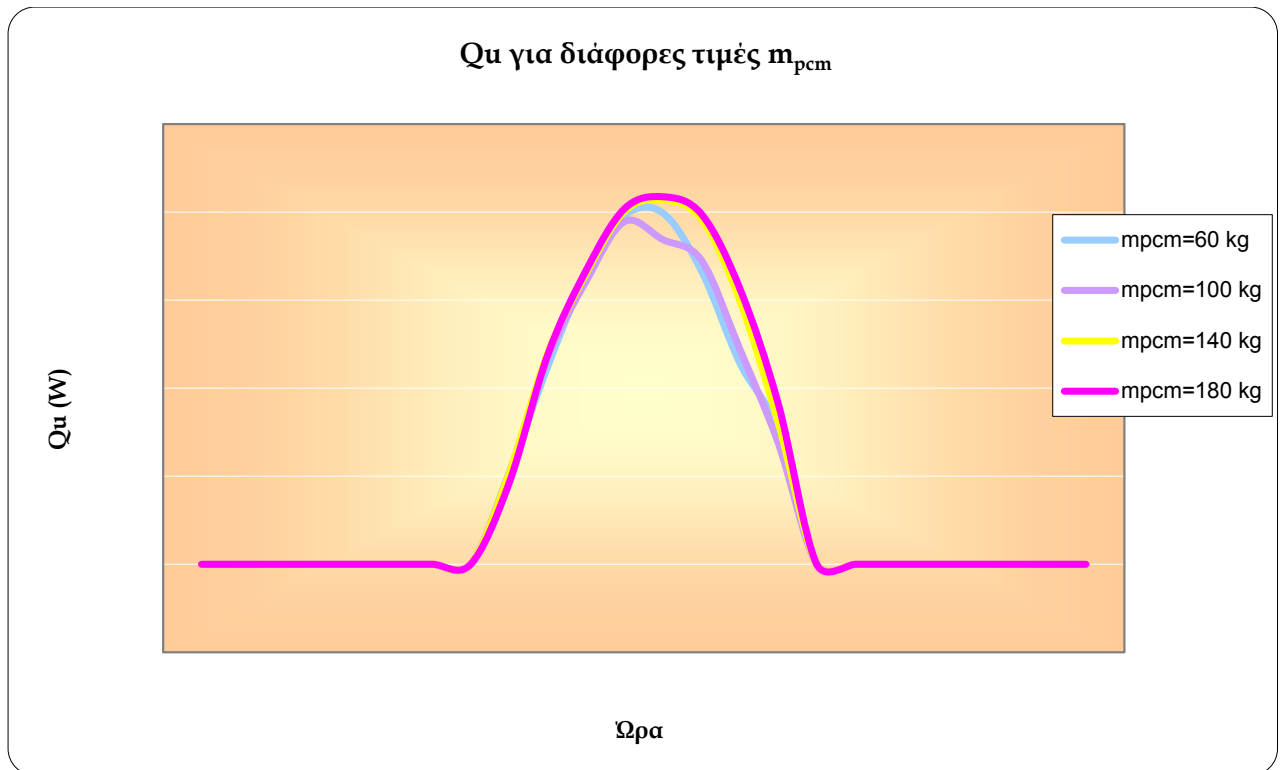
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι τιμές των παραπάνω πινάκων της παραμετρικής μελέτης αλλά και της βασικής μελέτης για το μήνα Ιανουάριο προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



Σχήμα 11.5.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές της μάζας PCM.



Σχήμα 11.5.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές της μάζας PCM.



Σχήμα 11.5.3: Διάγραμμα ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη συναρτήσει της ώρας για διάφορες τιμές της μάζας PCM.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η επίδραση της μάζας του PCM στα υπολογιζόμενα μεγέθη παρουσιάζει μια έντονη μεταβολή στο καθένα ξεχωριστά. Αναλυτικότερα, στο σχήμα 11.5.1 βλέπουμε ότι κατά τη διάρκεια της νύχτας όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του PCM έχει μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα και διατηρεί μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της ημέρας η θερμότητα από τον ήλιο χρησιμοποιείται κυρίως για την αλλαγή φάσης παρά για την αύξηση της θερμοκρασίας του PCM με αποτέλεσμα όταν η μάζα του είναι μεγάλη είναι περισσότερο δύσκολο να αυξηθεί η θερμοκρασία του και έτσι η T_{pcm} να μειώνεται με αύξηση της μάζας του. Αντιθέτως, στα υπόλοιπα διαγράμματα δεν παρατηρείται η τάση αυτή για όλες τις ώρες. Συγκεκριμένα, για το διάγραμμα 11.5.2 γνωρίζουμε ότι η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη T_{fo} εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη T_{fi} όσο και από την ωφέλιμη ισχύ του συλλέκτη Q_u , μεγέθη τα οποία εξαρτώνται με

τη σειρά τους από τη μάζα του PCM και από την T_{fi} λόγω απωλειών προς το περιβάλλον αντίστοιχα. Οι επιδράσεις λοιπόν των T_{fi} και Q_u είναι αντίθετες γι' αυτό και η επίδραση της μάζας του PCM στην T_{fo} είναι μικρή. Όσον αφορά στο διάγραμμα 11.5.3 έχουμε να αναφέρουμε ότι η μεγαλύτερη μάζα του PCM του προκαλεί μικρότερη θερμοκρασία με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μικρότερες απώλειες προς το περιβάλλον και συνεπώς να αυξάνεται η τιμή της ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη Q_u .

11.6 Παραμετρική μελέτη για PCMs με διαφορετικές τιμές θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης:

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για PCM με εύρος αλλαγής φάσης $T_s = 14^\circ\text{C} - T_l = 20^\circ\text{C}$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και $C_{p,eff}$.

Πίνακας 11.6.1: Αποτελέσματα μελέτης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό σύστημα για την 21^η Ιανουαρίου με εύρος αλλαγής φάσης $T_s=14^\circ\text{C} - T_l=20^\circ\text{C}$.

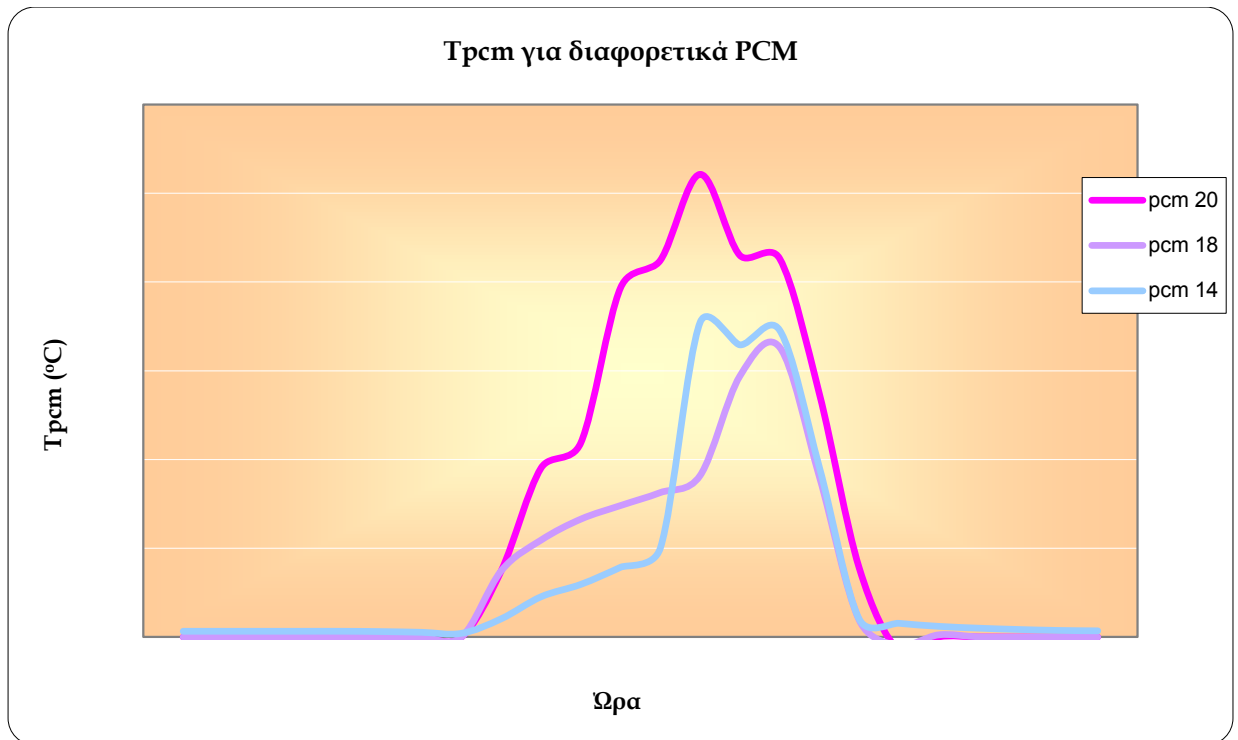
Ωρα	T_{pcm} ($^\circ\text{C}$)	T_{fo} ($^\circ\text{C}$)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg $^\circ\text{C}$)
1:00	15,3273	0	0	22697,73
2:00	15,3273	0	0	22697,73
3:00	15,3273	0	0	22697,73
4:00	15,3273	0	0	22697,73
5:00	15,3273	0	0	22697,73
6:00	15,3091	0	0	22454,17
7:00	15,2680	0	0	21907,2
8:00	15,2106	0	0	21141,42
9:00	16,0295	39,8276	514,496	32060,62
10:00	17,2706	75,0281	1233,070	81392,47
11:00	17,9671	101,6136	1762,770	72105,36
12:00	18,9327	119,3220	2118,318	59230,29
13:00	20,0125	123,4074	2183,521	5000
14:00	32,7274	119,3996	2077,191	5000
15:00	31,4611	99,8003	1401,824	5000
16:00	32,2856	69,5427	795,907	5000
17:00	24,5579	0	0	5000
18:00	16,0120	0	0	31826,68
19:00	15,7751	0	0	28667,73
20:00	15,6038	0	0	26384,64
21:00	15,5015	0	0	25020,43
22:00	15,4269	0	0	24024,73
23:00	15,3739	0	0	23318,68
24:00	15,3500	0	0	23000,09

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για PCM με εύρος αλλαγής φάσης $T_s = 18^\circ\text{C} - T_l = 24^\circ\text{C}$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

