



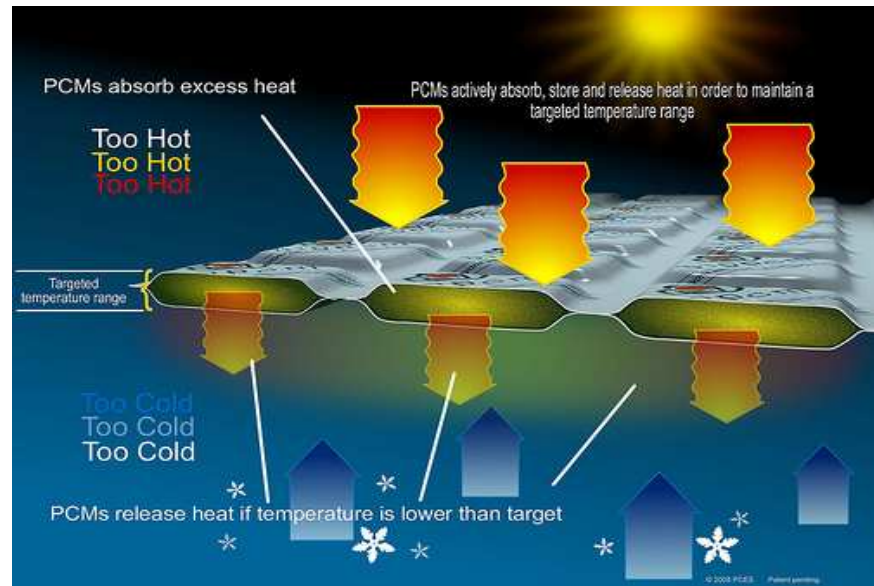
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

διπλωματική
εργασία του :

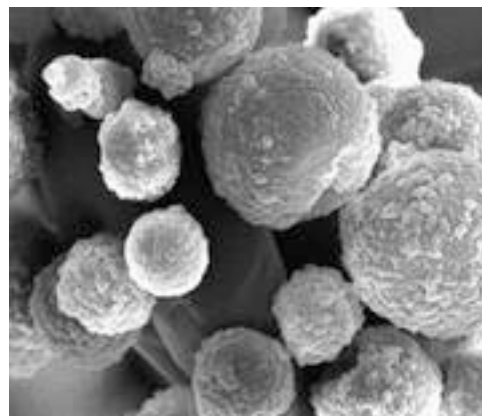
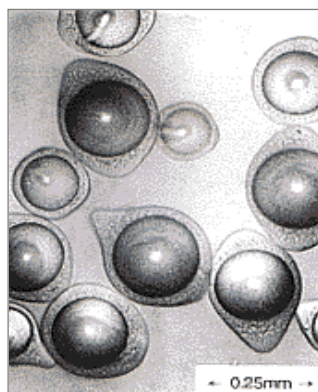
Λαζαρίδη Δημητρίου

επιβλέπων καθηγητής :

Κίμων. Α. Αντωνόπουλος



“Χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) για ηλιακή ενδοδαπέδια θέρμανση χώρων στην περιοχή της Αθήνας ”



ΑΘΗΝΑ , ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011

Χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) για ηλιακή ενδοδαπέδια θέρμανση χώρων στην περιοχή της Αθήνας.

ΑΘΗΝΑ , ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας οφείλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα μου κ. Κ.Α.Αντωνόπουλο για την αξιόλογη βοήθεια του και τις εύστοχες παρατηρήσεις του που συνέβαλλαν στην διευκόλυνση της προσπάθειάς μου. Την εργασία αυτή την αφιερώνω στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη που μου έχει δείξει όλα αυτά τα χρόνια.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από ένα θεωρητικό και ένα πειραματικό τμήμα. Στο θεωρητικό τμήμα, που προηγείται, έχει γίνει μια λεπτομερής ανάλυση των ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης και παρατίθενται αρκετές μελέτες που αφορούν την χρήση τους σε κτίρια καθώς και σε εφαρμογές ενδοδαπέδιας ηλιακής θέρμανσης. Ακολουθεί το πειραματικό τμήμα όπου μελετάται η ενδοδαπέδια θέρμανση χώρου με εμβαδόν δαπέδου $10 \times 10 \text{ m}^2$. Το κτίριο βρίσκεται στην περιοχή της Αθήνας με γεωγραφικό πλάτος $\phi=37,97^\circ$. Στην οροφή του κτιρίου βρίσκονται τοποθετημένοι ηλιακοί συλλέκτες νότιου προσανατολισμού και κλίσης $\beta=53^\circ$ με συνολική συλλεκτική επιφάνεια $A_c=55 \text{ m}^2$ ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες του κτιρίου για θέρμανση. 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 του υλικού αλλαγής φάσης το οποίο είναι τοποθετημένο κάτω από το στρώμα του δαπέδου του δωματίου που μελετάται. Εφόσον στόχος μας είναι η θέρμανση του χώρου η μελέτη θα πραγματοποιηθεί για την 21^η μέρα των μηνών Νοεμβρίου και Ιανουαρίου. Στο τέλος ακολουθεί παραμετρική μελέτη για να εξακριβωθεί η ο βαθμός στον οποίο κάθε παράμετρος επιδρά στην συνολική λειτουργία του συστήματος και για να γίνει η σωστότερη επιλογή τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	12
Κεφάλαιο 2 : Μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας	
2.1 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας	16
2.2 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας	16
2.3 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας	19
Κεφάλαιο 3 : Γενικά για τα PCMs	
3.1 Κατηγοριοποίηση των PCMs	22
3.2 Επιθυμητές ιδιότητες των PCMs	24
3.3 Φαινόμενο διαχωρισμού φάσεων και supercooling	26
3.4 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων των PCMs	27
3.5 Μορφές ενσωμάτωσης και συσκευασίας των PCMs	31
3.5.1 Μικροενσωμάτωση	32
3.5.2 Μακροενσωμάτωση	33
3.5.3 Ογκώδης αποθήκευση	33
3.5.4 Εμβάπτιση	34
3.5.5 Ενσωμάτωση σε τούβλο.....	34
Κεφάλαιο 4: Ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα	36
Κεφάλαιο 5 : Εφαρμογές των PCMs	
5.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια	40
5.2 Ηλιακό θερμοκήπιο	41
5.3 Ηλεκτρονικά εξαρτήματα	42

5.4 Μεταφορά ευαίσθητων προϊόντων	44
5.5 Ιατρικά προϊόντα	45
5.6 Θερμική ένδυση	46
5.7 Οχήματα	49
5.8 Τηλεπικοινωνίες	50

Κεφάλαιο 6 : Αναδρομή των εφαρμογών των PCM's σε κτιριακές εγκαταστάσεις

6.1 Ιστορική αναδρομή της χρήσης των PCM's	52
6.2 Ερευνητική δραστηριότητα	54

Κεφάλαιο 7 : Εφαρμογές των PCM's σε παθητικά συστήματα κτιρίων

7.1 Τοίχος Trombe με ενσωματωμένο PCM	56
7.2 Τοίχος συλλογής θερμότητας για αερισμό κτιρίου με ενσωματωμένο PCM.....	58
7.3 Γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM.....	59
7.4 Σκίαστρα με ενσωματωμένο PCM	62
7.5 Κουρτίνες με ενσωματωμένο PCM	63
7.6 Πάνελ οροφής με ενσωματωμένο PCM	64
7.7 Ενδοδαπέδια θέρμανση με ενσωματωμένο PCM	65

Κεφάλαιο 8 : Εφαρμογές των PCM's σε ενεργητικά συστήματα κτιρίων

8.1 Σύστημα θέρμανσης χώρου ενσωματωμένο στην οροφή	68
8.2 Ενεργητικό πάνελ οροφής με ενσωματωμένο PCM	69
8.3 Ενδοδαπέδια θέρμανση με ενσωματωμένο PCM	70
8.4 Free Cooling	72
8.5 PCM σε συνδυασμένο σύστημα θέρμανσης-ψύξης	74
8.6 Διάφορα ενεργητικά συστήματα σε κτίρια	76

Κεφάλαιο 9: Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης

9.1 Γενικά για την αλλαγή φάσης	79
9.2 Μέθοδος της ενθαλπίας	80
9.3 Μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας	82

Κεφάλαιο 10 : Πειραματική μελέτη ενδοδαπέδιας ηλεκτρικής θέρμανσης με χρήση πλακών PCM σταθερού σχήματος

10.1 Εισαγωγή	86
10.2 Πειραματική μελέτη ενός πρότυπου συστήματος	89
10.2.1 Περιγραφή του πρότυπου σπιτιού και του συστήματος θέρμανσης ..	89
10.2.2 Όργανα μέτρησης	91
10.2.3 Πειραματική μελέτη.....	92
10.3 Αποτελέσματα και συμπεράσματα	94

Κεφάλαιο 11 : Μοντελοποίηση και προσομοίωση της θερμικής απόδοσης δαπέδου με χρήση PCM σταθερού σχήματος εφαρμοσμένο σε ηλιακό παθητικό σύστημα κτιρίου

11.1 Εισαγωγή.....	97
11.2 Ανάλυση μεταφοράς θερμότητας	99
11.3 Εξακρίβωση της εγκυρότητας του μοντέλου	104
11.4 Επίδραση των διαφόρων παραγόντων στην θερμική απόδοση δωματίου ...	105
11.5 Συμπεράσματα	114

Κεφάλαιο 12 : Παρουσίαση αποτελεσμάτων της βασικής μελέτης και παραμετρική μελέτη

12.1 Περιγραφή του συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης που μελετήθηκε	115
12.2 Υπολογισμός της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους ηλιακούς συλλέκτες.....	117
12.3 Αποτελέσματα βασικής μελέτης	122
12.4 Αλλαγή της συλλεκτικής επιφάνειας A_c των ηλιακών συλλεκτών	131
12.5 Αλλαγή του γινομένου $F_R \cdot \tau_a$ των ηλιακών συλλεκτών	138
12.6 Αλλαγή του γινομένου $F_R \cdot U_L$ των ηλιακών συλλεκτών	146

12.7	Αλλαγή της μάζας του PCM που είναι ενσωματωμένο στο δάπεδο	154
12.8	Αντικατάσταση του PCM από μπετό	162
12.9	Αλλαγή των ιδιοτήτων του PCM	168

Κεφάλαιο 13	: Γενικά σχόλια και συμπεράσματα.....	176
--------------------	--	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	: Κώδικας βασικής μελέτης σε matlab	180
--------------------	--	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	: Κώδικας μελέτης χωρίς PCM σε matlab	181
--------------------	--	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	: Κώδικας μελέτης με αλλαγή των ιδιοτήτων του PCM σε matlab ..	183
--------------------	---	------------

Βιβλιογραφία	185
---------------------	--------------	------------

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η προσπάθεια του ανθρώπου για τη συνεχή άνοδο του βιοτικού του επιπέδου σε συνδυασμό με τη ραγδαία αύξηση του πληθυσμού της γης και την αλόγιστη σπατάλη και κακή χρήση των ενεργειακών αποθεμάτων του πλανήτη μας, απειλούν να οδηγήσουν σύντομα την ανθρωπότητα σ' ένα μακρύ ενεργειακό χειμώνα [1]. Στις αρχές της δεκαετίας του '50 έκανε δειλά την εμφάνισή του το ενεργειακό πρόβλημα. Παρά το γεγονός ότι το 1950 τα εκτιμώμενα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα είχαν επάρκεια 20 χρόνων, επικρατούσε κάποια νηφαλιότητα σε σχέση με την ενεργειακή τροφοδότηση. Με την εμφάνιση της ενεργειακής κρίσης του 1973 άρχισε και η συνειδητοποίηση του ενεργειακού προβλήματος. Από τότε, έχει αναπτυχθεί μια πλούσια φιλολογία αναφορικά με τα αίτια δημιουργίας, τις επιπτώσεις και τις πιθανές λύσεις του [2]. Το ενεργειακό πρόβλημα, ανεξάρτητα από τη χρονική και την τοπική ιδιαιτερότητα που εμφανίζει, προσδιορίζεται κυρίως από τις εξής συνιστώσες:

- Την ανοδική τάση των τιμών της ενέργειας, η οποία δημιουργεί αύξηση του κόστους στο σύνολο των προϊόντων και των υπηρεσιών. Αξίζει να σημειωθεί ότι από την ενεργειακή κρίση μέχρι σήμερα οι τιμές του αργού πετρελαίου έχουν τετραπλασιασθεί, γεγονός που πιστοποιεί τη μονιμότητα του ενεργειακού προβλήματος ως προς την άνοδο των τιμών.
- Την αβεβαιότητα επάρκειας και σταθερότητας της ενεργειακής τροφοδοσίας. Το φαινόμενο της αβεβαιότητας συντηρείται από τοπικές και περιφερειακές συρράξεις, οι οποίες στις περισσότερες των περιπτώσεων δημιουργούνται από παρέμβαση τρίτων προκειμένου να αυξήσουν την επιρροή τους στο διεθνές κύκλωμα του πετρελαίου.
- Την εξάντληση των ενεργειακών πόρων, έστω και αν αυτή τοποθετείται σε μακρινούς χρονικούς ορίζοντες.
- Τη ρύπανση της ατμόσφαιρας και των υδάτινων αποδεκτών. Συγκεκριμένα η ενέργεια επιδρά δυσμενώς στο περιβάλλον σε κάθε φάση της ενεργειακής ροής, δηλαδή από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι την τελική χρήση τους. Αυτό έχει ως συνέπεια να συμβάλλει τα μέγιστα στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου

(από τις εκπομπές των αερίων καύσης) και ταυτόχρονα να μειώνει τη διαθεσιμότητα του υδάτινου δυναμικού (από την ποιοτική υποβάθμιση των αποδεκτών). Έτσι το ενεργειακό σύστημα είναι κυρίως υπεύθυνο για την κλιματική αλλαγή και για την παγκόσμια κρίση του νερού.

- Το κύκλωμα διαχείρισης της ενεργειακής ροής χαρακτηρίζεται από μεγάλες απώλειες, που ανέρχονται στο 85% της πρωτογενούς ενέργειας. Διαπιστώνεται ως εκ τούτου ότι σημαντική συνιστώσα του ενεργειακού συστήματος είναι η μη ορθολογική διαχείρισή του ή, διαφορετικά, η χαμηλή αποδοτικότητά του [2].

Επίσης πρέπει να αναφερθεί, ότι τα τελευταία χρόνια η μέση ετήσια παγκόσμια αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ του 4% και 5 %, το οποίο μεταφράζεται σε διπλασιασμό της κατανάλωσης ενέργειας κάθε δέκα ή δώδεκα χρόνια. Το γεγονός αυτό από μόνο του είναι αρκετά ανησυχητικό, ιδίως εάν συνδυασθεί με την αναμενόμενη εξάντληση των βεβαιωμένων αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων [1]. Στα πλαίσια αυτά η παγκόσμια κοινότητα τα τελευταία είκοσι χρόνια συνειδητοποιώντας τον κίνδυνο του επερχόμενου ενεργειακού χειμώνα, ξεκίνησε ορισμένες φιλότιμες προσπάθειες περιορισμού της κατανάλωσης και ορθολογικότερης χρήσης των ενεργειακών αποθεμάτων[1].

Σήμερα το 80% της ενέργειας προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, το 14% από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας - ΑΠΕ, και το 6% από πυρηνικούς σταθμούς. Είναι φανερό ότι για την επίλυση του ενεργειακού προβλήματος είναι απαραίτητο να ελαχιστοποιηθεί η χρήση ορυκτών καυσίμων. Οποιαδήποτε όμως λύση θα πρέπει να εξασφαλίζει τις αξίες, τις παραδόσεις, την ευημερία και τις ελευθερίες του κοινωνικού συνόλου. Προς την κατεύθυνση αυτή, έχει γίνει ευρύτερα αποδεκτή η ανάγκη υποκατάστασης των συμβατικών ενεργειακών πηγών με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι ΑΠΕ πρέπει να αποτελέσουν βασικό στόχο μιας νέας ενεργειακής πολιτικής και να μπορούν να καλύψουν σημαντικό ποσοστό της ενεργειακής ζήτησης των ανεπτυγμένων χωρών [2]. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εκπέμπουν περιορισμένα ή καθόλου αέρια που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα που δίνουν οι ανανεώσιμες πηγές για την δημιουργία κατανεμημένων δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [3].

Σήμερα, το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού ή θερμότητας από ΑΠΕ, σε σύγκριση με τη χρήση συμβατικών καυσίμων είναι σε αρκετές περιπτώσεις υψηλότερο. Ωστόσο, το μέσο κόστος παραγωγής επηρεάζεται ελάχιστα λόγω της περιθωριακής ακόμη συμμετοχής των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο ειδικά της Ελλάδας. Έτσι, είναι σαφές ότι το κόστος των τεχνολογιών ΑΠΕ μειώνεται ραγδαία με την επέκταση της χρήσης τους και συνεπώς με τη μαζική παραγωγή τους. Ορισμένες τεχνολογίες είναι ήδη ανταγωνιστικές και προβλέπεται ότι θα συμβεί το ίδιο και με πολλές από τις υπόλοιπες. Αντίθετα, είναι εξίσου σαφές ότι με την βαθμιαία κατανόηση του εξωτερικού κόστους που συνεπάγεται η παραγωγή ενέργειας, η χρήση των συμβατικών καυσίμων θα επιβαρυνθεί πολύ, είτε άμεσα με φόρους, είτε έμμεσα με περιορισμούς εκπομπών ρύπων που οδηγούν σε επενδύσεις υψηλού κόστους. Είναι γεγονός ότι οι ευνοϊκές συνθήκες που διαμορφώθηκαν τα τελευταία χρόνια στην Ευρώπη, αλλά και παγκόσμια από την ανάπτυξη των ΑΠΕ, θα επηρεάσουν θετικά την προώθηση των ΑΠΕ και στην χώρα μας. Αντίθετα οι δυσμενείς επιπτώσεις από την αύξηση της τιμής του πετρελαίου, λόγω πολιτικοκοινωνικών καταστάσεων, συντελούν στον περιορισμό της κατανάλωσης συμβατικών καυσίμων. Οι προοπτικές αυτές αυξάνονται για την Ελλάδα, λόγω ύπαρξης πλούσιου δυναμικού (ειδικά ηλιακού και αιολικού), γεγονός που επιτρέπει τη στήριξη μιας ενεργειακής πολιτικής που θα στηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό στις ΑΠΕ [3] .

Μια από τις εναλλακτικές επιλογές είναι και η ανάπτυξη συσκευών αποθήκευσης , η οποία είναι εξίσου σημαντική με την εξέλιξη της εκμετάλλευσης των νέων πηγών ενέργειας . Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας παρέχουν την δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας η οποία με τη σειρά της περιορίζει την επίδραση του περιβάλλοντος σχετικά με την χρήση της ενέργειας. Ο σκοπός αυτών των συστημάτων είναι να γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, όπως θα περιγραφεί αναλυτικά σε κεφάλαια που ακολουθούν, άρχισε να κινεί το ενδιαφέρον των ερευνητών από τα τέλη της δεκαετίας του '70 όπου μελετούνταν για εφαρμογές θέρμανσης με χρήση ηλιακής ενέργειας. Σχετικά πρόσφατα άρχισε να εξετάζεται η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας για ανάκτηση ενεργειακών απωλειών, εξισορρόπηση του φορτίου για παραγωγή ενέργειας και εφαρμογές κλιματισμού.

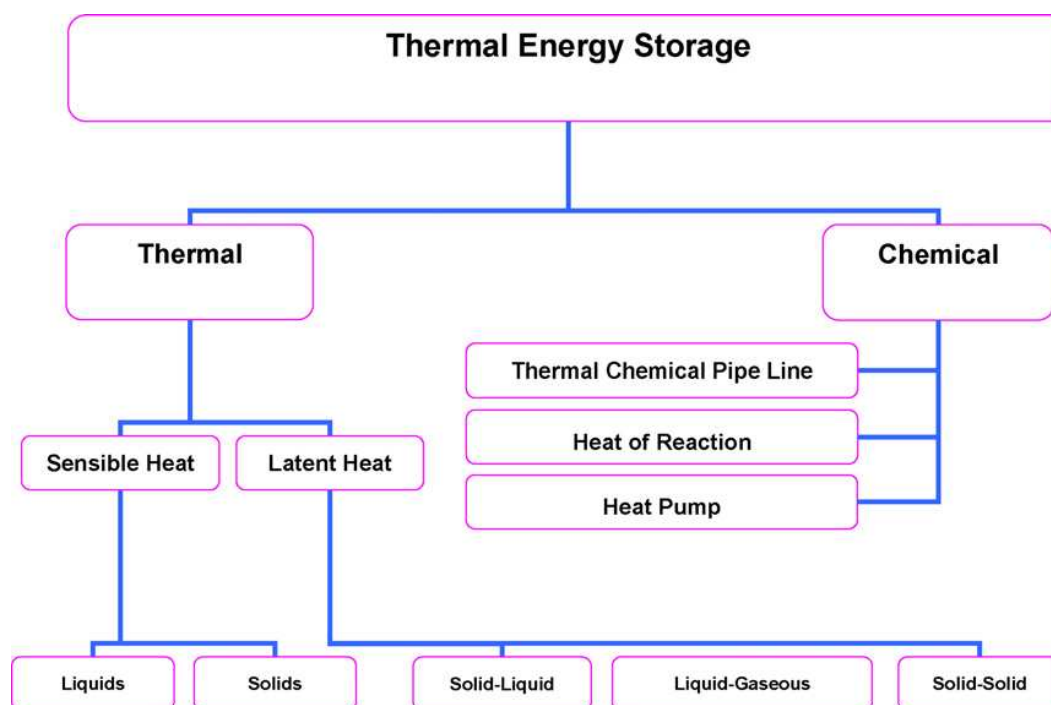
Η χρήση των μη συνεχώς διαθέσιμων πηγών ενέργειας σε ένα σύστημα για θέρμανση και ψύξη απαιτεί την ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης. Τα κτίρια διαθέτουν μεγάλη μάζα η οποία αντιδρά σταδιακά στις απαιτήσεις της θέρμανσης και ψύξης. Η εφαρμογή των PCMs, στα οποία αναφέρεται και η παρούσα εργασία, στα κτίρια αποθηκεύει θερμότητα κατά τη διάρκεια της μέγιστης παραγωγής του ηλιακού φορτίου (δηλαδή την ημέρα) και την αποδίδει κατά τη διάρκεια της περιορισμένης παραγωγής του φορτίου δηλαδή την νύχτα.

Κεφάλαιο 2

Μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

2.1 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας

Η θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να αποδοθεί αργότερα σαν αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια ενός υλικού και μπορεί να έχει τη μορφή αισθητής θερμότητας, λανθάνουσας θερμότητας ή και σε θερμοχημικές αντιδράσεις [4]. Στο σχήμα 2.1.1 παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας.



Σχήμα 2.1.1 Διάφοροι τύποι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας [5].

2.2 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης της εσωτερικής θερμοκρασίας του μέσου αποθήκευσης. Αυτό συνεπάγεται πως το μέσο αποθήκευσης πρέπει να έχει υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα, μακροχρόνια σταθερότητα σε θερμική

φόρτιση, συμβατότητα με το δοχείο και χαμηλό σχετικά κόστος. Τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι είτε υγρά είτε στερεά [6].

► Υγρά μέσα αποθήκευσης

i) Αποθήκευση σε νερό

Το νερό αποτελεί ένα από τα καλύτερα μέσα αποθήκευσης θερμότητας ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει διότι διαθέτει υψηλότερη ειδική θερμοχωρητικότητα από άλλα υλικά, είναι φθινό και πάντα διαθέσιμο. Όμως λόγω της υψηλής τάσης ατμών που παρουσιάζει απαιτείται μόνωση και δοχεία που αντέχουν υψηλές πιέσεις για εφαρμογές σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Χρησιμοποιείται για θέρμανση νερού με χρήση της ηλιακής ενέργειας αλλά και για τη θέρμανση χώρων [6].

Η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση σε δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας με νερό δημιουργείται λόγω των ανωστικών δυνάμεων εξαιτίας των οποίων η υψηλή θερμοκρασία παρατηρείται στο πάνω μέρος της δεξαμενής και η χαμηλή στο κάτω μέρος. Αυτή η ιδιότητα έχει ένα διπλό πλεονέκτημα i) το ποσό της ενέργειας που συλλέχθηκε μπορεί να αυξηθεί, αν η θερμοκρασία του υγρού εισόδου στο συλλέκτη είναι χαμηλότερη από τη μικτή θερμοκρασία αποθήκευσης και ii) η αποδοτικότητα με την οποία η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί βελτιώνεται αν το φορτίο προμηθεύεται στην θερμοκρασία που συλλέχθηκε και όχι σε χαμηλότερη [6].

Οι δεξαμενές αποθήκευσης κατασκευάζονται από υλικά όπως ασφάλι, αλουμίνιο, οπλισμένο σκυρόδεμα και fiber glass. Η μόνωση τους αποτελείται από υαλοβάμβακα, ορυκτοβάμβακα και πολυουρεθάνη.

ii) Αποθήκευση σε αλμυρό νερό

Οι ηλιακές λίμνες αποτελούν μεθόδους συλλογής και αποθήκευσης μεγάλης ποσότητας ηλιακής ενέργειας υπό τη μορφή θερμικής ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας. Βρίσκουν εφαρμογή τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη χώρων. Στην ηλιακή λίμνη με συντελεστές συναγωγής δημιουργείται ένας συντελεστής πυκνότητας του οποίου η συγκέντρωση

αυξάνεται ανάλογα με το βάθος από την επιφάνεια της λίμνης. Η λίμνη έχει σκούρο (ή μαύρο) πυθμένα έτσι ώστε να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και ακολούθως να αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού. Τέλος η αφαίρεση θερμικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στα κατώτερα στρώματα της λίμνης είναι δυνατό να γίνει χωρίς να διαταραχθούν τα ανώτερα στρώματα [6].

iii) Αποθήκευση σε άλλα υγρά

Τα πιο συνήθη υλικά που αντικαθιστούν το νερό είναι λάδια με βάση το πετρέλαιο και λιωμένα άλατα. Η θερμοχωρητικότητα τους είναι περίπου 25-40 % αυτής του νερού αλλά παρουσιάζουν αρκετά μικρότερη τάση ατμών σε σχέση με το νερό. Έτσι λειτουργούν σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν και τους 300 °C. Επίσης ορισμένα υγρά μέταλλα έχουν αναφερθεί ως πιθανά μέσα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Οι περισσότερες ιδιότητες τους είναι παραπλήσιες με αυτές του νερού και παρουσιάζουν αρκετά υψηλή πιθανότητα αντίδρασης με το δοχείο [6].

► Στερεά μέσα αποθήκευσης

i) Αποθήκευση σε πέτρες

Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από πέτρες ή χαλίκια που είναι τοποθετημένα χαλαρά μεταξύ τους σε ένα στρώμα και διαμέσω αυτών ρέει το ρευστό που μεταφέρει τη θερμότητα. Η αποθηκευόμενη ενέργεια εξαρτάται εκτός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του υλικού και από το μέγεθος, σχήμα της πέτρας, την πυκνότητα τοποθέτησης τους και το υγρό που μεταφέρει τη θερμότητα [6].

ii) Αποθήκευση στον ιστό του κτιρίου

Η αποθήκευση θερμότητας εφαρμόζεται τόσο σε νέα όσο και υπάρχοντα κτίρια και είναι δυνατό να ολοκληρωθεί με συστήματα διανομής αέρα και νερού. Το πιο σύνηθες μέσο αποθήκευσης είναι το κεραμικό τούβλο, το οποίο αποτελείται από μαγνησίτη, ολιβίνη, θερμομόνωση ή φεολίτη. Η μάζα του κτιρίου αλλά και το δομικό τσιμέντο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παθητικά ή ενεργητικά αποθηκευτικά συστήματα. Η πιο διαδεδομένη διάταξη, που χρησιμοποιεί τη μάζα του κτιρίου για θερμική αποθήκευση, βρίσκεται μέσα στο πάτωμα. Έτσι το πάτωμα μετατρέπεται σε μια ακτινοβολούσα επιφάνεια χαμηλής θερμοκρασίας και το τσιμέντο λειτουργεί ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας. Η θέρμανση του πατώματος μπορεί να γίνει μέσω υγρού που μεταφέρει θερμότητα, με σύρματα ηλεκτρικής αντίστασης ή με αγωγούς αέρα [6].

iii) Αποθήκευση σε μέταλλα

Μια άλλη περίπτωση υλικού που είναι κατάλληλα για αποθήκευση θερμότητας και μάλιστα σε υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 120 - 1.400 °C είναι είτε τα ανόργανα μέταλλα είτε μέταλλα [7],[8]. Τέτοια μέταλλα είναι το αλουμίνιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος. Η χρήση μετάλλων προσφέρει πλεονεκτήματα όταν απαιτείται υψηλή θερμική αγωγιμότητα και το κόστος είναι παράμετρος μικρότερης σημασίας [6].

2.3 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας βασίζεται στην απορρόφηση και απελευθέρωση θερμότητας καθώς το υλικό υφίσταται αλλαγή φάσης από την υγρή στην στερεή ή από την υγρή στην αέρια και αντίστροφα. Η αλλαγή φάσης από στερεή σε υγρή παρουσιάζει μικρότερη λανθάνουσα θερμότητα από την αλλαγή από υγρή σε αέρια φάση. Προτιμάται όμως καθώς προκαλεί πολύ μικρότερη αλλαγή όγκου. Παρέχει υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας και έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει θερμότητα ως λανθάνουσα θερμότητα τήξης σε σταθερή θερμοκρασία αντίστοιχη της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης

του υλικού που χρησιμοποιείται. Αυτό σημαίνει ότι για την αποθήκευση μιας ποσότητας ενέργειας απαιτείται μικρότερο βάρος και όγκος υλικού [6].

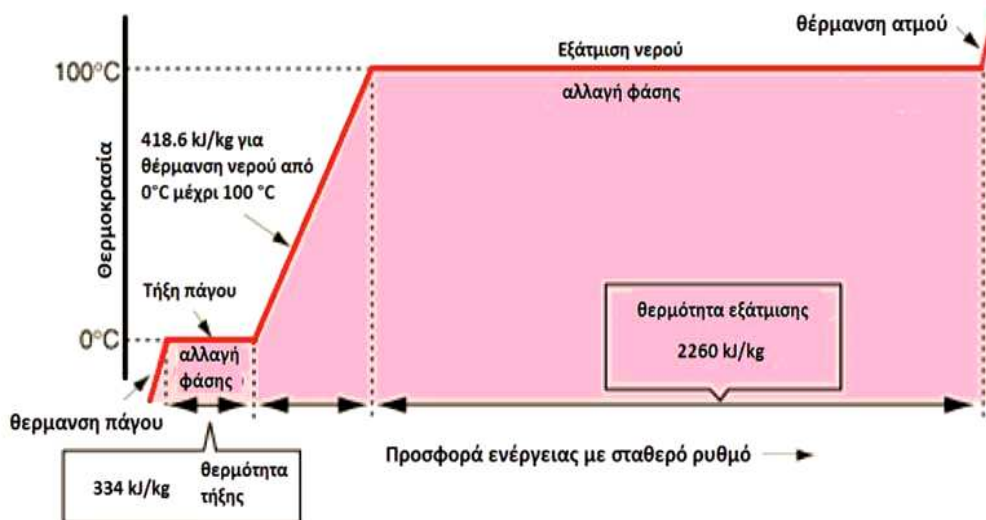
Τα PCMs δε δρουν αυτούσια ως υλικά μεταφοράς θερμότητας και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η χρήση ενός ξεχωριστού μέσου με ένα εναλλάκτη θερμότητας ενδιάμεσα. Ο εναλλάκτης αυτός σχεδιάζεται ειδικά καθώς λαμβάνεται υπόψη και η χαμηλή θερμική διάχυση των PCMs. Επιπλέον το δοχείο που περιέχει το PCM πρέπει να σχεδιαστεί ειδικά ώστε να απορροφά τις αλλαγές όγκου που υφίσταται το υλικό κατά την αλλαγή φάσης [5].

Ένα τυπικό σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας αποτελείται από τα εξής στοιχεία : i) ένα PCM κατάλληλο για το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής που μελετάμε ,ii) ένα κατάλληλο δοχείο που θα περιέχει αυτό το υλικό και iii) ένα εναλλάκτη θερμότητας για την μεταφορά της λανθάνουσας θερμότητας από την πηγή στο PCM και εν συνεχεία από το PCM στη δεξαμενή θερμότητας [6].

Κεφάλαιο 3

Γενικά για τα PCMs

Τα υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος των θερμοκρασιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται ονομάζονται PCMs (Phase Change Materials). Ως υποψήφια PCMs θεωρούνται συνήθως υλικά που αλλάζουν μεταξύ στερεής και υγρής φάσης καθώς αυτή η αλλαγή παρουσιάζει συγκριτικά υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ενώ η μεταβολή του όγκου του υλικού είναι πολύ μικρή. Το ιδανικό PCM θα ήταν ένα υλικό που θα παρουσίαζε μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας υψηλή αγωγιμότητα, θερμοκρασία τήξης σύμφωνη με το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής, να τήκεται με την ελάχιστη εμφάνιση supercooling, να είναι χημικά σταθερό, φτηνό στην παραγωγή του, να μην είναι τοξικό, διαβρωτικό και εύφλεκτο. Ένα υλικό πολύ γνωστό για τις αλλαγές φάσης του είναι το νερό. Το νερό, στη θερμοκρασία 0°C, προκειμένου να αλλάξει φάση, από στερεό (πάγος) σε υγρό, χρειάζεται να απορροφήσει ενέργεια ίση με 334 kJ/kg. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα τήξης γιατί δεν προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του (δηλαδή, δεν είναι αντιληπτή με τις αισθήσεις) αλλά αποδίδεται στη μεταβολή των δεσμών και της κινητικής ενέργειας των μορίων του. Ομοίως, για την εξάτμιση του νερού, στους 100°C, δηλαδή για τη μετατροπή από την υγρή στην αέρια φάση, θα πρέπει να απορροφήσει, ως λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, ενέργεια ίση με 2.260 kJ/kg. Αντίστροφα, κατά την ψύξη του νερού, στις θερμοκρασίες αλλαγής φάσης, οι κατά περίπτωση λανθάνουσες θερμότητες ελευθερώνονται.



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα μεταβολής φάσης του νερού [9].

3.1 Κατηγοριοποίηση των PCMs [10]

Τα υλικά αλλαγής φάσης και ειδικά αυτά που μεταπίπτουν από την στερεή στην υγρή φάση μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη σύστασή τους σε: οργανικά υλικά, ανόργανα υλικά και εύτηκτα μίγματα.

Οργανικά PCMs

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) . Οι παραφίνες (κεριά) που έχουν σημείο τήξης από 30 έως 90 °C έχουν 18 έως 50 άτομα άνθρακα (C18-C50). Όσο αυξάνεται το μήκος αλυσίδας του άνθρακα, τόσο αυξάνεται το μοριακό βάρος και η θερμοκρασία τήξης. Η ειδική θερμοχωρητικότητα τους είναι περίπου 2.1 kJ/ kg K και η λανθάνουσα θερμότητά τους από 180 έως 230kJ/kg.

Πλεονεκτήματα οργανικών PCMs :

- μη διαβρωτικά με τα περισσότερα υλικά
- μικρός κίνδυνος ρύπανσης του νερού
- μικρής τάξης ή καθόλου εμφάνιση του φαινομένου supercooling
- χημική και θερμική σταθερότητα
- χαμηλό κόστος αγοράς σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες των PCM
- παραγωγή των υλικών σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές (σκόνη, κόκκοι, πλάκες)

Μειονεκτήματα οργανικών PCMs:

- λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης χαμηλότερη από τα μη οργανικά
- συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας χαμηλότερος από τα μη οργανικά
- αναφλέξιμα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (~ 200 °C)
- πυκνότητα χαμηλότερη από τα μη οργανικά

Ανόργανα PCMs

Τα ένυδρα άλατα είναι ο κύριος εκπρόσωπος ανόργανων υλικών και παρουσιάζουν αρκετά καλές ιδιότητες (τιμή λανθάνουσας θερμότητας περίπου 250 kJ/kg και αγωγιμότητας 0.6 W/mK περίπου). Έλαβαν μέρος σε αναρίθμητες μελέτες γύρω από τη χρησιμοποίησή τους σαν PCM. Ο κύριος λόγος είναι το σχετικά μεγάλο εύρος σημείων τήξης που διαθέτουν, σχεδόν από 0 έως 120 °C, πράγμα που τα κάνει κατάλληλα για πολλές θερμικές εφαρμογές και όχι μόνο για κτίρια. Ο χημικός τύπος είναι $M \cdot nH_2O$, όπου M είναι μία ανόργανη ουσία, ενυδατωμένη με n μόρια νερού, και σχηματίζει μία σύνθετη ουσία ικανή να αποθηκεύσει μεγάλο ποσό θερμότητας υπό μορφή λανθάνουσας. Η αρχή λειτουργίας των ένυδρων αλάτων, βασίζεται στην αποβολή του κρυσταλλικού νερού, το οποίο αποβάλλεται όταν προσδοθεί θερμότητα στο άλας σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό, αποθηκεύεται θερμότητα στο PCM, η οποία αποβάλλεται με επανακρυστάλλωση του νερού του άλατος.

Πλεονεκτήματα ανόργανων PCMs :

- μεγαλύτερη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης (σε σύγκριση με τα οργανικά)
- μη αναφλέξιμα
- πυκνότητα υψηλότερη από τα οργανικά

Μειονεκτήματα ανόργανων PCMs:

- διαβρωτικά (απαραίτητη αποθήκευση των υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία)
- εμφάνιση supercooling
- διαχωρισμός των φάσεων (μεταβλητή τιμή της διαλυτότητας με τη θερμοκρασία), δυνατή η δημιουργία ιζήματος
- αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση
- αρκετά μεγαλύτερο κόστος αγοράς από τα οργανικά
- υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα τον εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους

Εύτηκτα μίγματα

Εύτηκτα ονομάζονται τα μίγματα δύο ή περισσότερων αλάτων τα οποία έχουν συγκεκριμένα σημεία τήξης/ πήξης και μπορεί να είναι είτε οργανικά, είτε ανόργανα ή ακόμα και μίγμα ανόργανων με οργανικά PCMs. Προφανές είναι πως τα εύτηκτα PCMs αναπτύχθηκαν λόγω των δυνατοτήτων που παρέχουν στους σχεδιαστές ώστε να επιτύχουν τα επιθυμητά σημεία τήξης για την κάθε εφαρμογή. Επίσης θεωρείται ότι συμπεριφέρονται και αντιμετωπίζονται σαν ένυδρα άλατα. Το μειονέκτημά τους είναι το κόστος παραγωγής, το οποίο είναι διπλάσιο έως τριπλάσιο απ' ότι των οργανικών και ανόργανων PCMs .

Πλεονεκτήματα ευτηκτικών μιγμάτων :

- εμφανίζουν την τάση να συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα και των δυο ομάδων των PCMs
- έχουν ευδιάκριτο σημείο τήξης παρόμοιο με αυτό της καθαρής ουσίας
- η ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από αυτή των οργανικών μιγμάτων

Μειονεκτήματα ευτηκτικών μιγμάτων :

- το κόστος παραγωγής είναι από διπλάσιο ως τριπλάσιο του κόστους των οργανικών και ανόργανων PCMs
- ελλιπείς δεδομένα στη βιβλιογραφία σχετικά με τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες

3.2 Επιθυμητές ιδιότητες των PCMs [11]

Το ιδανικό PCM πρέπει να διαθέτει ορισμένες επιθυμητές ιδιότητες ώστε να ικανοποιεί τους σκοπούς για τους οποίους το χρησιμοποιούμε. Οι σημαντικότερες από αυτές φαίνονται παρακάτω:

Θερμοφυσικές ιδιότητες:

- θερμοκρασία τήξης μέσα στο προκαθορισμένο θερμοκρασιακό εύρος
- υψηλή τιμή λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα μάζας
- υψηλή τιμή ειδικής θερμότητας

- υψηλή πυκνότητα
- υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- μικρές αλλαγές στον όγκο κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης
- χαμηλή πίεση ατμών

Κινηματικές ιδιότητες:

- υψηλό δείκτη πυρηνοποίησης για να αποφευχθεί το φαινόμενο του supercooling
- υψηλός δείκτης κρυσταλλικής αύξησης ώστε το σύστημα να μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις για ανάκτηση θερμότητας

Χημικές ιδιότητες:

- χημική σταθερότητα
- πλήρως αναστρέψιμη διαδικασία τήξης-πήξης
- μη εμφάνιση χημικής αποσύνθεσης
- συμβατότητα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη θερμική αποθήκευση
- μη δηλητηριώδη
- μη τοξικά
- μη αναφλέξιμα

Οικονομικοί παράγοντες:

- χαμηλό κόστος
- μεγάλες διαθέσιμες ποσότητες

3.3 Φαινόμενο διαχωρισμού φάσεων και supercooling [10]

Η συμπεριφορά κατά την αλλαγή φάσης στα ένυδρα άλατα είναι μακράν πιο περίπλοκη απ' ό,τι στα οργανικά PCM, γιατί το υλικό περνά στάδια ενυδάτωσης και αφυδάτωσης, και όχι απλά τις φάσεις της τήξης και της στερεοποίησης. Η μεγάλη θερμοαποθηκευτική ικανότητα των ένυδρων αλάτων είναι δύσκολο να διατηρηθεί και συνήθως μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης του υλικού. Αυτός είναι και ο λόγος όπου δεν μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών. 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 εξασθένηση των ιδιοτήτων τους. Προφανώς, λόγω της διαφοράς πυκνότητας των δύο αυτών φάσεων, η στερεή φάση κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου αποθήκευσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αποσύνθεση του υλικού ή διαχωρισμός των φάσεων.

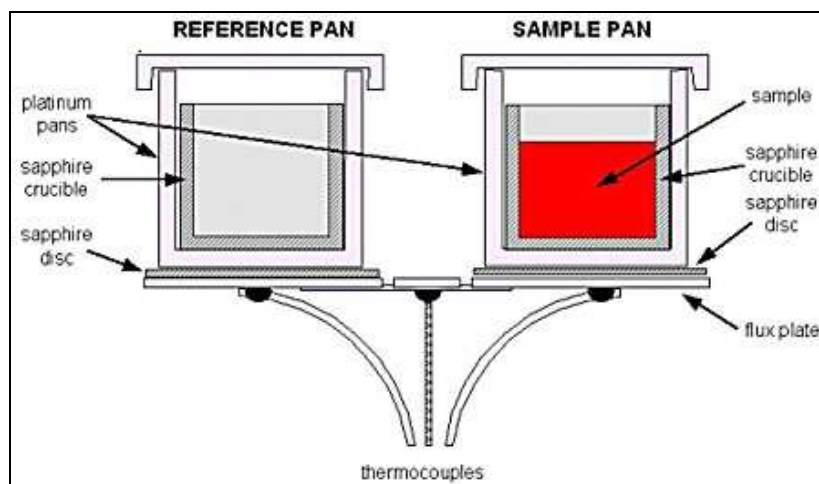
Ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα που αφορά το σύνολο των ανόργανων PCMs αλλά και μέρος των οργανικών είναι το φαινόμενο του supercooling. Το φαινόμενο του supercooling όσο εντείνεται τόσο μη αποδοτικότερη κάνει την αξιοποίηση της αποθηκευμένης θερμότητας. Το φαινόμενο είναι εμφανές αν παρατηρηθεί η καμπύλη θερμοκρασίας - 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. 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 συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων όπως ο όγκος του δείγματος, η "καθαρότητα" του υλικού, ο ρυθμός ψύξης, η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης.

3.4 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων των PCMs [11],[12]

Για τη μέτρηση ιδιοτήτων των PCMs όπως η ειδική θερμοχωρητικότητα και η λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης-στερεοποίησης χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι οι σημαντικότερες των οποίων θα αναφερθούν παρακάτω.

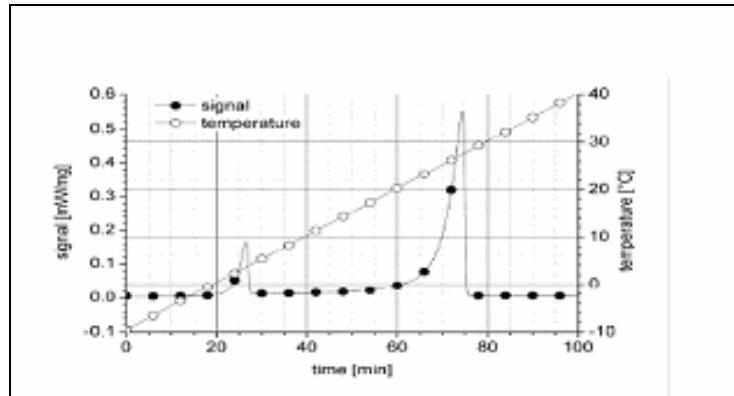
◆ DSC(διαφορική θερμιδομετρική σάρωση)

Είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης της θερμικής ικανότητας πολύ μικρών δειγμάτων. Σε ένα θερμοκρασιακό πρόγραμμα μετράται η διαφορά στην θερμική απόκριση του δείγματος που εξετάζουμε και ενός υλικού αναφοράς. Μάλιστα, το μέρος του οργάνου που χρησιμοποιείται για την συγκράτηση του δείγματος έχει διάμετρο και ύψος μόλις 0,00635m. Για τα υλικά αλλαγής φάσης η DSC υπολογίζει τις καμπύλες τήξης και στερεοποίησης και τις συνδεδεμένες με αυτές τις τιμές της λανθάνουσας θερμότητας. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου είναι η διατήρηση της θερμοκρασιακής ισορροπίας ανάμεσα στο υπό δοκιμή δείγμα και στο δείγμα αναφοράς, καθώς το τελευταίο θερμαίνεται και ψύχεται με σταθερό ρυθμό ή θερμαίνεται βηματικά ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

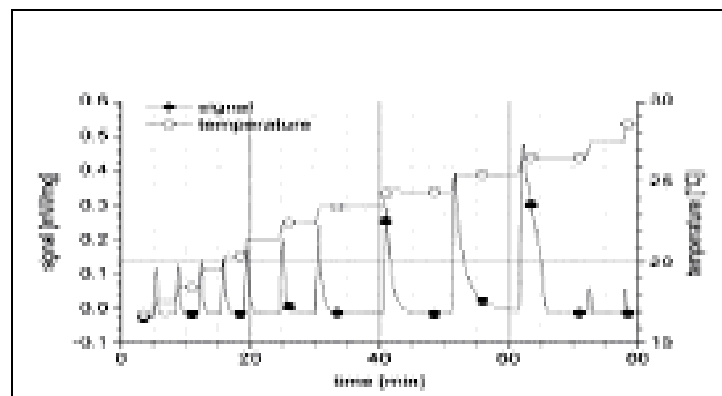


Σχήμα 3.4.1 Διάταξη μέτρησης με μέθοδο DSC.

Η περίσσεια θερμότητας που απορροφάται ή απορρίπτεται από το υπό δοκιμή δείγμα καταγράφεται σαν συνάρτηση του χρόνου. Η ολοκλήρωση αυτών των τιμών δίνει τις ακριβείς μετρήσεις της ολικής θερμότητας μετάβασης μεταξύ των δυο θερμοκρασιών.



Σχήμα 3.4.2 Τυπικό διάγραμμα ροής θερμότητας και θερμοκρασίας με μέτρηση DSC σταθερού ρυθμού θέρμανσης.

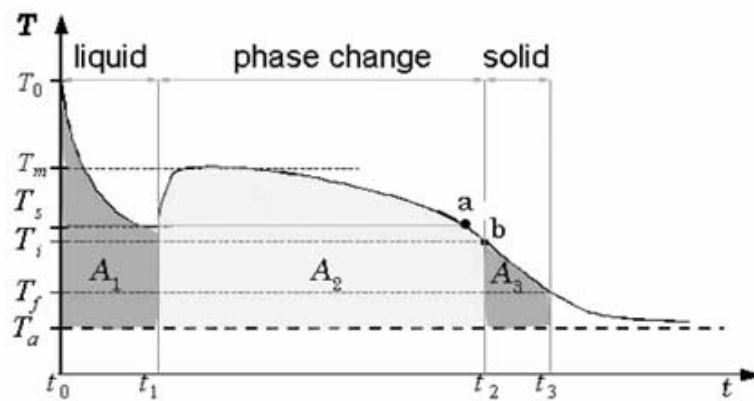


Σχήμα 3.4.3 Τυπικό διάγραμμα ροής θερμότητας και θερμοκρασίας με μέτρηση DSC ισόθερων βημάτων.

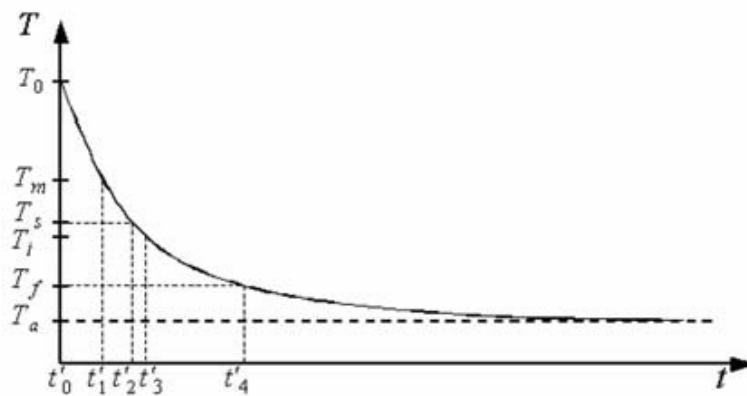
Η παραπάνω μέθοδος μέτρησης των ιδιοτήτων των PCMs έχει δώσει αρκετά ακριβή αποτελέσματα κάνοντας όμως χρήση δειγμάτων πολύ μικρών διαστάσεων της τάξης των μμ. Ενδεχομένως όταν θα χρειαστεί για μια εμπορική χρήση να αξιολογηθεί το υλικό η μέθοδος αυτή δε θα δώσει τόσο ασφαλή αποτελέσματα καθώς σε αυτή την περίπτωση είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο δείγμα από το συγκεκριμένο υλικό που μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε. Αυτό γίνεται γιατί καθώς 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. Έτσι σε αυτές τις περιπτώσεις των, μεγαλύτερων δειγμάτων, προτιμάται χρήση κάποιας παρεμβατικής μεθόδου δοκιμών για καταγραφή των ιδιοτήτων τους.

◆ T-history [13]

Μία πολύ ενδιαφέρουσα και απλή σχετικά μέθοδος, που αναπτύχθηκε πρόσφατα, είναι η γνωστή μέθοδος “T-history”, η οποία υπολογίζει την λανθάνουσα θερμότητα του PCM μέσω σύγκρισης της θερμοκρασίας του PCM και ενός υλικού αναφοράς. Αν εκτεθούν ξαφνικά δύο κυλινδρικές ράβδοι, που η μια περιέχει PCM σε υγρή φάση και η άλλη αποσταγμένο νερό, που είχαν εμβαπτιστεί σε λουτρό νερού θερμοκρασίας T_0 , σε περιβάλλον θερμοκρασίας T_∞ , τότε αρχίζει να καταγράφεται η θερμοκρασία της κάθε μίας και παίρνουμε τις καμπύλες ψύξης (θερμοκρασίας-χρόνου) ή καμπύλες T-history.



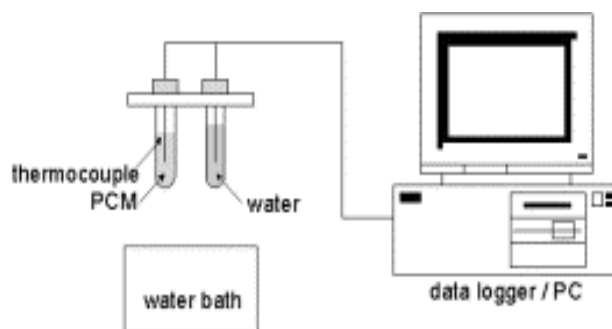
(a) PCM



(b) Pure water

Σχήμα 3.4.4 Τυπική καμπύλη T-history ενός PCM και του νερού[14].

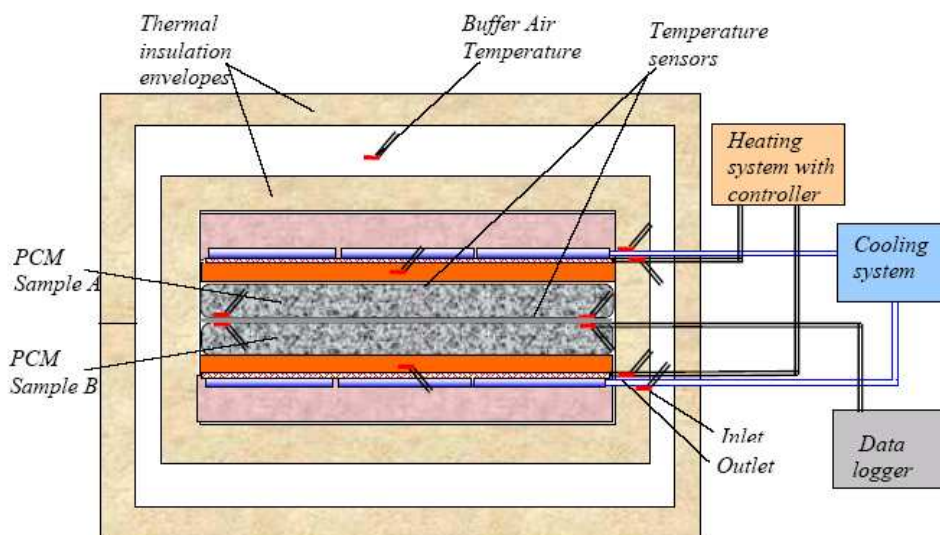
Η μέθοδος αυτή αν και είναι σχετικά απλή είναι αρκετά χρονοβόρα και δημιουργεί κάποια προβλήματα όταν πρόκειται να γίνει μέτρηση με πολλούς κύκλους τήξης-στερεοποίησης. Ένα συγκεκριμένο πρόβλημα που προκύπτει είναι ο καθορισμός των ορίων της περιόδου αλλαγής φάσης, δηλαδή της έναρξης και της λήξης, που αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τον ακριβή προσδιορισμό της θερμοκρασίας τήξης.



Σχήμα 3.4.5 Τυπική μετρητική διάταξη T-history [14].

◆ Double-cell

Πρόκειται για μια μέθοδο θερμιδικού τύπου που έχει δημιουργηθεί για μακροχρόνιες δοκιμές των PCM και επιτρέπει τη μέτρηση και τη σύγκριση της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας του υλικού σε πολλούς κύκλους φόρτισης. Βασίζεται στην εναλλασσόμενη συμμετρική θέρμανση και ψύξη, υπό ελεγχόμενες συνθήκες, ενός μεγάλου δείγματος PCM της τάξης του 1-2 kg που τοποθετείται στο εσωτερικό ενός πολύ καλά μονωμένου καλύμματος. Παρέχει αρκετά σημαντικές πληροφορίες για 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.



Σχήμα 3.4.6 Σχηματική απεικόνιση του double-cell.

3.5 Μορφές ενσωμάτωσης και συσκευασίας των PCMs [10],[15],[16]

Η χρήση των PCMs στις περισσότερες εφαρμογές απαιτεί την 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 διευκολύνει τη μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας. Η ενσωμάτωση του υλικού στο πορώδες άλλου υλικού αποτελεί τη “βάση” του σύνθετου τελικού προϊόντος.

Ο χώρος συσκευασίας θα πρέπει να πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις : i) να καλύπτει τις απαιτήσεις αντοχής στη διάβρωση , ελαστικότητα και θερμική σταθερότητα, ii) να δρα σαν όριο ώστε να αποτρέπεται η επαφή του περιβάλλοντος με το PCM και κάθε αρνητική επίπτωση που αυτή επιφέρει, iii) να προσφέρει ικανοποιητική επιφάνεια για τη μεταφορά θερμότητας και iv) να παρέχει σταθερότητα στη δομή καθώς και εύκολο χειρισμό της αλλαγής όγκου κατά την αλλαγή φάσης. Δυο παράγοντες που έχουν άμεση επίδραση στο χρόνο τήξης και στην απόδοση του PCM είναι η γεωμετρία της συσκευασίας του PCM καθώς και οι θερμικές και γεωμετρικές παράμετροι της συσκευασίας για δεδομένη ποσότητα PCM. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά την επιλογή του υλικού και της γεωμετρίας της συσκευασίας του PCM.

Τα είδη της ενσωμάτωσης είναι: μικροενσωμάτωση, μακροενσωμάτωση, ογκώδης αποθήκευση, εμφύσηση, ενσωμάτωση σε τούβλο.



Σχήμα 3.5.1 Συσκευασίες PCMs για εφαρμογές, από μέταλλο ή πλαστικό σε διάφορους τύπους και μεγέθη [9].

3.5.1 Μικροενσωμάτωση [15],[16]

Η μικροενσωμάτωση είναι μια τεχνική ενσωμάτωσης κατά την οποία ένας μεγάλος αριθμός μικρών PCMs εσωκλείονται σε μια στεγανοποιημένη και συνεχή κοιλότητα με διάμετρο μικρότερη του 1 mm. Η κοιλότητα αυτή χαρακτηρίζεται από ακαμψία γεγονός το οποίο εμποδίζει την μεταφορά θερμότητας με τρόπο διαφορετικό από αυτό της αγωγής. Κάτι τέτοιο μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο στη μεταφορά θερμότητας και να επιβραδύνει το ρυθμό της, κυρίως κατά της φάση της "φόρτισης" του PCM. Βέβαια σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι εμποδίζεται η διαρροή του υλικού και

ότι ο συνδυασμός της μεγάλης επιφάνειας του τοίχου(στο οποίο θα τοποθετηθούν οι μικροκάψουλες που περιέχουν το PCM) σε συνδυασμό με το μικρό όγκο των καψουλών ευνοεί ιδιαιτέρως την ταχύτερη απορρόφηση και απομάκρυνση της θερμότητας. Από την άλλη πλευρά τα συστήματα που λειτουργούν με συσκευασίες με μικροκάψουλες είναι αρκετά δαπανηρά σε σχέση με τις άλλες μεθόδους ενσωμάτωσης και χρησιμοποιούνται συνήθως σε περιπτώσεις θερμικού ελέγχου.

3.5.2 Μακροενσωμάτωση [15],[16]

Αποτελεί την πλέον συνήθη τεχνική ενσωμάτωσης κατά την οποία μια αρκετά μεγάλη ποσότητα PCM τοποθετείται σε κάψουλες κυλινδρικής ή σφαιρικής μορφής. Η μάζα του PCM μπορεί να κυμαίνεται από μερικά γραμμάρια ως κιλό. Βασικό προτέρημα της τεχνικής αυτής είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα που χρησιμοποιούν ρευστό μεταφοράς τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια φάση. Για να επιτύχει μια μακροκάψουλα θα πρέπει να ικανοποιεί την εφαρμογή για την οποία την χρειαζόμαστε. Έτσι με χρήση της μακροενσωμάτωσης μπορούμε να : i) να αποφύγουμε τον διαχωρισμό των φάσεων, ii) να αυξήσουμε το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας εξασφαλίζοντας ότι οι κάψουλες θα έχουν μεγάλη αναλογία επιφανείας και όγκου δηλαδή να μεταφέρονται μεγάλο ποσό θερμότητας ανά μονάδα όγκου σε μια περιοχή, iii) να προσφέρουμε μια ισχυρή δομή για τα PCMs. Οι πιο φθηνές μέθοδοι μακροενσωμάτωσης είναι τα πλαστικά μπουκάλια και τα επίπεδα μεταλλικά κουτιά.

3.5.3 Ογκώδης αποθήκευση

Η ογκώδης αποθήκευση για PCM είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που μοιάζει σε κατασκευή με τις ήδη υπάρχουσες κατασκευές που χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή αποθήκευση, αλλά με κάποιες ουσιαστικές διαφορές. Το μοναδικό χαρακτηριστικό αυτών των μεγάλων συστημάτων αποθήκευσης PCM είναι η ανάγκη για πιο έντονη μεταφορά

θερμότητας συγκριτικά με αυτή των συστημάτων χωρίς PCM, εξ' αιτίας του γεγονότος ότι η πυκνότητα θερμικής αποθήκευσης του PCM είναι υψηλότερη σε σχέση με άλλα μέσα αποθήκευσης. Η περιοχή όπου συντελείται η μεταφορά θερμότητας αν και μικρή απαιτεί ένα μεγάλο ρυθμό θερμικού κέρδους ή απόδοσης. Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται είναι η προσθήκη πτερυγίων ή η χρησιμοποίηση μορίων υψηλής αγωγιμότητας, οι μεταλλικές δομές, ίνες στην πλευρά που έρχεται σε επαφή με το PCM, οι εναλλάκτες θερμότητας άμεσης επαφής ή η μέθοδος των κυλιόμενων κυλίνδρων.

