

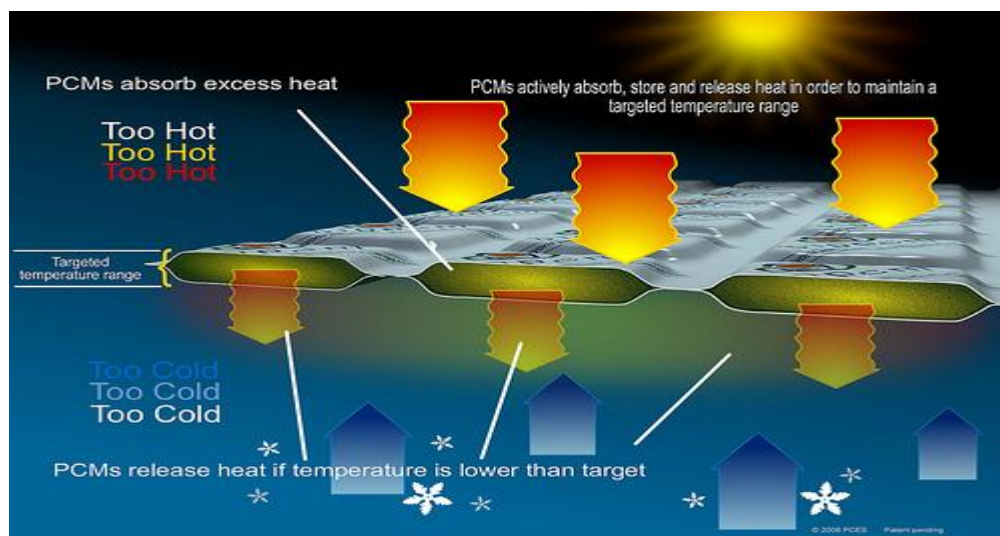


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Ηλιακή θέρμανση κτιρίων με χρήση μείγματος συμβατικών δομικών υλικών και υλικών αλλαγής φάσης (PCM) στους εσωτερικούς τοίχους.



ΕΚΠΟΝΗΣΗ: Καλλινίκου Ζαφειρία

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: Κίμων Α.Αντωνόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ 2011

Πρόλογος-Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αποτελεί μία θεωρητική ανασκόπηση, καταρχήν, των λόγων που οδήγησαν στην αναγκαιότητα της χρήσης των υλικών αλλαγής φάσης (PCM) και των επιλογών που υπάρχουν ως προς τα είδη των PCM που έχουν αναπτυχθεί αλλά και των χαρακτηριστικών αυτών των υλικών. Επιπλέον, αναλύονται διεξοδικά όλα τα είδη των εφαρμογών των PCM, οι οποίες καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα, στοιχείο το οποίο αποδεικνύει τη χρησιμότητά τους και την αξιοπιστία τους. Το δεύτερο μέρος αποτελεί μία θεωρητική προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός εσωτερικού τοίχου, ως προς τη δυνατότητα για παροχή ηλιακής θέρμανσης σε έναν χώρο, όταν ενσωματώνεται σε αυτόν ένα μείγμα συμβατικών δομικών υλικών και υλικών αλλαγής φάσης.

Για την εκπόνηση της εργασίας οφείλω ένα ευχαριστώ στον καθηγητή κ. Κίμωνα Αντωνόπουλο, για την καθοδήγησή του, την παροχή πηγών και πληροφοριών, αλλά κυρίως για την κατανόηση και την υπομονή του στα προβλήματα που προέκυψαν. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συμφοιτήτρια και φίλη μου, Καζάνη Βασιλική για τη στήριξή της και την άρτια συνεργασία μας σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας και κυρίως κατά τη διάρκεια της διετέλεσης των διπλωματικών μας εργασιών. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου για τη διαρκή προσφορά και συμπαράστασή τους.

Αφιερώνω αυτό το σύγγραμμα ειδικά στον πατέρα μου που λείπει από τη ζωή μου...

Περιεχόμενα

<u>Μέρος 1^ο: Θεωρητική Ανασκόπηση</u>	8
<u>Κεφάλαιο 1^ο:Εισαγωγή</u>	8
1.1 Ενεργειακό πρόβλημα.....	8
1.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα με χρήση ΑΠΕ.....	10
1.3 Τρόποι αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας.....	12
1.3.1 Παθητικά ηλιακά συστήματα.....	12
1.3.1.1 Συστήματα άμεσου κέρδους.....	13
1.3.1.2 Συστήματα έμμεσου κέρδους.....	16
1.3.1.3 Συστήματα απομονωμένου κέρδους.....	18
1.3.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα.....	19
1.4 Φαινόμενο αλλαγής φάσης.....	21
1.4.1 Κατάσταση ύλης και αλλαγή φάσης.....	21
1.4.2 Θερμότητα κατά την αλλαγή φάσης.....	22
1.4.2.1 Αισθητή θερμότητα.....	24
1.4.2.2 Λανθάνουσα θερμότητα.....	24
<u>Βιβλιογραφία 1^{ου} Κεφαλαίου</u>	26
<u>Κεφάλαιο 2^ο:Υλικά αλλαγής φάσης</u>	28
2.1 Ορισμός PCM ως μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.....	28
2.2 Συμπεριφορά PCM.....	30
2.2.1 Θερμοδυναμικές (θερμικές και φυσικές) ιδιότητες.....	31
2.2.2 Κινητικές ιδιότητες.....	31
2.2.3 Χημικές ιδιότητες.....	32
2.2.4 Οικονομικές και οικολογικές ιδιότητες.....	32
2.3 Κατηγοριοποίηση.....	32
2.3.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τις εφαρμογές.....	32
2.3.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τη σύσταση.....	33

2.3.2.1 Οργανικά PCM.....	33
2.3.2.1.1 Παραφίνες.....	34
2.3.2.1.2 Λιπαρά οξέα.....	36
2.3.2.2 Ανόργανα PCM.....	37
2.3.2.2.1 Ένυδρα άλατα.....	38
2.3.2.2.2 Άλας Glauber.....	40
2.3.2.3 Ευτηκτικά PCM.....	41
2.3.2.4 Υλικά αλλαγής στερεάς φάσης.....	42
2.3.2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε κατηγορίας.....	43
2.4 Προβλήματα που παρουσιάζουν τα PCM και τρόποι αντιμετώπισης.....	45
2.4.1 Διαχωρισμός των φάσεων και σχηματισμός ιζήματος.....	45
2.4.2 Φαινόμενο υπέρψυξης.....	46
2.4.3 Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση.....	48
2.5 Τρόποι ενσωμάτωσης των PCM.....	49
2.5.1 Συσκευασία PCM.....	49
2.5.1.1 Μικροενσωμάτωση.....	49
2.5.1.2 Μακροενσωμάτωση.....	51
2.5.2 Μαζική αποθήκευση.....	52
2.5.3 Άμεση ενσωμάτωση.....	53
2.5.4 Εμβάπτιση.....	53
2.5.5 Πολυστρωματικά σανίδια με PCM.....	54
2.6 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων PCM.....	54
2.6.1 Μέθοδος T-history.....	57
2.7 Μέθοδοι προσομοίωσης της αλλαγής φάσης.....	59
2.7.1 Μέθοδος ενθαλπίας.....	60
2.7.2 Μέθοδος ενεργούς θερμοχωρητικότητας.....	60
<u>Βιβλιογραφία 2^{ου} Κεφαλαίου.....</u>	<u>62</u>
<u>Κεφάλαιο 3^ο:Γενικές εφαρμογές των PCM.....</u>	<u>65</u>
3.1 Εισαγωγή.....	65
3.2 Φωτοβολταικά πλαίσια.....	65

3.3 Θερμική ένδυση.....	67
3.4 Ιατρικές εφαρμογές.....	70
3.5 Μεταφορές αγαθών.....	73
3.6 Οχήματα.....	75
3.7 Ηλεκτρονικά εξαρτήματα.....	77
3.7.1 Χρήση PCM σε φορητές ηλεκτρικές συσκευές.....	77
3.7.2 Χρήση PCM σε επαναγραφόμενα CDs και DVDs.....	79
<u>Βιβλιογραφία 3ου Κεφαλαίου.....</u>	<u>82</u>

Κεφάλαιο 4ο: Ηλιακά συστήματα για θέρμανση και ψύξη με PCM.....

4.1 Ηλιακά συστήματα με PCM.....	84
4.1.1 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM.....	84
4.1.2 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα με PCM.....	89
4.1.3 Ηλιακά θερμοκήπια με PCM.....	92
4.2 Συστήματα ψύξης με PCM.....	96
4.2.1 Free cooling.....	96
4.2.2 PCM σε συστήματα κλιματισμού.....	103
4.3 PCM σε συνδυασμένα συστήματα θέρμανσης και ψύξης.....	106
<u>Βιβλιογραφία 4ου Κεφαλαίου.....</u>	<u>108</u>

Κεφάλαιο 5ο: Ενσωμάτωση PCM σε οικοδομικά στοιχεία.....

5.1 Ιστορική αναδρομή και ερευνητική δραστηριότητα.....	110
5.1.1 Πρώτες εφαρμογές επιστημόνων σε ηλιακά σπίτια.....	110
5.1.2 Ερευνητική δραστηριότητα ως προς την καταλληλότητα των PCM.....	112
5.1.3 Κρατική έρευνα ανά τον κόσμο για τη χρησιμότητα των PCM.....	112
5.1.3.1 ΗΠΑ.....	113
5.1.3.2 Ευρώπη.....	114
5.1.3.3 Ιαπωνία.....	115
5.2 Αρχές λειτουργίας της εγκατάστασης PCM στα κτίρια.....	116
5.2.1 PCM ενσωματωμένα στο φάκελο του κτιρίου.....	116
5.2.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την εσωτερική θερμοκρασία του	

αέρα.....	116
5.2.1.2 Μη γραμμικές ιδιότητες ενός τοίχου με PCM.....	117
5.2.2 PCM και θερμοφυσικές ιδιότητες.....	118
5.2.2.1 Θερμότητα και θερμοκρασία τήξης.....	118
5.2.2.2 Υποψήφια PCM.....	119
5.2.2.3 Μακρόχρονη σταθερότητα και αναφλεξιμότητα.....	120
5.3 Ανάπτυξη των PCM για θέρμανση και ψύξη στα κτίρια.....	121
5.3.1 Ηλιακός τοίχος αποθήκευσης θερμότητας για αερισμό κτιρίων.....	121
5.3.2 Τοίχος Trombe με PCM.....	123
5.3.3 Ξηρός τοίχος αλλαγής φάσης εμποτισμένος με PCM.....	124
5.3.3.1 Γυψοσανίδες με PCM.....	125
5.3.3.2 Μπλοκ τσιμέντου με PCM.....	130
5.3.3.2.1 Χρησιμοποίηση μικροκαψουλών PCM σε τοίχο από τσιμέντο για εξοικονόμηση ενέργειας, Cabezza-Castellon et al.....	132
5.3.3.2.2 Ενσωμάτωση PCM σε μείγμα ξύλου-ελαφρού βάρους τσιμέντο, Mehling et al.....	133
5.3.4 Θερμικά ενισχυμένο πλαίσιο τοίχου με PCM.....	134
5.3.5 Ενσωμάτωση PCM σε κατασκευές με τούβλο.....	136
5.3.6 Θερμικά ενεργά παράθυρα με κινούμενες κουρτίνες με PCM.....	139
5.3.7 Σανίδες οροφής με PCM.....	140
5.3.7.1 Θερμικά ενεργοποιημένο πάνελ οροφής με PCM, Koschenz-Lehmann.....	144
5.3.8 Υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με PCM.....	145
5.3.8.1 Υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με τη χρήση ``σταθερής μορφής`` πλακών με PCM, Lin et al.....	149
<u>Βιβλιογραφία 5^{ου} Κεφαλαίου.....</u>	152
<u>Μέρος 2^ο : Θεωρητική Προσομοίωση.....</u>	154
<u>Κεφάλαιο 6^ο:Εισαγωγή-Τυπολόγιο.....</u>	154
<u>Κεφάλαιο 7^ο:Παραμετρικές μελέτες.....</u>	161

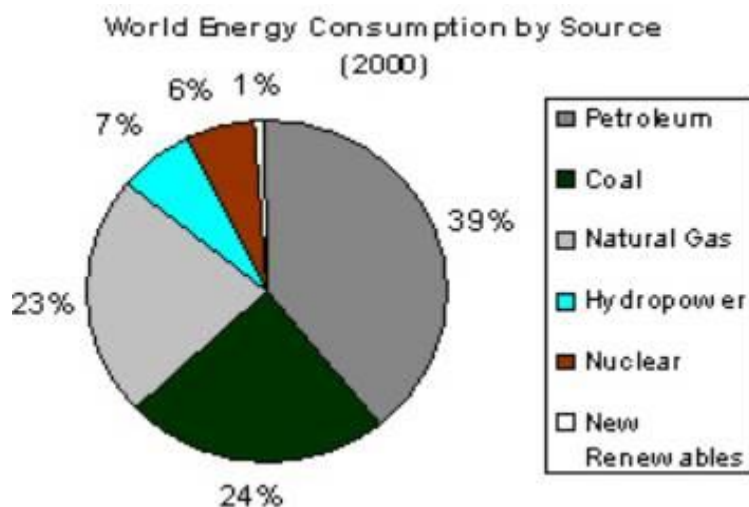
7.1 Παραμετρική μελέτη ως προς την περιεκτικότητα PCM το 24ωρο.....	161
7.2 Παραμετρική μελέτη ως προς την περιεκτικότητα PCM το 48ωρο.....	174
7.3 Παραμετρική μελέτη ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου.....	180
7.4 Παραμετρική μελέτη ως προς τον μήνα.....	184
7.5 Παραμετρική μελέτη ως προς το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του PCM.....	196
7.6 Παραμετρική μελέτη ως προς την ειδική θερμοχωρητικότητα στερεής-υγρής φάσης του PCM.....	204
<u>Βιβλιογραφία Θεωρητικής Προσομοίωσης.....</u>	<u>211</u>

Μέρος 1ο: Θεωρητική Ανασκόπηση

Κεφάλαιο 1ο:Εισαγωγή

1.1 Ενεργειακό πρόβλημα[1-3]

Η ύπαρξη της ζωής στην γη είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ενέργεια. Η προσπάθεια του ανθρώπου να βελτιώσει το βιοτικό του επίπεδο και τον τρόπο διαβίωσής του ξεκίνησε από τον άνθρωπο των σπηλαίων πριν τετρακόσιες χιλιάδες χρόνια όταν χρησιμοποιούσε την φωτιά (δηλαδή την καύση βιομάζας), η οποία του επέτρεψε να αναπτύξει νέα τεχνολογία, όπως τα μεταλλουργικά εργαλεία. Με το πέρασμα του χρόνου ο άνθρωπος προχώρησε στην ανακάλυψη της ατμομηχανής και την εξόρυξη ορυκτών καυσίμων και έφτασε στις σύγχρονες κυψέλες καυσίμου και στη χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Η ανάπτυξη στον πλανήτη συνδέεται με τη χρήση ενέργειας. Η χρήση τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας, με τον τρόπο που αυτό συμβαίνει στις χώρες του αναπτυγμένου δυτικού κόσμου, σηματοδοτεί τη διαφορά ανάμεσα σε αυτόν και στον αναπτυσσόμενο τρίτο κόσμο, όσο και την ασύγκριτη εξέλιξη αυτού του ίδιου από την εποχή του Μεσαίωνα ως σήμερα.



Σχήμα 1.1: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με την πηγή[4].

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, από τα είδη των πηγών ενέργειας

που χρησιμοποιούνται σήμερα, το μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας προέρχεται από συμβατικά καύσιμα. Όμως τα ενεργειακά αποθέματα είναι πεπερασμένα αν και δεν είναι ακριβώς γνωστό το πότε θα εξαντληθούν. Οι ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών όμως αυξάνονται καθημερινά ενώ ταυτόχρονα, στον πλανήτη ζουν εκατομμύρια άνθρωποι που δεν έχουν πρόσβαση στην ενέργεια, με όλες τις συνέπειες που αυτό εμπεριέχει. Σήμερα, οι αναπτυσσόμενες χώρες τείνουν να προσφεύγουν όλο και περισσότερο στον άνθρακα και σε ορισμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (κυρίως στην παραδοσιακή βιομάζα) και λιγότερο στο φυσικό αέριο και την πυρηνική ενέργεια.

Το ενεργειακό πρόβλημα είναι ουσιαστικά αυτή η συσχέτιση των ενεργειακών αποθεμάτων που διαρκώς μειώνονται με τις απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας που διαρκώς αυξάνονται. Η προσέγγισή του μπορεί να γίνει από τρεις απόψεις:

- Της εξασφάλισης της αναγκαίας ποσότητας ενέργειας, στην κατάλληλη για την κάθε χρήση μορφή, δηλαδή της ενεργειακής επάρκειας.
- Του κόστους αυτής της ενέργειας.
- Των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση της.

Το ενεργειακό πρόβλημα και το πρόβλημα της ρύπανσης του περιβάλλοντος έχουν συνδεθεί και έχουν τεθεί ως θέματα προτεραιότητας τόσο σε πολιτικό όσο και σε κοινωνικό επίπεδο, ενώ η επίλυσή τους έχει καταστεί επιτακτική ανάγκη σε εθνική και παγκόσμια κλίμακα. Η ρύπανση του περιβάλλοντος εξαιτίας της καύσης ορυκτών καυσίμων στη βιομηχανία, στα αυτοκίνητα και στα κτίρια έχει φτάσει σε επικίνδυνα όρια. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου έχει αποκτήσει τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη σημασία και θα πρέπει να εξευρεθούν άμεσα τρόποι αντιμετώπισής του. Η αύξηση της μέσης πλανητικής θερμοκρασίας κατά 2°C σε σύγκριση με τα επίπεδα της προβιομηχανικής περιόδου θα πρέπει να περιοριστεί κατά το δυνατόν. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου να περιοριστούν έως το 2020 και να μειωθούν κατά τουλάχιστον 80-95% έως το 2050.