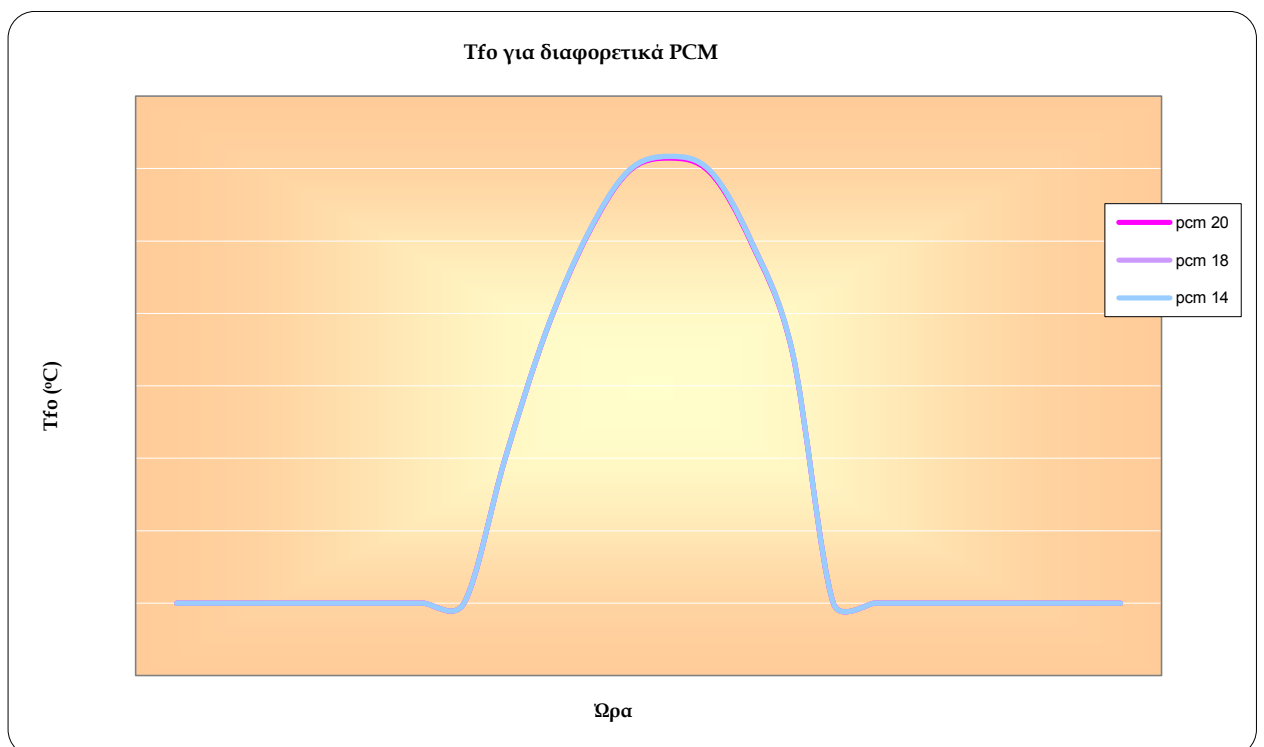
Πίνακας 11.6.2: Αποτελέσματα μελέτης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό σύστημα για την 21^η Ιανουαρίου με εύρος αλλαγής φάσης $T_s = 18^\circ\text{C} - T_l = 24^\circ\text{C}$.

Ωρα	T_{pcm} ($^\circ\text{C}$)	T_{fo} ($^\circ\text{C}$)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg $^\circ\text{C}$)
1:00	15,0007	0	0	5000
2:00	15,0007	0	0	5000
3:00	15,0007	0	0	5000
4:00	15,0007	0	0	5000
5:00	15,0007	0	0	5000
6:00	15,0005	0	0	5000
7:00	15,0002	0	0	5000
8:00	15,0000	0	0	5000
9:00	18,7371	39,8347	519,045	14828,27
10:00	20,4621	74,9374	1174,586	37827,54
11:00	21,6437	101,5067	1693,833	76417,13
12:00	22,4099	119,1989	2038,903	66201,31
13:00	23,1395	123,2910	2108,414	56473,93
14:00	24,0984	119,2949	2009,649	5000
15:00	29,7034	100,0893	1588,211	5000
16:00	31,3251	69,6016	833,873	5000
17:00	24,0268	0	0	5000
18:00	15,9558	0	0	5000
19:00	14,5315	0	0	5000
20:00	15,1249	0	0	5000
21:00	15,0132	0	0	5000
22:00	15,0034	0	0	5000
23:00	15,0014	0	0	5000
24:00	15,0010	0	0	5000

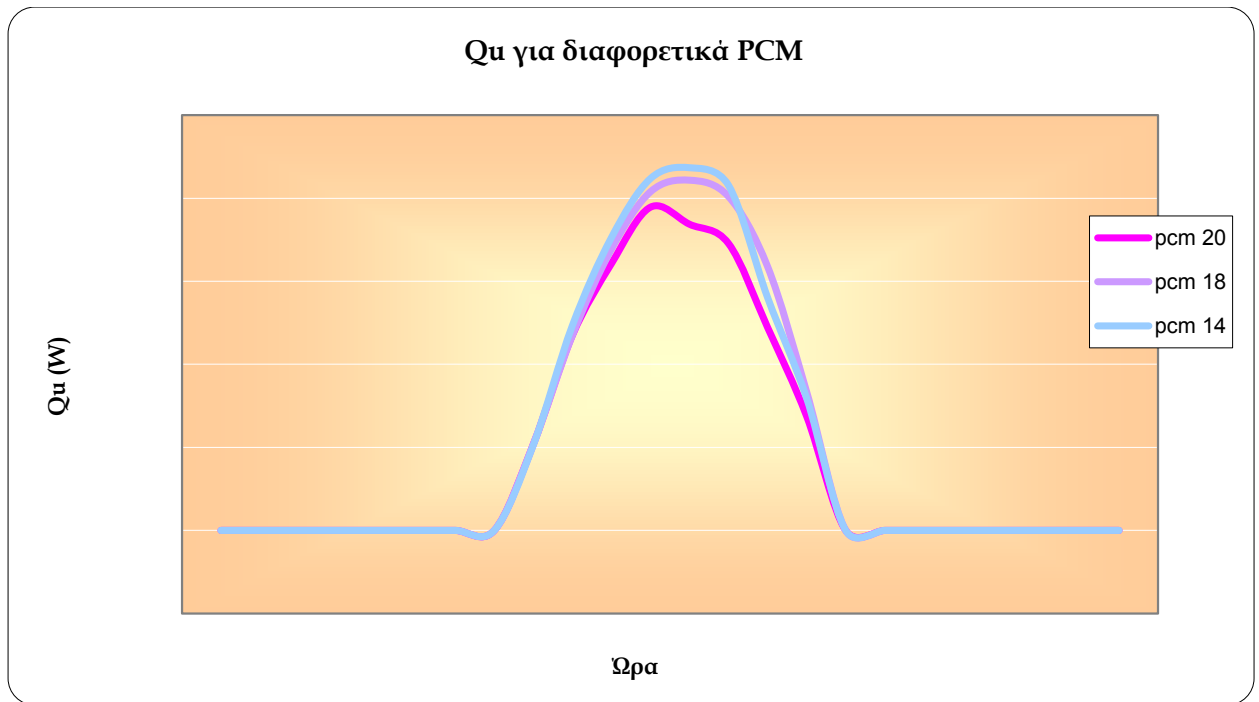
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι τιμές των παραπάνω πινάκων της παραμετρικής μελέτης αλλά και της βασικής μελέτης για το μήνα Ιανουάριο προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



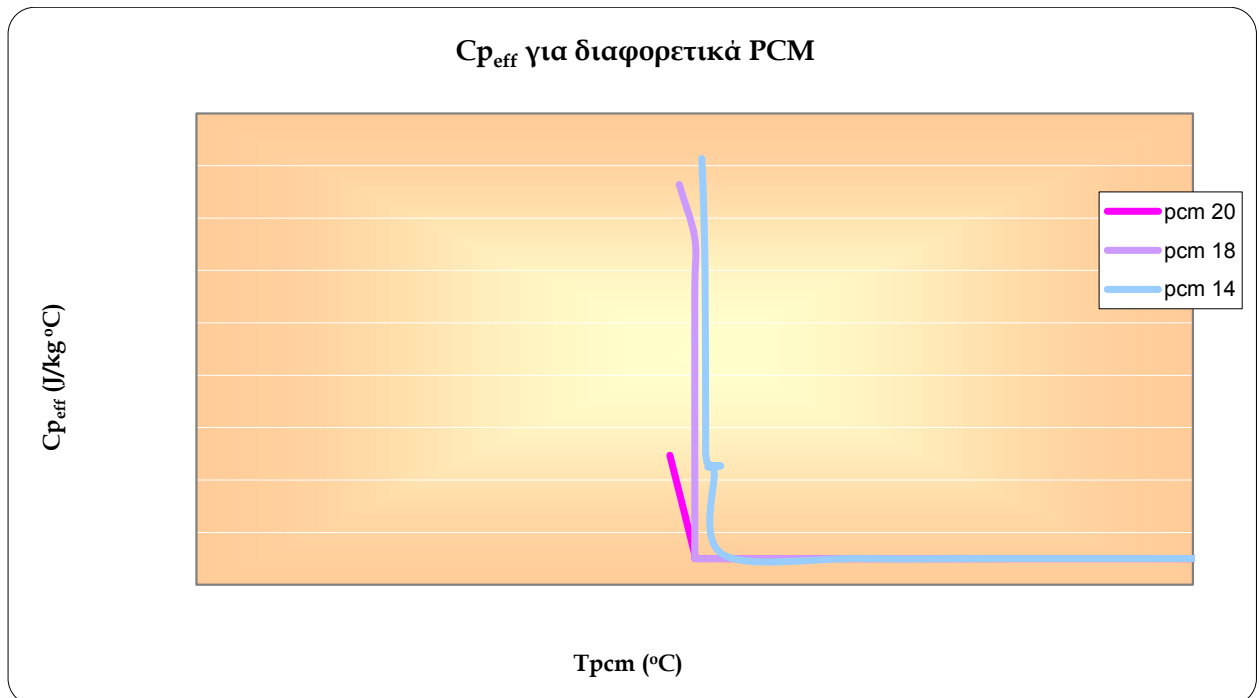
Σχήμα 11.6.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM συναρτήσει της ώρας για PCM με διαφορετικές τιμές εύρους αλλαγής φάσης.



Σχήμα 11.6.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού συναρτήσει της ώρας για PCM με διαφορετικές τιμές εύρους αλλαγής φάσης.



Σχήμα 11.6.3: Διάγραμμα ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη συναρτήσει της ώρας για PCM με διαφορετικές τιμές εύρους αλλαγής φάσης.



Σχήμα 11.6.4: Διάγραμμα ενεργού θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για διαφορετικές τιμές εύρους αλλαγής φάσης.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα καταλήξαμε σε διαφορετικά συμπεράσματα για το καθένα. Αναλυτικότερα, στο διάγραμμα 11.6.1 παρατηρούμε ότι για εύρος αλλαγής φάσης 20-26°C δεν υφίσταται μεγάλη αλλαγή φάσης το συγκεκριμένο PCM καθώς οι θερμοκρασίες του είναι αρκετά υψηλές. Συμπεραίνουμε δηλαδή ότι η θερμότητα από το ζεστό νερό στο συλλέκτη χρησιμεύει κυρίως για αύξηση της θερμοκρασίας του PCM και όχι τόσο για την αλλαγή φάσης, δηλαδή δεν αποθηκεύει μεγάλο ποσό θερμότητας. Προκειμένου να εξυπηρετήσουμε τις ανάγκες μας για αποθήκευση περισσότερης θερμότητας, που είναι και ο βασικός στόχος του PCM, προτιμούμε το υλικό που έχει μικρότερες θερμοκρασίες μέσα στη δεξαμενή και αυτό δεν είναι άλλο από το PCM με εύρος αλλαγής φάσης 18-24°C. Όσον αφορά στο διάγραμμα 11.6.2 τα συμπεράσματα είναι παρεμφερή με αυτά που προέκυψαν και στο διάγραμμα 11.5.2. Με άλλα λόγια, η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη T_{fo} εξαρτάται από δύο παραμέτρους, την T_{fi} και την Q_u , που έχουν αντίθετες επιδράσεις με αποτέλεσμα να μην παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στο μέγεθος αυτό για οποιοδήποτε υλικό αλλαγής φάσης. Ακόμη από το διάγραμμα 11.6.3 συμπεραίνουμε ότι το PCM με εύρος αλλαγής φάσης μεταξύ των τιμών 14-20°C είναι προτιμότερο καθώς εκμεταλλεύεται καλύτερα την ηλιακή ενέργεια διότι αναπτύσσει μεγαλύτερο ωφέλιμο φορτίο Q_u . Τέλος, για το σχήμα 11.6.4 αναφέρουμε ότι παρατηρείται κάποια αλλαγή στις τιμές της ενεργού θερμοχωρητικότητας για τα διαφορετικά PCM που μελετήθηκαν καθώς το μέγεθος αυτό εξαρτάται άμεσα από τις θερμοκρασίες του εύρους αλλαγής φάσης.