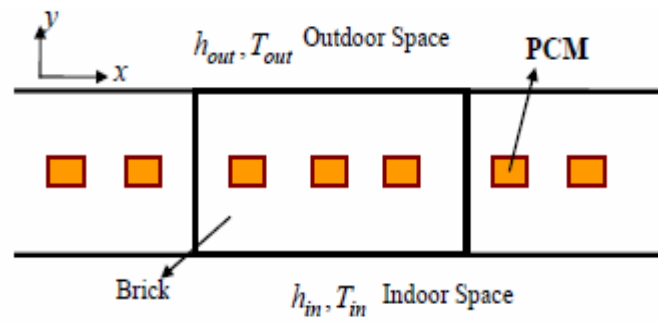
3.5.4 Εμβάπτιση [17]

Σε αυτή τη μέθοδο, το πορώδες κατασκευαστικό υλικό, δηλαδή η γυψοσανίδα, το τούβλο ή το μπλόκ τσιμέντου, βυθίζεται σε ζεστό-τηγμένο PCM, το οποίο απορροφάται από τους πόρους του υλικού μέσω τριχοειδών φαινομένων. Στη συνέχεια το πορώδες υλικό απομακρύνεται από το υγρό PCM, αφήνεται για κάποιο χρονικό διάστημα ώστε να κρυώσει και το PCM παραμένει στους πόρους του κατασκευαστικού υλικού. Το πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι καθιστά εύκολη την μετατροπή ενός απλού πάνελ σε πάνελ με PCM εφόσον η εμβάπτιση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιαδήποτε ώρα και σημείο.

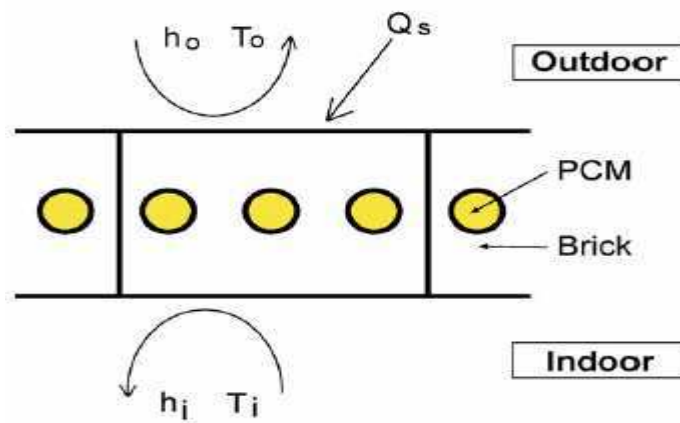
3.5.5 Ενσωμάτωση σε τούβλο [18]

Μια άλλη τεχνική είναι η ενσωμάτωση του υλικού αλλαγής φάσης μέσα σε τούβλο. Από μελέτες που έχουν γίνει συγκριτικά μεταξύ ενός απλού τούβλου και ενός τούβλου που έχει ενσωματωμένο PCM προέκυψε ότι η μέγιστη ροή θερμότητας μπορεί να περιοριστεί σε ποσοστό 32,8 % αναλόγως της ποιότητας του ενσωματωμένου PCM. Ένας ακόμη παράγοντας που επιδρά στην θερμική αποδοτικότητα του τούβλου με ενσωματωμένο PCM είναι η θέση που τοποθετείται το τελευταίο. Από την μελέτη προέκυψε ότι το PCM παρουσιάζει μεγαλύτερη αποδοτικότητα όταν είναι τοποθετημένο στην εξωτερική πλευρά του τοίχου. Υπάρχουν όμως και άλλα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν τα οποία αφορούν την

Θερμική ανάλυση των τούβλων που χρησιμοποιούνται σε οικοδομές και περιέχουν υλικό αλλαγής φάσης, σε κυλινδρικές τρύπες στο εσωτερικό τους.



Σχήμα 3.5.5.1 Σχηματική απεικόνιση τούβλου με PCM.



Σχήμα 3.5.5.2 Σχηματική απεικόνιση τούβλου με PCM σε κυλινδρικές τρύπες.

Κεφάλαιο 4

Ενεργητικά και Παθητικά Ηλιακά Συστήματα [10],[19]

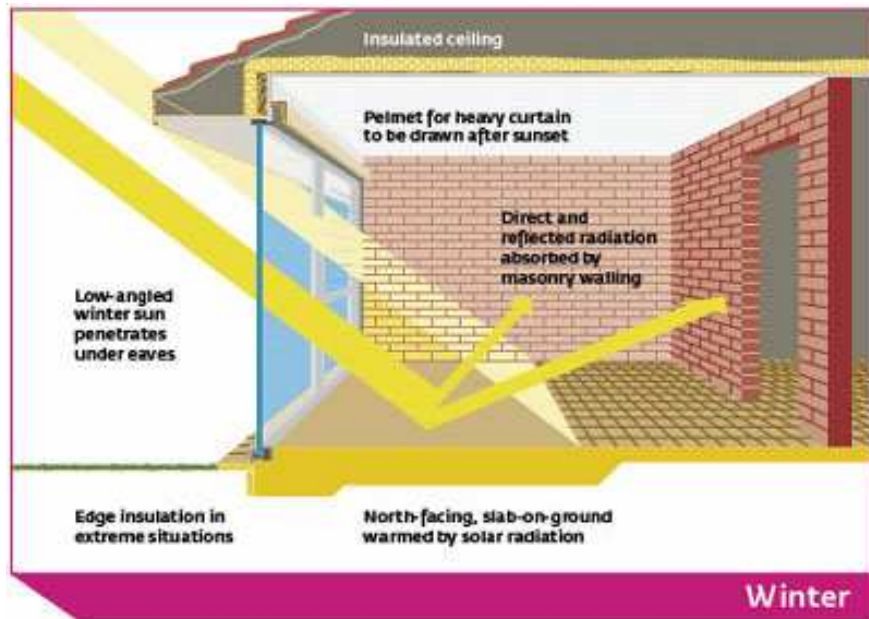
Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να γίνει η διάκριση μεταξύ των ενεργητικών και παθητικών ηλιακών συστημάτων και η αναφορά των χαρακτηριστικών του κάθε είδους. Η απαίτηση για τη θέρμανση ή την ψύξη ενός χώρου με χρήση της ηλιακής ενέργειας καλύπτεται με τη συλλογή, αποθήκευση και διανομή της τελευταίας στο χώρο που θέλουμε να θερμάνουμε ή να ψύξουμε.

Στα παθητικά ηλιακά συστήματα η συλλογή, αποθήκευση και η διανομή της ενέργειας γίνεται με φυσικό τρόπο χωρίς να απαιτούνται καθόλου μηχανολογικά εξαρτήματα καθώς και πρόσθετη μηχανική ή ηλεκτρική ισχύς ή ηλεκτρονικός έλεγχος. Τα διάφορα στοιχεία του κτιρίου όπως οι τοίχοι, η οροφή, τα παράθυρα επιλέγονται και τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να συνεισφέρουν στην συλλογή, αποθήκευση, μεταφορά και διανομή της θερμικής ενέργειας. Τόσο τα κατασκευαστικά υλικά του κτιρίου όπως οι πέτρες, τούβλα, μπετό, νερό, μόνωση καθώς και οι διάφορες θερμικές διεργασίες όπως η θερμική ακτινοβολία, η φυσική και εξαναγκασμένη συναγωγή, η αγωγή, η εξάτμιση συνδυάζονται με ποικίλους τρόπους ώστε να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες του εκάστοτε κτιρίου. Τα κατασκευαστικά υλικά, δηλαδή τα τούβλα, οι πέτρες, το τσιμέντο, το PCM συμβάλλουν στην αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και στην χρονική καθυστέρηση και μείωση της έντασης του θερμικού κύματος. Κατά την διάρκεια της ημέρας, η θερμότητα αποθηκεύεται σε αυτά τα υλικά και αποδίδεται κατά τη διάρκεια της νύχτας. 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.

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα διαχωρίζονται στα συστήματα άμεσου και έμμεσου ηλιακού κέρδους. Το σύστημα άμεσου κέρδους είναι το απλούστερο, γιατί δεν απαιτεί παρά μόνο μια μεγάλη υαλόφρακτη επιφάνεια (παράθυρα με διπλά τζάμια),

προσανατολισμένη προς τη μεσημβρία και μια μονωμένη εξωτερικά κατασκευή με σημαντική θερμική μάζα από μπετόν, τούβλα ή πέτρα με τα οποία θα είναι κατασκευασμένα κυρίως το δάπεδο και οι τοίχοι. Τα συστήματα άμεσου κέρδους χρησιμοποιούν τους χώρους που καταλαμβάνει το κτίριο για τη συλλογή, την αποθήκευση και τη διανομή της ηλιακής θερμότητας και εφόσον είναι σωστά σχεδιασμένα, μπορεί να αποτελέσουν μια πολύ αποτελεσματική και πρακτική λύση ενεργειακής εξοικονόμησης. Το καλοκαίρι, το μεγάλο ύψος του ήλιου περιορίζει την ακτινοβολία που μεταδίδεται από τα τζάμια και ένα σκίαστρο μπορεί να αποκλείσει τελείως τον ήλιο. Η τοποθέτηση της θερμικής μάζας έχει δύο σκοπούς. Ο πρώτος είναι η εξομάλυνση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κατοικίας ακόμα και όταν οι εξωτερικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είναι έντονες και ο δεύτερος είναι να δημιουργήσει την απαραίτητη χρονική καθυστέρηση στην απόδοση της θερμότητας μέσα στην κατοικία, ώστε να επιτρέπεται η θέρμανση και μετά τη δύση του ηλίου.

Μία αποτελεσματική μέθοδος για την μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων είναι η εισαγωγή ενός τοίχου αποθήκευσης θερμότητας ανάμεσα στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία και στο κτίριο. Αυτό αποτελεί το έμμεσο κέρδος. Σε αυτή τη κατηγορία υπάρχουν οι τοίχοι-συλλέκτες θερμικής αποθήκευσης(τοίχος Trombe). Ένας τέτοιος τοίχος δεσμεύει την ηλιακή ενέργεια που περνάει από το τζάμι και την αποταμιεύει. Η ενέργεια αυτή, ύστερα από ένα χρονικό διάστημα που εξαρτάται από το υλικό και το πάχος του τοίχου, εμφανίζεται στην εσωτερική του επιφάνεια και προκαλεί ανύψωση της θερμοκρασίας αέρα του εσωτερικού χώρου. Όλες οι λειτουργίες του συστήματος αυτού, όπως: συλλογή, αποταμίευση, διανομή, έλεγχος και ρύθμιση, είναι τοποθετημένες στον τοίχο αποταμιεύσεως, μεσημβρινού προσανατολισμού και πρακτικά δε διαχωρίζονται. Μόνο η ενέργεια που μεταβιβάζεται στο χώρο με φυσική κυκλοφορία του αέρα μπορεί να διαχωριστεί από αυτή που μεταβιβάζεται με αγωγή μέσα από τον τοίχο. Ο κύριος μηχανισμός θερμάνσεως του σπιτιού γίνεται με ακτινοβολία και συναγωγή από τη θερμική ενέργεια που μεταφέρεται με αργό ρυθμό μέσα από τον παχύ τοίχο προς την εσωτερική του επιφάνεια και η οποία στη συνέχεια διαχέεται προς το εσωτερικό του σπιτιού.



Σχήμα 4.1 Τυπικό παθητικό ηλιακό σύστημα [9].



Σχήμα 4.2 Τυπικό ενεργητικό ηλιακό σύστημα [9].

Η ενεργητική ηλιακή θέρμανση είναι μεν παρόμοια με την παθητική ηλιακή θέρμανση, αλλά είναι πιο περίπλοκη διαδικασία και παράγει πολύ περισσότερη θερμότητα από ότι τα παθητικά συστήματα. Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούν τους συλλέκτες και τη δεξαμενή αποθήκευσης ως χωριστές συνιστώσες και η διανομή της ενέργειας γίνεται με τη βοήθεια κάποιας αντλίας, ανεμιστήρα ή άλλων μέσων. Ένα ενεργητικό ηλιακό σύστημα συλλέγει, αποθηκεύει και διανέμει την ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιώντας είτε κάποιο υγρό, είτε αέρα, ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας των συλλεκτών. Το υγρό στο οποίο αποθηκεύεται η ηλιακή ενέργεια μπορεί να είναι νερό αποθηκευμένο σε πλαστικό, σε fiberglass το οποίο συνήθως χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικό ή σε ατσάλινες κατασκευές που είναι επενδυμένες με γυαλί και διαχωρίζεται από το υπόλοιπο κτίριο με μόνωση. Η ηλιακή ενέργεια αποθηκεύεται στο μέσο αποθήκευσης είτε με τη μορφή λανθάνουσας είτε με τη μορφή αισθητής θερμότητας. Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα δύναται να χρησιμοποιηθούν για τη θέρμανση νερού οικιακής χρήσης, για τη θέρμανση και ψύξη χώρων, για βιομηχανικές διεργασίες, για αφαλάτωση και για διάφορες αγροτικές εφαρμογές.

Κεφάλαιο 5

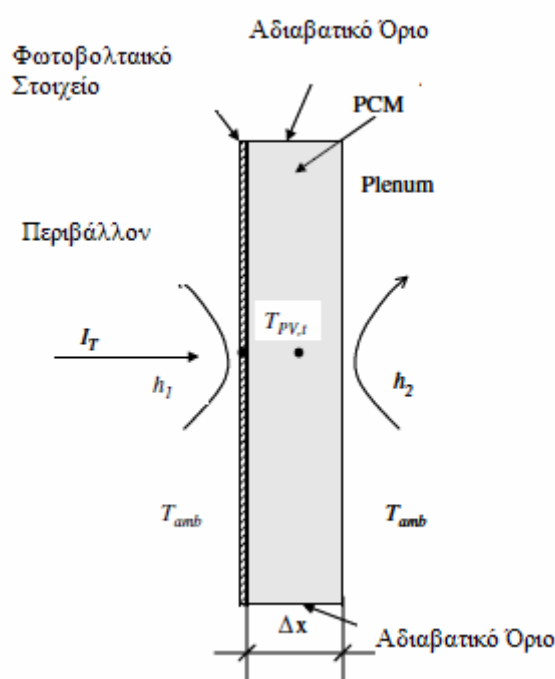
Εφαρμογές των PCMs

Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας υπό λανθάνουσα μορφή είναι αρκετά εκτεταμένες. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η μεγάλη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας με μικρότερη θερμοκρασιακή διακύμανση κατά την ανάκτησή της. Οι πρακτικές δυσκολίες που ανακύπτουν οφείλονται στη χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, στη μεταβολή της πυκνότητας, στην αξιοπιστία-σταθερότητα των ιδιοτήτων σε μακροχρόνια χρήση καθώς και στο διαχωρισμό των φάσεων με ενδεχόμενη αλλαγή χημικής σύστασης των υλικών και εμφάνιση φαινομένου supercooling. Η αποθήκευση θερμότητας είναι ένα πολύ σημαντικό μέσο εξοικονόμησης ενέργειας, βελτιώνοντας την αξιοποίηση της ήδη υπάρχουσας ενέργειας. Μικρής διάρκειας αποθήκευση είναι απαραίτητη σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές, ενώ μελετώνται εγκαταστάσεις μεγάλης αποθήκευσης ενέργειας (εποχιακή αποθήκευση). Λαμβάνοντας υπ' όψη την περιοδικότητα των ενεργειακών φαινομένων στη φύση, οι εφαρμογές που συνδυάζουν ηλιακά συστήματα θα πρέπει να προβλέπουν επαρκή ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης για την περίσσεια της ενέργειας και την διανομή της, τις ώρες μη διαθέσιμης ενέργειας από την πηγή. Ακολουθεί μία σύντομη παρουσίαση σημαντικών εφαρμογών που χρησιμοποιούν τα PCMs για αποθήκευση θερμικής ενέργειας [20].

5.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Έχει παρατηρηθεί, ότι λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται σε κτίρια, όπου γίνεται χρήση φωτοβολταϊκών, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με αρκετά σημαντικές απώλειες. Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει σχεδιαστεί για να εργάζεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Μια χαρακτηριστική τιμή θερμοκρασίας είναι οι 25 °C. Όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στοιχείου ξεπεράσει αυτή την τιμή, η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μειώνεται κατά 0,5% K⁻¹. Για να

ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή PCM σε φωτοβολταϊκά στοιχεία όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το PCM όντας τοποθετημένο σε αδιαβατικό προς το περιβάλλον πλαίσιο, απορροφά την εξέχουσα θερμότητα, διατηρώντας το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε σταθερή θερμοκρασία, εξασφαλίζοντας την αποδοτικότερη λειτουργία του [21].

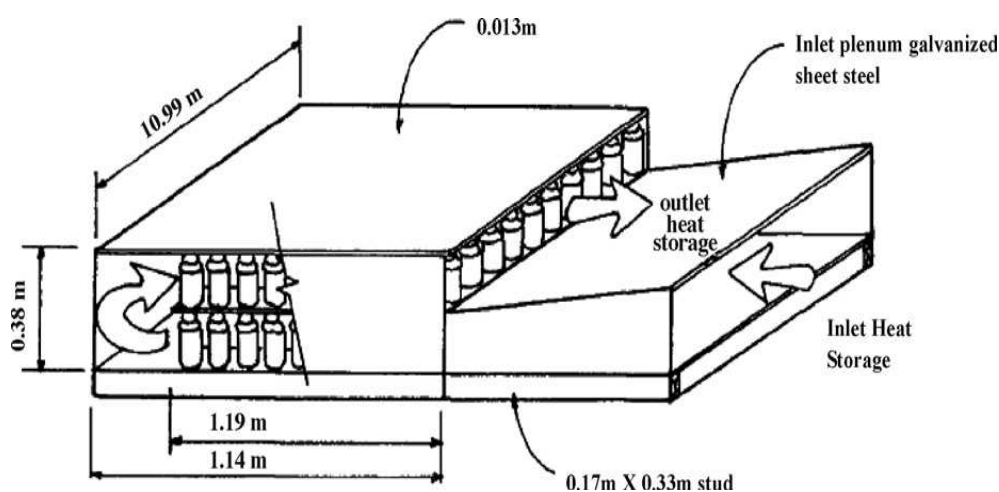


Σχήμα 5.1.1 Φωτοβολταϊκό στοιχείο με ενσωματωμένο PCM [21].

5.2 Ηλιακό Θερμοκήπιο

Άλλη μια εφαρμογή στην οποία έχουν χρησιμοποιηθεί τα PCMs είναι και το θερμοκήπιο για την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας η οποία θα χρησιμοποιηθεί μετέπειτα για την διαδικασία της ξήρανσης καθώς και της φυτικής παραγωγής. Οι Kern και Aldrich [22] ενσωμάτωσαν 1.650 kg $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ σε φιάλες με αεροσόλ που η κάθε μια ζύγιζε 0,74 kg και τις χρησιμοποίησε για να ερευνήσει τις πιθανότητες αποθήκευσης ενέργειας εντός και εκτός ενός θερμοκηπίου έκτασης 36 m² που καλύπτονταν από tedlar με επικάλυψη

fiberglass. Οι φιάλες με τα PCMs τοποθετήθηκαν σε ένα "ράφι" με κενό 22,86 mm ανάμεσά τους και δύο ράφια που περιείχαν διαφορετικές ποσότητες από το PCM τοποθετήθηκαν, το ένα εντός και το άλλο εκτός του θερμοκηπίου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου συλλέγει τον ζεστό αέρα από το κάλυμμα του θερμοκηπίου και τη νύχτα η κατεύθυνση της ροής του αέρα αναστρέφεται για την διάθεση της αποθηκευμένης ενέργειας [5].



Σχήμα 5.2.1 Μονάδα αποθήκευσης ενέργειας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου [5].

5.3 Ηλεκτρονικά εξαρτήματα

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι ιδιαίτερως ευαίσθητα στη υπερθέρμανση, επηρεάζοντας αρνητικά τη διάρκεια ζωής και την αξιοπιστία του εξαρτήματος στο οποίο ανήκουν. Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις που συναντά το ρεύμα καθώς διαπερνά τα καλώδια, τα επίπεδα πυριτίου, τα transistor των επιμέρους ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, αυξάνουν τη θερμοκρασία τους με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος φθοράς ή ακόμα και καταστροφής. Στόχος είναι να διατηρηθεί η θερμοκρασία των εξαρτημάτων αυτών εντός κάποιων ορίων

ασφαλούς λειτουργίας του εκάστοτε εξαρτήματος, χωρίς συνακόλουθη αύξηση του συνολικού μεγέθους του. Σήμερα χρησιμοποιούνται μεταλλικά πτερύγια ενσωματωμένα σε ανεμιστήρες μικρού μεγέθους που συμβάλλουν στην απαγωγή θερμότητας από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ενισχύοντας έτσι την ψύξη τους. Η χρησιμοποίηση των PCMs σε τέτοια συστήματα ψύξης για την προστασία του εξαρτήματος, είναι απολύτως αξιόπιστη, καθώς το PCM ανανεώνεται από μόνο του και επανέρχεται στην αρχική κατάσταση, μεταξύ δυο διαδοχικών σημείων όπου η θερμοκρασία μεγιστοποιείται και επίσης δεν απαιτείται κάποιου είδους κινητήρας ή διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας. Γνωρίζουμε ότι τα PCMs δρουν σε τρεις φάσεις. Κατά την πρώτη φάση η θερμοκρασία του στερεού PCM αυξάνεται μέχρι το σημείο τήξης του, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντός του. Κατά τη δεύτερη φάση, η θερμοκρασία του PCM παραμένει σταθερή καθώς αυτό λιώνει. Κατά τη τρίτη φάση η θερμοκρασία του υγρού PCM συνεχίζει να αυξάνεται. Για να εισαχθούν τα PCMs επιτυχώς στις ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει θεωρητικά να μην βρεθούν στην τρίτη φάση, αλλά να παραμείνουν στη δεύτερη, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση. Πλέον, από πολλές εταιρίες διατίθενται στο εμπόριο προϊόντα ειδικά σχεδιασμένα για τοποθέτηση σε ηλεκτρονικές διατάξεις, που είναι ιδιαίτερως αποδοτικά. Τα περισσότερα από αυτά τα προϊόντα, θυμίζουν δεσμίδες με μικρά αυτοκόλλητα χαρτιά, έρχονται σε άμεση επαφή με το εξάρτημα για το οποίο προορίζονται [23].



Σχήμα 5.3.1 Προϊόντα με PCMs για ψύξη ηλεκτρονικών εξαρτημάτων [23].

5.4 Μεταφορά ευαίσθητων προϊόντων

Στον τομέα των μεταφορών σε αρκετές περιπτώσεις απαιτείται η μεταφορά προϊόντων τα οποία είναι ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές μεταβολές και απαιτούν πολύ συγκεκριμένα και στενά θερμοκρασιακά πλαίσια κατά τη μεταφορά τους. Είτε τα μεταφερόμενα αγαθά απαιτούν χαμηλές είτε υψηλές θερμοκρασίες, στο συνολικό κόστος μεταφοράς, προστίθεται ένα υψηλό κόστος το οποίο έχει να κάνει με τη διατήρηση της θερμοκρασίας, είτε πρόκειται για όχημα- ψυγείο, είτε για όχημα με κάποια θερμαντική διάταξη. Τα οχήματα αυτά καθιστούν σχεδόν απαγορευτική από πλευράς κόστους τη λειτουργία τους, καθώς χρησιμοποιούν σαν καύσιμο ντίζελ. Το κόστος της ενέργειας η οποία παράγεται από ντίζελ είναι περίπου 6 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κόστος της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας. Το τεράστιο πλεονέκτημα των PCMs είναι ότι μπορούν να απορροφήσουν και να αποδώσουν ικανοποιητικά ποσά θερμότητας σχεδόν ισοθερμοκρασιακά. Είναι προφανές ότι ανάλογα με τις θερμοκρασιακές απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής επιλέγεται και υλικό με αντίστοιχο σημείο τήξης. Σε γενικές γραμμές, πριν από τη μεταφορά φορτίζονται τα PCMs είτε σε ψυγείο, είτε σε φούρνο, ώστε να είναι έτοιμα για χρήση. Μία ηλεκτρική θερμαντική μονάδα δεν μπορεί να είναι διαθέσιμη υπό οποιοσδήποτε συνθήκες, και σε αυτές τις περιπτώσεις τα PCMs προσφέρουν την ιδανική λύση, αφού επιτρέπουν την κατασκευή ενός αυτοθερμαινόμενου σκεύους μεταφοράς. Η κατασκευή των δοχείων μεταφοράς προβλέπει την προθέρμανση των πλακών που περιέχουν τα PCMs σε ένα κοινό φούρνο ή μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων. Μόλις οι πλάκες με το PCM φορτιστούν, αποθηκεύοντας ένα μεγάλο ποσό λανθάνουσας θερμότητας τοποθετούνται στα θερμικά μονωμένα δοχεία σαν εσωτερική επένδυση. Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί, ότι ένα μεγάλο πλεονέκτημα των PCMs στην εφαρμογή αυτή είναι ότι η αποφόρτιση του PCM γίνεται σε σταθερή περίπου θερμοκρασία, χωρίς να επιβαρύνεται επιπλέον το εσωτερικό του δοχείου [24] .

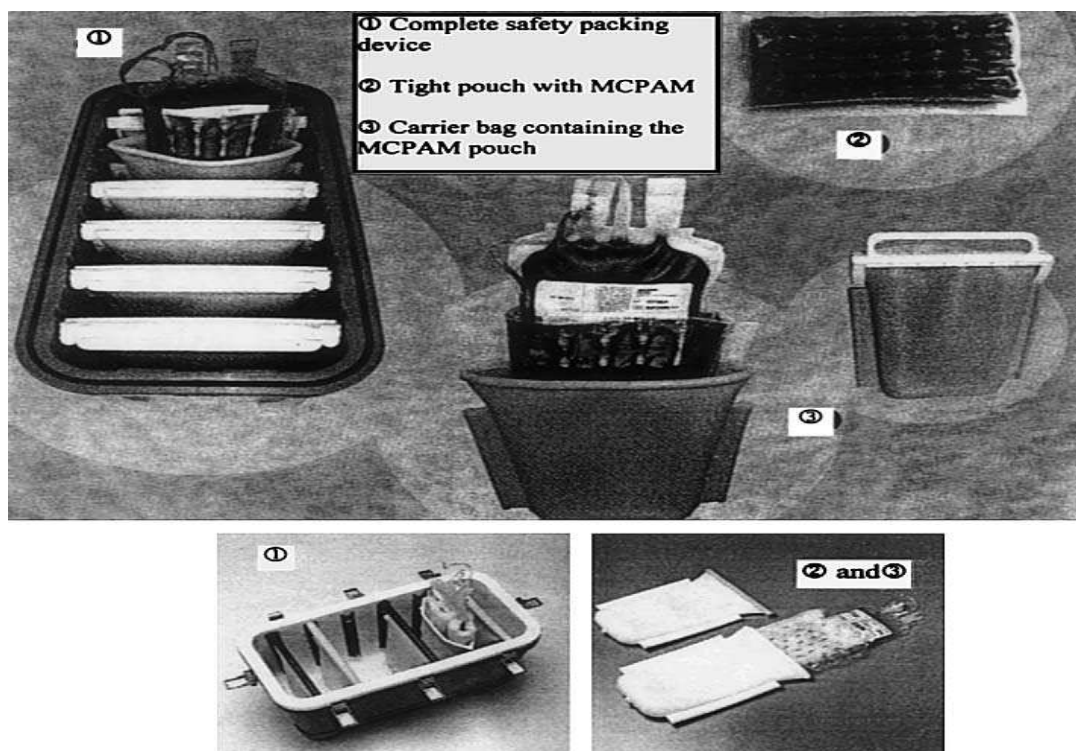


Σχήμα 5.4.1 Πλάκες με PCM για ενίσχυση των δοχείων μεταφοράς ευαίσθητων προϊόντων [24].

5.5 Ιατρικά προϊόντα

Σχετικά με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω τα PCMs χρησιμοποιούνται ακόμη και στον ιατρικό εξοπλισμό κυρίως στις εφαρμογές εκείνες που απαιτούν μια παθητική διαχείριση της θερμοκρασίας στον ανθρώπινο οργανισμό. Χρησιμοποιούνται για την επίτευξη της θερμικής άνεσης σε περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι δυνατή η συχνή μετατόπιση κάποιων βοηθημάτων, για την ανακούφιση των ασθενών όπως οι ζώνες αντιμετώπισης ορθοπεδικών προβλημάτων, οι οποίες συνήθως είναι αρκετά σφικτές και έτσι προκαλούν εφίδρωση. Επίσης πολύ χρήσιμη εφαρμογή είναι τα καλύμματα για την πλάτη και το κάθισμα αναπηρικών αμαξιδίων, τα οποία απορροφούν τη θερμότητα από το σώμα του ασθενούς, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία, αποφεύγοντας έτσι το αίσθημα δυσφορίας λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της εφίδρωσης. Επίσης τα PCMs χρησιμοποιούνται και ως 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 πλεονέκτημα των PCMs στις εφαρμογές αυτές είναι η μεγάλη αξιοπιστία που παρουσιάζουν, καθώς στις

εφαρμογές αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μην εμφανίζεται διακύμανση της θερμοκρασίας [25].



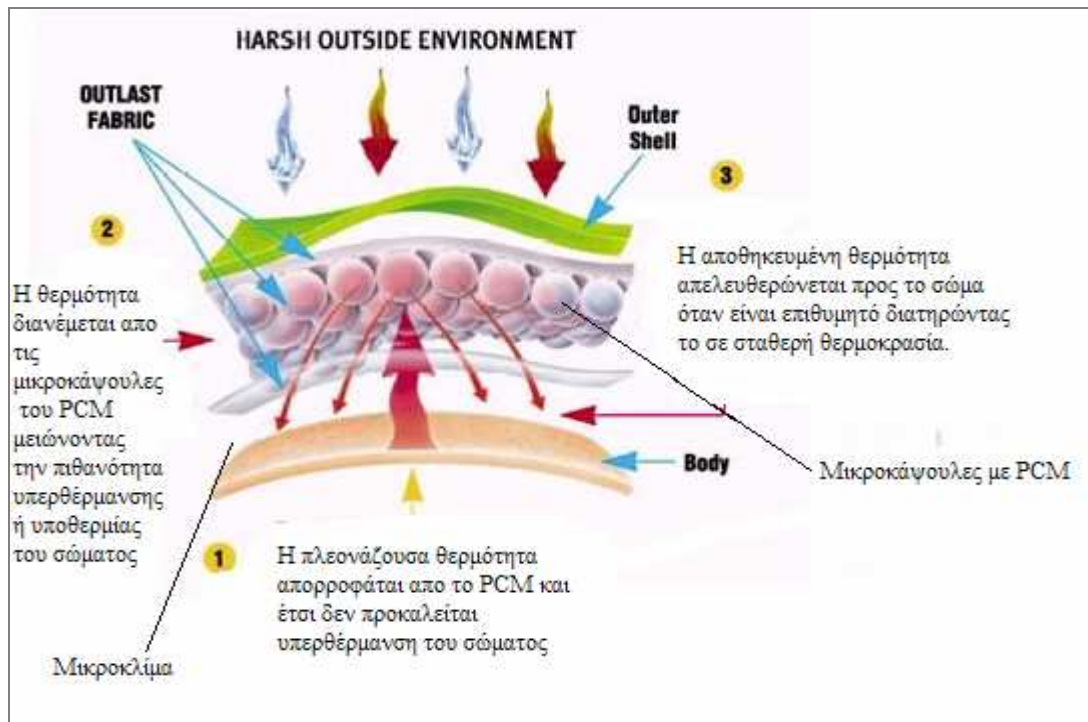
Σχήμα 5.5.1 PCMs ενσωματωμένα σε δοχεία μεταφοράς ανθρώπινων οργάνων [26].

5.6 Θερμική ένδυση

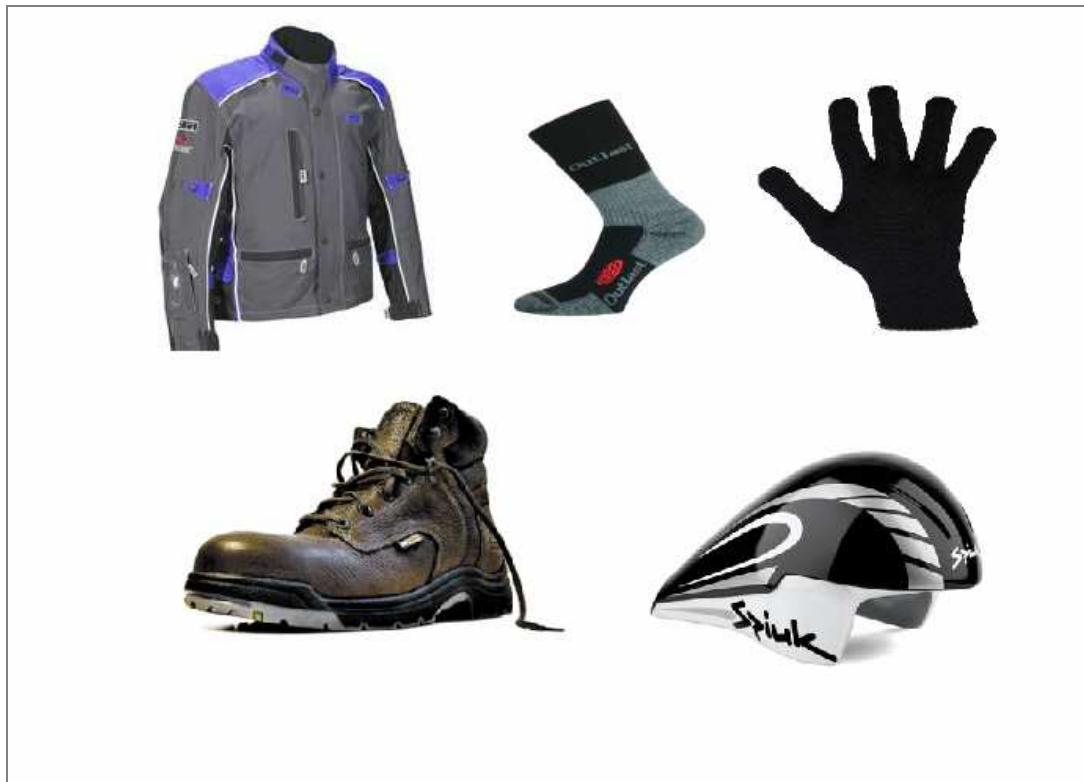
Η εισαγωγή των PCMs στα ρούχα έχει ως στόχο να παρέχουν θερμική άνεση, ομοιόμορφα κατανεμημένη θερμοκρασία και συνεπώς έκκριση λιγότερου ιδρώτα από το ανθρώπινο σώμα. Η χρήση των PCMs σε ρούχα ξεκίνησε από διαστημικές εφαρμογές, στις στολές των αστροναυτών, για τη προστασία τους από τις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές. Σήμερα οι εφαρμογές των PCMs στα ρούχα και γενικότερα στα υφάσματα έχουν επεκταθεί. Χρησιμοποιούνται σε στολές που εκτίθενται σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα σε πυροσβεστικές, ορειβατικές και αγωνιστικές στολές. Η χρήση τους όμως έχει επεκταθεί και σε καθημερινά ρούχα και άλλα υφάσματα, όπως κουβέρτες, κάλτσες, παπούτσια. Στα ενδύματα χρησιμοποιούνται κυρίως οργανικά PCMs σε

μικροκάψουλες, για να μην εμφανίζονται διαρροές κατά τη μετάβαση στην υγρή φάση. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να ελαττώσουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και να αυξήσουν τη θερμοχωρητικότητα (του ενδύματος) μέχρι και 10 φορές. Αυτά τα ανεπτυγμένα θερμικά χαρακτηριστικά μπορούν να εμφανιστούν στα σύγχρονα ρούχα με εμβαπτισμό των ινών του υφάσματος σε διάλυμα που περιέχει μικροκάψουλες με PCMs ή με την προσθήκη των μικροκαψούλων σε πολυμερή. Συνήθως επιλέγεται οι μικροκάψουλες με τα PCMs, να τοποθετούνται κατά στρώματα και σε σχετικά πειράματα έχει αποδειχθεί η αποδοτικότερη είναι χρήση δύο στρωμάτων με PCMs. Οι εφαρμογές στις οποίες η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι διάφορες όπως μπουφάν, αδιάβροχα, κουβέρτες, προστατευτικά φωτιάς για πυροσβέστες, στολές κατάδυσης και άλλα. Η χρήση των PCMs είναι πολύ αξιόπιστη πλέον στον τομέα της ένδυσης. Χάρη στις μικροκάψουλες με τα PCMs, η θερμότητα που απορροφάται οδηγεί το υλικό να αλλάξει φάση σε μοριακό επίπεδο, αποθηκεύοντας ή απελευθερώνοντας ενέργεια, ανάλογα με τη θερμοκρασία του δέρματος. Η θερμότητα αυτή διατηρείται στο PCM και είναι απαραίτητο απελευθερώνεται ομοιόμορφα και σταδιακά, δημιουργώντας ένα πολύ πιο θερμομονωτικό στρώμα σταθερής θερμοκρασίας μεταξύ του δέρματος και του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Επιπρόσθετα, πρόσφατες έρευνες δείχνουν την καταλληλότητα των PCMs σε κράνη, με σκοπό την ψύξη του κεφαλιού. Συγκεκριμένα το PCM απορροφά τη θερμότητα που εκλύεται από το κεφάλι του ατόμου αλλά και την ανεπιθύμητη θερμότητα που προέρχεται από το περιβάλλον. Η θερμότητα αποθηκεύεται στο κράνος χωρίς να γίνεται δυσάρεστη στον ανθρώπινο οργανισμό για χρονικό διάστημα που σήμερα φτάνει μέχρι τις δυο ώρες. Βέβαια, αυτή η θερμότητα δεν αποβάλλεται προς το περιβάλλον, οπότε θα πρέπει πριν ξαναχρησιμοποιηθεί το κράνος να αποφορτισθεί βυθίζοντάς το σε κρύο νερό για σύντομο χρονικό διάστημα. Τα PCMs που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για τα κράνη είναι τόσο τα οργανικά, αλλά και κάποια ανόργανα άλατα. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι έχει γίνει χρήση των PCMs σε υποδήματα και πάτους υποδημάτων προσφέροντας στο χρήστη, ένα άνετο περιβάλλον για τα πόδια του. Έτσι επιτυγχάνεται πέραν της θερμικής άνεσης, λιγότερη κόπωση, λιγότερος ιδρώτας, ο συνδυασμός του οποίου με υψηλές θερμοκρασίες οδηγεί σε μυκητιάσεις και άλλες δερματοπάθειες. Τα τελευταία είναι ιδιαιτέρως σημαντικά σε περιπτώσεις όπως των αθλητών ή άλλων επαγγελματιών που είναι υποχρεωμένοι να φορούν συγκεκριμένα υποδήματα [27].



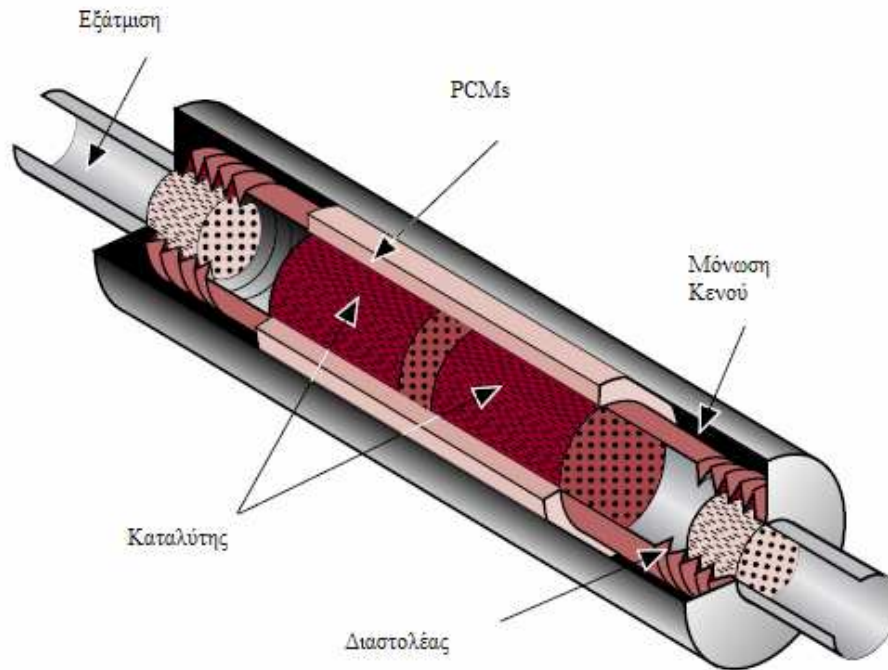
Σχήμα 5.6.1 Μηχανισμός λειτουργίας ενδυμάτων με ενσωματωμένο PCM [9].



Σχήμα 5.6.2 Ενδύματα, υποδήματα και κράνη με ενσωματωμένα PCMs [27].

5.7 Οχήματα

Η πλέον ενδιαφέρουσα χρήση των PCMs σήμερα γίνεται στην αυτοκινητοβιομηχανία. Τα PCMs χρησιμοποιούνται σήμερα σε μία μπαταρία λανθάνουσας θερμότητας, την οποία προσφέρει η BMW σαν προαιρετικό εξοπλισμό στα μοντέλα της σειράς 5. Η αρχή λειτουργίας της μπαταρίας 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 χρησιμοποιείται στο επόμενο ξεκίνημα του οχήματος με κρύο κινητήρα, ώστε να θερμανθεί ο κινητήρας γρηγορότερα, οπότε έτσι βελτιώνεται ο συνολικός συντελεστής κατανάλωσης καυσίμου όπως επίσης και στη θέρμανση της καμπίνας του οχήματος. Χάρη στην εξαιρετική μόνωση της μπαταρίας λανθάνουσας θερμότητας, μπορεί να διατηρήσει την αποθηκευμένη ενέργεια με το όχημα σταματημένο σε περιβάλλον έως και -20°C για τουλάχιστον δύο εικοσιτετράωρα. Άλλη μια εφαρμογή των PCMs βρίσκεται στο σύστημα εξαγωγής των καυσαερίων του οχήματος. Με χρήση των PCMs διατηρείται ο καταλύτης στη θερμοκρασία σχεδιασμού, ελαττώνοντας σημαντικά τις αυξημένες εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων κατά το ξεκίνημα του κρύου κινητήρα. Ο καταλύτης που πλέον είναι απαραίτητο εξάρτημα των σύγχρονων αυτοκινήτων, μετατρέπει μέσω οξείδωσης τα ευγενή μέταλλα που περιέχει (Ρόδιο, Παλλάδιο, Λευκόχρυσος) τα μονοξείδια αζώτου και άνθρακα από την καύση του καυσίμου στον κύλινδρο, σε λιγότερο βλαβερά και όχι δηλητηριώδη διοξείδια. Για να επιτευχθεί όμως αυτό, θα πρέπει η θερμοκρασία του καταλύτη να είναι πολύ υψηλή. 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. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού σχεδιάστηκε ένας τριοδικός καταλύτης ενισχυμένος με PCMs, που θα αποθηκεύουν τη θερμότητα κατά την κίνηση του αυτοκινήτου και θα την απελευθερώνουν στην επόμενη εκκίνησή του. Στα οχήματα που εφαρμόστηκε το συγκεκριμένο σύστημα τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά καθώς διαπιστώθηκε με μετρήσεις ότι οι εκπομπές υδρογονανθράκων και μονοξειδίου του άνθρακα ήταν μειωμένες κατά 84% και 91% αντίστοιχα, συγκρινόμενες με τις εκπομπές κινητήρων με συμβατικό καταλύτη [28].



Σχήμα 5.7.1 Καταλύτης αυτοκινήτου με χρήση των PCMs [28].

5.8 Τηλεπικοινωνίες

Τα συστήματα των τηλεπικοινωνιών εμπεριέχουν μηχανήματα και ηλεκτρονικά εξαρτήματα τα οποία είναι υπεύθυνα για την εύρυθμη λειτουργία του αντίστοιχου δικτύου. Τέτοιου είδους εξαρτήματα περιέχουν πολύπλοκα ηλεκτρονικά κυκλώματα, ιδιαίτερα ακριβά και καταναλωτικά από άποψης ενέργειας, όπως επίσης και πολύ ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες. Πολλά από αυτά, είναι διασκορπισμένα ανά την επικράτεια για την κατά τόπους ενίσχυση και σωστή διανομή του σήματος του δικτύου. Το καλύτερο δυνατό σημείο τοποθέτησης των κουβουκλίων που περιέχουν τέτοια μηχανήματα είναι σε ανοιχτούς χώρους (κοιλιάδες) και κατά το δυνατόν υψηλότερα (υψώματα, βουνά, κλπ). Ως εκ τούτου, είναι συνήθως τοποθετημένα σε προσβάσιμες περιοχές αλλά μακριά από κατοικημένους χώρους, οπότε και είναι δύσκολη η συνεχής επιτήρηση της θερμοκρασιακής διακύμανσής τους. Τα PCMs έχουν βρει εφαρμογή σε αυτά τα συστήματα και παρακάτω παρουσιάζεται μία τέτοια εφαρμογή. Τα τηλεπικοινωνιακά κουβούκλια είναι μονωμένα, και κλιματιζόμενα φυλάκια, τα οποία προστατεύουν την καρδιά της κινητής τηλεφωνίας, τον Πομποδέκτη Βάσης (Base Station Subsystem (BSS)). Είναι το τμήμα

ενός κλασσικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας το οποίο διαχειρίζεται την κίνηση και το σήμα του δικτύου. Εκτελεί, μάλιστα, διάφορες εργασίες σχετικά κυρίως με το δίκτυο, όπως την αποκωδικοποίηση της συνομιλίας, το διαχωρισμό των καναλιών του δικτύου από άλλα δίκτυα (ραδιοφωνικά, αεροπορικά, τηλεοπτικά, κλπ) και τη διαχείριση του σήματος για εξυπηρέτηση όλης της περιοχής κάλυψης. Ο πομποδέκτης βάσης, καθώς επίσης και η αντίστοιχη μπαταρία είναι ιδιαιτέρως θερμοευαίσθητα μηχανήματα και ο περιβάλλον χώρος τους πρέπει να διατηρείται διαρκώς κάτω από τους 35 °C. Σε κάποιες χώρες, εμφανίζεται συχνά το φαινόμενο της διακοπής του ρεύματος, καθώς και μονοφασικού ρεύματος, αναγκάζοντας τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας να εφοδιάζουν τα καταλύματα αυτά με ντιζελογεννήτριες για να υποστηρίξουν το σύστημα κλιματισμού του κουβουκλίου στην περίπτωση διακοπής ή μονοφασικού ρεύματος. Τα PCM's που εγκαθίστανται σε αυτά τα κουβούκλια απορροφούν θερμότητα από το εσωτερικό (θερμότητα η οποία παράγεται από τη λειτουργία του BSS) ελαχιστοποιώντας ή ακόμα και εξαλείφοντας την ανάγκη χρήσης της γεννήτριας για κλιματισμό, επομένως προκύπτει οικονομικό όφελος λόγω της μικρότερης ποσότητας καυσίμου που καταναλώνει η γεννήτρια. Το PCM θα επαναφορτιστεί όποτε είναι διαθέσιμη η πηγή ενέργειας, οπότε και θα δουλεύει το κανονικό σύστημα κλιματισμού, άρα αργότερα θα αποβάλλει την αποθηκευμένη θερμότητα [29,30] .



Σχήμα 5.8.1 : Συσκευασίες PCM (πλάκες και κύλινδροι) που χρησιμοποιούνται σε τηλεπικοινωνιακά κουβούκλια [30].

Κεφάλαιο 6

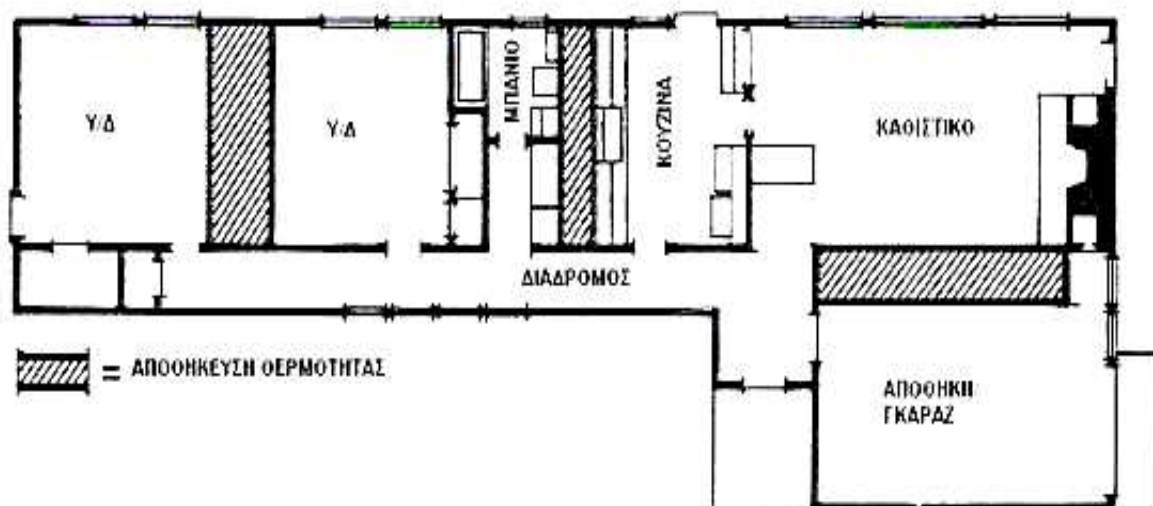
Αναδρομή των εφαρμογών των PCMs σε κτιριακές εγκαταστάσεις

6.1 Ιστορική ανασκόπηση της χρήσης των PCMs

Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν μόλις από τη δεκαετία του 1920, ενώ κάποιες πειραματικές κατασκευές σπιτιών για πειράματα μεγάλης κλίμακας παρατηρήθηκαν από το 1940 έως το 1970. Παρόλο ότι τα συστήματα αυτά θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν επιτυχημένα, δεν ακολούθησε περαιτέρω εξέλιξη ή μελέτη, αφού δεν υπήρξε σημαντική χρηματοδότηση, λόγω κυρίως έλλειψης εμπιστοσύνης για την επιτυχία του όλου εγχειρήματος. Παρακάτω ακολουθεί ιστορική ανασκόπηση των σημαντικότερων εφαρμογών των PCMs σε κτίρια, σαν ένα δείγμα της εξελικτικής πορείας των συστημάτων.

Η πρώτη που αποφάσισε να ασχοληθεί με την εφαρμογή των PCMs σε κτίρια ήταν η Δρ. Maria Telkes. Το 1948 κατασκεύασε το πρώτο μεγάλης κλίμακας πείραμά της, στην περιοχή Dover Mass, στη Βοστώνη των ΗΠΑ. Η περιοχή επελέγη από την Telkes λόγω των ετήσιων επιπέδων ηλιοφάνειας, που για την περιοχή ήταν πάνω από τις μέσες τιμές, κάτι που εξασφάλιζε τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του ηλιακού συστήματος. Το πείραμα αφορούσε ένα σπίτι ενός ορόφου, πέντε δωματίων εκ των οποίων τα δύο ήταν υπνοδωμάτια, συνολικής επιφάνειας 135 m². Η ηλιακή ακτινοβολία παρείχε θερμότητα μέσω ηλιακών συλλεκτών, η οποία μετά μέσω ανεμιστήρων οδηγείται σε τρία δοχεία αποθήκευσης θερμότητας. Τα δοχεία χρησιμοποιούσαν σαν PCM το άλας του Glauber. Συνολικά περιλαμβάνονταν 21 tn PCM, συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας 11MJ και σημείου τήξης 32 °C. Με τα οικονομικά δεδομένα της εποχής ήταν μία αρκετά ακριβή κατασκευή, κοστίζοντας 20.000 \$, από τα οποία τα 3.000 \$ αφορούσαν το θερμαντικό σύστημα (15% περίπου του συνολικού κόστους). Τα πρώτα δύο έτη λειτουργίας το σύστημα θέρμανσης αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό ακόμα και σε περιόδους με επτά ημέρες συνεχόμενης συννεφιάς. Το σύστημα λειτούργησε με επιτυχία παρέχοντας ένα θερμικά άνετο περιβάλλον θερμοκρασίας γύρω στους 21 °C, χωρίς να χρειαστεί οποιοδήποτε βοηθητικό σύστημα θέρμανσης. Τον τρίτο χρόνο όμως, το σύστημα άρχισε να εμφανίζει σοβαρά προβλήματα, καθώς το άλας του Glauber είχε διαχωριστεί σε διάλυμα και άνυδρο άλας (Na₂SO₄), χάνοντας έτσι την αποθηκευτική του ιδιότητα. Παρατηρήθηκε

επίσης ότι τα δοχεία αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται δραματικά οι απώλειες του συστήματος [31,32].



Σχήμα 6.1.1 Κάτοψη πειραματικού σπιτιού Telkes

Το 1953 ο Lawrence Gardshire κατασκεύασε ένα ηλιακό σπίτι με PCM στη περιοχή του New Mexico. Το κτίριο ήταν δυο ορόφων και κάθε όροφος είχε επιφάνεια 102 m^2 . Ο Gardshire χρησιμοποίησε «δοχεία» αποθήκευσης με PCM χωρητικότητας $1,9 \text{ m}^3$. Το μόνο που διαφοροποίησε το πείραμα του από αυτό της Telkes ήταν να μην εγκαταστήσει τα δοχεία ανάμεσα στα δωμάτια όπως η Telkes αλλά στη στέγη δίπλα στους ηλιακούς συλλέκτες. Μια καινοτομία επίσης ήταν ότι πρόσθεσε διφθορικό νάτριο στο άλας του Glauber σαν πηκτικό παράγοντα, ώστε να βοηθά στην στερεοποίηση του άλατος και να αποφύγει όσο ήταν δυνατόν το διαχωρισμό. Δυστυχώς και αυτή η κατασκευή αντιμετώπισε τα ίδια προβλήματα με την κατασκευή της Telkes, αργότερα βέβαια, λόγω της αύξησης του χρόνου ζωής του PCM που προήλθε από την προσθήκη του διφθορικού νατρίου [31,32].

Η επόμενη προσπάθεια για ένα ηλιακό σπίτι με PCM την έκαναν το 1959 οι J.Hodgins και T.Hoffman στον Καναδά. Το κτίριο αυτό ήταν δύο ορόφων, επιφάνειας 111 m^2 . Το σχεδιασμό για την αποθήκευσης ενέργειας τον ανέλαβε η Telkes λόγω της προηγούμενης εμπειρίας της. Και σε αυτή τη περίπτωση η Telkes χρησιμοποίησε ως υλικό αλλαγής φάσης

το άλας του Glauber (ένυδρο άλας, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, σημείο τήξης τους 32°C). Όμως για να ξεπεραστούν τα προηγούμενα προβλήματα, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας εκτός από τους 12 τη PCM που περιελάμβανε, ήταν εμπλουτισμένο και με πυριτικό άλας νατρίου και χρώμιο, ουσία η οποία εμποδίζει τη διάβρωση. Τα PCMs ήταν ενσωματωμένα σε κυλινδρικά δοχεία χάλυβα, διαμέτρου 0,1 m και ύψους 0,6 m, τα οποία ήταν τοποθετημένα κάθετα στους τοίχους. Παρόλο που τα αποτελέσματα της μελέτης ήταν ικανοποιητικά, οι προσπάθειες δεν συνεχίστηκαν περαιτέρω από αυτή την ομάδα επιστημόνων [45-46].

6.2 Ερευνητική Δραστηριότητα

Το πρώτο μεγάλο ερευνητικό πρόγραμμα έλαβε χώρα στο πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνια το 1971. Σε αυτό συμμετείχαν οι S.Freedman, M.Telkes, M.Altman. Ο ερευνητικός σκοπός ήταν να ανακαλυφθεί ο αριθμός των PCMs που να είναι κατάλληλα για ψυκτικές και θερμαντικές εφαρμογές, με λεπτομερή ανάλυση παράπλευρων παραγόντων, όπως τα διάφορα κόστη (κτήσης, εγκατάστασης, συντήρησης), οικονομική ανάλυση επένδυσης και αποθηκευτική ικανότητα υλικού. Η έρευνα βασίστηκε στις βασικές ομάδες PCMs: ένυδρα άλατα, οργανικά PCM, ανόργανα PCM, εύτηκτα μίγματα (οργανικά /ανόργανα). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ανόργανο PCM) και ορισμένα μίγματα παραφίνης (οργανικό PCM) είναι κατάλληλα για εφαρμογές κλιματισμού, ενώ για θέρμανση χώρου τα πιο ελπιδοφόρα για επιτυχημένη χρήση PCMs είναι τα: $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ και $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Η δεκαετία του 1970 ήταν ορόσημο για τα PCM και γενικότερα για τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Συγκεκριμένα το 1973 με τον αραβικό αποκλεισμό πετρελαίου εμφανίζεται η πρώτη πετρελαϊκή κρίση. Αυτό ώθησε τις κυβερνήσεις διάφορων χωρών να αναζητήσουν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας. Το πεδίο μεγάλου ενδιαφέροντος ήταν οι τομείς της ηλιακής ενέργειας και της αποδοτικής αποθήκευσης θερμότητας. Από το σημείο αυτό και μετά η μέθοδοι αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έγιναν σημαντικό κομμάτι του προγράμματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και άρχισαν να επενδύονται σημαντικά κονδύλια στην έρευνα και ανάπτυξη των

συστημάτων αυτών. Από το 1973 και μετά ξεκινά η κυβερνητική χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων πάνω στα PCM σε χώρες όπως οι Η.Π.Α., η Αγγλία, η Γερμανία και η Γαλλία. Αποτέλεσμα της ανάγκης για εύρεση PCM, στα τέλη της δεκαετίας του 1970, ήταν κυβερνητικοί επιστημονικοί οργανισμοί των ΗΠΑ να διεξάγουν πειράματα ελέγχοντας 20.000 διαφορετικά υλικά ως προς τις προοπτικές που έδιναν για χρήση ως PCM. Μόλις το 1% θεωρήθηκε υποψήφιο υλικό και συγκεκριμένα κάποια ένυδρα άλατα με την ιδιότητα της ομογενούς τήξης και συγκεκριμένες κατηγορίες οργανικών υλικών. Η μετέπειτα ερευνητική δραστηριότητα παγκοσμίως απέδειξε ότι όντως αυτά τα υλικά είναι τα πλέον κατάλληλα για τέτοιου εφαρμογές.