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ταυτόχρονα με την εξοικονόμηση ενέργειας αποτελούν τις πιο ρεαλιστικές λύσεις για τα ενεργειακά και τα περιβαλλοντικά προβλήματα και επιπρόσθετα συνεισφέρουν στην ανάπτυξη, στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού μιας χώρας, αφού χρησιμοποιούνται εγχώριες πηγές και μειώνεται η εξάρτηση από

τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση πόρων (φυσικών και οικονομικών).

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή σε μια προσπάθεια αντιμετώπισης των προβλημάτων της ρύπανσης του περιβάλλοντος και της εξοικονόμησης ενέργειας, υιοθέτησε τον Ιανουάριο του 2008 το λεγόμενο <<κλιματικό-ενεργειακό πακέτο>>, το οποίο προνοεί τη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 20%, αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική ενεργειακή κατανάλωση κατά 20% και αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά 20% έως το 2020. Το Δεκέμβριο του 2008 μετά από μαραθώνιες διαβουλεύσεις που διήρκεσαν σχεδόν ένα χρόνο, συμφώνησαν στην υιοθέτηση του πακέτου ενέργειας και κλιματικών αλλαγών και της δέσμης αντισταθμιστικών μέτρων.

1.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα με χρήση των ΑΠΕ[5,6,8,9]

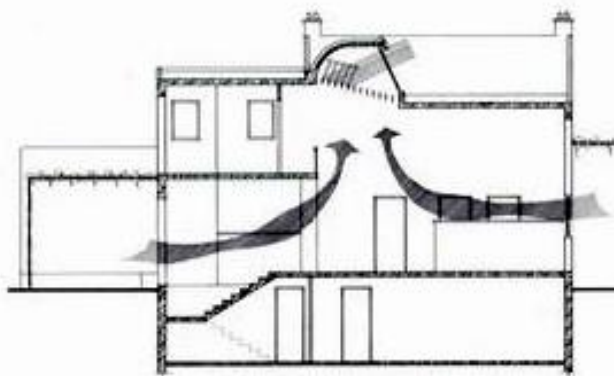
Επικουρικά με τα στατιστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω έχει διαπιστωθεί ότι το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο οφείλεται στον κτιριακό τομέα. Η κατανάλωση αυτή, σε μορφή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα την οικονομική επιβάρυνση λόγω του υψηλού κόστους της ενέργειας και τη μεγάλη επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με ρύπους, κυρίως λόγω του διοξειδίου του άνθρακα CO₂, το οποίο ευθύνεται κατά κύριο λόγο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια, τόσο στα οικιακής χρήσης όσο και στα εμπορικά, παρουσιάζει αυξητική τάση λόγω της αυξανόμενης χρήσης κλιματιστικών συστημάτων και μικροσυσκευών για θερμική άνεση. Η χρήση των κλιματιστικών αποτελεί σημαντικό παράγοντα αύξησης του ηλεκτρικού φορτίου αιχμής στη χώρα, με τεράστιες οικονομικές συνέπειες και σημαντική επιβάρυνση του καταναλωτή.

Η εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια προϋποθέτει τον κατάλληλο σχεδιασμό του κτιρίου, τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών δομικών στοιχείων και συστημάτων και τη σωστή συνεργασία αυτών, δηλαδή απαιτείται άριστη ποιότητα του σχετικού εξοπλισμού και της εγκατάστασής του καθώς και ύπαρξη των σχετικών τεχνικών μελετών που τον προδιαγράφουν.

Ο σωστός σχεδιασμός ενός κτιρίου βελτιστοποιεί ορισμένους από τους

παράγοντες που συμμετέχουν στο θερμικό ισοζύγιο.Ως θερμικό ισοζύγιο αναφέρεται το σύνολο όλων των θερμικών ροών από και προς το κτίριο.Με τον προσανατολισμό του κτιρίου, κυρίως των ανοιγμάτων του, τη μορφή του κτιρίου, την αναλογία συμπαγών στοιχείων και ανοιγμάτων,την κατασκευή του κελύφους και την επιλογή των συστημάτων θέρμανσης, αερισμού και φωτισμού, μπορεί να επέμβει ο μελετητής στη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου.Πολύ σημαντικός παράγοντας είναι και ο τρόπος χρήσης του κτιρίου από τους καταναλωτές, οι οποίοι με τις συνήθειές τους μπορούν να διορθώσουν ή να επιβαρύνουν τη θερμική συμπεριφορά ενός κτιρίου.

Ως βιοκλιματικός σχεδιασμός αναφέρεται εκείνος ο σχεδιασμός, ο οποίος ανταποκρίνεται στις κλιματικές συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως η ηλιακή ακτινοβολία ή ο άνεμος, με τρόπο ώστε το κτιριακό κέλυφος να τις τροποποιεί για να δημιουργείται εσώκλιμα που να παρέχει με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη τις βέλτιστες συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης στους χρήστες.



Σχήμα 1.2: Τυπικό σχήμα βιοκλιματικού σχεδιασμού[7].

Τη χειμερινή περίοδο, ο ενεργειακός σχεδιασμός αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών αγωγιμότητας, αερισμού και εξάτμισης, επιτρέποντας μόνο τον απαραίτητο για λόγους υγιεινής αερισμό, και στην αύξηση της θερμικής προσόδου από την ηλιακή ακτινοβολία, ώστε αφενός να μειωθεί η διάρκεια της θερμαντικής περιόδου και αφετέρου να ελαττωθούν οι δαπάνες για την παροχή θέρμανσης.Αντίστοιχα, στην θερινή περίοδο ο ενεργειακός σχεδιασμός στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της θερμικής προσόδου από την ηλιακή ακτινοβολία

και στη βελτιστοποίηση των διαφόρων μεθόδων φυσικού δροσισμού, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ή ακόμη να αποτραπεί η παρεχόμενη ψύξη με μηχανολογικό εξοπλισμό.

Η παρούσα εργασία αναφέρεται ακριβώς στη χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια προέρχεται από τον ήλιο και αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται τη θερμική και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου με χρήση μηχανικών μέσων για τη συλλογή, αποθήκευση και διανομή της. Τα πλεονεκτήματά της είναι ότι είναι καθαρή πηγή ενέργειας, δωρεάν, άφθονη και ανανεώσιμη. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα στη χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι η περιοδικότητά της, χαρακτηριστικό στοιχείο όλων σχεδόν των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Δηλαδή τις ώρες της ημέρας και ανάλογα με την εποχή του έτους η ηλιοφάνεια είναι διακοπτόμενη και επιπλέον περίπου οι μισές ώρες του έτους είναι νύχτα. Αυτό σημαίνει αυτόματα ότι πολύ συχνά η διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας μπορεί να μην συμπίπτει με τη ζήτηση. Υπάρχει περίπτωση να παράγεται περισσότερη ηλιακή ενέργεια από αυτήν που απαιτείται, οπότε μία μορφή αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας που θα δημιουργεί μία χρονική καθυστέρηση στην απόδοσή της θα ήταν ωφέλιμη και ενεργειακά και οικονομικά.

1.3 Τρόποι αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας

Έχουν αναπτυχθεί δύο κυρίως τεχνολογικά συστήματα για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση και τη ψύξη των κτιρίων: τα ενεργητικά και τα παθητικά συστήματα[5].

1.3.1 Παθητικά ηλιακά συστήματα

Η λειτουργία των παθητικών συστημάτων για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας προϋποθέτει ένα σωστά ενεργειακά σχεδιασμένο κτίριο, σύμφωνα με τις αρχές βιοκλιματικού σχεδιασμού που ήδη αναφέρθηκαν. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα επιτρέπουν σημαντική μείωση του ενεργειακού κόστους για τη θέρμανση των κτιρίων και βελτιώνουν τη θερμική άνεση των ενοίκων τους[5,10].

Ειδικότερα η λειτουργία των παθητικών συστημάτων βασίζεται στο ``φαινόμενο

του θερμοκηπίου`` για τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας, στη θερμοχωρητικότητα των υλικών για την αποθήκευση της θερμότητας και στους βασικούς νόμους της θερμοδυναμικής για τη μεταφορά της θερμότητας από τη συλλογή στην αποθήκευση και στη διανομή.Το φαινόμενο του θερμοκηπίου αναφέρεται στη δέσμευση της θερμότητας που προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία που διαπερνά μία γυάλινη επιφάνεια.Από το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία γυάλινη επιφάνεια, ένα ποσοστό απορροφάται, από το οποίο ένα ποσοστό επανακτινοβολείται προς το εξωτερικό περιβάλλον, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό που αποτελεί τη φωτεινή ακτινοβολία με τα μικρά μήκη κύματος, περνάει στον εσωτερικό χώρο και απορροφάται από τα δομικά στοιχεία και από τα λοιπά αντικείμενα του χώρου.Η με αυτόν τον τρόπο προερχόμενη θερμότητα παγιδεύεται στο εσωτερικό του κτιρίου και αποθηκεύεται στα στοιχεία με θερμοχωρητικότητα.Στη συνέχεια η θερμότητα μπορεί να μεταδοθεί με αγωγιμότητα, με μεταφορά ή με ακτινοβολία και να συνεισφέρει στη διαμόρφωση του θερμικού ισοζυγίου του χώρου[5].

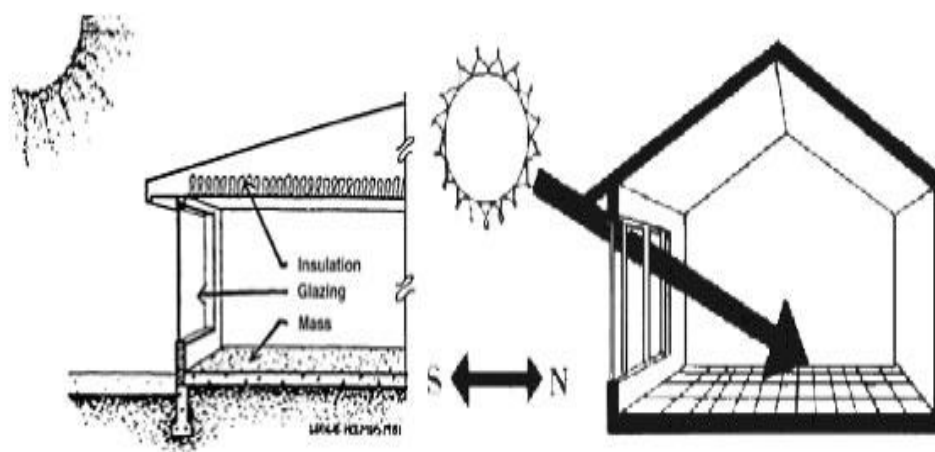
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα παθητικά συστήματα, διακρίνονται σε υλικά συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας και σε υλικά αποθήκευσης της θερμότητας.Το πιο σύννηθες υλικό συλλογής είναι το γυαλί, το οποίο είναι διαφανές και άκαμπτο, παρουσιάζει αντοχή στις καιρικές μεταβολές και στις χημικές αντιδράσεις, αλλά είναι αρκετά βαρύ και έχει μικρή αντοχή σε μηχανική κρούση.Όσον αφορά τα υλικά αποθήκευσης της θερμότητας, αυτά μπορεί να ποικίλλουν από το νερό και τα παραδοσιακά δομικά υλικά (όπως σκυρόδεμα, πέτρα, τούβλο) μέχρι τα καινοτόμα υλικά αλλαγής φάσης (PCM), τα οποία θα αποτελέσουν και κύριο αντικείμενο στην παρούσα εργασία[5].

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα είναι συνήθως απλές κατασκευές ενσωματωμένες στο κέλυφος του κτιρίου.Είναι το πλέον οικονομικό σύστημα για θέρμανση και δροσισμό των κτιρίων γιατί λειτουργούν χωρίς μηχανολογικά εξαρτήματα και πρόσθετη παροχή ενέργειας.Τα παθητικά συστήματα χωρίζονται σε αυτά του άμεσου κέρδους, του έμμεσου κέρδους και του απομονωμένου κέρδους[10].

1.3.1.1 Συστήματα άμεσου κέρδους[5,11,13,14]

Τα συστήματα άμεσου κέρδους είναι το πιο απλό και συνηθέστερο παθητικό

ηλιακό σύστημα και βασίζεται στην εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας για τη θέρμανση των κτιρίων μέσω της αξιοποίησης νότιων παραθύρων. Στην περίπτωση αυτή το κτίριο λειτουργεί σαν συλλέκτης, αποθήκη και διανομέας της θερμότητας. Τα παράθυρα συμμετέχουν ούτως ή άλλως στο θερμικό ισοζύγιο του κτιρίου ανεξάρτητα του αν ο σχεδιασμός είναι συμβατικός ή ενεργειακός. Στο παθητικό σύστημα του άμεσου κέρδους η διαφορά από ένα συμβατικό σύστημα, εντοπίζεται στη θερμική απόδοση των παραθύρων και στα υλικά και το μέγεθος των δομικών του στοιχείων.



Σχήμα 1.3: Απεικόνιση συστήματος άμεσου κέρδους[12].

Η αποτελεσματικότητα αυτού του συστήματος εξαρτάται καταρχήν από το μέγεθος των νότιων παραθύρων, αφού πρέπει να εξασφαλίζονται μεγάλες γυάλινες επιφάνειες, αλλά και από τον προσανατολισμό. Σχεδόν όλα τα παθητικά ηλιακά συστήματα απαιτούν περίπου νότιο προσανατολισμό, ώστε να υπάρχει ηλιακή πρόσπτωση στα ανοίγματα κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας το χειμώνα. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης η επιλογή του είδους και της κλίσης των υαλοπινάκων. Το κατακόρυφο υαλοστάσιο είναι προτιμότερο γιατί δέχεται την περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία το χειμώνα ενώ το θέρος τα κέρδη από ένα κατακόρυφο υαλοστάσιο είναι μικρότερα από αυτά που εξασφαλίζονται αν το υαλοστάσιο ήταν υπό άλλες γωνίες επειδή ο ήλιος είναι ψηλά στον ουρανό και η ηλιακή δέσμη έχει κατά συνέπεια υψηλή γωνία πρόσπτωσης.

Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο έχουν τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία εκτός των υαλοπινάκων, δηλαδή τοίχοι, δάπεδο, οροφή. Καταρχήν, όλοι οι εσωτερικοί χώροι

πρέπει να έχουν ένα λειτουργικό σχεδιασμό με κύρια οργάνωση προς νότο. Πρέπει να εξασφαλίζεται μεγάλη θερμική μάζα στο εσωτερικό του κτιρίου, που αυτό σημαίνει ότι για τα δομικά στοιχεία πρέπει να χρησιμοποιούνται βαριά υλικά με μεγάλη θερμοχωρητικότητα για δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι διότι εξασφαλίζεται η εξομάλυνση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κατοικίας ακόμα και όταν οι εξωτερικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είναι έντονες και ο δεύτερος λόγος είναι ότι επιτυγχάνεται η απαραίτητη χρονική καθυστέρηση στην απόδοση της αποθηκευμένης θερμότητας μέσα στην κατοικία, ώστε να επιτρέπεται η θέρμανση και μετά τη δύση του ηλίου.

Τέλος ειδική προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην περίπτωση των κτιρίων στα οποία έχουν ενσωματωθεί παθητικά ηλιακά συστήματα έτσι ώστε να λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα για να αποφεύγεται τυχόν υπερθέρμανση. Αυτά τα μέτρα είναι καταρχήν η θερμική προστασία (θερμομόνωση) στην εξωτερική πλευρά του κτιριακού κελύφους και ειδικά για την περίοδο του καλοκαιριού απαιτούνται κατάλληλα σκίαστρα και αερισμός.

Ο τύπος και οι διαστάσεις του ηλιοπροστατευτικού συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί, καθορίζονται από το σχήμα, τον προσανατολισμό και τη θέση των ανοιγμάτων. Ένα είδος φυσικής σκίασης είναι το πράσινο, δηλαδή οι θάμνοι και κυρίως τα δέντρα, τα οποία ανακόπτουν την ηλιακή ακτινοβολία, σκιάζοντας τα ανοίγματα. Εκτός από την ηλιοπροστασία, έμμεση και άμεση, που παρέχουν, συμβάλλουν στη μείωση των θερμικών απωλειών, λειτουργώντας σαν φράγμα, βελτιώνουν τις συνθήκες για τη δημιουργία φυσικού αερισμού, ελέγχουν το φυσικό φωτισμό και συνεισφέρουν στη δημιουργία ικανοποιητικού εσωκλίματος.

Αν τώρα χρησιμοποιηθεί εξωτερική ηλιοπροστασία, τότε αυτή μπορεί να είναι σταθερή ή κινητή. Για τα σταθερά ηλιοπροστατευτικά συστήματα μπορεί να γίνει ακριβής αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους, ενώ πλεονεκτούν σε σχέση με τα κινητά, ως προς το αρχικό κόστος και το κόστος συντήρησης, αλλά και επειδή με τη χρήση τους αποφεύγονται οι τυχόν αδυναμίες λειτουργίας (χειρισμός, θόρυβος, μικρός χρόνος ζωής). Το μεγάλο τους μειονέκτημα έναντι των κινητών σκίαστρων είναι η ανελαστικότητά τους ως προς το σκιασμό που επιφέρουν στους ισοδύναμους από την άποψη της θέσης του ήλιου, αλλά με διαφορετική απαίτηση σκιασμού, μήνες.