11.7 Παραμετρική μελέτη για ημέρες με διαφορετική ηλιοφάνεια:

Επειδή μελετάμε πραγματικά δεδομένα στην περιοχή της Αθήνας, πραγματοποιήσαμε παραμετρική μελέτη για ημέρες με διαφορετική ηλιοφάνεια προκειμένου να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά του PCM σε ημέρες όπου υπάρχει νέφωση.

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για ποσοστό προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη ίσο με **30% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας** της 21^{ης} ημέρας του Ιανουαρίου προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

Πίνακας 11.7.1: Αποτελέσματα μελέτης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό σύστημα για 30% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας της 21^{ης} Ιανουαρίου.

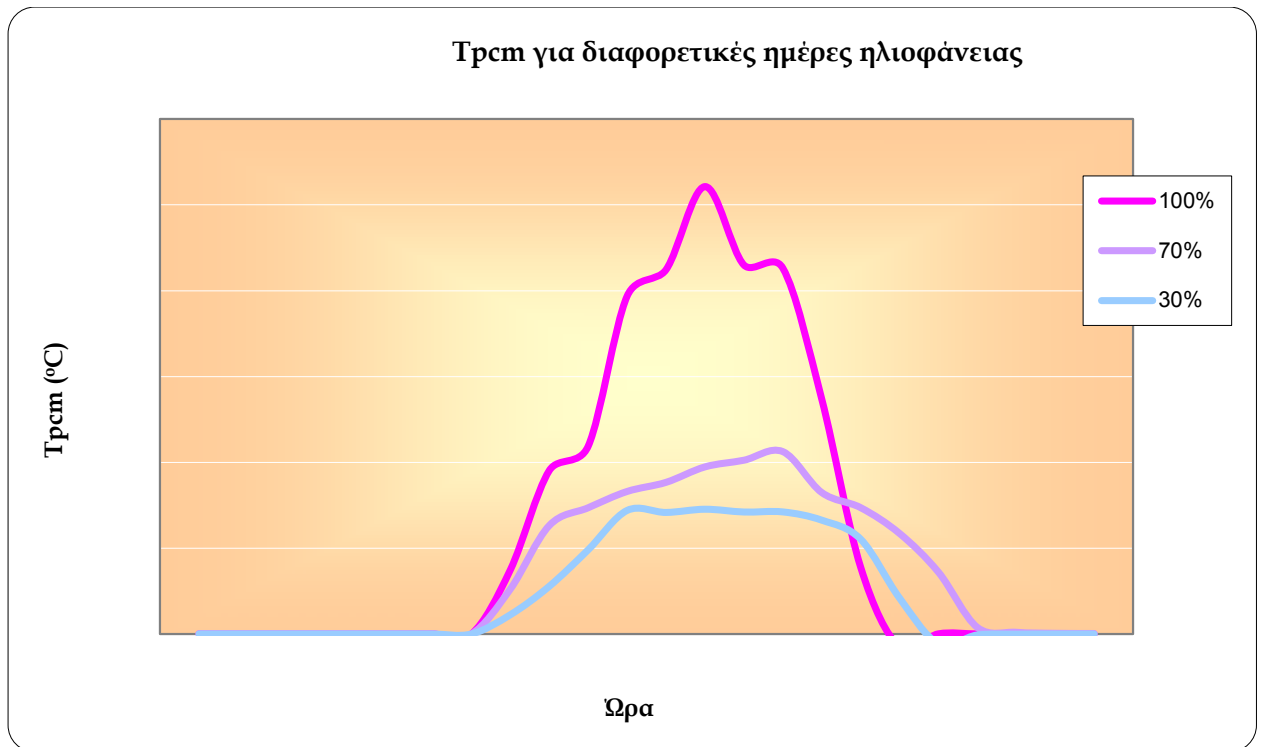
Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	14,997	0	0	5000
2:00	14,997	0	0	5000
3:00	14,997	0	0	5000
4:00	14,997	0	0	5000
5:00	14,997	0	0	5000
6:00	14,99776	0	0	5000
7:00	14,9991	0	0	5000
8:00	14,99994	0	0	5000
9:00	16,12115	22,4504	155,714	5000
10:00	17,77787	33,7923	369,327	5000
11:00	19,90595	42,9235	525,544	5000
12:00	22,19781	49,7113	622,932	34304,1
13:00	22,08135	52,5279	633,899	32751,3
14:00	22,26828	51,2560	609,751	35243,67
15:00	22,10633	45,6330	488,322	33084,45
16:00	22,11202	36,4313	299,391	33160,31
17:00	21,63261	0	0	26768,14
18:00	20,52489	0	0	11998,49
19:00	17,09396	0	0	5000
20:00	14,44161	0	0	5000
21:00	14,94088	0	0	5000
22:00	14,98493	0	0	5000
23:00	14,99391	0	0	5000
24:00	14,99573	0	0	5000

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για ποσοστό προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη ίσο με **70% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας** της 21^{ης} ημέρας του Ιανουαρίου προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

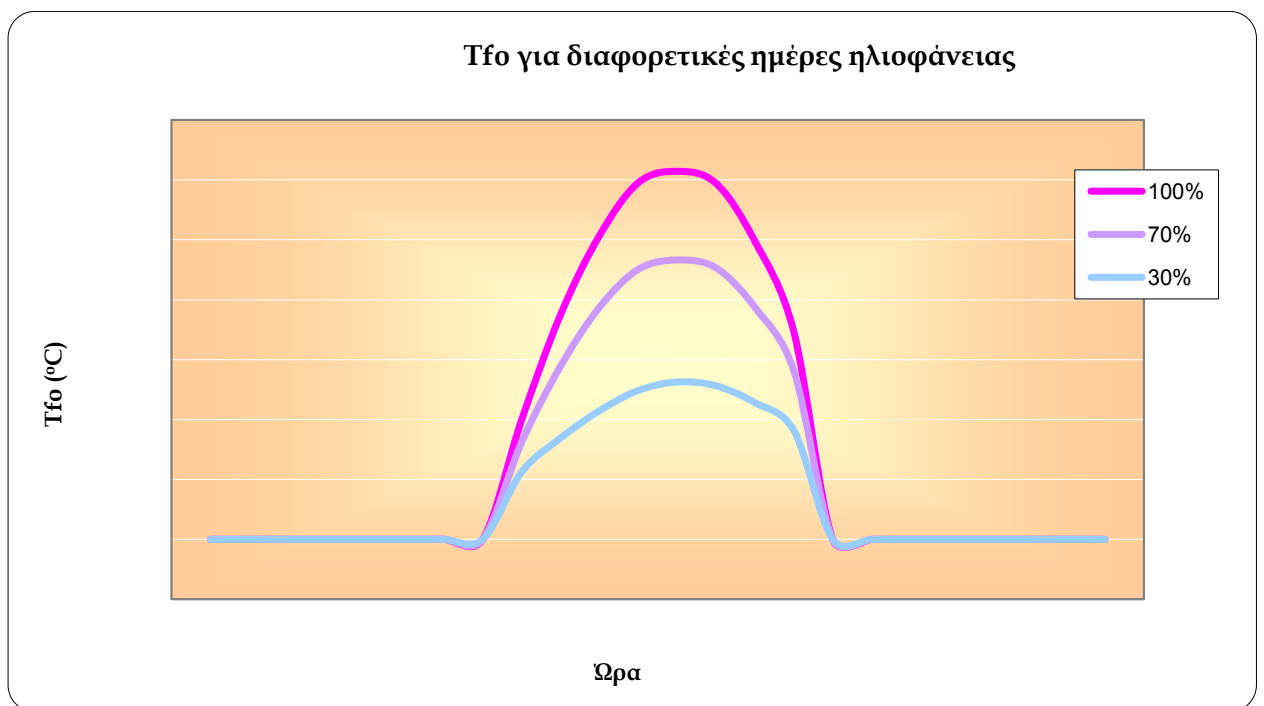
Πίνακας 11.7.2: Αποτελέσματα μελέτης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό σύστημα για 70% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας της 21^{ης} Ιανουαρίου.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	15,0193	0	0	5000
2:00	15,0193	0	0	5000
3:00	15,0193	0	0	5000
4:00	15,0193	0	0	5000
5:00	15,0193	0	0	5000
6:00	15,0144	0	0	5000
7:00	15,0058	0	0	5000
8:00	15,0004	0	0	5000
9:00	17,6159	32,3844	363,326	5000
10:00	21,3189	57,7672	839,163	22586
11:00	22,3543	77,4303	1172,727	36391,14
12:00	23,3039	90,1288	1416,487	40948,48
13:00	23,8340	93,2739	1462,373	33879,62
14:00	24,7348	90,6404	1396,252	21869,1
15:00	25,1229	77,4681	1102,125	16694,76
16:00	25,6273	56,3654	652,968	9968,705
17:00	23,2444	0	0	41741,84
18:00	22,3614	0	0	36485,1
19:00	20,8580	0	0	16440,54
20:00	18,6014	0	0	5000
21:00	15,3813	0	0	5000
22:00	15,0972	0	0	5000
23:00	15,0393	0	0	5000
24:00	15,0276	0	0	5000

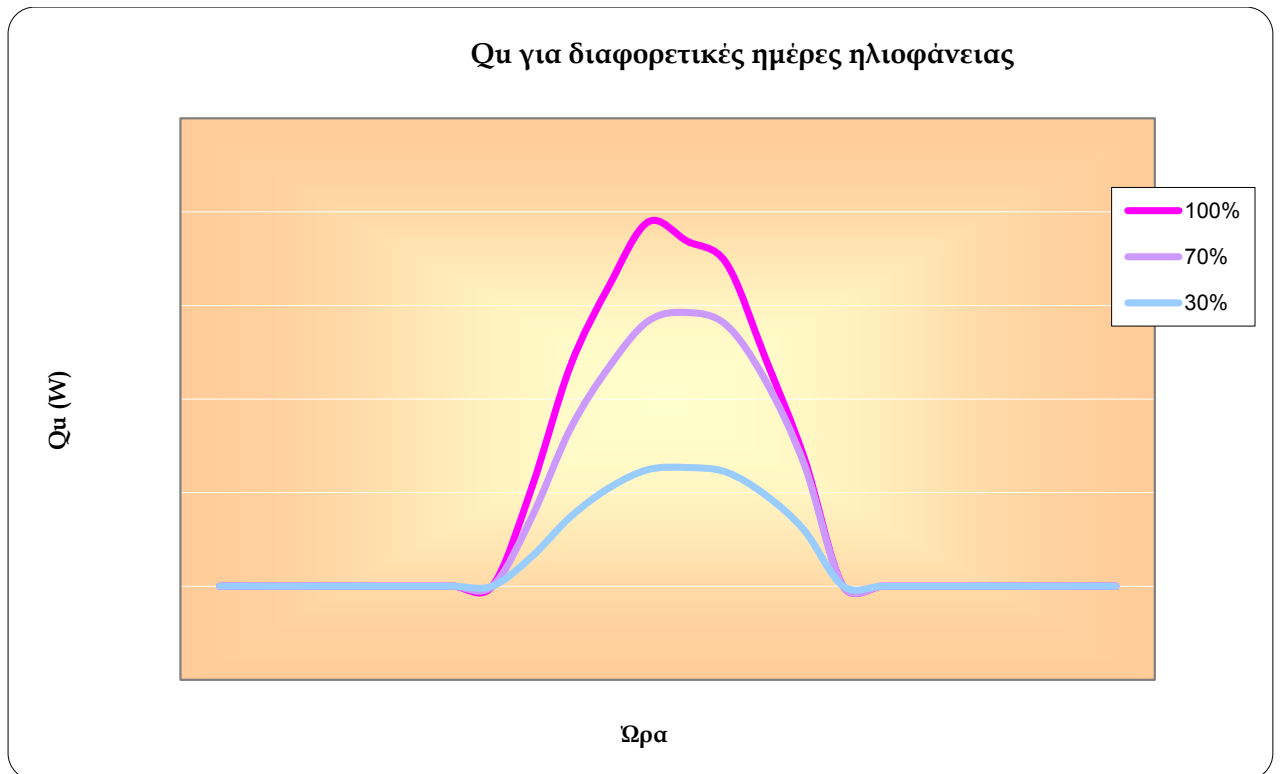
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι τιμές των παραπάνω πινάκων της παραμετρικής μελέτης αλλά και της βασικής μελέτης για το μήνα Ιανουάριο προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



Σχήμα 11.7.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM συναρτήσει της ώρας για διαφορετικά ποσοστά προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 11.7.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού συναρτήσει της ώρας για διαφορετικά ποσοστά προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 11.7.3: Διάγραμμα ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη συναρτήσει της ώρας για διαφορετικά ποσοστά προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα συμπεράσματα που αφορούν τα ανωτέρω διαγράμματα είναι αναμενόμενα καθώς όσο αυξάνεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία τόσο μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζουν τα μεγέθη που μελετώνται.

