



Τομέας Θερμότητας

Διπλωματική εργασία:

“Πλεονεκτήματα υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σε κτίρια κατά τους θερινούς μήνες στην περιοχή της Αθήνας. Σχετική παραμετρική μελέτη.”

Εκπόνηση: Καμπανοπούλου Ελένη

Επιβλέπων καθηγητής: Κίμων Α. Αντωνόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με αφορμή την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους εκείνους τους ανθρώπους που συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση των σπουδών μου, καθένας με το δικό του ξεχωριστό τρόπο.

Συγκεκριμένα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Κ. Κίμωνα Αντωνόπουλο, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος , τις πληροφορίες που μου παρείχε σχετικά με το συγκεκριμένο θέμα, την εποπτεία της εργασίας, την καθοδήγησή, την ενθάρρυνση και τον χρόνο που μου προσέφερε για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Επίσης, ευχαριστώ πολύ τους συμφοιτητές μου για τη συνεργασία, τη συνεχή ενθάρρυνση και την ανιδιοτελή προσφορά τους από τα πρώτα εκπαιδευτικά μου βήματα έως σήμερα.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ και από καρδιάς την οικογένειά μου για την αγάπη, τη διαρκή στήριξη και την κάθε είδους βοήθεια που μου προσέφεραν και μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια.

Αφιερωμένο στην οικογένεια μου...

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική ασχοληθήκαμε με την θεωρητική και πειραματική μελέτη των υλικών αλλαγής φάσης. Στο πρώτο (θεωρητικό) μέρος γίνεται αρχικά αναφορά για την αναγκαιότητα της χρήσης νέων τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια και κυρίως των υλικών αλλαγής φάσης. Έπειτα ακολουθεί η παρουσίαση των ιδιοτήτων τους , των προβλημάτων που συχνά εμφανίζονται καθώς και η ταξινόμηση τους σε κατηγορίες. Στη συνέχεια αναλύονται διεξοδικά όλα τα είδη των εφαρμογών του υλικού , έμφαση δίνεται στο τομέα των κτιρίων και κυρίως στις μελέτες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα για την χρήση των υλικών αλλαγής φάσης σε τοιχοποιία.

Στο δεύτερο μέρος αρχικά υπολογίζεται η θερμοκρασία του PCM στον τοίχο ενός κτιρίου απέναντι από το παράθυρο για τους θερινούς μήνες καθώς και η θερμοκρασία ενός απλού μπετόν. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τα ίδια και για 48ωρο με το πρώτο 24ωρο να είναι συννεφιασμένο καθώς και τις θερμοροές των δύο περιπτώσεων.

Τέλος, ακολουθεί παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος του PCM και ως προς τη θερμοκρασία του δωματίου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Α' ΜΕΡΟΣ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Γνωριμία με τα PCM.....	9
1.1 Εισαγωγικό.....	9
1.2 Ορισμός.....	12
1.3 Κριτήρια – Απαιτήσεις επιλογής των PCM.....	16
1.4 Αγορά.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Είδη PCM.....	25
2.1 Οργανικά.....	28
2.1.1 Παραφίνες.....	29
2.1.2 Λιπαρά οξέα.....	31
2.1.3 Λιπαρές αλκοόλες.....	35
2.2 Ανόργανα.....	36
2.2.1 Ένυδρα άλατα.....	38
2.2.2 Μεταλλικά άλατα.....	42
2.3 Εύτηκτα.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ιδιότητες.....	45
3.1 Ιδιότητες PCM.....	45
3.2 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων.....	50
3.2.1 TGA.....	51
3.2.2 DTA.....	52
3.2.3 DSC.....	56
3.2.4 T History.....	59
3.2.5 Thermal delay method.....	64
i) Γενικά.....	64

ii) Προτεινόμενη αναθεώρηση των κύριων βελτιώσεων στην T-History μέθοδο.....	70
iii) Προτεινόμενη θερμική μέθοδος καθυστέρησης.....	72
iv) Πλεονεκτήματα της προτεινόμενης θερμικής μεθόδου καθυστέρησης	
v) Μετρήσεις.....	79
vi) Συμπεράσματα.....	81

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης.....83

4.1 Μέθοδος ενθαλπίας.....	85
4.2 Μέθοδος ενεργούς θερμοχωρητικότητας.....	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Εφαρμογές PCM.....87

5.1 Γενικές.....	87
5.1.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	88
5.1.2 Θερμική ένδυση.....	91
5.1.3 Ιατρικές εφαρμογές.....	95
5.1.4 Οχήματα.....	99
5.1.5 Θερμική προστασία ηλεκτρικών μηχανών.....	100
5.1.6 Μεταφορές αγαθών.....	100
5.1.7 Φορητές ηλεκτρικές συσκευές.....	103
5.1.8 Επαναγραφόμενα CDs και DVDs.....	105
5.1.9 Ηλιακά θερμαινόμενα θερμοκήπια.....	106
5.1.10 Μαγειρικά σκέυη.....	108
5.2 Κτιριακές εφαρμογές.....	110
5.2.1 Ενσωμάτωση PCM στα δομικά υλικά.....	112
i) Άμεση ενσωμάτωση.....	112
ii) Απορρόφηση.....	112
iii) Συσκευασία.....	112

5.2.2	Ενεργειακά αποδοτικά παράθυρα.....	114
5.2.3	Ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης με PCM.....	117
5.2.4	Οροφές PCM.....	120
5.2.5	Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα με PCM.....	123
5.2.6	Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM.....	125
5.2.7	Υλικά αλλαγής φάσης σε τοιχοποιία.....	128
	<i>i) Τοίχος Trombe με PCM.....</i>	131
	<i>ii) Ξηρός τοίχος αλλαγής φάσης εμποτισμένος με PCM.....</i>	134
5.2.8	Γυψοσανίδες με PCM.....	135
5.2.9	Σανίδες οροφής με PCM.....	140
5.2.10	Ενσωμάτωση PCM σκυρόδεμα.....	142
5.2.11	Ενσωμάτωση PCM σε τούβλο.....	143
5.2.12	Πολυστρωματική σανίδα από PCM.....	144
5.2.13	Θερμικά ενεργοποιημένο πάνελ οροφής με PCM.....	144
5.2.14	Υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με PCM.....	146
5.2.15	Υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με τη χρήση ``σταθερής μορφής`` πλακών με PCM.....	148
5.2.16	Ενσωμάτωση PCM σε μείγμα ξύλου-ελαφρού βάρους τσιμέντο..	149

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Ιστορική αναδρομή.....

6.1	ΗΠΑ-NASA.....	153
6.2	ΥΑΦ για ψύξη-θέρμανση κτιρίων.....	153
6.3	Maria Telkes.....	154
6.4	Lawrence Gardshire.....	155
6.5	J.W.Hodgins και T.W.Hoffman.....	155
6.6	Ερευνητική δραστηριότητα.....	157
6.7	Άλας Glauber.....	159
6.8	Παραφίνες.....	160
6.9	Υπόλοιπος κόσμος.....	160

6.10	(Δυτική) Γερμανία.....	160
6.11	Σουηδία.....	161
6.12	Γαλλία.....	161
6.13	Ηνωμένο Βασίλειο.....	162
6.14	Ιαπωνία.....	162

Β' ΜΕΡΟΣ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Υπολογιστική μελέτη.....	163
7.1 Υπολογισμός διάχυτης ακτινοβολίας και παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	163
7.2 Επιλογή PCM.....	183
7.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας PCM.....	187
7.4 Υπολογισμός θερμοκρασίας μπετόν.....	206
7.5 Υπολογισμός θερμοκρασίας PCM (48ωρο).....	222
7.6 Υπολογισμός θερμοκρασίας μπετόν (48ωρο).....	238
7.7 Υπολογισμός θερμοροής PCM.....	258
7.8 Υπολογισμός θερμοροής μπετόν.....	267
7.9 Διαφορά θερμοροών PCM - μπετόν.....	276
7.10 PCM RT27.....	280
7.11 Υπολογισμός θερμοκρασίας PCM RT27.....	283
7.12 Διαφορά θερμοκρασίας PCM RT27 –μπετόν.....	296
7.13 Υπολογισμός θερμοκρασίας PCM RT27 (48ωρο).....	300
7.14 Διαφορά θερμοκρασίας PCM RT27 –μπετόν (48ωρο).....	316
7.15 Υπολογισμός θερμοροής PCM RT27.....	320
7.16 Διαφορά θερμοροών PCM RT27- μπετόν.....	329
7.17 Παραμετρική μελέτη.....	333
7.17.1 Αλλαγή πάχους PCM.....	333
7.17.2 Αλλαγή θερμοκρασίας δωματίου.....	361

Α' ΜΕΡΟΣ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Γνωριμία με τα PCM

1.1 Εισαγωγικό

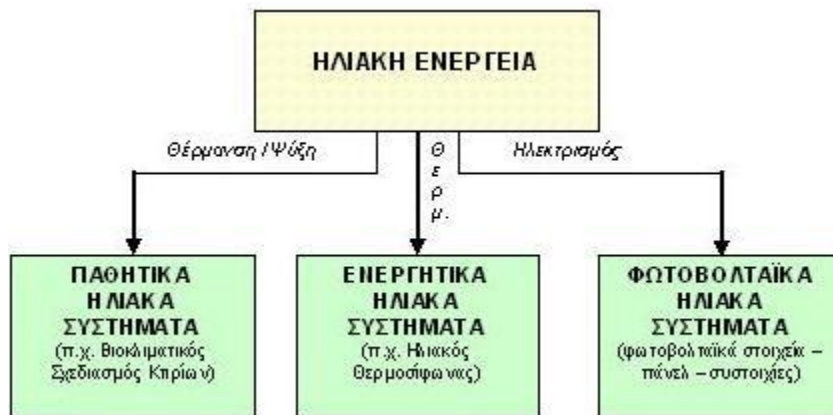
Μία απ' τις σημαντικότερες ιδιότητες των κτιρίων είναι η προστασία των ανθρώπων από ακραία καιρικά φαινόμενα. Αν ανατρέξουμε στην ιστορία των ανθρώπου, απ' την παλαιολιθική κιόλας εποχή, θα δούμε την συνεχή του προσπάθεια για την κατασκευή ενός καταφύγιου που θα τον προστατέψει από τις κλιματικές συνθήκες. Με το πέρασμα των χρόνων, αυτή η αναζήτηση του ανθρώπου για προστασία απ' τα καιρικά φαινόμενα εξελίχθηκε εξασφαλίζοντας δροσερές συνθήκες το καλοκαίρι και επαρκή θέρμανση το χειμώνα.

Σήμερα, ο κτιριακός τομέας θεωρείται ένας απ' τους πιο ενεργοβόρους. Η σύγχρονη τεχνολογία έχει προσανατολιστεί στην απαγκίστρωσή μας από τη χρήση του πετρελαίου και στην εύρεση νέων πηγών ενέργειας καθώς και τρόπων μείωσης των ενεργειακών μας αναγκών. Στην Ελλάδα τα κτίρια αντιπροσωπεύουν το 36% της συνολικής ζήτησης ενέργειας και πρόκειται για ένα ποσοστό το οποίο έχει αυξητικές τάσεις. Ωστόσο, φαίνεται αισιόδοξο το ποσοστό μείωσης της σημερινής κατανάλωσης μελλοντικά (περίπου 30%) αξιοποιώντας τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και τον βιοκλιματικό σχεδιασμό των κτιρίων.



Σχ. 1.1.1 Ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων [3]

Η Ελλάδα είναι μια χώρα διεθνώς φημισμένη για τον ήλιο της τις περισσότερες μέρες του χρόνου. Ο ήλιος είναι μία ανεξάντλητη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε για την παραγωγή ενέργειας και θερμότητας. Ειδικά στην Ελλάδα, μπορούμε να την εκμεταλλευτούμε σε όλο της το φάσμα καθώς η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται κατά προσέγγιση στα 1400kwh/m². Έτσι, τα τελευταία χρόνια, υπάρχει μια νέα τάση στη δόμηση που αναζητεί την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας και την ελαχιστοποίηση της συμβατικής.

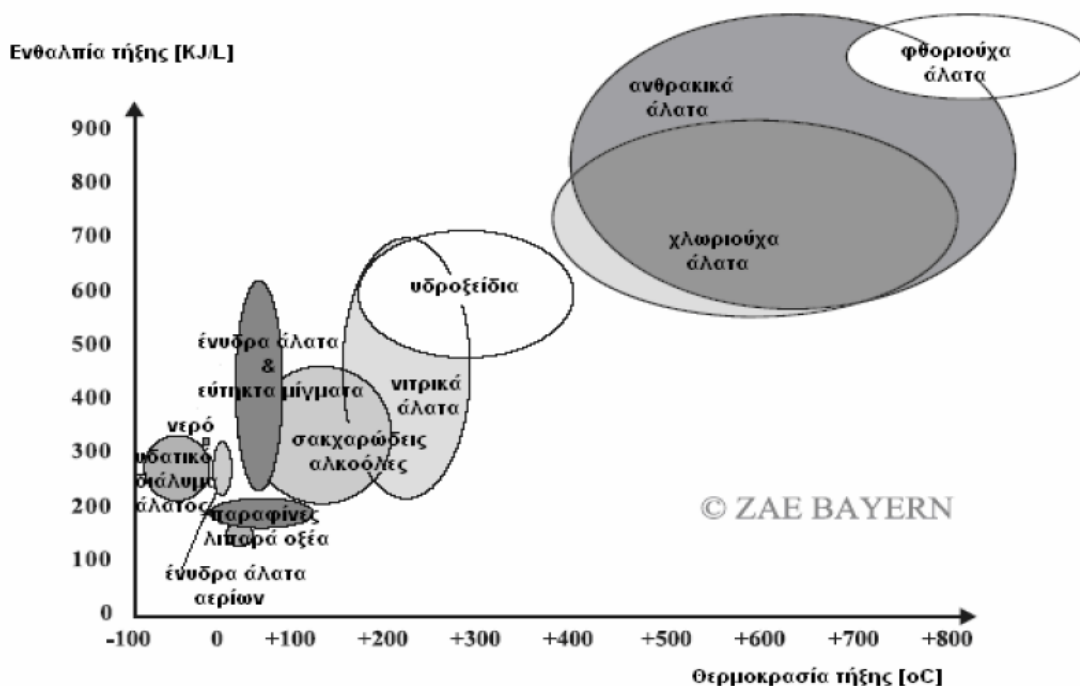


Σχ. 1.1.2. Χρήση ηλιακής ενέργειας [4]

Μία τέτοια προσπάθεια μπορεί να επιτευχθεί και με τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης - ΥΑΦ (Phase Change Materials - PCM). Πρόκειται για μία τεχνική αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας ενέργειας, δηλαδή με την αλλαγή φάσης του υλικού στο οποίο αποθηκεύουμε θερμότητα. Στο παρακάτω κεφάλαιο θα δούμε αναλυτικότερη περιγραφή της τεχνικής αυτής.

1.2 Ορισμός

Με τον όρο υλικά αλλαγής φάσης (PCM) ορίζονται τα υλικά τα οποία μπορούν να αποθηκεύσουν και να ελευθερώσουν μεγάλα ποσά ενέργειας, ως αποτέλεσμα της αλλαγής φάσης στη μοριακή τους δομή. Συνοπτικά, πρόκειται για υλικά λανθάνουσας θερμότητας που χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και έπειτα να απελευθερώσουν θερμότητα. Αξίζει να αναφέρουμε στο σημείο αυτό ότι γενικά η αλλαγή φάσης ενός υλικού από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε αέριο ακολουθείται από ταυτόχρονη ανταλλαγή ενέργειας με το περιβάλλον, η οποία είναι αποτέλεσμα της αναδιάταξης της μοριακής τους κατάταξης. [1]

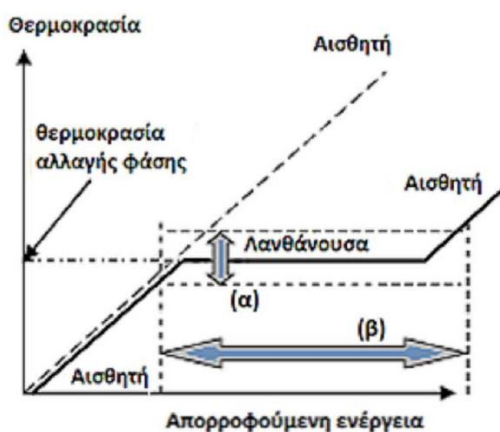


Σχ. 1.2.1 Κατηγοριοποίηση υλικών που χρησιμοποιούνται ως PCM σύμφωνα με το τυπικό εύρος της θερμοκρασίας και της ενθαλπίας τήξης τους [2]

Τα υλικά αλλαγής φάσης ή PCM (phase changing materials) έχουν την δυνατότητα να μειώσουν τις ημερήσιες διακυμάνεις της θερμοκρασίας δωματίου περιορίζοντας τις μέγιστες τιμές που αυτή δύναται να λαμβάνει λόγω των

ακραίων μεταβολών της εξωτερικής θερμοκρασίας. Γενικότερα, τα PCM μπορούν να περιορίζουν τα φορτία ψύξης ή θέρμανσης, να παράγουν αποθέματα ενέργειας για τον καταναλωτή και επομένως μειώνουν σημαντικά την αναγκαιότητα για δημιουργία νέων ηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση σε ώρες αιχμής.

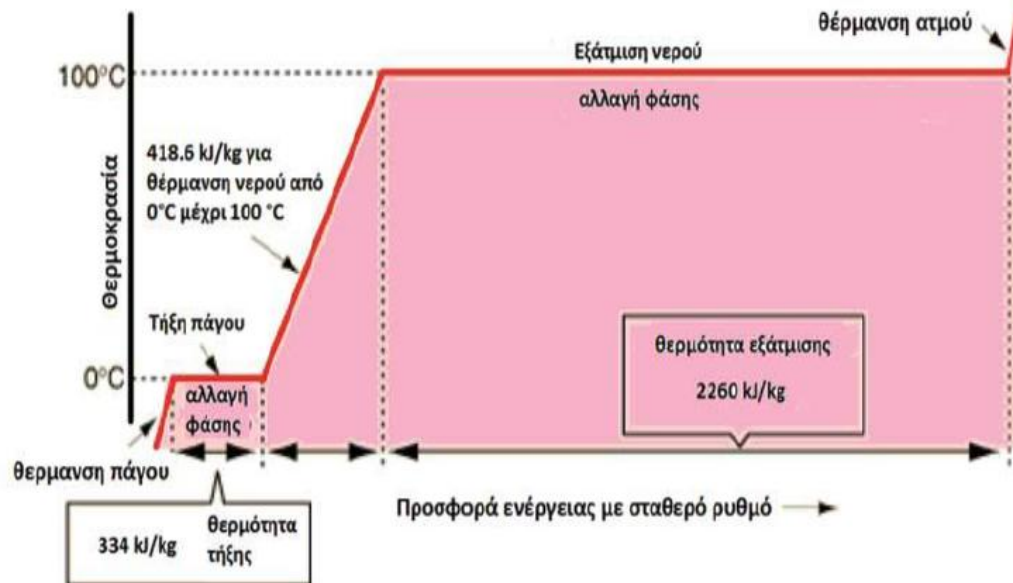
Επειδή έχει αναφερθεί αρκετά παραπάνω, με τον όρο λανθάνουσα θερμότητα ονομάζουμε τη θερμότητα εκείνη που χρειάζεται ένα υλικό για τη μετάβαση από τη μία φάση στην άλλη κατά τη διάρκεια της οποίας το υλικό έχει σταθερή θερμοκρασία. Είναι, δηλαδή, το ποσό της θερμικής ενέργειας που απορροφάται ή ελκύεται όταν μια ουσία αλλάζει κατάσταση. Ονομάζεται λανθάνουσα γιατί δεν μπορεί να ανιχνευτεί ως διαφορά στη θερμοκρασία της ουσίας.[6]



Σχ. 1.2.2 Αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [7]

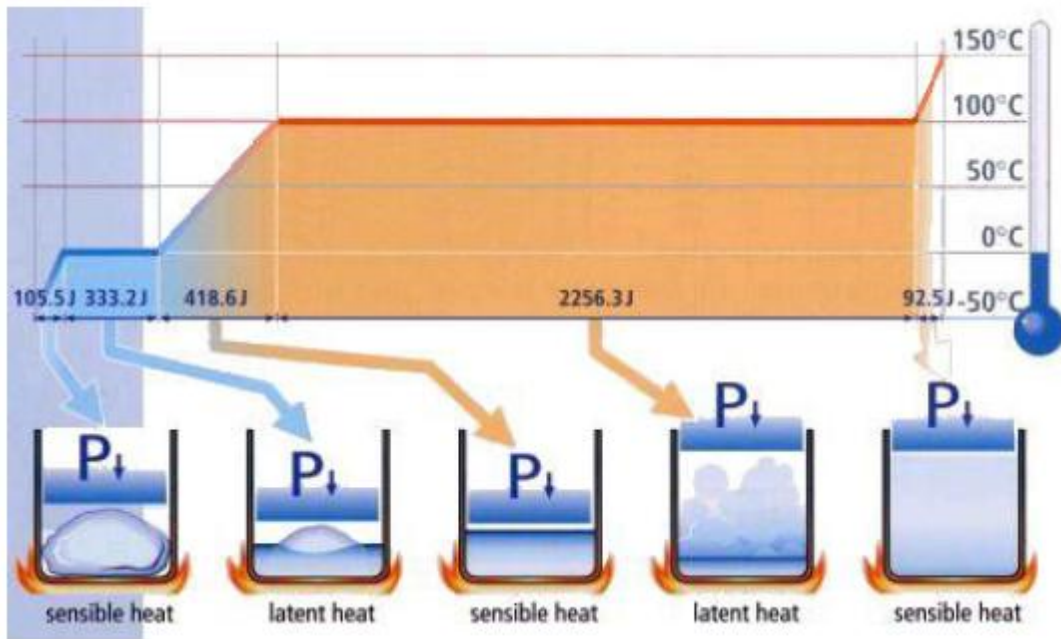
Ένα καλό παράδειγμα για να καταλάβουμε την έννοια των υλικών αλλαγής φάσης είναι το νερό απ' το οποίο προήλθε και η ιδέα για την τεχνική αυτή. Το νερό έχει την ιδιότητα να αποθηκεύει μεγάλα ποσά θερμότητας κατά την αλλαγή φάσης του σε πάγο. Η χρήση όμως του πάγου παρουσιάζει αρκετά προβλήματα λόγω των ιδιοτήτων του νερού όπως η θερμοκρασία τήξεώς του, η μεγάλη μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία καθώς και η χαμηλή θερμοκρασία προσαγωγής στο σύστημα αποθήκευσης. Για παράδειγμα, το νερό χρειάζεται

540cal/g στους 100° C για την μετάβασή του από υγρή σε αέρια φάση ενώ ο πάγος μόλις 80cal/g για να μεταβεί σε υγρή. [8]



Σχ. 1.2.3 Διάγραμμα μεταβολής φάσης του νερού [5]

Παρόλα τα πρόβλημα που παρουσιάζει ο πάγος, η μεγάλη αποθήκευση θερμότητας κατά την αλλαγή φάσης του νερού ήταν αυτό που οδήγησε σε εκτενέστερες έρευνες για την εύρεση υλικών αλλαγής φάσης. Δηλαδή, υλικά τέτοια τα οποία θα παρουσίαζαν τα πλεονεκτήματα του νερού και στα οποία θα ελαχιστοποιούνταν τα παραπάνω μειονεκτήματά του. Οι έρευνες κατέληξαν στην ανακάλυψη των PCM τα οποία παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης κάνοντας πιο λειτουργική την χρήση τους. Τα πρώτα PCM είναι τα ένυδρα άλατα, μια κατηγορία υλικών που αναπτύσσεται και τελειοποιείται ακόμη και σήμερα. Ανάλογα με τις τεχνικές εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται τα PCM, πολλές διαφορετικές κατηγορίες υλικών έχουν μελετηθεί στο παρελθόν.



Σχ 1.2.4 Λανθάνουσα θερμότητα νερού

1.3 Κριτήρια – Απαιτήσεις επιλογής PCM [9, 10, 11, 12, 13]

Απαραίτητη είναι η γνώση των φυσικών , τεχνικών και άλλων ιδιοτήτων των ΥΑΦ για να πετύχουμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα της χρήσης τους ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Οι μηχανικοί πρέπει να επιλέξουν το σωστό υλικό αλλαγής φάσης ανάλογα με την εφαρμογή λαμβάνοντας υπόψη ένα μεγάλο αριθμό κριτηρίων και όχι ενός. Για την επιλογή τους θα πρέπει να εξεταστούν προσεχτικά οι ιδιότητες των υποψηφίων καταγράφοντας τα πλεονακτήματα αλλά και τις αδυναμίες τους.

Για την ευκολότερη εύρεση ενός ιδανικού μέσου θερμικής αποθήκευσης συνίσταται ο καλύτερος συνδυασμός των ιδιοτήτων του. Επίσης, για την σωστή επιλογή του υλικού σημαντικός παράγοντας είναι ο σκοπός χρήσης του ΥΑΦ. Παρακάτω θα δούμε αναλυτικότερα τα κριτήρια που πρέπει να πληρούν τα ΥΑΦ ώστε να είναι ιδανικά μέσα αποθήκευσης ενέργειας.

- **Κριτήρια με βάση τις θερμικές και φυσικές ιδιότητες**

Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ΥΑΦ πρέπει να βρίσκεται μέσα στο εύρος θερμοκρασιών της συγκεκριμένης εφαρμογής. Η διαδικασία τήξης στη θερμοκρασία αυτή θα πρέπει να παράγει αρκετή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου ώστε να ικανοποιεί τις ανάγκες αποθήκευσης της συγκεκριμένης εφαρμογής περιορίζοντας ταυτόχρονα τον όγκο του υλικού που απαιτείται. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη επίσης και η αισθητή θερμότητα που μπορεί να αποθηκευτεί από το ΥΑΦ.

Η υψηλή τιμή της λανθάνουσας θερμότητας που αποθηκεύεται ανά μονάδα μάζας είναι απαραίτητη ώστε με μικρότερη ποσότητα PCM να αποδίδεται καθορισμένο ποσό θερμότητας, ενώ εξίσου απαραίτητη είναι και η υψηλή τιμή της ειδικής θερμότητας. Η τελευταία προσφέρει επιπλέον αποθήκευση θερμότητας με την μορφή της αισθητής θερμότητας και συμβάλλει και στην αποφυγή του φαινομένου “ supercooling”. Ακόμα, απαιτείται η υψηλή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας ώστε η

θερμοκρασιακή κλίση για την φόρτιση του PCM να είναι μικρή, και υψηλή πυκνότητα του υλικού ώστε να περιορίζεται ο όγκος του που χρησιμοποιείται.

Άλλο ένα κριτήριο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η ιδιότητα της ενθαλπίας. Η ενθαλπία αλλαγής φάσης πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να επιτευχθεί υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης σε σύγκριση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Επίσης, η αποδοτικότητα με την οποία η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να επανακτηθεί μπορεί να μεγιστοποιηθεί με την επιλογή ενός υλικού με υψηλή θερμική αγωγιμότητα.

- **Κριτήρια με βάση τις χημικές ιδιότητες**

Μία ακόμα παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη για εφαρμογές υλικών αλλαγής φάσης σε κτίρια είναι η ασφάλεια. Η χημική σταθερότητα του ΥΑΦ θα πρέπει να εκτιμηθεί πριν την εφαρμογή του στη δομή του κτιρίου. Καθώς το ΥΑΦ πρόκειται να εκτελέσει πολλούς επαναλαμβανόμενους κύκλους αλλαγής φάσης στη διάρκεια της ζωής του, προτεραιότητα έχουν η ολοκληρωτική αντιστρεψιμότητα και η εκφύλιση του υλικού.

Ακόμα, το ΥΑΦ θα πρέπει να είναι συμβατό με τα υπόλοιπα κατασκευαστικά υλικά ώστε να μην προκαλέσει δομικές ζημιές. Αυτονόητο είναι το ΥΑΦ να μην είναι τοξικό και εύφλεκτο για να μην προκαλέσει τον παραμικρό κίνδυνο στους χρήστες του κτιρίου.

Σε ότι αφορά στην μή αναφλεξιμότητα του PCM, οι Salyer και Sircar παρουσίασαν ένα δοκίμιο πάνω στην αντίδραση των PCM στη φωτιά και τόνισαν την πιθανότητα προσθήκης ουσιών που ονομάζονται fire-retardants και οι οποίες βελτιώνουν την αντίδραση του υλικού σε περίπτωση πυρκαγιάς. Οι Banu et al πραγματοποίησαν δοκιμές αναφλεξιμότητας σε γυψοσανίδες, οι οποίες ήταν διαποτισμένες με περίπου 24% οργανικό PCM και οι οποίες έδειξαν ότι οι γυψοσανίδες δεν πληρούν όλες τις προϋποθέσεις σχετικά με το ενδεχόμενο έναρξης

φωτιάς. Όμως, ανέφεραν την πιθανότητα μείωσης της αναφλεξιμότητας της γυψοσανίδας που αποθηκεύει θερμότητα με την ενσωμάτωση των fire-retardants.

Θα πρέπει να αποφευχθεί το φαινόμενο της υπέρψυξης ή υπόψυξης το οποίο έχει παρουσιαστεί στη συμπεριφορά αρκετών υλικών αλλαγής φάσης. Η αλλαγή φάσης του ΥΑΦ θα πρέπει να είναι ολοκληρωτική και ομογενής κατά τους κύκλους της φόρτισης και αποφόρτισης. Η παρουσία αυτού του φαινομένου δεν θα επιτρέψει στο ΥΑΦ να στερεοποιηθεί αμέσως κατά την ψύξη στη θερμοκρασία τήξης αντιθέτως θα αρχίσει να κρυσταλλοποιείται όταν η θερμοκρασία φτάσει αρκετά χαμηλότερα. Αυτό σημαίνει ότι η έκλυση της αποθηκευμένης ενέργειας θα γίνεται σε ένα εύρος 5-10°C χαμηλότερα από το σημείο τήξης.

- **Οικονομικά κριτήρια**

Η διαθεσιμότητα των διαφόρων τύπων ΥΑΦ είναι ουσιαστικός παράγοντας και καθορίζει τη χρήση τους στο μέλλον στη σχεδίαση και στην κατασκευή. Το κόστος αλλά και η ευκολία εφαρμογής τους είναι το ίδιο σημαντικοί παράγοντες. Η τιμή των ΥΑΦ γενικά δεν είναι αντιπροσωπευτική για το άμεσο μέλλον καθώς θα επηρεαστεί από το εύρος εφαρμογής των υλικών και τη διάδοση της χρήσης τους. Πάντως η επίτευξη θερμικού ελέγχου των χωρών είναι κρίσιμη για την αειφόρο ανάπτυξη στον κτιριακό τομέα. Εφόσον όμως η εφαρμογή των ΥΑΦ μπορεί να συντελέσει αποτελεσματικά στην εξοικονόμηση ενέργειας, το αρχικό κόστος εγκατάστασης μπορεί να εξισορροπηθεί από την εξοικονόμηση αυτή.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι τα υλικά αλλαγής φάσης δεν είναι δυνατόν να πληρούν για κάθε εφαρμογή όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις και ιδιότητες. Γι' αυτό η επιλογή ενός τέτοιου υλικού γίνεται συνήθως σε σχέση με τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, την ενθαλπία, τη σταθερότητα σε

κυκλική φόρτιση και την υπόψυξη, παράγοντες οι οποίοι είναι πολύ σημαντικοί για τη σωστή λειτουργία του.

Το ιδανικό ΥΑΦ 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 του φαινομένου της υπέρψυξης, να είναι χημικά σταθερό, φθηνό στην παραγωγή του, να μην είναι τοξικό, διαβρωτικό και εύφλεκτο.

<u>Φυσικά</u>	<u>Τεχνικά</u>	<u>Οικονομικά</u>
- Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης (στα όρια θερμικής άνεσης)	- Χαμηλή τάση ατμών	- Χαμηλό κόστος
- Σταθερή θερμοκρασία αλλαγής φάσης	- Μικρή μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης	- Δυνατότητα Ανακύκλωσης
- Μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης	- Χημική ευστάθεια	
- Μεγάλη θερμική αγωγιμότητα	- Συμβατότητα με άλλα δομικά υλικά	
	- Ασφάλεια στη χρήση τους	

Σχ 1.3.1: Κριτήρια επιλογής PCMs για εφαρμογές στα κτίρια.

1.4 Αγορά

Η διαθεσιμότητα των εμπορικών ΥΑΦ, των σύνθετων υλικών από ΥΑΦ και των συσκευασμένων ΥΑΦ είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη και την εμπορευματοποίηση των εφαρμογών με ΥΑΦ. Τα εμπορικά ΥΑΦ ή τα σύνθετα υλικά που περιέχουν ΥΑΦ πρέπει να πληρούν περισσότερες απαιτήσεις σε σύγκριση με τα συσκευασμένα ΥΑΦ. Συχνά ένα καθαρό ΥΑΦ δεν μπορεί να πουληθεί εξαιτίας της ειδικής μεταχείρισής του για παράδειγμα όσον αφορά την περιεκτικότητά του σε νερό. Όταν όμως τέτοια υλικά συσκευασθούν δεν τίθεται πρόβλημα πώλησής τους.

Συνήθως, είναι απαραίτητο τα κύρια χαρακτηριστικά των προϊόντων ΥΑΦ να είναι καλά τεκμηριωμένα. Γι' αυτό το λόγο έχει αναπτυχθεί από την ZAE Bayern και την FhG-ISE ένα πρότυπο για τον έλεγχο της ποιότητας των προϊόντων. Από την άνοιξη του 2007 το σήμα που φαίνεται παρακάτω υποδεικνύει ότι ένα ΥΑΦ έχει ελεγχθεί σύμφωνα με το πρότυπο αυτό. [17]



Αυτή τη στιγμή είναι διαθέσιμα στην αγορά περισσότερα από 50 εμπορικά PCM από τις εταιρίες RUBITHERM GmbH, Dorken GmbH & Co. KG, Climator AB, TEAP, CRISTOPIA Energy Systems και Mitsubishi Chemical. Οι τιμές τους ξεκινούν από 0.5 και φτάνουν έως τα 10 € / kg.

Το Κερί παραφίνης είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μορφή στο εμπόριο ως οργανικό PCM αποθήκευσης θερμότητας, προσδιορίστηκε από τον Carl Reichenbach το 1830 βρίσκεται κυρίως ως ένα λευκό, άοσμο, άγευστο και κυρώδες στερεό, με τυπικό σημείο τήξης μεταξύ 46° C και 68° C, έχοντας πυκνότητα περίπου 0,9. Είναι αδιάλυτο στο νερό, αλλά διαλυτό στη βενζίνη ή σε συγκεκριμένους εστέρες, επίσης είναι ένας καλός αγωγός ηλεκτρισμού. Επιπλέον παρέχει χημική και θερμική σταθερότητα, χαμηλό κόστος αγοράς σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες PCM και η παραγωγή του γίνεται για ποικίλες εμπορικές εφαρμογές. [15,16]

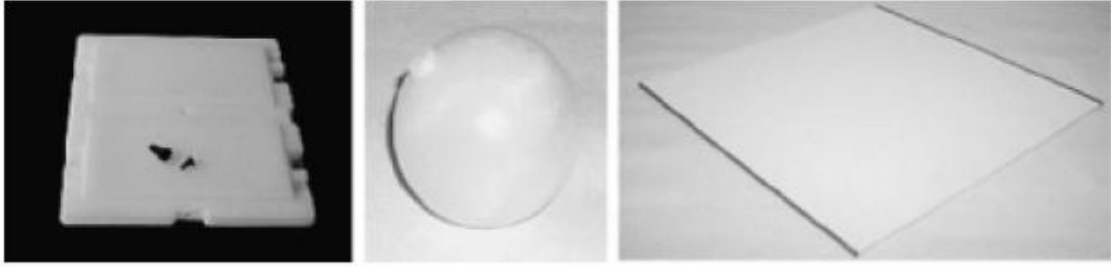


Σχ. 1.4.1 κερί παραφίνης

Γενικά, το κόστος των υλικών προς το παρόν για τα εμπορικά διαθέσιμα PCM είναι αρκετά υψηλό (ενδεικτική τιμή 0.5-10 €/kg). Αυτό σημαίνει ότι η αποθήκευση 1kWh=3600kJ απαιτεί 20kg PCM (με πυκνότητα αποθήκευσης 180kJ/kg) ή $20 \cdot 0.5 = 10\text{€}$. Αν υποθέσουμε ότι η συμβατική ενέργεια κοστίζει 0.05 €/kWh, η αποπληρωμή της επένδυσης απαιτεί $10/0.05 = 200$ κύκλους χρήσης.

PCN name	Type of product	Melting point (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Source
RT 20	Paraffin	22	172	Rubitherm GmbH
Climsel C23	Salt hydrate	23	148	Climator
Climsel C24	Salt hydrate	24	216	Climator
RT 26	Paraffin	25	131	Rubitherm GmbH
RT 25	Paraffin	26	232	Rubitherm GmbH
STL 27	Salt hydrate	27	213	Mitsubishi chemical
S27	Salt hydrate	27	207	Cristopia
RT 30	Paraffin	28	206	Rubitherm GmbH
RT 27	Paraffin	28	179	Rubitherm GmbH
TH 29	Salt hydrate	29	188	TEAP
Climsel C32	Salt hydrate	32	212	Climator
RT 32	Paraffin	31	130	Rubitherm GmbH

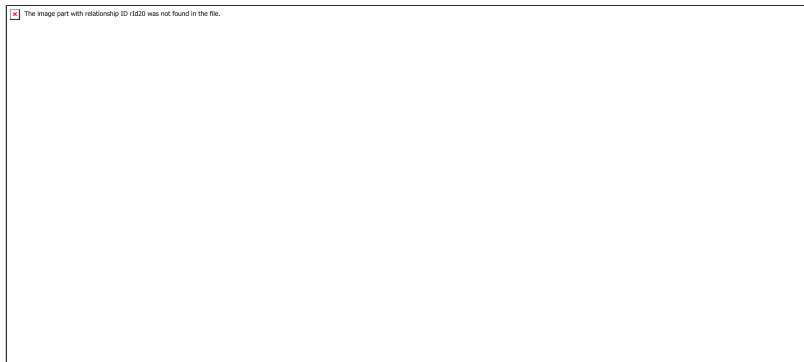
Σχ. 1.4.2 Εμπορικά PCM διαθέσιμα στη διεθνή αγορά [14]



Σχ 1.4.3 Επίπεδη συσκευασία (Kissmann – Γερμανία) [18]
Σφαίρες PCM [18]
Μπάρες διπλών πιάτων (Dorken – Γερμανία) [18]



Σχ 1.4.4 Marco encapsulation σε σάκους [18]



Σχ 1.4.5 Marco encapsulation σε λωρίδες καψουλας [18]



Σχ 1.4.6 Marco encapsulation σε αλουμίνια πορτραίτα με πτερύγια για βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας [18]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Είδη PCM [20]

Όλα τα υλικά που είναι γνωστά ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν μπορούν να βρίσκονται σε μία από τις τρεις φάσεις στερεή, υγρή ή αέρια. Αν χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο ταξινόμησης ο μηχανισμός αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο υλικό (χαρακτηρίζει σε μεγάλο βαθμό τη γενικότερη θερμική συμπεριφορά του υλικού) τότε θα μπορούσαν να δημιουργηθούν δύο μεγάλες κατηγορίες :

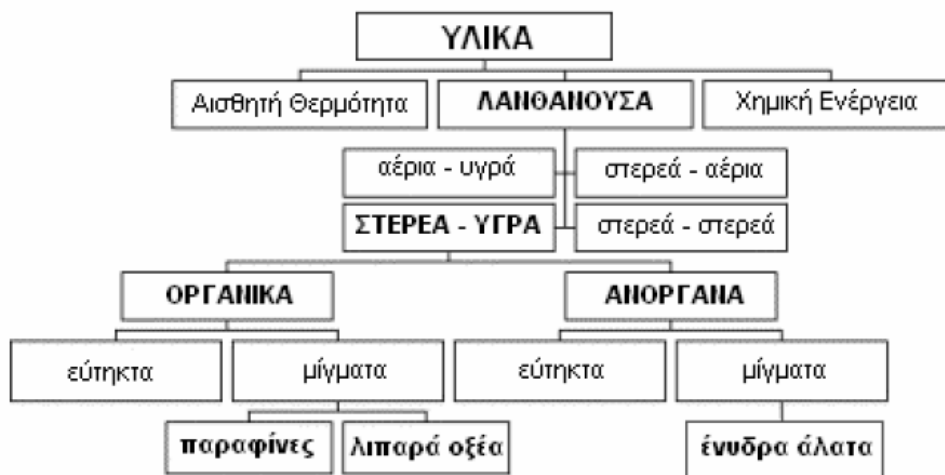
1. Τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή αισθητής θερμότητας σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης τους.
2. Τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας σε ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης τους ενώ στο υπόλοιπο τμήμα συναλλάσσουν θερμότητα με τη μορφή αισθητής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

Για την πρώτη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά τους αποτελεί η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή όγκο, ενώ για τη δεύτερη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται για την αλλαγή φάσης. Βασική παρατήρηση για τις τιμές των δύο μεγεθών είναι ότι η τιμή της λανθάνουσας θερμότητας είναι πολλαπλάσια της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση ή όγκο. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται η θερμοχωρητικότητα και η πυκνότητα διαφόρων υλικών.

ΥΛΙΚΟ	ρ (kg/m ³)	C _p (J/KgK)	C _v (MJ/m ³ K)
Πηλός	1458	879	1,28
Τούβλο	1800	837	1,51
Αμμόπετρα	2200	712	1,57
Ξύλο	700	2390	1,67
Σκυρόδεμα	2000	880	1,76
Αλουμίνιο	2710	837	2,27
Σίδερο	7900	452	3,57
Ατσάλι	7840	465	3,68
Πετρώματα υπεδάφους	2050	1840	3,77
Μαγνήτης	5177	752	3,89
Νερό	988	4182	4,17

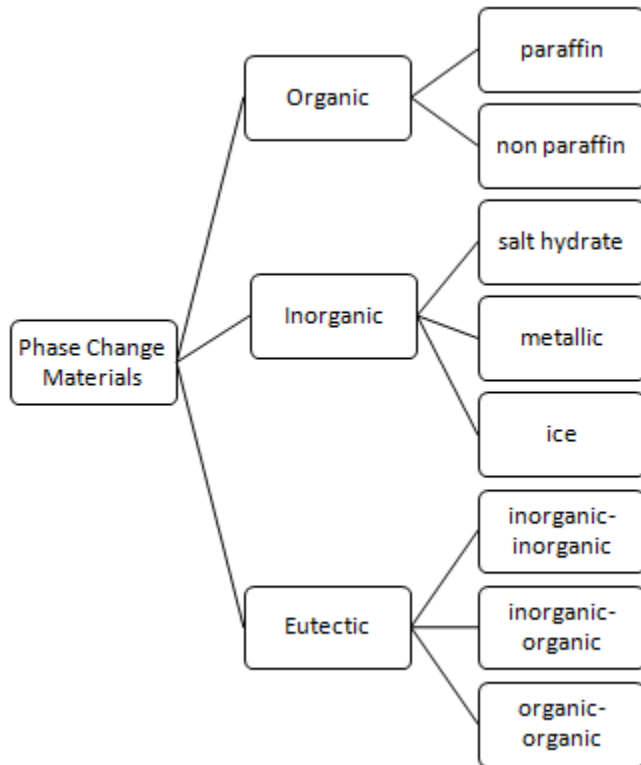
Σχ. 2.1.1 Θερμοχωρητικότητα και η πυκνότητα διαφόρων υλικών [21]

Η ομαδοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης μπορεί να γίνει με βάση πολλούς διαφορετικούς παράγοντες. Πρώτος και σημαντικότερος είναι η σύσταση, σύμφωνα με την οποία χωρίζονται σε οργανικά και ανόργανα υλικά. Άλλοι παράγοντες είναι οι εφαρμογές που καλύπτουν καθώς επίσης και το εύρος θερμοκρασιών που λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης τους.



Σχ. 2.1 Ομαδοποίηση υλικών αλλαγής φάσης [19]

Κατηγοριοποίηση υλικών αλλαγής φάσης βάσει σύστασης



Σχ. 2.2 Μια διαφορετική κατηγοριοποίηση των ΥΑΦ [21]

2.1 Οργανικά

Τα οργανικά υλικά καλύπτουν μικρότερο θερμοκρασιακό εύρος, περίπου από 0°C έως 150°C. Περιλαμβάνουν κυρίως τις παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και τις σακχαρώδεις αλκοόλες. Στις περισσότερες περιπτώσεις εμφανίζουν μικρές πυκνότητες, μικρότερες από 1g/cm³. Για το λόγο αυτό, έχουν μικρότερες τιμές λανθάνουσας θερμότητας ανά όγκο σε σύγκριση με τα ανόργανα. Ακόμη, παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και είναι εύφλεκτα. Ωστόσο, πλεονεκτούν ως προς τη συμβατότητά τους με άλλα υλικά, γιατί είναι μη τοξικά, εμφανίζουν λίγο ή καθόλου υπόψυξη, έχουν χημική και θερμική σταθερότητα ενώ παράλληλα είναι αρκετά φθηνότερα. Ως κύριοι εκπρόσωποι της κατηγορίας, οι παραφίνες και τα λιπαρά οξέα αναπτύσσονται περισσότερο στις επόμενες παραγράφους. [22]

Κάποια χαρακτηριστικά γνωρίσματα των οργανικών ΥΑΦ είναι τα εξής:

- 1) Υψηλή θερμοκρασία τήξης
- 2) Εύφλεκτα
- 3) Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα
- 4) Χαμηλά σημεία ανάφλεξης
- 5) Ποικίλα επίπεδα τοξικότητας
- 6) Αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες

Compound	Melting point (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)
Butyl stearate	19	140
Paraffin C ₁₆ -C ₁₈	20-22	152
Capric-Lauric acid	21	143
Dimethyl sabacate	21	120
Polyglycol E 600	22	127.2
Paraffin C ₁₃ -C ₂₄	22-24	189
(34% Mistiric acid + 66% Capric acid)	24	147.7
1-Dodecanol	26	200
Paraffin C ₁₈ (45-55%)	28	244
Vinyl stearate	27-29	122
Capric acid	32	152.7

Σχ. 2.1.1 Οργανικές ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM [23]

2.1.1 Παραφίνες

Οι παραφίνες αποτελούν τις απλούστερες οργανικές ενώσεις και ανήκουν στην ομάδα των αλκανικών υδρογονανθράκων με μεγάλο μοριακό βάρος. Χαρακτηρίζονται από το γενικό μοριακό τύπο C_nH_{2n+2} , όπου n ο αριθμός των ατόμων άνθρακα που περιέχονται στο μόριο κάθε ένωσης. Η ίδια ονομασία επικράτησε προσδιορίζοντας γενικότερα τα αλκάνια, όμως τις περισσότερες φορές αναφέρεται στα αλκάνια με γραμμική ανθρακική αλυσίδα. Εκτός των απλών παραφινών, υπάρχουν τα ισοαλκάνια (ισοπαραφίνες), δηλαδή αλκάνια των οποίων οι ανθρακικές αλυσίδες περιέχουν διακλαδώσεις και τα κεριά παραφίνης που είναι αλκάνια στερεής μορφής με $20 \leq n \leq 40$.

Η πιο απλή παραφίνη που συναντάται, είναι το μεθάνιο (CH_4) με ένα άτομο άνθρακα, το οποίο σε θερμοκρασία δωματίου βρίσκεται σε αέρια φάση. Τα βαρύτερα μόρια παραφινών με 5 έως 19 άτομα άνθρακα, όπως το οκτάνιο (C_8H_{18}), εμφανίζονται ως υγρά σε συνήθεις θερμοκρασίες ενώ τα κεριά παραφίνης με 20 έως 40 άτομα άνθρακα στο μόριό τους, σχηματίζουν στερεά σώματα. Η φυσική ιδιότητα των παραφινών που ενδιαφέρει κυρίως τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, είναι το σημείο τήξης τους, κι αυτό γιατί θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να εξασφαλίζεται η αλλαγή φάσης τους μέσα στο εύρος θερμοκρασιών που απαιτείται από την εκάστοτε εφαρμογή. Το σημείο αυτό ακολουθεί ένα είδος γραμμικής μεταβολής, καθώς εξαρτάται από το μοριακό βάρος του μορίου και πιο συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερο το μόριο της ένωσης τόσο υψηλότερο είναι και το σημείο τήξης της τελευταίας.

Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει το σημείο τήξης, πέραν του μοριακού μεγέθους, είναι και η σταθερότητα της μοριακής δομής της ένωσης. Αλκάνια με περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα σχηματίζουν χαλαρές δομές στη στερεή τους φάση, σε αντίθεση με τα αλκάνια άρτιου αριθμού που σχηματίζουν καλά οργανωμένες στερεές δομές. Για το λόγο αυτό, κατά τη μετάβασή τους στην υγρή φάση απαιτούν λιγότερη ενέργεια για τη διάσπαση της δομής τους, άρα εμφανίζουν και χαμηλότερα σημεία τήξης.

Οι παραφίνες, ως οργανικές ενώσεις, είναι φθηνές και άφθονες. Παρουσιάζουν άριστη συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση χωρίς καμία υποβάθμιση των

ιδιοτήτων τους. Δεν εμφανίζουν προβλήματα διάβρωσης με κανένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο. Δεν πλήττονται από φαινόμενα, όπως ο διαχωρισμός των φάσεων ή η υπόψυξη, άρα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Επιπλέον χαρακτηρίζονται από χημική και θερμική σταθερότητα. Τέλος, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που εμφανίζουν, μπορεί εύκολα να ξεπεραστεί μέσω εμπλουτισμού του υλικού με μεταλλικά αντικείμενα διαφόρων σχημάτων ή με χρήση ειδικά διαμορφωμένων πτερυγίων. Για τους παραπάνω λόγους, οι παραφίνες αποτελούν ιδανικά υλικά αλλαγής φάσης στα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο γεγονός ότι πραγματοποιούν ολοκληρωμένα την αλλαγή φάσης τους σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου 10K (~ 9K πριν το σημείο τήξης και ~1K μετά). Ένα τέτοιο φαινόμενο αν δεν ληφθεί υπόψη μπορεί να οδηγήσει σε μη σωστή εκλογή υλικού με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές. Τέλος, θα πρέπει να υπάρχει προσοχή κατά τη χρήση τους, καθώς είναι εύφλεκτα υλικά. [22, 24, 25, 26]

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion ($\frac{Kj}{Kg}$)
Paraffin C16-C28	42-44	189
Paraffin C20-C33	48-50	189
Paraffin C22-C45	58-60	189
Paraffin wax	64	173.6
Paraffin C28-C50	66-68	189
Paraffin RT40	43	181
Paraffin RT50	54	195
Paraffin RT65	64	207
Paraffin RT80	79	209
Paraffin RT90	90	197
Paraffin RT110	112	213

Σχ. 2.1.1.1 Παραφίνες και ιδιότητες τους [23]

2.1.2 Λιπαρά Οξέα

Στην Οργανική Χημεία και ειδικότερα στη Βιοχημεία, λιπαρό οξύ ονομάζεται ένα καρβοξυλικό οξύ, συνήθως με μακρά ανθρακική αλυσίδα, είτε κορεσμένη, είτε ακόρεστη. Καρβοξυλικά οξέα σαν το βουτυρικό οξύ (με 4 άτομα άνθρακα) θεωρούνται λιπαρά οξέα, παρά το ότι γενικότερα τα λιπαρά οξέα προέρχονται από φυσικά λίπη και έλαια και θεωρείται ότι έχουν τουλάχιστον 8 άτομα άνθρακα, όπως το καπριλικό οξύ.

Τα περισσότερα από τα φυσικά λιπαρά οξέα, έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα στην ανθρακική αλυσίδα τους. Στη βιομηχανία παράγονται από την υδρόλυση των εστερικών δεσμών ενός λιπαρού ή βιολογικού ελαίου (π.χ. τριγλυκερίδια), με την αφαίρεση της γλυκερόλης.

Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα κορεσμένα και τα ακόρεστα. Τα κορεσμένα λιπαρά οξέα δεν περιέχουν καθόλου διπλούς δεσμούς ή άλλα λειτουργικά σύνολα κατά μήκος της ανθρακικής αλυσίδας.

Ενδεικτικά κορεσμένα λιπαρά οξέα είναι:

- Βουτυρικό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$
- Μυριστικό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$
- Παλμιτικό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$
- Στεαρικό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$

Τα ακόρεστα λιπαρά οξέα είναι παρόμοιας μορφής με τα κορεσμένα, περιέχοντας όμως αυτή τη φορά αλκύλια κατά μήκος της ανθρακικής αλυσίδας με αποτέλεσμα να υπάρχουν διπλοί δεσμοί μεταξύ των ατόμων του άνθρακα.

Ενδεικτικά ακόρεστα λιπαρά οξέα:

- Άλφα-λινολεϊκό οξύ:



- Λινολεϊκό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
- Ολεϊκό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

Τα λιπαρά οξέα εμφανίζουν σημεία τήξης και λανθάνουσα θερμότητα παρόμοια με αυτά των παραφινών. Το Βουτυρικό οξύ ($\text{CH}_3[\text{CH}_2]_2\text{COOH}$) για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κτιριακές εφαρμογές και έχει χρησιμοποιηθεί σε πειράματα, όμως το κόστος του είναι τουλάχιστον 2 με 2,5 φορές μεγαλύτερο από την παραφίνη με αντίστοιχες θερμικές ιδιότητες.

Αντίστοιχα, υπάρχουν λίγα λιπαρά οξέα τα οποία να είναι κατάλληλα για κτιριακές εφαρμογές, πράγμα που γίνεται εύκολα κατανοητό ότι είναι σημαντικό μειονέκτημα έναντι των παραφινών.

Οι δύο επικρατέστεροι υποψήφιοι από αυτά τα υλικά για χρήση σε κτιριακές θερμικές εφαρμογές είναι το Καπρικό Οξύ [σημείο τήξης 31.5°C] και το Καπριλικό Οξύ [σημείο τήξης 16.5°C].

Τα λιπαρά οξέα σε θερμοκρασία δωματίου, υπόκεινται σε μία χημική αντίδραση, γνωστή σαν αυτό-οξειδωση. Το λιπαρό οξύ σπάει σε υδαάνθρακες, κετόνες, αλδεΐδες και μικρότερες ποσότητες αλκοολών και εποξικών. Επίσης συχνά τα τελευταία επεξεργάζονται με συμπυκνωτικούς παράγοντες, όπως το κιτρικό οξύ. [22, 24, 27]

ΥΛΙΚΟ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ	ΘΕΡΜΙΚΗ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (kg/m ³)
	ΤΗΞΗΣ (°C)	ΤΗΞΗΣ (kJ/kg)	ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (W/m K)	
Καπρυλικό οξύ	16	149	0.149 (υγρό,38°C)	901 (υγρό,30°C)
Καπρυλικό οξύ	16	149	0.149 (υγρό,38°C)	981 (στερεό,13°C)
Βουτύλιο στεατικού οξέος	19	140	Μη διαθέσιμη	Μη διαθέσιμη
Βουτύλιο στεατικού οξέος	19	123-200	Μη διαθέσιμη	Μη διαθέσιμη
Καπρινικό οξύ	32	153	0.153 (υγρό,38°C)	886 (υγρό,40°C)
Καπρινικό οξύ	32	153	0.149 (υγρό,40°C)	1004 (στερεό,24°C)
Λαυρικό οξύ	42-44	178	0.147 (υγρό,50°C)	870 (υγρό,50°C)
Λαυρικό οξύ	42-44	178	0.147 (υγρό,50°C)	1007 (στερεό,24°C)
Μυριστικό οξύ	49-58	186 , 204	Μη διαθέσιμη	861 (υγρό,55°C)
Μυριστικό οξύ	49-58	186 , 204	Μη διαθέσιμη	990 (στερεό,24°C)
Παλμιτικό οξύ	61 , 64	185 , 203	0.162 (υγρό,68°C)	850 (υγρό,65°C)
Παλμιτικό οξύ	61 , 64	185 , 203	0.159 (υγρό,80°C)	989 (στερεό,24°C)

Σχ. 2.1.2.1 Λιπαρά οξέα που χρησιμοποιούνται ως PCM [19]

Ένα ακόμη μειονέκτημα αυτής της ομάδας υλικών είναι η κακοσμία, γεγονός που όπως γίνεται κατανοητό περιορίζει δραματικά τη χρηστικότητα του χώρου στον οποίο αυτά εγκαθίστανται.

Παρ' όλ' αυτά, τα παραπάνω προβλήματα θα μπορούσαν να ξεπεραστούν με κάποιου είδους συσκευασία, δίνοντας έτσι ένα PCM φτηνό, χημικά σταθερό, ιδανικό για κτιριακές εφαρμογές.

Material	Formula	Melting Point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group
Acetic acid	CH ₃ COOH	16.7	184	I
Polyethylene glycol 600	H(OC ₂ H ₂) _n OH	20–25	146	I
Capric acid	CH ₃ (CH ₂) ₈ ÁCOOH	36	152	-
Eladic acid	C ₈ H ₇ C ₉ H ₁₆ ÁCOOH	47	218	I
Lauric acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ ÁCOOH	49	178	II
Pentadecanoic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₃ ÁCOOH	52.5	178	-
Tristearin	(C ₁₇ H ₃₅ COO)C ₃ H ₅	56	191	I
Myristic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ ÁCOOH	58	199	I
Palmitic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ ÁCOOH	55	163	I
Stearic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ ÁCOOH	69.4	199	I
Acetamide	CH ₃ CONH ₂	81	241	I
Methyl fumarate	(CHCO ₂ NH ₃) ₂	102	242	I

Σχ. 2.1.2.2 Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης: Λιπαρά οξέα [21]

2.1.3 Λιπαρές αλκοόλες

Οι αλκοόλες είναι οι πιο διαδεδομένες οργανικές ενώσεις. Περιέχουν έναν απλό δεσμό άνθρακα με κάποιο ηλεκτραρνητικότερο άτομο. Οι αλκοόλες περιέχουν ομάδες υδροξυλίου συνδεδεμένες με κορεσμένα άτομα άνθρακα. Πρόκειται στην ουσία για οργανικά παράγωγα του νερού στο οποίο ένα από τα υδρογόνα του έχει αντικατασταθεί από μια οργανική ομάδα. Η πιο γνωστή αλκοόλη είναι η αιθανόλη. Έχουν υψηλά σημεία ζέσεως και μπορούν να παρασκευαστούν από της κατηγορίες ενώσεων της αλκένια και εστέρες αλλά μπορούν να μετατραπούν και σε μία μεγάλη ποικιλία άλλων ενώσεων.

2.2 Ανόργανα

Τα ανόργανα PCM κατηγοριοποιούνται σε ένυδρα και μεταλλικά άλατα. Οι ανόργανες ενώσεις λόγω της μεγάλης τους πυκνότητας έχουν υψηλό λόγο λανθάνουσας θερμότητας προς μάζα και όγκο, έχουν χαμηλό κόστος και σε αντίθεση με τις οργανικές, δεν είναι εύφλεκτες. Ωστόσο, η συμβατότητά τους με άλλα υλικά, όπως τα μέταλλα, είναι προβληματική καθώς πολλοί από τους συνδυασμούς τους προκαλούν σοβαρές διαβρώσεις. Στα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνονται: το φαινόμενο της υπόψυξης (subcooling), ο διαχωρισμός φάσεων και η έλλειψη θερμικής σταθερότητας. [23]

	ΟΡΓΑΝΙΚΑ	ΑΝΟΡΓΑΝΑ
ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ	μικρότερη τιμή θερμοχωρητικότητας σε σχέση με τα ανόργανα	υψηλότερη τιμή θερμοχωρητικότητας
ΣΥΝΤ.ΘΕΡΜ.ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας	μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με τα οργανικά
ΥΠΕΡΨΥΞΗ	καθόλου ή μικρό πρόβλημα υπέρψυξης	πρόβλημα υπέρψυξης
ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΤΗΞΗΣ	μικρότερη τιμή σε σχέση με τα ανόργανα	μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας τήξης
ΔΙΑΒΡΩΣΗ	δεν παρουσιάζουν διαβρωτική συμπεριφορά	διαβρωτική συμπεριφορά
ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ	δεν παρουσιάζουν διαχωρισμό	παρουσιάζουν διαχωρισμό φάσεων
ΑΝΑΦΛΕΞΗ	εύφλεκτο	μη εύφλεκτο
ΚΟΣΤΟΣ-ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ	πιο ακριβά από τα ανόργανα-εύκολα διαθέσιμα	φτηνά-εύκολα διαθέσιμα

Σχ. 2.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα οργανικών και ανόργανων ΥΑΦ [22]

Compound	Melting point (°C)	Heat of fusion (Kj/Kg)
KF.4H ₂ O	18,5	231
Mn(NO ₃).6H ₂ O	25,8	125,9
CaCl ₂ .6H ₂ O	29	190,8
LiNO ₃ .H ₂ O	30	296
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	32	251

Σχ. 2.2.2 Ανόργανες ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM [23]

2.2.1 Ένυδρα άλατα [22, 28, 29]

Τα ένυδρα άλατα είναι ανόργανα άλατα τα οποία περιέχουν μόρια νερού συνδυασμένα με μία καθορισμένη αναλογία, έτσι ώστε να αποτελούν εσωτερικό μέρος του κρυστάλλου, τα οποία είναι είτε δεσμευμένα στο κέντρο του μετάλλου είτε έχουν κρυσταλλωθεί με το μεταλλικό σύνολο.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των ένυδρων αλάτων είναι η μεγάλη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας που κυμαίνεται περίπου στα 250Kj/Kg, η καλή θερμική αγωγιμότητα με τιμή περίπου 0,6W/mK και η μη αναφλεξιμότητά τους. Επίσης, έχουν ένα σχετικά μεγάλο εύρος σημείων τήξης, από 0°C μέχρι 120°C. Τα ένυδρα άλατα τα οποία χρησιμοποιούνται για κτιριακές εφαρμογές έχουν χαμηλό κόστος υλικού αλλά υψηλό κόστος συσκευασίας και πώλησης σε σχέση με τις παραφίνες. Δεν πρέπει να παραληφθεί και η σχετικά υψηλή πυκνότητα των ένυδρων αλάτων, η οποία ενισχύει την ικανότητά τους για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας, και κυμαίνεται περίπου στην τιμή του 1500Kg/m³.

Τα ένυδρα άλατα συμβολίζονται με τον τύπο $X(Y)_n \cdot mH_2O$, όπου $X(Y)_n$ είναι ένα ανόργανο συστατικό. Η αρχή λειτουργίας των ένυδρων αλάτων βασίζεται στην αποβολή του κρυσταλλικού νερού όταν προσδίδεται θερμότητα στο ένυδρο άλας. Άρα αποθηκεύεται θερμότητα στο υλικό αλλαγής φάσης, η οποία αποβάλλεται με επανακρυστάλλωση του νερού του άλατος. Δηλαδή, όταν ένα ένυδρο άλας θερμαίνεται στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης, τότε συμβαίνει μία από τις παρακάτω αντιδράσεις:



Έτσι, στο σημείο τήξης οι κρύσταλλοι του ένυδρου άλατος σπάνε σε άνυδρο άλας και νερό, ή σε ένα άλας χαμηλότερης περιεκτικότητας σε νερό και σε νερό. Ένα πρόβλημα των ένυδρων αλάτων είναι η ασυνεχής τήξη η οποία προκαλείται από το γεγονός ότι το νερό που αποβάλλεται στην αποκρυστάλλωση δεν είναι αρκετό να διαλύσει όλη την στερεή φάση. Εξαιτίας της διαφοράς στην πυκνότητα

το άνυδρο άλας ή αυτό με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νερό, μένει στο κάτω μέρος του δοχείου. Η ασυνεχής τήξη κάνει την διαδικασία μη αναστρέψιμη, καθώς το άνυδρο άλας ή αυτό με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νερό δεν μπορεί να βρει το απαραίτητο νερό για επανακρυστάλλωση στο αρχικό ένυδρο άλας. Κατά αυτόν τον τρόπο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αποσύνθεσης του υλικού αλαγής φάσης ή αλλιώς του διαχωρισμού των φάσεων του. Η επανακρυστάλλωση σε περίπτωση ασυνεχούς τήξης μπορεί να γίνει είτε με χρήση μέσων ανάρτησης ή παραγόντων πύκνωσης, είτε με μηχανικά μέσα (δόνηση, ανακίνηση).

Τα περισσότερα ένυδρα άλατα έχουν φτωχές ιδιότητες πυρήνωσης, στοιχείο το οποίο οδηγεί στην εμφάνιση υπέρψυξης του υγρού πριν ξεκινήσει η αποκρυστάλλωση. Μία λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η προσθήκη πυρηνοποιητών ώστε να παρέχουν τους πυρήνες με τους οποίους θα ξεκινήσει η σύνθεση των κρυστάλλων. Μία άλλη περίπτωση είναι να διατηρηθούν μερικοί κρύσταλλοι, σε μία μικρή ψυχρή περιοχή, ώστε να λειτουργήσουν ως πυρήνες. Επίσης, ένα άλλο αρνητικό τους χαρακτηριστικό είναι η ασυμβατότητα με τα υλικά συσκευασίας, γεγονός που οδηγεί σε διαβρωτικά φαινόμενα στο δοχείο, καθώς τα ένυδρα άλατα είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά. Επιπλέον, πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι και η αφυδάτωση του ένυδρου άλατος, λόγω συνεχούς και μακράς χρήσης, κατά την οποία οι φάσεις διαχωρίζονται κυρίως λόγω της πίεσης των ατμών του νερού, φαινόμενο που αντιμετωπίζεται με τη χρήση αεροστεγών δοχείων αποθήκευσης.

Πίνακας 2.1 : Χαρακτηριστικά ένυδρων αλάτων				
Material	Chemical compound	Melting Point °C	Heat of fusion kJ/kg	Density Kg
Calcium chloride hexahydrate	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29-39	177	1634
Sodium carbonate decahydrate	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	32-36	247	1442
Disodium phosphate decahydrate	$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	36	265	1522
Sodium sulphate decahydrate	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	31-32	251	1534
Sodium thiosulphate	$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	48-49	209	1666

Σχ. 2.2.1.1 Χαρακτηριστικά ένυδρων αλάτων [21]

Μερικά ένυδρα άλατα όπως το θειικό δεκαένυδρο νάτριο (Άλας του Glauber) ή το χλωριούχο εξαυδρικό ασβέστιο έχουν κατάλληλες θερμοκρασίες αλλαγής φάσης για χρήση ως αποθηκευτικά μέσα θερμότητας σε μονάδες θέρμανσης χώρου. Έχουν το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης πυκνότητας ενέργειας. Μέχρι τώρα οι περισσότερες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στο θειικό ένυδρο νάτριο. Αυτό το άλας, όμως, θέτει προβλήματα εξαιτίας της ασυνεχούς τήξης και της εμφάνισης υπέρψυξης. Ο βόραξ και ένας ειδικός πηλός ως παράγοντες πύκνωσης αυτού του υλικού, έχουν εξεταστεί σε ένα μεγάλο αριθμό θερμικών κύκλων. Επίσης, γίνεται αρκετή μελέτη για την μικροενσωμάτωση, η οποία θα αναλυθεί στη συνέχεια, ώστε να βρεθεί λύση για το παραπάνω πρόβλημα. Το χλωριούχο εξαυδρικό ασβέστιο αντιμετωπίζεται ως κατάλληλο για χρήση σε παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης, αφού μπορεί να πραγματοποιήσει συνεχή τήξη με την προσθήκη συγκεκριμένων αλάτων, τα οποία δρουν και ως πυρηνοποιητές.

[29, 30]

Το **άλας του Glauber** ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), με τυπική κατά βάρος σύσταση 44% Na_2SO_4 και 56% H_2O είναι ένα από τα πλέον μελετημένα υλικά με θερμοκρασία τήξης 32,4° C και λανθάνουσα θερμότητα 254 kJ/kg. Αν και είναι

ένα από τα φθηνότερα υλικά που κυκλοφορούν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας, τα προβλήματα διαχωρισμού των φάσεων, ο σχηματισμός ιζήματος και το φαινόμενο supercooling περιορίζουν το εύρος των εφαρμογών.

Ερευνητές προτείνουν την προσθήκη επιπλέον ύδατος, για την αποφυγή δημιουργίας ιζήματος, όμως κάτι τέτοιο θα μείωνε την αποθηκευτική ικανότητα του υλικού. Αντ' αυτού έχει χρησιμοποιηθεί πληθώρα υλικών για την σταθεροποίηση του PCM, προσπαθώντας παράλληλα να αυξηθεί η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας. [31]

Material	Chemical compound	Melting Point (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Density (Kg)
Calcium chloride hexahydrate	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29-39	177	1634
Sodium carbonate decahydrate	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32-36	247	1442
Disodium phosphate decahydrate	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	36	265	1522
Sodium sulphate decahydrate	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	31-32	251	1534
Sodium thiosulphate	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	48-49	209	1666

Σχ. 2.2.1.2. Χαρακτηριστικά ένυδρων αλάτων [21]

2.2.2 Μεταλλικά άλατα

Τα μείγματα PCMs αποτελούν μία σύνθεση δύο ή περισσότερων συστατικών καθένα από τα οποία τήκεται και στερεοποιείται κατάλληλα. Κατά τη διάρκεια της κρυσταλλοποίησης τους σχηματίζουν ένα μίγμα κρυστάλλων από όλα τα συστατικά και ενεργούν ως ένα μόνο στοιχείο. Ένα μίγμα PCM είναι ένας συνδυασμός ενώσεων που αποτελείται είτε από οργανικά, είτε ανόργανα ή και τα δύο. Ένας σημαντικός αριθμός των μιγμάτων αυτών μπορεί να προσαρμοστεί σε σχεδόν οποιοδήποτε επιθυμητό σημείο τήξης για συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Η χρήση αυτών των υλικών στις εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης είναι πολύ πρόσφατη, για το λόγο αυτό δεν γνωρίζουμε πολλές πληροφορίες για τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες.

Βασικό πλεονέκτημα των μιγμάτων PCM είναι ότι εμφανίζουν την τάση να συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα και των δύο ομάδων, ενώ παράλληλα δεν έχουν την τάση να κάνουν το ίδιο με τα μειονεκτήματα. Το βασικό τους μειονέκτημα όμως είναι το κόστος παραγωγής, το οποίο είναι διπλάσιο έως τριπλάσιο απ' ότι των οργανικών και ανόργανων PCMs. [21]

2.3 Εύτηκτα [32,33]

Τα εύτηκτα μείγματα υλικών αλλαγής φάσης αποτελούν συνδυασμό ανόργανων, οργανικών ή ακόμα και ενός οργανικού με ένα ανόργανο υλικό. Θεωρούνται και αντιμετωπίζονται ως ένυδρα άλατα, ενώ παρέχουν στους σχεδιαστές πολλές δυνατότητες για να επιτύχουν το επιθυμητό σημείο τήξης. Το μειονέκτημα τους βέβαια είναι το αυξημένο κόστος παραγωγής σε σχέση με τα απλά ανόργανα ή οργανικά υλικά αλλαγής φάσης.

Στην βάση των βασικών κριτηρίων για την επιλογή των υλικών για θερμική αποθήκευση, όπως οι απαιτούμενες επιθυμητές θερμοδυναμικές, κινητικές και χημικές ιδιότητες, η συμπεριφορά σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της τήξης και της στερεοποίησης, η υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, η αναπαραγωγίμη συμπεριφορά τήξης και στερεοποίησης, η αρνητική τάση για υποβάθμιση ιδιοτήτων, η υπέρψυξη και η διαβρωτικότητα, η μη-τοξικότητα, η θερμική και χρωματική σταθερότητα, και μία προκαθορισμένη θερμοκρασία τήξης κοντά στο επιθυμητό εύρος για συγκεκριμένη εφαρμογή ψύξης, το εύτηκτο μείγμα του καπρικού και λαυρικού οξέος (Capric Acid and Lauric Acid Eutectic Mixture) φαίνεται να είναι ένα δυναμικό μείγμα για PCM, μεταξύ όλων των άλλων υποψηφιοτήτων. [34]

Μπορεί να εμποτιστεί ή να ενσωματωθεί άμεσα στα οικοδομικά υλικά σε κάποιο στάδιο της κατασκευής τους. Στην υγρή φάση, έχει επιφανειακή τάση της τάξεως του 0,02-0,30N/m. Αυτή είναι αρκετή ώστε να μπορεί να διατηρηθεί στο προβλεπόμενο υλικό κατασκευής. Παρουσιάζει μικρή αλλαγή όγκου κατά τη διάρκεια της τήξης και της στερεοποίησης, με μία διαστολή τήξης περίπου 100-200m³/kg.

Η ανάπτυξη του υλικού είναι σήμερα πρωταρχικής αξίας, ώστε να επιτύχει την συγκεκριμένη απαίτηση για να είναι ένα αποτελεσματικό μέσο αποθήκευσης. Εξαιτίας αυτού του στοιχείου, το κόστος μπορεί να θυσιαστεί στο ενδιαφέρον για μία καλύτερη συμπεριφορά του υλικού ως PCM. [35]

Compound	Melting temperature (° C)	Heat of fusion (kJ/kg)
66,6%CaCl ₂ .6H ₂ O+33,3%Mgcl ₂ .6H ₂ O	25	127
48%CaCl ₂ +4,3%NaCl+0,4%KCl+47,3%H ₂ O	26,8	188
47%Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53%Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	30	136
60%Na(CH ₃ COO).3H ₂ O+40%CO(NH ₂) ₂	30	200,5

Σχ. 2.3.1 Ανόργανες εύτηκτες ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM [23]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ιδιότητες

3.1 Ιδιότητες [21, 23, 38]

Ένα ιδανικό PCM χαρακτηρίζεται απ' τις παρακάτω ιδιότητες:

- **Υψηλή θερμοχωρητικότητα**

Η υψηλή τιμή της θερμοχωρητικότητας σε συνδυασμό με την υψηλή τιμή της ενθαλπίας τήξης δίνει στο ΥΑΦ μεγάλη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας.

- **Λανθάνουσα θερμότητα**

Η μεγάλη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας ενός ΥΑΦ αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Όμως, αυτό πρέπει να σταθμίζεται και σε σχέση με άλλους παράγοντες και ιδιότητες. Τα άλατα με υψηλό ποσοστό υγρασίας, όπως τα ένυδρα άλατα λόγω της μεγάλης περιεκτικότητάς τους σε νερό έχουν μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας. Ωστόσο, αυτά συνήθως έχουν ανάρμοστη ή ημι-ανάρμοστη συμπεριφορά κατά την τήξη με αποτέλεσμα να απαιτείται σημαντική τροποποίηση του ΥΑΦ. Για παράδειγμα, τέτοιου είδους άλατα χάνουν την ικανότητά τους να αποθηκεύσουν θερμότητα, όταν χρησιμοποιούνται πτητικά μέσα, τροποποιητές κρυστάλλωσης ή επιστρώσεις κρυστάλλου. Τα πρόσθετα αυτά παρεμβαίνουν επίσης στη μεταφορά θερμικής ενέργειας εμποδίζοντας τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της τήξης.

- **Υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας**

Τα ΥΑΦ μειονεκτούν παρουσιάζοντας μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας κάτι που όμως αντιμετωπίζεται αυξάνοντας την επιφάνεια μετάδοσης της θερμότητας.

- **Διαχωρισμός φάσεων**

Η μεγάλη θερμοαποθηκευτική ικανότητα των ένυδρων αλάτων συνήθως μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης του υλικού. Κύρια αίτια εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός άνυδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα κυρίως στα ένυδρα άλατα λόγω του ότι αυτά τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος, δημιουργώντας μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε εξασθένηση των ιδιοτήτων.

- **Δοχεία αποθήκευσης**

Η χρησιμότητα των δοχείων αποθήκευσης των ΥΑΦ δεν περιορίζεται μόνο στο να συγκρατούν το τηγμένο μέσο αποθήκευσης θερμότητας αλλά λειτουργούν και ως φράγμα ατμών και ως μια δομή στήριξης του ΥΑΦ στην υγρή και τη στερεή κατάσταση. Το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται τα δοχεία αποθήκευσης θα πρέπει να εμποδίζει την απώλεια ή την ανάκτηση υγρασίας από τα ένυδρα άλατα και να παρέχει ένα φράγμα κατά των ατμών από τα οργανικά ΥΑΦ. Όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση του ατμού τόσο μεγαλύτερες είναι οι απαιτήσεις στις οποίες πρέπει να ανταποκριθούν τα δοχεία αποθήκευσης. Θα πρέπει ακόμα να μπορούν να αντισταθμίζουν τις δυνάμεις διαστολής και συστολής που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης.

- **Μικρή αλλαγή όγκου κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης**

Τα ΥΑΦ με μικρότερες μεταβολές όγκου απαιτούν λιγότερο αυστηρές ιδιότητες των δοχείων αποθήκευσης.

- **Πυκνότητα**

Η μεγάλη τιμή της πυκνότητας είναι σημαντική αφού περισσότερη θερμότητα θα μπορεί να αποθηκευτεί σε δεδομένο όγκο. Ωστόσο, η αύξηση της θερμότητας συνοδεύεται συχνά από μείωση της τιμής της

λανθάνουσας θερμότητας. Για παράδειγμα, όταν το ατομικό βάρος ενός κατιόντος ένυδρου άλατος αυξάνει, η πυκνότητα αυξάνεται αλλά ελαττώνεται η λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα βάρους. Επίσης, όσο το ποσοστό υγρασίας του άλατος αυξάνει, η τιμή της πυκνότητας πέφτει ενώ η λανθάνουσα θερμότητα αυξάνεται λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε νερό.

- **Θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση**

Τα ΥΑΦ χαρακτηρίζονται από σταθερότητα όσο αφορά τους θερμικούς κύκλους από υγρή σε στέρεη φάση. Για να είμαστε σίγουροι ότι το υλικό δεν αλλάζει τις ιδιότητές του πρέπει να γίνονται μετρήσεις για πάνω από 1000 επαναλαμβανόμενους κύκλους.

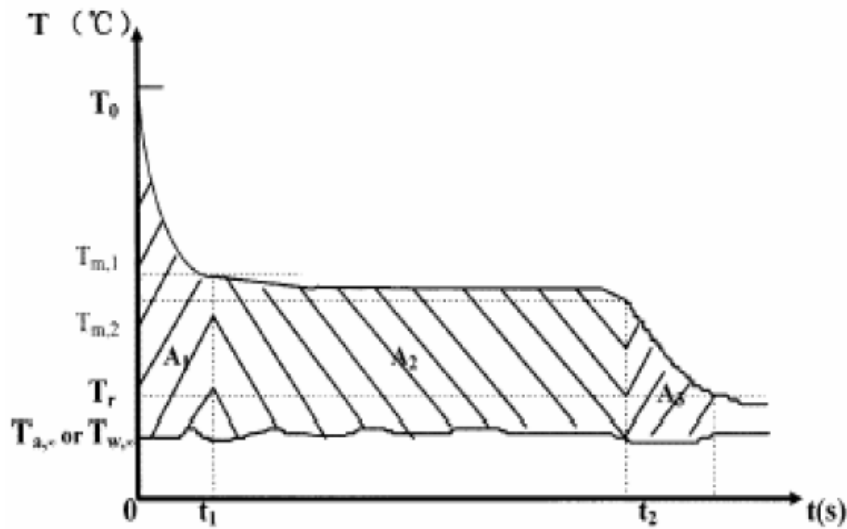
- **Ιδανική θερμοκρασία αλλαγής φάσης**

Σε όλες σχεδόν τις θερμοκρασιακές περιοχές υπάρχουν εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας. Η κάθε εφαρμογή απαιτεί και διαφορετική θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ γιατί είναι βασικό να συμφωνεί με τη εκάστοτε θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης ή ψύξης. Για παράδειγμα στον κτιριακό τομέα που μας ενδιαφέρει τα ΥΑΦ που χρησιμοποιούνται πρέπει να έχουν θερμοκρασία τήξης περίπου στη θερμοκρασία του δωματίου (20° C).

- **Μη εμφάνιση υπέρψυξης**

Το φαινόμενο της υπέρψυξης (supercooling) αποτελεί μια ενοχλητική πλευρά στην ανάπτυξη των ΥΑΦ και ειδικότερα των ένυδρων αλάτων. Εάν το σημείο τήξης βρίσκεται ψηλότερα απ' το σημείο στερεοποίησης τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της υπέρψυξης ή αλλιώς υπόψυξης. Τα ΥΑΦ που χρησιμοποιούμε θα πρέπει να περιορίζουν το φαινόμενο αυτό ή ακόμα καλύτερα να μην εμφανίζεται καθόλου. Ευτυχώς, όταν είναι δυνατόν να εισαχθούν πρόσθετα που θα βοηθήσουν το σχηματισμό των πυρήνων, το πρόβλημα λύνεται. Συνήθως, ένα ΥΑΦ επιλέγεται με

θερμοκρασία τήξης 5 έως 10° C μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος. Αυτό ελαχιστοποιεί τις απώλειες θερμότητας και επιπλέον παρέχει αρκετή διαφορά θερμοκρασίας έτσι ώστε να διατηρείται η καλή μετάδοση θερμότητας. Το φαινόμενο της υπέρψυξης σε περισσότερους από μερικούς βαθμούς θα εμποδίζει τη σωστή απαγωγή θερμότητας από το δοχείο αποθήκευσης. Ακόμα κι αν το φαινόμενο αυτό δεν υπάρχει, μια εκ φύσεως ανάπτυξη κρυστάλλων με αργό ρυθμό μπορεί να περιορίσει το ποσοστό της αξιοποίησης της αποθηκευμένης θερμότητας.



Σχ. 3.1.1 Τυπική καμπύλη ψύξης υλικού χωρίς υπέρψυξη [39]

- **Χημική σταθερότητα και συμβατότητα**

Η μακροπρόθεσμη σταθερότητα αποτελεί ένα ακόμη πρόβλημα. Η οξειδωση, η θερμική διάσπαση, η υδρόλυση ή άλλες αντιδράσεις μπορούν να αποκλείσουν ένα κατά τα άλλα ΥΑΦ. Τα υλικά αποθήκευσης θα πρέπει επίσης να είναι αδρανή και μην αλληλεπιδρούν με τα υλικά κατασκευής των δοχείων μέσα στα οποία τοποθετούνται τα ΥΑΦ. Ενώ, συνήθως, υπάρχουν ικανοποιητικά υλικά κατασκευής,

κάποια ΥΑΦ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξαιτίας του υψηλού κόστους των συμβατών δοχείων αποθήκευσής τους. [36]

- **Μη διαβρωτικό**

Το ΥΑΦ που χρησιμοποιούμε πρέπει να είναι μη διαβρωτικό ώστε να μην καταστρέφει το υλικό αποθήκευσης ή το υλικό με το οποίο έρχεται σε άμεση επαφή.

- **Μη τοξικό**

Το ΥΑΦ πρέπει να είναι φιλικό προς το περιβάλλον.

- **Μη εύφλεκτο**

Το ΥΑΦ που χρησιμοποιούμε δεν πρέπει να είναι εύφλεκτο

- **Χαμηλή τιμή και διαθεσιμότητα**

Τα υλικά πρέπει να είναι οικονομικά αποτελεσματικά. Οι χημικές ουσίες ή οι πρώτες ύλες τους πρέπει να είναι άφθονες και διαθέσιμες. Η χαμηλή τιμή του ΥΑΦ αποτελεί κύριο στόχο κατά την επιλογή των μέσων αποθήκευσης αφού πολλές εφαρμογές των ΥΑΦ μπορεί να κριθούν ακατάλληλες λόγω του υψηλού κόστους. [37]

3.2 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων

Όπως προαναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο κριτήριο για την επιλογή ενός υλικού αλλαγής φάσης είναι κυρίως κάποιες ιδιότητες τους. Η πυκνότητα αποθήκευσης και οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης είναι πολύ σημαντικές παράμετροι, καθώς βάση αυτών καθορίζεται η ικανότητα αποθήκευσης, το μέγεθος και το εύρος λειτουργίας του συστήματος λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας. Αν οι τιμές αυτών των παραμέτρων παρουσιάζουν απόκλιση από τις πραγματικές, η αποθηκευτική ικανότητα θα είναι μικρότερη από την αναμενόμενη, με αποτέλεσμα το σύστημα να μην ικανοποιεί τις προδιαγραφές του.



Σχ. 3.2.1 Μηχάνημα θερμοστατικής ανάλυσης

Η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που μπορούμε να αποθηκεύσουμε εξαρτάται από την ενθαλπική διακύμανση στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας. Πρέπει, συνεπώς, να είναι γνωστή και η ενθαλπική συνάρτηση ή η θερμοχωρητικότητα του Υ.Α.Φ., ώστε να είναι ακριβή τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου. Προκειμένου να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, πρέπει να ληφθεί υπ' όψη το θερμοκρασιακό εύρος, βάση του οποίου λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. [40]

Οι τέσσερις βασικές μέθοδοι που έχουν επικρατήσει και μας δίνουν πληροφορίες κυρίως για τη θερμότητα τήξης, την ειδική θερμότητα και του σημείου τήξης στο πεδίο της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι οι παρακάτω :

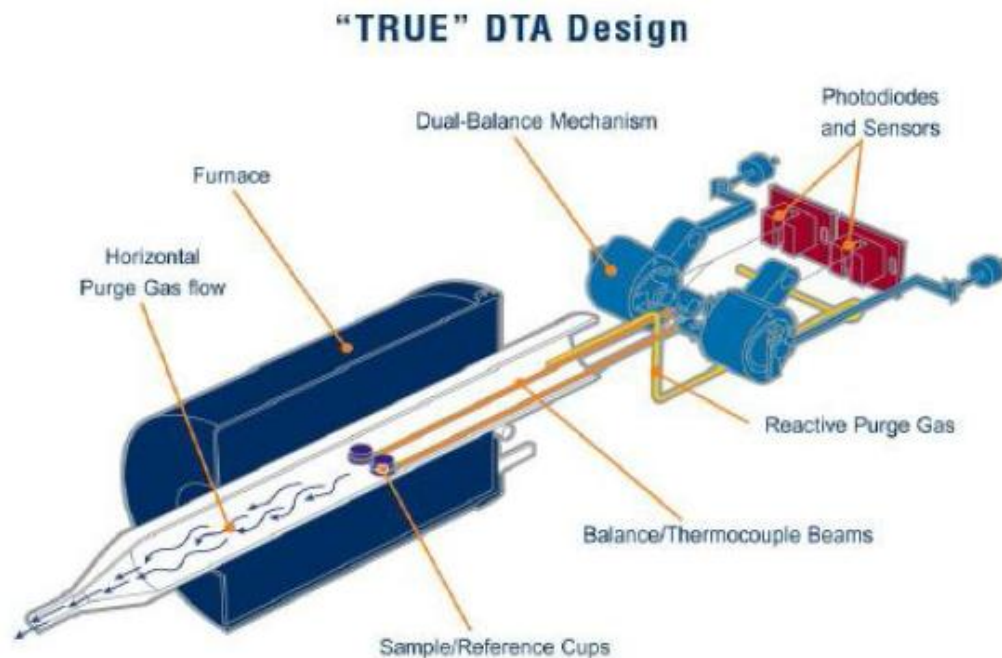
- Θερμοσταθμική Ανάλυση (thermo gravimetric analysis -TGA)
- Οι μέθοδοι διαφορικής θερμικής ανάλυσης (differential thermal analysis-DTA)
- Οι μέθοδοι διαφορικής θερμιδομετρικής σάρωσης (differential scanning calorimetry-DSC).
- T History

3.2.1 TGA

Η συγκεκριμένη τεχνική έχει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογής. Μετράει την αλλαγή της μάζας του δείγματος συναρτήσει της θερμοκρασίας. Μία συνηθισμένη διάταξη περιλαμβάνει έναν φούρνο (ζεσταίνει το δείγμα σε υψηλή θερμοκρασία) , μία χοάνη όπου τοποθετείται το δείγμα, έναν ευαίσθητο αναλυτικό ζυγό, έναν μικροεπεξεργαστή καθώς και ένα σύστημα καθαρισμού με διαβίβαση αερίου που διασφαλίζει αδρανή ατμόσφαιρα. [41]

3.2.2 DTA [51]

Η διαφορική θερμική ανάλυση ορίζεται επισήμως ως μια τεχνική καταγραφής των θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ μιας ουσίας και ενός υλικού αναφοράς συναρτήσει είτε του χρόνου είτε της θερμοκρασίας, ενόσω τα δύο μείγματα υπόκεινται σε πανομοιότυπο θερμοκρασιακό καθεστώς, εντός περιβάλλοντος ελεγχόμενης θέρμανσης ή ψύξης. Με πιο απλά λόγια, η μέθοδος DTA περιλαμβάνει την θέρμανση ή την ψύξη ενός δείγματος και ενός αδρανούς υλικού αναφοράς κάτω από όμοιες συνθήκες, καταγράφοντας ταυτόχρονα τις θερμοκρασιακές διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ τους. Οι διαφορές αυτές με την σειρά τους αναπαριστώνται διαγραμματικά ως προς τον χρόνο ή την θερμοκρασία. Η ύπαρξη του αδρανούς δείγματος συμβάλλει στον εντοπισμό των αλλαγών του μελετώμενου δείγματος που οφείλονται στην απορρόφηση ή έκλυση θερμότητας.

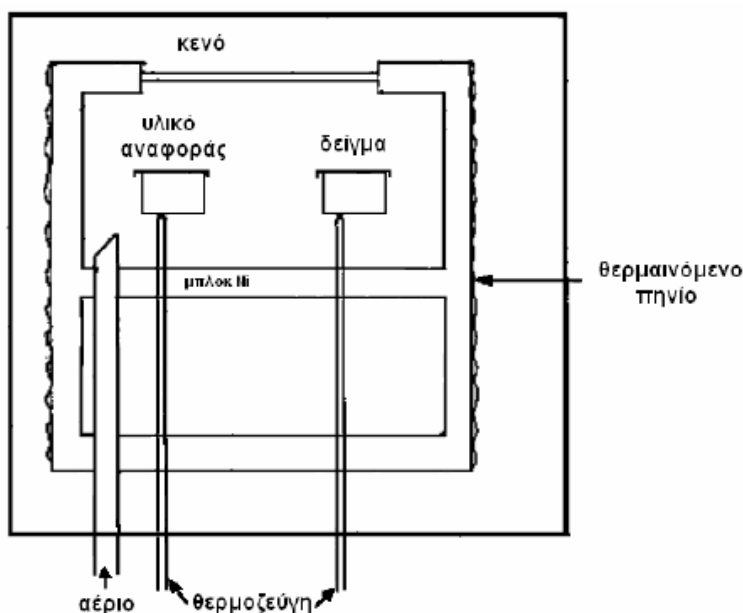


Σχ. 3.2.2.1 Τυπική διάταξη της μεθόδου DTA [42]

Θερμοκρασιακές διαφορές προκύπτουν όχι μόνο μεταξύ του δείγματος-αδρανούς υλικού αναφοράς αλλά και μεταξύ δύο αδρανών δειγμάτων, όταν η απόκρισή τους στην προσφερόμενη θερμότητα είναι διαφορετική. Αυτός είναι και ο λόγος που καθιστά την DTA ικανή να εφαρμοστεί στη μελέτη θερμικών ιδιοτήτων και αλλαγών φάσης, που χαρακτηρίζονται από ενθαλπικές μεταβολές. Στις περιπτώσεις αυτές, η βασική καμπύλη του διαγράμματος θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ασυνέχειες στις μεταβατικές θερμοκρασίες ενώ η κλίση της σε οποιοδήποτε σημείο θα πρέπει να εξαρτάται από την κατάσταση της μικροδομής του δείγματος στην αντίστοιχη θερμοκρασία.

Σε γενικές γραμμές, η καμπύλη DTA μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποτύπωμα για λόγους ταυτοποίησης υλικών, για παράδειγμα κατά την μελέτη του πυλού, όπου η δομική ομοιότητα των διαφορετικών ειδών του μπορεί να προκαλέσει δυσκολίες στην ερμηνεία των πειραμάτων διάθλασης.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτών των διαγραμμάτων είναι ότι η περιοχή που εκτείνεται κάτω από το ακρότατο της καμπύλης είναι ενδεικτική της εωθαλπικής μεταβολής και δεν επηρεάζεται από τη θερμοχωρητικότητα του δείγματος.



Σχ. 3.2.2.2 Σχηματική αναπαράσταση κελιού DTA [51]

Η γενική διάταξη διεξαγωγής της διαφορικής θερμικής ανάλυσης αποτελείται από τα εξής μέρη (σχήμα):

- 1) Συσκευή συγκράτησης δείγματος κατάλληλα συνδεδεμένη με θερμοζεύγη, δοχεία μειγμάτων και κεραμική ή μεταλλική κατασκευή.
- 2) Εστία
- 3) Συσκευή προγραμματισμού θερμοκρασίας
- 4) Καταγραφικό σύστημα

Η επιλογή της κατάλληλης εστίας βασίζεται στην δυνατότητά της να εξασφαλίζει εσωτερικά μία εκτενή και ομοιόμορφη ζώνη θερμότητας ενώ σημαντική είναι η άμεση απόκριση της στις εντολές του θερμοκρασιακού προγραμματιστή. Ο τελευταίος, με τη σειρά του, είναι απαραίτητος στη μετρητική διαδικασία, καθώς διατηρεί σταθερούς τους ρυθμούς θέρμανσης.

Ως προς το καταγραφικό σύστημα, αυτό θα πρέπει να εμφανίζει μικρή αδράνεια για να αναπαράγει αξιόπιστα τις αποκλίσεις της πειραματικής διάταξης.

Η συσκευή συγκράτησης δείγματος αποτελείται από δύο θερμοζεύγη, ένα για το μελετώμενο δείγμα και ένα για το δείγμα αναφοράς, και περιβάλλεται από μια κατασκευή (block) που εξασφαλίζει τη ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας. Το δείγμα περιέχεται σε μικρό σκεύος, κοίλο στην βάση του, σχεδιασμός που ενισχύει την ορθότερη εφαρμογή του πάνω στα θερμοστοιχεία. Το υλικό κατασκευής του σκεύους μπορεί να είναι πυρέξ, χαλαζίας, νικέλιο ή λευκόχρυσος, ανάλογα με την θερμοκρασία και την φύση των διεξαγόμενων μετρήσεων.

Τα θερμοζεύγη δεν τοποθετούνται σε άμεση επαφή με τα δείγματα προ αποφυγής νοθεύσεων και άλλων εκφυλισμών παρόλο που κάτι τέτοιο θα αύξανε αρκετά την ευαισθησία της μέτρησης. Οι κατασκευές που περιστοιχίζουν τις συσκευές συγκράτησης μειγμάτων, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι μεταλλικές ή κεραμικές. Οι μεταλλικές είναι λιγότερο επιρρεπείς στις αποκλίσεις σε σχέση με τις κεραμικές που είναι πορώδεις.

Παρόλα αυτά , η υψηλή θερμική αγωγιμότητα τους οδηγεί σε μικρότερα DTA ακρότατα , πράγμα που σημαίνει μικρότερες μεταβολές στην ενθαλπία. Ολόκληρη η διάταξη συγκράτησης του δείγματος είναι ηλεκτρικά μονωμένη από τις καλωδιώσεις της εστίας με την βοήθεια γειωμένου καλύμματος, φτιαγμένου συνήθως από κεραμικό υλικό επικαλυμμένο με λευκόχρυσο. Το ίδιο κάλυμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε να απομονώνει την περιοχή του δείγματος μέσα σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα ή κενό.

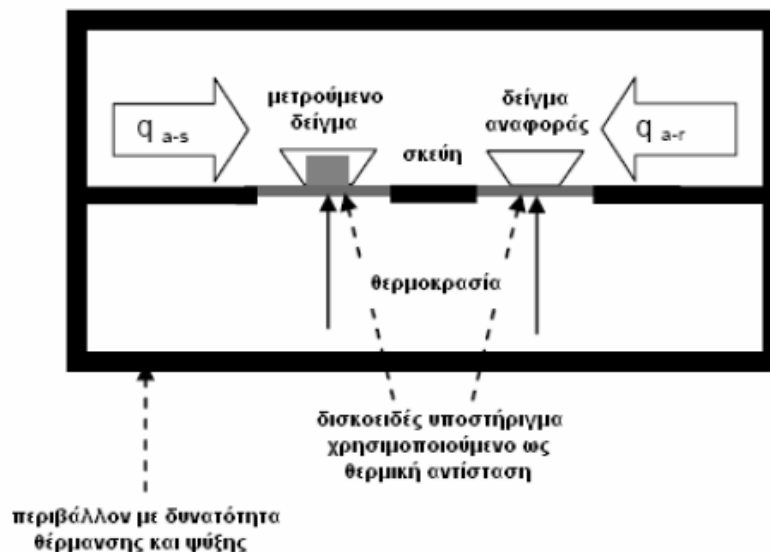
Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την πειραματική διαδικασία της DTA, παρουσιάζονται παρακάτω:

- 1) Τα περισσότερα πειράματα πραγματοποιούνται σε δείγματα υλικών σε σκόνη και ως εκ τούτου τα αποτελέσματά τους μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικά για μεγαλύτερα δείγματα.
- 2) Η συσκευασία στη οποία περιέχονται τα δείγματα, παίζει σημαντικό ρόλο στις χημικές αντιδράσεις διάσπασης και μπορεί να προκαλέσει υψηλές αποκλίσεις μεταξύ φαινομενικά ίδιων δειγμάτων.
- 3) Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας μπορεί να αυξηθεί τόσο, ώστε να προκαλέσει κορεσμό της αποκριτικής ικανότητας της μετρητικής διάταξης. Ενδείκνυται η αραίωση του μελετώμενου δείγματος με κάποιο αδρανές υλικό.
- 4) Για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών αλλαγής φάσης , θα πρέπει η ακραία θερμοκρασία που θα εμφανιστεί κατά τη μετρητική διαδικασία, να είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του δείγματος.
- 5) Το σχήμα του ακρότατου που προκύπτει τελικά , εξαρτάται από το βάρος του δείγματος και το ρυθμό θέρμανσης που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία. Μάλιστα η μείωση του ενός αντιστοιχεί, ως ένα βαθμό, με τη μείωση του άλλου οδηγώντας και στις δύο περιπτώσεις , σε πιο απότομα ακρότατα βελτιωμένης ανάλυσης. Η επίδραση του ρυθμού θέρμανσης στο σχήμα και τη διάταξη του ακρότατου μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς όφελος της μελέτης των χημικών διασπάσεων, όμως για την ανάλυση της κινηματικής σημαντικό ρόλο παίζει η

ελαχιστοποίηση των θερμικών μεταβολών, μειώνοντας είτε το μέγεθος των δειγμάτων είτε τον ρυθμό θέρμανσης τους.

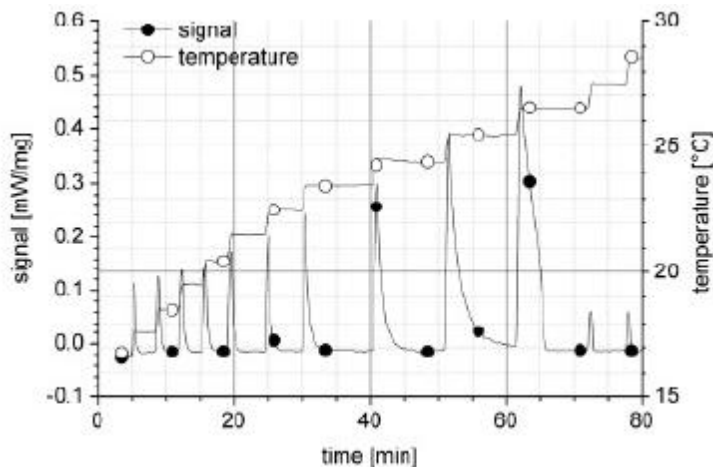
3.2.3 DSC [50]

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος μέτρησης των ιδιοτήτων είναι η DSC. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανίχνευση των διαφορών στη θερμική απόκριση ενός δείγματος αναφοράς και ενός δείγματος PCM προς μέτρηση, όταν ταυτόχρονα εκτίθενται σε ένα πρόγραμμα μέτρησης της θερμοκρασίας. Ο πιο γνωστός τρόπος λειτουργίας αυτής της μεθόδου είναι μία αναβαθμίδα με σταθερό ρυθμό θερμότητας. Τυπικές τιμές ρυθμού θέρμανσης ή ψύξης για τη μέτρηση της ειδικής θερμότητας είναι 2 έως 10K/min. Το σήμα που λαμβάνεται είναι ανάλογο με τη διαφορά θερμοκρασίας της χοάνης αναφοράς που είναι άδεια με τη χοάνη που περιέχει το δείγμα προς μέτρηση. Η ειδική θερμότητα του δείγματος ως συνάρτηση της θερμοκρασίας υπολογίζεται με τη βοήθεια ενός υλικού με γνωστά χαρακτηριστικά. Από αυτήν η ικανότητα αποθήκευσης μπορεί να προκύψει με ολοκλήρωση.



Σχ. 3.2.3.1 Σχηματική αναπαράσταση για τη μέθοδο DSC [50]

Πιο αναλυτικά, γίνεται εφαρμογή θερμοκρασιακού προγράμματος σταθερού ρυθμού ψύξης ή θέρμανσης για τον υπολογισμό της ειδικής θερμοχωρητικότητας C_p . Η εφαρμογή της μεθόδου DSC σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης δεν ενδείκνυται για την μέτρηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας των PCM, γιατί κατά την αλλαγή φάσης, το δείγμα δεν βρίσκεται σε θερμική ισορροπία και έχουμε σημαντική κατανομή της θερμοκρασίας, μέσα σε αυτό. Για αυτό τον λόγο οδηγούμαστε σε εσφαλμένα αποτελέσματα, των οποίων η απόκλιση εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος, από τον ρυθμό θέρμανσης, από το μέγεθος της θερμοχωρητικότητας και από την θερμική αγωγιμότητα. Επειδή οι θερμοφυσικές ιδιότητες των μετρούμενων υλικών συνήθως δεν είναι γνωστές με την επιθυμητή ακρίβεια, η απόκλιση αυτή δεν μπορεί μαθηματικώς να ελαχιστοποιηθεί.



Σχ. 3.2.3.2 Τυπικό διάγραμμα ροής θερμότητας και θερμοκρασίας σε μέτρηση DSC σε ισόθερμα βήματα [50]

Στην περίπτωση αυτή το δείγμα θερμαίνεται βηματικά ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το δείγμα ακολουθεί τα βήματα με κάποια χρονική υστέρηση και έτσι παράγεται το σήμα εξόδου. Όταν θα φτάσει το δείγμα σε θερμική ισορροπία, το σήμα μηδενίζεται και ακολουθεί το επόμενο ισόθερμο βήμα. Το εμβαδόν κάτω από την

καμπύλη του σήματος είναι ανάλογο της, εκ του δείγματος, απορροφούμενης θερμότητας, στο συγκεκριμένο ισόθερμο βήμα.

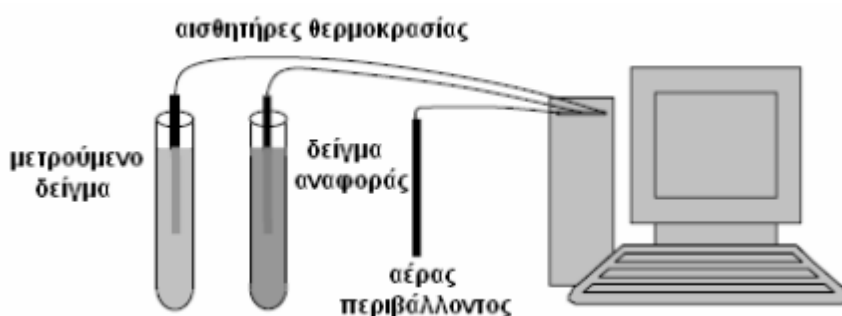
Η εφαρμογή της DSC ισόθερμων βημάτων είναι πιο χρονοβόρα και πιο περίπλοκη κατά την επεξεργασία απ' ό,τι η δυναμική μέτρηση θερμοχωρητικότητας. Το μεγάλο πλεονέκτημα, σε σύγκριση με την δυναμική μέτρηση, είναι ότι η απόκλιση στην μέτρηση της θερμοκρασίας του δείγματος είναι επ'ακριβώς γνωστή αφού σχετίζεται με το μέγεθος του ισόθερμου βήματος. Έτσι με ελάττωση του μεγέθους του βήματος επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια.



Σχ. 3.2.3.3 Μορφή εμπορικού θερμιδόμετρου DSC από την ZAE Bayern [50]

3.2.4 T History [43 – 49]

Οι μέθοδοι που περιγράφηκαν παραπάνω απαιτούν δείγμα υλικού, γεγονός που επιβάλλει την πολύ προσεκτική δειγματοληψία, ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι αντιπροσωπευτικά των ιδιοτήτων του Υ.Α.Φ.. Στην περίπτωση δε που το υλικό έχει προκύψει ως σύνθεση άλλων, είναι τεχνικές πλήρως εξαρτώμενες από το δείγμα που λαμβάνουμε. Η λεγόμενη T-history, είναι μία εναλλακτική μέθοδος, η οποία είναι ιδανική για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων των Υ.Α.Φ., τα οποία παρουσιάζουν ετερογένεια.



Σχ. 3.2.4.1 Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης μεθόδου T-History [22]

Η συγκεκριμένη μέθοδος προτάθηκε από τον Zhang et al. το 1999 ως μία απλούστερη μέθοδος μέτρησης των θερμικών ιδιοτήτων των ΥΑΦ σε σχέση με τις μεθόδους DSC και DTA. Πρόκειται για μία τεχνική εύκολη, γρήγορη, κατά την οποία το υλικό τοποθετείται σε σφραγισμένο σωλήνα και επαναλαμβάνονται οι κύκλοι τήξης-πήξης, χωρίς να απαιτείται δειγματοληψία. Η αρχική T-history μέθοδος που προτάθηκε παρουσιάζει ατέλειες σε ότι αφορά τις θερμοφυσικές ιδιότητες, εξαιτίας ορισμένων μη έγκυρων φυσικών υποθέσεων που λαμβάνει υπ' όψη. Η έρευνα λοιπόν σήμερα οδηγείται στην κατεύθυνση των βελτιώσεων της T history μεθόδου.

Στη μέθοδο, δύο δοκιμαστικοί σωλήνες διατηρούνται σε μία θερμοκρασία υψηλότερη από το σημείο ψύξης σε ένα σταθερής θερμοκρασίας λουτρό. Ο ένας

σωλήνας είναι γεμάτος με το PCM του οποίου μετρούνται οι ιδιότητες και ο άλλος με ένα υλικό αναφοράς (συνήθως καθαρό νερό) χωρίς PCM. Κατόπιν, οι δύο δοκιμαστικοί σωλήνες απομακρύνονται γρήγορα από το λουτρό και μετρώνται οι θερμοκρασίες και των δύο δοκιμαστικών σωλήνων και του περιβάλλοντος ταυτόχρονα.

Εάν ο αριθμός Biot είναι μικρότερος του 0,1 τότε η θερμοκρασιακή κατανομή του δείγματος μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη, οπότε μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος των ομοιόμορφων ιδιοτήτων (lumped capacitance) [43-46]

$$Bi = \frac{h \times Ls}{ks} \approx \frac{h \times R}{2ks}$$

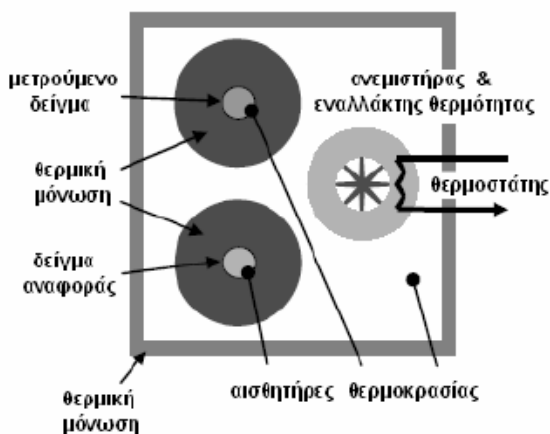
R η ακτίνα της κυλινδρικής ράβδου

ks η θερμική αγωγιμότητα του PCM

h ο συντελεστής φυσικής συναγωγής μεταξύ εξωτερικής επιφάνειας και αέρα

Ls το χαρακτηριστικό μήκος $Ls = \frac{V}{A}$

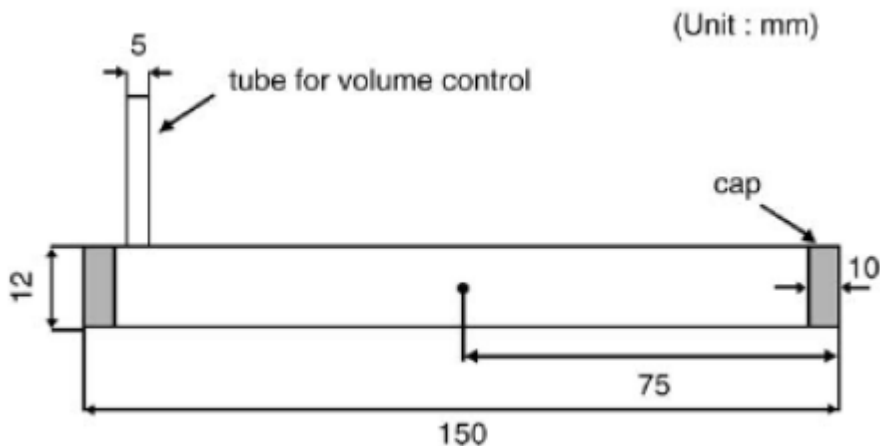
Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής σε σχέση για παράδειγμα με την μέθοδο DSC είναι αρχικά η απλότητά της αλλά και το γεγονός ότι μπορούμε να έχουμε δείγμα μεγάλου μεγέθους. Το μεγάλο μέγεθος δείγματος της επιτρέπει να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα για ετερογενή μείγματα τα οποία δεν θα μπορούσαν να έχουν αντιπροσωπευτική σύσταση σε πολύ μικρό μέγεθος. Επιπλέον λόγω μεγάλου δείγματος μπορούμε να έχουμε πιο αντιπροσωπευτική τιμή του βαθμού υπόψυξης.



Σχ. 3.2.4.2 Διάταξη T-history σχεδιασμένη για πειραματικές μετρήσεις θέρμανσης και ψύξης σε εύρος -5 ως 80°C

Στη μελέτη που έγινε το 2005 από της Jong Hyeon et al. για την ακριβή μέτρηση λανθάνουσας θερμότητας της ΥΑΦ με χαμηλή θερμοκρασία τήξης(χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος), παρατηρήθηκαν δύο σημαντικά προβλήματα για τα οποία δόθηκαν και προτάσεις για λύση. Το πρώτο πρόβλημα ήταν ότι η μέθοδος T History χρησιμοποιεί το σημείο υπέρψυξης ως το σημείο που τελειώνει η αλλαγή φάσης. Κάτι τέτοιο της είναι λάθος και έτσι στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε άλλο σημείο στην καμπύλη(inflexion point), το οποίο φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα, εκεί όπου η πρώτη παράγωγος της καμπύλης παρουσιάζει ελάχιστο.

Ακόμη ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν ο κάθετος σωλήνας που χρησιμοποιείται στη μέθοδο αυτή, ο οποίος έπρεπε να τοποθετηθεί οριζόντια, διότι όταν ο σωλήνας ήταν κάθετος το κάτω μέρος του πάγου έλιωνε πιο γρήγορα λόγω φυσικής συναγωγής.