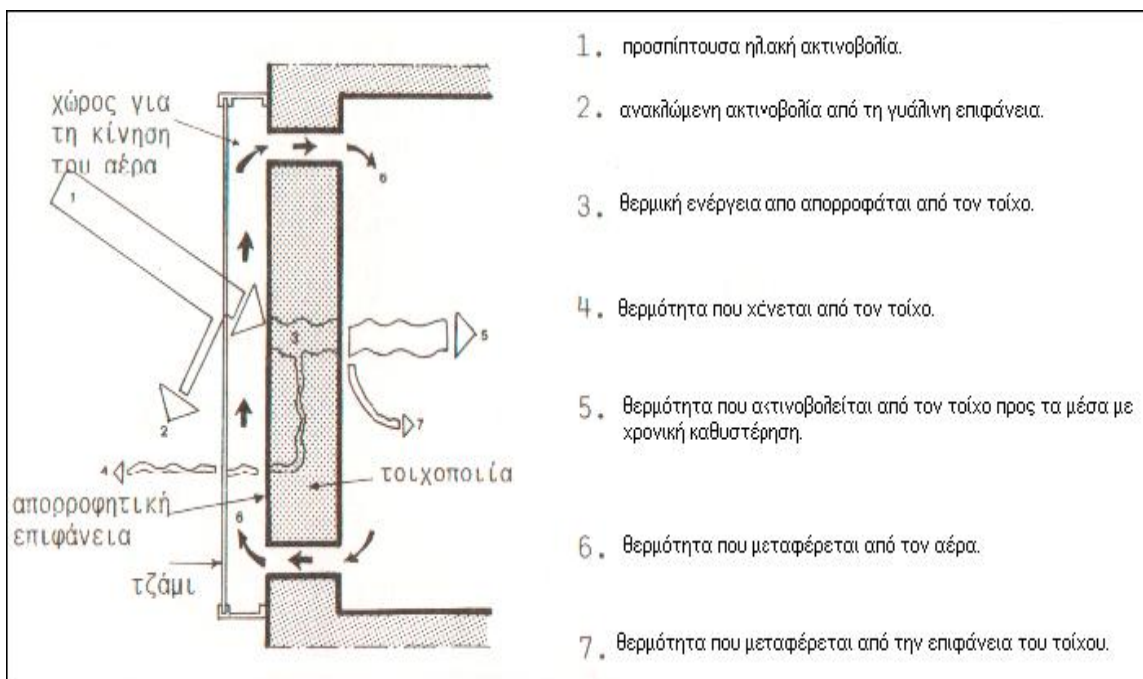
1.3.1.2 Συστήματα έμμεσου κέρδους[5,11,14]

Τα συστήματα έμμεσου κέρδους είναι συστήματα που αξιοποιούν έμμεσα τα ηλιακά οφέλη για τη θέρμανση του κτιρίου.Αυτά τα συστήματα απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κέλυφος και ύστερα επιτρέπουν στη θερμότητα να διεισδύσει στους χώρους διαβίωσης.Τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι οι ηλιακοί τοίχοι, τα ηλιακά θερμοκήπια και τα ηλιακά αίθρια.

Όσον αφορά τους ηλιακούς τοίχους, η συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και η αποθήκευση της θερμότητας γίνεται στο νότιο τοίχο του κτιρίου που είναι κατάλληλα διαμορφωμένος.Ο τοίχος είναι κατασκευασμένος από υλικά με μεγάλη θερμοχωρητικότητα, η εξωτερική του επιφάνεια είναι βαμμένη με σκούρο χρώμα για τη μεγιστοποίηση της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και μπροστά από την εξωτερική του πλευρά και σε μικρή απόσταση από αυτήν υπάρχει υαλοστάσιο για τη δέσμευση της ακτινοβολίας.Με την αρχή του θερμοκηπίου η ηλιακή ακτινοβολία που συγκεντρώνεται μετατρέπεται σε θερμότητα στο χώρο μεταξύ του υαλοστασίου και του τοίχου.Από εκεί μεταδίδεται μέσα από τον τοίχο, με αγωγιμότητα ή και με μεταφορά, ανάλογα με την κατασκευή του, στο χώρο.Ταυτόχρονα το γυαλί λειτουργεί σαν μονωτικό στρώμα για τη μείωση των θερμικών απωλειών από το θερμό τοίχο προς το εξωτερικό περιβάλλον.Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους, οι τοίχοι θερμικής αποθήκευσης διακρίνονται σε αυτούς που είναι κατασκευασμένοι με υλικά τοιχοποιίας, όπως σκυρόδεμα, πέτρα ή οπλινθοδομή και σε αυτούς που αποτελούνται από δοχεία μεταλλικά, πλαστικά ή από μπετόν και περιέχουν νερό.

Μία παραλλαγή του ηλιακού τοίχου είναι ο τοίχος με θυρίδες ή τοίχος Trombe.Πρόκειται για τοιχοποιία συνδυαζόμενη με σταθερό ή ανοιγόμενο υαλοστάσιο, με μονό ή διπλό υαλοπίνακα, το οποίο είναι τοποθετημένο εξωτερικά σε απόσταση 5-15 εκ.Η τοιχοποιία αποτελείται είτε από ένα μη μονωμένο τοίχο μεγάλης θερμικής μάζας (τοίχος θερμικής αποθήκευσης), είτε από ένα θερμομονωμένο τοίχο (θερμοσιφωνικό πάνελο).Μέρος της συλλεγόμενης θερμότητας στο διάκενο μεταξύ τοίχου και υαλοπίνακα μεταφέρεται μέσω των θυρίδων, που βρίσκονται στο άνω και κάτω τμήμα του τοίχου, στον προσκείμενο χώρο.Πιο συγκεκριμένα, οι θυρίδες

παραμένουν ανοιχτές κατά τη διάρκεια της ημέρας τους χειμερινούς μήνες προκειμένου η θερμική ενέργεια να μεταφέρεται με φυσική κυκλοφορία του αέρα, από τις θυρίδες στο επάνω μέρος του τοίχου στον εσωτερικό χώρο. Ταυτόχρονα, ο ψυχρός αέρας του προσκείμενου χώρου μεταφέρεται μέσω των κάτω θυρίδων του τοίχου στο διάκενο, όπου θερμαίνεται και ανέρχεται, εξασφαλίζοντας μια συνεχή ροή θερμότητας προς το χώρο. Οι θυρίδες στο επάνω μέρος του τοίχου τόσο κατά τη διάρκεια της νύχτας, όσο και τις νεφосκεπείς ημέρες παραμένουν κλειστές, για να αποφευχθεί η αντίστροφη κίνηση του θερμού αέρα από τον εσωτερικό χώρο προς την εξωτερική ψυχρή επιφάνεια του υαλοπίνακα. Κατά τους θερινούς μήνες επιβάλλεται η ηλιοπροστασία του ηλιακού τοίχου με κινητά εξωτερικά πετάσματα.

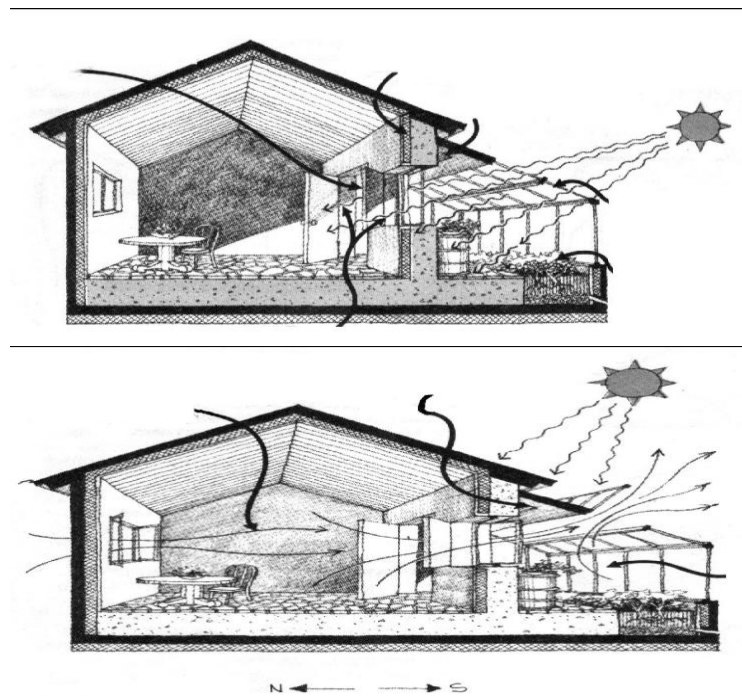


Σχήμα 1.4: Λειτουργία τοίχου Trombe[11].

Όσον αφορά τα ηλιακά θερμοκήπια πρόκειται για ένα συνδυασμό συστήματος άμεσου και έμμεσου κέρδους. Αποτελείται από έναν κλειστό χώρο προσαρτημένο ή ενσωματωμένο σε τμήμα του συμβατικού κτιριακού κελύφους με νότιο προσανατολισμό. Ο χώρος αυτός περιβάλλεται από υαλοστάσια. Ένα μέρος της εισερχόμενης ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμική και αποδίδεται άμεσα στο χώρο, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του αέρα και ένα μέρος της αποθηκεύεται στα δομικά

στοιχεία του χώρου, δηλαδή της θερμικής μάζας, και αποδίδεται με χρονική υστέρηση. Η θερμική ενέργεια μεταφέρεται στο εσωτερικό του κτιρίου μέσω θυρίδων ή ανοιγμάτων του διαχωριστικού δομικού στοιχείου.

Συχνά τα θερμοκήπια είναι χώροι, οι οποίοι προστίθενται εκ των υστέρων στα υφιστάμενα κτίρια, με μικρό κόστος και μπορούν να εξυπηρετήσουν πολλές λειτουργίες. Η απόδοση του προσαρτημένου ηλιακού χώρου εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα και τον τρόπο σύνδεσης του ηλιακού χώρου με το κτίριο. Η συνολική θερμική απόδοση ενός θερμοκηπίου υπολογίζεται σε 60-75% κάλυψη των θερμαντικών αναγκών του θερμοκηπίου στους χειμερινούς μήνες, ενώ στους παρακείμενους κατοικήσιμους χώρους του κτιρίου φθάνει ένα ποσοστό της τάξεως του 10-30% από την ενέργεια που πέφτει στην επιφάνεια του θερμοκηπίου.



Σχήμα 1.5: Χειμερινή και θερινή λειτουργία προσαρτημένου στο κτίριο θερμοκηπίου[5].

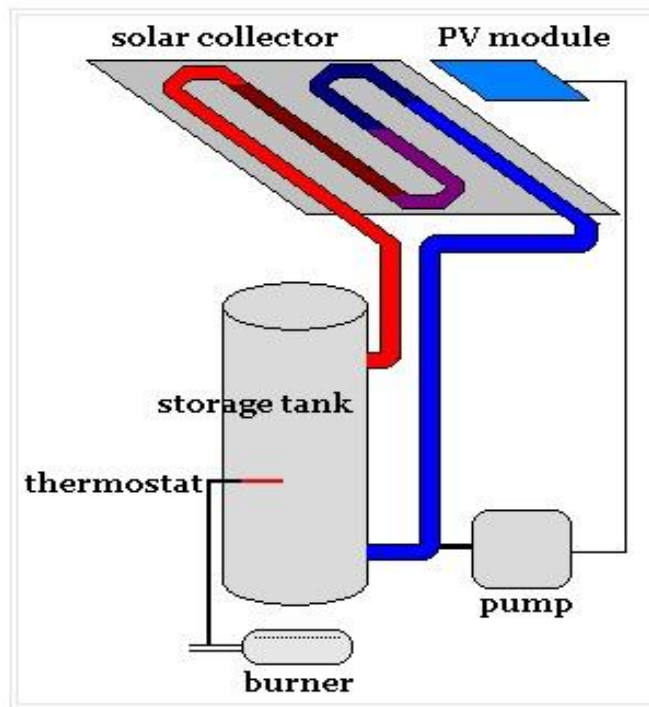
1.3.1.3 Συστήματα απομονωμένου κέρδους[5]

Στα συστήματα απομονωμένου κέρδους η επιφάνεια ηλιοσυλλογής δεν

βρίσκεται σε επαφή με τον χώρο που επιθυμούμε να θερμάνουμε. Μεταξύ αυτής της επιφάνειας και του χώρου διαβίωσης υπάρχει ένας μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας, όπως για παράδειγμα ένας ανεμιστήρας, για να παραλάβει τη θερμότητα και να τη μεταφέρει στη συνέχεια με τη βοήθεια σωληνώσεων σε χώρους που θα αποθηκευτεί σε όγκους με θραυστό υλικό (rock bed storage). Η θερμότητα αυτή αποδίδεται στο κτίριο συνήθως χωρίς τη χρήση μηχανικών μέσων, με ακτινοβολία και με μεταφορά από την σε επαφή με το χώρο θερμή επιφάνεια αποθήκευσης.

1.3.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα[15,16]

Ενεργητικά ηλιακά συστήματα ονομάζονται τα συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και στη συνέχεια τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας χρησιμοποιώντας ως ρευστό μεταφοράς κάποιο υγρό ή αέρα. Η πλέον γνωστή εφαρμογή των συστημάτων αυτών είναι η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με τους ηλιακούς θερμοσίφωνες.



Σχήμα 1.6: Τυπικό ηλιακό ενεργητικό σύστημα[17].

Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής ζεστού νερού αποτελείται καταρχήν από το τμήμα συλλογής, δηλαδή τους ηλιακούς συλλέκτες. Οι ηλιακοί συλλέκτες έχουν τρία διαφορετικά είδη. Το πρώτο είναι οι συλλέκτες χωρίς κάλυμμα, οι οποίοι είναι απλοί και οικονομικοί, ενώ αποτελούνται από μαύρους πλαστικούς ή μεταλλικούς σωλήνες χωρίς μόνωση, μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το υγρό. Το δεύτερο και πιο διαδεδομένο είδος είναι οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες, οι οποίοι αποτελούνται από επίπεδο μονωμένο πλαίσιο, το οποίο καλύπτεται από τη μία μεριά με διαφανές κάλυμμα και τζάμι και από την άλλη με πλαστικό. Το πλαίσιο περιέχει μία μαύρη σκουρόχρωμη πλάκα που απορροφάει την ηλιακή ακτινοβολία. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας κυκλοφορεί μέσα ή πάνω από την επίπεδη πλάκα μεταφέροντας τη θερμότητα. Το τρίτο είδος αποτελούν οι σωλήνες κενού, που πρόκειται για μία σειρά γυάλινων σωλήνων νερού, ο καθένας από τους οποίους περιέχει έναν απορροφητή για την ηλιακή ενέργεια. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες, που ενδιαφέρουν και περισσότερο τις πρακτικές εγκαταστάσεις, τοποθετούνται συνήθως στην οροφή του κτιρίου, με νότιο προσανατολισμό και κλίση $30-60^\circ$ ως προς τον ορίζοντα, ώστε να μεγιστοποιηθεί το ποσό της ακτινοβολίας που συλλέγεται ετησίως.

Αμέσως μετά το σύστημα συλλογής αναλαμβάνει το τμήμα κυκλοφορίας. Πρόκειται για σωληνώσεις, μέσα στις οποίες κυκλοφορεί το ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Στις περισσότερες περιπτώσεις η κυκλοφορία γίνεται με φυσική ροή (θερμοσιφωνική ροή). Η θερμότητα που μεταφέρεται αποθηκεύεται τελικά στη δεξαμενή αποθήκευσης, η οποία συνήθως διαθέτει και ηλεκτρική αντίσταση με θερμοστάτη. Με αυτόν το τρόπο επιτυγχάνεται έλεγχος του συστήματος, όπως για παράδειγμα να δίνεται εντολή παραγωγής ζεστού νερού και σε περιόδους μηδενικής ηλιοφάνειας.

Τα ενεργητικά συστήματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμαινόμενου μέσου:

- Άνοιχτου κυκλώματος: Άπευθειας θέρμανση του νερού χρήσης (το θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο το νερό που θα χρησιμοποιηθεί).
- Κλειστού κυκλώματος: Έμμεση θέρμανση του νερού χρήσης (το θερμαινόμενο μέσο κυκλοφορεί σε ιδιαίτερο κύκλωμα το οποίο θερμαίνει το νερό που θα χρησιμοποιηθεί,

χωρίς να γίνεται ανάμειξή τους, μέσω εναλλάκτη θερμότητας).

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

Μία άλλη εφαρμογή που έχει εξαπλωθεί στην Ευρωπαϊκή αγορά είναι ο συνδυασμός παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης χώρων με ενεργητικά ηλιακά συστήματα. Η χρήση των συστημάτων αυτών θεωρείται τεχνικά και οικονομικά αποδοτική, αν συνδυαστεί με την κατάλληλη μελέτη και κατασκευή του κτιρίου (καλή μόνωση, εκμετάλλευση των παθητικών ηλιακών ωφελειών) και τη συνεργασία του χρήστη. Ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για ψύξη χώρων, με τις κατάλληλες τεχνολογίες (ψυκτικές μηχανές τύπου απορρόφησης). Πέρα από την οικιακή χρήση, ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε απαιτείται θερμότητα χαμηλής θερμοκρασιακής στάθμης (όπως στη θέρμανση/ψύξη χώρου, στα συστήματα αφαλάτωσης νερού και στη θέρμανση νερού πισίνας).

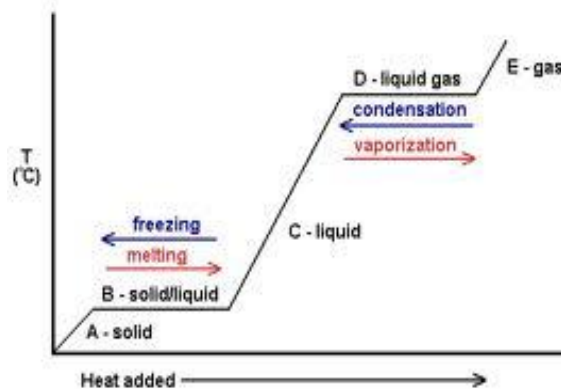
1.4 Φαινόμενο αλλαγής φάσης

1.4.1 Κατάσταση ύλης και αλλαγή φάσης[18,19]

Η κατάσταση της ύλης ενός σώματος περιγράφει το πόσο εύκολα μεταβάλλεται το σχήμα και το μέγεθός του. Υπάρχουν τρεις βασικές καταστάσεις της ύλης, η στερεά, η υγρή και η αέρια. Η κατάσταση στην οποία θα βρεθεί ένα σώμα εξαρτάται

από τη θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντός του.