11.8 Παραμετρική μελέτη για σταθερή κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης:

Παρατηρώντας τόσο τα διαγράμματα της βασικής όσο και των παραμετρικών μελετών συμπεραίνουμε πως όλες οι καμπύλες δεν είναι ομαλές αλλά παρουσιάζονται διάφορα ακρότατα για ορισμένες ώρες. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται πιθανότατα στη μεταβλητή ωριαία κατανάλωση. Προκειμένου λοιπόν, να επιβεβαιώσουμε τόσο την ορθότητα των ανωτέρω υπολογισμών,

διαγραμμάτων και κατ' επέκταση συμπερασμάτων όσο και να εξαλείψουμε τα ακρότατα αυτά των καμπυλών, πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη χρησιμοποιώντας κάθε φορά σταθερές τιμές ωριαίας κατανάλωσης ζεστού νερού.

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για σταθερή ωριαία κατανάλωση $Q_{\text{καταν.}} = 500 \text{ W}$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

Πίνακας 11.8.1: Αποτελέσματα μελέτης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό σύστημα για την 21^η Ιανουαρίου με ωριαία κατανάλωση $Q_{\text{καταν.}} = 500 \text{ W}$.

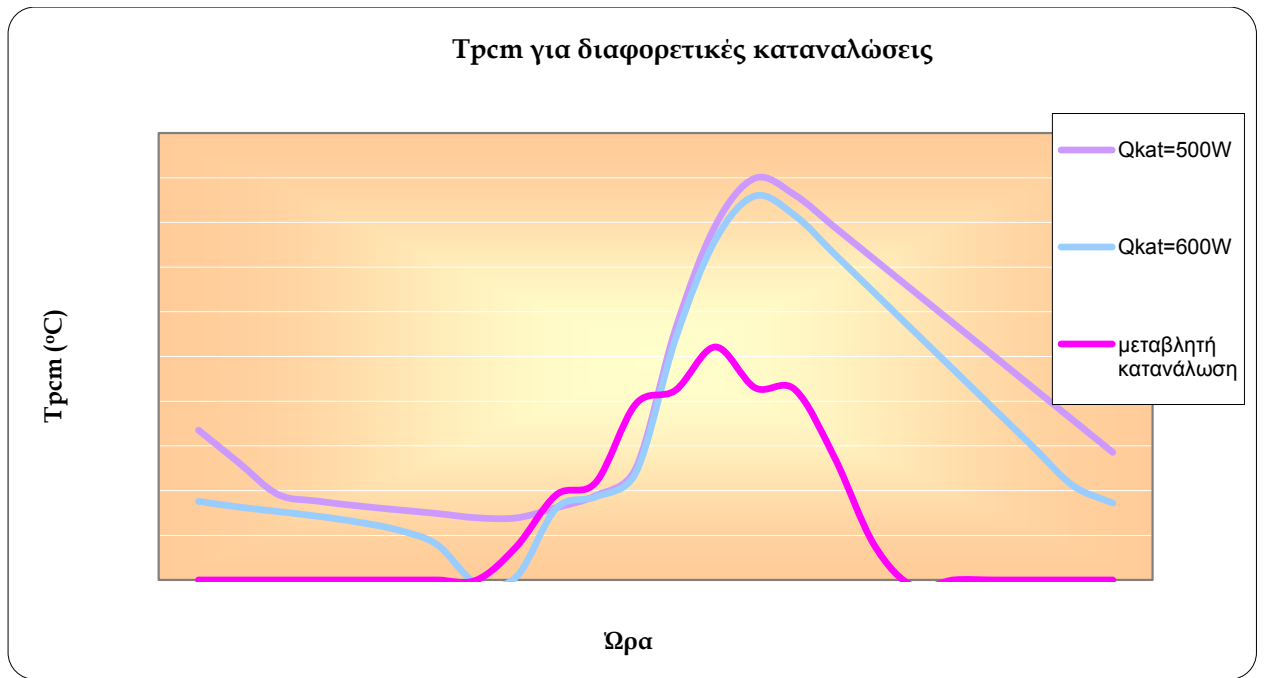
Ωρα	$T_{\text{pcm}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{\text{fo}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$Q_u \text{ (W)}$	$C_{\text{peff}} \text{ (J/kg }^\circ\text{C)}$
1:00	31,7717	0	0	5000
2:00	28,1717	0	0	5000
3:00	24,5717	0	0	24044,31
4:00	23,8231	0	0	34025,88
5:00	23,2940	0	0	41079,34
6:00	22,8559	0	0	43078,31
7:00	22,4380	0	0	37507,06
8:00	21,9581	0	0	31108,27
9:00	21,9485	45,4828	491,666	30979,68
10:00	23,0799	92,4570	1473,628	43934,91
11:00	24,4590	127,5321	2183,051	25547,14
12:00	27,4710	150,6531	2637,458	5000
13:00	43,0623	155,0049	2665,460	5000
14:00	54,6237	143,8161	2105,754	5000
15:00	59,9408	113,8814	1238,485	5000
16:00	58,0760	71,4716	240,993	5000
17:00	54,4760	0	0	5000
18:00	50,8760	0	0	5000
19:00	47,2760	0	0	5000
20:00	43,6760	0	0	5000
21:00	40,0760	0	0	5000
22:00	36,4760	0	0	5000
23:00	32,8760	0	0	5000
24:00	29,2760	0	0	5000

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης για την 21^η ημέρα του Ιανουαρίου και για σταθερή ωριαία κατανάλωση $Q_{\text{καταν.}} = 600 \text{ W}$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τα μεγέθη T_{pcm} , T_{fo} , Q_u και C_{peff} .

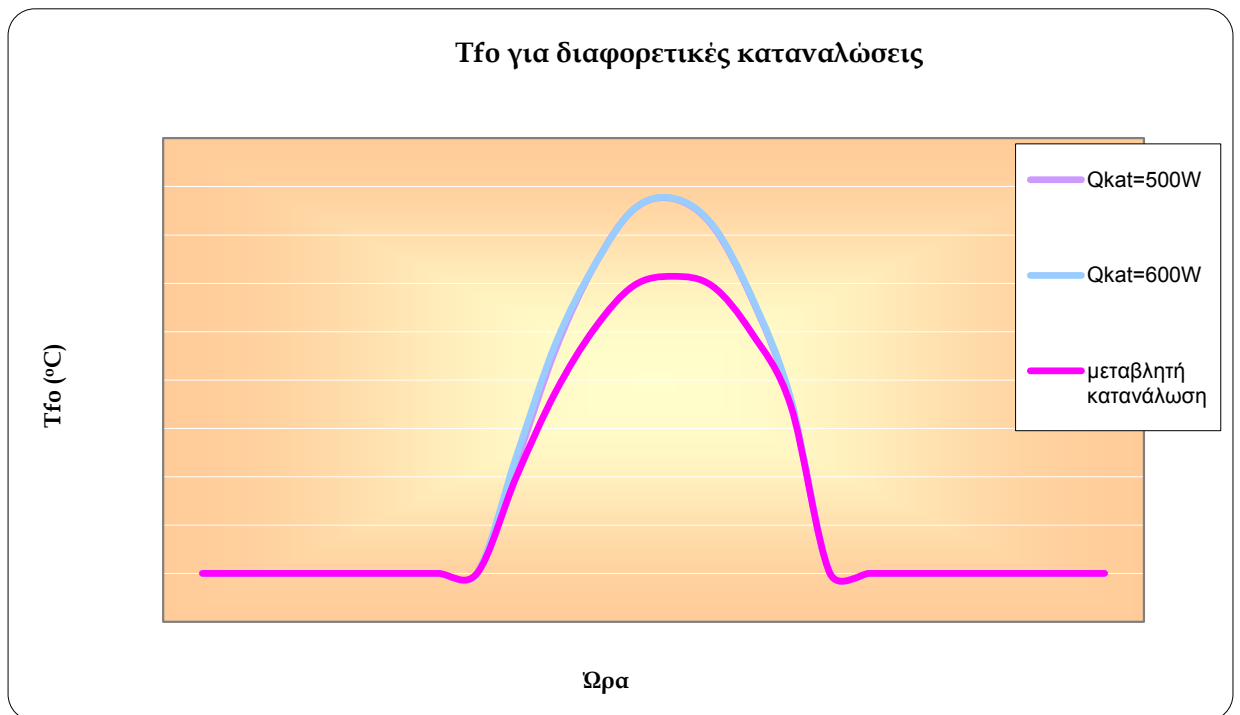
Πίνακας 11.8.2: Αποτελέσματα μελέτης για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό σύστημα για την 21^η Ιανουαρίου με ωριαία κατανάλωση $Q_{\text{καταν.}} = 600 \text{ W}$.