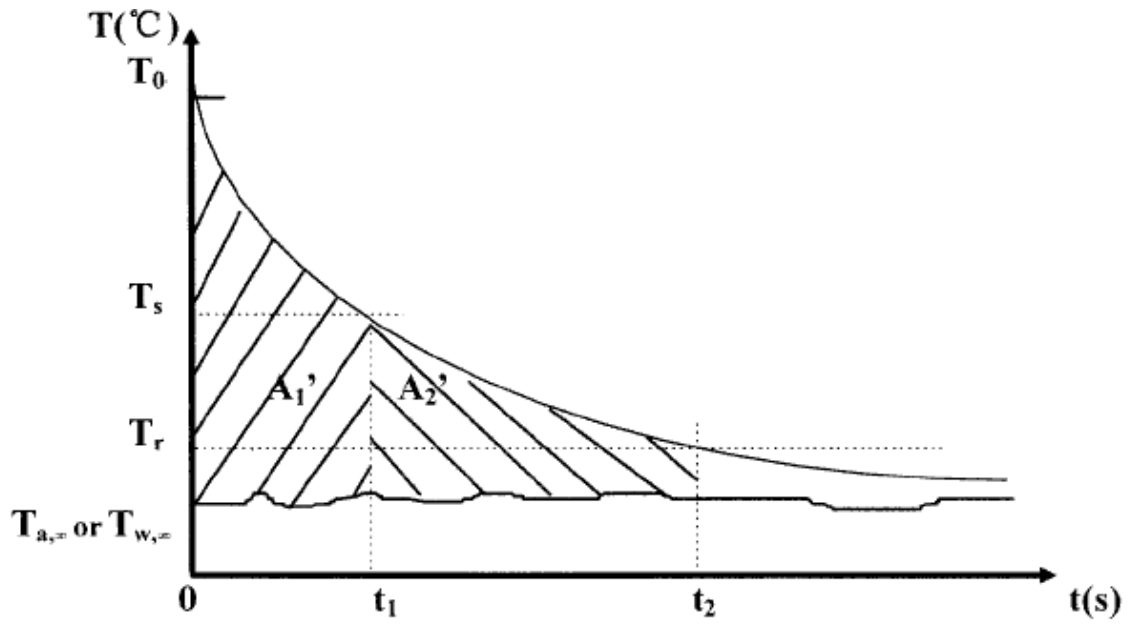


Σχ. 3.2.4.3 Οριζόντια τοποθέτηση της κυλινδρικής ράβδους με δοχείο διαστολής [48]

Συμπερασματικά, αποδείχτηκε ότι δεν υπάρχει σημαντικό σφάλμα στον καθορισμό της θερμότητας στερεοποίησης στην περίπτωση που η απόκλιση από το κέντρο είναι έως 3 mm. Επίσης επαληθεύτηκε ότι δεν υπάρχει σφάλμα μέτρησης στην περίπτωση κάθετης μετατόπισης του θερμοστοιχείου.

Λόγω της ακτινικής κατανομής της θερμοκρασίας έχει προταθεί η κυλινδρική ράβδος να τοποθετηθεί οριζοντίως. Κατά την αρχική παραλλαγή της μεθόδου με την κάθετη τοποθέτηση παρατηρήθηκε τήξη και στερεοποίηση από την εξωτερική επιφάνεια προς τον εσωτερικό όγκο με αποτέλεσμα, την διαφορετική τήξη ή στερεοποίηση του επάνω τμήματος με το κάτω και την εσωτερική κίνηση του στερεού τμήματος.

Για την μείωση της αρνητικής αυτής παραμέτρου προτείνεται η χρήση μίας οριζόντια τοποθετημένης κυλινδρικής ράβδου με εφαρμογή ενός καθέτου τμήματος που θα επιτρέπει την διαστολή-συστολή του υλικού. Στην ουσία λοιπόν η μέθοδος βελτιώθηκε μέσα από τη συγκεκριμένη μελέτη και για τα συγκεκριμένα δεδομένα, δίνοντας σωστά και ακριβή αποτελέσματα.



Σχ. 3.2.4.4 Τυπική καμπύλη T-history νερού [47]

3.2.5 Thermal delay method

Βελτιώσεις προτείνονται στη γνωστή μέθοδο T-History, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τη θερμική μέτρηση ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης.

Οι βελτιώσεις μας αναφέρονται στην πειραματική ρύθμιση, στον τρόπο της επεξεργασίας μέτρησης, καθώς επίσης και στο σχήμα ειδών και παρουσίασης των τελικών αποτελεσμάτων. Η προτεινόμενη ρύθμιση έχει ένα ελεγχόμενο εσωτερικό περιβάλλον και είναι πλήρως αυτόματη, χωρίς την ανάγκη για τη συμμετοχή προσωπικού, ακόμη και για τα επαναλαμβανόμενα σύνολα μετρήσεων του ίδιου ή διαφορετικού PCM ταυτόχρονα. Ο προτεινόμενος τρόπος της επεξεργασίας μέτρησης είναι βασισμένος στη χρήση της θερμικής καθυστέρησης (δηλ. Διαφορά θερμοκρασίας) μεταξύ του PCM και ενός ρευστού αναφοράς σε οποιοδήποτε καθορισμένο χρόνο και όχι στη χρήση της χρονικής καθυστέρησης τους σε οποιαδήποτε διευκρινισμένη θερμοκρασία. Αυτή η θεμελιώδης αλλαγή οδηγεί στην αυξανόμενη ακρίβεια και στη σημαντική μείωση της διάρκειας και την εργασία της επεξεργασίας μέτρησης, όπως αποδεικνύεται από τις διενεργηθείσες μετρήσεις του διάφορου PCM. Η αποτελεσματική λειτουργία θερμικής ικανότητας ως τελικό αποτέλεσμα αποδεικνύεται πιο χρήσιμη από τα αποτελέσματα της αρχικής μεθόδου. Η νέα διαδικασία είναι ένα πρώτο βήμα προς τον καθορισμό των προδιαγραφών για τη μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων PCM.

i) Γενικά

Η μέτρηση των σωματικών ιδιοτήτων των νέων τεχνικών υλικών είναι το πρώτο βήμα προς τη μελέτη τους,πρίν τη χρήση τους στις τεχνολογικές εφαρμογές. Στην παρούσα εργασία προσπάθεια καταβάλλεται να αξιολογήσει και να βελτιώσει τις υπάρχουσες μεθόδους μέτρησης και τις σχετικές συσκευές, σχετικά με την αλλαγή φάσης θερμότητας, τη λειτουργία ικανότητας θερμότητας, οι θερμοκρασίες στις άκρες της διφασικής περιοχής του αλλαγή φάσης υλικού(PCM). Τα τελευταία προσελκύουν το συμφέρον των ερευνητών παγκοσμίως δεδομένου ότι έχουν

υιοθετηθεί με αυξανόμενο ρυθμό των τεχνολογικών εφαρμογών κατά τη διάρκεια των πρόσφατων ετών.

Οι ιδιαίτερες αποκλίσεις φαίνονται να εισάγονται από τις συμβατικές διαδικασίες μέτρησης για διάφορους λόγους. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 20 ετών, οι νέες μέθοδοι για τη μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων PCM εμφανίστηκαν, στοχεύοντας στη βελτίωση της ακρίβειας, τη μείωση του κόστους και την απλούστευση της διαδικασίας μέτρησης.

Εντούτοις, λίγη εργασία έγινε για τον καθορισμό των ακριβών διεθνών προδιαγραφών για τη μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων PCM. Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι να προταθούν οι βελτιώσεις στο γνωστό Μέθοδος T-History, οι οποίες αναφέρονται

(α) στη μέτρηση ρύθμιση,

(β) στον τρόπο της επεξεργασίας μέτρησης, ο οποίος είναι το σημαντικότερο μέρος της συμβολής μας και

(γ) το είδος και σχήμα παρουσίασης των τελικών αποτελεσμάτων.

Οι προτεινόμενες αλλαγές στοχεύουν στην αύξηση, στην ακρίβεια και την παροχή της αυτοματοποίησης, της ευκολίας και έχουν αποτελέσματα άμεσα εφαρμόσιμα

ιδίως στις αριθμητικές προβλέψεις. Επίσης, ένα πρώτο βήμα γίνεται προς τον καθορισμό των προδιαγραφών για τη μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων PCM. Οι προτεινόμενες τροποποιήσεις για τη μέθοδο T-History εξετάστηκαν με τη μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων του διάφορου PCM, και τα αποτελέσματα έλεγξαν τα αναμενόμενα πλεονεκτήματα. Αρχικές διαφορικές μέθοδοι μέτρησης και οι βελτιωμένες εκδόσεις τους υιοθετούνται πολύ συχνά μέσα από τη μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων PCM. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν στις βασικές κατηγορίες, δηλ. (CCM), διαφορική θερμική ανάλυση (DTA) διαδικασίες, calorimetry πτώσης (συνεχές ρεύμα) και (DSC). Η τελευταία φαίνεται να είναι η συνηθέστερη χρησιμοποιημένη δεδομένου ότι παρέχει τον υψηλότερο ακρίβεια. Εντούτοις, διάφοροι συντάκτες, όπως, παραδείγματος χάριν τον Arkar και λοιποί και κυρίως ο Mehling παρουσίασαν τα προβλήματα που προκύπτουν από τη

χρήση της μεθόδου DSC όταν χρησιμοποιείται στις θερμικές ιδιότητες μέτρου PCM. Σαν λύση για αυτά τα προβλήματα, ο Mehling και οι άλλοι συντάκτες πρότειναν μια βαθμιαία παραλλαγή θερμοκρασίας έτσι ώστε η θερμική ισορροπία να μπορεί να ληφθεί σε κάθε βήμα. Σε αυτό βοήθησαν οι μόλυβδοι τροποποίησης στην υψηλότερη ακρίβεια εις βάρος της διάρκειας μέτρησης καθώς επίσης και η απλότητα του προγραμματισμού και της επεξεργασίας μέτρησης.

Το 1999, ο Yinping και λοιποί παρουσίασαν μια νέα μέθοδο με το όνομα «T-History», στοχεύοντας στην απλότητα κυρίως της μέτρησης των μεγαλύτερων ποσοτήτων PCM. Τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου είναι ιδιαίτερα όπως αποδεικνύεται από εκτενή έρευνα από τους διάφορους συντάκτες που οδηγούν

στις σχετικές βελτιώσεις όπως περιγράφεται αργότερα στην παράγραφο 2. Για την παρουσίαση των προτεινόμενων βελτιώσεών μας, θα είναι απαραίτητο να συνοψίσουμε τα βασικά βήματα που περιλαμβάνονται στην αρχική μέθοδο T-history:

(α) τα δύο σκάφη δειγμάτων που χρησιμοποιούνται είναι σωλήνες γυαλιού με μικρή διάμετρο και μακρή μήκος, που γεμίζουν με το PCM και με το κατάλληλο ρευστό αναφοράς (συνήθως νερό), αντίστοιχα. Οι διαστάσεις των δύο σωλήνων πρέπει να εξασφαλίσουν συσσωρευμένη υπόθεση ικανότητας (αριθμός Biot < 0.1).

(β) οι δύο σωλήνες θερμαίνονται μέσα σε ένα σκάφος ζεστού νερού για να φθάσουν σε μια ομοιόμορφη θερμοκρασία, υψηλότερη από το PCM, και έπειτα αναστέλλονται σε αέρα περιβάλλοντος σταθερής θερμοκρασίας T_0 , χαμηλότερη από τη θερμοκρασία T_s στερεοποίησης PCM.

(γ) κατά τη διάρκεια της ψύξης και του PCM και του ρευστού αναφοράς, οι θερμοκρασίες $T_m(t)$ και το $T_r(t)$, αντίστοιχα, μετριοούνται από την άποψη του χρόνου t , που αρχίζει από το κοινή αρχική θερμοκρασία και τελειώνει σε μια θερμοκρασία T_e , η οποία είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία T_s του PCM. Μία σύνηθης διαδικασία συναρμολογήσεων καμπυλών εφαρμόζεται στις

μετρήσεις $T_m(t)$ και $T_r(t)$ για τη δημιουργία του ρευστού PCM και αναφοράς δροσίζοντας καμπύλες.

(δ) κάθε μία από τις ανωτέρω καμπύλες διαιρείται σε τρία μέρη (σε $T_o - T1$), $(T1 - T_s)$ και $(T_s - T_e)$ βάσει των θερμοκρασιών έναρξης $T1$ και στο τέλος το T_s του PCM διφασικής περιόδου, αντίστοιχα. Για την εκτίμηση των $T1$, T_o και T_s , διάφορες τεχνικές μπορεί να υιοθετηθούν συμπεριλαμβάνοντας την εξέταση των παραγώγομενων καμπυλών PCM. Η ενεργειακή ισορροπία για κάθε μέρος των καμπυλών εκφράζεται όπως περιγράφεται στο ακόλουθο βήμα.

(ε) η ισορροπία ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του PCM και του ρευστού αναφοράς με το περιβάλλον κατά μήκος της υγρής φάσης περιόδου PCM (δηλ. το πρώτο μέρος της ψύξης) εκφράζεται από τις ακόλουθες δύο εξισώσεις, αντίστοιχα:

$$(m_{tm}c_{ptm} + m_m c_{pml}) (T_o - T1) = h_1 S_{tm} A_{1m} \quad (3.2.5.1)$$

$$(m_{tr}c_{ptr} + m_r c_{pr}) (T_o - T1) = h_1 S_{tr} A_{1r} \quad (3.2.5.2)$$

όπου m_{tm} και m_{tr} είναι οι μάζες των σωλήνων που περιέχουν το PCM και ρευστό αναφοράς, αντίστοιχα m_m και m_r είναι οι μάζες από το ρευστό PCM και αναφοράς, αντίστοιχα c_{ptm} και c_{ptr} είναι οι ικανότητες θερμότητας των σωλήνων που περιέχουν το PCM και την αναφορά ρευστό, αντίστοιχα c_{pml} και c_{pr} είναι οι ικανότητες θερμότητας υγρού ρευστού αναφοράς PCM και , αντίστοιχα T_o και $T1$ είναι οι θερμοκρασίες στην αρχή του πειράματος και έναρξη της διφασικής περιόδου του PCM, αντίστοιχα h_1 είναι ο συντελεστής μεταφοράς στην εξωτερική επιφάνεια και οι δύο σωλήνες μεταξύ των θερμοκρασιών T_o και T , S_{tm} και S_{tr} είναι οι εξωτερικές επιφάνειες των ρευστών σωλήνων PCM και αναφοράς, αντίστοιχα A_{1m} και A_{1r} είναι οι περιοχές κάτω από την ψύξη των καμπυλών $T_m(t)$ και $T_r(t)$ του PCM και του ρευστού αναφοράς, αντίστοιχα, μεταξύ των θερμοκρασιών T_o και $T1$, δηλ. κατά μήκος του PCM σε υγρή φάση.

Ομοίως, η ισορροπία ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του PCM και ρευστό αναφοράς με το περιβάλλον κατά μήκος της διφασικής περιόδου PCM εκφράζεται από τις ακόλουθες δύο εξισώσεις, αντίστοιχα:

$$m_{tm}c_{ptm} (T1 - Ts) + m_m H_m = h_2 S_{tm} A_{2m} \quad (3.2.5.3)$$

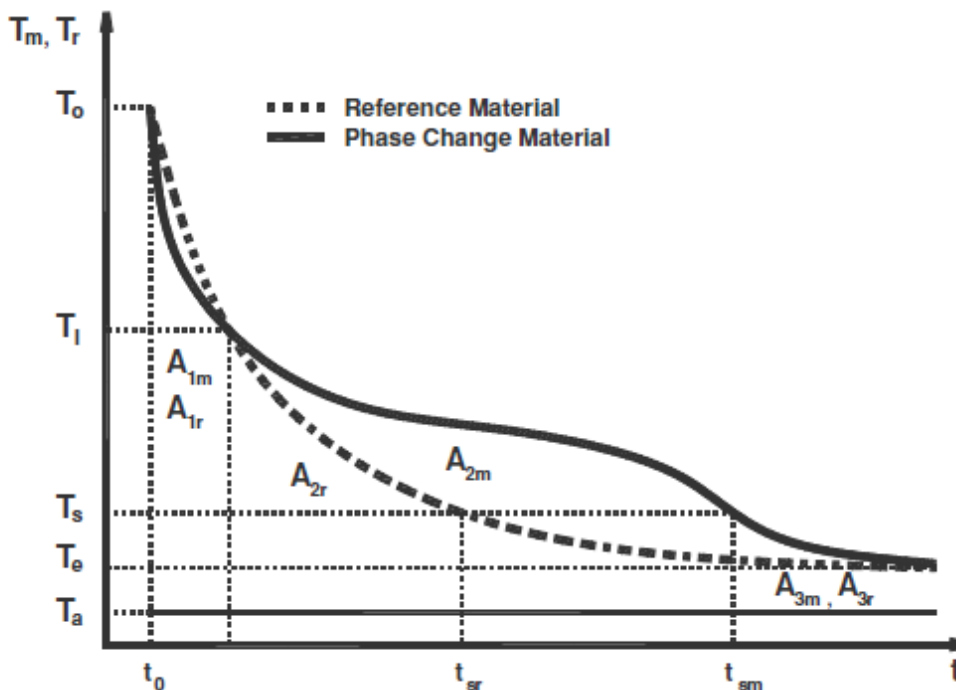
$$(m_{tr}c_{ptr} + m_r c_{pr}) (T1 - Ts) = h_2 S_{tr} A_{2r} \quad (3.2.5.4)$$

Όπου T_s είναι η θερμοκρασία PCM στο τέλος της διφασικής περιόδου, H_m είναι η συνολική θερμότητα που απελευθερώνεται από το PCM κατά τη διάρκεια ολόκληρης της αλλαγής φάσης της περιόδου, h_2 είναι ο μέσος συντελεστής μεταφοράς κατά μήκος της ίδιας περιόδου και A_{2m} και A_{2r} είναι οι περιοχές κάτω από τις καμπύλες $T_m(t)$ και το $T_r(t)$ από το PCM και το ρευστό αναφοράς, αντίστοιχα, μεταξύ $T1$ και T_s θερμοκρασιών, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.

Τελικά, η ισορροπία ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του PCM και του υγρού αναφοράς με το περιβάλλον κατά μήκος της περιόδου του PCM (δηλ. από το τέλος του PCM της διφασικής περιόδου μέχρι το τέλος του πειράματος) εκφράζεται από μετά από δύο εξισώσεις, αντίστοιχα:

$$(m_{tm}c_{ptm} + m_m c_{pms}) (Ts - Te) = h_3 S_{tm} A_{3m} \quad (3.2.5.5)$$

$$(m_{tr}c_{ptr} + m_r c_{pr}) (Ts - Te) = h_3 S_{tr} A_{3r} \quad (3.2.5.6)$$



Σχ.3.2.5.1 Καμπύλες $T_m(t)$ και $T_r(t)$ του ρευστού PCM και αναφοράς, αντίστοιχα, σύμφωνα με την αρχική μέθοδο T-History.

όπου c_{rms} είναι η στερεά ικανότητα θερμότητας PCM, T_e είναι η ρευστή θερμοκρασία PCM και αναφοράς στο τέλος του πειράματος, h_3 είναι ο μέσος συντελεστής μεταφοράς και A_{3m} και A_{3r} είναι οι περιοχές κάτω από τις καμπύλες $T_m(t)$ και $T_r(t)$ του PCM και του ρευστού αναφοράς, αντίστοιχα, μεταξύ των θερμοκρασιών T_s και T_e , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.5.1.

στ) Περιλαμβάνονται παρακάτω οι 6 εξισώσεις οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις περιοχές κάτω από τα τρία μέρη του PCM και τις ρευστές καμπύλες αναφοράς $T_m(t)$ και $T_r(t)$, αντίστοιχα, υπολογίζεται από την ολοκλήρωση των ανωτέρω λειτουργιών:

$$A_{1m} = \int_{t_0}^{t_{1m}} (T_m(t) - T_a) dt \quad (3.2.5.7)$$

$$A_{1r} = \int_{t_0}^{t_{1r}} (T_r(t) - T_a) dt \quad (3.2.5.8)$$

$$A_{2m} = \int_{t_{1m}}^{t_{sm}} (T_m(t) - T_a) dt \quad (3.2.5.9)$$

$$A_{2r} = \int_{t_{1r}}^{t_{sr}} (Tr(t) - Ta) dt \quad (3.2.5.10)$$

$$A_{3m} = \int_{t_{sm}}^{t_{em}} (Tm(t) - Ta) dt \quad (3.2.5.11)$$

$$A_{3r} = \int_{t_{sr}}^{t_{er}} (Tr(t) - Ta) dt \quad (3.2.5.12)$$

όπου (to, tlm), (tlm, tsm), (tsm, tem) είναι τα τρία χρονικά όρια της καμπύλης PCM και (to, tlr), (tlr, tsr), (tsr, ter) είναι τα αντίστοιχα όρια του ρευστού αναφοράς της καμπύλης.

(ζ) Μετά από τον υπολογισμό του A, οι εξισώσεις (3.2.5.7) - (3.2.5.12) διαμορφώθηκαν με άγνωστα τα c_{pml} , c_{pms} , h_1 , h_2 , h_3 .

Η λύση του συνόλου δίνει τις απαραίτητες ικανότητες θερμότητας του υγρού και του στερεού PCM καθώς επίσης και τη συνολική θερμότητα που απελευθερώνεται κοντά στο PCM κατά τη διάρκεια ολόκληρης της αλλαγής φάσης περιόδου (δηλ. Λανθάνων θερμότητα):

$$c_{pml} = M A_{1m} / A_{1r} - N \quad (3.2.5.13)$$

$$c_{pms} = M A_{3m} / A_{3r} - N \quad (3.2.5.14)$$

$$H_m = (M A_{2m} / A_{2r} - N) (T_1 - T_s) \quad (3.2.5.15)$$

Όπου,

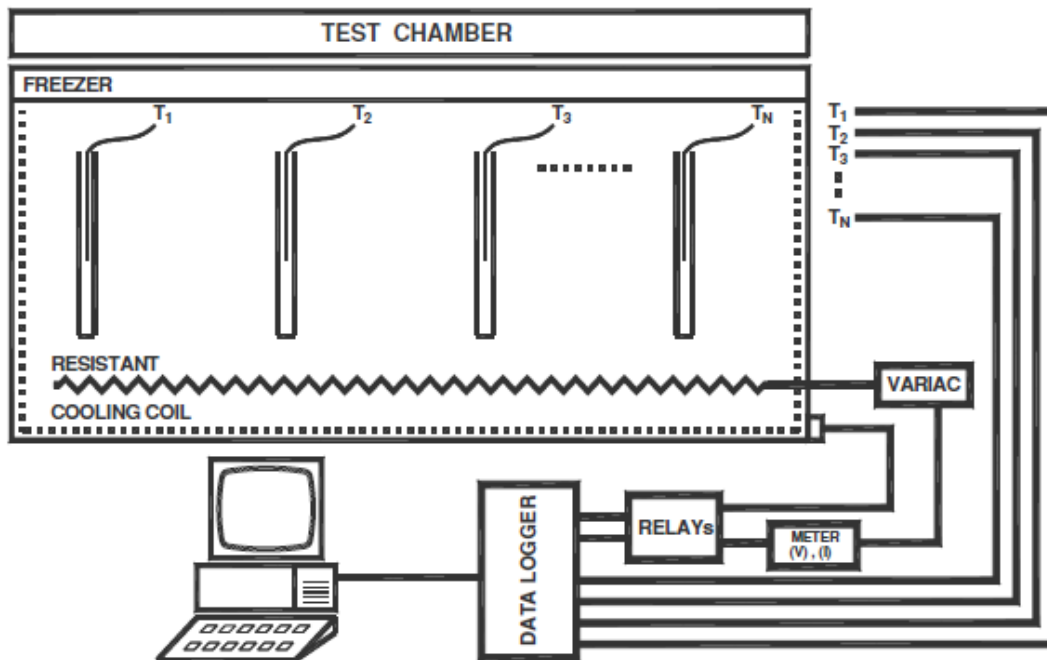
$$M = (m_{tr}c_{ptr} + m_r c_{pr}) S_{tm} / m_m S_{tr} \quad (3.2.5.16)$$

$$N = m_{tm} c_{ptm} / m_m \quad (3.2.5.17)$$

i) Προτεινόμενη αναθεώρηση των κύριων βελτιώσεων στην T-History μέθοδο

Ο Hong και λοιποί προσπάθησαν να βελτιώσουν την ακρίβεια της T-History μεθόδου με την υποβολή προτάσεων για έναν ακριβέστερο καθορισμό των θερμοκρασιών T1 και TS στην αρχή και στο τέλος αλλαγής φάσης. Μια δεύτερη βελτίωση έρχεται από τον Marin, ο οποίος άλλαξε το σχήμα παρουσίασης των αποτελεσμάτων, δηλ. προτείνει τη λήψη της ενθαλπίας εναντίον της χρονικής

λειτουργίας αντί του συνόλου της απελευθερωμένη θερμότητας και της ικανότητας θερμότητας.



Σχ.3.2.5.2 Προτεινόμενη και κατασκευασμένη πλήρως αυτόματη πειραματική ρύθμιση με μια αίθουσα δοκιμής του ελεγχόμενου εσωτερικού περιβάλλοντος

Ο Hong πρότεινε μια τρίτη βελτίωση συμπεριλαμβανομένου ενός όρου που εκφράζει τη λογική θερμότητα που αποθηκεύεται στη μάζα από τον πειραματικό σωλήνα, ο οποίος θεωρήθηκε αμελητέος μέσα απ' την αρχική μέθοδο. Αυτή η βελτίωση έχει περιλάβει τη περίληψη της μεθόδου που δίνεται στην εισαγωγή. Επίσης περιέλαβε έναν όρο για τη λογική θερμότητα που αποθηκεύτηκε στο δείγμα. Από χωρισμός των ανωτέρω δύο ποσοτήτων λογικής θερμότητας, υπολογισμός από το δείγμα η λανθάνουσα θερμότητα γίνεται ακριβέστερη. Μια τροποποίηση προτάθηκε από τον Van Dorp ο οποίος καθιστά τη μέθοδο άμεσα κατάλληλη στις εφαρμογές PCM μέσα κτήρια. Το 2005, ο Zalba πρότεινε μια τέταρτη βελτίωση από τη μέθοδο T-History, δηλ. τοποθέτηση των πειραματικών σωλήνων οριζόντια προκειμένου να

ελαχιστοποιηθούν τα αποτελέσματα βαρύτητας. Επίσης πρότεινε στην προσθήκη του φύλλου αλουμινίου για να αποφύγει εξωτερικά αποτελέσματα ακτινοβολίας. Η ιδέα της οριζόντιας τοποθέτησης των σωλήνων εφαρμόστηκε επιτυχώς από τον Hong το 2006. Τον ίδιο χρόνο ο Lazaro απέδειξε ότι η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί είτε στο καθαρό είτε σύνθετο PCM μετά από κατάλληλες τροποποιήσεις των πειραματικών συσκευών. Το 2006, ο Mehling πρότεινε ότι ένας τυποποιημένος τρόπος από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μέτρησης η διαδικασία πρέπει να είναι οργάνωση, έτσι ώστε μια άμεση σύγκριση των μετρήσεων για το διαφορετικό PCM μπορεί να είναι δυνατή. Αυτή ήταν η πρώτη πρόταση για την καθιέρωση των προδιαγραφών μέτρησης PCM.

ii) Προτεινόμενη θερμική μέθοδος καθυστέρησης

Η μέθοδος T-History, σύμφωνα με την εισαγωγή, απαιτεί συμμετοχή ερευνητών τουλάχιστον στην αρχή και το τέλος από το πείραμα. Στην περίπτωση των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, όπως είναι συνήθως η περίπτωση για τη βελτίωση ακρίβειας με τον υπολογισμό μέσου όρου, τα αποτελέσματα των ερευνητών μπορούν να διαρκέσουν πολλές ώρες. Κατά μια ελάχιστη διάρκεια πειράματος 3 ωρών και 30 επαναλήψεων από τις μετρήσεις, ολόκληρη η διαδικασία μπορεί να φθάσει αφόρητη διάρκεια 90 ωρών. Για να υπερνικήσει αυτό το πρόβλημα, αναπτύξαμε ένα σύστημα για την αυτόματη εκμετάλλευση επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, οι οποίες μπορούν, επιπλέον, να χειριστούν ταυτόχρονα διαφορετικό PCM. Ένα διαφορετικό αυτοματοποιημένο σύστημα με τη θέρμανση και τη ψύξη έχει περιγραφεί. Η καρδιά του προτεινόμενου συστήματος είναι μια μονωμένη δοκιμή, στην οποία η θερμοκρασία κυμαίνεται από -30°C μέχρι 120°C μπορεί να αποκτηθεί μέσω των ηλεκτρικών ψύξης σπειρών αντιστάσεων. Η παραπάνω δοκιμή κατασκευάζεται από έναν καταψύκτη, ο οποίος τροποποιήθηκε κατάλληλα με την προσθήκη των απαραίτητων συστατικών, συμπεριλαμβανομένου ενός υπολογιστή, που ελέγχει ολόκληρο το σύστημα, όπως παρουσιασμένος σχηματικά στο σχήμα 3.2.5.2. Οι σωλήνες δειγμάτων

αναστέλλονται μέσα σε ελεγχόμενο περιβάλλον της αίθουσας δοκιμής, όπου ολόκληρο το πείραμα πραγματοποιείται, δηλ. πρώτα να θερμάνει και έπειτα να δροσίζει τη συλλογή από τις μετρήσεις. Το σημαντικότερο μέρος της προτεινόμενης βελτίωσης είναι ο διαφορετικός τρόπος της επεξεργασίας μέτρησης. Ο αρχικός Η μέθοδος T-History είναι βασισμένη στην εξέταση της χρονικής καθυστέρησης μεταξύ του PCM και του ρευστού αναφοράς σε μια διευκρινισμένη θερμοκρασία. Παραδείγματος χάριν, η θερμοκρασία T_s λαμβάνεται στο χρόνο t_{sm} PCM ενώ στο ρευστό αναφοράς η ίδια θερμοκρασία έχει ληφθεί νωρίτερα, στο χρόνο $t_{sr} < t_{sm}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.5.1. Αντίθετα, η προτεινόμενη μέθοδος εξετάζει τη θερμική καθυστέρηση (δηλ. διαφορά θερμοκρασίας) μεταξύ του PCM και του ρευστού αναφοράς στον ίδιο καθορισμένο χρόνο. Παραδείγματος χάριν, στο χρονικό T_i και οι ρευστές θερμοκρασίες αναφοράς είναι $T_{m,i}$ και $T_{r,i}$ αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.5.3. Στην επόμενη μέτρηση στο χρόνο t_{i+1} , οι ρευστές θερμοκρασίες PCM και αναφοράς είναι $T_{m, i+1}$ και $T_{r, i+1}$, αντίστοιχα (σχήμα 3.2.5.3). Η ισορροπία ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του ρευστού αναφοράς και PCM με το περιβάλλον κατά μήκος του χρόνου το βήμα $(t_{i+1} - T_i)$ εκφράζεται από τις ακόλουθες δύο εξισώσεις, αντίστοιχα:

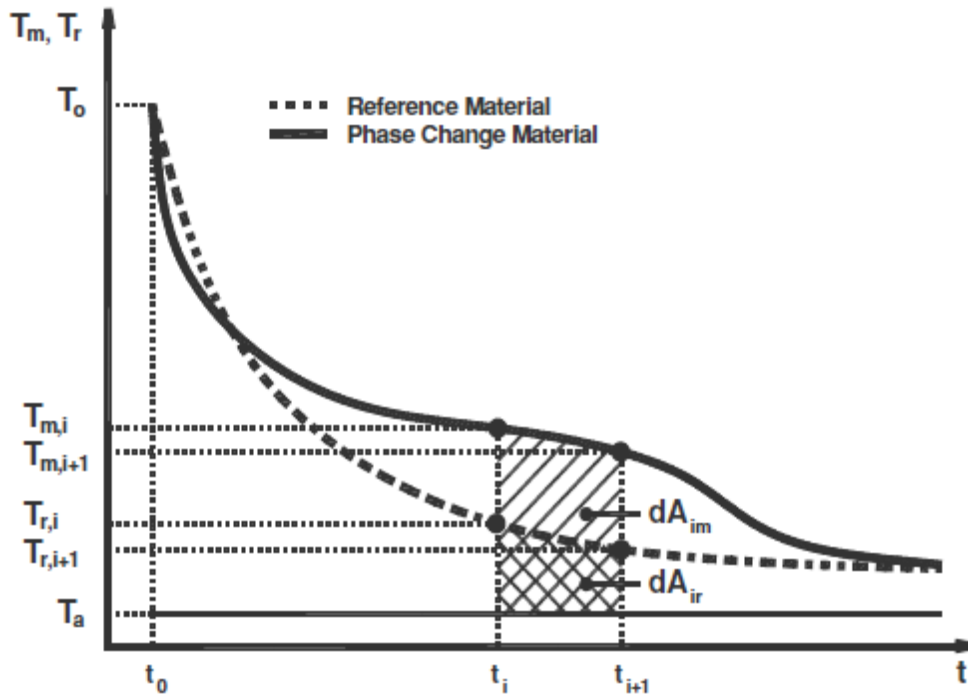
$$(m_{tm}c_{ptm} + m_m c_{p,eff}) (T_{m,i} - T_{m,i+1}) = h S_{tm} dA_{im} \quad (3.2.5.18)$$

$$(m_{tr}c_{ptr} + m_r c_{pr}) (T_{r,i} - T_{r,i+1}) = h S_{tr} dA_{ir} \quad (3.2.5.19)$$

όπου το $C_{p,eff}(T)$ είναι μια «αποτελεσματική θερμική ικανότητα PCM» η θερμοκρασία $T = (T_{m, i} + T_{m, i+1})/2$ και dA_{im} και dA_{ir} είναι οι περιοχές κάτω από τις καμπύλες του PCM και της αναφοράς ρευστού, αντίστοιχα, μεταξύ του χρονικού T_i και T_{i+1} , δηλ.

$$dA_{im} \approx (T_{m,i} + T_{m,i+1} - 2 T_a) (t_{i+1} - t_i) / 2 \quad (3.2.5.20)$$

$$dA_{ir} \approx (T_{r,i} + T_{r,i+1} - 2 T_a) (t_{i+1} - t_i) / 2 \quad (3.2.5.21)$$



Σχ.3.2.5.3 Σχηματική αντιπροσώπευση του νέου τρόπου της επεξεργασίας μέτρησης, σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο «θερμικής καθυστέρησης»

Με τη διαίρεση των παραπάνω εξισώσεων και την επίλυση για το $C_{p,eff}$ μετά από την έκφραση λαμβάνεται (συντελεστές χ μεταφοράς θερμότητας αποβάλλεται, δεδομένου ότι είναι ίσοι ο ένας στον άλλο κατά τη διάρκεια του χρόνου $t_i - t_{i+1} \approx 10$ s

$$c_{p,eff}(T) = M (T_{r,i} - T_{r,i+1}) dA_{im} / (T_{m,i} - T_{m,i+1}) dA_{ir} - N \quad (3.2.5.22)$$

όπου το M και το N δίνονται από τις εξισώσεις. Αντικατάσταση του dA_{im} και του dA_{ir} δίνει μια τελική έκφραση για το $C_{p,eff}$ στην προτεινόμενη θερμική μέθοδο καθυστέρησης:

$$c_{p,eff}(T) = M (T_{r,i} - T_{r,i+1}) (T_{m,i} + T_{m,i+1} - 2T_a) / (T_{m,i} - T_{m,i+1}) (T_{r,i} + T_{r,i+1} - 2T_a) - N \quad (3.2.5.23)$$

Σε σχέση με το σχήμα 3.2.5.4, ένα αποτελεσματικό PCM θερμικό $C_{p,eff}(T)$ σε οποιαδήποτε θερμοκρασία $T = (T_i + T_{i+1})/2$ μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την αρχική μέθοδο T-History, κοντά στην εξέταση των χρονικών καθυστερήσεων μεταξύ του PCM και του ρευστού αναφοράς στο T_i θερμοκρασιών και T_{i+1} , ως εξής. Οι παρακάτω εξισώσεις τώρα λαμβάνουν τη μορφή:

$$(m_{tm}c_{ptm} + m_m c_{p,eff}) (T_i - T_{i+1}) = h S_{tm} dA_{im} \quad (3.2.5.24)$$

$$(m_{tr}c_{ptr} + m_r c_{pr}) (T_i - T_{i+1}) = h S_{tr} dA_{ir} \quad (3.2.5.25)$$

Όπου

$$dA_{im} \approx (T_i + T_{i+1} - 2T_a) (t_{m,i+1} - t_{m,i}) / 2 \quad (3.2.5.26)$$

$$dA_{ir} \approx (T_i + T_{i+1} - 2T_a) (t_{r,i+1} - t_{r,i}) / 2 \quad (3.2.5.27)$$

Με τη διαίρεση των εξισώσεων (3.2.5.24) και (3.2.5.25) και την επίλυση για το $C_{p,eff}$ μετά από την έκφραση λαμβάνεται:

$$C_{p,eff}(T) = M dA_{im} / dA_{ir} - N \quad (3.2.5.28)$$

Τελικά προκύπτει:

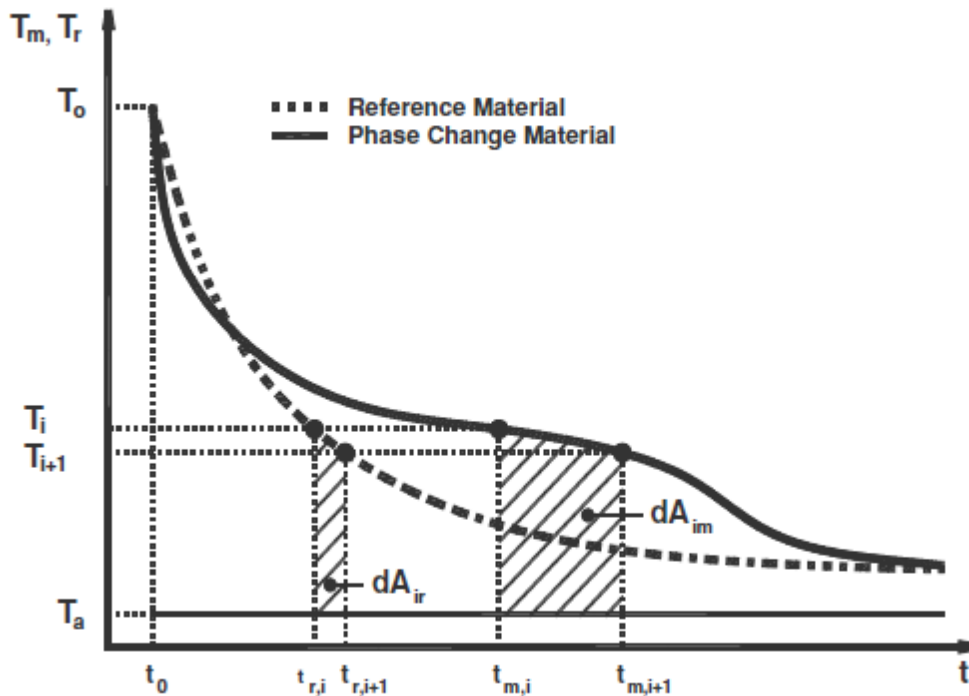
$$C_{p,eff}(t) = M (t_{m,i+1} - t_{m,i}) / (t_{r,i+1} - t_{r,i}) - N \quad (3.2.5.29)$$

iii) Πλεονεκτήματα της προτεινόμενης θερμικής μεθόδου καθυστέρησης

Οι προτάσεις μας και τα σχετικά πλεονεκτήματα μαζεύονται κατωτέρω. Ο σημαντικότερος είναι ο προτεινόμενος νέος τρόπος επεξεργασία μέτρησης, που περιγράφεται στο σημείο (στ) του παρόντος τμήματος.

(α) το σκάφος ζεστού νερού, στο οποίο οι σωλήνες δοκιμής θερμαίνονται (εισαγωγή, βήμα (β)), τίθεται κατά μέρος. Επομένως, οι πηγές από τα λάθη σχετικά με την υγρασία στις επιφάνειες σωλήνων δοκιμής και η ανεξέλεγκτη μετακίνησή τους τελειώνει με τις επακόλουθες ταλαντώσεις, δεν υπάρχουν στην

προτεινόμενη διαδικασία. Επιπλέον, η εκμετάλλευση ολόκληρου του πειράματος μέσα στον ελεγχόμενο εσωτερικό αέρα και η προτεινόμενη αίθουσα δοκιμής εξασφαλίζει ξηρότητα του εσωτερικού αέρα με τη χρησιμοποίηση των κατάλληλων υλικών απορρόφησης της υγρασίας.



Σχ.3.2.5.4 Σχηματική αντιπροσώπηση του προτεινόμενου τρόπου του αποτελεσματικού υπολογισμού θερμικής ικανότητας, που χρησιμοποιεί την αρχική μέθοδο T-History.

(β) το προτεινόμενο πλήρως αυτόματο σύστημα εξασφαλίζει την εκμετάλλευση ολόκληρης της διαδικασίας (δηλ. θέρμανση, ψύξη και συλλογή από τις μετρήσεις) χωρίς τη συμμετοχή του προσωπικού ακόμη και για τα επαναλαμβανόμενα σύνολα μετρήσεων και του διαφορετικού PCM, ταυτόχρονα.

(γ) στο αναπτυγμένο πειραματικό σύστημα, οι σωλήνες δοκιμής ήταν μήκους 500 χιλ. και 7 χιλ. εξωτερική διάμετρος αντί εκείνων 200 χιλ. και 10 χιλ. αντίστοιχα, χρησιμοποιημένοι από τους προηγούμενους ερευνητές. Αυτές οι αλλαγές εξασφαλίζουν την ελαχιστοποίηση των αποτελεσμάτων ακρών σωλήνων και εκπλήρωση του αριθμού Biot < 0.1 όρος σε όλες τις περιπτώσεις του PCM που εξετάζονται.

(δ) η συνολική αλλαγή φάσης θερμότητας που δίνεται από τους περισσότερους ερευνητές ως αποτέλεσμα των μετρήσεών τους, η παρούσα μελέτη, η αποτελεσματική θερμική ικανότητα καθορίζεται από την άποψη της θερμοκρασίας, $C_{p,eff}(T)$, με τη χρησιμοποίηση των εξισώσεων που παρουσιάζονται στο προηγούμενο τμήμα. Η παρουσίαση από τις μετρήσεις είναι κατά αυτόν τον τρόπο ανάλογη με αυτήν που πρότεινε ο Mehling αλλά χωρίς να είναι απαραίτητο να περάσει μέσω του προσδιορισμού της ενθαλπίας. Η αποτελεσματική λειτουργία θερμικής ικανότητας περιέχει πολύ περισσότερες πληροφορίες από τη συνολική αλλαγή φάσης θερμότητας. Παραδείγματος χάριν, η αλλαγή φάσης στην περιοχή των θερμοκρασιών T_1 και T_s συνάγεται εύκολα από μορφή του $C_{p,eff}(T)$, και των τιμών ικανότητας θερμότητας c_{pml} και c_{pms} του υγρού και στερεού υλικού λαμβάνεται από το $C_{p,eff}(T)$ για το $T \geq T_1$ και $T \leq T_s$, αντίστοιχα. Επίσης, το $C_{p,eff}(T)$ παρέχει τη δυνατότητα να συγκρίνει διαφορετικά PCM και είναι πολύ χρήσιμο στους περισσότερους υπολογισμούς.

(ε) για τη βελτίωση της ακρίβειας της μεθόδου, προτείνεται να ληφθεί υπόψη η μάζα των ελέγχων, ειδικά εάν αυτοί είναι ενός ιδιαίτερου μεγέθους. Είναι επίσης προτεινόμενος για να περιλάβει στους υπολογισμούς ανταλλαγής θερμότητας ολόκληρες επιφάνειες σωλήνων δοκιμής, αντί να πάρει μόνο μέρη που γεμίζουν με το υλικό, όπως προτείνεται από τους διάφορους συντάκτες. Ο λόγος για την πρότασή μας βρίσκεται στο γεγονός ότι στα πειράματά μας, τα κενά μέρη των σωλήνων δοκιμής βρέθηκαν για να είναι στην ίδια θερμοκρασία με τα γεμισμένα μέρη, συμβάλλοντας κατά συνέπεια στην ανταλλαγή θερμότητας ως πτερύγια. (στ) μια νέα μέθοδος έχει αναπτυχθεί και έχει εφαρμοστεί για την επεξεργασία μέτρησης, η οποία είναι βασισμένη στη χρήση της θερμικής καθυστέρησης (δηλ. διαφορά θερμοκρασίας) μεταξύ του PCM και του ρευστού αναφοράς σε οποιοδήποτε καθορισμένο χρόνο. Αντίθετα, η αρχική μέθοδος T-History είναι βασισμένη στη χρήση του χρόνου καθυστέρησης μεταξύ του PCM και του ρευστού αναφοράς σε διευκρινισμένη θερμοκρασία. Τα πλεονεκτήματα από το νέο τρόπο επεξεργασίας μέτρησης συνοψίζεται ως εξής:

(i) η διάρκεια της επεξεργασίας μέτρησης είναι αρκετά μειωμένη επειδή οι περιοχές A κάτω από τις καμπύλες υπολογίζονται τώρα άμεσα από οι μετρήσεις μέσω των εξισώσεων και όχι μετά από τη συναρμολόγηση καμπυλών στις μετρήσεις και κατόπιν ολοκλήρωση. Η τελευταία πρακτική συνεπάγεται στο πρόβλημα της συναρμολόγησης καμπυλών και μπορεί να εισάγει τα λάθη στα τελικά αποτελέσματα.

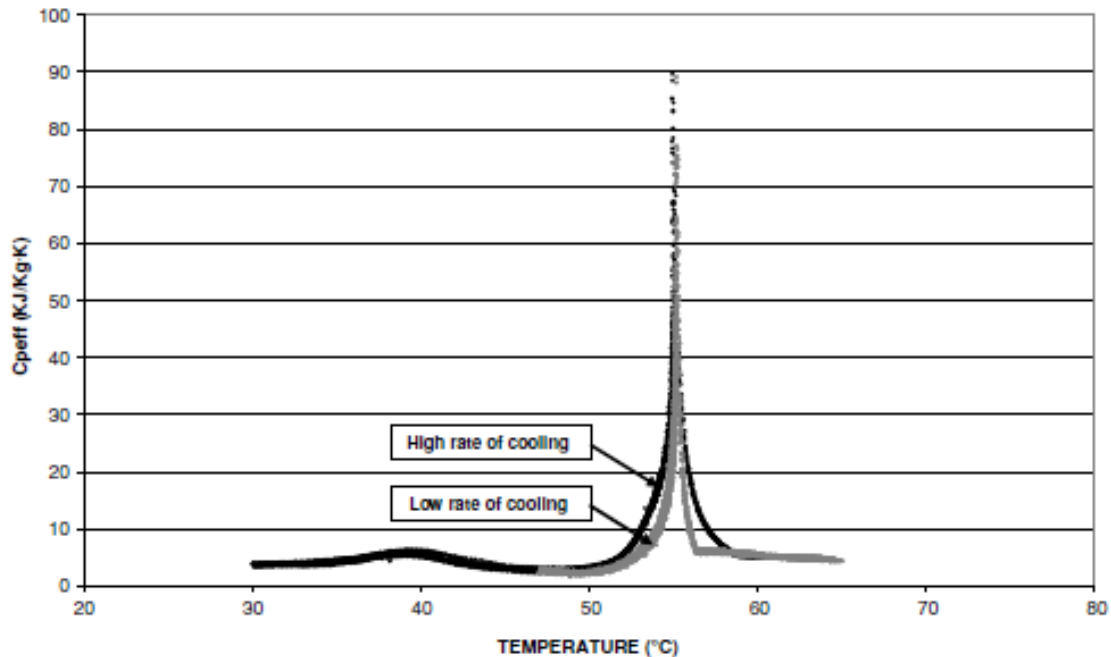
(ii) με την προτεινόμενη διαδικασία, η λύση των εξισώσεων αποφεύγεται.

(iii) η υπόθεση της σταθερής θερμοκρασίας αέρα TA (παράγραφος 1, βήμα (β)) σε όλο το πείραμα δεν απαιτείται επειδή στην προτεινόμενη διαδικασία οι υπολογισμοί εκτελούνται σταδιακά με απότομα χρονικά βήματα. Οι εξισώσεις (3.2.5.20) και (3.2.5.21) υπονοούν ότι το TA είναι προφανώς σταθερά κατά μήκος του χρονικού βήματος ($t_{i+1} - t_i \sim 10$ s).

(iv) στο ανάλογο πλεονέκτημα των ανωτέρω εφαρμόζεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.

(v) η προτεινόμενη διαδικασία προσφέρει τη δυνατότητα κατοχής των αποτελεσμάτων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (πραγματικά μια αξία από το $C_{p,eff}$ υπολογίζεται σε κάθε βήμα), επιτρέποντας κατά συνέπεια στον ερευνητή να ανιχνεύσει τις πιθανές ανεπάρκειες της πειραματικής οργάνωσης ή της διαδικασίας μέτρησης, και κάνει τις απαραίτητες διορθώσεις.

(ζ) η προτεινόμενη θερμική μέθοδος καθυστέρησης, εκτός από την εύκολη και την γρήγορη παροχή σε ολόκληρο το πείραμα, μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως πρώτο βήμα προς τον καθορισμό των προδιαγραφών για τη μέτρηση θερμικών ιδιοτήτων του PCM .



Σχ.3.2.3.5 Αποτελεσματική θερμική ικανότητα παραφίνης από την άποψη της θερμοκρασίας, για την ελληνική αγορά, σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία μέτρησης, για δύο ποσοστά ψύξης δειγμάτων, που παρουσιάζουν αναμενόμενη αλλαγή φάσης περιοχής.

ii) Μετρήσεις

Το αναπτυγμένο ελεγχόμενο σύστημα μέτρησης περιβάλλοντος και η αντίστοιχη θερμική διαδικασία καθυστέρησης με το νέο τρόπο επεξεργασίας μέτρησης εξετάστηκαν επιτυχώς κοντά στην παραγωγή των θερμικών ικανοτήτων της υγρής και στερεής κατάστασης c_{pml} και c_{pms} , αντίστοιχα, αλλαγή φάσης θερμότητας και ο αποτελεσματική λειτουργία θερμικής ικανότητας $C_{p,eff}(T)$ για τα διάφορα PCM. Αυτές οι μετρήσεις θα παρουσιαστούν σε ένα προσεχές έγγραφο. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα για τη συνηθισμένη παραφίνη της ελληνικής αγοράς (παραγωγή των ελληνικών διυλιστηρίων πετρελαίου, που χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή κεριού) θα δοθεί παρακάτω. Διπλό αποσταγμένο νερό (WFI) χρησιμοποιήθηκε ως ρευστό αναφοράς. Δύο σύνολα πειραμάτων έχουν εκτελεσθεί και τα αποτελέσματα δίνονται μαζί μέσα σχήμα 3.2.3.5.

(α) στο πρώτο σύνολο πειραμάτων, οι μετρήσεις αρχίζουν με $T_0=65^\circ\text{C}$ και τελειώνουν σε $T_e = 30^\circ\text{C}$, ενώ η θερμοκρασία από τον ελεγχόμενο εσωτερικό αέρα ήταν $T_a = 20^\circ\text{C}$. Ολόκληρο το πείραμα επαναλήφθηκε 50 φορές. Το σχήμα 3.2.3.5 παρουσιάζει την αποτελεσματική λειτουργία θερμικής ικανότητας $C_{p,\text{eff}}(T)$, η οποία υπολογίστηκε με την επεξεργασία των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων σύμφωνα με την προτεινόμενη εξίσωση (3.2.3.23). Όπως φαίνεται, η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται με αυξανόμενο $C_{p,\text{eff}}(T)$, δηλ. από $T_1 = 58^\circ\text{C}$ σε $T_s = 50^\circ\text{C}$. Η υπολογισμένη μέση αξία της αλλαγής φάσης θερμότητας είναι $H_m = 136.5 \text{ KJ kg}^{-1}$ με μια σταθερή απόκλιση 6 KJ kg^{-1} , ενώ η αξία που δίνεται από τον προμηθευτή είναι 146.5 KJ kg^{-1} . Η τελευταία αξία είναι απλά ενδεικτική και δεν δίνεται για σύγκριση δεδομένου ότι έχει μετρηθεί χρησιμοποιώντας ένα DSC με άγνωστους όρους μέτρησης. Στο σχήμα 3.2.3.5 η μέγιστη στιγμή παρατηρείται επίσης στο $T \sim 39^\circ\text{C}$. Αυτή η συμπεριφορά, η οποία είναι σύμφωνη με τις μετρήσεις άλλων ερευνητών σε DSC, οφείλεται σε μια αλλαγή στη δομή του κρυστάλλου του PCM.

(β) ο σκοπός του δεύτερου συνόλου πειραμάτων ήταν να ερευνηθεί εάν τα αποτελέσματα επηρεάζονται από το ποσοστό από την ψύξη δειγμάτων. Για να λάβει το χαμηλότερο ποσοστό, η θερμοκρασία του ελεγχόμενου εσωτερικού αέρα τέθηκε σε $T_a = 45^\circ\text{C}$ και οι μετρήσεις αρχίζουν $T_0= 65^\circ\text{C}$ και τελειώνουν σε $T_e = 47^\circ\text{C}$. Επομένως, η χαμηλότερη αρχική διαφορά θερμοκρασίας (δηλ. $65-45 = 20^\circ\text{C}$ σε σύγκριση με $65-20 = 45^\circ\text{C}$ στο πρώτο σύνολο πείραμα) εξασφαλίζουν ένα χαμηλότερο ποσοστό ψύξης δειγμάτων. Ολόκληρο το πείραμα επαναλήφθηκε 50 φορές. Το σχήμα 3.2.3.5 παρουσιάζει αποτελεσματική θερμική λειτουργία ικανότητας $C_{p,\text{eff}}(t)$, υπολογισμένη με την επεξεργασία των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων σύμφωνα με την προτεινόμενη εξίσωση (3.2.3.23). Όπως φαίνεται, η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται με αυξανόμενο $C_{p,\text{eff}}(T)$, δηλ. από $T_1 = 56^\circ\text{C}$ σε $T_s = 51^\circ\text{C}$. Επομένως, η αλλαγή φάσης θερμοκρασίας $T_1 - T_s = 56 - 51 = 5^\circ\text{C}$ είναι μικρότερη από την αντίστοιχη σειρά $T_1 - T_s = 58 - 50 = 8^\circ\text{C}$ του πρώτου συνόλου πειραμάτων στο υψηλότερο ποσοστό της ψύξης του δείγματος. Αυτή η εύρεση συμφωνεί με τις μετρήσεις DSC όλων των άλλων ερευνητών. Η υπολογισμένη μέση αξία αλλαγής φάσης

είναι $H_m = 128.9 \text{ KJ kg}^{-1}$ με πρότυπη απόκλιση 8.5 KJ kg^{-1} . Επομένως, οι αλλαγές φάσης θερμότητας ολοκληρώνονται με μειωμένο ποσοστό ψύξης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί αυτό στα ανωτέρω δύο σύνολα από τα πειράματα (α) και (β), η τριγωνική μορφή και η θερμοκρασία της μέγιστης αξίας των καμπύλων του $C_{p,eff}$ (T) παραμένουν αμετάβλητες. Οι μετρήσεις προτείνουν ότι τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και το ποσοστό ψύξης που επιβάλλονται. Επομένως, η ακρίβεια των ιδιοτήτων του PCM σε οποιαδήποτε ιδιαίτερη εφαρμογή μπορεί να εξασφαλιστεί μόνο με την επανάληψη των μετρήσεων κάτω από θερμικούς όρους της εφαρμογής.

iii) Συμπεράσματα

Βελτιώσεις στη μέτρηση της μεθόδου T-History που έχουν προταθεί αναφέρονται (α) στην πειραματική ρύθμιση, (β) στον τρόπο της μέτρησης επεξεργασίας και (γ) στο σχήμα ειδών και παρουσίασης των τελικών αποτελεσμάτων. Η βάση της προτεινόμενης πειραματικής ρύθμισης είναι μια αίθουσα δοκιμής του ελεγχόμενου εσωτερικού περιβάλλοντος, όπου ολόκληρο το πείραμα πραγματοποιείται, μειώνοντας κατά συνέπεια τις πηγές των λάθων σχετικά με τις μετακινήσεις δειγμάτων, με τη θερμοκρασία και με τις διακυμάνσεις υγρασίας του εσωτερικού αέρα. Η προτεινόμενη ρύθμιση είναι πλήρως αυτόματη, χωρίς την ανάγκη για συμμετοχή προσωπικού, ακόμα και για τα επαναλαμβανόμενα σύνολα μετρήσεων. Επίσης, η αλλαγή φάσης θερμότητας, η λειτουργία ικανότητας θερμότητας και οι ακραίες θερμοκρασίες της διαφασικής περιοχής περισσότερων από ενός διαφορετικών PCM μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα. Κατά συνέπεια, το νέο πείραμα παρέχει ευκολία όπως αναλύεται λεπτομερώς στα προηγούμενα τμήματα. Οι προτεινόμενες βελτιώσεις αφορούσαν τον τρόπο της επεξεργασίας μέτρησης που διαμορφώνουν το σημαντικότερο μέρος της συμβολή μας. Είναι βασισμένες στη χρήση της θερμικής καθυστέρησης (δηλ. διαφορά θερμοκρασίας) μεταξύ του PCM και του ρευστού αναφοράς σε οποιοδήποτε καθορισμένο χρόνο και όχι στη χρήση της χρονικής καθυστέρησης σε οποιαδήποτε διευκρινισμένη θερμοκρασία, όπως

συμβαίνει με την αρχική μέθοδο T-History. Αυτή η θεμελιώδης αλλαγή οδηγεί στην αυξανόμενη ακρίβεια και στη σημαντική μείωση της διάρκειας της εργασίας της επεξεργασίας μέτρησης, για λόγους που έχουν εξηγηθεί λεπτομερώς στα προηγούμενα τμήματα. Οι προτεινόμενες αλλαγές στο είδος και στην παρουσίαση του σχήματος των τελικών αποτελεσμάτων συσχετίζεται με τη αποτελεσματική λειτουργία της θερμική ικανότητας $C_{p,eff}(T)$. Αυτή η λειτουργία περιέχει πολύ περισσότερες πληροφορίες από τα τελικά αποτελέσματα που δίνονται με την αρχική μέθοδο, όπως εξηγείται στα προηγούμενα τμήματα. Επιπλέον, το $C_{p,eff}(T)$ παρέχει τη δυνατότητα να συγκριθεί με διαφορετικό PCM και είναι πιά χρήσιμο στις περισσότερες εφαρμογές και ειδικά σε αριθμητικούς υπολογισμούς. Η βελτιωμένη μέθοδος με τη σχετική διαδικασία «θερμική καθυστέρηση» που περιγράφηκε ανωτέρω εξετάστηκε επιτυχώς με την μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων διαφόρων PCM. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα για τη συνηθισμένη παραφίνη της ελληνικής αγοράς λήφθηκαν υπόψη λεπτομερώς. Η νέα διαδικασία θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια προσπάθεια να τεθεί μια βάση για τις προδιαγραφές για την μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων του PCM. Οι μετρήσεις που έγιναν προτείνουν ότι τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και το ποσοστό ψύξης που επιβάλλονται. Επομένως, ακρίβεια των ιδιοτήτων PCM σε οποιαδήποτε ιδιαίτερη εφαρμογή μπορεί να εξασφαλιστεί μόνο με την επανάληψη των μετρήσεων κάτω από θερμικούς όρους της εφαρμογής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης

Η μετάδοση θερμότητας στην αποθήκευση με PCM είναι ένα περιοδικό μη-γραμμικό φαινόμενο με μία μεταβαλλόμενη διεπιφάνεια μεταξύ των φάσεων του στερεού και του υγρού, το οποίο γενικά αναφέρεται ως το πρόβλημα των κινούμενων ορίων. Η μεταβλητότητα των ορίων, μάλιστα, σε τέτοια προβλήματα καθορίζεται από τη λανθάνουσα θερμότητα η οποία απελευθερώνεται ή αποδίδεται στο όριο. Η μη-γραμμικότητα είναι η πηγή των προβλημάτων στα προβλήματα κινούμενων ορίων, εξαιτίας της οποίας η αναλυτική λύση τέτοιων προβλημάτων είναι γνωστή μόνο για πολύ λίγες περιπτώσεις, όπως για μία απλή γεωμετρία ή για πρόβλημα με απλές συνθήκες ορίων. Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι, ώστε να επιτύχουν μία λύση του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας που να είναι αρκετά ακριβής.

Τα προβλήματα αλλαγής φάσης συνήθως επιλύονται με πεπερασμένες διαφορές ή πεπερασμένα στοιχεία σύμφωνα με την αριθμητική προσέγγιση. Το φαινόμενο αλλαγής φάσης πρέπει να μοντελοποιηθεί ξεχωριστά εξαιτίας της μή-γραμμικής φύσης του προβλήματος. Έχει αναπτυχθεί μία μεγάλη γκάμα αριθμητικών μεθόδων για επίλυση των προβλημάτων με τα PCM. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι η μέθοδος της ενθαλπίας και η μέθοδος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας. Αυτές οι μέθοδοι είναι ικανές να προσεγγίσουν PCM με ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών αλλαγής φάσης. Επίσης, ανήκουν στην κατηγορία των μεθόδων σταθερού τομέα (fixed-domain methods), οι οποίες αντιμετωπίζουν τη στερεή και την υγρή φάση ως ένα ενιαίο μέσο, ενώ η συνθήκη της διεπιφάνειας των φάσεων υποχωρεί σε μία καινούρια μορφή των εξισώσεων που περιέχουν τα αντίστοιχα μεγέθη για κάθε μία από τις δύο μεθόδους.

Πριν παρουσιαστούν συνοπτικά οι δύο αυτές μέθοδοι, αναφέρεται εδώ η γενική εξίσωση, γνωστή ως η συνθήκη του Stephan, η οποία περιγράφει την παραπάνω διαδικασία:

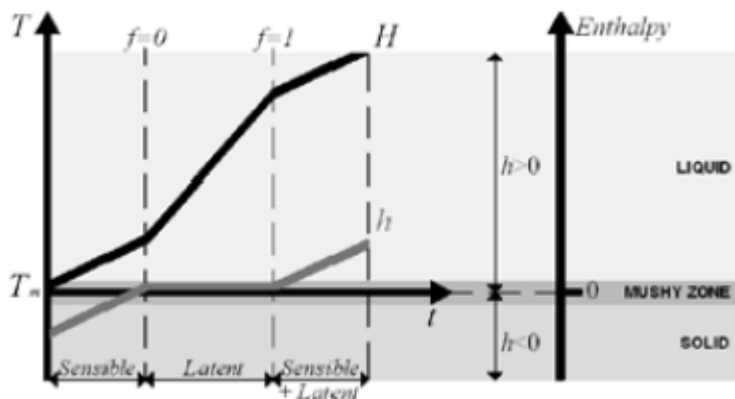
$$\lambda \rho \left(\frac{ds(t)}{dt} \right) = k_s \left(\frac{dT_s}{\delta \tau} \right) - k_l \left(\frac{\delta T_l}{\delta t} \right) \quad (4.1)$$

Όπου είναι λ η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, ρ είναι η πυκνότητα (δεν διευκρινίζεται αν είναι στερεό ή υγρό), $s(t)$ είναι η θέση της επιφάνειας, k είναι η θερμική αγωγιμότητα, t είναι ο χρόνος και T είναι η θερμοκρασία. Οι δείκτες s και l υποδεικνύουν τις φάσεις του στερεού και του υγρού αντίστοιχα.

Τα βασικά προβλήματα, λοιπόν, είναι ότι η θέση και η ταχύτητα των ορίων δεν είναι εκ των προτέρων γνωστά και αφού οι δύο φάσεις εμφανίζουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, πρέπει να προσεχτούν πολύ οι μη-φυσικές ασυνέχειες οι οποίες μπορούν να προκύψουν.[56 – 57]

4.1 Μέθοδος ενθαλπίας

Η μέθοδος της ενθαλπίας βασίζεται σε μία αριθμητική λύση της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς ενθαλπίας. Αναπτύσσοντας τη μέθοδο της ενθαλπίας, το πρόβλημα αλλαγής φάσης γίνεται πιο εύκολο, αφού η κύρια παραπάνω εξίσωση είναι η ίδια και για τις δύο περιπτώσεις, οι συνθήκες της διεπιφάνειας επιτυγχάνονται αυτόματα και δημιουργείται μία πολτώδης ζώνη ανάμεσα στις δύο φάσεις του στερεού και του υγρού. Με αυτή τη ζώνη αποφεύγονται κάποιες απότομες ασυνέχειες, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν αριθμητικές αστάθειες. Βέβαια, είναι εμφανές ότι το πάχος και η ποιότητα της διακριτοποίησης αυτής της ζώνης είναι καθοριστικής σημασίας για τη συμπεριφορά του μοντέλου. Η μέθοδος της ενθαλπίας μπορεί να αντιμετωπίσει και πολτώδη και ισοθερμικά προβλήματα, όμως η θερμοκρασία σε ένα συγκεκριμένο σημείο του πλέγματος μπορεί να ταλαντώνεται με το χρόνο.



Σχ. 4.1.1 Διαμόρφωση ενθαλπίας [52]

Αυτή η μέθοδος έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε πολλές περιπτώσεις. Οι Hunter το 1989 και Amdjadi το 1990 επιβεβαίωσαν ότι η μέθοδος της ενθαλπίας είναι η πιο αρμόζουσα για τυπικές εφαρμογές, κάτω από τον περιορισμό ότι δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο αριθμητικό μοντέλο στην διεπιφάνεια. [52 54]

4.2 Μέθοδος ενεργούς θερμοχωρητικότητας

Η μέθοδος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας είναι η πιο εύχρηστη, αφού ακολουθεί τη διαδικασία της συνηθισμένης αριθμητικής λύσης της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς ενέργειας. Η θερμοχωρητικότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αλλαγής φάσης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, ενώ αναφέρεται με το όνομα ``η συνάρτηση της ενεργούς θερμοχωρητικότητας`` και συμβολίζεται ως $C_{peff}(T)$. Το στοιχείο εκείνο που χρειάζεται μεγάλη προσοχή είναι η επιλογή της σωστής συνάρτησης για το $C_{peff}(T)$.

Τα μόνα δεδομένα τα οποία χρειάζονται ώστε να δημιουργηθούν απλές συναρτήσεις του $C_{peff}(T)$ είναι η θερμότητα αλλαγής φάσης του PCM που συμβολίζεται ως H , οι θερμοκρασίες T_s και T_l στο τέλος των δύο περιοχών φάσεων του PCM και οι αντίστοιχες θερμοχωρητικότητες σε αυτά τα σημεία C_{ps} και C_{pl} . Πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι σε όλες τις προσεγγίσεις υπάρχει ένα ασυνεχές σημείο αναβαθμού στη συμπεριφορά της ενεργούς

θερμοχωρητικότητας, το οποίο μπορεί να προκαλέσει αριθμητικές ταλαντώσεις, εξαιτίας της αδυναμίας που υπάρχει να αξιολογηθεί η μήτρα του μεγέθους της χωρητικότητας. [54 – 55]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Εφαρμογές PCM

5.1 Γενικές

Η πρώτη χρήση των PCMs έγινε με τη χρήση του πάγου στις διάφορες εφαρμογές της ιατρικής και της συντήρησης τροφίμων. Η χρησιμοποίηση άλλων PCMs, εκτός πάγου-νερού, σε ενεργητικά και παθητικά συστήματα ξεκίνησε ήδη, αν και σε πρώιμο στάδιο από το 1940. Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας σε λανθάνουσα μορφή είναι αρκετά εκτεταμένες.

Όπως έχει γίνει κατανοητό, το γεγονός ότι υπάρχουν πάρα πολλά είδη PCM τα οποία μάλιστα μπορούν να παραχθούν σε πολύ μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος, έχει δώσει την ευκαιρία για μεγάλη ποικιλία εφαρμογών άμεσης ή έμμεσης αποθήκευσης θερμότητας. Η αποθήκευση της ενέργειας, όπως θα γίνει εμφανές και από τα κεφάλαια που ακολουθούν, είναι ένα πολύ σημαντικό μέσο εξοικονόμησης ενέργειας. Η μικρής διάρκειας αποθήκευση είναι απαραίτητη σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές, ενώ τώρα μελετώνται και εγκαταστάσεις μεγάλης διάρκειας αποθήκευσης.

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη αναφορά σε διάφορα είδη εφαρμογών των PCM. Άλλωστε η χρήση των PCM δεν περιορίζεται μόνο σε κτιριακές εφαρμογές, που είναι και το κύριο θέμα της παρούσας εργασίας, αλλά καλύπτει μεγάλη γκάμα και είναι μία αποτελεσματική λύση για διάφορες καθημερινές και μη ανάγκες. [22]

5.1.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία έχουν ενσωματωθεί σε κτίρια (Building Integrated Photovoltaic systems-BIPVs) είναι αναγνωρισμένα ως η καλύτερη εφαρμογή της φωτοβολταϊκής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Και αυτό διότι εκτός από την παραγωγή ενέργειας, τα BIPVs μπορούν να αντικαταστήσουν κάποια από τα υλικά στέγασης και εσωτερικής επένδυσης, μειώνοντας έτσι το καθαρό κόστος των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το μεγαλύτερο πρόβλημα στα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι ότι οι αυξημένες θερμοκρασίες λειτουργίας, που συχνά εμφανίζονται, μειώνουν την ικανότητά τους για μετατροπή της ηλιακής ενέργειας. Το ποσοστό μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι μόνο 16%, ενώ η υπόλοιπη ηλιοφάνεια η οποία απορροφάται από ένα τέτοιο σύστημα μετατρέπεται σε θερμότητα. Έχει γίνει αρκετή έρευνα ως προς το πώς η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει την παραγωγή ενέργειας των κελιών του πλαισίου, αλλά ελάχιστη έρευνα για το πώς θα μπορούσε να ελέγχεται αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας. [58, 59]



Σχ. 5.1.1.1 Στέγη σκεπασμένη με λεπτές σανίδες, μεταλλική στέγη με υπέρυθρη-αντανακλαστική επίστρωση και μεταλλική στέγη με PV πάνελ με PCM [60]

Τα PCM, όπως είναι γνωστό, μπορούν να απορροφήσουν μεγάλα ποσά ενέργειας κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης, γι' αυτό και μελετώνται ως κατάλληλα για θερμική αποθήκευση. Έχει μελετηθεί, λοιπόν, από τον M.J.Huang και την ομάδα του το 2006, ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί PCM για να απορροφήσει ενέργεια ως λανθάνουσα θερμότητα σε μία σταθερή θερμοκρασία

αλλαγής φάσης και να ομαλοποιήσει την αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σε αυτές τις μελέτες χρησιμοποιήθηκαν PCMs που ήταν βασισμένα στο κερί παραφίνης, με διαφορετικά είδη αλλαγής φάσης (στερεού-υγρού και στερεού-στερεού) για να καθοριστούν οι βέλτιστες ιδιότητες της ομαλοποίησης της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Χρησιμοποιώντας το σύνθετο σύστημα PV/PCM με ένα απλό PCM RT25 η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού μπορούσε να φτάσει τους 38°C κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, η οποία ήταν 18°C λιγότερο από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς με τις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος. Διαπιστώθηκε, όμως, ότι η θερμική αγωγιμότητα του PCM και η διαστολή του όγκου του κατά τη διάρκεια της τήξης, ήταν τα βασικά εμπόδια για αυτήν την εφαρμογή.

Επίσης, μία σειρά από μελέτες με ενσωματωμένα πτερύγια στο σύνθετο σύστημα PV/PCM έχουν γίνει πειραματικά. Αν και τα μεταλλικά πτερύγια μπορούν να βελτιώσουν τη μετάδοση θερμότητας στο PV/PCM σύστημα, η περίοδος θερμικής ομαλοποίησης μειώνεται καθώς ο όγκος του PCM αντικαθίσταται από τη μεταλλική μάζα του σύνθετου συστήματος. Επιπλέον, βρέθηκε ότι κατά τη διάρκεια της αποκρυστάλλωσης, η κοιλότητα αέρα η οποία σχηματίζεται μέσα στο PCM, θα μεγαλώσει τη θερμική αντίσταση όταν χρησιμοποιείται για θερμική ομαλοποίηση κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Οι επόμενες μελέτες, από τον Hasan και την ομάδα του το 2010, χρησιμοποίησαν άλλου είδους PCM, όπως ένα ευτηκτικό μείγμα καπρικού και λαυρικού οξέος ή ένα ευτηκτικό καπρικού και παλμιτικού οξέος και ένα εμπορικό μείγμα ένυδρου άλατος και παραφίνης. Από αυτές τις μελέτες βρέθηκε ότι ειδικά τα_ευτηκτικά μείγματα με τη μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα είχαν καλύτερη συμπεριφορά στη θερμική ομαλοποίηση σε σύγκριση με το κερί παραφίνης, για τα σύνθετα συστήματα PV/PCM και για εσωτερικές συνθήκες.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί και η προσπάθεια που έγινε από τον M.J.Huang για χρησιμοποίηση δύο PCM βασισμένα στην παραφίνη, με διαφορετικές θερμοκρασίες αλλαγής φάσης, ώστε να βελτιωθεί η ομαλοποίηση της θερμότητας στο σύστημα PV/PCM και να αυξηθεί η περίοδος της ομαλοποιημένης θερμοκρασίας στο σύστημα. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ θετικά ως προς τα δύο αυτά στοιχεία, αλλά και ως προς την αύξηση του ποσοστού μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και ως προς τη μείωση της διαστολής του όγκου του PCM, σε σχέση μάλιστα και με τις προηγούμενες εφαρμογές.

5.1.2 Θερμική ένδυση [61, 62]

Οι θεμελιώδεις αρχές της επιστήμης χρησιμοποιούνται ραγδαία των τελευταίο καιρό για παραγωγή πρωτοποριακών προϊόντων κλωστοϋφαντουργίας. Μία από αυτές τις αρχές είναι και το φαινόμενο της αλλαγής φάσης.



Σχ. 5.1.2.1 Προϊόντα για χρήση ύπνου [63]

Η μέθοδος ενσωμάτωσης μικροκαψουλών με PCM στα υφάσματα, ώστε να βελτιωθεί η θερμική τους συμπεριφορά, ξεκίνησε από την NASA στις αρχές του 1980. Η αρχική σκέψη ήταν να χρησιμοποιηθούν αυτά τα σύνθετα υφάσματα στις στολές των αστροναυτών, ώστε να τους παρέχουν βελτιωμένη θερμική προστασία ενάντια στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του διαστήματος. Από την πρώτη αυτή εφαρμογή, όμως, αυτή η τεχνική της ενσωμάτωσης έχει διευρυνθεί και σε πολλά καταναλωτικά προϊόντα.

Τα ενδύματα που περιέχουν PCM αντιδρούν ακαριαία στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και των διάφορων μερών του σώματος. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, τότε οι μικροκάψουλες απορροφούν και αποθηκεύουν την ενέργεια στο ρευστοποιημένο PCM. Όταν η θερμοκρασία μειώνεται ξανά, τότε η ενέργεια απελευθερώνεται και το PCM στερεοποιείται. Επίσης, εκτός από τη προστασία από τη ζέστη, η ικανότητα για θερμική μόνωση των ενδυμάτων προστασίας από το κρύο μπορεί να βελτιωθεί πολύ από την ενσωμάτωση των

μικροκαψουλών PCM. Τα παραφινούχα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως εμφανίζουν την αλλαγή φάσης τους περίπου στους 28-30°C.



Σχ. 5.1.2.2 Προϊόντα για χρήση στις ένοπλες δυνάμεις [63]

Είναι χαρακτηριστικό το ποσοστό που δίνουν οι έρευνες για ένα μεταχειρισμένο ύφασμα με 22,9% προσθήκη μικροκαψουλών PCM, το οποίο μπορεί να απορροφήσει 4,44J/g της θερμότητας, αν οι μικροκάψουλες στο ύφασμα υποστούν μία διαδικασία τήξης. Η θερμότητα που απορροφάται από τις μικροκάψουλες καθυστερεί την αύξηση της θερμοκρασίας του μικροκλίματος των ρούχων. Αυτό το στοιχείο οδηγεί σε ενισχυμένη θερμοφυσιολογική άνεση και αποτρέπει την αίσθηση της θερμικής δυσφορίας. Ακολουθούν κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής.



Σχ. 5.1.2.3 Προϊόντα για αθλητικές δραστηριότητες [63]

Ευρεία χρήση των μικροκαψουλών PCM παρατηρείται στα αθλητικά ενδύματα, ώστε να έχουν ικανότητες θερμικής ρύθμισης. Είναι απαραίτητο για τη σωστή εφαρμογή να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στο συνδυασμό της ποσότητας PCM που χρησιμοποιείται και του επιπέδου και της διάρκειας της δραστηριότητας για την οποία θα χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο προϊόν. Παραδείγματα σε αυτόν τον τομέα είναι τα γάντια του snowboard και ειδικά εσώρουχα για ice-climbing(αναρρίχηση στον πάγο), ποδηλατοδρομία και τρέξιμο. Ειδικά για τα εσώρουχα, έχει παρατηρηθεί ότι είναι πολύ πιο αποτελεσματικά από τα κλασσικά ισοθερμικά εσώρουχα, αφού διατηρούν άριστα τη καλή θερμοκρασία του σώματος, ώστε να μην είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί κάποιο εξωτερικό ένδυμα υπερβολικά χοντρό και βαρύ.



Σχ. 5.1.2.4 Προϊόντα για χρήση ως εσώρουχα [63]

Μία άλλη πολύ διαφορετική χρήση των PCM είναι σε παπλώματα, μαξιλάρια και καλύμματα στρωμάτων, ώστε να υπάρχει εξασφαλισμένος έλεγχος της θερμοκρασίας στα κρεβάτια. Επίσης, έχουν δημιουργηθεί πολλά υποδήματα με PCM, όπως μπότες για σκι, για ορειβασία και για οδηγούς αγωνιστικών αυτοκινήτων. Τέλος, πολύ σημαντική εφαρμογή έχουν βρει τα ειδικά γιλέκα τα οποία είναι ενισχυμένα με μικροκάψουλες PCM. Τα γιλέκα αυτά μπορούν να φορεθούν αυτόνομα ή σε συνδυασμό με κάποιο ένδυμα, ώστε να απομακρύνουν την επιπλέον θερμότητα σε περίπτωση αυξημένης δραστηριότητας. Τα γιλέκα αυτά έχουν μεγάλη απήχηση στα σώματα ασφαλείας και στις ένοπλες δυνάμεις.

5.1.3 Ιατρικές εφαρμογές [40, 64]

Οι ιατρικές εφαρμογές των PCM είναι υψηλής σημασίας. Οι κυριότερες είναι η μεταφορά του αίματος, τα χειρουργικά τραπέζια και κάποιες ειδικές θεραπείες.

Η μεταφορά του αίματος και των υποπροϊόντων του είναι πολύ κρίσιμη από την άποψη της θερμοκρασίας. Μερικά προϊόντα πρέπει να μεταφέρονται σε θερμοκρασία μεταξύ 20 και 24°C, άλλα μεταξύ 2 και 6°C και άλλα μεταξύ -30 και -26°C. Σχεδιάστηκαν και παρουσιάστηκαν, λοιπόν, ειδικά κιβώτια και θήκες που επιτρέπουν τη μεταφορά των προϊόντων αίματος από το νοσοκομείο στο όχημα μεταφοράς (το οποίο θα είναι ήδη κλιματιζόμενο στη σωστή θερμοκρασία) και από το όχημα μεταφοράς στον τελικό προορισμό.



Σχ. 5.1.3.1 Ειδικές θήκες για μεταφορά αίματος [65]

Η δεύτερη εφαρμογή είναι ένα στρώμα για τα χειρουργικά τραπέζια. Το στρώμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποτρέψει τη μείωση της θερμοκρασίας του σώματος κατά τη διάρκεια πολύωρης εγχείρησης, ή κατά τη διάρκεια εγχείρησης ανθρώπων που έχουν κάποιο σοβαρό έγκαυμα. Το στρώμα θα μπορούσε να θερμανθεί ηλεκτρικά πριν από τη χρήση του και να απελευθερώσει

τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της εγχείρησης. Το κατάλληλο PCM σε αυτή την εφαρμογή θα είχε ένα σημείο τήξης περίπου στους 37°C.

Ένα καινούριο προϊόν που έχει κατασκευαστεί, είναι ένα στρώμα για να θεραπεύσει την υποξία, δηλαδή την έλλειψη οξυγόνου, στα νεογέννητα μωρά. Είναι γνωστό ότι η μείωση της θερμοκρασίας του σώματος των νεογέννητων έχει θετικά αποτελέσματα ως προς αυτό το πρόβλημα, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται για τα μωρά κρύες πετσέτες, ειδικά φάρμακα και διατηρημένα σε ψύξη δωμάτια. Αυτό, όμως, το είδος θεραπείας θα μπορούσε να αντικατασταθεί από τη θεραπεία με ένα στρώμα με PCM, βελτιστοποιώντας και παρατείνοντας έτσι την περίοδο της ομαλοποίησης της θερμοκρασίας.

Άλλου είδους εφαρμογή είναι ζεστά και κρύα μαξιλάρια για θεραπεία του τοπικού πόνου στο σώμα.



Σχ. 5.1.3.2 Ειδικό ζεστό μαξιλάρι με PCM για ιατρικές εφαρμογές [37]

Επιπλέον, επειδή η θερμότητα μπορεί να αποτελεί πρόβλημα και για επαγγελματίες αθλητές και για ηλικιωμένους ανθρώπους με χρόνιες παθήσεις ή για παιδιά, έχουν αναπτυχθεί διάφορα ψυκτικά προϊόντα, όπως περικάρπια, καπέλα, γιλέκα και ειδικά βοηθήματα για τον αυχένα που περιέχουν PCM. Αν η θερμοκρασία του σώματος μπορεί να μειωθεί, τότε οι άνθρωποι θα αισθάνονται μεγαλύτερη άνεση και θα αποτρέπεται ο κίνδυνος για κούραση ή για αφυδάτωση.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί συνοπτικά η εφαρμογή που έγινε για την κρυοχειρουργική. Αν και έχει γίνει ιδιαίτερη έρευνα για να αντιμετωπιστούν οι διαφόρων ειδών όγκοι που σχηματίζονται στο ανθρώπινο σώμα, η θερμική πληγή στα υπόλοιπα μέρη του σώματος και ειδικά σε εκείνα που βρίσκονται πολύ κοντά στον καρκινικό όγκο, είναι μία πολύ σημαντική εμπλοκή στην κρυοχειρουργική. Πραγματοποιήθηκε, λοιπόν, μία μελέτη ώστε να εμποδιστεί ο υγιής ιστός γύρω από τον καρκινικό ιστό από θερμική βλάβη, χρησιμοποιώντας μικροκάψουλες. Η επιλογή του PCM για αυτήν την εφαρμογή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η μεγάλη ικανότητα για αποθήκευση αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας, η μεγάλη ειδική θερμοχωρητικότητα, η μικρή θερμική αγωγιμότητα στη στερεή και στην υγρή φάση, η κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και φυσικά η συμβατότητα με τον ιστό. Η χρήση λιποσώματος ως κάψουλα μπορεί να μειώσει την τοξικότητα των PCM, αλλά και να συμβάλλει στην περαιτέρω μείωση της θερμικής αγωγιμότητας.



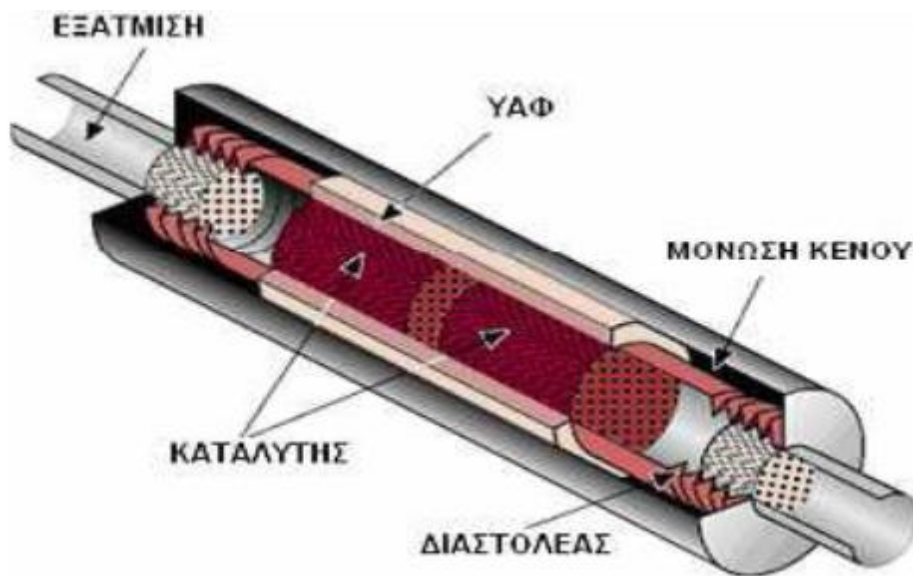
Σχ. 5.1.3.3 Ειδικά ιατρικά βοηθήματα [37]

Οι μικροκάψουλες PCM ενσωματώνονται σε μία περιοχή γύρω από τον καρκινικό όγκο με αρτηριακή, υποδόρια ή άμεση ένεση. Κατά τη διάρκεια της κρυοχειρουργικής επέμβασης, τα PCM προλαμβάνουν τη θερμική βλάβη στον υγιή ιστό αποθηκεύοντας ενέργεια σε μία σταθερή θερμοκρασία, όταν η

θερμοκρασία του υγιούς ιστού φτάσει τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PCM. Επίσης, δεν επιτρέπει τη μεταφορά θερμότητας από τον καρκινικό στον υγιή ιστό εξαιτίας της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας και τέλος η ενσωμάτωσή τους μπορεί να ελαττώσει τη μετάσταση των κελιών του καρκινικού όγκου.

5.1.4 Οχήματα [66 – 68]

Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν βρει εφαρμογή και στην βιομηχανία των αυτοκινήτων, κυρίως ως βοηθητικά μέσα για επίλυση κάποιων προβλημάτων ή για βελτιστοποίηση κάποιων στοιχείων. Έχει πια διαπιστωθεί ότι ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (HS system), προσαρμοσμένο για χρήση σε οχήματα, μπορεί να αποτρέψει μία σειρά από προβλήματα που προκαλούνται από την ``κρύα`` εκκίνηση μίας μηχανής. Τέτοια προβλήματα είναι οι αυξημένες εκπομπές ρύπων, μεγάλη συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογονανθράκων στα καυσαέρια, μείωση του χρόνου ζωής της μηχανής και της ικανότητας για υψηλό φορτίο στους συσσωρευτές και στη μίζα.



Σχ. 5.1.4.1 PCM με καταλυτικό μετατροπέα [67]

5.1.5 Θερμική προστασία ηλεκτρικών μηχανών

Η χρήση των PCM στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα έχει ως κύριο σκοπό την αντιμετώπιση της υπερθέρμανσης όλων των σύνθετων ηλεκτρικών συσκευών. Τα Ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στην υπερθέρμανση, επηρεάζοντας αρνητικά τόσο την διάρκεια ζωής τους όσο και την αξιοπιστία τους. Το πλεονέκτημα είναι ένα μικρότερο σύστημα ψύξης με πολύ υψηλή αξιοπιστία. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι φορητές ηλεκτρικές συσκευές, φορητοί υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα κλπ.

5.1.6 Μεταφορές αγαθών [37]

Έχει, ήδη, αναφερθεί η χρήση των PCM για τη μεταφορά των προϊόντων του αίματος. Αλλά είναι ευρέως γνωστό ότι PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά και τη διατήρηση όλων των πιθανών, ευαίσθητων στις θερμοκρασιακές αλλαγές, προϊόντων. Επομένως, έχουν κατασκευαστεί διάφορων ειδών κιβώτια με αφαιρούμενα μέρη, τα οποία περιέχουν κάποιο PCM (συνηθέστερα το νερό, αλλά σήμερα και άλλα πολλά υλικά που έχουν αναπτυχθεί), το οποίο πρέπει να διατηρείται στο ψύκτη πριν τη χρήση και το οποίο κρατάει μία χαμηλή θερμοκρασία στο κιβώτιο για ένα χρονικό διάστημα.



Σχ. 5.1.6.1 Ειδικά πάνελ με PCM για μεταφορά αγαθών [69]

Μερικές εταιρείες εμπορεύονται κάποια μπλοκ PCM, σαν μαξιλάρια. Τέτοια μπλοκ χρησιμοποιούνται για να κρατήσουν τα προϊόντα ζεστά, όπου τα μπλοκ πρέπει να προετοιμαστούν σε φούρνο ή σε φούρνο μικροκυμάτων, ή για να κρατήσουν τα προϊόντα κρύα, όπου η προετοιμασία γίνεται στο ψύκτη. Αυτά τα εμπορεύματα χρησιμοποιούνται στις αποστολές πλοίων.

Ένα άλλο χρήσιμο καταναλωτικό προϊόν είναι αυτό που ονομάζεται ``isothermal water bottle``, το οποίο αρχικά παρουσιάστηκε για την ποδηλασία, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιοδήποτε άλλο αθλούμενο άτομο. Πρόκειται για ένα διπλού τοιχώματος μπουκάλι, στο οποίο έχει ενσωματωθεί ALCAL ως PCM. Το μπουκάλι έχει χωρητικότητα περίπου 0,5l και πρέπει να διατηρηθεί στο ψύκτη μέχρις ότου να στερεοποιηθεί το PCM και μετά το μπουκάλι θα κρατήσει το αφέψημα κρύο. Επομένως, αυτό το είδος ισοθερμικής διατήρησης είναι χρήσιμο για κρύα υγρά (κρασί ή αναψυκτικά) και για ζεστά υγρά (τσάι, καφέ ή σούπα).



Σχ. 5.1.6.2 Ειδικές θήκες για μεταφορά κρύων ή θερμών υγρών [64]

Τέλος, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου διαφόρων ειδών φαγητά πρέπει να μεταφερθούν από το ένα μέρος στο άλλο μετά την προετοιμασία τους. Τα ειδικά κατασκευασμένα κιβώτια με PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό, ώστε να διατηρήσουν τη λεγόμενη ``cold chain`` στα προϊόντα, δηλαδή

να παρέχουν μία μη διακοπτόμενη αποθήκευση και μεταφορά. Συγκεκριμένα παραδείγματα έχουν εφαρμοστεί για τη μεταφορά φαγητών από καταστήματα γρήγορης εστίασης, όπου παρατηρήθηκε ότι η περίοδος διατήρησής τους σε θερμοκρασία πάνω από 65°C σχεδόν τετραπλασιάστηκε σε σχέση με τα απλά κιβώτια, αλλά και για την αποθήκευση και μεταφορά παγωτού, όπου η θερμοκρασία του διατηρήθηκε κάτω από τους -8°C.



Σχ. 5.1.6.3 Μονωμένα κουτιά με ενσωματωμένο PCM για μεταφορά αγαθών [64]

5.1.7 Φορητές ηλεκτρικές συσκευές [70, 71]

Οι φορητές ηλεκτρικές συσκευές, όπως οι φορητοί υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα, οι προσωπικοί ψηφιακοί κατάλογοι (PDAs), τα mini-laptops και άλλα, έχουν γίνει πολύ δημοφιλή και τείνουν να γίνουν όλο και μικρότερα σε μέγεθος, αλλά εξοπλισμένα με πιο σύνθετα εξαρτήματα και χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα τα κινητά τηλέφωνα πια δεν έχουν μόνο τη δυνατότητα για φωνητικές κλήσεις και για αποστολή σύντομων μηνυμάτων, αλλά μπορούν να χρησιμεύσουν για φωτογραφίες και βίντεο, για αναπαραγωγή μουσικής και για αναζήτηση στο διαδίκτυο. Αυτές οι προσθήκες στο κινητό τηλέφωνο, αλλά και σε όλες τις υπόλοιπες συσκευές έχουν οδηγήσει σε υψηλότερη κατανάλωση ισχύος και σε μεγαλύτερη ποσότητα παραγώμενης ενέργειας, ενώ οι μικρότερες διαστάσεις έχουν μειώσει την επιφάνεια μεταφοράς και απαγωγής θερμότητας.

Ο θερμικός έλεγχος των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων βασίζεται στο σωστό συνδυασμό των υλικών και των τεχνικών μεταφοράς θερμότητας, ώστε να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία των εξαρτημάτων σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Για παράδειγμα, η αποτελεσματική ψύξη απαιτείται στους φορητούς υπολογιστές, ώστε να απομακρυνθεί η θερμότητα απαγωγής από αυτούς κατά την επαφή τους με το δέρμα του χρήστη. Η συμβατική εξαναγκασμένη συναγωγή είναι μία τεχνική ψύξης αρκετά γνωστή. Η εξαναγκασμένη συναγωγή, η οποία χρησιμοποιεί ανεμιστήρες, μπορεί να ενισχύσει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του θερμαινόμενου ηλεκτρονικού εξαρτήματος και του εξωτερικού αέρα. Όμως, αυτή η τεχνική δεν είναι κατάλληλη για τα καινούρια εξαρτήματα, κυρίως λόγω του κόστους, του μεγέθους, της κατανάλωσης ενέργειας, της αξιοπιστίας, του βάρους, του θορύβου και της αισθητικής.

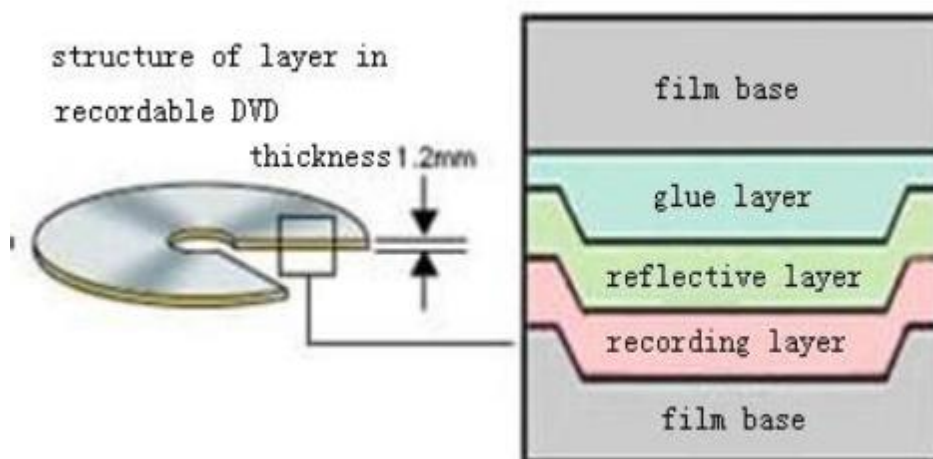


Σχ. 5.1.7.1 Τηλέφωνο με ηλιακές μπαταρίες και θήκη που περιέχει PCM [72]

Μία εναλλακτική μέθοδος ψύξης, η οποία είναι πολύ απλή, είναι η χρήση ενός οργανικού υλικού αλλαγής φάσης (το οποίο πραγματοποιεί αλλαγή φάσης στερεού σε υγρό και αντίστροφα). Η θερμότητα που απάγεται από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα μπορεί να αποθηκευτεί αποτελεσματικά σε μία ψύκτρα PCM, ενώ το PCM αλλάζει φάση από στερεό σε υγρό. Η ψύκτρα PCM μπορεί να παραχθεί με μία απλή σύνθεση ενός PCM ενσωματωμένο σε μικροκάψουλες μέσα σε ένα λεπτό μέταλλο. Το λιωμένο PCM μπορεί να επαναστερεοποιηθεί απάγοντας τη θερμότητα στο περιβάλλοντα χώρο, όταν η ηλεκτρονική συσκευή είναι ανενεργή. Εφόσον η αλλαγή φάσης συμβαίνει σε μία ομοιόμορφη θερμοκρασία τήξης του PCM, η θερμοκρασία της συσκευής μπορεί να διατηρηθεί μέχρι την ολοκληρωμένη τήξη του PCM.

5.1.8 Επαναγραφόμενα CDs και DVDs [73]

Όλα τα καινοτόμα ηλεκτρονικά εξαρτήματα έχουν βασιστεί στην αύξηση της πυκνότητας αποθήκευσης μίας στερεής κατάστασης αμετάβλητης μνήμης, η οποία είναι γνωστή ως ``flash memory``, η οποία λειτουργεί με την εμβολή και την αποθήκευση ενός φορτίου για μία μεγάλη χρονική περίοδο σε μία κυμαινόμενης θύρας κατασκευή. Η επιτυχία μίας τέτοιας μνήμης έχει οδηγήσει στο σχεδιασμό κάποιων εναλλακτικών λύσεων, ώστε οι συσκευές να γίνουν ακόμα μικρότερες και γρηγορότερες και να παρέχουν υψηλή λειτουργικότητα. Μία σπουδαία εναλλακτική μέθοδος είναι η εκμετάλλευση των υλικών αλλαγής φάσης που χρησιμοποιούνται σήμερα σε επαναγράφομενα CDs και DVDs.



Σχ. 5.1.8.1 Σχηματική διάταξη ενός DVD για το οποίο στο στρώμα εγγραφής έχει χρησιμοποιηθεί PCM [74]

Μία μνήμη αλλαγής φάσης λειτουργεί με διαφορετικό τρόπο από αυτόν μίας ``flash`` μνήμης. Τα δεδομένα δεν αποθηκεύονται ως φορτίο, αλλά ως μία φυσική αλλαγή δομής στο υλικό. Αυτά τα υλικά υφίστανται μία σταθερή, γρήγορη και αναστρέψιμη μεταβολή μεταξύ μίας διατεταγμένης κρυσταλλικής μορφής και μίας άτακτης άμορφης ατομικής δομής. Οι δύο φάσεις έχουν διαφορετικές ανακλαστικότητες, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οπτικές μνήμες,

ενώ έχουν και διαφορετικές αγωγιμότητες, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρονικές μνήμες.

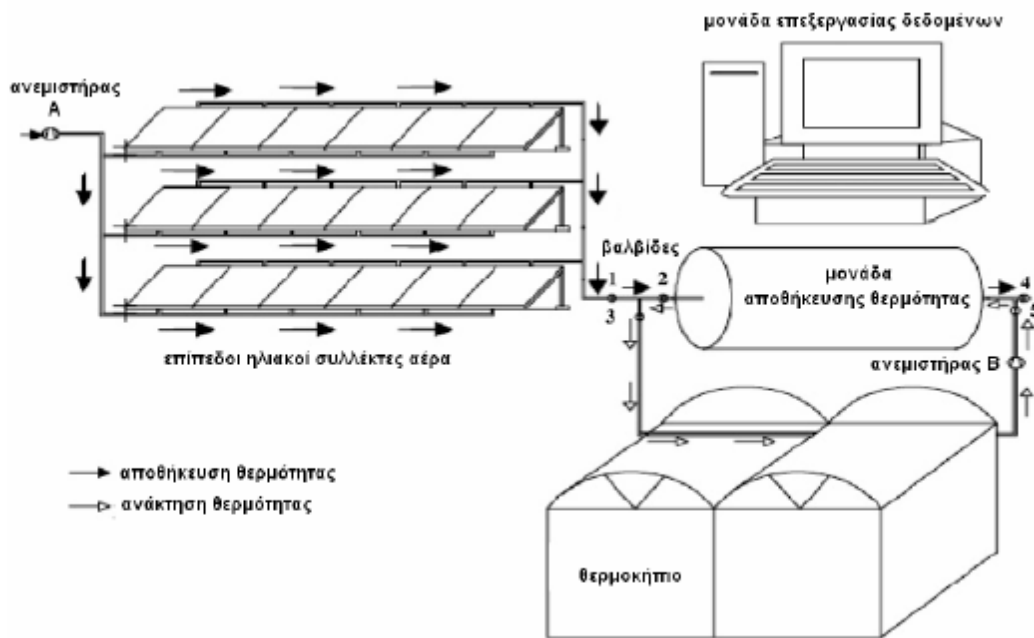
5.1.9 Ηλιακά θερμαινόμενα θερμοκήπια

Η εφαρμογή των PCMs σε θερμοκήπια για την αποθήκευση ηλιακής ενέργειας εφαρμόστηκε τη δεκαετία του '80. Οι Thus, Kern και Aldrich, Nishina και Takakura, Nishina, Jaffrin και Cadier, Jaffrin, Machida, Baille και Boulard, Levav και Zamir και Kurklu και οι συνεργάτες τους, πραγματοποίησαν εκτενείς έρευνες στην εφαρμογή των PCMs για τη θέρμανση θερμοκηπίων.

Η ανάλυση των δεδομένων από τις παραπάνω έρευνες εκτελέστηκε από τον Kurkl. Το $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, το άλας Glauber (sodium sulphate decahydrate) και το polyethylene glycol χρησιμοποιήθηκαν σαν PCM. Όλα τα συστήματα αποθήκευσης των ηλιακών θερμοκηπίων συσώρευαν ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας και τη χρησιμοποιούσαν τις νύχτες ή κατά τη διάρκεια συννεφιασμένων περιόδων.

Οι ερευνητές από το Πανεπιστήμιο Cukurova στην Adana (Τουρκία) σχεδίασαν επίσης και έχτισαν ένα εποχιακό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας για θέρμανση των θερμοκηπίων. Αυτό το σύστημα αποτελούνταν από ηλιακούς θερμαντήρες αέρα, μια εποχιακή μονάδα αποθήκευσης θερμότητας (HSU), ένα πλαστικό θερμοκήπιο και μια μονάδα ελέγχου προγραμματισμένων δεδομένων. Η εξωτερική μονάδα συλλογής θερμότητας (HCU) αποτελούνταν από 27m^2 ηλιακούς θερμαντήρες αέρα, νότιου προσανατολισμού. Κατά μέσο όρο, υπήρχαν $0,15\text{m}^2$ επιφάνειας απορρόφησης ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας του εδάφους του θερμοκηπίου. Μια κυλινδρική δεξαμενή με διάμετρο 1,5m και όγκο 10m^3 χρησιμοποιήθηκε σαν εποχιακή HSU. Δύο τυλίγματα φτιαγμένα από κυματοειδή σωλήνα PCM με συνολικό μήκος 97m και διάμετρο 10cm χρησιμοποιήθηκαν σαν μεταλλάκτες θερμότητας, εγκατεστημένοι στην HSU. Ο όγκος της HSU ανά τετραγωνικό μέτρο των ηλιακών θερμαντήρων αέρα ήταν $0,37\text{m}^3$. Η HSU ήταν γεμισμένη με 6000kg παραφίνης, η οποία αντιστοιχεί σε

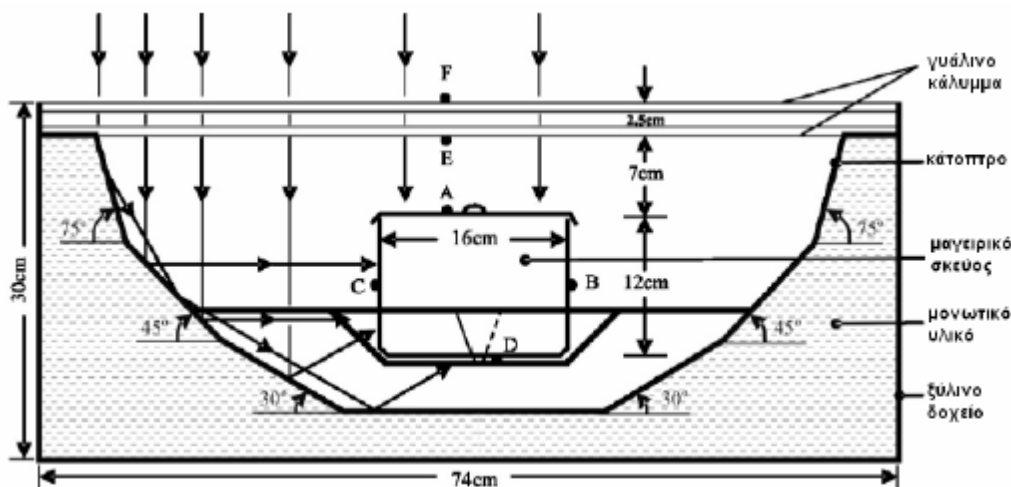
33,3kg παραφίνης ανά τετραγωνικό μέτρο της επιφάνειας του εδάφους του θερμοκηπίου. Το διάστημα θερμοκρασίας τήξης και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του PCM ήταν 48-60°C και 190kJ/kg, αντίστοιχα. Το πειραματικό θερμοκήπιο επιφάνειας πατώματος 180m² (15m x 12m) και ύψους στέγης 2,3m φτιάχτηκε σαν μια γαλβανισμένη μεταλλική κατασκευή σωλήνων, καλυμμένη με μια μονή λωρίδα από PE φίλμ.



Σχ. 5.1.9.1 Σύνθετη διάταξη αποθήκευσης ενέργειας και θέρμανσης θερμοκηπίου [21]

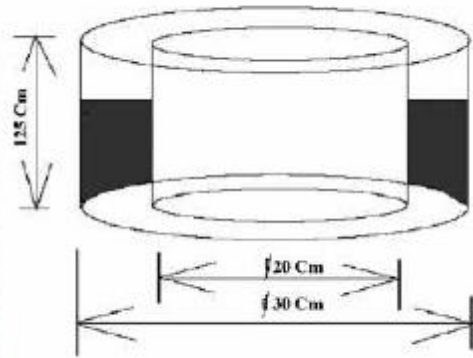
5.1.10 Μαγειρικά σκέυη

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση χώρου και νερού οικιακής χρήσης μέσω ηλιακών συλλεκτών είναι ευρέως διαδεδομένη. Μια εφαρμογή της είναι και η χρήση της στο μαγείρεμα με ειδικά ηλιακά σκεύη. Τα ηλιακά αυτά σκεύη θεωρείται ότι έχουν εξαιρετικό ενεργειακό δυναμικό, ιδίως σε χώρες θερμού κλίματος και υψηλής ηλιοφάνειας. Παρόλα αυτά, η λειτουργία τους περιορίζεται αν δεν είναι εξοπλισμένα με κάποιο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας μιας και είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν χωρίς ηλιακή ακτινοβολία. Σε αυτό ακριβώς το σημείο φαίνεται η μεγάλη σημασία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με PCM, τα οποία σε συνδυασμό με τα ηλιακά σκεύη παρέχουν τη δυνατότητα ηλιακού μαγειρέματος κάτω από οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες.



Σχ. 5.1.10.1 Σχηματική αναπαράσταση ηλιακού μαγειρικού σκεύους [56]

Σήμερα, οι έρευνες στον τομέα των ηλιακών σκευών μαγειρέματος με αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας συνεχίζονται εκτενώς. Πλήθος νέων PCM δοκιμάζονται ώστε να διαπιστωθεί ποια απ' αυτά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς σε εφαρμογές ηλιακού μαγειρέματος, βοηθώντας στην εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων. [57]



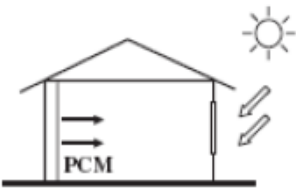
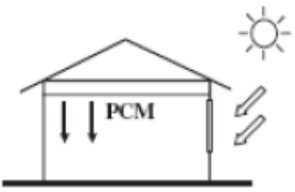
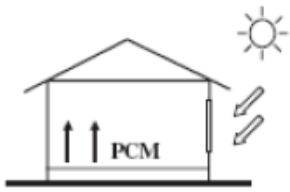
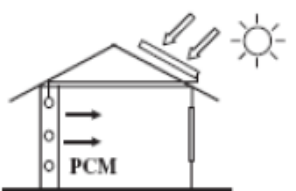
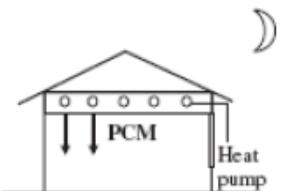
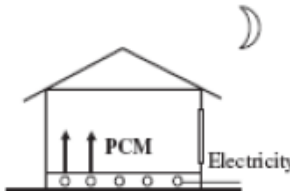
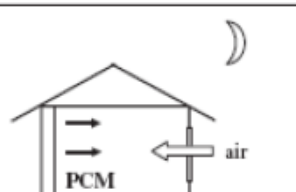
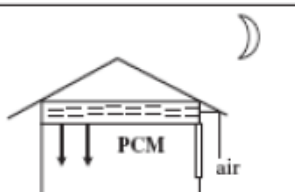
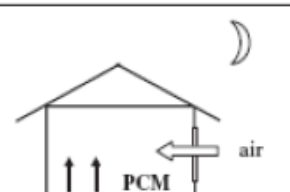
Σχ. 5.1.10.2 Συνδυασμένο σύστημα ηλιακού μαγειρικού σκεύους με υλικό αλλαγής φάσης [21]

5.2 Κτιριακές εφαρμογές

Ένας σημαντικός τομέας εφαρμογής των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με PCM αποτελούν αναμφισβήτητα τα κτίρια. Η μελέτη αποθήκευσης της λανθάνουσας θερμότητας για μετέπειτα χρήση της στη θέρμανση και ψύξη των χώρων ενός κτιρίου προσελκύει ολοένα και περισσότερους ερευνητές. Κι αυτό γιατί παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα:

1. Παρέχει τη δυνατότητα καλύτερης διαχείρισης της ηλεκτρικής ζήτησης. Αυτό οφείλεται στο ότι η ενέργεια, αφού μπορεί να αποθηκευτεί, χρησιμοποιείται μόνο όταν είναι αναγκαία. Έτσι, μειώνεται το χάσμα ανάμεσα στα ενεργειακά φορτία που απαιτούνται από τα κτίρια σε ώρες αιχμής και σε ώρες χαμηλής ζήτησης.
2. Προσφέρει εξοικονόμηση στα λειτουργικά έξοδα. Σε όλες σχεδόν τις χώρες, λόγω εποχικών και άλλων συνθηκών, η ηλεκτρική κατανάλωση διαφέρει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για να εξισορροπηθεί αυτή η διαφορά, ακολουθείται ειδική πολιτική τιμολόγησης του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό σημαίνει πως το ρεύμα που καταναλώνεται σε περιόδους χαμηλής ζήτησης μπορεί να στοιχίζει από 1/3-1/5 της τιμής του ρεύματος αιχμής. Έτσι, αποθηκεύοντας την ενέργεια και χρησιμοποιώντας την σε ώρες χαμηλού κόστους, μειώνονται σημαντικά τα λειτουργικά έξοδα του κτιρίου.
3. Βελτιώνει το βαθμό θερμικής άνεσης ενός κτιρίου. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω της δυνατότητας συνεχούς αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται σε κατάλληλες μονάδες και απελευθερώνεται τη νύχτα, για να θερμαίνεται ο χώρος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εξομάλυνση των ημερήσιων θερμοκρασιακών διακυμάνσεων του χώρου άρα και η βελτίωση της θερμικής του άνεσης.
4. Τέλος, συμβάλλει στη μείωση των ψυκτικών φορτίων του κλιματισμού κατά την περίοδο του καλοκαιριού. Πιο συγκεκριμένα, η δροσιά που δημιουργείται από τη φυσική κυκλοφορία του αέρα τη νύχτα αποθηκεύεται

και χρησιμοποιείται την ημέρα μειώνοντας τη θερμοκρασία του δωματίου. Αυτό συνεπάγεται μικρότερα ψυκτικά φορτία για τον κλιματισμό του χώρου, δηλαδή εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων. [96]

	Walls	Roof	Floor
Passive Solar Heating	 <p>With daytime solar radiation</p>	 <p>With daytime solar radiation</p>	 <p>With daytime solar radiation</p>
Active Heating	 <p>With solar collector system</p>	 <p>With nighttime cheap electricity</p>	 <p>With nighttime cheap electricity</p>
Night Cooling	 <p>With nighttime ventilation</p>	 <p>With nighttime ventilation</p>	 <p>With nighttime ventilation</p>

Σχ. 5.2.1 Τύποι και αποτελέσματα εφαρμογών PCM στα κτίρια

5.2.1 Ενσωμάτωση PCM στα δομικά υλικά

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης στην τοιχοποιία. Οι τρόποι ενσωμάτωσης που έχουν μελετηθεί είναι πολλοί, αλλά οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι η άμεση ενσωμάτωση, η απορρόφηση και η συσκευασία. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι τα PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τη μορφή πολυστρωματικής σανίδας και σε συνδυασμό με τα άλλα υλικά.

i) Άμεση ενσωμάτωση

Αποτελεί την οικονομικότερη μέθοδο αφού δεν απαιτεί ειδικό εξοπλισμό για να πραγματοποιηθεί. Κατά τη διάρκεια παραγωγής δομικών υλικών, όπως ο γύψος ή το τσιμέντο, το υλικό αλλαγής φάσης προστίθεται σε αυτά είτε σε σκόνη είτε ως υγρό και αναμιγνύεται μαζί τους. Έτσι πραγματοποιείται η άμεση ενσωμάτωση τους στα οικοδομικά υλικά. [75-76, 21]

ii) Απορρόφηση

Σε αυτή τη μέθοδο το υλικό αλλαγής φάσης αρχικά θερμαίνεται και λιώνει. Στη συνέχεια τα δομικά υλικά εμβαπτίζονται στο PCM, με αποτέλεσμα το τελευταίο να απορροφάται από τους πόρους τους λόγω των τριχοειδών φαινομένων που αναπτύσσονται. Ακολούθως τα δομικά υλικά απομακρύνονται από το PCM, διατηρώντας το στους πόρους τους.

Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να λάβει χώρα οπουδήποτε και οποιαδήποτε στιγμή, ενώ το πιο σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί ο κίνδυνος διαρροής του PCM από το πορώδες υλικό. [77]

iii) Συσκευασία

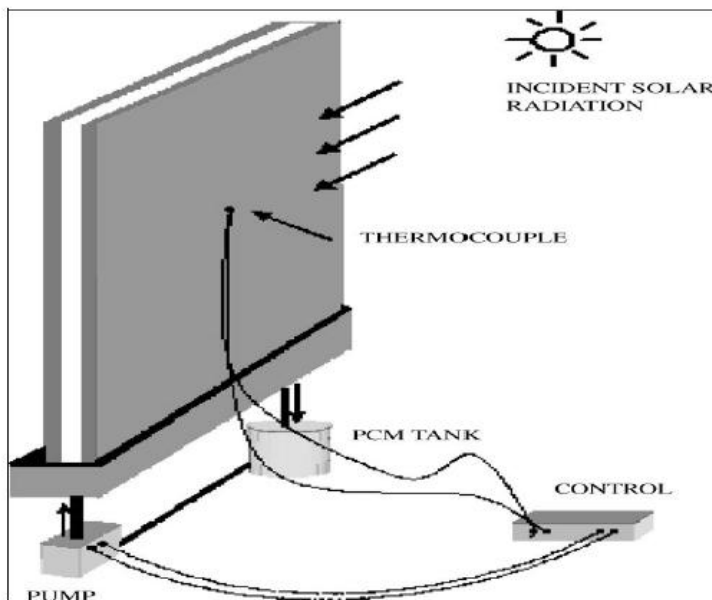
Η συσκευασία των PCM αποτελεί ένα τρόπο αποφυγής των προβλημάτων που δημιουργούνται από τη συνεργασία τους με άλλα δομικά υλικά. Υπάρχουν δύο είδη συσκευασίας: η μακρο-συσκευασία και η μικρο-συσκευασία. [77]



Σχ. 5.2.1.1 Τοίχοι από τσιμέντο και PCM [\[77\]](#)

5.2.2 Ενεργειακά αποδοτικά παράθυρα

Ένα πολύ ενδιαφέρον και καινοτόμο σύστημα μετάδοσης θερμότητας παρουσίασε ο H.Mehling. αυτό το σύστημα αναφέρεται στην μετατροπή απλών παραθύρων σε ενεργειακά με την χρήση υλικών αλλαγής φάσης στα παραθυρόφυλλα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι γρίλλιες παραμένουν ανοιχτές έτσι ώστε η εσωτερική τους πλευρά να είναι εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία την οποία απορροφά το PCM και την αποθηκεύει σαν λανθάνουσα θερμότητα. Ενώ τη νύχτας οι γρίλλιες κλείνουν και μέσω του παραθύρου μεταδίδεται η θερμότητα στους εσωτερικούς χώρους. Ο μελετητής κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η χρήση πατζουριών με PCM μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία δωματίου μέχρι και 2°C.



Σχ. 5.2.2.1 Παράθυρα με PCM [78]

Άλλες μελέτες πάνω στα ενεργειακά παράθυρα πραγματοποίησε ο ερευνητής Ismail και οι συνεργάτες του, πρότειναν ένα άλλο τρόπο δημιουργίας ενεργειακών παραθύρων με PCM. Το συγκεκριμένο παράθυρο αποτελείται από

δύο γυάλινες επιφάνειες ανάμεσα στις οποίες υπάρχει κενό, καθώς επίσης και από ένα αεραγωγό στην επάνω γωνία του παραθύρου. Στη βάση υπάρχουν δύο τρύπες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με μία αντλία και μία δεξαμενή PCM αντίστοιχα, ενώ η υπόλοιπη βάση και οι πλευρές του παραθύρου είναι σφραγισμένες. Η αντλία συνδέεται με τη δεξαμενή η οποία περιέχει το PCM σε υγρή μορφή. Η λειτουργία της ελέγχεται από έναν αισθητήρα θερμοκρασίας, ο οποίος θέτει σε λειτουργία την αντλία όταν η διαφορά θερμοκρασίας φτάσει σε μία προκαθορισμένη τιμή. Σε αυτήν την περίπτωση το υγρό PCM πληρώνει τον κενό χώρο που υπάρχει μεταξύ των δύο επιφανειών του παραθύρου και λόγω της χαμηλότερης εξωτερικής θερμοκρασίας το PCM κρυώνει και στερεοποιείται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος να μένει σταθερή. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου το υλικό αλλαγής φάσης μετατραπεί εξ ολοκλήρου σε στερεό. Ο καλός σχεδιασμός του συγκεκριμένου συστήματος μπορεί να εξασφαλίσει ότι η θερμοκρασία θα αυξηθεί πριν την πλήρη στερεοποίηση του PCM. Σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος να μειωθεί η εσωτερική θερμοκρασία, πράγμα που φυσικά είναι ανεπιθύμητο. [78]



Σχ. 5.2.2.2 Εσωτερικές γρίλιες παραθύρων με PCM [78]

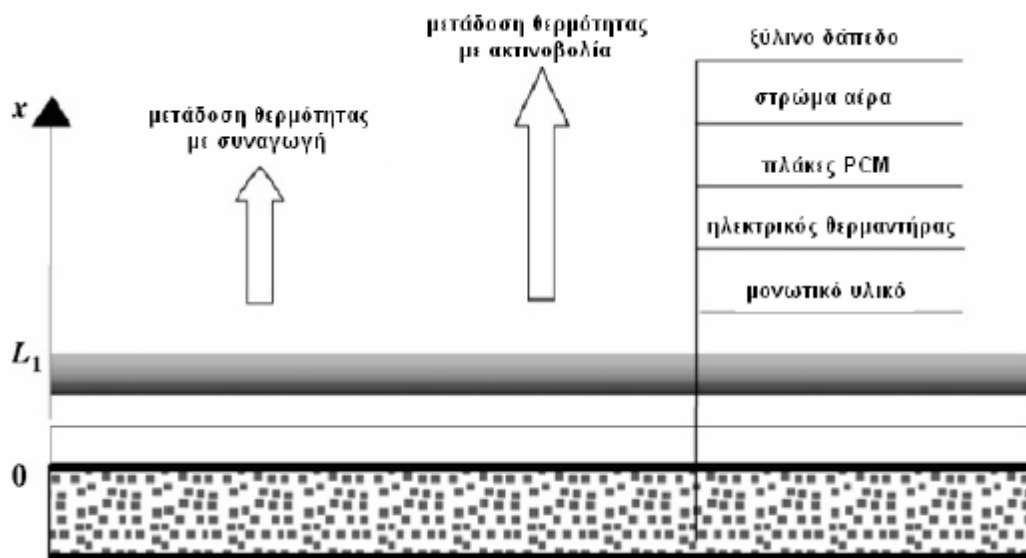
Σύμφωνα με τους μελετητές το παραπάνω σύστημα είναι βιώσιμο και θερμικά αποδοτικό. Η πλήρωση του παραθύρου με το PCM βοηθάει στο φιλτράρισμα της θερμικής ακτινοβολίας και μειώνει τις θερμικές απώλειες, αφού το μεγαλύτερο μέρος της μεταφερόμενης ενέργειας απορροφάται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Ο Weinlader και άλλοι πρότειναν τη χρήση δύο υαλοπινάκων με τοποθετημένο PCM στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ τους. Σε σύγκριση με ένα απλό υαλοπίνακα χωρίς PCM το συγκεκριμένο παράθυρο πέτυχε 30% μείωση θερμικών απωλειών κατά την τοποθέτηση του σε προσόψεις κτιρίων με νότιο προσανατολισμό. [82]

5.2.3 Ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης με PCM

Γενικά η θέρμανση μέσω ακτινοβολίας παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Η θερμική μάζα του δαπέδου αποθηκεύει την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας κάνοντας δυνατή την καλύτερη κατανομή των ενεργειακών φορτίων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική μάζα του δαπέδου (π.χ. τσιμέντο) τόσο μεγαλύτερες είναι και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος. Η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης εγγυάται μεγάλη αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, βελτιώνοντας έτσι το επίπεδο θερμικής άνεσης.

Οι Athienities και Chen επικεντρώθηκαν στη μελέτη του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας στα ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης. Επικεντρώθηκαν στην συμβολή που έχουν τόσο η προσπίπτουσα ακτινοβολία όσο και η επένδυση του πατώματος στη θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος αυτού και στην κατανάλωση ενέργειας. Μελέτησαν πως επηρεάζει η χρήση χαλιών, πλήρους η μερικής κάλυψης καθώς και η ξύλινης επένδυσης πατώματος πάνω από τσιμέντο ή μίγμα γύψου τσιμέντου. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι η θερμοκρασία, που προκαλείται από την εκπεμπόμενη ηλιακή ακτινοβολία στην προσπίπτουσα φωτισμένη περιοχή του δαπέδου, είναι αυξημένη κατά 8 °C σε σχέση με τη θερμοκρασία της σκιασμένης, ενώ η χρήση χαλιού αυξάνει τη διαφορά θερμοκρασίας στους 15°C. Η ενέργεια που αποθηκεύεται στη θερμική μάζα του δαπέδου συμβάλει στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης για θέρμανση κατά τουλάχιστον 30%. [79]

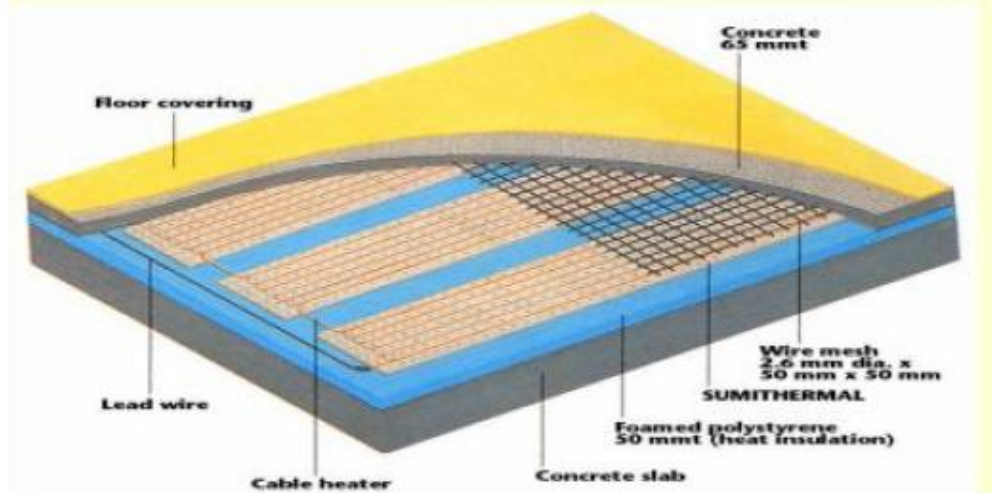
Αξίζει να αναφερθεί η μελέτη του Nagano ο οποίος παρουσίασε ένα ενδοδαπέδιο σύστημα κλιματισμού με λανθάνουσα θερμότητα στα κτίρια. Τοποθετήθηκε PCM κάτω από το πάτωμα με μικρές πολλαπλές οπές. Τα αποτελέσματα των θερμοκρασιακών αλλαγών και της ποσότητας της αποθηκευμένης ενέργειας που μετρήθηκαν ήταν άκρως ικανοποιητικά, καθώς απέδειξαν πως η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να επιτύχει διαχείριση των ενεργειακών φορτίων ενός χώρου. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε ήταν μίγμα παραφίνης σε μορφή κόκκων, πάχους 3cm, ενώ το πείραμα έγινε σε δάπεδο 0,5m². [39]



Σχ. 5.2.3.1 Σχηματική απεικόνιση ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με πλάκες PCM [79]

Οι Farid και Kong ασχολήθηκαν επίσης με τα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Μελέτησαν και σύγκριναν δύο τσιμεντένιες πλάκες που περιείχαν PCM με μια απλή τσιμεντένια πλάκα. Παρατηρήθηκε ότι, σε αντίθεση με την απλή, η διπλή τσιμεντένια πλάκα με το PCM εμφάνιζε μικρότερες διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Επίσης η θερμοκρασία στην επιφάνεια της ήταν αποδεκτή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε ήταν το $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. [80]

Electrical floor heating system with PCM



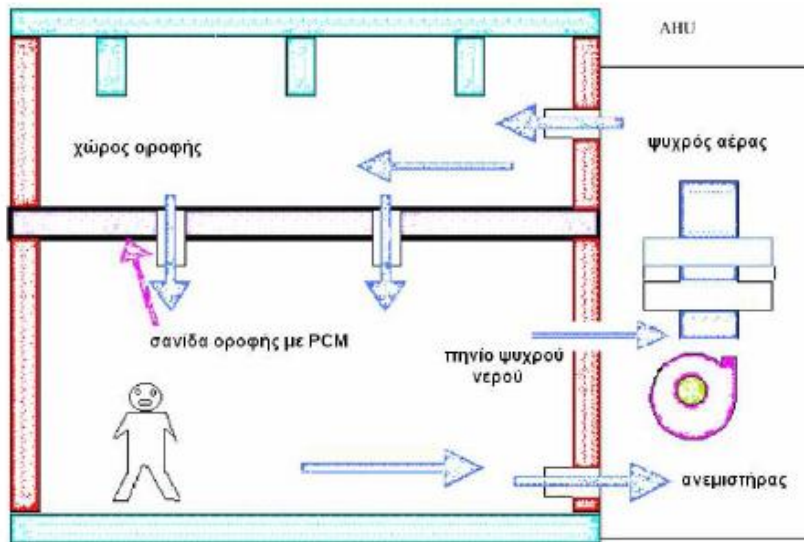
Σχ. 5.2.3.2 Ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης [80]

5.2.4 Οροφές PCM

Στο πανεπιστήμιο της Νότιας Αυστραλίας κατασκευάστηκε ένα νέο σύστημα ηλιακής θέρμανσης. Η συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται από μία μεταλλική οροφή για θέρμανση αέρα. Ο αέρας αυτός διοχετεύεται στο εσωτερικό του κτηρίου ή σε μια δεξαμενή με PCM για την αποθήκευση της θερμότητας η οποία χρησιμοποιείται όταν κρίνεται αναγκαία. Με σκοπό την επίτευξη θερμικής χωρητικότητας ίση με τα εσωτερικά φορτία στο εσωτερικό κτηρίων προτάθηκε η λύση της κατασκευής μίας θερμικά ενεργής ψευδο-οροφής.

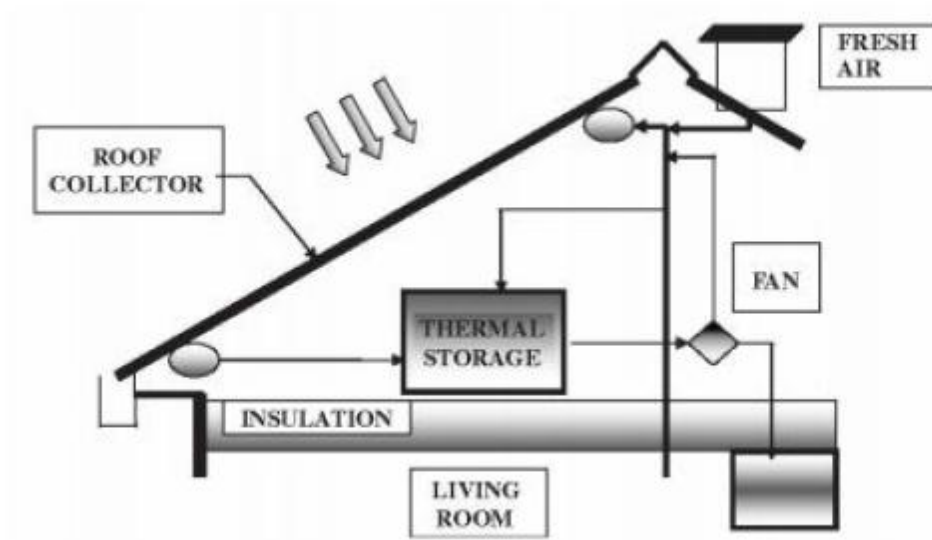
Πολλοί επιστήμονες ασχολήθηκαν με το συγκεκριμένο σύστημα θέρμανσης ο Bruno ανέπτυξε ένα σύστημα δροσισμού χρησιμοποιώντας υλικά αλλαγής φάσης. Συγκεκριμένα χρησιμοποίησε PCM με σημείο τήξης εύρους 20-30°C, που ανταποκρίνεται στη θερμοκρασία θερμικής άνεσης του συγκεκριμένου δωματίου. Με αυτόν τον τρόπο αποθηκεύονταν ενέργεια τις ώρες χαμηλής ζήτησης η οποία αποδιδόταν κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής. [81]

Οι Gutherz και Schiler ανέπτυξαν ένα σύστημα θέρμανσης που περιλαμβάνει τοποθέτηση PCM στο διάκενο της οροφής. Τοποθετήθηκαν ηλιακά κάτοπτρα για να οδηγηθεί η ηλιακή ακτινοβολία από τα παράθυρα προς τα PCM. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι η δυνατότητα του να αποθήκευση θερμότητα, χωρίς την απαίτηση μεγάλων όγκων μέσου αποθήκευσης, πράγμα απαραίτητο σε ένα σύστημα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με το συγκεκριμένο σύστημα μπορούν να ανακτηθούν από 17-36% της χαμένης θερμότητας. [82]



Σχ. 5.2.4.1 Απεικόνιση του συστήματος οροφής με PCM [81]

Τέλος αξιοσημείωτη είναι η μελέτη των Kodo και Ibamoto ως προς την επίδραση χρήσης PCM σε συστήματα κλιματισμού στις οροφές κτιρίων με γραφεία. Η μονωτική επένδυση της σανίδας οροφής εμπλουτίστηκε με μικροσυσκευασμένο PCM σημείου τήξης γύρω στους 25°C. Κατά τη διάρκεια της νύχτας ψυχρός αέρας εισέρχεται στο χώρο από τη μονάδα διαχείρισης αέρα ψύχοντας τη σανίδα με το PCM, με αποτέλεσμα το τελευταίο να αποθηκεύει ψυκτική ενέργεια στο εσωτερικό του και αυτή η ενέργεια αποδίδεται όταν το θερμικό φορτίο γίνεται μέγιστο με αποτέλεσμα να παραμένει ο χώρος δροσερός. Από την πειραματική μελέτη αποδείχθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας το PCM είναι της τάξης των 2°C, ενώ στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης PCM έφτασε τους 6°C. [83]



Σχ. 5.2.4.2 Ηλιακό σύστημα θέρμανσης με PCM ενσωματωμένο σε οροφή [81]

5.2.5 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα με PCM

Οι Telkes και Raymond πραγματοποίησαν μία από τις πρώτες προσπάθειες χρήσης PCM σε ενεργητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης κτιρίων το 1949 στην Αμερική. Μελέτησαν μια μονώροφη κατοικία 5 δωματίων συνολικής έκτασης 135m², μήκους 23m και πλάτους ενός δωματίου. 18 ηλιακοί συλλέκτες, κατασκευασμένοι από γαλβανισμένες απορροφητικές πλάκες λεπτού πάχους, βαμμένες μαύρες και καλυμμένες με διπλά γυάλινα πλαίσια, ήταν υπεύθυνοι για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας. Εν συνεχεία η ενέργεια αυτή μεταφερόταν με τη βοήθεια ανεμιστήρα κατά μήκος ενός αγωγού και κατέληγε σε τρία δοχεία αποθήκευσης τοποθετημένα στις πλευρές των δωματίων.



Σχ. 5.2.5.1 Φωτογραφία ενός συστήματος θέρμανσης αέρα [84]

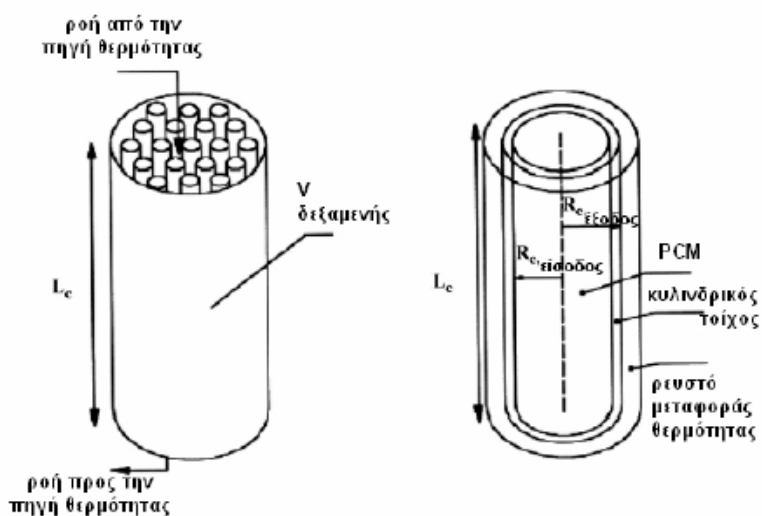
Τα δοχεία αυτά περιείχαν κάδους χωρητικότητας 5 γαλονιών γεμάτους με άλας του Glauber. Η συνολική χρήση 21 τόνων PCM δημιουργεί δυναμικό θερμικής αποθήκευσης 11 GJ, που αντιστοιχεί σε θερμικό φορτίο 12 ημερών, για διακύμανση θερμοκρασίας από αυτή του δωματίου έως τη θερμοκρασία τήξης. Η κατοικία λειτούργησε για 2 χρόνια παρέχοντας θερμική άνεση 21°C χωρίς την

ανάγκη άλλου συστήματος θέρμανσης, το πείραμα όμως δεν είχε επιτυχία καθώς δεν μπόρεσε να αποφευχθεί η διάσπαση του ένυδρου άλατος. [84]

Οι канаδοί επιστήμονες Hodgins και Hoffman πραγματοποίησαν μία ακόμα εφαρμογή PCM σε ηλιακή συστήματα θέρμανσης αέρα. Η μελέτη τους πραγματοποιήθηκε για διώροφη κατοικία 111m², ενώ το σύστημα αποθήκευσης περιλάμβανε 12 τόνους άλατος Glauber, ενισχυμένο με πυριτικό νάτριο και χρωμικό άλας ως ανασταλτικό μέσο διάβρωσης. Και σε αυτό όμως το πείραμα, παρ' όλες τις προσθήκες, δεν αποφεύχθηκε η διάσπαση του άλατος και το πείραμα απέτυχε. Η αποτυχία των δύο παραπάνω πειραμάτων ώθησε στην αριθμητική μοντελοποίηση των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης αέρα με χρήση PCM. [16] Οι Jurinak και Abdel-Khalik ασχολήθηκαν με την επίδραση των παραγόντων, όπως οι διαστάσεις και τα θερμικά χαρακτηριστικά της μονάδας αποθήκευσης, η επιφάνεια και η τοποθεσία των συλλεκτών και πως αυτοί οι παράγοντες επιδρούν στη λειτουργικότητα του συστήματος και διεξήγαγαν κατάλληλα πειράματα χρησιμοποιώντας άλας Glauber και παραφίνη ως υλικά αλλαγής φάσης. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το συγκεκριμένο σύστημα απαιτεί περίπου το ¼ του όγκου αποθήκευσης μιας κλίνης χαλικιών και το ½ μιας απλής δεξαμενής νερού, άρα η χρήση του είναι αρκετά συμφέρουσα ως προς τον όγκο. [85]

5.2.6 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM

Πολλοί ερευνητές στράφηκαν στη χρήση ηλιακών θερμαντήρων νερού για τη θέρμανση κτιριακών εγκαταστάσεων καθώς πρόκειται για μια απλή και φθηνή λύση. Ο Prakash και οι συνεργάτες του ήταν από τους πρώτους που ασχολήθηκαν με ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM. Τοποθέτησαν στον πυθμένα ενός θερμαντήρα στρώμα PCM και ανέλυσαν τη λειτουργία του η οποία είναι η εξής: κατά τη διάρκεια ωρών με ηλιοφάνεια το νερό ζεσταίνεται μεταφέροντας θερμότητα στο PCM που βρίσκεται κάτω από αυτό, με σκοπό το PCM να την αποδώσει τις υπόλοιπες ώρες που το νερό θα είναι κρύο. Βέβαια η ανεπαρκής μετάδοση θερμότητας μεταξύ νερού και PCM έκανε συγκεκριμένο το σύστημα μη αποδοτικό. [29]



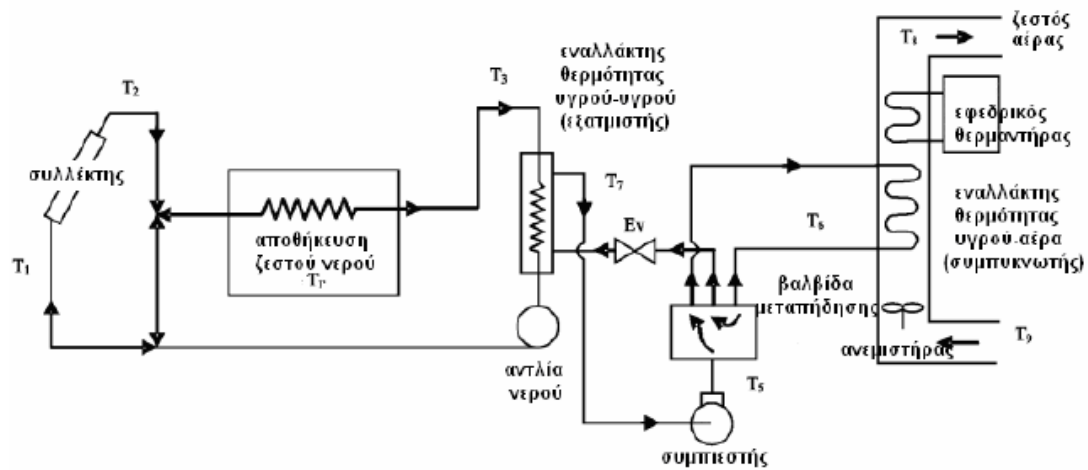
Σχ. 5.2.6.1 Κυλινδρικό δοχείο αποθήκευσης θερμότητας με PCM [29]

Ο Kaygusuz μελέτησε ένα ακόμα ηλιακό σύστημα θέρμανσης, το οποίο σχεδιάστηκε για την θέρμανση εργοστασιακών εγκαταστάσεων και αποτελείται από έναν ηλιακό συλλέκτη, έναν εναλλάκτη θερμότητας νερού-αέρα, έναν εφεδρικό ηλεκτρικό θερμαντήρα, μία αντλία διακίνησης του νερού στο σύστημα σωληνώσεων και εξοπλισμό μέτρησης και αυτόματου ελέγχου. Η ηλιακή ενέργεια που δεσμεύεται από τους συλλέκτες μεταφέρεται στη δεξαμενή αποθήκευσης με τη βοήθεια νερού που ρέει μέσα στις σωληνώσεις. Στο εσωτερικό της δεξαμενής

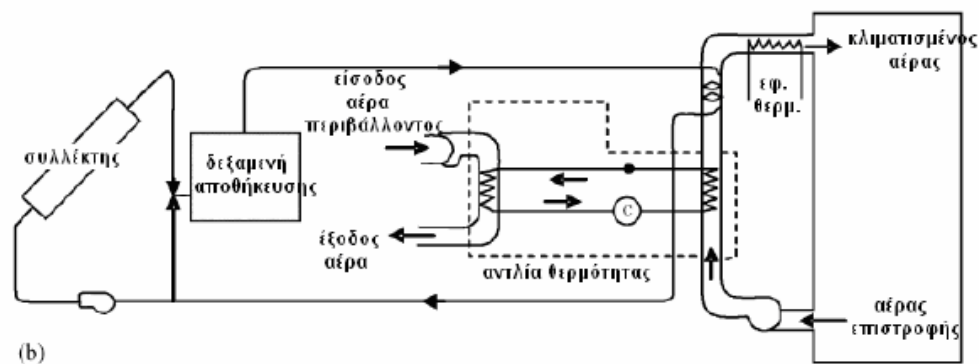
υπάρχουν μικρότεροι σωλήνες που περιέχουν ως PCM χλωριούχο ασβέστιο 6 μορίων νερού. Έτσι η αποθήκευση ενέργειας γίνεται μέσω του PCM και αποδίδεται ανάλογα με τις ανάγκες του κτιρίου κάθε φορά. Όταν το κτίριο απαιτεί θερμικό φορτίο το σύστημα το αποδίδει είτε μέσω της δεξαμενής είτε μέσω του ηλεκτρικού θερμαντήρα. Την καλοκαιρινή περίοδο συγκρίθηκαν οι αποδόσεις του απλού ηλιακού συλλέκτη και του συγκεκριμένου συστήματος με PCM, ο βαθμός απόδοσης του οποίου ήταν καλύτερος λόγω της ικανότητας του για αποθήκευση θερμότητας τις μέρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.

Επίσης πραγματοποιήθηκε θεωρητική προσέγγιση του παραπάνω πειράματος , με την κατασκευή αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης. Τέλος τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα είναι πιο αποδοτικό όταν ως υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται το άλας Glauber είτε το χλωριούχο ασβέστιο 6 μορίων νερού. [86]

Ο Chaurasia πραγματοποίησε μία συγκριτική μελέτη σε ηλιακά συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας με στόχο να διαπιστωθεί κατά πόσο το νερό που έχει ζεσταθεί από τον ήλιο θα παραμείνει θερμό κατά τη διάρκεια της νύχτας. Χρησιμοποίησε δύο πανομοιότυπες μονάδες αποθήκευσης. Η μία περιείχε παραφίνη ως PCM, βάρους 17,5kg, τοποθετημένη μέσα σε σωλήνες αλουμινίου, ενώ η άλλη περιείχε απλά νερό σε μία δεξαμενή. Τα αποτελέσματα από τη φόρτιση των δύο μονάδων έδειξαν ότι η αποθήκευση λανθάνουσας ενέργειας αποφέρει περισσότερο ζεστό νερό σε σύγκριση με την αισθητή. [87]



(a)



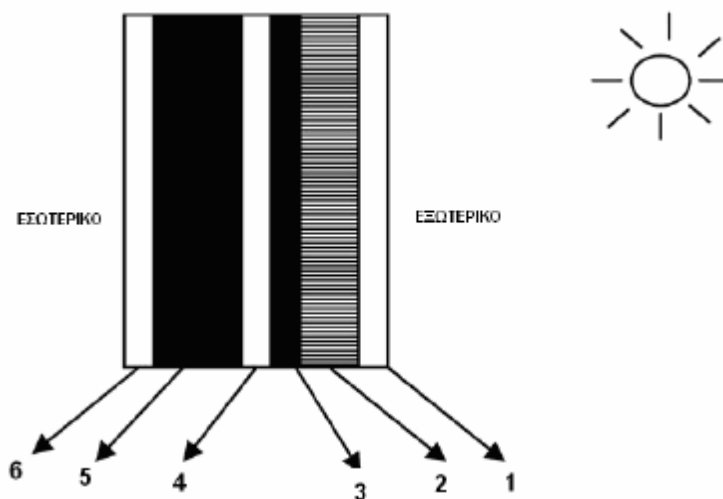
(b)

Σχ. 5.2.6.2 Θερμικά συστήματα αντλιών εκμεταλλεύόμενα τα ηλιακά θερμικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας με PCM [87]

5.2.7 Υλικά αλλαγής φάσης σε τοιχοποιΐα

Πολλές έρευνες και μελέτες έχουν διεξαχθεί για την εύρεση ενός PCM το οποίο να παρέχει γενικές κατευθύνσεις χρήσης και εγκατάστασης, καθώς και για την εύρεση και γενικών οδηγιών για την τελική επιλογή του είδους, της ποσότητας και του τρόπου εφαρμογής του PCM σε τοίχο, με βάση τις εκάστοτε κλιματολογικές συνθήκες. Οι έρευνες έχουν εστιάσει την προσοχή τους στη θερμοκρασία τήξης του PCM το οποίο καθορίζει τη βέλτιστη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας του τοίχου, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας.

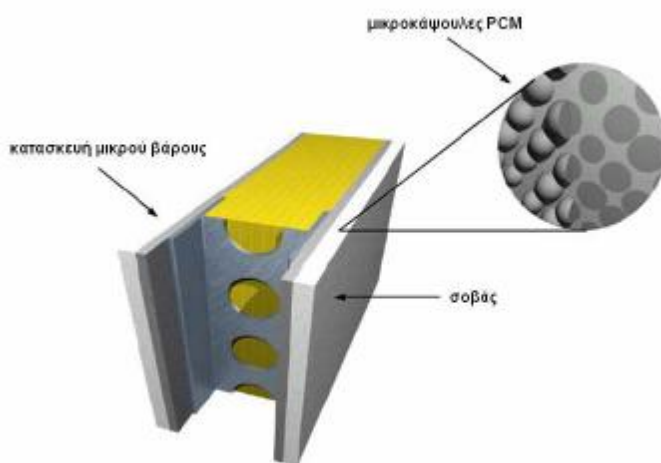
Ο αποδοτικότερος τρόπος ρύθμισης του τοίχου, επιτυγχάνεται με επιλογή PCM του οποίου η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ κοντά με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία του τοίχου και όχι του περιβάλλοντος. Εξισώνοντας τη θερμοκρασία τήξης του PCM με τη μέση ημερήσια του τοίχου μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το μεγαλύτερο μέρος της αποθηκευτικής ικανότητας του PCM, καθώς και να πετύχουμε την εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στον εσωτερικό χώρο. Αφού λοιπόν δύναται να υιοθετηθεί μία μόνο θερμοκρασία αλλαγής φάσης (χρήση ενός μόνο PCM) αποδεικνύεται πως αυτή η θερμοκρασία θα πρέπει να κυμαίνεται γύρω από τη συνολική μέση θερμοκρασία του τοίχου, δηλαδή τη μέση τιμή της ημερήσιας θερμοκρασίας και την μέση τιμή της συνάρτησης της θερμοκρασίας του τοίχου σε σχέση με το πάχος του.



Σχ. 5.2.7.1 Εσωτερική δομή ηλιακού τοίχου [46]

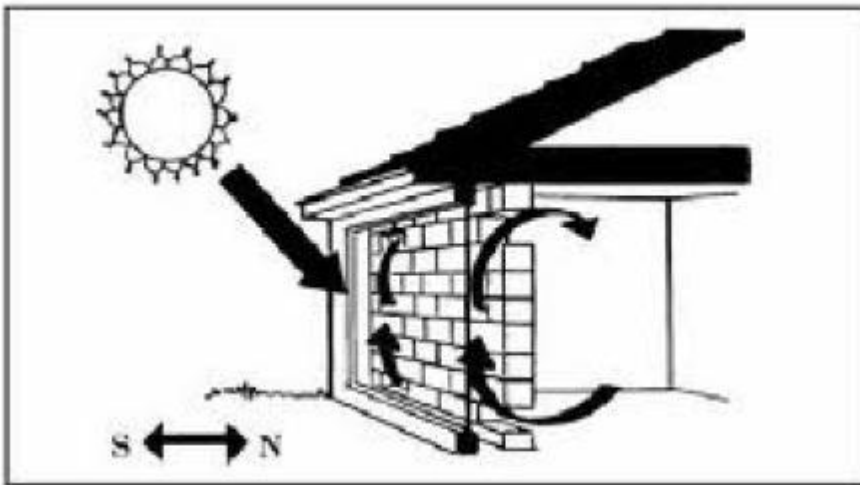
Ένας ηλιακός τοίχος με PCM δεν διαφέρει στον τρόπο λειτουργίας και στα βασικά πλεονεκτήματα. Είναι ικανός να απορροφήσει μία μεγάλη ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στους τοίχους ή στην οροφή ενός κτιρίου. Εξαιτίας της μεγάλης θερμικής μάζας των τοίχων με PCM, είναι ικανοί σχεδόν να μηδενίζουν την επίδραση των μεγάλων διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας στην εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου. Μπορούν να είναι πολύ αποτελεσματικοί στη μετατόπιση του ψυκτικού φορτίου σε περίοδο εκτός αιχμής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην περίπτωση του ηλιακού τοίχου με το PCM, η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο αποθηκεύεται στο PCM, το οποίο είναι ``θαμμένο`` στον τοίχο. Οι Stritih και Novak παρουσίασαν έναν πειραματικό ηλιακό τοίχο για τον αερισμό του κτιρίου, ο οποίος απορροφάει την ηλιακή ενέργεια σε μαύρο κερί παραφίνης με σημείο τήξης τους 25-30°C. Η αποτελεσματικότητα της απορρόφησης διαπιστώθηκε ότι έφτανε το 79%. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης έδειξαν ότι το πάνελ καθορίζει την ποσότητα της ενέργειας που αποθηκεύεται ως αισθητή ή λανθάνουσα θερμότητα και ότι το σημείο τήξης του PCM έχει μία επίδραση στη θερμοκρασία του αέρα που εξέρχεται και αερίζει τον εσωτερικό χώρο.



Σχ. 5.2.7.2 Σχηματική απεικόνιση τοίχου PCM [46]

Η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος διέρχεται από το γυαλί με το διαφανές μονωτικό υλικό (στρώματα 1 και 2), το οποίο εμποδίζει τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και με θερμική ακτινοβολία. Το PCM, το οποίο είναι μέσα σε μία διαφανή πλαστική θήκη (στρώμα 3), απορροφάει και αποθηκεύει ενέργεια κυρίως ως λανθάνουσα θερμότητα. Ο αέρας για τον αερισμό του σπιτιού θερμαίνεται στο κανάλι αέρα (στρώμα 4) και οδηγείται στο δωμάτιο. Η μόνωση (στρώμα 5) και ο γύψος (στρώμα 6) είναι βασικά συστατικά κάθε τέτοιου τοίχου. Αυτή η δομή ενός τοίχου είναι παρόμοια με αυτή που εξετάζεται στη θεωρητική προσομοίωση της εργασίας.

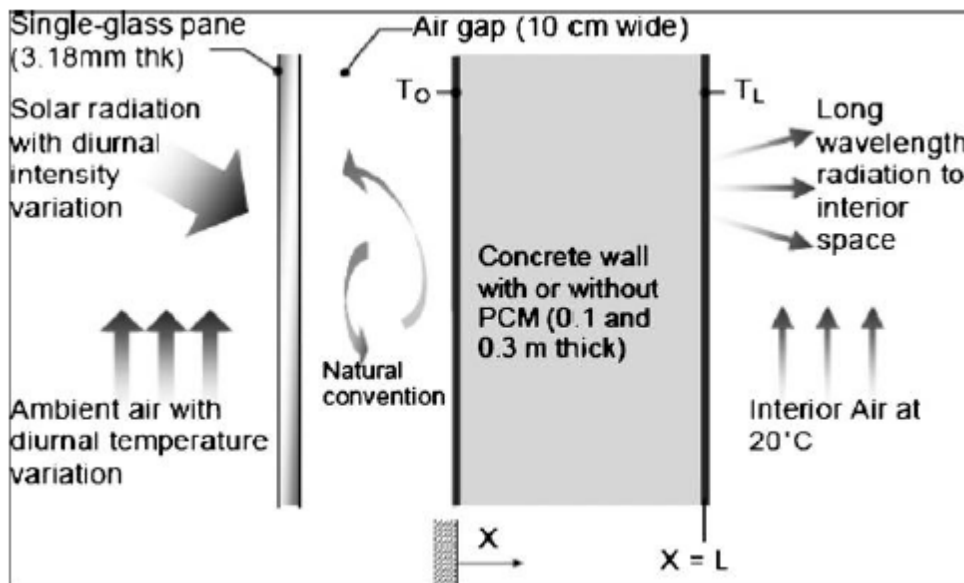


Σχ. 5.2.7.3 Ηλιακός τοίχος με PCM [88]

Ο ηλιακός τοίχος έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα άλλα συστήματα. Η υψηλής αποτελεσματικότητας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα οφείλεται στην απευθείας απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην παραφίνη μέσα από διαφανές πλαστικό κάλυμμα, το οποίο είναι την ίδια στιγμή ένα μονωτικό υλικό που αποτρέπει τις απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας προς τον περιβάλλοντα χώρο. Τέλος, οι απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής από το δωμάτιο μειώνονται και αυτές, στην επιφάνεια στην οποία τοποθετείται ένας τέτοιος τοίχος. [46, 88]

i) Τοίχος Trombe με PCM

Ο τοίχος Trombe είναι ένα πρωταρχικό παράδειγμα μιας προσέγγισης έμμεσου κέρδους. Αποτελείται από ένα λεπτό τοίχο στη νότια πλευρά του σπιτιού. Ένα μονό ή διπλό στρώμα γυαλιού ή πλαστικό τζάμι είναι τοποθετημένο περίπου 4 ίντσες μπροστά από την επιφάνεια του τοίχου. Η ηλιακή θερμότητα συλλέγεται στο χώρο μεταξύ του τοίχου και του τζαμιού.



Σχ. 5.2.7.4 Σχηματική αποτύπωση ενός τοίχου Trombe [21]

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 η θερμότητα ξεκινά να διασκορπίζεται στο δωμάτιο. Οι απώλειες θερμότητας από τον τοίχο Trombe μπορούν να ελεγχθούν από μια κουρτίνα με μόνωση, η οποία είναι κλειστή τη νύχτα στο χώρο μεταξύ του τζαμιού και του τοίχου. Στους τοίχους Trombe, χρησιμοποιούνται PCM όπως salt hydrates και hydrocarbons.

Η Telkes πρότεινε την τοποθέτηση PCM σε τοίχους, μεσότοιχους, ταβάνια και πατώματα, για να εξυπηρετήσουν σαν ρυθμιστές θερμοκρασίας. Τα PCM

χρησιμοποιήθηκαν για να αντικαταστήσουν τη λιθοποιία σε ένα τοίχο Trombe. Ο Askew χρησιμοποίησε ένα πρίσμα 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 Gucerı μελέτησαν τη χρησιμότητα του εγκατεστημένου τοίχου PCM σε ένα κτίριο για νυχτερινή οικιακή θέρμανση, χρησιμοποιώντας ένα μίγμα από το άλας του Glauber και κερί SUNOCO P-116. Παρατηρήθηκε ότι εάν ο τοίχος PCM ήταν κατάλληλα σχεδιασμένος, περιόριζε μερικά από τα μη επιθυμητά χαρακτηριστικά του κανονικού τοίχου με συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Ο Bourdeau έλεγξε δύο τοίχους συλλογής παθητικής αποθήκευσης χρησιμοποιώντας calcium chloride hexahydrate (σημείο τήξης 29°C) ως υλικό αλλαγής φάσης. Κατέληξε ότι ένας τοίχος PCM 8,1cm είχε καλύτερη θερμική απόδοση από ένα κανονικό τοίχο πάχους 40cm.

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

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

Οι Stritih και Novak παρουσίασαν έναν ηλιακό τοίχο για αερισμό κτιρίων, ο οποίος απορροφά ηλιακή ενέργεια σε μαύρο κερί παραφίνης (σημείο τήξης 25-30°C). Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκε για θέρμανση αέρα για τον αερισμό του σπιτιού. Η αποδοτικότητα της απορρόφησης βρέθηκε να είναι 79%. [21, 23]

ii) *Ξηρός τοίχος αλλαγής φάσης εμποτισμένος με PCM*

Ο τύπος του ξηρού τοίχου ή σανίδας τοίχου αλλαγής φάσης είναι υπαρκτός ως ένα δομικό υλικό για αποθήκευση θερμότητας. Στη διάρκεια των τελευταίων 20 χρόνων, διάφορα είδη χονδρικών PCM σε κάψουλες παράχθηκαν για εμπορική χρήση για ενεργητικές ή παθητικές ηλιακές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης και της εφαρμογής άμεσου κέρδους. Δυστυχώς, η επιφάνεια συναλλαγής των περισσότερων τέτοιων προϊόντων δεν επαρκούσε για να παρέχει τη θερμότητα στο κτίριο μετά τη τήξη του PCM εξαιτίας της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

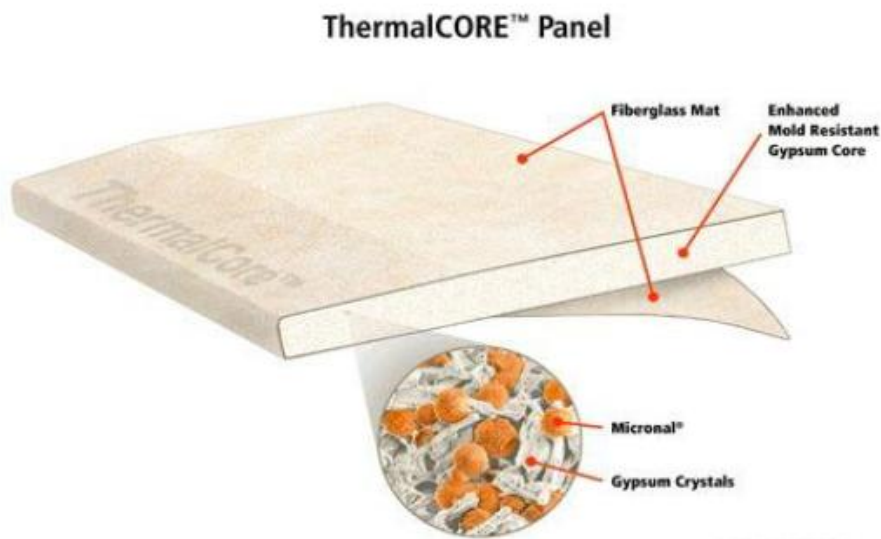
Λόγω αυτών των προβλημάτων υπήρχε η ανάγκη να βρεθεί άλλος τρόπος ενσωμάτωσης των PCM στους κτιριακούς ``φακέλους``. Σε αυτήν την παράγραφο αναλύονται οι τεχνικές παραγωγής, η θερμική συμπεριφορά και οι εφαρμογές της γυψοσανίδας και των μπλοκ τσιμέντου που είναι εμποτισμένα με PCM, ως τρόποι ενσωμάτωσης. Υπάρχουν συγκεκριμένοι λόγοι για τους οποίους στη βιβλιογραφία έχουν επιλεγεί κυρίως αυτά τα δύο δομικά στοιχεία για περαιτέρω μελέτη σχετικά με την ενσωμάτωση σε αυτά διαφόρων υλικών αλλαγής φάσης. Καταρχήν, είναι δεδομένο ότι χρησιμοποιούνται ευρέως σε ένα μεγάλο πλήθος κατασκευών, η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας είναι μεγάλη και το βάθος συναλλαγής θερμότητας είναι μικρό. Επίσης, εξαιτίας της γεωμετρίας τους, της δομής τους και της θέσης στην οποία τοποθετούνται, είναι ικανά να λειτουργήσουν ως αποθήκες θερμότητας, ως αγωγοί και εναλλάκτες θερμότητας αλλά και ως δομικά στοιχεία. Τέλος, ένας άλλος λόγος της ευρείας εφαρμογής τους είναι το χαμηλό κόστος της ανάπτυξής τους και η ευκολία στον έλεγχο της λειτουργίας τους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της σανίδας αποθήκευσης ενέργειας, η θερμότητα εναλλάσσεται κυρίως στην πλευρά η οποία κοιτάζει το δωμάτιο. Στην περίπτωση του μπλοκ τσιμέντου η θερμότητα μπορεί να εναλλάσσεται είτε στην πλευρά που κοιτάζει το δωμάτιο, είτε στην εσωτερική πλευρά (στον πυρήνα), αλλά και στον συνδυασμό αυτών των δύο περιπτώσεων. Τα μπλοκ τσιμέντου εκτός από τοίχους μπορούν να εφαρμοστούν και στο δάπεδο ενός δωματίου. [76, 89]

5.2.8 Γυψοσανίδες με PCM

Οι γυψοσανίδες που είναι εμποτισμένες με PCM μπορούν να τοποθετηθούν στη θέση των συμβατικών σανίδων τοίχου κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή της ανακαίνισης ενός κτιρίου. Μπορούν να παρέχουν θερμική αποθήκευση η οποία 126 διανέμεται σε όλο το κτίριο, κάνοντας εφικτή τη παθητική ηλιακή σχεδίαση και τη ψύξη εκτός φορτίου αιχμής. Ακολουθούν κάποιες από τις πιο γνωστές εφαρμογές σχετικά με τις γυψοσανίδες.

Μία γυψοσανίδα αποθήκευσης ενέργειας κατασκευάστηκε σε εργαστηριακή κλίμακα, με άμεση ενσωμάτωση ποσοστού 21-22% εμπορικής σειράς στεατικού βουτυλίου (BS) στο στάδιο ανάμειξης της παραγωγής μίας συμβατικής γυψοσανίδας, ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση του PCM στις ιδιότητες μίας γυψοσανίδας. Η ενσωμάτωση του BS διευκολύνθηκε από την ύπαρξη και τον τύπο μικρών ποσοτήτων παραγόντων διασποράς. Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες αυτής της εργαστηριακής γυψοσανίδας μπορούσαν να συγκριθούν αρκετά ανταγωνιστικά με τις ιδιότητες της κλασικής γυψοσανίδας. Η θερμοχωρητικότητα είχε δεκαπλασιαστεί σε ικανότητα αποθήκευσης και απελευθέρωσης της θερμότητας σε σχέση με τη γυψοσανίδα χωρίς PCM.



Σχ. 5.2.8.1 Γυψοσανίδα με PCM [89]

Ο Ρεϊρρο και οι συνεργάτες του μελέτησαν μία γυψοσανίδα εμποτισμένη με PCM ως ένα στοιχείο αποθήκευσης σε ένα ελαφρού βάρους παθητικό ηλιακό σπίτι 120m², με καλή μόνωση και μία μεγάλη επιφάνεια νότιων υαλοπινάκων στο Μάντισον. Το σπίτι μπορούσε να εξοικονομήσει μέχρι και 3GJ ή 15% του ετήσιου ενεργειακού κόστους. Επίσης, συμπέραναν ότι η βέλτιστη ημερήσια αποθήκευση θερμότητας συμβαίνει όταν το PCM έχει μία θερμοκρασία τήξης 1-3°C πάνω από τη μέση θερμοκρασία δωματίου. Αντίστοιχα, η ημερήσια αποθήκευση βρέθηκε ότι μειώνεται όταν το PCM είχε θερμοκρασία αλλαγής φάσης που κυμαινόταν σε ένα εύρος θερμοκρασιών. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από άλλες εφαρμογές, όπως αυτή του Neeper, ο οποίος χρησιμοποίησε λιπαρά οξέα και κεριά παραφίνης σε γυψοσανίδες, τις οποίες και εξέθεσε στην ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του δωματίου, αλλά όχι σε άμεση έκθεση στον ήλιο.

TABLE 3. Thermal characteristics of various gypsum-PCM combinations used

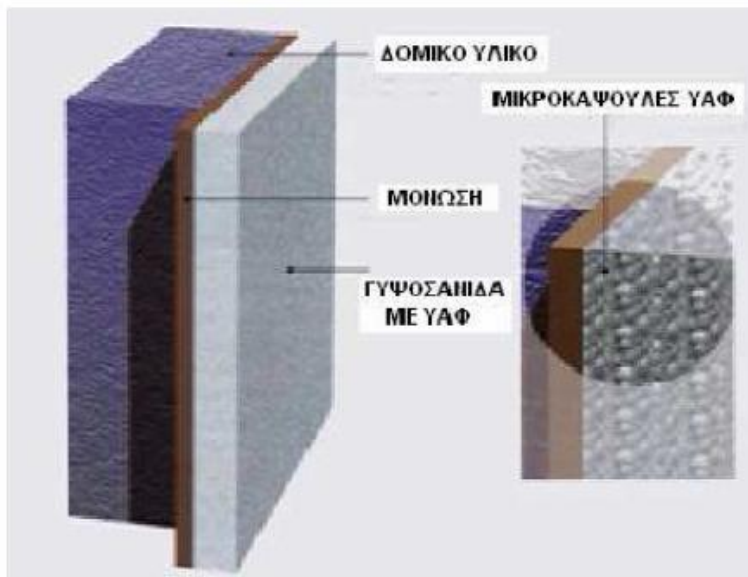
PCM Nature	Melting point (°C)	Freezing point (°C)	Average latent heat of impregnated gypsum (J/g)
45–55% Capric-lauric acid plus fire retardant	17	21	28
Butyl stearate	18	21	30
Propyl palmitate	19	16	40
Dodecanol	20	21	47

Σχ. 5.2.8.2 Θερμικά χαρακτηριστικά διαφόρων συνδυασμών γύψου-PCM [23]

Οι Stetiu και Feustel χρησιμοποίησαν μία θερμική προσομοίωση κτιρίου βασισμένη σε μία προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών, για να εκτιμήσουν αριθμητικά τη συμπεριφορά μίας γυψοσανίδας εμποτισμένης με PCM σε ένα κτίριο όσον αφορά την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Το αποτέλεσμα έδειξε ότι αυτή η γυψοσανίδα, σε συνδυασμό μάλιστα και με μηχανικό νυχτερινό

αερισμό προσφέρει τη δυνατότητα για μεγάλη μείωση των διαστάσεων του συστήματος, ειδικά σε κλίματα στα οποία η εξωτερική θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 18°C κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στην περίπτωση, μάλιστα, ενός πρωτότυπου κτιρίου στην Καλιφόρνια, εκτίμησαν ότι η εφαρμογή της γυψοσανίδας μπορούσε να μειώσει το μέγιστο φορτίο ψύξης κατά 28%.

Οι ίδιοι επιστήμονες μελέτησαν περαιτέρω τη χρήση μίας διπλής γυψοσανίδας με PCM, ώστε να αυξηθεί περισσότερο η ικανότητα αποθήκευσης του κτιρίου, για να είναι εφικτή η διατήρηση των θερμοκρασιών του δωματίου σε τιμές κοντά στο ανώτερο επίπεδο θερμικής άνεσης, ώστε να αποφευχθεί πιθανόν και η χρήση μηχανικής ψύξης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα κατοικήσιμο χώρο με υψηλά εσωτερικά φορτία στην Καλιφόρνια, έδειξαν πολύ μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα του δωματίου όταν η θερμική ενέργεια μπορούσε να αποθηκευτεί στις γυψοσανίδες με PCM. Είναι βέβαια, απαραίτητο να αναφερθεί ότι η ψύξη του κτιριακού ``φακέλου`` μόνο με τη μεταφορά αέρα στο εσωτερικό του δωματίου, παρείχε ένα μη αποτελεσματικό τρόπο μεταφοράς θερμότητας. Ως εκ τούτου, οι επιστήμονες συμπέραναν ότι πιθανή εξαναγκασμένη παροχή αέρα κατά μήκος των επιφανειών των τοίχων, θα ήταν ωφέλιμη για τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας.



Σχ. 5.2.8.3 Εφαρμογή ενισχυμένης γυψοσανίδας σε τοίχο [89]

Οι κτιριακές ενεργειακές προσομοιώσεις βοηθούν στην εκτίμηση των εν δυνάμει εφαρμογών των PCM στη θερμική αποθήκευση στα κτίρια. Γι' αυτό το Ινστιτούτο Fraunhofer στη Γερμανία προσομοίωσε τη θερμική συμπεριφορά των δομικών συστατικών, ώστε να συγκρίνει τη δυναμική επίδοση διαφορετικών τύπων γυψοσανίδων που περιέχουν διαφορετικές ποσότητες PCM. Ανέλυσαν την επίδραση ως μία συνάρτηση του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης, την ποσότητα του PCM και τη κατασκευή και τη χρήση του κτιρίου. Χρησιμοποιώντας θερμογράφους, απεικονίστηκε ποιοτικά η επίδραση των PCM στα οικοδομικά υλικά: τέσσερα δείγματα γυψοσανίδων με διαφορετικές ποσότητες PCM, τα οποία είχαν θερμανθεί σε φούρνο και μετά είχαν παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια της ψύξης. Η διακύμανση της θερμοκρασίας με το χρόνο έδειξε ξεκάθαρα την επίδραση των PCM. Όσο μεγαλύτερη ποσότητα PCM χρησιμοποιείται, τόσο μεγαλύτερη σε διάρκεια είναι η διαδικασία ψύξης. Ως εκ τούτου, σε ένα συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, η θερμική μάζα ενός δομικού στοιχείου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά εξαιτίας της διαδικασίας αλλαγής φάσης, τόσο ώστε η θερμική άνεση η οποία είναι συνήθως συνυφασμένη με μεγάλης μάζας και βαριά κτίρια, να μπορεί να προσεγγιστεί με ελαφριά υλικά κατασκευής.

Οι Kedl και Stoval χρησιμοποίησαν οκταδεκάνιο κερί παραφίνης εμποτισμένο σε γυψοσανίδα για παθητική ηλιακή εφαρμογή, ώστε να διαπιστωθεί ποιος τρόπος είναι πιο αποτελεσματικός για ενσωμάτωση των PCM στις γυψοσανίδες. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι η διαδικασία της απορρόφησης ώστε να γεμίσει η γυψοσανίδα με κερί παραφίνης κλιμακώθηκε επιτυχώς από μικρά δείγματα σε πλήρους μεγέθους φύλλα. Το σημαντικότερο στοιχείο από αυτήν την προσπάθεια ήταν ότι η διαδικασία απορρόφησης έχει το δυναμικό να πετύχει υψηλότερη χωρητικότητα αποθήκευσης από το να γίνει απλή πρόσθεση σφαιριδίων γεμάτων με κερί παραφίνης στο στάδιο της κατασκευής της γυψοσανίδας.

Όσον αφορά τον τρόπο ενσωμάτωσης, μία άλλη εφαρμογή ήταν αυτή των Salyer και Sircar, οι οποίοι όρισαν έναν χαμηλού κόστους αλκυλικό υδρογονάνθρακα ως PCM και ανέπτυξαν μεθόδους ώστε να γίνεται η ενσωμάτωση του PCM σε

γυψοσανίδες, ελαχιστοποιώντας τη διαρροή και τα προβλήματα διαστολής κατά τη τήξη και τη στερεοποίηση. Η πρώτη επιτυχής διαδικασία ενσωμάτωσης ήταν αυτή της εκ των υστέρων απορρόφησης του υγρού PCM από το πορώδες μέρος της ήδη κατασκευασμένης γυψοσανίδας. Η δεύτερη ήταν η ενσωμάτωση ενός πρόσθετου στο υγρό στάδιο κατασκευής της γυψοσανίδας.

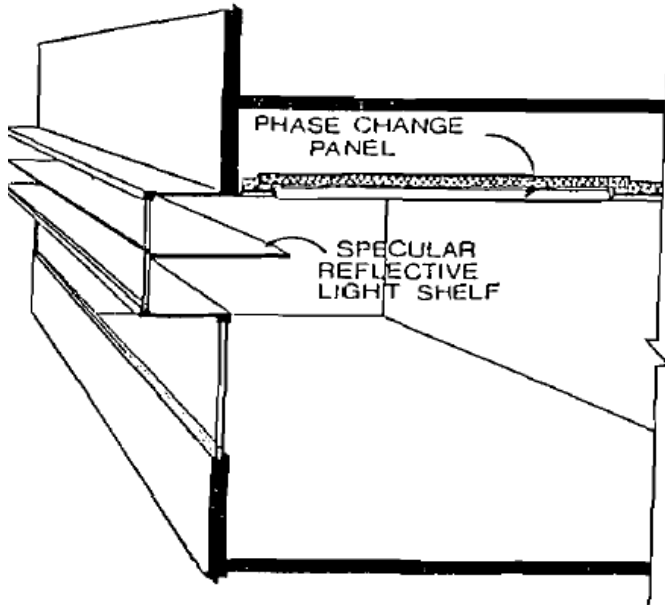
Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η μελέτη των Feldman και Hawes, οι οποίοι πραγματοποίησαν εκτενή μελέτη σχετικά με τη χρήση και τη σταθερότητα οργανικών συστατικών PCM σε γυψοσανίδες. Βρήκαν ότι ο γύψος συνεργάζεται αποτελεσματικά με ένα πλήθος υλικών, ενώ μερικά από αυτά που εξέτασαν ήταν το στεατικό βουτύλιο, το μείγμα καπρικού και λαυρικού οξέος και το παλμιτικό προπύλιο.

Τα αποτελέσματα των τεστ των διαφόρων γυψοσανίδων με PCM ήταν αρκετά ικανοποιητικά. Οι καμπτικές δυνάμεις ήταν συγκρίσιμες με αυτές της συμβατικής γυψοσανίδας, η αντοχή μετά από κύκλους ψύξης-απόψυξης ήταν απολύτως ικανοποιητική, η αντίσταση σε ανάφλεξη ήταν άψογη, η συμβατότητα με τα χρώματα και τις ταπετσαρίες των γυψοσανίδων ήταν αρκετά καλή, η αντοχή σε υγρασία ήταν πιο καλή από αυτήν της συμβατικής γυψοσανίδας, η σταθερότητα των υλικών ήταν σε καλό επίπεδο, ενώ η αποθήκευση ενέργειας είχε σχεδόν δεκαπλασιαστεί. Το βάρος μίας τέτοιας γυψοσανίδας ήταν περίπου κατά 22% μεγαλύτερο από μία γυψοσανίδα χωρίς PCM, αλλά και αυτή η τιμή ήταν αποδεκτή από τα όρια βάρους της βιομηχανίας. [23, 76, 89]

5.2.9 Σανίδες οροφής με PCM

Οι σανίδες οροφής είναι ένα σημαντικό δομικό στοιχείο της στέγης, αφού χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και τη ψύξη των κτιρίων. Έχουν πραγματοποιηθεί και σε αυτό το πεδίο πολλές εφαρμογές, οι οποίες αφορούν εξίσου και ενεργητικά και παθητικά συστήματα.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον Pasupathy, περιλάμβανε δύο όμοιους κατασκευαστικά δειγματικούς χώρους, προκειμένου να ελεγχθεί η επίδραση ενός πάνελ με PCM ενσωματωμένο στη στέγη, για τον θερμικό έλεγχο ενός κατοικήσιμου σπιτιού. Ο ένας από τους δύο χώρους κατασκευάστηκε χωρίς PCM στη στέγη, για να γίνει σύγκριση της θερμικής συμπεριφοράς αυτού του δωματίου, με το δωμάτιο που περιείχε το πάνελ με ένα ανόργανο ευτηκτικό PCM, με θερμοκρασία τήξης στο εύρος 26-28°C. Πραγματοποιήθηκε ένα πλήθος προσομοιώσεων λειτουργίας αυτού του συστήματος, για τις μέσες εξωτερικές συνθήκες και για πολλούς άλλους παράγοντες που προκαλούν ενδιαφέρον. Για τη διάρκεια μάλιστα της θερινής περιόδου, όπου το PCM δεν καταφέρνει να πραγματοποιήσει πάλι αλλαγή φάσης και να στερεοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας, μελετήθηκε η περίπτωση ανάκτησης της θερμότητας από το πάνελ PCM και από την οροφή, με παροχή νερού διαμέσου της πλάκας με το PCM, για την οποία χρησιμοποιήθηκε μία δεξαμενή νερού χωρητικότητας 200 λίτρων.



Σχ. 5.2.9.1 Σανίδες οροφής [90]

Σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα, η χρήση σανίδων οροφής κατέδειξε πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα. Το πρώτο από αυτά ήταν η επίτευξη πιο αποτελεσματικής θερμικής αποθήκευσης, καθώς υψηλής πυκνότητας ψυχρός αέρας ρέει πάνω στη σανίδα με το PCM, η οποία αποτελεί το κάτω μέρος του χώρου της οροφής. Επιπλέον, όλη η σανίδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση, καθώς ο ψυχρός αέρας ρέει μέσω του χώρου της οροφής χωρίς να διακόπτεται από ακτίνες. Τέλος, αφού η θερμοκρασία της επιφάνειας της σανίδας μπορεί να διατηρηθεί κοντά στο σημείο τήξης του PCM, τότε το εσωτερικό θερμικό περιβάλλον μπορεί να βελτιωθεί. [21, 23, 82, 89, 90]

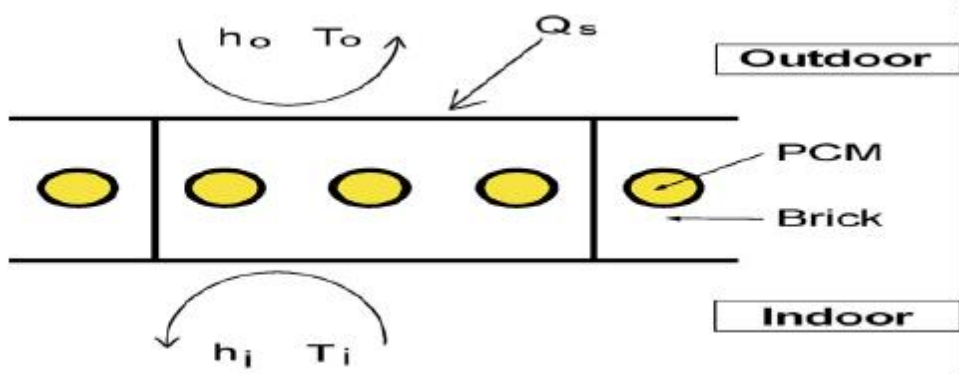
5.2.10 Ενσωμάτωση PCM σκυρόδεμα

Μια άλλη δυνατότητα εφαρμογής των PCMs στις κατασκευές κτιρίων είναι το ενισχυμένο σκυρόδεμα με PCM η ενσωματωμένο σε μείγμα ξύλου – ελαφρού βάρους σκυροδέματος. Ξύλο και ελαφρού βάρους σκυρόδεμα μπορεί να εφαρμοστεί στην κατασκευή εσωτερικής και εξωτερικής τοιχοποιίας κτιρίου και είναι ένα μίγμα τσιμέντου, κομματιών ξύλου ή σκόνης από πριόνι που δεν πρέπει να υπερβαίνει το 15% κατά βάρος, και επίσης νερού και προσθέτων.

Ο Mehling και οι συνεργάτες του έκαναν έρευνες για δύο υλικά PCM με ξύλο-σκυροδέμα τα μοντέλα GR40, 1-3mm και GR50, 0.2- 0,6mm της Rubitherm και αποδείχτηκε ότι τα PCMs μπορούν να συνδυαστούν με το μείγμα και ότι οι μηχανικές ιδιότητες δεν φαίνεται να αλλάζουν σημαντικά. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης του υλικού αυτού είναι η δημιουργία πιο ελαφριών τοίχων με βελτιωμένες θερμικές επιδόσεις αλλά και η ικανότητα θερμικής αποθήκευσης. [89]

5.2.11 Ενσωμάτωση PCM σε τούβλο

Για τη μείωση της ροή θερμότητας από τον εξωτερικό χώρο με απορρόφηση του κέρδους θερμότητας χρησιμοποιούμε το σύστημα τούβλο- PCM ώστε να γίνει απορρόφηση θερμότητας στο τούβλο προτού φθάσει στον εσωτερικό χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται στους εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους κατά τη διάρκεια της νύχτας. [91, 92]



Σχ. 5.2.11.1 Σχηματική απεικόνιση του συστήματος τούβλου-PCM [91]



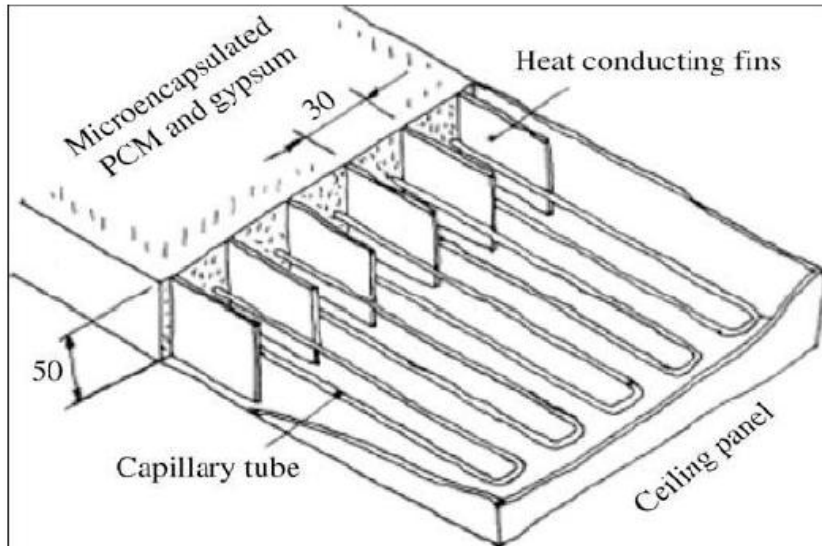
Σχ. 5.2.11.2 Θάλαμος από τούβλο και πολυουρεθάνη [92]

5.2.12 Πολυστρωματική σανίδα από PCM

Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε πολυστρωματικές οικοδομικές σανίδες και να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία ενταγμένα στο κέλυφος του σπιτιού, όπως για παράδειγμα στο εσωτερικό των τοίχων. Από τις έρευνες διαπιστώθηκε ότι η διάρκεια θερμικής επαναφοράς του συστήματος μειώθηκε περίπου 17% σε σχέση με άλλα συστήματα, η θερμική ροή σημείωσε αύξηση κατά 20-50% ενώ ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας κατά 7-18%. [43, 95]

5.2.13 Θερμικά ενεργοποιημένο πάνελ οροφής με PCM

Αυτή η ενεργητική εφαρμογή σχετικά με τα πάνελ οροφής αναφέρεται ξεχωριστά λόγω της σπουδαιότητας της. Σκοπός αυτής της εφαρμογής, η οποία πραγματοποιήθηκε από τους Markus Koschenz και Beat Lehmann, ήταν να χρησιμοποιηθεί ένα τέτοιο σύστημα σε ελαφρού βάρους κτίρια ή ως επιπλέον εξοπλισμός σε ήδη υπάρχοντα, ώστε να χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τη θέρμανση ή τη ψύξη βιομηχανικών και εμπορικών κτιρίων. Η προτεραιότητα των επιστημόνων ήταν να δημιουργηθεί ένα σύστημα, το οποίο να διαθέτει μία ικανότητα θερμικής αποθήκευσης ίση με τα ημερήσια θερμικά κέρδη του κτιρίου, ενώ να απασχολεί και όσο το δυνατόν λιγότερο χώρο.

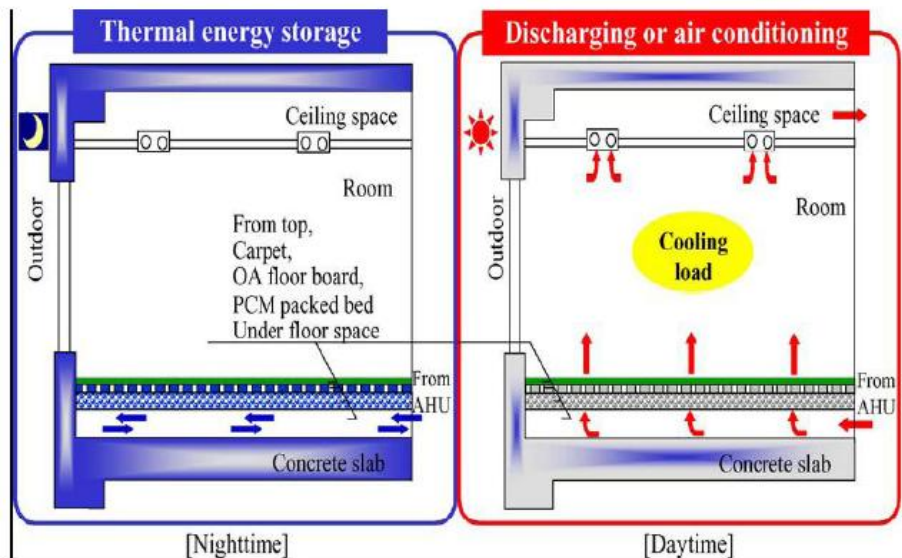


Σχ. 5.2.13.1 Θερμικά ενεργοποιημένο πάνελ οροφής [93]

Η διάρθρωση ενός τέτοιου συστήματος ακολουθεί την παρακάτω δομή. Ένα φύλλο χάλυβα λειτουργεί ως δοχείο μεταφοράς για το σύνθετο μείγμα PCM-γύψος, ενώ επίσης βοηθάει για τη μηχανική σταθερότητα των πάνελ. Πάνω στο δίσκο από χάλυβα χύνεται ένα μείγμα από μικροκάψουλες με PCM και γύψο. Ενεργός έλεγχος της θερμικής μάζας επιτυγχάνεται από την ενσωμάτωση ενός τριχοειδούς συστήματος σωλήνων νερού στο σύνθετο του γύψου. Αν απαιτείται, η θερμική αγωγιμότητα στο μείγμα μπορεί να βελτιωθεί από την εισαγωγή πτερυγίων αλουμινίου. Η ενσωμάτωση στην οροφή ή και στους τοίχους ενός τέτοιου πάνελ είναι άμεση. [89, 93]

5.2.14 Υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με PCM

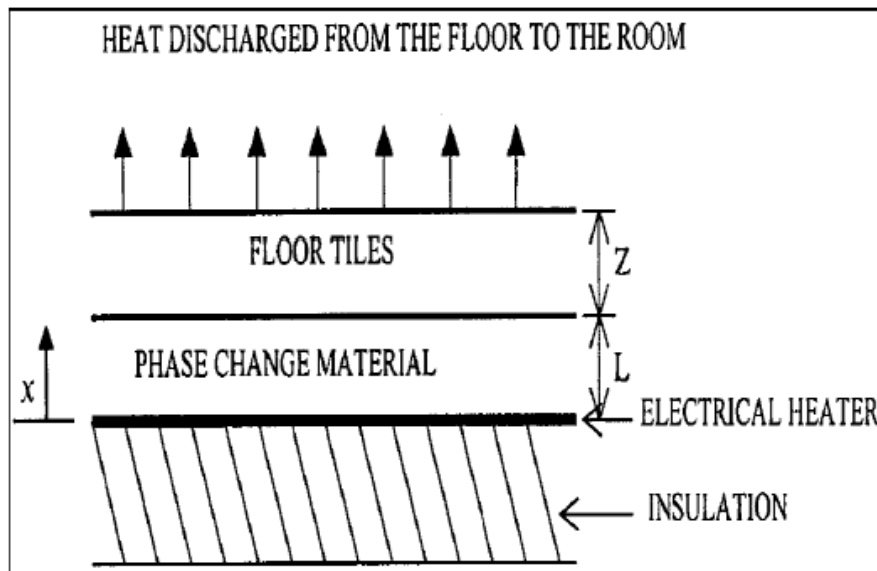
Ο Athienitis και οι συνεργάτες του μελέτησαν την παροδική μεταφορά θερμότητας σε επιδαπέδια συστήματα θέρμανσης. Η μελέτη αυτή επικεντρώθηκε στην επίδραση του καλύμματος και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στη θερμοκρασία του πατώματος και στην κατανάλωση ενέργειας. Λήφθηκε υπόψιν η τοποθέτηση τάπητα, ο οποίος κάλυπτε το σύνολο του πατώματος ή μέρος αυτού, καθώς και η χρήση καλυμμάτων από σκληρό ξύλο για το τσιμέντο ή για το μείγμα γύψου-τσιμέντου, τα οποία ήταν τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για θερμική αποθήκευση.



Σχ. 5.2.14.1 Υποδαπέδιο σύστημα [94]

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει, σε μία αίθρια ημέρα, τοπική τιμή θερμοκρασίας επιφάνειας πατώματος σε μία φωτισμένη περιοχή έως και 8°C παραπάνω από ότι σε μία σκιασμένη περιοχή. Οι μερικοί τάπητες μπορούν να αυξήσουν περαιτέρω αυτή τη διαφορά έως και 15°C , όταν απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία που αποθηκεύεται στη θερμική μάζα του πατώματος, βρέθηκε ότι μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση σε ποσοστό μέχρι και 30%.

Από αυτήν την εφαρμογή γίνεται εμφανής η δυναμική της χρήσης θερμικής μάζας στο σύστημα θέρμανσης του πατώματος ενός χώρου, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτός περιόδου αιχμής αποθήκευση θερμικής ενέργειας.



Σχ. 5.2.14.2 Σχηματική απεικόνιση του υποδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με χρήση στρώματος PCM [94]

Κατά αυτόν τον τρόπο, οι αιχμές του φορτίου μπορούν να μειωθούν και να μετατοπιστούν στη νυχτερινή περίοδο, όπου το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερο. Όσον αφορά, όμως, τον τρόπο εφαρμογής μίας τέτοιας μεθόδου, υλικά με μεγάλη πυκνότητα σαν το τσιμέντο μπορούν να προκαλέσουν τις μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που ήδη αναφέρθηκαν. Όμως, η χρήση των PCM μπορεί να προσφέρει μεγάλη αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας στο στενό εύρος θερμοκρασίας που συνήθως συναντάται στα κτίρια, βελτιώνοντας έτσι και τη θερμική άνεση. Γι'αυτό παρακάτω αναφέρονται εφαρμογές υποδαπέδιων συστημάτων με PCM. [23, 39, 43, 75, 94]

5.2.15 Υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με τη χρήση ``σταθερής μορφής`` πλακών με PCM

Επιλέγεται να αναφερθεί αυτή η εφαρμογή, των Lin,Χυ και των συνεργατών τους, ξεχωριστά διότι προβάλλει ένα καινούριο είδος υποδαπέδιου ηλεκτρικού δαπέδου θέρμανσης με χρήση των ``σταθερής μορφής`` (shape-stabilized) πλακών με PCM. Η ιδιότητα αυτών των σύνθετων υλικών να μπορούν να διατηρούν σταθερό το σχήμα τους όσο η θερμοκρασία λειτουργίας είναι κάτω από το σημείο τήξης του υποστηρικτικού υλικού, ακόμα και αν το PCM μεταβαίνει από τη μία φάση στην άλλη, τα καθιστά κατάλληλα για χρήση σε θερμική αποθήκευση στα κτίρια και μάλιστα χωρίς ανάγκη για ενσωμάτωση σε κάψουλες.

Το είδος ``σταθερής μορφής`` πλακών PCM που αναπτύχθηκε από τους επιστήμονες, περιείχε 75% κατά βάρος παραφίνη ως διάσπαρτο υλικό και 25% κατά βάρος πολυαιθυλένιο ως υποστηρικτικό υλικό. Προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργία αυτών των πλακών, κατασκευάστηκε ένα πειραματικό σπίτι στο Πανεπιστήμιο της Tsinghua, στο Πεκίνο, στην Κίνα. [75]

5.2.16 Ενσωμάτωση PCM σε μείγμα ξύλου-ελαφρού βάρους τσιμέντο

Αυτό το μείγμα αποτελείται στην πραγματικότητα από τσιμέντο, πριονίδια ξύλου σε κατά βάρος περιεκτικότητα που δεν πρέπει να ξεπερνάει το 15%, νερό και πρόσθετα συστατικά. Μπορεί να εφαρμοστεί, γενικά, για την κατασκευή εξωτερικών και εσωτερικών τοίχων ενός κτιρίου.

Σε αυτού του είδους την ενσωμάτωση εργάστηκε ο Mehling και οι συνεργάτες του. Φρησιμοποίησαν δύο PCM, τα οποία ήταν το Rubitherm GR40, 1-3mm και GR50, 0,2-0,6mm. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μείγμα αυτό μπορεί εύκολα να συνδυαστεί με τα PCM και μάλιστα χωρίς μεγάλη μεταβολή στις μηχανικές ιδιότητές του. Τα περαιτέρω θετικά αποτελέσματα αναφέρθηκαν συνοπτικά από τους ερευνητές. Η θερμική αγωγιμότητα ήταν αρκετά καλή, δηλαδή μεταξύ 0,15 και 0,75W/mK και η ηχητική μόνωση αυξημένη. Οι μηχανικές ιδιότητες ήταν σε καλό επίπεδο, δηλαδή πυκνότητα μεταξύ 600 και 1700kg/m³, αλλά και η θερμοχωρητικότητα, η οποία για πυκνότητα στην τιμή των 1300kg/ m³, έφτανε στην τιμή των 0,39-0,48kJ/kg.

Όπως και σε όλες τις προηγούμενες εφαρμογές, η ενσωμάτωση των PCM ήταν κυρίως ωφέλιμη διότι οδήγησε σε αυξημένη ικανότητα θερμικής αποθήκευσης και καλύτερη θερμική συμπεριφορά και μάλιστα με αρκετά μειωμένα το βάρος και το πάχος των στοιχείων των τοίχων. [89]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Ιστορική αναδρομή [97, 98]

Η χρήση ΥΑΦ για αποθήκευση θερμότητας είναι γνωστή και εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια. Η χρήση του πάγου για τη διατήρηση των τροφίμων είναι σχεδόν αρχαία. Η χρήση λοιπόν του πάγου σαν ΥΑΦ είναι η πρώτη χρήση τέτοιων συστημάτων. Τα ιγκλού (σπίτια από πάγο) κατασκευάζονταν χρησιμοποιώντας μεγάλα κομμάτια πάγου από την παγωμένη επιφάνεια ποταμών, τα οποία μετά αποθηκεύονταν σε πριονίδι για μετέπειτα χρήση κατά την περίοδο της Άνοιξης.



Σχ. 6.1 Ιγκλού

Η βιομηχανία τροφίμων πέρα από τον πάγο μετέπειτα χρησιμοποίησε και άλλες μεθόδους για τη διατήρηση των τροφίμων σε επιθυμητή θερμοκρασία. Για παράδειγμα, κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση τροφίμων, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά δοχεία μεγάλου πλάτους και μικρού αντίστοιχα πάχους, γεμάτα με στερεοποιημένα μίγματα αλάτων, τα οποία άλλαζαν φάση κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση του τροφίμου, απορροφώντας θερμότητα και διατηρώντας το εσωτερικό στην επιθυμητή θερμοκρασία. Τα ίδια υλικά χρησιμοποιήθηκαν και στη βιομηχανία φαρμάκων, σε πλαστικά δοχεία, ώστε να διατηρούν τα θερμοκρασιακά επίπεδα χημικών και φαρμάκων, κατά τη μεταφορά ή την αποθήκευσή τους. Το βασικό ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε σε τέτοιες εφαρμογές, ήταν κάποιο μίγμα ανόργανων αλάτων, όπως Θειικό Νάτριο, Θειικό Μαγνήσιο, Θειικό Κάλιο, Θειικό Αμμώνιο, Θειικό Ασβέστιο και κάποια χλωρίδια του Μαγνησίου. Από τη στιγμή που η επιστημονική κοινότητα κατάλαβε τις

προοπτικές των ΥΑΦ, ξεκίνησε να διεξάγει μελέτες και πειράματα για την εύρεση και ανάπτυξη όλο και καλύτερων ΥΑΦ, με διάφορα σημεία τήξης και υψηλές θερμοότητες υγροποίησης.

Σε πρώτη φάση το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στους μεμονωμένους χρήστες των συστημάτων αυτών και όχι σε τεχνολογικώς ανεπτυγμένα θερμικά συστήματα. Μερικά δείγματα δουλειάς, ήταν κάποια συστήματα, τα οποία προορίζονταν για εστιατορες και ξενοδόχους και ήταν σχεδιασμένα να διατηρούν τα ζεστά πιάτα σε ικανοποιητική θερμοκρασία όση ώρα διαρκούσε το σερβίρισμα. Άλλες εφαρμογές ήταν προϊόντα για τη διατήρηση ζεστών ροφημάτων, αλλά η εφεύρεση του "Θερμός" ήταν πολύ αποτελεσματική, οπότε αυτό το προϊόν δεν έτυχε απήχησης, και διάφορα προϊόντα σε ρούχα διαβίωσης (ρούχα για ακραίες συνθήκες).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 διατέθηκε στην αγορά ένα φαρμακευτικό προϊόν, μία θερμαντική ζώνη που προοριζόταν για θεραπευτικούς σκοπούς, το οποίο βασιζόταν στη θερμική συμπεριφορά του Βορικού Θείου. Το πρώτο προϊόν το οποίο αναπτύχθηκε για θεραπευτικό σκοπό ήταν μία συσκευασία παροχής ψύξης, ονομαζόταν γενικά "cool pack" και αναπτύχθηκε από αθλίατρος σε συνεργασία με νοσοκομειακές μονάδες και η κύρια χρήση του ήταν περιορίζει το μωλώπισμα σε περίπτωση τραυματισμού. Το προϊόν αποτελείται από μία σακούλα που λειτουργεί σαν εξωτερική συσκευασία, η οποία είναι εσωτερικά χωρισμένη σε δύο τμήματα. Το ένα και μεγαλύτερο περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο έχει σταθεροποιηθεί σε υπέρψυκτη κατάσταση. Το άλλο τμήμα περιέχει έναν παράγοντα πυρηνοποίησης, κάποιου είδους πηκτικό δηλαδή. Μια απότομη κίνηση καταστρέφει το διαχωριστικό εντός της συσκευασίας και επιτρέπει την ανάμιξη των δύο υλικών, με αποτέλεσμα το ΥΑΦ να σταθεροποιείται, απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη θερμότητα.



Σχ. 6.2 Συσκευασία παροχής ψύξης

Κατ' αντιστοιχία αναπτύχθηκαν άλλα πακέτα με υλικά υψηλότερου σημείου τήξης για παραγωγή υψηλότερης θερμοκρασίας για ιατρικές εφαρμογές όπου ζητούμενο είναι να θερμανθεί η πληγείσα περιοχή. Τα λεγόμενα "hot packs" βρήκαν εφαρμογή και σε στρατιωτικά πακέτα εξοπλισμού επιβίωσης, όπως και σε ειδικά ενδύματα για συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας. Η εξέλιξη των προϊόντων ήταν φυσική εξέλιξη λόγω της τεχνολογικής προόδου και διατέθηκαν στην αγορά πολλά ακόμη προϊόντα επιβίωσης, χρησιμοποιώντας διαφορετικά ΥΑΦ με μεγάλη ποικιλία σημείων τήξης.



Σχ. 6.3 Συσκευασία υψηλής θερμοκρασίας

6.1 ΗΠΑ-NASA

Αναγνωρίζοντας τις προοπτικές που δίνονται από την αποθηκευτική ικανότητα των ΥΑΦ, όπως επίσης και στην ικανότητά τους να ελαττώνουν τα θερμικά φορτία, η NASA περιέλαβε τα ΥΑΦ και διάφορες εφαρμογές τους στο διαστημικό της πρόγραμμα. Αυτό που ενδιέφερε περισσότερο από όλα τους επιστήμονες εκεί, ήταν η δυνατότητα διατήρησης σταθερών θερμοκρασιακών συνθηκών.

Οι πρώτες εφαρμογές των ΥΑΦ ήταν στην αποστολή Apollo 15, όπου χρησιμοποιήθηκαν σε επένδυση χώρου για να απορροφούν την επιπλέον θερμότητα που εκλυόταν από τα ηλεκτρονικά συστήματα, ώστε να μειώνεται η χρήση των κλιματιστικών συσκευών για το ίδιο έργο. Επίσης στην ίδια αποστολή χρησιμοποιήθηκαν ΥΑΦ σε κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών που ήταν εγκατεστημένο στη διαστημάκατο.

6.2 ΥΑΦ για ψύξη-θέρμανση κτιρίων

Παρ' όλο που η πρόοδος στη μελέτη και εφαρμογή των υλικών αυτών ήταν σε προχωρημένα στάδια, είχαν γίνει ελάχιστα βήματα για τη χρήση αυτών των υλικών σε σπίτια και στην ουσιαστική συμβολή τους στη θερμική συμπεριφορά των τελευταίων. 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. Παρ' ότι τα συστήματα αυτά θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν επιτυχημένα, δεν υπήρξε περαιτέρω εξέλιξη ή μελέτη, αφού δεν υπήρξε σημαντική χρηματοδότηση, λόγω κυρίως έλλειψης πίστης στην επιτυχία του όλου εγχειρήματος. Ακολουθεί ιστορική ανασκόπηση των σημαντικότερων πρώιμων εφαρμογών των ΥΑΦ, σαν ένα δείγμα της εξελικτικής πορείας των συστημάτων.

6.3 Maria Telkes

Ήταν η πρώτη που αποφάσισε να ασχοληθεί με την εφαρμογή των ΥΑΦ σε κτίρια. Το 1948 κατασκευάστηκε το πρώτο μεγάλης κλίμακας πείραμά της, στην περιοχή Dover Mass, στη Βοστώνη των ΗΠΑ. Η περιοχή επελέγη από την Telkes για τα ετήσια επίπεδα ηλιοφάνειας, που για την περιοχή ήταν πάνω από τις μέσες τιμές, πράγμα που εξασφάλιζε τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του ηλιακού συστήματος. Ήταν ένα σπίτι ενός ορόφου, πέντε δωματίων εκ των οποίων δύο υπνοδωμάτια, επιφάνειας 135m². Η ηλιακή ακτινοβολία παρείχε θερμότητα μέσω ηλιακών συλλεκτών, θερμότητα η οποία μετά μέσω ανεμιστήρων οδηγείτο σε τρία δοχεία αποθήκευσης θερμότητας.



Σχ. 6.3.1 Κάτοψη σπιτιού Telkes

Τα δοχεία χρησιμοποιούσαν σαν ΥΑΦ το άλας του Glauber. Συνολικά περιλαμβάνονταν 21 τόνοι ΥΑΦ, συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας 11MJ και σημείου τήξης 32 βαθμών Κελσίου. Με τα οικονομικά δεδομένα της εποχής ήταν μία ακριβή κατασκευή, κοστίζοντας 20000 δολάρια, από τις οποίες οι 3000 δολάρια αναφέρονταν στο θερμαντικό σύστημα (συνολικό ποσοστό κόστους 15%). 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 άνετο περιβάλλον 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 (Na_2SO_4), χάνοντας έτσι την αποθηκευτική του ιδιότητα. Παρατηρήθηκε επίσης ότι τα δοχεία αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται δραματικά οι απώλειες του συστήματος.

6.4 Lawrence Gardshire

Το 1953 ο Lawrence Gardshire κατασκεύασε ένα ηλιακό σπίτι με ΥΑΦ στη περιοχή του New Mexico. Το κτίριο ήταν διώροφο και κάθε όροφος είχε επιφάνεια 102m^2 . Και ο Gardshire, όπως η Telkes χρησιμοποίησε «δοχεία» αποθήκευσης με ΥΑΦ χωρητικότητας $1,9\text{m}^3$, μόνο που αντί να τα εγκαταστήσει ανάμεσα στα δωμάτια όπως η Telkes, τα εγκατέστησε στη στέγη δίπλα στους ηλιακούς συλλέκτες. Η καινοτομία ήταν ότι πρόσθεσε διφθορικό νάτριο στο άλας του Glauber σαν πηκτικό παράγοντα, ώστε να βοηθά στην στερεοποίηση του άλατος και να αποφύγει- κατά το δυνατόν-το διαχωρισμό. Δυστυχώς και αυτή η κατασκευή αντιμετώπισε τα ίδια προβλήματα με την κατασκευή της Telkes, πιο καθυστερημένα βέβαια, λόγω αύξησης του χρόνου ζωής του ΥΑΦ, λόγω της προσθήκης του πηκτικού παράγοντα.

6.5 J.W.Hodgins και T.W.Hoffman

Την επόμενη προσπάθεια για ένα ηλιακό σπίτι με ΥΑΦ την έκαναν το 1959 οι J.Hodgins και T.Hoffman στον Καναδά. Το κτίριο ήταν δύο ορόφων, επιφάνειας 111m^2 . Το σχεδιασμό της αποθήκευσης ενέργειας τον ανέλαβε η M.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). Για να ξεπεραστούν τα προηγούμενα προβλήματα, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας εκτός από 12 τόνους ΥΑΦ που περιελάμβανε, ήταν εμπλουτισμένο με πυριτικό άλας νατρίου και χρώμιο, ουσία που εμποδίζει τη διάβρωση. Τα ΥΑΦ ήταν ενσωματωμένα σε κυλινδρικά δοχεία χάλυβα, διαμέτρου $0,1\text{m}$ και ύψους $0,6\text{m}$, τα οποία ήταν τοποθετημένα

κάθετα στους τοίχους. Παρόλο που τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, οι προσπάθειες δεν συνεχίστηκαν από αυτή την ομάδα επιστημόνων.



Σχ. 6.5.1 Σπίτι των Hodgins και Hoffman

6.6 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 αριθμός ΥΑΦ κατάλληλων για ψυκτικές και θερμαντικές εφαρμογές, με ενδεδειγμένη ανάλυση παράπλευρων παραγόντων, όπως τα διάφορα κόστη (κτήσης, εγκατάστασης, συντήρησης), οικονομική ανάλυση επένδυσης και αποθηκευτική ικανότητα υλικού.

Η έρευνα βασίστηκε στις βασικές ομάδες ΥΑΦ:

- Ένυδρα άλατα
- Οργανικά ΥΑΦ
- Ανόργανα ΥΑΦ
- Εύτηκτα μίγματα(οργανικά/ανόργανα)

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το $K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$ (ανόργανο ΥΑΦ) και ορισμένα μίγματα παραφίνης (οργανικό ΥΑΦ) είναι κατάλληλα για εφαρμογές κλιματισμού , ενώ για θέρμανση χώρου τα πιο ελπιδοφόρα ΥΑΦ είναι τα:

$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ και $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$. (6.6.1)

Η δεκαετία του 1970 ήταν ορόσημο για τα ΥΑΦ 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 ΥΑΦ σε χώρες όπως οι Η.Π.Α., η Αγγλία, η Γερμανία και η Γαλλία.

Αποτέλεσμα της ανάγκης για εύρεση ΥΑΦ, στα τέλη της δεκαετίας του 1970, κυβερνητικοί επιστημονικοί οργανισμοί των ΗΠΑ διεξήγαγαν πειράματα ελέγχοντας 20000 διαφορετικά υλικά ως προς τις προοπτικές που έδιναν για χρήση ως ΥΑΦ. 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 είδους εφαρμογές.

6.7 Άλας Glauber

Η M.Telkes συνέχισε τις έρευνές τις πάνω στα ΥΑΦ και συγκεκριμένα γύρω από το άλας του Glauber και τρόπους επιμήκυνσης του χρόνου ζωής του υλικού. Ένα από τα προβλήματα που εμφάνιζε το υλικό ήταν η ιδιότητά του να διαχωρίζει το άνυδρο θειικό νάτριο, κάτι το οποίο ελάττωνε τη θερμική αποθηκευτική ικανότητα του υλικού, ύστερα από κάποιο αριθμό κύκλων. Σε δοκιμές που διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας διάφορους πηκτικούς παράγοντες για τη βοήθεια της τήξης του ΥΑΦ, παρατηρήθηκε ότι η διάρκεια ζωής του υλικού όντως αυξήθηκε εντυπωσιακά, παρέμεινε όμως η ελάττωση της αποθηκευτικής ικανότητας ύστερα από κάποιους (περίπου 1000) κύκλους φόρτισης. Ο S.Marks με τη σειρά του διεξήγαγε σειρές πειραμάτων στο ίδιο αντικείμενο. Χρησιμοποιώντας ένα είδος πηλού για πηκτικό παράγοντα, είχε τα ίδια αποτελέσματα με την Telkes, αύξηση δηλαδή της διάρκειας ζωής του ΥΑΦ, αλλά παρατηρούμενη ελάττωση των θερμικών ιδιοτήτων. Πειράματά του με άλλους πηκτικούς παράγοντες, όπως με ένα πολυμερές του πολυκαρβοξυλικού οξέος, οδήγησαν στην αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας, αλλά επίσης σε ελάττωση του χρόνου ζωής.

Ο P.Rueffel χρησιμοποίησε πλέγμα τύρφης, το οποίο ενσωμάτωσε στο ΥΑΦ. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να είναι τόσο συμβατά τα δύο υλικά που το πλέγμα αυτό τελικά έδρασε σαν ένας άριστος πηκτικός παράγοντας. Περαιτέρω ανάλυση αυτής της ιδέας έδωσε στο μέλλον μίγμα ΥΑΓ και τυπικού τσιμέντου, το οποίο μίγμα υστερά από 2000 κύκλους δεν εμφάνιζε ελάττωση στις θερμικές ιδιότητές του. Το σύστημα αυτό αποδείχθηκε χημικώς σταθερό και έχει σπουδαίες προοπτικές όσον αφορά στον τομέα της τοιχοποιίας.

6.8 Παραφίνες

Μόλις η επιστημονική κοινότητα αντιλήφθηκε ότι η αποθηκευτική ικανότητα των παραφινειδών κυμαίνεται σε αρκετά καλά επίπεδα, άρχισε να εξετάζει τις προοπτικές να αποτελέσει η παραφίνη υποψήφιο ΥΑΦ, λόγω του χαμηλού της κόστους σε σχέση με τα υπόλοιπα ΥΑΦ. Ο J.Bailey επικεντρώθηκε στη μελέτη θερμοσυσσωρευτών με πλέγμα αλουμινίου σε σχήμα κερήθρας στο εσωτερικό με τη χρήση εικοσανίου με σημείο τήξης τους 32°C. Το 1974 ο T.Galloway πειραματίστηκε πάνω σε κεριά παραφίνης χρησιμοποιώντας τα σε τρεις διαφορετικές μορφές: χύμα ΥΑΦ σε δεξαμενή με πλαστικό πτερύγια συναλλαγής θερμότητας, ατσάλινα δοχεία γεμάτα με ΥΑΦ σε δεξαμενή με νερό και τρίτο, μεγάλοι δίσκοι με ΥΑΦ επίσης σε δεξαμενή νερού.

6.9 Υπόλοιπος κόσμος

Τα ερευνητικά εργαστήρια των ΗΠΑ επικεντρώνονταν στην έρευνα των ανόργανων ΥΑΦ, την ώρα που τα μεγαλύτερα Ευρωπαϊκά ερευνητικά κέντρα βασίζονταν στις προοπτικές των οργανικών ΥΑΦ για τις μελέτες τους. Ιδιαίτερως σημαντικά ήταν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές τις μελέτες. Οι πλέον δραστήριες χώρες ήταν η (τότε) ,υτική Γερμανία, η (τότε) ΕΣΣ, η Αγγλία, η Σουηδία, η Δανία, η Γαλλία και η Ιταλία. Πέραν από την Ευρώπη πολύ σημαντική ερευνητική πρόοδο έκαναν και οι παραδοσιακά πρωτοπόροι σε επιστημονικά θέματα Ιάπωνες.

6.10 (Δυτική) Γερμανία

Η ερευνητική δραστηριότητα στη Γερμανία απέφερε καρπούς, καθώς οι επιστήμονες συνέταξαν αναλυτικά γραφήματα και πίνακες φυσικών και θερμικών ιδιοτήτων των ΥΑΦ, καθώς και πληροφορίες για ΥΑΦ για τους τομείς της κατασκευής και της μόνωσης. Τα κύρια υλικά που εξετάστηκαν ήταν οι παραφίνες, τα ένυδρα άλατα και κάποια εύηκτα μίγματα για εφαρμογές κάτω

των 100°C. Οι δοκιμές περιλάμβαναν τη χρήση των υλικών σε σωλήνες με πτερύγια. Μεγάλη επίσης έρευνα εξέταζε τη διαφορετική θερμική συμπεριφορά των ΥΑΦ σε ηλιακό σπίτι, το οποίο θερμαίνεται από μια αντλία θερμότητας με αποθηκευτικό μέσο το νερό. Οι ερευνητές αντικατέστησαν το νερό πρώτα με πάγο και μετά με παραφίνη (σημείο τήξης 18 με 25°C), για τρία έτη. Αποδείχθηκε ότι η παραφίνη έχει την καλύτερη συμπεριφορά καθώς επίσης ότι αυξάνει το συντελεστή συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας από 2,6 σε 3,3, καθώς επίσης ότι η παραφίνη χρειάζεται το μισό όγκο από αυτόν του νερού γεγονός που δίνει μικρότερο κόστος εγκατάστασης.

6.11 Σουηδία

Η έρευνα από τον Prof.H.Hedman επικεντρώθηκε στις εφαρμογές ένυδρων αλάτων, χρησιμοποιώντας αέρα ως μέσο μετάδοσης θερμότητας. Τα συστήματα PCM, ενσωματωμένα σε μεταλλικές κάψουλες, αποδείχθηκαν πιο αποτελεσματικά από τις δεξαμενές νερού που χρησιμοποιήθηκαν στις υπόλοιπες χώρες της Ευρώπης για παθητική θέρμανση.

6.12 Γαλλία

Η Γαλλία είναι μία από τις χώρες που έδειξαν γρήγορα μεγάλο ενδιαφέρον για τις θερμικές προοπτικές των ΥΑΦ και κατασκεύασαν για ερευνητικούς σκοπούς αρκετά κτίρια με ΥΑΦ. Πολύ γρήγορα κατασκευάστηκαν αρκετά κτίρια χρησιμοποιώντας τεχνολογία αποθήκευσης θερμότητας με PCM. Τα πιο σημαντικά ήταν αυτά του Εργαστηρίου CNRS στη Νίκαια, δηλαδή ένα ηλιακό σπίτι για οικιακή χρήση και ένα θερμοκήπιο.Σα συστήματά τους χρησιμοποιούσαν ένα PCM, το οποίο αποτελείται από $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ αναμεμειγμένο με έναν πυρηνοποιητικό παράγοντα, ενσωματωμένο σε μορφή μικροκαψουλών σε κελιά που αποτελούσαν μέρος του ``φακέλου`` του κτιρίου. Το ίδιο εργαστήριο ανέπτυξε την έρευνα σχετικά με το κερί παραφίνης, με δειγματικά συστήματα που περιλάμβαναν μεταλλικά μείγματα ώστε να αυξηθούν

τα χαρακτηριστικά μετάδοσης θερμότητας. Άλλοι επιστήμονες από το Παρίσι παρουσίασαν διάφορες συσκευές, οι οποίες ενσωμάτωναν PCM με σημεία τήξης μεταξύ 15 και 40°C, για εφαρμογές κλιματισμού.

6.13 Ηνωμένο Βασίλειο

Η Αγγλία είναι μία από τις χώρες, όπως και η Γερμανία και η Σουηδία που εκτός από την έντονη ερευνητική δραστηριότητα, είναι παραγωγοί υλικών ΥΑΦ με συνεχώς αναπτυσσόμενη βιομηχανία. Από τις σημαντικότερες ερευνητικές προσπάθειες αυτές των A.Bromley, E.McKay και J.Wilkins, οι οποίοι ίδρυσαν ερευνητικό οργανισμό και ασχολήθηκαν διεξοδικά με τη μελέτη της λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας σε θερμικές εφαρμογές και ιδιαίτερα στα συστήματα αποθήκευσης πάγου.

6.14 Ιαπωνία

Η Ιαπωνία έχει παίξει πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των PCM, αφού η σχετική έρευνα έχει ευρέως χρηματοδοτηθεί από το κράτος. Η έρευνα της Ιαπωνίας μέχρι το 1970 επικεντρώθηκε στα συστήματα αποθήκευσης για θέρμανση, αλλά μεταγενέστερες προσπάθειες ασχολήθηκαν και με εφαρμογές ψύξης. Αρκετή έρευνα και ανάπτυξη πραγματοποιήθηκε για έναν αριθμό νιτρικών ευτηκτικών μειγμάτων, ώστε να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο της θερμοκρασίας δωματίου. Οι επιστήμονες Yoneda και Takanashi ανέπτυξαν μία σειρά μοντέλων χρησιμοποιώντας έναν απλό εναλλάκτη θερμότητας για να ελέγχει τη λειτουργία του συστήματος με το PCM. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα ήταν αρκετά ικανοποιητικό, αλλά τα προβλήματα εμφανίστηκαν όταν συνδέθηκε με έναν ηλιακό συλλέκτη, στοιχείο που οδήγησε σε αρκετά μεγάλη μείωση της αποτελεσματικότητας.

Β' ΜΕΡΟΣ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Υπολογιστική μελέτη

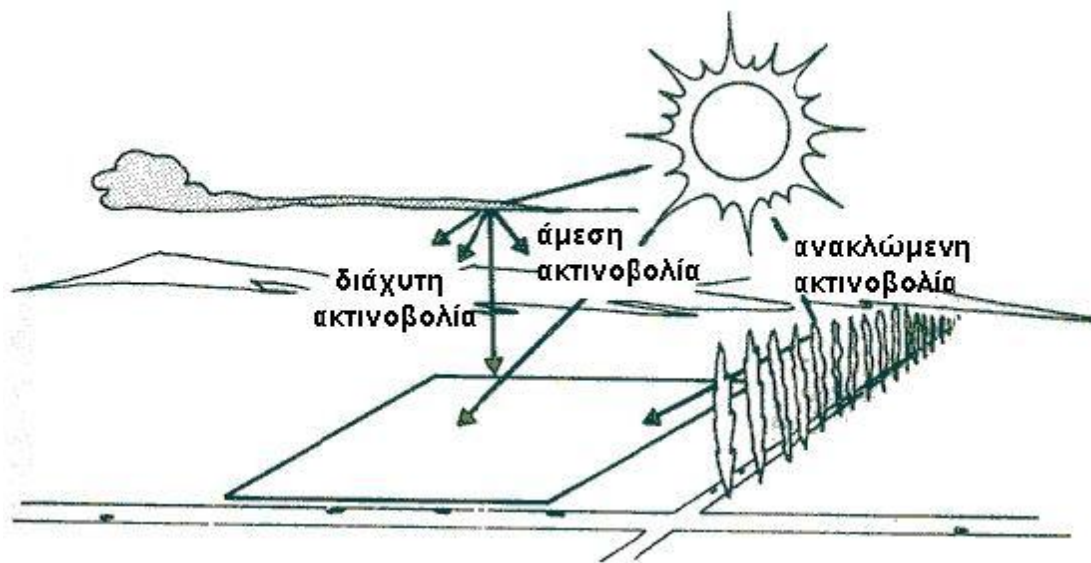
7.1 Υπολογισμός διάχυτης ακτινοβολίας και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια παρουσίαση εφαρμογής υλικών αλλαγής φάσης ενσωματωμένων σε μικροκάψουλες σε τοίχο νότιου προσανατολισμού, δηλαδή το PCM θα χρησιμοποιείται σε νότιο εσωτερικό τοίχο αίθουσας απέναντι από υαλοπίνακα, για την παθητική ηλιακή θέρμανση αυτής. Αρχικά μελετάται η συμπεριφορά του PCM και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε αυτό.

Χρήσιμοι ορισμοί:

Άμεση ηλιακή ακτινοβολία G_b : Ηλιακή ακτινοβολία, που έρχεται απευθείας από τον ήλιο και προσπίπτει στη γη χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα.

Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία G_d : Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο οριζόντιο επίπεδο αφού έχει αλλάξει διεύθυνση από σκέδαση στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 7.1.1 Άμεση, διάχυτη, και ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου.

Για τον υπολογισμό της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου G_b και G_d αντίστοιχα χρησιμοποιούμε τις σχέσεις που δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\bullet \quad G_b = M_t + A_t \sin\left(\frac{360}{365} D - Pt\right) \quad (7.1.1)$$

$$\bullet \quad G_d = m_t + a_t \sin\left(\frac{360}{365} D - Pt\right) \quad (7.1.2)$$

$$\bullet \quad R_b = \frac{\sin\delta \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cos(\varphi - \beta) \cos\omega}{\sin\delta \sin\varphi + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega} \quad (7.1.3)$$

$$\bullet \quad G_T = G_b R_b + G_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + (G_b + G_d) \rho \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (7.1.4)$$

Με $\beta = 90^\circ$

$\rho = 0,20$

$D = 1 - 365$ (αύξων αριθμός της ημέρας του έτους)

$\varphi = 37,97^\circ$ γεωγραφικό πλάτος Αθήνας γωνιακή θέση βόρεια ή νότια

του ισημερινού

Όπου οι συντελεστές M_t , m_t , a_t , A_t , P_t , ρ δίνονται από τον παρακάτω πίνακα για τις ώρες 07.00-18.00. Ο οποίος βρίσκεται στη σελίδα 27 του βιβλίου Ηλιακή Ενέργεια.

t [hrs]	Mt	At	Pt	Mt	at	pt
07.00	0,007	0,046	86,18	0,048	0,111	81,23
08.00	0,057	0,068	87,31	0,134	0,127	82,45
09.00	0,119	0,104	87,94	0,208	0,133	83,94
10.00	0,191	0,129	88,31	0,261	0,129	85,60
11.00	0,258	0,153	89,35	0,283	0,117	86,05
12.00	0,319	-0,181	-88,88	0,271	0,095	82,71
13.00	0,342	-0,194	-89,18	0,243	0,081	81,95
14.00	0,325	0,183	87,21	0,210	0,083	87,23
15.00	0,269	0,166	86,22	0,176	0,087	89,53
16.00	0,183	0,147	82,10	0,141	-0,085	-88,19
17.00	0,078	0,131	79,85	0,104	-0,079	-88,97
18.00	-0,025	0,114	77,36	0,051	0,091	86,79

Σχήμα 7.1.2 Σταθερές για τον υπολογισμό της G_b και G_d.

Στη περίπτωση μας όπου μελετάμε κατακόρυφο τοίχο η κλίση της επιφάνειας είναι $\beta=90^\circ$. Άρα ο τελικός μας τύπος για την ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου είναι :

$$\bullet \quad G_T = G_b R_b + \frac{G_d}{2} + (G_b + G_d) \frac{\rho}{2} \quad (7.1.5.)$$

$$\bullet \quad \delta = 23,45 \sin \left(\frac{360 (284+n)}{365} \right) \quad (7.1.6)$$

Με n ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους, για την οποία ζητείται να υπολογισθεί η ηλιακή ακτινοβολία δηλαδή n=1- 365.

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

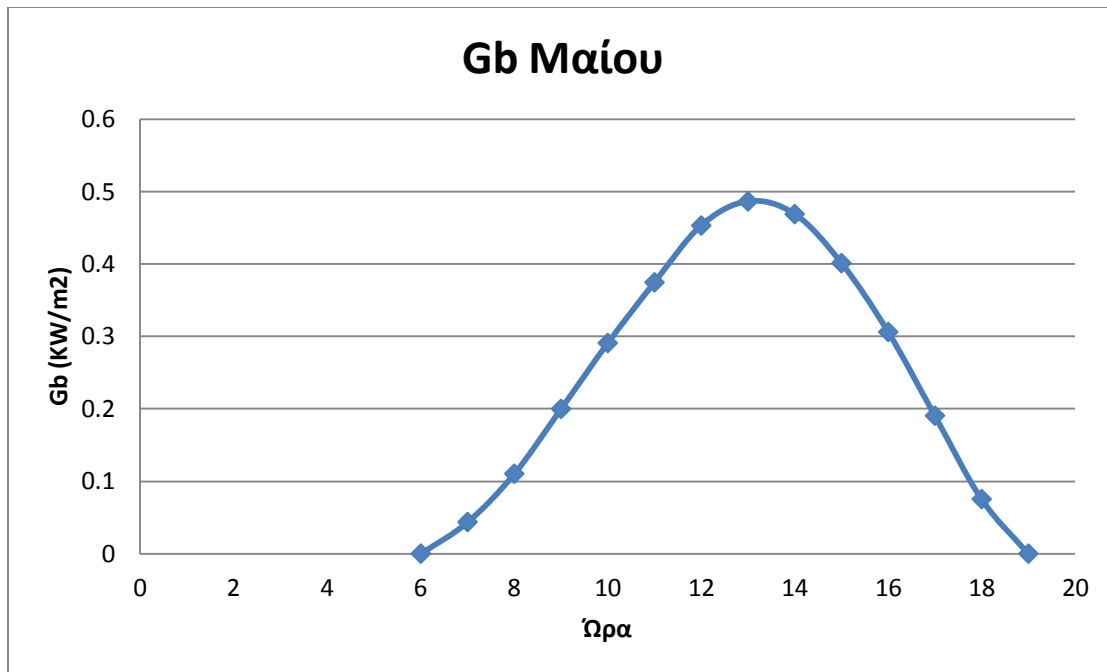
ωριαία γωνία (η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά η δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω περιστροφής της γης γύρω από τον αξονά της).