Αν ένα σώμα βρίσκεται σε διαφορετική κατάσταση από αυτήν που αντιστοιχεί στις συνθήκες του περιβάλλοντος, τότε τη μεταβάλλει για να βρεθεί στην κατάλληλη. Η μετατροπή του στερεού σε υγρό ονομάζεται τήξη, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται πήξη. Η μετατροπή από αέριο σε υγρό ονομάζεται υγροποίηση ή συμπύκνωση και η μετατροπή από στερεό σε αέριο ονομάζεται εξάχνιση. Σε αυτές τις μετατροπές δεν έχει διαφορά αν προήλθαν από ασυμφωνία τρέχουσας και κατάλληλης κατάστασης ή λόγω μερικών πιέσεων. Αλλά στη μετατροπή υγρού σε αέριο διακρίνονται δύο περιπτώσεις: ο βρασμός και η εξάτμιση. Ο βρασμός οφείλεται στην τάση του υλικού να επιστρέψει στην κατάλληλη κατάσταση, ενώ η εξάτμιση οφείλεται στην μερική πίεση. Γι' αυτό και ο βρασμός εμφανίζεται μόνο σε συγκεκριμένες συνθήκες και συμβαίνει σε όλη την έκταση του υγρού, ενώ η εξάτμιση μπορεί να γίνει σε οποιοσδήποτε συνθήκες και συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια του υγρού.



Σχήμα 1.7: Διαδοχικές αλλαγές φάσης[19].

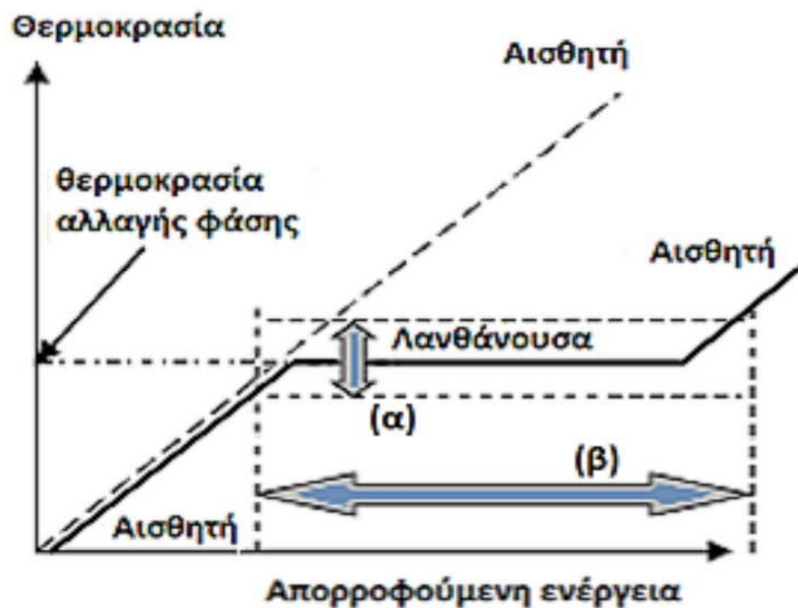
Γενικά οι αλλαγές φάσης που δεν οφείλονται στις μερικές πιέσεις, γίνονται σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης για την κάθε καθαρή ουσία. Γι' αυτό και αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες του κάθε υλικού και μάλιστα αποτελούν τις συνθήκες ισορροπίας δύο διαφορετικών καταστάσεών του.

1.4.2 Θερμότητα κατά την αλλαγή φάσης[20,21]

Κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει η θερμική ενέργεια συναλλαγής. Οι αλλαγές φάσης γίνονται κατά κανόνα σε κανονική πίεση μίας ατμόσφαιρας, άρα οι αλλαγές φάσης οφείλονται στην αλλαγή της θερμοκρασίας, άρα και στην πρόσληψη ή την αποβολή θερμικής ενέργειας.

Γενικά η θερμική ενέργεια ενός σώματος αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του, οπότε και μεταπίπτει από τη στερεή στην υγρή κατάσταση και στη συνέχεια στην αέρια. Η θερμική ενέργεια ενός σώματος μειώνεται όταν ακολουθείται η αντίστροφη πορεία. Κατά την πρόσληψη ή την αποβολή θερμικής ενέργειας το σώμα μεταβάλλει την θερμοκρασία του ή αλλάζει την κατάστασή του. Αν ένα σώμα αλλάζει κατάσταση τότε η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή, ενώ η θερμική ενέργεια καταναλώνεται για την διάλυση ή τη δημιουργία των διαμοριακών δυνάμεων, οι οποίες έχουν άμεση σχέση με τη δομή ενός σώματος σε μικροσκοπικό επίπεδο.

Η ολική θερμότητα ατμοποίησης, η οποία είναι η θερμότητα που απαιτείται για τη μετατροπή 1kg απεσταγμένου νερού θερμοκρασίας 0°C σε ατμό ορισμένης πίεσης και θερμοκρασίας, αναλύεται στην αισθητή και στη λανθάνουσα θερμότητα.



Σχήμα 1.8: Απεικόνιση αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας[22].

1.4.2.1 Αισθητή θερμότητα[20,23]

Από τον παραπάνω πρόλογο γίνεται αντιληπτό ότι αισθητή θερμότητα ονομάζεται το ποσό της θερμότητας που χρησιμοποιείται για την αύξηση της θερμοκρασίας 1Kg νερού από τους 0°C στους 100 °C. Έχει αυτήν την ονομασία επειδή γίνεται αντιληπτή από την ανύψωση της θερμοκρασίας που παρατηρείται σε προσαρμοσμένο θερμόμετρο.

Ο πιο γνωστός τρόπος αποθήκευσης θερμότητας είναι η αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Μεταφέρεται στο μέσο που χρησιμοποιείται για αποθήκευση και ανεβάζει τη θερμοκρασία του. Ο λόγος της αποθηκευόμενης ενέργειας προς τη θερμοκρασιακή μεταβολή καλείται θερμοχωρητικότητα του μέσου, η οποία είναι επιθυμητό να είναι αυξημένη. Ως μέσα αποθήκευσης χρησιμοποιούνται υγρά υλικά (όπως το νερό, τα παράγωγα πετρελαίου ή κάποια τηγμένα άλατα) ή στερεά υλικά (όπως οι πέτρες ή τα μέταλλα). Τα αέρια δεν έχουν πρακτική χρήση λόγω ακριβώς της μικρής θερμοχωρητικότητάς τους.

Τα συστήματα αισθητής αποθήκευσης θερμότητας παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Αυτά είναι η περιορισμένη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου του μέσου αποθήκευσης και η μη ισοθερμική συμπεριφορά κατά την αποθήκευση και την απόδοση θερμότητας, δηλαδή κατά τη φόρτιση και την αποφόρτιση του συστήματος.

1.4.2.2 Λανθάνουσα θερμότητα[20,23,24]

Λανθάνουσα θερμότητα ονομάζεται το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για την μετατροπή 1Kg νερού θερμοκρασίας βρασμού σε ατμό ίδιας θερμοκρασίας. Σε αντίθεση με την αισθητή θερμότητα, δεν γίνεται αντιληπτή από προσαρμοσμένο θερμόμετρο, γι' αυτό και φέρει αυτό το όνομα.

Η συνολική λανθάνουσα θερμότητα διαχωρίζεται στην εσωτερική και στην εξωτερική. Η εσωτερική λανθάνουσα θερμότητα είναι το ποσό των θερμίδων που

αντιπροσωπεύουν το μηχανικό έργο που απαιτείται για τη διάσπαση της συνοχής των μορίων του νερού προκειμένου αυτά να ελευθερωθούν και να μετατραπούν σε ατμό. Η εξωτερική λανθάνουσα θερμότητα είναι το ποσό της θερμότητας που απαιτείται προκειμένου να υπερνικηθεί η πίεση που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του νερού κατά τη διάρκεια της ατμοπαραγωγής. Εν προκειμένω αυτή αντιπροσωπεύει το παραγόμενο εξωτερικό έργο από τον ατμό.

Η αποθήκευση με λανθάνουσα θερμότητα βασίζεται στην απορρόφηση και στην απελευθέρωση θερμότητας όταν ένα υλικό που δρα ως μέσο αποθήκευσης αλλάζει φάση από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε αέριο ή αντίστροφα. Μεταξύ αυτών των μετατροπών, τα δύο είδη που είναι πιο συχνά εκμεταλλεύσιμα είναι αυτά της μετατροπής στερεού σε υγρό και στερεό σε στερεό. Οι μετατροπές στερεού σε αέριο και υγρού σε αέριο δεν επιλέγονται για πρακτικές χρήσεις, εξαιτίας των μεγάλων όγκων που απαιτούνται για τα αντίστοιχα συστήματα. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του είδους αποθήκευσης είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας και ανά μονάδα όγκου. Επίσης, μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί με τη λανθάνουσα θερμότητα να αποθηκεύεται ενέργεια σε σταθερή θερμοκρασία, η οποία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης του υλικού.

Τα θερμοχημικά συστήματα βασίζονται στην ενέργεια που απορροφάται και αποδίδεται κατά το σπάσιμο και την ανάπλαση των μοριακών δεσμών κατά τη διάρκεια μίας απολύτως αντιστρεπτής χημικής αντίδρασης. Δηλαδή όταν η ροή θερμότητας μέσα από ένα υλικό δεν αντανakλάται σε αύξηση της θερμοκρασίας του, τότε αυτή η θερμότητα χρησιμοποιείται για αύξηση της απόστασης των μοριακών δεσμών και για μετατροπή από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε αέριο. Η αντίστροφη διαδικασία συμβαίνει όταν επανακτάται η θερμότητα από το υλικό. Σε αυτήν την περίπτωση η αποθηκευόμενη θερμική ενέργεια εξαρτάται από την ποσότητα του αποθηκευτικού μέσου, την ενδοθερμική θερμότητα της αντίδρασης και το βαθμό της μετατροπής του υλικού.

Βιβλιογραφία 1^{ου} Κεφαλαίου

- [1] Ανθή Χαραλάμπους, Διευθύντρια Cyprus Energy Agency, Το ενεργειακό πρόβλημα και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας,
<http://www.cea.org.cy/publications/09%20Feb%20REVMA.pdf>
- [2] Εκπαιδευτικό πρόγραμμα για την ενέργεια, Ο ρόλος της ενέργειας, Σύγχρονες ενεργειακές προκλήσεις, <http://www.cie.org.cy/sxoliko.html#menu1-2-4>
- [3] Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή, Το ενεργειακό πρόβλημα,
<http://aix.meng.auth.gr/lhtee/education/IAxBE1.pdf>
- [4] <http://lyk-naxou.kyk.sch.gr/Brochurewater.htm>
- [5] Κλειώ Ν.Αξαρχή, Εργαστήριο Οικονομικής και Φυσικής των Κτιρίων Α.Π.Θ, Γενικές αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού
- [6] Εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα,
http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/ktiria_intro.htm
- [7] Βιοκλιματικός ενεργειακός σχεδιασμός,
http://spitia.gr/greek/meleti_efarmogi/bioclimate/bioclimate.htm
- [8] Ηλιακή ενέργεια και ηλιακά συστήματα,
<http://www.physics4u.gr/energy/sunenergy.html>
- [9] Ηλιακή ενέργεια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, <http://affiliate-solar-energy.prositeslab.com/el/43/solar-energy-pros-and-cons/>
- [10] Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης,
http://www.fourlas.com/index.php?option=com_content&view=article&id=113&Itemid=96&lang=el
- [11] Χρήστος Τζιβανίδης, Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων, Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων
- [12] Ηλιακή Ενέργεια-Παθητικά ηλιακά συστήματα,
http://users.sch.gr/kpara/ape2009_10/sun_energy2.html
- [13] Παθητικά ηλιακά συστήματα και η απόδοσή τους στην Ελλάδα,
http://www.ecoarchitects.gr/images/FINAL/Pathitika_Hliaka_Systemata.pdf
- [14] Παθητικά ηλιακά συστήματα άμεσου και έμμεσου κέρδους,
<http://www.topmagazine.gr>
- [15] Ενεργειακό Γραφείο Κυπρίων Πολιτών, Θερμικά ηλιακά συστήματα, Εφαρμογές στον οικιακό τομέα,
<http://www.cea.org.cy/CEA%20Greek/TOPICS/Renewable%20Energy/Solar%20thermal%20systems.pdf>

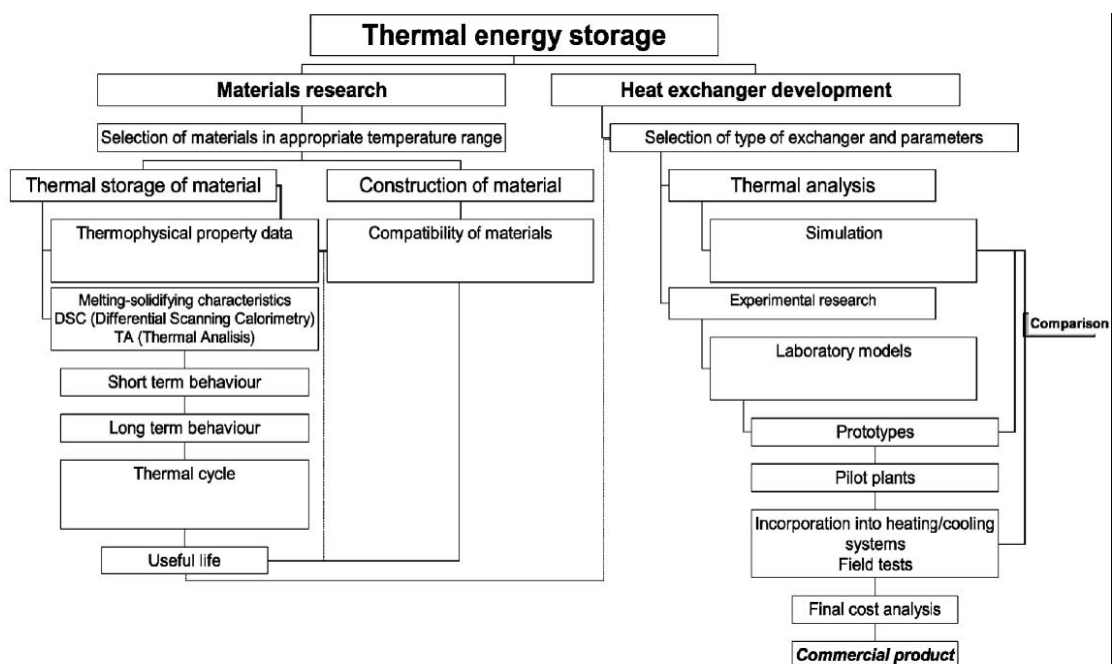
- [16] Εκπαιδευτικό πρόγραμμα για την ενέργεια, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Ηλιακή ενέργεια, Ενεργητικά ηλιακά συστήματα,
<http://www.cie.org.cy/sxoliko.html#menu2-3-1-2>
- [17] <http://www.green-planet-solar-energy.com/active-solar-heating-system.html>
- [18] el.wikipedia.org/wiki/Κατάσταση_της_ύλης
- [19] <http://www.kentchemistry.com/links/Matter/PhaseChanges.htm>
- [20] el.wikipedia.org/wiki/Θερμότητα_ατμοπαραγωγής
- [21] Changes of Phase,
<http://zonalandeducation.com/mstm/physics/mechanics/energy/heatAndTemperature/changesOfPhase/changeOfState.html>
- [22] Εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στα κτίρια,
http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153
- [23] S.M.Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques
- [24] A.Pasupathy, R.Velraj, R.V.Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments

Κεφαλαίο 2^ο: Υλικά αλλαγής φάσης

2.1 Ορισμός PCM ως μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας[1-4]

Τα υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος των θερμοκρασιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται, χρησιμοποιώντας χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν ή να απελευθερώσουν θερμότητα, ονομάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία PCMs (Phase Change Materials). Τα PCMs είναι στερεά σε θερμοκρασία δωματίου αλλά ρευστοποιούνται όταν αυξηθεί η θερμοκρασία και αντίστροφα. Με αυτήν την διαδικασία γίνεται και η συναλλαγή θερμότητας.

Τα PCM αποτελούν μέρος των συστημάτων θερμικής αποθήκευσης (Thermal Energy Storage-TES). Τα γενικά πλεονεκτήματα των TES είναι η χρονική καθυστέρηση για εξομάλυνση των αιχμών φορτίου, η ασφάλεια στην παροχή ενέργειας όταν αυτή είναι απαραίτητη, η θερμική αδράνεια και η θερμική προστασία. Οι πιο βασικοί τομείς μελέτης στα συστήματα θερμικής αποθήκευσης είναι η επιλογή των υλικών και η ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας, όπως γίνεται κατανοητό και από το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.1: Τομείς έρευνας στα συστήματα θερμικής αποθήκευσης[3].

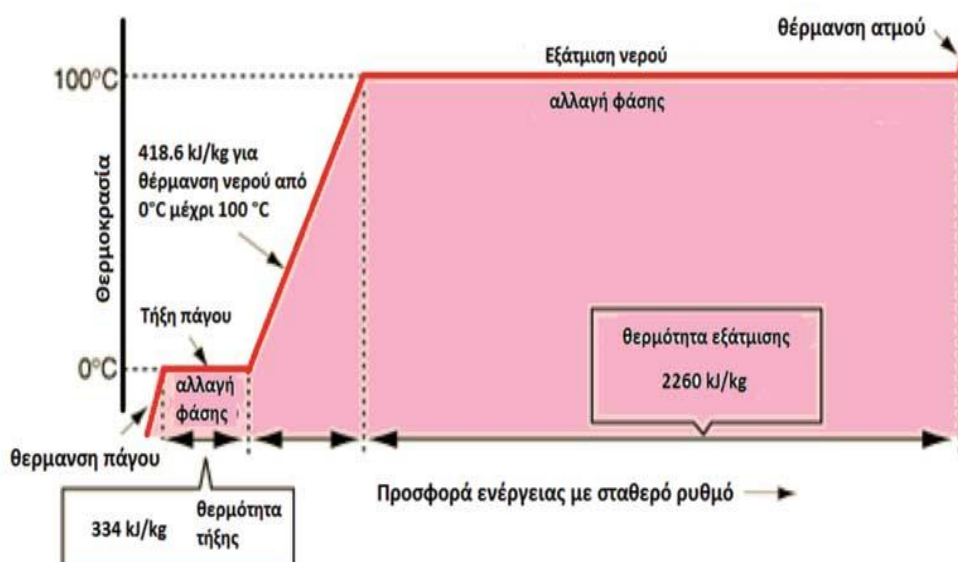
Τα PCM αποτελούν μία αξιόπιστη λύση για την επιλογή των υλικών. Σε αντίθεση με τις συμβατικής λογικής μεθόδους θερμικής αποθήκευσης, τα PCMs παρέχουν πολύ υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας και η θερμότητα αποθηκεύεται και απελευθερώνεται σε μία σχεδόν σταθερή θερμοκρασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Στα πλαίσια του θερμοκρασιακού εύρους της ανθρώπινης θερμικής άνεσης (20-30°C) τα υλικά αλλαγής φάσης είναι πολύ αποδοτικά, αφού αποθηκεύουν περίπου 5-14 φορές περισσότερη ενέργεια κατ'όγκο από τα συμβατικά υλικά.