Ωρα	T_{pcm} (°C)	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	C_{peff} (J/kg °C)
1:00	23,7954	0	0	34394,58
2:00	23,1674	0	0	42767,99
3:00	22,6623	0	0	40498
4:00	22,1290	0	0	33386,54
5:00	21,4820	0	0	24760,31
6:00	20,6097	0	0	13128,79
7:00	18,9644	0	0	5000
8:00	14,6444	0	0	5000
9:00	15,3810	48,2473	702,301	5000
10:00	23,0329	94,9394	1662,772	44560,8
11:00	24,3130	127,5498	2184,403	27493,92
12:00	26,9863	150,7083	2641,663	5000
13:00	41,9581	155,1882	2679,419	5000
14:00	53,0285	144,2334	2137,555	5000
15:00	57,9564	114,4844	1284,428	5000
16:00	55,7830	72,2217	298,145	5000
17:00	51,4630	0	0	5000
18:00	47,1430	0	0	5000
19:00	42,8230	0	0	5000
20:00	38,5030	0	0	5000
21:00	34,1830	0	0	5000
22:00	29,8630	0	0	5000
23:00	25,5430	0	0	11093,25
24:00	23,5959	0	0	37054,98

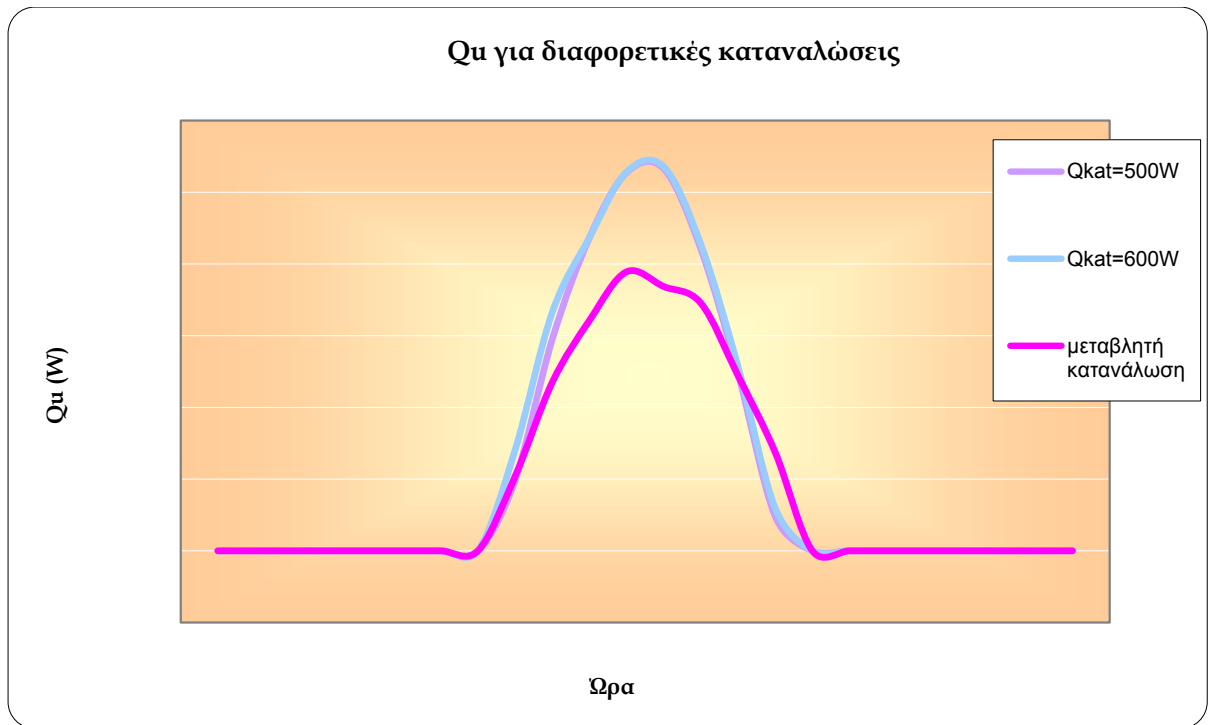
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι τιμές των παραπάνω πινάκων της παραμετρικής μελέτης αλλά και της βασικής μελέτης για το μήνα Ιανουάριο προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



Σχήμα 11.8.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM συναρτήσει της ώρας για διαφορετικά ποσά κατανάλωσης ζεστού νερού.



Σχήμα 11.8.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού συναρτήσει της ώρας για διαφορετικά ποσά κατανάλωσης ζεστού νερού.



Σχήμα 11.8.3: Διάγραμμα ωφέλιμης ισχύος συλλέκτη συναρτήσει της ώρας για διαφορετικά ποσά κατανάλωσης ζεστού νερού.

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται γενικά μια τάση εξομάλυνσης των τιμών με σταθερή κατανάλωση ζεστού νερού. Αντίθετα, στο σχήμα 11.8.1 υπάρχουν κάποιες μικρές ανωμαλίες στις τιμές της θερμοκρασίας του PCM, οι οποίες ενδεχομένως να οφείλονται στο μεγάλο χρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε το οποίο πιθανότητα έπρεπε να ήταν δεκάλεπτο αντί για ωριαίο. Το συμπέρασμα που εξάγεται παρατηρώντας το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι ότι στη μικρότερη κατανάλωση το PCM παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας, γεγονός που είναι αναμενόμενο. Όσον αφορά στο διάγραμμα 11.8.2 τα συμπεράσματα είναι αντίστοιχα των διαγραμμάτων 11.5.2 και 11.6.2 όπου το μέγεθος T_{fo} εξαρτάται από παράγοντες που έχουν αντίθετη αλληλεπίδραση πάνω του. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και στο σχήμα 11.8.3 όπου για σταθερές καταναλώσεις δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στις τιμές του εξεταζόμενου μεγέθους για τον ίδιο λόγο.

Κεφάλαιο 12

Γενικά Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρατίθενται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο από τη βασική μελέτη όσο και από τα παραμετρικά μοντέλα προσομοίωσης για καθένα από τα δύο τμήματα που μελετήθηκαν στην εν λόγω εργασία.

12.1 Μελέτη ενεργητικού συστήματος ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης:

Το πρώτο κομμάτι που μελετήθηκε αφορούσε την απόδοση του ηλιακού συστήματος για ενδοδαπέδια θέρμανση με υλικό αλλαγής φάσης ενσωματωμένο στο δάπεδο ενός σπιτιού 100 m². Όπως έγινε γνωστό εξ αρχής, το φαινόμενο μελετήθηκε μακροσκοπικά και για όλα τα μεγέθη που υπολογίστηκαν έγιναν οι κατάλληλες παραδοχές. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της βασικής μελέτης του συστήματος αυτού καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η απόδοσή του με τη χρήση του υλικού αλλαγής φάσης ήταν αρκετά ικανοποιητική καθώς οι τιμές των θερμοκρασιών που υπολογίστηκαν ήταν επαρκείς ώστε να επιτρέπουν την αλλαγή φάσης στο PCM και την απόδοση ενός αρκετά μεγάλου ποσού θερμότητας στο χώρο κατά τη διάρκεια της νύχτας. Όσον αφορά τις παραμετρικές μελέτες που έγιναν αξίζει να σημειωθούν ορισμένα σημεία με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Ενώ αναμέναμε ότι με την αύξηση της επιφάνειας του συλλέκτη τα υπολογιζόμενα μεγέθη παρουσίαζαν ανοδική τάση πράγμα που όντως διαπιστώθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε, δεν αναμέναμε το ίδιο και με τη μεταβολή της παραμέτρου $F_R(\tau_a)$ του συλλέκτη καθώς το μέγεθος αυτό συνδέεται με το βαθμό απόδοσης του συλλέκτη και εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους οι οποίες αποδείχτηκε ότι έχουν αντίθετη επίδραση στο μέγεθος αυτό, με αποτέλεσμα όσο αυξάνονται οι τιμές της εν λόγω παραμέτρου τόσο να αυξάνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη και άρα η απόδοση όλου του

συστήματος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον όμως, παρουσιάστηκε με την παραμετρική μελέτη που αφορούσε τη μεταβολή της μάζας του PCM. Η συγκεκριμένη παράμετρος παρουσίασε έντονη μεταβολή και τα αποτελέσματα δεν ήταν ίδια για κάθε υπολογιζόμενο μέγεθος ενώ παράλληλα υπήρχε και διαφοροποίηση στα μεγέθη που υπολογίζονταν ανάλογα με το αν υπήρχε ηλιακή ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τη θερμοκρασία του PCM, διαπιστώθηκε αύξησή της κατά τη διάρκεια της νύχτας όσο μεγαλύτερη ήταν η μάζα του γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη αποθηκευτική του ικανότητα. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της ημέρας το φαινόμενο αυτό αντιστρεφόταν. Από την άλλη μεριά, παρατηρήθηκε ότι η μάζα του PCM δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη καθώς η τελευταία εξαρτάται και από άλλους παράγοντες με αντίθετη και εντονότερη επιρροή επάνω της. Τέλος, όσον αφορά την επιλογή ενός υλικού αλλαγής φάσης με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης και στερεοποίησης μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερο ένα υλικό με εύρος αλλαγής φάσης που να συνδυάζεται κατάλληλα με τη θερμοκρασία του θερμού νερού στο συλλέκτη ώστε να επιτυγχάνεται η αλλαγή φάσης καθώς μας ενδιαφέρει η ικανότητά του να αναπτύσσει τη μεγαλύτερη ωφέλιμη ισχύ στο συλλέκτη γεγονός που του επιτρέπει να εκμεταλλεύεται καλύτερα την ηλιακή ενέργεια και άρα να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση.

12.2 Μελέτη για την παραγωγή ζεστού νερού οικιακής χρήσης με ηλιακό σύστημα:

Το δεύτερο τμήμα της εργασίας αφορούσε την απόδοση του ανεξάρτητου με το προηγούμενο ηλιακού συστήματος για παραγωγή ζεστού νερού με υλικό αλλαγής φάσης διασκορπισμένο σε μια δεξαμενή τοποθετημένη στο ίδιο σπίτι. Ομοίως και με το παραπάνω σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, η μελέτη έγινε μακροσκοπικά και για όλα τα μεγέθη που υπολογίστηκαν έγιναν οι κατάλληλες παραδοχές. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της βασικής μελέτης του συστήματος αυτού καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η απόδοσή του με τη χρήση του υλικού αλλαγής φάσης ήταν αρκετά ικανοποιητική καθώς οι τιμές των θερμοκρασιών που υπολογίστηκαν ήταν επαρκείς ώστε να επιτρέπουν την αλλαγή φάσης στο PCM και την κάλυψη ενός αρκετά μεγάλου μέρους των αναγκών σε ζεστό νερό του σπιτιού. Βέβαια, να αναφέρουμε ότι στο συγκεκριμένο σύστημα σε ορισμένα χρονικά διαστήματα κρίνεται αναγκαία η χρήση εξωτερικής πηγής προκειμένου να καλυφθούν πλήρως οι ανάγκες του σπιτιού γεγονός που οφείλεται στο συνδυασμό παραμέτρων που επιλέχθηκε. Όσον αφορά τις παραμετρικές μελέτες που έγιναν αξίζει να σημειωθούν ορισμένα σημεία με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Όπως και κατά τη μελέτη του ενδοδαπέδιου συστήματος ηλιακής θέρμανσης, ομοίως και στην περίπτωση αυτή αναμέναμε ότι με την αύξηση της επιφάνειας του συλλέκτη τα υπολογιζόμενα μεγέθη παρουσίαζαν ανοδική τάση πράγμα που όντως διαπιστώθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε, με τη μόνη διαφορά ότι οι τιμές τους στα διαγράμματα παρουσιάζουν κάποια ακρότατα τα οποία όπως αποδείχτηκε οφείλονται τόσο στο γεγονός ότι η κατανάλωση νερού στο σπίτι είχε διαφορετική τιμή για κάθε ώρα της ημέρας όσο και στο ότι το ωριαίο χρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη μελέτη κρίθηκε αρκετά μεγάλο. Επιπλέον, τα αποτελέσματα που προέκυψαν μεταβάλλοντας τη μάζα του PCM είναι ίδια με αυτά της μελέτης του συστήματος ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης. Όσον αφορά την επιλογή ενός υλικού αλλαγής φάσης με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης και

στερεοποίησης για τη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέξαμε το υλικό που παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές των παραπάνω θερμοκρασιών και όχι εκείνο το οποίο έχει τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες καθώς αποδείχτηκε ότι εκείνο μπόρεσε να αναπτύξει τη μεγαλύτερη ωφέλιμη ισχύ στο συλλέκτη και άρα να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση. Τέλος, η παραμετρική μελέτη που έγινε με σταθερή κατανάλωση ζεστού νερού μπόρεσε εν μέρει να εξαλείψει τις μικρές ανωμαλίες στις τιμές της θερμοκρασίας του PCM που υπήρχαν ενώ στα υπόλοιπα μετρούμενα μεγέθη δε συνέβη το ίδιο καθώς αυτά από ότι αποδείχτηκε επηρεάζονται από διαφορετικές παραμέτρους με αντίθετες αλληλεπιδράσεις από εκείνη της σταθερής κατανάλωσης.