Ο υπολογισμός έγινε για τους θερινούς μήνες του χρόνου για Νότιο προσανατολισμό, τα αποτελέσματα καθώς και τα διαγράμματα μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας παρατίθενται παρακάτω:

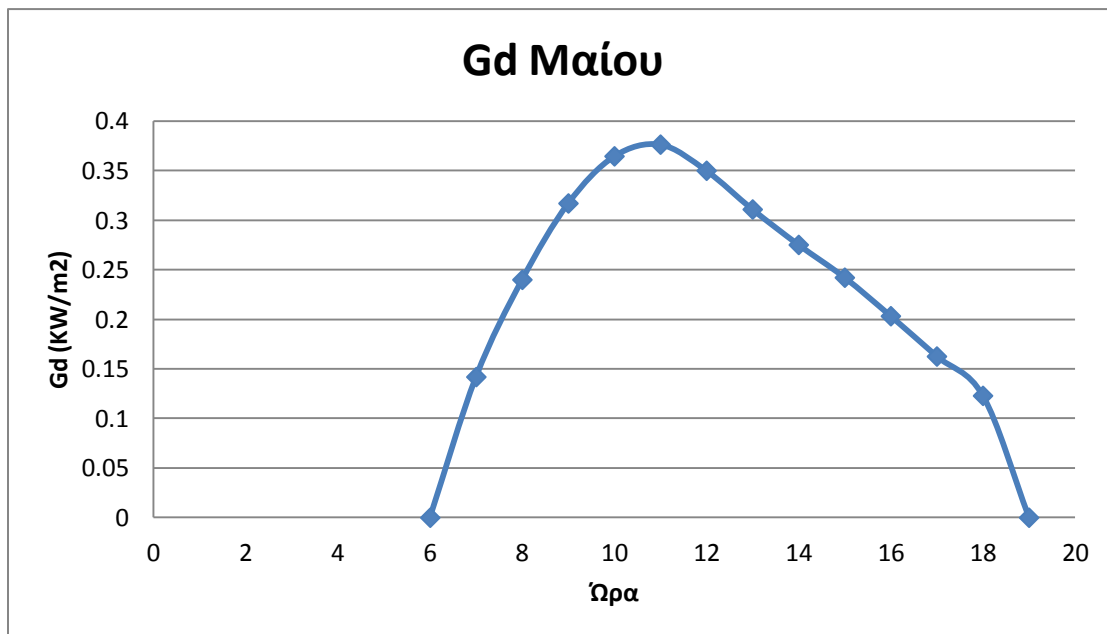
➤ Για την 21η Μαΐου : $D=141$, $\delta=20,09331$

Ωρα (hrs)	Gb (KW/m²)	Gd (KW/m²)	ω	Rb	Gt (KW/m²)
6	0	0	-90	-1,27567	0
7	0,04367	0,141937	-75	-0,29898	0,076473
8	0,110389	0,240013	-60	0,032232	0,158606
9	0,19994	0,317081	-45	0,188276	0,247887
10	0,290872	0,364619	-30	0,269974	0,326386
11	0,374677	0,37643	-15	0,310715	0,379743
12	0,453155	0,350063	0	0,323164	0,401797
13	0,486471	0,311001	15	0,310715	0,386401
14	0,468875	0,275237	30	0,269974	0,338614
15	0,401262	0,242169	45	0,188276	0,260975
16	0,3062	0,20331	60	0,032232	0,162475
17	0,19051	0,162637	75	-0,29898	0,059674
18	0,075353	0,122955	90	-1,27567	0
19	0	0	105	-1,4586	0

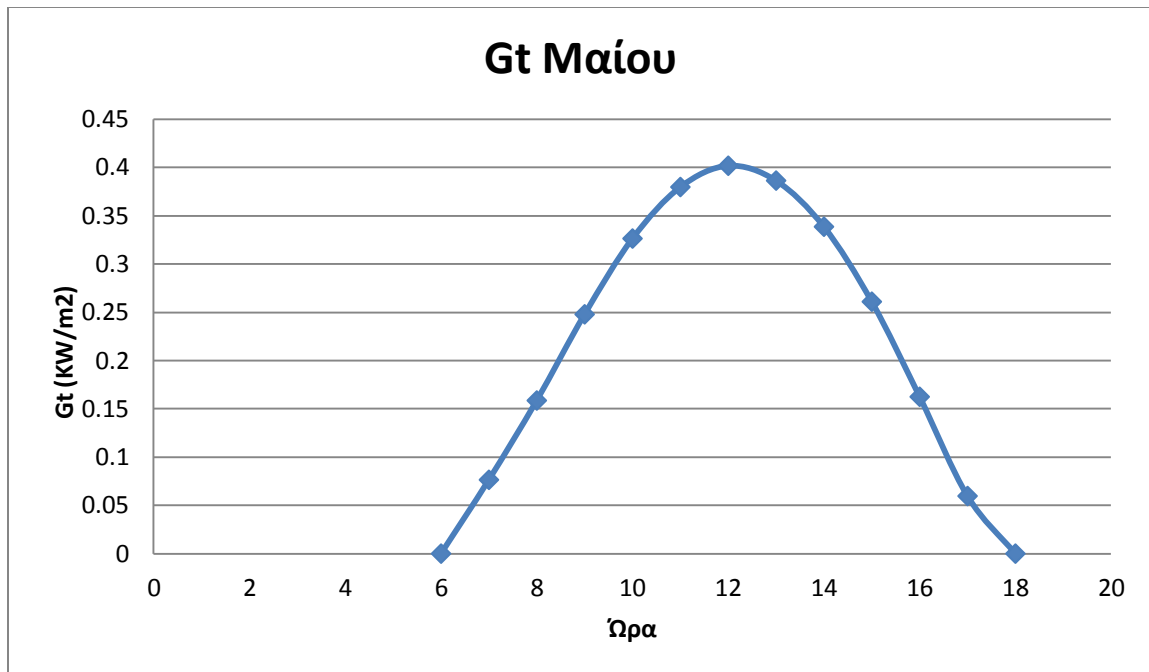
Σχήμα 7.1.3 :Άμεση Gb , διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία Gt κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Μάη νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.4 Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαΐου.



Σχήμα 7.1.5 Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαΐου

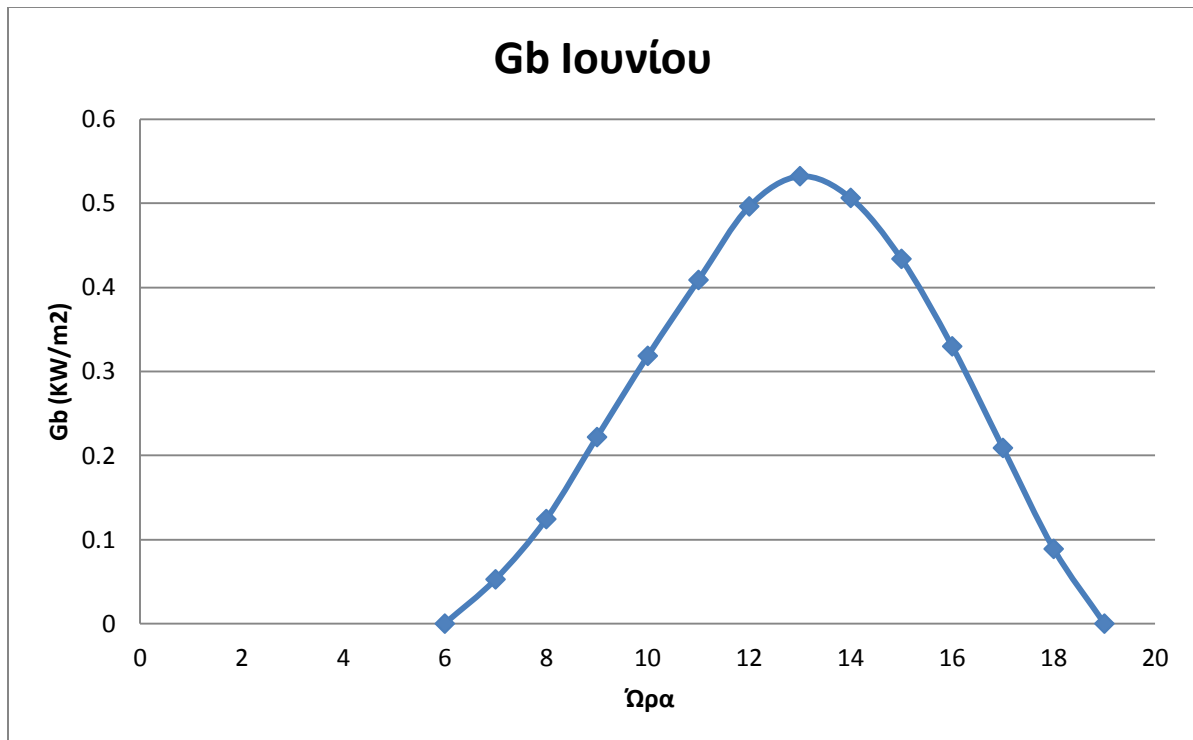


Σχήμα 7.1.6 Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαΐου νότιου προσανατολισμού.

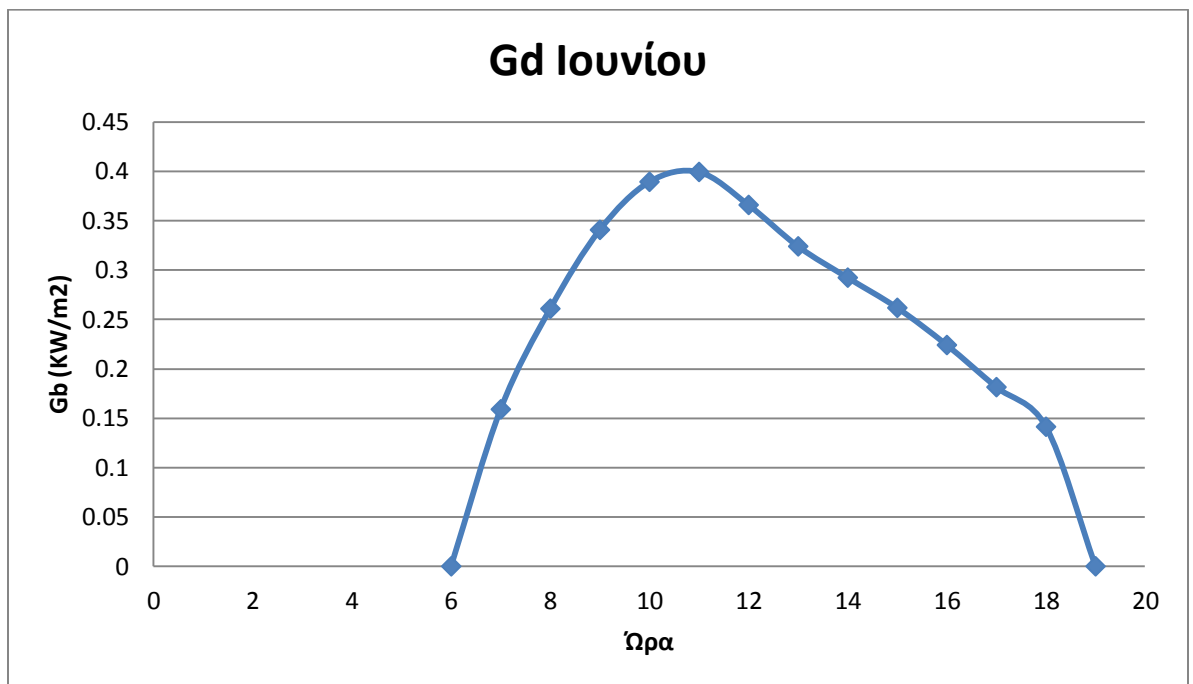
➤ Για την 21η Ιουνίου : $D=172$, $\delta=23,4492$

Ωρα (hrs)	Gb (KW/m²)	Gd (KW/m²)	ω	Rb	Gt (KW/m²)
6	0	0	-90	-1,27657	0
7	0,052697	0,158955	-75	-0,38604	0,080299
8	0,124386	0,260843	-60	-0,05072	0,162635
9	0,221901	0,340619	-45	0,113836	0,251822
10	0,318513	0,389294	-30	0,201756	0,329689
11	0,408791	0,39926	-15	0,246064	0,381024
12	0,496299	0,36586	0	0,259664	0,398017
13	0,532234	0,323932	15	0,246064	0,378546
14	0,506389	0,292266	30	0,201756	0,328165
15	0,433894	0,261698	45	0,113836	0,249801
16	0,32986	0,22405	60	-0,05072	0,150684
17	0,208999	0,181409	75	-0,38604	0,049063
18	0,088913	0,141285	90	-1,27657	0
19	0	0	105	-2,16742	0

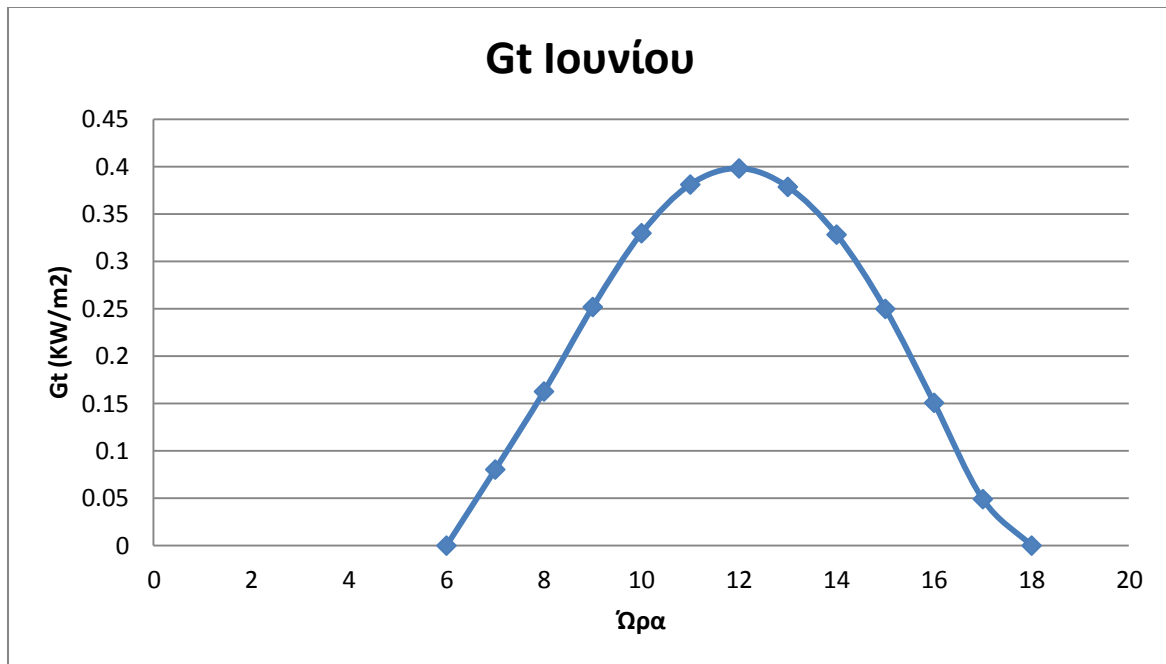
Σχήμα 7.1.7 Άμεση Gb , διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία Gt κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Ιούνη νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.8 Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουνίου.



Σχήμα 7.1.9 Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουνίου.

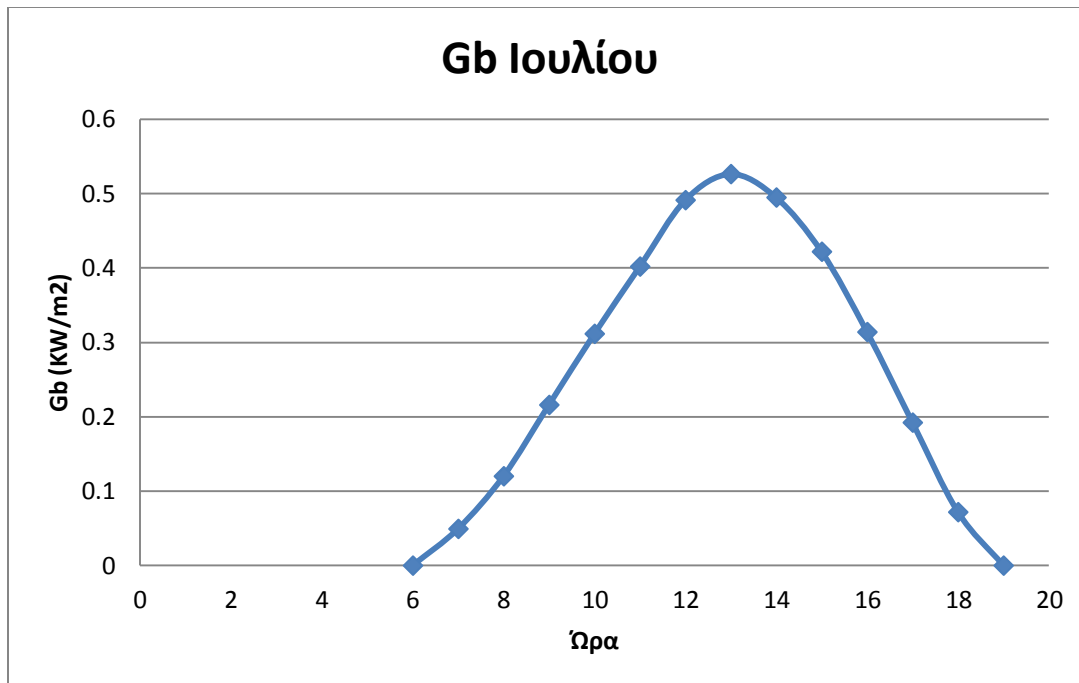


Σχήμα 7.1.10 Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουνίου νότιου προσανατολισμού.

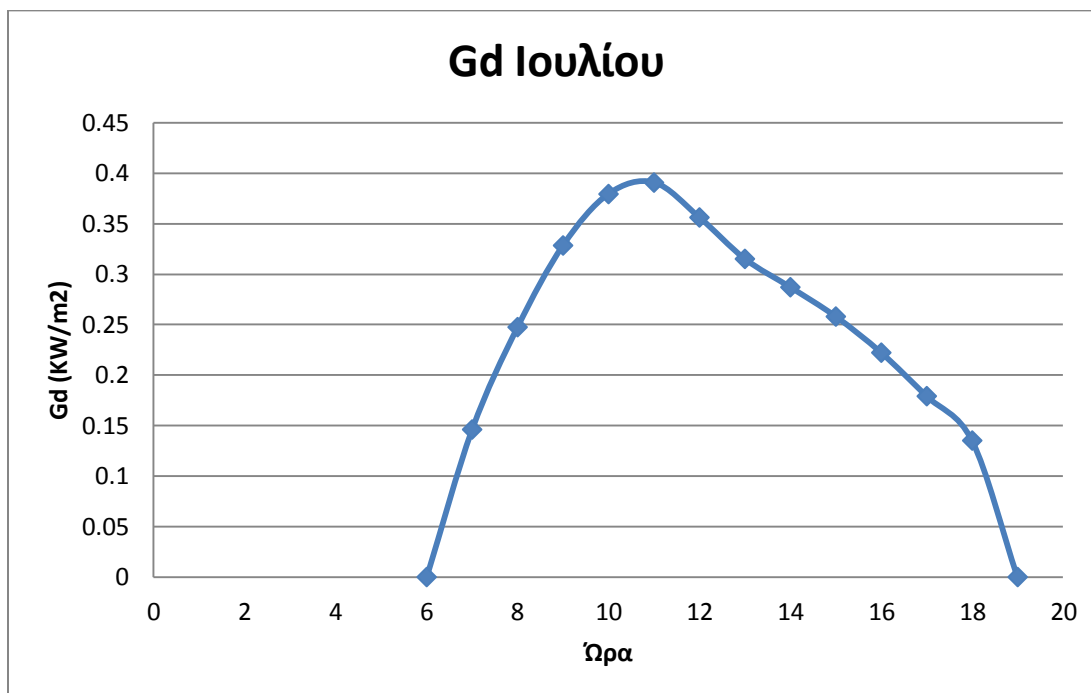
➤ Για την 21η Ιουλίου : $D=202$, $\delta=20,49007$

Ωρα (hrs)	Gb (KW/m²)	Gd (KW/m²)	ω	Rb	Gt (KW/m²)
6	0	0	-90	-1,27579	0
7	0,049345	0,146059	-75	-0,30993	0,077277
8	0,120108	0,247435	-60	0,022052	0,16312
9	0,215938	0,328308	-45	0,179247	0,257285
10	0,311539	0,379233	-30	0,261751	0,340239
11	0,40193	0,390599	-15	0,302946	0,396315
12	0,491174	0,356046	0	0,31554	0,41773
13	0,526224	0,315028	15	0,302946	0,401056
14	0,494715	0,286985	30	0,261751	0,351155
15	0,421854	0,257935	45	0,179247	0,272563
16	0,313892	0,222165	60	0,022052	0,17161
17	0,192216	0,179109	75	-0,30993	0,067114
18	0,071876	0,135142	90	-1,27579	0
19	0	0	105	-2,4734	0

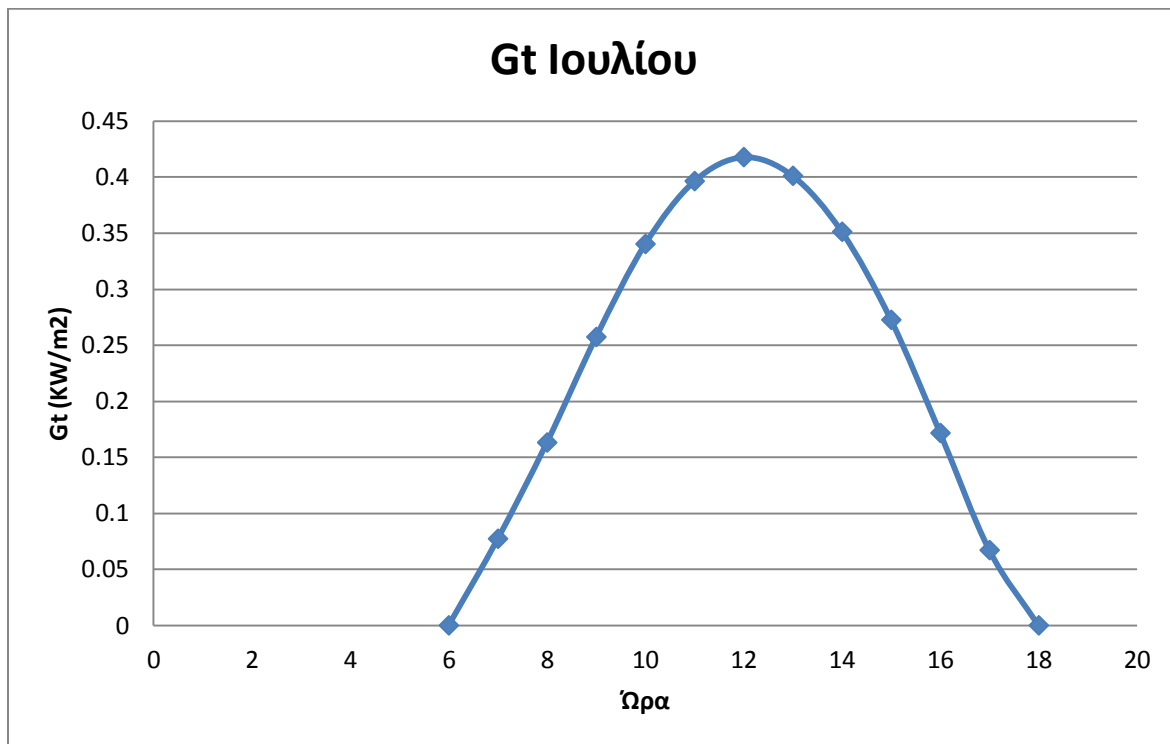
Σχήμα 7.1.11 Άμεση Gb , διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία Gt κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Ιούλη νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.12 Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουλίου



Σχήμα 7.1.13 Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουλίου.

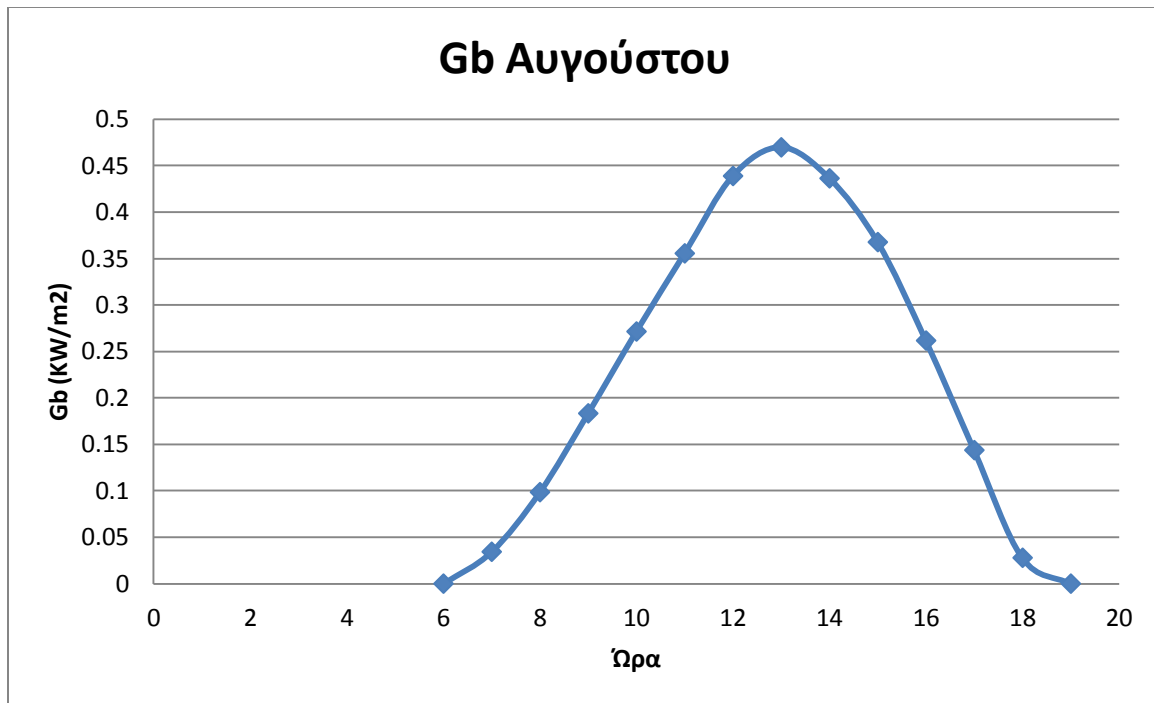


Σχήμα 7.1.14 Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουλίου νότιου προσανατολισμού.

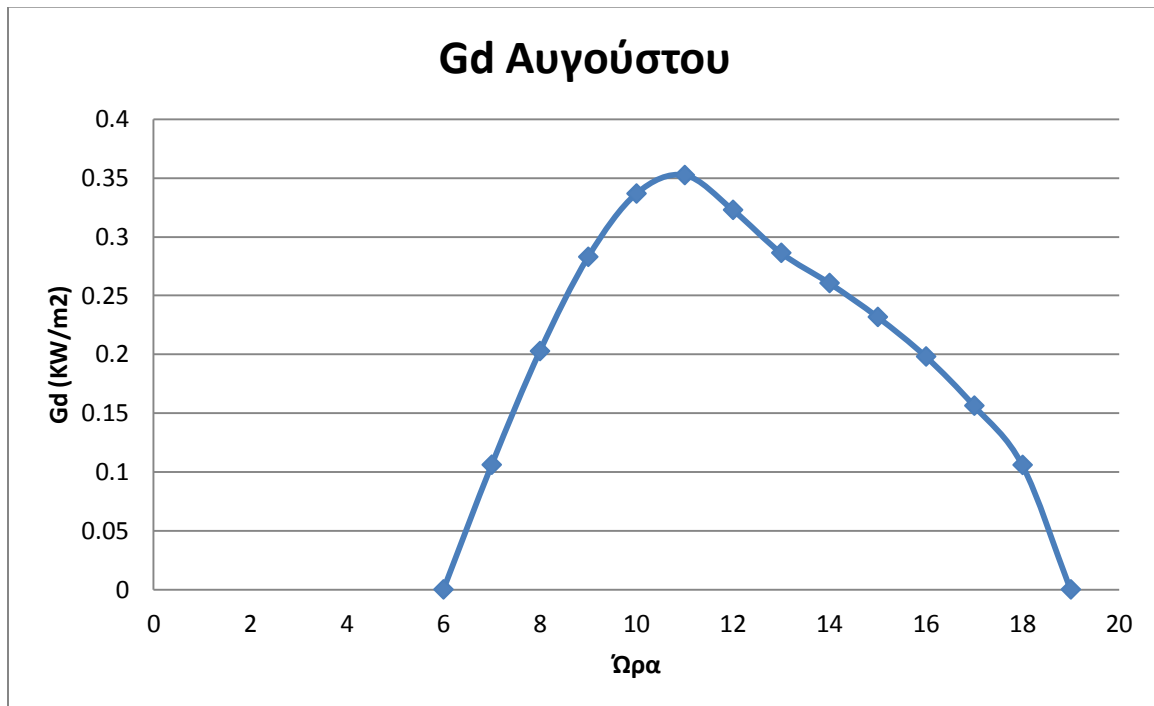
➤ Για την 21η Αυγούστου: $D=233$, $\delta=11,84555$

Ωρα (hrs)	Gb (KW/m²)	Gd (KW/m²)	ω	Rb	Gt (KW/m²)
6	0	0	-90	-1,27142	0
7	0,034326	0,105993	-75	-0,01641	0,066465
8	0,098465	0,202641	-60	0,272922	0,158305
9	0,18332	0,282768	-45	0,393574	0,260143
10	0,271434	0,336578	-30	0,453268	0,352122
11	0,355553	0,35229	-15	0,483268	0,418377
12	0,438871	0,322708	0	0,490934	0,452968
13	0,469718	0,286183	15	0,482201	0,44518
14	0,436338	0,26052	30	0,453268	0,397724
15	0,367705	0,231681	45	0,393574	0,320498
16	0,261694	0,198056	60	0,272922	0,216425
17	0,143733	0,156226	75	-0,01641	0,10575
18	0,027867	0,105834	90	-1,27142	0,030856
19	0	0	105	-2,3385	0

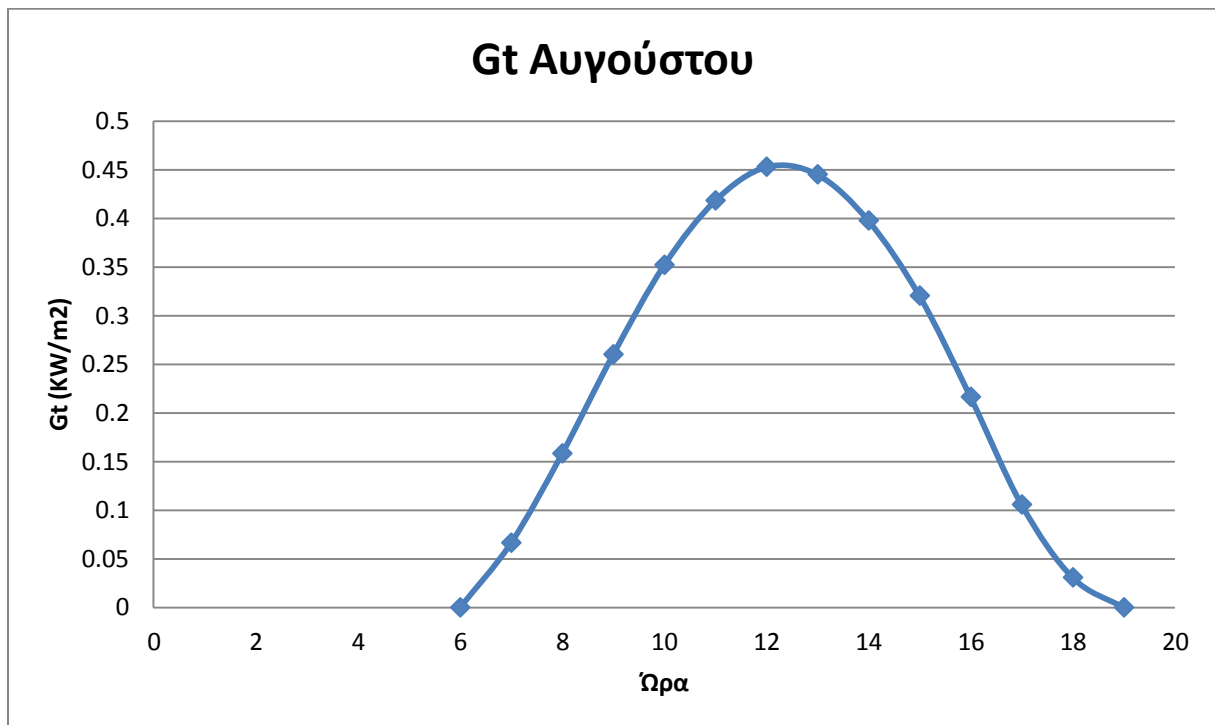
Σχήμα 7.1.15 Άμεση Gb , διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία Gt κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Αυγούστου νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.16 Μεταβολή της αμέσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Αυγούστου



Σχήμα 7.1.17 Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Αυγούστου.

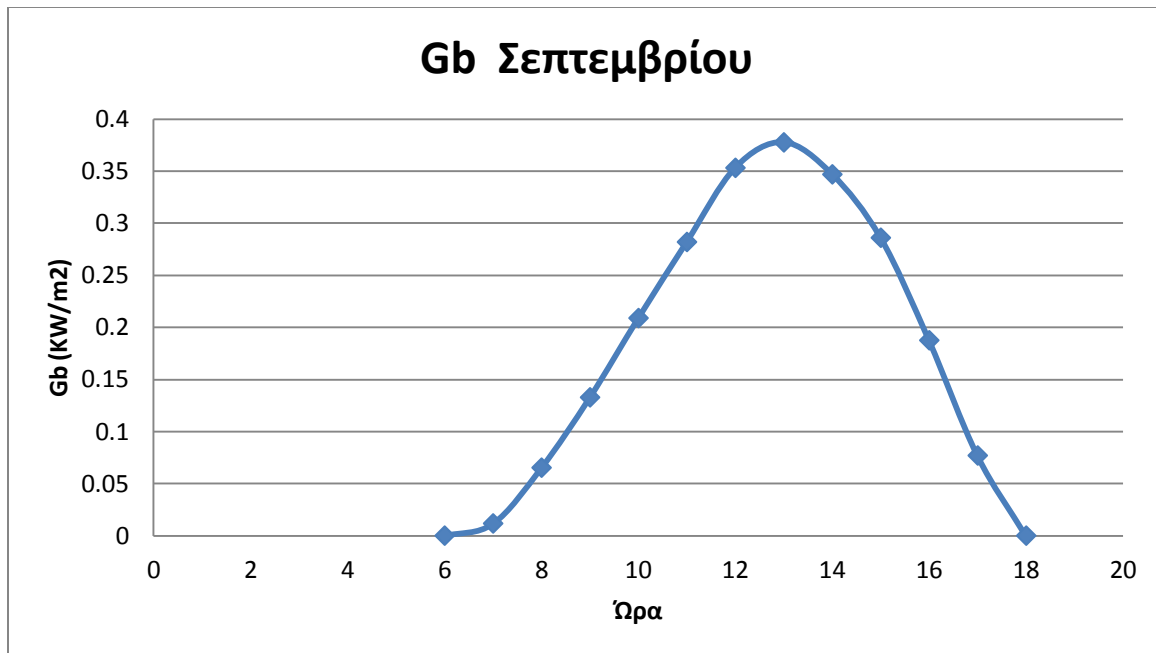


Σχήμα 7.1.18 Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Αυγούστου νότιου προσανατολισμού.

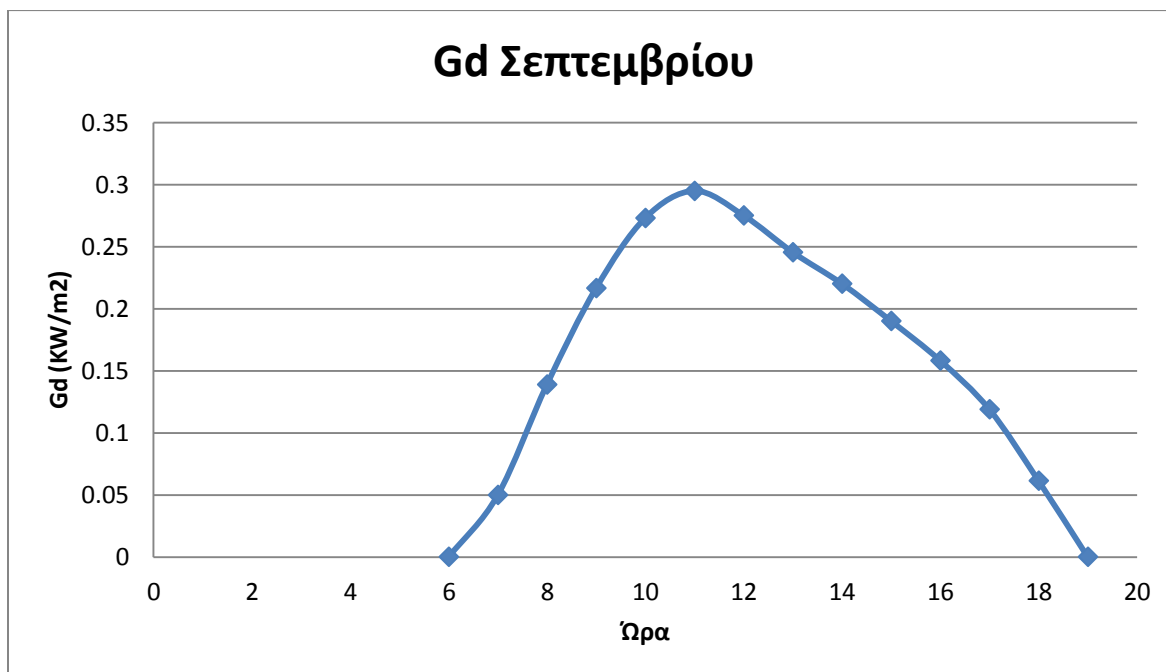
➤ Για την 21η Σεπτέμβρη: $D=264$, $\delta=- 0,08969$

Ωρα (hrs)	Gb (KW/m²)	Gd (KW/m²)	ω	Rb	Gt (KW/m²)
6	0	0	-90	-5,15521	0
7	0,011716	0,049816	-75	0,790442	0,040322
8	0,065304	0,138779	-60	0,785739	0,14111
9	0,132834	0,216457	-45	0,784262	0,247334
10	0,208984	0,272927	-30	0,783608	0,348416
11	0,282075	0,294732	-15	0,783307	0,425997
12	0,353268	0,275006	0	0,783218	0,477016
13	0,377732	0,245342	15	0,783307	0,480858
14	0,34703	0,220021	30	0,783608	0,438651
15	0,286135	0,189959	45	0,784262	0,366994
16	0,187635	0,158096	60	0,785739	0,261053
17	0,076989	0,118835	75	0,790442	0,139856
18	0	0,061293	90	-5,15521	0
19	0	0	105	-6,7358	0

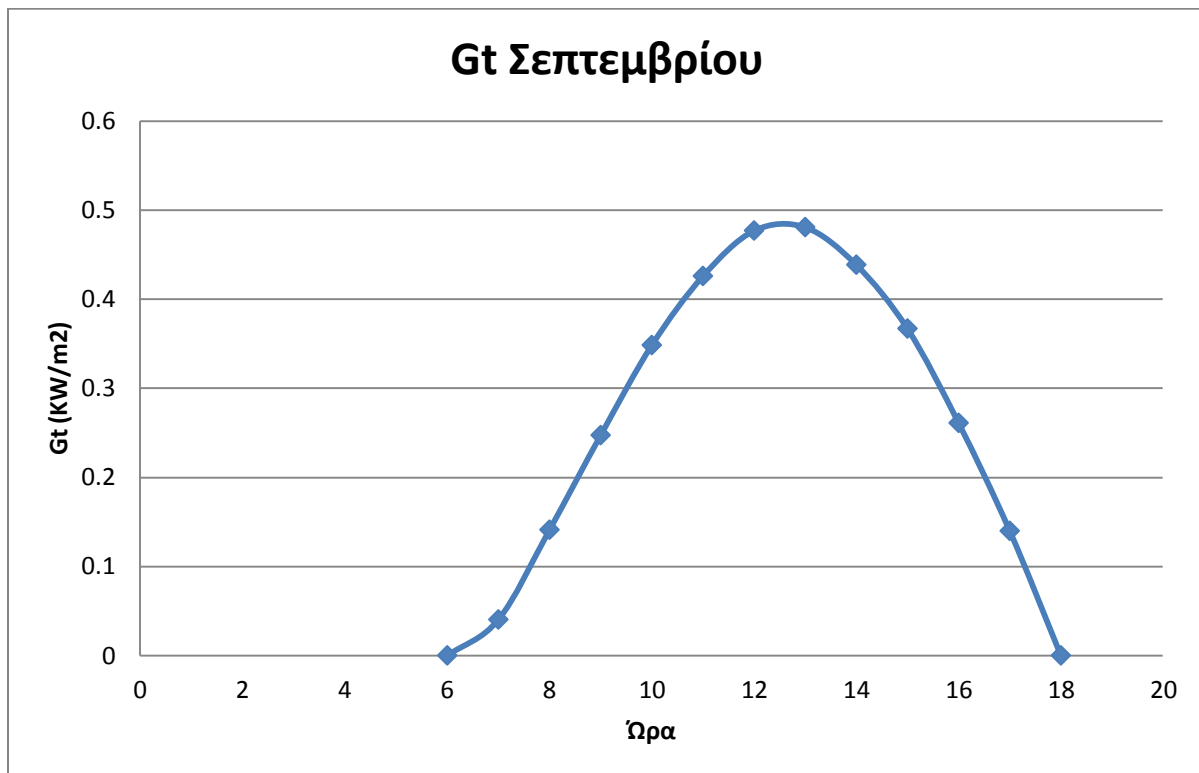
Σχήμα 7.1.19 Άμεση Gb , διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία Gt κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Σεπτέμβρη νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.20 Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Σεπτέμβρη



Σχήμα 7.1.21 Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Σεπτέμβρη

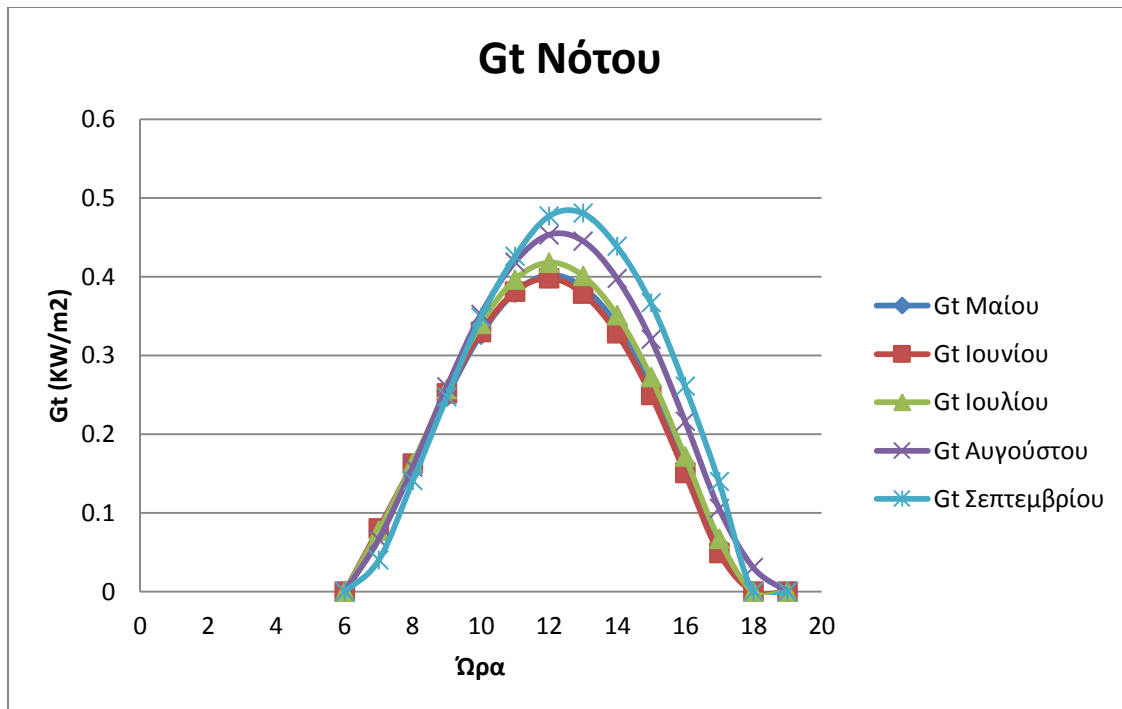


Σχήμα 7.1.22 Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Σεπτέμβρη νότιου προσανατολισμού.

Γt Νότου

Ωρα	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος
6	0	0	0	0	0
7	0.076473	0.080299	0.077277	0.066465	0.040322
8	0.158606	0.162635	0.16312	0.158305	0.14111
9	0.247887	0.251822	0.257285	0.260143	0.247334
10	0.326386	0.329689	0.340239	0.352122	0.348416
11	0.379743	0.381024	0.396315	0.418377	0.425997
12	0.401797	0.398017	0.41773	0.452968	0.477016
13	0.386401	0.378546	0.401056	0.44518	0.480858
14	0.338614	0.328165	0.351155	0.397724	0.438651
15	0.260975	0.249801	0.272563	0.320498	0.366994
16	0.162475	0.150684	0.17161	0.216425	0.261053
17	0.059674	0.049063	0.067114	0.10575	0.139856
18	0	0	0	0.030856	0
19	0	0	0	0	0

Σχήμα 7.1.23 Ακτινοβολία Γt κεκλιμένου επιπέδου για νότιο προσανατολισμό για τους θερινούς μήνες .



Σχήμα 7.1.24 Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει της ώρας για νότιο προσανατολισμό για τους θερινούς μήνες του έτους.

Από τους συνοπτικούς πίνακες και διαγράμματα όπου παρουσιάζουν για νότιο προσανατολισμό τις ακτινοβολίες των θερινών μηνών εύκολα παρατηρείται η ελαφρώς αύξηση της ακτινοβολίας όσο πλησιάζουμε στο μήνα Σεπτέμβρη.

7.2 Επιλογή PCM

- Χαρακτηριστικά της αίθουσας :

Θεωρήσαμε αίθουσα στην Αθήνα με διαστάσεις πλάτος =10m

Μήκος = 10m

Ύψος = 3m

- Ο τοίχος που θα περιέχει το PCM θα είναι πάντα απέναντι από

Υαλοπίνακα: $2,5 \times 3 \text{ m}^2$

- Ο τοίχος επίσης θα αποτελείται από :

Γυψοσανίδα =10mm

Στρώμα PCM = 40mm

Μόνωση =30mm

Τούβλο =60mm

Σοβάς =10mm

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τη θερμοκρασία που αποκτά το PCM μας κατά τη διάρκεια της ημέρας τους θερινούς μήνες. Η θερμότητα που εισέρχεται, κατά τους θερινούς μήνες, στο δωμάτιο είναι μεγάλη και πολλές φορές ανυπόφορη. Ψάχνουμε απεγνωσμένα τρόπους να απαλαχθούμε από αυτή τη δυσάρεστη κατάσταση. Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να επωφεληθούμε από αυτή την θερμότητα και μέσω του στρώματος PCM αφενός να απορροφήσουμε τα ηλιακά φορτία και αφετέρου να παράξουμε θερμό νερό για οικιακή χρήση.

Σε αυτήν την εφαρμογή χρησιμοποιείται ένα υποθετικό υλικό αλλαγής φάσης με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Θερμότητα αλλαγής φάσης ή θερμότητα της τήξης **H=150KJ/Kgr**
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης με θερμοκρασία εισόδου στη διφασική **Ts=20°C** και θερμοκρασία εξόδου από τη διφασική περιοχή ή θερμοκρασία υγροποίησης **Tl=26°C**.
 - Ειδική θερμοχωρητικότητα έναρξης της τήξης **Cps=4000 J/Kg°C** και ολοκλήρωσης της τήξης (υγρή φάση) **Cpl=4000J/Kg°C**.
 - Ειδική θερμική αγωγιμότητα **k=1,2**.
 - Πυκνότητα **ρ=1019Kgr/m3**

Η προσομοίωση θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση της ενεργός θερμοχωρητικότητας . Θα χρησιμοποιήσουμε την απλή μορφή του $C_{p,eff}$ δηλαδή η ενεργός θερμοχωρητικότητα θα βρεθεί από τις παρακάτω εξισώσεις και με την χρήση της τριγωνικής μορφής καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας (τριγωνική κατανομή) .

Γενική εξίσωση ενεργούς θερμοχωρητικότητας:

- Για $T \leq T_s$:

$$C_{p,eff} = C_{ps} \quad (7.2.1)$$

- Για $T_s < T \leq T_c$:

$$C_{p,eff} = 4 \times (H - b C_{ps}) \times \frac{T - T_s}{b} + C_{ps} \quad (7.2.2)$$

- Για $T_c < T \leq T_l$:

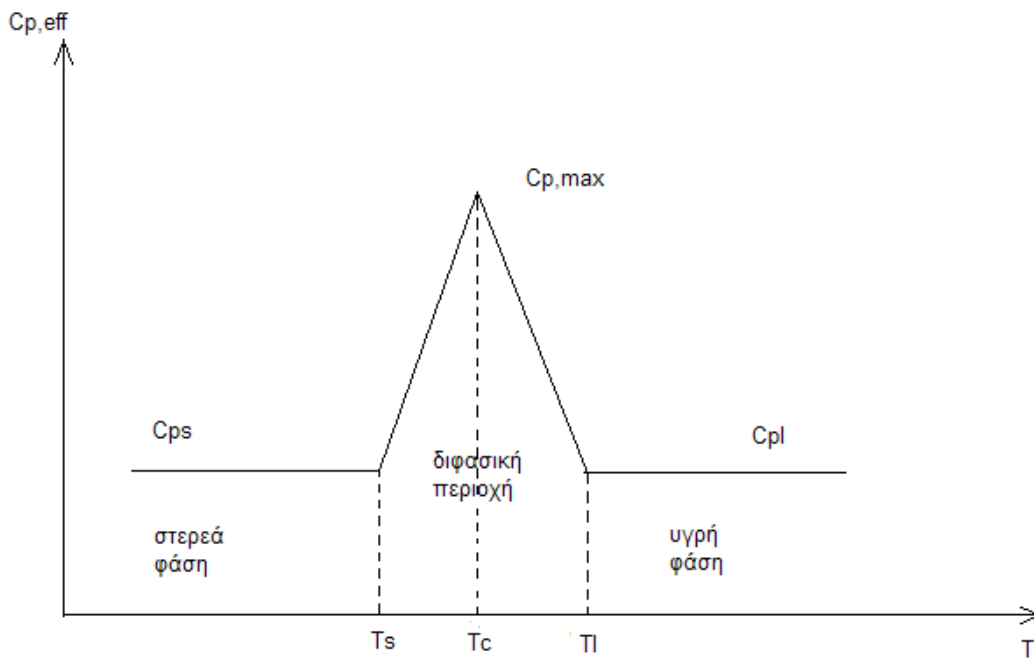
$$C_{p,eff} = 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b} \times (T - T_s - \frac{b}{2}) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} \quad (7.2.3)$$

- Για $T > T_l$:

$$C_{p,eff} = C_{pl} \quad (7.2.4)$$

Όπου : $T_c = \frac{T_s + T_l}{2}$ και $b = T_l - T_s$

Παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα:



Σχήμα 7.2.1 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας.

Χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά του υλικού αλλαγής φάσης που επιλέχθηκε για αυτήν την προσομοίωση οδηγούμαστε στις παρακάτω εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας:

- Για $T \leq 20 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$C_{p,eff} = C_{ps} = 4000 \text{ J/kgK} \quad (7.2.5)$$

- Για $20\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 23\text{ }^{\circ}\text{C}$:

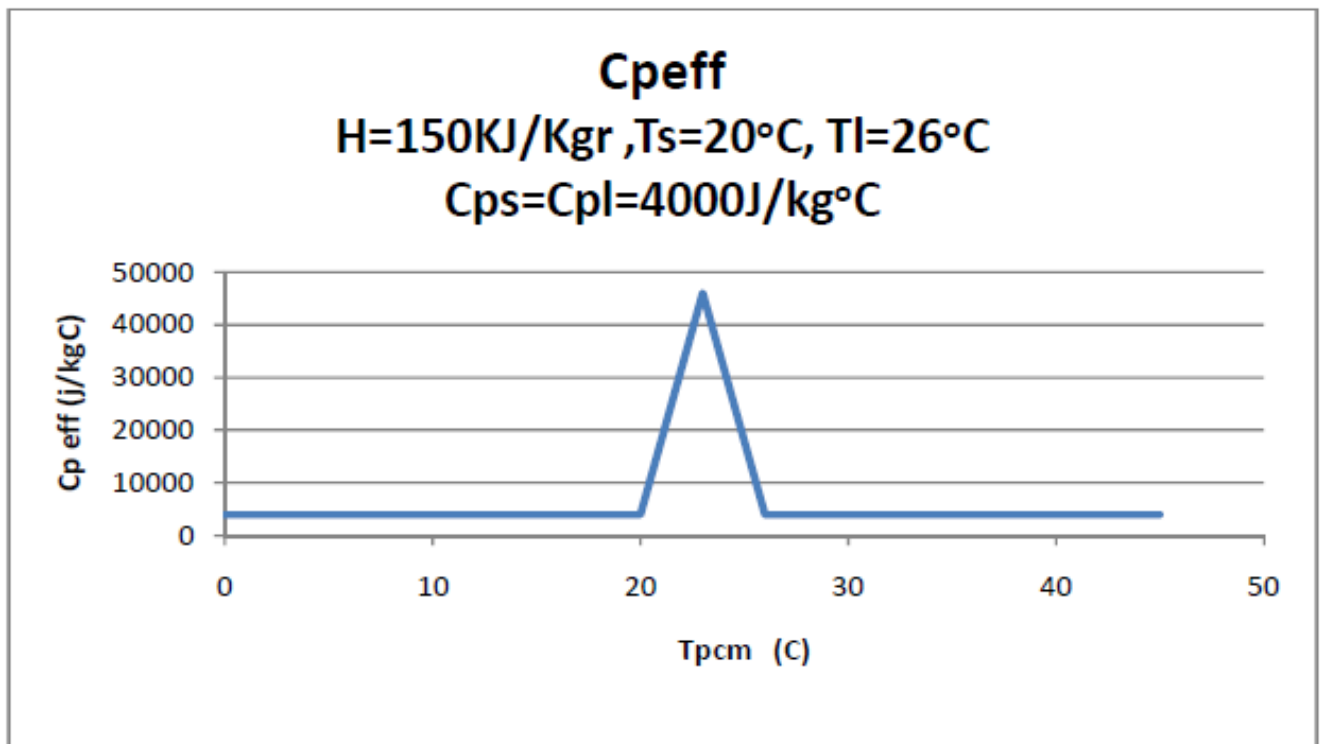
$$\begin{aligned} C_{p,\text{eff}} &= 4 \times (H - b C_{ps}) \times \frac{T - T_s}{b^2} + C_{ps} \\ &= 14000 \times (T - 20) + 4000 \end{aligned} \quad (7.2.6)$$

- Για $23\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 26\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\begin{aligned} C_{p,\text{eff}} &= 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b^2} \times (T - T_s - \frac{b}{2}) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} \\ &= -14000 \times (T - 23) + 46000 \end{aligned} \quad (7.2.7)$$

- Για $T > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$C_{p,\text{eff}} = C_{pl} = 4000 \text{ J/kgK} \quad (7.2.8)$$



Σχήμα 7.2.2: Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας του χρησιμοποιηθέντος PCM .

7.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας PCM

Για να γίνει χρήση του ισολογισμού θα πρέπει να προβούμε σε κάποιες παραδοχές ώστε να απλουστέψουμε λίγο το πρόβλημα, έτσι θεωρούμε :

1. Θεωρούμε ότι στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης επικρατεί ομοιόμορφη θερμοκρασία.
2. Η θερμοκρασία της αίθουσας θεωρείται σταθερή.
3. Θεωρούμε ότι μεταξύ του στρώματος υλικού αλλαγής φάσης και της μόνωσης δεν υπάρχει συναλλαγή θερμότητας δηλαδή υπάρχει αδιαβατικό όριο μεταξύ τους, τέλεια μόνωση .
4. Τέλος θεωρούμε ότι στην αίθουσα υπάρχουν σταθερές απώλειες δηλαδή υπάρχει σταθερή ισχύ που χρειάζεται για την κάλυψη των αναγκών.

Ισολογισμός :

Η ενέργεια που δίνει το PCM είναι η ενέργεια λόγω της ακτινοβολίας αφαιρούμενη κατά την ενέργεια που δίνει το PCM στο χώρο.

Άρα :

$$m C_p (T_T - T_A) = G_t A_{\pi} 3600 + A_T U 3600 (T_{\delta} - T_A) \quad (7.3.1)$$

Όπου :

- C_p , η ειδική θερμοχωρητικότητα η οποία δίνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του PCM σύμφωνα με τις εξισώσεις (7.2.5), (7.2.6), (7.2.7), (7.2.8)
- m , η μάζα του PCM

$$m = \rho V = 1019 \times 1,2 = 1222,8 \text{ Kgr}$$

$$\text{με: } V = (\text{επιφάνεια τοίχου}) \times (\text{πάχος PCM}) = 30\text{m}^2 \times 0,04\text{m} = 1,2\text{m}^3$$

Για το πάχος του PCM έχουμε επιλέξει μια λογική τιμή ίση με 4cm.

Και $\rho=1019\text{Kgr/m}^3$

- T_A , η θερμοκρασία του PCM στην αρχή της χρονικής περιόδου .

- T_T , η θερμοκρασία του PCM στο τέλος της χρονικής περιόδου.
- G_t , ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου (έχει βρεθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 7.1.)
- A_{π} , η επιφάνεια του υαλοπίνακα στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται υαλοπίνακας διαστάσεων (ύψος) x (μήκος) = (2,5) x (3) m^2 .

$$\text{Άρα } A_{\pi} = 7,5 \text{ m}^2$$

- A_T , η επιφάνεια τοίχου στον οποίο έχει ενσωματωθεί το PCM με διαστάσεις (πλάτος αίθουσας) x (ύψος) = (10) x (3) m^2

$$\text{Άρα } A_T = 30 \text{ m}^2$$

- U , η ειδική θερμική διαπερατότητα, η οποία μπορεί να βρεθεί με βάση την εξίσωση :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{l}{k} = \frac{1}{8} + \frac{0,01}{1,2} = 0,133$$

$$\text{Άρα } U = 7,52 \text{ W/m}^2$$

με $\frac{1}{h}$, η θερμική αντίσταση συναγωγής και $\frac{l}{k}$, η θερμική αντίσταση αγωγής

διαμέσου της γυψοσανίδας που υπάρχει πριν το στρώμα του PCM και η οποία έχει πάχος $l = 10\text{mm}$ και θερμική αγωγιμότητα $k = 0,12 \text{ W /m C}$

- T_{δ} , η θερμοκρασία στο εσωτερικό της αίθουσας όπου στην περίπτωση μας είναι ίση με $T_{\delta} = 26^{\circ}\text{C}$

Θα μελετήσουμε την ηλιακή φόρτιση τοιχοποιίας για την 21η ημέρα των θερινών μηνών τις ώρες ύπαρξης ηλιακής ακτινοβολίας (από 07:00 - 18:00) καθώς για αυτές τις μέρες και ώρες είναι γνώστη η ηλιακή ακτινοβολία από προηγούμενο κεφάλαιο. Μελετάται δηλαδή η θερμοκρασία του στρώματος PCM για κάθε θερινό μήνα και για νότιο προσανατολισμό του τοίχου κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Εύκολα από την εξίσωση ισολογισμού γνωρίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία μπορούμε να βρούμε την θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης στο τέλος της κάθε ώρας .

$$T_T = T_A + \frac{Gt A\pi 3600 + U A\tau 3600 (T\delta - T_A)}{Cp m} \quad (7.3.2)$$

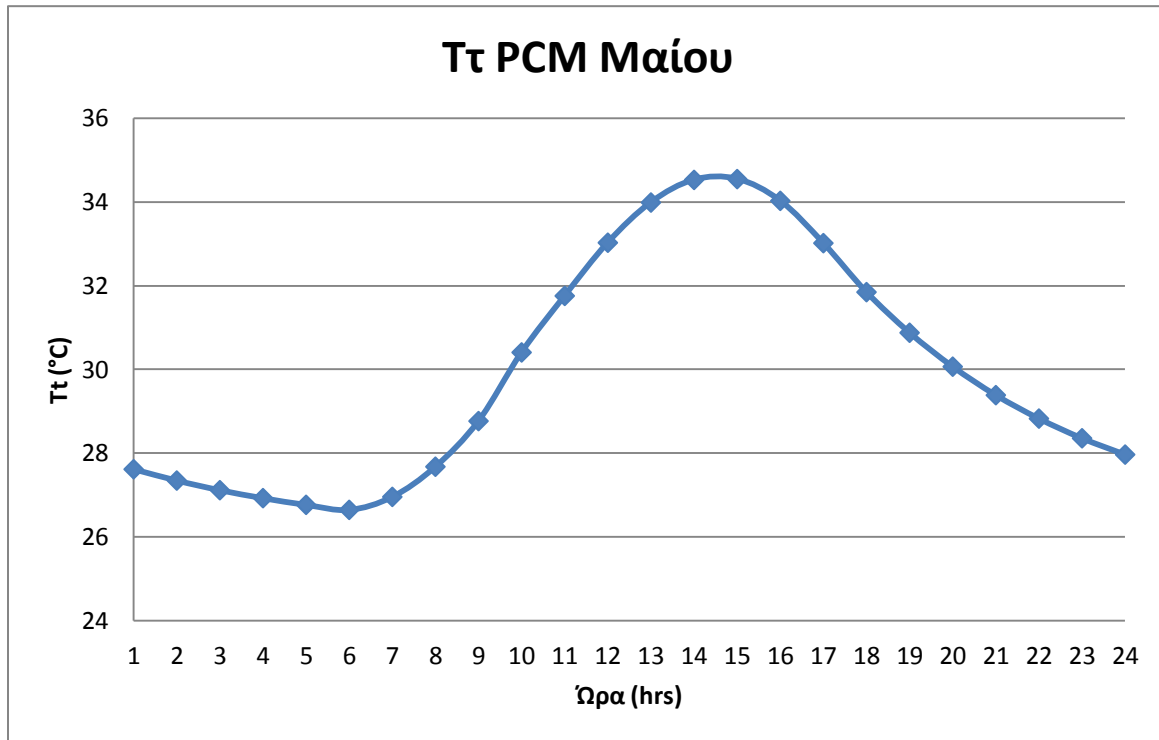
Βέβαια από τη παραπάνω εξίσωση παρατηρούμε την ύπαρξη και ενός άλλου αγνώστου του T_A της θερμοκρασίας δηλαδή στην αρχή της χρονικής περιόδου στην αρχή κάθε ώρας .Για την εύρεση της όποιας θα εργαστούμε ως εξής:

Αρχικά θα θεωρήσουμε εμείς μια αυθαίρετη τιμή , έστω $T_A = 24^\circ\text{C}$ για τις $t=07:00$ (7 η ώρα το πρωί) με αυτή την αρχική τιμή(γνωρίζοντας και την ακτινοβολία που δέχεται ο τοίχος την συγκεκριμένη ώρα) θα βρούμε από τη σχέση (7.3.2) για κάθε ώρα της μέρας μελέτης μας τη νέα θερμοκρασία του PCM T_T , δηλαδή για κάθε μια από τις ώρες από 07:00 το πρωί ως 06:00 το άλλο πρωί(ένα εικοσιτετράωρο) θα βρεθεί η νέα θερμοκρασία του . Ύστερα θα επαναλάβουμε την διαδικασία αυτή βάζοντας τώρα ως αρχική τιμή της T_A για $t=07:00$ την τιμή που μας έχει προκύψει την $t=06:00$ του προηγούμενου 24ώρου(προηγούμενη δοκιμή).Οι επαναλήψεις θα συνεχιστούν μέχρι οι τιμές της ίδιας ώρας κάθε 24ώρου να συγκλίνουν. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία από την αρχική αυθαίρετη υποτεθείσα θερμοκρασία. Για να απλοποιηθεί η εξίσωση (7.3.2) θα παίρνουμε το $C_{p,eff}$ βάση της αρχικής θερμοκρασίας T_A που έχουμε θεωρήσει κάθε φορά. Όσο μικραίνει το βήμα τόσο πιο ακριβές θα είναι το αποτέλεσμα. Με την διαδικασία αυτή λοιπόν υπολογίσαμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο στρώμα του PCM για μια τυπική ημέρα 21η κάθε θερινού μήνα του έτους, οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω πίνακάκια και διαγράμματα.

➤ Για την 21η Μαΐου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	26,65
7	0,076473	26,96
8	0,158606	27,68
9	0,247887	28,77
10	0,326386	30,41
11	0,379743	31,76
12	0,401797	33,03
13	0,386401	33,99
14	0,338614	34,53
15	0,260975	34,55
16	0,162475	34,03
17	0,059674	33,02
18	0	31,85
19	0	30,88
20	0	30,07
21	0	29,39
22	0	28,83
23	0	28,36
24	0	27,97
1	0	27,62
2	0	27,35
3	0	27,12
4	0	26,93
5	0	26,77

Σχήμα 7.3.1 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Μαΐου για νότιο προσανατολισμό.

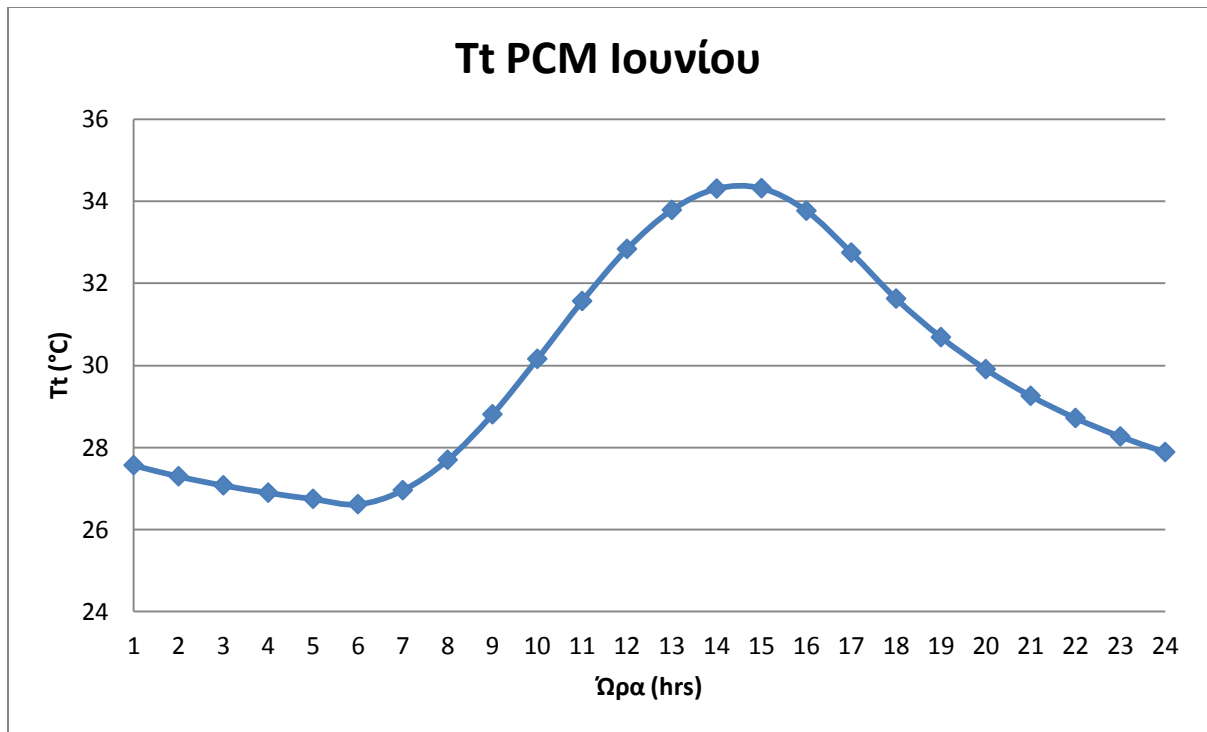


Σχήμα 7.3.2 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Μαΐου για νότιο προσανατολισμό.

➤ Για την 21^η Ιουνίου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	26,62
7	0,080299	26,96
8	0,162635	27,70
9	0,251822	28,81
10	0,329689	30,16
11	0,381024	31,57
12	0,398017	32,84
13	0,378546	33,79
14	0,328165	34,31
15	0,249801	34,32
16	0,150684	33,77
17	0,049063	32,75
18	0	31,63
19	0	30,69
20	0	29,91
21	0	29,26
22	0	28,72
23	0	28,27
24	0	27,89
1	0	27,57
2	0	27,30
3	0	27,08
4	0	26,90
5	0	26,75

Σχήμα 7.3.3 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό.

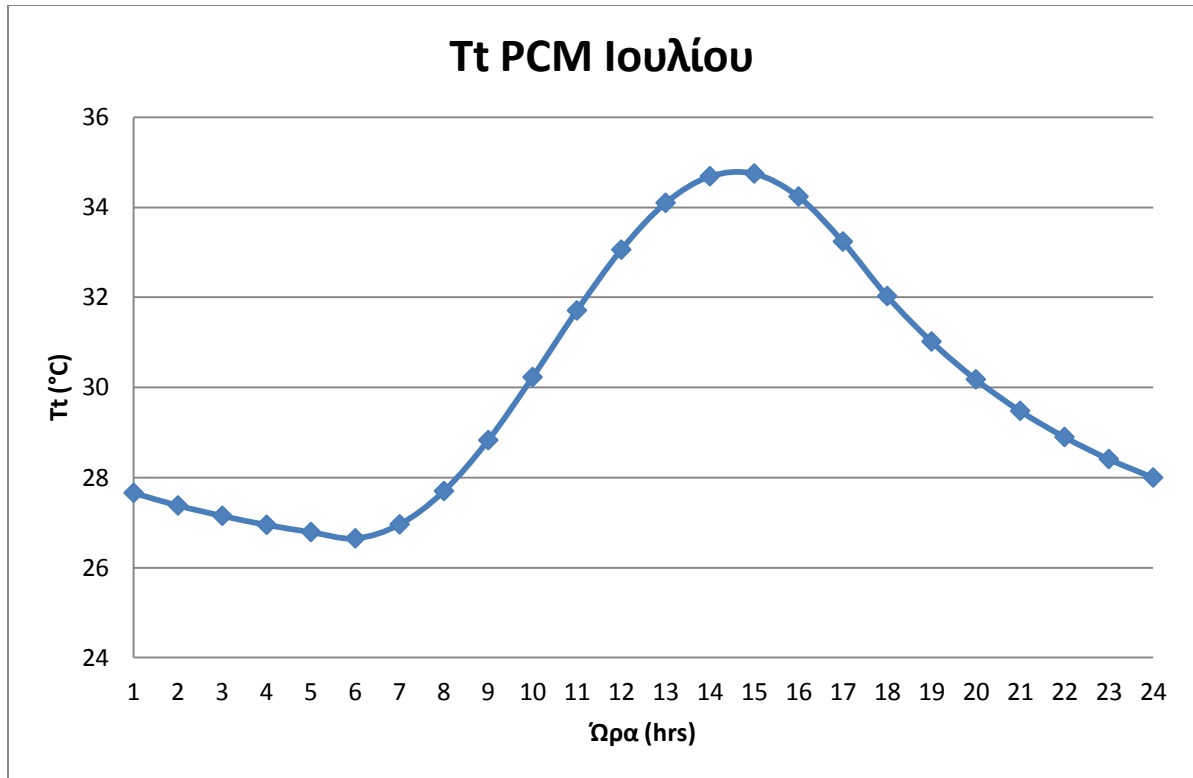


Σχήμα 7.3.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21^η Ιουλίου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	26,65
7	0,077277	26,96
8	0,16312	27,70
9	0,257285	28,83
10	0,340239	30,23
11	0,396315	31,71
12	0,41773	33,06
13	0,401056	34,10
14	0,351155	34,69
15	0,272563	34,75
16	0,17161	34,24
17	0,067114	33,24
18	0	32,03
19	0	31,02
20	0	30,18
21	0	29,48
22	0	28,90
23	0	28,41
24	0	28,00
1	0	27,66
2	0	27,38
3	0	27,15
4	0	26,95
5	0	26,79

Σχήμα 7.3.5 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό.

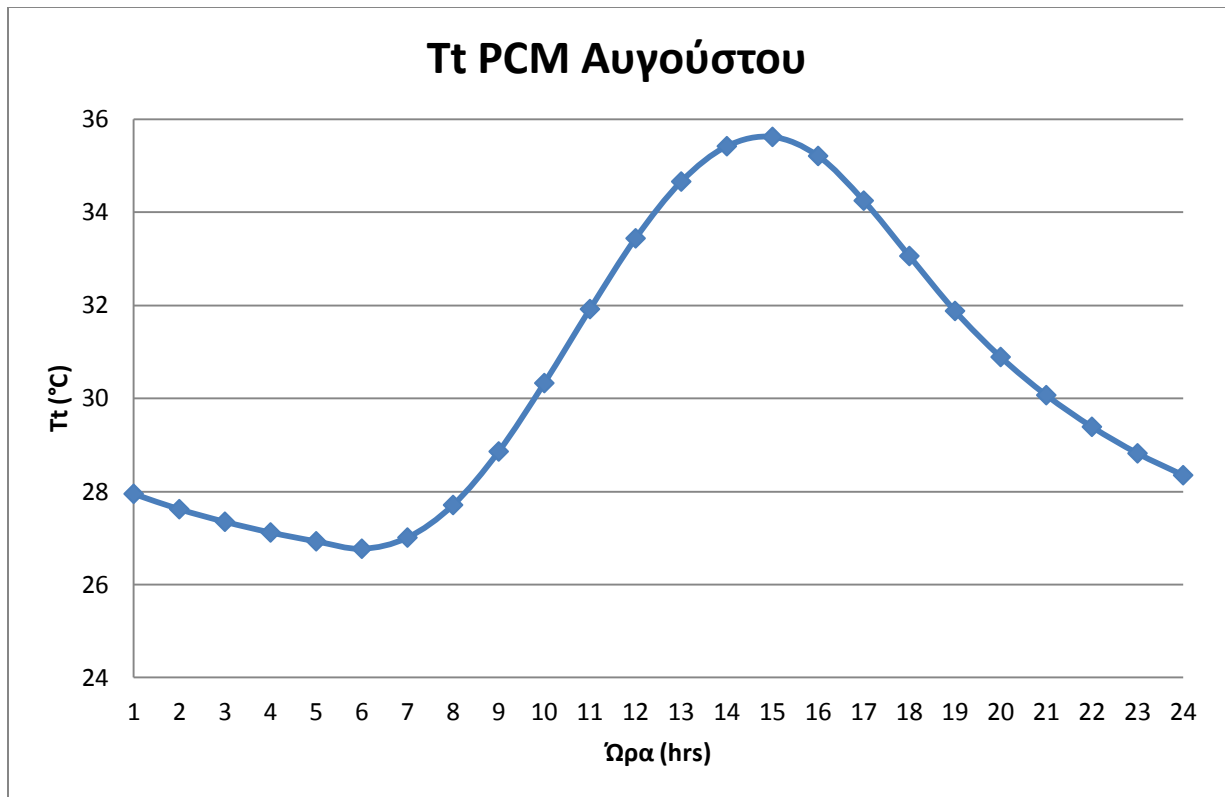


Σχήμα 7.3.6 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21^η Αυγούστου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	26,77
7	0,066465	27,01
8	0,158305	27,71
9	0,260143	28,86
10	0,352122	30,33
11	0,418377	31,92
12	0,452968	33,44
13	0,44518	34,66
14	0,397724	35,42
15	0,320498	35,62
16	0,216425	35,21
17	0,10575	34,25
18	0,030856	33,06
19	0	31,88
20	0	30,89
21	0	30,07
22	0	29,39
23	0	28,82
24	0	28,35
1	0	27,95
2	0	27,62
3	0	27,35
4	0	27,12
5	0	26,93

Σχήμα 7.3.7 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό.

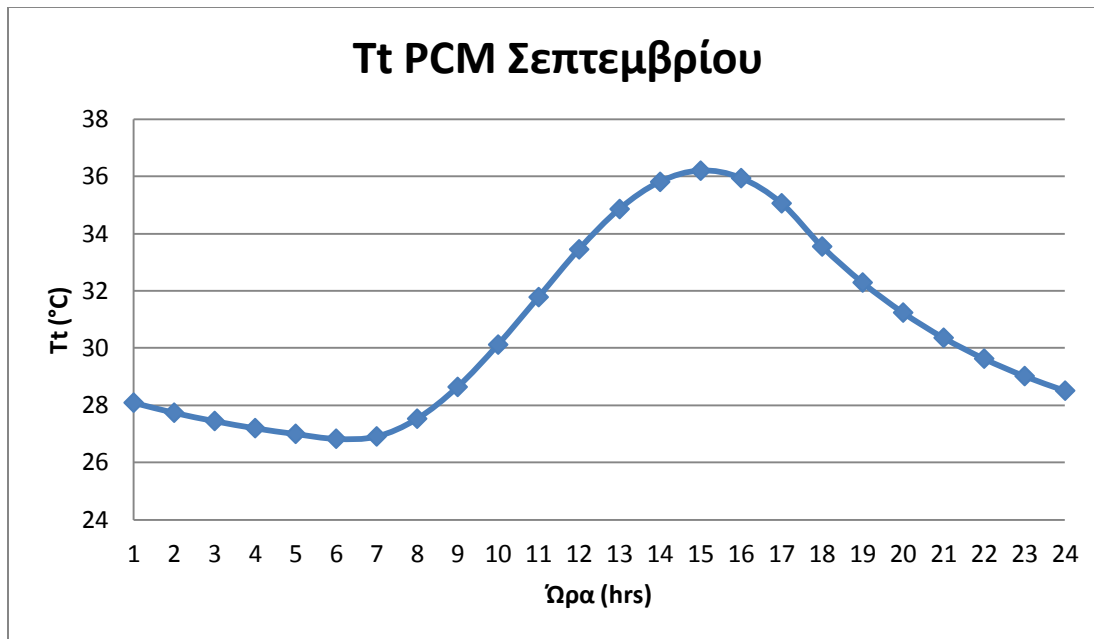


Σχήμα 7.3.8 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό

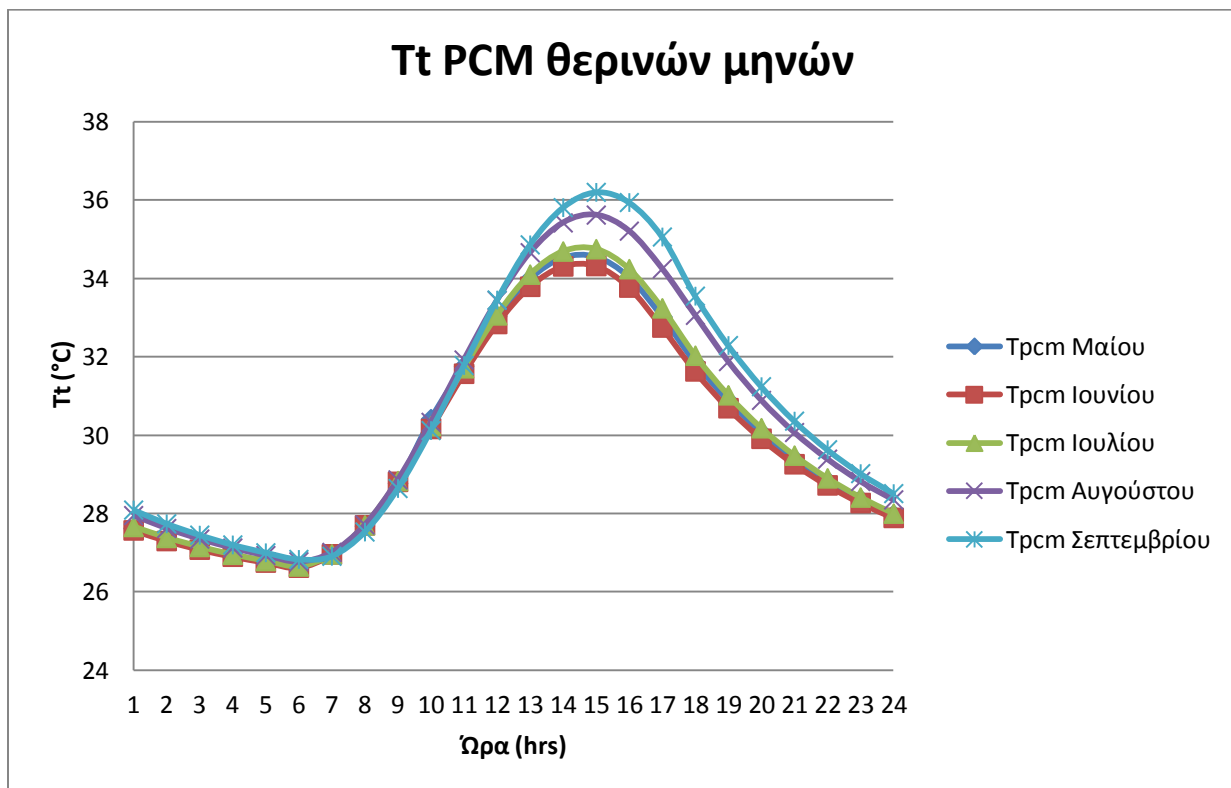
➤ Για την 21^η Σεπτεμβρίου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	26,83
7	0,040322	26,91
8	0,141111	27,53
9	0,247334	28,64
10	0,348416	30,12
11	0,425997	31,78
12	0,477016	33,45
13	0,480858	34,86
14	0,438651	35,81
15	0,366994	36,20
16	0,261053	35,94
17	0,139856	35,06
18	0	33,55
19	0	32,29
20	0	31,24
21	0	30,36
22	0	29,63
23	0	29,02
24	0	28,51
1	0	28,09
2	0	27,74
3	0	27,45
4	0	27,20
5	0	27,00

Σχήμα 7.3.9 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό.

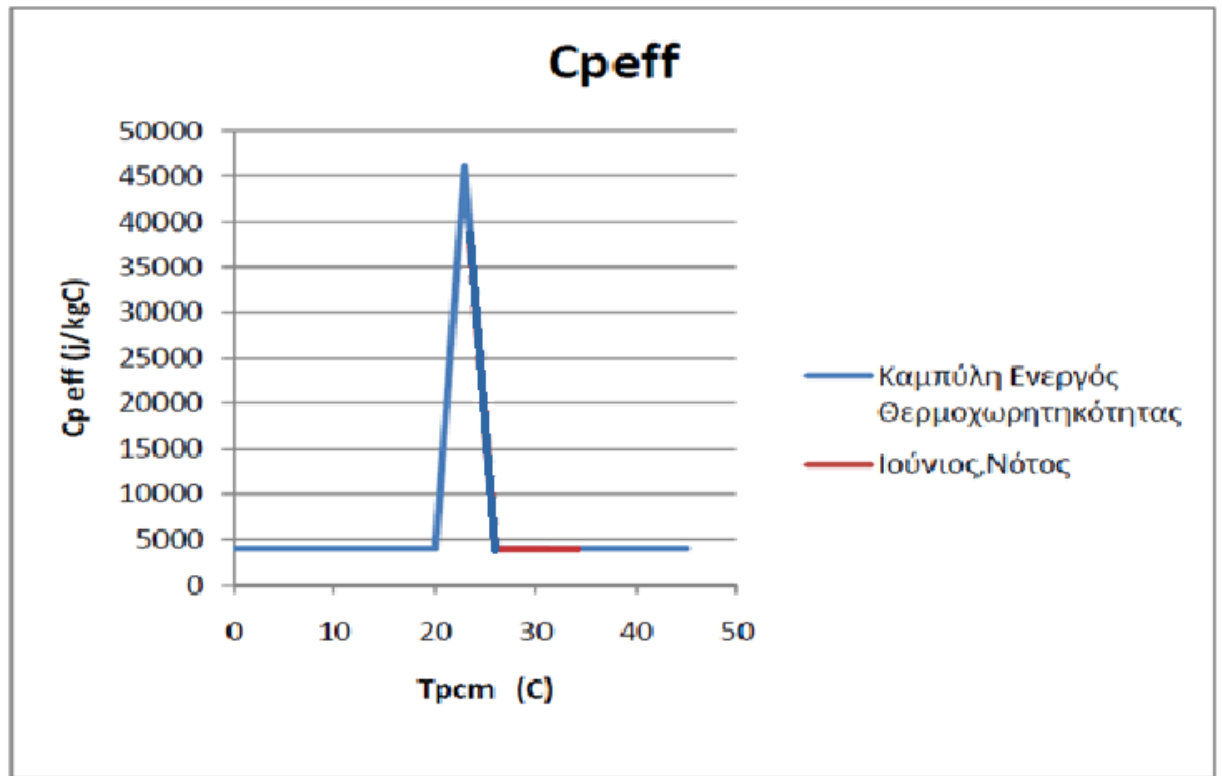


Σχήμα 7.3.10 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό



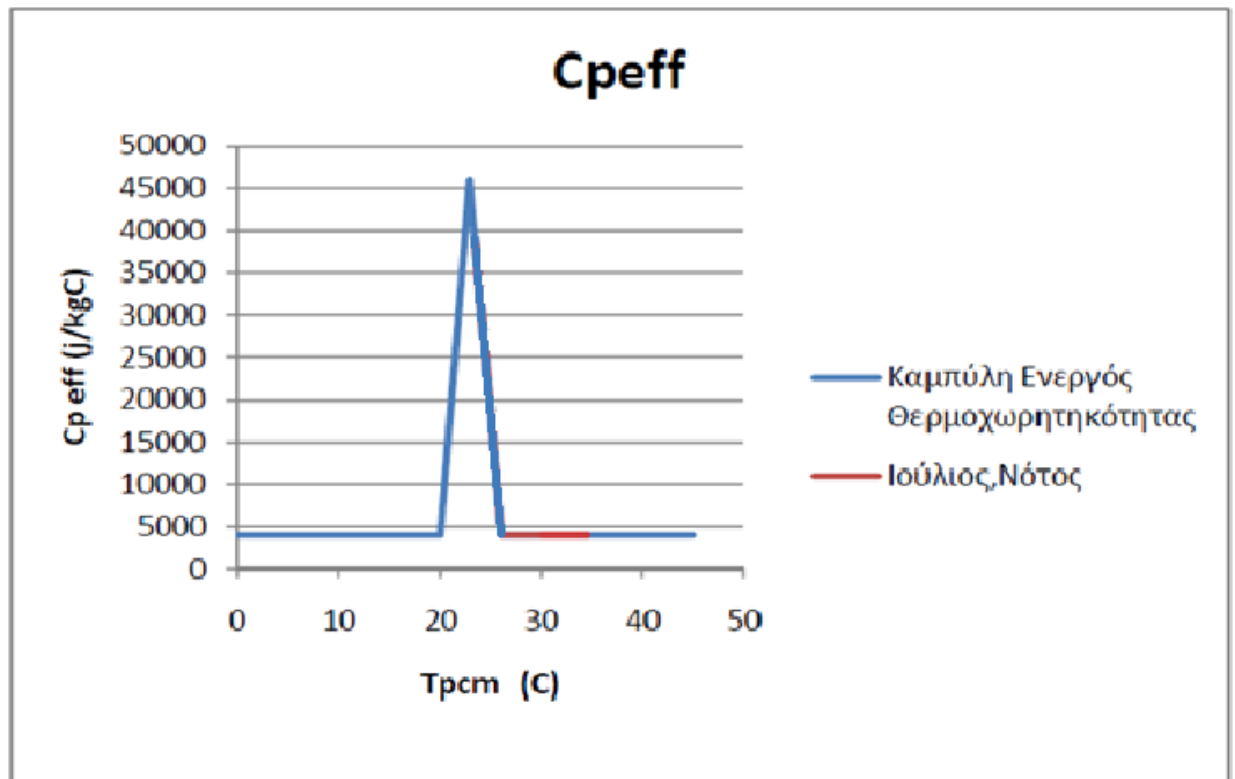
Σχήμα 7.3.11 Διαγράμματα Tt PCM συναρτήσει της ώρας για όλους τους θερινούς μήνες του έτους σε τοίχο νότιο προσανατολισμού.

➤ Για την 21η Ιουνίου



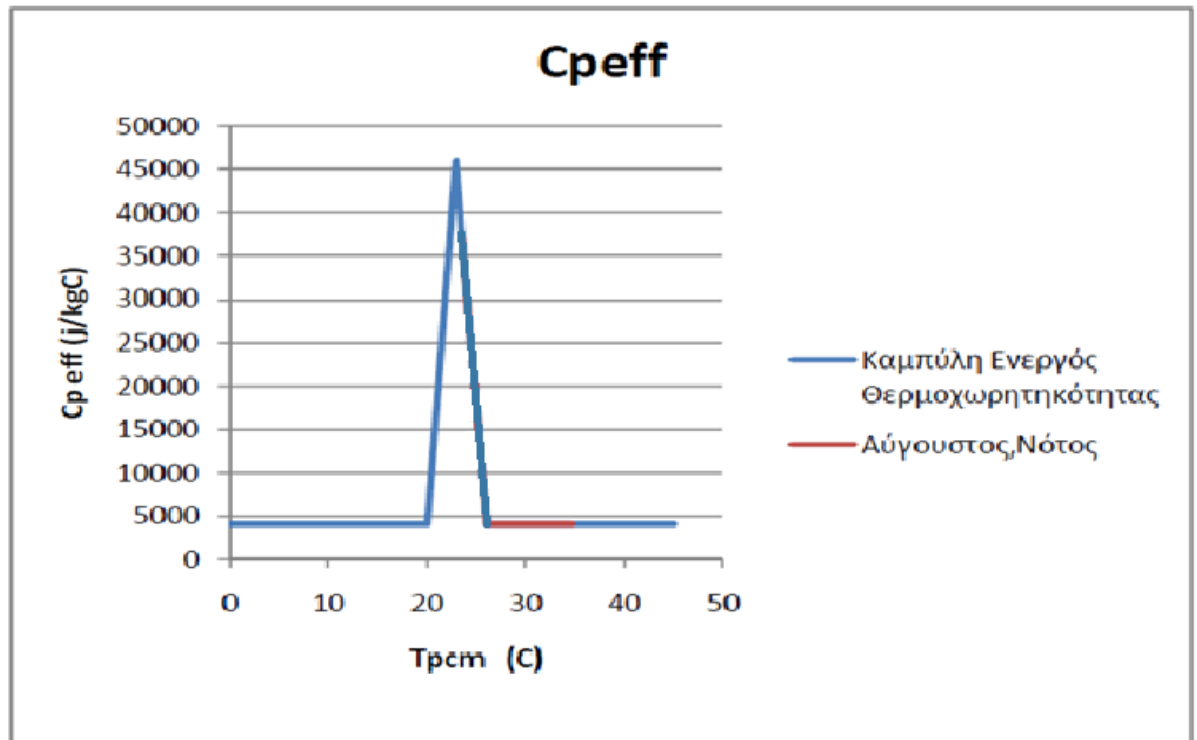
Σχήμα 7.3.13 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Ιούνιο το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

➤ Για την 21η Ιουλίου



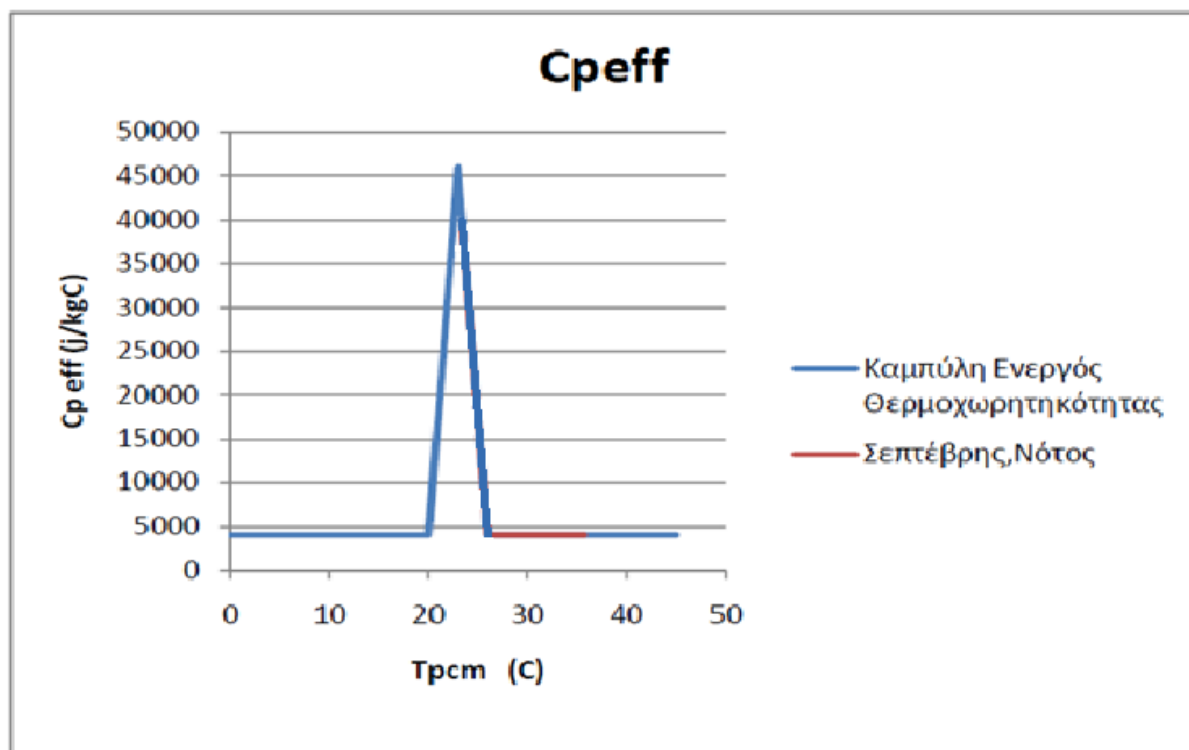
Σχήμα 7.3.14 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Ιούλιο το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

➤ Για την 21η Αυγούστου



Σχήμα 7.3.15 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Αυγούστο το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

➤ Για την 21η Σεπτεμβρίου



Σχήμα 7.3.16 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Σεπτέμβρη το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

Για να αποδώσει το υλικό αλλαγής φάσης το 100% της ενέργειας που μπορεί να προσφέρει πρέπει σε αυτό να αναπτύσσονται τέτοιες θερμοκρασίες ώστε να καλύπτεται όλο το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του. Πολλές έρευνες και μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για την εύρεση PCM με ιδιότητες τέτοιες ώστε να εκμεταλλεύεται πλήρως όλη τη λανθάνουσα θερμοκρασία του ,όμως χωρίς επιτυχία. Βέβαια έχουν βρεθεί PCM που έχουν πλησιάσει πολύ κοντά στο στόχο και εκμεταλλεύονται μεγάλο ποσοστό της λανθάνουσας θερμοκρασίας τους. Στην περίπτωση μας βλέπουμε ότι το PCM μας κατά τη διάρκεια όλης της μέρας δεν ξεφεύγει από την υγρή περιοχή.

Τους καλοκαιρινούς μήνες το υλικό αλλαγής φάσης τις ώρες αιχμής απορροφά την ακτινοβολία του ήλιου επιτυγχάνοντας μικρότερες σε μέτρο θερμοκρασίες στην αίθουσα από το αναμενόμενο. Λόγω της αρκετά υψηλής εξωτερικής θερμοκρασίας είναι δύσκολο να επιτευχθούν συνθήκες θερμικής άνεσης με την χρήση μόνο του PCM τους θερινούς μήνες για το λόγω αυτό προτείνεται χρήση κάποιου κλιματιστικού ή κάποιου άλλου τρόπου δροσισμού.

7.4 Υπολογισμός θερμοκρασίας μπετόν

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τη θερμοκρασία που αποκτά ο τοίχος μας σε περίπτωση που δεν είχε PCM κατά τη διάρκεια της ημέρας τους θερινούς μήνες. Δηλαδή, θα εξετάσουμε τη θερμοκρασία του μπετόν λόγω της ακτινοβολίας που δέχεται ο τοίχος και της ήδη θερμοκρασίας του δωματίου.

Ο ισολογισμός που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ο ίδιος με του κεφαλαίου (7.3)

Δηλαδή:

$$m C_p (T_T - T_A) = G_t A_{\pi} 3600 + A_T U 3600 (T_{\delta} - T_A) \quad (7.4.1)$$

Όπου :

- C_p , η ειδική θερμοχωρητικότητα του μπετόν η οποία ισούται με $880 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$
- m , η μάζα του μπετόν

$$m = \rho V = 2300 \times 1,2 = 2760 \text{ Kgr}$$

$$\text{με: } V = (\text{επιφάνεια τοίχου}) \times (\text{πάχος μπετόν}) = 30\text{m}^2 \times 0,04\text{m} = 1,2\text{m}^3$$

Για το πάχος του μπετόν έχουμε επιλέξει μια λογική τιμή ίση με 4cm.

$$\text{Και } \rho = 2300 \text{Kgr/m}^3$$

- T_A , η θερμοκρασία του μπετόν στην αρχή της χρονικής περιόδου .
- T_T , η θερμοκρασία του μπετόν στο τέλος της χρονικής περιόδου.
- G_t , ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου (έχει βρεθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 7.1.)
- A_{π} , η επιφάνεια του υαλοπίνακα στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται υαλοπίνακας διαστάσεων (ύψος) x (μήκος) = (2,5) x (3) m^2 .
Άρα $A_{\pi} = 7,5 \text{ m}^2$
- A_T , η επιφάνεια τοίχου που εξετάζουμε με διαστάσεις (πλάτος αίθουσας) x (ύψος) = (10) x (3) m^2 . Άρα $A_T = 30 \text{ m}^2$
- U , η ειδική θερμική διαπερατότητα, η οποία μπορεί να βρεθεί με βάση την εξίσωση :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{l}{k} = \frac{1}{8} + \frac{0,01}{1,2} = 0,133$$

$$\text{Άρα } U = 7,52 \text{ W/m}^2$$

με $\frac{1}{h}$, η θερμική αντίσταση συναγωγής και $\frac{l}{k}$, η θερμική αντίσταση αγωγής η

οποία έχει πάχος $l = 10\text{mm}$ και θερμική αγωγιμότητα $k = 0,12 \text{ W /m C}$

- T_{δ} , η θερμοκρασία στο εσωτερικό της αίθουσας όπου στην περίπτωση μας είναι ίση με $T_{\delta} = 26^{\circ}\text{C}$

Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα μελετήσουμε την ηλιακή φόρτιση τοιχοποιίας για την 21η ημέρα των θερινών μηνών τις ώρες ύπαρξης ηλιακής ακτινοβολίας (από 07:00 - 18:00) καθώς για αυτές τις μέρες και ώρες είναι γνώστη η ηλιακή ακτινοβολία από προηγούμενο κεφάλαιο. Μελετάται δηλαδή η θερμοκρασία του μπετόν για κάθε θερινό μήνα και για νότιο προσανατολισμό του τοίχου κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Μπορούμε να βρούμε την θερμοκρασία του μπετόν στο τέλος της κάθε ώρας σύμφωνα με τον τύπο του προηγούμενου κεφαλαίου.

$$T_T = T_A + \frac{Gt A \pi 3600 + U A \tau 3600 (T_{\delta} - T_A)}{Cp m} \quad (7.4.2)$$

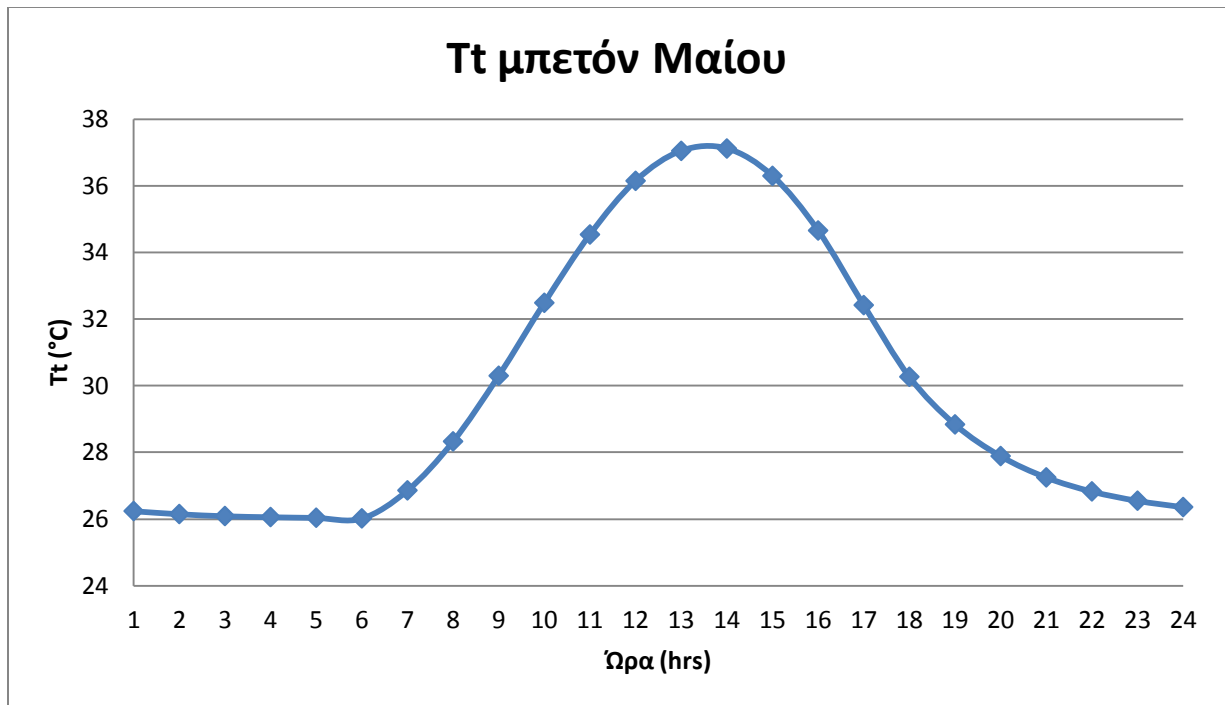
Για την εύρεση της T_A της θερμοκρασίας δηλαδή στην αρχή της χρονικής περιόδου θα εργαστούμε όπως πριν.

Με την ήδη δοκιμασμένη διαδικασία υπολογίσαμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο μπετόν για μια τυπική ημέρα 21η κάθε θερινού μήνα του έτους, οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω πίνακάκια και διαγράμματα.

➤ Για την 21^η Μαΐου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
6	0	26,02
7	0,076473	26,86
8	0,158606	28,33
9	0,247887	30,30
10	0,326386	32,49
11	0,379743	34,54
12	0,401797	36,15
13	0,386401	37,05
14	0,338614	37,12
15	0,260975	36,30
16	0,162475	34,66
17	0,059674	32,42
18	0	30,27
19	0	28,84
20	0	27,89
21	0	27,25
22	0	26,83
23	0	26,55
24	0	26,36
1	0	26,24
2	0	26,15
3	0	26,09
4	0	26,06
5	0	26,04

Σχήμα 7.4.1 Θερμοκρασία που παίρνει το μπετόν κατά την 21^η Μαΐου για νότιο προσανατολισμό.

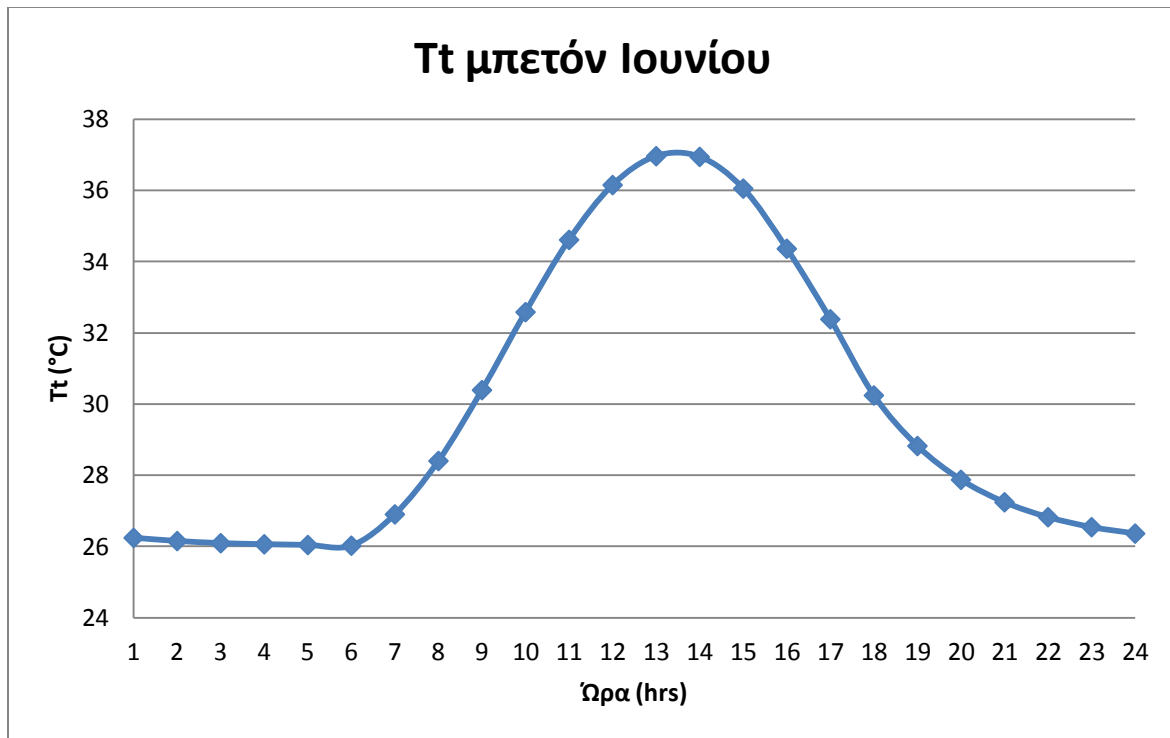


Σχήμα 7.4.2 Διάγραμμα θερμοκρασίας μπετόν – ώρας κατά την 21^η Μαΐου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21^η Ιουνίου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
6	0	26,02
7	0,080299	26,90
8	0,162635	28,40
9	0,251822	30,39
10	0,329689	32,58
11	0,381024	34,61
12	0,398017	36,15
13	0,378546	36,96
14	0,328165	36,94
15	0,249801	36,05
16	0,150684	34,36
17	0,049063	32,38
18	0	30,24
19	0	28,82
20	0	27,87
21	0	27,24
22	0	26,82
23	0	26,54
24	0	26,36
1	0	26,24
2	0	26,15
3	0	26,09
4	0	26,06
5	0	26,04

Σχήμα 7.4.3 Θερμοκρασία που παίρνει το μπετόν κατά την 21^η Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό.

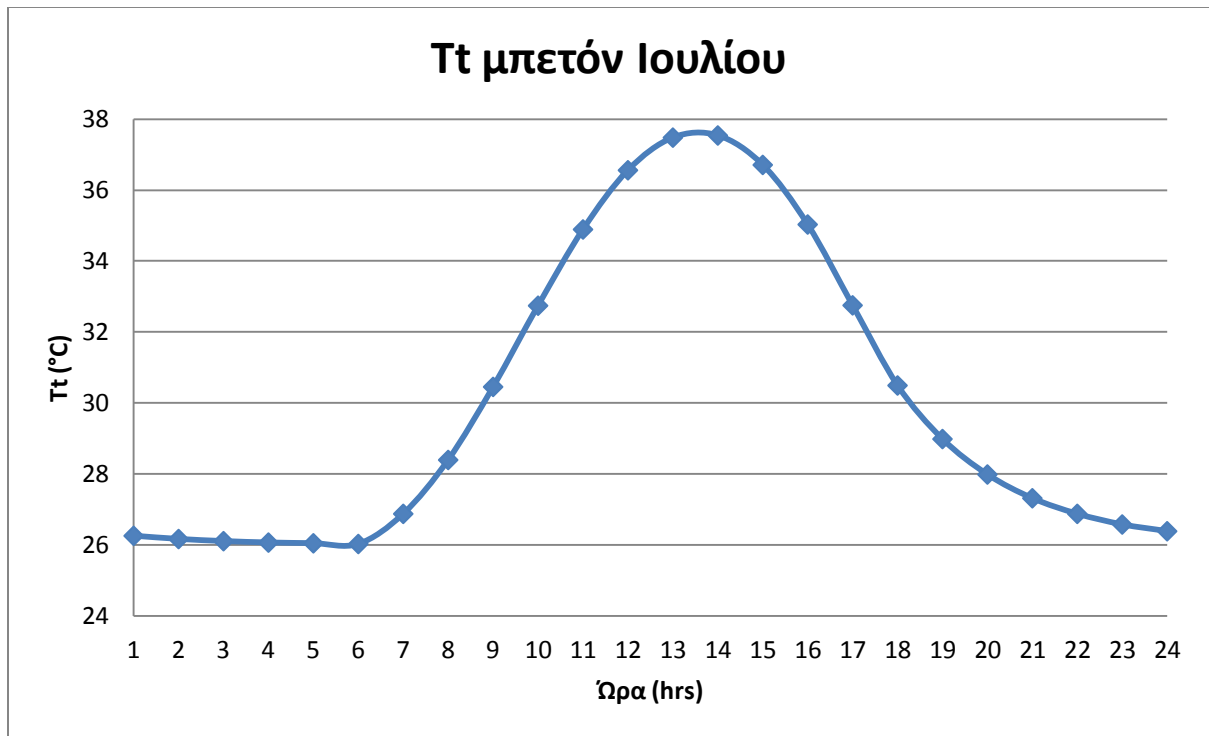


Σχήμα 7.4.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας μπετόν – ώρας κατά την 21^η Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21^η Ιουλίου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
6	0	26,02
7	0,077277	26,87
8	0,16312	28,39
9	0,257285	30,45
10	0,340239	32,74
11	0,396315	34,89
12	0,41773	36,56
13	0,401056	37,48
14	0,351155	37,54
15	0,272563	36,71
16	0,17161	35,03
17	0,067114	32,75
18	0	30,49
19	0	28,98
20	0	27,98
21	0	27,31
22	0	26,87
23	0	26,57
24	0	26,38
1	0	26,25
2	0	26,16
3	0	26,10
4	0	26,06
5	0	26,04

Σχήμα 7.4.5 Θερμοκρασία που παίρνει το μπετόν κατά την 21^η Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό.

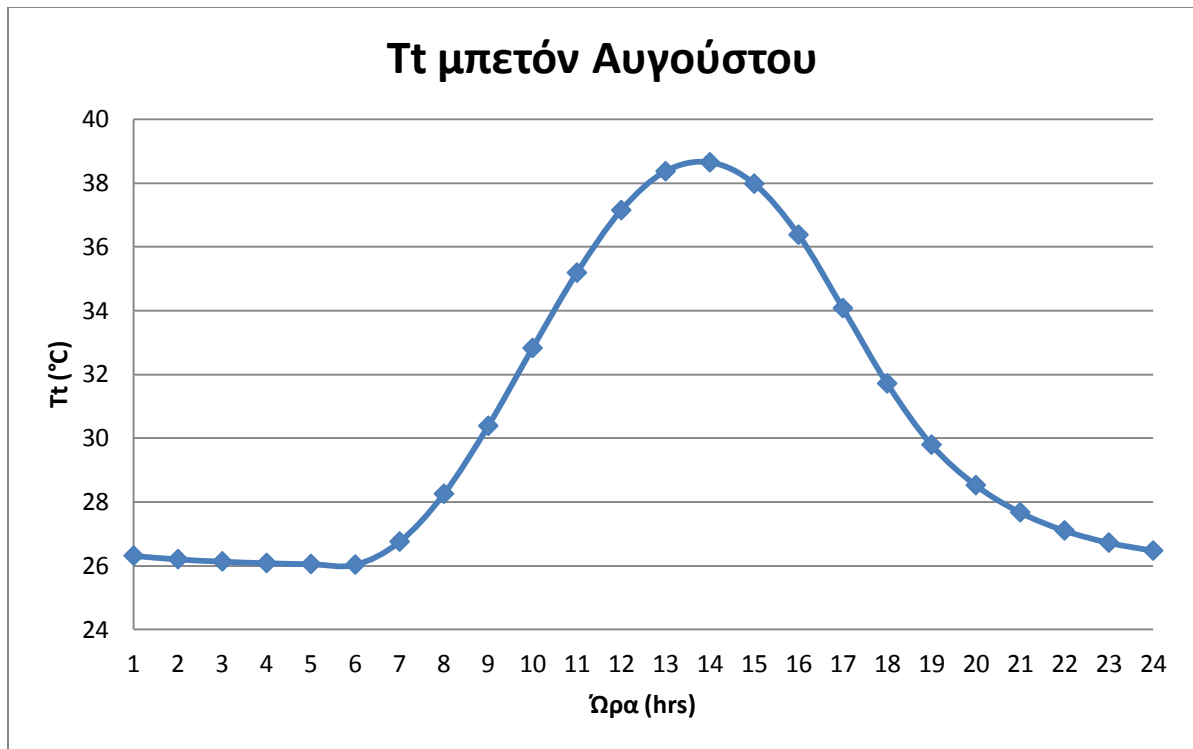


Σχήμα 7.4.6 Διάγραμμα θερμοκρασίας μπετόν – ώρας κατά την 21^η Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21^η Αυγούστου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
6	0	26,04
7	0,066465	26,76
8	0,158305	28,26
9	0,260143	30,39
10	0,352122	32,83
11	0,418377	35,19
12	0,452968	37,15
13	0,44518	38,37
14	0,397724	38,65
15	0,320498	37,98
16	0,216425	36,38
17	0,10575	34,08
18	0,030856	31,72
19	0	29,80
20	0	28,53
21	0	27,68
22	0	27,11
23	0	26,73
24	0	26,48
1	0	26,32
2	0	26,21
3	0	26,14
4	0	26,09
5	0	26,06

Σχήμα 7.4.7 Θερμοκρασία που παίρνει το μπετόν κατά την 21^η Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό.