Τα PCMs μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα, τόσο για ενεργητική όσο και για παθητική θέρμανση. Σε γενικές γραμμές PCMs μπορούν να ενταχθούν σε οικοδομικά υλικά, όπως σε σκυρόδεμα, σε γυψοσανίδες στην οροφή ή στο πάτωμα για να αυξηθεί η χωρητικότητά τους για θερμική αποθήκευση. Μπορούν να απορροφήσουν είτε την ηλιακή ενέργεια άμεσα είτε τη θερμική ενέργεια μέσω της φυσικής συναγωγής. Σημαντική έρευνα έχει γίνει για την εφαρμογή των PCMs για θέρμανση και ψύξη χώρων, αλλά προς το παρόν υπάρχουν περιορισμένα συστήματα σε χρήση. Στα ήδη υπάρχοντα τα ενσωματωμένα PCMs απορροφούν την θερμότητα από το θερμότερο περιβάλλον, καθυστερούν την θέρμανση του εσωτερικού ψύχοντας το κτίριο την ημέρα και θερμαίνοντας το τη νύχτα, αποδίδοντας την στο ψυχρότερο πλέον περιβάλλον.

Το ιδανικό PCM θα ήταν ένα υλικό που θα παρουσίαζε μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας, υψηλή αγωγιμότητα, θερμοκρασία τήξης σύμφωνη με το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής, να τήκεται με την ελάχιστη εμφάνιση supercooling (υπέρψυξη), να είναι χημικά σταθερό, φτηνό στην παραγωγή του, να μην είναι τοξικό, διαβρωτικό και εύφλεκτο. Τα υλικά που έχουν μελετηθεί τα τελευταία 40 χρόνια είναι τα ένυδρα άλατα, οι παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και ευτηκτικά μείγματα οργανικών και μη οργανικών συστατικών.

Πριν την ανάλυση των υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα ως PCM, γίνεται εδώ μία αναφορά του πρώτου υλικού που χρησιμοποιήθηκε σε πρακτικές εφαρμογές, που είναι το νερό. Το νερό, στη θερμοκρασία των 0°C, προκειμένου να αλλάξει φάση από στερεό (πάγος) σε υγρό, χρειάζεται να απορροφήσει ενέργεια ίση με 334kJ/kg, η οποία αποτελεί τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Αντίστοιχα στη θερμοκρασία των 100°C, δηλαδή για τη μετατροπή από την υγρή στην αέρια φάση, χρειάζεται να απορροφήσει λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ίση με 2260kJ/kg. Κατά την αντίστροφη πορεία, δηλαδή κατά τη ψύξη

του νερού, στις θερμοκρασίες αλλαγής φάσης, οι κατα περίπτωση λανθάνουσες θερμότητες απελευθερώνονται. Σε όλες τις υπόλοιπες θερμοκρασίες, με σταθερό και συνεχή ρυθμό θέρμανσης ή ψύξης μπορεί να επιτευχθεί αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας του νερού αντίστοιχα. Παρατίθεται και το διάγραμμα μεταβολής των φάσεων του νερού.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα μεταβολής φάσης του νερού[4].

Το νερό κατά την αλλαγή φάσης του σε πάγο μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλα ποσά θερμότητας, δηλαδή σχεδόν 80 φορές περισσότερη αποθηκευμένη θερμότητα σε σχέση με την υγρή κατάσταση του νερού. Επειδή η χρήση του πάγου ως PCM παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα που δημιουργούνται λόγω των ιδιοτήτων του νερού (θερμοκρασία πήξης 0°C, μεγάλη μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία, χαμηλή θερμοκρασία προσαγωγής στο σύστημα αποθήκευσης), η αρχική ιδέα ήταν να αναπτυχθούν υλικά με βάση το νερό, τα οποία να παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματά του (μεγάλη τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας), αλλά να μην παρουσιάζουν τα υπόλοιπα προβλήματα της χρήσης του πάγου. Έτσι προέκυψαν τα ένυδρα άλατα και μετά τα υπόλοιπα υλικά τα οποία θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.

2.2 Συμπεριφορά PCM[5,6]

Ουσιαστικά εδώ αναλύονται διεξοδικά οι ιδιότητες ενός ιδανικού PCM ώστε να γίνει κατανοητός και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η επιλογή του για κάθε εφαρμογή.

2.2.1 Θερμοδυναμικές(θερμικές και φυσικές) ιδιότητες

1.Θερμοκρασία τήξης μέσα στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας.Η διαδικασία επιλογής ενός PCM πρέπει να ξεκινάει ακριβώς από αυτό το σημείο.Δηλαδή θα πρέπει να μετράται το σημείο τήξης και να ελέγχεται ότι πράγματι βρίσκεται μέσα στο εύρος των θερμοκρασιών που προκαλούν θερμική άνεση.

2.Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα για να παρέχει πρόσθετο απόθεμα αισθητής θερμότητας.

3.Υψηλή θερμική αγωγιμότητα στερεής και υγρής φάσης για να υπάρχει αποτελεσματική φόρτιση και αποφόρτιση του συστήματος.Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας θεωρείται σταθερή σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής.Τα υλικά αλλαγής φάσης στο σύνολό τους δεν παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, γι' αυτό και επιδιώκεται να υπάρχουν μεγάλες επιφάνειες μετάδοσης θερμότητας.

4.Μικρή μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης.

5.Ομοιόμορφη τήξη του υλικού αλλαγής φάσης για σταθερή αποθηκευτική ικανότητα του υλικού σε κάθε κύκλο τήξης και πήξης.

6.Μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας μετάβασης σε άλλη φάση.Είναι δείκτης αποδοτικότητας του υλικού αλλαγής φάσης.

7.Υψηλή πυκνότητα.Και η πυκνότητα είναι δείκτης αποδοτικότητας του υλικού αλλαγής φάσης.

8.Χαμηλή τάση ατμών, ώστε να υπάρχει μείωση των απαιτήσεων σταθερότητας του δοχείου που θα περιέχει το PCM.

2.2.2 Κινητικές ιδιότητες

1.Υψηλός βαθμός πυρηνοποίησης για να αποφευχθεί υπέρψυξη της υγρής φάσης.

2.Υψηλός βαθμός ανάπτυξης κρυστάλλων.

2.2.3 Χημικές ιδιότητες

- 1.Εντελώς αναστρέψιμος κύκλος ψύξης-τήξης.
- 2.Απουσία χημικής αποικοδόμησης μετά από μεγάλο αριθμό κύκλων τήξης-ψύξης, δηλαδή μακροπρόθεσμη χημική σταθερότητα.
- 3.Απουσία διαβρωτικότητας στα υλικά κατασκευής.
- 4.Μη τοξικά, μη εύφλεκτα και μη εκρηκτικά υλικά για λόγους ασφαλείας.

2.2.4 Οικονομικές και οικολογικές ιδιότητες

- 1.Άφθονα.
- 2.Διαθέσιμα.
- 3.Ανακυκλώσιμα, ώστε να είναι φιλικά προς το περιβάλλον.
- 3.Οικονομικά προσεγγίσιμα.Το χαμηλό κόστος και η υψηλή διαθεσιμότητα των υλικών αλλαγής φάσης είναι ένας πολύ σημαντικός άξονας ανάπτυξης και διάδοσης της εφαρμογής τους.

2.3 Κατηγοριοποίηση

2.3.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τις εφαρμογές[1,2]

Γενικά δεδομένου ότι ένα μόνο υλικό δεν μπορεί να έχει όλες τις απαιτούμενες ιδιότητες για να είναι ένα ιδανικό μέσο θερμικής αποθήκευσης, πρέπει κανείς να χρησιμοποιήσει τα διαθέσιμα υλικά και να προσπαθήσει να αντιμετωπίσει τις φτωχές φυσικές ιδιότητες με έναν κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος.

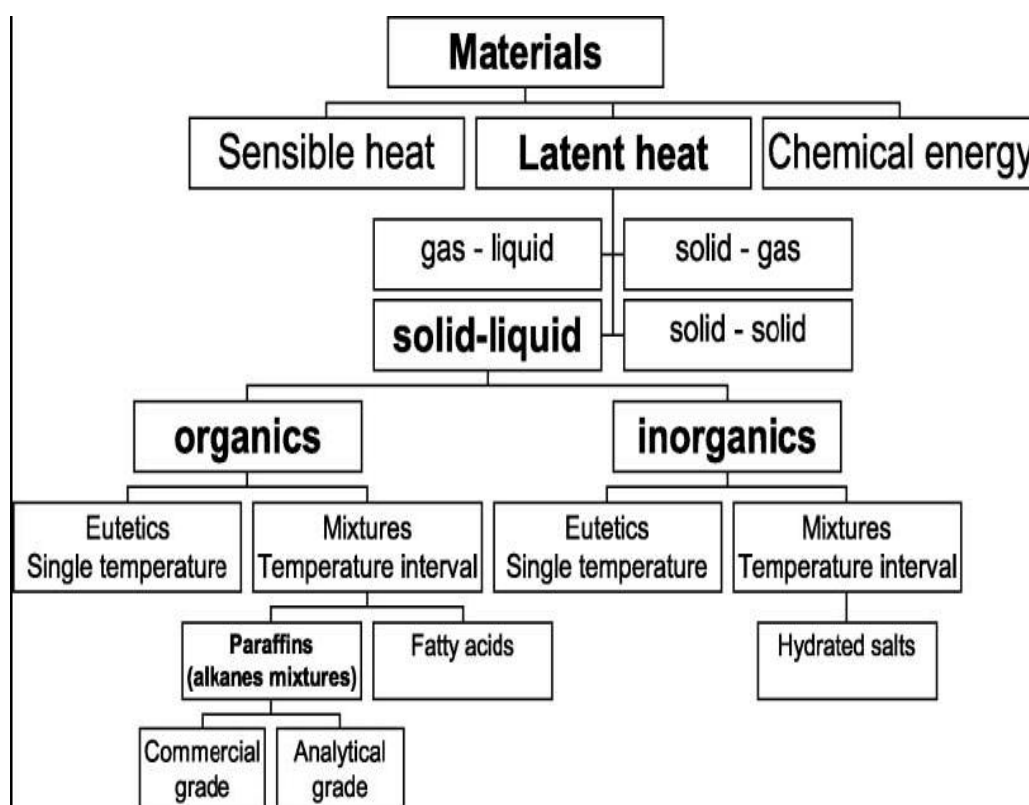
Είναι δεδομένο βέβαια ότι δεν είναι εφικτό να χρησιμοποιούνται όλα τα υλικά αλλαγής φάσης για όλες τις εφαρμογές, οπότε γίνεται ένας διαχωρισμός.Το χαρακτηριστικό που τα διαχωρίζει σε διάφορες κατηγορίες είναι το θερμοκρασιακό εύρος που μπορούν να καλύψουν.

Τα PCMs, λοιπόν, μπορούν να ομαδοποιηθούν ανάλογα με τη θερμοκρασία ή το εύρος θερμοκρασιών που λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης (από στερεό σε υγρό) σε υλικά που αλλάζουν φάση κάτω από τους 15°C και χρησιμοποιούνται

για αποθήκευση ψύξης σε εφαρμογές κλιματισμού ή μεταφορά ευπαθών υλικών (ιατρικές εφαρμογές) και σε υλικά που αλλάζουν φάση πάνω από τους 90°C και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ψύξης με απορρόφηση. Όλα τα άλλα υλικά με ενδιάμεσες τιμές της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές θέρμανσης σε συνεργασία με ηλιακά συστήματα ή εφαρμογές ομαλοποίησης των φορτίων κλιματισμού καθώς και για αποθήκευση θερμότητας.

2.3.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τη σύσταση

Η γενική κατηγοριοποίηση των PCM φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.3: Κατηγοριοποίηση των PCM[3].

2.3.2.1 Οργανικά PCM

Τα οργανικά υλικά αντιπροσωπεύονται κυρίως από τις παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά, τα οποία είναι μείγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 έως 25. Εξίσου σημαντικές κατηγορίες οργανικών υλικών είναι τα λιπαρά οξέα, οι εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μείγματα αυτών[1].

2.3.2.1.1 Παραφίνες[1,6-9]

Στην χημεία, η παραφίνη είναι ένας όρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τον όρο ``αλκάνιο``, κάνοντας αναφορά σε κορεσμένους υδρογονάνθρακες που συμβολίζονται με τον γενικό μοριακό τύπο C_nH_{2n+2} . Το κερι παραφίνης αναφέρεται σε ένα μείγμα αλκανίων, το οποίο κυμαίνεται στο εύρος $20 \leq n \leq 40$. Στη θερμοκρασία δωματίου είναι στερεά, ενώ εισέρχονται στην υγρή φάση περίπου στους 37°C.

Οι περισσότερες παραφίνες αποτελούνται από ευθείες ανθρακικές αλυσίδες με δύο μεθυλικά μόρια κοντά στο τέλος της αλυσίδας. Διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τον αριθμό ατόμων άνθρακα στην αλυσίδα τους. Υπάρχουν οι n-Παραφίνες, οι οποίες έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα και οι ισο-Παραφίνες, των οποίων η ανθρακική αλυσίδα αποτελείται από περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα.

Ο όρος ``παραφίνη`` αναφέρεται κυρίως σε ένα γραμμικό κανονικό αλκάνιο, ενώ τα ισοαλκάνια ονομάζονται επίσης παραφίνες. Τα αλκάνια δεν είναι στο σύνολό τους ιδιαίτερα αντιδραστικές ουσίες, θεωρούνται βιολογικά υποπροϊόντα και είναι σημαντικά κυρίως λόγω των μη υδρογονανθρακικών ουσιών, οι οποίες μπορούν να πρσαρτηθούν στην ανθρακική αλυσίδα. Το απλούστερο μόριο παραφίνης είναι αυτό του μεθανίου με χημικό τύπο CH_4 , που είναι αέριο στη θερμοκρασία δωματίου, ενώ ομοίως αέρια είναι όλα τα στοιχεία με χημικό τύπο μέχρι C_4H_{10} . Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των ατόμων που σχηματίζουν την ανθρακική αλυσίδα. Βαρύτερα μέλη της σειράς παραφινών, όπως το οκτάνιο με χημικό τύπο C_8H_{18} και το ορυκτέλαιο, εμφανίζονται ως υγρά στη θερμοκρασία δωματίου, ενώ ομοίως υγρά είναι όσα αλκάνια κυμαίνονται μεταξύ των χημικών τύπων C_5H_{12} και $C_{17}H_{36}$. Η στερεή μορφή παραφίνης, η οποία ονομάζεται κερι παραφίνης, είναι από τα βαρύτερα μόρια, με χημικούς τύπους από $C_{20}H_{42}$ μέχρι $C_{40}H_{82}$, αφού στερεά είναι όλα τα αλκάνια με χημικό τύπο από $C_{18}H_{38}$ και μετά.

Το κερι παραφίνης προσδιορίστηκε από τον Carl Reichenbach το 1830. Το κερι παραφίνης βρίσκεται κυρίως ως ένα λευκό, άοσμο, άγευστο και κυρώδες στερεό, με τυπικό σημείο τήξης μεταξύ 46°C και 68°C, έχοντας πυκνότητα περίπου $0,9 \text{ g/cm}^3$. Είναι αδιάλυτο στο νερό, αλλά διαλυτό ή στη βενζίνη ή σε συγκεκριμένους εστέρες. Το φτωχό κερι παραφίνης είναι, επίσης, ένας καλός αγωγός ηλεκτρισμού. Είναι ένα τέλειο υλικό για να αποθηκεύσει θερμότητα,

έχοντας θερμοχωρητικότητα περίπου $2,14-2,9J/gK$ και θερμότητα τήξης περίπου $200-220J/g$.

Γενικά το σημείο βρασμού των αλκανίων εξαρτάται από το μοριακό βάρος, και μάλιστα η συνάρτηση των δύο μεγεθών είναι σχεδόν γραμμική. Όμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το σημείο τήξης, δηλαδή όσο περισσότερα άτομα άνθρακα στο μόριο του αλκανίου, τόσο υψηλότερο το σημείο τήξης. Τα αλκάνια με περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα έχουν γενικά χαμηλότερο σημείο τήξης από αυτά με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα, διότι τα μόρια με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα είναι καλύτερα χωροθετημένα, στοιχείο που συνεπάγεται υψηλότερη απαίτηση για προσθήκη θερμότητας για να σπάσουν οι δεσμοί και να αλλάξει η φάση σε υγρή.

Τα εμπορικά προϊόντα των παραφινών είναι αρκετά φθηνότερα και άφθονα σε σχέση με τα ένυδρα άλατα, που θα αναλυθούν παρακάτω, με μέτριες τιμές λανθάνουσας θερμότητας (περίπου $150 KJ/Kg$) και δυνατότητα παραγωγής τους σχεδόν σε όλο το φάσμα των θερμοκρασιών. Η εμφάνιση της υπέρψυξης είναι αμελητέα, είναι αδρανή με τους περισσότερους χημικούς αντιδραστήρες και σταθερά χωρίς να παρουσιάζουν διαχωρισμό των φάσεων και εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους, στοιχείο που δείχνει ότι έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Και αυτό γιατί οι παραφίνες παρουσιάζουν χαμηλή πίεση ατμοποίησης, στοιχείο που εξηγεί την μικρή απώλεια υλικού μετά από μεγάλο αριθμό κυκλικών φορτίσεων του υλικού. Δεν παρουσιάζουν πρόβλημα διάβρωσης με κανένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των παραφινών είναι ότι υπάρχει πλήθος παραφινών με σημεία τήξης από $20-26^{\circ}C$, δηλαδή ένα εύρος θερμοκρασιών κατάλληλο για εφαρμογές θέρμανσης στα κτίρια.