Ολοκληρώνοντας την εργασία αυτή καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση υλικών αλλαγής φάσης σε ηλιακά ενεργητικά συστήματα και κυρίως όσον αφορά την εφαρμογή τους σε κτιριακές εγκαταστάσεις είναι μια τεχνολογία αρκετά αποδοτική και υποσχόμενη για το μέλλον, η οποία με τη βοήθεια των κατάλληλων μέσων μπορεί τόσο να προσφέρει οικονομικά οφέλη όσο και να συμβάλλει στην ενεργειακή εξοικονόμηση των κτιρίων.

Παράρτημα:

Παρακάτω παρατίθεται ο κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab που χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστούν τα απαραίτητα μεγέθη της βασικής μελέτης για το **ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης χώρου** :

AC=55;

FRta=0.85;

FRUI=3.6;

A=100;

mw=0.1;

CPw=4180;

h=8;

mpcm=3000;

CPeff(1,1)=5000;

Txwrou=20;

Tarx(1,1)=25;

a=1/3600;

Ts=20;

Tl=26;

Tc=23;

for j=1:10

if j>1

CPeff(1,j)=c;

Tarx(1,j)=d;

end

for i=1:24

if GT(i)>0

Qu(i,j)=AC*(FRta*GT(i)*1000-FRUI*(Tfi(i,j)-Ta(i)));

Tfo(i,j)=Tfi(i,j)+Qu(i,j)/(mw*CPw);

Tex(i,j)=(Qu(i,j)+Tfi(i,j)*(mpcm*CPeff(i,j)*a-h*A)+h*A*Txwrou)/ ...
(mpcm*CPeff(i,j)*a);

Tfi(i+1,j)=Tex(i,j);

else

Tex(i,j)=((mpcm*CPeff(i,j)*a-h*A)* Tarx(i,j)+h*A*Txwrou)/ ...
(mpcm*CPeff(i,j)*a) ;

Tarx(i+1,j)=Tex(i,j);

end

if i==8

Tfi(9,j)=Tex(8,j);

end

if i==16

Tarx(17,j)=Tex(16,j);

end

if Tex(i,j)<Ts

CPeff(i+1,j)=5000;

elseif ((Tex(i,j)>=Ts) && (Tex(i,j)<=Tc))

CPeff(i+1,j)=(120000/9)*(Tex(i,j)-20)+5000;

```
elseif ((Tex(i,j))>=Tc) && (Tex(i,j)<=Tl)
    CPeff(i+1,j)=-((120000/9)*(Tex(i,j)-23)+45000);
else
    CPeff(i+1,j)=5000;
end
```

```
end
```

```
c=CPeff(25,j);
```

```
d=Tarx(25,j);
```

```
end
```

Παρακάτω παρατίθεται ο κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab που χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστούν τα απαραίτητα μεγέθη της βασικής μελέτης για την **οικιακή παραγωγή ζεστού νερού χρήσης** :

```
AC=6;
FRta=0.85;
FRUI=3.6;
mw=0.005;
rw=1000;
CPw=4180;
mpcm=100;
CPeff(1,1)=5000;
Tarx(1,1)=35;

a=1/3600;
Ts=20;
Tl=26;
Tc=23;
Tkat=40;
Tdikt=15;
HM=1/30;
for j=1:10
    if j>1

        CPeff(1,j)=c;
        Tarx(1,j)=d;

    end

for i=1:24
```

$Q_{kat}(i,j)=a \cdot V(i) \cdot HM \cdot rw \cdot CP_w \cdot (T_{kat}-T_{dikt});$

if $GT(i)>0$

$Q_{kat}(i,j)=a \cdot V(i) \cdot HM \cdot rw \cdot CP_w \cdot (T_{kat}-T_{dikt});$

$Q_u(i,j)=AC \cdot (FR_{ta} \cdot GT(i) \cdot 1000 - FR_{UI} \cdot (T_{fi}(i,j) - T_a(i)));$

$T_{fo}(i,j)=T_{fi}(i,j) + Q_u(i,j) / (mw \cdot CP_w);$

$T_{ex}(i,j)=(Q_u(i,j) - a \cdot V(i) \cdot HM \cdot rw \cdot CP_w \cdot (T_{fi}(i,j) - T_{dikt}) + \dots$

$mpcm \cdot CP_{eff}(i,j) \cdot a \cdot T_{fi}(i,j)) / (mpcm \cdot CP_{eff}(i,j) \cdot a);$

$T_{fi}(i+1,j)=T_{ex}(i,j);$

else

$T_{ex}(i,j)=(mpcm \cdot CP_{eff}(i,j) \cdot T_{arx}(i,j) - V(i) \cdot HM \cdot rw \cdot CP_w \cdot (T_{arx}(i,j) - T_{dikt})) / \dots$
 $(mpcm \cdot CP_{eff}(i,j));$

$T_{arx}(i+1,j)=T_{ex}(i,j);$

end

if $i==8$

$T_{fi}(9,j)=T_{ex}(8,j);$

end

if $i==16$

$T_{arx}(17,j)=T_{ex}(16,j);$

end

if $T_{ex}(i,j) < T_s$

$CP_{eff}(i+1,j)=5000;$

elseif $((T_{ex}(i,j) \geq T_s) \ \&\& \ (T_{ex}(i,j) \leq T_c))$

$CP_{eff}(i+1,j)=(120000/9) \cdot (T_{ex}(i,j) - 20) + 5000;$

elseif $((T_{ex}(i,j) \geq T_c) \ \&\& \ (T_{ex}(i,j) \leq T_l))$


```
    CPeff(i+1,j)=-((120000/9)*(Tex(i,j)-23))+45000;  
else  
    CPeff(i+1,j)=5000;  
end
```

```
end
```

```
c=CPeff(25,j);  
d=Tarx(25,j);
```

```
end
```

Βιβλιογραφία:

[1] <http://aix.meng.auth.gr/lhtee/education/IAxBE1.pdf>

[2]

http://www.diplomatikoperiskopio.com/index.php?option=com_content&view=article&id=181:2008-06-15-19-05-42&catid=41:2008-05-31-14-21-01&Itemid=68

[3] <http://www.selasenergy.gr/energy.php>

[4]

<http://www.sarantoskargakos.gr/content/%CF%84%CE%BF-%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CF%8C-%CF%80%CF%81%CF%8C%CE%B2%CE%BB%CE%B7%CE%BC%CE%B1-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CE%B7-%CE%B5%CE%BE%CE%AC%CE%BD%CF%84%CE%BB%CE%B7%CF%83%CE%B7-%CF%84%CF%89%CE%BD-%CF%86%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD-%CF%80%CE%B7%CE%B3%CF%8E%CE%BD-%CF%80%CE%BB%CE%BF%CF%8D%CF%84%CE%BF%CF%85>

[5]

<http://www.eng.auth.gr/nmargaris/tag/%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CF%8C-%CF%80%CF%81%CF%8C%CE%B2%CE%BB%CE%B7%CE%BC%CE%B1/>

[6] http://library.tee.gr/digital/m2362/m2362_ladopoulos.pdf

[7]

http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%89%CF%80%CE%B9%CE%B5%CF%82_%CE%BC%CE%BF%CF%81%CF%86%CE%AD%CF%82_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82

[8] http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/ktiria_intro.htm

[9] http://www.spitia.gr/greek/aiforos/exikonomisi/m_santamouris.htm

[10] S. M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, PART I: heat storage materials and techniques, Energy Research Institute, King Abdulaziz City for Science and Technology, July 1997

[11]

<http://www.scribd.com/doc/49713800/34/%CE%A5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AC->

%CE%B1%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%AE%CE%BA%CE%B5%CF%85%
CF%83%CE%B7%CF%82-%CF%84%CE%B7%CF%82-
%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%
E%B1%CF%82

[12] Σημειώσεις του μαθήματος «Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων», Χρήστος Τζιβανίδης

[13] Mohammed M. Farid, Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, Said Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, Department of Chemical & Materials Engineering, The University of Auckland, Center for Electrochemical Science and Engineering, Illinois Institute of Technology, Chicago, 2003.

[14] M. Medrano , M.O. Yilmaz , M. Noguis , I. Martorell , Joan Roca , Luisa F. Cabeza, Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems, February 2009

[15] L.F. Cabeza, A. Castell , C. Barrenechea, A. de Gracia, A.I. Fernandez, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, GREA Innovacis Concurrent, Edifici CREA, Universitat de Lleida Spain, Department of Materials Science & Metallurgical Engineering, Universitat de Barcelona, January 2011

[16] Atul Sharma , V.V. Tyagi , C.R. Chen , D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, October 2007

[17] E. Gunther, S. Hiebler, H. Mehling, Determination of the heat storage capacity of PCM and PCM-objects as a function of temperature, Bavarian Center for Applied Energy Research (ZAE Bayern), Ecostock, 2006.

[18] Zhang Y., Jiang Y., A simple method, the t-history method of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase change materials, Measurement and Science Technology, 10, 1999

[19] Jong Hyeon Peck, Jae-Jun Kim, Chaedong Kang, Hiki Hong, A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method. Received September 2005

[20] Shapiro M., Development of the properties of phase change materials. Subcontract report to Florida Solar Energy Center 1989.

[21] A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini., Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review; 2007.

[22] Amar M. Khudhair, Mohammed M. Farid, A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat

using phase change materials, Department of Chemical and Materials Engineering, School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand, May 2003

[23] Samira Haghshenaskashani, Department of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Teheran and Hadi Pasdarsahri, Department of Mechanical Engineering, tarbiat Modares University.

[24] Piia Lamberg , Reijo Lehtiniemi, Anna-Maria Henell, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage, Helsinki University of Technology, Laboratory of Heating, Ventilating and Air-Conditioning, Finland, Nokia Research Center, Finland, July 2003

[25]

http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_11_3_PCM%20storage/121.pdf

[26] Pablo Dolado, Ana Lazaro, Jose M. Marin, Belen Zalba, Characterization of melting and solidification in a real scale PCM-air heat exchanger: Numerical model and experimental validation, Aragon Institute for Engineering Research (I3A), Thermal Engineering and Energy Systems Group, University of Zaragoza, Torres Quevedo Building, Spain, Available online 7 January 2011

[27] Elena Palomo del Barrio, Jean-Luc Dauvergne, A non-parametric method for estimating enthalpy-temperature functions of shape-stabilized phase change materials, University Bordeaux CNRS, Laboratoire TREFLE, France, Available online 1 December 2010

[28] Jos'e MMar'ın, Bel'en Zalba, Luisa F Cabeza and Harald Mehling, Determination of enthalpy-temperature curves of phase change materials with the temperature-history method: improvement to temperature dependent properties, Published 7 January 2003

[29] Robert Cerny, Jan Toman, Jaroslav Sestak, Measuring the effective specific heat of building materials, Department of Physics, Faculty of civil Engineering, Czech Technical University, Institute of Physics of the Academy of Sciences of the Czech Republic, Available online 12 December 1998.