Κεφάλαιο 7

Εφαρμογές των PCMs σε παθητικά συστήματα κτιρίων [4],[5],[19]

Η χρήση των PCMs στα κτίρια έχει αρχίσει να μελετάται εδώ και μερικές δεκαετίες. Η χρήση τους στον τοίχο Trombe , σε τοίχο συλλογής θερμότητας για αερισμό του κτιρίου, σε τοίχο με γυψοσανίδα, σε παντζούρια, σε πάνελ οροφής, σε ενδοδαπέδια θέρμανση συμβάλλει στη θέρμανση και ψύξη των κτιρίων. Η εφαρμογή των PCMs στα κτίρια έχει δυο στόχους. Πρώτον τη χρήση της φυσικής θερμότητας που παρέχει η ηλιακή ενέργεια για θέρμανση ή την ψύχρα της νύχτας για ψύξη. Δεύτερον τη χρήση των πηγών θερμότητας ή ψύξης που έχουν κατασκευαστεί από τον άνθρωπο. Σε κάθε περίπτωση η αποθήκευση της θερμότητας ή της ψύξης είναι απαραίτητη για την εξισορρόπηση της διαθεσιμότητας και της ζήτησης στη διάρκεια της ημέρας. Οι βασικοί μέθοδοι για τη χρήση των PCMs στα κτίρια είναι οι εξής τρεις : i) η προσθήκη των PCMs στους τοίχους, ii) η προσθήκη των PCMs σε συστατικά μέρη του σπιτιού εκτός των τοίχων, iii) η χρήση των PCMs σε ψυχρές και θερμές μονάδες αποθήκευσης. Τα πρώτα δυο αναφέρονται σε παθητικά συστήματα, όπου η θέρμανση και η ψύξη που αποθηκεύονται αποδίδονται αυτόματα όταν η εσωτερική ή η εξωτερική θερμοκρασία αυξηθεί ή μειωθεί κάτω από το σημείο τήξης. Το τρίτο αναφέρεται σε ενεργητικό σύστημα, όπου η αποθηκευμένη θερμότητα ή ψύξη βρίσκεται μέσα σε κάλυμμα, θερμικά μονωμένο από το κτίριο με μόνωση. Έτσι, η θερμότητα ή η ψύξη χρησιμοποιείται μόνο όταν χρειάζεται και όχι αυτόματα

7.1 Τοίχος Trombe με ενσωματωμένο PCM [5],[19]

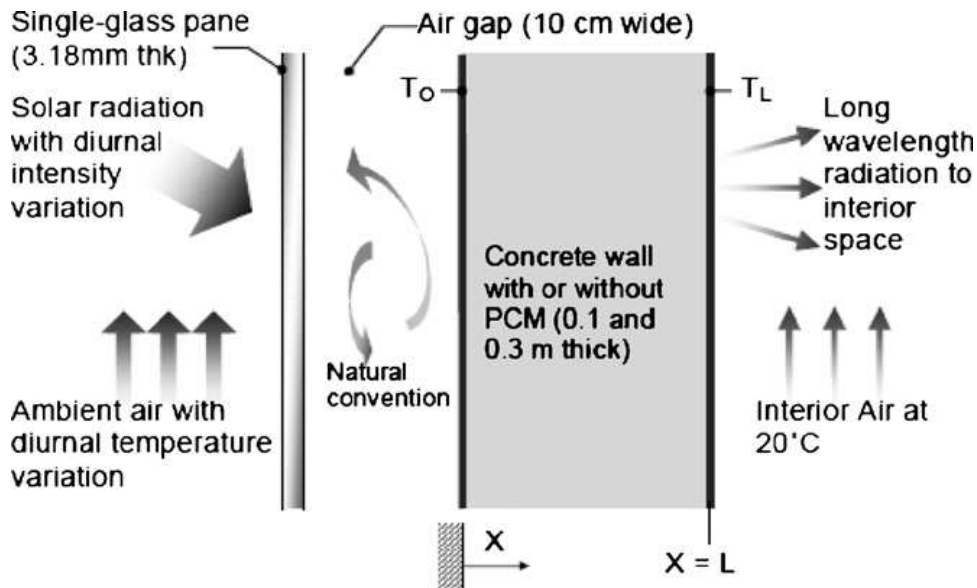
Ο τοίχος Trombe αποτελείται από ένα λεπτό τοίχο στη νότια πλευρά του σπιτιού. Ένα μονό ή διπλό στρώμα γυαλιού ή πλαστικό τζάμι είναι τοποθετημένο περίπου 4 in μπροστά από την επιφάνεια του τοίχου. Η ηλιακή θερμότητα συλλέγεται στο χώρο μεταξύ του τοίχου και του τζαμιού. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου είναι μαύρου χρώματος και απορροφά τη θερμότητα, η οποία στη συνέχεια αποθηκεύεται στη μάζα του τοίχου. Η θερμότητα διαχέεται από τον τοίχο Trombe στο σπίτι κατά τη διάρκεια αρκετών ωρών.

Τότε η εσωτερική θερμοκρασία πέφτει κάτω από αυτή της επιφάνειας του τοίχου και έτσι η θερμότητα ξεκινά να διασκορπίζεται στο δωμάτιο. Οι απώλειες θερμότητας από τον τοίχο Trombe μπορούν να ελεγχθούν μέσω μιας κουρτίνας με μόνωση, η οποία είναι κλειστή τη νύχτα στο χώρο μεταξύ του τζαμιού και του τοίχου. Στους τοίχους Trombe, χρησιμοποιούνται PCMs όπως ένυδρα άλατα και υδρογονάνθρακες.

Η Telkes [33] πρότεινε την τοποθέτηση PCMs σε τοίχους, μεσότοιχους, ταβάνια και πατώματα, για να λειτουργούν ως ρυθμιστές θερμοκρασίας. Τα PCMs χρησιμοποιήθηκαν για να αντικαταστήσουν τη λιθοποιία σε ένα τοίχο Trombe. Ο Askew [34] χρησιμοποίησε ένα πίνακα συλλεκτών φτιαγμένο από μια λεπτή πλάκα κεριού παραφίνης και το 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 [35] μελέτησαν τη χρησιμότητα του εγκατεστημένου τοίχου με 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 με PCM ήταν κατάλληλα σχεδιασμένος, περιορίζονταν μερικά από τα μη επιθυμητά χαρακτηριστικά του κανονικού τοίχου.

Ο Bourdeau [36] μελέτησε δύο τοίχους παθητικής θερμικής αποθήκευσης που χρησιμοποιούσαν εξαένυδρο χλωριούχο ασβέστιο, με σημείο τήξης 29°C. Κατέληξε ότι ένας τοίχος πάχους 8,1 cm με PCM παρουσίαζε ελαφρώς καλύτερη θερμική αποθηκευτική ικανότητα από έναν κλασσικό τοίχο πάχους 40 cm.

Οι Buddhi και Sharma [37] μέτρησαν το κατά πόσο μεταφέρεται ηλιακή ακτινοβολία μέσω ενός PCM για διαφορετικές θερμοκρασίες και πάχη του υλικού. Ως PCM επιλέχθηκε στεατικό οξύ, και οι μετρήσεις κατέληξαν στο ότι στο PCM η ηλιακή ακτινοβολία μεταφέρεται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με το γυαλί για το ίδιο πάχος και μάλιστα πρότεινε μια καινούρια εφαρμογή, την εισαγωγή του σε τοίχους και παράθυρα, ως ένα διάφανο υλικό μόνωσης.



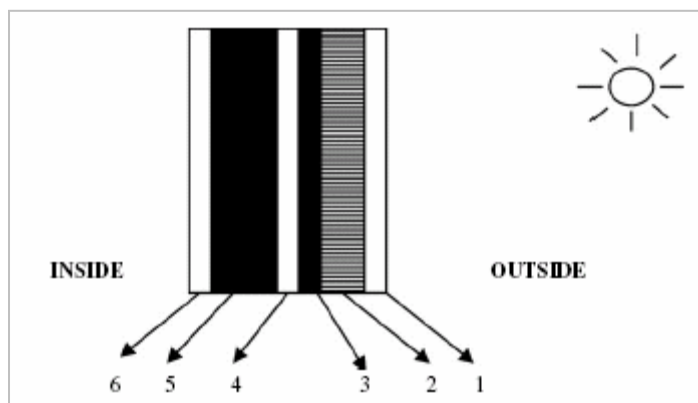
Σχήμα 7.1.1 Σχηματική απεικόνιση ενός τοίχου Trombe με ή χωρίς ενσωμάτωση PCM [5].

7.2 Τοίχος συλλογής θερμότητας για αερισμό κτιρίου με ενσωματωμένο PCM [4]

Ένας τοίχος με PCMs έχει την δυνατότητα να αιχμαλωτίζει μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω του. Εξαιτίας της μεγάλης θερμικής του μάζας μπορεί να ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις των διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου. Επιπλέον, είναι πολύ αποτελεσματικός στην μετατόπιση του φορτίου σε περιόδους μικρότερης ζήτησης. Οι Arkar και Medved [38] σχεδίασαν και εξέτασαν ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για τον αερισμό ενός κτιρίου. 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 αέρα που εισέρχεται στο κτίριο.

Ο "ηλιακός" τοίχος είναι μία εφαρμογή τοίχου με ενσωματωμένα PCMs. Σε αυτή την περίπτωση η ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο απορροφάται από το PCM και "θάβεται" στον τοίχο. Οι Stritih και Novak [39] κατασκεύασαν έναν πειραματικό τοίχο, ο οποίος περιείχε μαύρο κερί παραφίνης ως PCM. Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκε για την θέρμανση και τον αερισμό του κτιρίου και τα αποτελέσματα,

σύμφωνα με τους ερευνητές, ήταν πολλά υποσχόμενα. Ο τοίχος αποτελείται από έξι κυρίως μέρη όπως φαίνεται και στο σχήμα που δίδεται παρακάτω.



Σχήμα 7.2.1 Στοιχεία PCM στον "ηλιακό" τοίχο.

Η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος περνάει μέσα από το τζάμι με το διαφανές μονωτικό υλικό (1,2), το οποίο εμποδίζει την συναγωγή και την μεταφορά της θερμότητας με ακτινοβολία. Στη συνέχεια το PCM (3), το οποίο

βρίσκεται σε μια διαφανή πλαστική θήκη από πολυανθρακικό, απορροφά και αποθηκεύει την ενέργεια, κυρίως ως λανθάνουσα θερμότητα. Ο αέρας για τον αερισμό του κτιρίου θερμαίνεται στο κανάλι (4) και οδηγείται στο δωμάτιο, ενώ η μόνωση και ο γύψος (5) και (6) αντίστοιχα αποτελούν δεδομένα στοιχεία. Ο "ηλιακός" τοίχος παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα. Κατ' αρχήν, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα με τόσο υψηλή αποδοτικότητα οφείλεται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατ' ευθείαν από το PCM μέσω του διαφανούς πλαστικού τζαμιού, το οποίο ταυτόχρονα λειτουργεί και ως μονωτικό, εμποδίζοντας τις απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Επιπλέον, οι απώλειες λόγω της αγωγής στο δωμάτιο μειώνονται στην επιφάνεια του τοίχου.

7.3 Γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM [5],[19]

Οι γυψοσανίδες είναι φθηνές και ευρέως χρησιμοποιούμενες σε μια ποικιλία εφαρμογών, πράγμα που τις κάνει κατάλληλες για την ενσωμάτωση των PCMs σε κάψουλες.

Ο Shapiro [40] και οι συνεργάτες του, ανακάλυψαν μεθόδους για διαποτισμό γύψινου τοίχου και άλλων αρχιτεκτονικών υλικών με PCMs. Ο Shapiro [41] απέδειξε ότι διάφορα

PCMs είναι κατάλληλα για εισαγωγή σε γύψινο τοίχο, με πιθανές εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης για το κλίμα της Φλόριντα.

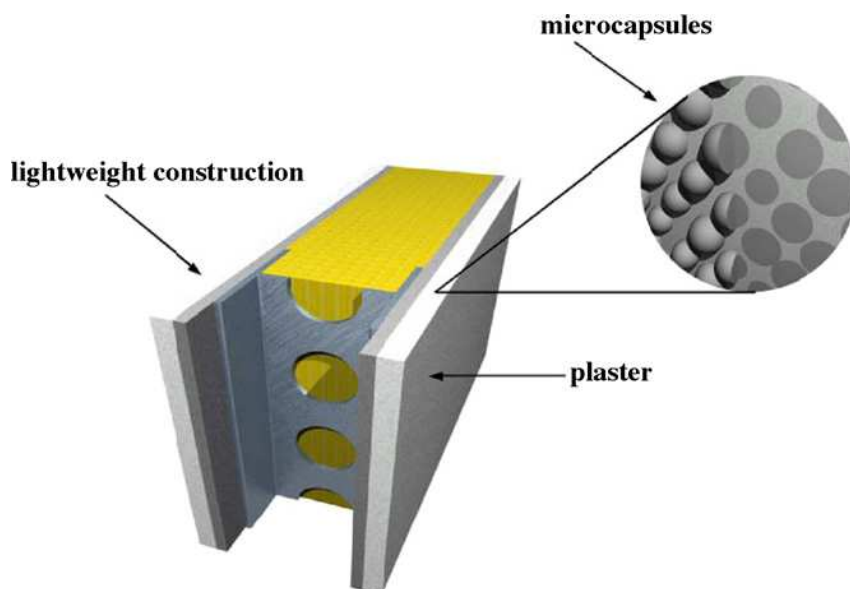
Ο Feldman [42-44] και οι συνεργάτες του, διεξήγαγαν εκτενή έρευνα όσον αφορά τη χρήση και τη σταθερότητα των οργανικών συστατικών για τη λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων των λιπαρών οξέων. Επιπροσθέτως διεξήχθη έρευνα και για τα υλικά τα οποία συμπεριφέρονται ως απορροφητές των PCMs.

Ο Neeper [45] έχει εξετάσει την δυναμική μιας γυψοσανίδας με ενσωματωμένα λιπαρά οξέα και κεριά παραφίνης ως PCM που υπόκεινται στην ημερήσια θερμοκρασιακή διακύμανση του δωματίου, χωρίς όμως να προσπίπτει άμεσα σε αυτά η ηλιακή ακτινοβολία. Η παρατήρηση που έκανε είναι ότι η μέγιστη τιμή της ημερήσιας αποθηκευμένης ενέργειας προκύπτει όταν η τιμή της θερμοκρασίας τήξης του PCM σε κάψουλες πλησιάζει την μέση τιμή της θερμοκρασίας που δημιουργεί την αίσθηση της άνεσης. Μάλιστα, η ημερήσια αποθηκευμένη ενέργεια μειώνεται όταν η αλλαγή φάσης πραγματοποιηθεί σε ένα εύρος θερμοκρασιών.

Οι προσομοιώσεις των ενεργειακών κτιρίων βοηθούν στην εκτίμηση των διάφορων εφαρμογών των PCMs για λόγους αποθήκευσης θερμότητας στα κτίρια. Γι' αυτό το λόγο το Fraunhofer Institute προσομοίωσε την θερμική συμπεριφορά των στοιχείων κτιρίου, προκειμένου να συγκρίνει την δυναμική απόδοση των διαφόρων ειδών τοίχων, που περιείχαν ποικίλα PCMs. Η βάση τους είναι ένα μοντέλο, που εξετάζει την αλλαγή φάσης και είναι εμπειρικά επικυρωμένο από μετρήσεις σε δείγματα τοίχων, διαστάσεων 0,5 x 0,5 m². Ερεύνησαν την επίδραση που έχουν τα PCMs ως συνάρτηση του θερμοκρασιακού εύρους της αλλαγής φάσης, της ποσότητας του PCM, της κατασκευής και χρήσης του κτιρίου. Με την βοήθεια θερμογράφων, φάνηκε ποσοτικά η επίδραση του PCM στα κατασκευαστικά υλικά, δηλαδή σε τέσσερα δείγματα τοίχων με διαφορετική ποσότητα PCM ενσωματωμένη στο καθένα, τα οποία είχαν θερμανθεί σε ένα φούρνο και στη συνέχεια παρακολουθούνταν η ψύξη τους. Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του PCM τόσο περισσότερο διαρκεί και η αποβολή της θερμότητας που έχουν απορροφήσει. Επομένως, σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, η θερμική μάζα ενός στοιχείου του κτιρίου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά λόγω της διαδικασίας αλλαγής φάσης, ώστε η θερμική άνεση που συνδέεται με τις βαριές κατασκευές των κτιρίων να μπορεί να προσεγγισθεί και από κατασκευαστικά υλικά που είναι κατάλληλα για πιο ελαφριές κατασκευές.

Ο Kissock και οι συνεργάτες του [46], έχουν παρουσιάσει τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης τους πάνω στην θερμική συμπεριφορά γυψοσανίδων, οι οποίες έχουν απορροφήσει 30% κατά βάρος εμπορική παραφίνη. Στις προσομοιώσεις που έκαναν, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του γύρω χώρου και οι εσωτερικές θερμοκρασίες στα κελιά των δοκιμών παρακολουθούνταν για 14 ημέρες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη θερμοκρασία κατά την διάρκεια της αλλαγής φάσης στο δοκιμαστικό κελί με PCM ήταν σχεδόν 10 φορές μικρότερη από την αντίστοιχη στο κελί αναφοράς τις θερμές ημέρες.

Από την άλλη πλευρά, οι γυψοσανίδες με PCMs παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Η κατάλληλη μεταβατική θερμοκρασία διαφέρει ανάλογα με το κλίμα της εκάστοτε περιοχής, ενώ το να πετύχεις την σωστή θερμοκρασία γίνεται πολύ δύσκολο σε περιοχές που έχουν ανάγκη τόσο από θέρμανση όσο και από ψύξη. Άλλα ζητήματα που προκύπτουν είναι η διάβρωση, η αναφλεξιμότητά τους και άλλα παραδοσιακά θέματα που αφορούν στην εφαρμογή τους, όπως η δυνατότητα να βαφτεί ο τοίχος.



Σχήμα 7.3.1 Σχηματική απεικόνιση τοίχου ελαφράς κατασκευής με χρήση PCM.

7.4 Σκίαστρα με ενσωματωμένο PCM [5],[19]

Σε αυτή την εφαρμογή, το σκίαστρο που περιέχει PCMs τοποθετείται έξω από τις επιφάνειες των παραθύρων. Κατά την διάρκεια της ημέρας είναι ανοιχτό προς το περιβάλλον, η εξωτερική του πλευρά εκτίθεται σε ηλιακή ακτινοβολία, απορροφάται θερμότητα και έτσι το PCM λιώνει. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, κλείνουμε το παραθυρόφυλλο, ανοίγουμε το παράθυρο και θερμότητα από το PCM εισέρχεται λόγω ακτινοβολίας στον χώρο. Ο Budhi και οι συνεργάτες του [47], ερεύνησαν την θερμική συμπεριφορά ενός δοκιμαστικού δωματίου διαστάσεων 1m x 1m x 1m , με και χωρίς PCM. Ως υλικό αποθήκευσης της λανθάνουσας μορφής θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το CG λαυρικό οξύ και βρέθηκε ότι η ικανότητα θερμικής αποθήκευσης του δωματίου αυξήθηκε κατά 4 °C για 4-5 ώρες όταν χρησιμοποιείται νύχτα, χάρη στην παρουσία του PCM. Επίσης παρατηρήθηκε ότι με τη χρήση αυτών των σκιάστρων η μέγιστη θερμοκρασία λόγω της σκίασης καθυστέρησε να εμφανιστεί κατά 3 ώρες καθώς και η θερμοκρασία του δωματίου μειώθηκε κατά 2 °C.

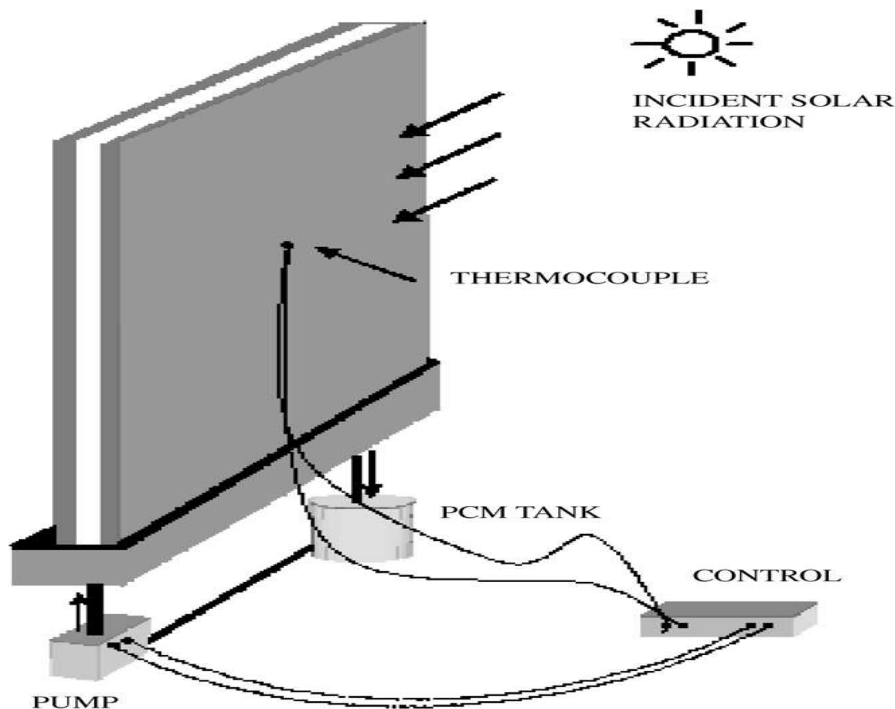


Σχήμα 7.4.1 Σκίαστρα με ενσωματωμένα PCMs.

7.5 Κουρτίνες με ενσωματωμένο PCM [4]

Ο Ismail και οι συνεργάτες του [48] πρότειναν την προσθήκη PCMs σε κινούμενες κουρτίνες αξιοποιώντας θερμικά τα παράθυρα με ένα εναλλακτικό τρόπο όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα. Το παράθυρο έχει δυο στρώματα με κενό στο ενδιάμεσο και μια σχισμή για να διέρχεται ο αέρας στην επάνω γωνία. Οι πλευρές και το κάτω μέρος είναι σφραγισμένα εκτός των δυο οπών που βρίσκονται στο κάτω μέρος οι οποίες ενώνονται με μια αντλία και τη δεξαμενή που περιέχει το PCM. Η αντλία συνδέεται με τη δεξαμενή που φέρει το PCM το οποίο βρίσκεται σε υγρή φάση. Η λειτουργία της αντλίας ελέγχεται μέσω ενός αισθητήρα θερμότητας. Όταν η θερμοκρασιακή διαφορά φτάσει μια καθορισμένη τιμή η αντλία ξεκινά τη λειτουργία της και το υγρό PCM απομακρύνεται από την δεξαμενή για να γεμίσει το κενό μεταξύ των υαλοπινάκων. Έτσι το PCM αρχίζει να ψύχεται εξαιτίας της χαμηλότερης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας, σχηματίζοντας ένα στερεό στρώμα που αυξάνεται σε πάχος με την πάροδο του χρόνου κι έτσι αποτρέπει την μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Αυτό συνεχίζεται μέχρι να στερεοποιηθεί όλη η ποσότητα του PCM. Ένα σωστά σχεδιασμένο τέτοιο σύστημα παραθύρου μπορεί να διασφαλίσει ότι η εξωτερική θερμοκρασία θα σταματήσει να μειώνεται πριν την ολική στερεοποίηση του PCM .

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



Σχήμα 7.5.1 Απεικόνιση παραθύρου με κινητή κουρτίνα.

7.6 Πάνελ οροφής με ενσωματωμένο PCM [5],[19]

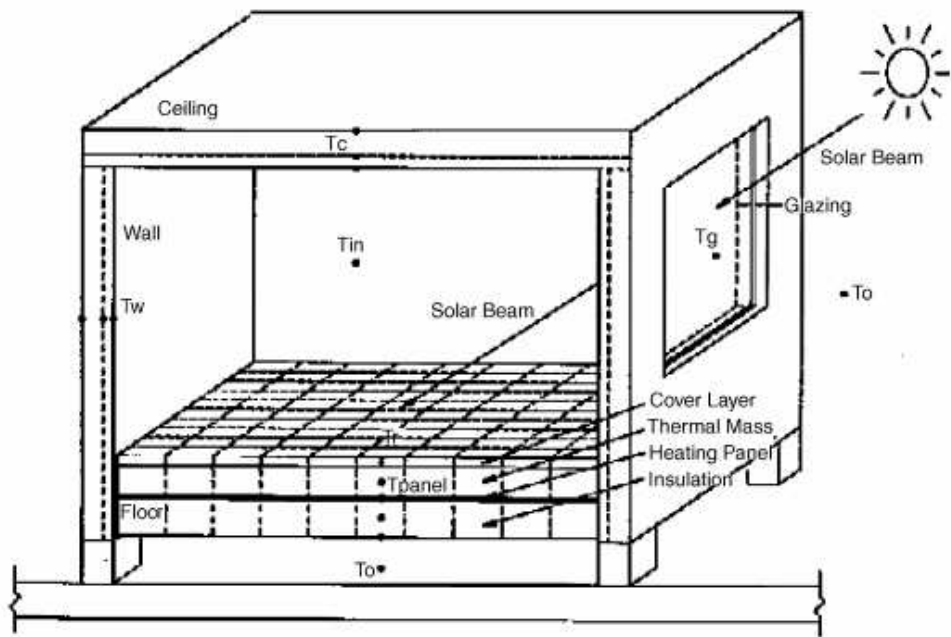
Η τοποθέτηση PCM σε πάνελ οροφής έχει μελετηθεί εκτενώς από αρκετούς επιστήμονες. Η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος αυτού είναι πως το PCM στα πάνελ οροφής λιώνει κατά τη διάρκεια της μέρας όταν εκτίθεται στα θερμικά φορτία και παγώνει κατά τη διάρκεια της νύχτας με τη βοήθεια ενός συστήματος ενσωματωμένων σωλήνων που μεταφέρουν νερό. Η προσωρινή αποθήκευση της θερμικής ενέργειας στο PCM μειώνει το εύρος διακύμανσης των θερμοκρασιών στο κτίριο ενώ επιτρέπει στην διαδικασία αποβολής θερμότητας να μην είναι ταυτόχρονη με το κέρδος θερμότητας. Ενδείκνυται η συσκευασία του PCM σε μικροκάψουλες οι οποίες θα είναι τοποθετημένες σε κατάλληλο υλικό όπως ο γύψος για αποφευχθεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς σε ενδεχόμενη διαρροή υγρού PCM.

Ένα σύστημα θέρμανσης χώρου το οποίο περιλαμβάνει PCM τοποθετημένο στην οροφή αναπτύχθηκε από τους Guthertz και Schiller [49]. Ηλιακοί ανακλαστήρες χρησιμοποιούνται για να κατευθύνουν την ηλιακή ενέργεια να εισέλθει μέσω των

παραθύρων στα PCMs. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι ότι επιτρέπει σε μια μεγάλη περιοχή να αποθηκεύσει θερμότητα χωρίς να απαιτεί μεγάλες ποσότητες αποθηκευτικού μέσου όπως θα απαιτούνταν στην περίπτωση αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Έχει αποδειχθεί ότι η χρήση ενός τέτοιου συστήματος έχει τη δυνατότητα να ανακτήσει 17-36 % της θερμότητας που χάνεται .

7.7 Ενδοδαπέδια θέρμανση με ενσωματωμένο PCM [19]

Το δάπεδο είναι ένα εξίσου σημαντικό σημείο ενός κτιρίου και επομένως δοκιμάστηκε και η χρήση αυτού για την θέρμανση και την ψύξη. Οι Ahtienities και Chen, [50] ερεύνησαν την παροδική μεταφορά θερμότητας στα συστήματα θέρμανσης του πατώματος. Η μελέτη τους επικεντρώθηκε στην επίδραση του καλύμματος και της ηλιακής ακτινοβολίας στην θερμοκρασιακή κατανομή του δαπέδου και στην κατανάλωση ενέργειας. Περιοχές καλυμμένες εξ ολοκλήρου ή μερικώς από χαλί, λήφθηκαν υπ' όψιν, όπως επίσης και περιοχές με ξύλινη επικάλυψη του τσιμέντου ή του μίγματος γύψου-τσιμέντου θερμικής αποθήκευσης. Πειραματικά αποτελέσματα από προσομοιώσεις για ένα εξωτερικό δωμάτιο δοκιμών, αποκαλύπτουν ότι η οριζόντια ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας της περιοχής του πατώματος που φωτίζεται κατά 8 °C περισσότερο σε σχέση με αυτή που βρίσκεται υπό σκιά. Η μερική κάλυψη 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% περίπου, ενώ η αύξηση της θερμικής μάζας από 5 cm σε 10 cm δεν έδειξε να οδηγεί σε περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας. Παρακάτω δίνεται η σχηματική αναπαράσταση του δωματίου δοκιμών.



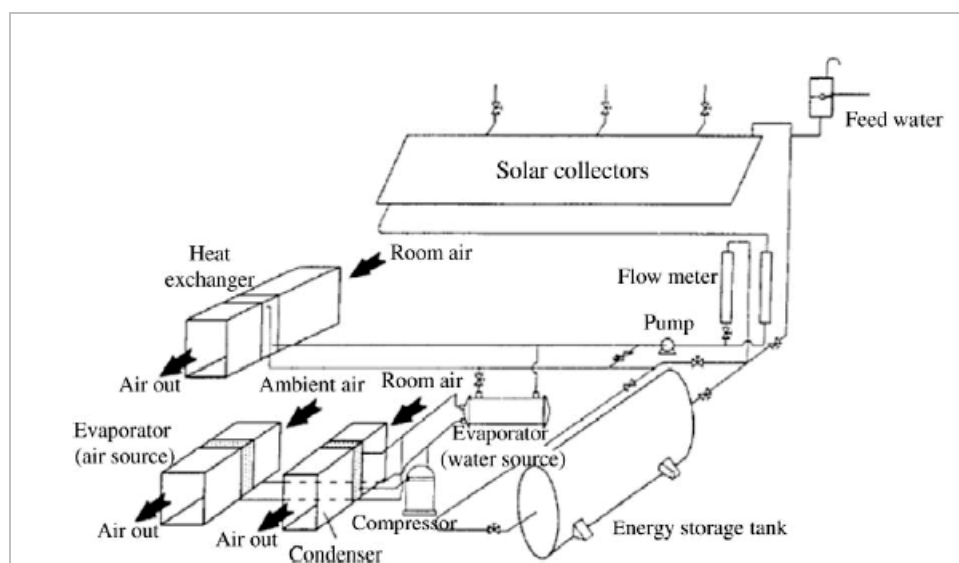
Σχήμα 7.7.1 Σχηματική απεικόνιση του δωματίου δοκιμών.

Κεφάλαιο 8

Εφαρμογές των PCMs σε ενεργητικά συστήματα κτιρίων [51]

Στις εφαρμογές στα κτίρια, τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να ενσωματωθούν σε άλλα συστήματα, όπως συστήματα ηλιακής θέρμανσης με χρήση αντλίας, συστήματα ανάκτησης θερμότητας, συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης ως ενεργητικές εφαρμογές προκειμένου να εξυπηρετήσουν λειτουργικούς σκοπούς και να βελτιώσουν την ικανότητα μεταφοράς θερμότητας των PCMs.

Η αποτελεσματικότητα του συνδυασμού των συστημάτων με χρήση αντλίας με το PCM (π.χ. το $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) για θέρμανση χώρου ερευνάται σε διάφορες μελέτες. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η συνολική διάταξη αυτού του πειραματικού συστήματος θέρμανσης που εξετάζεται στις μελέτες.



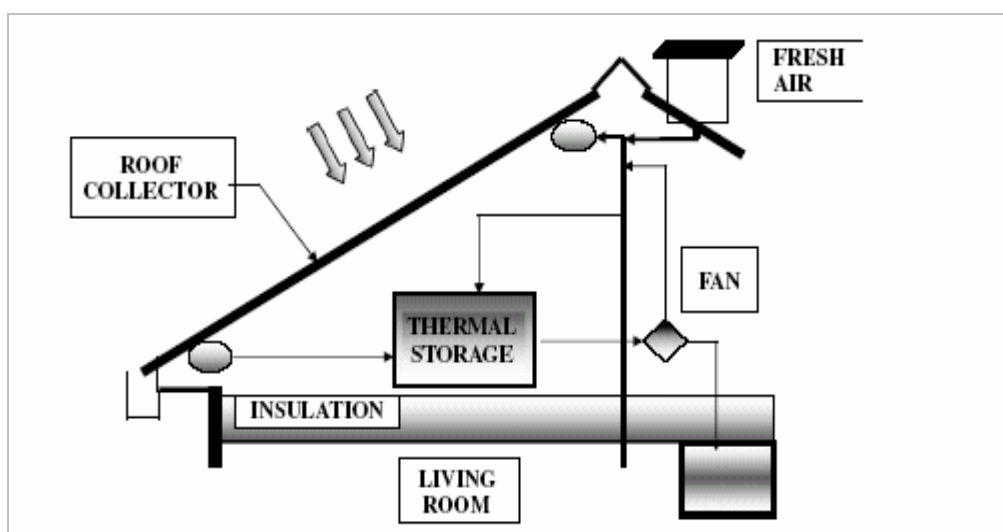
Σχήμα 8.1 Πειραματικό σύστημα θέρμανσης [52].

Η επίδραση των διάφορων παραμέτρων του συστήματος στη θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου, η διακύμανση της θερμοκρασίας του PCM στην δεξαμενή αποθήκευσης και οι θερμοκρασίες του νερού που μεταφέρει τη θερμότητα στους ηλιακούς συλλέκτες και στη δεξαμενή αποθήκευσης ερευνώνται σε μελέτες. Επιπλέον αποδείχθηκε ότι το PCM είναι ένα συστατικό καίριας σημασίας για συστήματα ηλιακής θέρμανσης με χρήση σωλήνων.

8.1 Σύστημα θέρμανσης χώρου ενσωματωμένο στην οροφή [4]

Το πανεπιστήμιο της βόρειας Αυστραλίας (UniSA), έχει αναπτύξει ένα σύστημα αποθήκευσης της ηλιακής θερμότητας, το οποίο είναι ενσωματωμένο στην οροφή και το οποίο χρησιμοποιεί μεταλλικά φύλλα οροφής με αυλακώσεις ως ηλιακό συλλέκτη για την θέρμανση του αέρα. Μία μονάδα θερμικής αποθήκευσης PCM χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της θερμότητας την ημέρα, ώστε αυτή να μπορεί να διανεμηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας διότι δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.

Το σύστημα αυτό λειτουργεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Όσο έχει ηλιοφάνεια και όταν απαιτείται θέρμανση ο αέρας περνάει μέσα από τον συλλέκτη και εν συνεχεία μέσα στο σπίτι. Όταν δεν απαιτείται θέρμανση ο αέρας περνάει από την μονάδα θερμικής αποθήκευσης, λιώνει το PCM και το φορτίζει έτσι για μελλοντική χρήση. Όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, ο αέρας του δωματίου περνάει από την μονάδα θερμικής αποθήκευσης, ζεσταίνεται και μετά ωθείται στο σπίτι. Επαρκή ποσά καθαρού αέρα εισάγονται όταν το σύστημα ηλιακής θέρμανσης διανέμει θερμότητα στον χώρο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



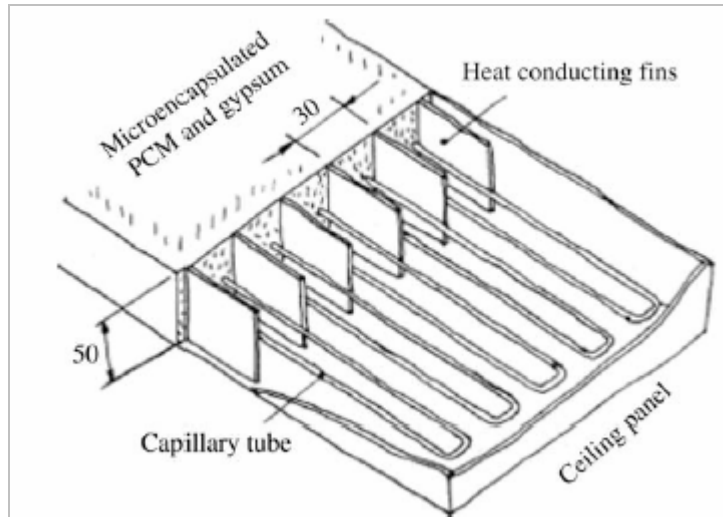
Σχήμα 8.1.1 Απεικόνιση του συστήματος ηλιακής θέρμανσης.

Το σύστημα αυτό παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- ◆ Οι επιδράσεις της αισθητής θερμότητας γίνονται εμφανείς στις αρχικές περιόδους τόσο της τήξης όσο και της ψύξης. Για την περίπτωση της θέρμανσης αυτό σημαίνει σημαντική αύξηση της θερμότητας κατά την αρχική περίοδο διανομής του αέρα στον χώρο, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση της θερμικής άνεσης.
- ◆ Η υψηλότερη θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα στο σύστημα αυξάνει τους ρυθμούς μεταφοράς της θερμότητας και μειώνει τον χρόνο τήξης. Αντίθετα, κατά την διάρκεια της ψύξης η χαμηλότερη θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα αυξάνει την μεταφορά θερμότητας και μειώνει τον χρόνο ψύξης.
- ◆ Η υψηλότερη ροή αέρα αυξάνει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και μειώνει τον χρόνο τήξης, αυξάνοντας όμως την θερμοκρασία του αέρα εξόδου από το σύστημα (και άρα εισόδου στο δωμάτιο). Για την ψύξη, ο υψηλότερος ρυθμός ροής του αέρα αυξάνει την μεταφορά θερμότητας και μειώνει τον χρόνο ψύξης, μειώνοντας όμως και την θερμοκρασία του αέρα εξόδου από το σύστημα.

8.2 Ενεργητικό πάνελ οροφής με ενσωματωμένο PCM [51]

Ένα θερμικό ενεργητικό πάνελ οροφής με PCM, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.2.1 μελετήθηκε στην αναφορά [53] για ελαφρές και ανακαινισμένες κατασκευές. Το PCM στα πάνελ οροφής λιώνει κατά τη διάρκεια της μέρας λόγω της έκθεσης του στα θερμικά φορτία του ήλιου και παγώνει κατά τη διάρκεια της νύχτας χρησιμοποιώντας ένα ενιαίο δίκτυο σωληνώσεων νερού. Η προσομοίωση που έγινε με το πρόγραμμα TRNSYS και οι δοκιμές στο εργαστήριο έδειξαν ότι ένα στρώμα PCM πάχους 5cm συσκευασμένο σε μικροκάψουλες (25% κατά βάρος) και γύψο είναι αρκετό ώστε να διατηρήσει μια θερμοκρασία άνεσης στο δωμάτιο σε ένα κτίριο με γραφεία.



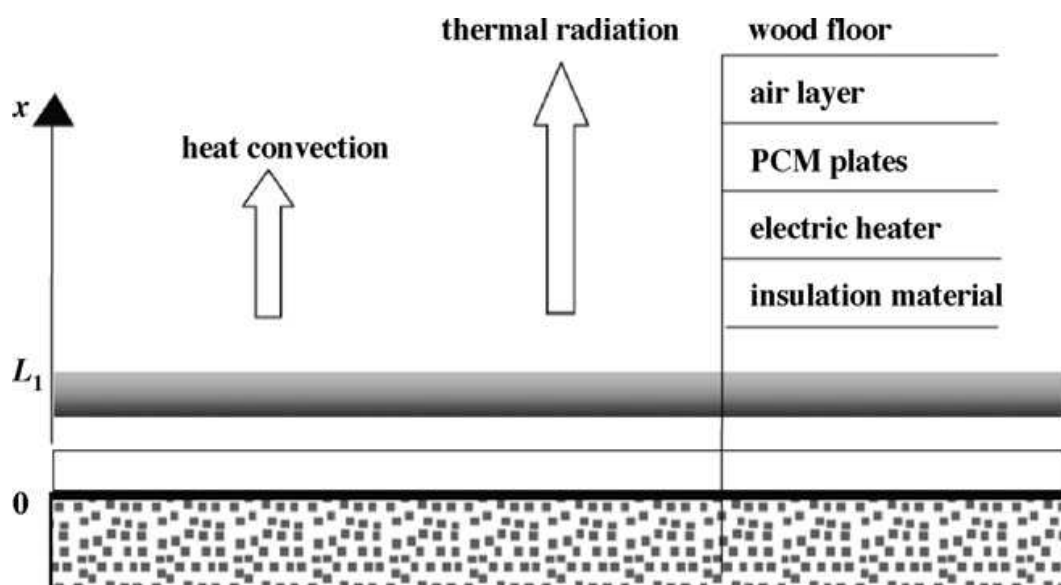
Σχήμα 8.2.1 Θερμικό ενεργητικό πάνελ οροφής με ενσωματωμένο PCM .

8.3 Ενδοδαπέδια θέρμανση με ενσωματωμένο PCM

Η Kunring Lina και οι συνεργάτες της [54] προωθούν ένα νέο είδος ενδοδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος. Διαφοροποιημένα από τα συμβατικά PCMs, τα σταθερού σχήματος PCMs μπορούν να κρατήσουν το σχήμα τους αμετάβλητο κατά τη διαδικασία της αλλαγής φάσης. Συνεπώς ο κίνδυνος διαρροής τους αποφεύγεται. Το σύστημα αυτό μπορεί να φορτιστεί χρησιμοποιώντας το νυχτερινό φτηνό ρεύμα και να αποδώσει την αποθηκευμένη ενέργεια κατά της διάρκεια της ημέρας [4].

Για να υπολογιστεί η θερμική απόδοση του ενδοδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος, ένα πειραματικό σπίτι εξοπλίστηκε με αυτό το σύστημα και τις πλάκες PCM σταθερού σχήματος στο πανεπιστήμιο της Tsinghua στο Πεκίνο. Οι διαστάσεις του πειραματικού σπιτιού ήταν 3m(μήκος) x 2m (πλάτος) x 2m (ύψος). Διέθετε ένα 1,6m x 1,5m παράθυρο νοτίου προσανατολισμού με διπλό τζάμι καλυμμένο με μαύρη κουρτίνα. Η οροφή και οι τοίχοι ήταν κατασκευασμένοι από πολυεστερίνη πάχους 100mm καλυμμένη από μέταλλο. Το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης περιελάμβανε μόνωση πολυεστερίνης πάχους 120mm, ηλεκτρικούς θερμαντήρες, PCM πάχους 15mm, μερικά ξύλινα στηρίγματα, στρώμα αέρα πάχους 10

mm και δάπεδο πάχους 8mm. Στο σχήμα 8.3.1 αναπαριστάται η κατασκευή του συστήματος θέρμανσης [4].



Σχήμα 8.3.1 Απεικόνιση του ενδοδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος [5].

Από το πείραμα εξάχθηκαν τα εξής συμπεράσματα:

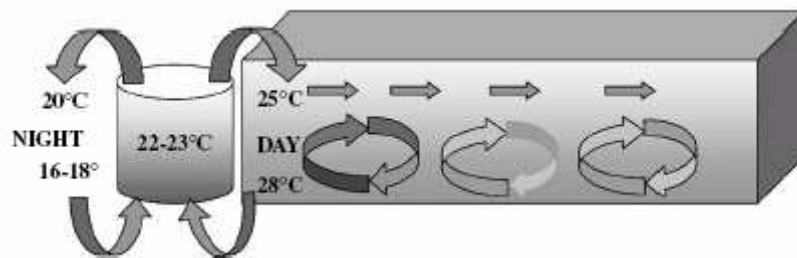
- Το σύστημα αύξησε την εσωτερική θερμοκρασία χωρίς ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς .
- Η θερμοκρασία του PCM διατηρήθηκε στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το τέλος της λειτουργίας των θερμαντήρων. Πάνω από τη μισή ηλεκτρική θερμική ενέργεια μεταφέρθηκε από την περίοδο της μέγιστης ζήτησης σε περίοδο μικρότερης ζήτησης κάτι το οποίο παρέχει σημαντικό οικονομικό όφελος λόγω του διαφορετικού κόστους του ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ μέρας και νύχτας.
- Η μικρή διαφορά στην εσωτερική θερμοκρασία κατά μήκος της κατακόρυφης διεύθυνσης εμφανίστηκε λόγω του γεγονότος ότι η ενδοδαπέδια θέρμανση

μπορούσε να ζεστάνει τον εσωτερικό αέρα ομοιόμορφα. Οπότε το σύστημα θέρμανσης αποδείχθηκε άνετο και ενεργειακά αποδοτικό [4].

Οι δυνατότητες της χρήσης PCM σε ενδοδαπέδια θέρμανση μελετήθηκαν στις αναφορές [55,56]. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από την αναφορά [56] έδειξαν ότι ένα στρώμα PCM με πάχος 30mm τοποθετημένο ανάμεσα στον θερμαντήρα και στα πλακάκια του δαπέδου με σημείο τήξης κοντά στους 40 °C είναι ικανό να παρέχει την αναγκαία θερμότητα κατά τη διάρκεια της μέρας, όταν ο θερμαντήρας χρησιμοποιείται μόνο οκτώ ώρες κατά τη διάρκεια της νύχτας, και επιτρέπει μια μεταφορά θερμότητας της τάξεως των 7,2 MJ/m² ανά ημέρα ηλεκτρικής ενέργειας από τις περιόδους αυξημένης ζήτησης στις περιόδους περιορισμένης ζήτησης. Στην αναφορά [38] δυο πλάκες σκυροδέματος με διαστάσεις 0,5m x 0,5m x 0,5m κατασκευάστηκαν για να προσομοιώσουν τα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με και χωρίς PCMs. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σύστημα με μέσο αποθήκευσης θερμότητας το CaCl₂ 6H₂O είναι ικανό να εξασφαλίσει ομοιόμορφη θέρμανση κατά τη διάρκεια της μέρας και να κρατήσει την επιφάνεια του δαπέδου κοντά στην επιθυμητή θερμοκρασία των 24 °C [51].

8.4 Free Cooling [4]

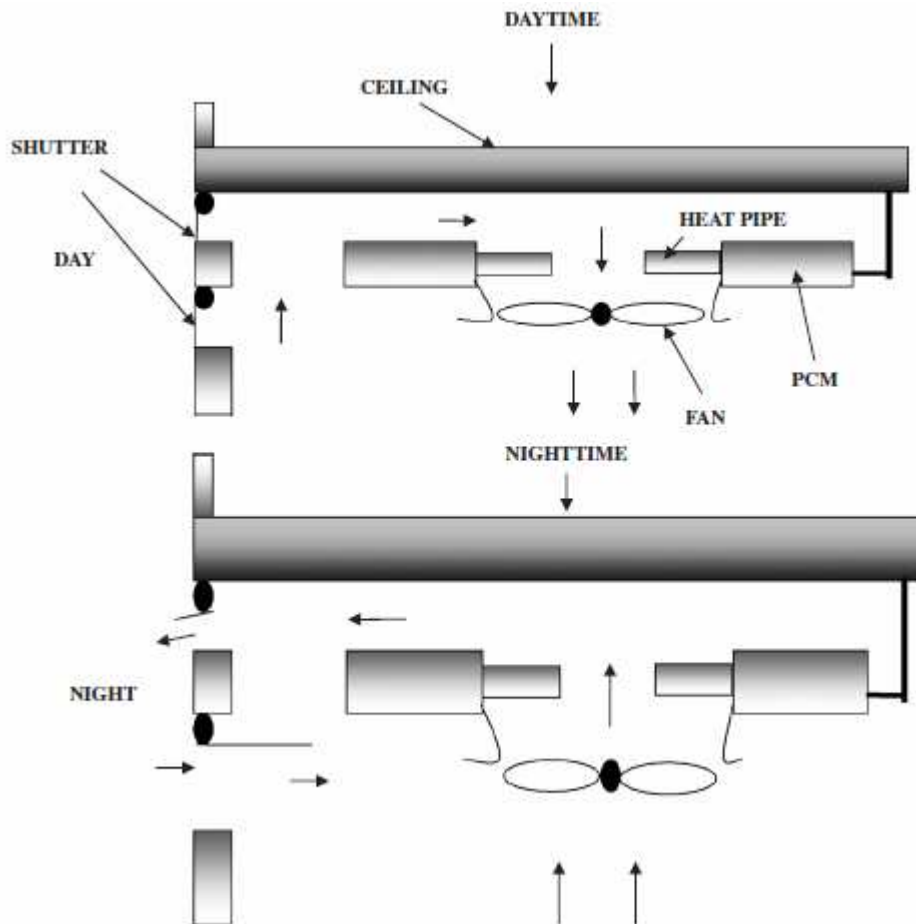
Μια μορφή κλιματισμού γνωστή με το όνομα "free cooling" μελετήθηκε στο πανεπιστήμιο της Σαραγόσα από τον Zalba [57]. Στόχος της μελέτης ήταν να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί μια πειραματική εγκατάσταση για τη μελέτη των PCMs με θερμοκρασία τήξης μεταξύ των 20 °C και 25 °C, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Αυτό το θερμοκρασιακό εύρος φαίνεται να είναι το πιο κατάλληλο για το free cooling καθώς η θερμοκρασία του περιβάλλοντος την νύχτα συνήθως πέφτει κάτω από τους 20-25 °C και επομένως είναι αρκετά χαμηλές ώστε να ψύχουν τον αέρα στα κτίρια. Η εγκατάσταση του free cooling απαιτεί κλίματα, όπου η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας τους καλοκαιρινούς μήνες είναι μεγαλύτερη των 15 °C, ώστε να μπορεί να αποθηκεύει κρύο κατά τη διάρκεια της νύχτας και να το αποδίδει την ημέρα.



Σχήμα 8.4.1 Η ιδέα του free cooling .

Στο πανεπιστήμιο του Νότιγχαμ [58] έγινε μια προσέγγιση κατά την οποία το πλήρες σύστημα κλιματισμού αντικαταστάθηκε από το καινούριο σύστημα το οποίο είναι ένα σύστημα βραδινής ψύξης που είναι επίσης εύκολο να προσαρμοστεί. Το προτεινόμενο μοντέλο παρουσιάζεται στο σχήμα 8.4.2 . Είναι τοποθετημένο στην οροφή και υπάρχει και ένας ανεμιστήρας που ρίχνει αέρα γύρω από τα εκτεθειμένα άκρα των σωλήνων θερμότητας. Το άλλο άκρο των σωλήνων θερμότητας βρίσκεται μέσα σε ένα χώρο αποθήκευσης με PCM. Κατά τη διάρκεια της μέρας , ο ζεστός αέρας που εισέρχεται στο κτίριο ψύχεται από το PCM και θερμότητα αποθηκεύεται στο PCM. Κατά τη διάρκεια της νύχτας η λειτουργία του ανεμιστήρα αντιστρέφεται και τα στόρια είναι ανοιχτά έτσι ώστε ο κρύος αέρας από τον εξωτερικό χώρο να περνάει διαμέσου των σωλήνων και να αφαιρεί την θερμότητα απο τα PCMs. Ο κύκλος επαναλαμβάνεται την επόμενη μέρα.

Οι θερμοκρασίες τήξης και πήξης είναι περίπου 22 °C και 20 °C αντίστοιχα . Η πλήρης τήξη συμβαίνει όταν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ PCM και αέρα είναι 2 °C για μια χρονική περίοδο 8 ωρών και για θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ PCM και αέρα 3,5 °C για μια χρονική περίοδο 3 ωρών. Τα μεταφερόμενα ποσά θερμότητας είναι 80 και 200 W/ μονάδα αντίστοιχα.

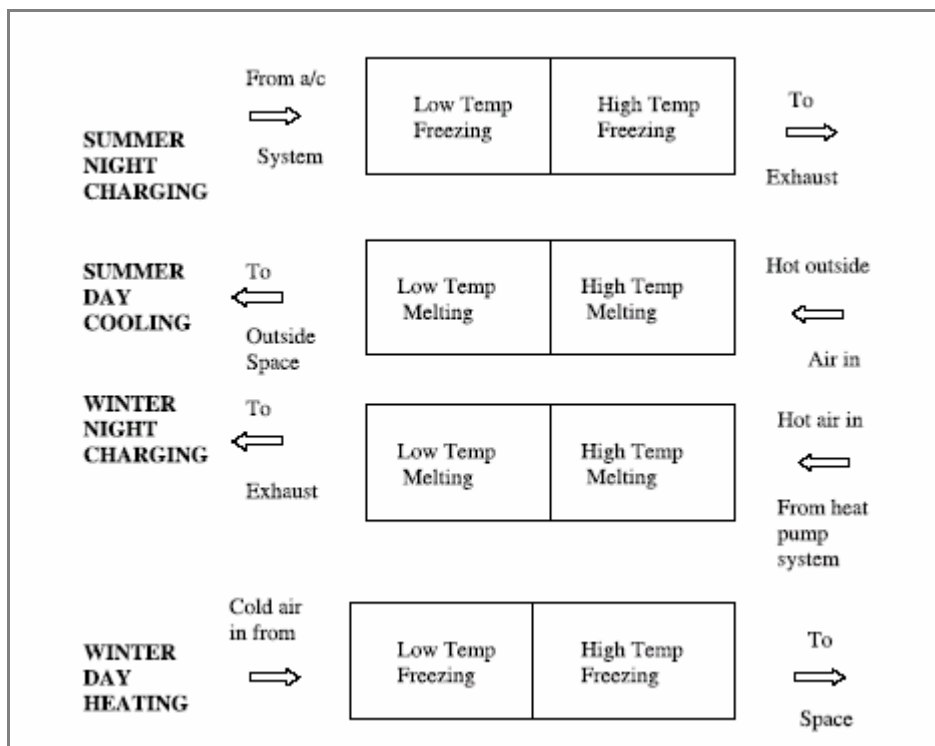


Σχήμα 8.4.2 Το προτεινόμενο μοντέλο του πανεπιστημίου του Νότιγγαμ .

8.5 PCM σε συνδυασμένο σύστημα θέρμανσης-ψύξης [4]

Το κέντρο βιώσιμης ενέργειας στη UniSA [59], άρχισε να ασχολείται με τα PCMs στα μέσα της δεκαετίας του 1990, με την ανάπτυξη μίας μονάδας αποθήκευσης, η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για θέρμανση και για ψύξη του χώρου. Η φόρτιση της μονάδας αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της νύχτας και η χρήση της ενέργειας την ημέρα, κατά την διάρκεια είτε θερμότερων είτε ψυχρότερων εποχών, γίνεται μέσω ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που αποτελείται από δύο διαφορετικά PCMs τα οποία είναι ενσωματωμένα σε ένα σύστημα αντιστρεπτού κύκλου. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί ηλεκτρική 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 και στην παρακάτω εικόνα. Το σημείο τήξης-στερεοποίησης του πρώτου υλικού είναι κάτω από την θερμοκρασία που δημιουργεί την αίσθηση της άνεσης, ενώ το δεύτερο έχει σημείο τήξης-στερεοποίησης πάνω από αυτή την θερμοκρασία. Κατά την διάρκεια του χειμώνα, η ροή



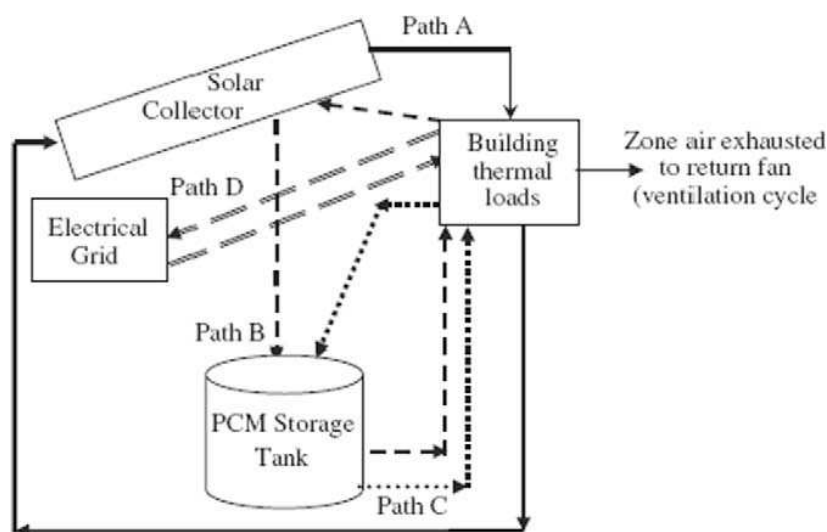
Σχήμα 8.5.1 Φόρτιση κατά της διάρκεια της νύχτας και χρήση κατά τη διάρκεια της μέρας.

του αέρα καθορίζεται έτσι ώστε το σύστημα να αποθηκεύει θερμότητα τη νύχτα (με την τήξη και των δύο υλικών) και να αποδίδει την θερμότητα σε μία θερμοκρασία πάνω 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 κάτω από την θερμοκρασία άνεσης την ημέρα. Το ποσοστό της μείωσης για την απαιτούμενη ικανότητα του κλιματιστικού και οι ποσότητες των θερμών και ψυχρών φορτίων που μεταφέρονται στις περιόδους χαμηλής ζήτησης, αναφέρθηκαν από αυτούς χρησιμοποιώντας ένα υπολογιστικό μοντέλο για το σύστημα αποθήκευσης. Μάλιστα το τελευταίο έχει την 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. Μπορεί επιπλέον να μετατοπίσει μία ποσότητα από τα φορτία θέρμανσης και ψύξης στις ώρες που δεν είναι αιχμής, οπότε και η τιμή του ρεύματος είναι χαμηλότερη. Οι υπολογισμοί για ένα τυπικό σπίτι στην Αδελαιίδα έδειξαν ότι το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας αποτελούμενο από 100 kg PCM θερμοκρασίας 29 °C και από 80 kg PCM θερμοκρασίας 18°C μείωσαν το ονομαστικό ποσοστό του φορτίου που απαιτείται στο 50% του συνολικού φορτίου. Επιπλέον, το ετήσιο ηλεκτρικό κόστος μειώθηκε κατά 32% εξ αιτίας της μετατόπισης του φορτίου σε ώρες χαμηλής ζήτησης.

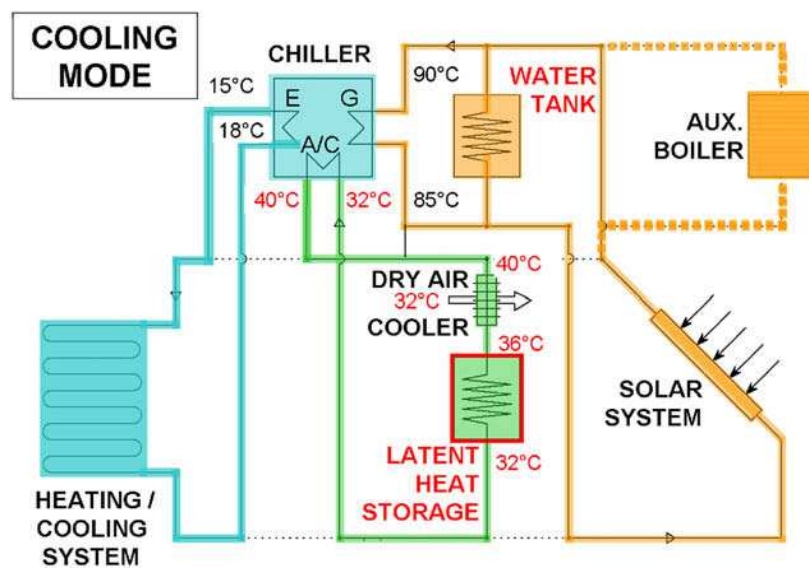
8.6 Διάφορα ενεργητικά συστήματα σε κτίρια

Οι Hassan και Baliveau [60] μελέτησαν τη χρήση ενός συλλέκτη σε σχήμα επίπεδου πιάτου και μιας δεξαμενής αποθήκευσης με PCMs για να προσφέρει ενέργεια σε κατοικημένες περιοχές. Το σύστημα λειτουργούσε ελέγχοντας το σωλήνα κυκλοφορίας και τη διαδρομή του υγρού. Η διαδρομή του υγρού είχε τη δυνατότητα να αλλάζει βασιζόμενη σε αλλαγές στο σύστημα ή στο επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας και της εξωτερικής θερμοκρασίας. Στο σχήμα 8.6.1 παρουσιάζονται οι εναλλακτικές διαδρομές παροχής ενέργειας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έγινε σε ένα κτίριο στο Blacksburg έδειξε ότι το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να καλύψει ως και το 88% της ζήτησης για θέρμανση χώρων και ζεστού νερού και εξοικονομώντας περίπου 61,5% του ετήσιου λογαριασμού της θέρμανσης [51].



Σχήμα 8.6.1 Εναλλακτικές διαδρομές παροχής ενέργειας [60].

Ένα σύστημα ηλιακής απορρόφησης για ψύξη με χρήση PCM σχεδιάστηκε στην αναφορά [61]. Κατά τη λειτουργία της θέρμανσης το PCM εξισορροπεί τη θερμότητα που παράγεται από το ηλιακό σύστημα και άλλες πηγές θερμότητας για να προσφέρει την κατάλληλη θερμότητα που απαιτούν τα κτίρια. Μια ανάλυση της θερμικής σχεδίασης των επί μέρους τμημάτων του συστήματος απέδειξε ότι η εισαγωγή του PCM μπορεί να μειώσει το συνολικό μέγεθος του συστήματος με τον ηλιακό συλλέκτη για την εφαρμογή ψύξης με ξηρό αέρα εν αντιθέσει με το συνηθισμένο σύστημα ψύξης με υγρό αέρα. Τέλος τα αποτελέσματα έδειξαν τη θετική επίδραση που έχει το PCM στο ηλιακό κέρδος επιτρέποντας παράλληλα της λειτουργία του συστήματος με σχετικά χαμηλή θερμοκρασία στους συλλέκτες [51].



Σχήμα 8.6.2 Δομή συστήματος ηλιακής απορρόφησης για ψύξη [61].

Ένα ακόμη σύστημα που κάνει χρήση των PCMs αποτελεί το σύστημα κλιματισμού χαμηλής ενέργειας που αναπτύχθηκε από τον Wang [62] και τους συνεργάτες του. Το συγκεκριμένο σύστημα συνδυάζει το ψυχρό ταβάνι, PCM, που βρίσκεται σε μίγμα με ασβεστόγαλα, ενσωματωμένο σε μικροκάψουλες (MPCM) και τεχνολογίες ψύξης. Το κύριο χαρακτηριστικό του εν λόγω συστήματος είναι ότι η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με χρήση MPCM και ασβεστόγαλα επιτρέπει στην ψύξη, που γίνεται μέσω της εξάτμισης, να αποθηκεύεται στο μίγμα κατά τη διάρκεια του 24ώρου οπότε η θερμοκρασία υγρού βολβού να φτάνει σε κάποιο προκαθορισμένο επιθυμητό σημείο. Τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από την προσομοίωση έδειξαν ότι το σύστημα μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια της τάξης του 80% στην βορειοδυτική Κίνα και του 10% στην νοτιοανατολική Κίνα [51].