Δυστυχώς, όμως, παρουσιάζουν μικρή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, ιδιότητα που περιορίζει τις εμπορικές εφαρμογές τους (περίπου $0,2W/m^{\circ}C$). Αυτή είναι η αιτία που έχουν εξεταστεί πολλές περιπτώσεις εμπλουτισμού του υλικού με μεταλλικά αντικείμενα διαφόρων σχημάτων ή χρήση δοχείων και σωλήνων με πτερύγια με σκοπό την αύξηση του ρεύματος θερμότητας μέσα στο υλικό. Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, επίσης, στο γεγονός ότι οι παραφίνες πραγματοποιούν ολοκληρωμένα την αλλαγή φάσης τους σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου $10K$ ($\sim 9K$ πριν το σημείο τήξης και $\sim 1K$ μετά το σημείο τήξης). Ένα τέτοιο φαινόμενο αν δεν ληφθεί υπόψη μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη εκλογή υλικού με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις ονομαστικές τιμές. Ένα άλλο πρόβλημα των παραφινών είναι ότι επηρεάζεται πολύ η

πυκνότητα το υλικού από την φάση στην οποία βρίσκεται, ώστε είναι δυνατόν όταν το υλικό στερεοποιηθεί και αυξηθεί η πυκνότητά του, να αποκολληθεί από τα τοιχώματα του δοχείου, γεγονός που θα επηρεάσει πολύ το φαινόμενο της αγωγής θερμότητας. Ουσιαστικά δεν θα είναι πλέον αγωγή, αλλά αγωγή-συναγωγή θερμότητας. Τέλος, ένα μειονέκτημά τους είναι η αναφλεξιμότητα, όμως είναι κοινή άποψη όλων των ερευνητών ότι η χαμηλή τάση ατμών της παραφίνης που ήδη αναφέρθηκε, δεν εγκυμονεί κινδύνους ανάφλεξης.

2.3.2.1.2. Λιπαρά οξέα[10-12]

Στην Οργανική Χημεία και ειδικότερα στη Βιοχημεία, λιπαρό οξύ ονομάζεται ένα καρβοξυλικό οξύ, συνήθως με μακριά ανθρακική αλυσίδα. Καρβοξυλικά οξέα σαν το βουτυρικό οξύ (με 4 άτομα άνθρακα) θεωρούνται λιπαρά οξέα, παρά το γεγονός ότι γενικότερα τα λιπαρά οξέα προέρχονται από φυσικά λίπη και έλαια και θεωρείται ότι έχουν τουλάχιστον 8 άτομα άνθρακα, όπως το καπρυλικό 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 με την αφαίρεση της γλυκερόλης. Χωρίζονται σε δύο 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: $CH_3(CH_2)_2COOH$

•Μυριστικό οξύ: $CH_3(CH_2)_{12}COOH$

•Παλμιτικό οξύ: $CH_3(CH_2)_{14}COOH$

•Στεαρικό οξύ: $CH_3(CH_2)_{16}COOH$

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: $CH_3CH_2CH=CHCH_2CH=CHCH_2CH=CH(CH_2)_7COOH$

•Λινολεϊκό οξύ: $CH_3(CH_2)_4CH=CHCH_2CH=CH(CH_2)_7COOH$

•Ολεϊκό οξύ: $CH_3(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_7COOH$

Τα λιπαρά οξέα εμφανίζουν σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα παρόμοια με αυτά των παραφινών. Είναι θερμικά και χρωματικά σταθερά, μη-τοξικά, έχοντας αναπαραγωγίμα χαρακτηριστικά τήξης και στερεοποίησης και χαμηλή διαβρωτικότητα, όπως ακριβώς και οι παραφίνες. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι σε θερμοκρασία δωματίου υπόκεινται σε μία χημική αντίδραση η οποία ονομάζεται αυτο-οξειδωση. Το λιπαρό οξύ, δηλαδή, σπάει σε υδαάνθρακες, κετόνες, αλδεύδες και μικρότερες ποσότητες αλκοολών και εποξικών. Επίσης, είναι σύνηθες να γίνεται μία επεξεργασία των λιπαρών οξέων με συμπυκνωτικούς παράγοντες, όπως το κιτρικό οξύ.

Το μειονέκτημά τους σε σχέση με τις παραφίνες είναι ότι αν και αντιμετωπίζονται ως εξαιρετικές ουσίες για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, έχουν πολύ αυξημένο κόστος για μεγάλης κλίμακας ηλιακές εφαρμογές. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από κακοσμία, στοιχείο που περιορίζει την χρησιμότητα του χώρου στον οποίο έχουν χρησιμοποιηθεί λιπαρά οξέα. Βέβαια, αυτό θα μπορούσε να εξουδετερωθεί από τη χρήση κάποιων καινούριων αποσμητικών προϊόντων, όπως την οικογένεια που περιέχει κάποια συνθετικά μοριακά κόσκινα, τα οποία μπορούν πολύ εύκολα να συνδυαστούν με τέτοιου είδους οργανικά μοριακά υλικά που χαρακτηρίζονται από κακοσμία.

Οι Sari και Kaygusuz έχουν δώσει μία σειρά από μελέτες, σύμφωνα με τις οποίες, τα λιπαρά οξέα πληρούν τα θερμοδυναμικά και κινητικά κριτήρια για χαμηλής θερμοκρασίας αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Παρουσιάζουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά τήξης και στερεοποίησης, χημική σταθερότητα και φυσικές ιδιότητες. Ανάμεσα στα διάφορα λιπαρά οξέα, μόνο το καπρυλικό οξύ έχει σημείο τήξης περίπου στους $16,5^{\circ}\text{C}$, το οποίο είναι αρκετά κοντά στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος για εφαρμογή ψύξης μίας μονάδας χώρου. Για ψύξη δωματίου, ευτηκτικά μείγματα λιπαρών οξέων αντιμετωπίζονται ως ένα ευέλικτο μέσο ψυκτικής ενέργειας, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε μία μεγάλη ποικιλία κτιριακών καταστάσεων. Επιπλέον, συνδυασμοί λιπαρών οξέων με διαφορετικά σημεία τήξης μπορούν να σχηματίσουν ευτηκτικά σημεία, τα οποία μπορούν να συμμορφωθούν με το επιθυμητό εύρος τήξης.

2.3.2.2 Ανόργανα PCM

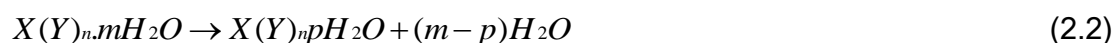
Τα ανόργανα υλικά αντιπροσωπεύονται κυρίως από τα ένυδρα άλατα, τα οποία και αναλύονται στη συνέχεια. Ξεχωριστή αναφορά γίνεται στο Άλας του Glauber[1].

2.3.2.2.1 Ένυδρα άλατα[1,13,14]

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 $X(Y)_n.mH_2O$, 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.

Μερικά ένυδρα άλατα όπως το θειικό δεκαένυδρο νάτριο 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.

Στον πίνακα δίνονται κάποια ένυδρα άλατα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κτιριακές εφαρμογές, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Το εξυδρικό χλωριούχο ασβέστιο, το οποίο και σημειώνεται με έντονη γραμματοσειρά, είναι αυτό που έχει χρησιμοποιηθεί περισσότερο στις διάφορες πειραματικές διατάξεις, όπως θα γίνει αντιληπτό και από τα επόμενα κεφάλαια.

Πίνακας 2.1 : Χαρακτηριστικά ένυδρων αλάτων				
Material	Chemical compound	Melting Point οC	Heat of fusion kJ/kg	Density Kg
Calcium chloride hexahydrate	<i>CaCl₂.6H₂O</i>	29-39	177	1634
Sodium carbonate decahydrate	<i>Na₂CO₃.10H₂O</i>	32-36	247	1442
Disodium phosphate decahydrate	<i>Na₂HPO₄.12H₂O</i>	36	265	1522
Sodium sulphate decahydrate	<i>Na₂SO₄.10H₂O</i>	31-32	251	1534
Sodium thiosulphate	<i>Na₂S₂O₃.5H₂O</i>	48-49	209	1666

2.3.2.2 Άλας του Glauber[14-16]

Το Άλας του Glauber με χημικό τύπο $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ή αλλιώς το θειικό δεκαένυδρο νάτριο με τυπική κατά βάρος σύσταση 44% $NaSO_4$ και 56% H_2O είναι μάλλον το πιο ικανοποιητικό υλικό για χρήση σε παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης, όπως προκύπτει από τις εκτεταμένες μελέτες της M.Telkes , κυρίως λόγω των χαρακτηριστικών του. Το άλας αυτό έχει μία κατάλληλη θερμοκρασία τήξης περίπου στους 32,4°C και μεγάλη θερμότητα τήξης που κυμαίνεται μεταξύ των 56-60cal/gr, η οποία του δίνει μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα στο σημείο τήξης του και η θερμοκρασία τήξης του μπορεί να μειωθεί μέχρι και στους 4°C με την προσθήκη κατάλληλων ανόργανων αλάτων. Δεν χρειάζεται μεγάλη περιεκτικότητα σε άλας για να θερμάνει ορισμένο χώρο. Το άλας μπορεί να αποθηκευτεί σε μαύρους σωλήνες, ενώ σειρές αυτών των σωλήνων μπορούν να διαταχθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να συλλέγουν την ενέργεια του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Είναι διαθέσιμο σε αμέτρητες ποσότητες ως ``χονδρικό υλικό``, στη μορφή του άνυδρου θειικού νατρίου σε αρκετά χαμηλό κόστος. Όταν προστίθεται η

κατάλληλα ποσότητα νερού και μεταβαίνει στο δεκαένυδρο θειικό νάτριο, τότε το κόστος μειώνεται ακόμα περισσότερο.

Αν και τα πλεονεκτήματά του είναι αρκετά, μελέτες έχουν αποδείξει ότι το άλας του Glauber τήκεται με ασυνέχεια, εμφανίζει μεγάλο πρόβλημα υπέρψυξης και πυρηνοποιεί το ανεπιθύμητο επταένυδρο. Η προσθήκη $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$, δηλαδή η προσθήκη βόρακος μπορεί να επιλύσει τα δύο τελευταία προβλήματα. Ο βόραξ έχει δείξει ότι μπορεί να πυρηνοποιεί το άλας του Glauber επαναλαμβανόμενα για περισσότερους από 100 θερμικούς κύκλους με μία κρίσιμη υπέρψυξη των 70°C και να πυρηνοποιεί το δεκαένυδρο αποκλειστικά, ώστε να μην σχηματίζεται το επταένυδρο.

Τα προβλήματα που προκαλεί η ασυνεχής τήξη είναι πιο δύσκολο να επιλυθούν. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται πέρα από το σημείο τήξης, διαχωρίζεται σε ένα διάλυμα και ένα στερεό, ενώ αφού η πυκνότητα του στερεού είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα του διαλύματος, εμφανίζεται το φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με προσθήκη κάποιας γέλης ή άλλων παραγόντων.

2.3.2.3 Ευτηκτικά PCM[11,17]

Τα ευτηκτικά 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 ευτηκτικό 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.

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 θυσιάσει στο ενδιαφέρον για μία καλύτερη συμπεριφορά του υλικού ως PCM.

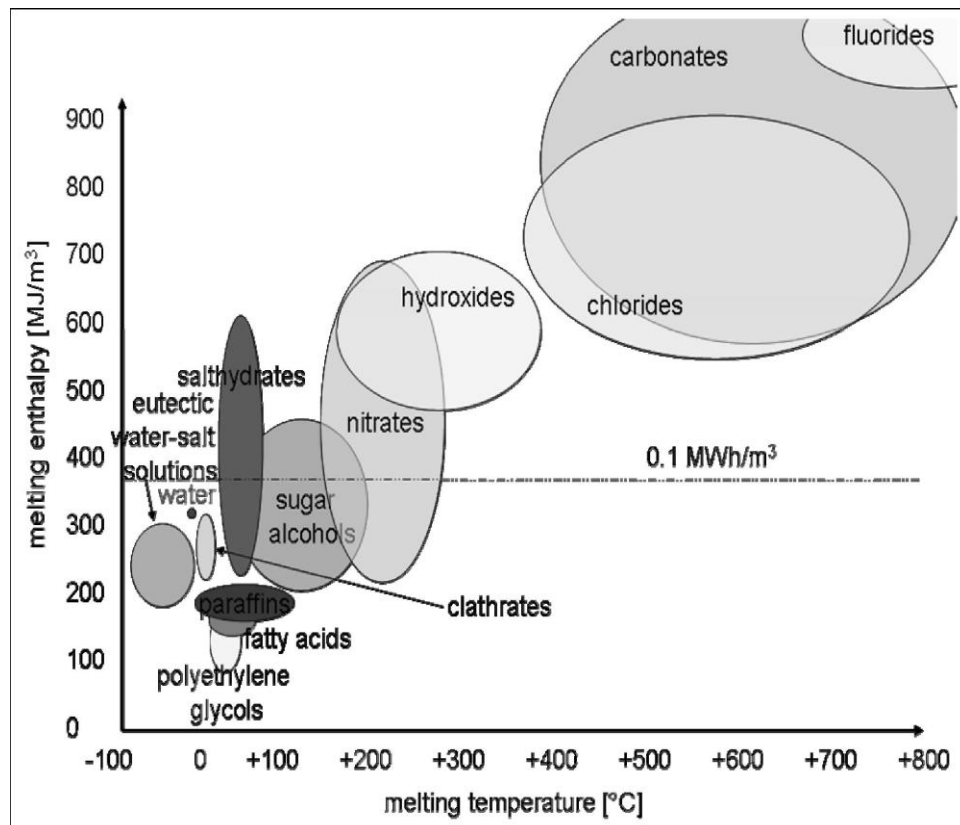
2.3.2.4 Υλικά αλλαγής στερεής φάσης[18]

Εκτός από τις υπόλοιπες κατηγορίες υλικών αλλαγής φάσης που είναι οι πιο σημαντικές και η συμπεριφορά και η χρησιμότητά τους έχει αποδειχθεί εδώ και αρκετό καιρό, τα πολυμερή υλικά αλλαγής φάσης στερεής-στερεής φάσης έχουν αναπτυχθεί τον τελευταίο καιρό και έχουν αποδειχθεί λειτουργικά υλικά αλλαγής φάσης με πολλά πλεονεκτήματα. Μερικά από αυτά είναι η καθόλου παραγωγή υγρού ή αερίου υλικού, η μικρή ογκομετρική αλλαγή, η απουσία δοχείου για να σφραγιστούν και η δυνατότητα επεξεργασίας σε αυθαίρετο σχήμα. Επομένως, μπορούν να απλοποιηθούν οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται και να μειωθεί το κόστος.

Σήμερα υπάρχουν δύο είδη πολυμερών υλικών αλλαγής στερεής-στερεής φάσης. Ένα είδος είναι σύνθετα υλικά τα οποία προκύπτουν από διασκορπισμό των PCM σε πολυμερή υλικά υψηλότερης θερμοκρασίας τήξης, τα οποία δρουν ως υποστηρικτικά υλικά. Όσο η θερμοκρασία είναι κάτω από το σημείο τήξης των υποστηρικτικών υλικών, τα σύνθετα υλικά μπορούν να κρατήσουν το στερεό σχήμα τους ακόμα και όταν το PCM μεταβαίνει από στερεό σε υγρό. Γενικά έχουν την ονομασία ``PCM σταθερής μορφής`` ή ``PCM σταθεροποιημένου σχήματος``. Το άλλο είδος συντίθεται από χημικές μεθόδους. Χημικά μοσχεύματα ή ένας καλά φορμαρισμένος συμπολυμερισμός χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν καλής ποιότητας υλικά στερεής-υγρής φάσης, ως το συνθετικό

υλικό εργασίας αποθήκευσης ενέργειας ενός υλικού αλλαγής στερεής-στερεής φάσης.

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, υπάρχουν προβλήματα και με αυτά τα υλικά. Αυτά είναι ότι η θερμοκρασία μετάβασης είναι αρκετά υψηλή, η ενθαλπία μετάβασης είναι χαμηλή και η θερμική ικανότητα είναι ασταθής. Όλα αυτά τα αρνητικά χαρακτηριστικά μειώνουν πολύ τις πρακτικές τους εφαρμογές.



Σχήμα 2.4: Τάξεις των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM και τυπικό εύρος θερμοκρασίας τήξης και ενθαλπίας τήξης[20].

2.3.2.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα κάθε κατηγορίας[1]

Προκειμένου να ολοκληρωθεί η παρουσίαση των διαφόρων κατηγοριών PCM, συγκεντρώνονται εδώ τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δύο βασικών κατηγοριών, δηλαδή των ανόργανων και των οργανικών υλικών αλλαγής φάσης.

~Οργανικά υλικά:

1. Πλεονεκτήματα:

- Μη διαβρωτικότητα με τα περισσότερα υλικά
- Μικρός κίνδυνος ρύπανσης του νερού
- Μικρής τάξης ή καθόλου εμφάνιση του φαινομένου supercooling
- Χημική και θερμική σταθερότητα, χωρίς να παρουσιάζουν διαχωρισμό των φάσεων ή εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους
- Χαμηλό κόστος αγοράς σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες PCM
- Παραγωγή των υλικών σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές(σκόνη,κόκκοι,πλάκες)
- Άριστη συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση χωρίς καμία υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους.