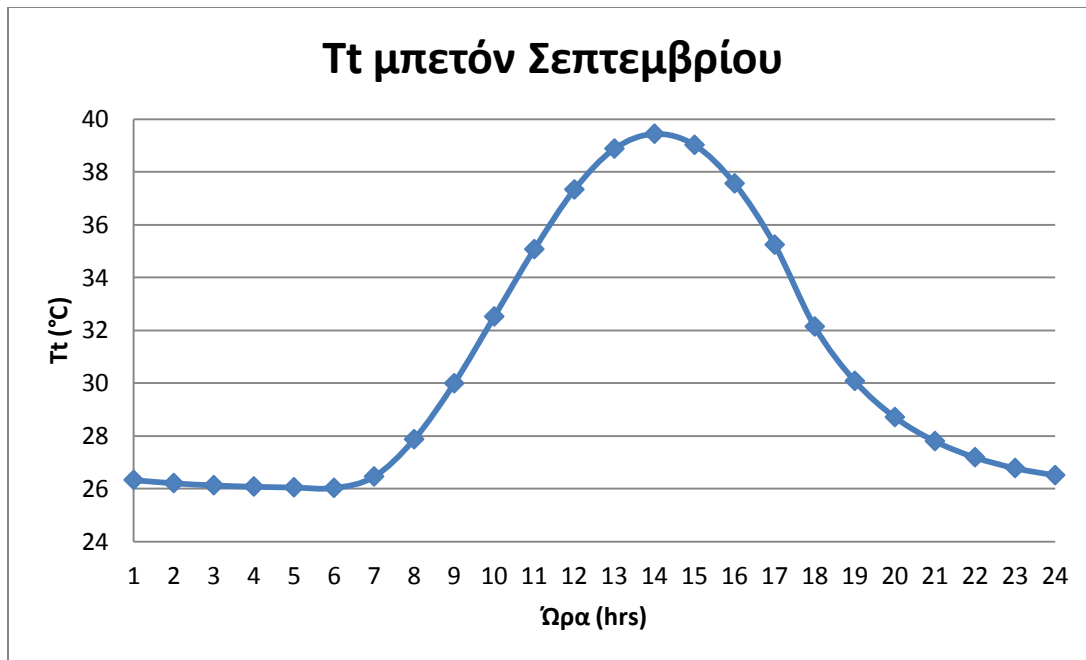


Σχήμα 7.4.8 Διάγραμμα θερμοκρασίας μπετόν – ώρας κατά την 21^η Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό

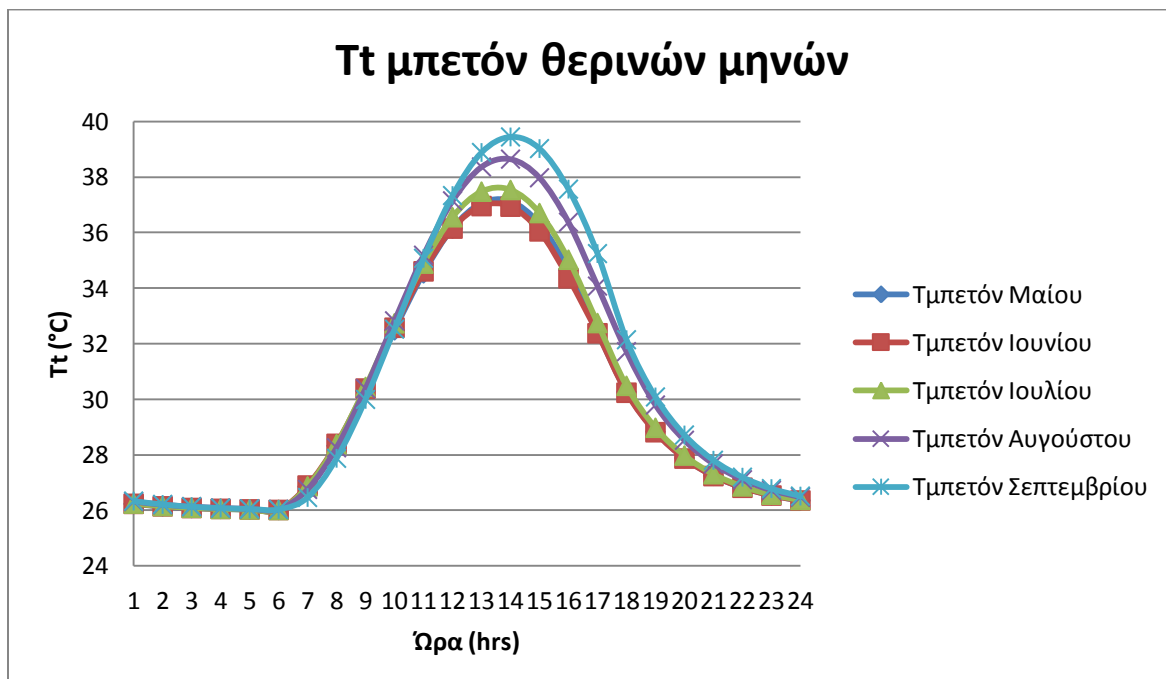
➤ Για την 21^η Σεπτέμβρη

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
6	0	26,04
7	0,040322	26,47
8	0,14111	27,88
9	0,247334	30,00
10	0,348416	32,53
11	0,425997	35,08
12	0,477016	37,34
13	0,480858	38,89
14	0,438651	39,45
15	0,366994	39,03
16	0,261053	37,57
17	0,139856	35,25
18	0	32,15
19	0	30,09
20	0	28,72
21	0	27,81
22	0	27,20
23	0	26,79
24	0	26,52
1	0	26,34
2	0	26,22
3	0	26,14
4	0	26,09
5	0	26,06

Σχήμα 7.4.9 Θερμοκρασία που παίρνει το μπετόν κατά την 21^η Σεπτέμβρη για νότιο προσανατολισμό.

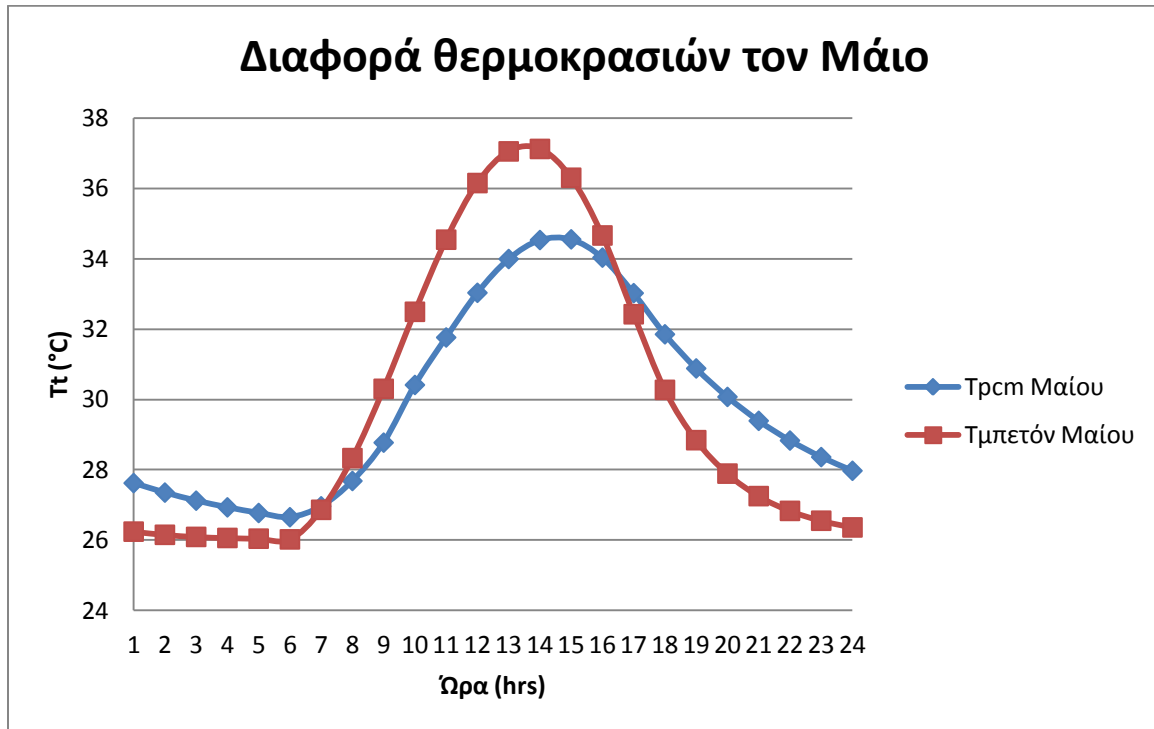


Σχήμα 7.4.10 Διάγραμμα θερμοκρασίας μπετόν – ώρας κατά την 21^η Σεπτέμβρη για νότιο προσανατολισμό

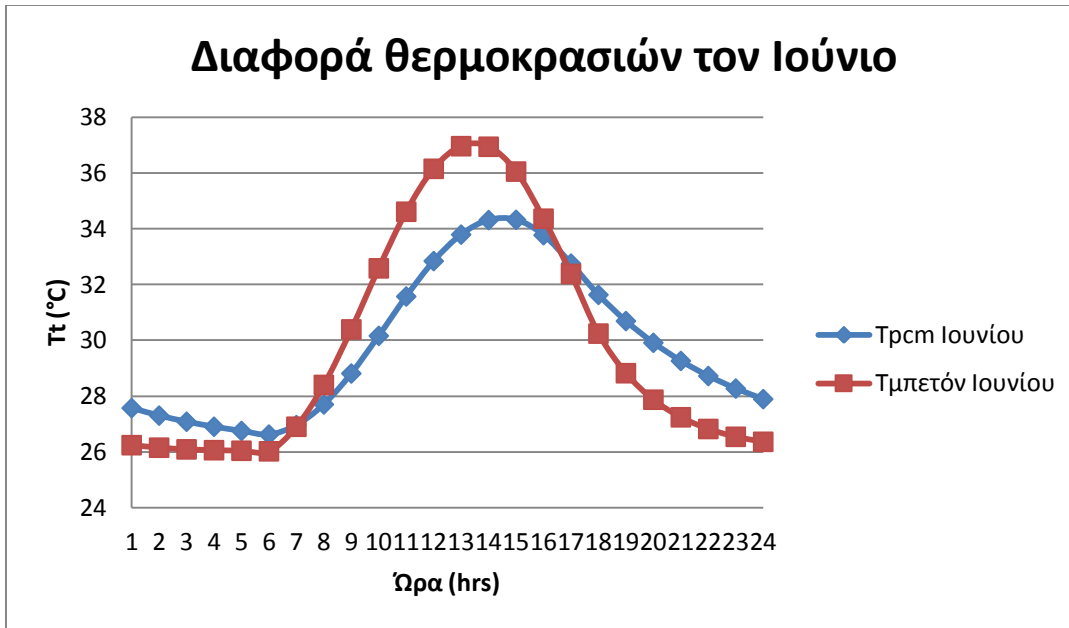


Σχήμα 7.4.11 Διαγράμματα Τμπετόν συναρτήσεως της ώρας για όλους τους θερινούς μήνες του έτους σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.

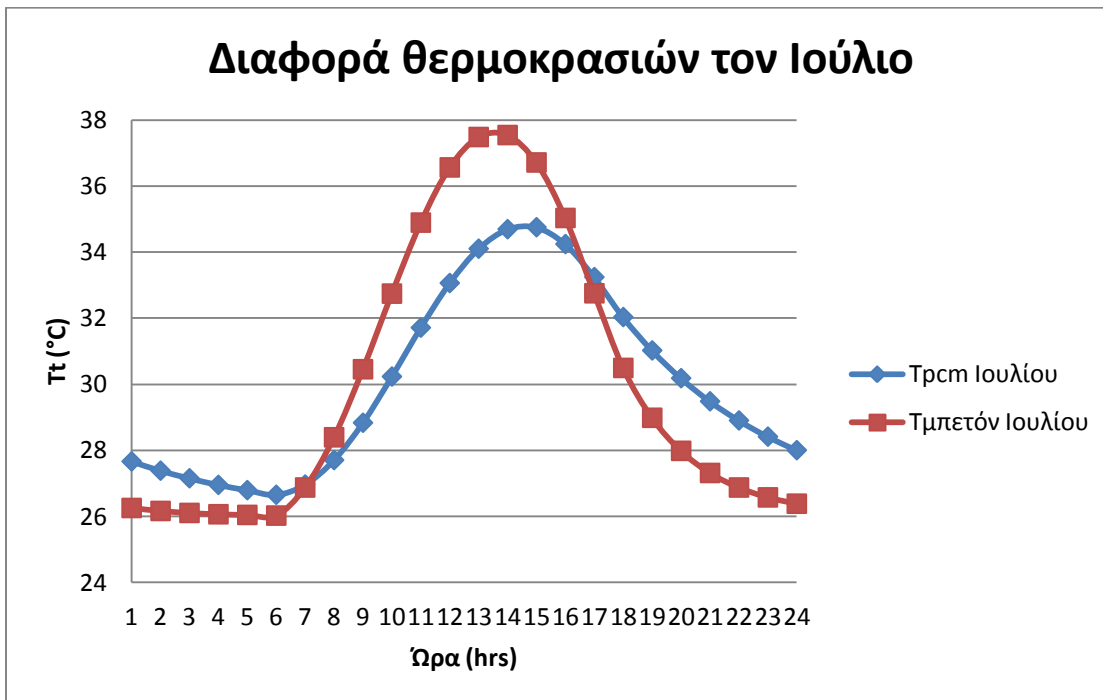
Σ αυτό το σημείο μπορούμε να δούμε την διαφορά θερμοκρασίας του τοίχου όταν περιέχει PCM και όταν έχει απλό μπετόν για όλους τους θερινούς μήνες. Τα παρακάτω διαγράμματα θα μας κάνουν πιο εμφανή αυτή τη διαφορά.



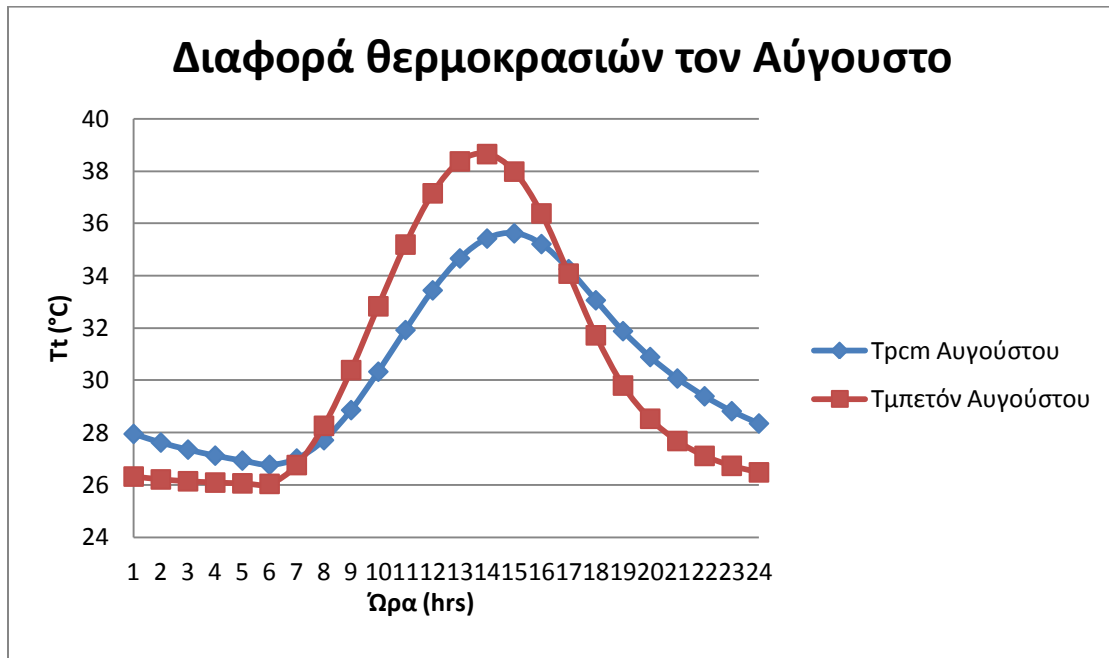
Σχήμα 7.4.12 Διαγράμματα Τμπετόν και ΤPCM συναρτήσεως της ώρας για την 21^η Μαΐου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



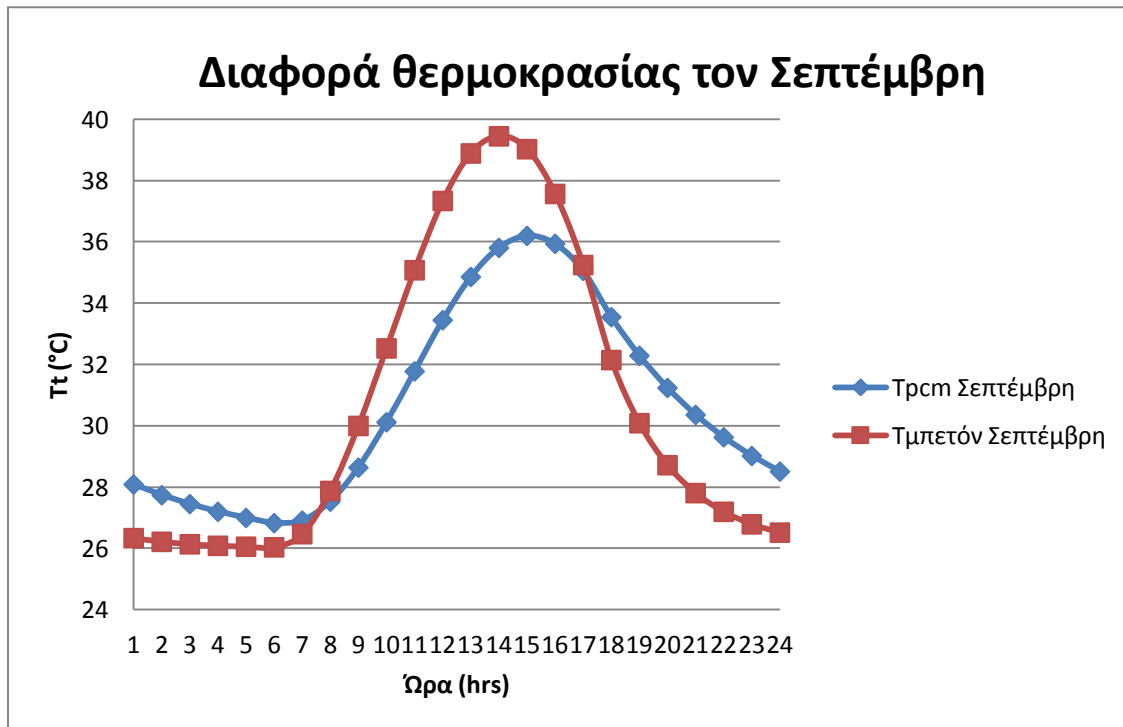
Σχήμα 7.4.13 Διαγράμματα Τμπετόν και Τrcm συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουνίο σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.4.14 Διαγράμματα Τμπετόν και Τrcm συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουλίο σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.4.15 Διαγράμματα Τμπετόν και Trcm συναρτήσεϊ της ώρας για την 21^η Αυγούστου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.4.16 Διαγράμματα Τμπετόν και Trcm συναρτήσεϊ της ώρας για την 21^η Σεπτέμβρη σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.

Από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε εμφανώς τη διαφορά θερμοκρασίας που έχει το PCM σε σχέση με το μπετόν. Παρατηρούμε ότι τις βραδινές ώρες (όταν δεν υπάρχει συναλλαγή με την ηλιακή ακτινοβολία) η θερμοκρασία που έχει το μπετόν είναι 1,5 με 2 βαθμούς πιο μικρή από αυτή του PCM. Ενώ αντιθέτως, από τις 7 το πρωί μέχρι και τις 5 το απόγευμα που επηρεάζει η ηλιακή ακτινοβολία, το μπετόν αποκτά υψηλότερη θερμοκρασία από το PCM και μάλιστα σε κάποιους μήνες αυτή η διαφορά αγγίζει τους 4 βαθμούς. Αυτό εξηγείται εύκολα αν καταλάβουμε τον ορισμό του PCM. Η ιδιότητα ενός υλικού αλλαγής φάσης είναι να εκμεταλλεύεται την θερμότητα που απορροφά και να περνά από την υγρή φάση στη στερεή και ανάποδα. Συνεπώς, το PCM, με την βοήθεια της θερμότητας που προσδίδεται από την ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλάζει φάση και από στερεό γίνεται υγρό. Γι αυτό και δεν έχουμε τόσο μεγάλη αύξηση θερμοκρασίας ενώ το μπετόν αποκτά όλη τη θερμότητα που του προσδίδεται μην μπορώντας να την αξιοποιήσει. Ομοίως, τις βραδινές ώρες που δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, το PCM αργεί να αποβάλλει τη θερμότητά του σε σχέση με το μπετόν καθώς κρατάει ποσό αυτής για να μετατραπεί από υγρή σε στερεή φάση τώρα. Γι αυτό και το μπετόν τις βραδινές ώρες αποβάλλει πιο γρήγορα τη θερμότητά του καθώς δεν έχει την ιδιότητα να την κρατάει.

7.5 Υπολογισμός θερμοκρασίας PCM (48ωρο)

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τη θερμοκρασία που αποκτά το PCM μας κατά τη διάρκεια ενός 48ώρου τους θερινούς μήνες. Υποθέτουμε ότι το πρώτο 24ωρο κάθε μήνα που εξετάζουμε επικρατεί στην Αθήνα συννεφιά και συνεπώς η ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ μικρή. Για να μας βγει πιο εύκολα ο ισολογισμός των θερμοκρασιών παίρνουμε οριακά την ηλιακή ακτινοβολία ίση με μηδέν για το πρώτο 24ωρο. Στο δεύτερο 24ωρο όμως, έχουμε ηλιοφάνεια και επικρατούν ίδιες συνθήκες με αυτές του κεφαλαίου 7.1. Θα μελετήσουμε πώς αυτή η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στο 48ωρο επηρεάζει την τελική θερμοκρασία του PCM στο τέλος κάθε ώρας για κάθε θερινό μήνα.

Σε αυτήν την εφαρμογή χρησιμοποιείται ένα υποθετικό υλικό αλλαγής φάσης με τα ίδια χαρακτηριστικά του κεφαλαίου 7.2. Όπως επίσης, η αίθουσα, το παράθυρο και ο τοίχος παραμένουν ίδια.

Η προσομοίωση και σ αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση της ενεργός θερμοχωρητικότητας σύμφωνα με τις εξισώσεις που έχουμε συναντήσει στο κεφάλαιο 7.2. Χρησιμοποιώντας πάλι τον τύπο:

$$T_T = T_A + \frac{Gt A \pi 3600 + U A \tau 3600 (T_\delta - T_A)}{C_p m} \quad (7.5.1)$$

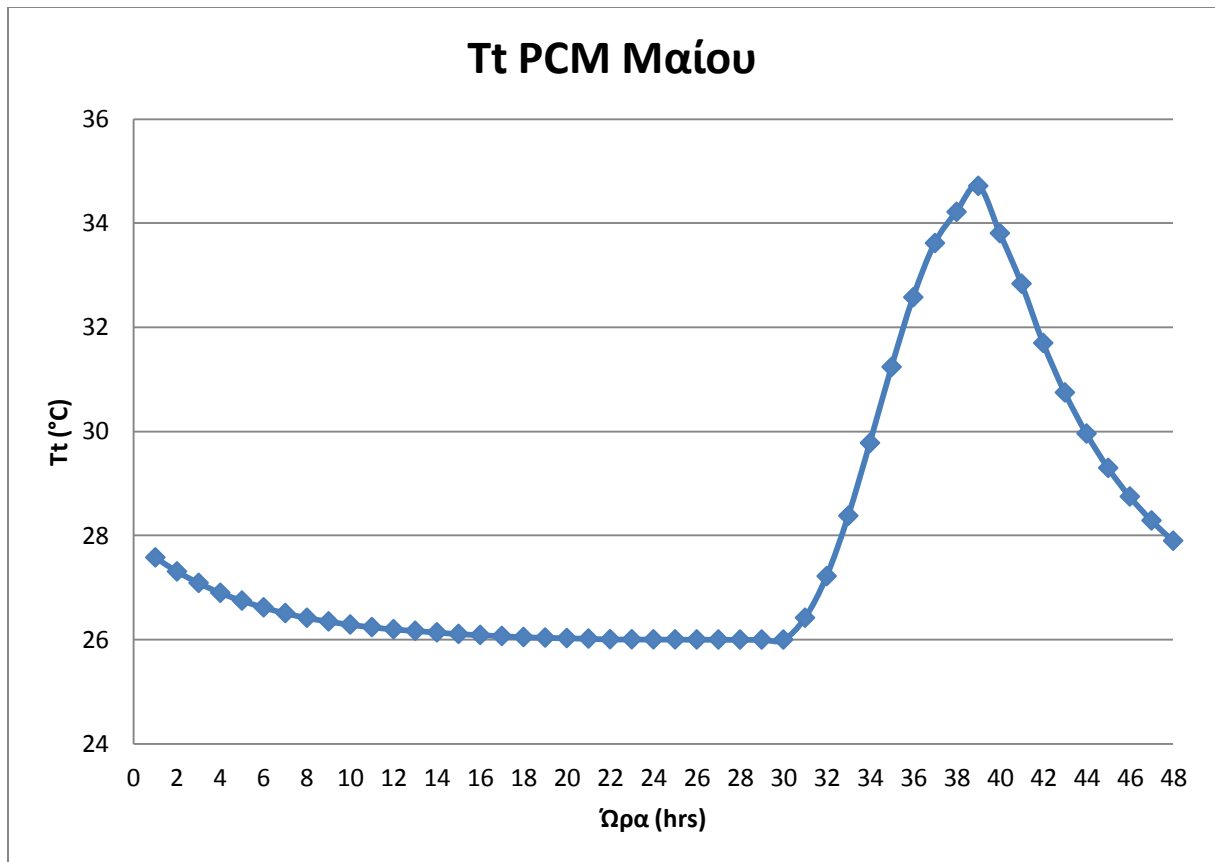
Και υπολογίζοντας την αρχική θερμοκρασία T_A όπως σε προηγούμενα κεφάλαια και υποθέτοντάς την αρχικά $T_A=24^\circ\text{C}$, έχουμε για κάθε μήνα:

➤ Για τον Μάιο:

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	27,58
2	0	27,31
3	0	27,09
4	0	26,90
5	0	26,75
6	0	26,62
7	0	26,51
8	0	26,42
9	0	26,35
10	0	26,29
11	0	26,24
12	0	26,20
13	0	26,17
14	0	26,14
15	0	26,11
16	0	26,09
17	0	26,07
18	0	26,05
19	0	26,04
20	0	26,03
21	0	26,02
22	0	26,008
23	0	26,006
24	0	26,005
25	0	26,004
26	0	26,003
27	0	26,002
28	0	26,001

29	0	26,0008
30	0	26,0007
31	0,076473	26,42
32	0,158606	27,22
33	0,247887	28,38
34	0,326386	29,78
35	0,379743	31,24
36	0,401797	32,58
37	0,386401	33,62
38	0,338614	34,22
39	0,260975	34,72
40	0,162475	33,81
41	0,059674	32,84
42	0	31,70
43	0	30,75
44	0	29,96
45	0	29,30
46	0	28,75
47	0	28,29
48	0	27,90

Σχήμα 7.5.1 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά το 48ωρο του Μαΐου για νότιο προσανατολισμό.



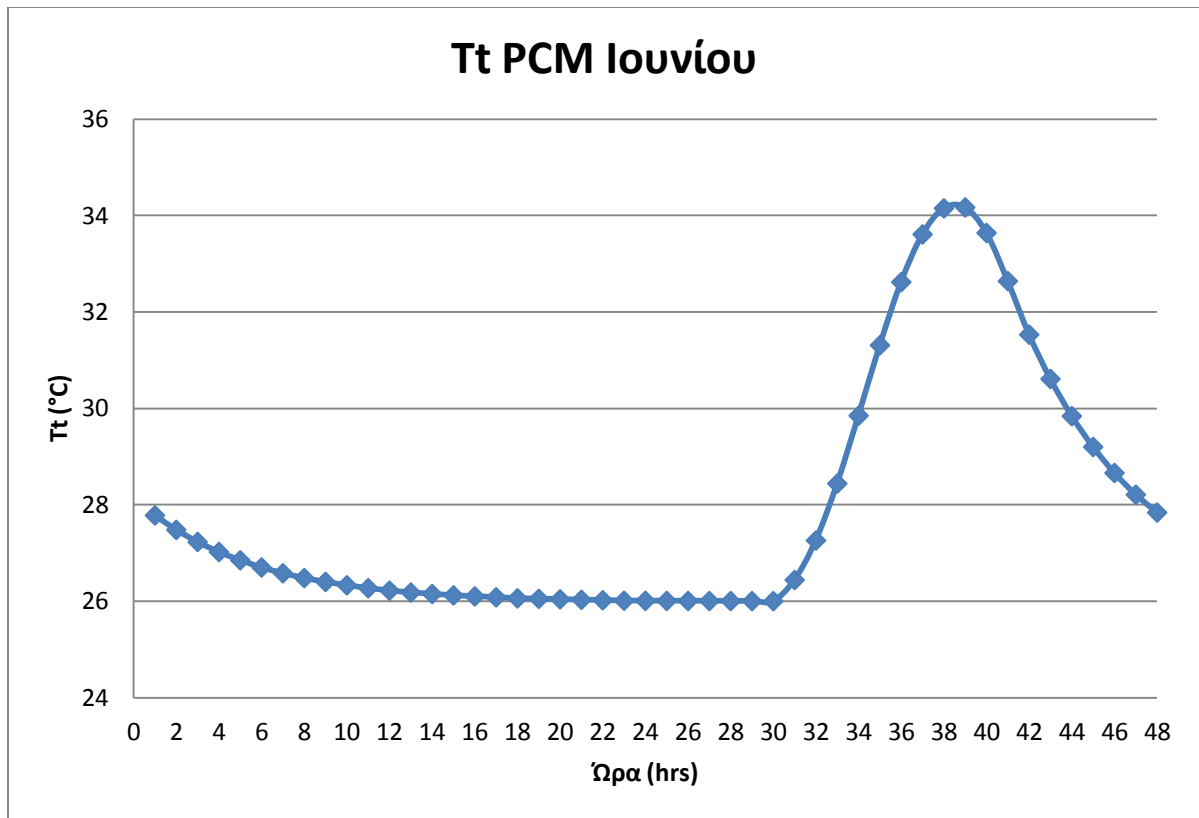
Σχήμα 7.5.2 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά το 48ωρο του Μαΐου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για τον Ιούνιο:

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	27,78
2	0	27,48
3	0	27,23
4	0	27,02
5	0	26,85
6	0	26,70
7	0	26,58
8	0	26,48
9	0	26,40
10	0	26,33
11	0	26,27
12	0	26,22
13	0	26,18
14	0	26,15
15	0	26,12
16	0	26,10
17	0	26,08
18	0	26,06
19	0	26,05
20	0	26,04
21	0	26,03
22	0	26,02
23	0	26,01
24	0	26,008
25	0	26,006
26	0	26,005
27	0	26,004
28	0	26,003

29	0	26,002
30	0	26,001
31	0,080299	26,44
32	0,162635	27,26
33	0,251822	28,44
34	0,329689	29,85
35	0,381024	31,31
36	0,398017	32,62
37	0,378546	33,61
38	0,328165	34,15
39	0,249801	34,17
40	0,150684	33,64
41	0,049063	32,64
42	0	31,53
43	0	30,61
44	0	29,84
45	0	29,20
46	0	28,66
47	0	28,21
48	0	27,84

Σχήμα 7.5.3 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά το 48ωρο του Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό.



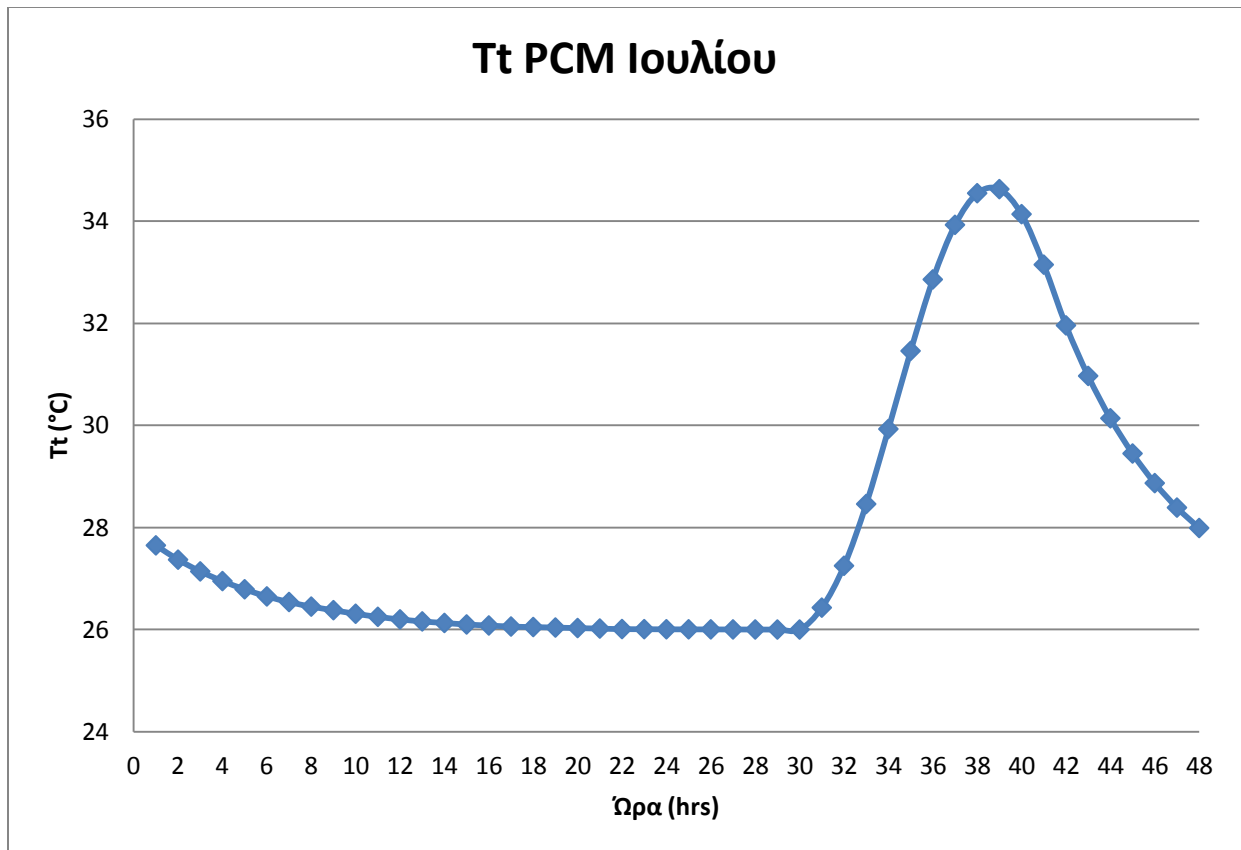
Σχήμα 7.5.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά το 48ωρο του Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για τον Ιούλιο:

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	27,65
2	0	27,37
3	0	27,14
4	0	26,95
5	0	26,79
6	0	26,65
7	0	26,54
8	0	26,45
9	0	26,38
10	0	26,31
11	0	26,25
12	0	26,20
13	0	26,16
14	0	26,13
15	0	26,10
16	0	26,08
17	0	26,06
18	0	26,05
19	0	26,04
20	0	26,03
21	0	26,02
22	0	26,01
23	0	26,008
24	0	26,006
25	0	26,005
26	0	26,004
27	0	26,003
28	0	26,002

29	0	26,001
30	0	26,0008
31	0,077277	26,43
32	0,16312	27,25
33	0,257285	28,46
34	0,340239	29,93
35	0,396315	31,46
36	0,41773	32,86
37	0,401056	33,93
38	0,351155	34,55
39	0,272563	34,63
40	0,17161	34,14
41	0,067114	33,15
42	0	31,96
43	0	30,97
44	0	30,14
45	0	29,45
46	0	28,87
47	0	28,39
48	0	27,99

Σχήμα 7.5.5 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά το 48ωρο του Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό.



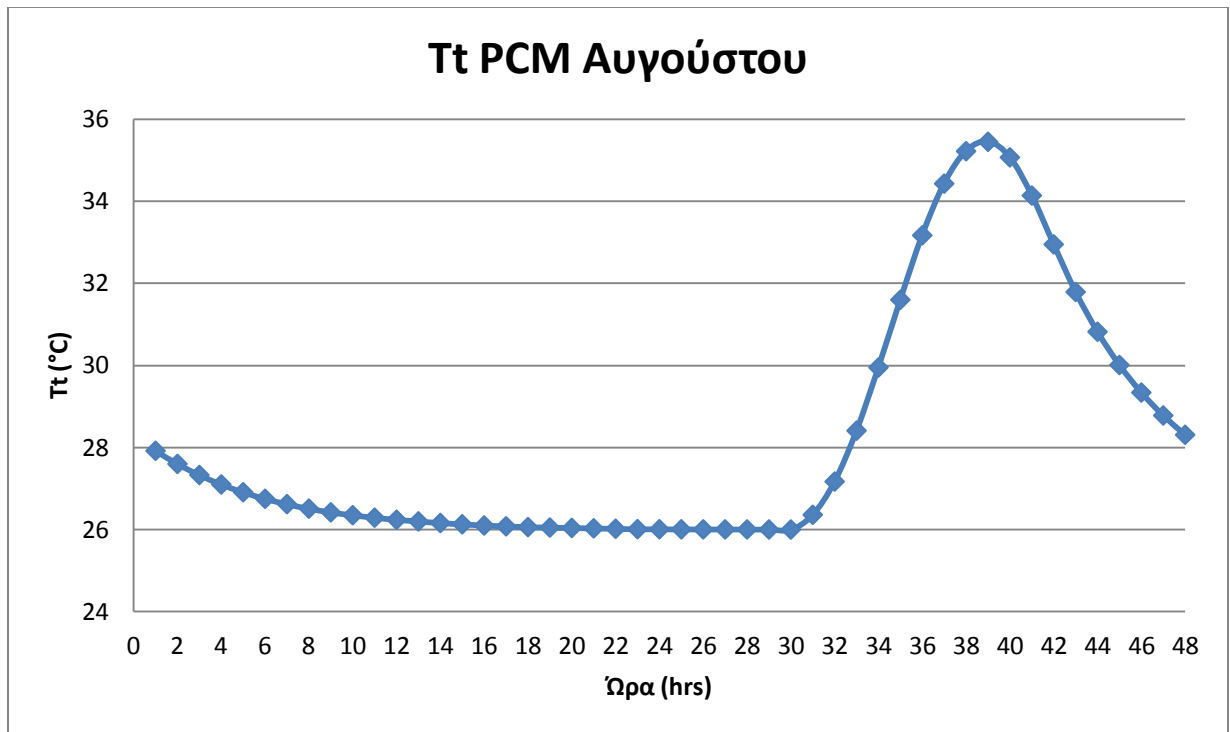
Σχήμα 7.5.6 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά το 48ωρο του Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για τον Αύγουστο:

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	27,92
2	0	27,60
3	0	27,33
4	0	27,10
5	0	26,91
6	0	26,75
7	0	26,62
8	0	26,51
9	0	26,42
10	0	26,35
11	0	26,29
12	0	26,24
13	0	26,20
14	0	26,16
15	0	26,13
16	0	26,10
17	0	26,08
18	0	26,06
19	0	26,05
20	0	26,04
21	0	26,03
22	0	26,02
23	0	26,01
24	0	26,008
25	0	26,006
26	0	26,005
27	0	26,004
28	0	26,003

29	0	26,002
30	0	26,001
31	0,066465	26,36
32	0,158305	27,17
33	0,260143	28,41
34	0,352122	29,95
35	0,418377	31,60
36	0,452968	33,17
37	0,44518	34,43
38	0,397724	35,22
39	0,320498	35,45
40	0,216425	35,07
41	0,10575	34,14
42	0,030856	32,95
43	0	31,79
44	0	30,82
45	0	30,01
46	0	29,34
47	0	28,78
48	0	28,31

Σχήμα 7.5.7 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά το 48ωρο του Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό.



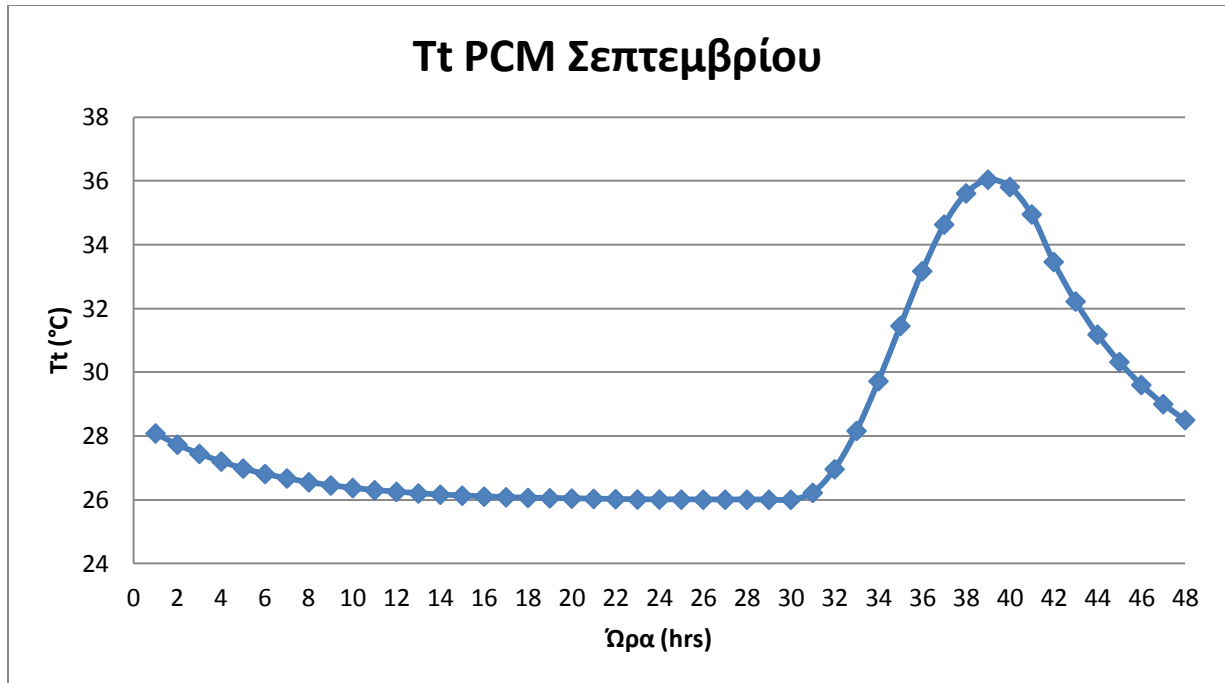
Σχήμα 7.5.8 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά το 48ωρο του Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για τον Σεπτέμβριο:

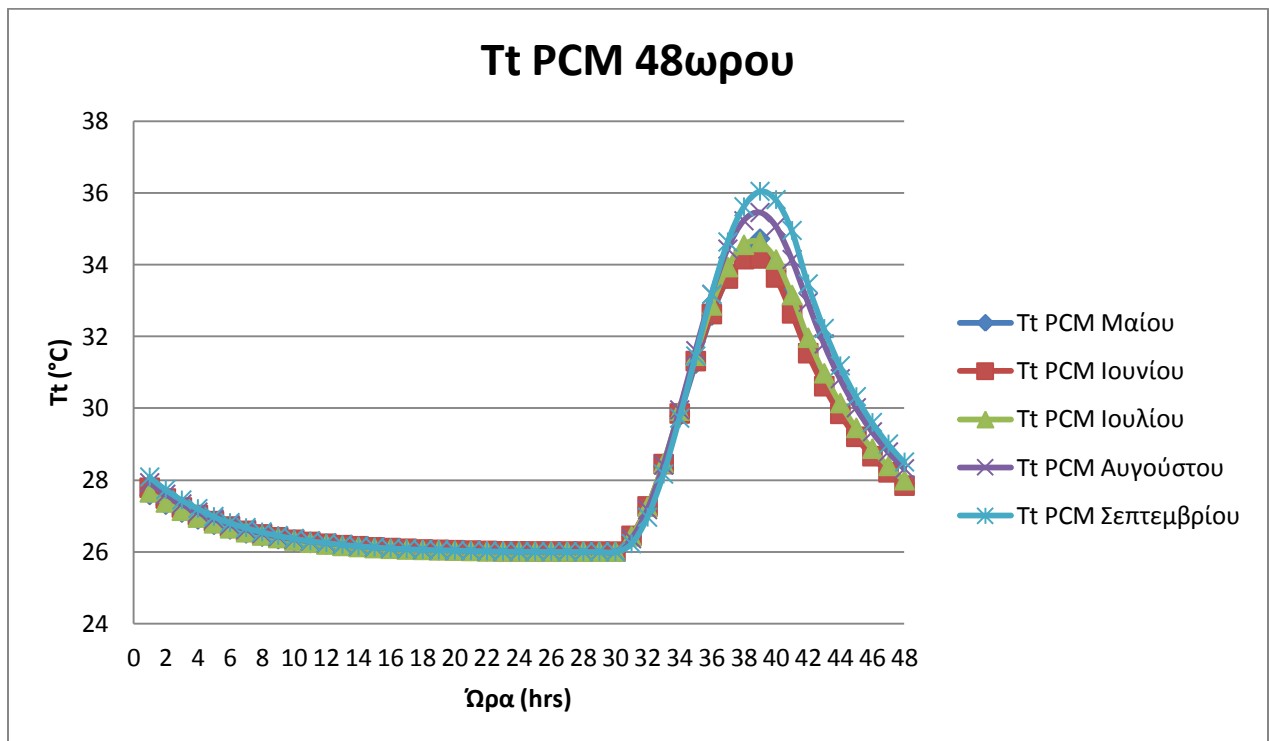
Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	28,08
2	0	27,73
3	0	27,44
4	0	27,20
5	0	26,98
6	0	26,81
7	0	26,67
8	0	26,55
9	0	26,45
10	0	26,37
11	0	26,30
12	0	26,25
13	0	26,20
14	0	26,16
15	0	26,13
16	0	26,10
17	0	26,08
18	0	26,06
19	0	26,05
20	0	26,04
21	0	26,03
22	0	26,02
23	0	26,01
24	0	26,008
25	0	26,006
26	0	26,005
27	0	26,004
28	0	26,003

29	0	26,002
30	0	26,001
31	0,040322	26,22
32	0,14111	26,96
33	0,247334	28,16
34	0,348416	29,72
35	0,425997	31,45
36	0,477016	33,17
37	0,480858	34,63
38	0,438651	35,61
39	0,366994	36,04
40	0,261053	35,81
41	0,139856	34,95
42	0	33,46
43	0	32,22
44	0	31,18
45	0	30,32
46	0	29,60
47	0	29,00
48	0	28,50

Σχήμα 7.5.9 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά το 48ωρο του Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό.



Σχήμα 7.5.10 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά το 48ωρο του Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 7.5.11 Διαγράμματα Tt PCM για ένα 48ώρο συναρτήσεϊ της ώρας για όλους τους θερινούς μήνες του έτους σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.

7.6 Υπολογισμός θερμοκρασίας μπετόν (48ωρο)

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τη θερμοκρασία που αποκτά το μπετόν κατά τη διάρκεια ενός 48ώρου τους θερινούς μήνες. Υποθέτουμε ότι το πρώτο 24ωρο κάθε μήνα που εξετάζουμε επικρατεί στην Αθήνα συννεφιά και συνεπώς η ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ μικρή. Για να μας βγει πιο εύκολα ο ισολογισμός των θερμοκρασιών παίρνουμε οριακά την ηλιακή ακτινοβολία ίση με μηδέν για το πρώτο 24ωρο. Στο δεύτερο 24ωρο όμως, έχουμε ηλιοφάνεια και επικρατούν ίδιες συνθήκες με αυτές του κεφαλαίου 7.1. Θα μελετήσουμε πώς αυτή η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στο 48ωρο επηρεάζει την τελική θερμοκρασία του μπετόν στο τέλος κάθε ώρας για κάθε θερινό μήνα.

Σε αυτήν την εφαρμογή χρησιμοποιείται ένα υποθετικό υλικό αλλαγής φάσης με τα ίδια χαρακτηριστικά του κεφαλαίου 7.2. Όπως επίσης, η αίθουσα, το παράθυρο και ο τοίχος παραμένουν ίδια.

Η προσομοίωση και σ αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση της ενεργός θερμοχωρητικότητας σύμφωνα με τις εξισώσεις που έχουμε συναντήσει στο κεφάλαιο 7.2. Χρησιμοποιώντας πάλι τον τύπο:

$$T_T = T_A + \frac{Gt A \pi 3600 + U A \tau 3600 (T_\delta - T_A)}{C_p m} \quad (7.6.1)$$

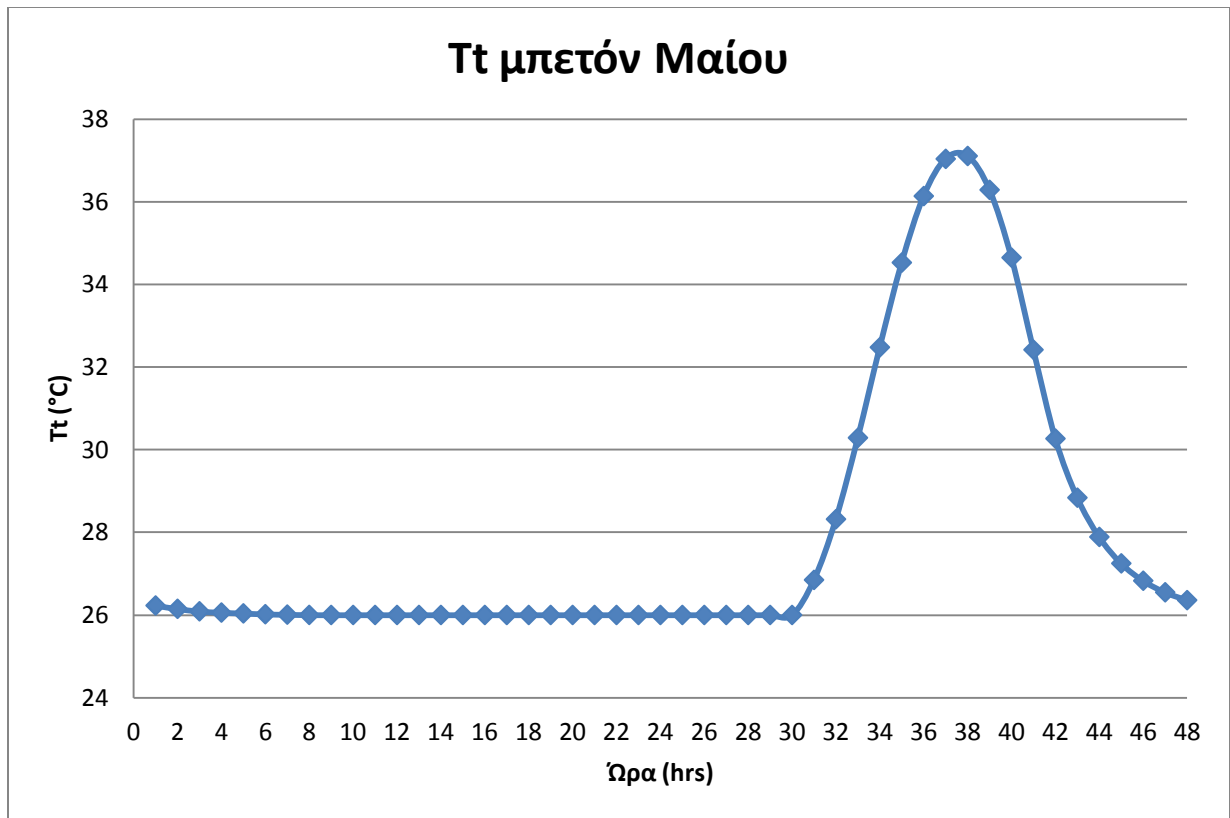
Και υπολογίζοντας την αρχική θερμοκρασία T_A όπως σε προηγούμενα κεφάλαια και υποθέτοντάς την αρχικά $T_A=24^\circ\text{C}$, έχουμε για κάθε μήνα:

➤ Για τον Μάιο:

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	26,23
2	0	26,15
3	0	26,09
4	0	26,06
5	0	26,04
6	0	26,02
7	0	26,01
8	0	26,002
9	0	26,001
10	0	26,001
11	0	26,001
12	0	26,001
13	0	26,001
14	0	26,001
15	0	26,001
16	0	26,001
17	0	26,001
18	0	26,001
19	0	26,001
20	0	26,001
21	0	26,001
22	0	26,001
23	0	26,001
24	0	26,001
25	0	26,0001
26	0	26,0001
27	0	26,0001
28	0	26,0001

29	0	26,0001
30	0	26,0001
31	0,076473	26,85
32	0,158606	28,32
33	0,247887	30,29
34	0,326386	32,48
35	0,379743	34,53
36	0,401797	36,14
37	0,386401	37,04
38	0,338614	37,11
39	0,260975	36,29
40	0,162475	34,65
41	0,059674	32,42
42	0	30,27
43	0	28,84
44	0	27,89
45	0	27,25
46	0	26,83
47	0	26,55
48	0	26,36

Σχήμα 7.6.1 Θερμοκρασία που παίρνει το μπετόν κατά το 48ωρο του Μαΐου για νότιο προσανατολισμό.



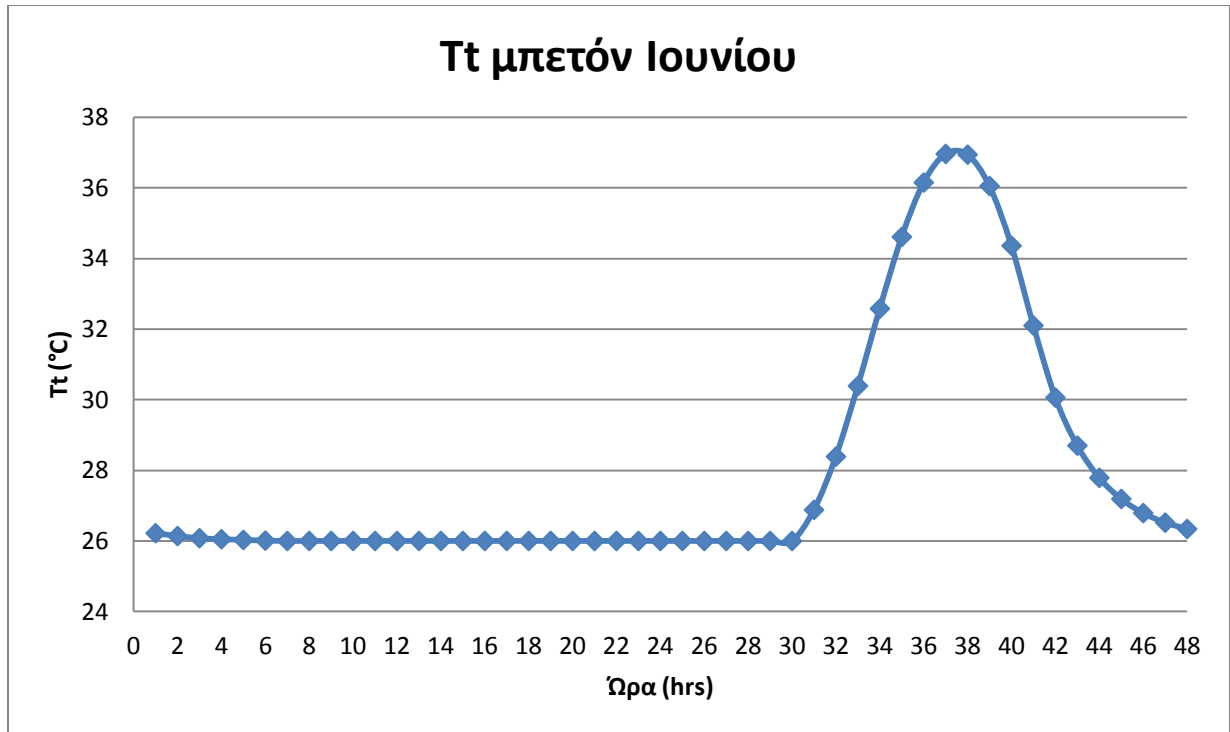
Σχήμα 7.6.2 Διάγραμμα θερμοκρασίας μπετόν – ώρας κατά το 48ωρο του Μαΐου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για τον Ιούνιο:

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	26,22
2	0	26,14
3	0	26,08
4	0	26,05
5	0	26,03
6	0	26,01
7	0	26,001
8	0	26,001
9	0	26,001
10	0	26,001
11	0	26,001
12	0	26,001
13	0	26,001
14	0	26,001
15	0	26,001
16	0	26,001
17	0	26,001
18	0	26,001
19	0	26,001
20	0	26,001
21	0	26,0001
22	0	26,0001
23	0	26,0001
24	0	26,0001
25	0	26,0001
26	0	26,0001
27	0	26,0001
28	0	26,0001

29	0	26,0001
30	0	26,0001
31	0,080299	26,88
32	0,162635	28,39
33	0,251822	30,39
34	0,329689	32,58
35	0,381024	34,61
36	0,398017	36,15
37	0,378546	36,96
38	0,328165	36,94
39	0,249801	36,05
40	0,150684	34,36
41	0,049063	32,10
42	0	30,06
43	0	28,70
44	0	27,79
45	0	27,19
46	0	26,79
47	0	26,52
48	0	26,34

Σχήμα 7.6.3 Θερμοκρασία που παίρνει το μπετόν κατά το 48ωρο του Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό.



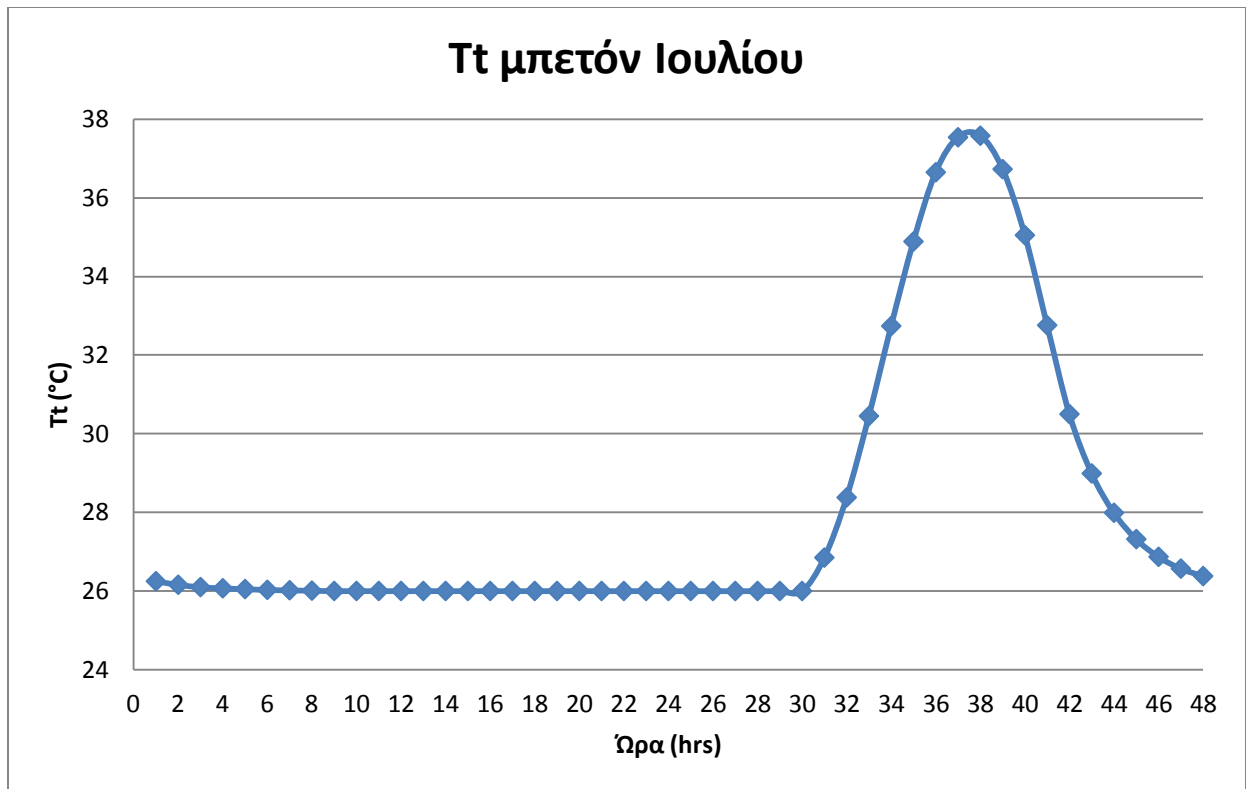
Σχήμα 7.6.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας μπετόν – ώρας κατά το 48ωρο του Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για τον Ιούλιο:

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	26,25
2	0	26,16
3	0	26,10
4	0	26,07
5	0	26,05
6	0	26,03
7	0	26,02
8	0	26,01
9	0	26,001
10	0	26,001
11	0	26,001
12	0	26,001
13	0	26,001
14	0	26,001
15	0	26,001
16	0	26,001
17	0	26,001
18	0	26,001
19	0	26,001
20	0	26,001
21	0	26,0001
22	0	26,0001
23	0	26,0001
24	0	26,0001
25	0	26,0001
26	0	26,0001
27	0	26,0001
28	0	26,0001

29	0	26,0001
30	0	26,0001
31	0,077277	26,85
32	0,16312	28,38
33	0,257285	30,45
34	0,340239	32,74
35	0,396315	34,89
36	0,41773	36,65
37	0,401056	37,54
38	0,351155	37,58
39	0,272563	36,73
40	0,17161	35,05
41	0,067114	32,76
42	0	30,50
43	0	28,99
44	0	27,99
45	0	27,32
46	0	26,87
47	0	26,57
48	0	26,38

Σχήμα 7.6.5 Θερμοκρασία που παίρνει το μπετόν κατά το 48ωρο του Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό.



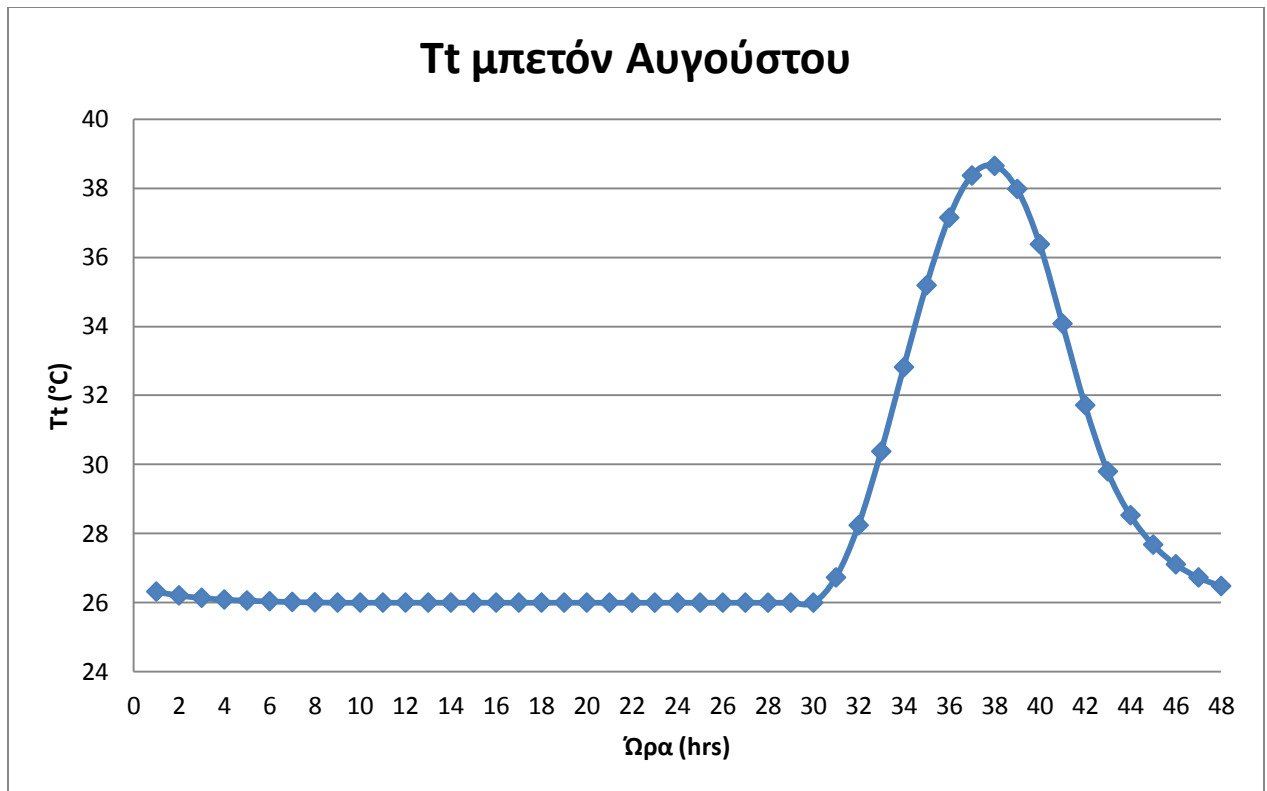
Σχήμα 7.6.6 Διάγραμμα θερμοκρασίας μπετόν – ώρας κατά το 48ωρο του Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για τον Αύγουστο:

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	26,32
2	0	26,21
3	0	26,14
4	0	26,09
5	0	26,06
6	0	26,04
7	0	26,02
8	0	26,01
9	0	26,001
10	0	26,001
11	0	26,001
12	0	26,001
13	0	26,001
14	0	26,001
15	0	26,001
16	0	26,001
17	0	26,001
18	0	26,001
19	0	26,001
20	0	26,001
21	0	26,0001
22	0	26,0001
23	0	26,0001
24	0	26,0001
25	0	26,0001
26	0	26,0001
27	0	26,0001
28	0	26,0001

29	0	26,0001
30	0	26,0001
31	0,066465	26,73
32	0,158305	28,24
33	0,260143	30,38
34	0,352122	32,82
35	0,418377	35,19
36	0,452968	37,15
37	0,44518	38,37
38	0,397724	38,65
39	0,320498	37,98
40	0,216425	36,38
41	0,10575	34,08
42	0,030856	31,72
43	0	29,80
44	0	28,53
45	0	27,68
46	0	27,11
47	0	26,73
48	0	26,48

Σχήμα 7.6.7 Θερμοκρασία που παίρνει το μπετόν κατά το 48ωρο του Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό.



Σχήμα 7.6.8 Διάγραμμα θερμοκρασίας μπετόν – ώρας κατά το 48ωρο του Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για τον Σεπτέμβριο:

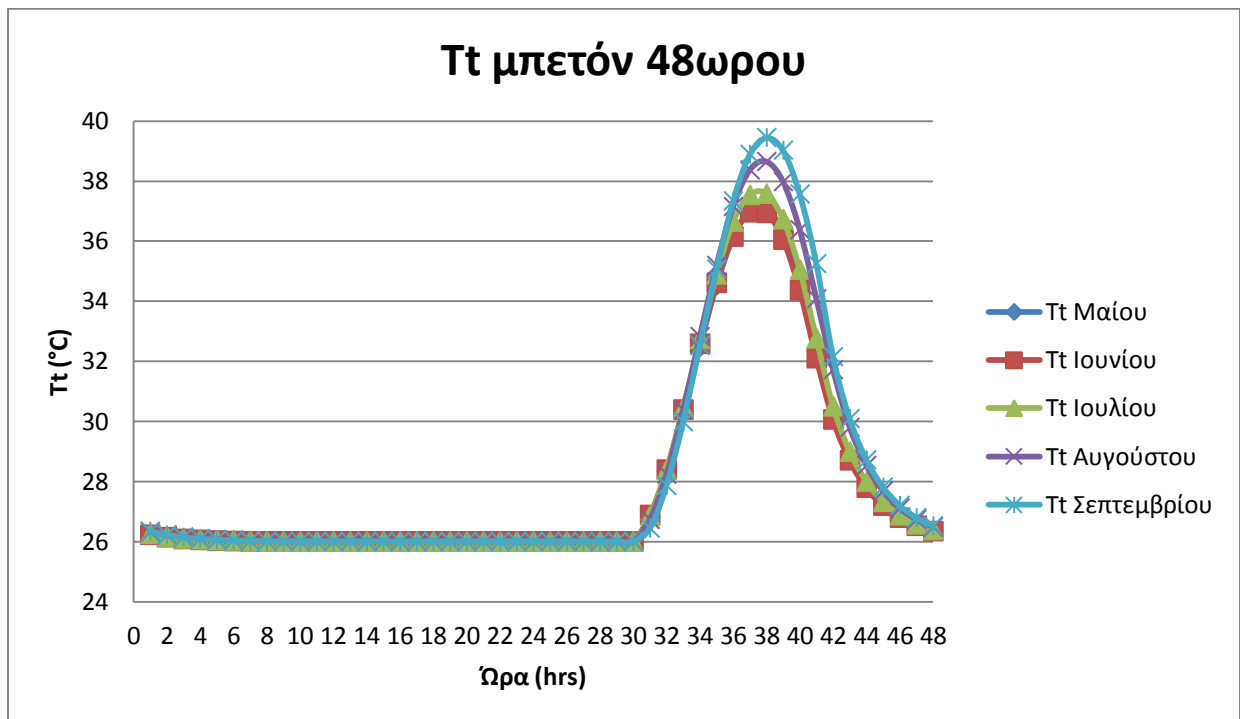
Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	26,34
2	0	26,22
3	0	26,14
4	0	26,09
5	0	26,06
6	0	26,04
7	0	26,02
8	0	26,01
9	0	26,001
10	0	26,001
11	0	26,001
12	0	26,001
13	0	26,001
14	0	26,001
15	0	26,001
16	0	26,001
17	0	26,001
18	0	26,001
19	0	26,001
20	0	26,001
21	0	26,0001
22	0	26,0001
23	0	26,0001
24	0	26,0001
25	0	26,0001
26	0	26,0001
27	0	26,0001
28	0	26,0001

29	0	26,0001
30	0	26,0001
31	0,040322	26,44
32	0,14111	27,86
33	0,247334	29,98
34	0,348416	32,52
35	0,425997	35,07
36	0,477016	37,34
37	0,480858	38,89
38	0,438651	39,45
39	0,366994	39,03
40	0,261053	37,57
41	0,139856	35,25
42	0	32,15
43	0	30,09
44	0	28,72
45	0	27,81
46	0	27,20
47	0	26,79
48	0	26,52

Σχήμα 7.6.9 Θερμοκρασία που παίρνει το μπετόν κατά το 48ωρο του Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό.

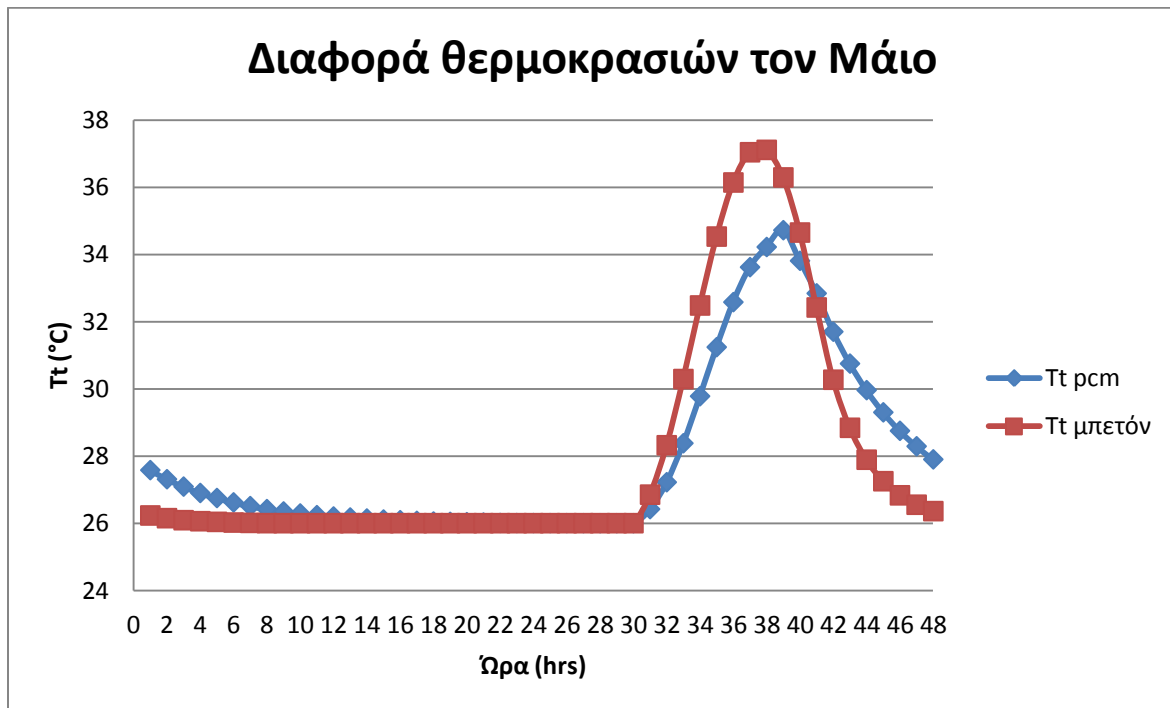


Σχήμα 7.6.10 Διάγραμμα θερμοκρασίας μπετόν – ώρας κατά το 48ωρο του Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό

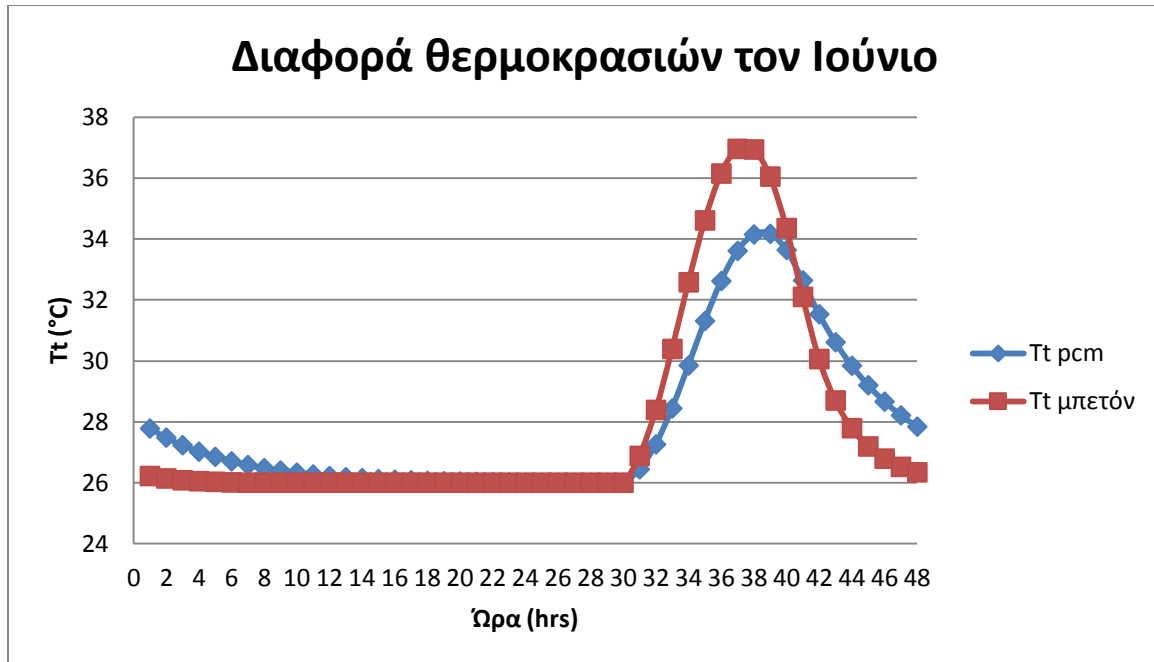


Σχήμα 7.6.11 Διαγράμματα Τt μπετόν για ένα 48ώρο συναρτήσει της ώρας για όλους τους θερινούς μήνες του έτους σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.

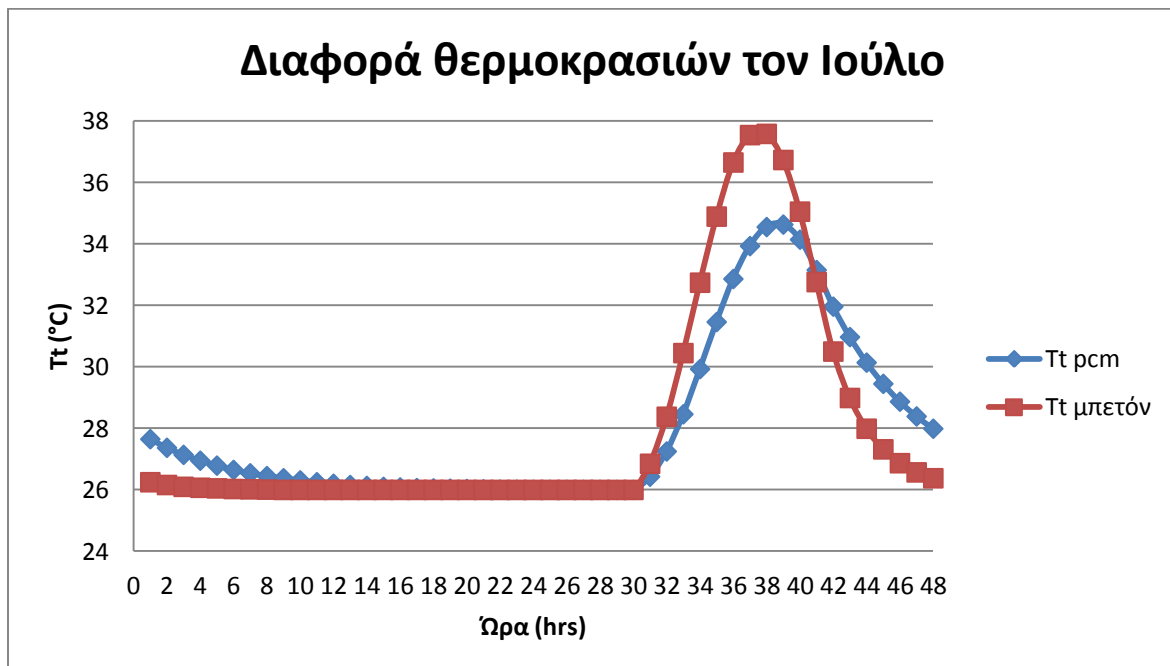
Σ αυτό το σημείο μπορούμε να δούμε την διαφορά θερμοκρασίας του τοίχου όταν περιέχει PCM και όταν έχει απλό μπετόν για όλους τους θερινούς μήνες. Τα παρακάτω διαγράμματα θα μας κάνουν πιο εμφανή αυτή τη διαφορά.



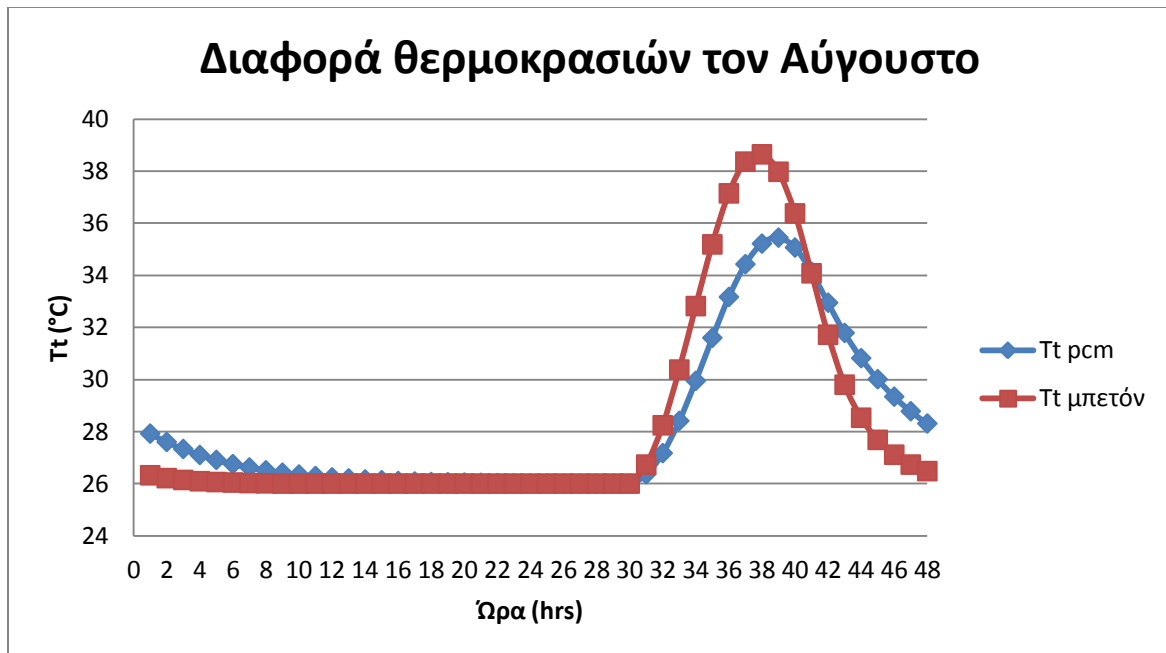
Σχήμα 7.6.12 Διαγράμματα $T_{\mu\beta\epsilon\tau\acute{o}\nu}$ και T_{pcm} συναρτήσεως της ώρας για ένα 48ωρο του Μαΐου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



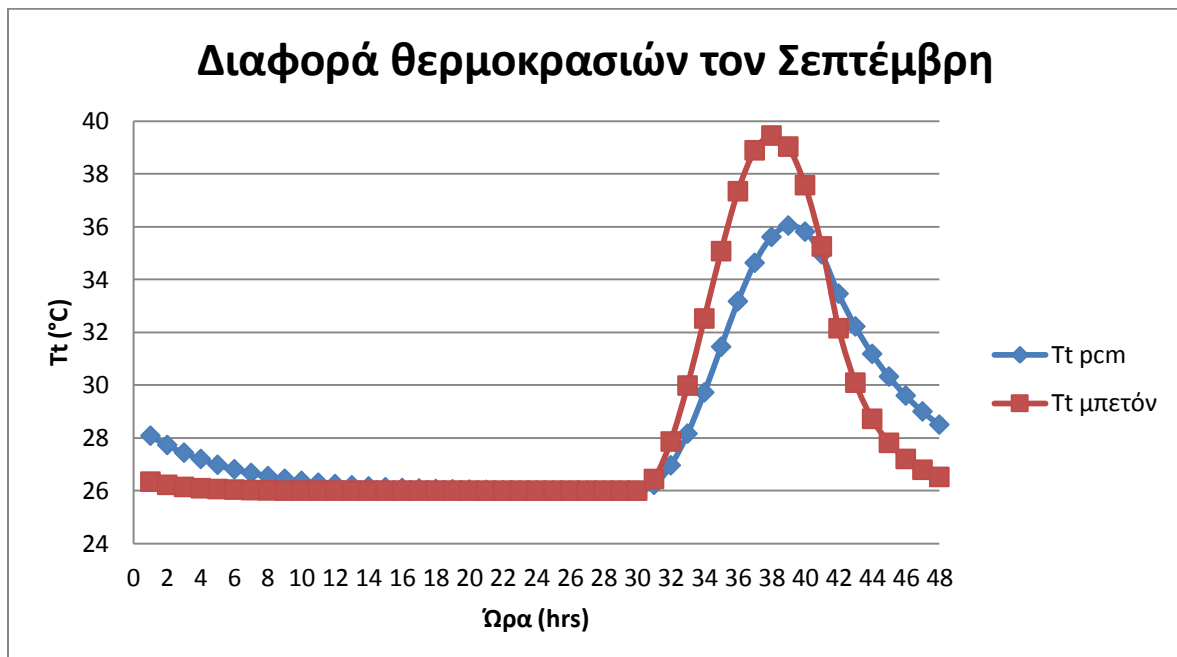
Σχήμα 7.6.13 Διαγράμματα Τμπετόν και Τρσm συναρτήσεϊ της ώρας για ένα 48ωρο του Ιουνίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.6.14 Διαγράμματα Τμπετόν και Τρσm συναρτήσεϊ της ώρας για ένα 48ωρο του Ιουλίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.6.15 Διαγράμματα Τμπετόν και Τrpcm συναρτήσεως της ώρας για ένα 48ωρο του Αυγούστου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.6.16 Διαγράμματα Τμπετόν και Τrpcm συναρτήσεως της ώρας για ένα 48ωρο του Σεπτεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.

Συμπέρασμα:

Όπως και στο 24ωρο που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, βλέπουμε ότι έχουμε μεγαλύτερη μέγιστη θερμοκρασία στην περίπτωση του μπετόν. Στο δεύτερο 24ωρο, όπου υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, έχουμε μια μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του μπετόν τις πρωινές ώρες. Αυτό συμβαίνει γιατί το μπετόν έχει την ιδιότητα να παίρνει την θερμότητα να αυξάνει την θερμοκρασία του. Σε αντίθεση με το PCM που εκμεταλλεύεται τη θερμότητα που του δίνεται για να αλλάξει φάση (από στερεό σε υγρό όσο αφορά τις πρωινές ώρες). Το βράδυ βλέπουμε μια γρήγορη πτώση θερμοκρασίας του μπετόν σε σχέση με το PCM το οποίο χρησιμοποιεί τη θερμότητα που του έχει δοθεί όλο το πρωί για να αλλάξει φάση (από υγρό γίνεται στερεό αυτή τη φορά). Ενώ το μπετόν χάνει πολύ πιο γρήγορα τη θερμοκρασία του γιατί δεν έχει την ιδιότητα να την κρατάει και να την χρησιμοποιήσει κάπου.

7.7 Υπολογισμός θερμοροής PCM

Στο κεφάλαιο αυτό θα υπολογίσουμε την θερμοροή του PCM που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας ώρας τους θερινούς μήνες και προσδίδει ο τοίχος στο δωμάτιο. Για τον υπολογισμό της θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω ισολογισμό.

$$\text{ΑΤ U} \left(\frac{(T_i + T_{i+1})}{2} - 26 \right) 3600 = Q_{i,i+1} \quad (7.7.1)$$

➤ Για τον Μάιο:

Ωρα (hrs)	T _i (°C)	T _{i+1} (°C)	Q _{i,i+1} (MJ)
1-2	27,62	27,35	1,206
2-3	27,35	27,12	1,003
3-4	27,12	26,93	0,832
4-5	26,93	26,77	0,690
5-6	26,77	26,65	0,576
6-7	26,65	26,96	0,653
7-8	26,96	27,68	1,072
8-9	27,68	28,77	1,807
9-10	28,77	30,41	2,915
10-11	30,41	31,76	4,129
11-12	31,76	33,03	5,193
12-13	33,03	33,99	6,099
13-14	33,99	34,53	6,708
14-15	34,53	34,55	6,935
15-16	34,55	34,03	6,732
16-17	34,03	33,02	6,111
17-18	33,02	31,85	5,226

18-19	31,85	30,88	4,352
19-20	30,88	30,07	3,634
20-21	30,07	29,39	3,029
21-22	29,39	28,83	2,525
22-23	28,83	28,36	2,107
23-24	28,36	27,97	1,758
24-1	27,97	27,62	1,457

Σχήμα 7.7.1 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Μαΐου.

➤ Για τον Ιουνίο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	27,57	27,30	1,165
2-3	27,30	27,08	0,966
3-4	27,08	26,90	0,804
4-5	26,90	26,75	0,670
5-6	26,75	26,62	0,556
6-7	26,62	26,96	0,641
7-8	26,96	27,70	1,080
8-9	27,70	28,81	1,831
9-10	28,81	30,16	2,830
10-11	30,16	31,57	3,951
11-12	31,57	32,84	5,039
12-13	32,84	33,79	5,940
13-14	33,79	34,31	6,537
14-15	34,31	34,32	6,753
15-16	34,32	33,77	6,533

16-17	33,77	32,75	5,896
17-18	32,75	31,63	5,027
18-19	31,63	30,69	4,190
19-20	30,69	29,91	3,4920
20-21	29,91	29,26	2,911
21-22	29,26	28,72	2,428
22-23	28,72	28,27	2,026
23-24	28,27	27,89	1,689
24-1	27,89	27,57	1,405

Σχήμα 7.7.2 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Ιουνίου.

➤ Για τον Ιουλίο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	27,66	27,38	1,234
2-3	27,38	27,15	1,027
3-4	27,15	26,95	0,852
4-5	26,95	26,79	0,706
5-6	26,79	26,65	0,584
6-7	26,65	26,96	0,653
7-8	26,96	27,70	1,080
8-9	27,70	28,83	1,839
9-10	28,83	30,23	2,866
10-11	30,23	31,71	4,036
11-12	31,71	33,06	5,185
12-13	33,06	34,10	6,156
13-14	34,10	34,69	6,818

14-15	34,69	34,75	7,082
15-16	34,75	34,24	6,899
16-17	34,24	33,24	6,286
17-18	33,24	32,03	5,388
18-19	32,03	31,02	4,487
19-20	31,02	30,18	3,735
20-21	30,18	29,48	3,110
21-22	29,48	28,90	2,590
22-23	28,90	28,41	2,156
23-24	28,41	28,00	1,790
24-1	28,00	27,66	1,486

Σχήμα 7.7.3 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Ιουλίου.

➤ Για τον Αύγουστο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	27,95	27,62	1,449
2-3	27,62	27,35	1,206
3-4	27,35	27,12	1,003
4-5	27,12	26,93	0,832
5-6	26,93	26,77	0,690
6-7	26,77	27,01	0,722
7-8	27,01	27,71	1,104
8-9	27,71	28,86	1,855
9-10	28,86	30,33	2,929
10-11	30,33	31,92	4,162
11-12	31,92	33,44	5,425

12-13	33,44	34,66	6,537
13-14	34,66	35,42	7,341
14-15	35,42	35,62	7,731
15-16	35,62	35,21	7,646
16-17	35,21	34,25	7,090
17-18	34,25	33,06	6,217
18-19	33,06	31,88	5,254
19-20	31,88	30,89	4,373
20-21	30,89	30,07	3,638
21-22	30,07	29,39	3,029
22-23	29,39	28,82	2,521
23-24	28,82	28,35	2,099
24-1	28,35	27,95	1,746

Σχήμα 7.7.4 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Αυγούστου.

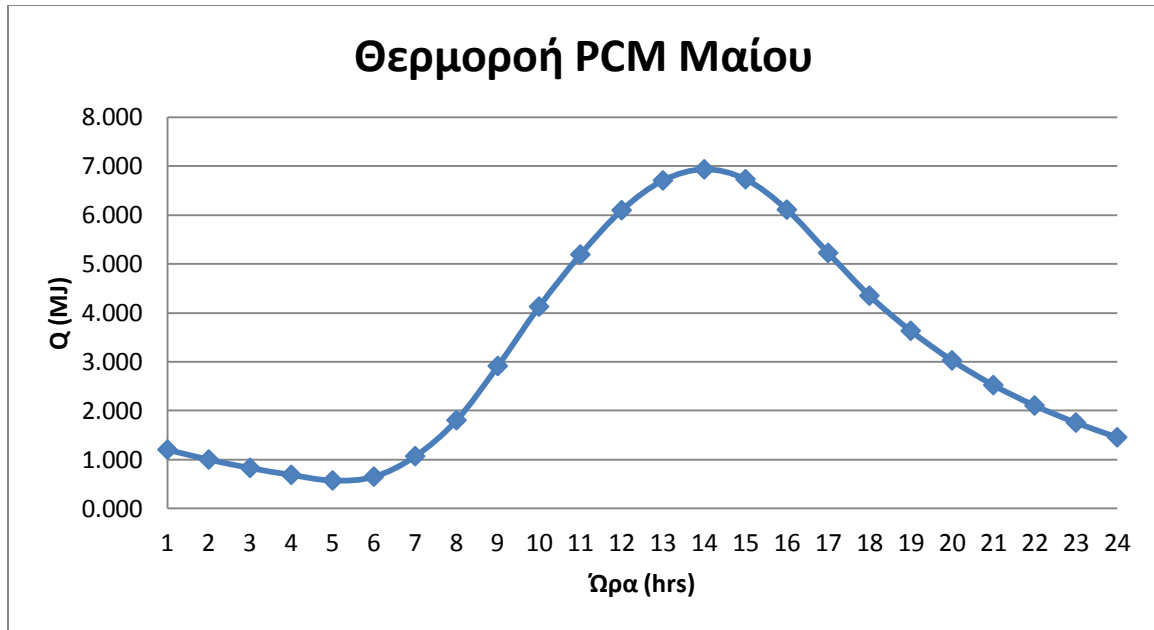
➤ Για τον Σεπτέμβριο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	28,09	27,74	1,555
2-3	27,74	27,45	1,295
3-4	27,45	27,20	1,076
4-5	27,20	27,00	0,893
5-6	27,00	26,83	0,743
6-7	26,83	26,91	0,706
7-8	26,91	27,53	0,990
8-9	27,53	28,64	1,693
9-10	28,64	30,12	2,745
10-11	30,12	31,78	4,020

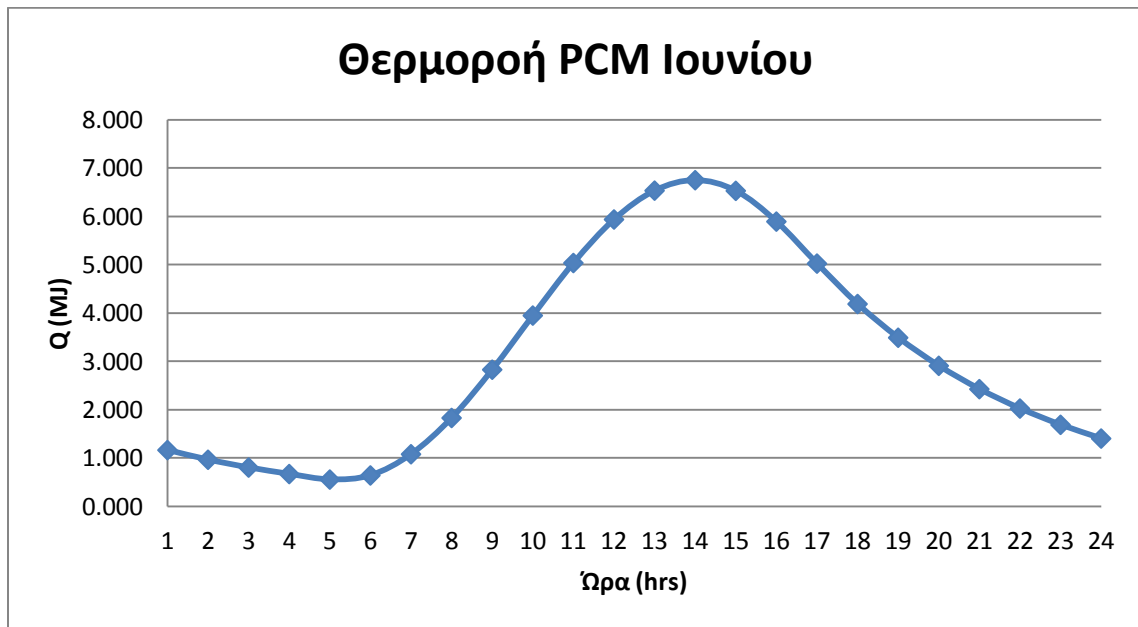
11-12	31,78	33,45	5,372
12-13	33,45	34,86	6,623
13-14	34,86	35,81	7,581
14-15	35,81	36,20	8,125
15-16	36,20	35,94	8,178
16-17	35,94	35,06	7,715
17-18	35,06	33,55	6,744
18-19	33,55	32,29	5,620
19-20	32,29	31,24	4,682
20-21	31,24	30,36	3,898
21-22	30,36	29,63	3,244
22-23	29,63	29,02	2,700
23-24	29,02	28,51	2,245
24-1	28,51	28,09	1,867

Σχήμα 7.7.5 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Σεπτεμβρίου.

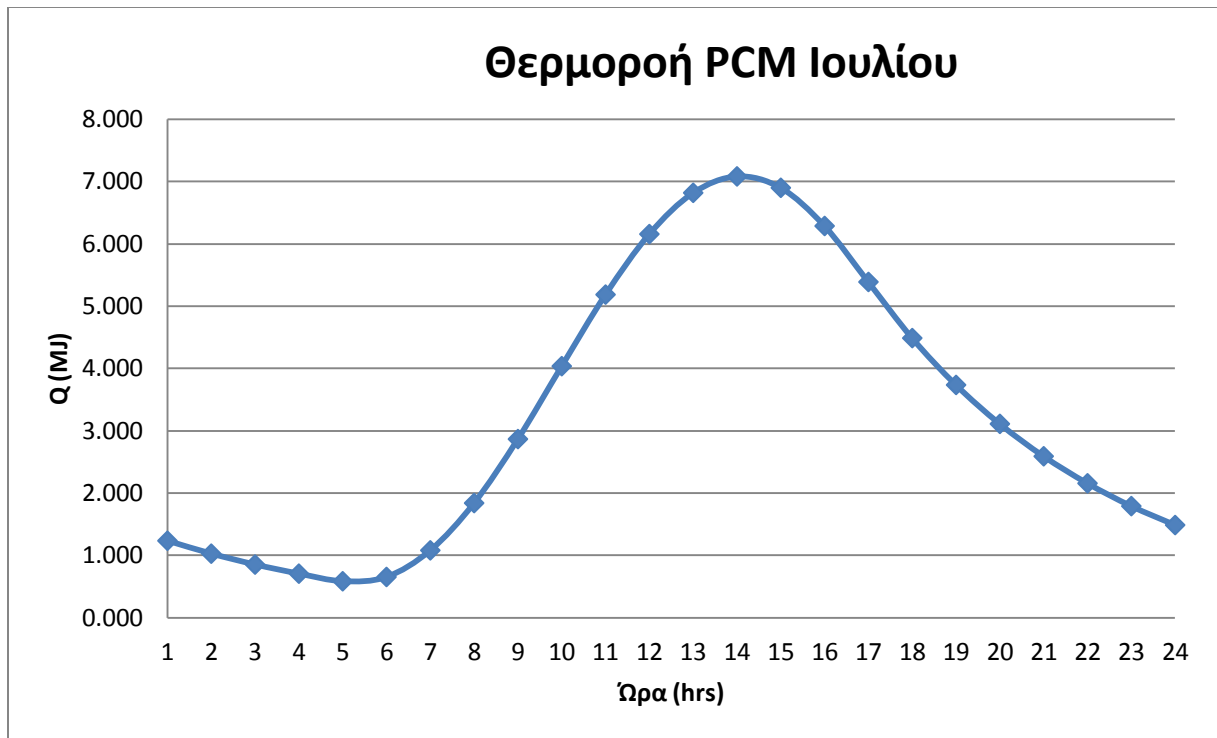
Παρακάτω μπορούμε να δούμε και γραφικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν πιο πάνω.



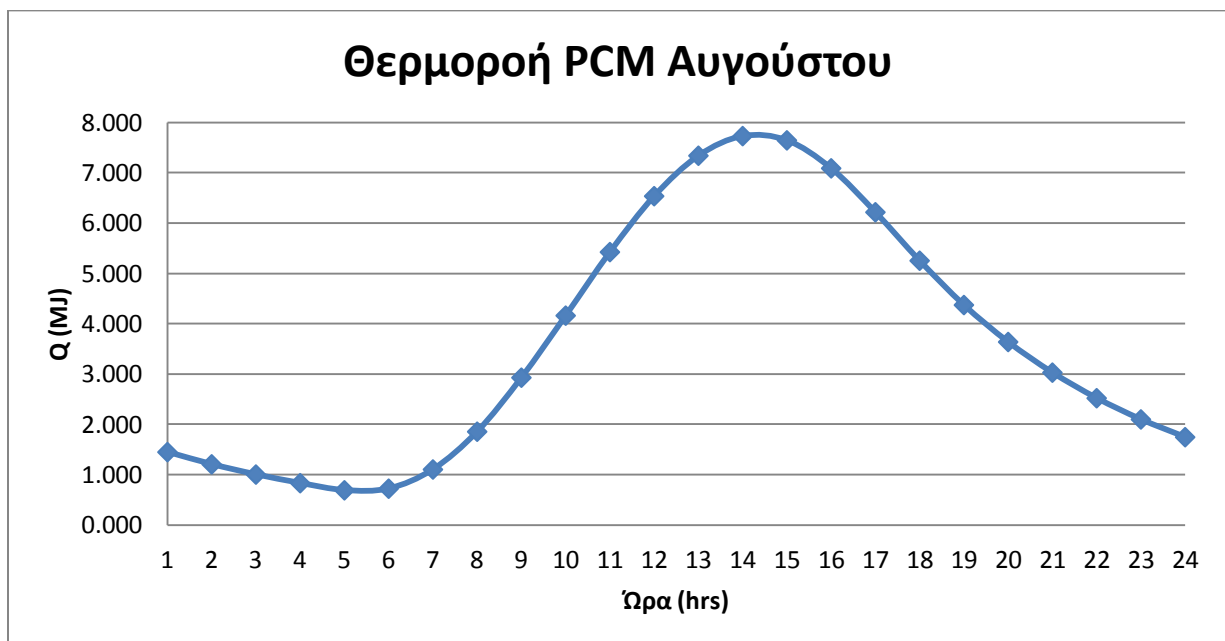
Σχήμα 7.7.6 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσεως της ώρας για την 21^η Μαΐου



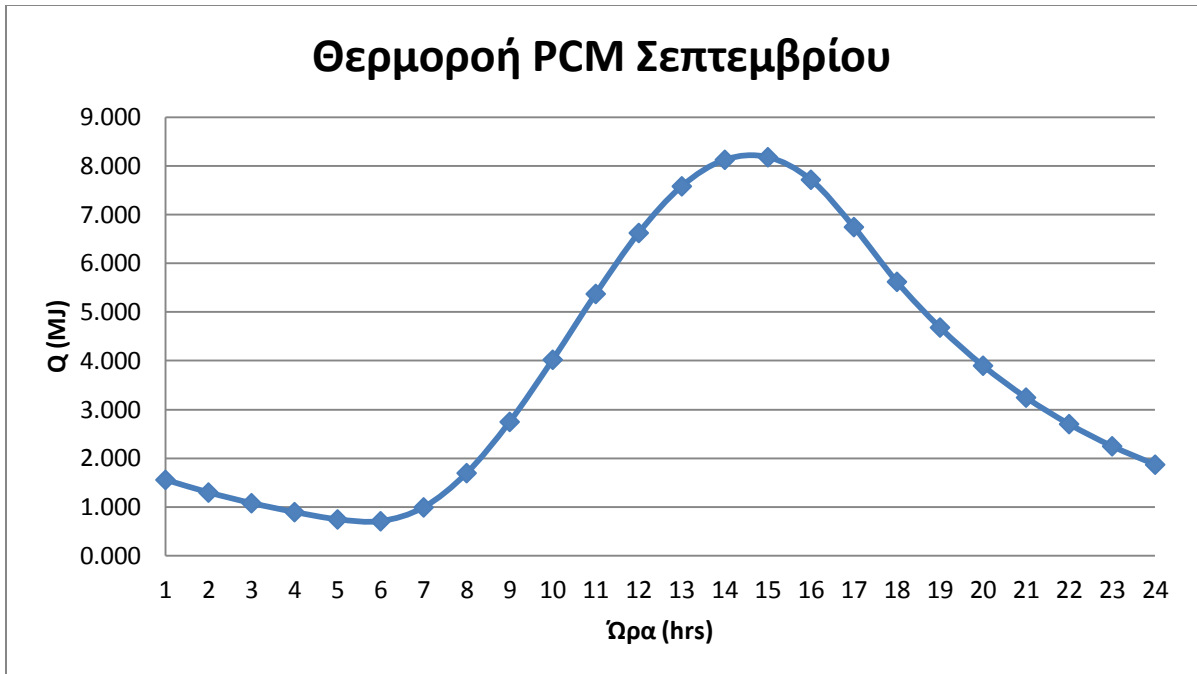
Σχήμα 7.7.7 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσεως της ώρας για την 21^η Ιουνίου



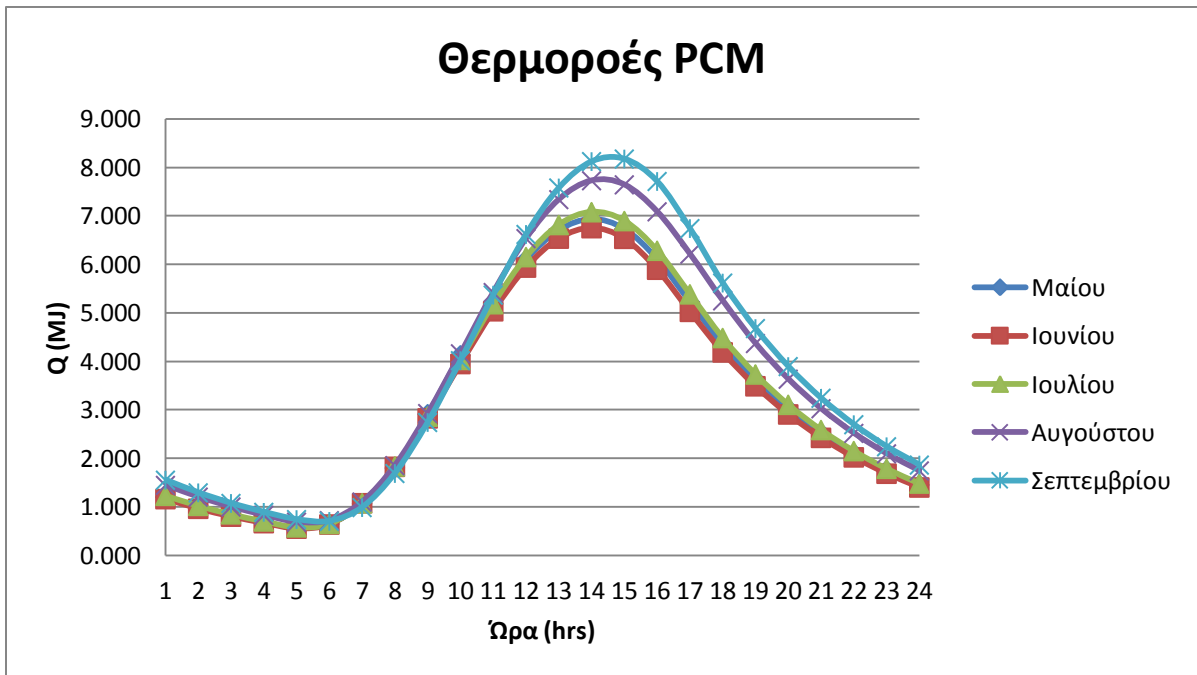
Σχήμα 7.7.8 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουλίου



Σχήμα 7.7.9 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Αυγούστου



Σχήμα 7.7.10 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Σεπτεμβρίου



Σχήμα 7.7.11 Διάγραμμα θερμοροών του PCM συγκεντρωτικά συναρτήσει της ώρας για τους θερινούς μήνες

7.8 Υπολογισμός θερμοροής μπετόν

Στο κεφάλαιο αυτό θα υπολογίσουμε την θερμοροή του μπετόν που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας ώρας τους θερινούς μήνες. Για τον υπολογισμό της θα χρησιμοποιήσουμε πάλι τον ισολογισμό που χρησιμοποιήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

$$\text{ΑΤ U} \left(\frac{(T_i + T_{i+1})}{2} - 26 \right) 3600 = Q_{i,i+1} \quad (7.8.1)$$

➤ Για τον Μάιο:

Ωρα (hrs)	T _i (°C)	T _{i+1} (°C)	Q _{i,i+1} (MJ)
1-2	26,24	26,15	0,158
2-3	26,15	26,09	0,097
3-4	26,09	26,06	0,060
4-5	26,06	26,04	0,040
5-6	26,04	26,02	0,024
6-7	26,02	26,86	0,357
7-8	26,86	28,33	1,295
8-9	28,33	30,30	2,692
9-10	30,30	32,49	4,381
10-11	32,49	34,54	6,103
11-12	34,54	36,15	7,589
12-13	36,15	37,05	8,608
13-14	37,05	37,12	9,002
14-15	37,12	36,30	8,698
15-16	36,30	34,66	7,699
16-17	34,66	32,42	6,123
17-18	32,42	30,27	4,340

18-19	30,27	28,84	2,887
19-20	28,84	27,89	1,920
20-21	27,89	27,25	1,275
21-22	27,25	26,83	0,844
22-23	26,83	26,55	0,560
23-24	26,55	26,36	0,369
24-1	26,36	26,24	0,243

Σχήμα 7.8.1 Πίνακας θερμοροών του μπετόν κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Μαΐου.

➤ Για τον Ιουνίο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	26,24	26,15	0,158
2-3	26,15	26,09	0,097
3-4	26,09	26,06	0,060
4-5	26,06	26,04	0,040
5-6	26,04	26,02	0,024
6-7	26,02	26,90	0,37
7-8	26,90	28,40	1,340
8-9	28,40	30,39	2,757
9-10	30,39	32,58	4,454
10-11	32,58	34,61	6,168
11-12	34,61	36,15	7,618
12-13	36,15	36,96	8,572
13-14	36,96	36,94	8,893
14-15	36,94	36,05	8,523
15-16	36,05	34,36	7,475

16-17	34,36	32,38	5,985
17-18	32,38	30,24	4,312
18-19	30,24	28,82	2,866
19-20	28,82	27,87	1,904
20-21	27,87	27,24	1,262
21-22	27,24	26,82	0,836
22-23	26,82	26,54	0,552
23-24	26,54	26,36	0,365
24-1	26,36	26,24	0,243

Σχήμα 7.8.2 Πίνακας θερμοροών του μπετόν κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Ιουνίου.

➤ Για τον Ιουλίο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	26,25	26,16	0,166
2-3	26,16	26,10	0,105
3-4	26,10	26,06	0,064
4-5	26,06	26,04	0,040
5-6	26,04	26,02	0,024
6-7	26,02	26,87	0,361
7-8	26,87	28,39	1,323
8-9	28,39	30,45	2,777
9-10	30,45	32,74	4,544
10-11	32,74	34,89	6,347
11-12	34,89	36,56	7,898
12-13	36,56	37,48	8,950
13-14	37,48	37,54	9,347

14-15	37,54	36,71	9,035
15-16	36,71	35,03	8,016
16-17	35,03	32,75	6,407
17-18	32,75	30,49	4,564
18-19	30,49	28,98	3,033
19-20	28,98	27,98	2,014
20-21	27,98	27,31	1,336
21-22	27,31	26,87	0,885
22-23	26,87	26,57	0,584
23-24	26,57	26,38	0,385
24-1	26,38	26,25	0,255

Σχήμα 7.8.3 Πίνακας θερμοροών του μπετόν κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Ιουλίου.

➤ Για τον Αύγουστο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	26,32	26,21	0,215
2-3	26,21	26,14	0,142
3-4	26,14	26,09	0,093
4-5	26,09	26,06	0,060
5-6	26,06	26,04	0,040
6-7	26,04	26,76	0,324
7-8	26,76	28,26	1,226
8-9	28,26	30,39	2,700
9-10	30,39	32,83	4,556
10-11	32,83	35,19	6,505
11-12	35,19	37,15	8,259

12-13	37,15	38,37	9,551
13-14	38,37	38,65	10,160
14-15	38,65	37,98	10,001
15-16	37,98	36,38	9,079
16-17	36,38	34,08	7,496
17-18	34,08	31,72	5,603
18-19	31,72	29,80	3,865
19-20	29,80	28,53	2,570
20-21	28,53	27,68	1,709
21-22	27,68	27,11	1,132
22-23	27,11	26,73	0,747
23-24	26,73	26,48	0,491
24-1	26,48	26,32	0,324

Σχήμα 7.8.4 Πίνακας θερμοροών του μπετόν κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Αυγούστου.