[30] K. Darkwa, P.W. O'Callaghan, Simulation of phase change drywalls in a passive solar building, School of the Built Environment, The Applied Energy and Environmental Engineering Group, Nottingham Trent University, Available online 18 November 2005

[31]

http://imarinakis.webs.com/solar_energy.htm

- [32] <http://www.cie.org.cy/sxoliko.html#menu2-3-1-1>
- [33]
http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_active_solar.htm
- [34] <http://www.cie.org.cy/sxoliko.html#menu2-3-1-2>
- [35] <http://www.allaboutenergy.gr/HliakaSistimata.html>
- [36]
http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_bioclimatic_passive.htm
- [37]
http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/pathitika_iliaka_systimata.htm
- [38] <http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/alternative/pathitika.htm>
- [39]
http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/pathitika_iliaka_systimata_emmeso_kerdos_iliakoi_toixoi.htm
- [40] http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153
- [41] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art Thermal Energy Storage Laboratory, School Of Energy and Environmental Studies, Faculty of Engineering Science, Devi Ahilya University, India, 2005.
- [42] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj, Phase change material- based building architecture for thermal management in residential and commercial establishment;2006.
- [43] Telkes M., Thermal storage for solar heating and cooling. In: Proceedings of the workshop on solar energy storage sub systems for heating and cooling of buildings, Charlottesville, University of Virginia, 1975.
- [44] Askew GL., Solar heating utilization a paraffin's phase change material. In: Proceedings of the second national passive solar conference, Philadelphia, PA, 1978.
- [45] Farouk B, Guceri SI., Tromb-Michal wall using a phase change material. In: Proceedings of the second Miami international conference on alternative energy, Miami, 1979.

- [46] Bourdeau LE., Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage. In: Hayes J, Snyder R, editors. Proceedings of the fifth national passive solar conference, 19–26 October, Amherst. Newark, DE: American Solar Energy Society; 1980. p. 297–301.
- [47] Swet CJ., Phase change storage in passive solar architecture. In: Proceedings of the fifth national passive solar conference, Amherst, MA, 1980. p. 282–6.
- [48] Ghoneim AA, Klein SA, Duffie JA., Analysis of collector–storage building walls using phase change materials. *Sol Energy* 1991;47(1):237–42.
- [49] Chandra S, Kumar R, Kaushik S, Kaul S., Thermal performance of a non-A/C building with PCCM thermal storage wall. *Energy Convers Manage* 1985;25(1):15–20.
- [50] Knowler T., Proportioning composites for efficient-TSWs. *Sol Energy* 1983;31(3):319–26.
- [51] Buddhi D, Sharma SD., Measurements of transmittance of solar radiation through stearic acid: latent heat storage material. *Energy Convers Manage* 1999;40:1979–84.
- [52] Stritih U, Novak P., Solar heat storage wall for building ventilation, In: World renewable energy congress (WREC), 1996. p. 268–71.
- [53] Shapiro MM, Feldman D, Hawes D, Banu D., PCM thermal storage in wallboard. In: Proceedings of the 12th passive solar conference, Portland, 1987. p. 48–58.
- [54] Shapiro M., Development of the enthalpy storage materials, mixture of methyl stearate and methyl palmitate. Subcontract Report to Florida Solar Energy Center, 1989.
- [55] Feldman D, Khan MA, Banu D., Energy storage composite with an organic phase change material. *Sol Energy Mater* 1989;18:333–41.
- [56] Feldman D, Shapiro M, Banu D, Fuks CJ., Fatty acids and their mixtures as phase change materials for thermal energy storage. *Sol Energy Mater* 1989;18:201–16.
- [57] Feldman D, Banu D, Hawes D, Ghanbari E., Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. *Sol Energy Mater* 1991;22: 231–42.

- [58] Neeper DA., Potential benefits of distributed PCM thermal storage. In: Coleman MJ, editor. Proceedings of the 14th national passive solar conference, 19-22 June. Denver, CO: American Solar Energy Society; 1989. p. 283-8.
- [59] Stovall TK, Tomlinson JJ., What are the potential benefits of including latent heat storage in common wall board. Trans ASME 1995;117:318-25.
- [60] Drake JB., A study of the optimal transition temperature of PCM wallboard for solar energy storage. Oak Ridge National Laboratory report ORNL/TM-10210 available from National Technical Information Service, Springfield, VA, USA, 1987.
- [61] Stetiu C, Feustel HE., Phase change wallboard as an alternative to compressor cooling in Californian residences. In: Proceedings of 96 ACEE summer study for energy efficient building, California, USA, 1996.
- [62] Buddhi D. Mishra HS, Sharma A., Thermal performance studies of a test cell having a PCM window in south direction. Annex 17, Indore, India, 2003.
- [63] <http://www.cce-mt.org/Links/archives/page45/page45.htm>
- [64] Arkar C, Medved S., Enhanced solar assisted building ventilation system using sphere encapsulated PCM thermal heat storage. IEA, ECES IA Annex 17, Advanced thermal energy storage techniques—feasibility studies and demonstration projects 2nd workshop; 3-5 April 2002: Ljubljana, Slovenia.
- [65] Stritih U, Novak P., Thermal storage of solar energy in the wall for building ventilation. Second workshop: IEA, ECES IA Annex 17, Advanced thermal energy storage techniques—feasibility studies and demonstration projects, Ljubljana, Slovenia. 3-5 April 2002.
- [66] Benard C, Gobin D, Gutierrez M., Experimental results of a latent heat solar roof used for breeding chickens. Sol Energy 1981;26(4):347-54.
- [67] Guthertz JM, Schiler ME., A passive solar heating system for the perimeter zone of office buildings. Energy Sources 1991;13:39-54.
- [68] Turnpenny JR, Etheridge DW, Reay DA., Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings, Part I: Testing and theoretical modeling. Appl Therm Eng 2000;20:1019-37.
- [69] Athienities A, Chen Y., The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems. Sol Energy 2000;69:229-37.

- [70] Markus Koschenz, Beat Lehmann., Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. *Energy Build* 2004;36:567-78.
- [71] Frank B., Phase change material for space heating and cooling, University of South Australia, Sustainable Energy Center, Presentation, 2002.
- [72] Kodo T, Ibamoto T., Research on using the PCM for ceiling board. IEA ECESIA, third workshop, 1-2 October, Tokyo, Japan, 2002 (Annex 17).
- [73] Kunping Lin, Yinping Zhang, Xu Xu, Hongfa Di, Rui Yang, Penghua Qin., Experimental study of underfloor electric heating system with shape-stabilized PCM plates. *Energy Build* 2005;37:215-20.
- [74] Zalba B, Mari'n JM, Sa'nchez-Valverde B, Cabeza LF., Free-cooling. An application of PCMs in TES; proceedings of the third workshop of IEA ECESIA Annex 17, Tokyo, Japan. 2002.
- [75] University of Nottingham, <http://www.nottingham.ac.uk/sbe/research/ventcool/objectives.htm>, 2002.
- [76] Wakilaltojjar S, Saman M., Domestic heating and cooling with thermal storage. Eighth international conference on thermal energy storage, Stuttgart, Germany. 28 August-1 September 2000. p. 381-6.
- [77] Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Department of Mechanical Engineering, Kun Shan University, Thermal Energy Storage Laboratory, School of Energy & Environmental Studies, India, 9 October 2007.
- [78] Prakash J, Garg HP, Datta G., A solar water heater with a built-in latent heat storage. *Energy Convers Manage* 1985;25(1):51-6.
- [79] Bansal NK, Buddhi D., An analytical study of a latent heat storage system in a cylinder. *Solar Energy* 1992;33(4):235-42.
- [80] Chaurasia PBL., Phase change material in solar water heater storage system. In: Proceedings of the 8th international conference on thermal energy storage; 2000.
- [81] Ghoneim AA., Comparison of theoretical models of phase change and sensible heat storage for air and water solar heating systems. *Solar Energy* 1989;42(3):209-30.
- [82] Bajnoczy G, et al., Heat storage by two grade phase change material. *Periodica Polytechnica Ser Chem Eng* 1999;43(2):137-47.

- [83] Kayugz K, et al., Experimental and theoretical investigation of latent heat storage for water based solar heating systems. *Energy Convers Manage* 1995;36(5):315-23.
- [84] Sharma A, Sharma A, Pradhan N, Kumar B., Performance evaluation of a solar water heater having built in latent heat storage unit, IEA, ECESIA Annex 17. Advanced thermal energy storage through phase change materials and chemical reactions—feasibility studies and demonstration projects. 4th workshop, Indore, India. March 21-24, 2003; p. 109-15.
- [85] Mettawee E-BS, Assassa GMR., Experimental study of a compact PCM solar collector. *Energy* 2006;31:2958-68.
- [86] Hung K, Abrams CF, Jr., Coasts LL, Bowers CG. Jr., Development of greenhouse bulk drying systems for solar energy utilization and planted mechanization. AHARE paper no. 75-1018, Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI; 1975.
- [87] Kern M, Aldrich RA., Phase change energy storage in a greenhouse solar heating system. ASME paper no. 79-4028. Am Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI; 1979.
- [88] Hung K, Toksoy M., Design and analysis of green house solar system in agricultural production. *Energy Agric* 1983;2(2):115-36.
- [89] Hhyum - Kasp Song, Utilization of latent heat storage materials for the high concentrated thermal energy storage. Report no. 1988.5-19990.5; 1988.
- [90] Nishina H, Takakura T., Greenhouse heating by means of latent heat storage units. *Acta Hort (Energy in Protected Cultivation III)* 1984;148: 751-4.
- [91] Takakura T, Nishina H., A solar greenhouse with phase change energy storage and a microcomputer control system. *Acta Hort (Energy in Protected Cultivation)* 1981;115:583-90.
- [92] Morrison DJ, Abdel Khalik SI., Effects of phase change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar heating systems. *Solar Energy* 1978;20:57-67.
- [93] Jurinak JJ, Adbel Khalik SI., On the performance of air-based solar heating systems utilizing phase change energy storage. *Solar Energy* 1979;24:503-22.
- [94] Ghoneim AA, Klein SA., The effect of phase change material properties on the performance of solar air-based heating systems. *Solar Energy* 1989;42(6):441-7.

- [95] Enibe SO., Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage. *Renew Energy* 2002;27: 69–86.
- [96] Zhou G, Zhang Y, Zhang Q, Lin K, Di H., Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase-change material plates. *Appl Energy* 2007;84(10):1068–77.
- [97] Domanski. et al., Cooking during off sunshine hours using PCMs as storage media. *Fuel Energy Abstr* 1995;36(5):348.
- [98] Buddhi D, Sahoo LK., Solar cooker with latent heat storage design and experimental testing. *Energy Convers Manage* 1997;38(5):493–8.
- [99] Sharma SD, Buddhi D, Sawhney RL, Sharma A., Design, development and performance evaluation of a latent heat unit for evening cooking in a solar cooker. *Energy Convers Manage* 1997;38(5):493–8.
- [100] Buddhi D, Sharma SD, Sharma A., Thermal performance evaluation of a latent heat storage unit for late evening cooking in a solar cooker having three reflectors. *Energy Convers Manage* 2003;44(6):809–17.
- [101] Sharma SD, Iwata T, Kitano H, Sagara K., Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit. *Solar Energy* 2005;78:416–26.
- [102] Belen Zalba, Jose M Marin, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Dpto. Ingenieria Mecanica, Campus Politecnico, Universidad de Zaragoza, Dpt.d'Informatica i Enginyeria Industrial, Escola, Universitaria Politecnica, Universitat de Lleida, ZAE Bayern, Division 1: Energy Conversion and Storage, Accepted 11 October 2002
- [103] M.A. Cuevas-Diarte, T. Calvet-Pallas, J.L. Tamarit, H.A.J. Oonk, D. Mondieig, Y. Haget, Nuevos materiales termoajustables, *Mundo Cientifico*, June 2000.
- [104] L.F. Cabeza, J. Roca, M. Nogues, B. Zalba, J.M. Marin, Transportation and conservation of temperature sensitive materials with phase change materials: state of the art, IEA ECES IA Annex 17 2nd Workshop, Ljubljana (Slovenia), 2002.
- [105] M. Dominguez, J.M. Pinillos, J.M. Arias, R. Fuentes, *La acumulacion de frio en el transporte de productos perecederos*, Reclien 98, La Habana, 1998.
- [106] Available from <www.va-q-tec.de>.
- [107] Available from <www.rubitherm.de>.