Κεφάλαιο 9

Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης

9.1 Γενικά για την αλλαγή φάσης

Τα PCMs είναι αποθηκευτικοί χώροι που χρησιμοποιούνται για να εξισορροπούν προσωρινά τις εναλλαγές της θερμοκρασίας και να αποθηκεύουν ενέργεια σε διάφορους τομείς εφαρμογής τους όπως στα ηλεκτρονικά, στην αυτοκινητοβιομηχανία καθώς και στα κτίρια. Η αποθήκευση στα PCMs είναι προτιμότερη από την αποθήκευση αισθητής θερμότητας όσο αφορά εφαρμογές με μικρή ταλάντωση της θερμοκρασίας λόγω του σχεδόν ισοθερμοκρασιακού μηχανισμού αποθήκευσης και της υψηλής πυκνότητας αποθήκευσης που διαθέτουν τα υλικά αυτά. Όταν εμφανίζεται το μέγιστο της θερμοκρασίας, το PCM απορροφά την περισσευούμενη θερμότητα και την αποδίδει όταν πλέον η θερμοκρασία έχει μειωθεί. Η αποθήκευση της θερμότητας μπορεί να έχει διαστασιολογηθεί κατά τρόπο τέτοιο ώστε η θερμοκρασία αποθήκευσης να διατηρείται κάτω από κάποιο συγκεκριμένο όριο την ίδια στιγμή όπου η περισσευούμενη εξωτερική ενέργεια αποθηκεύεται [63].

Τα προβλήματα αλλαγής φάσης επιλύονται συνήθως με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με την αριθμητική προσέγγιση. Το φαινόμενο αλλαγής φάσης πρέπει να εξεταστεί ξεχωριστά, λόγω της μη γραμμικής φύσης του. Για την επίλυση των προβλημάτων με PCMs, υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος διαφορετικών ειδών αριθμητικών μεθόδων. 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 τα PCMs με ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας αλλαγής φάσης [63].

9.2 Μέθοδος της ενθαλπίας

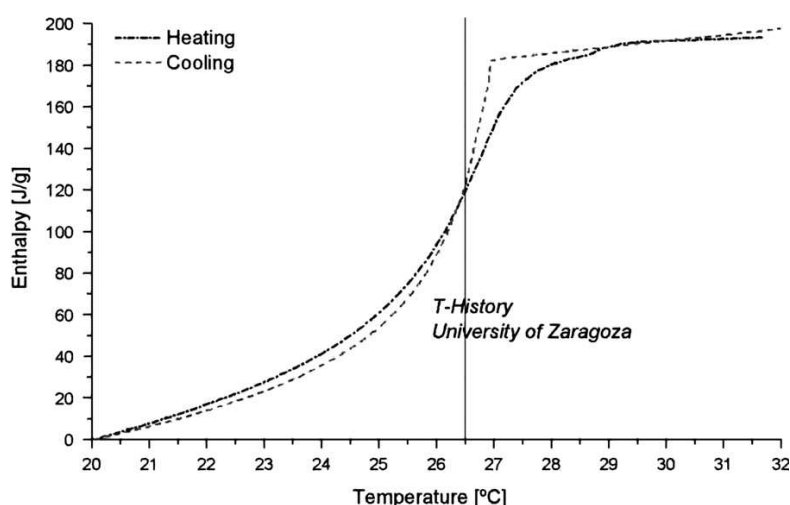
Το κύριο χαρακτηριστικό των PCMs είναι η σχέση ενθαλπίας-θερμοκρασίας που καθορίζει την ικανότητά τους να αποθηκεύουν θερμότητα. Αυτή η σχέση καθορίζεται πειραματικά με θερμιδομετρικές μεθόδους. Τα PCMs είναι ιδιαίτερα δύσκολα δείγματα λόγω της μεγάλης θερμικής μάζας τους, αλλά και γιατί συχνά είναι ετερογενή υλικά ή παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από τον όγκο [64]. Η μεταφορά θερμότητας κατά την αποθήκευση στο PCM είναι ένα παροδικό, μη γραμμικό φαινόμενο με μια κινούμενη διεπιφάνεια στερεού-υγρού το οποίο είναι γνωστό ως κινούμενο συνοριακό πρόβλημα. Η μη γραμμικότητα είναι η πηγή των δυσκολιών και οι αναλυτικές λύσεις για τα προβλήματα αλλαγής φάσης είναι γνωστές μόνο για ορισμένες φυσικές καταστάσεις που έχουν απλή γεωμετρία και απλές οριακές συνθήκες [63]. Ως εκ τούτου, η απόκτηση θερμιδομετρικών δεδομένων δεν είναι εγγυημένη μέσω μιας αντιπροσωπευτικής τυποποιημένης μεθοδολογίας και μάλιστα χωρίς την προσθήκη σχολιασμών στα δεδομένα των μετρήσεων μπορούν εύκολα να δημιουργηθούν παρεξηγήσεις. Για το λόγο αυτό μια βελτιωμένη μεθοδολογία θα συμβάλλει στην αποφυγή συγχύσεων μεταξύ των ερευνητών, παραγωγών και αγοραστών των PCMs [64].

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 [65]. Μια μορφή αυτής της καμπύλης δίνεται στο σχήμα 9.2.1 που ακολουθεί.

Προκειμένου να γίνει μια τέτοια μοντελοποίηση, χρησιμοποιούνται οι εξής παραδοχές για την τήξη και τη στερεοποίηση των PCMs όπως φαίνονται παρακάτω:

1. το PCM μπορεί να θεωρηθεί ως ένα συνεχές μέσο σε μακροσκοπική κλίμακα
2. η μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής στο εσωτερικό του PCM είναι αμελητέα
3. οι θερμικές ιδιότητες (θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα) του PCM είναι σταθερές σε κάθε φάση, αλλά η θερμοχωρητικότητα θα μπορούσε να είναι ασυνεχής μεταξύ στερεής και υγρής φάσης. Αντίθετα, η θερμική αγωγιμότητα θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση του PCM

4. η αλλαγή φάσης λαμβάνει χώρα υπό σταθερή πίεση
5. η υπόψυξη είναι αμελητέα
6. για υλικά αλλαγής φάσης πολλών συστατικών που υποβάλλονται σε μετασχηματισμό σε ένα εύρος θερμοκρασιών, δεν θεωρούνται φαινόμενα διαχωρισμού κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης [66].



Σχήμα 9.2.1 Καμπύλη ενθαλπίας συναρτήσει της θερμοκρασίας για PCM με τη μέθοδο T-history [65].

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

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 [65].

Στην πραγματικότητα, σε περιπτώσεις αλλαγής φάσης, περισσότερες από μία διεπιφάνεια αλλαγής φάσης μπορεί να υπάρξουν ή οι διεπιφάνειες αυτές ενδέχεται να εξαφανιστούν εντελώς. Επιπλέον, η αλλαγή φάσης συμβαίνει συνήθως σε μη ισοθερμοκρασιακό εύρος θερμοκρασίας, όπως στην περίπτωση της παραφίνης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η παρακολούθηση της διεπιφάνειας στερεού-υγρού μπορεί να είναι δύσκολη

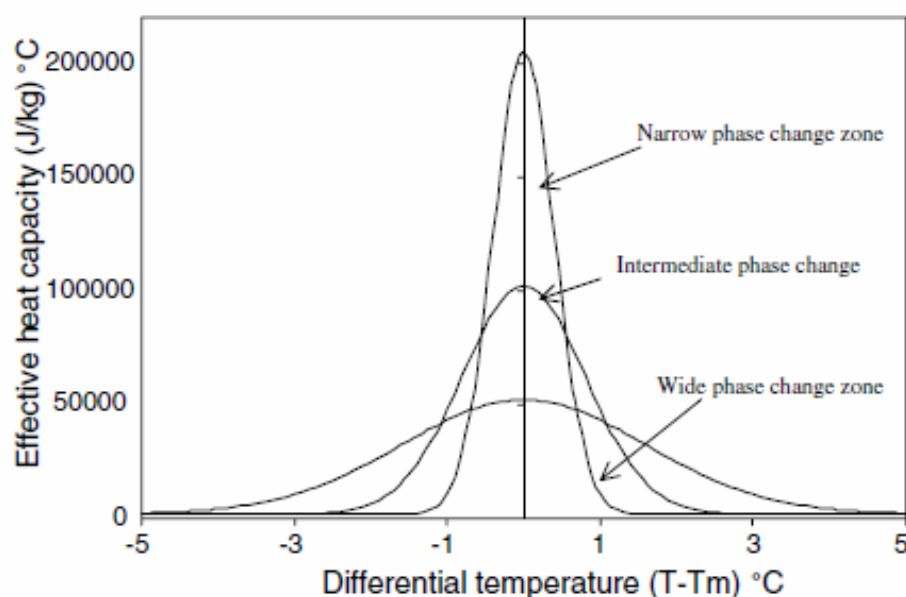
ή και αδύνατη. Από υπολογιστική άποψη, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο το πρόβλημα να αναδιατυπωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι διάφορες εξισώσεις που το περιγράφουν να ενσωματωθούν σε μία νέα μορφή εξισώσεων που θα εφαρμόζονται σε όλα τα σταθερά τμήματα του προβλήματος. Αυτό μπορεί να γίνει με τη γνωστή συνάρτηση ενθαλπίας θερμοκρασίας του εκάστοτε PCM που χρησιμοποιείται. Η συνάρτηση αυτή καθορίζει το άθροισμα της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας που απαιτείται για την αλλαγή φάσης. Το μεγάλο πλεονέκτημα όμως της μεθόδου ενθαλπίας είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιοδήποτε υλικό και όχι μόνο με τα υλικά αλλαγής φάσης [63].

9.3 Μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας

Διάφορα PCMs που χρησιμοποιούνται σε κτίρια 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 απορροφηθεί 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 σε υψηλές θερμοκρασίες, που είναι πολύ σημαντική για θέματα πυροπροστασίας, περιλαμβάνει τη διαμόρφωση ενός σχετικά πολύπλοκου 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 και χρησιμοποιεί ένα μη αδιαβατικό θερμιδόμετρο, το οποίο είχε αναπτυχθεί νωρίτερα, για την μέτρηση της ενεργού θερμοχωρητικότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [67].

Με τη μέθοδο της ενεργού θερμοχωρητικότητας είναι επίσης δυνατό να περιγραφεί η μη ισοθερμοκρασιακή αλλαγή φάσης ενός PCM. Η ενεργός θερμοχωρητικότητα του υλικού $C_{p,eff}$ είναι 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 [63].

Το μέγεθος της ενεργού θερμοχωρητικότητας περιλαμβάνει τις έννοιες των χημικών αντιδράσεων και της αλλαγής φάσης. Λόγω της πολυπλοκότητας αυτών των εννοιών, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ακριβής μέτρηση της ενεργού θερμοχωρητικότητας δεν είναι μια απλή 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 ως τώρα [67]. Παρακάτω απεικονίζεται ένα τυπικό διάγραμμα αυτής της μεθόδου.



Σχήμα 9.3.1 Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της διαφορικής θερμοκρασίας [68].

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, είναι σαφές ότι, προκειμένου να αποφευχθεί μια άπειρη θερμοχωρητικότητα αλλά και να προωθηθεί η μέγιστη εξέλιξη της λανθάνουσας θερμότητας πρέπει να διατηρηθεί ένα θερμοκρασιακό εύρος. Ακόμα κι αν η μέθοδος αυτή

δεν αποτελεί ένα αρκετά ακριβές μοντέλο ισοθερμοκρασιακής διαδικασίας αλλαγής φάσης, η κατανομή Gauss επιτρέπει το φιλτράρισμα των αριθμητικών ταλαντώσεων, περιορίζοντας έτσι τα λάθη. Για αυτό το λόγο γίνεται χρήση της επίδρασης και των τριών καθορισμένων ζωνών αλλαγής φάσης (στενή, ενδιάμεση και πλατιά) στην προσομοιωτική διαδικασία [68].

Έχει διαπιστωθεί με πειραματικές διαδικασίες ότι τα διάφορα PCMs 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 μορφή της καμπύλης $C_{p,eff}(T)$ για τα υλικά με μικρή θερμομόνωση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την περιεκτικότητα σε οργανικές ενώσεις, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τις αλλαγές στη δομή και τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στη ζώνη των υψηλότερων θερμοκρασιών. Τα υλικά αυτά 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. Αντίθετα τα υλικά με μικρότερη περιεκτικότητα σε οργανικές ουσίες, συνήθως λιγότερο από 5%, δεν εμφανίζουν δραματικές αλλαγές στην καμπύλη $C_{p,eff}(T)$ [67].

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 PCM. Ειδικότερα, τα ελάχιστα στις καμπύλες $C_{p,eff}(T)$ παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, διότι απεικονίζουν 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 $C_{p,eff}$. Παρόλα αυτά όταν οι συνθήκες του πειράματος διατηρούνται σταθερές μπορούμε να παρατηρήσουμε έμμεσα τη εξάρτηση της ταχύτητας της αντίδρασης από την θερμοκρασία και να εντοπίσουμε με σχετική ακρίβεια στην καμπύλη του $C_{p,eff}$ το τμήμα εκείνο στο οποίο έχει ολοκληρωθεί η αντίδραση, κατά την διάρκεια της θέρμανσης του υλικού στον κλίβανο [67].

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι σχέσεις υπολογισμού της θερμοχωρητικότητας για την παραφίνη με την μέθοδο ενθαλπίας και με τη μέθοδο της ενεργού θερμοχωρητικότητας.

Πίνακας 9.3.1 Ειδική θερμοχωρητικότητα και συντελεστής συναγωγής για την παραφίνη

Paraffin $c_p(T)$	Melting	Solidification
Enthalpy method	$c_p(T) = \begin{cases} 24T^2 + 515T + 3606, & 10^\circ\text{C} \leq T < 20^\circ\text{C} \\ 1467^3 - 9123T + 191658, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 27^\circ\text{C} \\ 112857^2 - 652T + 9424, & 27^\circ\text{C} \leq T \leq 29^\circ\text{C} \\ 2400, & T > 29^\circ\text{C} \end{cases}$ $h_c = 75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \text{ when } T > 20^\circ\text{C}$	$c_p(T) = \begin{cases} 32T^2 - 671T + 4548, & 10^\circ\text{C} \leq T < 19^\circ\text{C} \\ 32057^2 - 124276T + 1207500, & 19^\circ\text{C} \leq T \leq 23^\circ\text{C} \\ -115437^2 + 536878T - 6197600, & 23^\circ\text{C} < T \leq 25^\circ\text{C} \\ -7374T + 194125, & 25^\circ\text{C} < T \leq 26^\circ\text{C} \\ 2400, & T > 26^\circ\text{C} \end{cases}$ $h_c = 0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Effective heat capacity method	$c_p(T) = \begin{cases} 1800, & T < 21 \\ 18067, & 21 \leq T \leq 28 \\ 2400, & T > 28 \end{cases}$ $h_c = 75.03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \text{ when } T > 21^\circ\text{C}$ $c_p(T) = \begin{cases} 1800, & T < 25 \\ 116866, & 25 \leq T \leq 27 \\ 2400, & T > 27 \end{cases}$ $h_c = 69 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \text{ when } T > 25^\circ\text{C}$	$c_p(T) = \begin{cases} 1800, & T < 20 \\ 26740, & 20 \leq T \leq 25 \\ 2400, & T > 25 \end{cases}$ $c_p(T) = \begin{cases} 1800, & T < 25 \\ 127698, & 25 \leq T \leq 27 \\ 2400, & T > 27 \end{cases}$ $h_c = 0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Κεφάλαιο 10

Πειραματική μελέτη ενδοδαπέδιας ηλεκτρικής θέρμανσης με χρήση πλακών PCM σταθερού σχήματος.

10.1 Εισαγωγή

Η πλειοψηφία των πόλεων της Βόρειας Κίνας έχει ως κύρια πηγή ενέργειας, για την θέρμανση των κατοικιών, τον άνθρακα ο οποίος όμως προκαλεί σοβαρή περιβαλλοντική μόλυνση. Το Πεκίνο αναζητούσε άλλη εναλλακτική μορφή ενέργειας φιλική προς το περιβάλλον για να εκμεταλλευτεί και κινήθηκε προς την ηλεκτρική ενέργεια αντί του άνθρακα για την ηλεκτρική χρήση στα νοικοκυριά. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός είναι ότι η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια εμφανίζει το μέγιστο της κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ της νυχτερινές ώρες είναι σαφώς μειωμένη. Αυτή η διαφορά ζήτησης απεικονίζεται και στο κόστος του ρεύματος το οποίο τις νυχτερινές ώρες κυμαίνεται στο 1/3-1/5 σε σχέση με το αντίστοιχο της ημέρας. Επομένως η μεταφορά της ηλεκτρικής κατανάλωσης από τις περιόδους αυξημένης ζήτησης σε περιόδους περιορισμένης ζήτησης μπορεί να αποφέρει μεγάλα οικονομικά οφέλη [54].

Όπως έχει αποδειχθεί από ορισμένες έρευνες, η θέρμανση του δαπέδου μέσω ακτινοβολίας μπορεί να αποτελέσει μια εναλλακτική και ταυτόχρονα οικονομική λύση [69]. Αυτή η μέθοδος θέρμανσης του δαπέδου έχει αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με το συμβατικό σύστημα θέρμανσης αέρα. Λόγω του ότι το σύστημα αυτό ενσωματώνεται στο σκελετό του κτιρίου αποφεύγεται η χρήση χώρου για την εγκατάσταση του [70]. Η θερμότητα άνεσης ρυθμίζεται από τη θερμοκρασία του χώρου η οποία με τη σειρά της είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα καθώς και της θερμοκρασίας των ακτινοβολούμενων επιφανειών. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι μπορεί να εξασφαλισθούν συνθήκες άνεσης με χαμηλότερη θερμοκρασία αέρα από μια μεγάλη επιφάνεια δαπέδου η οποία παρουσιάζει μειωμένες θερμικές απώλειες. Οι θερμοκρασίες στο κεφάλι και στα πόδια διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους. Επίσης οι διαφορές της θερμοκρασίας του αέρα στα διάφορα σημεία στο χώρο είναι μικρές και έτσι η κίνηση του αέρα καθώς και η μεταφορά σκόνης που αυτή προκαλεί είναι σχεδόν μηδαμινές. Έτσι εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα συστήματα θέρμανσης στο δάπεδο που λειτουργούν με ακτινοβολία

είναι φιλικότερα προς τα άτομα που βρίσκονται μέσα στο χώρο αλλά και προς το περιβάλλον σε σχέση με τα συμβατικά [54].

Η θερμική μάζα στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας τις περιόδους μειωμένης ζήτησης. Έτσι τα μεγάλα φορτία μετακινούνται από τις πρωινές στις βραδινές ώρες όπου το κόστος κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος είναι χαμηλότερο. Ο συνδυασμός της ενδοδαπέδιας θέρμανσης μέσω ακτινοβολίας και της θερμικής αποθήκευσης προσφέρει την δυνατότητα βελτίωσης της ενεργειακής αποτελεσματικότητας των κτιρίων χωρίς μείωση της θερμικής άνεσης των ατόμων που βρίσκονται σε αυτά [54].

Για την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας χρησιμοποιούνται πυκνά υλικά όπως το σκυρόδεμα. Ο Athienitis και οι συνεργάτες του μελέτησαν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης με αποθήκευση θερμικής ενέργειας του οποίου η κυρίως θερμική μάζα αποτελούνταν από άμμο πάχους 1cm και πλάκες σκυροδέματος πάχους 4cm [71]. Τα πυκνά υλικά που επιλέγονται για τέτοιου είδους εφαρμογές μπορεί να προκαλέσουν έντονη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας σε σχέση με τα PCMs. Τα PCMs έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά λανθάνουσας θερμότητας με πολύ μικρότερη θερμοκρασιακή διακύμανση και έτσι δημιουργούν θερμική άνεση καλύτερης ποιότητας [54].

Οι Farid και Kong εφάρμοσαν ένα είδος ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ενσωματωμένο $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, το οποίο το τοποθέτησαν στο σκυρόδεμα του δαπέδου και έτσι πέτυχαν υψηλή θερμική απόδοση [56]. Ωστόσο το συνηθισμένο PCM που χρησιμοποιείται σε τοίχους και πατώματα πρέπει να ενσωματωθεί ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος της διαρροής. Αυτό συνεπάγεται επιπρόσθετη θερμική αντίσταση και επιπλέον κόστος που αποτελούν μεγάλα προβλήματα στην εφαρμογή του PCM [54].

Τα PCMs σταθερού σχήματος είναι ένα είδος συνθετικού υλικού PCM και κάποιου άλλου βοηθητικού υλικού με αναλογία του PCM 70-85% κατά μάζα. Όσο η θερμοκρασία λειτουργίας είναι κάτω από το σημείο τήξης του βοηθητικού υλικού τόσο το συνθετικό υλικό είναι σε θέση να διατηρήσει το σχήμα του οπότε και το PCM μεταβαίνει από την στερεή στην υγρή φάση. Συνεπώς αυτός ο τύπος PCM είναι κατάλληλος για θερμική αποθήκευση σε κτίρια χωρίς ενσωμάτωση. Λόγω του χαμηλού κόστους του και των καλών θερμικών του ιδιοτήτων προκάλεσε το ενδιαφέρον μελετητών οι οποίοι ερεύνησαν την προπαρασκευαστική του διαδικασία τα τελευταία χρόνια [72,73].

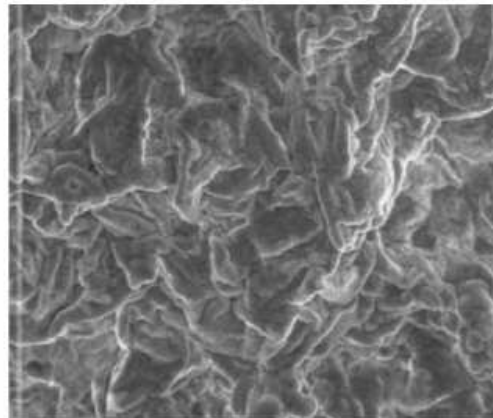
Σκοπός της έρευνας ήταν :

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

Ακόμη δημιουργήθηκε ένα νέο είδος πλακών PCM σταθερού σχήματος, το οποίο αποτελείται από 25% κατά μάζα παραφίνη σαν διασκορπισμένο PCM και από 25% κατά μάζα πολυαιθυλένιο σαν βοηθητικό υλικό. Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης της παραφίνης είναι 52 °C και η θερμότητα τήξης είναι 200 kJ/kg . Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μορφή και η μικροδομή της πλάκας του PCM [54].



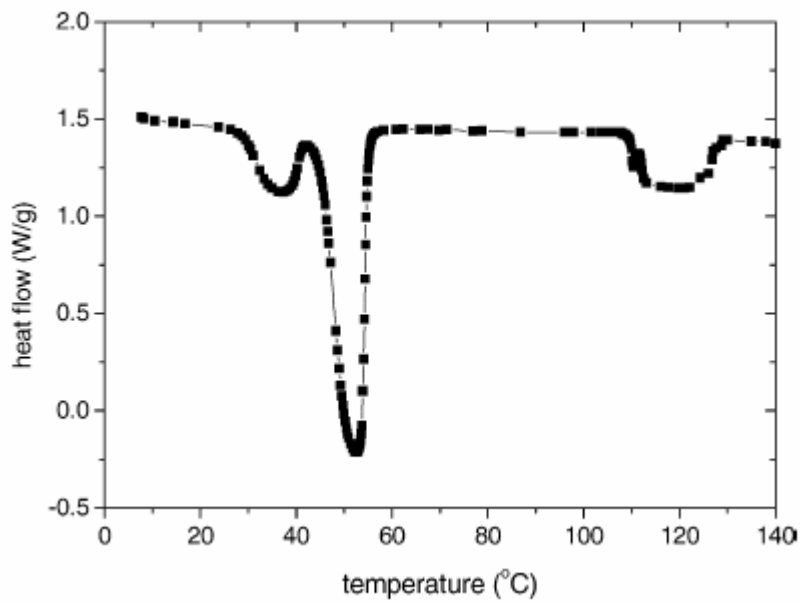
(a) appearance of a plate



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

Σχήμα 10.1.1 Φωτογραφίες των πλακών PCM σταθερού σχήματος [54].

Για να μετρηθούν η θερμοκρασία αλλαγής φάσης t_m και η θερμότητα τήξης H_m χρησιμοποιήθηκαν ως όργανα μέτρησης τα διαφορικά θερμιδόμετρα. Οι δυο κορυφές των καμπυλών DSC δείχνουν την θερμοκρασία αλλαγής φάσης της παραφίνης και του πολυαιθυλενίου.



Σχήμα 10.1.2 Καμπύλες DSC για το PCM σταθερού σχήματος [54].

Πίνακας 10.1.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM σταθερού σχήματος [54].

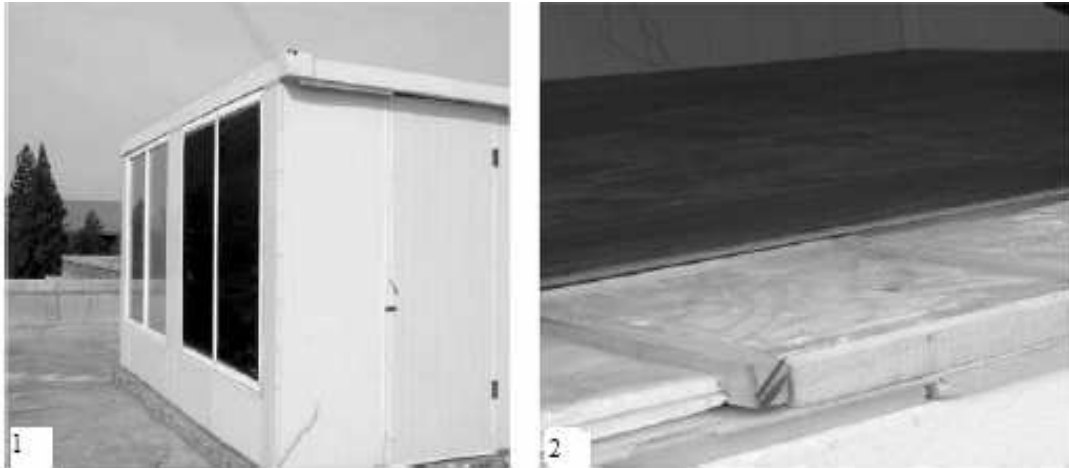
Thermophysical properties of the shape-stabilized PCM			
ρ (kg m^{-3})	C_p ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	H_m (kJ kg^{-1})	k ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
850	2.0	150	0.15

10.2 Πειραματική μελέτη ενός πρότυπου συστήματος

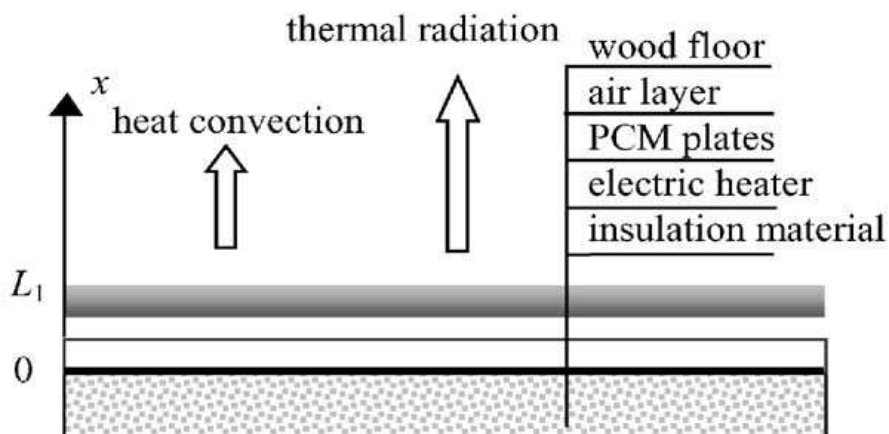
10.2.1 Περιγραφή του πρότυπου σπιτιού και του συστήματος θέρμανσης

Το πειραματικό σπίτι στο οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα καθώς και το σύστημα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης με το οποίο εξοπλίστηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι διαστάσεις του σπιτιού ήταν : 3m(βάθος) x 2m(πλάτος) x 2m(ύψος). Επίσης ένα υαλοπίνακα με διπλό τζάμι διαστάσεων 1,6m x 1,5m, νοτίου προσανατολισμού το οποίο

καλυπτόταν από μαύρη κουρτίνα. Η οροφή καθώς και οι τοίχοι αποτελούνται από 100mm πολυστερίνη που είναι ενσωματωμένη σε ένα μεταλλικό περίβλημα. Το σύστημα της ενδοδαπέδιας ηλεκτρικής θέρμανσης περιλαμβάνει 120mm πολυστερίνη, τους ηλεκτρικούς θερμαντήρες, 15mm PCM, μερικούς ξύλινους υποστηρικτές, 10mm στρώμα αέρα και 8mm ξύλινο πάτωμα [54].



Σχήμα 10.2.1.1 Φωτογραφίες 1) του πειραματικού σπιτιού και 2) του συστήματος θέρμανσης [74].



Σχήμα 10.2.1.2 Απεικόνιση του συστήματος ενδοδαπέδιας ηλεκτρικής θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος [74].

Ακολουθούν φωτογραφίες των θερμαντήρων , πλακών PCM και του ξύλινου πατώματος που αποτελούν το σύστημα της θέρμανσης.



α



β



γ

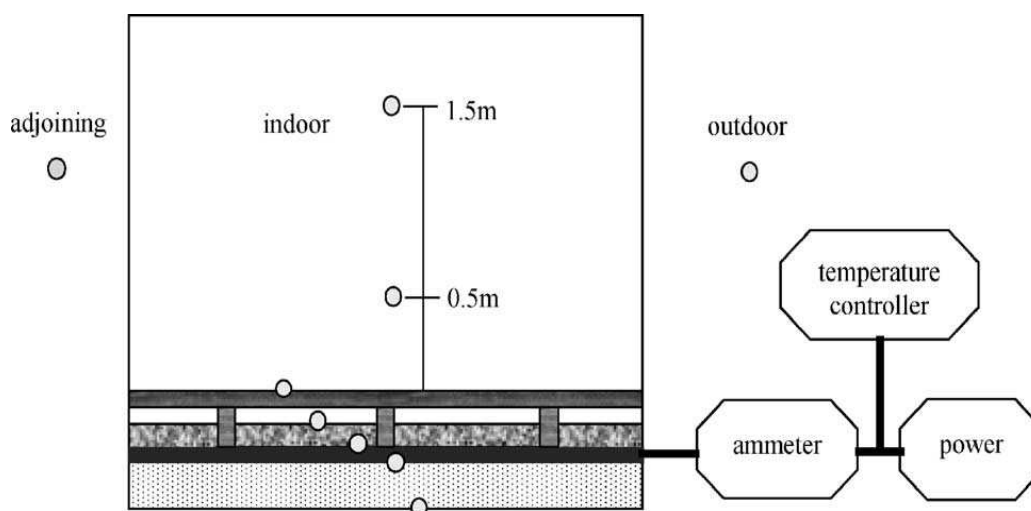
Σχήμα 10.2.1.3 Φωτογραφίες από τη δομή του συστήματος α) Ηλεκτρικοί θερμαντήρες , β) πλάκες PCM σταθερού σχήματος και γ) ξύλινο πάτωμα [54].

10.2.2 Όργανα μέτρησης

Τα πειράματα που έγιναν είχαν στόχο τον καθορισμό της θερμικής συμπεριφοράς του συστήματος θέρμανσης και της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου. Η ακόλουθη μετρητική διάταξη εφαρμόστηκε για τις μετρήσεις και αποτελείται από:

- Dataloggers (για την καταγραφή των δεδομένων)
- Υπολογιστές (για την επεξεργασία των δεδομένων)
- Ελεγκτές θερμοκρασίας (για να ελέγχουν πότε είναι εντός ή εκτός λειτουργίας ο ηλεκτρικός θερμαντήρας)
- Θερμικό ραδιόμετρο (για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας)
- Αμπερόμετρο (για την καταγραφή της ηλεκτρικής κατανάλωσης)

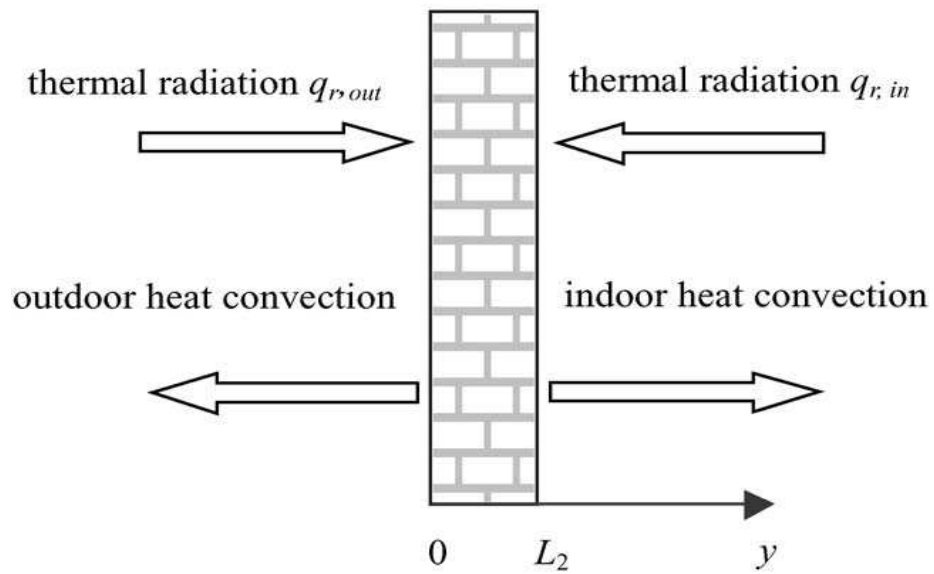
Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει την κατανομή της θερμοκρασίας και την πειραματική διάταξη. Δυο από τους μετρητές είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικά ύψη (0,5 και 1,5 m) στο σπίτι. Η μετρούμενη ηλιακή ακτινοβολία καταγράφεται κάθε ώρα με το θερμικό ραδιόμετρο [54].



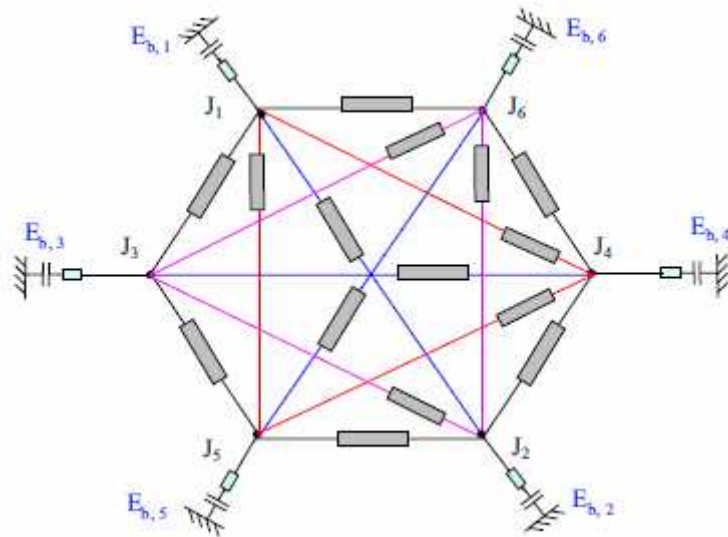
Σχήμα 10.2.2.1 Πειραματική διάταξη [54].

10.2.3 Πειραματική μελέτη

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Πανεπιστήμιο Tsinghua τον Απρίλιο του 2003 και η εσωτερική πηγή θερμότητας όταν λειτουργούσε όλη η εγκατάσταση ήταν 150W. Η διάταξη δούλεψε για 6 ημέρες με νυκτερινή ηλεκτρική θέρμανση και στη συνέχεια για 4 ημέρες χωρίς ηλεκτρική θέρμανση. Κατά την διάρκεια των θερμών ημερών οι θερμαντήρες σταματούσαν τη λειτουργία όταν η θερμοκρασία τους ξεπερνούσε τους 70°C και λειτουργούσαν ξανά όταν η θερμοκρασία τους έπεφτε κάτω από τους 55 °C κατά την περίοδο που ήταν απαραίτητη η θέρμανση και διαρκούσε από τις 23:00 ως τις 8:00 [54].



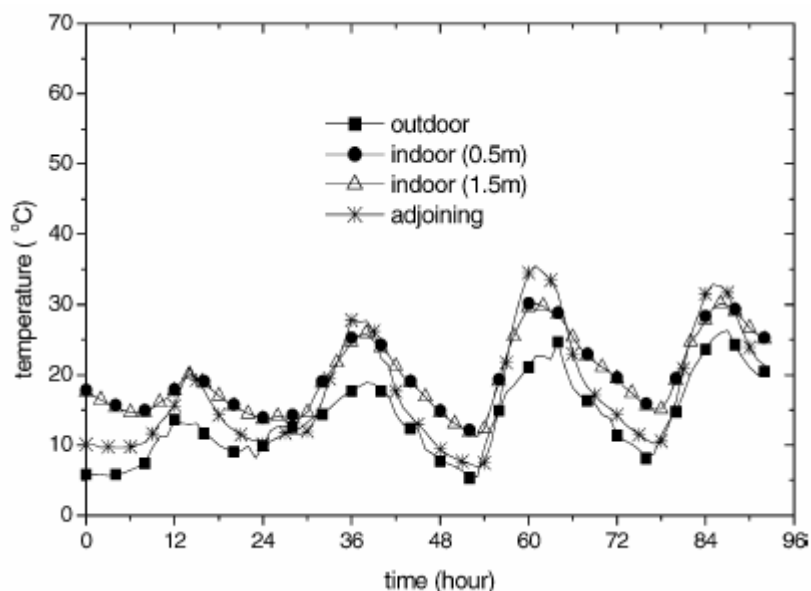
Σχήμα 10.2.3.1 Απεικόνιση της μεταφοράς θερμότητας στις επιφάνειες των εξωτερικών τοίχων [74].



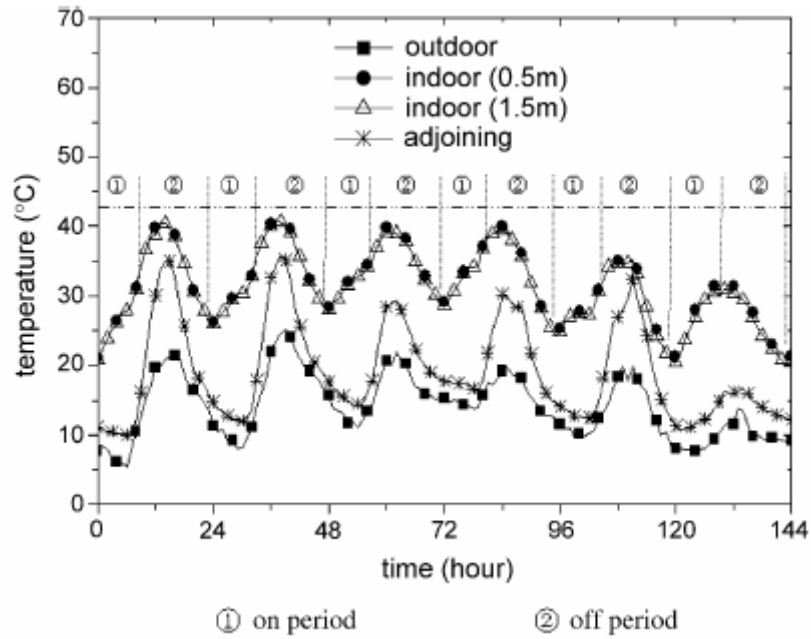
Σχήμα 10.2.3.2 Απεικόνιση της ακτινοβολίας μεταξύ των τοίχων, της οροφής και του δαπέδου του δωματίου [74].

10.3 Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Η περίοδος που στο Πεκίνο απαιτείται θέρμανση είναι από 15 Νοεμβρίου ως 15 Μαρτίου. Η μέση θερμοκρασία την περίοδο αυτή είναι περίπου $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Παρόλο αυτά τα πειράματα διεξήχθησαν τον Απρίλιο που η μέση θερμοκρασία του είναι $13,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ και συνεπώς η μετρούμενη εσωτερική θερμοκρασία ήταν υψηλή. Το σχήμα 10.3.1 δείχνει ότι η μέση εσωτερική θερμοκρασία του αέρα είναι $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ χωρίς να είναι σε λειτουργία η ηλεκτρική ενδοδαπέδια θέρμανση με θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ημέρας και νύχτας $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αντίθετα το σχήμα 10.3.2 δείχνει ότι η μέση εσωτερική θερμοκρασία του αέρα είναι $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ όταν είναι σε λειτουργία η ηλεκτρική ενδοδαπέδια θέρμανση με ίδια θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ημέρας και νύχτας $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Οπότε γίνεται κατανοητό ότι το σύστημα θέρμανσης αυξάνει την εσωτερική θερμοκρασία χωρίς να μεταβάλλεται η τιμή της θερμοκρασιακής διαφοράς [54].

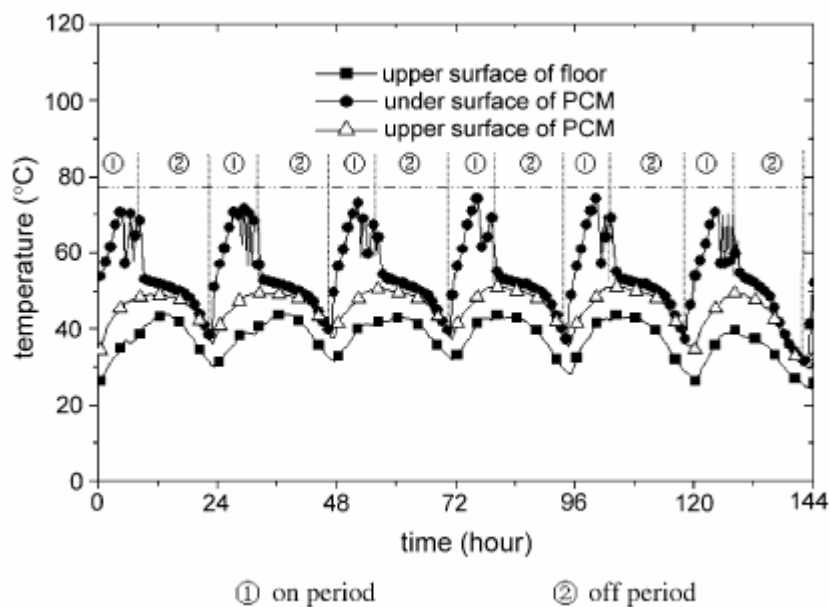


Σχήμα 10.3.1 Μετρούμενη θερμοκρασία αέρα χωρίς ηλεκτρική θέρμανση [54].



Σχήμα 10.3.2 Μετρούμενη θερμοκρασία αέρα με νυχτερινή ηλεκτρική θέρμανση [54].

Η θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος του PCM στην επιφάνεια διατηρήθηκε σταθερά πάνω από τους 45°C για διάστημα μεγαλύτερο των 10 ωρών από τη στιγμή που σταμάτησαν τη λειτουργία τους οι θερμαντήρες στις 8:00. Η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα δυο εσωτερικά σημεία μέτρησης ήταν λιγότερη από 0,5 °C κάτι το οποίο υποδηλώνει υψηλό βαθμό θερμικής άνεσης [54].



Σχήμα 10.3.3 Μετρούμενη θερμοκρασία του δαπέδου και του PCM με νυχτερινή ηλεκτρική θέρμανση [54].

Από τη διεξαγωγή του πειράματος μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Το σύστημα της ηλεκτρικής θέρμανσης κατάφερε να αυξήσει την εσωτερική θερμοκρασία χωρίς να μεταβληθεί η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ημέρας και νύχτας.
2. Η θερμοκρασία των πλακών του PCM διατηρήθηκε σταθερή κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης για μεγάλο χρονικό διάστημα αφού πριν οι θερμαντήρες είχαν σταματήσει τη λειτουργία τους. Περισσότερο από το μισό της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την θέρμανση του σπιτιού μεταφέρθηκε από την περίοδο υψηλής ζήτησης στην περίοδο μειωμένης ζήτησης αποφέροντας μεγάλο οικονομικό όφελος λόγω του χαμηλότερου κόστους που έχει τότε το ηλεκτρικό ρεύμα.
3. Η μικρή εσωτερική θερμοκρασιακή διαφορά κατά την κατακόρυφη διεύθυνση οφείλεται στην ικανότητα του συστήματος της ενδοδαπέδιας θέρμανσης να θερμάνει τον εσωτερικό αέρα ομοιόμορφα.

Κεφάλαιο 11

Μοντελοποίηση και προσομοίωση της θερμικής απόδοσης δαπέδου με χρήση PCM σταθερού σχήματος εφαρμοσμένο σε ηλιακό παθητικό σύστημα κτιρίου [75] .

11.1 Εισαγωγή

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια πηγή ενέργειας, χρονικά εξαρτώμενη, διαθέτει διακοπτόμενο χαρακτήρα και εμφανίζει το μέγιστό της τις μεσημεριανές ώρες. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας είναι σημαντική για την εξισορρόπηση των διακυμάνσεων της ηλιακής ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η αποθήκευση αυτή γίνεται στους τοίχους, την οροφή και το δάπεδο και μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη κατάλληλου PCM σε αυτά. Με τη χρήση του PCM βελτιώνεται το επίπεδο θερμικής άνεσης καθώς μειώνεται η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα σε κάποιο επιθυμητό εύρος για μεγάλη χρονική περίοδο.

Τα PCMs σταθερού σχήματος, που αναφέρθηκαν και στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ένα συνθετικό είδος PCM που αποτελείται από ένα μακρομοριακό υλικό, το οποίο θεωρείται βοηθητικό, και μια παραφίνη ενσωματωμένη σε μικροκάψουλες στο βοηθητικό υλικό. Το συνθετικό υλικό μπορεί να διατηρήσει σταθερό το σχήμα του όταν η παραφίνη υφίσταται αλλαγή φάσης. Στα PCMs σταθερού σχήματος ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος διαρροής σε σχέση με τα συμβατικά PCMs. Το PCM αυτό μπορεί να έχει τη μορφή πλακών ή μπορεί να προστεθεί κατευθείαν στον οπλισμό του σκυροδέματος.

Στη συγκεκριμένη μελέτη που θα αναλυθεί παρακάτω, δημιουργήθηκε ένα νέο είδος PCM σταθερού σχήματος το οποίο περιείχε 70% κατά βάρος παραφίνη σαν διασκορπισμένο PCM, 15% κατά βάρος πολυαιθυλένιο και 15% κατά βάρος στυρένιο-βουταδιένιο-στυρένιο (SBS) ως βοηθητικό υλικό. Ένα ακόμη είδος PCM σταθερού σχήματος εγκατεστημένο στο δάπεδο εφαρμόστηκε για ένα παθητικό ηλιακό σύστημα σε κτίρια και ερευνήθηκε πειραματικά [76]. Ωστόσο, είναι αδύνατο να μελετηθεί η θερμική απόδοση διαφόρων κτιρίων σε άλλες περιοχές, όπου τα πειράματα λαμβάνουν χώρα μέσα σ' ένα σπίτι. Μια επιπλέον δυσκολία είναι ο διαχωρισμός των επιδράσεων διαφόρων παραγόντων στην θερμική απόδοση των ενδοδαπέδιων συστημάτων. Αναγκαία, εκτός των

πειραμάτων, απαραίτητη κρίνεται η μοντελοποίηση και η προσομοίωση ώστε να εξακριβωθεί η εγκυρότητα των πειραμάτων.

Οι Farid και Kong εφάρμοσαν μια μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή για να περιγράψουν την θερμότητα που μεταφέρθηκε στο σκυρόδεμα καθώς και στο σκυρόδεμα που είχε ενσωματωμένο το PCM. Βασίστηκαν στην υπόθεση ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα του PCM ήταν ανάλογη με τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της τήξης και της πήξης του υλικού [77].

Ακολουθεί στην επόμενη σελίδα ο πίνακας που περιλαμβάνει τις μονάδες μέτρησης καθώς και την ανάλυση των συμβόλων ώστε να γίνουν κατανοητές οι εξισώσεις που θα παρατεθούν αργότερα.

Το μοντέλο της ενθαλπίας είναι απλούστερο για τους υπολογισμούς κατά την αλλαγή φάσης και λαμβάνει ως μεταβλητή την ενθαλπία αντί της θερμοκρασίας ή της θερμοχωρητικότητας. Οι Shansundar και Sparrow απέδειξαν την ισοδυναμία της μαθηματικής παρουσίασης του μοντέλου της ενθαλπίας και των συμβατικών εξισώσεων της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στην στερεή και στην υγρή κατάσταση, καθώς επίσης και στην διεπιφάνεια υγρού-στερεού [78]. Για το λόγο αυτό σε αυτή την μελέτη ακολουθήθηκε το μοντέλο της ενθαλπίας. Τα σημαντικότερα σημεία της μελέτης αυτής είναι:

1. η ανάπτυξη ενός μοντέλου ανάλυσης της θερμικής απόδοσης ενός σταθερού σχήματος PCM που είναι εγκατεστημένο στο δάπεδο
2. η μελέτη της επίδρασης των διαφόρων παραγόντων στην θερμική απόδοση του συστήματος
3. η εξέταση της δυνατότητας εφαρμογής του συστήματος σε περιοχές της Κίνας με διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες
4. η δημιουργία μιας μεθόδου προσομοίωσης που θα χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος

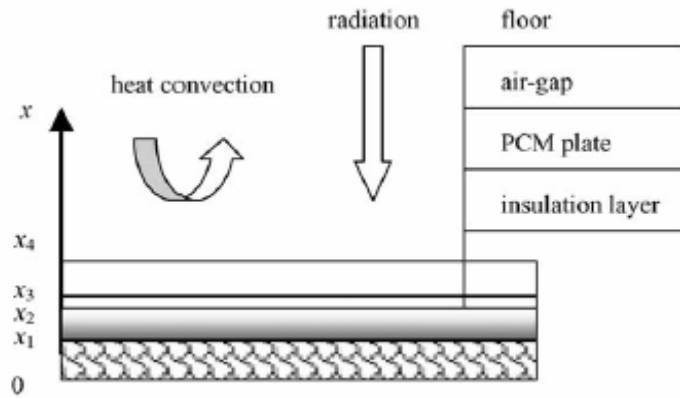
Πίνακας 11.1.1 Μονάδες μέτρησης και ανάλυση συμβόλων

Nomenclature	
A	area (m^2)
ACH	air change per hour (1/h)
c_p	specific heat (kJ/(kg K))
g	gravity acceleration ($9.8 m/s^2$)
Gr	Grashof number
h	convective heat transfer coefficient ($W/(m^2 K)$)
H	enthalpy (kJ/kg)
H_m	heat of fusion (kJ/kg)
k	thermal conductivity ($W/(m K)$)
L	thickness (mm)
Nu	Nusselt number
Pr	Prandtl number
q	heat flux (W/m^2)
Q	heat transfer rate (W)
T	temperature ($^{\circ}C$)
U	overall heat transfer coefficient ($W/(m^2 K)$)
V	cubage (m^3)
<i>Greek symbols</i>	
α	air coefficient of volume expansion (1/K)
ρ	density (kg/m^3)
τ	time (s)
ν	air viscosity (m^2/s)
<i>Subscripts</i>	
a	air
f	floor
gap	air-gap
in	indoor
init	initial
l	liquid state of PCM
leak	air leak from room
m	phase transition state of PCM
out	outdoor
PCM	phase change material
r	radiation
R	room
s	solid state of PCM
w	wall
w, s	wall surface
win	window

11.2 Ανάλυση μεταφοράς θερμότητας

Για διευκόλυνση της ανάλυσης έγιναν οι ακόλουθες απλουστευμένες παραδοχές:

- ▶ Η μεταφορά θερμότητας μέσω των τοίχων, της οροφής και του δαπέδου θεωρείται μονοδιάστατη.
- ▶ Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών του σκελετού του κτιρίου είναι σταθερές εκτός μόνο από την ειδική θερμότητα του PCM κατά την αλλαγή φάσης.
- ▶ Το PCM σταθερού σχήματος είναι θερμικά μονωμένο κάτω από την επιφάνεια.



Σχήμα 11.2.1 Απεικόνιση του δαπέδου με το PCM σταθερού σχήματος.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας στο δάπεδο είναι:

$$\rho_f c_{p,f} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = k_f \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (11.2.1)$$

Η εξίσωση 11.2.1 έχει ως οριακή συνθήκη την ακόλουθη:

$$k_f \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} = h_f (T_{in}(\tau) - T(x, \tau)) + q_r(\tau) \text{ at } x = x_4 \quad (11.2.1-\alpha)$$

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

Η h_r υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση [79]:

$$h_f = 2.5 \times \sqrt[4]{T(x_4, \tau) - T_{in}(\tau)} \quad (11.2.1-\beta)$$

$$k_f \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} = q_{\text{gap}}(\tau) + \varepsilon \sigma ((Tx_2, \tau)^4 - T(Tx_2, \tau)^4) \quad (11.2.1-\gamma)$$

Για το κενό του αέρα η μεταφορά θερμότητας υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση [80]:

$$q_{\text{gap}}(\tau) = \text{Nu} \frac{k_a}{L_{\text{gap}}} (T(x_2, \tau) - T(x_3 - \tau)) \quad (11.2.2)$$

όπου

$$\text{Nu} = 0.212(GrPr)^{1/4} \quad (11.2.2-\alpha)$$

$$Gr = 1 \times 10^4 \text{ to } 4.6 \times 10^5$$

$$\text{Nu} = 0.061(GrPr)^{1/3}, \quad Gr > 4.6 \times 10^5 \quad (11.2.2-\beta)$$

$$\text{Nu} = 1, \quad GrPr \leq 1700 \quad (11.2.2-\gamma)$$

$$Gr = \frac{g\alpha(T(x_2, \tau) - T(x_3, \tau))L_{\text{gap}}^3}{V^2} \quad (11.2.3)$$

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

$$\rho_{\text{PCM}} \frac{\partial H}{\partial \tau} = k_{\text{PCM}} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (11.2.4)$$

και η ενθαλπία του PCM δίνεται ως:

$$H = \int_{T_0}^{T_1} c_{p,s} dT + \int_{T_1}^{T_2} c_{p,m} dT \quad (11.2.4-\alpha)$$

Το θερμοκρασιακό εύρος της αλλαγής φάσης κυμαίνεται από T_1 σε T_2 .

Η εξίσωση 11.2.4 έχει την ακόλουθη οριακή συνθήκη:

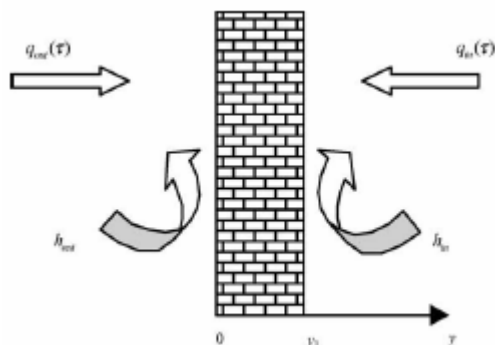
$$k_{PCM} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} = -q_{\text{gap}}(\tau) + \varepsilon \sigma ((Tx_3, \tau)^4 - T(Tx_2, \tau)^4)$$

at $x = x_2$

$$k_{PCM} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} = 0, \quad \text{at } x = x_1 \quad (11.2.4-\beta)$$

Η αρχική συνθήκη είναι η εξής:

$$T(x, \tau)|_{\tau=0} = T_{\text{init}} \quad (11.2.5)$$



Σχήμα 11.2.2 Απεικόνιση μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια των τοίχων.

Η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας για τους τοίχους είναι:

$$\rho_w c_{p,w} \frac{\partial T(y, \tau)}{\partial \tau} = k_w \frac{\partial^2 T(y, \tau)}{\partial y^2} \quad (11.2.6)$$

$$q_{\text{out}}(\tau) + h_{\text{out}}(T_{\text{out}}(\tau) - T(y, \tau)) = -k_w \frac{\partial T(y, \tau)}{\partial y}, \quad \text{at } y = 0 \quad (11.2.6-\alpha)$$

$$q_{\text{in}}(\tau) + h_{\text{in}}(T_{\text{in}}(\tau) - T(y, \tau)) = -k_w \frac{\partial T(y, \tau)}{\partial y}, \quad \text{at } y = y_1 \quad (11.2.6-\beta)$$

Η αρχική συνθήκη είναι η εξής:

$$T(y, \tau)|_{\tau=0} = T_{init} \quad (11.2.7)$$

Για τον εξωτερικό τοίχο, q_{in} και q_{out} είναι η εσωτερική και εξωτερική συνολική θερμική ακτινοβολία αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 11.2.2.

Το μοντέλο του εσωτερικού αέρα βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$c_{p,a} \rho_a V_R \frac{dT_a(\tau)}{d\tau} = \sum_{i=1}^N Q_{w,s}^i + Q_{leak} + Q_{win} \quad (11.2.8)$$

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 την διαρροή του αέρα
- ▶ Q_{win} είναι ο δείκτης μεταφοράς θερμότητας μέσω των παραθύρων

Τα $Q_{w,s}$, Q_{leak} , Q_{win} δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$Q_{w,s} = h_{in} \times (T_{w,s}(\tau) - T_{in}(\tau)) \times A_{w,s} \quad (11.2.9)$$

$$Q_{leak} = c_{p,a} \rho_a V_R \times ACH \times (T_{out}(\tau) - T_{in}(\tau)) / 3600 \quad (11.2.10)$$

$$Q_{win} = U_{win} \times (T_{out}(\tau) - T_{in}(\tau)) \times A_{win} \quad (11.2.11)$$

όπου

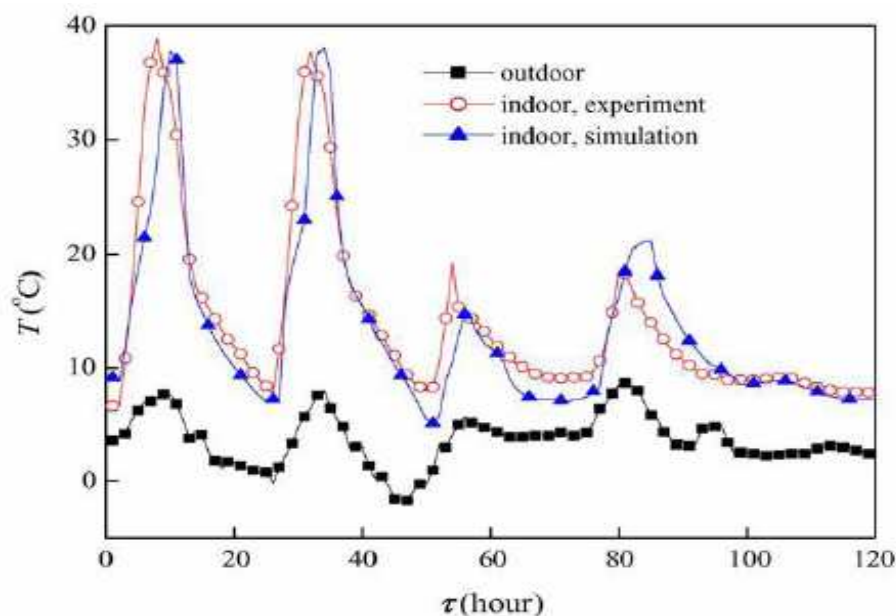
- ▶ $T_{w,s}$ είναι η θερμοκρασία στην επιφάνεια του τοίχου, της οροφής ή του δαπέδου
- ▶ $A_{w,s}$ είναι η επιφάνεια του τοίχου, της οροφής ή του δαπέδου

- ▶ U_{win} είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
- ▶ A_{win} είναι η επιφάνεια των υαλοπινάκων

Οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω μπορούν να επιλυθούν αριθμητικά με τη μέθοδο Gauss-Seidel. Για να διασφαλιστεί η απαραίτητη ακρίβεια και για την εξάλειψη των λαθών, εφαρμόστηκε ένα πλήρως πεπλεγμένο σχήμα.