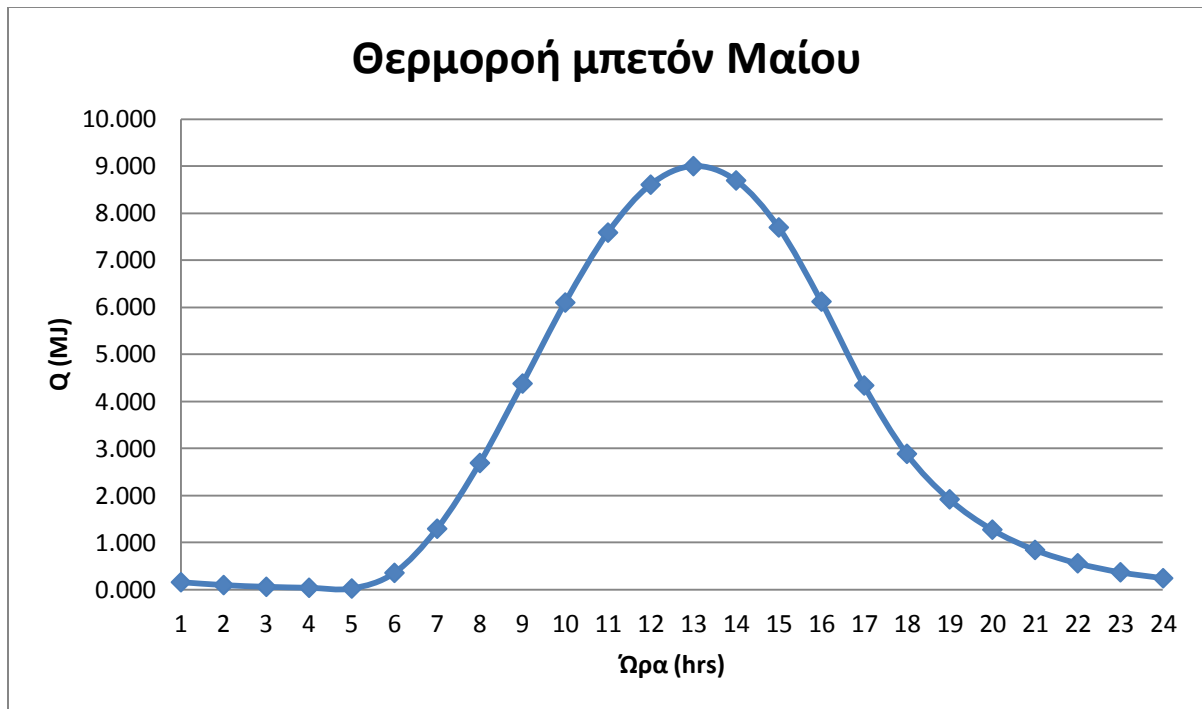
➤ Για τον Σεπτέμβριο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	26,34	26,22	0,227
2-3	26,22	26,14	0,146
3-4	26,14	26,09	0,093
4-5	26,09	26,06	0,060
5-6	26,06	26,04	0,040
6-7	26,04	26,47	0,207
7-8	26,47	27,88	0,954
8-9	27,88	30,00	2,387
9-10	30,00	32,53	4,276

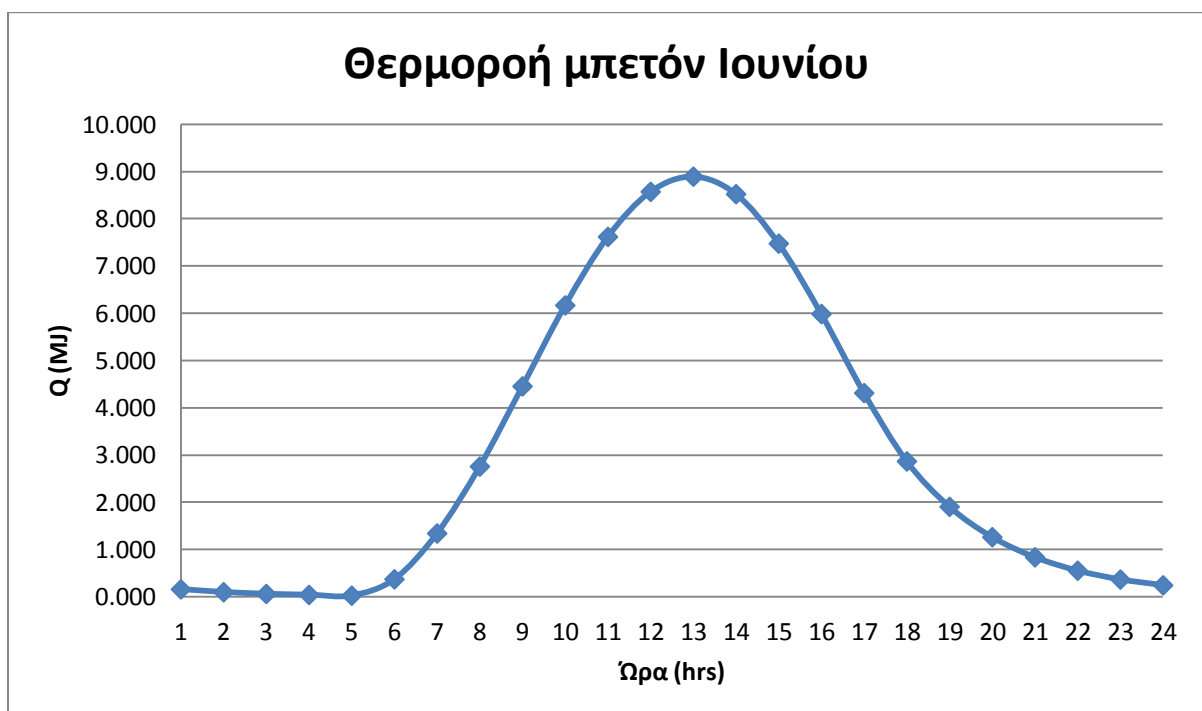
10-11	32,53	35,08	6,338
11-12	35,08	37,34	8,292
12-13	37,34	38,89	9,839
13-14	38,89	39,45	10,696
14-15	39,45	39,03	10,752
15-16	39,03	37,57	9,989
16-17	37,57	35,25	8,454
17-18	35,25	32,15	6,253
18-19	32,15	30,09	4,158
19-20	30,09	28,72	2,765
20-21	28,72	27,81	1,839
21-22	27,81	27,20	1,222
22-23	27,20	26,79	0,808
23-24	26,79	26,52	0,531
24-1	26,52	26,34	0,349

Σχήμα 7.8.5 Πίνακας θερμοροών του μπετόν κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Σεπτεμβρίου.

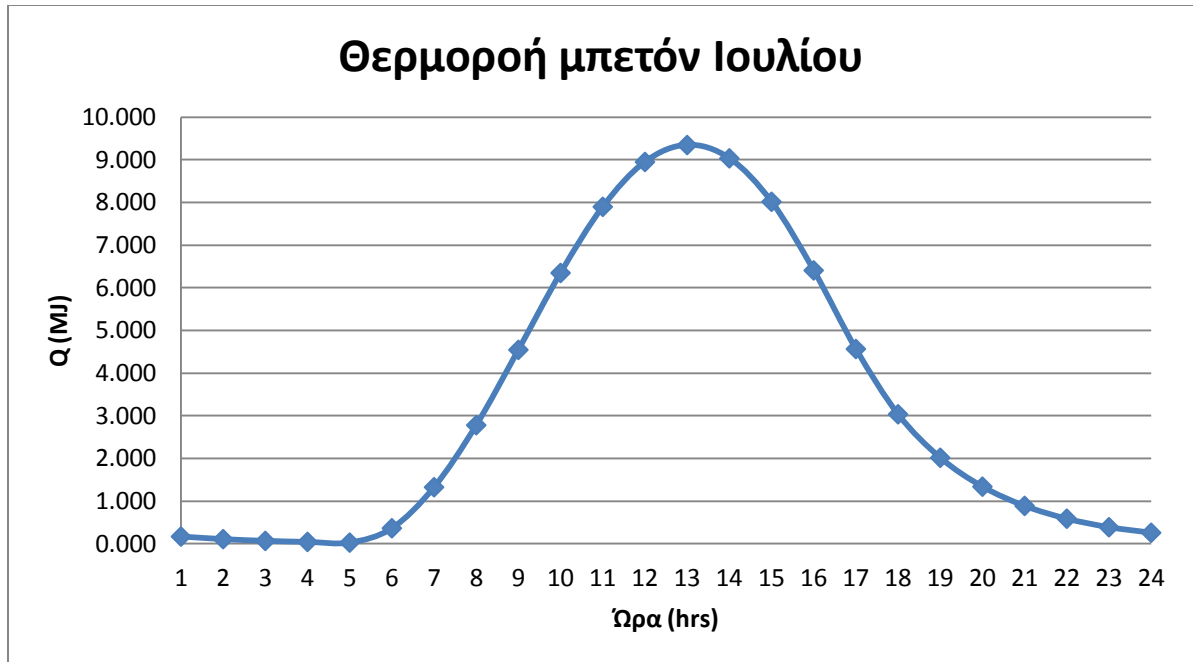
Παρακάτω μπορούμε να δούμε και γραφικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν πιο πάνω.



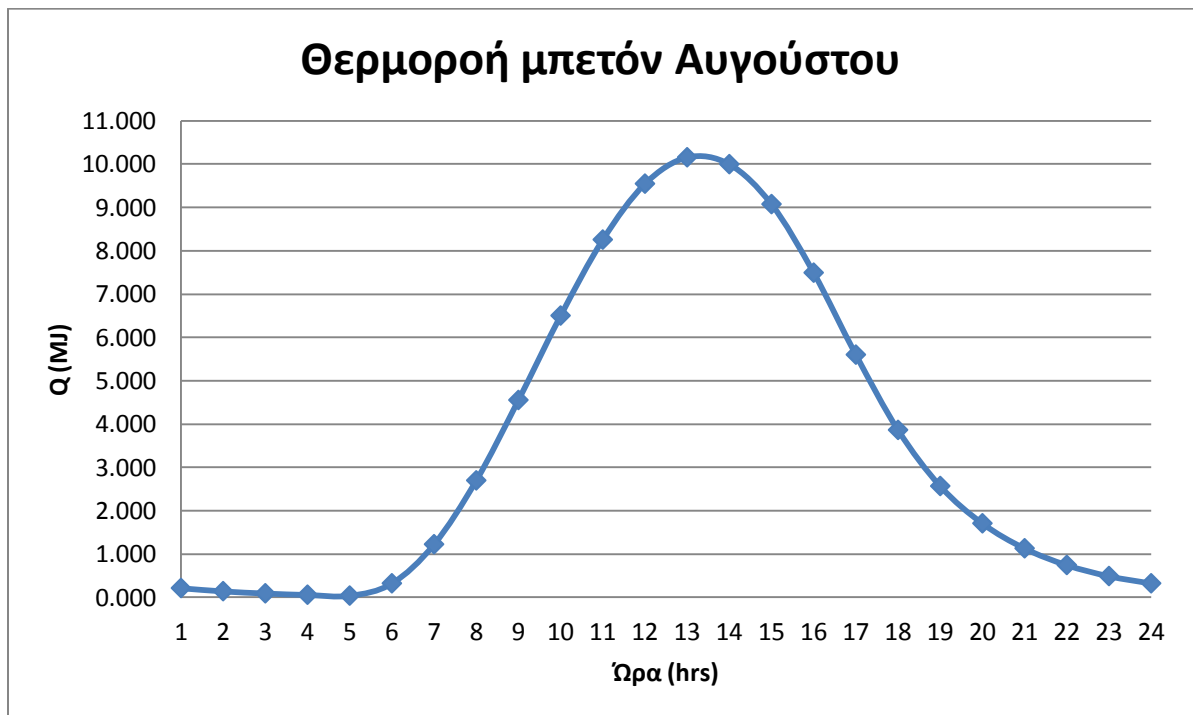
Σχήμα 7.8.6 Διάγραμμα θερμοροής του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Μαΐου



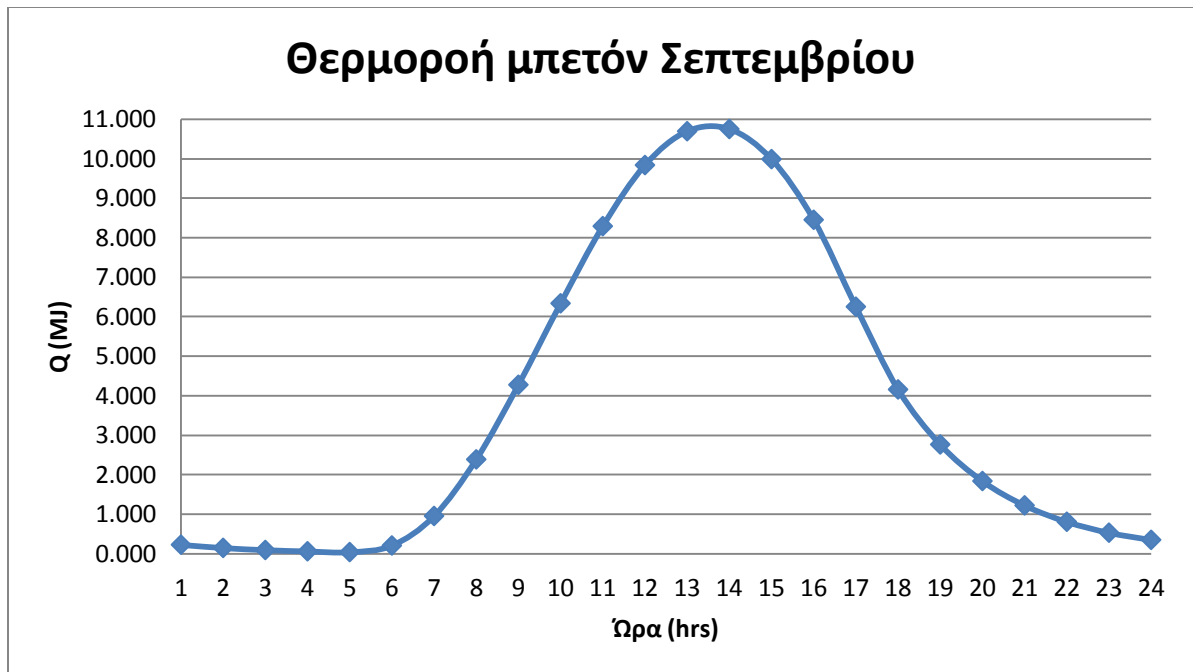
Σχήμα 7.8.7 Διάγραμμα θερμοροής του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουνίου



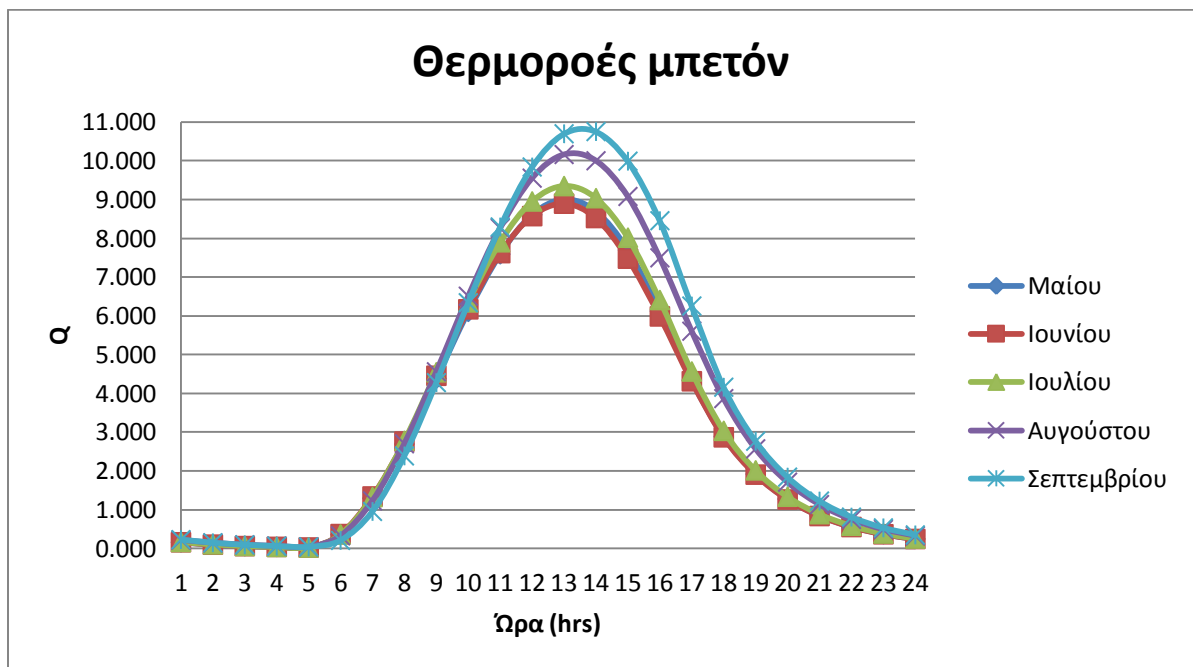
Σχήμα 7.8.8 Διάγραμμα θερμοροής του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουλίου



Σχήμα 7.8.9 Διάγραμμα θερμοροής του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Αυγούστου



Σχήμα 7.8.10 Διάγραμμα θερμοροής του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Σεπτεμβρίου

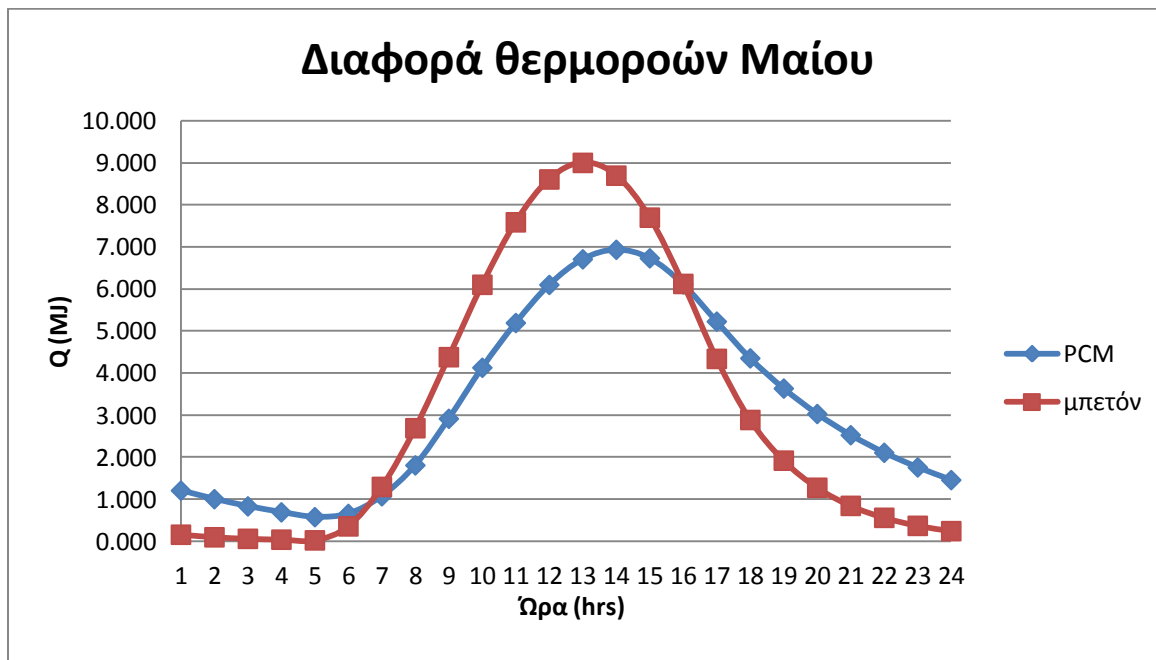


Σχήμα 7.8.11 Διάγραμμα θερμοροών του μπετόν συγκεντρωτικά συναρτήσει της ώρας για τους θερινούς μήνες

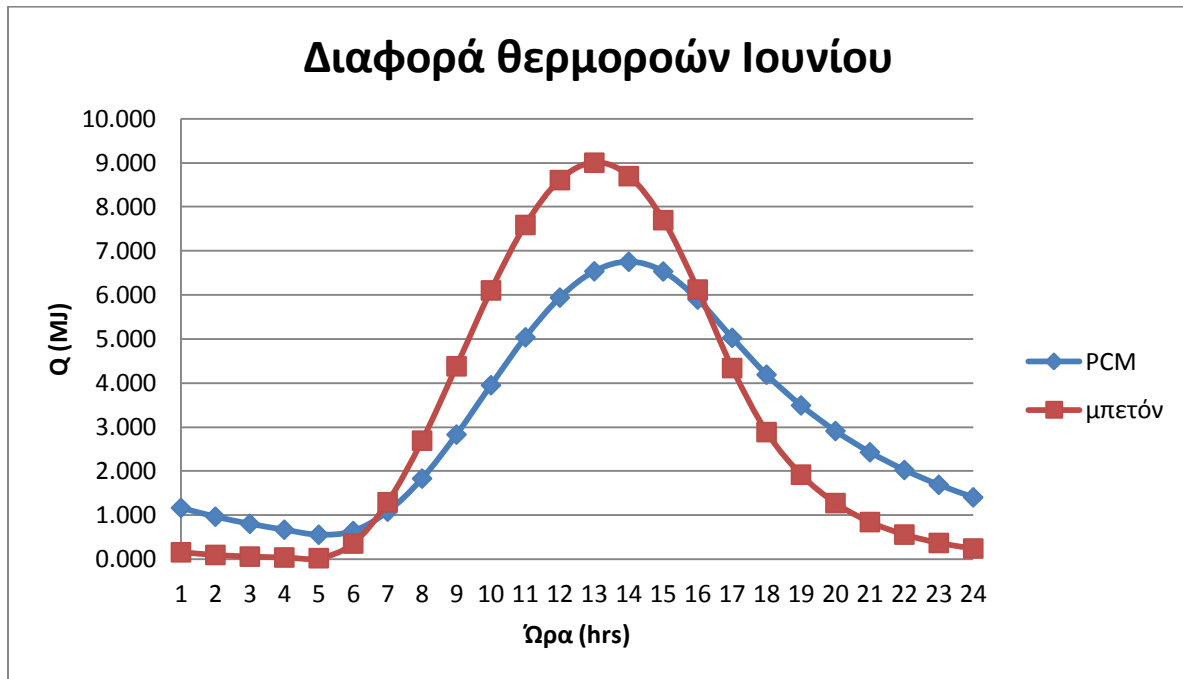
7.9 Διαφορά θερμοροών PCM – μπετόν

Η χρήση των PCM σε όλες τις εφαρμογές βελτιώνει την ποιότητα τους, διευκολύνει τον τρόπο λειτουργίας τους και συνεπώς και την καθημερινότητά μας. Αυτό το έχουμε αναφέρει εκτενέστερα στο πρώτο μέρος της εργασίας με αρκετά παραδείγματα. Σ αυτό το κεφάλαιο θα αποδείξουμε και αριθμητικά πως οφελεί η χρήση των PCM στους τοίχους συγκριτικά με το μπετόν. Στα κεφάλαια 7.7 και 7.8 υπολογίσαμε τις θερμοροές για τα PCM και το μπετόν αντίστοιχα για τους θερινούς μήνες. Συνεπώς, είναι εύκολο να υπολογίσουμε τη διαφορά των θερμοροών και άρα το όφελος που θα χουμε με την εγκατάσταση των PCM στους τοίχους τους θερινούς μήνες.

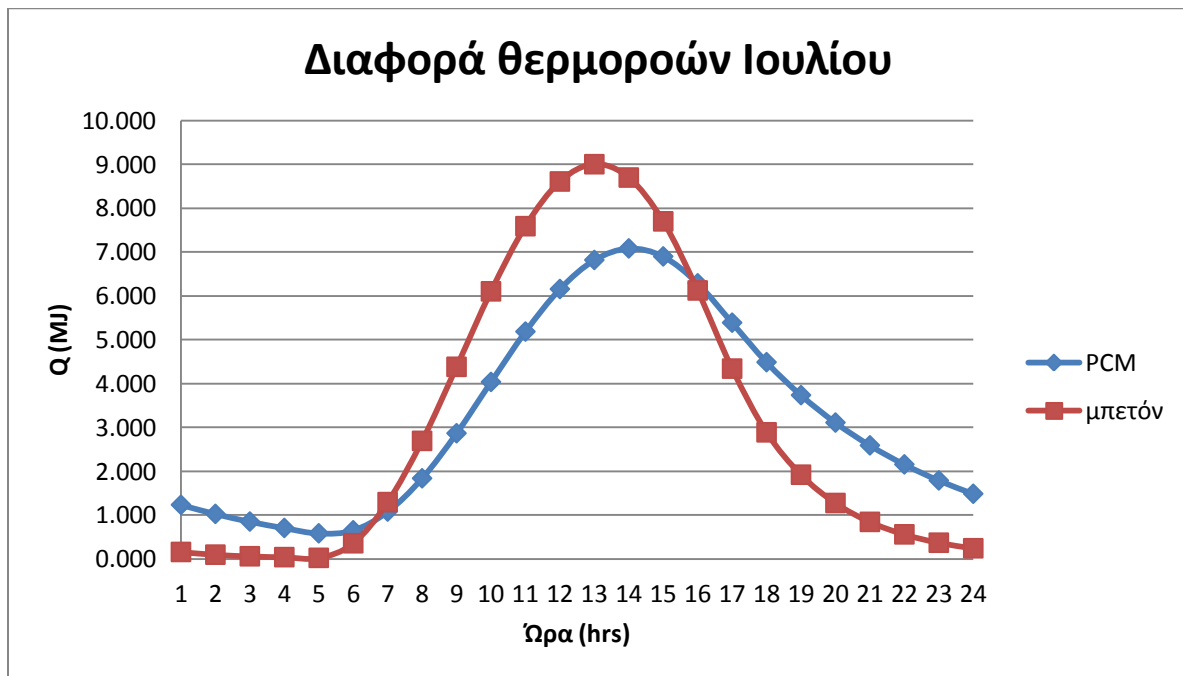
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται και γραφικά αυτή η διαφορά.



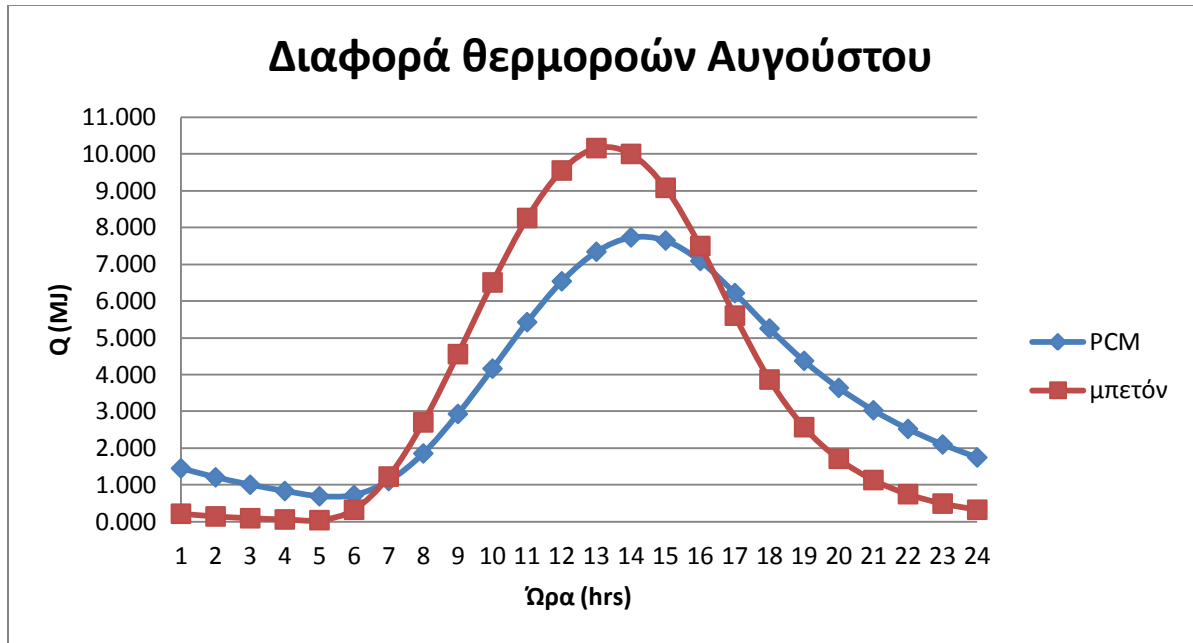
Σχήμα 7.9.1 Διάγραμμα θερμοροών του PCM και του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Μαΐου,



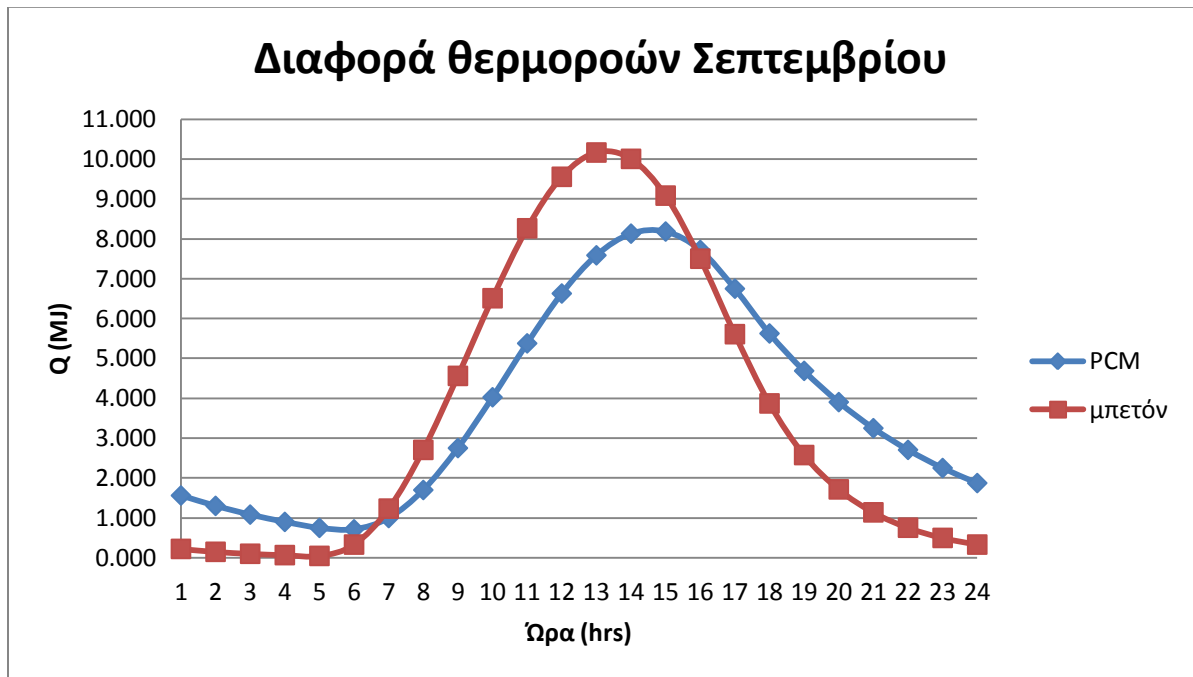
Σχήμα 7.9.2 Διάγραμμα θερμοροών του PCM και του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουνίου,



Σχήμα 7.9.3 Διάγραμμα θερμοροών του PCM και του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουλίου,



Σχήμα 7.9.4 Διάγραμμα θερμορών του PCM και του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Αυγούστου,



Σχήμα 7.9.5 Διάγραμμα θερμορών του PCM και του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Σεπτεμβρίου,

Συμπέρασμα:

Συγκρίνοντας τις θερμοροές των PCM και μπετόν για τους θερινούς μήνες βλέπουμε ότι έχουμε αύξηση τις πρωινές ώρες της θερμοροής του μπετόν. Το PCM τις βραδινές ώρες αποθηκεύει περισσότερη θερμοροή. Αυτό ακριβώς θέλουμε. Καθώς το πρωί που η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλότερη το PCM αποθηκεύει λιγότερη θερμοροή από το μπετόν και το βράδυ που πλέον η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη το PCM κρατάει τη θερμοροή σε υψηλότερα επίπεδα. Συμπερασματικά, το PCM αποβάλλει λοιπόν την ενέργεια σε μεγαλύτερο βαθμό τις βραδινές ώρες γεγονός που μας εξυπηρετεί καθώς η θερμοκρασία τότε είναι χαμηλότερη. Το μπετόν απ' την άλλη αποθηκεύει μεγάλα ποσά θερμοροής τις πρωινές ώρες πράγμα που δεν θέλουμε γιατί το πρωί έχουμε ήδη υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Άρα λοιπόν καταλήγουμε στο γεγονός ότι η εγκατάσταση PCM στον τοίχο ενός κτιρίου συμφέρει και προτιμάται σε σχέση με το απλό μπετόν.

7.10 PCM RT27

Στο κεφάλαιο αυτό θα επιλέξουμε ένα άλλο PCM που κυκλοφορεί στην αγορά, το RT27. Θα υπολογίσουμε την θερμοκρασία και τη θερμοροή του PCM σε τοίχο που προκύπτει με το RT27. Τις πληροφορίες που θα χρειαστούμε θα τις πάρουμε από το επιστημονικό άρθρο των κύριων Κραββαρίτη, Αντωνόπουλου και Τζιβανίδη με τίτλο " Experimental determination of the effective thermal capacity function and other thermal properties for various phase change materials using the thermal delay method". Σύμφωνα με το άρθρο αυτό, θα δούμε τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν για το $C_{p,eff}$ ανάλογα με τη θερμοκρασία του τοίχου. Παρακάτω θα δούμε τους ισολογισμούς που ισχύουν για το $C_{p,eff}$.

- Για $T \leq 22 \text{ }^\circ\text{C}$

$$C_{p,eff} = C_{ps} = 2000 \text{ J/kgK} \quad (7.10.1)$$

- Για $22 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 25 \text{ }^\circ\text{C}$

$$C_{p,eff} = -329,5000062 + 106,3162953 \times T - 13,35423683 \times T^2 + 0,8223480772 \times T^3 - 0,02488671396 \times T^4 + 0,0002972388922 \times T^5 \quad (7.10.2)$$

- Για $25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 26,8 \text{ }^\circ\text{C}$

$$C_{p,eff} = 9542,790195 - 774,7503271 \times T + 15,74031481 \times T^2 \quad (7.10.3)$$

- Για $26,8 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 27,5 \text{ }^\circ\text{C}$

$$C_{p,eff} = 41611,7679 - 3023,692869 \times T + 54,96396748 \times T^2 \quad (7.10.4)$$

- Για $27,5 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 31 \text{ }^\circ\text{C}$

$$C_{p,eff} = 31155,44075 - 3820,483549 \times T + 175,7678837 \times T^2 - 3,594806096 \times T^3 + 0,02757236338 \times T^4 \quad (7.10.5)$$

- $T \geq 31 \text{ }^\circ\text{C}$

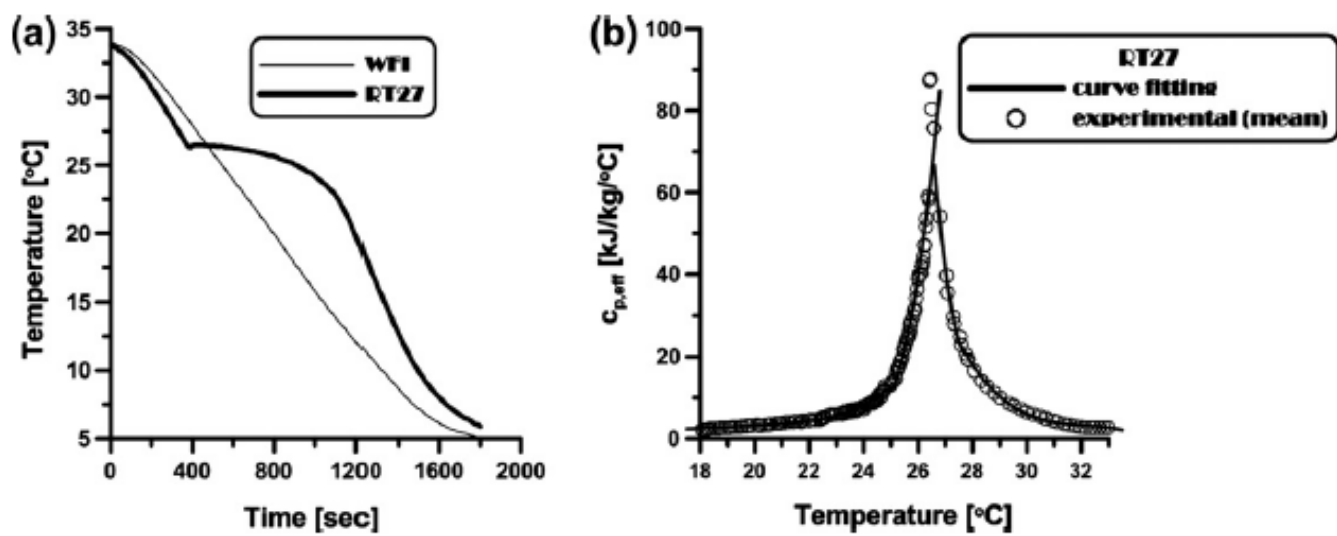
$$C_{p,\text{eff}} = C_{pl} = 2300 \text{ J/kgK}$$

$$(7.10.6)$$

Table 1
Thermal properties of various PCM, measured by the thermal delay method.

Measurements serial number	Thermal capacity, c_p (kJ/kg K)	Latent heat, H (kJ/kg)	Phase change heat, H (kJ/kg)	Heat storage capacity H^* during operation temperature range $T_s - T_l$ (kJ/kg)			
	Alcohol	WFI	Gr Paraffin	RT20	RT27	RT58	SP25A8
1	2.801	335.2	133.7	177.8	178.2	174.6	179.3
2	2.874	343.9	136.8	171.5	183.2	173.7	156.7
3	2.862	337.0	136.4	173.6	180.5	166.8	203.3
4	2.862	337.4	134.1	177.3	183.1	176.4	212.9
5	2.867	329.6	140.0	172.6	186.2	164.1	170.4
6	2.870	310.5	131.2	174.6	174.3	167.8	172.6
7	2.868	306.7	143.0	169.0	185.9	171.2	191.4
8	2.894	292.4	143.6	179.5	182.4	180.0	175.3
9	2.860	285.9	133.1	170.5	184.6	183.6	182.3
10	2.816	307.6	134.1	175.6	178.2	183.1	173.7
11	2.899	315.3	137.1	172.7	175.6	183.4	179.3
12	2.849	316.0	134.5	174.3	184.3	177.1	169.7
13	2.696	307.7	146.9	176.4	177.2	169.9	185.9
14	2.863	317.5	131.1	173.7	181.6	186.9	182.7
15	2.847	306.2	142.6	175.4	183.7	171.3	184.6
16	2.862	324.2	132.7	170.1	172.5	182.6	190.4
17	2.876	324.2	136.7	178.2	184.4	185.7	189.2
18	2.902	330.3	134.2	171.7	181.1	176.7	191.8
19	2.906	350.7	130.8	174.5	182.7	174.2	186.3
20	2.905	355.9	130.8	173.4	182.7	174.2	184.7
St. deviation	0.020	15.1	3.6	2.2	3.3	5.6	8.9
Mean value	2.869	321.7	136.5	174.1	180.8	176.0	183.1
Ref. value	2.805	333.5	146.5	172	179	178	180
Disagreement %	-2.3	3.5	6.8	-1.2	-1.0	1.1	-1.7
Nom. operation temp. range $T_s - T_l$ ($^\circ\text{C}$)	-	-	-	11-26	19.35	50.65	15.30
Mean phase change characteristics							
H (kJ/kg)	-	321.7	136.5	132.1	167.4	166.1	141.5
$T_s - T_l$ ($^\circ\text{C}$)	-	00	50.58	15.26	22.31	53.62	22.32
Mean solid and liquid state thermal capacities							
c_{ps}, c_{pl} (kJ/kg K)	-	-	2.7-4.4	1.9-2.5	2.0-2.3	1.9-2.6	2.6-2.7

Σχήμα 7.10.1 Θερμικές ιδιότητες διάφορων PCM που μετριοούνται με τη μέθοδο thermal delay



Σχήμα 7.10.2 a) Μετρούμενες “cooling” καμπύλες για το PCM RT27
 b) Πειραματικά καθορισμένο $C_{p,eff}(T)$ για το RT27

7.11 Υπολογισμός θερμοκρασίας PCM για το RT27

Ισολογισμός :

Η ενέργεια που δίνει το PCM είναι η ενέργεια λόγω της ακτινοβολίας αφαιρούμενη κατά την ενέργεια που δίνει το PCM στο χώρο όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια.

Άρα :

$$m C_p (T_T - T_A) = G_t A_{\pi} 3600 + A_T U 3600 (T_{\delta} - T_A) \quad (7.11.1)$$

Όπου όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια:

- C_p , η ειδική θερμοχωρητικότητα η οποία δίνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του PCM σύμφωνα με τις εξισώσεις (7.10.1), (7.10.2), (7.10.3), (7.10.4), (7.10.5), (7.10.6)
- m , η μάζα του PCM

$$m = \rho V = 1019 \times 1,2 = 1222,8 \text{ Kgr}$$

$$\text{με: } V = (\text{επιφάνεια τοίχου}) \times (\text{πάχος PCM}) = 30\text{m}^2 \times 0,04\text{m} = 1,2\text{m}^3$$

Για το πάχος του PCM έχουμε επιλέξει μια λογική τιμή ίση με 4cm.

$$\text{Και } \rho = 1019 \text{Kgr/m}^3$$

- T_A , η θερμοκρασία του PCM στην αρχή της χρονικής περιόδου .
- T_T , η θερμοκρασία του PCM στο τέλος της χρονικής περιόδου.
- G_t , ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου (έχει βρεθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 7.1.)
- A_{π} , η επιφάνεια του υαλοπίνακα στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται υαλοπίνακας διαστάσεων (ύψος) x (μήκος) = (2,5) x (3) m^2 .
Άρα $A_{\pi} = 7,5 \text{ m}^2$
- A_T , η επιφάνεια τοίχου στον οποίο έχει ενσωματωθεί το PCM με διαστάσεις (πλάτος αίθουσας) x (ύψος) = (10) x (3) m^2
Άρα $A_T = 30 \text{ m}^2$
- U , η ειδική θερμική διαπερατότητα, η οποία μπορεί να βρεθεί με βάση την εξίσωση :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{l}{k} = \frac{1}{8} + \frac{0,01}{1,2} = 0,133$$

$$\text{Άρα } U = 7,52 \text{ W/m}^2$$

με $\frac{1}{h}$, η θερμική αντίσταση συναγωγής και $\frac{l}{k}$, η θερμική αντίσταση αγωγής

διαμέσου της γυψοσανίδας που υπάρχει πριν το στρώμα του PCM και η οποία έχει πάχος $l = 10\text{mm}$ και θερμική αγωγιμότητα $k = 0,12 \text{ W /m C}$

➤ T_{δ} , η θερμοκρασία στο εσωτερικό της αίθουσας όπου στην περίπτωση μας είναι ίση με $T_{\delta} = 26^{\circ}\text{C}$

Εύκολα από την εξίσωση ισολογισμού γνωρίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία μπορούμε να βρούμε την θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης στο τέλος της κάθε ώρας .

$$T_T = T_A + \frac{Gt A\pi 3600 + U A\tau 3600 (T_{\delta} - T_A)}{Cp m} \quad (7.11.2)$$

Βέβαια από τη παραπάνω εξίσωση παρατηρούμε την ύπαρξη και ενός άλλου αγνώστου του T_A της θερμοκρασίας δηλαδή στην αρχή της χρονικής περιόδου στην αρχή κάθε ώρας .Για την εύρεση της οποίας θα εργαστούμε ως εξής:

Αρχικά θα θεωρήσουμε εμείς μια αυθαίρετη τιμή , έστω $T_A = 24^{\circ}\text{C}$ για τις $t=07:00$ (7 η ώρα το πρωί) με αυτή την αρχική τιμή(γνωρίζοντας και την ακτινοβολία που δέχεται ο τοίχος την συγκεκριμένη ώρα) θα βρούμε από τη σχέση (7.11.2) για κάθε ώρα της μέρας μελέτης μας τη νέα θερμοκρασία του PCM T_T , δηλαδή για κάθε μια από τις ώρες από 07:00 το πρωί ως 06:00 το άλλο πρωί(ένα εικοσιτετράωρο) θα βρεθεί η νέα θερμοκρασία του . Ύστερα θα επαναλάβουμε την διαδικασία αυτή βάζοντας τώρα ως αρχική τιμή της T_A για $t=07:00$ την τιμή που μας έχει προκύψει την $t=06:00$ του προηγούμενου 24ώρου(προηγούμενη δοκιμή).Οι επαναλήψεις θα συνεχιστούν μέχρι οι τιμές της ίδιας ώρας κάθε 24ώρου να συγκλίνουν. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία από την

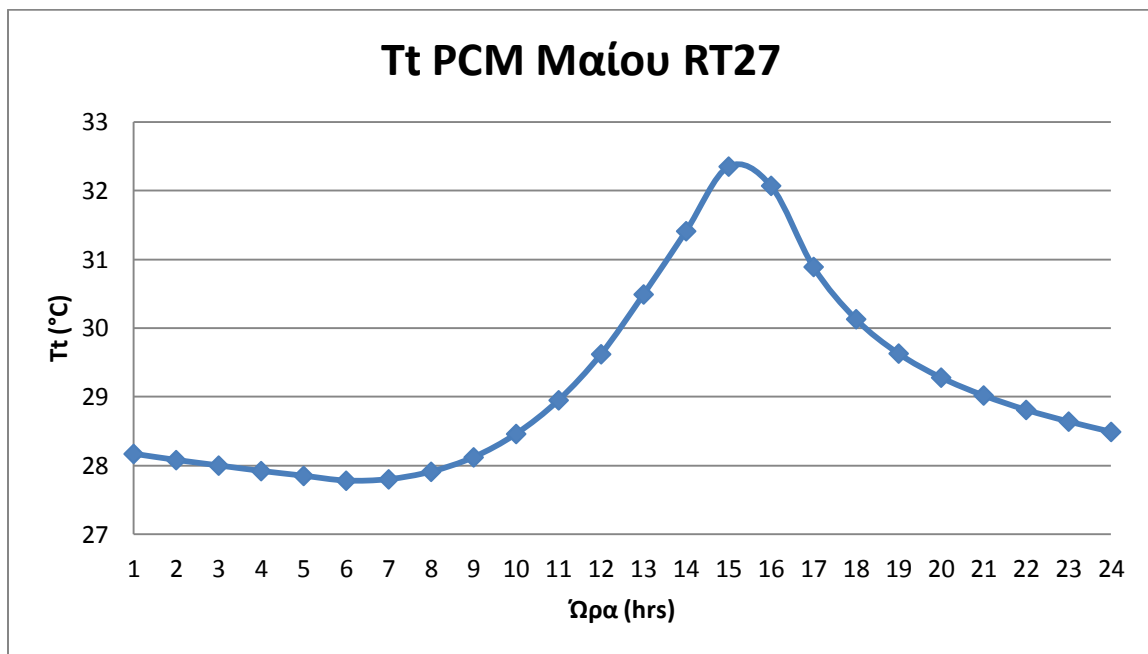
αρχική αυθαίρετη υποτεθείσα θερμοκρασία. Για να απλοποιηθεί η εξίσωση (7.11.2) θα παίρνουμε το $C_{p,eff}$ βάση της αρχικής θερμοκρασίας T_A που έχουμε θεωρήσει κάθε φορά. Όσο μικραίνει το βήμα τόσο πιο ακριβές θα είναι το αποτέλεσμα. Με την διαδικασία αυτή λοιπόν υπολογίσαμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο στρώμα του PCM για μια τυπική ημέρα 21η κάθε θερινού μήνα του έτους, οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω πίνακάκια και διαγράμματα.

➤ Για την 21η Μαΐου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	27,78
7	0,076473	27,80
8	0,158606	27,91
9	0,247887	28,12
10	0,326386	28,46
11	0,379743	28,95
12	0,401797	29,62
13	0,386401	30,49
14	0,338614	31,41
15	0,260975	32,35
16	0,162475	32,07
17	0,059674	30,89
18	0	30,13
19	0	29,63
20	0	29,28
21	0	29,02
22	0	28,81
23	0	28,64
24	0	28,49

1	0	28,17
2	0	28,08
3	0	28,00
4	0	27,92
5	0	27,85

Σχήμα 7.11.1 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM RT27 κατά την 21^η Μαΐου για νότιο προσανατολισμό.

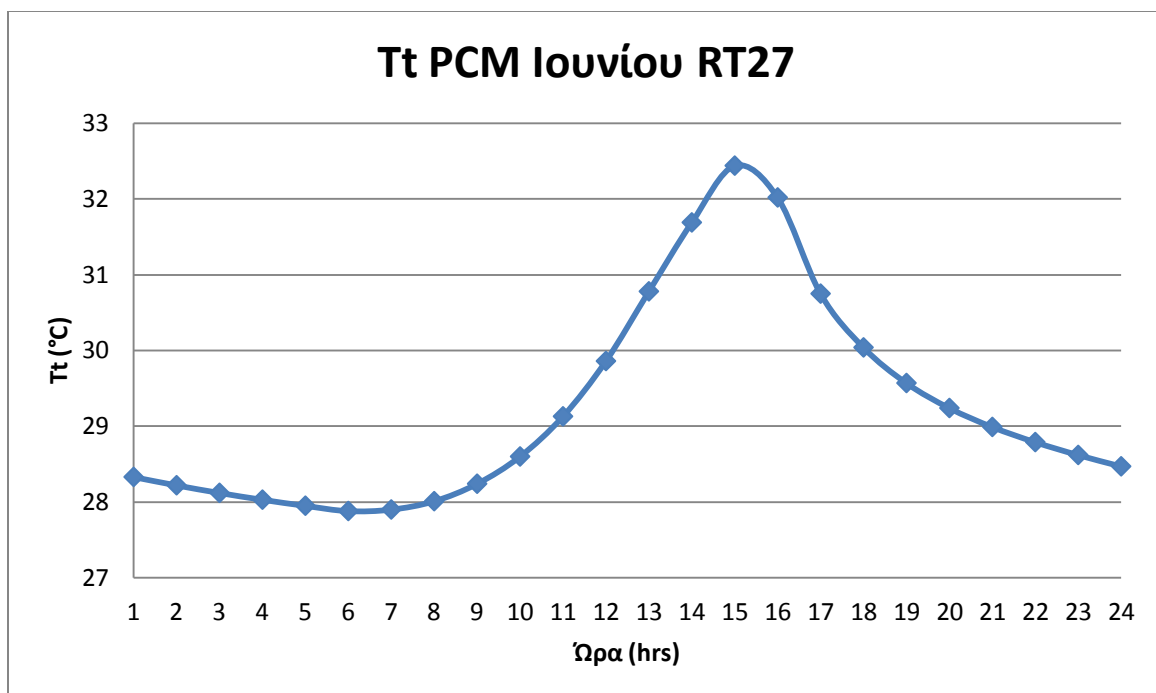


Σχήμα 7.11.2 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM RT27 – ώρας κατά την 21^η Μαΐου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21η Ιουνίου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	27,88
7	0,080299	27,90
8	0,162635	28,01
9	0,251822	28,24
10	0,329689	28,60
11	0,381024	29,13
12	0,398017	29,86
13	0,378546	30,78
14	0,328165	31,69
15	0,249801	32,44
16	0,150684	32,02
17	0,049063	30,75
18	0	30,04
19	0	29,57
20	0	29,24
21	0	28,99
22	0	28,79
23	0	28,62
24	0	28,47
1	0	28,33
2	0	28,22
3	0	28,12
4	0	28,03
5	0	27,95

Σχήμα 7.11.3 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM RT27 κατά την 21^η Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό.



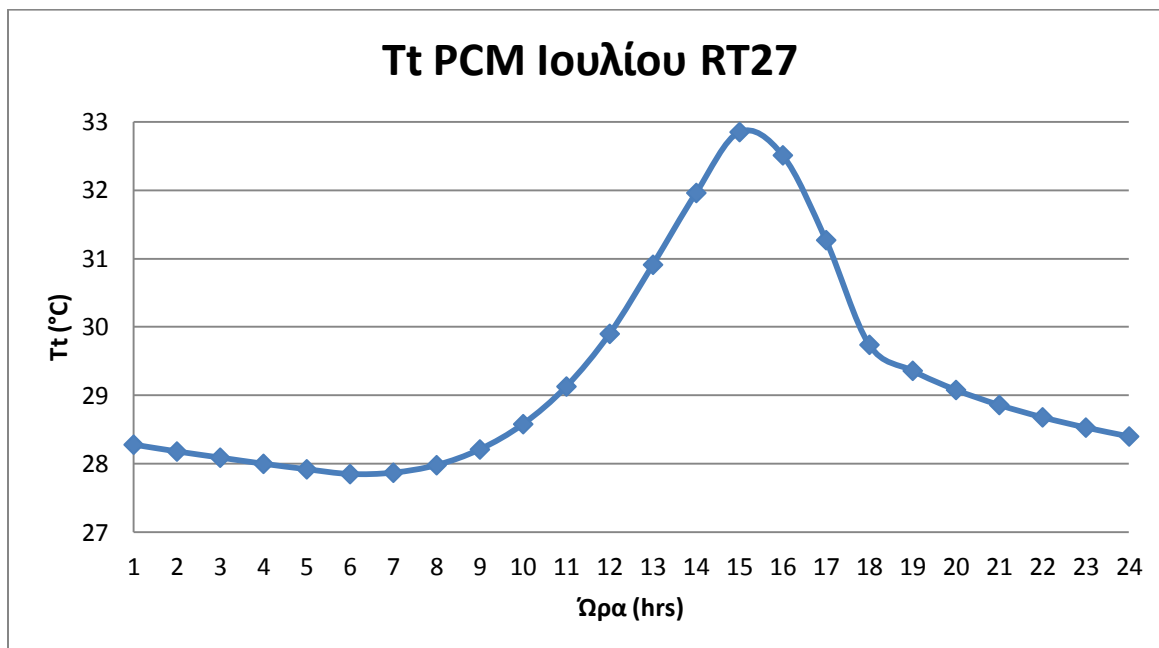
Σχήμα 7.11.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM RT27 – ώρας κατά την 21^η Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21η Ιουλίου

Ωρα	Gt (KW/m ²)	T _T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	27,85
7	0,077277	27,87
8	0,16312	27,98
9	0,257285	28,21
10	0,340239	28,58
11	0,396315	29,13
12	0,41773	29,90
13	0,401056	30,91
14	0,351155	31,96
15	0,272563	32,85
16	0,17161	32,51
17	0,067114	31,27

18	0	29,74
19	0	29,36
20	0	29,08
21	0	28,86
22	0	28,68
23	0	28,53
24	0	28,40
1	0	28,28
2	0	28,18
3	0	28,09
4	0	28,00
5	0	27,92

Σχήμα 7.11.5 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM RT27 κατά την 21^η Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό.

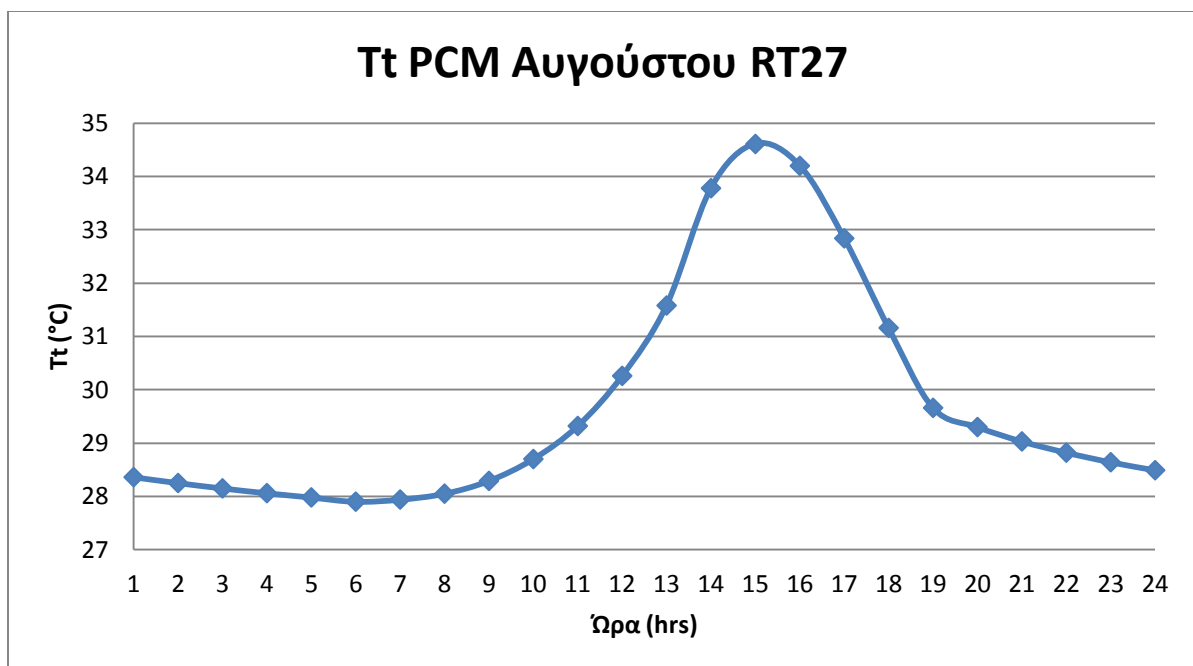


Σχήμα 7.11.6 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM RT27 – ώρας κατά την 21^η Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21η Αυγούστου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	27,90
7	0,066465	27,94
8	0,158305	28,05
9	0,260143	28,29
10	0,352122	28,70
11	0,418377	29,32
12	0,452968	30,26
13	0,44518	31,58
14	0,397724	33,78
15	0,320498	34,61
16	0,216425	34,20
17	0,10575	32,84
18	0,030856	31,16
19	0	29,66
20	0	29,30
21	0	29,03
22	0	28,82
23	0	28,64
24	0	28,49
1	0	28,36
2	0	28,25
3	0	28,15
4	0	28,06
5	0	27,98

Σχήμα 7.11.7 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM RT27 κατά την 21^η Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό.



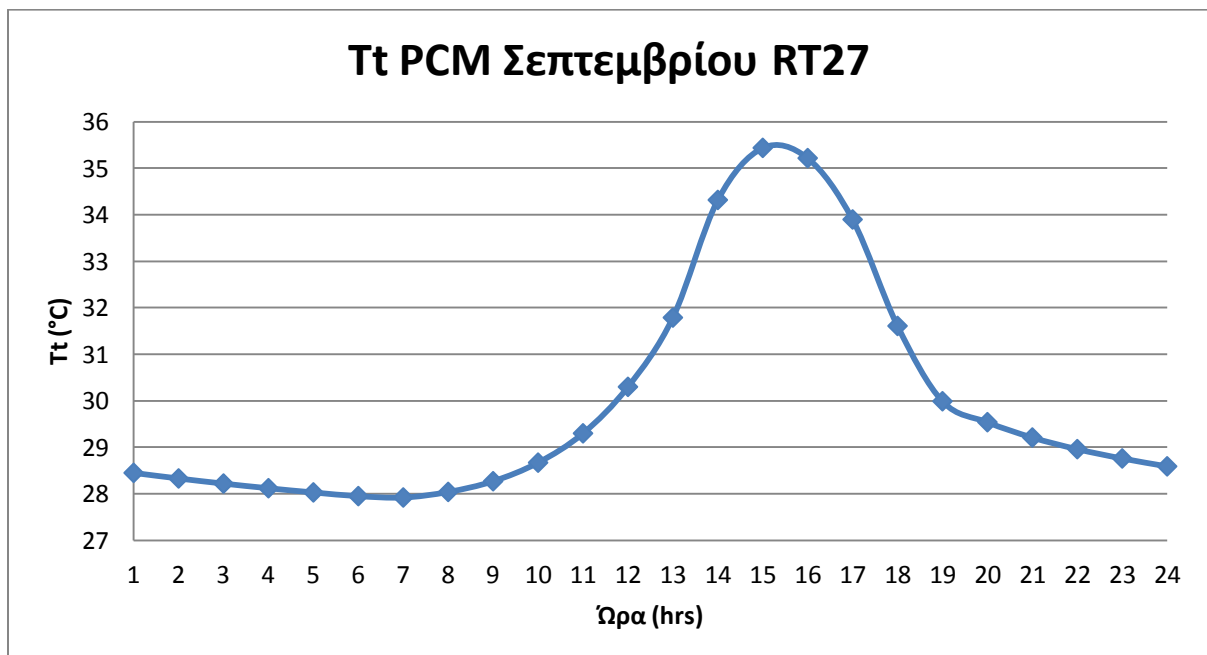
Σχήμα 7.11.8 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM RT27 – ώρας κατά την 21^η Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21η Σεπτεμβρίου

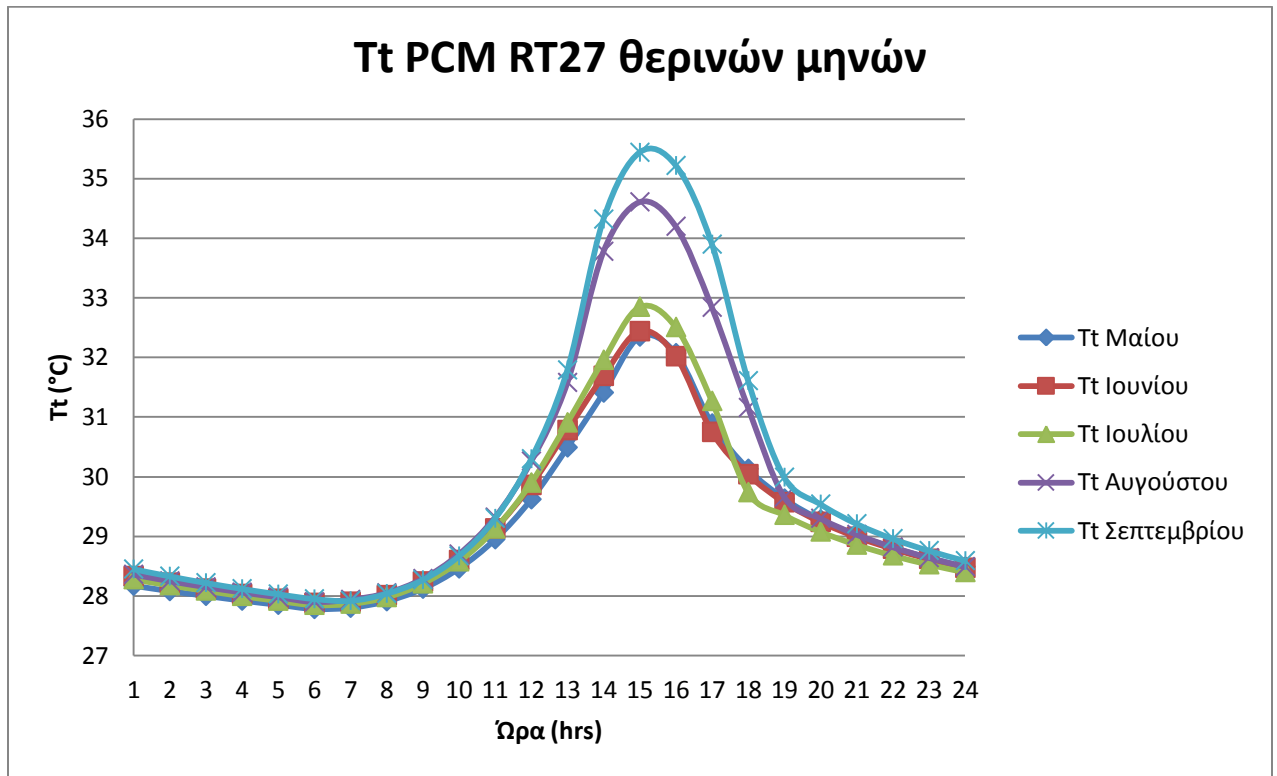
Ωρα	Gt (KW/m ²)	T _T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	27,95
7	0,040322	27,92
8	0,14111	28,04
9	0,247334	28,27
10	0,348416	28,67
11	0,425997	29,30
12	0,477016	30,30
13	0,480858	31,79
14	0,438651	34,32
15	0,366994	35,44
16	0,261053	35,22
17	0,139856	33,90

18	0	31,61
19	0	29,99
20	0	29,54
21	0	29,21
22	0	28,96
23	0	28,76
24	0	28,59
1	0	28,45
2	0	28,33
3	0	28,22
4	0	28,12
5	0	28,03

Σχήμα 7.11.9 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM RT27 κατά την 21^η Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό.



Σχήμα 7.11.10 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM RT27 – ώρας κατά την 21^η Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό

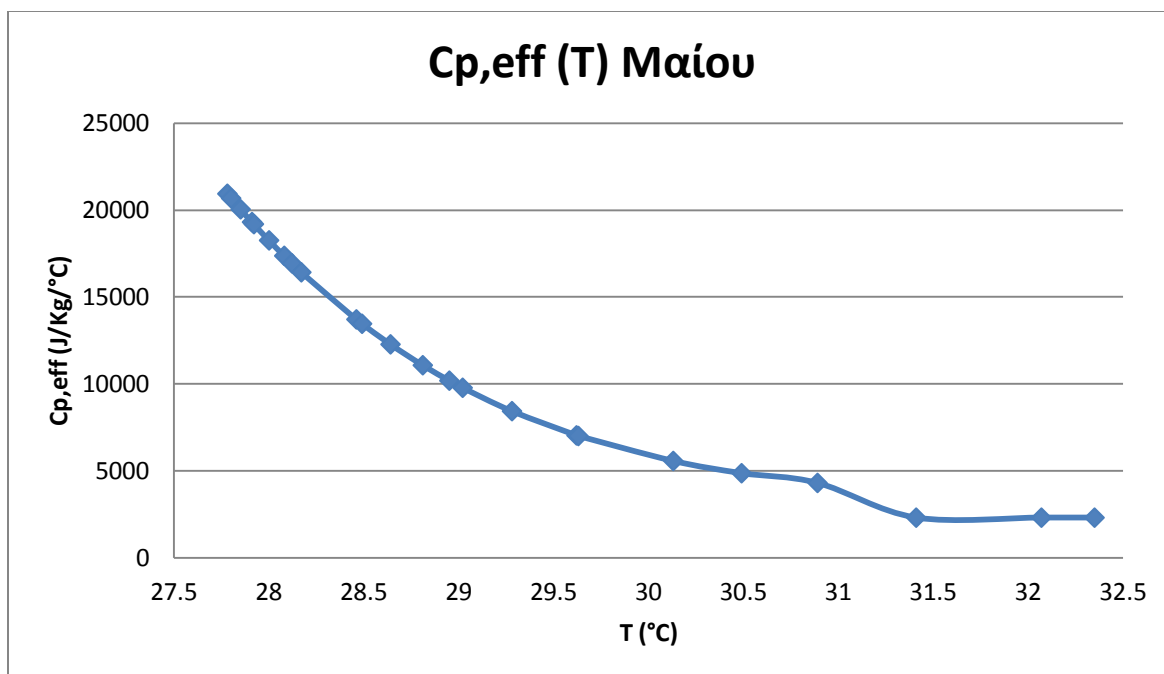


Σχήμα 7.11.11 Διαγράμματα T_{pcm} RT27 συναρτήσεως της ώρας για όλους τους θερινούς μήνες του έτους σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.

Τυχαία θα πάρουμε τις θερμοκρασίες του μήνα Μαΐου για να δούμε πώς προκύπτει γραφικά το $C_{p,eff}$.

T pcm (°C)	Cp,eff (J / Kg /°C)
27.78	20938.66
27.8	20680.02
27.85	20046.72
27.91	19311.39
27.92	19191.4
28	18257.36
28.08	17368.18
28.12	16939.93
28.17	16419.55
28.46	13710.56
28.49	13458.74
28.64	12273.8
28.81	11071.84
28.95	10185.94
29.02	9775.89
29.28	8428.98
29.62	7035.5
29.63	7000.07
30.13	5563.43
30.49	4857.5
30.89	4298.07
31.41	2300
32.07	2300

Σχήμα 7.11.12 Πίνακας θερμοκρασιών PCM Μαΐου – Cp,eff



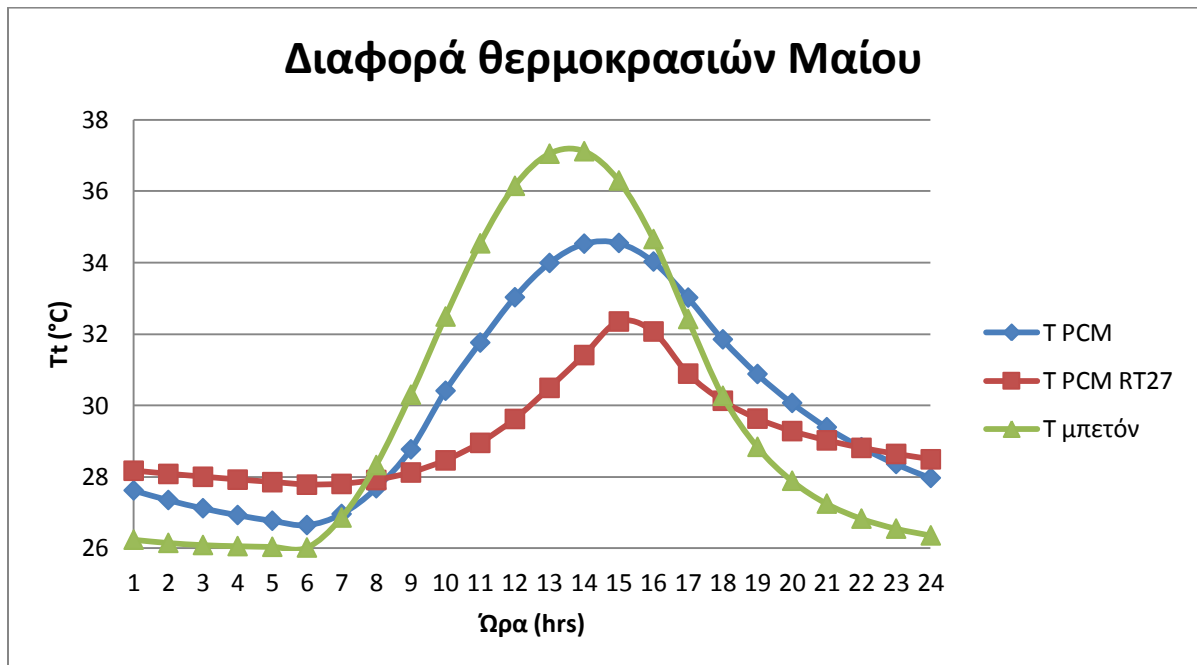
Σχήμα 7.11.13 Διάγραμμα $C_{p,eff}$ Μαΐου συναρτήσει των θερμοκρασιών των PCM που βρήκαμε πιο πάνω

Συμπέρασμα:

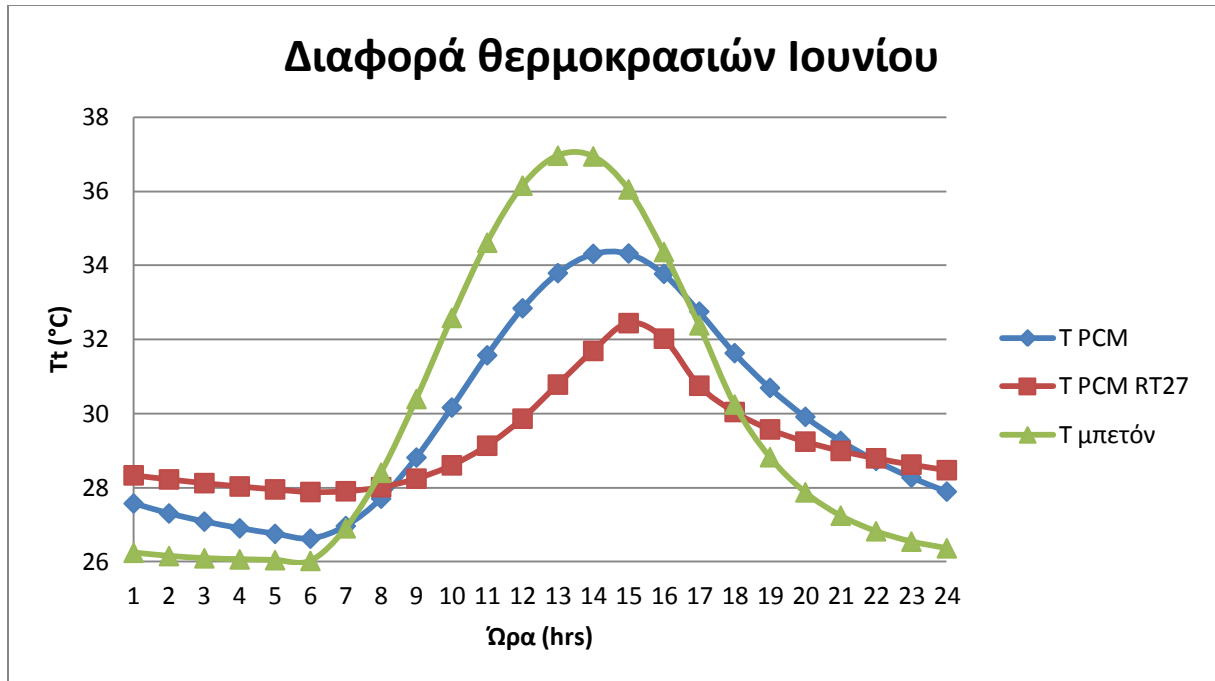
Όπως βλέπουμε από το διάγραμμα του $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας των PCM του Μαΐου που υπολογίσαμε πιο πάνω, η μορφή του είναι πολύ κοντά μ' αυτή του άρθρου (σχήμα 7.10.2 b). Στους 28 °C το $C_{p,eff}$ βρίσκεται κόντα και κάτω από τα 20000 J/Kg/°C και στο διάγραμμα που υπολογίσαμε εμείς και σ' αυτό του βιβλίου. Ενώ όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και κυρίως μετά τους 31 °C το $C_{p,eff}$ τείνει στο 0 χωρίς ποτέ όμως να το ακουμπάει. Συνεπώς, η μορφή του διαγράμματός μας πλησιάζει πολύ αυτή του άρθρου.

7.12 Διαφορά θερμοκρασίας PCM RT27 –μπετόν

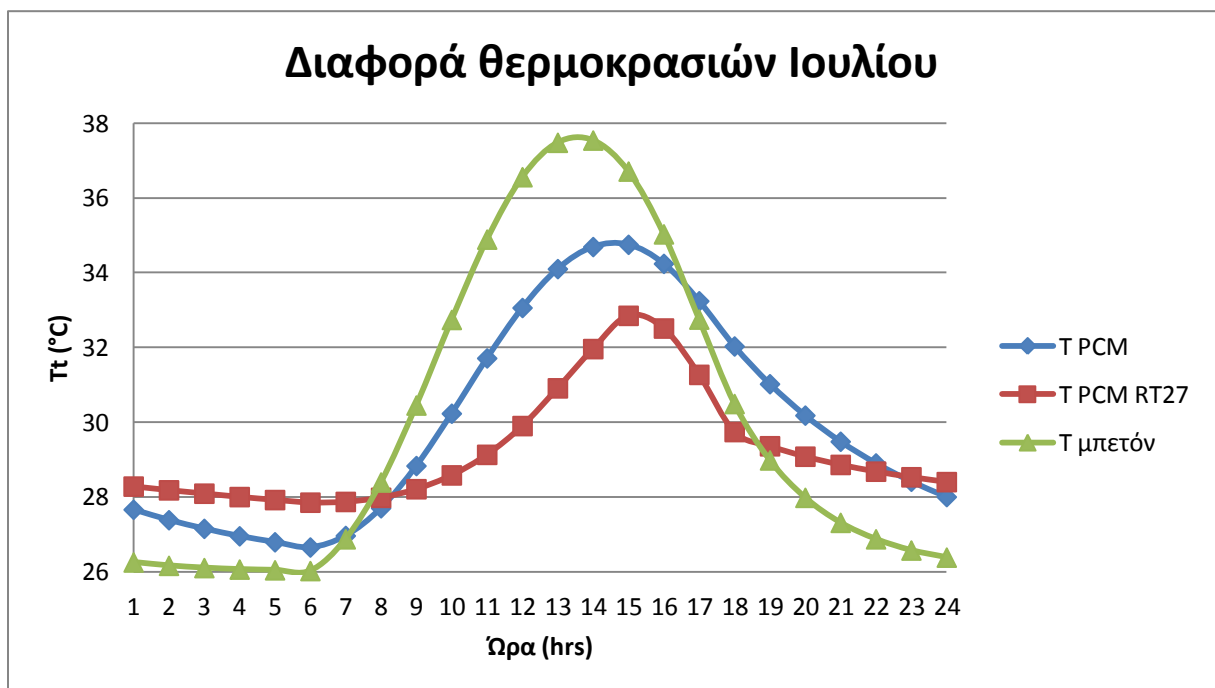
Στο κεφάλαιο αυτό μπορούμε να δούμε την διαφορά θερμοκρασίας του τοίχου όταν περιέχει PCM του 7.3 κεφαλαίου, του PCM RT27 που υπολογίσαμε στο 7.11 κεφάλαιο και όταν έχει απλό μπετόν για όλους τους θερινούς μήνες. Τα παρακάτω διαγράμματα θα μας κάνουν πιο εμφανή αυτή τη διαφορά.



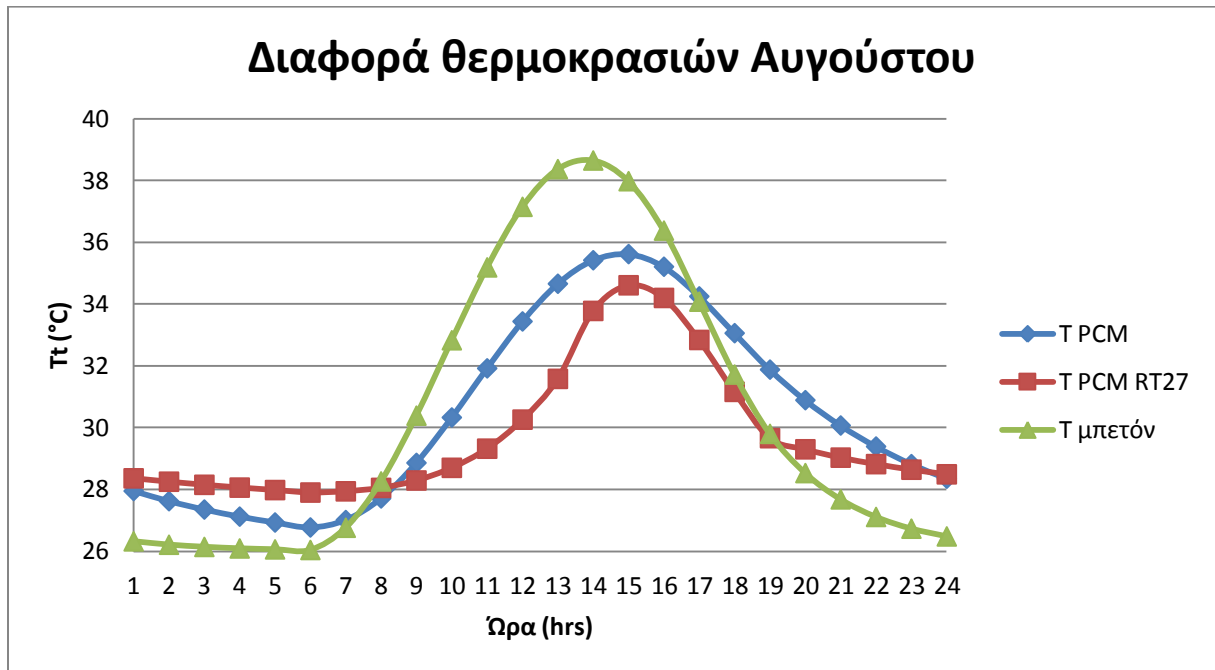
Σχήμα 7.12.1 Διαγράμματα $T_{\mu\beta\epsilon\tau\omicron\nu\omicron}$, T_{PCM} (7.3 κεφαλαίου) και PCM RT27 συναρτήσεως της ώρας για την 21^η Μαΐου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



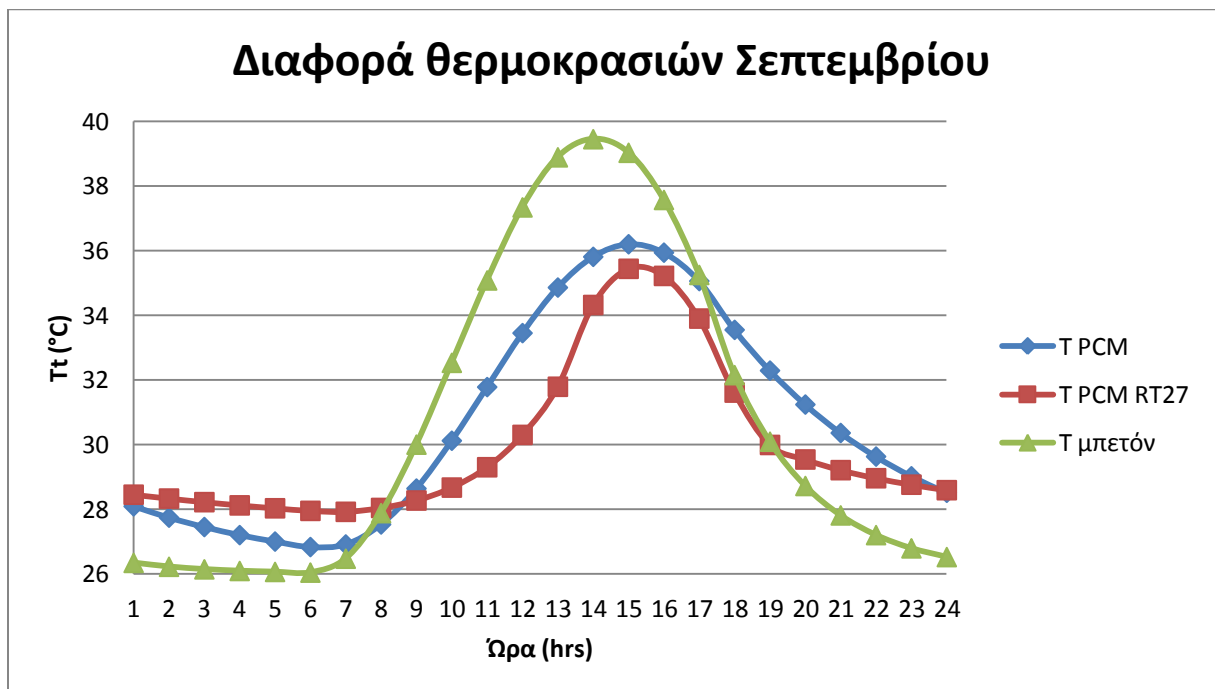
Σχήμα 7.12.2 Διαγράμματα Τμπετόν, Τρσm (7.3 κεφαλαίου) και PCM RT27 συναρτήσσει της ώρας για την 21^η Ιουνίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.12.3 Διαγράμματα Τμπετόν, Τρσm (7.3 κεφαλαίου) και PCM RT27 συναρτήσσει της ώρας για την 21^η Ιουλίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.12.4 Διαγράμματα Τμπετόν, Τρσm (7.3 κεφαλαίου) και PCM RT27 συναρτήσσει της ώρας για την 21^η Αυγούστου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.12.5 Διαγράμματα Τμπετόν, Τρσm (7.3 κεφαλαίου) και PCM RT27 συναρτήσσει της ώρας για την 21^η Σεπτεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.

Συμπέρασμα:

Βλέπουμε ότι σε όλους τους μήνες οι θερμοκρασίες του PCM RT27 είναι πιο χαμηλές απ' αυτές που υπολογίσαμε για το PCM στο κεφάλαιο 7.3 και προφανώς και από το μπετόν. Η διαφορά αυτή είναι λογική καθώς αυτή τη φορά επιλέξαμε ένα άλλο PCM (RT27) το οποίο έχει διαφορετικές θερμοκρασίες υγροποίησης και στερεοποίησης υψηλότερες (20 και 26 για το πρώτο PCM, 22 και 31 για το PCM RT27). Οι θερμοκρασίες τις βραδινές ώρες είναι πιο υψηλές όμως σε σχέση με το πρώτο PCM οι οποίες τριγυρίζουν τους 28 °C. Ένω οι θερμοκρασίες του πρώτου PCM τις βραδινές ώρες τείνουν στους 26 °C χωρίς ποτέ να πέφτουν κάτω από αυτούς. Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας των δύο PCM πλησιάζει τους 2 βαθμούς είτε μιλώντας για τις νυχτερινές ώρες είτε για τις πρωινές.

7.13 Υπολογισμός θερμοκρασίας PCM RT27 (48ωρο)

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τη θερμοκρασία που αποκτά το PCM RT27 κατά τη διάρκεια ενός 48ώρου τους θερινούς μήνες. Υποθέτουμε ότι το πρώτο 24ωρο κάθε μήνα που εξετάζουμε επικρατεί στην Αθήνα συννεφιά και συνεπώς η ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ μικρή. Για να μας βγει πιο εύκολα ο ισολογισμός των θερμοκρασιών παίρνουμε οριακά την ηλιακή ακτινοβολία ίση με μηδέν για το πρώτο 24ωρο. Στο δεύτερο 24ωρο όμως, έχουμε ηλιοφάνεια και επικρατούν ίδιες συνθήκες με αυτές του κεφαλαίου 7.1. Θα μελετήσουμε πώς αυτή η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στο 48ωρο επηρεάζει την τελική θερμοκρασία του PCM RT27 στο τέλος κάθε ώρας για κάθε θερινό μήνα.

Σε αυτήν την εφαρμογή η αίθουσα, το παράθυρο και ο τοίχος παραμένουν ίδια.

Η προσομοίωση και σ αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση της ενεργός θερμοχωρητικότητας σύμφωνα με τις εξισώσεις που έχουμε συναντήσει στο κεφάλαιο 7.2. Χρησιμοποιώντας πάλι τον τύπο:

$$T_T = T_A + \frac{Gt A \pi 3600 + U A \tau 3600 (T\delta - T_A)}{Cp m} \quad (7.5.1)$$

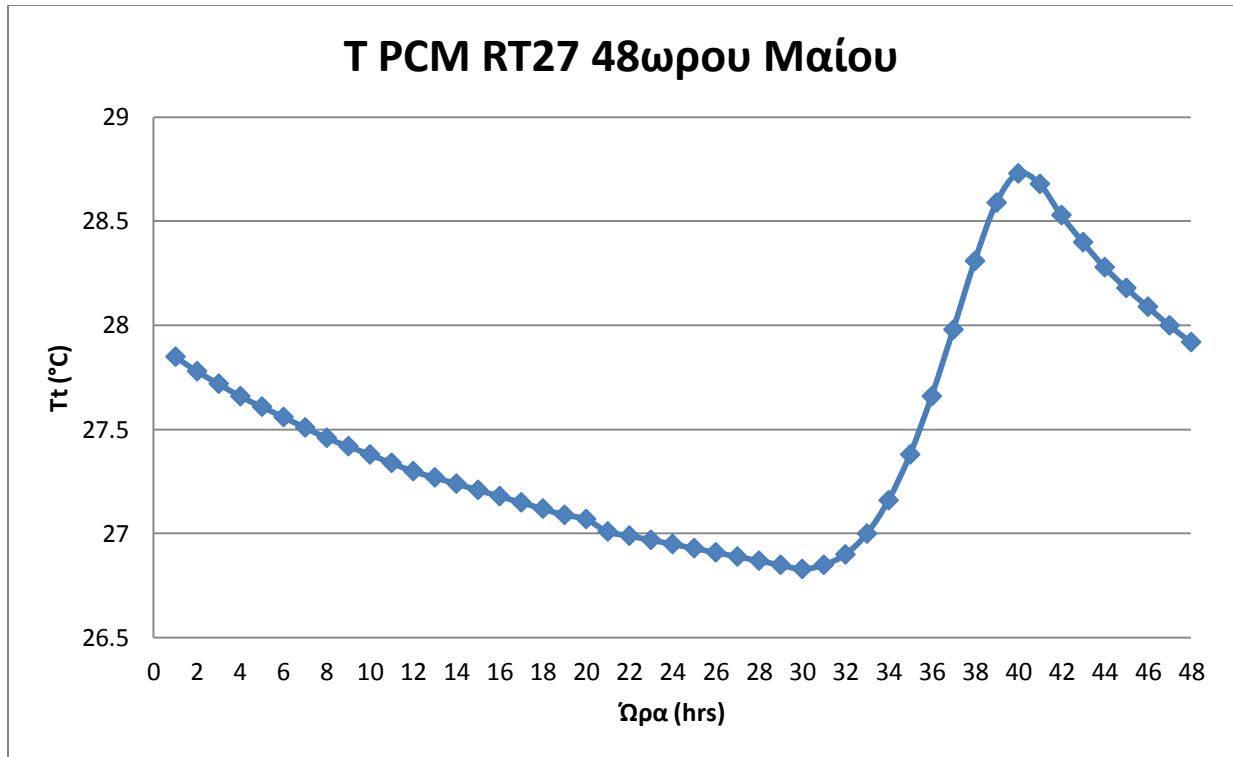
Και υπολογίζοντας την αρχική θερμοκρασία T_A όπως σε προηγούμενα κεφάλαια και υποθέτοντάς την αρχικά $T_A=24^\circ\text{C}$, έχουμε για κάθε μήνα:

➤ Για τον Μάιο:

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	27,85
2	0	27,78
3	0	27,72
4	0	27,66
5	0	27,61
6	0	27,56
7	0	27,51
8	0	27,46
9	0	27,42
10	0	27,38
11	0	27,34
12	0	27,30
13	0	27,27
14	0	27,24
15	0	27,21
16	0	27,18
17	0	27,15
18	0	27,12
19	0	27,09
20	0	27,07
21	0	27,01
22	0	26,99
23	0	26,97
24	0	26,95
25	0	26,93
26	0	26,91
27	0	26,89
28	0	26,87

29	0	26,85
30	0	26,83
31	0,076473	26,85
32	0,158606	26,90
33	0,247887	27,00
34	0,326386	27,16
35	0,379743	27,38
36	0,401797	27,66
37	0,386401	27,98
38	0,338614	28,31
39	0,260975	28,59
40	0,162475	28,73
41	0,059674	28,68
42	0	28,53
43	0	28,40
44	0	28,28
45	0	28,18
46	0	28,09
47	0	28,00
48	0	27,92

Σχήμα 7.13.1 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM RT27 κατά το 48ωρο του Μαΐου για νότιο προσανατολισμό.



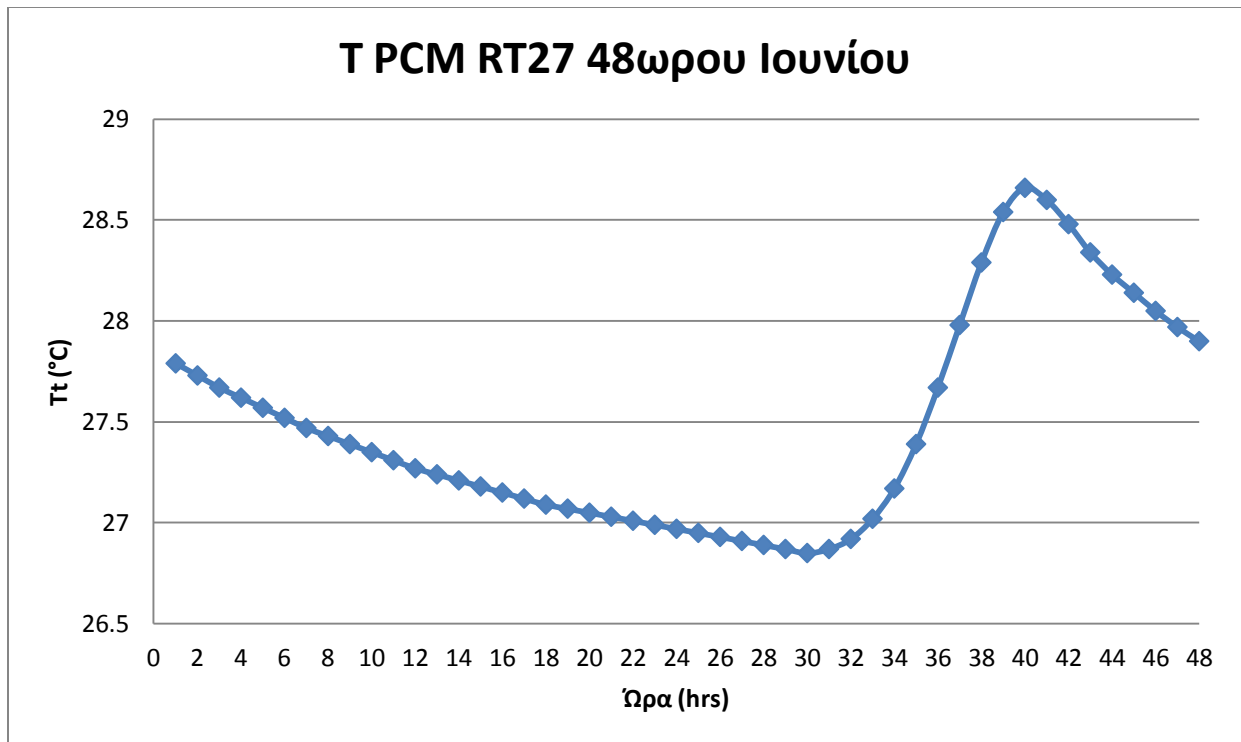
Σχήμα 7.13.2 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM RT27 – ώρας κατά το 48ωρο του Μαΐου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για τον Ιούνιο:

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	27,79
2	0	27,73
3	0	27,67
4	0	27,62
5	0	27,57
6	0	27,52
7	0	27,47
8	0	27,43
9	0	27,39
10	0	27,35
11	0	27,31
12	0	27,27
13	0	27,24
14	0	27,21
15	0	27,18
16	0	27,15
17	0	27,12
18	0	27,09
19	0	27,07
20	0	27,05
21	0	27,03
22	0	27,01
23	0	26,99
24	0	26,97
25	0	26,95
26	0	26,93
27	0	26,91
28	0	26,89

29	0	26,87
30	0	26,85
31	0,080299	26,87
32	0,162635	26,92
33	0,251822	27,02
34	0,329689	27,17
35	0,381024	27,39
36	0,398017	27,67
37	0,378546	27,98
38	0,328165	28,29
39	0,249801	28,54
40	0,150684	28,66
41	0,049063	28,60
42	0	28,48
43	0	28,34
44	0	28,23
45	0	28,14
46	0	28,05
47	0	27,97
48	0	27,90

Σχήμα 7.13.3 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM RT27 κατά το 48ωρο του Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό.



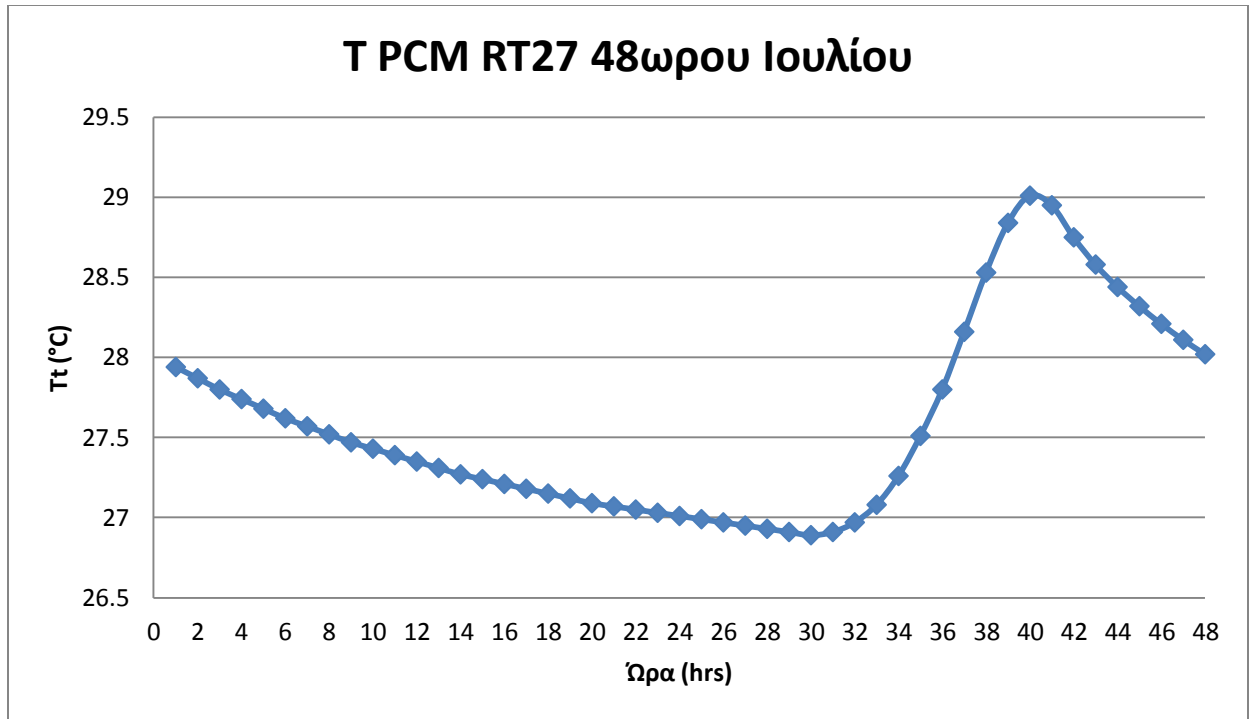
Σχήμα 7.13.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM RT27 – ώρας κατά το 48ωρο του Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για τον Ιούλιο:

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	27,94
2	0	27,87
3	0	27,80
4	0	27,74
5	0	27,68
6	0	27,62
7	0	27,57
8	0	27,52
9	0	27,47
10	0	27,43
11	0	27,39
12	0	27,35
13	0	27,31
14	0	27,27
15	0	27,24
16	0	27,21
17	0	27,18
18	0	27,15
19	0	27,12
20	0	27,09
21	0	27,07
22	0	27,05
23	0	27,03
24	0	27,01
25	0	26,99
26	0	26,97
27	0	26,95
28	0	26,93

29	0	26,91
30	0	26,89
31	0,077277	26,91
32	0,16312	26,97
33	0,257285	27,08
34	0,340239	27,26
35	0,396315	27,51
36	0,41773	27,80
37	0,401056	28,16
38	0,351155	28,53
39	0,272563	28,84
40	0,17161	29,01
41	0,067114	28,95
42	0	28,75
43	0	28,58
44	0	28,44
45	0	28,32
46	0	28,21
47	0	28,11
48	0	28,02

Σχήμα 7.13.5 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM RT27 κατά το 48ωρο του Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό.



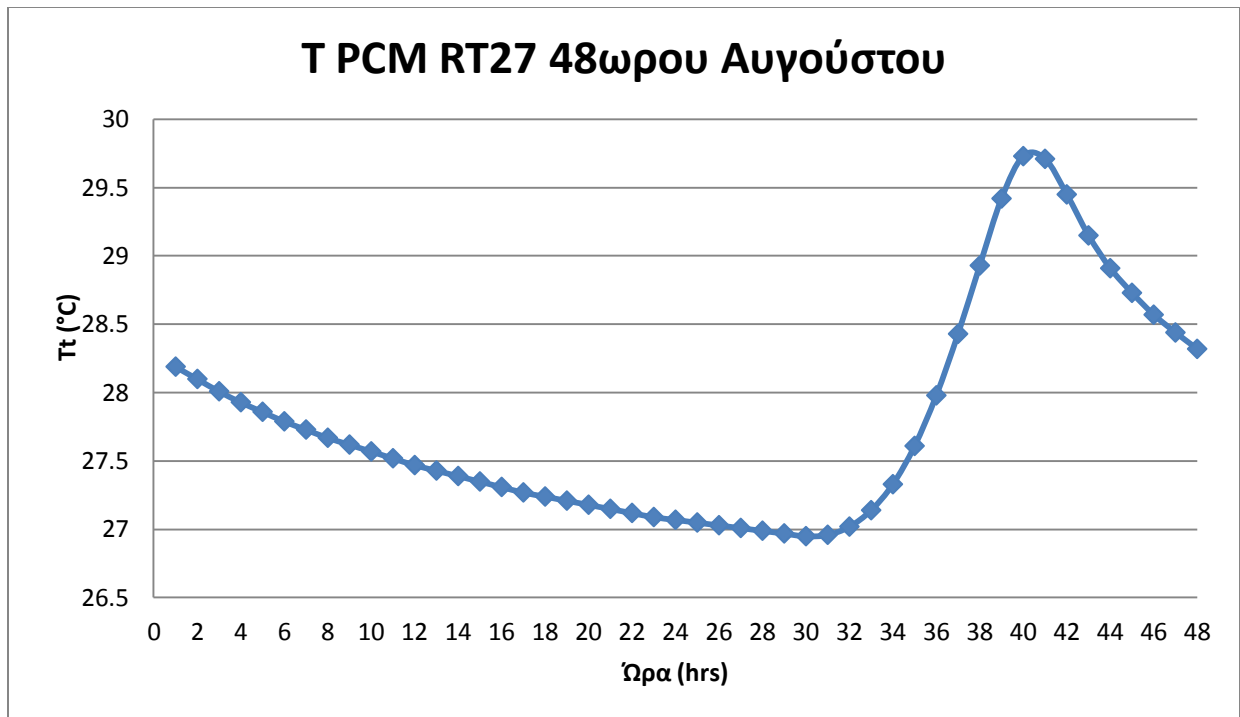
Σχήμα 7.13.6 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM RT27 – ώρας κατά το 48ωρο του Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για τον Αύγουστο:

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	28,19
2	0	28,10
3	0	28,01
4	0	27,93
5	0	27,86
6	0	27,79
7	0	27,73
8	0	27,67
9	0	27,62
10	0	27,57
11	0	27,52
12	0	27,47
13	0	27,43
14	0	27,39
15	0	27,35
16	0	27,31
17	0	27,27
18	0	27,24
19	0	27,21
20	0	27,18
21	0	27,15
22	0	27,12
23	0	27,09
24	0	27,07
25	0	27,05
26	0	27,03
27	0	27,01
28	0	26,99

29	0	26,97
30	0	26,95
31	0,066465	26,96
32	0,158305	27,02
33	0,260143	27,14
34	0,352122	27,33
35	0,418377	27,61
36	0,452968	27,98
37	0,44518	28,43
38	0,397724	28,93
39	0,320498	29,42
40	0,216425	29,73
41	0,10575	29,71
42	0,030856	29,45
43	0	29,15
44	0	28,91
45	0	28,73
46	0	28,57
47	0	28,44
48	0	28,32

Σχήμα 7.13.7 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM RT27 κατά το 48ωρο του Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό.



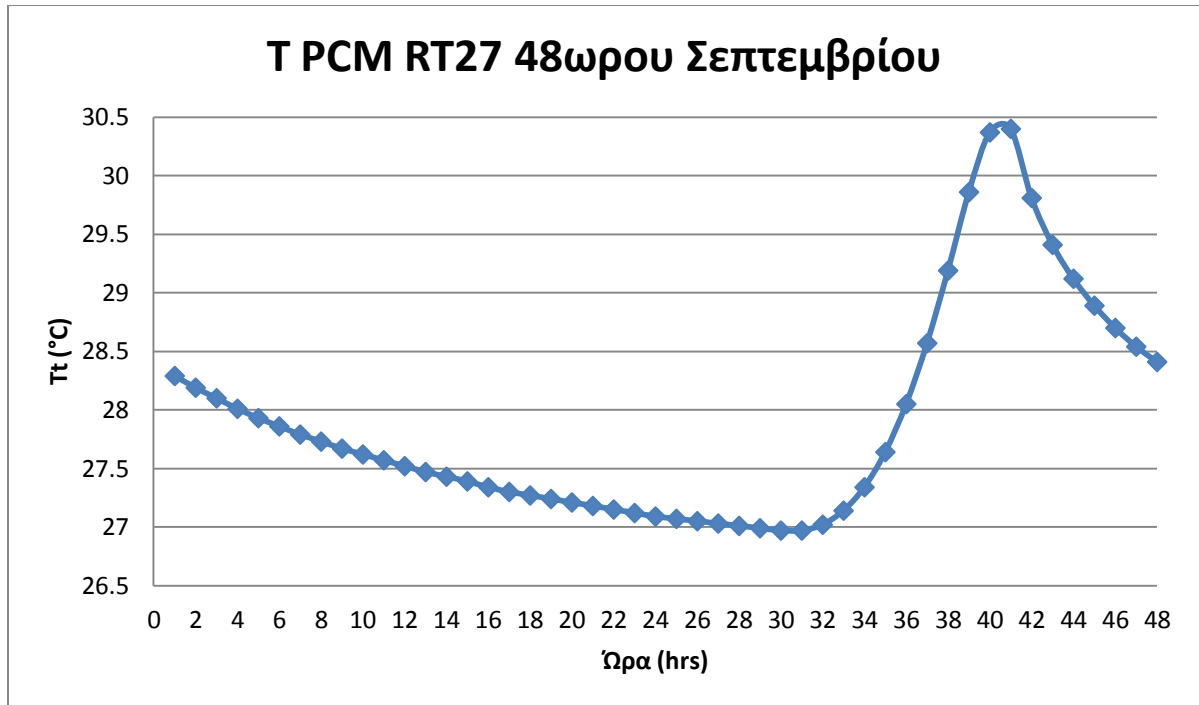
Σχήμα 7.13.8 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM RT27 – ώρας κατά το 48ωρο του Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για τον Σεπτέμβριο:

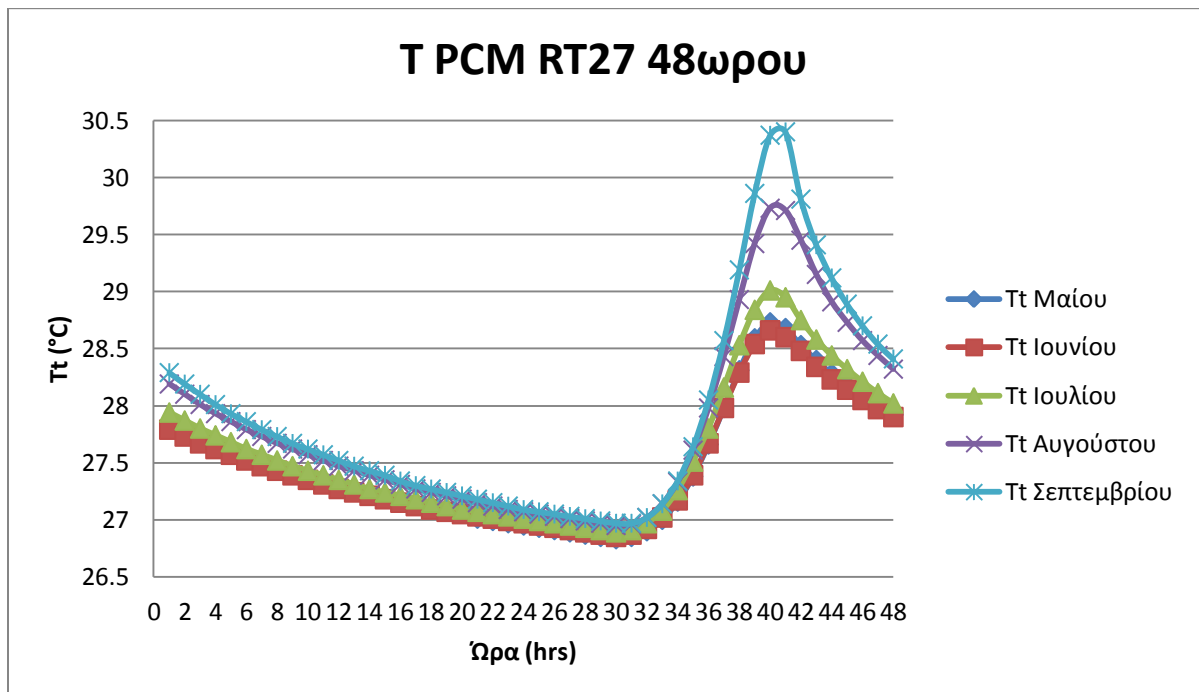
Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία °C)
1	0	28,29
2	0	28,19
3	0	28,10
4	0	28,01
5	0	27,93
6	0	27,86
7	0	27,79
8	0	27,73
9	0	27,67
10	0	27,62
11	0	27,57
12	0	27,52
13	0	27,47
14	0	27,43
15	0	27,39
16	0	27,34
17	0	27,30
18	0	27,27
19	0	27,24
20	0	27,21
21	0	27,18
22	0	27,15
23	0	27,12
24	0	27,09
25	0	27,07
26	0	27,05
27	0	27,03
28	0	27,01

29	0	26,99
30	0	26,97
31	0,040322	26,97
32	0,14111	27,02
33	0,247334	27,14
34	0,348416	27,34
35	0,425997	27,64
36	0,477016	28,05
37	0,480858	28,57
38	0,438651	29,19
39	0,366994	29,86
40	0,261053	30,37
41	0,139856	30,40
42	0	29,81
43	0	29,41
44	0	29,12
45	0	28,89
46	0	28,70
47	0	28,54
48	0	28,41

Σχήμα 7.13.9 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM RT27 κατά το 48ωρο του Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό.



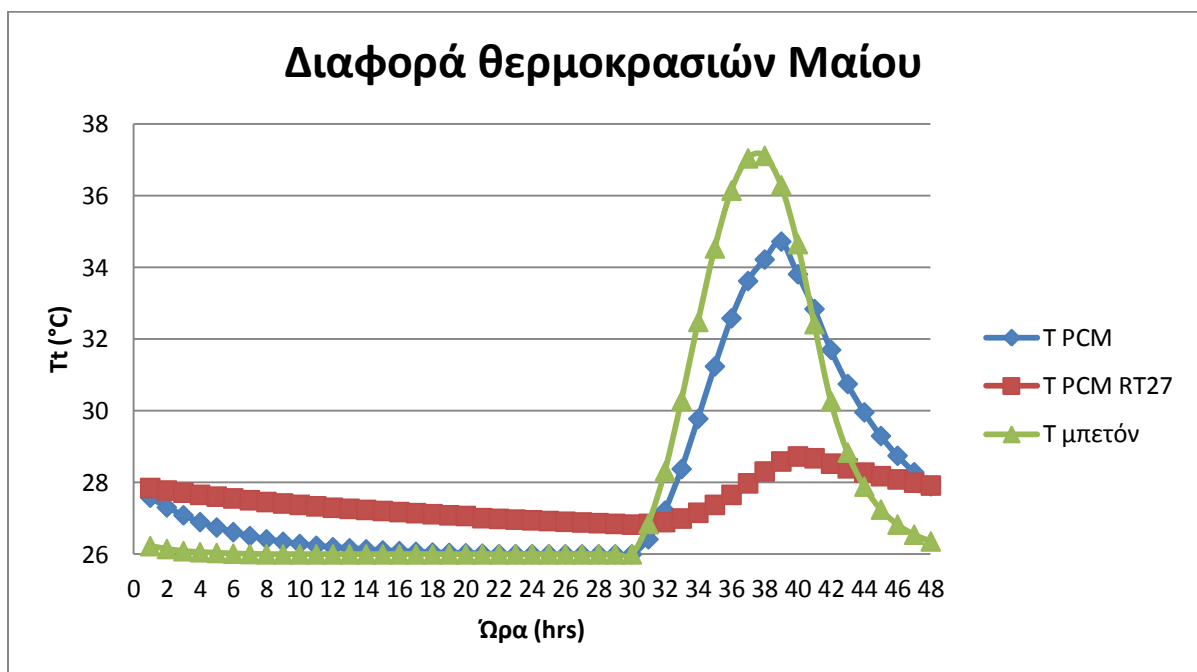
Σχήμα 7.13.10 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM RT27 – ώρας κατά το 48ωρο του Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό



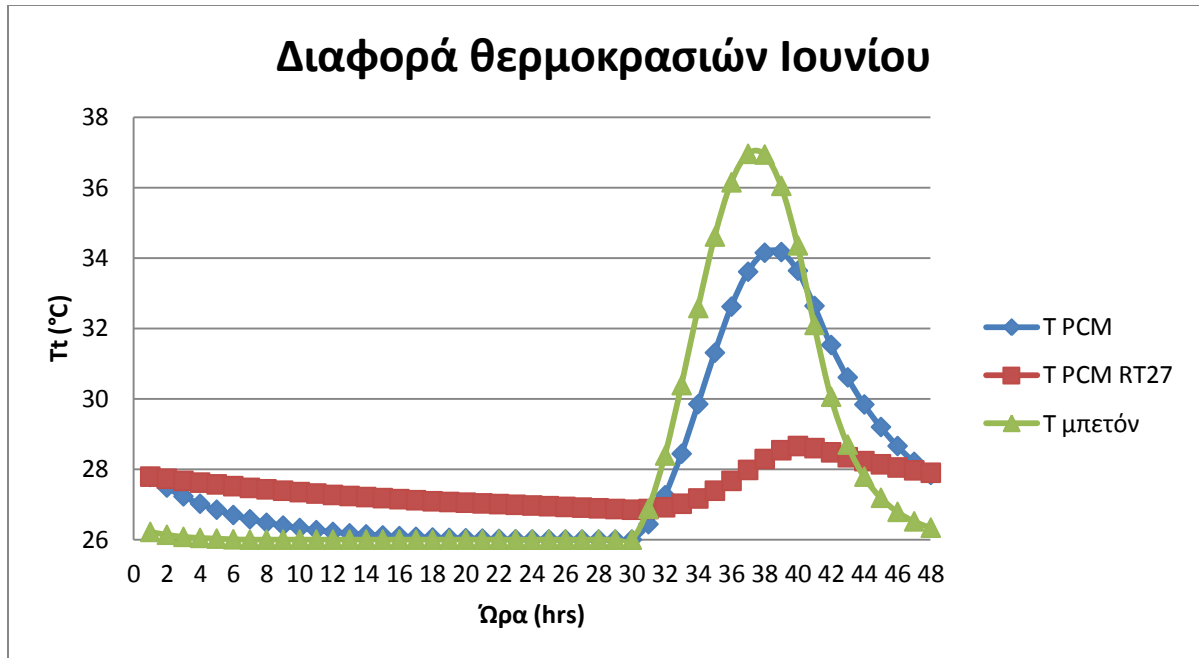
Σχήμα 7.13.11 Διαγράμματα Tt PCM RT27 για ένα 48ώρο συναρτήσεως της ώρας για όλους τους θερινούς μήνες του έτους σε τοίχο νότιο προσανατολισμού.