2.Μειονεκτήματα:

- Λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης χαμηλότερη από τα μη οργανικά
- Συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας χαμηλότερο από τα μη οργανικά
- Αναφλεξιμότητα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες
- Πυκνότητα χαμηλότερη από τα μη οργανικά υλικά

~Ανόργανα υλικά:

1.Πλεονεκτήματα:

- Μεγαλύτερη τιμή λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης σε σύγκριση με τα οργανικά
- Μη αναφλεξιμότητα
- Πυκνότητα υψηλότερη από τα οργανικά

2.Μειονεκτήματα:

- Διαβρωτικά(απαραίτητη αποθήκευση υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία)
- Εμφάνιση supercooling
- Διαχωρισμό των φάσεων(μεταβλητή τιμή της διαλυτότητας με τη θερμοκρασία), δυνατή δημιουργία ιζήματος
- Αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση

- Αρκετά μεγαλύτερο κόστος αγοράς από τα οργανικά
- Υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα τον εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου αν μείνουν εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υγρασία

2.4 Προβλήματα που παρουσιάζουν τα PCM και τρόποι αντιμετώπισης

Ήδη από την αναφορά των κατηγοριών των PCM έχουν γίνει αντιληπτά τα σημαντικότερα προβλήματα που αυτά παρουσιάζουν και που απασχολούν τους ερευνητές.Εδώ γίνεται μία ξεχωριστή αναφορά σε αυτά, ώστε να γίνουν κατανοητές και οι αιτίες οι οποίες τα προκαλούν.

2.4.1 Διαχωρισμός των φάσεων και σχηματισμός ιζήματος [19,20]

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα των PCM είναι ο διαχωρισμός των φάσεων.Είναι ένα πρόβλημα που εμφανίζεται κυρίως στα ένυδρα άλατα.Τα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν τρεις διαφορετικούς τρόπους αλλαγής φάσης: τον ομοιόμορφο, τον ημι-ομοιόμορφο και τον ανομοιόμορφο.Η ομοιογενής τήξη συμβαίνει όταν η σύσταση παραμένει σταθερή και στη στερεή και στην υγρή φάση.Η ημι-ομοιόμορφη τήξη συμβαίνει όταν το PCM έχει δύο ή περισσότερες ένυδρες μορφές με διαφορετικές συστάσεις στερεής φάσης και διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης.Η ανομοιόμορφη τήξη οδηγεί στην εμφάνιση δύο διαφορετικών φάσεων, δηλαδή ενός κορεσμένου διαλύματος και ενός ιζήματος αδιάλυτης άνυδρης ουσίας.

Ο διαχωρισμός των φάσεων εμφανίζεται στις δύο τελευταίες περιπτώσεις και είναι ακριβώς το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο φάσεις με διαφορετική σύνθεση διαχωρίζονται η μία την άλλη μακροσκοπικά.Εξαιτίας της διαφοράς πυκνότητας, η φάση με την υψηλότερη πυκνότητα καταπίπτει στον πυθμένα του δοχείου και η φάση με τη χαμηλότερη πυκνότητα μένει στην κορυφή.

Το πρόβλημα με το διαχωρισμό των φάσεων είναι ότι μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή μείωση της ενεργειακής πυκνότητας.Επειδή τοπικά δεν υπάρχει η σωστή μοριακή συγκέντρωση, το PCM δεν μπορεί να στερεοποιηθεί ολοκληρωτικά.Αυτό σημαίνει ότι η λανθάνουσα θερμότητα της στερεοποίησης δεν μπορεί να απελευθερωθεί ολόκληρη, ενώ συχνά απελευθερώνεται μόνο ένα μικρό κλάσμα αυτής.

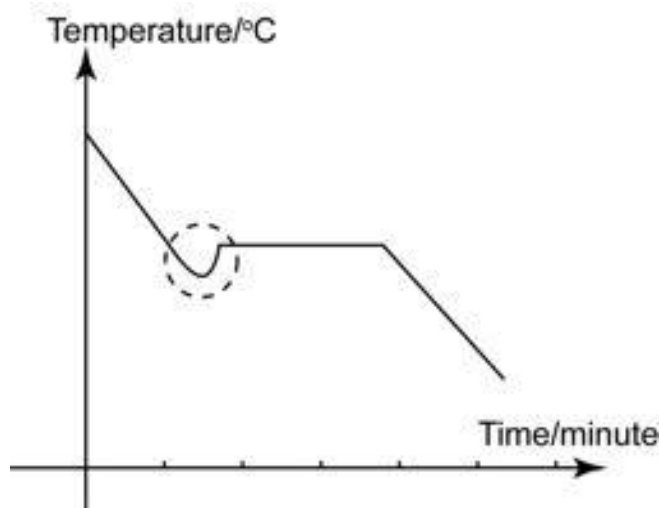
Υπάρχουν τρόποι ώστε να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων. Ένας τρόπος είναι η τεχνητή ανάμειξη. Αυτό σημαίνει ότι αφήνεται το PCM να διαχωριστεί σε μακροσκοπικές διαστάσεις, αλλά αντί να αναμένεται η διάχυση για να ομογενοποιηθεί το PCM, χρησιμοποιείται η πιο γρήγορη μέθοδος της ανάμειξης. Αυτή η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε πολλά ένυδρα άλατα, αλλά λόγω του απαραίτητου εξοπλισμού, δεν έχει εύκολη χρήση.

Ένας δεύτερος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν διαδικασίες διάχυσης για την ομογενοποίηση. Αλλά αυτός ο τρόπος είναι αποτελεσματικός μόνο όταν ο διαχωρισμός των φάσεων είναι μικρής τάξεως. Μπορεί βέβαια να μειωθεί η απόσταση στην οποία έχει γίνει διαχωρισμός των φάσεων σε μερικά mm, με τη χρήση ρηχών δοχείων για το PCM, αλλά και με κάποιου είδους γέλη. Όταν χρησιμοποιείται κάποια γέλη, τότε σχηματίζεται ένα δίκτυο τριών διαστάσεων μέσα στο σύνολο του PCM, το οποίο κρατάει τις διαφορετικές φάσεις του PCM σε μικροσκοπική κλίμακα. Το ίδιο αποτέλεσμα όπως στη γέλη, μπορεί να επιτευχθεί αν το PCM διηθηθεί σε ένα μικροπορώδες υλικό.

Άλλη λύση προκειμένου να αντιμετωπιστεί ο διαχωρισμός των φάσεων είναι να προστεθούν παράγοντες πύκνωσης. Πύκνωση σημαίνει να προστεθεί υλικό στο PCM ώστε να αυξηθεί το ιξώδες του. Εξαιτίας αυτού του υψηλού ιξώδους, οι διαφορετικές φάσεις στη συνέχεια δεν μπορούν να διαχωριστούν αρκετά μέχρι τελικά ολοκληρω το PCM να μεταβεί στη στερεή φάση. Αν αυτό επιτευχθεί, τότε το PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς πρόβλημα.

2.4.2 Φαινόμενο υπέρψυξης[1,20]

Πολλά PCM δεν στερεοποιούνται αμέσως μετά την ψύξη κάτω από την θερμοκρασία τήξης, αλλά ξεκινούν την αποκρυστάλλωση μόνο αφού προσεγγίζεται μία θερμοκρασία αρκετά κάτω από τη θερμοκρασία τήξης. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται υπέρψυξη. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι βαθμός της υπέρψυξης δεν είναι φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο όγκος του δείγματος, η καθαρότητα του υλικού, ο ρυθμός ψύξης και η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης.



Σχήμα 2.5: Καμπύλη ψύξης υλικού με εμφάνιση supercooling[21].

Κατά τη διάρκεια της παροχής θερμότητας, δεν υπάρχει διαφορά είτε ένα PCM εμφανίζει υπέρψυξη είτε όχι. Κατά τη διάρκεια, όμως, της ανάκτησης της θερμότητας, η λανθάνουσα θερμότητα δεν απελευθερώνεται αν η θερμοκρασία τήξης επιτυγχάνεται λόγω της υπέρψυξης. Η επίδραση της υπέρψυξης καθιστά αναγκαία τη μείωση της θερμοκρασίας αρκετά κάτω από τη θερμοκρασία τήξης, για να ξεκινήσει η αποκρυστάλλωση και για να απελευθερωθεί η λανθάνουσα θερμότητα που έχει αποθηκευτεί στο υλικό. Αν η πυρήνωση δεν πραγματοποιηθεί καθόλου, τότε η λανθάνουσα θερμότητα δεν απελευθερώνεται, ενώ το υλικό αλλαγής φάσης αποθηκεύει μόνο αισθητή θερμότητα.

Αν η θερμότητα η οποία απελευθερώνεται μετά τη στερεοποίηση είναι μεγαλύτερη από την αισθητή θερμότητα η οποία χάνεται εξαιτίας της υπέρψυξης, η θερμοκρασία αυξάνεται μέχρι τη θερμοκρασία τήξης και παραμένει εκεί σταθερή μέχρι να ολοκληρωθεί η αλλαγή φάσης. Αν η απώλεια της αισθητής θερμότητας εξαιτίας της υπέρψυξης είναι μεγαλύτερη από τη λανθάνουσα θερμότητα η οποία απελευθερώνεται μετά από την αποκρυστάλλωση, ή αν ο βαθμός απώλειας θερμότητας στο περιβάλλον είναι μεγαλύτερος από το βαθμό απελευθέρωσης θερμότητας κατά την αποκρυστάλλωση, τότε είναι πιθανό η θερμοκρασία να μην ξαναφτάσει ποτέ στη θερμοκρασία τήξης. Σε τεχνικές εφαρμογές των PCM, άρα, η υπέρψυξη μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα και να προκαλέσει αναπάντεχες επιδράσεις.

Η πιο εύκολη προσέγγιση ώστε να αντιμετωπιστεί η υπέρψυξη είναι η προσθήκη συγκεκριμένων πρόσθετων υλικών, τα οποία ονομάζονται πυρηνοποιητές, στο PCM ώστε να επιτευχθεί ετερογής πυρήνωση. Ετερογενής

πυρήνωση, όπως γίνεται αντιληπτό από τον όρο, σημαίνει πυρήνωση η οποία δεν πραγματοποιείται από το PCM. Οι πυρηνοποιητές έχουν αναπτυχθεί για τα περισσότερα κοινώς χρησιμοποιούμενα PCM και μειώνουν την υπέρψυξη μερικούς βαθμούς Kelvin. Οι πυρηνοποιητές είναι υλικά με παρόμοια κρυσταλλική μορφή με το στερεό PCM, ώστε να επιτρέψουν στην στερεή φάση του PCM να αναπτυχθεί στην επιφάνειά τους, αλλά έχουν υψηλότερη θερμοκρασία τήξης, ώστε να αποφευχθεί η απενεργοποίηση όταν το PCM λιώνει. Το πρόβλημα αυτής της μεθόδου είναι ότι παρόμοια κρυσταλλική μορφή συνήθως σημαίνει και παρόμοια θερμοκρασία τήξης, οπότε τελικά οι περισσότεροι πυρηνοποιητές είναι σταθεροί μόνο για περίπου 10 με 20K πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του PCM.

2.4.3 Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση[1,20]

Τα PCM συχνά έχουν ένα μεγάλο χρονικό διάστημα χρήσης, στο οποίο υπόκεινται σε χιλιάδες κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης, δηλαδή σε χιλιάδες κύκλους τήξης και στερεοποίησης. Ο αριθμός των κύκλων διαφέρει ανάλογα με τη χρήση του PCM, από έναν κύκλο όταν το PCM χρησιμοποιείται για θερμική προστασία στην περίπτωση πυρκαγιάς, σε χιλιάδες κύκλους όταν χρησιμοποιείται για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης κτιρίων. Είναι πολύ σημαντικό για την επιλογή του PCM, να μην είναι επιρρεπές σε χημική και φυσική υποβάθμιση σε βάθος χρόνου, το οποίο θα επηρεάσει την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας του PCM.

Η ανεπάρκεια σταθερότητας των υλικών οφείλεται κατά κύριο λόγο στο πρόβλημα διαχωρισμού των φάσεων, το οποίο έχει ήδη αναλυθεί προηγουμένως. Αλλά μπορεί να είναι αποτέλεσμα και άλλων αιτιών, όπως για παράδειγμα στην απουσία σταθερότητας στη χημική σύνθεση του υλικού ή των υλικών που αποτελούν το PCM ή στο φαινόμενο της διάβρωσης που πιθανόν να λάβει χώρα μεταξύ του PCM και των υλικών που έρχεται σε επαφή.

Ήταν αναγκαίο να γίνουν διάφορες μελέτες για τη σταθερότητα σε θερμικούς κύκλους της θερμοκρασίας τήξης, της λανθάνουσας θερμότητας τήξης και της ειδικής ενέργειας της εμπορικής σειράς των PCM, αφού αποδείχθηκε ότι απείχε πολύ η συμπεριφορά τους από τα PCM που χρησιμοποιούνται στα εργαστήρια και στα πειράματα. Από όλες τις υπάρχουσες μελέτες εξάγεται το συμπέρασμα ότι η παραφίνη και τα παράγωγα υλικά έδειξαν πολύ καλή σταθερότητα των

ιδιοτήτων τους. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται και στην καλή αντίδρασή τους όσον αφορά το διαχωρισμό των φάσεων, αφού είναι απαλλαγμένα από τέτοιου είδους φαινόμενα, αλλά και στο γεγονός ότι είναι τελείως φιλικά με όλα σχεδόν τα υλικά. Μερικά ευτηκτικά διαλύματα μπορεί να είναι ευπαθή σε μικροβιολογική επίθεση, γι' αυτό πρέπει να προστατεύονται με βιοκτόνα, αφού μπορεί να παρουσιάσουν προβλήματα με τις ιδιότητές τους. Η μεγάλη χρονική σταθερότητα μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα σε μερικά ένυδρα άλατα, εκτός και αν τροποποιηθούν ώστε να αποφευχθεί διαχωρισμός των συνθετικών τους μετά από διαδοχικούς θερμικούς κύκλους.

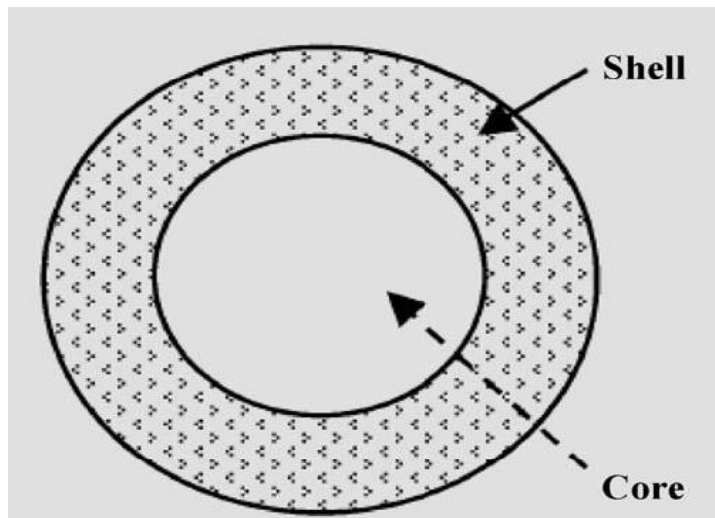
2.5 Τρόποι ενσωμάτωσης των PCM

2.5.1 Συσσκευασία PCM

Η χρήση των PCM απαιτεί και τη χρησιμοποίηση κάποιου είδους συσκευασίας. Οι κύριοι λόγοι είναι για να αποφευχθεί η επαφή του PCM με το περιβάλλον, η οποία μπορεί να βλάψει το περιβάλλον ή να αλλάξει τη σύνθεση του PCM και επίσης για να διευκολυνθεί η μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας, αφού η επιφάνεια της εκάστοτε συσκευασίας δρα ως επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας. Υπάρχουν διάφορα είδη συσκευασίας, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια [1].

2.5.1.1 Μικροενσωμάτωση [20,22]

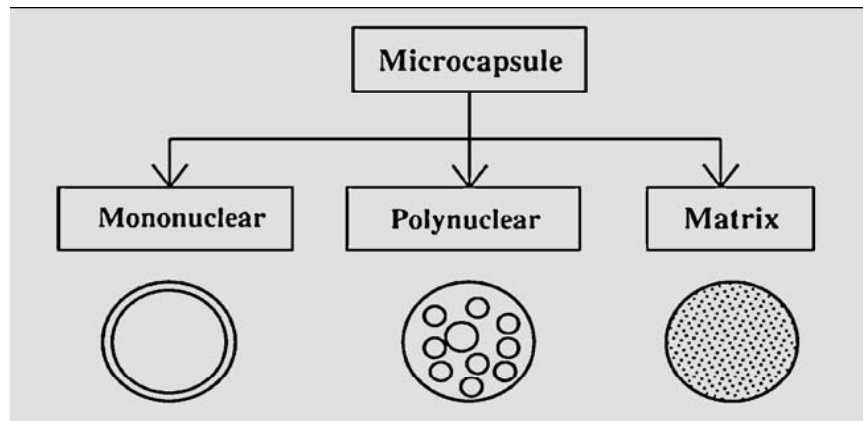
Μικροενσωμάτωση είναι η διαδικασία σύμφωνα με την οποία μεμονωμένα σωματίδια ή σταγονίδια του στερεού ή του υγρού υλικού του PCM (ο πυρήνας), περιβάλλονται ή επικαλύπτονται με μία συνεχή μεμβράνη πολυμερούς υλικού (το περίβλημα), ώστε να προκύψουν κάψουλες, οι οποίες στο μικρόμετρο κατατάσσονται στην τάξη των χιλιοστών, οι οποίες είναι γνωστές ως μικροκάψουλες. Οι μικροκάψουλες μπορεί να έχουν σφαιρικό σχήμα, με ένα συνεχές τείχος που περιβάλλει τον πυρήνα, ενώ μπορεί να είναι και ασύμμετρες ή να έχουν μεταβλητό σχήμα.



Σχήμα 2.6: Σχηματική απεικόνιση της μικροκάψουλας[22].

Και οι τρεις καταστάσεις της υλής, δηλαδή στερεή, υγρή και αέρια, μπορούν να γίνουν μικροκάψουλες. Αυτό επιτρέπει στις μικροκάψουλες να διαχειρίζονται ακόμα και τα υγρά υλικά ως στερεά. Επίσης, οι μικροκάψουλες ανέχονται αλλαγές φάσης, συμπεριλαμβανομένων και των ογκομετρικών αλλαγών στον πυρήνα τους. Οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης μεταξύ -10°C και 80°C , είναι αυτές οι οποίες ταιριάζουν περισσότερο με τις μικροκάψουλες.