11.3 Εξακρίβωση της εγκυρότητας του μοντέλου

Για να διερευνηθεί η εγκυρότητα του μοντέλου κατασκευάστηκε ένα πειραματικό δωμάτιο με PCM σταθερού σχήματος στο πανεπιστήμιο Tsinghua στο Πεκίνο. Οι διαστάσεις του δωματίου ήταν 3m (βάθος) x 2m (πλάτος) x 2m (ύψος) και επίσης διέθετε έναν υαλοπίνακα με διπλό τζάμι, διαστάσεων 1,6 m x 1,5 m και νοτίου προσανατολισμού. Η οροφή και οι τοίχοι περιείχαν 100mm πολυστερίνη. Το δάπεδο αποτελούνταν από 8 mm PCM και ένα στρώμα 50 mm πολυστερίνη. Τα πειράματα διεξήχθησαν από 15 Οκτωβρίου ως 15 Δεκεμβρίου 2003. Η εξωτερική θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία μετρήθηκαν και έγινε η εισαγωγή τους στο μοντέλο της προσομοίωσης με σκοπό να υπολογισθούν οι εσωτερικές θερμοκρασίες. Τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατίθενται στην εικόνα 11.3.1. Με μια απλή παρατήρηση φαίνεται ότι τα αποτελέσματα συμφωνούν μεταξύ τους.



Σχήμα 11.3.1 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρούμενων αποτελεσμάτων του πειραματικού δωματίου.

11.4 Επίδραση των διαφόρων παραγόντων στην θερμική απόδοση του δωματίου

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την θερμική απόδοση του πειραματικού δωματίου είναι η θερμοκρασία τήξης, η θερμότητα πήξης, η θερμική αγωγιμότητα και το πάχος του στρώματος του PCM. Μέσω των παραμετρικών μελετών μπορεί να εξακριβωθεί η επίδραση του κάθε παράγοντα στην θερμική απόδοση. Οι διαστάσεις του δωματίου προσομοίωσης είναι 5m (βάθος) x 5m(πλάτος) x 3m(ύψος). Υπάρχει επίσης ένας τοίχος με γυάλινη κουρτίνα και νότιο προσανατολισμό καθώς και τρεις τοίχοι με γύψο πάχους 100mm. Το σύστημα του δαπέδου περιλαμβάνει:

- ▶ 50 mm στρώμα μόνωσης πολυστερίνης
- ▶ 20 mm στρώμα PCM
- ▶ 10 mm πλακάκια

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των τοίχων και του PCM φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 11.4.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες των τοίχων και του PCM.

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	–

Το λογισμικό Medra που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς, μπορεί να προσφέρει κλιματικά δεδομένα από 193 περιοχές στην Κίνα που βασίζονται σε καταγραφές των κλιματικών δεδομένων που έγιναν τα τελευταία 30 χρόνια. Μέσω του προγράμματος δόθηκαν τα κλιματικά δεδομένα του χειμώνα για την μελέτη της προσομοίωσης.

Θερμοκρασία τήξης του PCM

Πολύ σημαντική είναι η επιλογή του PCM με θερμοκρασία τήξης κατάλληλη ώστε να γίνει η ενσωμάτωση του στο δάπεδο. Για συγκεκριμένα κτίρια και συγκεκριμένες συνθήκες, αν η θερμοκρασία τήξης είναι υπερβολικά υψηλή τότε το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται στο PCM από την ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά μικρό. Αντίθετα αν η θερμοκρασία τήξης είναι υπερβολικά χαμηλή, τότε δύσκολα διατηρείται η εσωτερική

θερμοκρασία σε κάποιο επίπεδο θερμικής άνεσης κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών. Οπότε προκύπτει ότι για δεδομένο κλίμα μιας περιοχής υπάρχει μια βέλτιστη θερμοκρασία τήξης του PCM. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι για περιοχές με διαφορετικά κλίματα οι βέλτιστες θερμοκρασίες τήξης διαφέρουν. Στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάστηκαν τρεις πόλεις (Urumchi, Beijing και Shanghai).

Βάσει της ανάλυσης της στιγμιαίας εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα χωρίς PCM , το θερμοκρασιακό εύρος τήξης του PCM για τις τρεις πόλεις ήταν προκαθορισμένο όπως φαίνεται και στον πίνακα 11.4.2.

Πίνακας 11.4.2 Εσωτερικές θερμοκρασίες χωρίς PCM και εύρος τήξης .

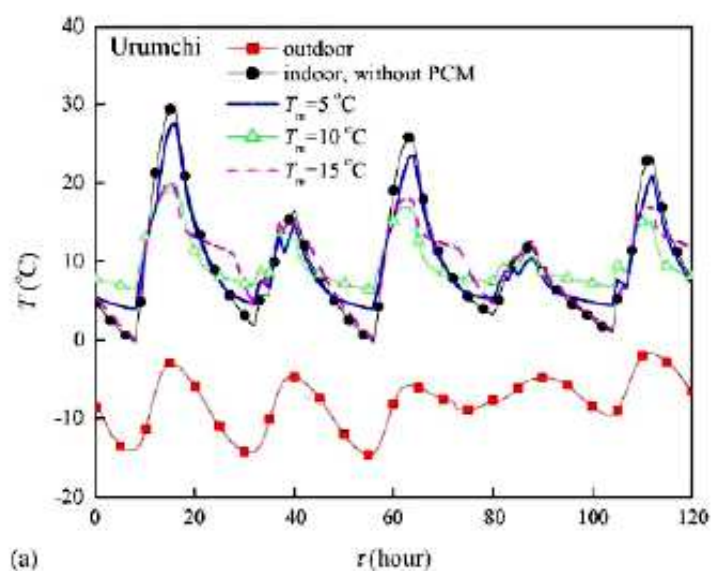
	Urumchi	Beijing	Shanghai
Indoor temperature without PCM (°C)	-0.3–29.4	8.5–37.2	11.6–45.8
(Range of melting point (°C)	5–15	15–23	23–30

Η κατάλληλη θερμοκρασία τήξης επιλέχθηκε με κριτήριο την μικρότερη διακύμανση που υφίσταται η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα ανάμεσα σε διάφορες περιπτώσεις με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

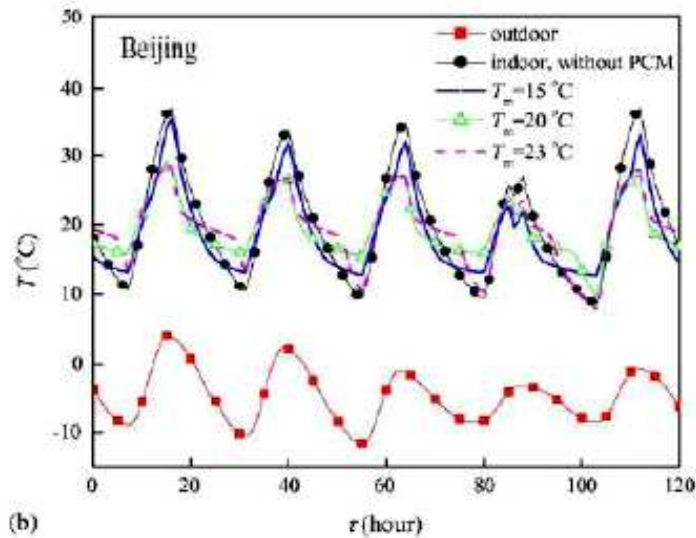
Πίνακας 11.4.3 Εσωτερικές θερμοκρασίες με PCM με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης στις τρεις πόλεις.

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

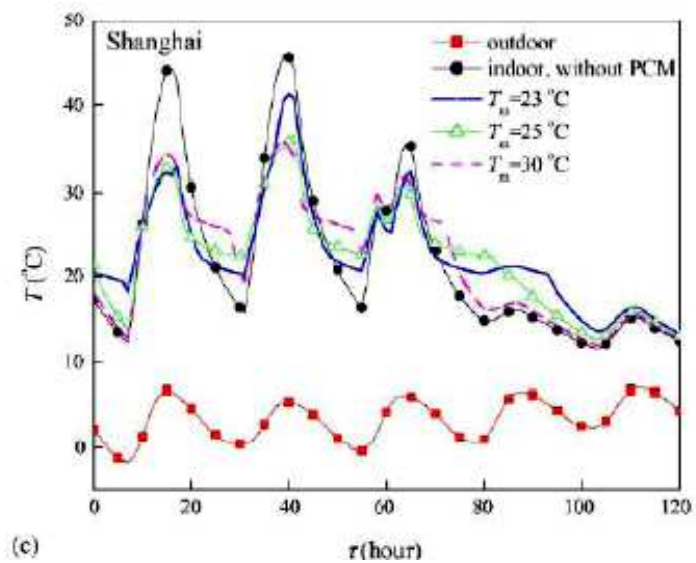
Γίνεται φανερό από τον πίνακα 11.4.3 ότι οι βέλτιστες θερμοκρασίες τήξης για τις πόλεις Urumchi, Πεκίνο, Σαγκάη είναι 10, 20 και 25 °C . Η βέλτιστη αξία της θερμοκρασίας τήξης είναι περίπου ίση με το μέσο όρο της θερμοκρασίας ενός δωματίου Σαγκάη, η οποία διαφέρει ανάλογα με τον σκελετό του εκάστοτε κτιρίου, την εποχή του χρόνου και την τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα για 5 μέρες ήταν 20 °C , όπως φαίνεται στο σχήμα 11.4.1 , αλλά οι δυο τελευταίες μέρες (από 73 μέχρι 120 h) ήταν συνεφιασμένες οπότε θα πρέπει να διαγραφούν από την στατική ανάλυση. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα για τις τρεις πρώτες μέρες ήταν 25 °C, κάτι που αποδεικνύει και τη σημασία της επιλογής της κατάλληλης θερμοκρασίας τήξης στην περιοχή της Σαγκάης. Ο σκοπός της μελέτης μόνο των ημερών με ηλιοφάνεια είναι ότι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια συνεφιασμένων ημερών δε μπορεί να απορροφηθεί υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας από το PCM.



Σχήμα 11.4.1.α Κατανομή της θερμοκρασίας με χρήση διαφορετικής θερμοκρασίας τήξης του PCM για το Urumchi.



Σχήμα 11.4.1.β Κατανομή της θερμοκρασίας με χρήση διαφορετικής θερμοκρασίας τήξης του PCM για το Πεκίνο.

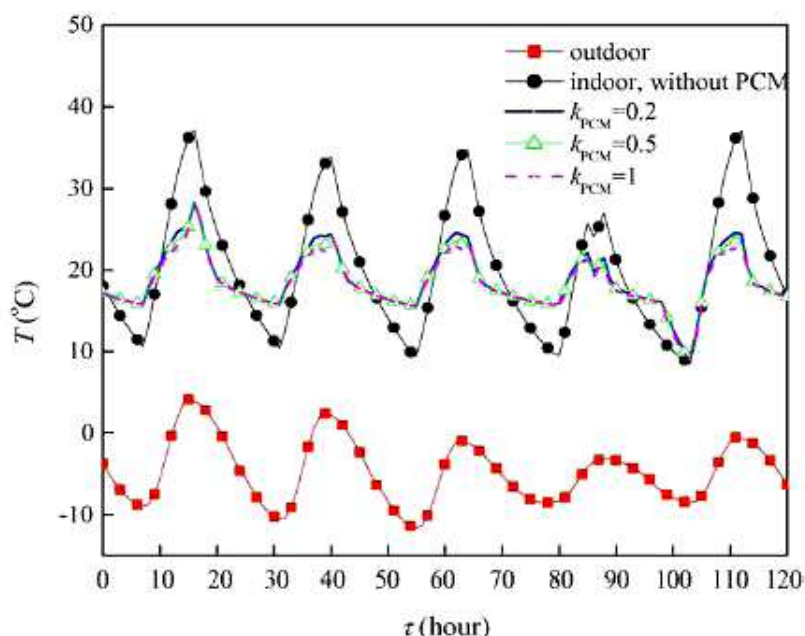


Σχήμα 11.4.1.γ Κατανομή της θερμοκρασίας με χρήση διαφορετικής θερμοκρασίας τήξης του PCM για τη Σαγκάη.

Θερμική αγωγιμότητα

Στη συγκεκριμένη μελέτη, η θερμική αγωγιμότητα των 0,2 , 0,5 και 1 W/m αντίστοιχα χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα για μερικές μέρες υπό τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στο Πεκίνο κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, κάτι που φαίνεται στο σχήμα 11.4.2 . Κατά τη διαδικασία απόδοσης της

θερμότητας, η θερμική αγωγιμότητα δεν προκάλεσε κάποια σημαντική επίδραση στην εσωτερική θερμοκρασία του χώρου. Βέβαια υπάρχει πιθανότητα να την επηρεάσει όταν οι πλάκες PCM σταθερού σχήματος απορροφούν θερμότητα. Η βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας ενδέχεται να επιταχύνει την διαδικασία απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας από τις πλάκες και είναι πιθανό να επιδράσει στην ελάττωση της μέγιστης εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται μειωμένη θερμοκρασιακή διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας και έχει θετικό αντίκτυπο στην θερμική άνεση του ανθρώπινου οργανισμού. Παρατηρείται ότι όταν η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας βρίσκεται πάνω από 0,5 W/m K , δεν υπάρχει καμιά μεταβολή στη θερμοκρασία αλλά και στις υπόλοιπες μεταβλητές του συστήματος.



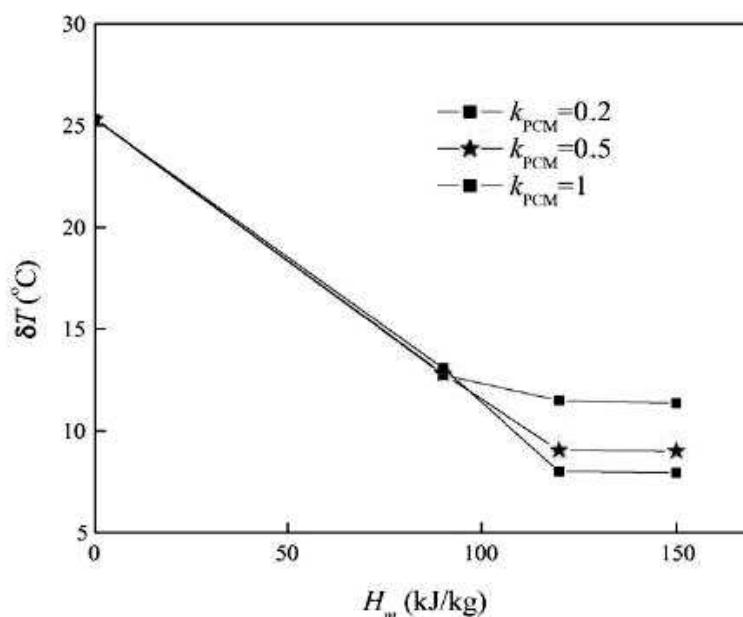
Σχήμα 11.4.2 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας αέρα με διάφορες θερμικές αγωγιμότητες.

Θερμότητα τήξης

Η θερμότητα τήξης είναι μια βασική παράμετρος που δύναται να επηρεάσει την ικανότητα του PCM να αποθηκεύει ενέργεια. Έγινε μελέτη των PCMs σταθερού σχήματος που ήταν τοποθετημένα στο δάπεδο με θερμότητα τήξης 90, 120 και 150 kJ/kg σε διαφορετικές θερμικές αγωγιμότητες 0,2 , 0,5 και 1 W/m K . Το ΔT ορίστηκε ως η διαφορά

της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα για μια τυπική μέρα του χειμώνα. Με βάση τη μελέτη που έγινε εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

- ▶ Όταν η θερμότητα τήξης είναι μικρότερη των 90 kJ/kg, το δT μειώνεται με αύξηση της θερμότητας τήξης, ενώ αντίθετα αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του PCM συνεπάγεται απειροελάχιστη μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα, κάτι που φαίνεται στο σχήμα 11.4.3 .
- ▶ Όταν η θερμότητα τήξης κινείται μεταξύ 90 ως 120 kJ/kg το δT μειώνεται με αύξηση της θερμότητας τήξης, ενώ αντίθετα αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του PCM συνεπάγεται μείωση της μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα.
- ▶ Όταν η θερμότητα τήξης είναι μεγαλύτερη των 120 kJ/kg το δT μένει σχεδόν ανεπηρέαστο από τις αλλαγές στην θερμότητα τήξης αλλά μειώνεται με αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του PCM.



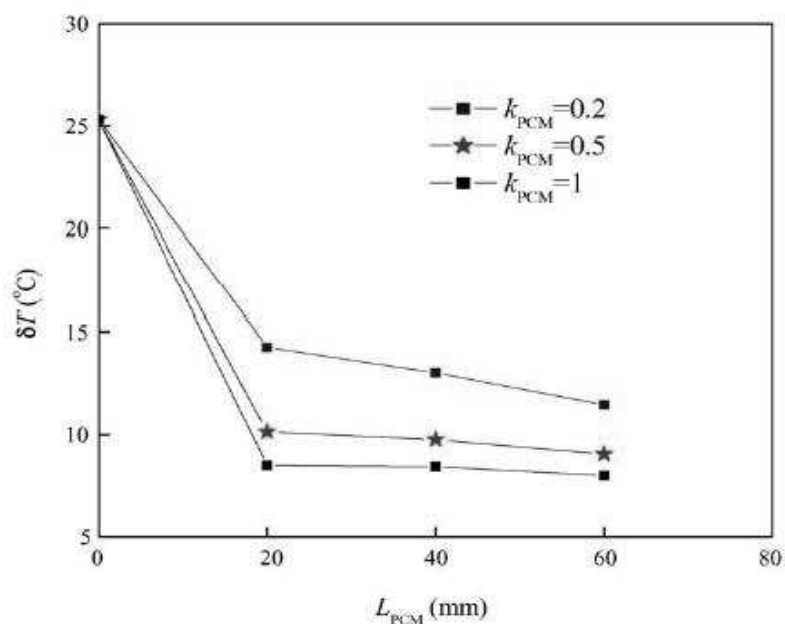
Σχήμα 11.4.3 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα με διαφορετικές θερμότητες τήξης.

Η θερμότητα τήξης αποτελεί ένα σημαντικό κριτήριο για την προετοιμασία του δαπέδου στο οποίο θα ενσωματωθεί το PCM. Αν η αναλογία του βάρους του PCM είναι αρκετά χαμηλή τότε η θερμότητα τήξης του δε επιτρέπεται να είναι πολύ υψηλή. Αντιθέτως αν η αναλογία βάρους του PCM είναι υπερβολικά υψηλή, τότε η θερμική αγωγιμότητα δεν

μπορεί να είναι πολύ υψηλή γιατί επειδή η παραφίνη είναι ένα υλικό με χαμηλή γενικά θερμική αγωγιμότητα. Αναζητείται δηλαδή ο βέλτιστος συνδυασμός της θερμότητας τήξης και της θερμικής αγωγιμότητας. Γενικά για να ελαχιστοποιηθεί όσο το δυνατό περισσότερο η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα πρέπει η θερμότητα τήξης του PCM να είναι υψηλότερη από 120 kJ/kg και η θερμική αγωγιμότητα να είναι υψηλότερη από 0,5 W/m K.

Πάχος στρώματος PCM σταθερού σχήματος

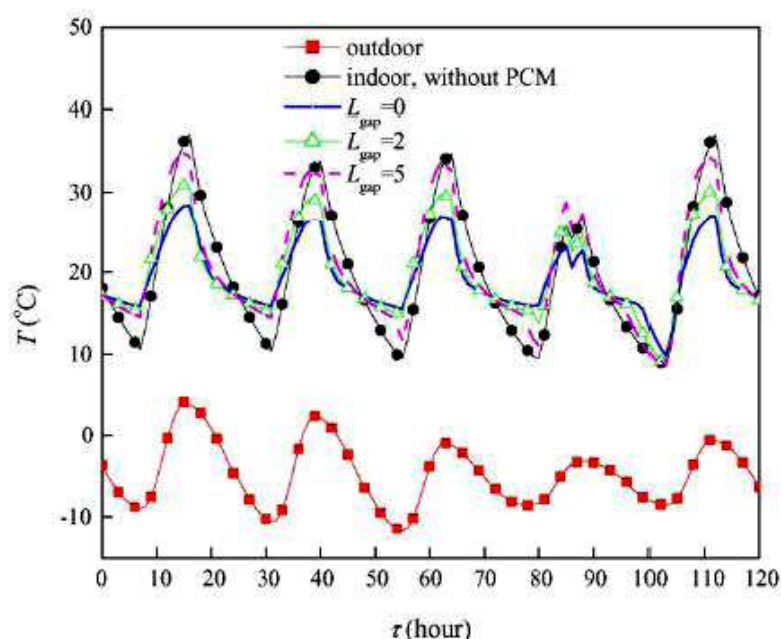
Το πάχος του στρώματος αποτελεί ακόμη ένα σημαντικό παράγοντα που επιδρά στην θερμική απόδοση του PCM που είναι τοποθετημένο στο δάπεδο. Η παρακάτω εικόνα δείχνει την σχέση μεταξύ της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα, του δT και του πάχους του στρώματος του PCM (L_{PCM}) για διάφορες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας. Παρατηρώντας προσεκτικά το διάγραμμα γίνεται εμφανές ότι το δT δεν επηρεάζεται αισθητά από το L_{PCM} , όταν το L_{PCM} είναι μεγαλύτερο από 20 mm. Οπότε προκύπτει ότι για πρακτικές εφαρμογές η τιμή του πάχους του PCM πρέπει να είναι κοντά στα 20 mm αλλά όχι μεγαλύτερη από τα 20 mm.



Σχήμα 11.4.4 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα με διαφορετικά πάχη του PCM.

Το κενό αέρα μεταξύ PCM και δαπέδου.

Οι πλάκες του PCM σταθερού σχήματος είναι τοποθετημένες κάτω από την επίστρωση του δαπέδου. Σε εκείνο το σημείο είναι συνηθισμένο φαινόμενο η εμφάνιση κενών αέρος, τα οποία προκαλούν μια επιπρόσθετη θερμική αντίσταση κάτι το οποίο είναι ανεπιθύμητο. Το κενό αέρος είναι πιθανό να μειώσει την αποτελεσματικότητα του PCM να αποθηκεύει την ηλιακή ενέργεια και να αυξήσει την μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 11.4.5. Οπότε κατά την τοποθέτηση των πλακών του PCM στο δάπεδο πρέπει να ελαχιστοποιούνται αυτά τα κενά.



Σχήμα 11.4.5 Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας αέρα με διαφορετικά πάχη των κενών αέρος.

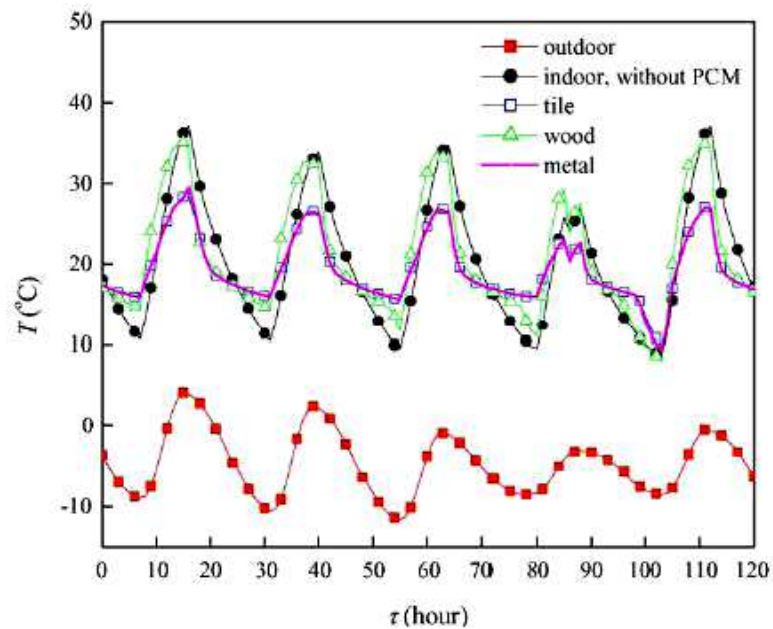
Υλικά επίστρωσης δαπέδου

Επειδή διαφορετικά υλικά επίστρωσης του δαπέδου έχουν αντίστοιχα και διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες, αυτό έχει άμεση συνέπεια και στην θερμική απόδοση του PCM που είναι τοποθετημένο στο δάπεδο. Τρεις τυπικές επιστρώσεις δαπέδου προσομοιάζονται σε αυτή την παραμετρική μελέτη. Οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες παρουσιάζονται στον πίνακα 11.4.4. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 11.4.6 τα πλακάκια ή το μεταλλικό δάπεδο είναι προτιμότερα σε σχέση με το ξύλινο δάπεδο. Επειδή έχουν

μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από το ξύλο και έτσι επιτρέπουν την καλύτερη μεταφορά θερμότητας μέσω του όγκου τους.

Πίνακας 11.4.4 Θερμοφυσικές ιδιότητες της επίστρωσης του δαπέδου.

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 11.4.6 Κατανομή εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα με διαφορετικά υλικά επίστρωσης του δαπέδου.

11.5 Συμπεράσματα

Από τη διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων παραγόντων στη θερμική απόδοση του PCM σταθερού σχήματος που έγινε μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- ▶ Για την μείωση της διακύμανσης της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα για μια συγκεκριμένη γεωγραφική θέση ή κλιματική συνθήκη, η κατάλληλη θερμοκρασία τήξης λαμβάνεται καταχρηστικά ίση με το μέσο όρο της εσωτερικής θερμοκρασίας που παρατηρείται κατά την διάρκεια των ημερών του χειμώνα που έχουν ικανοποιητική 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 του PCM δεν πρέπει να ξεπερνά τα 20 mm.
- ▶ Το πλακάκι και το μέταλλο είναι προτιμότερα ως υλικά επίστρωσης δαπέδου συγκριτικά με το ξύλο.
- ▶ Το κενό αέρος μεταξύ του PCM και του δαπέδου πρέπει να είναι το μικρότερο δυνατό.

Κεφάλαιο 12

Παρουσίαση αποτελεσμάτων της βασικής μελέτης και παραμετρική μελέτη.

12.1 Περιγραφή του συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης που μελετήθηκε.

Στην εργασία αυτή γίνεται μελέτη του συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης μιας κατοικίας συνολικής έκτασης 100 m^2 στην περιοχή της Αθήνας, με γεωγραφικό πλάτος $\phi=37,97^\circ$, με χρήση της ηλιακής ενέργειας που δεσμεύεται από ηλιακούς συλλέκτες που βρίσκονται τοποθετημένοι στην οροφή του κτιρίου. Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι νότιου προσανατολισμού και είναι τοποθετημένοι με κλίση $\beta=53^\circ$. Η συλλεκτική επιφάνεια των συλλεκτών επιλέχθηκε να είναι $A_c=55 \text{ m}^2$ ώστε να καλύπτει τις ανάγκες της κατοικίας για θέρμανση. Οι συλλέκτες είναι παράλληλα συνδεδεμένοι μεταξύ τους με συνολική παροχή νερού δια μέσω αυτών $m_w = 0,01 \text{ kg/s}$ με $C_{p_w}=1.000 \text{ kg/m}^3$. Τα χαρακτηριστικά των συλλεκτών που χρησιμοποιήθηκαν είναι $F_R \cdot \tau_a = 0,85$ και $F_R \cdot U_L = 3,6 \text{ (W/m}^2\text{)}/^\circ\text{C}$.

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 του υλικού αλλαγής φάσης το οποίο είναι τοποθετημένο κάτω από το στρώμα του δαπέδου του δωματίου που μελετάται. Όπως έχει ειπωθεί σε προηγούμενη ενότητα, το στρώμα του PCM, που έρχεται σε επαφή με τους σωλήνες του ζεστού νερού από τους συλλέκτες, απορροφά θερμότητα και από στερεό υλικό 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 μεταπίπτει στη στερεή κατάσταση και πάλι. Θεωρούμε 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 $\rho_{PCM}=1.000 \text{ kg/m}^3$. Η μελέτη αφού αφορά σύστημα θέρμανσης έγινε για την 21^η Νοεμβρίου και την 21^η Ιανουαρίου.

Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε στην παραπάνω μελέτη 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: $Cp_s = Cp_l = 5.000 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.

Προκειμένου να γίνει η προσομοίωση του φαινομένου της αλλαγής φάσης επιλέχθηκε το μαθηματικό μοντέλο της ενεργού θερμοχωρητικότητας Cp_{eff} ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$) συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM T_{PCM} ($^\circ\text{C}$).

Με βάση αυτό το μοντέλο λοιπόν, οι εξισώσεις της ενεργού θερμοχωρητικότητας Cp_{eff} συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{PCM} είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned} \bullet \quad Cp_{\text{eff}} &= 4 \cdot (H - b \cdot Cp_s) \cdot \left(\frac{T_{\text{PCM}} - T_s}{b^2} \right) + Cp_s && \text{για } T_s \leq T_{\text{PCM}} \leq T_c \\ \bullet \quad Cp_{\text{eff}} &= 4 \cdot (b \cdot Cp_l - H) \cdot \left(\frac{T_{\text{PCM}} - T_s - \frac{b}{2}}{b^2} \right) + \frac{2 \cdot H}{b} - Cp_s && \text{για } T_c \leq T_{\text{PCM}} \leq T_l \end{aligned}$$

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 χαρακτηριστικών του PCM οι παραπάνω εξισώσεις παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$\bullet \quad Cp_{\text{eff}} = \left(\frac{120000}{9} \right) \cdot (T_{\text{PCM}} - 20) + 5000 \quad \text{για } T_s \leq T_{\text{PCM}} \leq T_c \quad (12.1.1)$$

$$\bullet \quad Cp_{\text{eff}} = \left(-\frac{120000}{9} \right) \cdot (T_{\text{PCM}} - 23) + 45000 \quad \text{για } T_c \leq T_{\text{PCM}} \leq T_l \quad (12.1.2)$$

12.2.Υπολογισμός της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους ηλιακούς συλλέκτες.

Απαραίτητος είναι ο υπολογισμός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στους ηλιακούς συλλέκτες ώστε στη συνέχεια να υπολογιστούν τα υπόλοιπα μεγέθη για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Παρακάτω παρατίθενται οι τύποι υπολογισμού [81] της άμεσης, διάχυτης και ολικής αντίστοιχα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους ηλιακούς συλλέκτες για την περιοχή της Αθήνας.

$$G_b = M_t + A_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot D - P_t\right) \quad (12.2.1)$$

$$G_d = m_t + a_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot D - P_t\right) \quad (12.2.2)$$

$$G_T = G_b \cdot R_b + G_d \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + (G_b + G_d) \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (12.2.3)$$

όπου

- οι όροι M_t , m_t , A_t , a_t , P_t έχουν ληφθεί από πίνακα [81] ανάλογα με τις ώρες της ημέρας.
- D είναι η μέρα του έτους για την οποία υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία και παίρνει τιμές $1 \div 365$.
- ρ είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους που για συνηθισμένο έδαφος έχει τιμή $\rho=0,2$.
- Το R_b έχει υπολογιστεί από τη σχέση

$$R_b = \frac{\sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega}{\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega} \quad (12.2.4)$$

με γεωγραφικό πλάτος $\varphi=37,97^\circ$ επειδή δουλεύουμε για την περιοχή της Αθήνας, επιλεγμένη κλίση ηλιακού συλλέκτη $\beta=53^\circ$, ωριαία γωνία ηλίου υπολογισμένη από τη σχέση

$$\omega=0,25 \cdot (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (12.2.5)$$

και ηλιακή απόκλιση δ υπολογιζόμενη από τη σχέση

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad (12.2.6)$$

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

Με βάση τους παραπάνω τύπους υπολογίστηκαν η άμεση, διάχυτη και ολική ηλιακή ακτινοβολία συναρτήσει της ώρας για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών και χαράσσονται συγκριτικά διαγράμματα για όλους τους μήνες. Για όλους τους μήνες ο υπολογισμός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας γίνεται από τις 7:00 έως τις 18:00 καθώς τις υπόλοιπες ώρες του 24ώρου δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Σε ορισμένες περιπτώσεις προέκυπταν αρνητικές τιμές για το G_b ή για το G_d και επειδή κάτι τέτοιο δεν έχει προφανώς φυσική σημασία αυτές οι τιμές αυτομάτως μηδενίζονταν.

Νοέμβριος (21^η μέρα)

Πίνακας 12.2.1 Τιμές της άμεσης, διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για το μήνα Νοέμβριο.

Ώρα	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	0,0000000	0,0360
18:00	0,0000	0,0000	0,0000000	0,0000

Δεκέμβριος (21^η μέρα)

Πίνακας 22.2.2 Τιμές της άμεσης , διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για το μήνα Δεκέμβριο.

Ώρα	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

Ιανουάριος (21^η μέρα)

Πίνακας 32.2.3 Τιμές της άμεσης , διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για το μήνα Ιανουάριο.

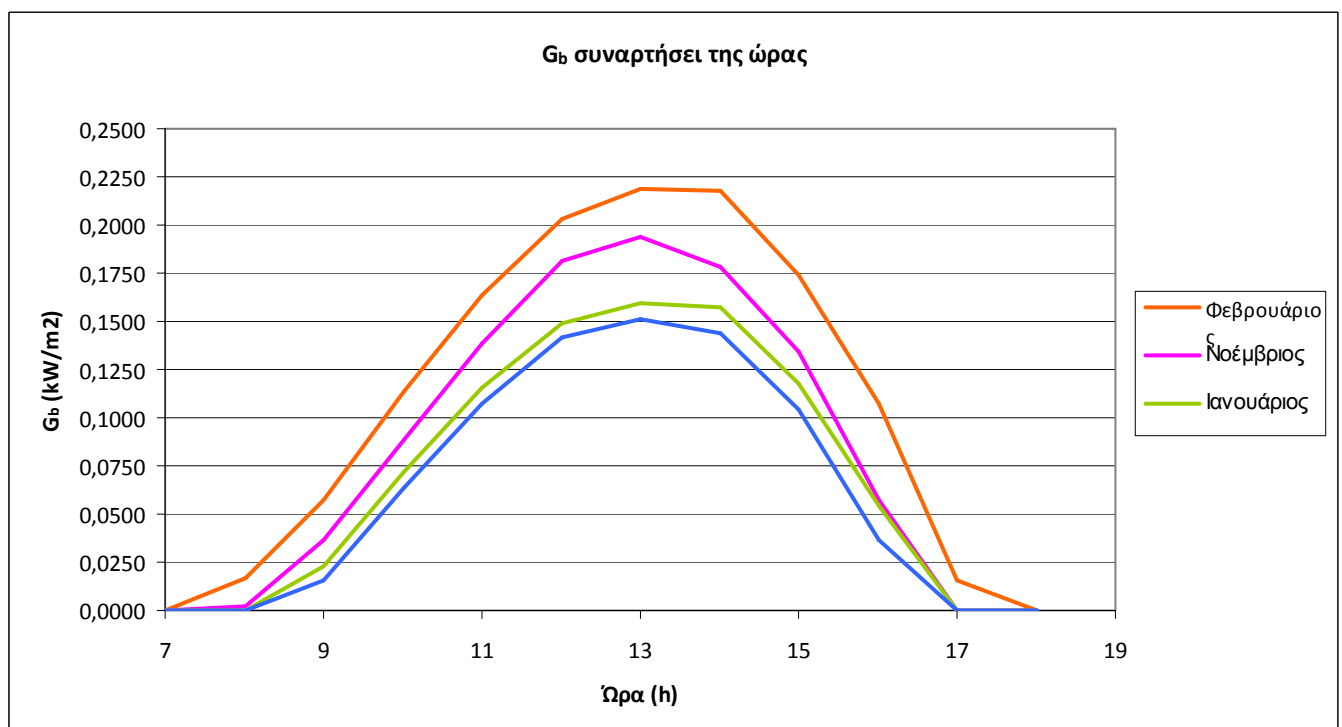
Ώρα	G _b [kW/m ²]	G _d [kW/m ²]	R _b	G _t [kW/m ²]
7:00	0,0000	0,0000	0,000000	0,0000
8:00	0,0000	0,0221	3,42965	0,0182
9:00	0,0231	0,0893	2,344855	0,1279
10:00	0,0717	0,1442	2,037944	0,2660
11:00	0,1155	0,1767	1,918476	0,3689
12:00	0,1485	0,1836	1,885376	0,4336
13:00	0,1596	0,1720	1,918476	0,4505
14:00	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

Φεβρουάριος (21^η μέρα)

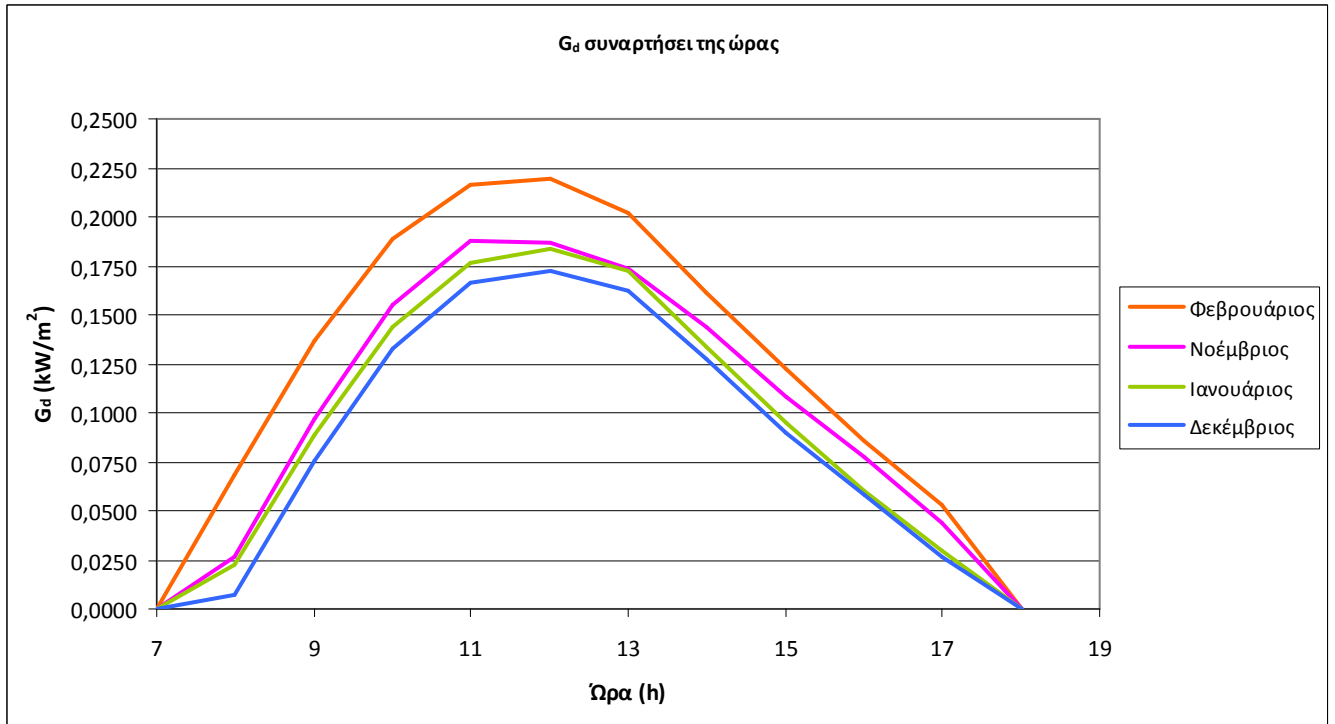
Πίνακας 42.2.4 Τιμές της άμεσης , διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για το μήνα Φεβρουάριο.

Ώρα	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

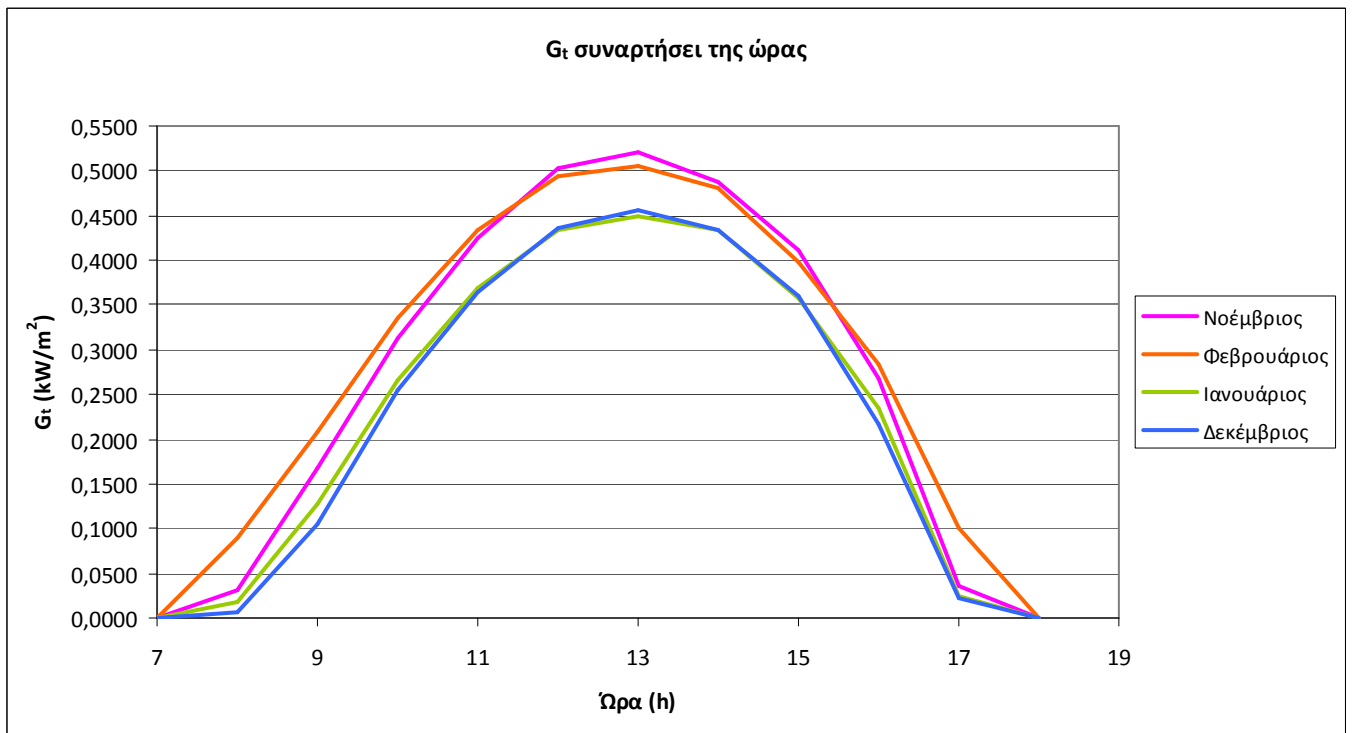
Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές της άμεσης, διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για τους τέσσερις μήνες ώστε να να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ τους.



Σχήμα 12.2.1 : Συγκριτικό διάγραμμα της άμεσης ακτινοβολίας G_b οριζοντίου επιπέδου για τους τέσσερις μήνες συναρτήσεως της ώρας .



Σχήμα 12.2.2 : Συγκριτικό διάγραμμα της διάχυτης ακτινοβολίας G_d οριζοντίου επιπέδου για τους τέσσερις μήνες συναρτήσει της ώρας .



Σχήμα 12.2.3 : Συγκριτικό 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 12.2.3 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 στις υψηλότερες θερμοκρασίες του περιβάλλοντος καθώς και στην κλίση που έχει ο ήλιος σε σχέση με τη γη αυτό το μήνα. Πιο συγκεκριμένα το Νοέμβριο ο ήλιος βρίσκεται πιο χαμηλά και έτσι οι ακτίνες του έχουν μεγαλύτερη καθετότητα ως προς το επίπεδο των ηλιακών συλλεκτών. Αυτό έχει ως συνέπεια να είναι μεγαλύτερο το ποσό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους συλλέκτες κατά τη διάρκεια αυτού του μήνα. Τέλος παρατηρείται ότι οι τιμές για τον Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο σχεδόν ταυτίζονται με κάποιες πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους.

12.3 Αποτελέσματα βασικής μελέτης

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της βασικής μελέτης έγινε χρήση των μαθηματικών σχέσεων [81] που αναφέρονται αναλυτικά στη συνέχεια:

$$\bullet \text{ Ωφέλιμη ισχύς συλλέκτη: } Q_u = A_c \cdot \left[G_T \cdot F_R \tau \alpha - F_R U_L \cdot (T_{f,i} - T_\alpha) \right] \quad (12.3.1)$$

όπου T_α είναι η μέση εξωτερική θερμοκρασία κάθε ώρας για την 21^η Ιανουαρίου και 21^η Νοεμβρίου και δίνεται από τον Πίνακα Δ.3.3 και Δ.3.14 αντίστοιχα [82].

• Θερμότητα που δίνει το PCM στο χώρο:

$$Q_{\text{χώρου}} = U \cdot A_{\text{δαπ}} \cdot (T_{\text{PCM}} - T_{\text{χώρου}}) \quad (12.3.2)$$

όπου θεωρούμε $T_{\text{χώρου}}=20^{\circ}\text{C}$ =σταθερή για λόγους απλούστευσης των υπολογισμών και T_{PCM} είναι η θερμοκρασία του PCM στην αρχή της ώρας. Θεωρούμε ότι το δάπεδο του χώρου αποτελείται από πλακάκια πάχους 1 cm και θερμικής αγωγιμότητας k_1 , υπόστρωμα πάχους 1,5 cm και θερμικής αγωγιμότητας k_2 και τέλος από PCM πάχους 3 cm. Ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας από το PCM στον αέρα U υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2} \quad (12.3.3)$$

όπου h είναι ο συντελεστής συναγωγής δαπέδου αέρα και l_1, l_2 τα πάχη των πλακακίων και του υποστρώματος αντίστοιχα. Τελικά προκύπτει ότι $U=8 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$.

☀ Θερμότητα που παίρνει το PCM για να αυξηθεί η θερμοκρασία του:

$$Q_{\text{PCM}} = \frac{m_{\text{PCM}} \cdot C_{p_{\text{eff}}}}{3600} \cdot (T_{\text{PCM,τελικό}} - T_{\text{PCM,αρχικό}}) \quad (12.3.4)$$

όπου $T_{\text{PCM,αρχικό}}$ είναι η θερμοκρασία του PCM στην αρχή της ώρας, $T_{\text{PCM,τελικό}}$ είναι η θερμοκρασία του PCM στο τέλος της ώρας και $C_{p_{\text{eff}}}$ είναι η ενεργός θερμοχωρητικότητα του υλικού αλλαγής φάσης. Η διαίρεση με το 3.600 γίνεται για να μετατραπούν οι μονάδες του Q_{PCM} από J σε W ώστε να γίνει ευκολότερη η επίλυση των εξισώσεων **12.3.6** και **12.3.7** μιας και τα υπόλοιπα μεγέθη που περιέχουν είναι υπολογισμένα σε W.

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

$$Q_u = \dot{m}_w \cdot C_{p_w} \cdot (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (12.3.5)$$

Κατά τη διάρκεια της ημέρας η εξίσωση που δείχνει τη συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του PCM και του προς θέρμανση χώρου είναι:

$$Q_u - Q_{\text{χώρου}} = Q_{\text{PCM}} \quad (12.3.6)$$

Αντίθετα κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία και κατ' επέκταση η ωφέλιμη ισχύς του συλλέκτη μηδενίζεται ($Q_u=0$) η εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$Q_{\text{χώρου}} = - Q_{\text{PCM}} \quad (12.3.7)$$

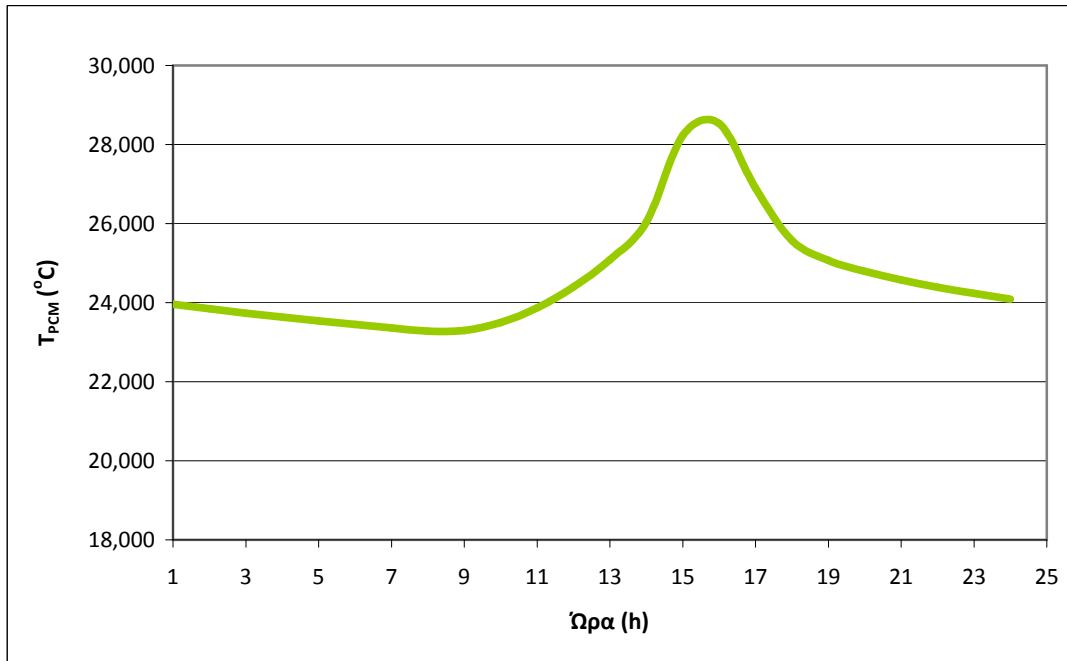
Με βάση τις παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιήθηκε κώδικας στο προγραμματιστικό πακέτο της Matlab προκειμένου να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του PCM στο τέλος κάθε ώρας. Στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι επειδή μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε το φαινόμενο αυτό μακροσκοπικά κάνουμε την **παραδοχή** ότι η θερμοκρασία του PCM είναι η **ίδια** για το σύνολο της μάζας του και για την επόμενη ώρα η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη ($T_{f,i}$) έχει τη θερμοκρασία του PCM της προηγούμενης ώρας.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Ιανουάριο** έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω . Εκτός από τη θερμοκρασία του PCM (T_{PCM}) υπολογίσαμε για κάθε ώρα τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$), την ωφέλιμη ισχύ του συλλέκτη (Q_u) και την ενεργό θερμοχωρητικότητα του PCM ($C_{p,eff}$).

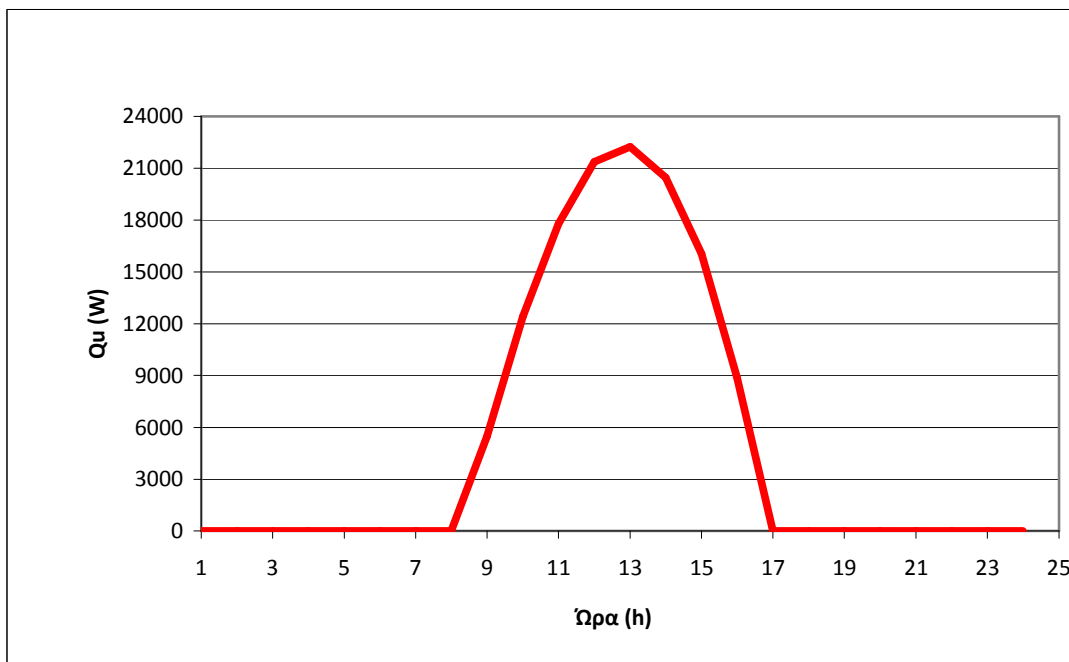
Πίνακας 12.3.1 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για τον Ιανουάριο.

Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (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

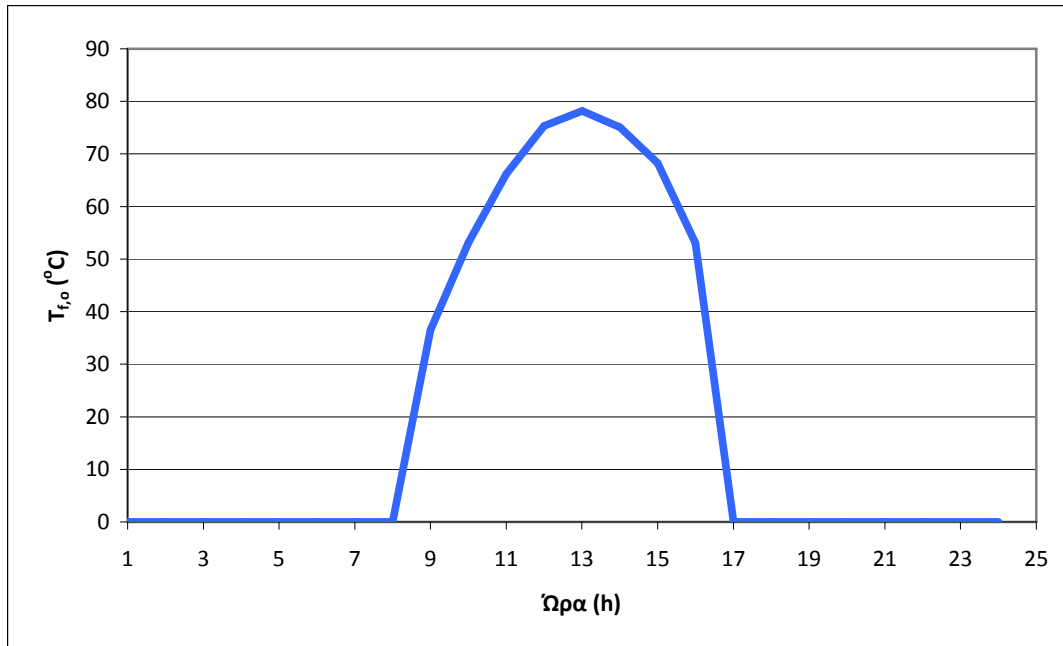
Παρακάτω ακολουθούν διαγράμματα που απεικονίζουν την μεταβολή των μεγεθών που έχουν υπολογιστεί κατά τη διάρκεια του 24ώρου.



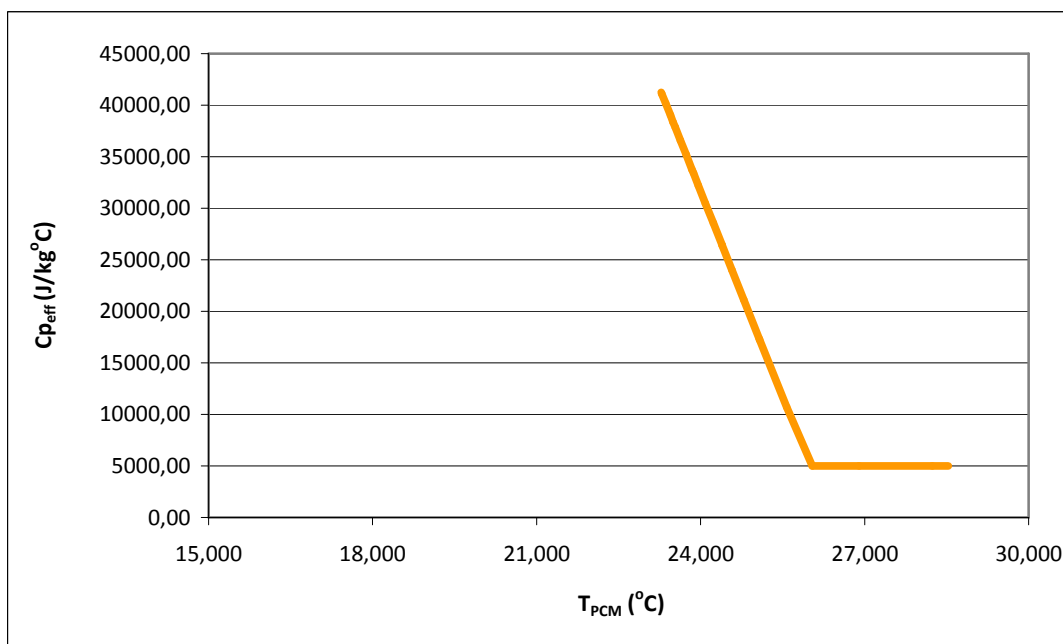
Σχήμα 12.3.1: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM (T_{PCM}) συναρτήσει της ώρας.



Σχήμα 12.3.2: Μεταβολή της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας.



Σχήμα 12.3.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας.



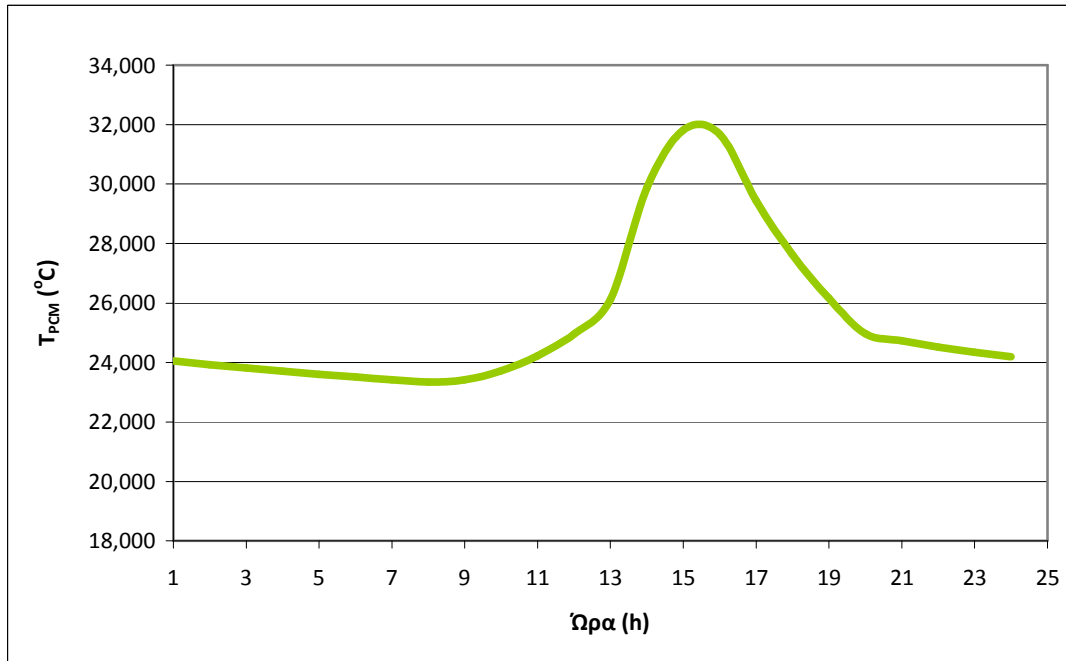
Σχήμα 12.3.4: Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας του PCM ($C_{p,eff}$) συναρτήσει της T_{PCM} .