7.14 Διαφορά θερμοκρασίας PCM RT27 –μπετόν (48ωρο)

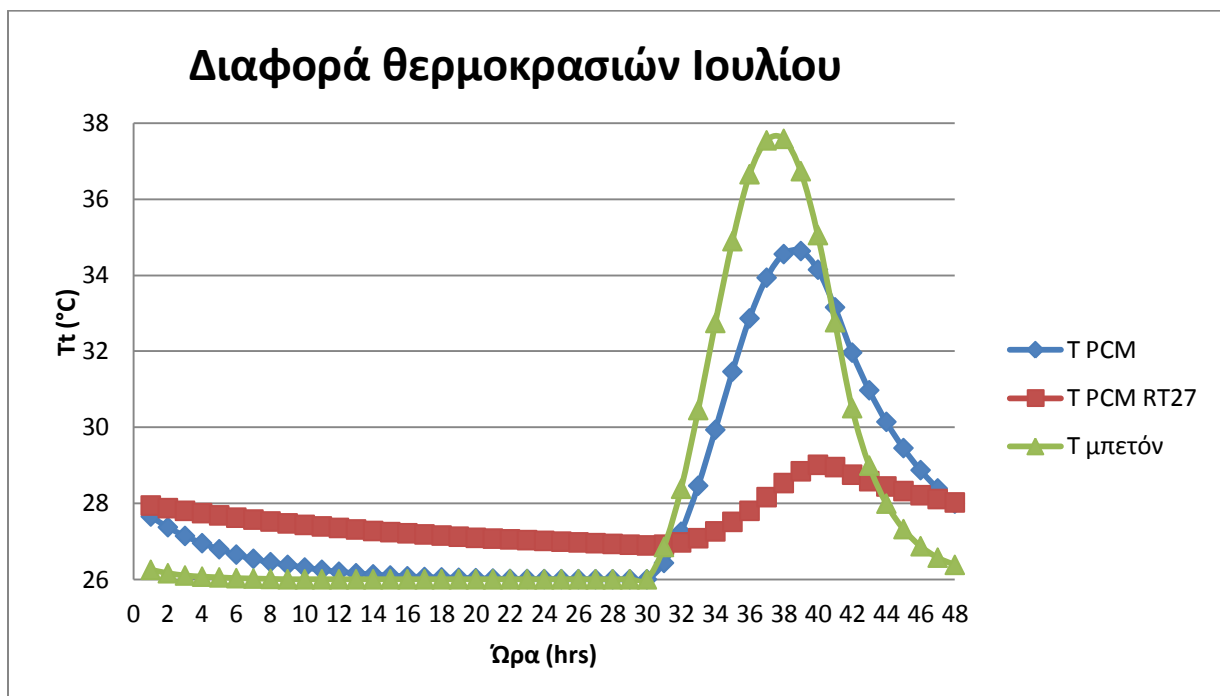
Στο κεφάλαιο αυτό μπορούμε να δούμε την διαφορά θερμοκρασίας ενός 48ωρου του τοίχου όταν περιέχει PCM του 7.3 κεφαλαίου, του PCM RT27 που υπολογίσαμε στο 7.11 κεφάλαιο και όταν έχει απλό μπετόν για όλους τους θερινούς μήνες. Τα παρακάτω διαγράμματα θα μας κάνουν πιο εμφανή αυτή τη διαφορά.



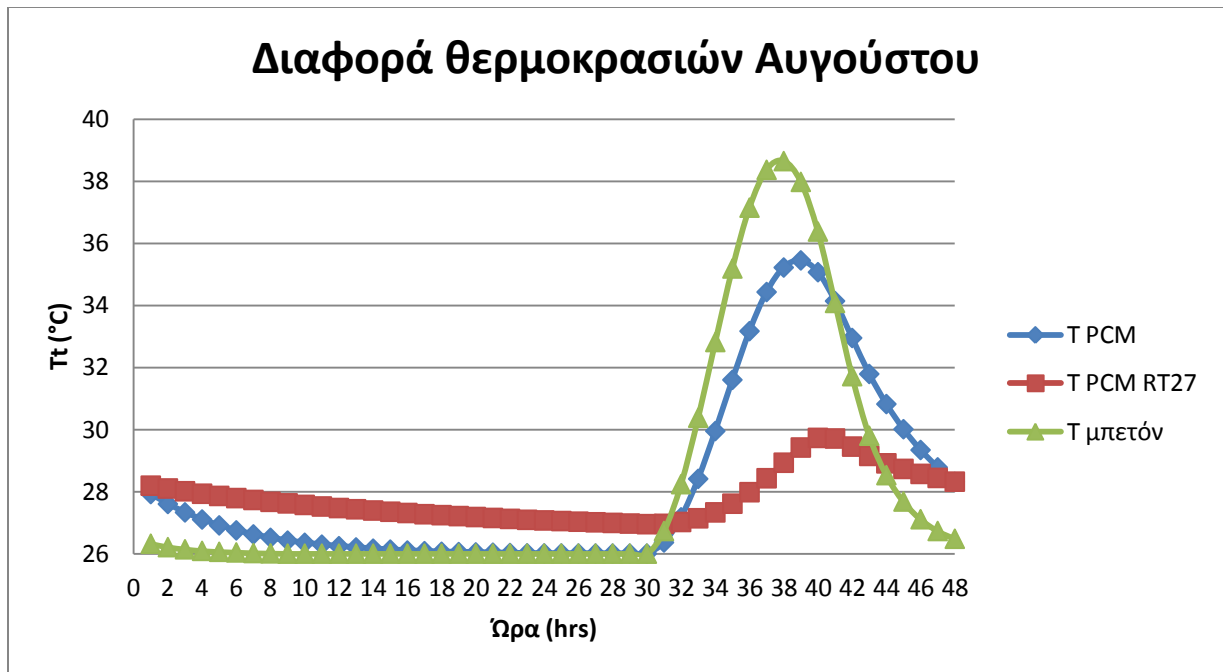
Σχήμα 7.14.1 Διαγράμματα Tμπετόν, Tpcm (7.3 κεφαλαίου) και PCM RT27 48ωρου συναρτήσεως της ώρας για την 21^η Μαΐου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



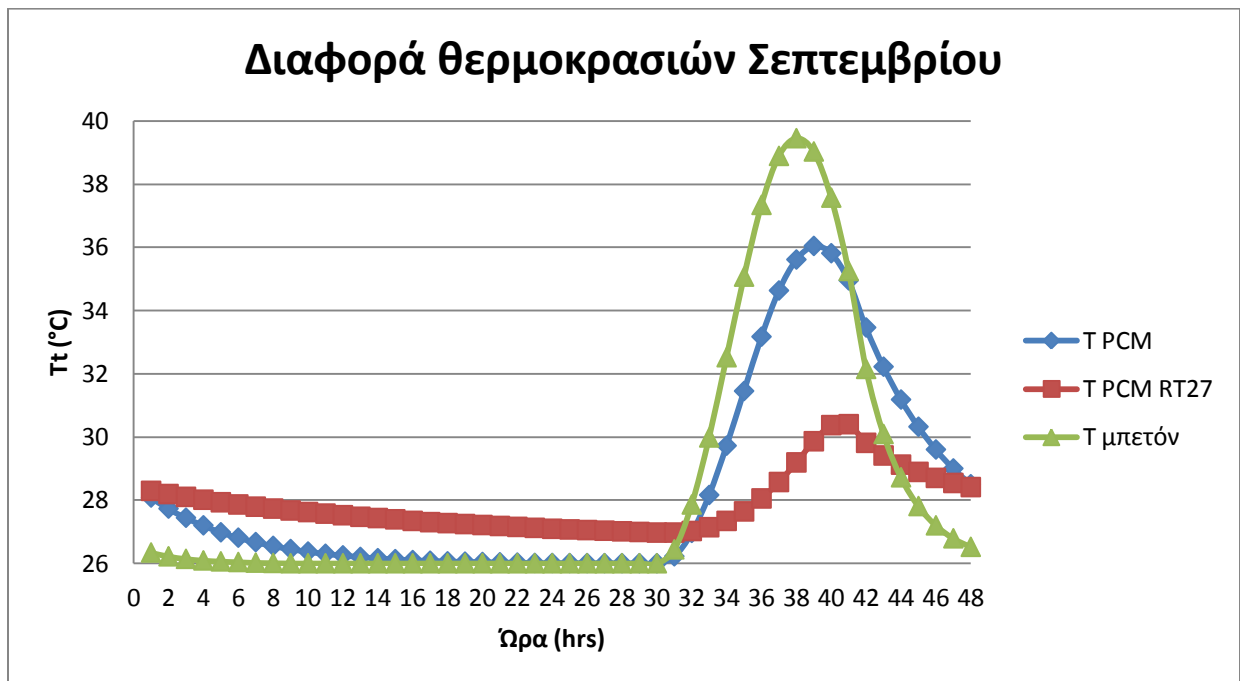
Σχήμα 7.14.2 Διαγράμματα Τμπετόν, Τrcm (7.3 κεφαλαίου) και PCM RT27 48ωρου συναρτήσε της ώρας για την 21^η Ιουνίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.14.3 Διαγράμματα Τμπετόν, Τrcm (7.3 κεφαλαίου) και PCM RT27 48ωρου συναρτήσε της ώρας για την 21^η Ιουλίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.14.4 Διαγράμματα Τμπετόν, Τpcm (7.3 κεφαλαίου) και PCM RT27 48ωρου συναρτήσε της ώρας για την 21^η Αυγούστου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.14.5 Διαγράμματα Τμπετόν, Τpcm (7.3 κεφαλαίου) και PCM RT27 48ωρου συναρτήσε της ώρας για την 21^η Σεπτεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.

Συμπέρασμα:

Το ίδιο συμπέρασμα με το 24ωρο προκύπτει και για το 48ωρο. Οι θερμοκρασίες του PCM RT27 τις ώρες που επικρατεί ηλιοφάνεια είναι χαμηλότερες από το πρώτο PCM με τη μέγιστη διαφορά τους να φτάνει τους 5 βαθμούς περίπου. Ενώ η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά τους εντοπίζεται το δεύτερο 24ωρο λίγο πριν ξημερώσει και με τη διαφορά αυτή να αγγίζει τον 1 βαθμό.

7.15 Υπολογισμός θερμοροής PCM RT27

Στο κεφάλαιο αυτό θα υπολογίσουμε την θερμοροή του PCM RT27 που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας ώρας τους θερινούς μήνες. Για τον υπολογισμό της θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω ισολογισμό.

$$A_T U \left(\frac{T_i + T_{i+1}}{2} - 26 \right) 3600 = Q_{i,i+1} \quad (7.15.1)$$

➤ Για τον Μάιο:

Ωρα (hrs)	T _i (°C)	T _{i+1} (°C)	Q _{i,i+1} (MJ)
1-2	28,17	28,08	1.725840
2-3	28,08	28,00	1.6568064
3-4	28,00	27,92	1.5918336
4-5	27,92	27,85	1.5309216
5-6	27,85	27,78	1.4740704
6-7	27,78	27,80	1.4537664
7-8	27,80	27,91	1.5065568
8-9	27,91	28,12	1.6365024
9-10	28,12	28,46	1.8598464
10-11	28,46	28,95	2.1968928
11-12	28,95	29,62	2.6679456
12-13	29,62	30,49	3.29331
13-14	30,49	31,41	4.020192
14-15	31,41	32,35	4.775502
15-16	32,35	32,07	5.043513
16-17	32,07	30,89	4.450638
17-18	30,89	30,13	3.662841
18-19	30,13	29,63	3.151182
19-20	29,63	29,28	2.8060128

20-21	29,28	29,02	2.558304
21-22	29,02	28,81	2.3674464
22-23	28,81	28,64	2.213136
23-24	28,64	28,49	2.0831904
24-1	28,49	28,17	1.8923328

Σχήμα 7,15,1 Πίνακας θερμοροών του PCM RT27 κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Μαΐου,

➤ Για τον Ιουνίο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	28,33	28,22	1.847664
2-3	28,22	28,12	1.762387
3-4	28,12	28,03	1.695232
4-5	28,03	27,95	1.616198
5-6	27,95	27,88	1.555286
6-7	27,88	27,90	1.534982
7-8	27,90	28,01	1.587773
8-9	28,01	28,24	1.72584
9-10	28,24	28,60	1.965427
10-11	28,60	29,13	2.326838
11-12	29,13	29,86	2.838499
12-13	29,86	30,78	3.508531
13-14	30,78	31,69	4.251658
14-15	31,69	32,44	4.92575
15-16	32,44	32,02	5.059757
16-17	32,02	30,75	4.373482
17-18	30,75	30,04	3.569443

18-19	30,04	29,57	3.090269
19-20	29,57	29,24	2.765405
20-21	29,24	28,99	2.529878
21-22	28,99	28,79	2.347142
22-23	28,79	28,62	2.196893
23-24	28,62	28,47	2.066947
24-1	28,47	28,33	1.949184

Σχήμα 7,15,2 Πίνακας θερμοροών του PCM RT27 κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Ιουνίου,

➤ Για τον Ιουλίο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	28,28	28,18	1.811117
2-3	28,18	28,09	1.733962
3-4	28,09	28,00	1.660867
4-5	28,00	27,92	1.591834
5-6	27,92	27,85	1.530922
6-7	27,85	27,87	1.510618
7-8	27,87	27,98	1.563408
8-9	27,98	28,21	1.701475
9-10	28,21	28,58	1.945123
10-11	28,58	29,13	2.318717
11-12	29,13	29,90	2.854742
12-13	29,90	30,91	3.577565
13-14	30,91	31,96	4.41409
14-15	31,96	32,85	5.201885
15-16	32,85	32,51	5.425229

16-17	32,51	31,27	4.783622
17-18	31,27	29,74	3.658781
18-19	29,74	29,36	2.883168
19-20	29,36	29,08	2.615155
20-21	29,08	28,86	2.412115
21-22	28,86	28,68	2.249683
22-23	28,68	28,53	2.115677
23-24	28,53	28,40	2.001974
24-1	28,40	28,28	1.900454

Σχήμα 7,15,3 Πίνακας θερμοροών του PCM RT 27 κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Ιουλίου,

➤ Για τον Αύγουστο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	28,36	28,25	1.872029
2-3	28,25	28,15	1.786752
3-4	28,15	28,06	1.709597
4-5	28,06	27,98	1.640563
5-6	27,98	27,90	1.57559
6-7	27,90	27,94	1.559347
7-8	27,94	28,05	1.620259
8-9	28,05	28,29	1.762387
9-10	28,29	28,70	2.026339
10-11	28,70	29,32	2.444602
11-12	29,32	30,26	3.078086
12-13	30,26	31,58	3.995827
13-14	31,58	33,78	5.425229

14-15	33,78	34,61	6.655651
15-16	34,61	34,20	6.826205
16-17	34,20	32,84	6.107443
17-18	32,84	31,16	4.87296
18-19	31,16	29,66	3.581626
19-20	29,66	29,30	2.826317
20-21	29,30	29,03	2.570486
21-22	29,03	28,82	2.375568
22-23	28,82	28,64	2.217197
23-24	28,64	28,49	2.08319
24-1	28,49	28,36	1.969488

Σχήμα 7,15,4 Πίνακας θερμοροών του PCM RT27 κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Αυγούστου,

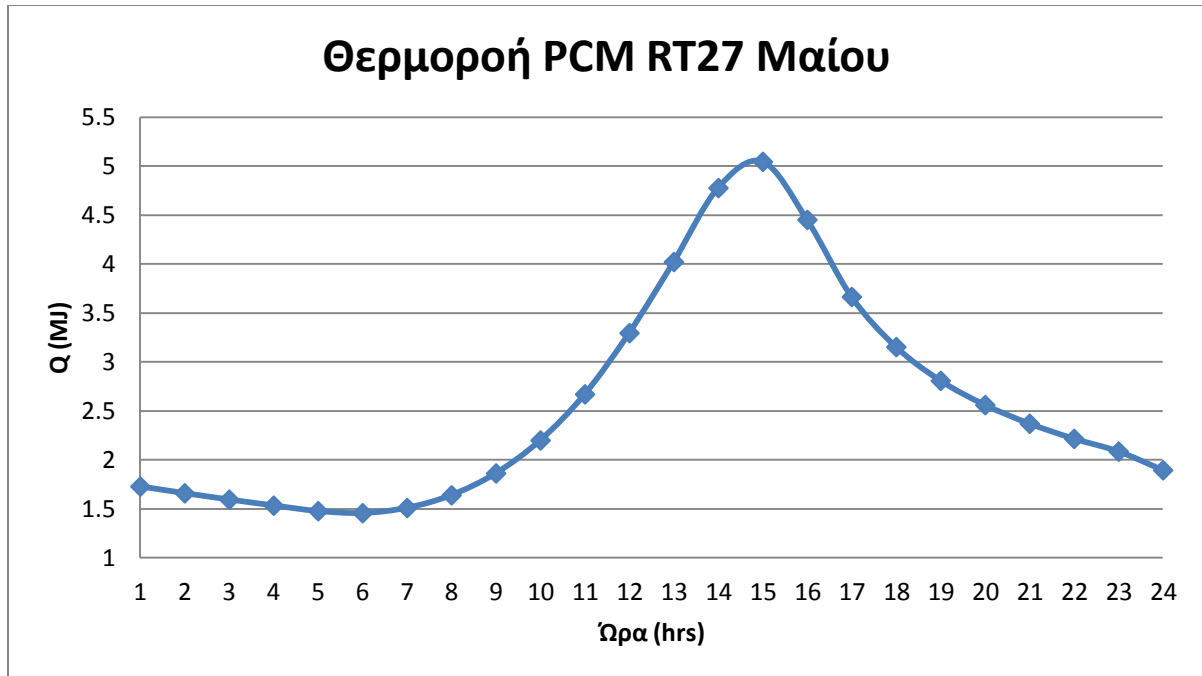
➤ Για τον Σεπτέμβριο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	28,45	28,33	1.941062
2-3	28,33	28,22	1.847664
3-4	28,22	28,12	1.762387
4-5	28,12	28,03	1.685232
5-6	28,03	27,95	1.616198
6-7	27,95	27,92	1.57153
7-8	27,92	28,04	1.608077
8-9	28,04	28,27	1.750205
9-10	28,27	28,67	2.006035
10-11	28,67	29,30	2.424298
11-12	29,30	30,30	3.086208
12-13	30,30	31,79	4.097347

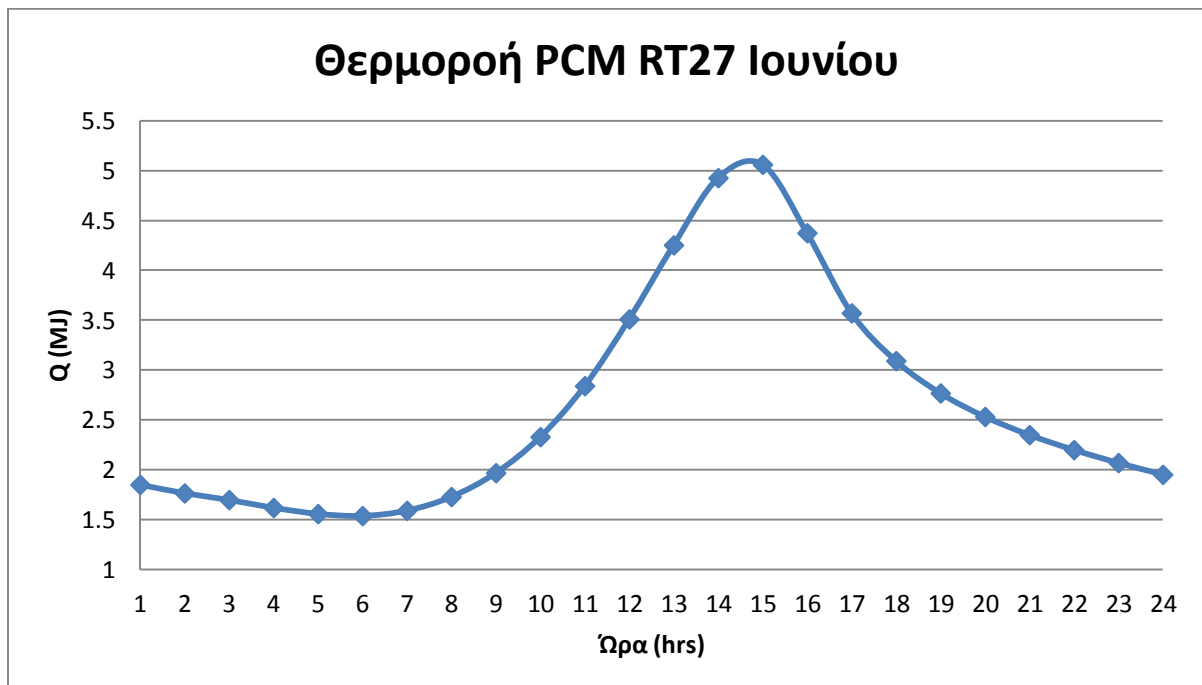
13-14	31,79	34,32	5.729789
14-15	34,32	35,44	7.211981
15-16	35,44	35,22	7.577453
16-17	35,22	33,90	6.95209
17-18	33,90	31,61	5.486141
18-19	31,61	29,99	3.898368
19-20	29,99	29,54	3.057782
20-21	29,54	29,21	2.74104
21-22	29,21	28,96	2.505514
22-23	28,96	28,76	2.322778
23-24	28,76	28,59	2.172528
24-1	28,59	28,45	2.046643

Σχήμα 7,15,5 Πίνακας θερμοροών του PCM RT27 κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Σεπτεμβρίου,

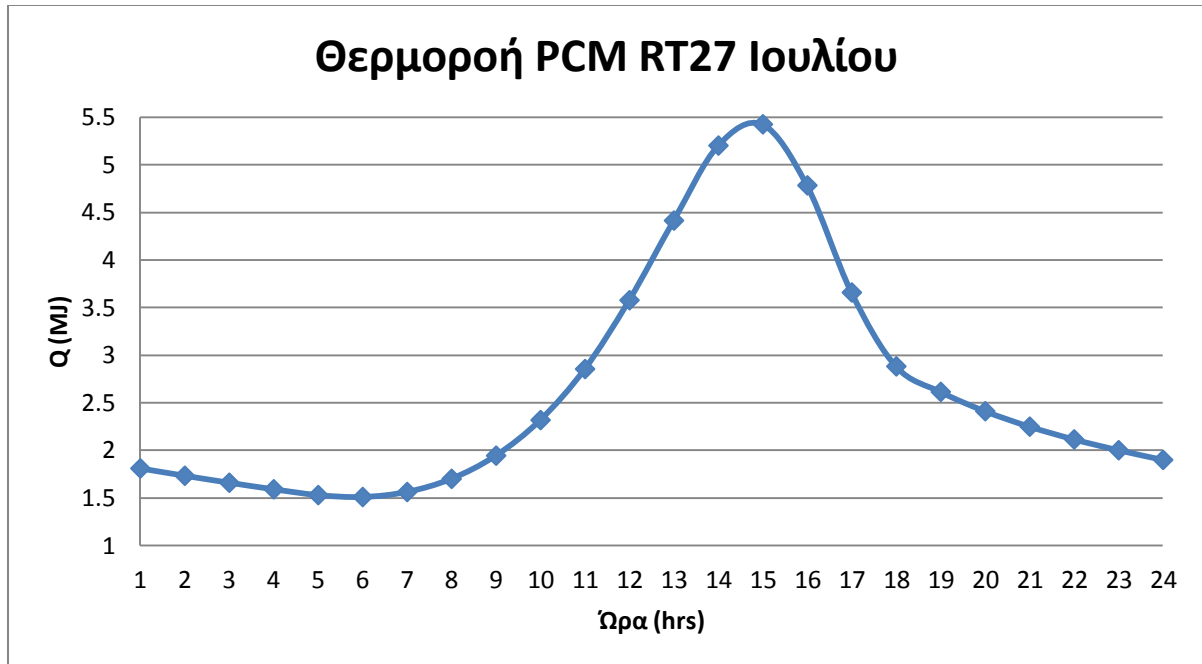
Παρακάτω μπορούμε να δούμε και γραφικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν πιο πάνω.



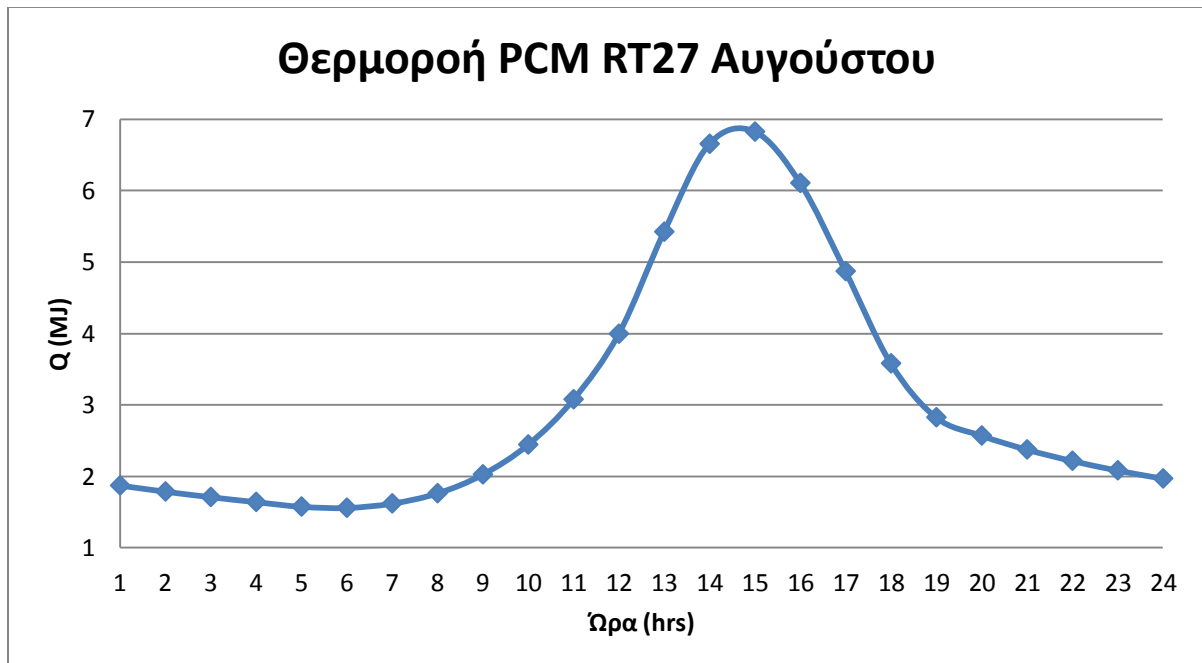
Σχήμα 7.15.6 Διάγραμμα θερμοροής του PCM RT27 συναρτήσεως της ώρας για την 21^η Μαΐου



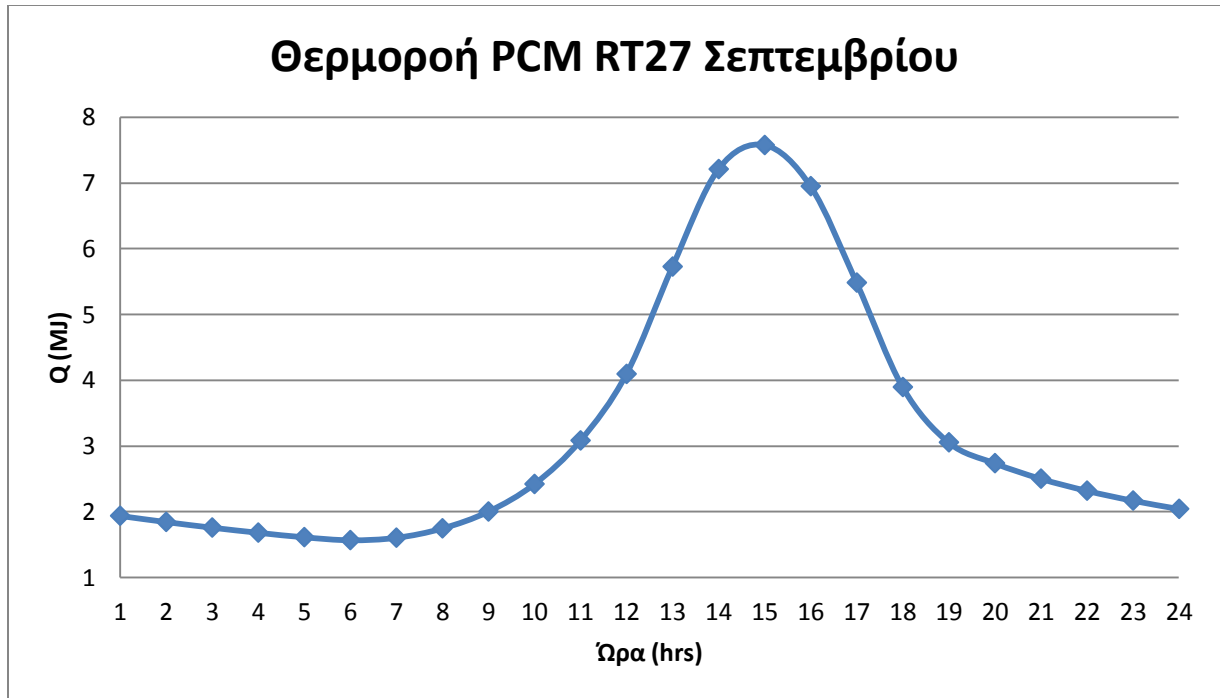
Σχήμα 7.15.7 Διάγραμμα θερμοροής του PCM RT27 συναρτήσεως της ώρας για την 21^η Ιουνίου



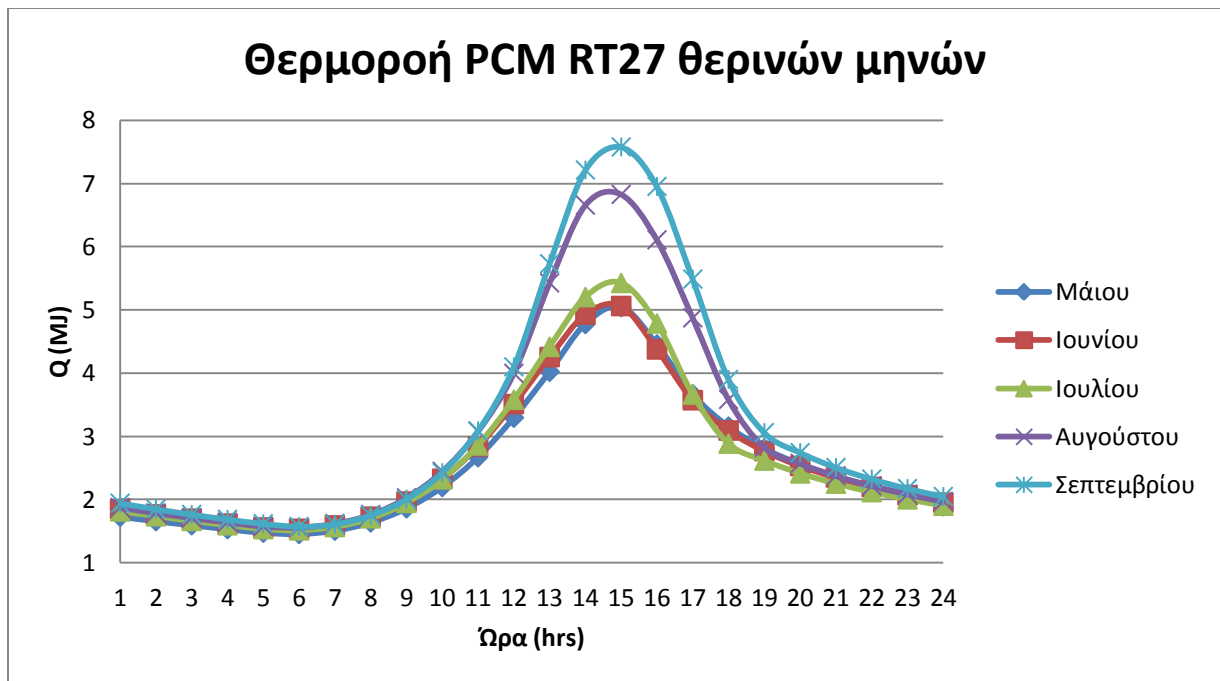
Σχήμα 7.15.8 Διάγραμμα θερμοροής του PCM RT27 συναρτήσεως της ώρας για την 21^η Ιουλίου



Σχήμα 7.15.9 Διάγραμμα θερμοροής του PCM RT27 συναρτήσεως της ώρας για την 21^η Αυγούστου



Σχήμα 7.15.10 Διάγραμμα θερμοροής του PCM RT27 συναρτήσει της ώρας για την 21^η Σεπτεμβρίου

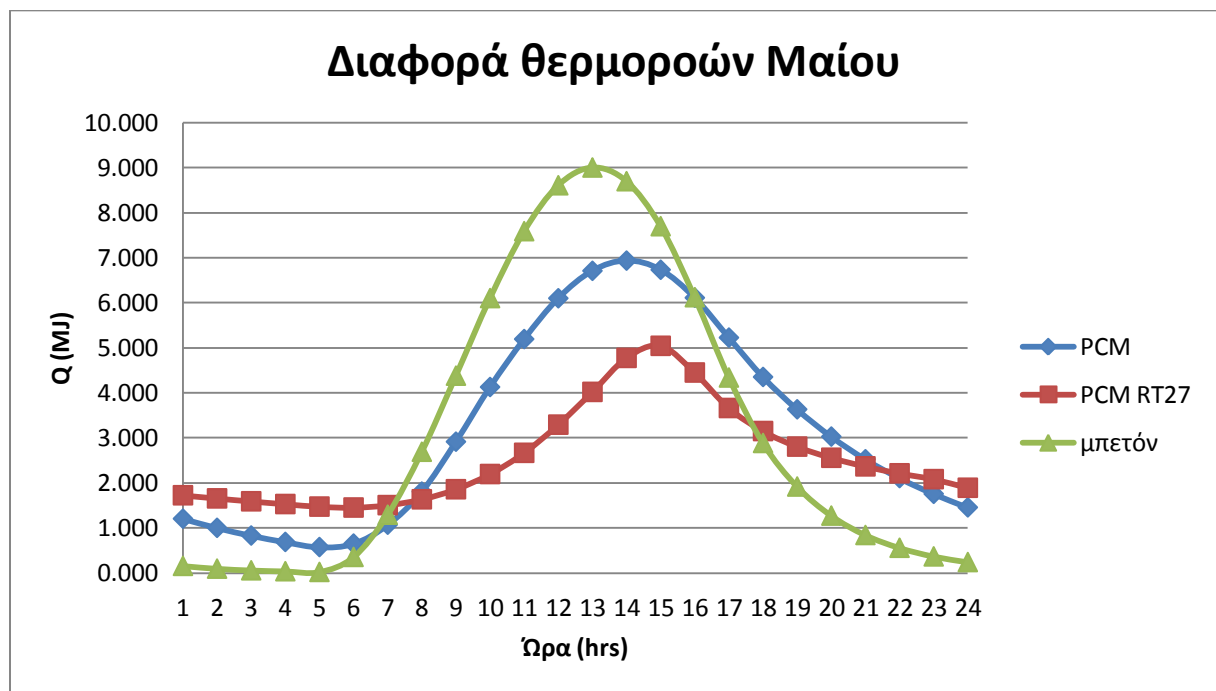


Σχήμα 7.5.11 Διάγραμμα θερμοροών του PCM RT27 συγκεντρωτικά συναρτήσει της ώρας για τους θερινούς μήνες

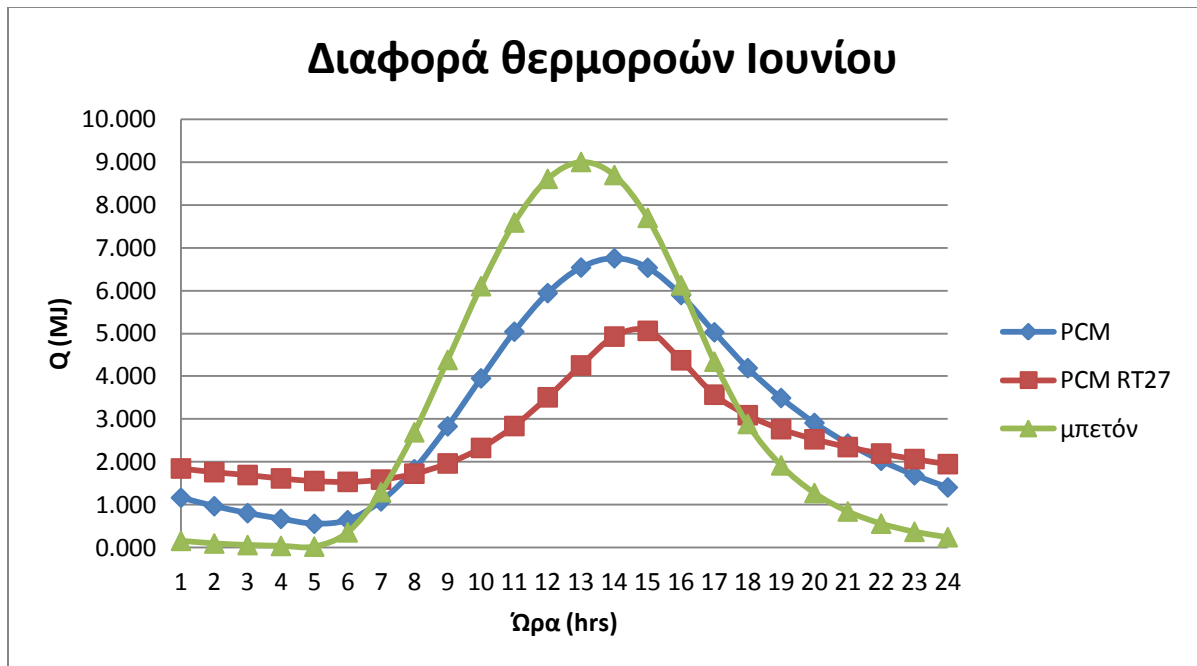
7.16 Διαφορά θερμοροών PCM RT27- μπετόν

Σ αυτό το κεφάλαιο θα αποδείξουμε και αριθμητικά πως οφείει η χρήση των PCM στους τοίχους συγκριτικά με το μπετόν. Στα κεφάλαια 7.7, 7.8, 7.15 υπολογίσαμε τις θερμοροές για τα PCM και το μπετόν αντίστοιχα για τους θερινούς μήνες. Συνεπώς, είναι εύκολο να υπολογίσουμε τη διαφορά των θερμοροών και άρα το όφελος που θα χουμε με την εγκατάσταση των PCM στους τοίχους τους θερινούς μήνες.

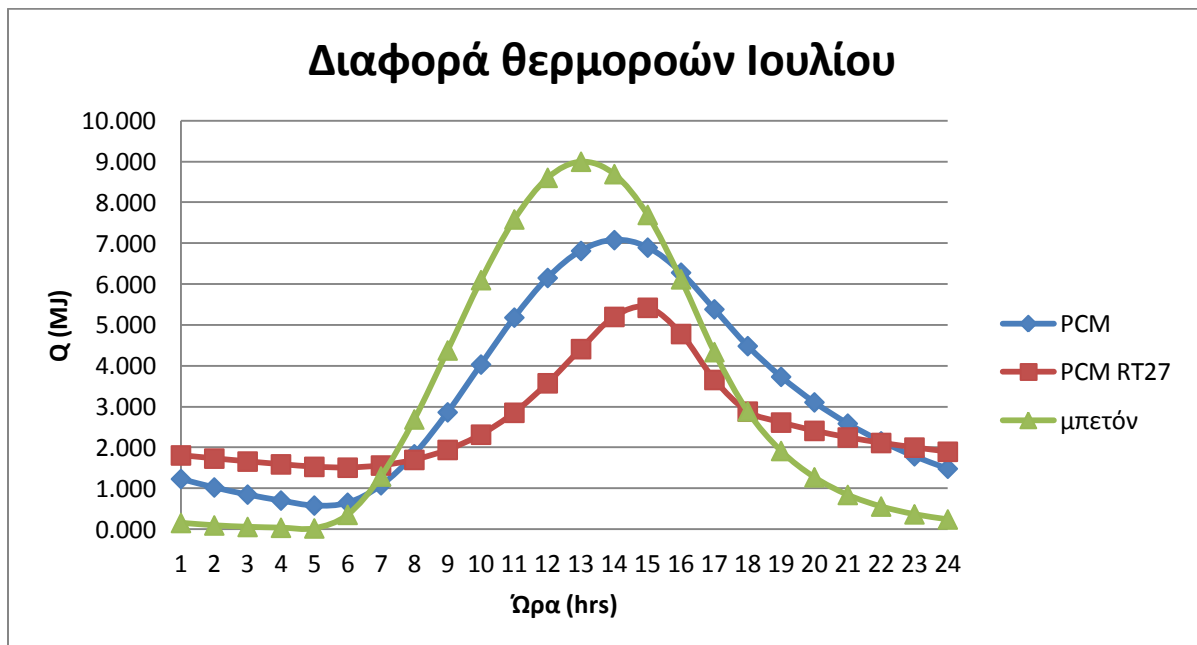
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται και γραφικά αυτή η διαφορά.



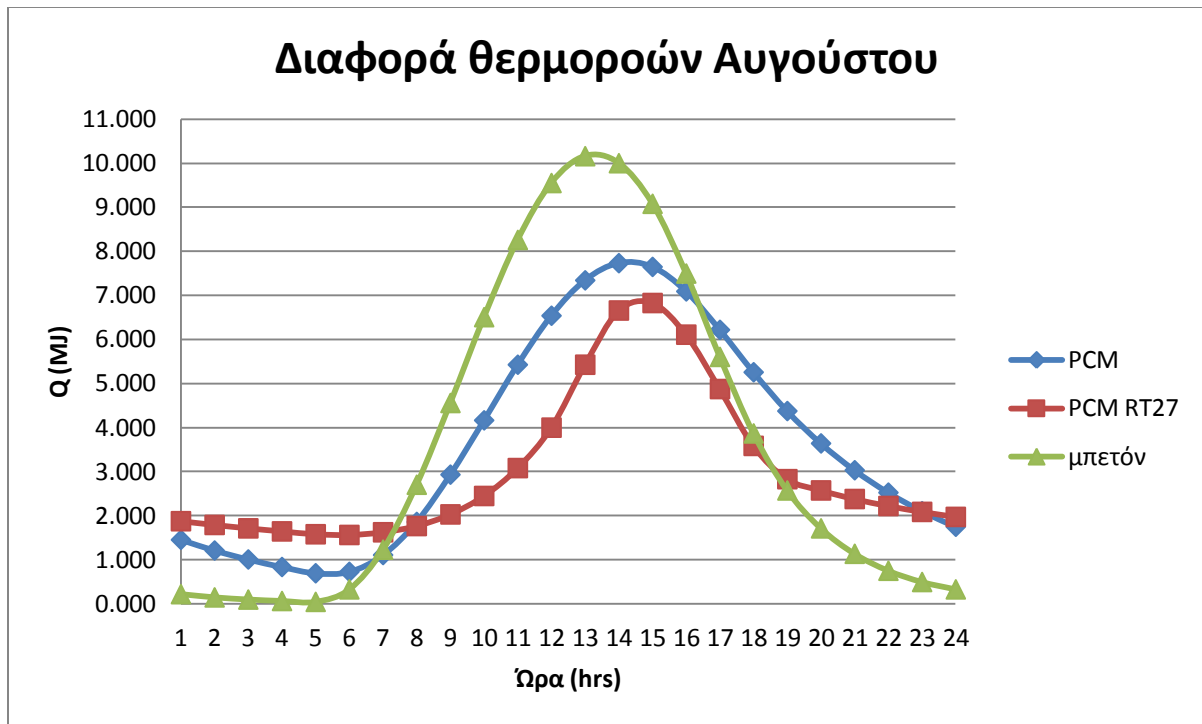
Σχήμα 7.16.1 Διάγραμμα θερμοροών του PCM (κεφ 7.7), PCM RT27 και του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Μαΐου



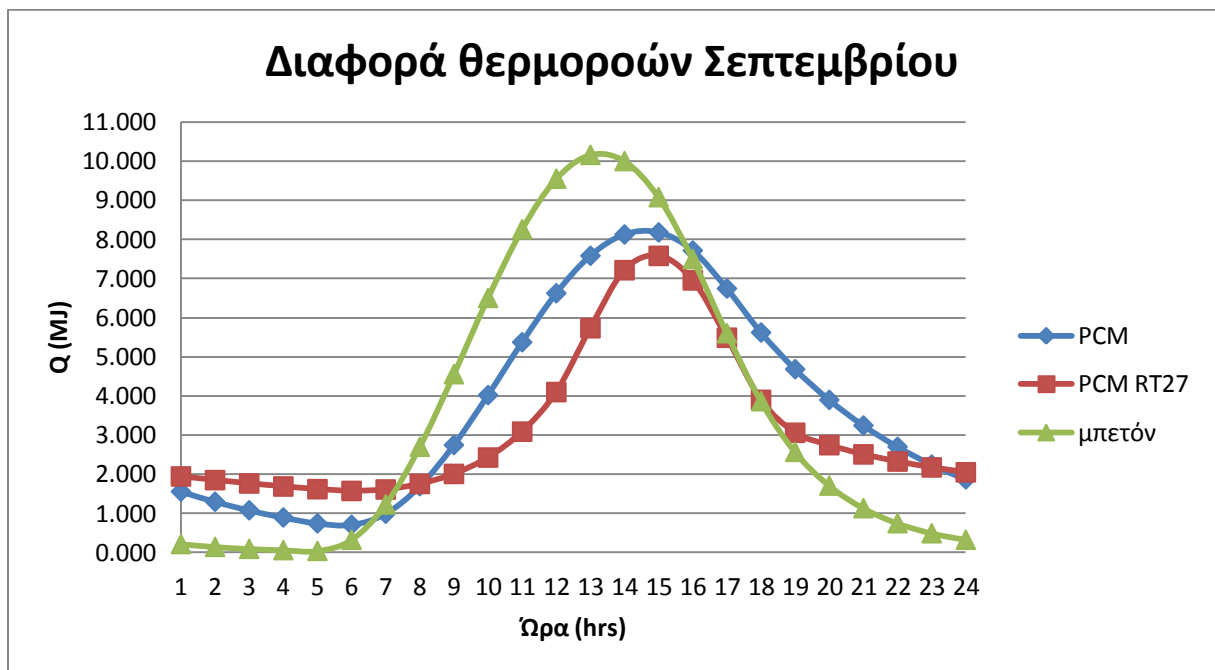
Σχήμα 7.16.2 Διάγραμμα θερμορών του PCM (κεφ 7.7), PCM RT27 και του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουνίου



Σχήμα 7.16.3 Διάγραμμα θερμορών του PCM (κεφ 7.7), PCM RT27 και του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουλίου



Σχήμα 7.16.4 Διάγραμμα θερμορών του PCM (κεφ 7.7), PCM RT27 και του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Αυγούστου



Σχήμα 7.16.5 Διάγραμμα θερμορών του PCM (κεφ 7.7), PCM RT27 και του μπετόν συναρτήσει της ώρας για την 21^η Σεπτεμβρίου

Συμπέρασμα:

Βλέπουμε ότι τις πρωινές ώρες η μέγιστη θερμοροή του PCM RT27 δεν ξεπερνάει αυτή του πρώτου PCM με τη διαφορά αυτή να κυμαίνεται από 500MJ μέχρι 2000MJ . Ενώ τις βραδινές ώρες η θερμοροή του PCM RT27 είναι υψηλότερη από αυτή του πρώτου PCM με την μέγιστη διαφορά τους να εντοπίζεται γύρω στις 5 με 6 το πρωί και φτάνει στα 1000MJ. Αυτή τη μορφή των διαγραμμάτων έπρεπε να την περιμένουμε αν αναλογιστούμε πώς προέκυψαν τα διαγράμματα των θερμοκρασιών σε προηγούμενα κεφάλαια.

7.17 Παραμετρική μελέτη

Σ αυτό το κεφάλαιο θα κάνουμε δύο παραμετρικές μελέτες με δεδομένο το πρώτο PCM και αλλάζοντας κάποια από τα χαρακτηριστικά του αυτού αλλά και του δωματίου. Θα δούμε με αυτές τις αλλαγές τι ακριβώς συμβαίνει στο PCM μας, πώς αλλάζει η θερμοκρασία του αλλά και η θερμοροή του.

7.17.1 Αλλαγή πάχους PCM

Στην πρώτη περίπτωση θα κάνουμε παραμετρική μελέτη αλλάζοντας το πάχος του PCM μας. Στο κεφάλαιο 7.2 είχαμε πάρει το πάχος του PCM ίσο με 40mm. Σ αυτό το κεφάλαιο θα πάρουμε το πάχος του ίσο με 60mm. Κατά τ άλλα, όλα τα υπόλοιπα δεδομένα παραμένουν ίδια με του κεφαλαίου 7.2.

Δηλαδή:

- Χαρακτηριστικά της αίθουσας :

Θεωρήσαμε αίθουσα στην Αθήνα με διαστάσεις πλάτος =10m

Μήκος = 10m

Ύψος = 3m

- Ο τοίχος που θα περιέχει το PCM θα είναι πάντα απέναντι από

Υαλοπίνακα: 2,5 x 3 m²

- Ο τοίχος επίσης θα αποτελείται από :

Γυψοσανίδα =10mm

Στρώμα PCM = 60mm

Μόνωση =30mm

Τούβλο =60mm

Σοβάς =10mm

Σε αυτήν την εφαρμογή χρησιμοποιείται ένα υποθετικό υλικό αλλαγής φάσης με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Θερμότητα αλλαγής φάσης ή θερμότητα της τήξης **H=150KJ/Kgr**
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης με θερμοκρασία εισόδου στη διφασική **Ts=20°C** και θερμοκρασία εξόδου από τη διφασική περιοχή ή θερμοκρασία υγροποίησης **Tl=26°C**.
 - Ειδική θερμοχωρητικότητα έναρξης της τήξης **Cps=4000 J/Kg°C** και ολοκλήρωσης της τήξης (υγρή φάση) **Cpl=4000J/Kg°C**.
 - Ειδική θερμική αγωγιμότητα **k=1,2**.
 - Πυκνότητα **ρ=1019Kgr/m3**

Η προσομοίωση θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση της ενεργός θερμοχωρητικότητας . Θα χρησιμοποιήσουμε την απλή μορφή του $C_{p,eff}$ δηλαδή η ενεργός θερμοχωρητικότητα θα βρεθεί από τις παρακάτω εξισώσεις και με την χρήση της τριγωνικής μορφής καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας (τριγωνική κατανομή) .

Χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά του υλικού αλλαγής φάσης που επιλέχθηκε για αυτήν την προσομοίωση οδηγούμαστε στις παρακάτω εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας:

- Για $T \leq 20 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$C_{p,eff} = C_{ps} = 4000 \text{ J/kgK} \quad (7.17.1.1)$$

- Για $20 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 23 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned} C_{p,eff} &= 4 \times (H - b C_{ps}) \times \frac{T - T_s}{b^2} + C_{ps} \\ &= 14000 \times (T - 20) + 4000 \end{aligned} \quad (7.17.1.2)$$

- Για $23\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 26\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$C_{p,\text{eff}} = 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b^2} \times (T - T_s - \frac{b}{2}) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl}$$

$$= -14000 \times (T - 23) + 46000 \quad (7.17.1.3)$$

- Για $T > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$C_{p,\text{eff}} = C_{pl} = 4000 \text{ J/kgK} \quad (7.17.1.4)$$

Ισολογισμός :

Η ενέργεια που δίνει το PCM είναι η ενέργεια λόγω της ακτινοβολίας αφαιρούμενη κατά την ενέργεια που δίνει το PCM στο χώρο.

Άρα :

$$m C_p (T_T - T_A) = G_t A_{\pi} 3600 + A_T U 3600 (T_{\delta} - T_A) \quad (7.17.1.5)$$

Όπου :

- C_p , η ειδική θερμοχωρητικότητα η οποία δίνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του PCM σύμφωνα με τις εξισώσεις (7.17.1.1), (7.17.1.2), (7.17.1.3), (7.17.1.4)

- m , η μάζα του PCM

$$m = \rho V = 1019 \times 1,8 = 1834,2 \text{ Kgr}$$

$$\text{με: } V = (\text{επιφάνεια τοίχου}) \times (\text{πάχος PCM}) = 30\text{m}^2 \times 0,06\text{m} = 1,8\text{m}^3$$

Για το πάχος του PCM έχουμε επιλέξει μια λογική τιμή ίση με 6cm.

$$\text{Και } \rho = 1019 \text{Kgr/m}^3$$

- T_A , η θερμοκρασία του PCM στην αρχή της χρονικής περιόδου .
- T_T , η θερμοκρασία του PCM στο τέλος της χρονικής περιόδου.

- G_t , ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου (έχει βρεθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 7.1.)

- A_{π} , η επιφάνεια του υαλοπίνακα στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται υαλοπίνακας διαστάσεων (ύψος) x (μήκος) = (2,5) x (3) m^2 .

$$\text{Άρα } A_{\pi} = 7,5 \text{ m}^2$$

- A_{τ} , η επιφάνεια τοίχου στον οποίο έχει ενσωματωθεί το PCM με διαστάσεις (πλάτος αίθουσας) x (ύψος) = (10) x (3) m^2

$$\text{Άρα } A_{\tau} = 30 \text{ m}^2$$

- U , η ειδική θερμική διαπερατότητα, η οποία μπορεί να βρεθεί με βάση την εξίσωση :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{l}{k} = \frac{1}{8} + \frac{0,01}{1,2} = 0,133$$

$$\text{Άρα } U = 7,52 \text{ W/m}^2$$

με $\frac{1}{h}$, η θερμική αντίσταση συναγωγής και $\frac{l}{k}$, η θερμική αντίσταση αγωγής

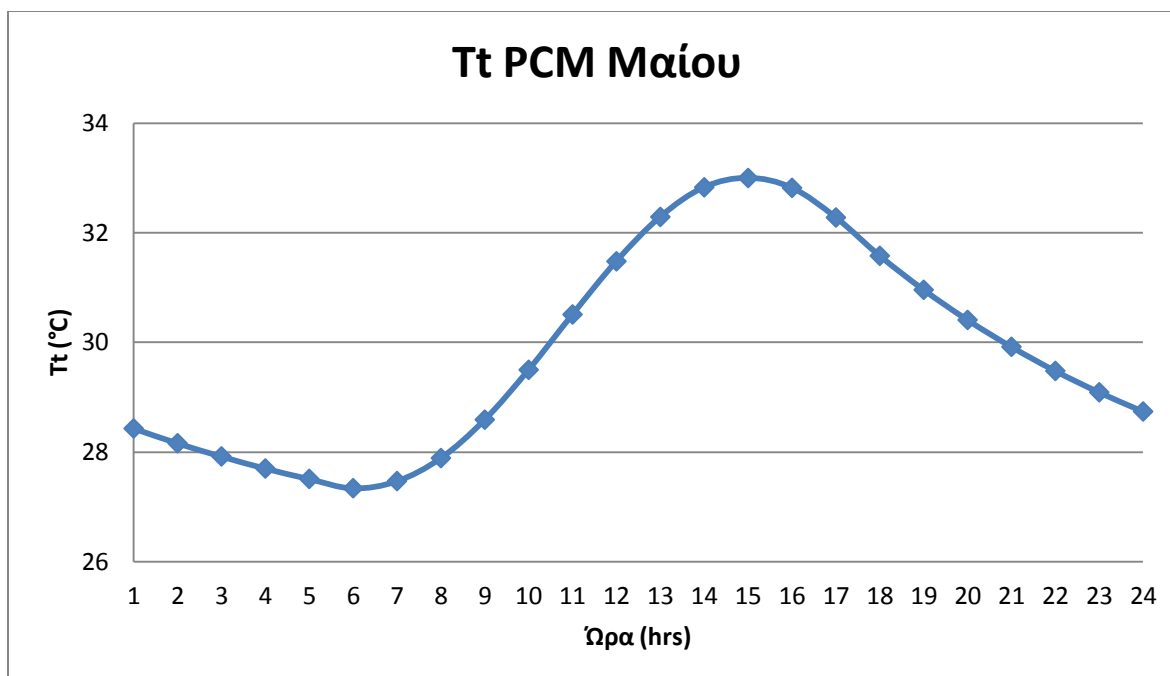
διαμέσου της γυψοσανίδας που υπάρχει πριν το στρώμα του PCM και η οποία έχει πάχος $l = 10\text{mm}$ και θερμική αγωγιμότητα $k = 0,12 \text{ W /m C}$

- T_{δ} , η θερμοκρασία στο εσωτερικό της αίθουσας όπου στην περίπτωση μας είναι ίση με $T_{\delta} = 26^{\circ}\text{C}$

➤ Για την 21η Μαΐου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	27,34
7	0,076473	27,47
8	0,158606	27,89
9	0,247887	28,59
10	0,326386	29,50
11	0,379743	30,51
12	0,401797	31,48
13	0,386401	32,29
14	0,338614	32,83
15	0,260975	33
16	0,162475	32,82
17	0,059674	32,28
18	0	31,58
19	0	30,96
20	0	30,41
21	0	29,92
22	0	29,48
23	0	29,09
24	0	28,74
1	0	28,43
2	0	28,16
3	0	27,92
4	0	27,70
5	0	27,51

Σχήμα 7.17.1.1 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Μαΐου για νότιο προσανατολισμό.



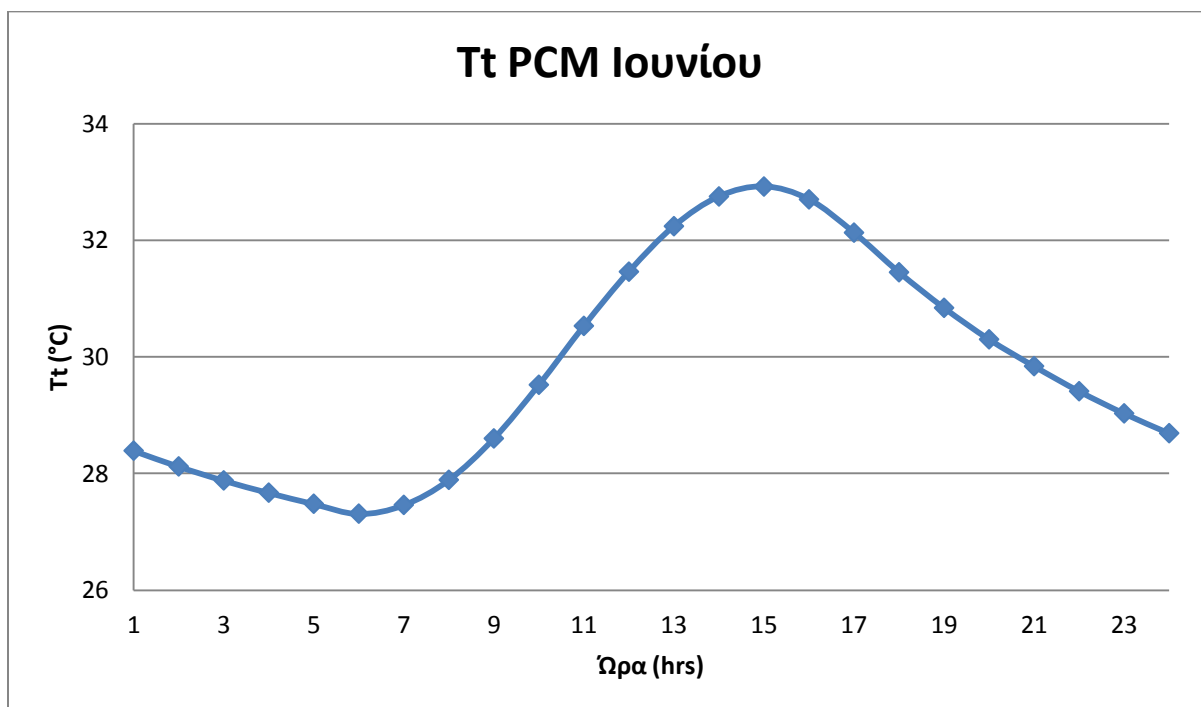
Σχήμα 7.17.1.2 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Μαΐου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21^η Ιουνίου

Ωρα	Gt (KW/m ²)	T _T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	27,31
7	0,080299	27,46
8	0,162635	27,89
9	0,251822	28,60
10	0,329689	29,52
11	0,381024	30,53
12	0,398017	31,46
13	0,378546	32,24
14	0,328165	32,75
15	0,249801	32,92
16	0,150684	32,70

17	0,049063	32,13
18	0	31,45
19	0	30,84
20	0	30,30
21	0	29,84
22	0	29,41
23	0	29,03
24	0	28,69
1	0	28,39
2	0	28,12
3	0	27,88
4	0	27,67
5	0	27,48

Σχήμα 7.17.1.3 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό.

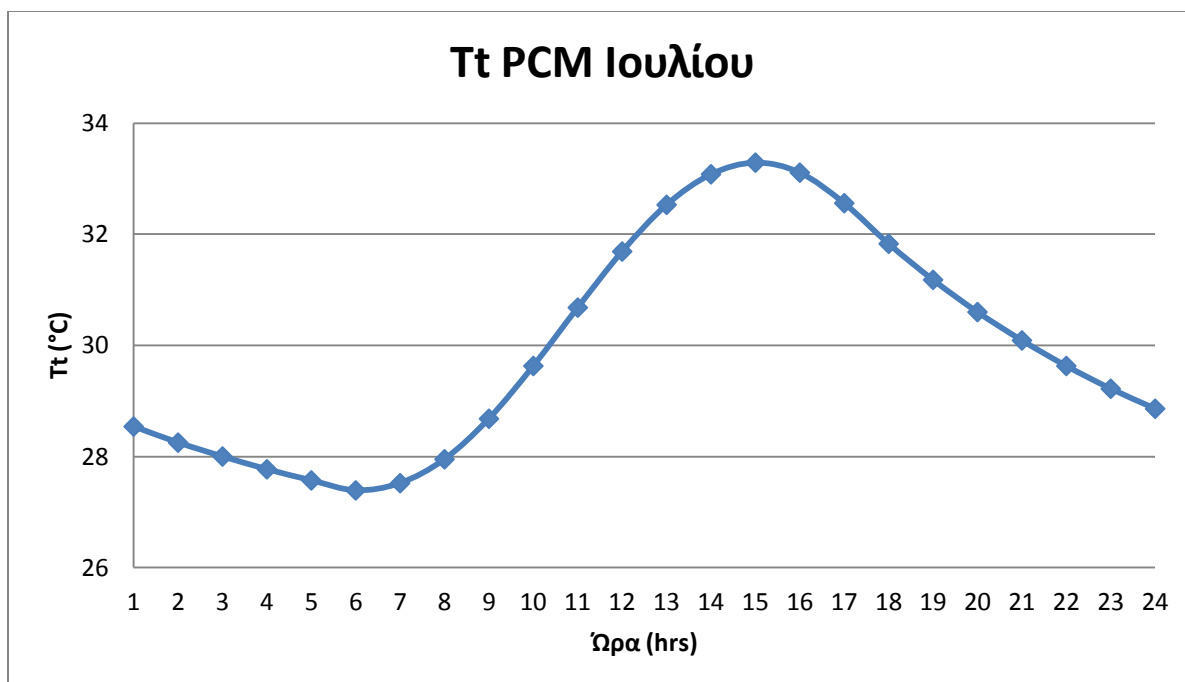


Σχήμα 7.17.1.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21^η Ιουλίου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	27,39
7	0,077277	27,52
8	0,16312	27,95
9	0,257285	28,68
10	0,340239	29,63
11	0,396315	30,68
12	0,41773	31,69
13	0,401056	32,53
14	0,351155	33,08
15	0,272563	33,29
16	0,17161	33,11
17	0,067114	32,56
18	0	31,83
19	0	31,18
20	0	30,60
21	0	30,09
22	0	29,63
23	0	29,22
24	0	28,86
1	0	28,54
2	0	28,25
3	0	28,00
4	0	27,77
5	0	27,57

Σχήμα 7.17.1.5 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό.



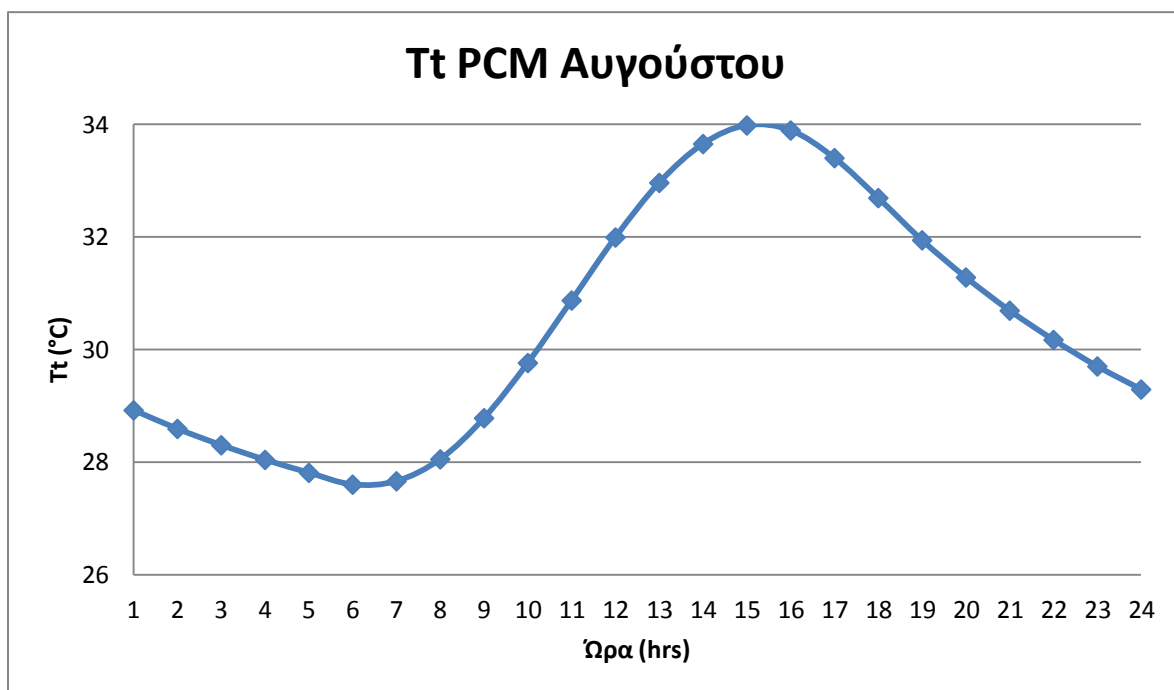
Σχήμα 7.17.1.6 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21^η Αυγούστου

Ωρα	Gt (KW/m ²)	T _T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	27,60
7	0,066465	27,66
8	0,158305	28,05
9	0,260143	28,78
10	0,352122	29,76
11	0,418377	30,87
12	0,452968	31,99
13	0,44518	32,96
14	0,397724	33,65
15	0,320498	33,98
16	0,216425	33,89

17	0,10575	33,40
18	0,030856	32,69
19	0	31,94
20	0	31,28
21	0	30,69
22	0	30,17
23	0	29,70
24	0	29,29
1	0	28,92
2	0	28,59
3	0	28,30
4	0	28,04
5	0	27,81

Σχήμα 7.17.1.7 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό.

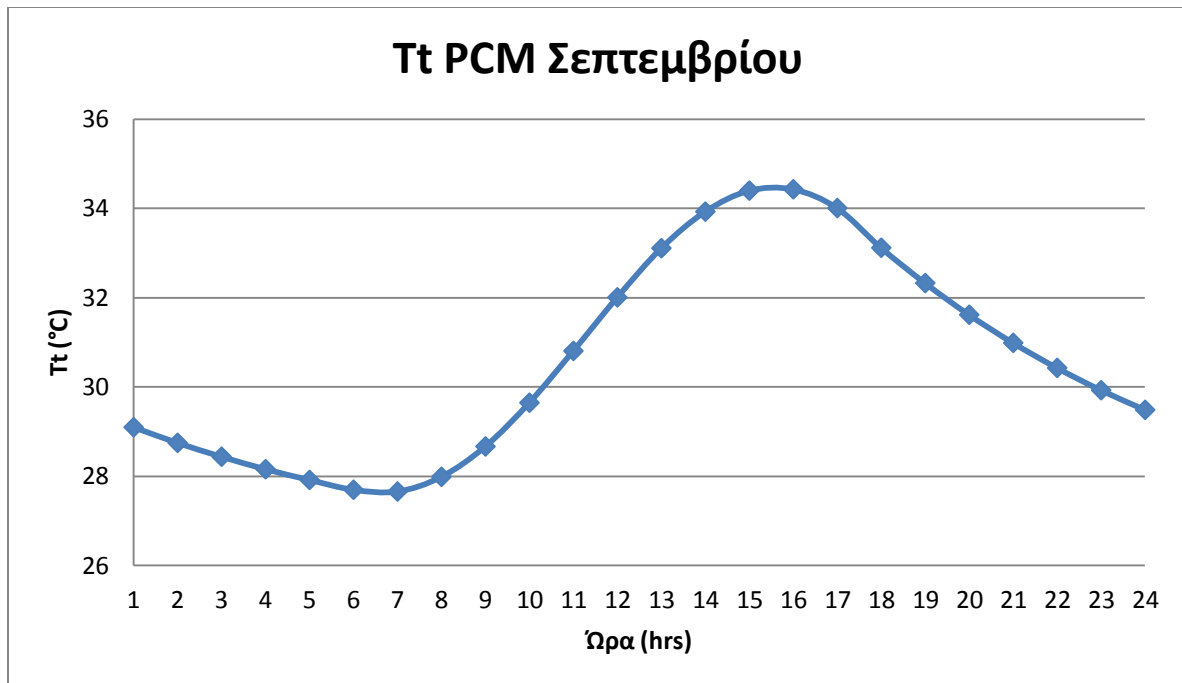


Σχήμα 7.17.1.8 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό

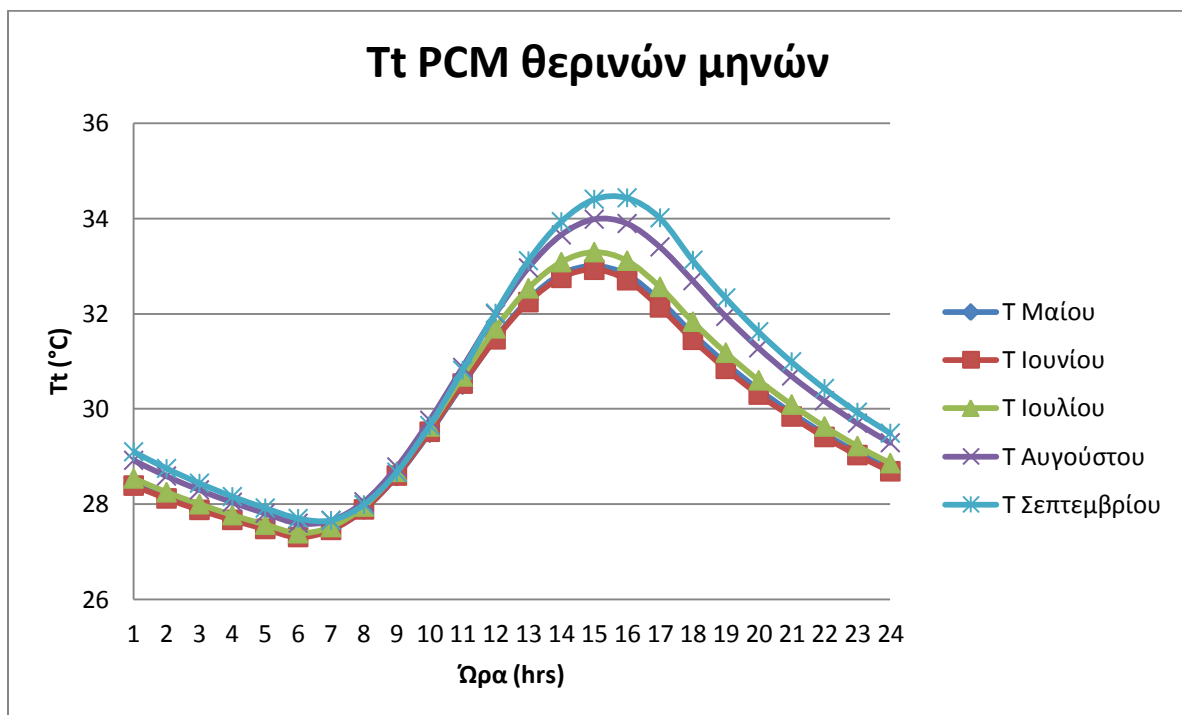
➤ Για την 21^η Σεπτεμβρίου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	27,70
7	0,040322	27,66
8	0,141111	27,99
9	0,247334	28,67
10	0,348416	29,65
11	0,425997	30,81
12	0,477016	32,01
13	0,480858	33,11
14	0,438651	33,93
15	0,366994	34,40
16	0,261053	34,43
17	0,139856	34,01
18	0	33,12
19	0	32,33
20	0	31,62
21	0	30,99
22	0	30,43
23	0	29,93
24	0	29,49
1	0	29,10
2	0	28,75
3	0	28,44
4	0	28,16
5	0	27,92

Σχήμα 7.17.1.9 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό.

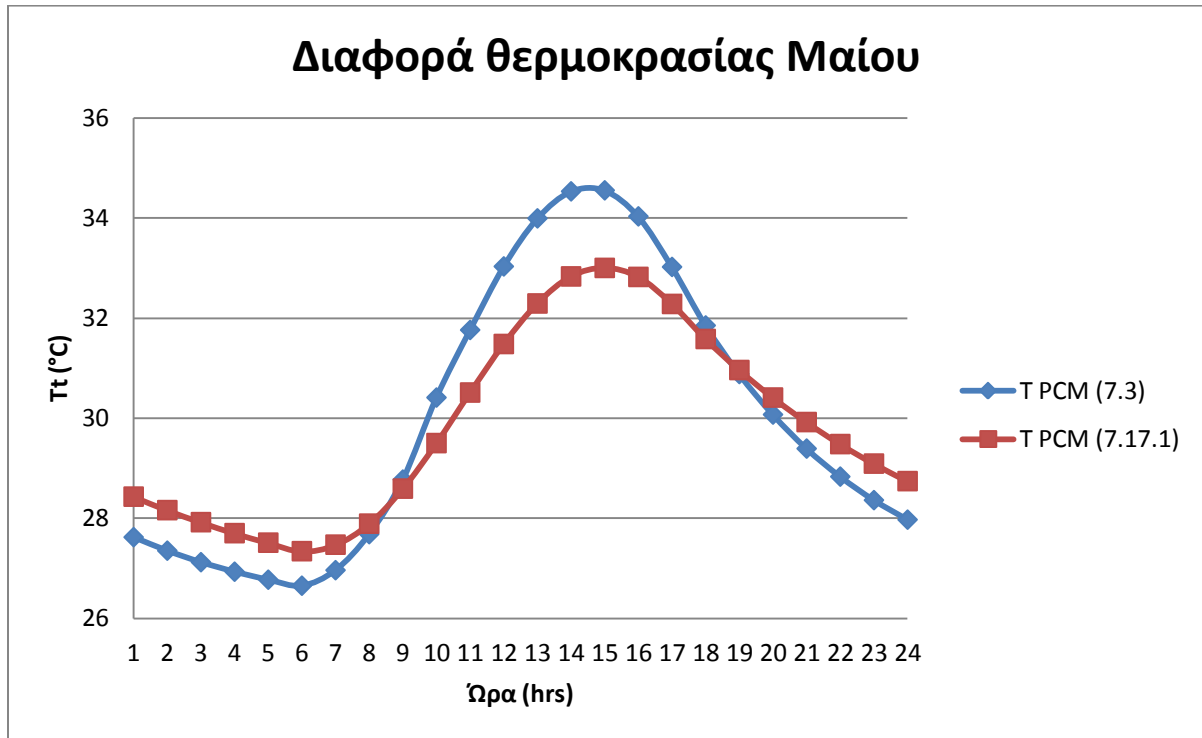


Σχήμα 7.17.1.10 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό

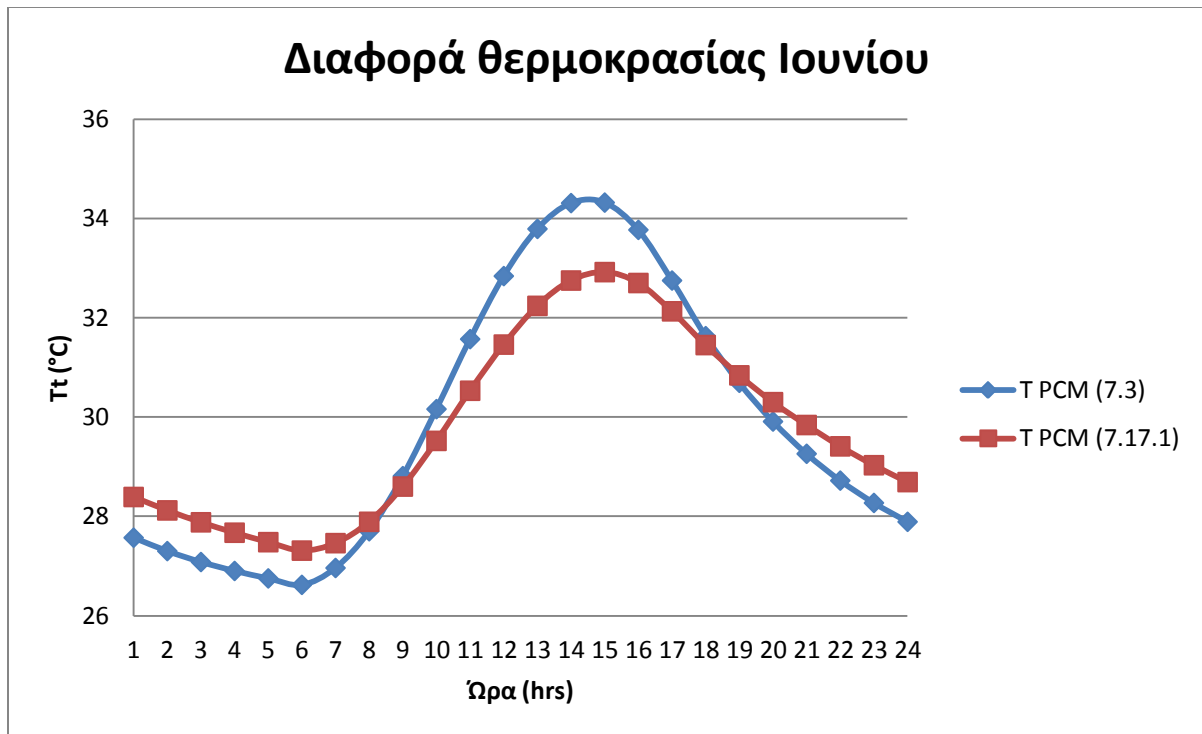


Σχήμα 7.17.1.11 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας για τους θερινούς μήνες για νότιο προσανατολισμό

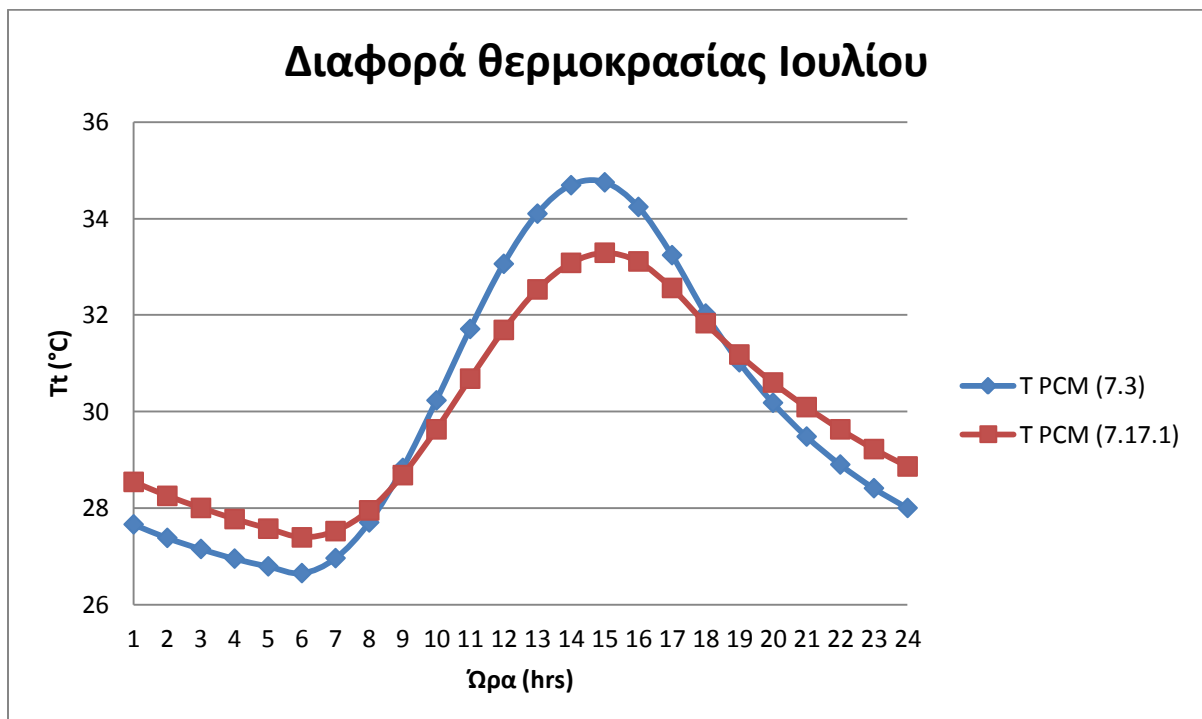
Παρακάτω θα δούμε τις θερμοκρασιακές διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των θερμοκρασιών του κεφαλαίου 7.3 και του κεφαλαίου 7.17.1.



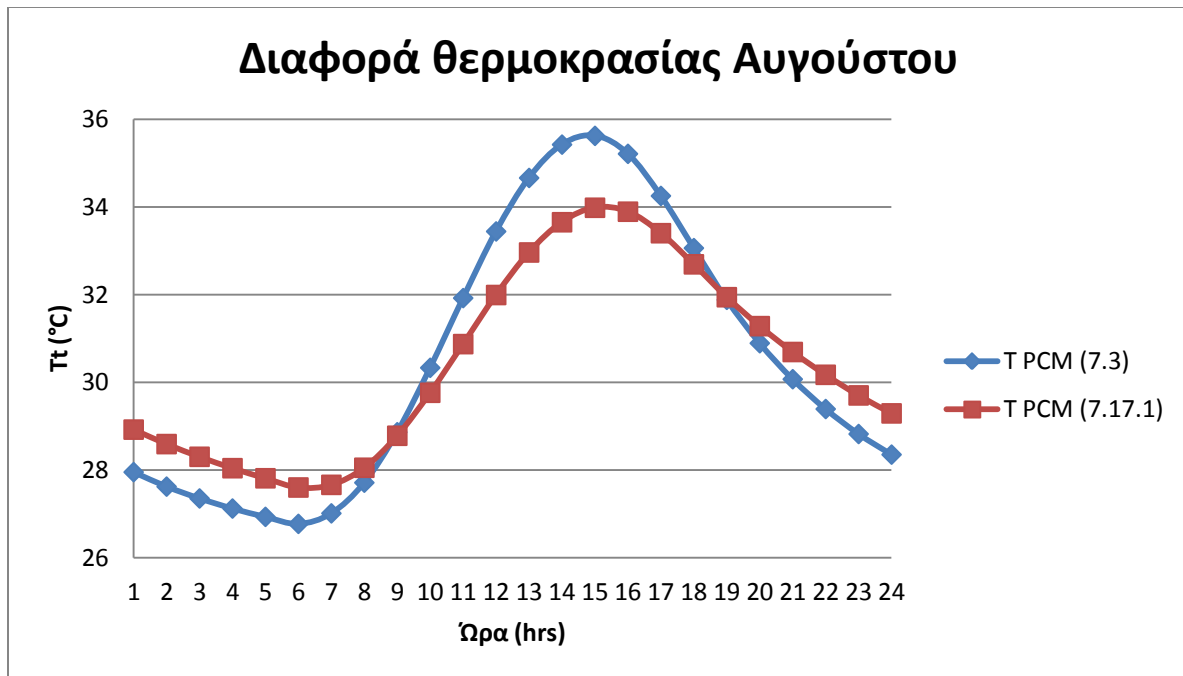
Σχήμα 7.17.1.12 Διάγραμμα θερμοκρασιακής διαφοράς PCM (κεφ 7.3) – PCM (κεφ 7.17.1) για την 21^η Μαΐου για νότιο προσανατολισμό



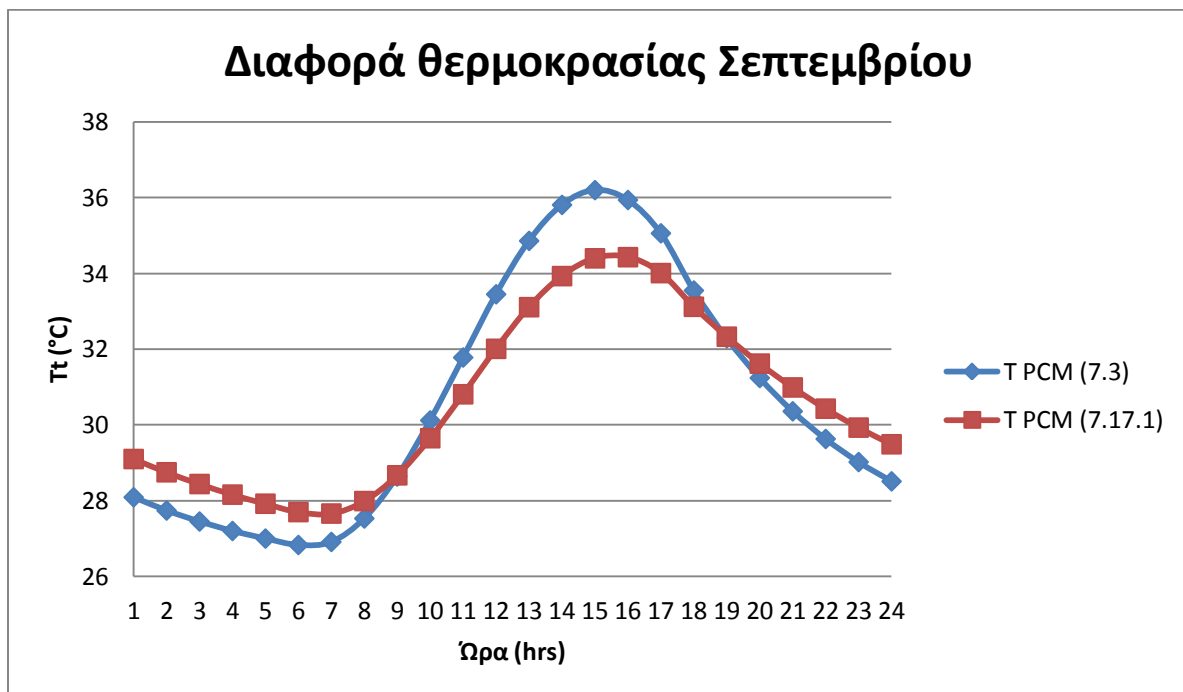
Σχήμα 7.17.1.13 Διάγραμμα θερμοκρασιακής διαφοράς PCM (κεφ 7.3) – PCM (κεφ 7.17.1) για την 21^η Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 7.17.1.14 Διάγραμμα θερμοκρασιακής διαφοράς PCM (κεφ 7.3) – PCM (κεφ 7.17.1) για την 21^η Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 7.17.1.15 Διάγραμμα θερμοκρασιακής διαφοράς PCM (κεφ 7.3) – PCM (κεφ 7.17.1) για την 21^η Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 7.17.1.16 Διάγραμμα θερμοκρασιακής διαφοράς PCM (κεφ 7.3) – PCM (κεφ 7.17.1) για την 21^η Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό

Συμπέρασμα:

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι το μεγαλύτερο PCM στις πρωινές ώρες αποθηκεύει μικρότερη θερμοκρασία από αυτή του PCM του 7.3 κεφαλαίου. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασιακή διαφορά για τις πρωινές ώρες των θερινών μηνών κυμαίνεται στους 1,5 με 2 βαθμούς. Αντίθετα, τις βραδινές ώρες βλέπουμε από τα διαγράμματα ότι το PCM που εξετάσαμε σ αυτό το κεφάλαιο, δηλαδή αυτό με το μεγαλύτερο πάχος, χάνει μικρότερο ποσό θερμότητας. Έτσι, τις βραδινές ώρες οι θερμοκρασίες που επικρατούν είναι μεγαλύτερες απ' αυτές του πρώτου PCM. Η θερμοκρασιακή διαφορά τις νυχτερινές ώρες είναι περίπου ένας βαθμός.

Παρακάτω θα δούμε τι γίνεται και με τις θερμοροές στη μέλετη που κάνουμε αλλάζοντας το πάχος του PCM.

. Για τον υπολογισμό της θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω ισολογισμό.

$$A_T U \left(\frac{(T_i + T_{i+1})}{2} - 26 \right) 3600 = Q_{i,i+1} \quad (7.17.1.6)$$

➤ Για τον Μάιο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	28,43	28,16	1.8639
2-3	28,16	27,92	1.6568
3-4	27,92	27,70	1.4700
4-5	27,70	27,51	1.3035
5-6	27,51	27,34	1.1573
6-7	27,34	27,47	1.1410
7-8	27,47	27,89	1.3644
8-9	27,89	28,59	1.8192
9-10	28,59	29,50	2.4730
10-11	29,50	30,51	3.2527
11-12	30,51	31,48	4.0567
12-13	31,48	32,29	4.7795
13-14	32,29	32,83	5.3277
14-15	32,83	33	5.6160
15-16	33	32,82	5.6120
16-17	32,82	32,28	5.3196
17-18	32,28	31,58	4.8161
18-19	31,58	30,96	4.2800
19-20	30,96	30,41	3.8049
20-21	30,41	29,92	3.3826
21-22	29,92	29,48	3.0049
22-23	29,48	29,09	2.6679
23-24	29,09	28,74	2.3674
24-1	28,74	28,43	2.0994

Σχήμα 7.17.1.17 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Μαΐου.

➤ Για τον Ιουνίο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	28,39	28,12	1.8314
2-3	28,12	27,88	1.6243
3-4	27,88	27,67	1.4415
4-5	27,67	27,48	1.2791
5-6	27,48	27,31	1.1329
6-7	27,31	27,46	1.1248
7-8	27,46	27,89	1.3603
8-9	27,89	28,60	1.8232
9-10	28,60	29,52	2.4852
10-11	29,52	30,53	3.2689
11-12	30,53	31,46	4.0567
12-13	31,46	32,24	4.7511
13-14	32,24	32,75	5.2749
14-15	32,75	32,92	5.5511
15-16	32,92	32,70	5.5308
16-17	32,70	32,13	5.2100
17-18	32,13	31,45	4.7024
18-19	31,45	30,84	4.1785
19-20	30,84	30,30	3.7115
20-21	30,30	29,84	3.3054
21-22	29,84	29,41	2.9440
22-23	29,41	29,03	2.6151
23-24	29,03	28,69	2.3227
24-1	28,69	28,39	2.0628

Σχήμα 7.17.1.18 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Ιουνίου.

➤ Για τον Ιουλίο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	28,54	28,25	1.9456
2-3	28,25	28,00	1.7258
3-4	28,00	27,77	1.5309
4-5	27,77	27,57	1.3563
5-6	27,57	27,39	1.2019
6-7	27,39	27,52	1.1816
7-8	27,52	27,95	1.4090
8-9	27,95	28,68	1.8801
9-10	28,68	29,63	2.5623
10-11	29,63	30,68	3.3745
11-12	30,68	31,69	4.2110
12-13	31,69	32,53	4.9622
13-14	32,53	33,08	5.5267
14-15	33,08	33,29	5.8353
15-16	33,29	33,11	5.8475
16-17	33,11	32,56	5.5511
17-18	32,56	31,83	5.0313
18-19	31,83	31,18	4.4709
19-20	31,18	30,60	3.9714
20-21	30,60	30,09	3.5288
21-22	30,09	29,63	3.1349
22-23	29,63	29,22	2.7816
23-24	29,22	28,86	2.4689
24-1	28,86	28,54	2.1928

Σχήμα 7.17.1.19 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Ιουλίου.

➤ Για τον Αύγουστο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	28,92	28,59	2.2375
2-3	28,59	28,30	1.9857
3-4	28,30	28,04	1.7623
4-5	28,04	27,81	1.5634
5-6	27,81	27,60	1.3847
6-7	27,60	27,66	1.3238
7-8	27,66	28,05	1.5065
8-9	28,05	28,78	1.9613
9-10	28,78	29,76	2.6557
10-11	29,76	30,87	3.5044
11-12	30,87	31,99	4.4100
12-13	31,99	32,96	5.2587
13-14	32,96	33,65	5.9328
14-15	33,65	33,98	6.3470
15-16	33,98	33,89	6.4444
16-17	33,89	33,40	6.2089
17-18	33,40	32,69	5.7216
18-19	32,69	31,94	5.1287
19-20	31,94	31,28	4.5562
20-21	31,28	30,69	4.0486
21-22	30,69	30,17	3.5978
22-23	30,17	29,70	3.1958
23-24	29,70	29,29	2.8384
24-1	29,29	28,92	2.5217

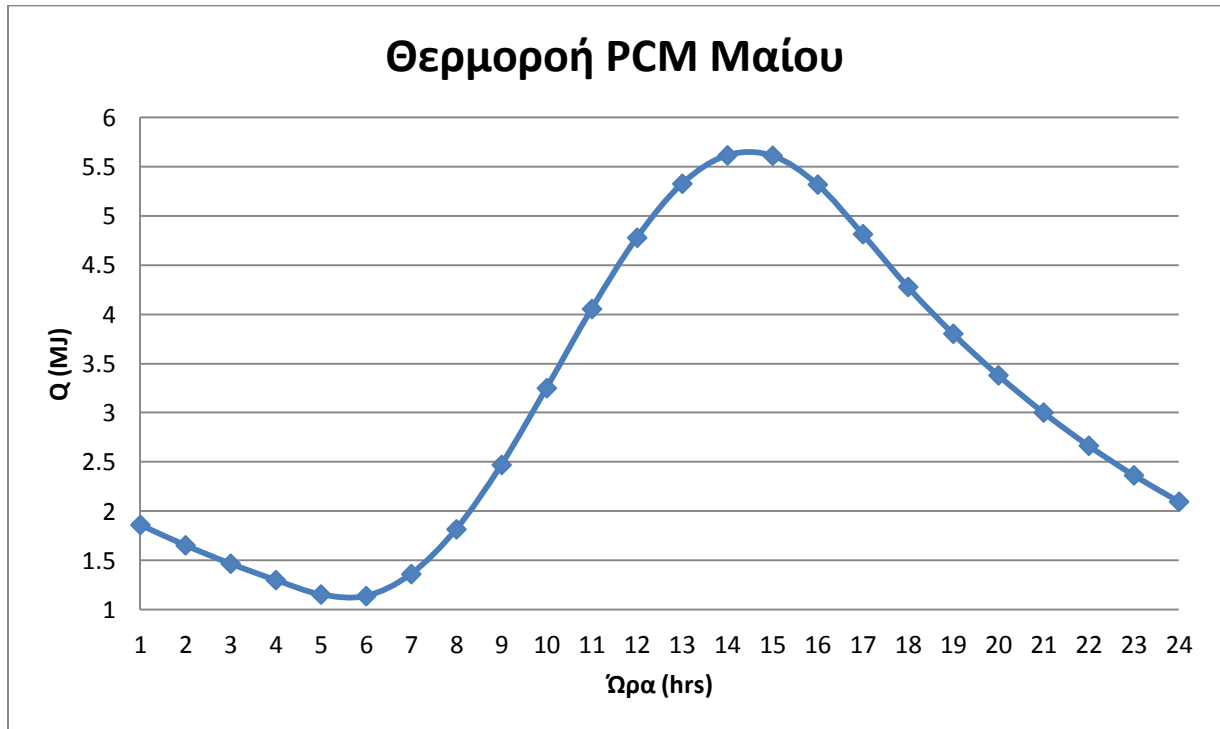
Σχήμα 7.17.1.20 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Αυγούστου.

➤ Για τον Σεπτέμβριο:

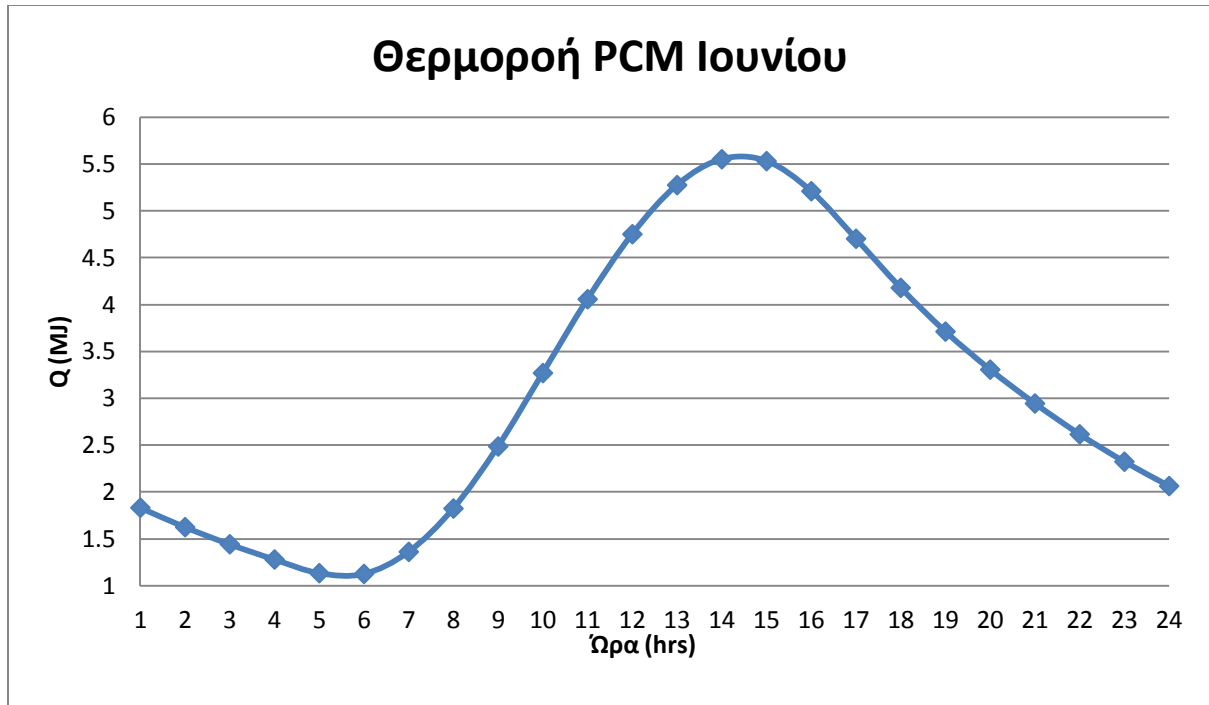
Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	29,10	28,75	2.3755
2-3	28,75	28,44	2.1075
3-4	28,44	28,16	1.8679
4-5	28,16	27,92	1.6568
5-6	27,92	27,70	1.4700
6-7	27,70	27,66	1.3644
7-8	27,66	27,99	1.4821
8-9	27,99	28,67	1.8923
9-10	28,67	29,65	2.5664
10-11	29,65	30,81	3.4354
11-12	30,81	32,01	4.3937
12-13	32,01	33,11	5.3277
13-14	33,11	33,93	6.1074
14-15	33,93	34,40	6.6312
15-16	34,40	34,43	6.8343
16-17	34,43	34,01	6.6759
17-18	34,01	33,12	6.1439
18-19	33,12	32,33	5.4617
19-20	32,33	31,62	4.8526
20-21	31,62	30,99	4.3085
21-22	30,99	30,43	3.8252
22-23	30,43	29,93	3.3948
23-24	29,93	29,49	3.0131
24-1	29,49	29,10	2.6760

Σχήμα 7.17.1.21 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Σεπτεμβρίου.

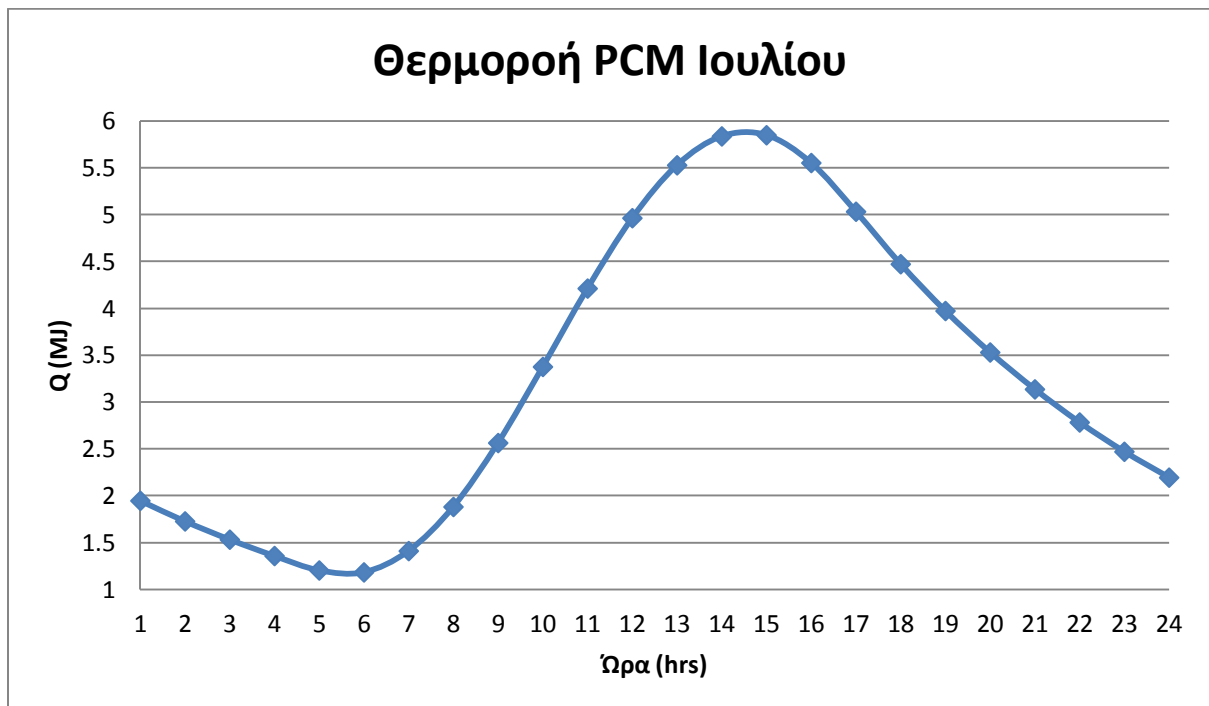
Παρακάτω μπορούμε να δούμε αυτά τα αποτελέσματα και διαγραμματικά.