- [108] Available from <www.sogrigam.com>.
- [109] Available from www.tcpreliable.com
- [110] Available from <www.pcm-solutions.com>.
- [111] D. Pal, Y. Joshi, Application of phase change materials for passive thermal control of plastic quad flat packages: a computational study, Numer. Heat Transfer, Part A 30 (1996) 19-34.
- [112] D. Pal, Y. Joshi, Application of phase change materials to thermal control of electronic modules: a computation study, Trans. ASME 119 (1997) 40-50.
- [113] J. Bellettre, V. Sartre, F. Biais, A. Lallemand, Transient state study of electric motor heating and phase change solid-liquid cooling, Appl. Thermal Eng. 17 (1) (1997) 17-31.
- [114] I.W. Eames, K.T. Adref, Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type used in thermal (ice) storage systems, Appl. Thermal Eng. 22 (2002) 733-745.
- [115] Available from <www.teappcm.com>.
- [116] Available from <www.climator.com>.
- [117] Available from <www.epsltd.co.uk>.
- [118] N. Malatidis, Warmespeicher, insbesondere Latentwarmespeicher fur Kraftfahrzeuge, Patent DE 39 90 275 C 1 (1988).
- [119] R. Strahle, B. Stephan, B. Streicher, Heat accumulator for a motor vehicle, Patent WO 97/06972 (1997).
- [120] W. Zobel, R. Strahle, A. Stolz, S. Horz, T. Jantschek, H.T.C. Van Hoof, A.C. De Vuono, R.S. Herrick, S.R. Larrabee, J.A. Logic, A.P. Meissner, J.C. Rogers, M.G. Voss, Heat battery, Patent EP 0 916 918 A2 (1999).
- [121] R. Kniep, Latentwarmespeicher in Kraftfahrzeugen. Speichersalze im Blickpunkt, GIT Fachzeitschrift fur das Laboratorium 39 (1995) 1137-1141.
- [122] E. Heck, P. Muller, W. Sebbesse, Latentwarmespeicher zur Verkurzung des Motorwarmlaufs, MTZ Motortechnische Zeitschrift 55 (1994) 2-8.
- [123] L.L. Vasiliev, V.S. Burak, A.G. Kulakov, D.A. Mishkinis, P.V. Bohan, Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: application to a bus petrol engine, Appl. Thermal Eng. 20 (2000) 913- 923.

- [124] http://www.ablesealanddesign.com/category/9/Thermal_Materials/page/116/Thermal_Phase_Change.aspx
- [125] <http://www.heatmanagement.com/kunze/00english/products/frameset.html>
- [126] L. Vasiliev, V. Burak, Latent storage modules for preheating internal combustion petrol engines, Applied Engineering, Vol 20
- [127] <http://www.teappcm.com/applications.htm>
- [128] <http://www.bmw.com>
- [129] <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/techbr.pdf>
- [130] http://www.sglgroup.com/cms/international/applications/automotive/applications/cab-air-conditioning.html?__locale=en
- [131] <http://www.k-bikes.com/forums/showthread.php?t=14200>
- [132] <http://www.outlast.com>
- [133] D. Mondieig, F. Rajabalee, Protection of temperature sensitive biomedical products using pcm, Transfusion and Aphaeresis science, Vol 28
- [134] <http://www.rubitherm.com/english/index.htm>
- [135] <http://www.britax-roemer.com/about-us/keep-cool-cover>
- [136] Lane, G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I, RC Press Inc., Florida, USA, 1983
- [137] <http://freespace.virgin.net/m.eckert/index.htm>
- [138] Khudhair AM, Farid MM., A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, Energy Conversion and Management 45 (2004) 263-275.
- [139] Zhang Y., Zhou G., Lin K., Zhang Q., Di H., Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, Building and Environment 42 (2007) 2197-2209.

[140] Lane GA., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, 1983, Vol. I and II, Background and Scientific Principles, CRC Press.

[141]

http://www.rubitherm.com/english/pages/03a_underfloor_heating.htm

[142] 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.

[143] A.K. Athienitis, T.Y. Chen, Experimental and theoretical investigation of floor heating with thermal storage, ASHRAE Transactions 99 (1) (1993) 1049-1057.

[144] J.D. Dale, M.Y. Ackerman, Proceeding of 15 Annual SESCO Conference, Acomparision of radiant floor and forced air heating, 1989, pp. 15-18.

[145] L.H. Lafontaine, Radiant heating and cooling, Heating, Piping and Air Conditioning 62 (3) (1990) 71-78.

[146] J. Braun, Reducing energy costs and peak electrical demand through optimal control of building thermal storage, ASHRAE Transactions 96 (2) (1990) 876-888.

[147] 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.

[148] M. Farid, W.J. Kong, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Underfloor heating with latent heat storage, 2001, pp. 601- 609.

[149] D.W. Hawes, D. Feldman, Absorption of phase change materials in concrete, Solar Energy Materials and Solar Cells 27 (2) (1992) 91- 101.

[150] 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

[151] 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.

[152] 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.

- [153] 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.
- [154] M.H. Sherman, Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone, *Building and Environment* 25 (4) (1990) 365–374.
- [155] Xu Xu, Yinping Zhang, Kunping Lin, Hongfa Di, Rui Yang, Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings.
- [156] K. Kamil, Experimental and theoretical investigation of latent heat storage for water based solar heating systems, *Energy Conv. Manage.* 36 (1995) 315–323.
- [157] H. Ye, X. Ge, Preparation of polyethylene-paraffin compound as a form-stable solid-liquid phase change material, *Solar Energy Mater. Solar Cells* 64 (1) (2000) 37–44.
- [158] M. Xiao, B. Feng, K. Gong, Preparation and performance of shape-stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity, *Energy Conv. Manage.* 43 (1) (2002) 103–108.
- [159] P. Qin, R. Yang, Y. Zhang, et al., Thermal performance of shape-stabilized phase-change materials, *J. Tsinghua Univ.* 43 (6) (2003) 833–835.
- [160] K. Lin, Y. Zhang, X. Xu, et al., Modeling and simulation study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates, *Build. Environ.* 39 (12) (2004) 1427–1434.
- [161] X. Xu, Y. Zhang, H. Di, K. Lin, Experimental study of shape-stabilized PCM floor used in passive solar buildings, *J. Solar Energy Eng.*, submitted for publication.
- [162] J. Wang, *Building Physics*, China Architecture and Building Press, Beijing, 1987.
- [163] J.P. Holman, *Heat Transfer*, 8th ed., McGraw-Hill, New York, 1997
- [164] http://imarinakiss.webs.com/solar_collectors.pdf
- [165] <http://www.cres.gr/kape/education/thermika%20Hliaka.pdf>

- [166] Luisa F. Cabeza, Manuel Ibañez, Cristian Solé, Joan Roca, Miquel Nogué's, Experimentation with a water tank including a PCM module, Department d'Informàtica Eng. Industrial, Universitat de Lleida Spain, Department de Medi Ambient i Ciències del So'l, Universitat de Lleida Spain, Available online 19 September 2005
- [167] E.S. Davis, R. Bartera, Stratification in solar water heater storage tanks, in: Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings, Charlottesville, Virginia, USA, 1975, pp. 38–42.
- [168] M.A. Abdolly, D. Rapp, Theoretical and experimental numerical studies of stratified thermocline storage hot water, *Energy Convers. Manage.* 23 (1982) 275.
- [169] A.M.C. Chan, P.S. Smereka, D. Giusti, A numerical study of transient mixed convection flows in a thermal storage tank, *J. Sol. Energy Eng.* 105 (1983) 246.
- [170] M.W. Wildin, C.R. Truman, Performance of stratified vertical cylindrical thermal storage tanks – Part I (scale model tank), *ASHRAE Trans.* 95 (1) (1989) 1086.
- [171] M.W. Wildin, Performance of stratified vertical cylindrical thermal storage tanks – Part II (prototype tank), *ASHRAE Trans.* 95 (Part 1) (1989) 1096.
- [172] A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, *Sol. Energy* 30 (1983) 313.
- [173] G.A. Lane, *Solar Heat Storage: Latent Heat Material. Background and Scientific Principles*, vol. I, CRC Press, Florida, 1983.
- [174] G.A. Lane, *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Technology*, vol. II, CRC Press, Florida, 1986.
- [175] I. Dincer, M.A. Rosen, *Thermal Energy Storage. Systems and Applications*, Wiley, Chichester, England, 2002.
- [176] B. Zalba, J.M. Mariñ, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Appl. Therm. Eng.* 23 (2003) 251.
- [177] L.F. Cabeza, M. Nogues, J. Roca, J. Illa, S. Hiebler, H. Mehling, PCM-module to improve hot water heat stores with stratification: first tests in a complete solar system, in: R. Domański, M. Jaworski, M. Rebow (Eds.),

Ninth International Conference on Thermal Energy Storage, vol.1, Institute of Heat Engineering, 2003, pp. 273–278.

[178] L.F. Cabeza, M. Nogues, J. Roca, M. Ibañ ez, PCM research at the University of Lleida, in: Proceedings of the IEA, ECES IA Annex 17, 6th Workshop, Arvika, Sweden, 2004 (in Spanish).

[179] H. Mehling, L.F. Cabeza, S. Hippeli, S. Hiebler, PCM-module to improve hot water heat stores with stratification, *Renew. Energy* 28 (2003) 699.

[180] M. Nogue' s, L.F. Cabeza, J. Roca, J. Illa, B. Zalba, J.M. Mari' n, S. Hiebler, H. Mehling, Efecto de la Insercio' n de un Mo' dulo de PCM en un Depo' sito de ACS, *Anales de la Ingenieria Meca' nica* 1 (2002) 398.

[181] M. Mazman, L.F. Cabeza, H. Mehling, H. Evliya, H.O. Paksoy, Gu' nes Enerjisiyle su Isitma Sistemlerinde Faz Degistiren Madde Kullanimi, in: Proceedings at UTES 2004, Istanbul, Turkey, 2004.

[182] L.F. Cabeza, H. Mehling, S. Hiebler, F. Ziegler, Heat transfer enhancement in water when used as PCM in thermal energy storage, *Appl. Therm. Eng.* 22 (2002) 375.

[183] H. Mehling , L.F. Cabeza , S. Hippeli , S. Hiebler, PCM-module to improve hot water heat stores with stratification, ZAE Bayern, Division 1, Germany, Centre de Recerca en Energia Aplicada (CREA), Universitat de Lleida Spain, accepted 13 July 2002

[184] S. M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, part 1: heat storage materials and techniques, July 1997.

[185] E. D. Kravvaritis, K. A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, Solar Energy Management using PCM passive systems in the Athens area buildings. Υπεβλήθη για δημοσίευση στο περιοδικό *Energy Conversion and Management*, 2010.

[186] Κ. Α. Αντωνόπουλος, *Θερμικά - Ηλιακά Συστήματα - μέρος πρώτο*, Αθήνα 2008.

[187] Κ. Α. Αντωνόπουλος, *Κλιματισμός - μέρος πρώτο*, Αθήνα 2008.