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Νοέμβριο** έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

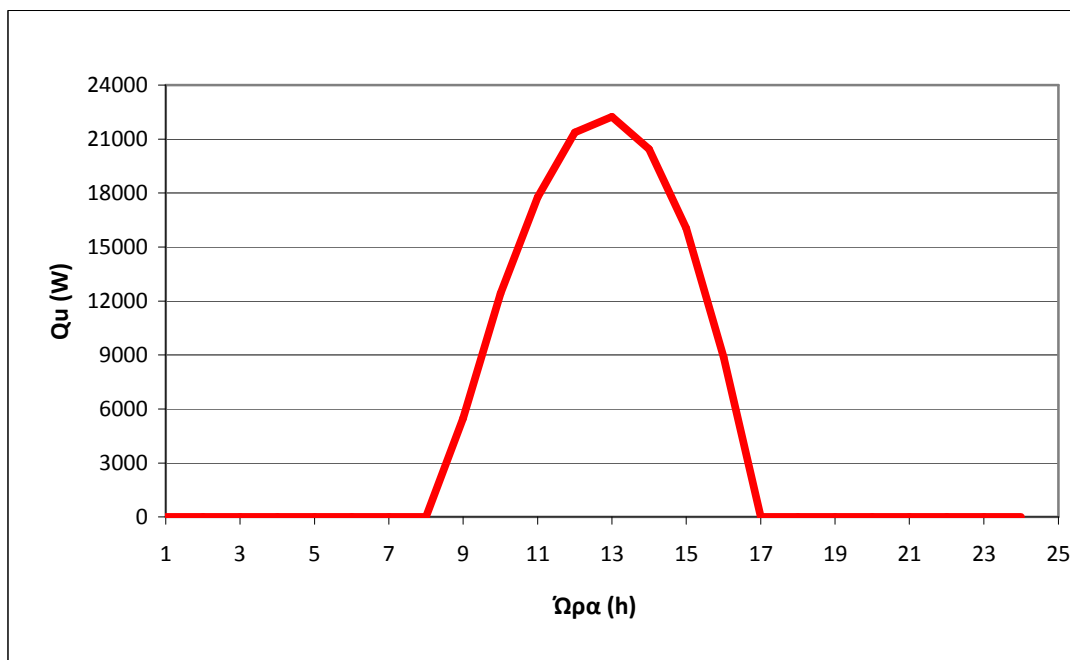
Πίνακας 12.3.2 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για το Νοέμβριο.

Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	24,0499	0	0	31001,598
2:00	23,9245	0	0	32673,720
3:00	23,8092	0	0	34211,140
4:00	23,7023	0	0	35636,328
5:00	23,6025	0	0	36966,126
6:00	23,5090	0	0	38213,553
7:00	23,4208	0	0	39388,921
8:00	23,3375	0	0	40500,569
9:00	23,4210	36,4691	5489,008	39386,889
10:00	23,7162	53,1512	12427,220	35450,378
11:00	24,2168	66,2066	17760,963	28776,040
12:00	24,9675	75,3549	21375,724	18766,443
13:00	26,1357	78,1790	22242,382	5000,000
14:00	29,8658	75,0609	20450,738	5000,000
15:00	31,8212	68,2392	16040,097	5000,000
16:00	31,6811	53,0493	8873,355	5000,000
17:00	29,4383	0	0	5000,000
18:00	27,6262	0	0	5000,000
19:00	26,1620	0	0	5000,000
20:00	24,9789	0	0	18615,173
21:00	24,7221	0	0	22038,694
22:00	24,5164	0	0	24781,273
23:00	24,3414	0	0	27114,082
24:00	24,1877	0	0	29163,588

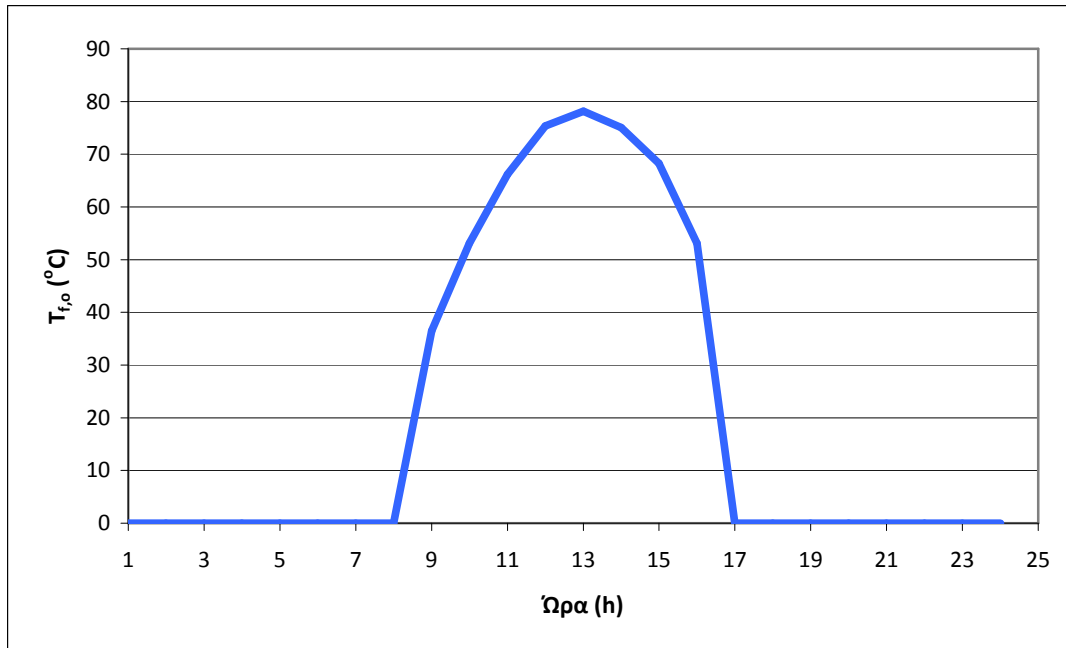
Παρακάτω ακολουθούν διαγράμματα που απεικονίζουν την μεταβολή των μεγεθών που έχουν υπολογιστεί κατά τη διάρκεια του 24ώρου.



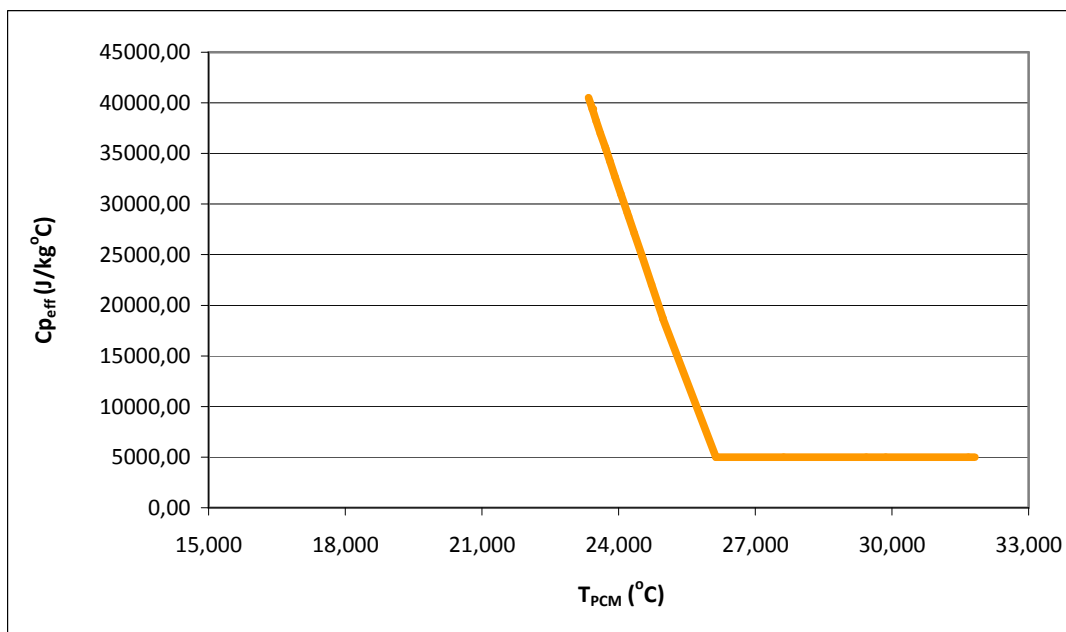
Σχήμα 12.3.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM (T_{PCM}) συναρτήσει της ώρας.



Σχήμα 12.3.6: Μεταβολή της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας.



Σχήμα 12.3.7: Μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας.



Σχήμα 12.3.8: Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας του PCM ($C_{p,eff}$) συναρτήσει της T_{PCM} .

Στη συνέχεια ακολουθεί παραμετρική μελέτη κατά την οποία θα εξεταστούν οι μεταβολές που θα παρατηρηθούν στα υπολογιζόμενα μεγέθη κατά την αλλαγή κάποιων συγκεκριμένων παραμέτρων. Κάθε φορά θα αλλάζει μια μόνο παράμετρος και οι υπόλοιπες θα παραμένουν ίδιες με σκοπό την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

12.4 Αλλαγή της συλλεκτικής επιφάνειας A_c των ηλιακών συλλεκτών.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Ιανουάριο** και για συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 45 \text{ m}^2$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

Πίνακας 12.4.1 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για τον Ιανουάριο με συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 45 \text{ m}^2$.

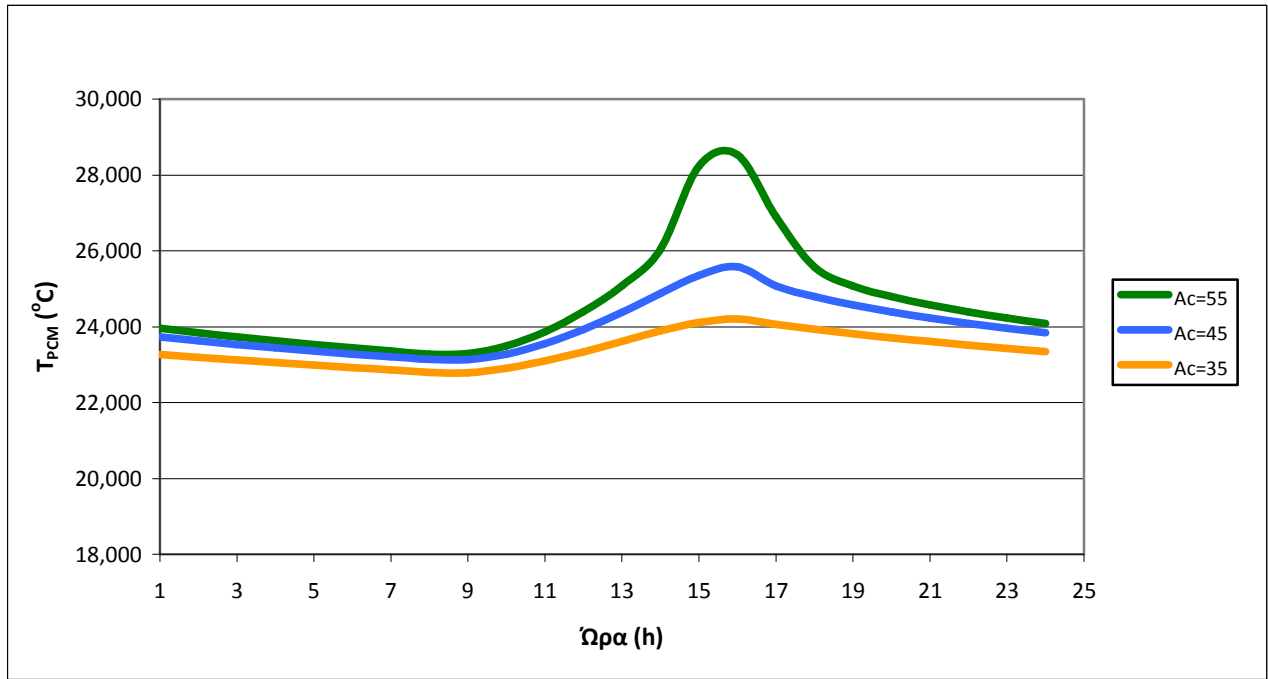
Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	23,7339	0	0	35215,084
2:00	23,6321	0	0	36572,272
3:00	23,5367	0	0	37843,471
4:00	23,4470	0	0	39039,721
5:00	23,3623	0	0	40169,900
6:00	23,2819	0	0	41241,272
7:00	23,2055	0	0	42259,872
8:00	23,1327	0	0	43230,782
9:00	23,1322	29,0884	2489,503	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

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Ιανουάριο** και για συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 35 \text{ m}^2$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

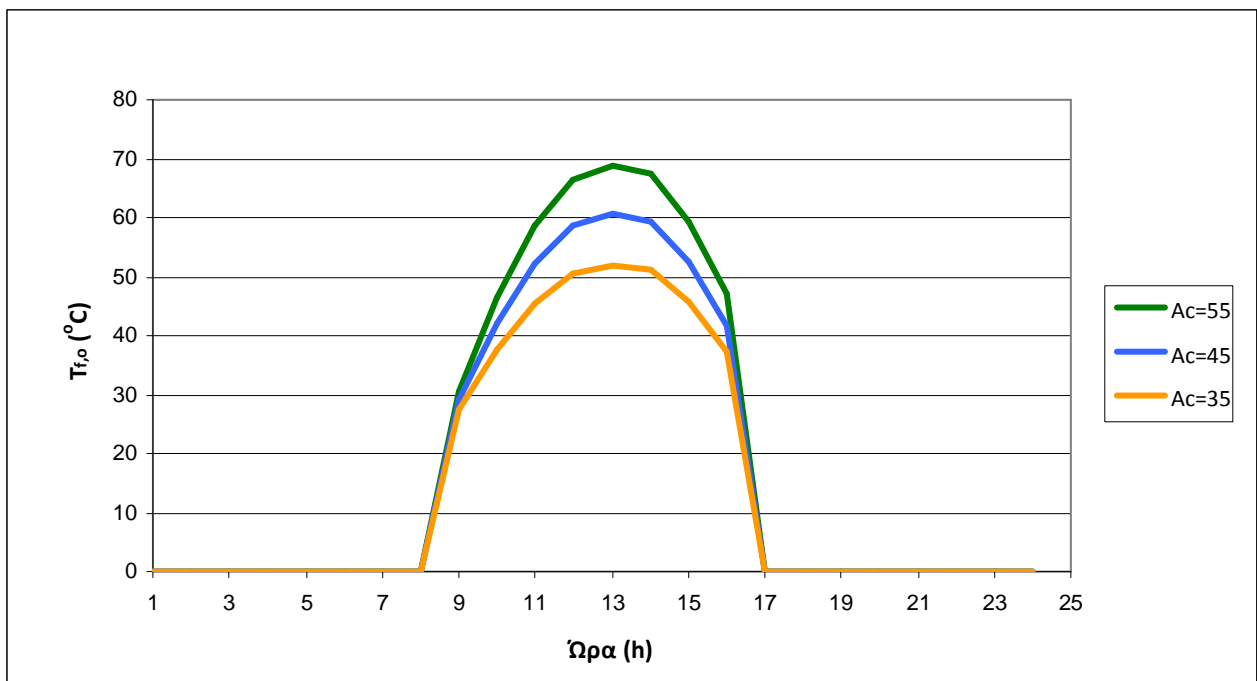
Πίνακας 12.4.2 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για τον Ιανουάριο με συλλεκτική επιφάνεια $A_c=35 \text{ m}^2$.

Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	23,2668	0	0	41442,830
2:00	23,1911	0	0	42451,807
3:00	23,1190	0	0	43413,987
4:00	23,0500	0	0	44333,566
5:00	22,9839	0	0	44785,843
6:00	22,9200	0	0	43933,019
7:00	22,8562	0	0	43082,276
8:00	22,7925	0	0	42233,691
9:00	22,7853	27,5273	1979,141	42137,131
10:00	22,8988	37,6506	6213,687	43650,460
11:00	23,0935	45,3882	9400,583	43753,808
12:00	23,3390	50,4282	11425,91	40480,533
13:00	23,6151	52,0138	11986,07	36798,801
14:00	23,8955	51,1065	11491,4	33059,842
15:00	24,1151	45,8226	9165,512	30132,252
16:00	24,2031	37,2784	5502,27	28958,650
17:00	24,0638	0	0	30816,461
18:00	23,9372	0	0	32504,396
19:00	23,8209	0	0	34054,826
20:00	23,7132	0	0	35490,962
21:00	23,6127	0	0	36830,139
22:00	23,5186	0	0	38085,716
23:00	23,4299	0	0	39268,251
24:00	23,3460	0	0	40386,266

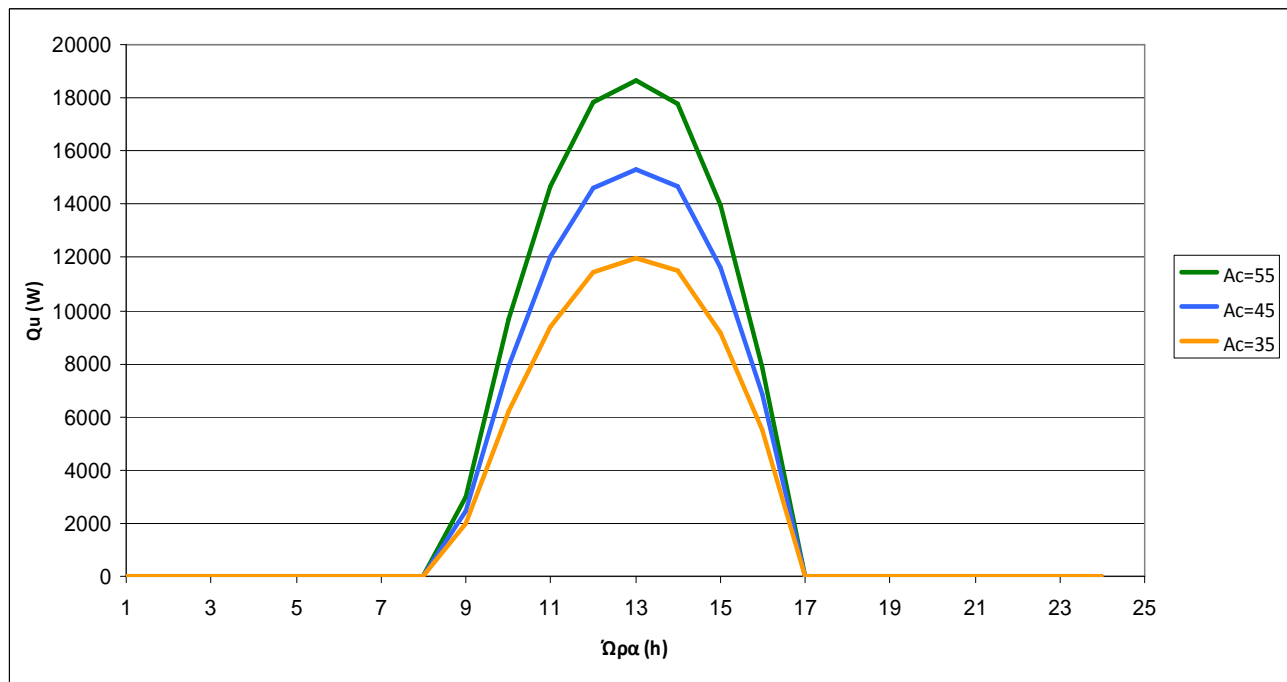
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές των μεγεθών T_{PCM} , $T_{f,o}$ και Q_u για τον μήνα Ιανουάριο για τις διάφορες τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας που αναφέρθηκαν παραπάνω ώστε να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ τους.



Σχήμα 12.4.1 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας του PCM (T_{PCM}) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή της συλλεκτικής επιφάνειας A_c .



Σχήμα 12.4.2 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή της συλλεκτικής επιφάνειας A_c .



Σχήμα 12.4.3 : Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή της συλλεκτικής επιφάνειας A_c .

Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα των παραπάνω υπολογιζόμενων μεγεθών παρατηρείται μείωση των τιμών τους όταν μειώνεται η συλλεκτική επιφάνεια. Αυτό είναι λογικό καθώς όσο αφορά τους συλλέκτες και δεδομένου ότι η παροχή νερού δια μέσω αυτών παραμένει ίδια, θα μειώνεται η θερμοκρασία εξόδου του νερού από αυτούς καθώς και η ωφέλιμη ισχύς τους, όπως αναμένεται, αφού θα μειώνεται το ποσό της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Όσον αφορά την θερμοκρασία του PCM, υπό την προϋπόθεση ότι παραμένει σταθερή η μάζα του, είναι προφανές ότι θα μειωθεί καθώς η συλλεκτική επιφάνεια ελαττώνεται.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Νοέμβριο** και για συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 45 \text{ m}^2$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

Πίνακας 12.4.3 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, Cp_{eff} και Q_u συναρτήσει της ώρας για το Νοέμβριο με συλλεκτική επιφάνεια $A_c=45 \text{ m}^2$.

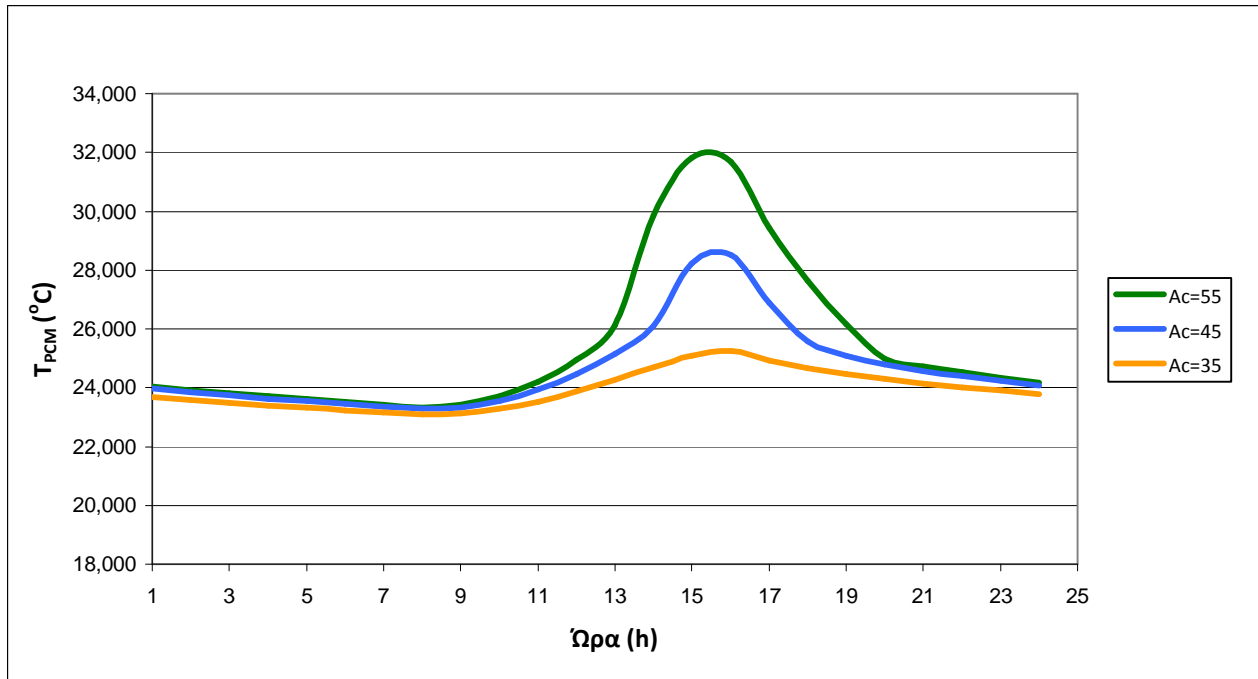
Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	Cp_{eff} (J/kg °C)
1:00	23,9602	0	0	32197,541
2:00	23,8421	0	0	33771,896
3:00	23,7329	0	0	35228,107
4:00	23,6312	0	0	36584,439
5:00	23,5359	0	0	37854,895
6:00	23,4462	0	0	39050,495
7:00	23,3615	0	0	40180,097
8:00	23,2812	0	0	41250,953
9:00	23,3357	34,0470	4500,124	40523,627
10:00	23,5582	47,6935	10181,537	37557,277
11:00	23,9324	58,3843	14557,296	32568,318
12:00	24,4626	65,8829	17535,305	25499,163
13:00	25,1548	68,1949	18280,115	16269,016
14:00	26,0965	65,5647	16891,319	5000,000
15:00	28,2223	58,9538	13734,334	5000,000
16:00	28,5259	46,9855	7843,045	5000,000
17:00	26,8889	0	0	5000,000
18:00	25,5663	0	0	10783,199
19:00	25,0707	0	0	17390,527
20:00	24,7908	0	0	21122,736
21:00	24,5731	0	0	24025,872
22:00	24,3903	0	0	26462,211
23:00	24,2311	0	0	28585,854
24:00	24,0890	0	0	30480,412

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Νοέμβριο** και για συλλεκτική επιφάνεια $A_c = 35 \text{ m}^2$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, Cp_{eff} και Q_u .

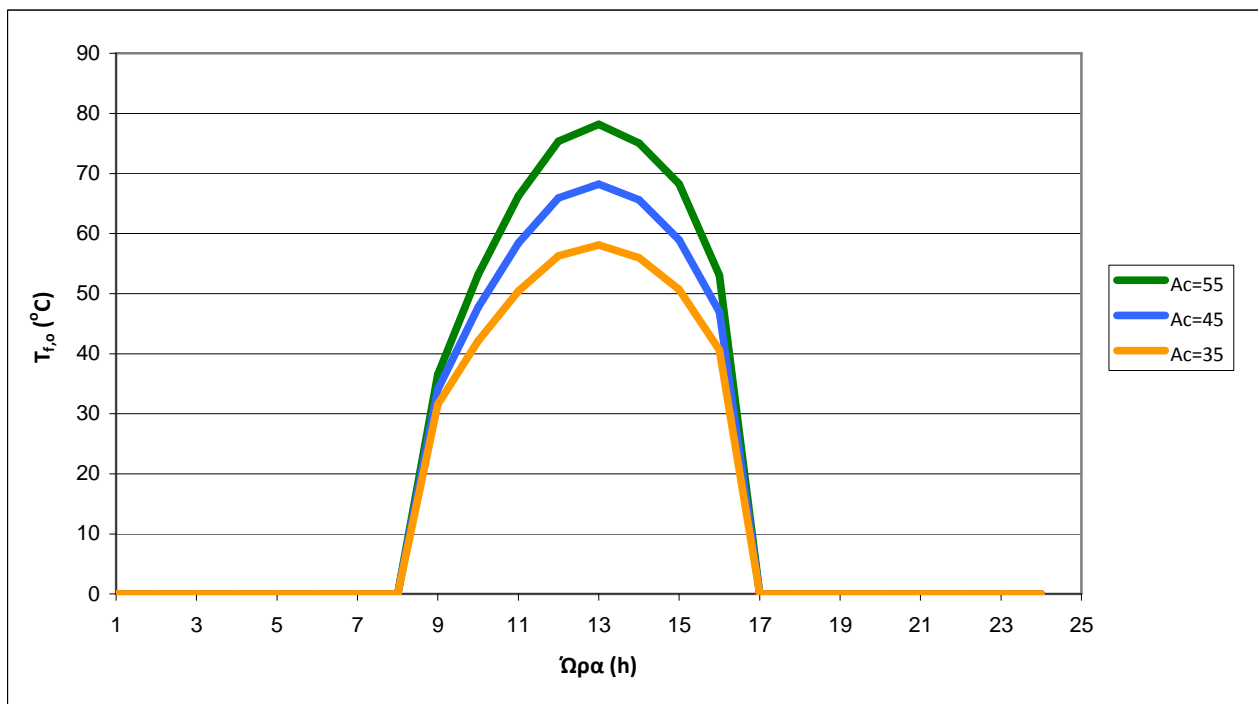
Πίνακας 12.4.4 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, Cp_{eff} και Q_u συναρτήσει της ώρας για το Νοέμβριο με συλλεκτική επιφάνεια $A_c=35 \text{ m}^2$.

Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	Cp_{eff} (J/kg °C)
1:00	23,6774	0	0	35967,771
2:00	23,5793	0	0	37276,469
3:00	23,4871	0	0	38505,518
4:00	23,4001	0	0	39664,694
5:00	23,3179	0	0	40761,940
6:00	23,2397	0	0	41803,807
7:00	23,1653	0	0	42795,782
8:00	23,0943	0	0	43742,512
9:00	23,1231	31,5241	3523,642	43359,108
10:00	23,2738	42,1321	7945,769	41348,987
11:00	23,5274	50,4465	11358,17	37967,386
12:00	23,8709	56,2777	13689,59	33387,609
13:00	24,2733	58,0633	14292,41	28022,423
14:00	24,6943	55,9689	13248,76	22409,714
15:00	25,0747	50,6726	10858,95	17337,964
16:00	25,2433	40,6171	6496,744	15089,006
17:00	24,9097	0	0	19536,917
18:00	24,6685	0	0	22753,625
19:00	24,4715	0	0	25379,867
20:00	24,3024	0	0	27635,014
21:00	24,1529	0	0	29627,789
22:00	24,0184	0	0	31421,961
23:00	23,8956	0	0	33058,870
24:00	23,7825	0	0	34567,194

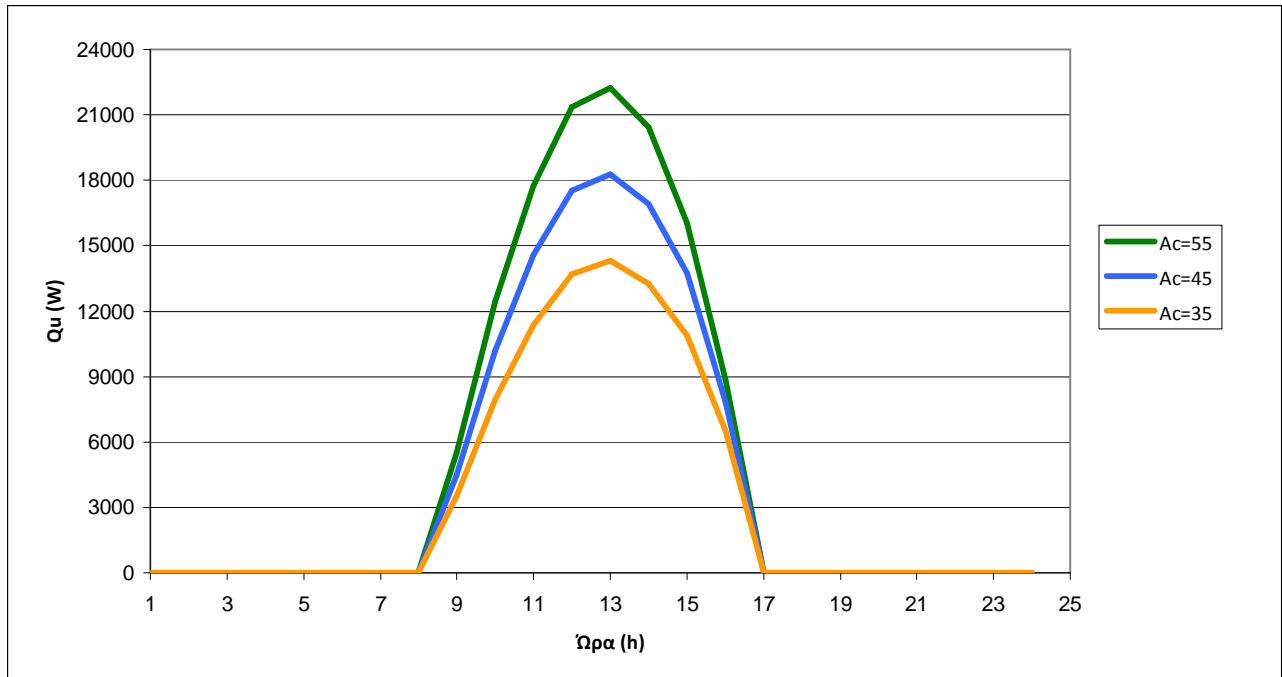
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές των μεγεθών T_{PCM} , $T_{f,o}$ και Q_u για τον μήνα Ιανουάριο για τις διάφορες τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας που αναφέρθηκαν παραπάνω ώστε να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ τους.



Σχήμα 12.4.4 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας του PCM (T_{PCM}) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή της συλλεκτικής επιφάνειας A_c .



Σχήμα 12.4.5 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή της συλλεκτικής επιφάνειας A_c .



Σχήμα 12.4.6 : Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή της συλλεκτικής επιφάνειας A_c .

Αντίστοιχα και για το μήνα Νοέμβριο τα αποτελέσματα είναι ανάλογα με αυτά του Ιανουαρίου.

12.5 Αλλαγή του γινομένου $F_R \cdot \tau_a$ των ηλιακών συλλεκτών.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Ιανουάριο** και για $F_R \cdot \tau_a = 0,75$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

Πίνακας 12.5.1 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για τον Ιανουάριο με γινόμενο $F_R \cdot \tau_a = 0,75$.

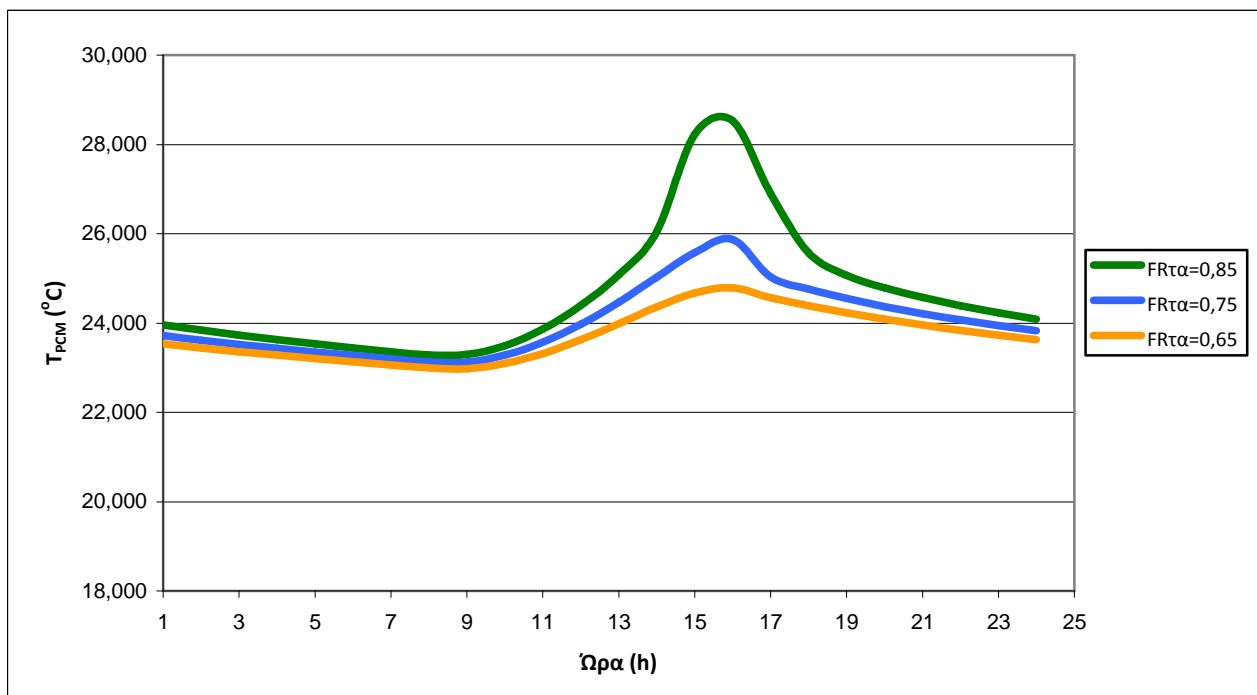
Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	23,7217	0	0	35377,279
2:00	23,6207	0	0	36723,845
3:00	23,5261	0	0	37985,834
4:00	23,4369	0	0	39174,003
5:00	23,3527	0	0	40297,017
6:00	23,2729	0	0	41361,981
7:00	23,1969	0	0	42374,807
8:00	23,1245	0	0	43340,480
9:00	23,1201	28,7246	2340,872	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

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Ιανουάριο** και για $F_R \cdot \tau_a = 0,65$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

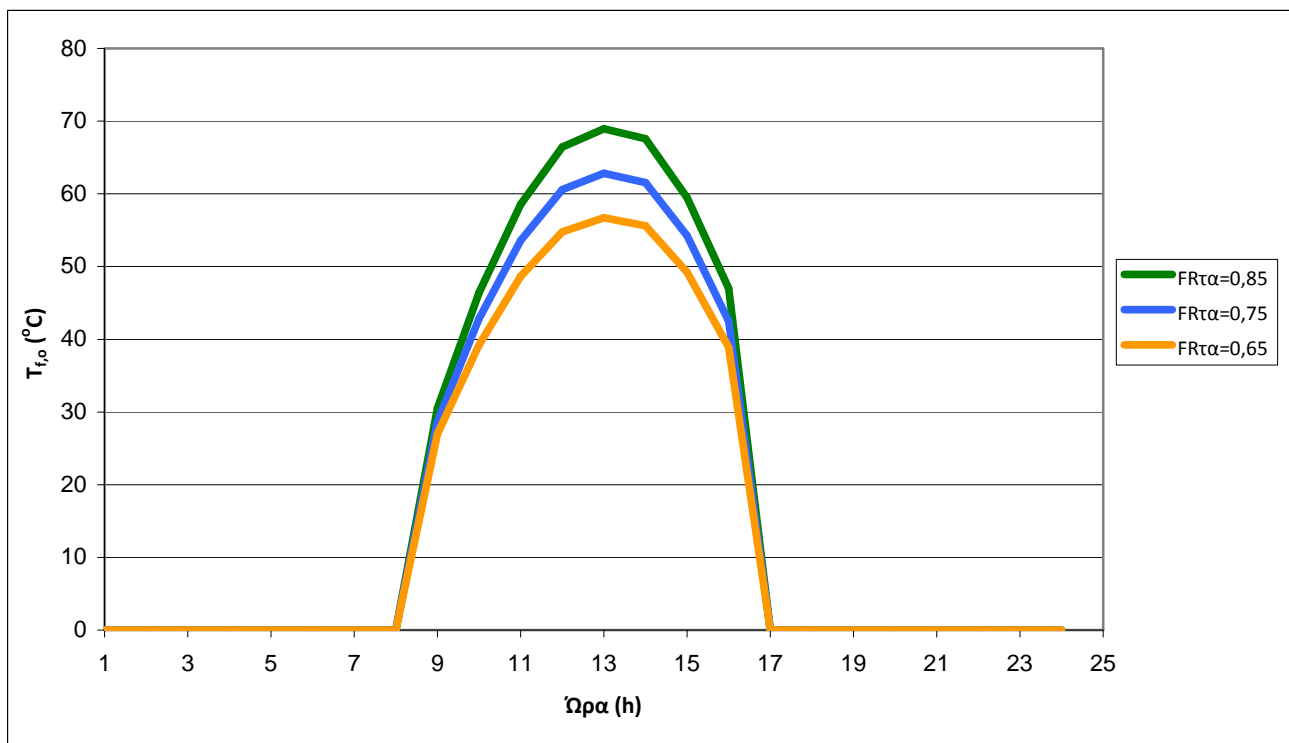
Πίνακας 12.5.2 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για τον Ιανουάριο με γινόμενο $F_{R\cdot\tau_a} = 0,65$.

Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (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	10675,42	40738,096
12:00	23,6285	54,7568	13140,74	36620,075
13:00	23,9863	56,6967	13822,5	31849,050
14:00	24,3642	55,6075	13217,66	26810,986
15:00	24,6728	49,2103	10385,67	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

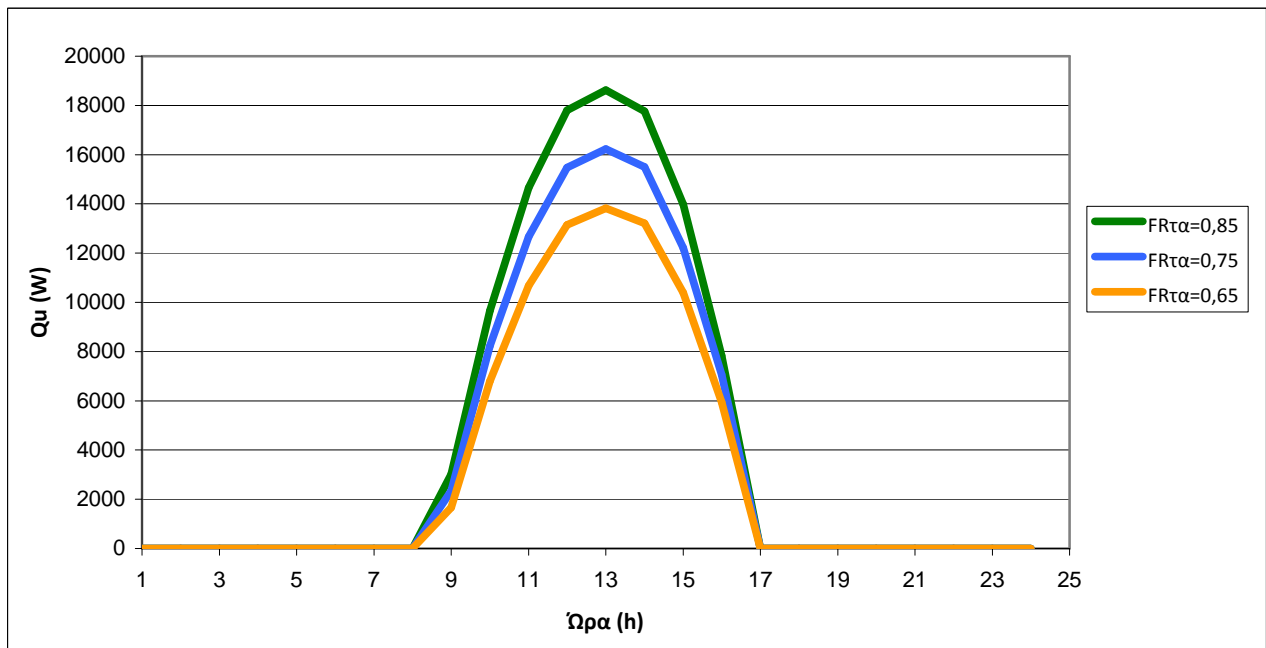
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές των μεγεθών T_{PCM} , $T_{f,o}$ και Q_u για τον μήνα Ιανουάριο για τις διάφορες τιμές του γινομένου $F_{R\cdot\tau_a}$ που αναφέρθηκαν παραπάνω ώστε να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ τους.



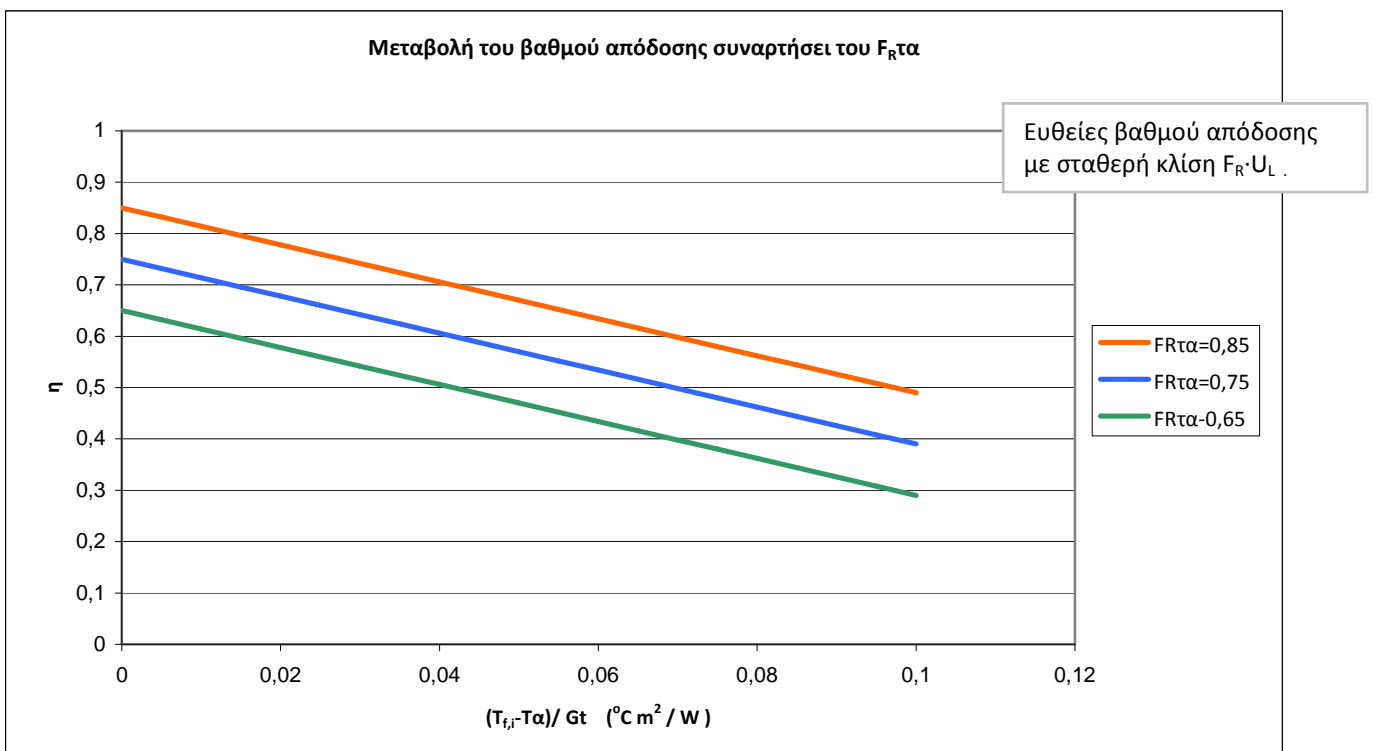
Σχήμα 12.5.1 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας του PCM (T_{PCM}) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή του γινομένου $F_R \cdot \tau$.



Σχήμα 12.5.2 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή του γινομένου $F_R \cdot \tau$.



Σχήμα 12.5.3 : Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή του γινομένου $F_R \tau_a$.



Σχήμα 12.5.4 : Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης συλλέκτη με μεταβλητό $F_R \tau_a$ και σταθερή κλίση $F_R \cdot U_L$.

Όπως φαίνεται λοιπόν και στα διαγράμματα των παραπάνω υπολογιζόμενων μεγεθών παρατηρείται μείωση των τιμών τους όταν μειώνεται το γινόμενο $F_R \cdot \tau_a$. Αυτό είναι λογικό καθώς αυτός ο όρος ουσιαστικά αντιστοιχεί στο βαθμό απόδοσης του συλλέκτη δεδομένου ότι το γινόμενο $F_R \cdot U_L$ παραμένει σταθερό (όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 12.5.4**). Αυτό σημαίνει πως όσο μειώνεται αυτός ο όρος τόσο μειώνεται και ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη. Άρα μειώνονται με τη σειρά τους η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη αλλά και η ωφέλιμη ισχύς του δεδομένου ότι η παροχή μάζας του νερού που διέρχεται μέσω αυτού παραμένει ίδια. Όσον αφορά την θερμοκρασία του PCM, υπό την προϋπόθεση ότι παραμένει σταθερή η μάζα του, είναι προφανές ότι θα μειωθεί καθώς η θερμοκρασία εξόδου του νερού, που με τη σειρά του θα ζεστάνει το PCM, μειώνεται.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Νοέμβριο** και για $F_R \cdot \tau_a = 0,75$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

Πίνακας 12.5.3: T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για το Νοέμβριο με γινόμενο $F_R \cdot \tau_a = 0,75$.

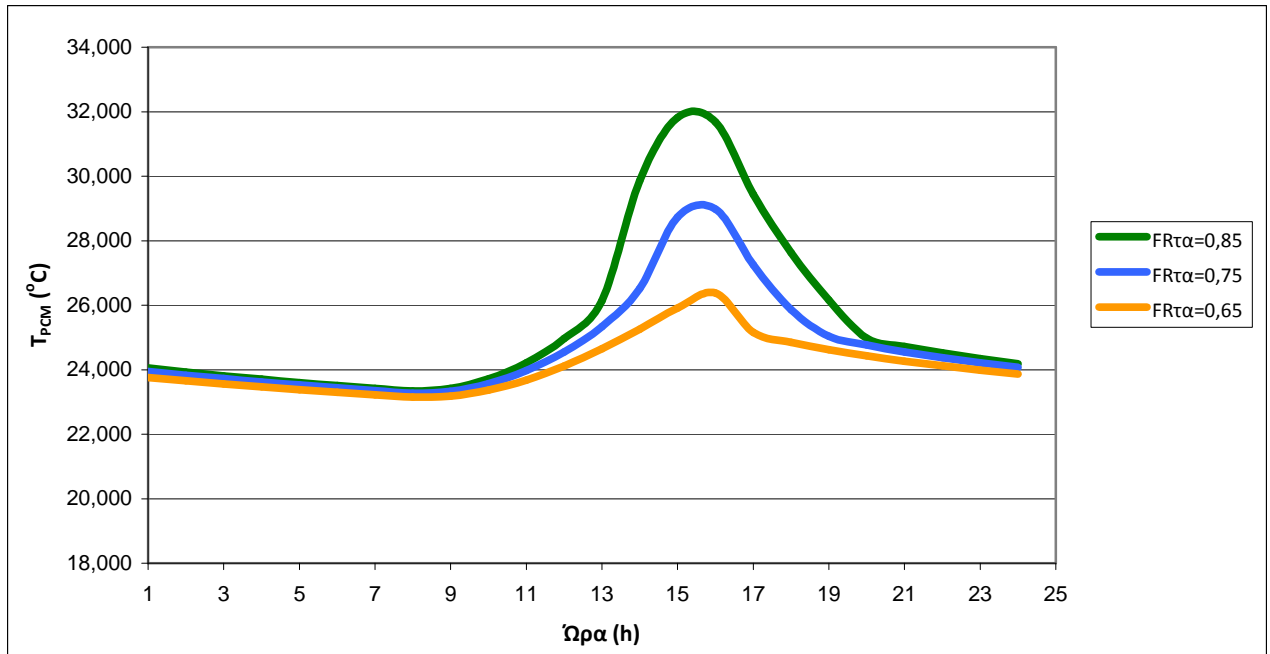
Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	23,9483	0	0	32355,335
2:00	23,8312	0	0	33917,331
3:00	23,7228	0	0	35363,180
4:00	23,6217	0	0	36710,665
5:00	23,5270	0	0	37973,452
6:00	23,4378	0	0	39162,322
7:00	23,3536	0	0	40285,957
8:00	23,2736	0	0	41351,477
9:00	23,3307	34,2420	4584,794	40590,824
10:00	23,5690	48,9918	10726,349	37413,042
11:00	23,9730	60,5330	15450,959	32026,369
12:00	24,5532	68,6187	18661,892	24291,006
13:00	25,3343	71,0951	19454,521	13875,969
14:00	26,5154	68,2181	17925,408	5000,000
15:00	28,7317	61,0772	14446,816	5000,000
16:00	28,9787	47,9049	8014,370	5000,000
17:00	27,2548	0	0	5000,000
18:00	25,8619	0	0	6841,929
19:00	25,0394	0	0	17808,390
20:00	24,7677	0	0	21430,500
21:00	24,5541	0	0	24278,157
22:00	24,3741	0	0	26679,203
23:00	24,2167	0	0	28777,765
24:00	24,0760	0	0	30653,288

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Νοέμβριο** και για $F_R \cdot \tau_a = 0,65$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

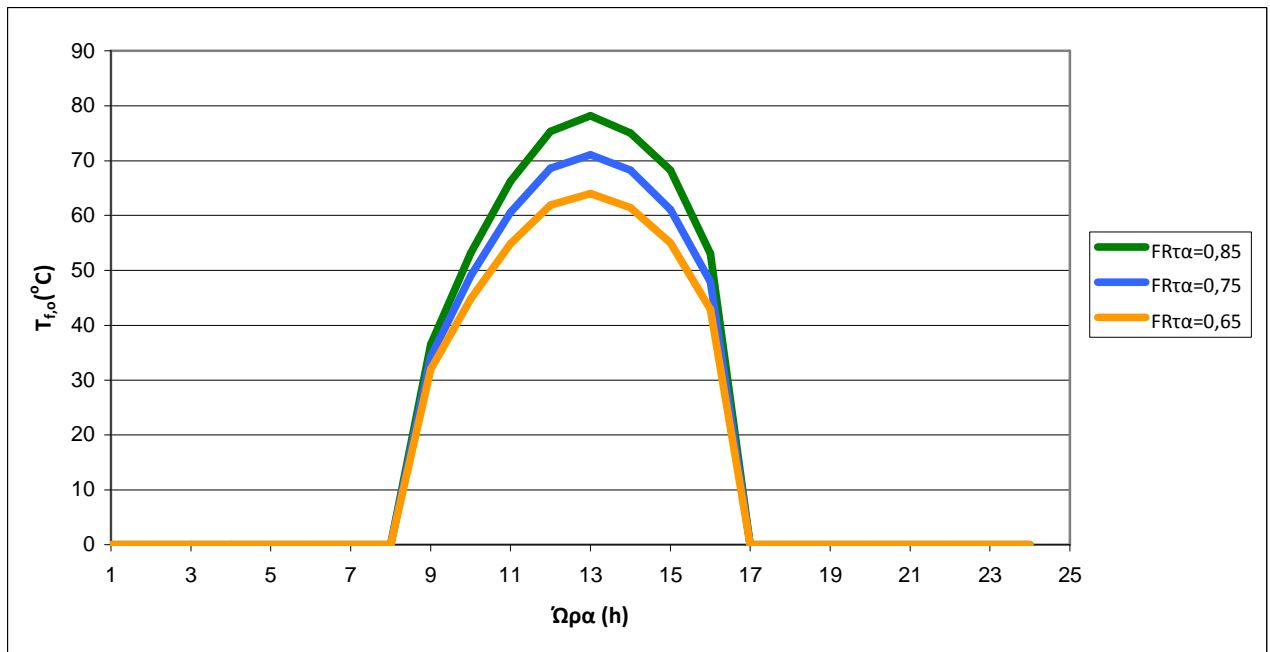
Πίνακας 12.5.4: T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για το Νοέμβριο με γινόμενο $F_R \cdot \tau_a = 0,65$.

Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	23,7608	0	0	34855,628
2:00	23,6572	0	0	36236,714
3:00	23,5604	0	0	37528,573
4:00	23,4693	0	0	38742,917
5:00	23,3833	0	0	39889,108
6:00	23,3019	0	0	40974,779
7:00	23,2245	0	0	42006,248
8:00	23,1508	0	0	42988,816
9:00	23,1835	31,9840	3692,259	42552,763
10:00	23,3666	44,8025	9036,734	40112,537
11:00	23,6794	54,8304	13151,9	35940,814
12:00	24,1140	61,8563	15957,92	30147,125
13:00	24,6466	63,9981	16671,58	23045,731
14:00	25,2537	61,4350	15377,58	14950,298
15:00	25,9149	55,0145	12439,99	6134,950
16:00	26,3784	42,9039	7101,404	5000,000
17:00	25,1537	0	0	16283,860
18:00	24,8499	0	0	20334,957
19:00	24,6209	0	0	23387,751
20:00	24,4312	0	0	25916,757
21:00	24,2671	0	0	28105,299
22:00	24,1214	0	0	30048,666
23:00	23,9897	0	0	31804,261
24:00	23,8693	0	0	33409,955

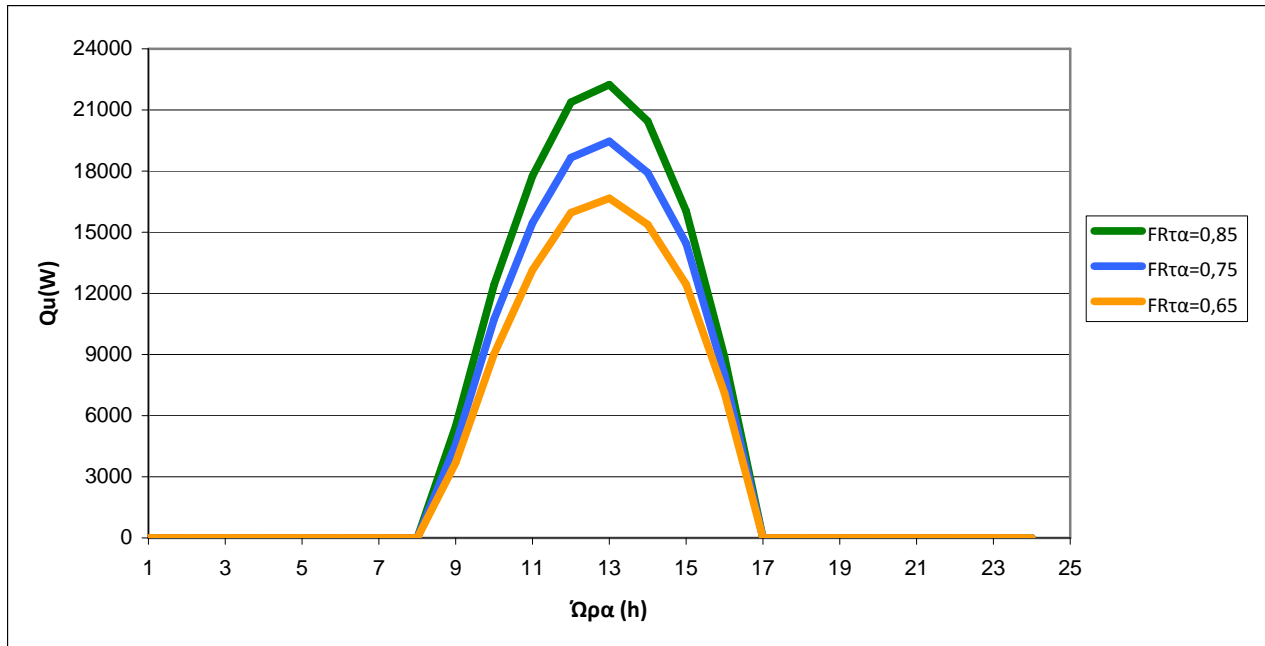
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές των μεγεθών T_{PCM} , $T_{f,o}$ και Q_u για τον μήνα Νοέμβριο για τις διάφορες τιμές του γινομένου $F_R \cdot \tau_a$ που αναφέρθηκαν παραπάνω ώστε να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ τους.



Σχήμα 12.5.5 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας του PCM (T_{PCM}) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή του γινομένου $F_R \cdot \tau$.



Σχήμα 12.5.6 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή του γινομένου $F_R \cdot \tau$.



Σχήμα 12.5.7 : Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή του γινομένου $F_R \cdot \tau_a$.

Αντίστοιχα και για το μήνα Νοέμβριο τα αποτελέσματα είναι ανάλογα με αυτά του Ιανουαρίου.

12.6 Αλλαγή του γινομένου $F_R \cdot U_L$ των ηλιακών συλλεκτών.

Η μεταβολή αυτής της παραμέτρου των ηλιακών συλλεκτών διαπιστώθηκε ότι έχει μικρή επίδραση στα υπολογιζόμενα μεγέθη της μελέτης. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να εκχωρηθούν υπερβολικά μεγάλες και μικρές τιμές, που πιθανών από φυσικής σκοπιάς να είναι λανθασμένες, αντίστοιχα σε αυτή την παράμετρο ούτως ώστε να γίνουν διακριτές οι μεταβολές που επιφέρει στα υπολογιζόμενα μεγέθη.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Ιανουάριο** και για $F_R \cdot U_L = 2,8 \text{ (W/m}^2\text{)/}^\circ\text{C}$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, Cp_{eff} και Q_u .

Πίνακας 12.6.1 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, Cp_{eff} και Q_u συναρτήσει της ώρας για τον Ιανουάριο με γινόμενο $F_R \cdot U_L = 2,8 \text{ (W/m}^2\text{)/}^\circ\text{C}$.