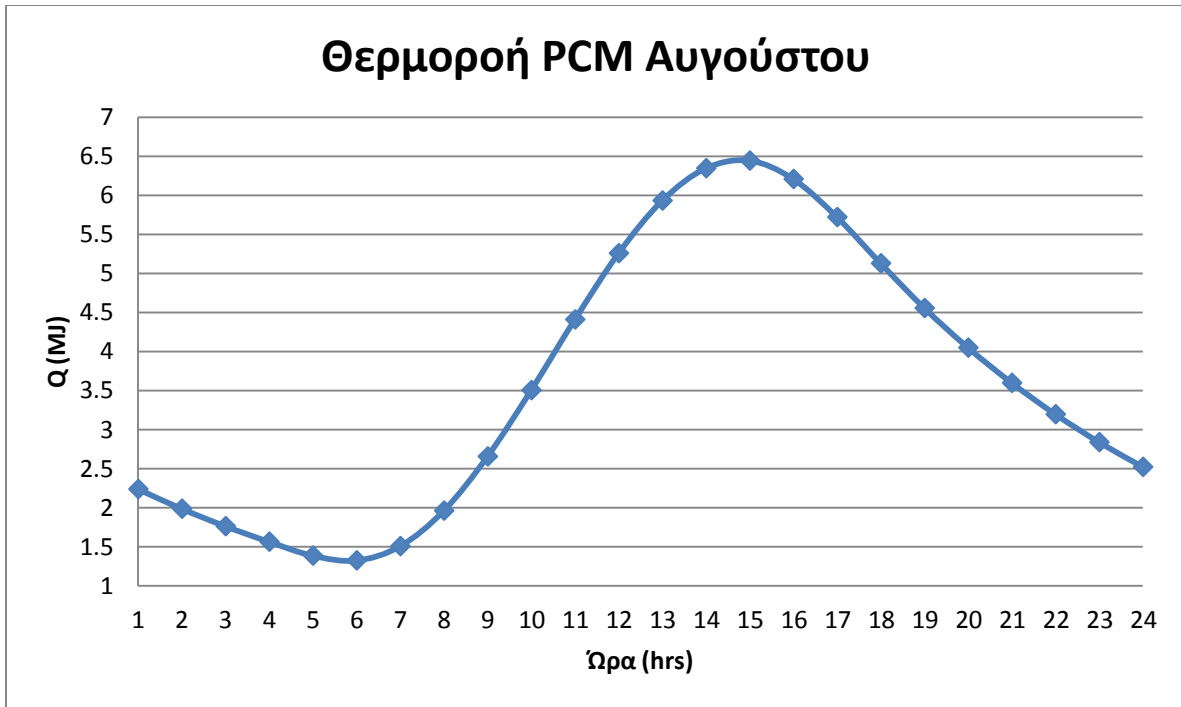
Σχήμα 7.17.1.22 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Μαΐου



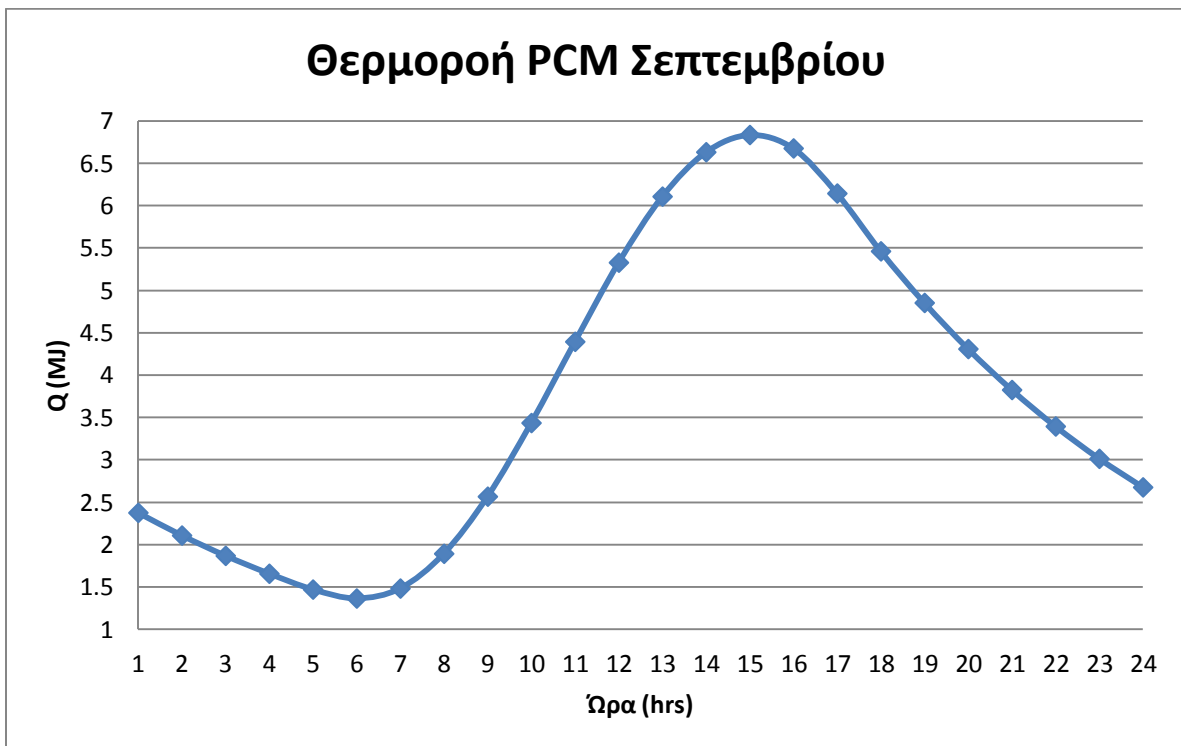
Σχήμα 7.17.1.23 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουνίου



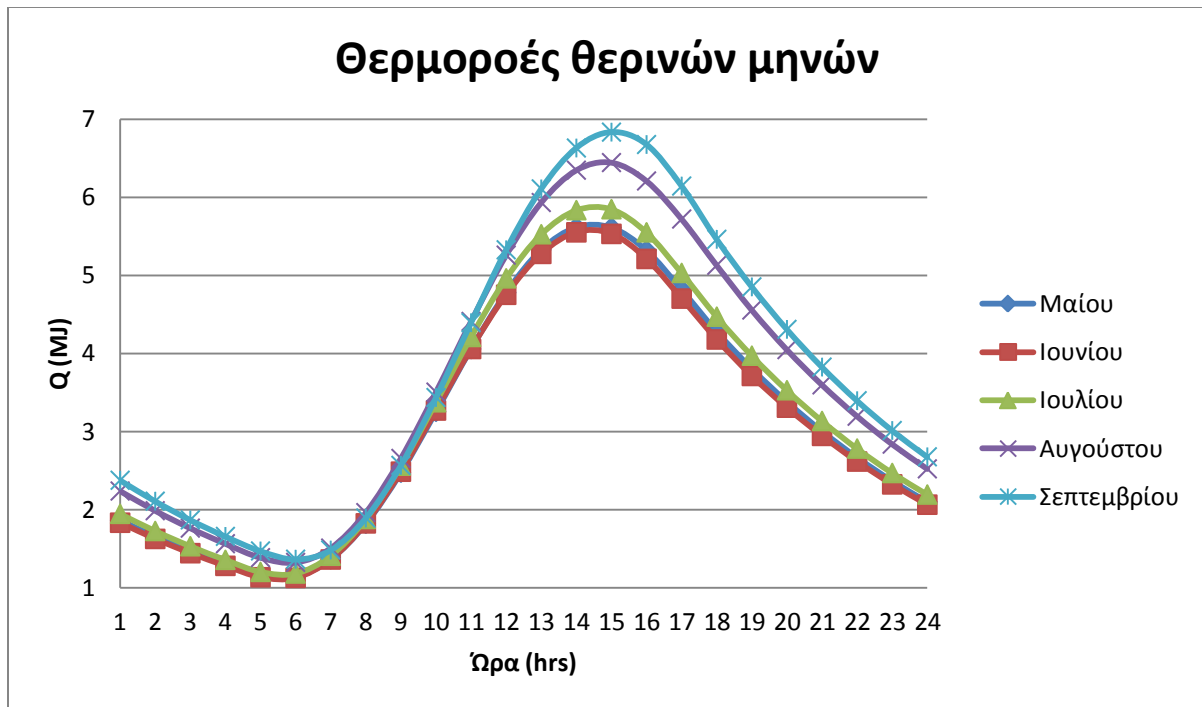
Σχήμα 7.17.1.24 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουλίου



Σχήμα 7.17.1.25 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Αυγούστου

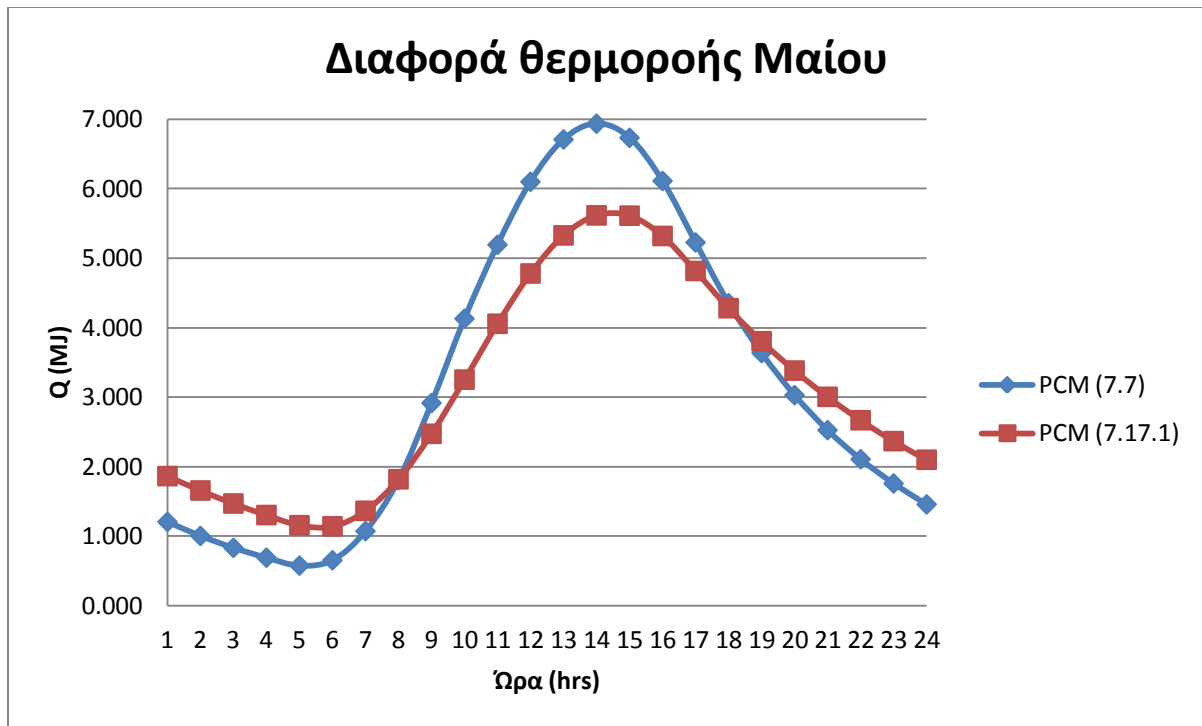


Σχήμα 7.17.1.26 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Σεπτεμβρίου

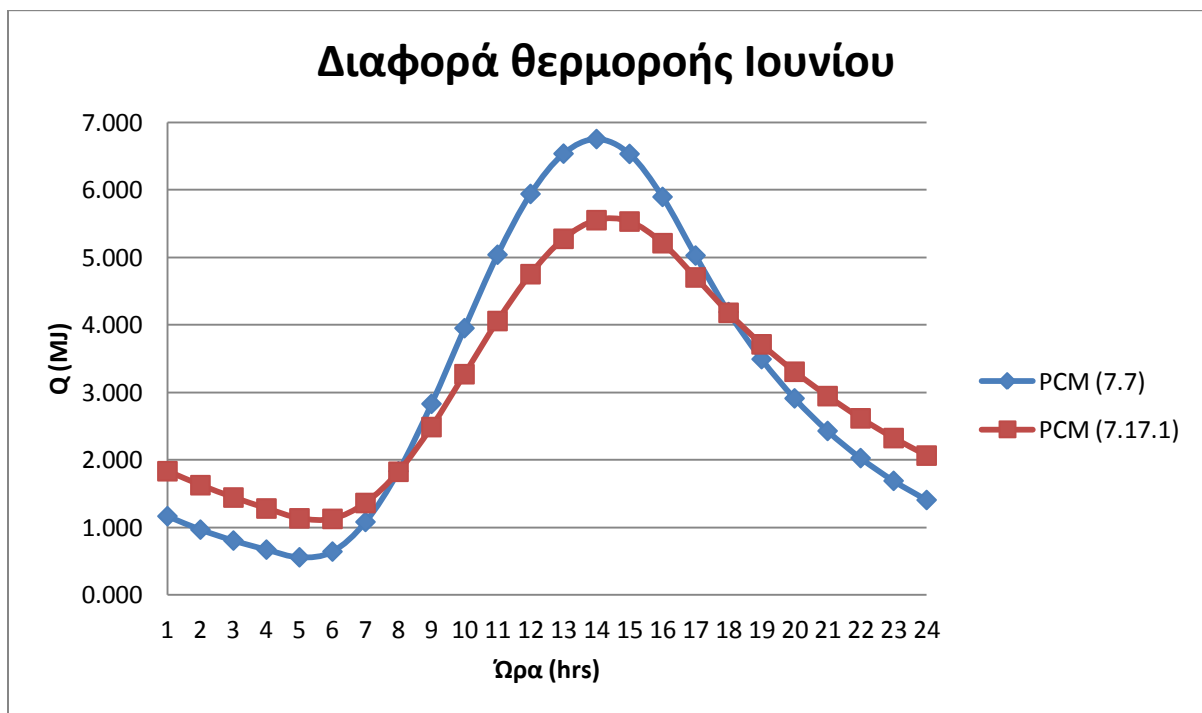


Σχήμα 7.17.1.27 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για τους θερινούς μήνες

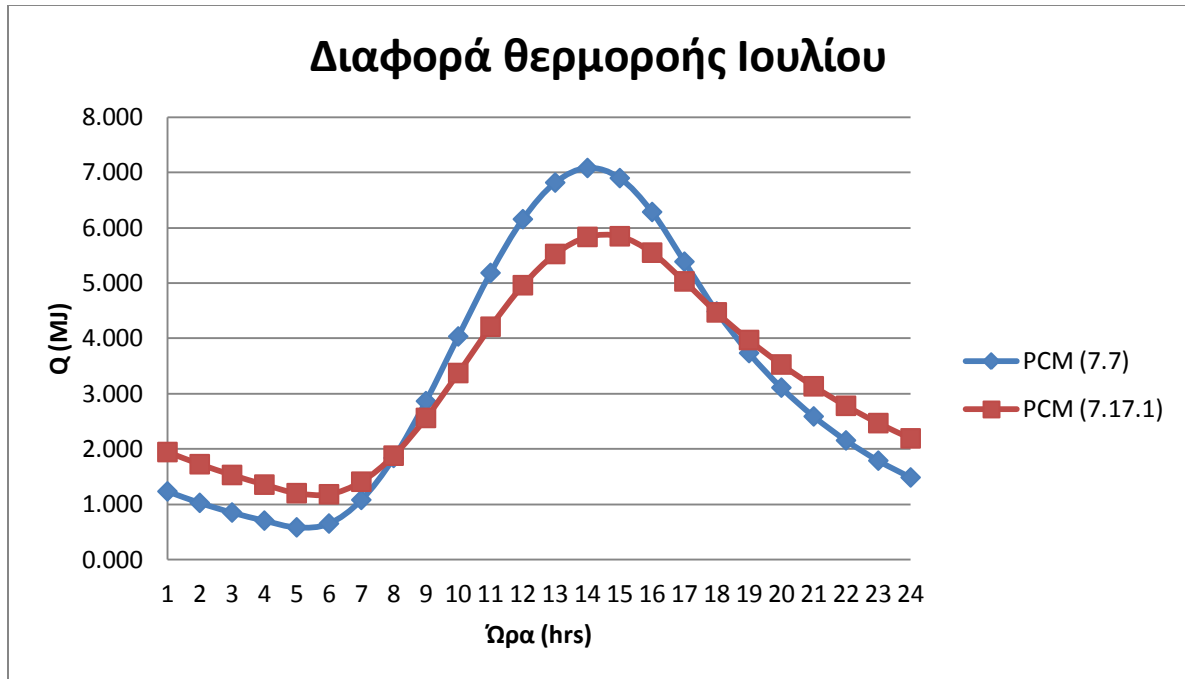
Παρακάτω θα δούμε σε διαγράμματα τι διαφορές υπάρχουν για τις θερμοροές του PCM του κεφαλαίου 7.7 και αυτές του παρόντος κεφαλαίου.



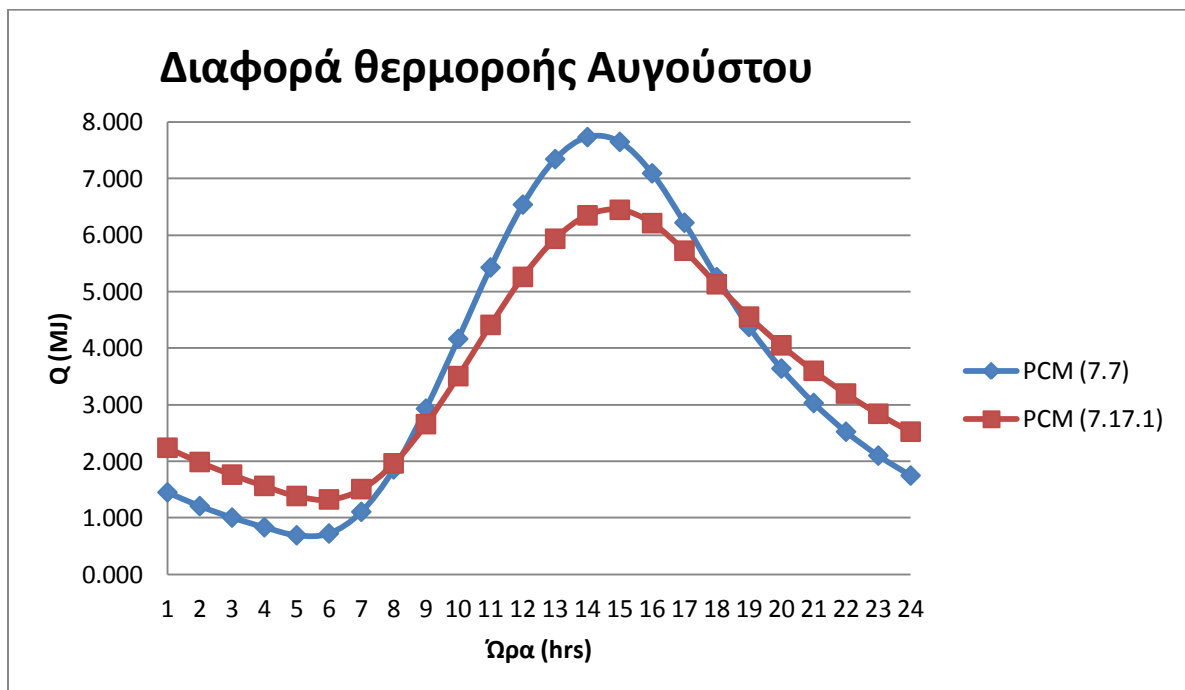
Σχήμα 7.17.1.28 Διάγραμμα θερμοροών του PCM (κεφ 7.7) και του PCM (κεφ 7.17.1) συναρτήσει της ώρας για την 21^η Μαΐου



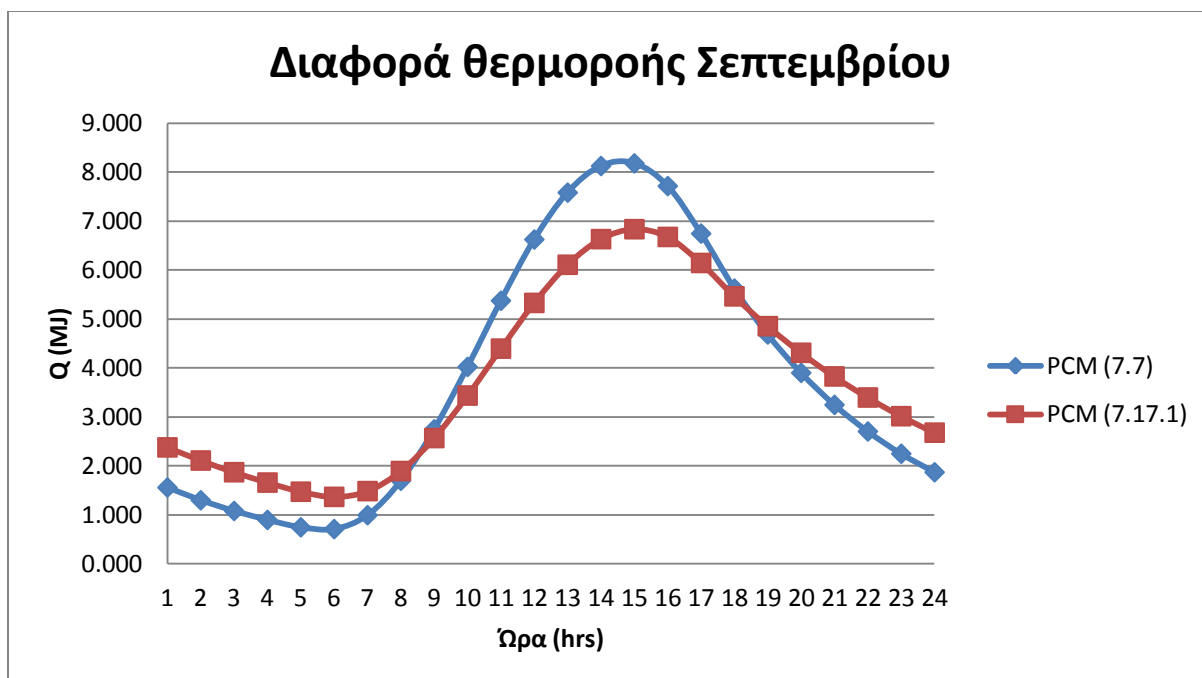
Σχήμα 7.17.1.29 Διάγραμμα θερμοροών του PCM (κεφ 7.7) και του PCM (κεφ 7.17.1) συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουνίου



Σχήμα 7.17.1.30 Διάγραμμα θερμοροών του PCM (κεφ 7.7) και του PCM (κεφ 7.17.1) συναρτήσεϊ της ώρας για την 21^η Ιουλίου



Σχήμα 7.17.1.31 Διάγραμμα θερμοροών του PCM (κεφ 7.7) και του PCM (κεφ 7.17.1) συναρτήσεϊ της ώρας για την 21^η Αυγούστου



Σχήμα 7.17.1.32 Διάγραμμα θερμοροών του PCM (κεφ 7.7) και του PCM (κεφ 7.17.1) συναρτήσει της ώρας για την 21^η Σεπτεμβρίου

Συμπέρασμα:

Όπως είδαμε και στα διαγράμματα των θερμοκρασιών των δύο PCM υπάρχουν διαφορές και στις θερμοροές τους. Βλέπουμε ότι τις πρωινές ώρες η θερμοροή του PCM με το μεγαλύτερο πάχος που υπολογίσαμε σ' αυτό το κεφάλαιο φτάνει σε χαμηλότερα επίπεδα απ' το PCM του κεφαλαίου 7.7. Συγκεκριμένα, η διαφορά αυτή κυμαίνεται από 1000 μέχρι 1500MJ. Αντιθέτως, στις βραδινές ώρες επικρατεί διαφορά στη θερμοροή μόνο που αυτή τη φορά μεγαλύτερες τιμές έχει το μεγαλύτερο PCM. Συγκεκριμένα, η μέγιστη διαφορά των δύο PCM για τις βραδινές ώρες πλησιάζει τα 1000 MJ.

7.17.2 Αλλαγή θερμοκρασίας δωματίου

Στην δεύτερη περίπτωση θα κάνουμε παραμετρική μελέτη αλλάζοντας τη θερμοκρασία δωματίου. Στο κεφάλαιο 7.2 είχαμε πάρει τη θερμοκρασία δωματίου ίση με 26 °C. Σ αυτό το κεφάλαιο θα πάρουμε τη θερμοκρασία ίση με 25 °C. Κατά τ άλλα, όλα τα υπόλοιπα δεδομένα παραμένουν ίδια με του κεφαλαίου 7.2.

Δηλαδή:

- Χαρακτηριστικά της αίθουσας :

Θεωρήσαμε αίθουσα στην Αθήνα με διαστάσεις πλάτος =10m

Μήκος = 10m

Ύψος = 3m

- Ο τοίχος που θα περιέχει το PCM θα είναι πάντα απέναντι από

Υαλοπίνακα: 2,5 x 3 m²

- Ο τοίχος επίσης θα αποτελείται από :

Γυψοσανίδα =10mm

Στρώμα PCM = 40mm

Μόνωση =30mm

Τούβλο =60mm

Σοβάς =10mm

Σε αυτήν την εφαρμογή χρησιμοποιείται ένα υποθετικό υλικό αλλαγής φάσης με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Θερμότητα αλλαγής φάσης ή θερμότητα της τήξης **H=150KJ/Kgr**
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης με θερμοκρασία εισόδου στη διφασική **Ts=20°C** και θερμοκρασία εξόδου από τη διφασική περιοχή ή θερμοκρασία υγροποίησης **Tl=26°C**.
- Ειδική θερμοχωρητικότητα έναρξης της τήξης **Cps=4000 J/Kg°C** και ολοκλήρωσης της τήξης (υγρή φάση) **Cpl=4000J/Kg°C**.
- Ειδική θερμική αγωγιμότητα **k=1,2**.

➤ Πυκνότητα $\rho=1019\text{Kgr/m}^3$

Η προσομοίωση θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση της ενεργός θερμοχωρητικότητας . Θα χρησιμοποιήσουμε την απλή μορφή του $C_{p,\text{eff}}$ δηλαδή η ενεργός θερμοχωρητικότητα θα βρεθεί από τις παρακάτω εξισώσεις και με την χρήση της τριγωνικής μορφής καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας (τριγωνική κατανομή) .

Χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά του υλικού αλλαγής φάσης που επιλέχθηκε για αυτήν την προσομοίωση οδηγούμαστε στις παρακάτω εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας:

- Για $T \leq 20 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$C_{p,\text{eff}} = C_{ps} = 4000 \text{ J/kgK} \quad (7.17.2.1)$$

- Για $20 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 23 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned} C_{p,\text{eff}} &= 4 \times (H - b C_{ps}) \times \frac{T - T_s}{b^2} + C_{ps} \\ &= 14000 \times (T - 20) + 4000 \end{aligned} \quad (7.17.2.2)$$

- Για $23 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 26 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned} C_{p,\text{eff}} &= 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b^2} \times (T - T_s - \frac{b}{2}) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} \\ &= -14000 \times (T - 23) + 46000 \end{aligned} \quad (7.17.2.3)$$

- Για $T > 26 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$C_{p,\text{eff}} = C_{pl} = 4000 \text{ J/kgK} \quad (7.17.2.4)$$

Ισολογισμός :

Η ενέργεια που δίνει το PCM είναι η ενέργεια λόγω της ακτινοβολίας αφαιρούμενη κατά την ενέργεια που δίνει το PCM στο χώρο.

Άρα :

$$m C_p (T_T - T_A) = G_t A_{\pi} 3600 + A_T U 3600 (T_{\delta} - T_A) \quad (7.17.2.5)$$

Όπου :

- C_p , η ειδική θερμοχωρητικότητα η οποία δίνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του PCM σύμφωνα με τις εξισώσεις (7.17.2.1), (7.17.2.2), (7.17.2.3), (7.17.2.4)

- m , η μάζα του PCM

$$m = \rho V = 1019 \times 1,2 = 1222,8 \text{ Kgr}$$

$$\text{με: } V = (\text{επιφάνεια τοίχου}) \times (\text{πάχος PCM}) = 30\text{m}^2 \times 0,04\text{m} = 1,2\text{m}^3$$

Για το πάχος του PCM έχουμε επιλέξει μια λογική τιμή ίση με 4cm.

$$\text{Και } \rho = 1019 \text{Kgr/m}^3$$

- T_A , η θερμοκρασία του PCM στην αρχή της χρονικής περιόδου .
- T_T , η θερμοκρασία του PCM στο τέλος της χρονικής περιόδου.
- G_t , ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου (έχει βρεθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 7.1.)
- A_{π} , η επιφάνεια του υαλοπίνακα στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται υαλοπίνακας διαστάσεων (ύψος) x (μήκος) = (2,5) x (3) m^2 .
Άρα $A_{\pi} = 7,5 \text{ m}^2$
- A_T , η επιφάνεια τοίχου στον οποίο έχει ενσωματωθεί το PCM με διαστάσεις (πλάτος αίθουσας) x (ύψος) = (10) x (3) m^2
Άρα $A_T = 30 \text{ m}^2$

- U, η ειδική θερμική διαπερατότητα, η οποία μπορεί να βρεθεί με βάση την εξίσωση :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{l}{k} = \frac{1}{8} + \frac{0,01}{1,2} = 0,133$$

$$\text{Άρα } U = 7,52 \text{ W/m}^2$$

με $\frac{1}{h}$, η θερμική αντίσταση συναγωγής και $\frac{l}{k}$, η θερμική αντίσταση αγωγής

διαμέσου της γυψοσανίδας που υπάρχει πριν το στρώμα του PCM και η οποία έχει πάχος $l = 10\text{mm}$ και θερμική αγωγιμότητα $k = 0,12 \text{ W /m C}$

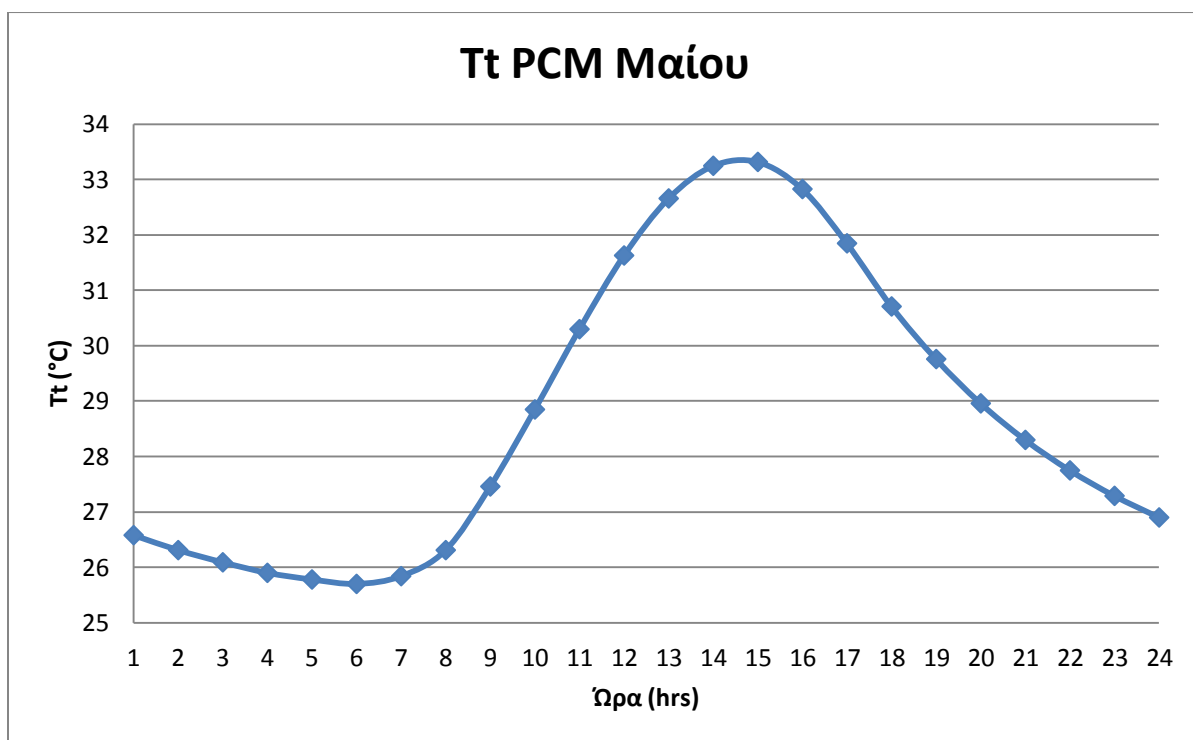
- T_{δ} , η θερμοκρασία στο εσωτερικό της αίθουσας όπου στην περίπτωση μας είναι ίση με $T_{\delta} = 25^{\circ}\text{C}$

- Για την 21η Μαΐου

Ωρα	Gt (KW/m ²)	T _T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	25,70
7	0,076473	25,84
8	0,158606	26,31
9	0,247887	27,46
10	0,326386	28,85
11	0,379743	30,30
12	0,401797	31,63
13	0,386401	32,66
14	0,338614	33,25
15	0,260975	33,32
16	0,162475	32,83
17	0,059674	31,85
18	0	30,71
19	0	29,76
20	0	28,96

21	0	28,30
22	0	27,75
23	0	27,29
24	0	26,90
1	0	26,58
2	0	26,31
3	0	26,09
4	0	25,90
5	0	25,78

Σχήμα 7.17.2.1 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Μαΐου για νότιο προσανατολισμό.

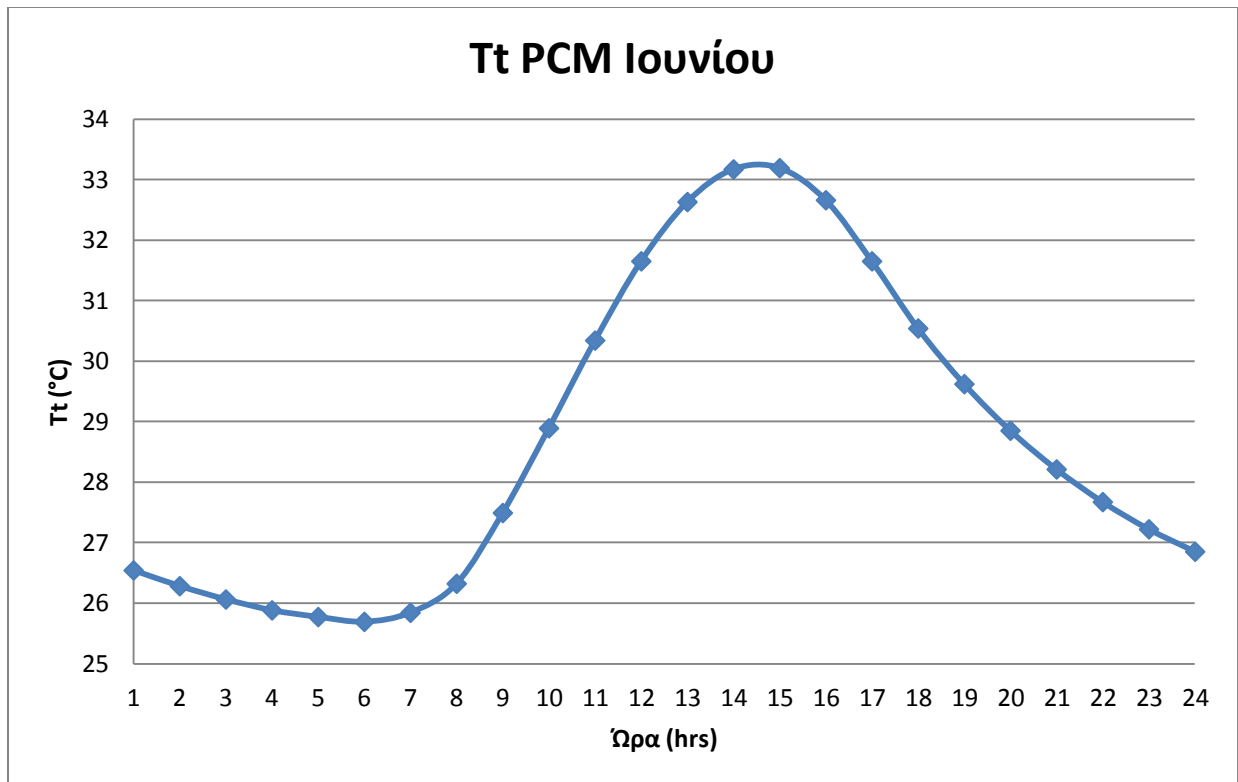


Σχήμα 7.17.2.2 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Μαΐου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21^η Ιουνίου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	25,69
7	0,080299	25,84
8	0,162635	26,32
9	0,251822	27,49
10	0,329689	28,89
11	0,381024	30,34
12	0,398017	31,65
13	0,378546	32,63
14	0,328165	33,17
15	0,249801	33,19
16	0,150684	32,66
17	0,049063	31,65
18	0	30,54
19	0	29,62
20	0	28,85
21	0	28,21
22	0	27,67
23	0	27,22
24	0	26,85
1	0	26,54
2	0	26,28
3	0	26,06
4	0	25,88
5	0	25,77

Σχήμα 7.17.2.3 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό.

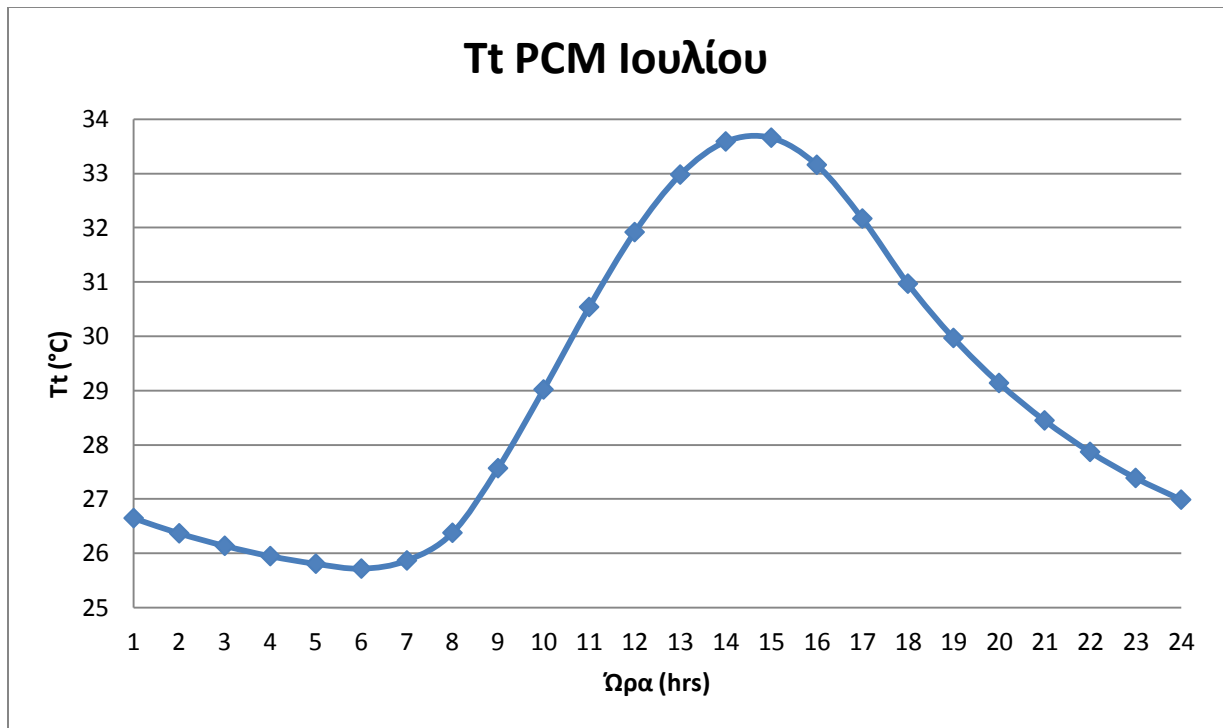


Σχήμα 7.17.2.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21^η Ιουλίου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	25,72
7	0,077277	25,87
8	0,16312	26,38
9	0,257285	27,57
10	0,340239	29,02
11	0,396315	30,54
12	0,41773	31,92
13	0,401056	32,98
14	0,351155	33,59
15	0,272563	33,66
16	0,17161	33,16
17	0,067114	32,17
18	0	30,97
19	0	29,97
20	0	29,14
21	0	28,45
22	0	27,87
23	0	27,39
24	0	26,99
1	0	26,65
2	0	26,37
3	0	26,14
4	0	25,95
5	0	25,81

Σχήμα 7.17.2.5 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό.

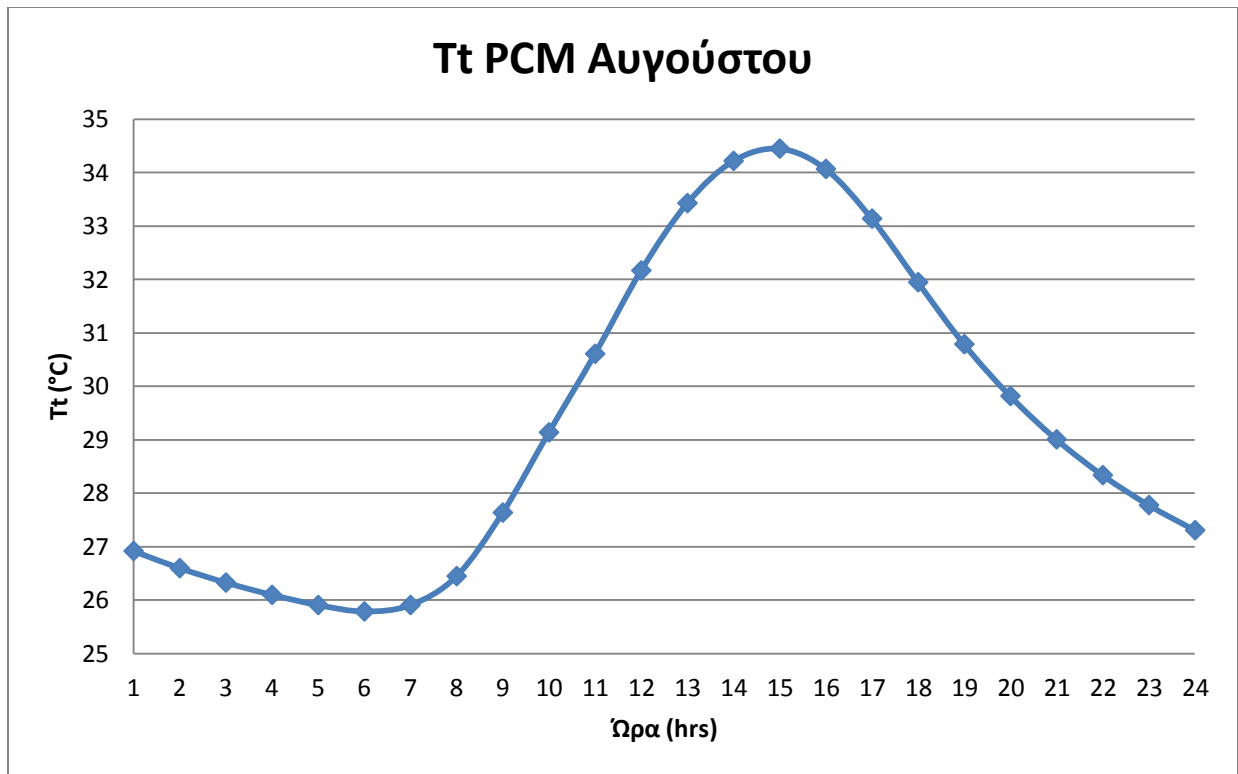


Σχήμα 7.17.2.6 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό

➤ Για την 21^η Αυγούστου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	25,79
7	0,066465	25,91
8	0,158305	26,45
9	0,260143	27,64
10	0,352122	29,14
11	0,418377	30,61
12	0,452968	32,17
13	0,44518	33,43
14	0,397724	34,22
15	0,320498	34,45
16	0,216425	34,07
17	0,10575	33,14
18	0,030856	31,95
19	0	30,79
20	0	29,82
21	0	29,01
22	0	28,34
23	0	27,78
24	0	27,31
1	0	26,92
2	0	26,60
3	0	26,33
4	0	26,10
5	0	25,91

Σχήμα 7.17.2.7 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό.

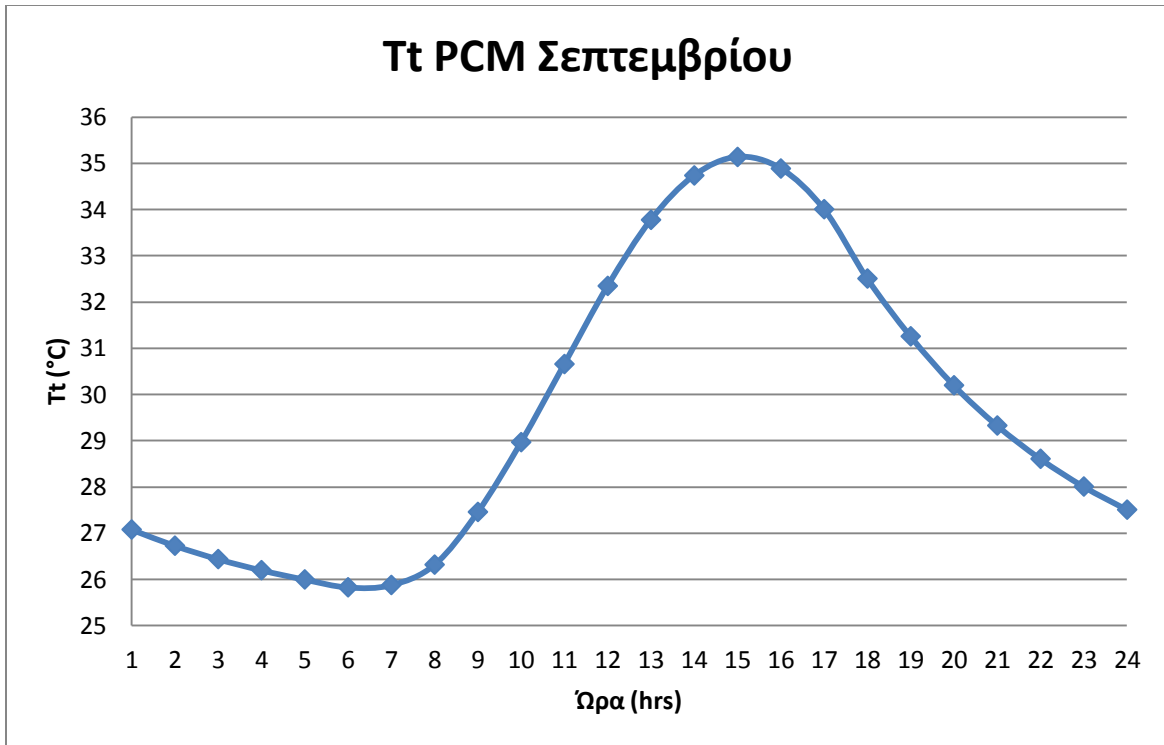


Σχήμα 7.17.2.8 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό

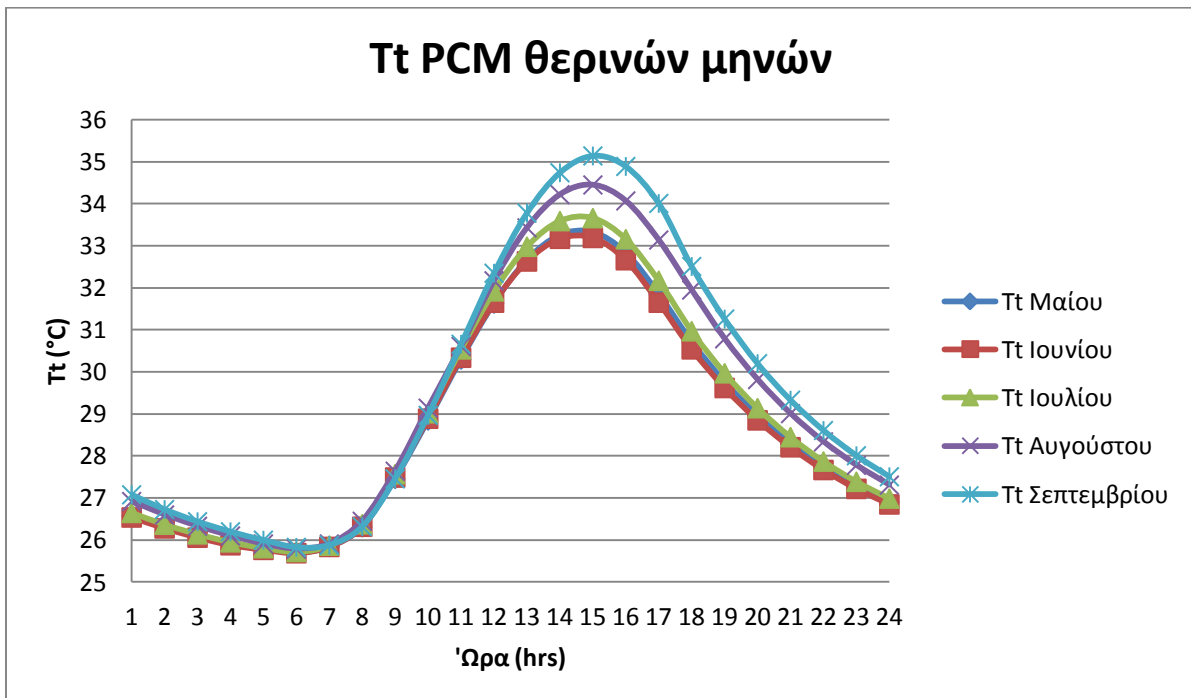
➤ Για την 21^η Σεπτεμβρίου

Ωρα	Gt (KW/m²)	T_T (θερμοκρασία PCM °C)
6	0	25,83
7	0,040322	25,88
8	0,141111	26,32
9	0,247334	27,46
10	0,348416	28,97
11	0,425997	30,66
12	0,477016	32,35
13	0,480858	33,78
14	0,438651	34,74
15	0,366994	35,14
16	0,261053	34,89
17	0,139856	34,01
18	0	32,51
19	0	31,26
20	0	30,20
21	0	29,33
22	0	28,61
23	0	28,01
24	0	27,51
1	0	27,08
2	0	26,73
3	0	26,44
4	0	26,20
5	0	26,00

Σχήμα 7.17.2.9 Θερμοκρασία που παίρνει το PCM κατά την 21^η Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό

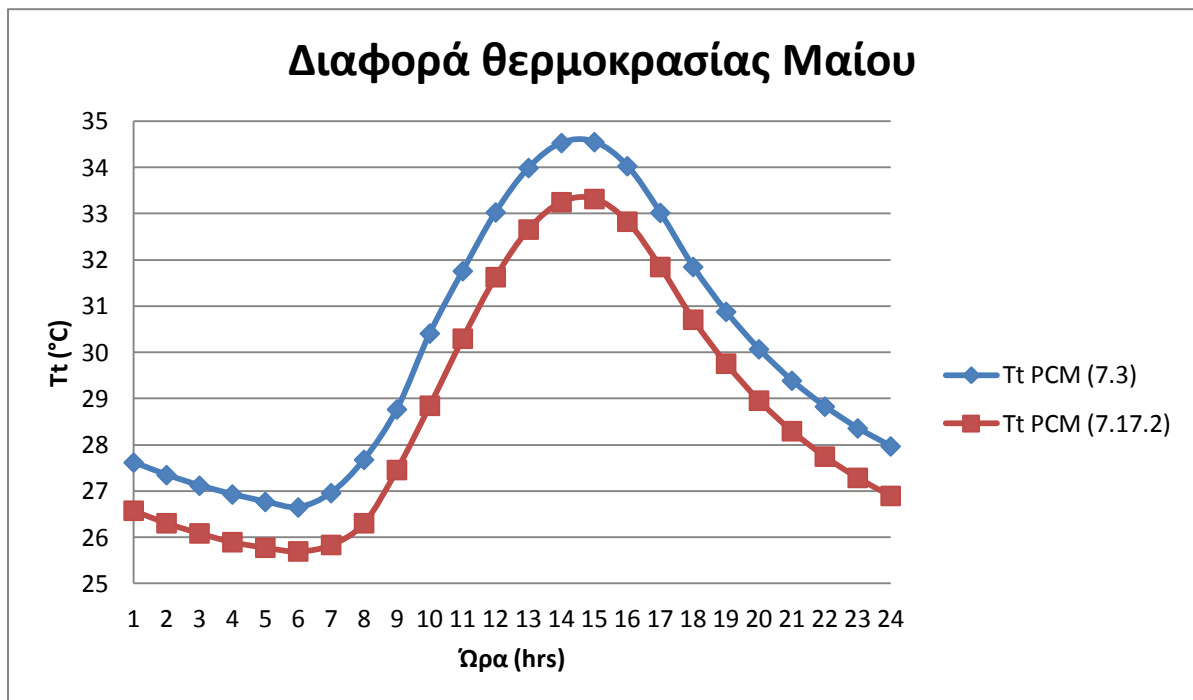


Σχήμα 7.17.2.10 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά την 21^η Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό

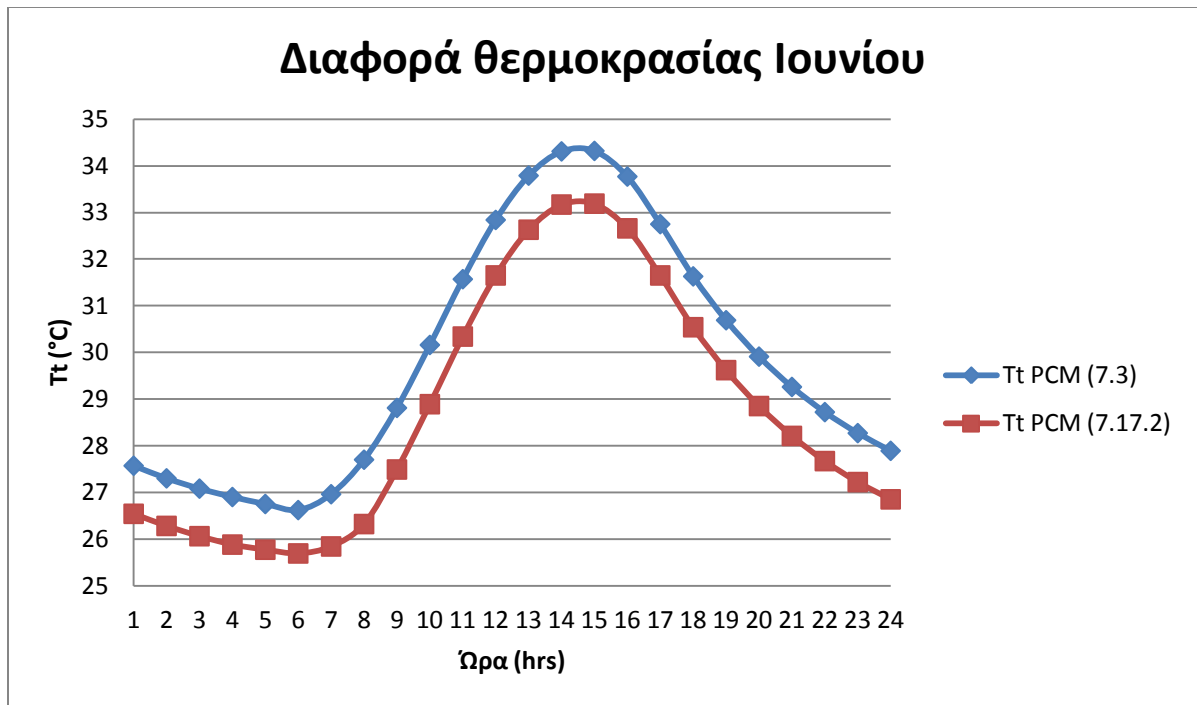


Σχήμα 7.17.2.11 Διάγραμμα θερμοκρασίας PCM – ώρας κατά τους θερινούς μήνες για νότιο προσανατολισμό

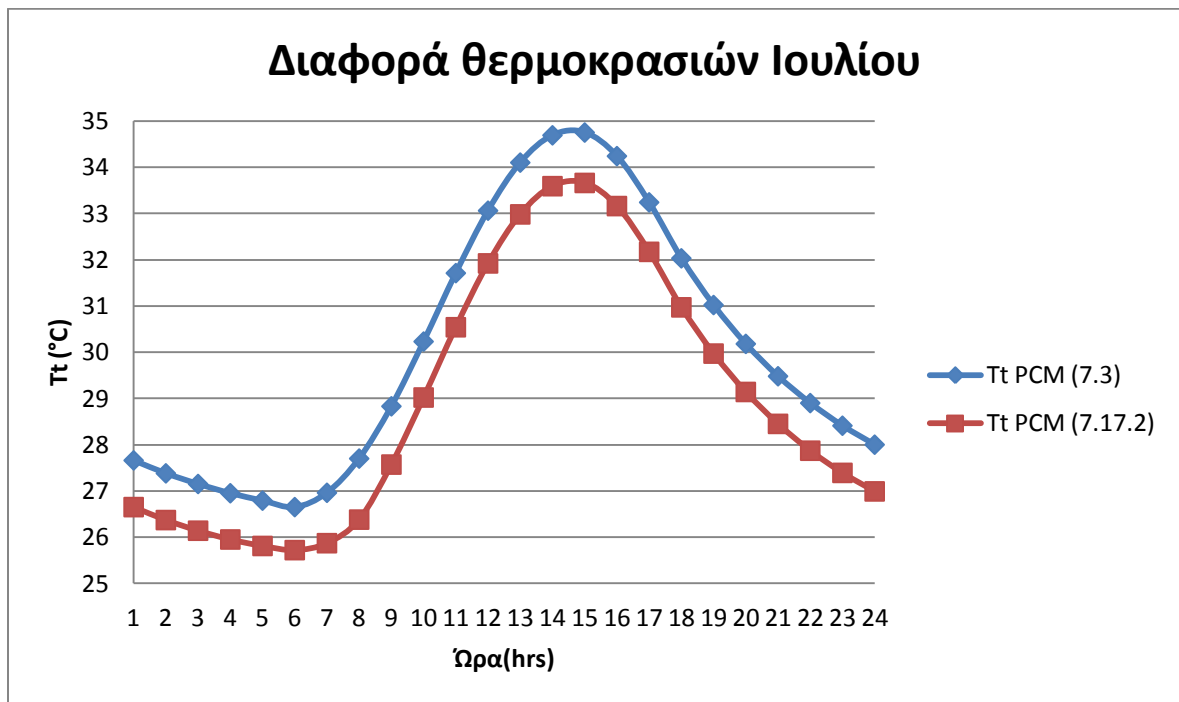
Παρακάτω θα δούμε πώς διαφέρουν και διαγραμματικά οι θερμοκρασίες του PCM του κεφαλαίου 7.3 και του παρόντος PCM.



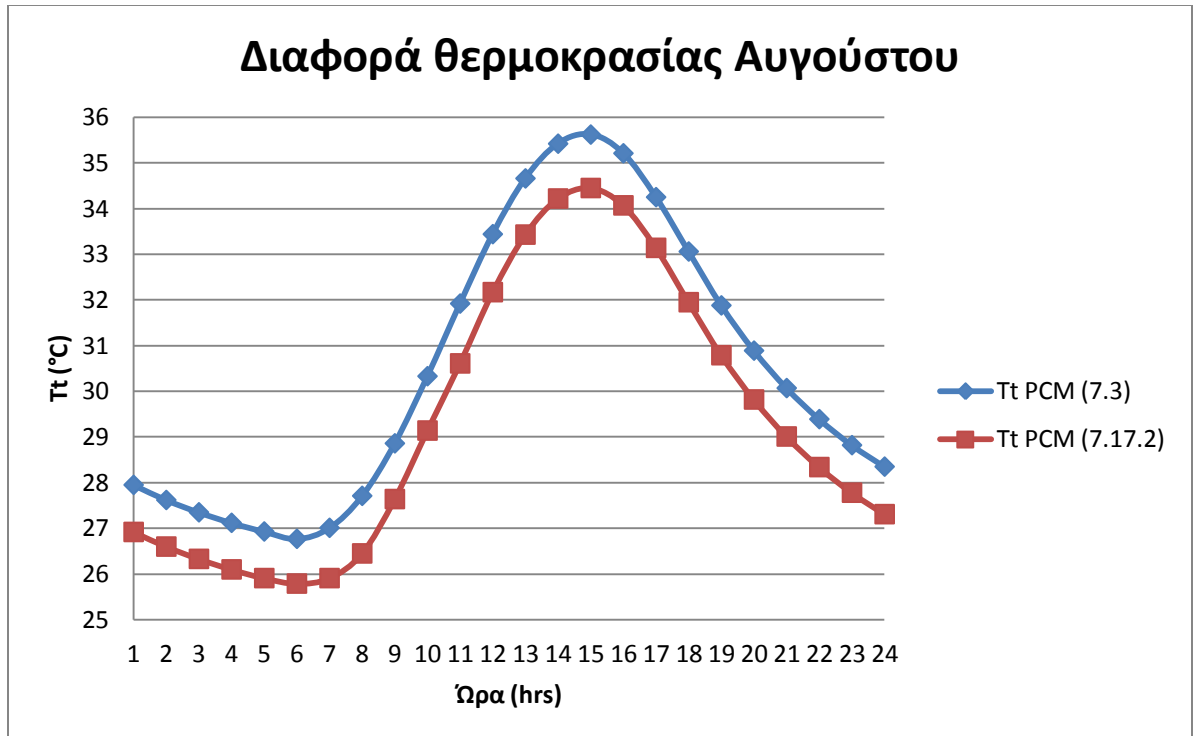
Σχήμα 7.17.2.12 Διάγραμμα θερμοκρασιακής διαφοράς PCM (κεφ 7.3) – PCM (κεφ 7.17.2) για την 21^η Μαΐου για νότιο προσανατολισμό



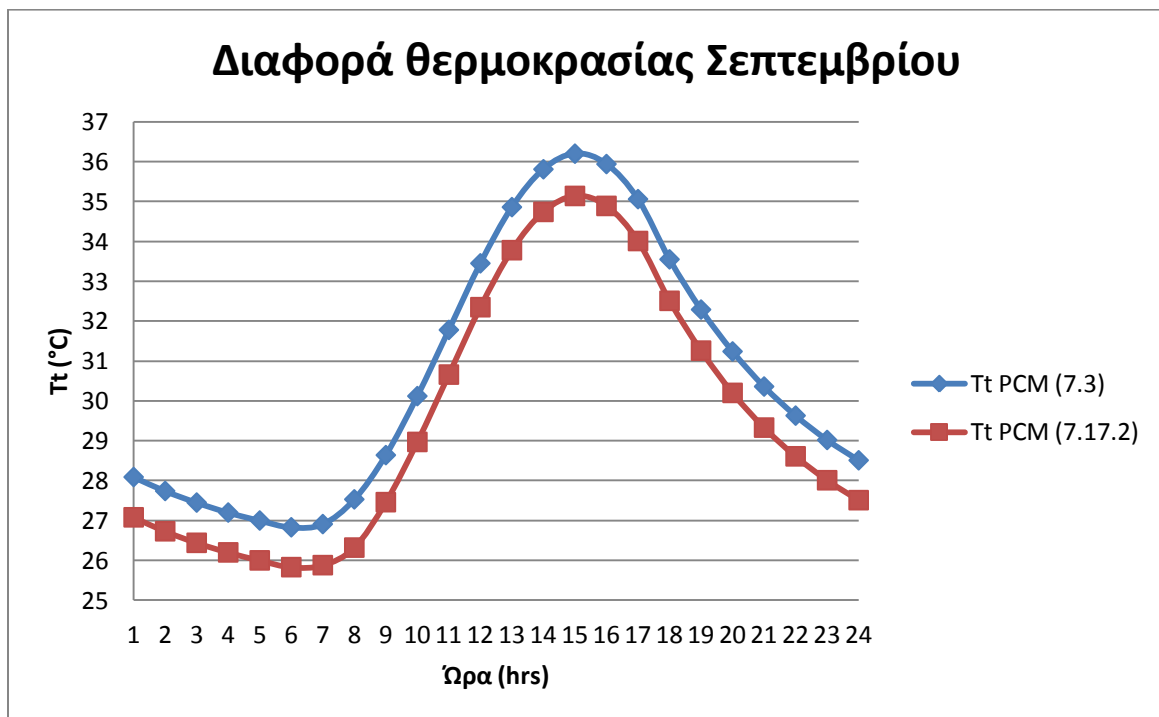
Σχήμα 7.17.2.13 Διάγραμμα θερμοκρασιακής διαφοράς PCM (κεφ 7.3) – PCM (κεφ 7.17.2) για την 21^η Ιουνίου για νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 7.17.2.14 Διάγραμμα θερμοκρασιακής διαφοράς PCM (κεφ 7.3) – PCM (κεφ 7.17.2) για την 21^η Ιουλίου για νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 7.17.2.15 Διάγραμμα θερμοκρασιακής διαφοράς PCM (κεφ 7.3) – PCM (κεφ 7.17.2) για την 21^η Αυγούστου για νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 7.17.2.16 Διάγραμμα θερμοκρασιακής διαφοράς PCM (κεφ 7.3) – PCM (κεφ 7.17.2) για την 21^η Σεπτεμβρίου για νότιο προσανατολισμό

Συμπέρασμα:

Από τα διαγράμματα βλέπουμε κάτι που ούτως ή αλλιώς το αναμέναμε. Η μείωση της θερμοκρασίας του δωματίου κατά έναν βαθμό αλλάζει τη μορφή των διαγραμμάτων. Όπως βλέπουμε το PCM αποκτά θερμοκρασία περίπου κατά μια μονάδα μικρότερη από την πρώτη περίπτωση όπου η θερμοκρασία δωματίου ήταν 26 °C. Άρα, διαπιστώνουμε ότι η θερμοκρασία που έχει το δωμάτιο εξ αρχής επηρεάζει τη θερμοκρασία που θα πάρει το PCM κατά τη διάρκεια της ημέρας με την ηλιακή ακτινοβολία.

Παρακάτω θα δούμε τι γίνεται και με τις θερμοροές στη μέλετη που κάνουμε αλλάζοντας το πάχος του PCM.

Για τον υπολογισμό της θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω ισολογισμό.

$$A_T U \left(\frac{T_i + T_{i+1}}{2} - 26 \right) 3600 = Q_{i,i+1} \quad (7.17.2.6)$$

➤ Για τον Μάιο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	26,58	26,31	1.1735
2-3	26,31	26,09	0.9745
3-4	26,09	25,90	0.8080
4-5	25,90	25,78	0.6822
5-6	25,78	25,70	0.6009
6-7	25,70	25,84	0.6253
7-8	25,84	26,31	0.8730
8-9	26,31	27,46	1.5309
9-10	27,46	28,85	2.5623
10-11	28,85	30,30	3.7156
11-12	30,30	31,63	4.8445
12-13	31,63	32,66	5.8028
13-14	32,66	33,25	6.4607
14-15	33,25	33,32	6.7287
15-16	33,32	32,83	6.5581
16-17	32,83	31,85	5.9612
17-18	31,85	30,71	5.1003
18-19	30,71	29,76	4.2516
19-20	29,76	28,96	3.5410
20-21	28,96	28,30	2.9481
21-22	28,30	27,75	2.4567
22-23	27,75	27,29	2.0466
23-24	27,29	26,90	1.7014
24-1	26,90	26,58	1.4131

Σχήμα 7.17.2.17 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Μαΐου.

➤ Για τον Ιουνίο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	26,54	26,28	1.1451
2-3	26,28	26,06	0.9502
3-4	26,06	25,88	0.7877
4-5	25,88	25,77	0.6700
5-6	25,77	25,69	0.5928
6-7	25,69	25,84	0.6213
7-8	25,84	26,32	0.8771
8-9	26,32	27,49	1.5471
9-10	27,49	28,89	2.5907
10-11	28,89	30,34	3.7481
11-12	30,34	31,65	4.8688
12-13	31,65	32,63	5.7988
13-14	32,63	33,17	6.4160
14-15	33,17	33,19	6.6434
15-16	33,19	32,66	6.4363
16-17	32,66	31,65	5.8110
17-18	31,65	30,54	4.9501
18-19	30,54	29,62	4.1257
19-20	29,62	28,85	3.4394
20-21	28,85	28,21	2.8669
21-22	28,21	27,67	2.3877
22-23	27,67	27,22	1.9857
23-24	27,22	26,85	1.6527
24-1	26,85	26,54	1.3766

Σχήμα 7.17.2.18 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Ιουνίου

➤ Για τον Ιουλίο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	26,65	26,37	1.2263
2-3	26,37	26,14	1.0192
3-4	26,14	25,95	0.8487
4-5	25,95	25,81	0.7147
5-6	25,81	25,72	0.6213
6-7	25,72	25,87	0.6456
7-8	25,87	26,38	0.9136
8-9	26,38	27,57	1.6040
9-10	27,57	29,02	2.6760
10-11	29,02	30,54	3.8821
11-12	30,54	31,92	5.0597
12-13	31,92	32,98	6.0505
13-14	32,98	33,59	6.7287
14-15	33,59	33,66	7.0048
15-16	33,66	33,16	6.8302
16-17	33,16	32,17	6.2252
17-18	32,17	30,97	5.3358
18-19	30,97	29,97	4.4425
19-20	29,97	29,14	3.6993
20-21	29,14	28,45	3.0821
21-22	28,45	27,87	2.5664
22-23	27,87	27,39	2.1359
23-24	27,39	26,99	1.7786
24-1	26,99	26,65	1.4781

Σχήμα 7.17.2.19 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Ιουλίου.

➤ Για τον Αύγουστο:

Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	26,92	26,60	1.4294
2-3	26,60	26,33	1.1898
3-4	26,33	26,10	0.9867
4-5	26,10	25,91	0.8162
5-6	25,91	25,79	0.6903
6-7	25,79	25,91	0.6903
7-8	25,91	26,45	0.9583
8-9	26,45	27,64	1.6608
9-10	27,64	29,14	2.7532
10-11	29,14	30,61	3.9592
11-12	30,61	32,17	5.1897
12-13	32,17	33,43	6.3348
13-14	33,43	34,22	7.1673
14-15	34,22	34,45	7.5815
15-16	34,45	34,07	7.5206
16-17	34,07	33,14	6.9886
17-18	33,14	31,95	6.1277
18-19	31,95	30,79	5.1734
19-20	30,79	29,82	4.3085
20-21	29,82	29,01	3.5856
21-22	29,01	28,34	2.9846
22-23	28,34	27,78	2.4852
23-24	27,78	27,31	2.0669
24-1	27,31	26,92	1.7177

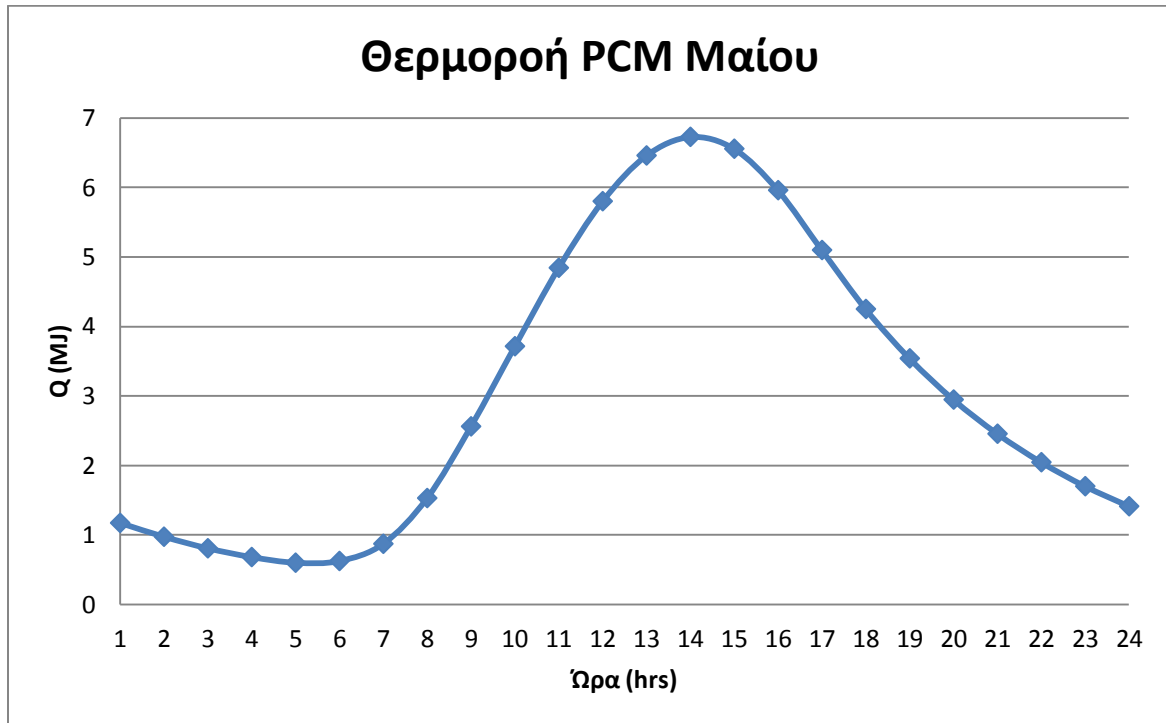
Σχήμα 7.17.2.20 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Αυγούστου.

➤ Για τον Σεπτέμβριο:

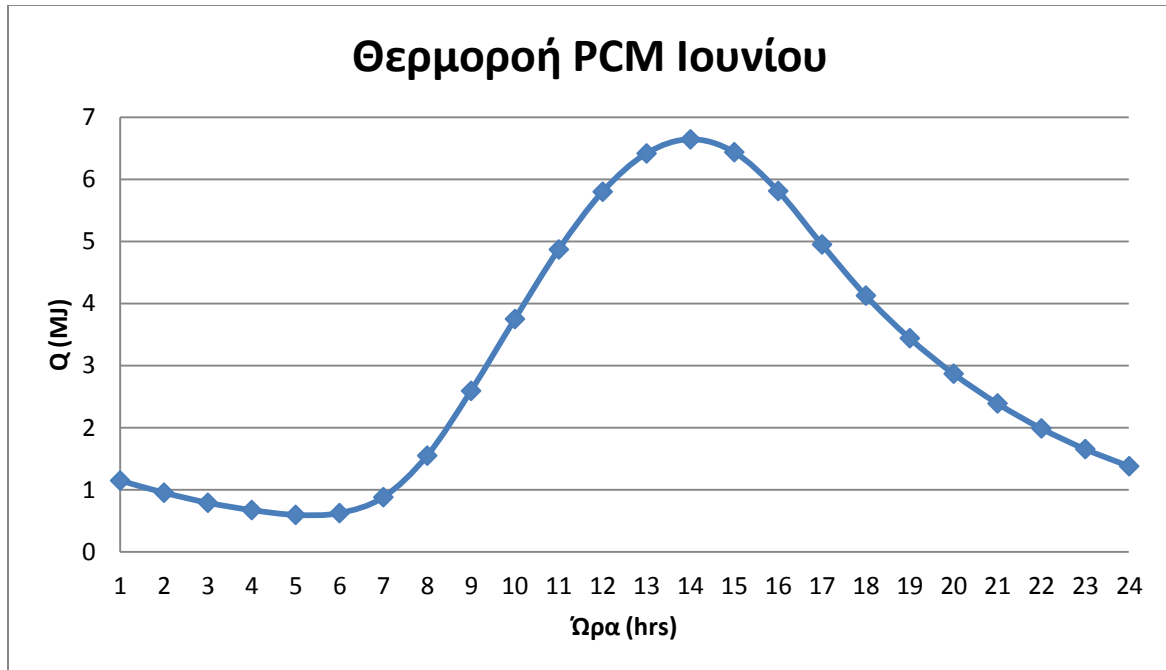
Ωρα (hrs)	T_i (°C)	T_{i+1} (°C)	Q_{i,i+1} (MJ)
1-2	27,08	26,73	1.5471
2-3	26,73	26,44	1.2872
3-4	26,44	26,20	1.0720
4-5	26,20	26,00	0.8933
5-6	26,00	25,83	0.7431
6-7	25,83	25,88	0.6943
7-8	25,88	26,32	0.8933
8-9	26,32	27,46	1.5349
9-10	27,46	28,97	2.6110
10-11	28,97	30,66	3.9105
11-12	30,66	32,35	5.2831
12-13	32,35	33,78	6.5500
13-14	33,78	34,74	7.5206
14-15	34,74	35,14	8.0728
15-16	35,14	34,89	8.1337
16-17	34,89	34,01	7.6749
17-18	34,01	32,51	6.7084
18-19	32,51	31,26	5.5917
19-20	31,26	30,20	4.6536
20-21	30,20	29,33	3.8699
21-22	29,33	28,61	3.2242
22-23	28,61	28,01	2.6882
23-24	28,01	27,51	2.2415
24-1	27,51	27,08	1.8639

Σχήμα 7.17.2.21 Πίνακας θερμοροών του PCM κατά τη διάρκεια μίας ωρας για την 21^η Σεπτεμβρίου.

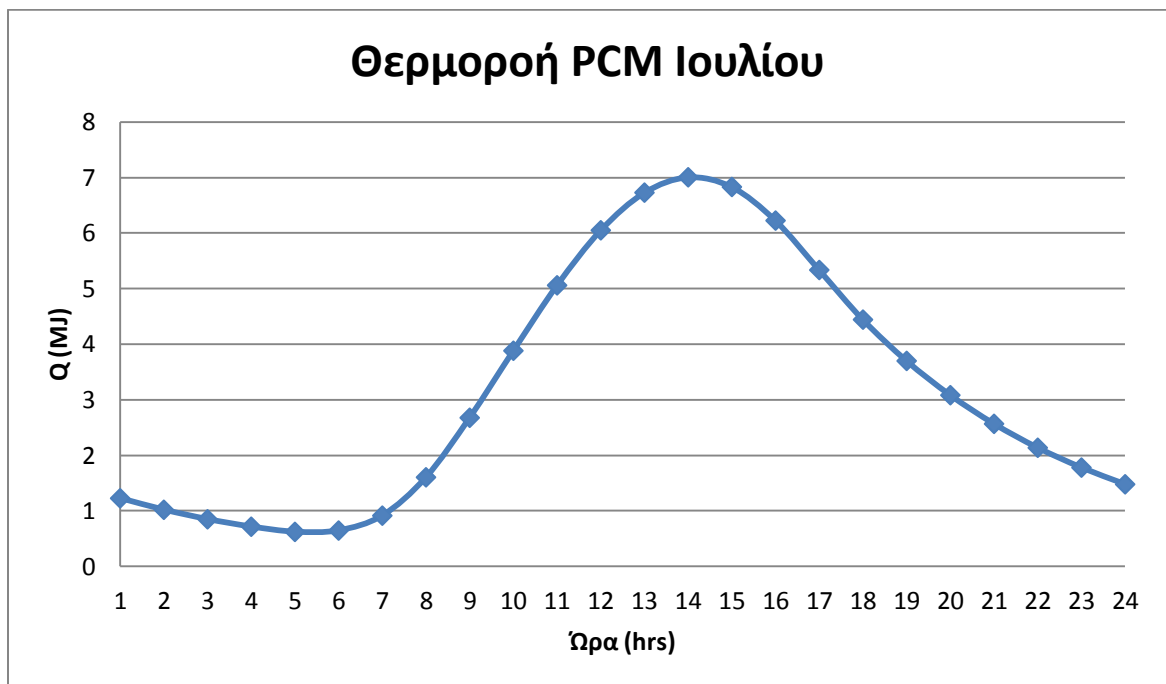
Παρακάτω θα δούμε τα παραπάνω αποτελέσματα και διαγραμματικά αλλά και τη συνολική εικόνα των θερμορών των θερινών μηνών.



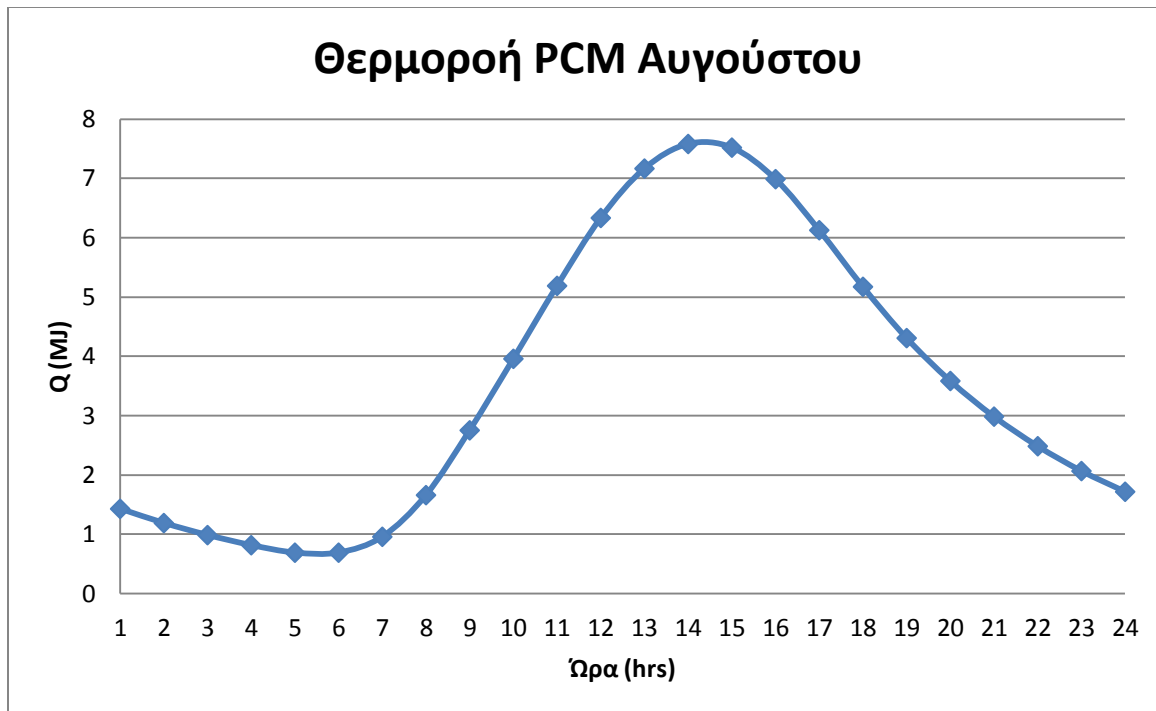
Σχήμα 7.17.2.22 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Μαΐου



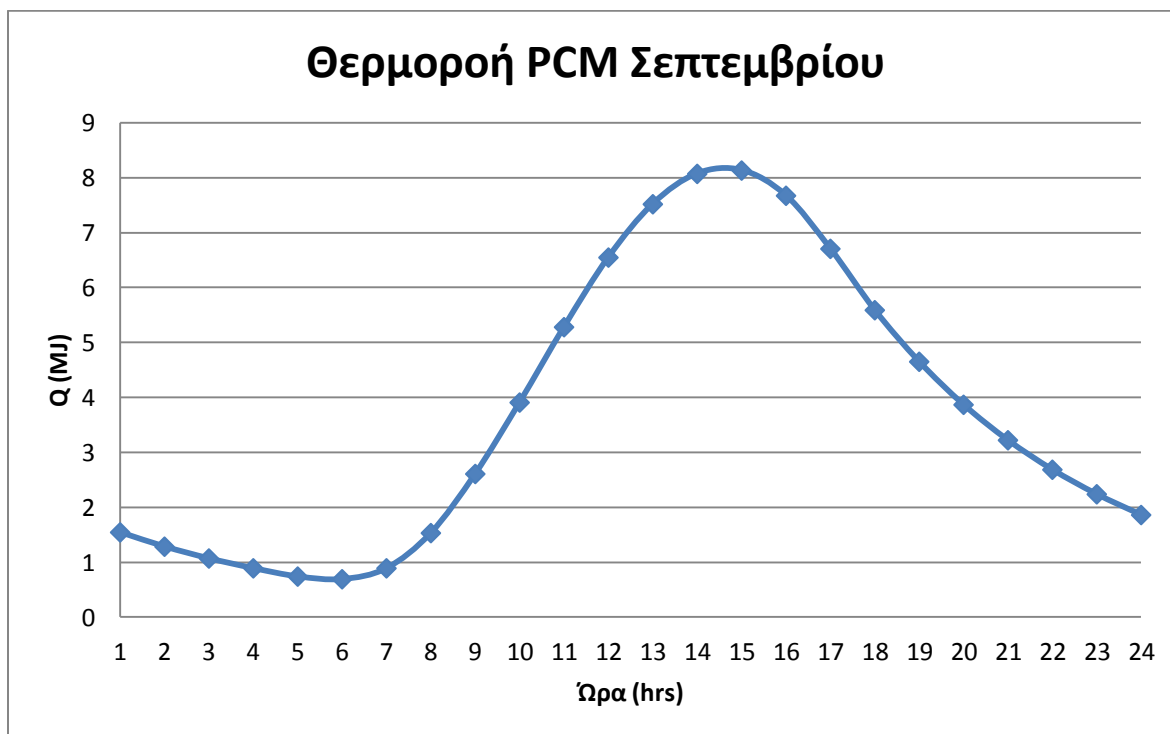
Σχήμα 7.17.2.23 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουνίου



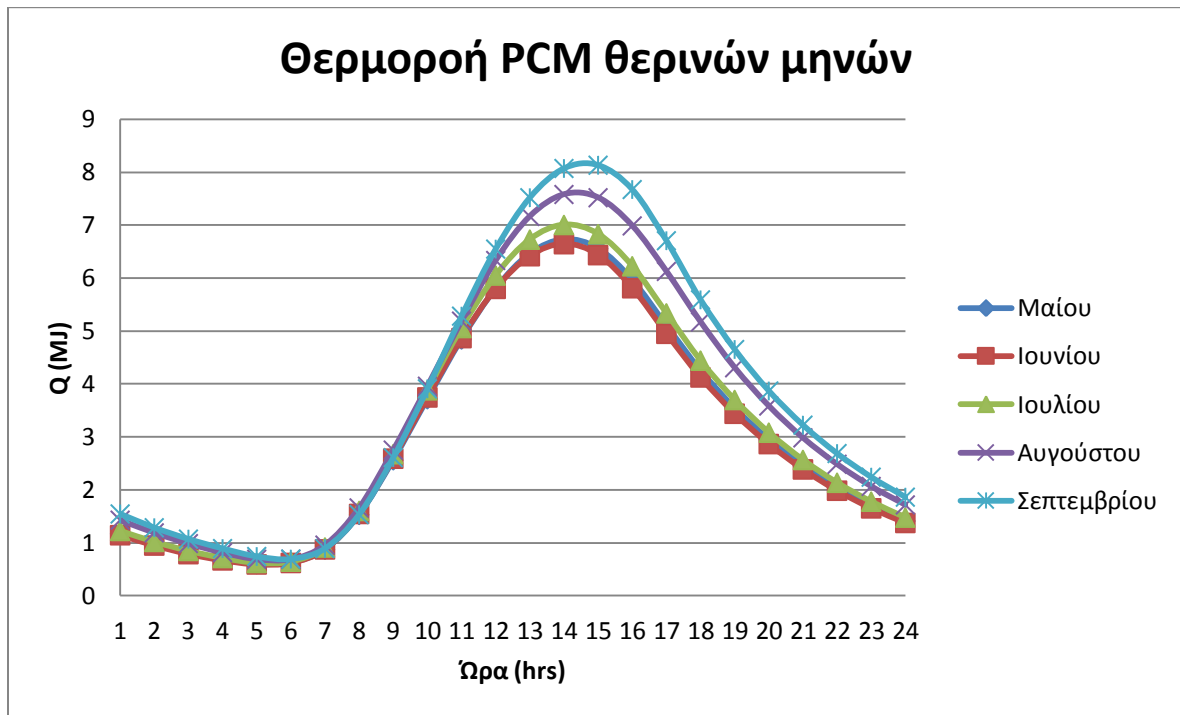
Σχήμα 7.17.2.24 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουλίου



Σχήμα 7.17.2.25 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Αυγούστου

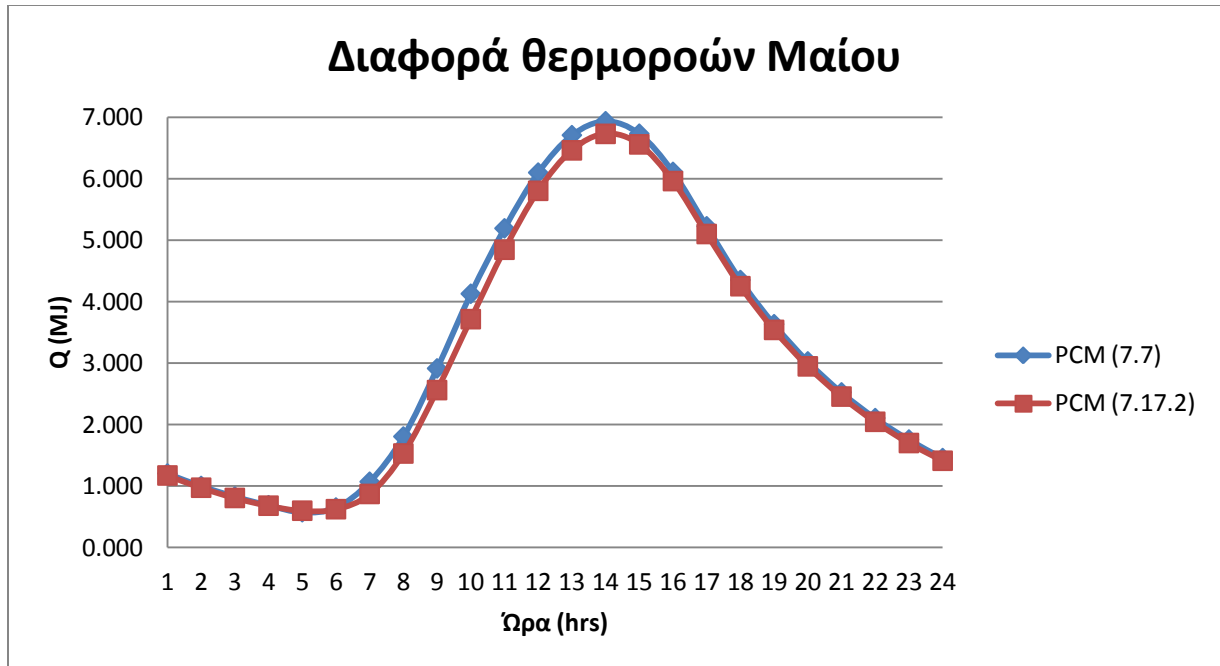


Σχήμα 7.17.2.26 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για την 21^η Σεπτεμβρίου

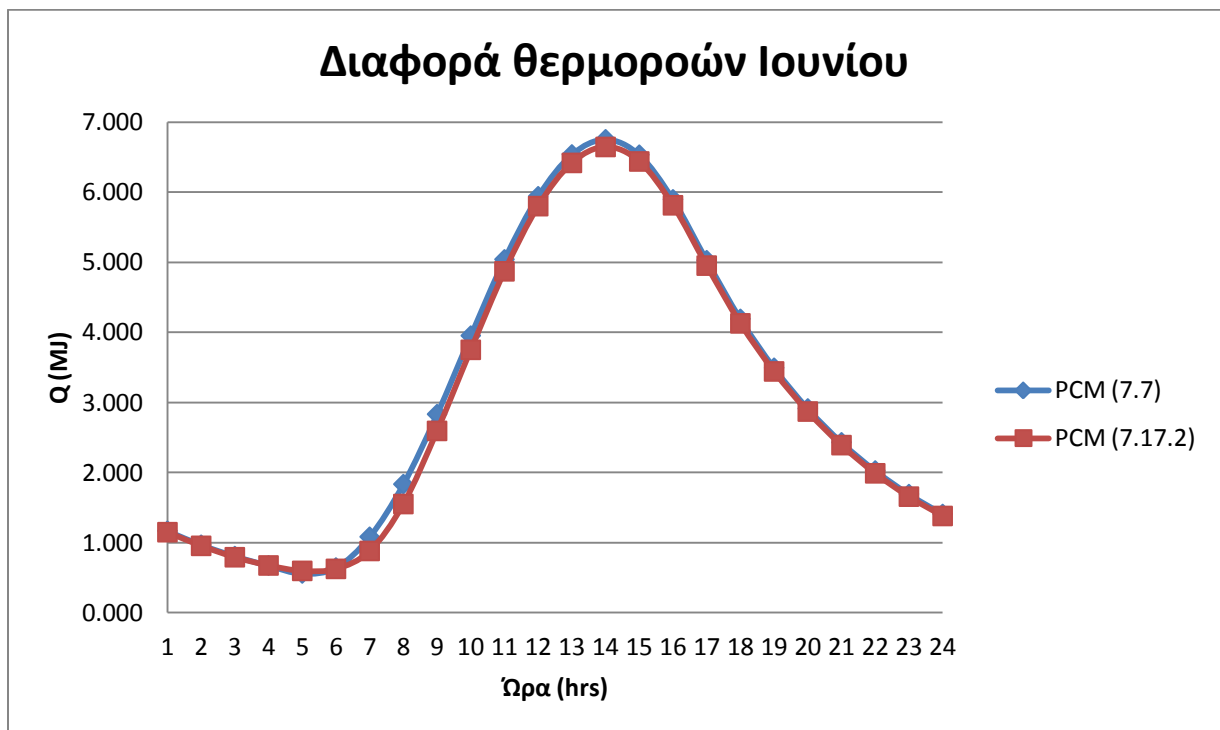


Σχήμα 7.17.2.27 Διάγραμμα θερμοροής του PCM συναρτήσει της ώρας για τους θερινούς μήνες

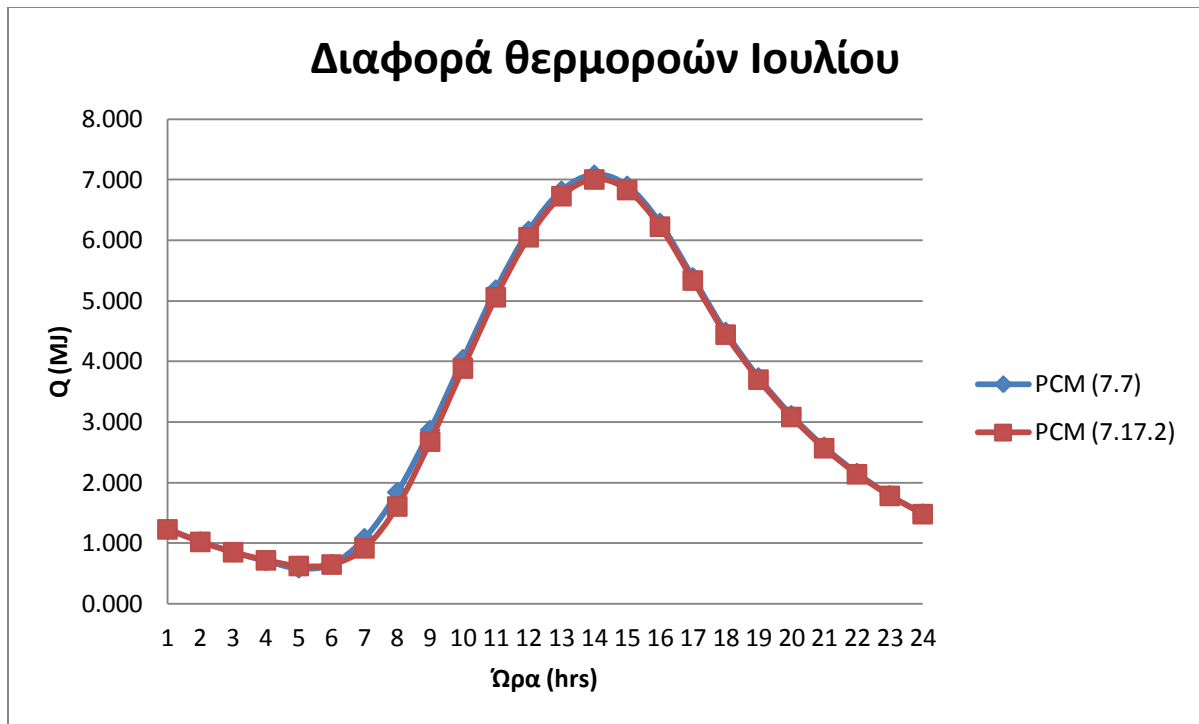
Στη συνέχεια θα δούμε σε διαγράμματα τι διαφορές υπάρχουν για τις θερμοροές του PCM του κεφαλαίου 7.7 και αυτές του παρόντος κεφαλαίου με την παραμετρική μελέτη που κάναμε.



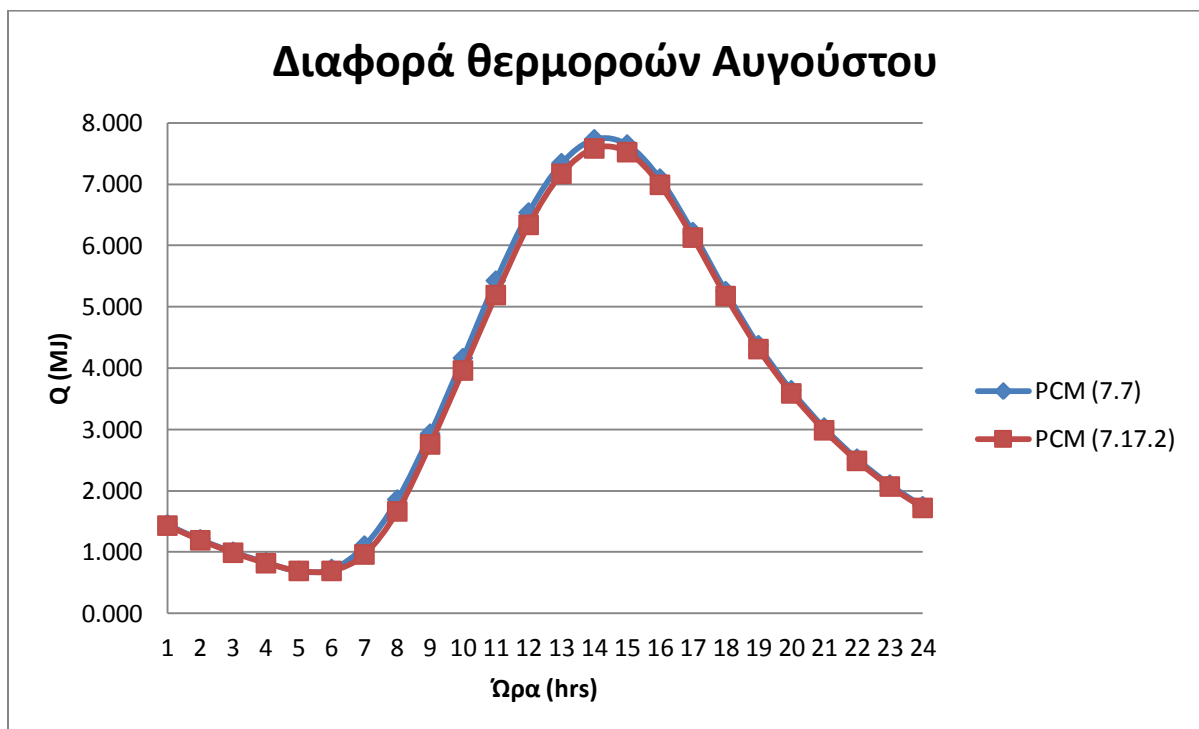
Σχήμα 7.17.2.28 Διάγραμμα θερμορών του PCM (κεφ 7.7) και του PCM (κεφ 7.17.2) συναρτήσει της ώρας για την 21^η Μαΐου



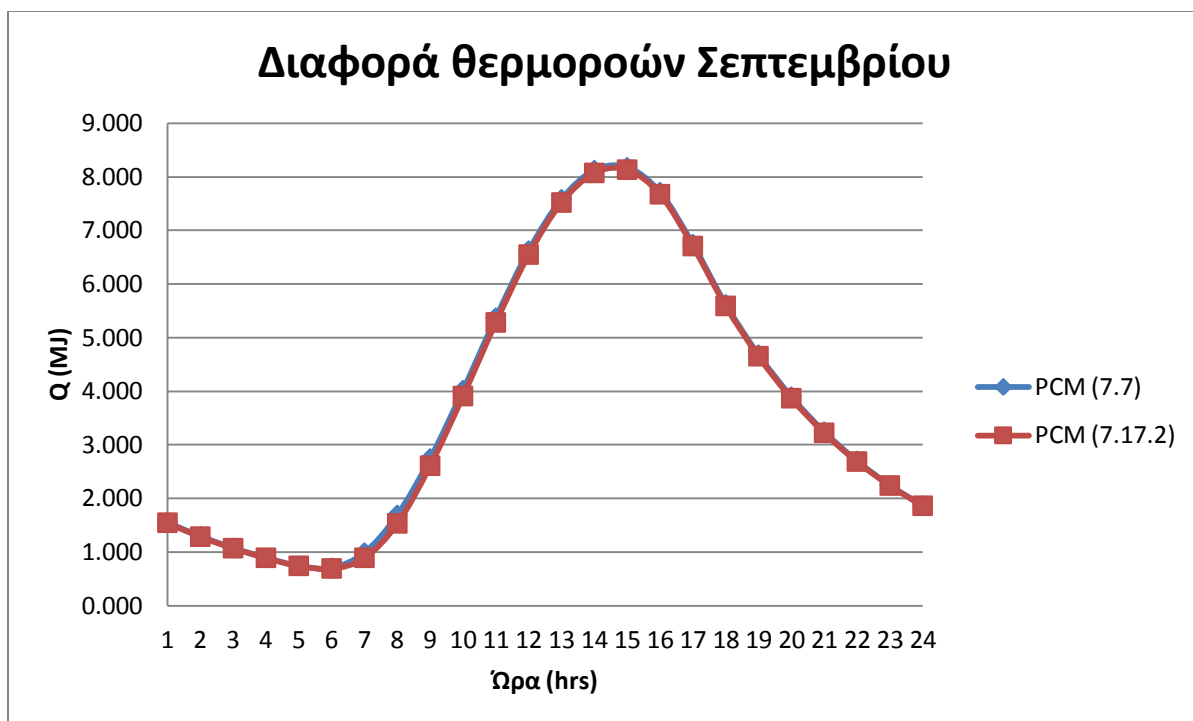
Σχήμα 7.17.2.29 Διάγραμμα θερμορών του PCM (κεφ 7.7) και του PCM (κεφ 7.17.2) συναρτήσει της ώρας για την 21^η Ιουνίου



Σχήμα 7.17.2.30 Διάγραμμα θερμοροών του PCM (κεφ 7.7) και του PCM (κεφ 7.17.2) συναρτήσεως της ώρας για την 21^η Ιουλίου



Σχήμα 7.17.2.31 Διάγραμμα θερμοροών του PCM (κεφ 7.7) και του PCM (κεφ 7.17.2) συναρτήσεως της ώρας για την 21^η Αυγούστου



Σχήμα 7.17.2.32 Διάγραμμα θερμοροών του PCM (κεφ 7.7) και του PCM (κεφ 7.17.2) συναρτήσεως της ώρας για την 21^η Σεπτεμβρίου

Συμπέρασμα:

Από τα διαγράμματα βλέπουμε ότι η διαφορά των θερμοροών για τις δύο περιπτώσεις είναι τόσο μικρή που σχεδόν δεν διακρίνεται. Κι αυτό οφείλεται στην ήδη μικρή θερμοκρασιακή διαφορά που είχαν. Η μέγιστη διαφορά θερμοροής εμφανίζεται τις πρωινές ώρες περίπου στις 8, 9 και 10 η ώρα. Αυτή η διαφορά αγγίζει τα 0,4 MJ. Συνεπώς, καταλήγουμε ότι η θερμοροή δεν αλλάζει πολύ όταν η θερμοκρασία του δωματίου αλλάζει μόνο έναν βαθμό. Παρόλα αυτά όσο απομακρύνουμε την θερμοκρασία δωματίου από τους 26 °C θα βλέπαμε και μεγαλύτερη διαφορά στις θερμοροές τους.

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κάνοντας μια ανασκόπηση στα διαγράμματα και στα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας, επιβεβαιώνουμε τις αρχικές μας παρατηρήσεις για τα υλικά αλλαγής φάσης. Από το θεωρητικό μέρος είχαμε τονίσει τα πλεονεκτήματα που μπορούν να προσφέρουν τα PCM στις κτιριακές εγκαταστάσεις. Είδαμε ότι στους θερινούς μήνες συμφέρει και οικονομικά και σαν ποιότητα ζωής να τοποθετήσουμε υλικά αλλαγής φάσης στους τοίχους. Τα PCM είναι υλικά αλλαγής φάσης. Όπως λέει και το όνομά τους, τα PCM έχουν την ιδιότητα να απορροφούν την θερμότητα που τους προσδίδεται και να την εκμεταλλεύονται αλλάζοντας την φάση τους (από στερεή σε υγρή και ανάποδα). Η ιδιότητα των PCM είναι αυτή που τα κάνει τόσο συμφέροντα. Κι αυτό γιατί κατά τους θερινούς μήνες τις πρωινές ώρες όση θερμότητα εισπράτουν τα PCM την χρησιμοποιούν στο να μετατρέψουν την σύστασή τους και δεν αφήνουν έτσι να ανέβει πολύ η θερμοκρασία του τοίχου συγκριτικά με το απλό μπετόν. Τις βραδινές ώρες, που η θερμοκρασία περιβάλλοντος ούτως ή άλλως έχει μειωθεί, τα PCM αποβάλλουν με αργό ρυθμό την θερμότητα που έχουν εισπράξει όλη μέρα αλλάζοντας και πάλι τη σύστασή τους (αυτή τη φορά από υγρή σε στερεή φάση). Μ' αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να κρατήσουμε σε χαμηλότερα επίπεδα τη θερμοκρασία του τοίχου συνεπώς και του δωματίου. Άρα μπορούμε να εξοικονομήσουμε χρήματα με την ελάχιστη ή και μηδενική χρήση των κλιματιστικών στο χώρο.

Επίσης, διαπιστώσαμε εύκολα μέσω υπολογισμών και διαγραμμάτων ότι όσο πιο μεγάλο-παχύ είναι το PCM που έχουμε τοποθετήσει στον τοίχο τόσο καλύτερα αποτελέσματα έχουμε. Δηλαδή, το πιο μεγάλο PCM θα χρειαστεί μεγαλύτερο ποσό θερμότητας για να μετατρέψει τη σύστασή του. Έτσι, τις πρωινές ώρες αφού το PCM θα εκμεταλλεύει περισσότερη θερμότητα, ο τοίχος θα αποκτήσει μικρότερη θερμοκρασία απ' ό,τι αν ήταν μικρότερης διάστασης. Αντίστοιχα, το βράδυ θα αποβάλλει με πιο αργό ρυθμό την θερμότητα που έχει αποκτήσει γιατί θα κρατάει ένα ποσό αυτής μέχρι να μετατραπεί ολοκληρωτικά σε στερεή φάση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] (<http://www.ktirio.gr/innet/UsersFiles/sa/documents/articles/2009-07-184.pdf>)
- [2] H.Mehling, L.F.Cabeza, Heat and cold storage with PCM:An up to date introduction into basics and applications, Solid-liquid phase change materials
- [3] http://kataskeui.blogspot.gr/2010/08/blog-post_19.html
- [4] http://el.wikipedia.org/wiki/Ηλιακή_ενέργεια
- [5] http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153
- [6] <http://www.ipedia.gr>
- [7] http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153
- [8] <http://www.aua.gr/~bethanis/ch9.pdf>
- [9] A. Shanmuga Sundaram, R.V. Seeniraj, R. Velraj: An experimental investigation on passive cooling system comprising phase change material and two-phase closed thermosyphon for telecom shelters in tropical and desert regions
- [10] <http://www.fibre2fashion.com/industry-article/9/884/phase-changematerials-overview2.asp>
- [11] <http://gearjunkie.com/everest-gear>
- [12] <http://www.outlast.com/index.php?id=70&L=0>

[13] http://www.sierrabmwonline.com/index.php/bmw-riders-apparel-2011-bmw-functional-underwear-c-169_80

[14] http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_Change_Material

[15] Ghoneim.A.A. & Klein.S.A, Phase Change Materials Analysis, Solar Energy, Vol.47, No.3., 1991

[16] Lane George A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I. 1983, Florida: CRC Press, Inc.

[17] <http://www.baulinks.de/webplugin/2006/1048.php4>

[18] Phase Change Materials-Part V., Harald Mehling and Luisa Cabeza

[19] Halime O. Paksoy, “Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption – Fundamentals, Case Studies and Design”, NATO Science Series, Springer publications (2007).

[20] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112005643#>

[21] Atul Sharma , V.V. Tyagi , C.R. Chen , D. Buddhi <<Review on thermal energy storage with phase change materials and applications>>

[22] Χρήστος Τζιβανίδης, Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων, Υλικά Αλλαγής Φάσης

[23] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 2007, p. 1146-1166.

[24] G.A. Lane, “Solar Heat Storage: Latent Heat Materials”, Volume I: Background and Scientific Principles, Florida: CRC Press, Inc. (1983).

[25] <http://en.wikipedia.org/wiki/Alkane>

[26] <http://en.wikipedia.org/wiki/Paraffin>

[27] http://en.wikipedia.org/wiki/Fatty_acid

[28] Ing. Ivo BĚHUNEK, Properties of inorganic PCM

[29] H.P.Carg, J.Prakash, Solar energy:Fundamentals and Applications

[30] Maria Telkes, Thermal energy storage in salt hydrates

[31] Stephen Marks, An investigation of the thermal energy storage capacity of Glauber`s salt with respect to thermal cycling

[32] Takayuki Watanable, Maria Natalia R.Dimaano, Solar energy:new research, Thermal performance characterization of capric acid and lauric acid mixture for low temperature energy storage

[33] Lv Shilei, Zhu Neng, Feng Guohui, Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage

[34] Ghoneim.A.A. & Klein.S.A, Phase Change Materials Analysis, Solar Energy, Vol.47, No.3., 1991

[35] Lane George A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I. 1983, Florida: CRC Press, Inc.

[36] PCM thermal storage in buildings: A state of art, Vineet Veer Tyagi, D.Buddhi*

[37] Phase Change Materials-Part V., Harald Mehling and Luisa Cabeza

[38] <http://www.rubitherm.de/>. (n.d.).

[39] S Takeda, K.Nagano, T.Mochida, K.Shimakura, Development of a ventilation

[40] Harald Mehling, Luisa F. Cabeza, “Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications”, Chapter 3: Determination of physical and technical properties, Springer Berlin Heidelberg publications (2008).

[41] R.P.W.Scott. Physical Chemistry resources.

[42] <http://www.nobadscience.com/therm3.htm>

[43] Zhang Yinping, Jiang Yi and Jiang Yi, A simple method, the T –history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials, Measurement and Science Technology, 10, 1999, p.201-205.

[44] Donald Pitts, Leighton Sissom, Heat Transfer, McGraw-Hill international editions

[45] A.F. MILLS, Heat and Mass Transfer

[46] Ξενοφών Κακάτσιος, Μετάδοση Θερμότητας, εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2002

[47] Hiki Hong , Sun Kuk Kim, Yong-Shik Kim, Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials, International Journal of Refrigeration, 27, 2004, p. 360-366

[48] Jong Hyeon Peck, Jae-Jun Kim, Chaedong Kang, Hiki Hong, A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method, International Journal of Refrigeration, 29, 2006, p. 1225-1232

[49] Ana Lazaro, Eva Gunther, Harald Mehling, Stefan Hiebler, Jose M Marin and Belen Zalba Verification of a T-history installation to measure enthalpy versus Temperature curves of phase change materials, Measurement and Science Technology, 17, 2006, p. 2168-2174

[50] H.Mehling, E.Günther, S.Hiebler, L.F.Cabeza, C.Castellón, A new measurement and evaluation method for DSC of PCM samples

[51] H.K.D.H. Bhadeshia, <<Thermal Analysis Techniques>>, University of Cambridge, Materials Science & Metallurgy.

[52] Piia Lamberg, Reijo Lehtiniemi, Anna-Maria Henell, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage

[53] Yvan Dutil, Daniel R.Rousse, Nizar Ben Salah, Stephane Lassue, Laurent Zalewski, A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations

[54] Eleftherios Dimitrios Kravvaritis, Kimon Antonopoulos, Christos Tzivanidis, Solar energy management using PCM passive systems in the Athens area buildings, (υπό δημοσίευση)

[55] Haitian Yang, Yiqian He, Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods

[56] Murat Kenisarin, Khamid Mahkamov, “Solar energy storage using phase change materials”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2007; 11: 1913-1965.

[57] R. Domanski, AA El-Sebaei, M. Jaworski, “Cooking during off-sunshine hours using PCMs as storage media”, Energy 1995; 20(7): 607–616.

[58] Ming Jun Huang, The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems

[59] M.J. Huang, P.C. Eames, B. Norton, Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics

[60] <http://www.durabilityanddesign.com/news/?fuseaction=view&id=4411>

[61] S. Mondal, Phase change materials for smart textiles – An overview

[62] A.Izzo Renzi, C.Carfagna, P.Persico, Thermoregulated natural leather using phase change materials: An example of bioinspiration

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

[64] Yonggang Lv, Yang Zou, Li Yang, Feasibility study for thermal protection by microencapsulated phase change micro/nanoparticles during cryosurgery

[65] http://www.rubitherm.com/english/pages/03c_medical_therapy_products.htm

[66] L.L.Vasiliev, V.S.Burak, A.G.Kulakov, D.A.Mishkinis, P.V.Bohan, Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines:application to a bus petrol engine

[67] NREL, Advances in Technology at the National Renewable Energy Laboratory, Keeping the Heat on Cold-Start Emissions, NREL's Insulated Catalytic Converter Slashes Automotive Air Pollution, <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/techbr.pdf>

[68] <http://www.teappcm.com/applications.htm>

[69] <http://www.cryopak.com/phase-change-materials/>

[70] F.L.Tan, C.P.Tso, Cooling of mobile electronic devices using phase change materials

[71] G.Setoh, F.L.Tan, S.C.Fok, Experimental studies on the use of a phase change material for cooling mobile phones

[72] <http://www.goodcellphonereviews.com/samsung-blue-earth-solar-powered-mobile/>

[73] Greg Atwood, Phase-Change Materials for Electronic Memories, http://mypages.iit.edu/~segre/phys100/science_2008_321_210.pdf

[74] <http://www.powerdatarecovery.com/cd-dvd-resources/recordable-cd.html>

[75]. Zhang Yinping, Zhou Guobing, Lin Kunping, Zhang Qunli, Di Hongfa,“Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-artand outlook”, Building and Environment 2007.

[76]. D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, E. Ghanbari, "Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard", Solar energy materials 1991.

[77]. M. Zhang, A.M. Mario, B.K. Jennifer, "Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings", International Journal of Energy Research 2005.

[78]. KAR Ismail, JR Henriquez, "Thermally effective windows with moving phase change curtains", Appl. Thermal Engineering 2001.

[79]. AK Athienities, Y. Chen, "The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems", Solar Energy 2000.

[80]. M. Farid, WJ Kong, "Underfloor heating with latent heat storage", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A 2001

[81]. Bruno Frank, "Phase change material for space heating and cooling", Sustainable Energy Centre: University of South Australia; Presentation 2002.

[82]. JM Guthertz, ME Schiler, "A passive solar heating system for the perimeter zone of office buildings", Energy Sources 1991

[83]. T. Kodo, T. Ibamoto, "Research on using the PCM for ceiling board", IEAECESIA, Annex 17, 3rd workshop, Tokyo, Japan. October 1–2, 2002.

[84]. M. Telkes, E. Raymond, "Storing solar heat in chemicals - a report on theDover house", Heat Vent 1949

[85]. JJ Jurinak, SI Abdel-Khalik, "Sizing phase change energy storage units for air-based solar heating systems", Sol Energy 1979

[86]. K. Kaygusuz, "Performance of solar-assisted heat-pump system", Appl.Energy 1995

[87]. PBL. Chaurasia, "Phase change material in solar water heater storage system", In: Proceedings of the 8th international conference on thermal energy storage; 2000.

[88]. Ghonein,A.A, Building Walls Using Phase Change Materials,Solar Energy 1991

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

[90] T.Kondo, T.Ibamoto, S.Iwamoto, Research on thermal storage using rock wool PCM ceiling board

[91] A.Castell, I.Martorell, M.Medrano, G.Perez, L.F.Cabeza, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling

[92] Esam M.Alawadhi, Thermal analysis of a building brick containing phase change material

[93] Markus Koschenz, Beat Lehmann, Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings

[94] M.M.Farid,X.D.Chen, Domestic electrical space heating with heat storage

[95] K.Darkwa, J.-S.Kim, Dynamics of energy storage in phase change drywall systems

[96] Ana Vaz S´a et al, Thermal enhancement of plastering mortars with Phase Change Materials: experimental and numerical approach, 2011

[97] <<Heat and Mass Transfer>>, Hans Dieter Baehr, Karl Stephan, Springer

[98] Phase change thermal energy storage,
http://freespace.virgin.net/m.eckert/carl_vener's_dissertation.htm

[100] Farid M M, Khudhair A M, Razack Siddique Ali K and Al-Hallaj Said 2004 A review on phase change energy storage: materials and applications *Energy Convers. Manag.*

[101] Zalba B, Mar´in J M, Cabeza L F and Mehling H 2003 Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications *Appl. Therm. Eng.*

[102] Hasnain S M 1998 Review on sustainable thermal energy storage technologies: part I. Heat storage materials and techniques *Energy Convers. Manag.*

[103] Mehling H and Cabeza L F 2008 *Heat and Cold Storage with PCM* (Berlin: Springer)

[104] Buddhi D, Sawhney R L, Sehgal P N and Bansal N K 1987 A simplification of the differential thermal analysis method to determine the latent heat of fusion of phase change materials *J. Phys. D: Appl. Phys.*

[105] Demirel Y and Paksoy H O 1993 Thermal analysis of heat storage materials *Thermochimica Acta*

[106] Paksoy H O 1996 Determining thermal properties of heat storage materials using the twin bath method *Energy Convers. Manag.*

[107] Sandnes B and Rekstad J 2006 Supercooling salt hydrates: stored enthalpy as a function of temperature *Solar Energy*

[108] Günther E, Hiebler S and Mehling H 2006 Determination of the heat storage capacity of PCM and PCM-objects as a function of temperature *Proc. ECOSTOCK, 10th Int. Conf. on Thermal Energy Storage (Stockton, USA)*

[109] Yinping Z, Yi J and Yi J 1999 A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase change materials *Meas. Sci. Technol.*

[110] Marcus Y, Minevich A and Ben-Dor L 2003 Differential drop calorimetry for the determination of enthalpy of fusion *J. Chem. Thermodyn.*

[111] Feldman D and Banu D 1996 DSC analysis for the evaluation of an energy storing wallboard *Thermochimica Acta*

[112] Schenker B and Stäger F 1997 Influence of the thermal conductivity on the CP-determination by dynamic methods *Thermochimica Acta*

[113] Mehling H, Ebert H-P and Schossig P 2006 Development of standards for materials testing and quality control of PCM *Proc. 7th IIR Conf. on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning (Dinan, France, September)*

- [114] Marin J, Zalba B, Cabeza L and Mehling H 2003 Determination of enthalpy–temperature curves of phase change materials with the temperature-history method: improvement to temperature dependent properties *Meas. Sci. Technol.*
- [115] He B, Martin V and Setterwall F 2004 Phase transition temperature ranges and storage density of paraffin wax phase change materials *Energy*
- [116] Arkar C and Medved S 2005 Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres *Thermochimica Acta*
- [117] Hong H, Park C H, Choi J H and Peck J H 2003 Improvement of the T-history method to measure heat of fusion for phase change materials *Int. J. Air-Cond. Refrig.*
- [118] Hong H, Kim S K and Kim Y S 2004 Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials *Int. J. Refrig.* **27** 360–6
- [119] van Dorp J E 2004 An approach to empirical investigation of performance of passive PCM applications in office buildings based on the T-history method *Arcadis*
- [120] Marin J, Zalba B and Lazaro A 2005 New installation at the University of Zaragoza (Spain) of T-history method to measure the thermal properties *8th Workshop Annex 17, ECES, IEA*
- [121] Peck J H, Kim J-J, Kang C and Hong H 2006 A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method *Int. J. Refrig.*

[122] Lazaro A, Günther E, Mehling H, Hiebler S, Marin J M and Zalba B 2006 Verification of a T-history installation to measure enthalpy versus temperature curves of phase change materials *Meas. Sci. Technol.*

[123] Krupa I, Mikova G and Luyt A S 2007 Phase change materials based on low-density polyethylene/paraffin wax blends *Eur. Polym. J.*

[124] Liu Z and Chung D D L 2001 Calometric evaluation of phase change materials for use as thermal interface materials *Thermochimica Acta*

[125] Zhang X-X, Fan Y-F, Tao X-M and Yick K-L 2005 Crystallization and prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes *J. Colloid Interface Sci.*