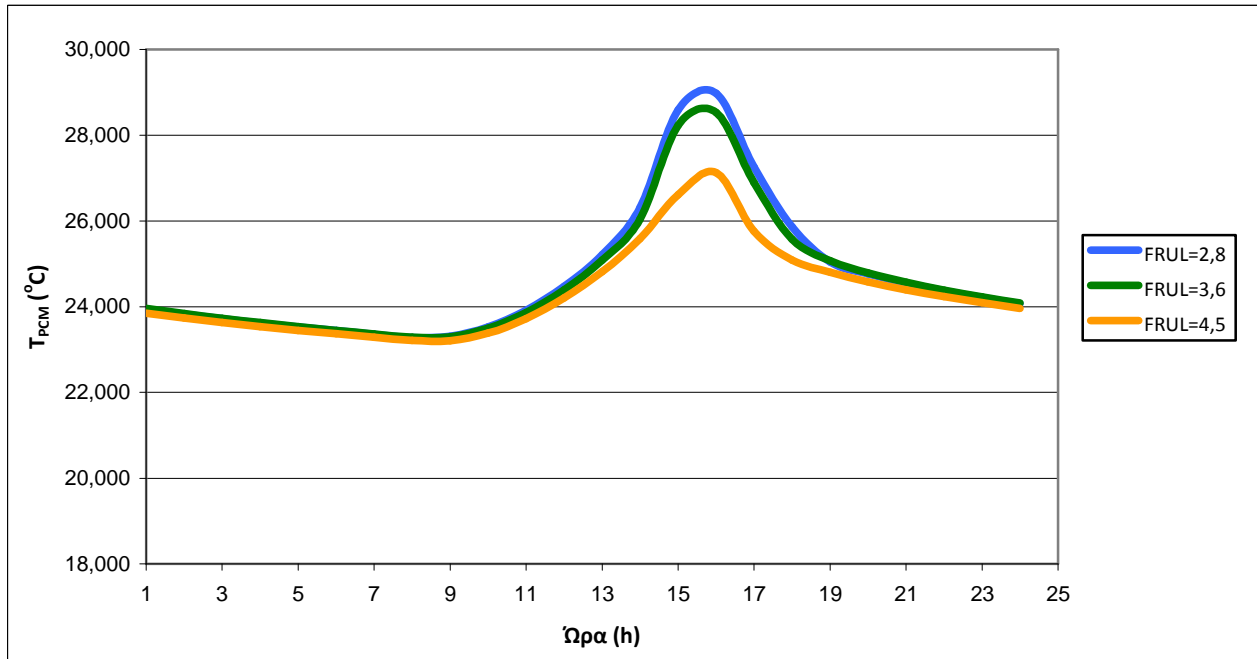
Ώρα	T_{PCM} ($^\circ\text{C}$)	$T_{f,o}$ ($^\circ\text{C}$)	Q_u (W)	Cp_{eff} (J/kg $^\circ\text{C}$)
1:00	23,9486	0	0	32352,653
2:00	23,8314	0	0	33914,858
3:00	23,7229	0	0	35360,883
4:00	23,6219	0	0	36708,517
5:00	23,5271	0	0	37971,435
6:00	23,4380	0	0	39160,419
7:00	23,3537	0	0	40284,155
8:00	23,2738	0	0	41349,766
9:00	23,3044	32,0624	3673,638	40941,686
10:00	23,5281	47,8924	10277,779	37958,212
11:00	23,9202	59,9525	15225,371	32730,204
12:00	24,4777	67,8011	18342,195	25296,822
13:00	25,2164	70,3017	19154,398	15447,548
14:00	26,3139	68,9972	18300,369	5000,000
15:00	28,5903	61,0898	14536,323	5000,000
16:00	28,9776	48,8915	8485,901	5000,000
17:00	27,2539	0	0	5000,000
18:00	25,8612	0	0	6851,333
19:00	25,0399	0	0	17801,424
20:00	24,7681	0	0	21425,327
21:00	24,5545	0	0	24273,904
22:00	24,3743	0	0	26675,539
23:00	24,2169	0	0	28774,521
24:00	24,0762	0	0	30650,363

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Ιανουάριο** και για $F_R \cdot U_L = 4,5 \text{ (W/m}^2\text{)/}^\circ\text{C}$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, Cp_{eff} και Q_u .

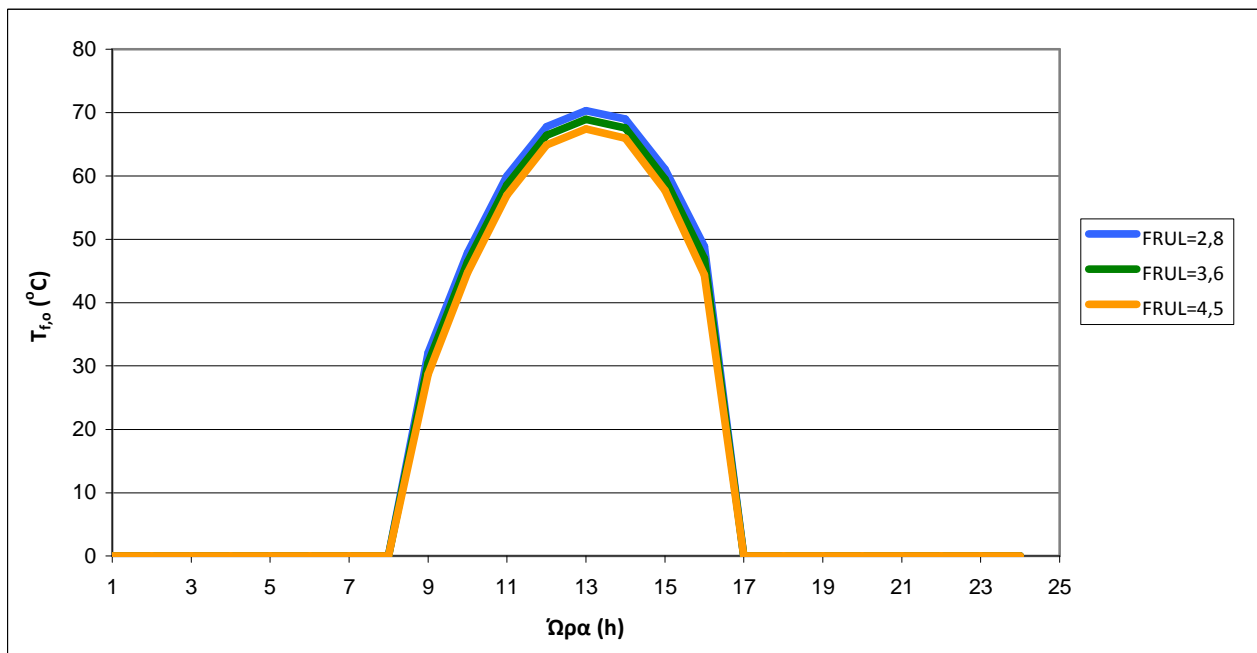
Πίνακας 12.6.2 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, Cp_{eff} και Q_u συναρτήσει της ώρας για τον Ιανουάριο με γινόμενο $F_R \cdot U_L = 4,5 \text{ (W/m}^2\text{)/}^\circ\text{C}$.

Ώρα	T_{PCM} ($^\circ\text{C}$)	$T_{f,o}$ ($^\circ\text{C}$)	Q_u (W)	Cp_{eff} (J/kg $^\circ\text{C}$)
1:00	23,8473	0	0	33702,661
2:00	23,7377	0	0	35163,835
3:00	23,6357	0	0	36524,401
4:00	23,5401	0	0	37798,524
5:00	23,4502	0	0	38997,338
6:00	23,3653	0	0	40129,789
7:00	23,2848	0	0	41203,191
8:00	23,2082	0	0	42223,620
9:00	23,2004	28,6862	2289,812	42328,498
10:00	23,3828	44,7174	8994,112	39896,540
11:00	23,7235	56,9566	14033,87	35353,724
12:00	24,2069	64,9202	17220,25	28908,474
13:00	24,8170	67,4225	18064,12	20773,210
14:00	25,5886	65,9898	17210,24	10485,627
15:00	26,6122	57,6816	13414,89	5000,000
16:00	27,1267	44,3960	7433,653	5000,000
17:00	25,7584	0	0	8221,722
18:00	25,0860	0	0	17186,650
19:00	24,8019	0	0	20974,521
20:00	24,5821	0	0	23904,956
21:00	24,3981	0	0	26358,474
22:00	24,2379	0	0	28494,252
23:00	24,0952	0	0	30397,988
24:00	23,9658	0	0	32122,376

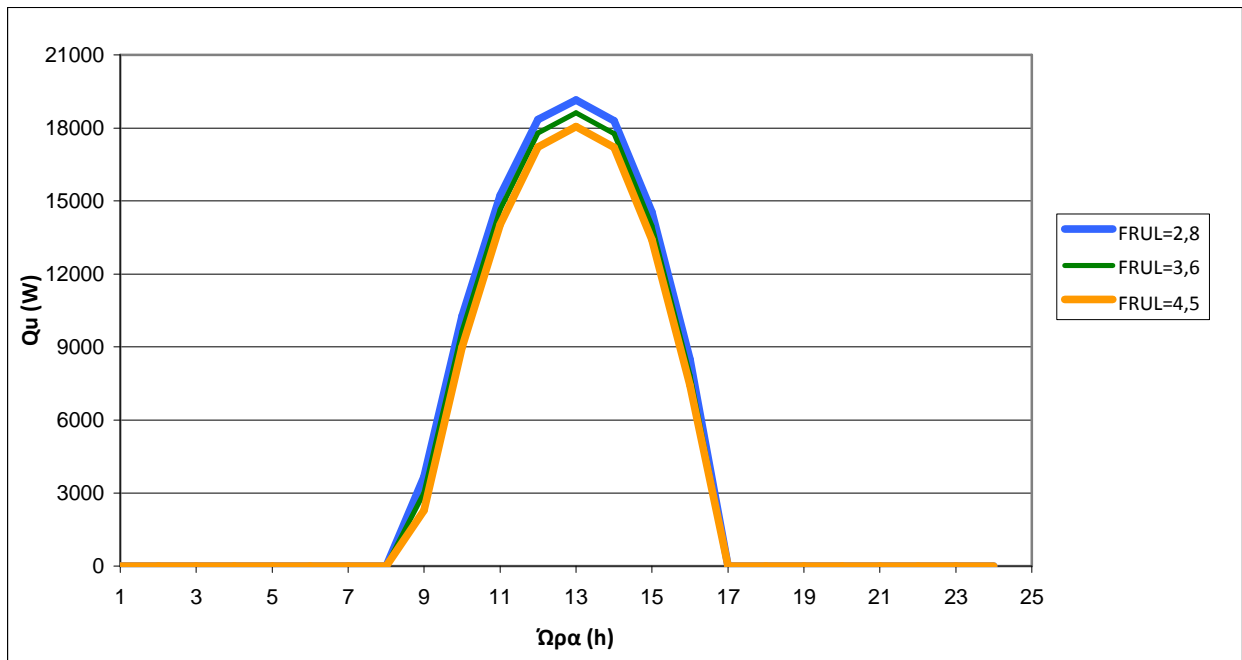
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές των μεγεθών T_{PCM} , $T_{f,o}$ και Q_u για τον μήνα Ιανουάριο για τις διάφορες τιμές του γινομένου $F_R \cdot U_L$ που αναφέρθηκαν παραπάνω ώστε να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ τους.



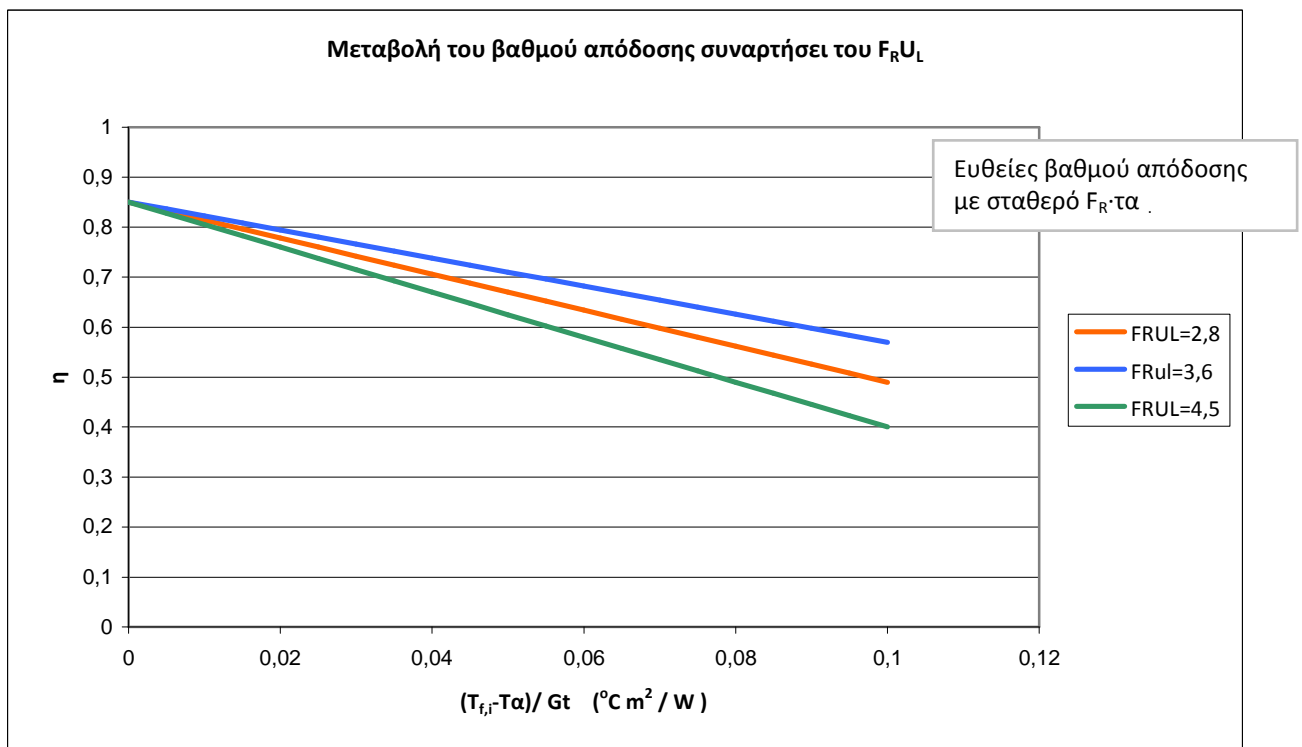
Σχήμα 12.6.1 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας του PCM (T_{PCM}) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή του γινομένου $F_R \cdot U_L$.



Σχήμα 12.6.2 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή του γινομένου $F_R \cdot U_L$.



Σχήμα 12.6.3 : Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή του γινομένου $F_R \cdot U_L$.



Σχήμα 12.6.4 : Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης συλλέκτη με σταθερό F_R -τα και μεταβλητή κλίση $F_R \cdot U_L$.

Όπως φαίνεται λοιπόν και στα διαγράμματα των παραπάνω υπολογιζόμενων μεγεθών παρατηρείται αύξηση των τιμών τους όταν μειώνεται το γινόμενο $F_R \cdot U_L$. Αυτό είναι λογικό καθώς αυτός ο όρος σχετίζεται με το βαθμό απόδοσης του συλλέκτη δεδομένου ότι το γινόμενο F_R τα παραμένει σταθερό (όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 12.6.4**). Αυτό σημαίνει πως όσο μειώνεται αυτός ο όρος τόσο αυξάνεται και ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη. Άρα αυξάνονται με τη σειρά τους η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη αλλά και η ωφέλιμη ισχύς του δεδομένου ότι η παροχή μάζας του νερού που διέρχεται μέσω αυτού παραμένει ίδια. Όσον αφορά την θερμοκρασία του PCM, υπό την προϋπόθεση ότι παραμένει σταθερή η μάζα του, είναι προφανές ότι θα αυξηθεί καθώς η θερμοκρασία εξόδου του νερού, που με τη σειρά του θα ζεστάνει το PCM, αυξάνεται.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Νοέμβριο** και για $F_R \cdot U_L = 2,8 \text{ (W/m}^2\text{)}/^\circ\text{C}$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

Πίνακας 12.6.3 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για το Νοέμβριο με γινόμενο $F_R \cdot U_L = 2,8 \text{ (W/m}^2\text{)}/^\circ\text{C}$.

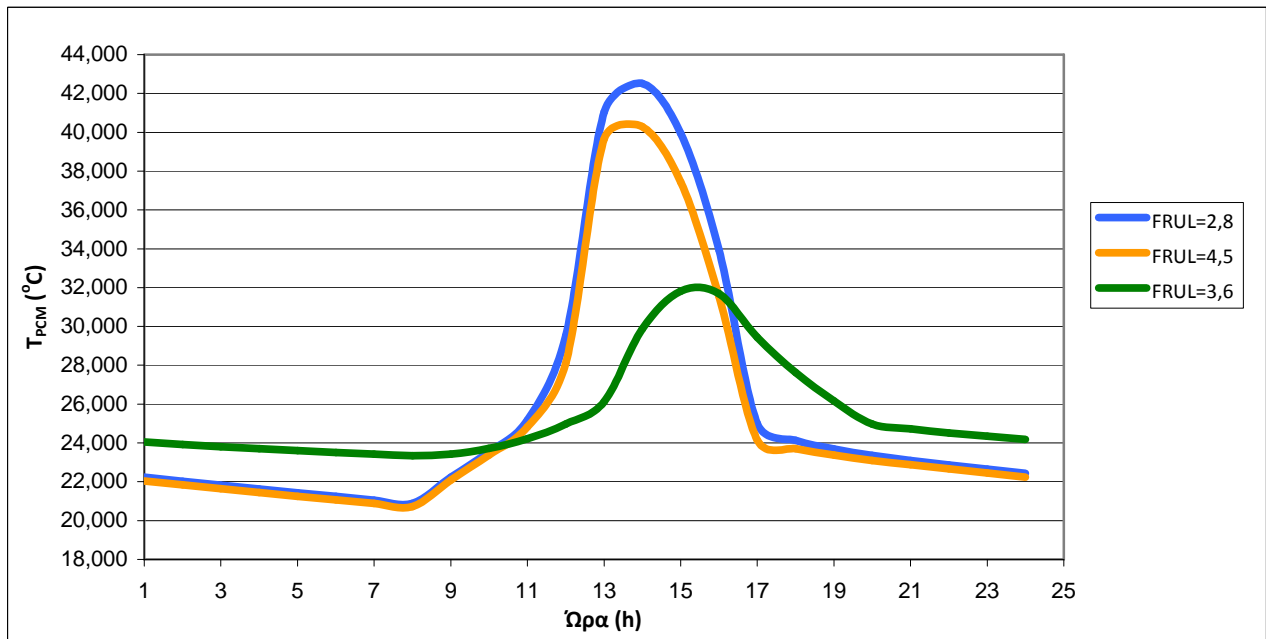
Ώρα	T_{PCM} ($^\circ\text{C}$)	$T_{f,o}$ ($^\circ\text{C}$)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg $^\circ\text{C}$)
1:00	22,2349	0	0	34798,655
2:00	22,0294	0	0	32058,443
3:00	21,8268	0	0	29357,532
4:00	21,6277	0	0	26702,537
5:00	21,4326	0	0	24101,731
6:00	21,2424	0	0	21565,583
7:00	21,0581	0	0	19107,506
8:00	20,8809	0	0	16744,874
9:00	22,2364	36,1425	6379,372	34819,036
10:00	23,5352	53,5631	13094,565	37864,118
11:00	25,1655	67,2203	18260,356	16127,158
12:00	29,5219	77,0716	21696,769	5000,000
13:00	41,0432	82,1994	22019,171	5000,000
14:00	42,5197	85,7326	18680,142	5000,000
15:00	39,9387	77,9012	14789,495	5000,000
16:00	33,9214	60,1047	8429,393	5000,000
17:00	25,0117	0	0	18177,091
18:00	24,1294	0	0	29940,982
19:00	23,6881	0	0	35825,520
20:00	23,3587	0	0	40217,873
21:00	23,0914	0	0	43781,035
22:00	22,8655	0	0	43206,229
23:00	22,6532	0	0	40376,546
24:00	22,4430	0	0	37572,816

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Νοέμβριο** και για $F_R \cdot U_L = 4,5 \text{ (W/m}^2\text{)/}^\circ\text{C}$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

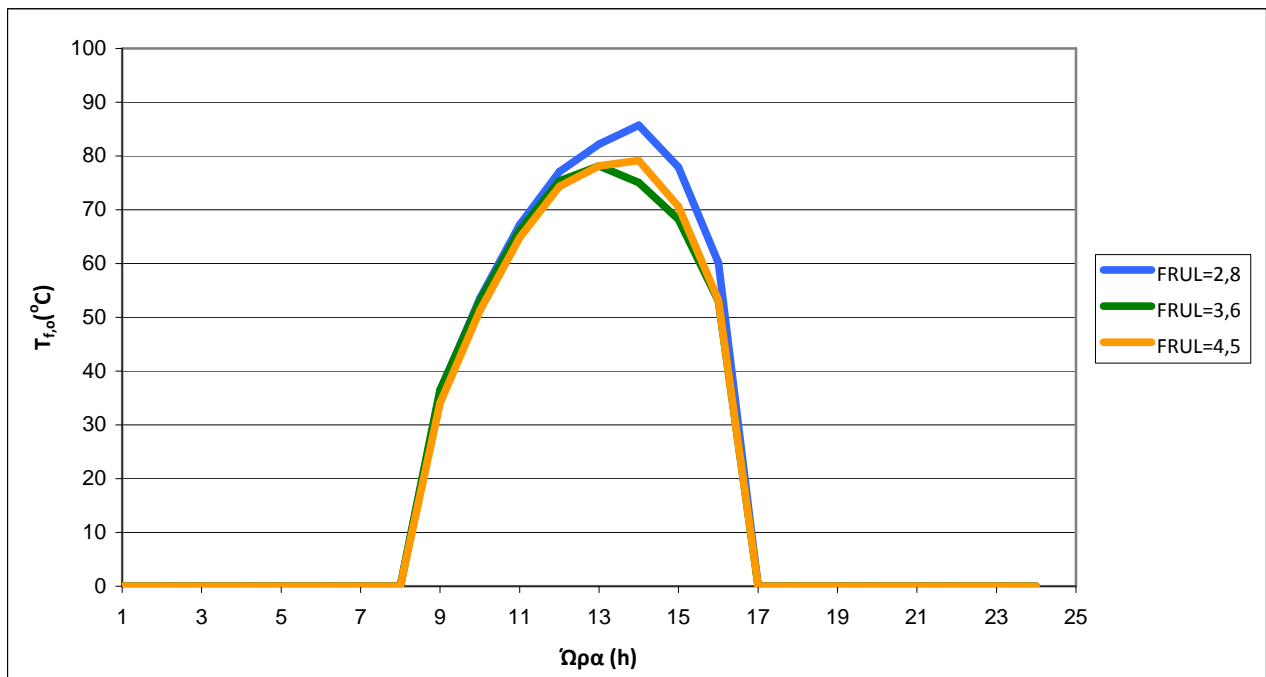
Πίνακας 12.6.4 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για το Νοέμβριο με γινόμενο $F_R \cdot U_L = 4,5 \text{ (W/m}^2\text{)/}^\circ\text{C}$.

Ώρα	T_{PCM} ($^\circ\text{C}$)	$T_{f,o}$ ($^\circ\text{C}$)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg $^\circ\text{C}$)
1:00	22,0386	0	0	32181,808
2:00	21,8359	0	0	29478,983
3:00	21,6366	0	0	26821,743
4:00	21,4414	0	0	24218,274
5:00	21,2509	0	0	21678,932
6:00	21,0663	0	0	19216,975
7:00	20,8887	0	0	16849,573
8:00	20,7199	0	0	14599,152
9:00	22,0857	34,0233	5560,791	32809,677
10:00	23,3711	51,3014	12212,16	40051,351
11:00	24,8312	64,7968	17315,92	20584,347
12:00	28,1022	74,3482	20698,13	5000,000
13:00	39,6597	78,1707	20928,6	5000,000
14:00	40,2877	79,1638	16512,73	5000,000
15:00	37,4438	70,6114	12675,33	5000,000
16:00	31,5397	53,1731	6574,854	5000,000
17:00	24,1543	0	0	29609,636
18:00	23,7053	0	0	35595,835
19:00	23,3722	0	0	40037,178
20:00	23,1027	0	0	43630,864
21:00	22,8751	0	0	43335,017
22:00	22,6628	0	0	40504,234
23:00	22,4524	0	0	37699,254
24:00	22,2443	0	0	34923,666

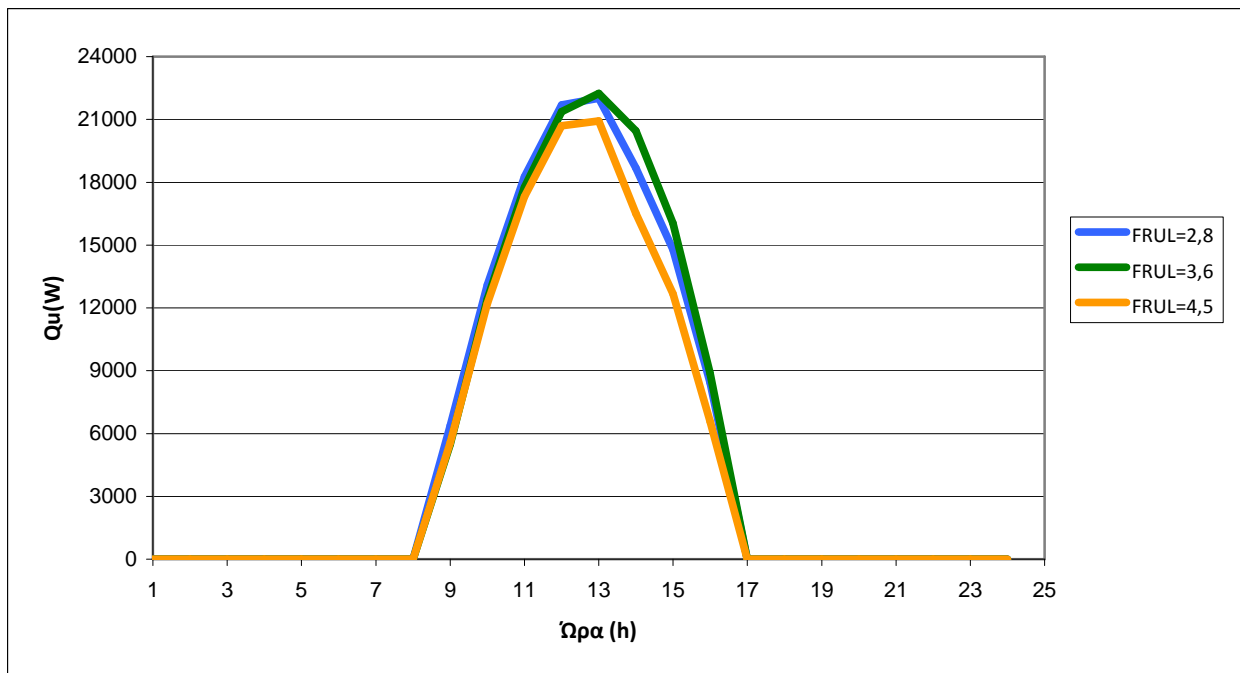
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές των μεγεθών T_{PCM} , $T_{f,o}$ και Q_u για τον μήνα Νοέμβριο για τις διάφορες τιμές του γινομένου $F_R \cdot U_L$ που αναφέρθηκαν παραπάνω ώστε να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ τους.



Σχήμα 12.6.5 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας του PCM (T_{PCM}) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή του γινομένου $F_R \cdot U_L$.



Σχήμα 12.6.6 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή του γινομένου $F_R \cdot U_L$.



Σχήμα 12.6.7 : Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή του γινομένου $F_R \cdot U_L$.

Για το μήνα Νοέμβριο όπως φαίνεται λοιπόν και στα διαγράμματα των παραπάνω υπολογιζόμενων μεγεθών παρατηρείται αύξηση των τιμών τους όταν μειώνεται το γινόμενο $F_R \cdot U_L$. Αυτό είναι λογικό καθώς αυτός ο όρος σχετίζεται με το βαθμό απόδοσης του συλλέκτη δεδομένου ότι το γινόμενο F_R τα παραμένει σταθερό (όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 12.6.4**). Αυτό σημαίνει πως όσο μειώνεται αυτός ο όρος τόσο αυξάνεται και ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη. Άρα αυξάνονται με τη σειρά τους η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη αλλά και η ωφέλιμη ισχύς του δεδομένου ότι η παροχή μάζας του νερού που διέρχεται μέσω αυτού παραμένει ίδια. Οι διαφορές αυτές βέβαια μεταξύ των καμπυλών δεν είναι τόσο έντονες όσο είναι για το μήνα Ιανουάριο. Όσον αφορά την θερμοκρασία του PCM όπως φαίνεται και στο σχήμα για τις τιμές του γινομένου $F_R \cdot U_L$ 2,8 και 4,5 (W/m^2)/ $^{\circ}C$ οι δυο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται.

12.7 Αλλαγή της μάζας του PCM που είναι ενσωματωμένο στο δάπεδο.

Όπως και για την προηγούμενη παράμετρο έτσι και για τη μεταβολή της μάζας του PCM διαπιστώθηκε ότι έχει μικρή επίδραση στα υπολογιζόμενα μεγέθη της μελέτης. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να εκχωρηθούν υπερβολικά μεγάλες και μικρές τιμές, που πιθανών

από φυσικής σκοπιάς να είναι λανθασμένες, αντίστοιχα σε αυτή την παράμετρο ούτως ώστε να γίνουν διακριτές οι μεταβολές που επιφέρει στα υπολογιζόμενα μεγέθη.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Ιανουάριο** και για $m_{PCM} = 500 \text{ kg}$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

Πίνακας 12.7.1: T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για τον Ιανουάριο με $m_{PCM}=500 \text{ kg}$.

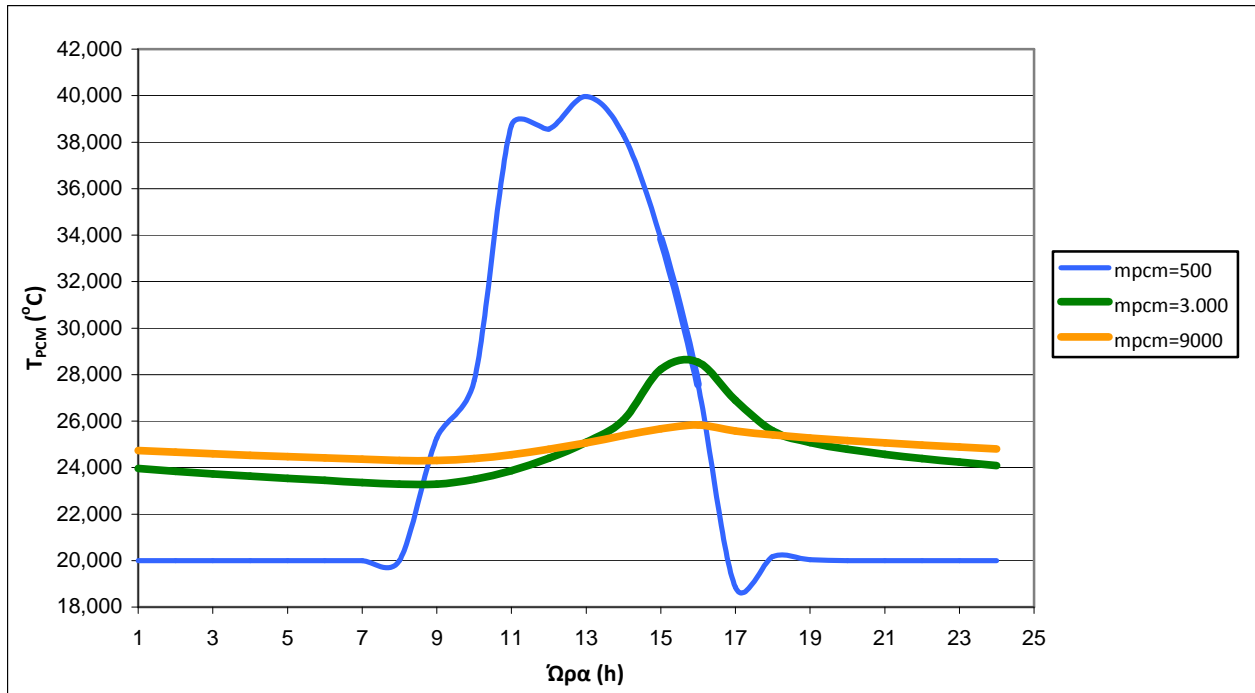
Ωρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	20,0000	0	0	5000,002
2:00	20,0000	0	0	5000,000
3:00	20,0000	0	0	5000,000
4:00	20,0000	0	0	5000,000
5:00	20,0000	0	0	5000,000
6:00	20,0000	0	0	5000,000
7:00	20,0000	0	0	5000,000
8:00	20,0000	0	0	5000,000
9:00	25,2747	28,7632	3662,999	14670,429
10:00	27,7540	47,4552	9271,458	5000,000
11:00	38,7092	60,7947	13811,012	5000,000
12:00	38,5590	74,2669	14863,080	5000,000
13:00	39,9622	76,4099	15821,682	5000,000
14:00	38,3082	75,4196	14821,174	5000,000
15:00	33,8480	65,9380	11549,229	5000,000
16:00	27,5709	49,9229	6719,299	5000,000
17:00	18,8492	0	0	5000,000
18:00	20,1749	0	0	7332,238
19:00	20,0375	0	0	5500,097
20:00	19,9982	0	0	5000,000
21:00	20,0003	0	0	5003,592
22:00	20,0000	0	0	5000,000
23:00	20,0000	0	0	5000,083
24:00	20,0000	0	0	5000,000

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Ιανουάριο** και για $m_{PCM} = 9.000 \text{ kg}$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

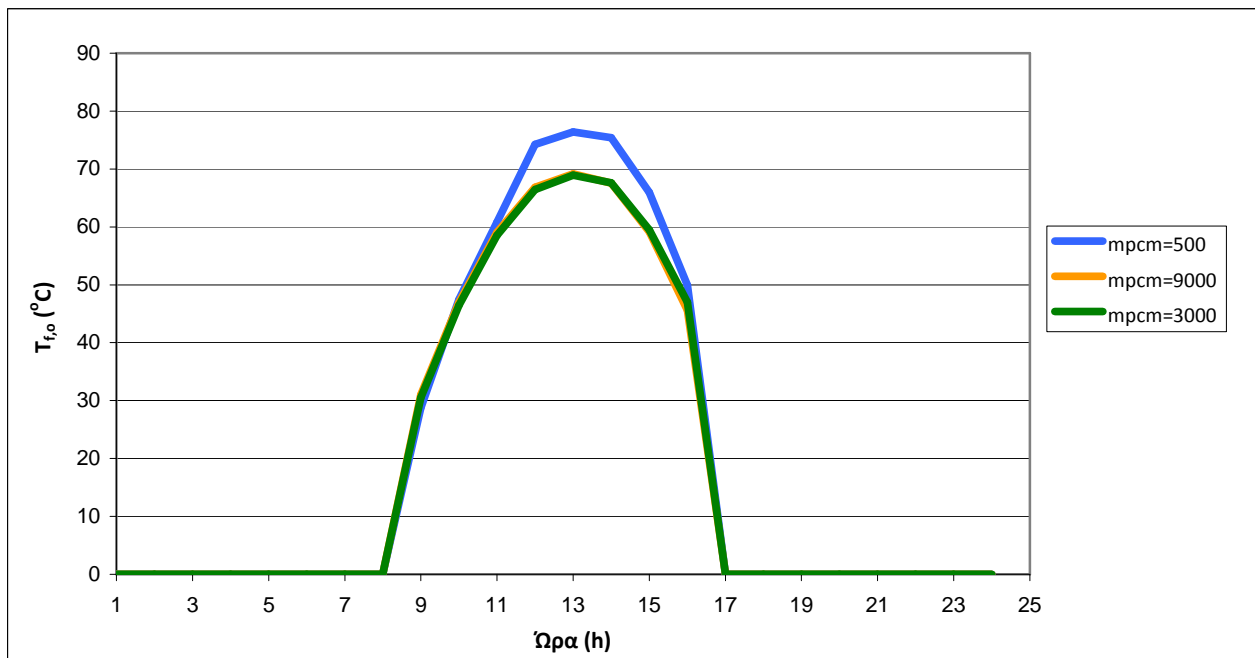
Πίνακας 12.7.2 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για τον Ιανουάριο με $m_{PCM}=9.000$ kg .

Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	24,728809	0	0	21949,20949
2:00	24,659867	0	0	22868,43408
3:00	24,594662	0	0	23737,84652
4:00	24,532723	0	0	24563,69604
5:00	24,473673	0	0	25351,02125
6:00	24,417203	0	0	26103,95633
7:00	24,363054	0	0	26825,94398
8:00	24,311008	0	0	27519,88779
9:00	24,301715	31,03210614	2809,419	27643,80068
10:00	24,388863	46,94313246	9464,113	26481,8301
11:00	24,554504	59,02357312	14477,31	24273,27806
12:00	24,785575	66,81699149	17665,72	21192,33363
13:00	25,063418	69,16075657	18548,83	17487,75727
14:00	25,377247	67,57811438	17771,14	13303,37213
15:00	25,672143	59,13218449	14109,56	9371,430236
16:00	25,834355	45,61981464	8338,127	7208,594141
17:00	25,57536	0	0	10661,86802
18:00	25,408024	0	0	12893,01572
19:00	25,273799	0	0	14682,68506
20:00	25,158859	0	0	16215,20726
21:00	25,057052	0	0	17572,64496
22:00	24,964962	0	0	18800,50529
23:00	24,880454	0	0	19927,27491
24:00	24,802082	0	0	20972,23827

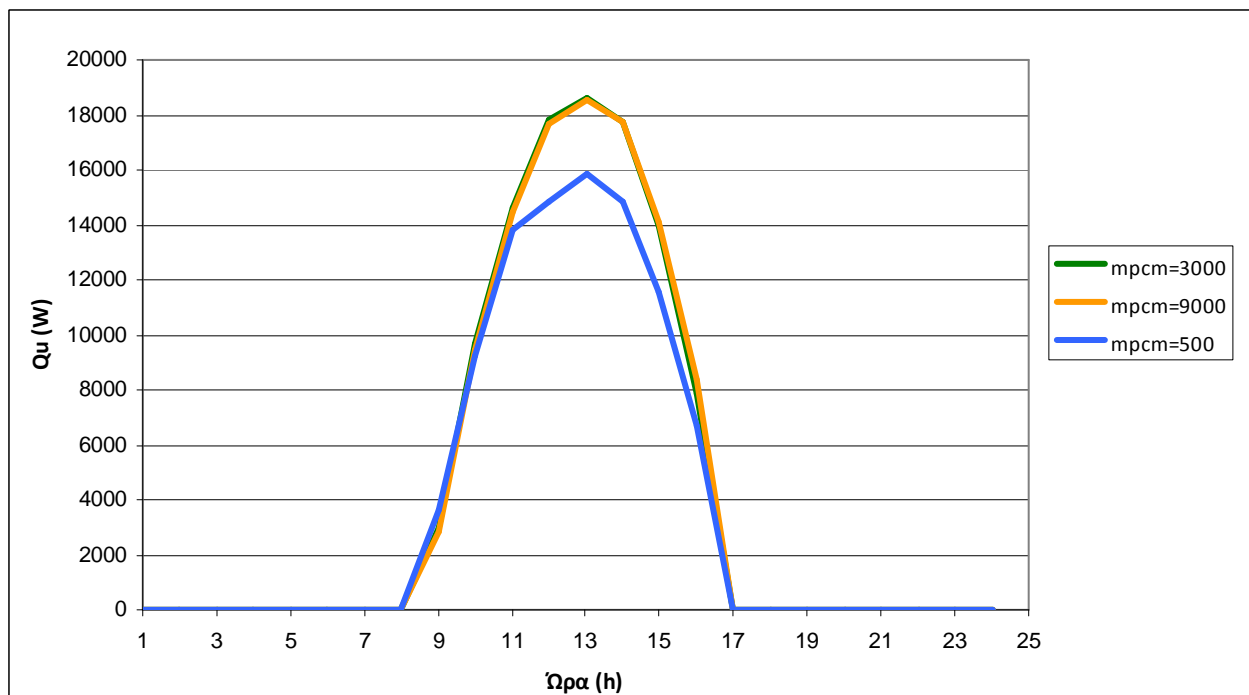
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές των μεγεθών T_{PCM} , $T_{f,o}$ και Q_u για τον μήνα Ιανουάριο για τις διάφορες τιμές της m_{PCM} που αναφέρθηκαν παραπάνω ώστε να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ τους.



Σχήμα 12.7.1 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας του PCM (T_{PCM}) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή της m_{PCM} .



Σχήμα 12.7.2 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή της m_{PCM} .



Σχήμα 12.7.3 : Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή της m_{PCM} .

Στα διαγράμματα που προηγήθηκαν παραπάνω δεν είναι σαφής η τάση της μεταβολής των υπολογιζόμενων μεγεθών κατά την μεταβολή της μάζας του PCM. Όσο αφορά τη θερμοκρασία του PCM παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η μάζα του η θερμοκρασία του αυξάνει σε υψηλά επίπεδα κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας ενώ αντίθετα κατά τις υπόλοιπες ώρες πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Αντίθετα όταν αυξάνει η μάζα του, η θερμοκρασία του αυξάνεται κατά τις ώρες με ηλιοφάνεια σε όχι πολύ υψηλά επίπεδα, διότι κάποιο μέρος της θερμότητας που λαμβάνει αποθηκεύεται για να αποδοθεί τις νυχτερινές ώρες, ενώ τις υπόλοιπες ώρες μειώνεται με σαφώς μικρότερο ρυθμό. Όσο αφορά τα μεγέθη της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη αλλά και της ωφέλιμης ισχύος του, παρατηρείται ότι οι διαφορές είναι αρκετά μικρές μεταξύ των καμπυλών και η μάζα του PCM από μια τιμή και μετά δεν επιδρά καθόλου στις τιμές αυτών των μεγεθών.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Νοέμβριο** και για $m_{PCM} = 500 \text{ kg}$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

Πίνακας 12.7.3: T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για το Νοέμβριο με $m_{PCM}=500 \text{ kg}$.

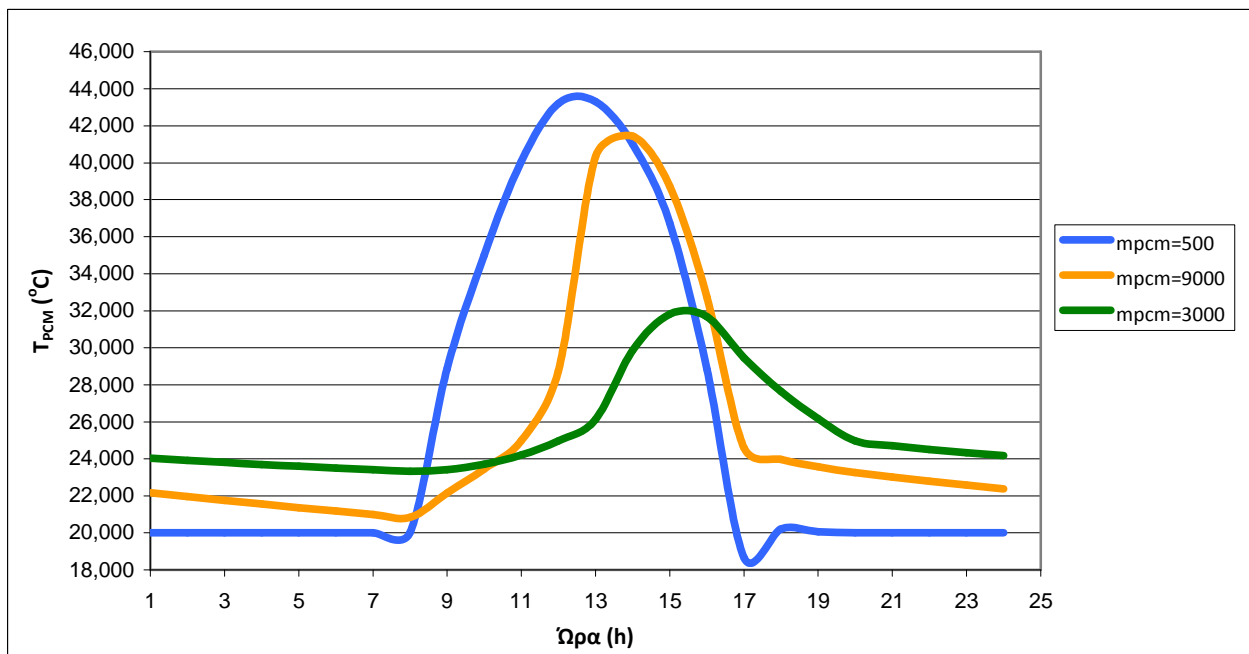
Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	20,0000	0	0	5000,001
2:00	20,0000	0	0	5000,000
3:00	20,0000	0	0	5000,000
4:00	20,0000	0	0	5000,000
5:00	20,0000	0	0	5000,000
6:00	20,0000	0	0	5000,000
7:00	20,0000	0	0	5000,000
8:00	20,0000	0	0	5000,000
9:00	28,8557	34,7125	6149,825	5000,000
10:00	34,9996	56,0116	11351,137	5000,000
11:00	40,0787	72,1452	15526,861	5000,000
12:00	43,2065	83,7033	18235,058	5000,000
13:00	43,3013	87,7784	18631,06	5000,000
14:00	41,0130	84,0954	17051,935	5000,000
15:00	36,7255	74,1062	13832,954	5000,000
16:00	28,8370	55,6305	7902,3049	5000,000
17:00	18,6568	0	0	5000,000
18:00	20,2042	0	0	7722,281
19:00	20,0519	0	0	5691,749
20:00	19,9994	0	0	5000,000
21:00	20,0001	0	0	5001,261
22:00	20,0000	0	0	5000,000
23:00	20,0000	0	0	5000,029
24:00	20,0000	0	0	5000,000

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Νοέμβριο** και για $m_{PCM} = 9.000 \text{ kg}$ έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

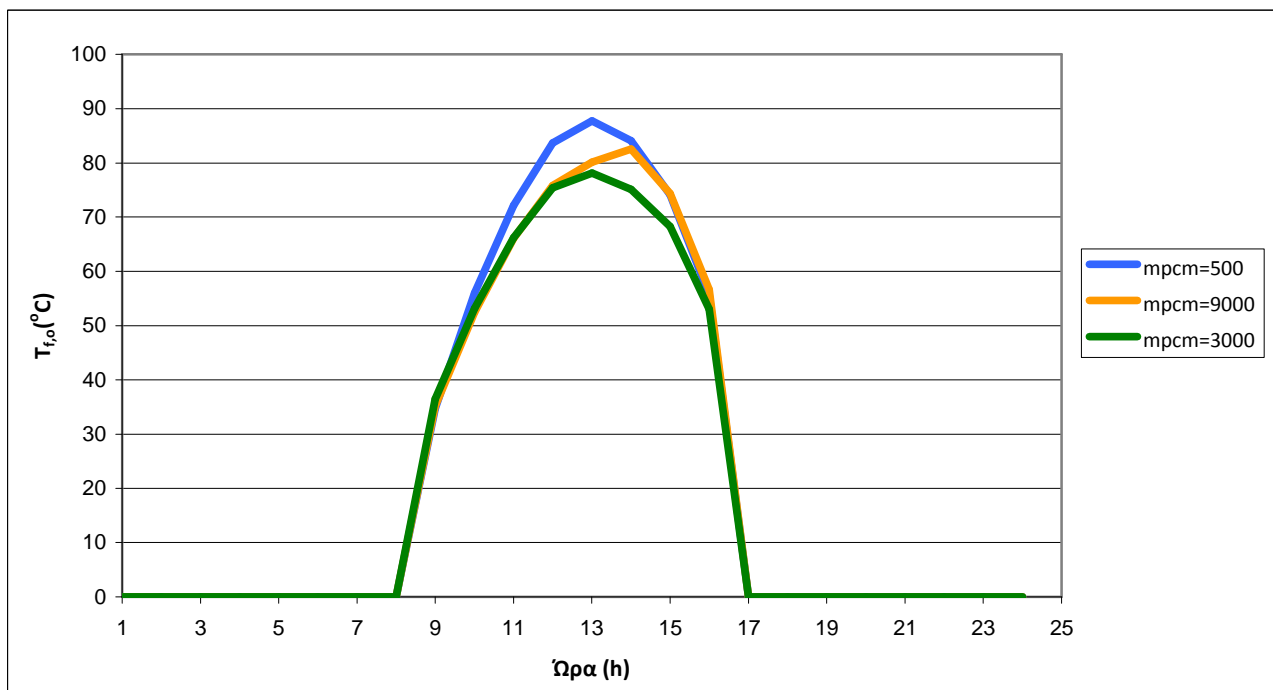
Πίνακας 12.7.4 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για το Νοέμβριο με $m_{PCM}=9.000$ kg .

Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	22,1720	0	0	33960,125
2:00	21,9673	0	0	31231,266
3:00	21,7658	0	0	28543,573
4:00	21,5678	0	0	25904,120
5:00	21,3741	0	0	23321,782
6:00	21,1856	0	0	20807,836
7:00	21,0033	0	0	18376,777
8:00	20,8286	0	0	16047,441
9:00	22,1554	35,1486	5985,77	33738,067
10:00	23,4540	52,4851	12677,81	38946,528
11:00	24,9997	66,0686	17812,88	18337,522
12:00	28,7561	75,7669	21220,71	5000,000
13:00	40,3460	80,1730	21492,24	5000,000
14:00	41,4342	82,5400	17637,09	5000,000
15:00	38,7160	74,3279	13749,55	5000,000
16:00	32,7443	56,6781	7508,19	5000,000
17:00	24,5879	0	0	23827,371
18:00	23,9718	0	0	32042,814
19:00	23,5751	0	0	37331,457
20:00	23,2687	0	0	41417,537
21:00	23,0161	0	0	44784,804
22:00	22,8006	0	0	42341,708
23:00	22,5890	0	0	39519,586
24:00	22,3793	0	0	36724,448

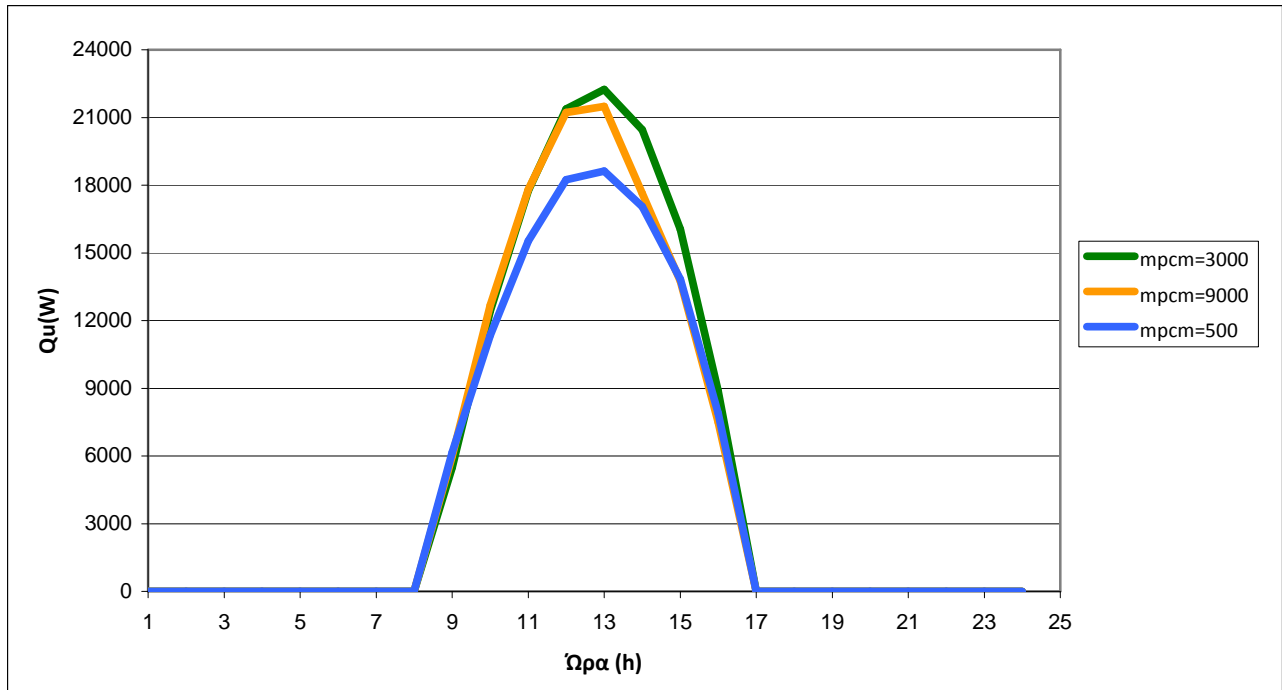
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές των μεγεθών T_{PCM} , $T_{f,o}$ και Q_u για τον μήνα Νοέμβριο για τις διάφορες τιμές της m_{PCM} που αναφέρθηκαν παραπάνω ώστε να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ τους.



Σχήμα 12.7.4 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας του PCM (T_{PCM}) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή της m_{PCM} .



Σχήμα 12.7.5 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή της m_{PCM} .



Σχήμα 12.7.6 : Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας για μεταβολή της m_{PCM} .

Για το μήνα Νοέμβριο όσο αφορά τη θερμοκρασία του PCM παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η μάζα του η θερμοκρασία του αυξάνει σε υψηλά επίπεδα κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας ενώ αντίθετα κατά τις υπόλοιπες ώρες πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Αντίθετα όταν αυξάνει η μάζα του, η θερμοκρασία του αυξάνεται κατά τις ώρες με ηλιοφάνεια σε υψηλά επίπεδα ενώ τις υπόλοιπες ώρες μειώνεται με σαφώς μικρότερο ρυθμό. Όσο αφορά τα μεγέθη της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη αλλά και της ωφέλιμης ισχύος του, παρατηρείται ότι οι διαφορές είναι αρκετά μικρές μεταξύ των καμπυλών.

12.8 Αντικατάσταση του PCM από μπετό.

Σε αυτή την παραλλαγή της μελέτης αντικαθιστούμε το στρώμα του PCM που έχει ενσωματωθεί στο δάπεδο με μπετό το οποίο διαθέτει διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά από αυτά του PCM. Το μπετό έχει πυκνότητα $\rho_{\mu\beta\epsilon\tau\acute{o}}=2.300 \text{ kg/m}^3$ και ειδική θερμοχωρητικότητα $C_p=880 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ η οποία παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Οι τιμές όλων των υπολοίπων παραμέτρων παραμένουν ίδιες με τις τιμές της βασικής μελέτης που προηγήθηκε.

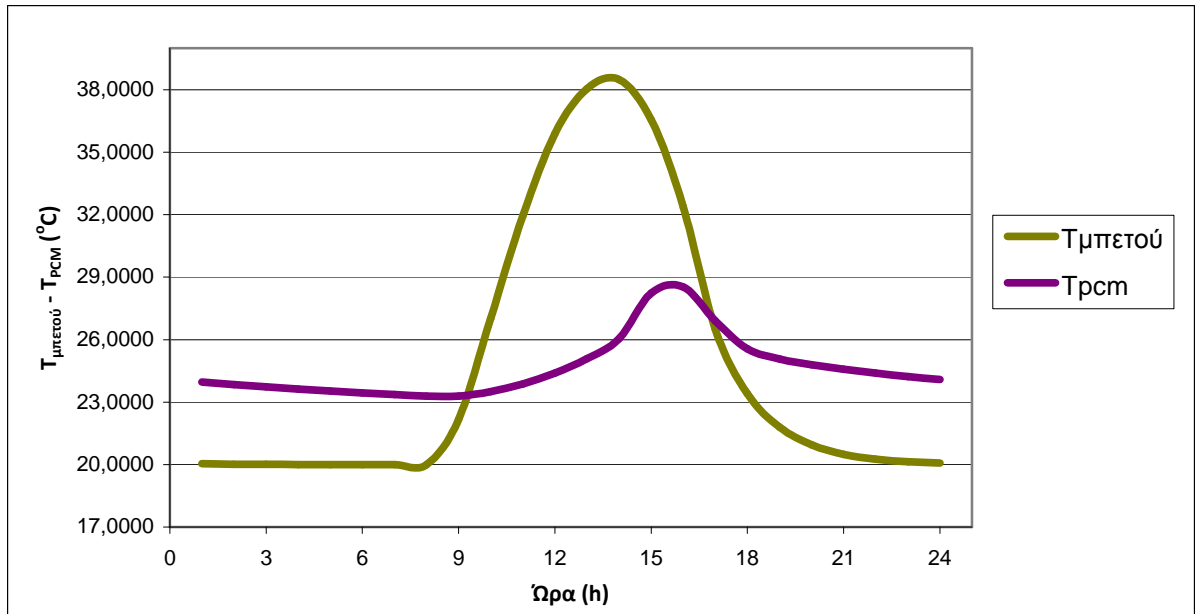
Χρησιμοποιώντας και πάλι το ίδιο υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και στη βασική μελέτη υπολογίζουμε τα μεγέθη θερμοκρασία του μπετό, τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη $T_{f,o}$ και την ωφέλιμη ισχύ του συλλέκτη Q_u για κάθε ώρα της ημέρας για τους μήνες Ιανουάριο και Νοέμβριο.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Ιανουάριο** και για τη χρήση μπετό αντί του PCM έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη $T_{\text{μπετού}}$, $T_{f,o}$ και Q_u .

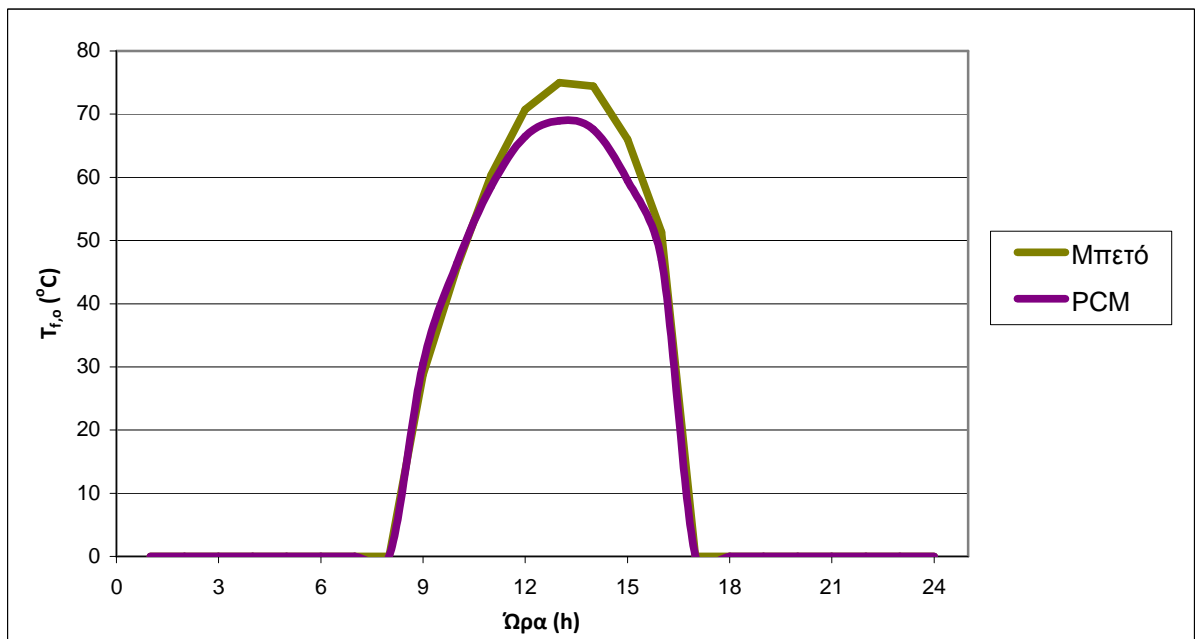
Πίνακας 12.8.1: $T_{\text{μπετού}}$, $T_{f,o}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για τον Ιανουάριο με χρήση μπετού.

Ώρα	$T_{\text{μπετού}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{f,o} (^{\circ}\text{C})$	$Q_u (\text{W})$
1:00	20,0379	0	0
2:00	20,0199	0	0
3:00	20,0105	0	0
4:00	20,0055	0	0
5:00	20,0029	0	0
6:00	20,0015	0	0
7:00	20,0008	0	0
8:00	20,0004	0	0
9:00	22,1719	28,7634	3662,915
10:00	27,0029	45,8222	9885,814
11:00	31,9579	60,3994	13959,728
12:00	35,8908	70,7135	16199,849
13:00	38,0473	75,0056	16349,988
14:00	38,4994	74,4118	15200,327
15:00	36,5499	66,0386	11511,380
16:00	32,3667	51,3450	6184,330
17:00	26,5011	0	0
18:00	23,4176	0	0
19:00	21,7966	0	0
20:00	20,9445	0	0
21:00	20,4965	0	0
22:00	20,2610	0	0
23:00	20,1372	0	0
24:00	20,0721	0	0

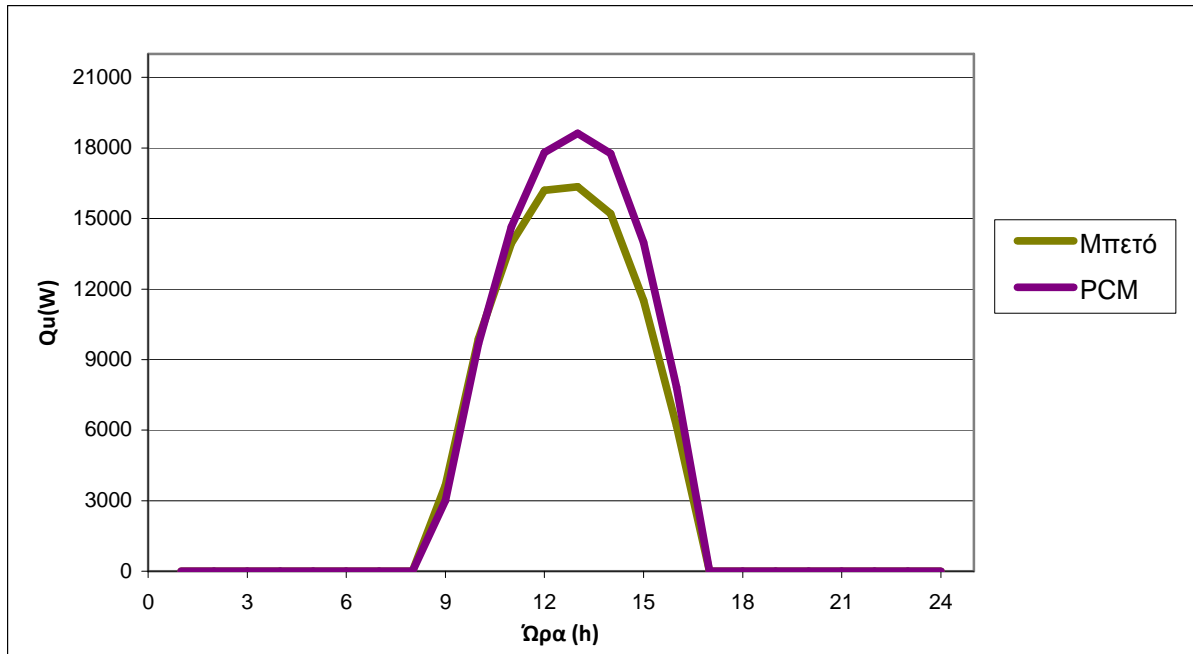
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές των μεγεθών T_{PCM} , $T_{\text{μπετού}}$, $T_{f,o}$ και Q_u για τον μήνα Ιανουάριο με χρήση PCM και μπετό στο δάπεδο ώστε να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ τους



Σχήμα 12.8.1 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας του PCM (T_{PCM}) και της θερμοκρασίας του μπετού ($T_{μπετού}$) συναρτήσει της ώρας .



Σχήμα 12.8.2 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας για μπετό και για PCM.



Σχήμα 12.8.3 : Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας για μπετό και PCM.

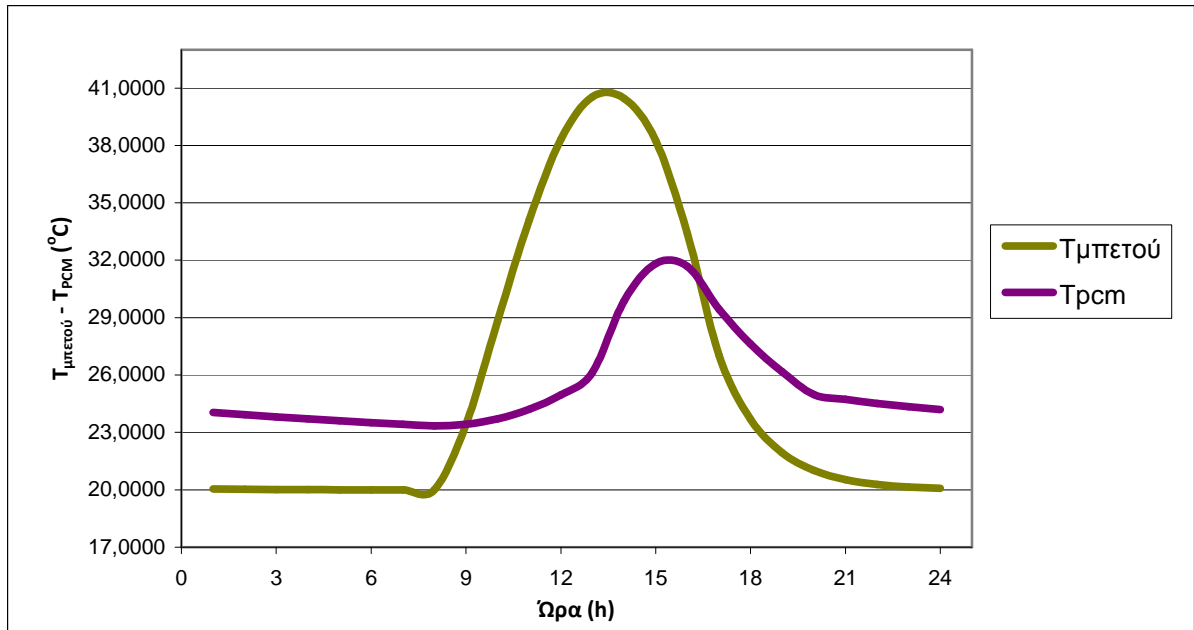
Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα το μπετό αναπτύσσει αρκετά υψηλότερες θερμοκρασίες κατά τις ώρες με ηλιοφάνεια καθώς χρησιμοποιεί τη θερμότητα που παραλαμβάνει εξ' ολοκλήρου για την αύξηση της θερμοκρασίας του και όχι για την αλλαγή φάσης όπως κάνει το PCM. Παρόλα αυτά τις ώρες δίχως ηλιοφάνεια το μπετό παρατηρείται ότι αποβάλλει γρηγορότερα τη θερμότητα που έχει προσλάβει και επομένως παρουσιάζει χαμηλότερες θερμοκρασίες συγκριτικά με το PCM. Συνολικά κατά τη διάρκεια της μέρας το μπετό παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση θερμοκρασιών σε σχέση με το PCM. Όσο αφορά τη θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη για την περίπτωση του μπετό είναι μεγαλύτερη κάτι που συνεπάγεται και μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον σε σχέση με το PCM. Οι απώλειες αυτές όμως δεν είναι τέτοιας τάξεως ώστε και η θερμοκρασία εξόδου του νερού του συλλέκτη για την περίπτωση του μπετό να είναι χαμηλότερη από ότι η αντίστοιχη με τη χρήση του PCM. Οι μεγάλες αυτές απώλειες οδηγούν στην μείωση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη στη περίπτωση του μπετό και κατ' επέκταση και στη μείωση της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη. Αυτό έχει ως συνέπεια ο συλλέκτης στη περίπτωση του PCM να αναπτύσσει μεγαλύτερη ωφέλιμη ισχύ συγκριτικά με τη περίπτωση του μπετό.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Νοέμβριο** και για τη χρήση μπετό αντί του PCM έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη $T_{\text{μπετού}}$, $T_{f,o}$ και Q_u .

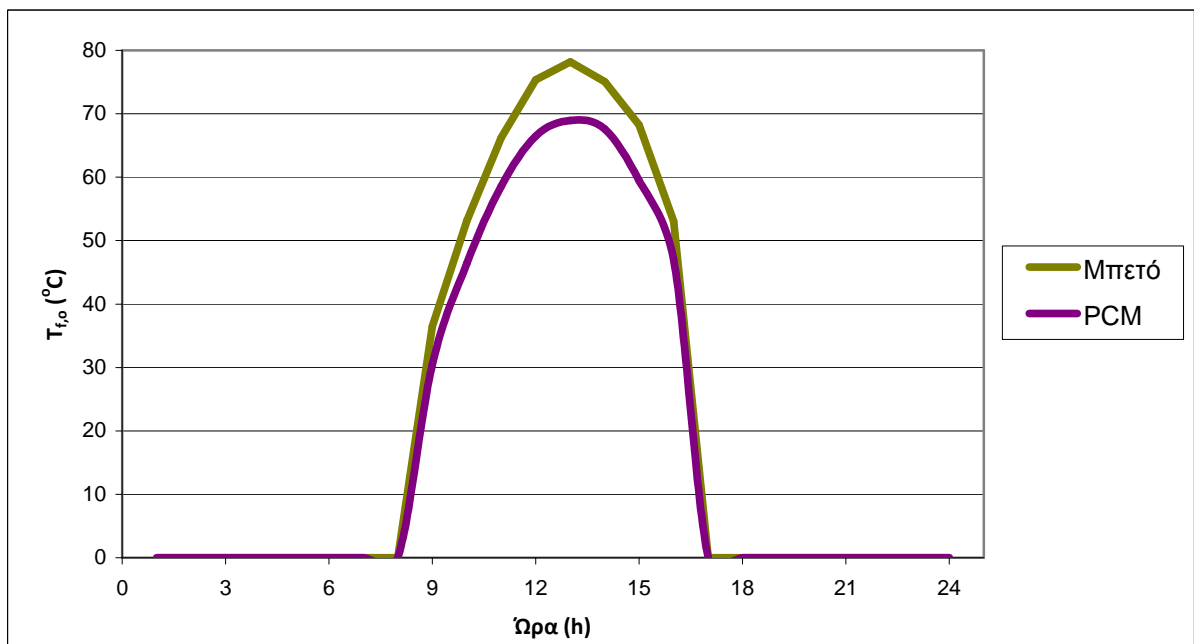
Πίνακας 12.8.2: T_{PCM} , $T_{f,o}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για το Νοέμβριο με χρήση μπετού.

Ώρα	$T_{\text{μπετού}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{f,o} (^{\circ}\text{C})$	$Q_u (\text{W})$
1:00	20,0410	0	0
2:00	20,0216	0	0
3:00	20,0113	0	0
4:00	20,0060	0	0
5:00	20,0031	0	0
6:00	20,0016	0	0
7:00	20,0009	0	0
8:00	20,0005	0	0
9:00	23,4027	33,7298	5738,862
10:00	28,8359	51,8386	11886,200
11:00	34,1094	67,0258	15963,380
12:00	38,3273	78,1328	18401,765
13:00	40,5424	82,3414	18397,881
14:00	40,4596	79,5239	16294,263
15:00	38,2452	70,6815	12632,778
16:00	33,3719	53,5000	6376,507
17:00	27,0295	0	0
18:00	23,6953	0	0
19:00	21,9426	0	0
20:00	21,0212	0	0
21:00	20,5368	0	0
22:00	20,2822	0	0
23:00	20,1484	0	0
24:00	20,0780	0	0

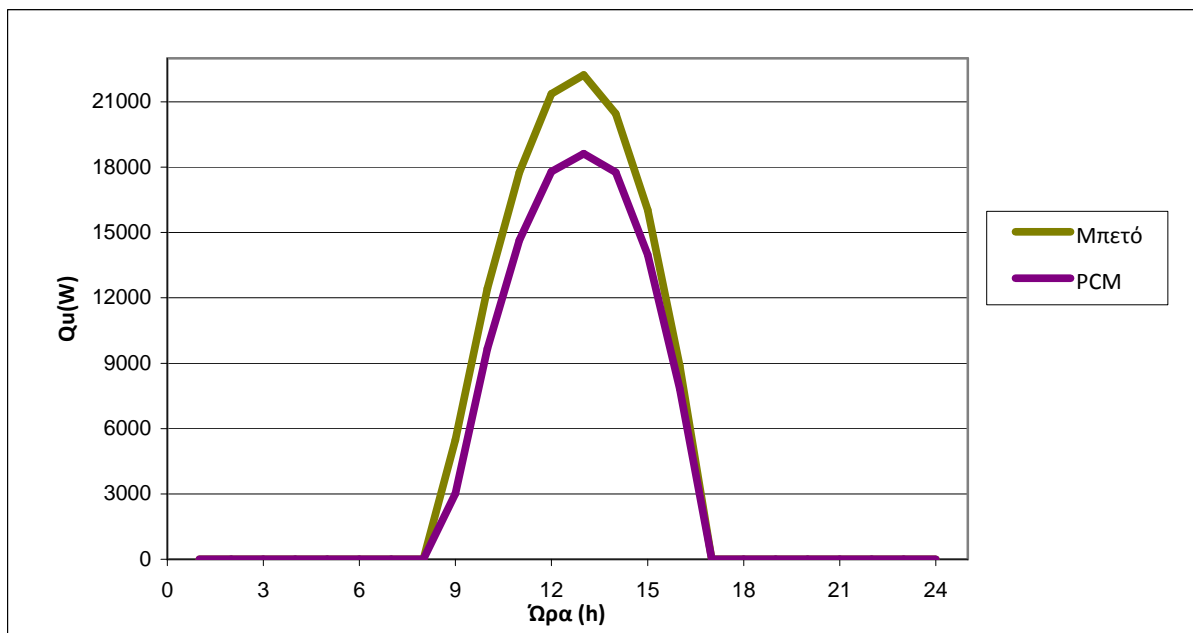
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές των μεγεθών T_{PCM} , $T_{\text{μπετού}}$, $T_{f,o}$ και Q_u για τον μήνα Νοέμβριο με χρήση PCM και μπετού στο δάπεδο ώστε να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ του



Σχήμα 12.8.4 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας του PCM (T_{PCM}) και της θερμοκρασίας του μπετού ($T_{μπετού}$) συναρτήσει της ώρας .



Σχήμα 12.8.5 : Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας για μπετό και PCM.



Σχήμα 12.8.6 : Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας για μπετό και PCM.

Αντίστοιχα και για το μήνα Νοέμβριο τα αποτελέσματα είναι ανάλογα με αυτά του Ιανουαρίου.

12.9 Αλλαγή των ιδιοτήτων του PCM.

Κατά την παραλλαγή αυτή του προβλήματος μας αλλάζουμε τις ιδιότητες του PCM που ενσωματώνεται στο δάπεδο. Πάλι θεωρούμε 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 $\rho_{PCM}=1.000 \text{ kg/m}^3$.

Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε στην παραλλαγή αυτή είναι ένα υποθετικό υλικό το οποίο παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ☀ Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 15-23 °C
- ☀ Θερμότητα της αλλαγής φάσης $H=130.000 \text{ J/kg}$
- ☀ Πυκνότητα $\rho=1.000 \text{ kg/m}^3$
- ☀ Ειδική θερμοχωρητικότητα στερεής φάσης, ειδική θερμοχωρητικότητα υγρής φάσης: $Cp_s = Cp_l = 5.000 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.

Οι εξισώσεις της ενεργού θερμοχωρητικότητας Cp_{eff} συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{PCM} είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned} \text{☀ } Cp_{eff} &= 4 \cdot (H - b \cdot Cp_s) \cdot \left(\frac{T_{PCM} - T_s}{b^2} \right) + Cp_s && \text{για } T_s \leq T_{PCM} \leq T_c \\ \text{☀ } Cp_{eff} &= 4 \cdot (b \cdot Cp_l - H) \cdot \left(\frac{T_{PCM} - T_s - \frac{b}{2}}{b^2} \right) + \frac{2 \cdot H}{b} - Cp_s && \text{για } T_c \leq T_{PCM} \leq T_l \end{aligned}$$

όπου στη συγκεκριμένη εφαρμογή έχουμε:

- Θερμοκρασία στην αρχή της στερεοποίησης $T_s=15 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία στο τέλος της στερεοποίησης $T_l=23 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία στο μέσον του εύρους αλλαγής φάσης $T_c=(T_s + T_l)/2=19 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασιακό εύρος της αλλαγής φάσης $b= T_l - T_s=8 \text{ }^\circ\text{C}$

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

$$\text{☀ } Cp_{eff} = \left(\frac{90000}{16} \right) \cdot (T_{PCM} - 15) + 5000 \quad \text{για } T_s \leq T_{PCM} \leq T_c \quad (12.9.1)$$

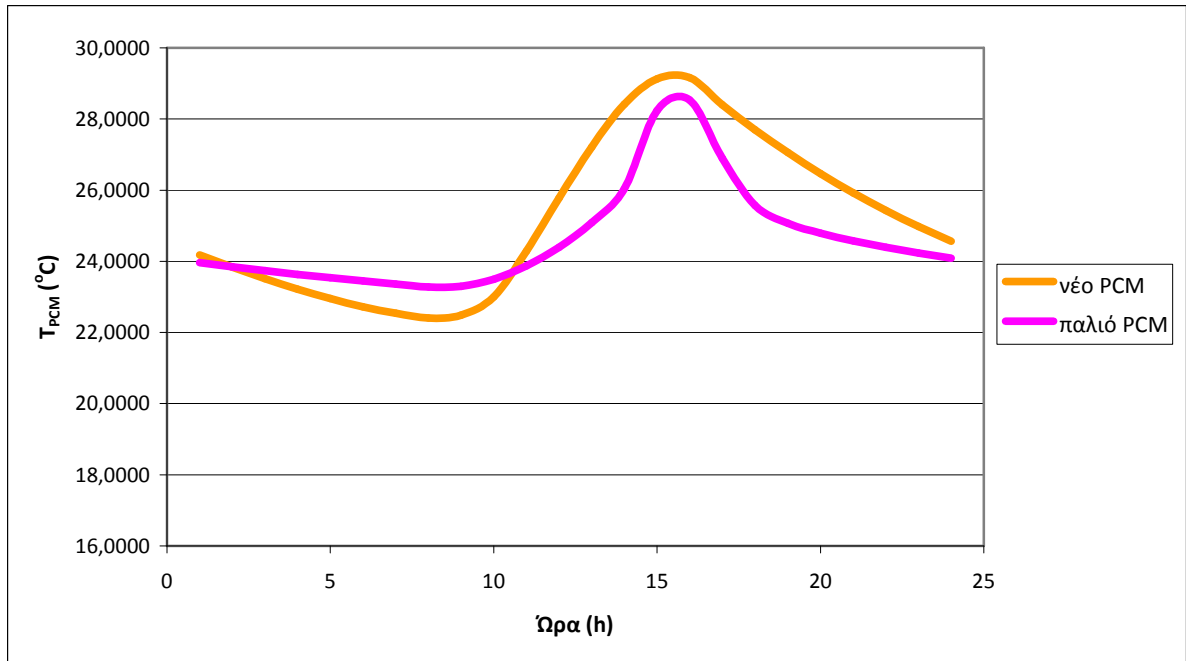
$$\text{☀ } Cp_{eff} = \left(-\frac{90000}{16} \right) \cdot (T_{PCM} - 19) + 27500 \quad \text{για } T_c \leq T_{PCM} \leq T_l \quad (12.9.2)$$

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Ιανουάριο** έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω .

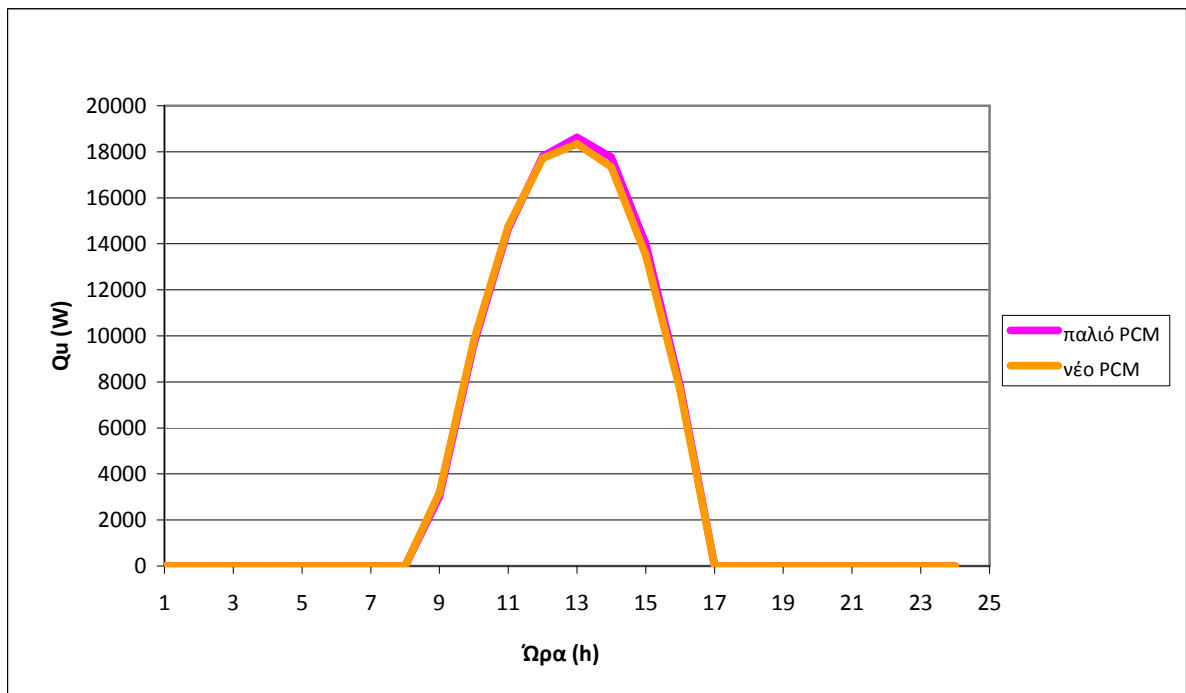
Πίνακας 12.9.1 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για τον Ιανουάριο.

Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	24,1819	0	0	5000,000
2:00	23,8328	0	0	5000,000
3:00	23,5128	0	0	5000,000
4:00	23,2196	0	0	5000,000
5:00	22,9508	0	0	5276,672
6:00	22,7174	0	0	6589,620
7:00	22,5453	0	0	7557,807
8:00	22,4047	0	0	8348,496
9:00	22,4836	30,0288	3186,866	7904,474
10:00	23,0009	45,9863	9824,090	5000,000
11:00	24,2898	58,2931	14752,117	5000,000
12:00	25,7805	66,6777	17718,134	5000,000
13:00	27,2130	69,6844	18351,825	5000,000
14:00	28,4208	68,7094	17345,535	5000,000
15:00	29,1273	60,7341	13506,941	5000,000
16:00	29,1640	47,4383	7654,013	5000,000
17:00	28,3990	0	0	5000,000
18:00	27,6979	0	0	5000,000
19:00	27,0553	0	0	5000,000
20:00	26,4663	0	0	5000,000
21:00	25,9265	0	0	5000,000
22:00	25,4318	0	0	5000,000
23:00	24,9783	0	0	5000,000
24:00	24,5628	0	0	5000,000

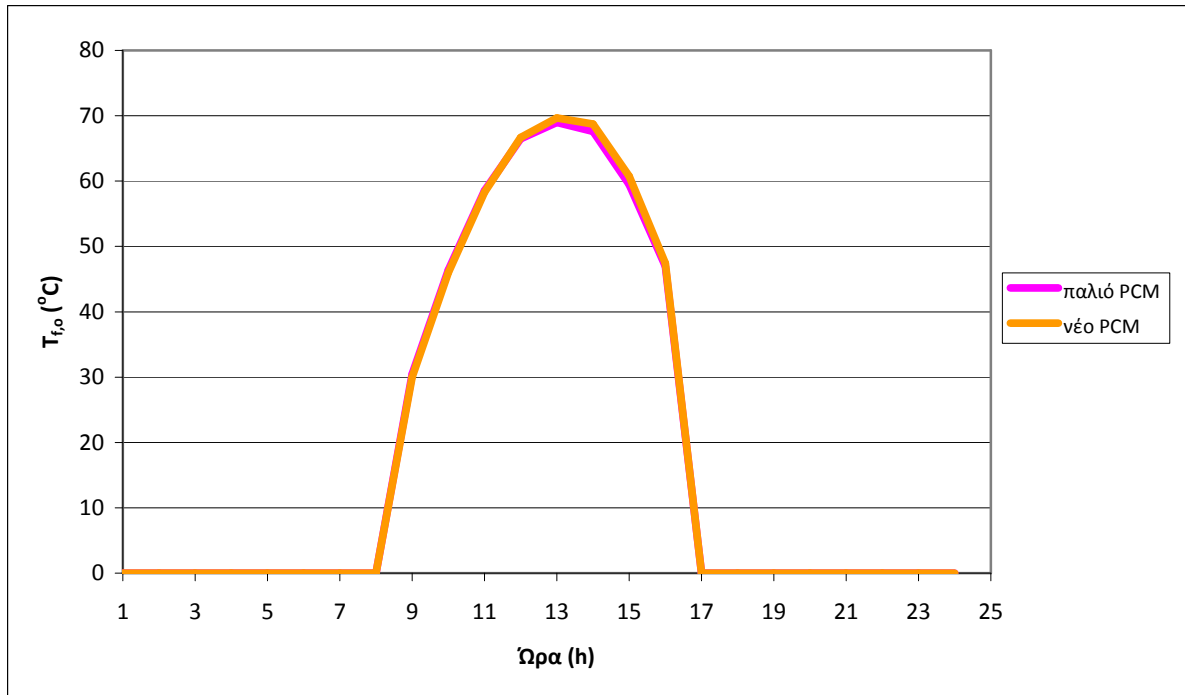
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές των μεγεθών T_{PCM} , $C_{p,eff}$, $T_{f,o}$ και Q_u για τον μήνα Ιανουάριο με χρήση του παλιού και του νέου PCM στο δάπεδο ώστε να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ τους.



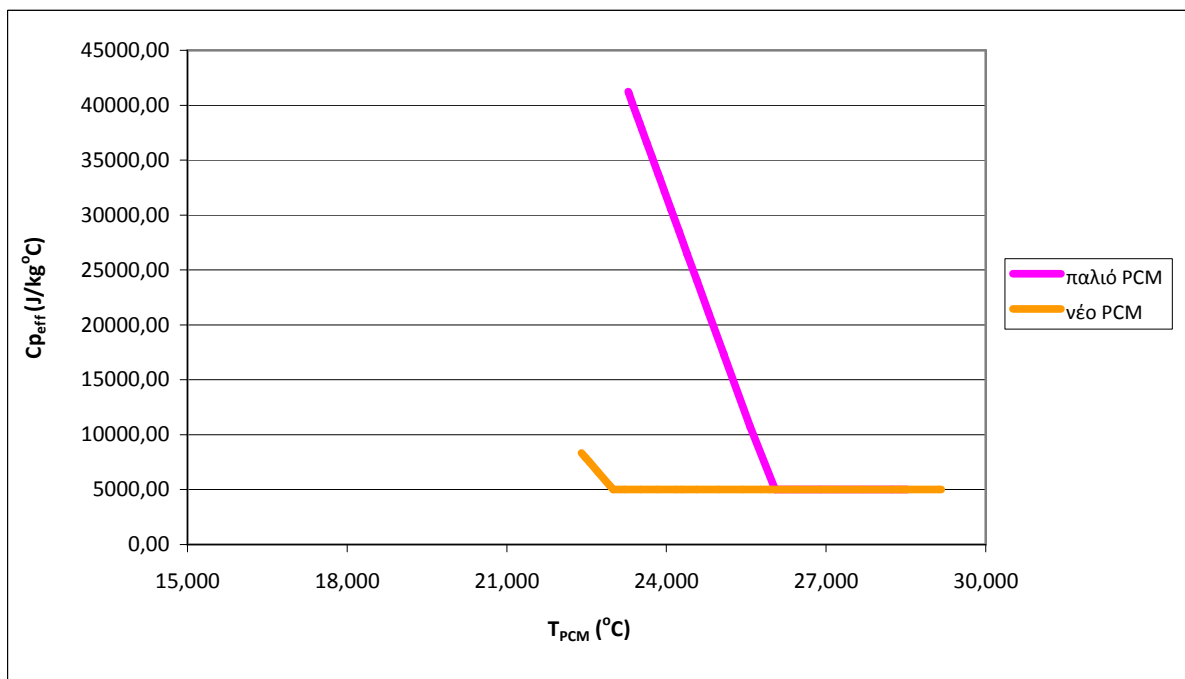
Σχήμα 12.9.1: Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας του παλιού και του νέου PCM (T_{PCM}) της ώρας .



Σχήμα 12.9.2: Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας για το νέο και για το παλιό PCM.



Σχήμα 12.9.3: Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας για το νέο και το παλιό PCM.



Σχήμα 12.9.4: Συγκριτικό διάγραμμα της ενεργού θερμοχωρητικότητας του παλιού και του νέου PCM ($C_{p,eff}$) συναρτήσει της T_{PCM} .

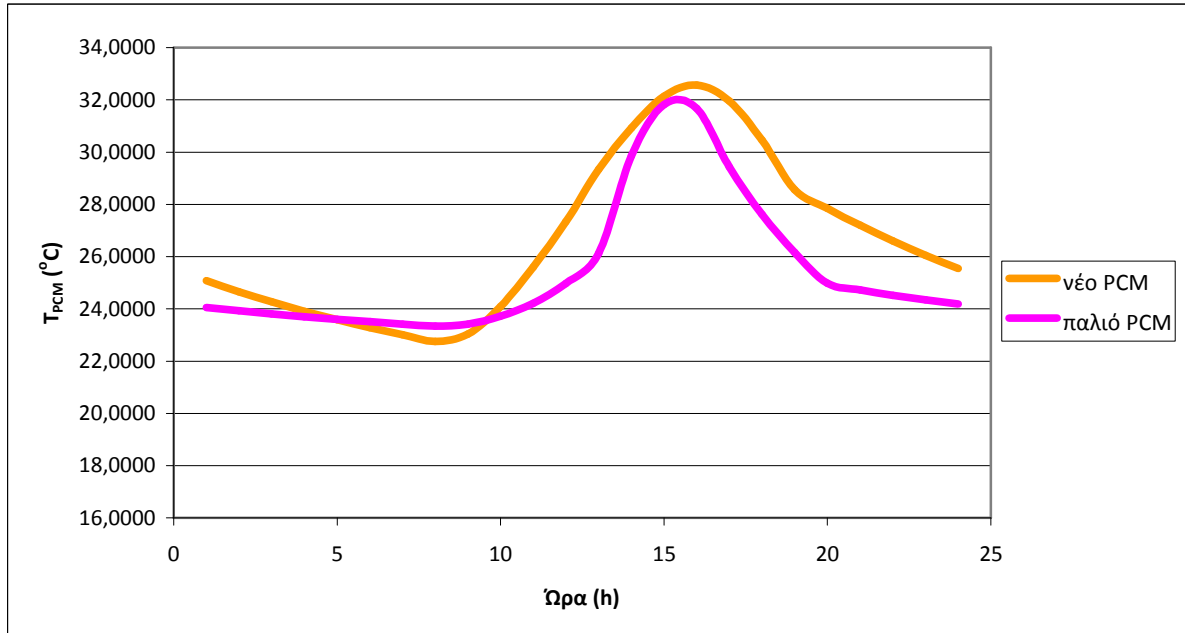
Το νέο PCM έχει μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης από το παλιό κάτι το οποίο σημαίνει ότι ουσιαστικά δουλεύει για πιο μεγάλο χρονικό διάστημα από το παλιό και αναμένεται να αναπτύξει χαμηλότερη θερμοκρασία. Αντιθέτως έχει μικρότερη θερμότητα αλλαγής φάσης από το παλιό PCM το οποίο σημαίνει ότι αλλάζει ευκολότερα φάση και έτσι αναμένεται να αναπτύξει υψηλότερη θερμοκρασία από το παλιό PCM. Οι παραπάνω δυο μεταβολές είναι αντίθετες μεταξύ τους και έχουν ως συνέπεια το νέο PCM να αναπτύξει υψηλότερη θερμοκρασία κάτι που φαίνεται και από το σχήμα **12.9.1** . Οι καμπύλες της ωφέλιμης ισχύος καθώς και της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ταυτίζονται σχεδόν μεταξύ τους. Από το διάγραμμα της θερμοχωρητικότητας συμπεραίνουμε ότι το PCM βρίσκεται κατά κύριο λόγο στην υγρή φάση και μπαίνει για λίγο στη διφασική περιοχή.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υπολογιστικό μοντέλο για το μήνα **Νοέμβριο** έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τα μεγέθη T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u .

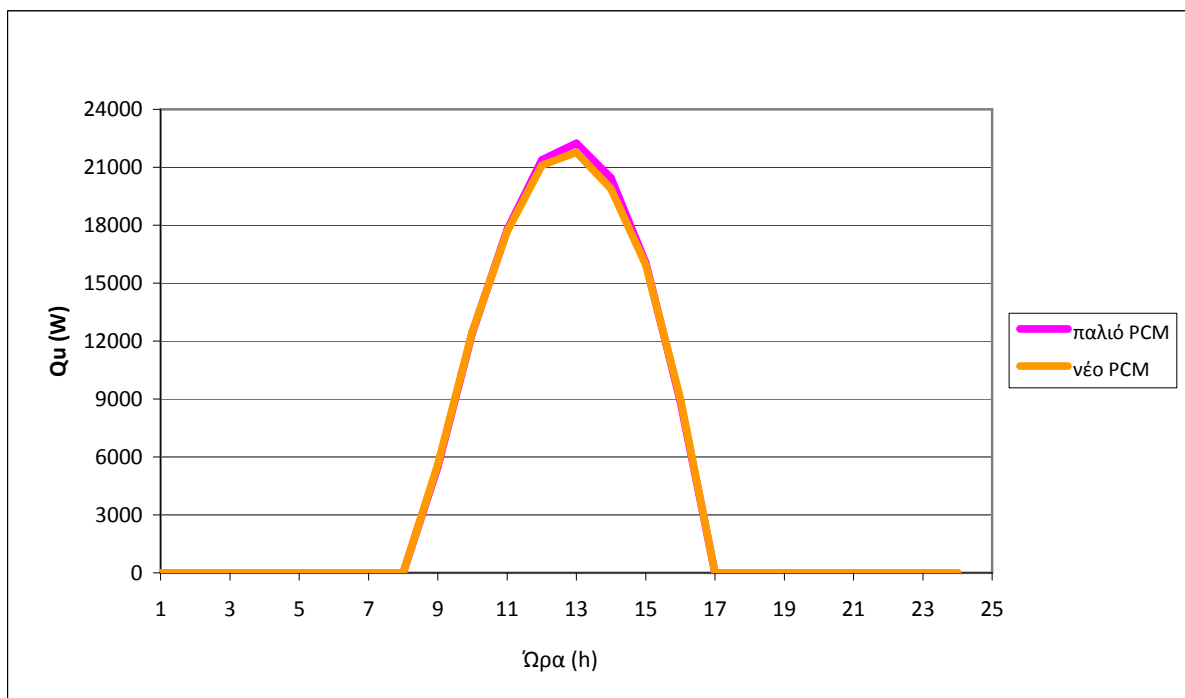
Πίνακας 12.9.2 : T_{PCM} , $T_{f,o}$, $C_{p,eff}$ και Q_u συναρτήσει της ώρας για το Νοέμβριο.

Ώρα	T_{PCM} (°C)	$T_{f,o}$ (°C)	Q_u (W)	$C_{p,eff}$ (J/kg °C)
1:00	25,0788	0	0	5000,000
2:00	24,6548	0	0	5000,000
3:00	24,2662	0	0	5000,000
4:00	23,9101	0	0	5000,000
5:00	23,5837	0	0	5000,000
6:00	23,2845	0	0	5000,000
7:00	23,0103	0	0	5000,000
8:00	22,7590	0	0	6355,414
9:00	23,0379	36,1646	5603,536	5000,000
10:00	24,0889	52,9495	12503,080	5000,000
11:00	25,5932	66,4027	17687,167	5000,000
12:00	27,3284	76,0793	21103,195	5000,000
13:00	29,3457	79,4215	21774,933	5000,000
14:00	30,9284	76,5625	19885,822	5000,000
15:00	32,1346	68,4748	15951,462	5000,000
16:00	32,5640	52,6787	9012,783	5000,000
17:00	31,9620	0	0	5000,000
18:00	30,4620	0	0	5000,000
19:00	28,5684	0	0	5000,000
20:00	27,8532	0	0	5000,000
21:00	27,1976	0	0	5000,000
22:00	26,5967	0	0	5000,000
23:00	26,0461	0	0	5000,000
24:00	25,5413	0	0	5000,000

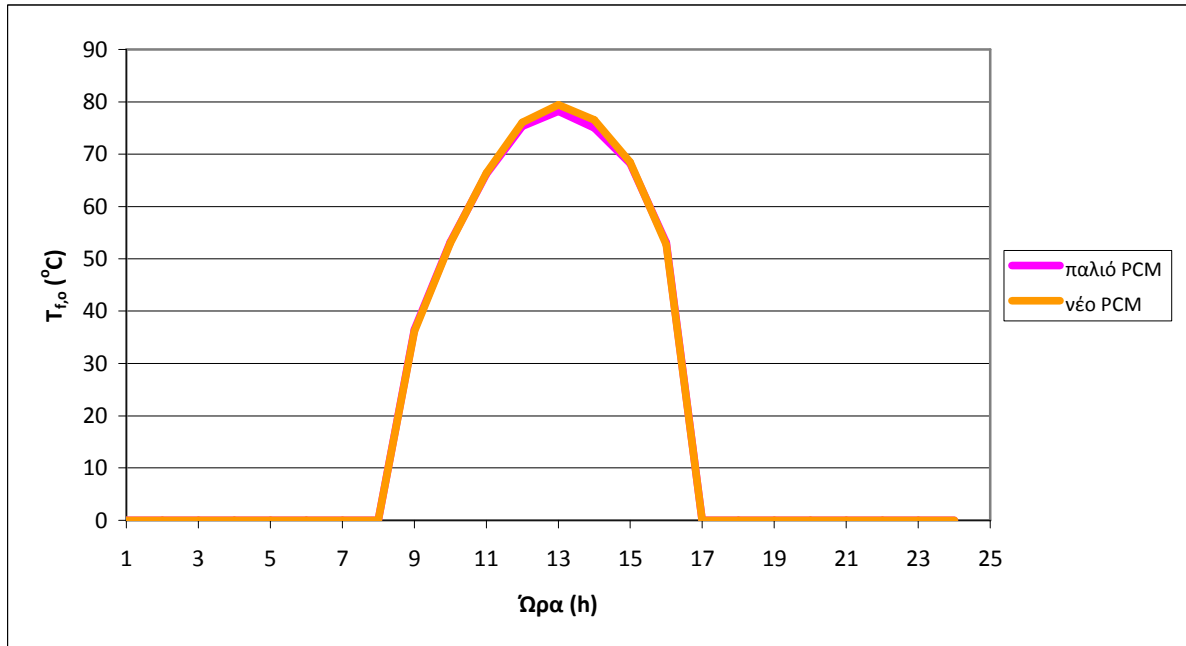
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα οι τιμές των μεγεθών T_{PCM} , $C_{p,eff}$, $T_{f,o}$ και Q_u για τον μήνα Ιανουάριο με χρήση του παλιού και του νέου PCM στο δάπεδο ώστε να μπορούν να συγκριθούν οπτικά μεταξύ τους.



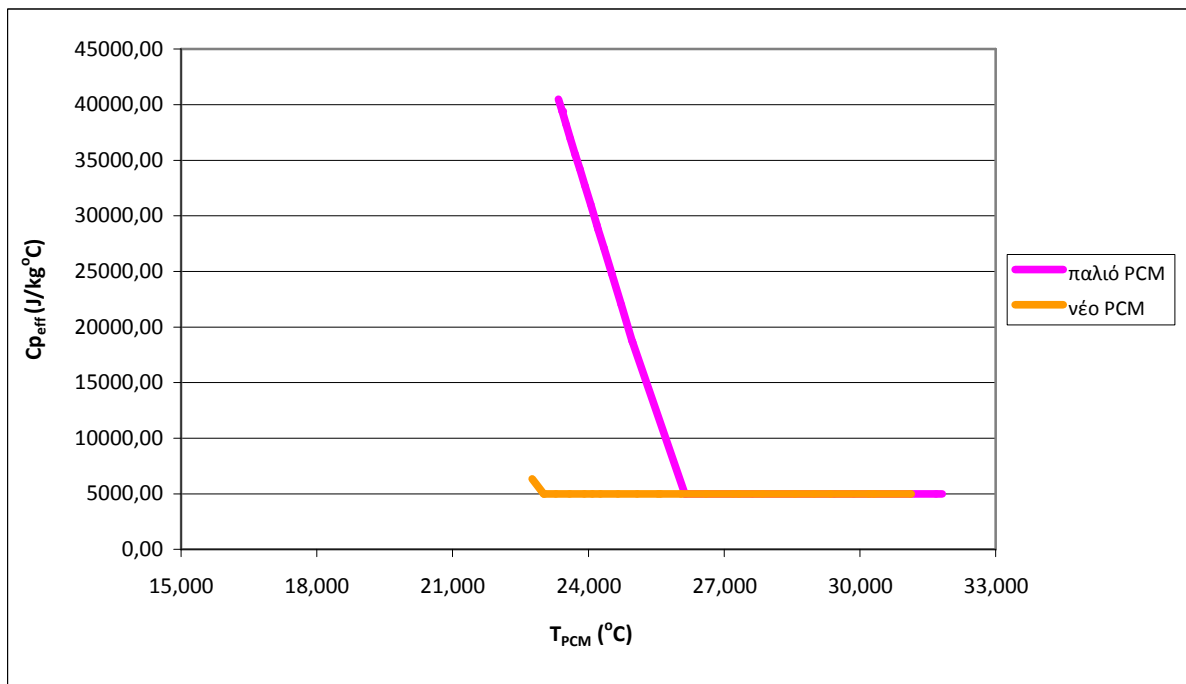
Σχήμα 12.9.5: Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας του παλιού και του νέου PCM (T_{PCM}) της ώρας .



Σχήμα 12.9.6: Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη (Q_u) συναρτήσει της ώρας για το νέο και για το παλιό PCM.



Σχήμα 12.9.7: Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ($T_{f,o}$) συναρτήσει της ώρας για το νέο και το παλιό PCM.



Σχήμα 12.9.8: Συγκριτικό διάγραμμα της ενεργού θερμοχωρητικότητας του παλιού και του νέου PCM ($C_{p,eff}$) συναρτήσει της T_{PCM} .

Αντίστοιχα και για το μήνα Νοέμβριο τα αποτελέσματα είναι ανάλογα με αυτά του Ιανουαρίου.

Κεφάλαιο 13

Γενικά σχόλια και συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε ένα σύστημα ηλιακής ενδοδαπέδιας θέρμανσης μιας κατοικίας συνολικής έκτασης 100 m^2 στην περιοχή της Αθήνας, με γεωγραφικό πλάτος $\phi=37,97^\circ$. Η ηλιακή ενέργεια που δεσμεύεται από ηλιακούς συλλέκτες που βρίσκονται τοποθετημένοι στην οροφή του κτιρίου με κλίση $\beta=53^\circ$. Η συλλεκτική επιφάνεια των συλλεκτών επιλέχθηκε να είναι $A_c=55 \text{ m}^2$ ώστε να καλύπτει τις ανάγκες της κατοικίας για θέρμανση. 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 του υλικού αλλαγής φάσης το οποίο είναι τοποθετημένο κάτω από το στρώμα του δαπέδου του δωματίου που μελετάται. Το στρώμα του PCM, που έρχεται σε επαφή με τους σωλήνες του ζεστού νερού από τους συλλέκτες, μεταπίπτει στην υγρή φάση και τη νύχτα αποδίδει τη θερμότητα που έχει αποθηκεύσει κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας στο χώρο. Έτσι το PCM μεταπίπτει στη στερεή κατάσταση και πάλι. Η μελέτη αφού αφορά σύστημα θέρμανσης έγινε για την 21^η Νοεμβρίου και την 21^η Ιανουαρίου.

Η αξιοποίηση του υλικού αλλαγής φάσης δεν ήταν πλήρης τόσο για τον Νοέμβριο όσο και για τον Ιανουάριο. Ειδικότερα τα αποτελέσματα είναι καλύτερα και το PCM βρίσκεται είτε στην διφασική περιοχή είτε στην πλήρως υγρή φάση. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο και λογικό καθώς τον Νοέμβριο η ακτινοβολία είναι εντονότερη από ότι το Δεκέμβριο. Αλλά και το Δεκέμβριο το PCM μετακινείται από την διφασική περιοχή μέχρι και την πλήρως υγρή φάση.

Αναγκαία κρίθηκε και η διεξαγωγή παραμετρικής μελέτης για την εξακρίβωση της επιρροής των διαφόρων παραμέτρων του προβλήματος στην θερμοκρασία του PCM καθώς και στα υπόλοιπα υπολογιζόμενα μεγέθη.

Στην πρώτη παραμετρική μελέτη μεταβάλλεται η τιμή της συλλεκτικής επιφάνειας και παρατηρείται μείωση των τιμών των παραπάνω υπολογιζόμενων μεγεθών τους όταν ελαττώνεται η συλλεκτική επιφάνεια. Αυτό είναι λογικό καθώς όσο αφορά τους συλλέκτες και δεδομένου ότι η παροχή νερού δια μέσω αυτών παραμένει ίδια, θα μειώνεται η θερμοκρασία εξόδου του νερού από αυτούς καθώς και η ωφέλιμη ισχύς τους αφού θα

μειώνεται το ποσό της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Όσον αφορά την θερμοκρασία του PCM, όπως είναι προφανές, μειώνεται καθώς η συλλεκτική επιφάνεια ελαττώνεται.

Στη δεύτερη παραμετρική μελέτη μεταβάλλεται η τιμή του γινομένου $F_R \cdot \tau_a$ και παρατηρείται μείωση των τιμών των παραπάνω υπολογιζόμενων μεγεθών τους όταν ελαττώνεται το γινόμενο. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς αυτός ο όρος ουσιαστικά αντιστοιχεί στο βαθμό απόδοσης του συλλέκτη και αυτό σημαίνει πως όσο μειώνεται αυτός ο όρος τόσο μειώνεται και ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειωθούν με τη σειρά τους η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη αλλά και η ωφέλιμη ισχύς του δεδομένου ότι η παροχή μάζας του νερού που διέρχεται μέσω αυτού παραμένει ίδια. Όσον αφορά την θερμοκρασία του PCM είναι προφανές ότι θα μειωθεί καθώς η θερμοκρασία εξόδου του νερού, που με τη σειρά του θα ζεστάνει το PCM, μειώνεται.

Στην τρίτη παραμετρική μελέτη μεταβάλλεται η τιμή του γινομένου $F_R \cdot U_L$ και παρατηρείται αύξηση των τιμών των παραπάνω υπολογιζόμενων μεγεθών τους όταν ελαττώνεται το γινόμενο. Αυτό είναι λογικό καθώς αυτός ο όρος σχετίζεται με το βαθμό απόδοσης του συλλέκτη και αυτό σημαίνει πως όσο μειώνεται αυτός ο όρος τόσο αυξάνεται και ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη. Για τον μήνα Ιανουάριο αυξάνεται η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη αλλά και η ωφέλιμη ισχύς του δεδομένου ότι η παροχή μάζας του νερού που διέρχεται μέσω αυτού παραμένει ίδια. Όσον αφορά την θερμοκρασία του PCM είναι προφανές ότι θα αυξηθεί καθώς η θερμοκρασία εξόδου του νερού, που με τη σειρά του θα ζεστάνει το PCM, αυξάνεται. Για το μήνα Νοέμβριο οι διαφορές μεταξύ των καμπυλών είναι εμφανώς μικρότερες συγκριτικά με αυτές του Ιανουαρίου. Συγκεκριμένα όσον αφορά την θερμοκρασία του PCM όπως φαίνεται και στο σχήμα για τις τιμές του γινομένου $F_R \cdot U_L$ 2,8 και 4,5 (W/m^2)/ $^{\circ}C$ οι δυο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται.

Στην τέταρτη παραμετρική μελέτη μεταβάλλεται η μάζα του PCM όμως η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων δεν είναι εύκολη καθώς η τάση μεταβολής των υπολογιζόμενων μεγεθών δεν είναι σαφής. Για τη θερμοκρασία του PCM παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η μάζα του η θερμοκρασία του αυξάνει σε υψηλά επίπεδα κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας ενώ στο υπόλοιπο μέρος της μέρας πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Αντίθετα όταν αυξάνει η μάζα του, η θερμοκρασία του αυξάνεται κατά τις ώρες με ηλιοφάνεια σε όχι

πολύ υψηλά επίπεδα, διότι κάποιο μέρος της θερμότητας που λαμβάνει αποθηκεύεται και αποδίδεται τις νυχτερινές ώρες, ενώ τις υπόλοιπες ώρες η μείωση γίνεται με μικρότερο ρυθμό. Για τα μεγέθη της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη αλλά και της ωφέλιμης ισχύος του, παρατηρείται ότι οι διαφορές είναι αρκετά μικρές μεταξύ των καμπυλών και η μάζα του PCM από μια τιμή και μετά δεν επιδρά καθόλου στις τιμές αυτών των μεγεθών.

Μια ακόμα παραλλαγή του συστήματος της βασικής μελέτης που έγινε ήταν η αντικατάσταση του στρώματος PCM που βρίσκεται τοποθετημένο στο δάπεδο με μπετό. Το μπετό αποδείχτηκε ότι αναπτύσσει αρκετά υψηλότερες θερμοκρασίες κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας καθώς χρησιμοποιεί τη θερμότητα που παραλαμβάνει εξ' ολοκλήρου για την αύξηση της θερμοκρασίας του και όχι για την αλλαγή φάσης όπως κάνει το PCM. Παρόλα αυτά τις ώρες δίχως ηλιοφάνεια το μπετό παρατηρείται ότι αποβάλλει γρηγορότερα τη θερμότητα που έχει προσλάβει και επομένως παρουσιάζει χαμηλότερες θερμοκρασίες συγκριτικά με το PCM. Συνολικά το μπετό παρουσιάζει μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διακύμανση στη διάρκεια του 24ώρου. Όσο αφορά τα υπολογιζόμενα μεγέθη της μελέτης παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη για την περίπτωση του μπετό είναι μεγαλύτερη κάτι που συνεπάγεται και μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον σε σχέση με το PCM. Οι απώλειες αυτές όμως δεν είναι τέτοιας τάξεως ώστε και η θερμοκρασία εξόδου του νερού του συλλέκτη για την περίπτωση του μπετό να είναι χαμηλότερη από ότι η αντίστοιχη με τη χρήση του PCM. Οι μεγάλες αυτές απώλειες έχουν ως συνέπεια τη μείωση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη στη περίπτωση του μπετό και κατ' επέκταση και στη μείωση της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη. Έτσι συμπερασματικά προκύπτει ότι ο συλλέκτης στη περίπτωση του PCM αναπτύσσει μεγαλύτερη ωφέλιμη ισχύ συγκριτικά με τη περίπτωση του μπετό.

Η τελευταία παραλλαγή που μελετήθηκε ήταν η αντικατάσταση του PCM με ένα άλλο νέο που παρουσίαζε μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης και μικρότερη θερμότητα αλλαγής φάσης. Το μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης συνεπάγεται ότι ουσιαστικά το νέο PCM δουλεύει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από το παλιό και αναμένεται να αναπτύξει χαμηλότερη θερμοκρασία. Αντιθέτως η μικρότερη θερμότητα αλλαγής φάσης από το παλιό PCM συνεπάγεται ότι αλλάζει ευκολότερα φάση και έτσι αναμένεται να αναπτύξει υψηλότερη θερμοκρασία από το παλιό PCM. Οι παραπάνω δυο μεταβολές είναι αντίθετες μεταξύ τους και έχουν ως συνέπεια το νέο PCM

να αναπτύξει υψηλότερη θερμοκρασία. Οι καμπύλες της ωφέλιμης ισχύος καθώς και της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη ταυτίζονται σχεδόν μεταξύ τους. Από το διάγραμμα της θερμοχωρητικότητας συμπεραίνουμε ότι το PCM βρίσκεται κατά κύριο λόγο στην πλήρως υγρή φάση και μπαίνει για λίγο στη διφασική περιοχή.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι η εφαρμογή του υλικού αλλαγής φάσης το σύστημα της ηλιακής ενδοδαπέδιας θέρμανσης απέδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Βέβαια για να γίνει εφαρμογή μιας τέτοιας μελέτης στην πράξη πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής που μελετάμε ώστε να έχουμε επιθυμητά αποτελέσματα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α . Κώδικας βασικής μελέτης σε matlab

```
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

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .Κώδικας μελέτης χωρίς PCM σε matlab

```

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*Txxwrou)/...
        (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*Txxwrou)/...
        (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)=5000;
    elseif ((Tex(i,j)>=Tc) && (Tex(i,j)<=Tl))
        CPeff(i+1,j)= 5000;
    else
        CPeff(i+1,j)=5000;
    end

end

c=CPeff(25,j);
d=Tarx(25,j);

end

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ . Κώδικας μελέτης με αλλαγή των ιδιοτήτων του PCM σε matlab

```
AC=55;
FRta=0.85;
FRUI=3.6;
A=100;
mw=0.1;
CPw=4180;
h=8;
mpcm=6900;
CPeff(1,1)=4000;
Txwrou=20;
Tarx(1,1)=25;

a=1/3600;
Ts=15;
Tl=23;
Tc=19;

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
end
```



```

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)=(90000/16)*(Tex(i,j)-15)+5000;
elseif ((Tex(i,j)>=Tc) && (Tex(i,j)<=Tl))
    CPeff(i+1,j)=(-90000/16)*(Tex(i,j)-19)+27500;
else
    CPeff(i+1,j)=5000;
end

end

c=CPeff(25,j);
d=Tarx(25,j);

end

```

Βιβλιογραφία

[1] http://www.ecocrete.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=2500&Itemid

[2] <http://www.aparadektoi.gr/content/view/1750/432/>

[3] <http://www.selasenergy.gr/energy.php>

[4] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj. Phase change material- based building architecture for thermal management in residential and commercial establishment;2006.

[5] Sharma A et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and application, Renew Sustain Energy Rev, 2008.

[6] S.M. Hasnain. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part 1: Heat storage materials and techniques; 1996.

[7] Hasnain, S.M., Smiai M., Al-Saedi, Y. And Al-Khaldi, M., Energy Research Institute- Internal Report, KACST, Riyadh, Saudi Arabia, 1996.

[8] A. Shitzer and M. Levy. Solar energy engineering, 1983, 105, 200] [Petri, Ong E.T. and Marianowski, L.G., in Proc. 12th Energy Technical Conference, USA, 1985.

[9] www.google.com

[10] Σημειώσεις του μαθήματος «Θερμική Συμπεριφορά κτιρίων», Χρίστος Τζιβανίδης.

[11] Shapiro M. Development of the properties of phase change materials. Subcontract report to Florida Solar Energy Center 1989.

[12] 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), Ecstock, 2006 .

[13] Jong Hyeon Pecka, Jae-Jun Kim¹, Chaedong Kang², Hiki Hong A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method. Received September 2005 .

[14] H. Hong et al. / International Journal of Refrigeration 2004

[15] Luisa F.Cabeza, Cecilia Castellon, Miquel Nogues, Marc Medrano –Department d'informatica I Eng.Industrial, Universitat de Leida, Leida, Spain, Ron Leppers –INTRON B.V., The Netherlands, Oihana Zubillaga – Fundacion INASMET, San Sebastian , Spain, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, 2006.

[16] A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules:A review; 2007.

[17] Øawes DW, Feldman D, Absorption of phase change materials in concrete , Solar Energy Materials and Solar Cells, 1992.

[18] Samira Haghshenaskashani, Department of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Teheran and Hadi Pasdarsahri, Department of Mechanical Engineering, tarbiat .

[19] 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.

[20] Farid M.M., Khudhair M.A., Razack S.A.K., Al-Hallaj S., A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy Conversion and Management 45, 2004.

[21] M. Huang, P. Eames, Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaic, Int. J. Solar Energy

[22] 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.

[23] F. Tan, C. Tso, Cooling of mobile electronic devices using pcm, Applied thermal engineering, Vol 24

[24] P. Espeau, D. Mondieig, 'Active Package' for thermal protection of food products, Packing Technology and Science, Vol 10.

[25] D. Mondieig, F. Rajabalee, Protection of temperature sensitive biomedical products using pcm, Transfusion and Aphaeresis science, Vol 28 .

[26] Denise Mondieig a,* , Fazil Rajabalee a, Alain Laprie b, Harry A.J. Oonk c, Thereza Calvet d, Miguel Angel Cuevas-Diarte , Protection of temperature sensitive biomedical products using molecular alloys as phase change material , Received 10 July 2002; accepted 2 November 2002 .

[27] <http://www.outlast.com>

[28] <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/techbr.pdf>

[29] <http://www.pcmenergy.com/products/telecom.htm>

[30] http://en.wikipedia.org/wiki/Base_Station_Subsystem

[31] Lane, G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I, RC Press Inc., Florida, USA, 1983.

[32] <http://freespace.virgin.net/m.eckert/index.htm>

- [33] Telkes M. Thermal storage for solar heating and cooling. In: Proceedings of the workshop on solar energystorage sub systems for heating and cooling of buildings, Charlottesville, University of Virginia, 1975.
- [34] Askew GL. Solar heating utilization a paraffin's phase change material. In: Proceedings of the second national passive solar conference, Philadelphia, PA, 1978.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Buddhi D, Sharma SD. Measurements of transmittance of solar radiation through stearic acid: latent heat storage material. *Energy Convers Manage* 1999;40:1979–84.
- [38] Arkar C, Medved S., Enhanced solar assisted building ventilation system using sphere encapsulated PCM thermal heat storage, *Advanced thermal energy storage techniques- feasibility studies and demonstration projects 2nd workshop*, April 2002, Ljubliana Slovenia .
- [39] Stritih U, Novak P, Thermal storage of solar energy in the wall for building ventillation. *Second workshop IEA, Advanced thermal energy storage techniques- feasibility studies and demonstration projects , Ljubjana, Slovenia, April 2002) .*
- [40] 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.
- [41] Shapiro M. Development of the enthalpy storage materials, mixture of methyl stearate and methyl palmitate. *Subcontract Report to Florida Solar Energy Center*, 1989.

[42] Feldman D, Khan MA, Banu D. Energy storage composite with an organic phase change material. *SolEnergy Mater* 1989;18:333–41.

[43] 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.

[44] 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.

[45] Neeper DA, Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage, *Solar Energy*, 2000 .

[46] Kissok JK, Hannig JM, Whitney TI, Drake ML, Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings. *Proceedings of 1998 international solar energy conference, New York ,USA , 1998 .*

[47] Buddhi D, Mishra HS, Sharma A, Theoretical performance studies of a test cell having a PCM window in south direction, India 2003 .

[48] Ismail KAR, Henriquez JR. Thermally effective windows with moving phase change material curtains. *App Thermal Eng* 2001;21:1909–23.

[49] Guthertz JM, Schiler ME. A passive solar heating system for the perimeter zone of office buildings. *Energy Sources* 1991;13:39–54.

[50] Athienities A, Chen Y. The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems. *Sol Energy* 2000;69:229–37.

[51] Na Zhu, Zhenum Ma, Shengwei Wang, Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials.

[52] Kaygusuz K. Investigation of a combined solar-heat pump system for residential heating Part1: experimental results. *Int J Energy Res* 1999;23(14):1213-23.

[53] Koschenz M, Lehmann B. Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. *Energy Build* 2004;36(6):567–78.

[54] 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.

[55] Farid MM, Chen XD. Domestic electrical space heating with heat storage. *Proc Inst Mech Eng A: J Power Energy* 1999;213(2):83–92.

[56] Farid MM, Kong WJ. Underfloor heating with latent heat storage. *Proc Inst Mech Eng A: J Power Energy* 2001;215(5):601–9.

[57] 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 ECES IA Annex 17, Tokyo, Japan. 2002.

[58]University of Nottingham.

<http://www.nottingham.ac.uk/sbe/research/ventcool/objectives.htm>, 2002.

[59] Wakilatojjar S., Saman M., Domestic heating and cooling with thermal storage.Eight international conference on thermal energy storage , Stuttgart, Germany, 2000 .

[60] Hassan MM, Beliveau Y. Modeling of an integrated solar system. *Build Environ* 2008;43(5):804–10.

- [61] Schweigler C, Hiebler S, Keil C, Kobel H, Kren C, Mehling H. Low-temperature heat storage for solar heating and cooling applications. *ASHRAE Trans* 2007;113(1):89–96.
- [62] Wang XC, Niu JL, Van Paassen AHC. Raising evaporative cooling potentials using combined cooled ceiling and MPCM slurry storage. *Energy Build* 2008;40(9):1691–8.
- [63] Piia Lamberg , Reijo Lehtiniemi , Anna-Maria Henell , Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage , Received 4 March 2003; accepted 2 July 2003.
- [64] E. Günther, S. Hiebler, H. Mehling , MEASUREMENT OF THE ENTHALPY OF PCM.
- [65] 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.
- [66] Elena Palomo del Barrio , Jean-Luc Dauvergne, A non-parametric method for estimating enthalpy-temperature functions of shape-stabilized phase change materials.
- [67] Robert Cernjil , Jan Toman , Jaroslav SestAk , Measuring the effective specific heat of building materials.
- [68] K. Darkwa , P.W. O'Callaghan , Simulation of phase change drywalls in a passive solar building , Received 22 April 2005; accepted 7 October 2005 .
- [69] A.K. Athienitis, T.Y. Chen, Experimental and theoretical investigation of floor heating with thermal storage, *ASHRAE Transactions* 99 (1) (1993) 1049–1057 .
- [70] J.D. Dale, M.Y. Ackerman, *Proceeding of 15 Annual SESCO Conference, A comparison of radiant floor and forced air heating*, 1989, pp.15–18.

- [71] A.K. Athienitis, T.Y. Chen, Experimental and theoretical investigation of floor heating with thermal storage, *ASHRAE Transactions* 99 (1) (1993) 1049–1057.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] Kunping Lin, Yinping Zhang, Xu Xu, Hongfa Di, Rui Yang, Penghua Qin, Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77]. M. Farid, W.J. Kong, Under-floor heating with latent heat storage, *Proc. Inst. Mech. Eng.* 215 (2001) 601–609.
- [78] N. Shamsundar, E.M. Sparrow, Analysis of multidimensional conduction phase change via the enthalpy model, *J. Heat Transfer* 97 (1975) 333–340.
- [79] J. Wang, *Building Physics*, China Architecture and Building Press, Beijing, 1987.
- [80] J.P. Holman, *Heat Transfer*, 8th ed., McGraw-Hill, New York, 1997.

[81]Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος , Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα, ΕΜΠ Αθήνα 2008

[82]Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος , Κλιματισμός Μέρος Πρώτο, ΕΜΠ Αθήνα 2008.