Πολλές φυσικές και χημικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή των μικροκαψουλών. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι φυσικές μέθοδοι είναι η επίπεδη επίστρωση, η επίστρωση με παροχή πεπιεσμένου αέρα, η φυγόκεντρος εξώθηση, η δονητική μέθοδος μέσω ακροφυσίου και η ξήρανση με ψεκασμό. Ενώ οι χημικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι ο διεπιφανειακός πολυμερισμός, ο επιτόπιος πολυμερισμός και ο πλεγματικός πολυμερισμός. Η περιγραφή των μικροκαψουλών εξαρτάται κυρίως από το υλικό του πυρήνα και από τη διαδικασία εναπόθεσης του κελύφους. Οι μονοπύρηνες μικροκάψουλες έχουν το περίβλημα γύρω από τον πυρήνα, οι πολυπυρηνικές μικροκάψουλες έχουν πολλούς πυρήνες έγκλειστους στο εσωτερικό του κελύφους και υπάρχει και η πλεγματική ενσωμάτωση, στην οποία το υλικό του πυρήνα διανέμεται ομοιόμορφα μέσα στο υλικό του περιβλήματος.



Σχήμα 2.7: Τύποι των μικροκαψουλών[22].

Η βελτίωση της μετάδοσης θερμότητας με τη χρήση των μικροκαψουλών συμβαίνει λόγω της μεγάλης επιφάνειας σε αναλογία όγκου των μικροκαψουλών. Επίσης, βοηθούν τη συγκράτηση της υγρής φάσης του PCM, ώστε να μην υπάρχει κάποιου είδους διαρροή προς το περιβάλλον και επιπλέον βελτιώνουν τη θερμική σταθερότητα στη κυκλική φόρτιση του PCM, αφού ο διαχωρισμός των φάσεων περιορίζεται σε μικροσκοπική κλίμακα. Τέλος, είναι εφικτό να ενσωματωθούν τα μικροενσωματωμένα PCM σε κάψουλες, σε άλλα υλικά στη συνέχεια.

Το πιο σημαντικό μειονέκτημα της χρήσης μικροκαψουλών είναι ότι η πιθανότητα για υπέρψυξη αυξάνεται. Σήμερα οι μικροκάψουλες, σε εμπορικό επίπεδο, απευθύνονται μόνο σε PCM που είναι αδιάλυτα στο νερό. Ο λόγος είναι η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία της διαδικασίας. Εκτός από αυτό, η περίπτωση να χρησιμοποιηθούν μικροκάψουλες για ένυδρα άλατα θέτει ένα ακόμη πρόβλημα. Η σύσφιξη στο υλικό του κελιού στα μικρά μόρια νερού, πρέπει να είναι αρκετή ώστε να αποτρέψει αλλαγή στη σύνθεση του ένυδρου άλατος.

2.5.1.2 Μακροενσωμάτωση[20,23]

Η μακροενσωμάτωση σημαίνει πλήρωση μίας μακροσκοπικής δεξαμενής με κάψουλες που περιέχουν PCM. Η χωρητικότητα της δεξαμενής μπορεί να ποικίλλει από μερικά ml μέχρι μερικά liters. Αυτές οι δεξαμενές είναι συνηθέστερα πλαστικές φιάλες (υψηλής πυκνότητας και χαμηλής πυκνότητας φιάλες πολυαιθυλενίου και φιάλες πολυπροπυλενίου), επιψευδαργυρωμένα μεταλλικά δοχεία και δοχεία μαλακού χάλυβα. Το σχήμα των μικροκαψουλών μπορεί να είναι από ορθογώνια πάνελ μέχρι σφαίρες, αλλά και σάκοι χωρίς ένα συγκεκριμένο σχήμα. Το κλειδί για

τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι να σχεδιαστεί η μακροκάψουλα σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Οι μακροκάψουλες είναι πολύ διαδεδομένες επειδή τέτοιου είδους δοχεία και σάκοι είναι διαθέσιμα σε μεγάλη ποικιλία ήδη από άλλες εφαρμογές, οπότε η ενσωμάτωση των καψουλών PCM είναι σχετικά απλή, ενώ έχουν και το θετικό χαρακτηριστικό ότι μπορεί να γίνει χρήση PCM με διαφορετικό σημείο τήξης στην ίδια δεξαμενή. Σε αυτήν την περίπτωση, οι μακροκάψουλες χρησιμοποιούνται και αυτές για να συγκρατήσουν την υγρή φάση του PCM από κάποια διαρροή και για να αποφύγουν αλλαγή στη σύνθεση του PCM εξαιτίας της επαφής του με το περιβάλλον. Άρα αποφεύγονται και οι μεγάλοι διαχωρισμοί των φάσεων στο PCM και επίσης προσφέρει μία αυτοφερόμενη κατασκευή στο PCM. Αν το δοχείο είναι αρκετά άκαμπτο, οι μακροκάψουλες μπορούν να προσθέσουν και μηχανική σταθερότητα στο σύστημα. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν χρησιμοποιούνται μεταλλικά δοχεία μαλακού χάλυβα, τότε αν τα εσωτερικά και τα εξωτερικά τελειώματα λάκας δεν έχουν εφαρμοστεί σωστά, η διάβρωση που μπορεί να συμβεί είναι σοβαρή και μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές συνέπειες.

2.5.2 Μαζική αποθήκευση[23,24]

Η μαζική αποθήκευση είναι δεξαμενές μετάδοσης θερμότητας για PCM, οι οποίες είναι παρόμοιες σε σχεδιασμό με τις δεξαμενές που ήδη υπάρχουν για ενεργειακή αποθήκευση, αλλά με κάποιες σημαντικές διαφοροποιήσεις.

Το πιο βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων μαζικής αποθήκευσης PCM είναι η ανάγκη για μία πιο εκτεταμένη μετάδοση θερμότητας από αυτήν που υπάρχει στις κοινές δεξαμενές που δεν προορίζονται για PCM. Ο λόγος για αυτήν την ανάγκη είναι ότι η πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας στο PCM είναι μεγαλύτερη από οποιοδήποτε άλλο μέσο αποθήκευσης. Η περιοχή μετάδοσης θερμότητας σε σχέση με τις άλλες μεθόδους είναι μικρότερη, αλλά απαιτείται και εδώ μεγάλος ρυθμός αποθήκευσης ή απόδοσης της θερμότητας. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι περύγια εισόδου ή η χρήση μερών μεγάλης αγωγιμότητας, μεταλλικές κατασκευές, ίνες στο μέρος του PCM και άμεσης επαφής εναλλάκτες θερμότητας.

Ένα στοιχείο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν σχετικά με τη μαζική αποθήκευση είναι η πίεση του αέρα στη δεξαμενή αποθήκευσης, χωρίς την οποία

το ένυδρο άλας θα απορροφούσε το περιεχόμενο νερό, καταλήγοντας έτσι σε μη ολοκληρωμένη απελευθέρωση θερμότητας με την αποκρυστάλλωση. Από την άλλη μεριά η μαζική αποθήκευση μπορεί να μειώσει πάρα πολύ το κόστος του συστήματος, αφού μειώνει πολύ τη δυσκολία συσκευασίας του PCM.

2.5.3 Άμεση ενσωμάτωση[25]

Η πιο απλή μέθοδος είναι η άμεση ενσωμάτωση του PCM σε συμβατικά δομικά υλικά, όπως ο γύψος, το σκυρόδεμα και άλλα πορώδη υλικά για να σχηματίσουν σύνθετα υλικά αλλαγής φάσης. Δηλαδή PCM υγρό ή σε πούδρα προστίθεται και ανακατεύεται με τα παραπάνω υλικά κατά τη φάση της παραγωγής. Ο όγκος ο οποίος καταλαμβάνεται από το PCM στους πόρους είναι αρκετά μικρός για να αποτρέψει την απομόνωση του στερεού φλοιού του PCM. Η κατασκευή του πορώδους υλικού μεταφέρει τη θερμότητα στους πόρους. Δυστυχώς, έχει παρατηρηθεί από διάφορες μελέτες σημαντική διαρροή και επίσης μία αλληλεπίδραση μεταξύ του PCM και του πορώδους υλικού σε διάφορες εφαρμογές. Αυτή η αλληλεπίδραση αν δεν προσεχτεί μπορεί να καταστρέψει τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

2.5.4 Εμβάπτιση[26,27]

Η εμβάπτιση ή απορρόφηση του PCM σημαίνει ενσωμάτωση αυτού σε ήδη έτοιμα συμβατικά δομικά υλικά με φυσική απορρόφηση. Δηλαδή το πορώδες οικοδομικό υλικό βυθίζεται σε ζεστό και λιωμένο PCM, το οποίο απορροφάται από τους πόρους μέσω της τριχοειδούς δράσης. Όταν το πορώδες υλικό απομακρυνθεί από το λιωμένο PCM και αφεθεί να κρυώσει, τότε το PCM έχει παραμείνει στους πόρους του. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να γίνει μετατροπή ήδη υπαρχόντων υλικών ή κατασκευαστικών πάνελ, ώστε να ενσωματώσουν την καινούρια τεχνολογία των PCM.

Το μειονέκτημα και αυτής και της προηγούμενης μεθόδου είναι ότι η ενσωματωμένη ποσότητα του PCM στα πορώδη υλικά είναι μικρή, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλό επίπεδο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Αν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος εμποτισμού κενού αέρος του PCM σε κοκκώδη πορώδη υλικά, τότε μπορούν να ενσωματωθούν μεγάλες ποσότητες PCM σε πορώδη χώρο. Αυτό

καθιστά το κοκκώδες συνθετικό υψηλής ενεργειακής πυκνότητας μέσο. Τα κοκκώδη συνθετικά αλλαγής φάσης μπορούν να ενσωματωθούν σε διαφορετικά είδη κατασκευαστικών μερών, όπως στον τοίχο, στο δάπεδο και στην οροφή, ώστε να αυξήσουν την ικανότητά τους για θερμική αποθήκευση.

2.5.5 Πολυστρωματικά σανίδια από PCM[27,28]

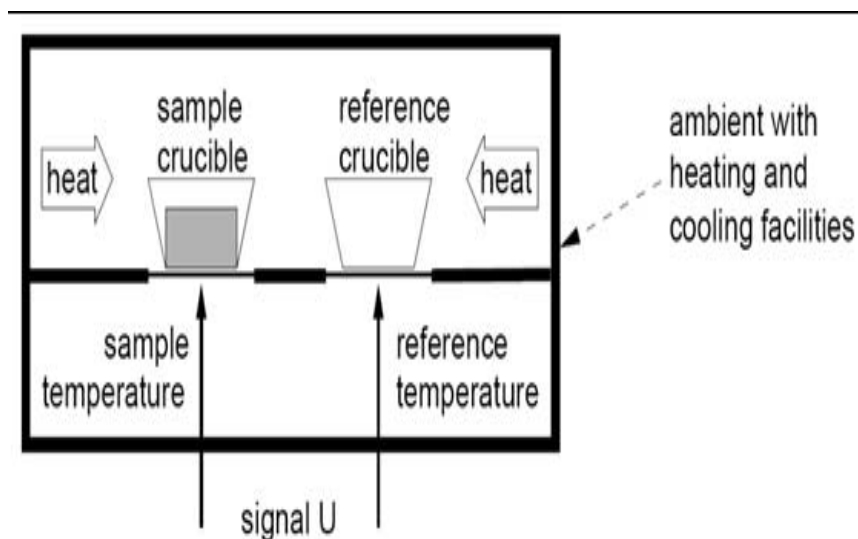
Το PCM μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα ενιαίο στρώμα και να χρησιμοποιηθεί ως αυτόνομο στοιχείο, όπως για παράδειγμα εσωτερική επένδυση, στον εσωτερικό ``φάκελο`` του κτιρίου. Από τις διάφορες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη εφαρμογή προέκυψαν πολύ θετικά αποτελέσματα. Καταρχήν το πολυστρωματικό σύστημα πέτυχε να μειώσει το χρόνο της ανάκτησης της λανθάνουσας θερμότητας κατά 17%. Επίσης, το σύστημα αυτό αύξησε κατά 20-50% τη ροή θερμότητας και κατά 7-18% το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας.

Τα γενικά συμπεράσματα ήταν ότι η χρήση πολυστρωματικών σανιδιών έδειξαν ένα ισχυρό δυναμικό για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης στα κτίρια. Τα πιο σημαντικά είναι ότι η τοποθέτηση του PCM σε ένα τέτοιο σύστημα επιτυγχάνει πολύ καλύτερη αλλαγή φάσης που φτάνει μέχρι και το 55% σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα, οπότε πραγματοποιείται καλύτερη εκμετάλλευση του χρησιμοποιούμενου PCM. Βέβαια, υπάρχει ακόμα πολύς χώρος για έρευνα ώστε να βελτιστοποιηθούν τα παραπάνω ήδη θετικά αποτελέσματα.

2.6 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων PCM[1,29,32,33]

Η επιλογή και η προετοιμασία του κατάλληλου υλικού αλλαγής φάσης για κάθε εφαρμογή, προϋποθέτει τη μέτρηση των θερμικών φυσικών ιδιοτήτων του PCM. Οι μέθοδοι που είναι διαθέσιμες για μέτρηση αυτών των ιδιοτήτων, δηλαδή κυρίως της θερμότητας της τήξης, της ειδικής θερμότητας και του σημείου τήξης στο πεδίο της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες. Η πρώτη είναι οι συμβατικές θερμιδομετρικές μέθοδοι (conventional calorimetry method), η δεύτερη είναι οι μέθοδοι διαφορικής θερμικής ανάλυσης (differential thermal analysis-DTA) και η τρίτη είναι οι μέθοδοι διαφορικής θερμιδομετρικής σάρωσης (differential scanning calorimetry-DSC).

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. Μία τυπική διάταξη ενός συστήματος για την εφαρμογή της μεθόδου DSC δίνεται παρακάτω.

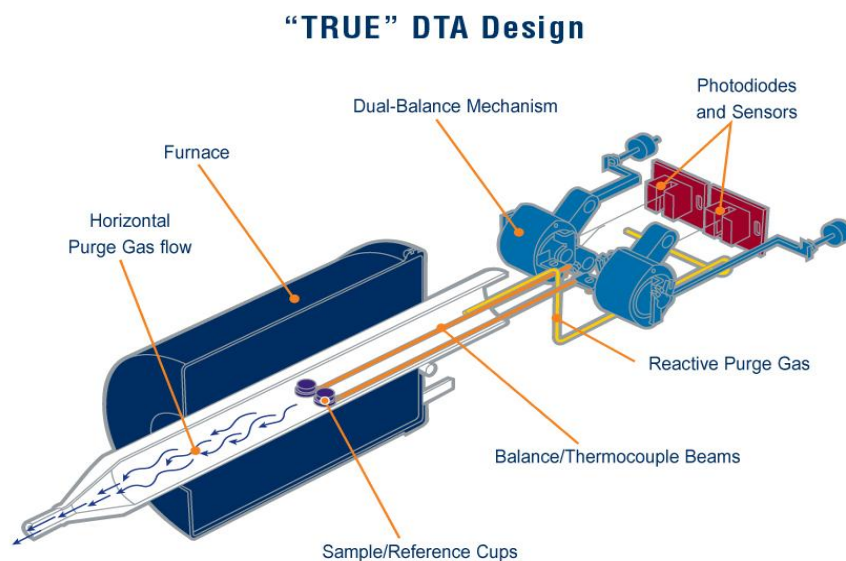


Σχήμα 2.8: Διάταξη του εξοπλισμού για τη μέθοδο DSC[31].

Η μέθοδος DTA είναι παρόμοια με την προηγούμενη. Το υλικό PCM προς μέτρηση και το αδρανές υλικό αναφοράς υποβάλλονται σε θερμικούς κύκλους, ενώ μετράται κάθε πιθανή διαφορά στη θερμοκρασία μεταξύ αυτών των δύο. Αυτή η διαφορική θερμοκρασία στη συνέχεια απεικονίζεται σε συνάρτηση με το χρόνο ή με τη θερμοκρασία, οπότε προκύπτει η καμπύλη της DTA. Κάθε αλλαγή στο PCM προς μέτρηση, είτε ενδοθερμική είτε εξοθερμική, μπορεί να ανιχνευτεί σε σύγκριση με το αδρανές υλικό αναφοράς. Οπότε αυτή η καμπύλη δίνει πληροφορίες για την αποκρυστάλλωση, την τήξη ή την εξάχνωση. Η περιοχή κάτω από την καμπύλη

της DTA είναι η ενθαλπία αλλαγής φάσης, η οποία δεν επηρεάζεται από τη θερμοχωρητικότητα του δείγματος προς μέτρηση. Μία τυπική διάταξη αυτής της μεθόδου παρατίθεται στο σχήμα (2.9).

Οι μέθοδοι DSC και DTA είναι καλά αναπτυγμένες, αλλά τα μειονεκτήματά τους είναι εμφανή. Καταρχήν τα δείγματα τα οποία μελετώνται από αυτές είναι πολύ μικρά (μεταξύ 1-10mg), οπότε οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δειγμάτων είναι συχνά πολύ διαφορετικές από τα πραγματικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις πρακτικές εφαρμογές. Για παράδειγμα στις αλλαγές φάσης μεταξύ στερεού και υγρού των πιο σύνθετων PCMs, ειδικά των ένυδρων αλάτων, αν το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετηθεί μέσα σε ένα μικρό δοχείο, τότε ο βαθμός της υπέρψυξης αυξάνεται όσο ο βαθμός του διαχωρισμού των φάσεων μειώνεται, δηλαδή αποτέλεσμα που είναι αναληθές. Ο εξοπλισμός, επίσης, για τις δύο αυτές μεθόδους είναι αρκετά πολύπλοκος και ακριβός και είναι αδύνατον να μετρηθούν η θερμότητα της τήξης, η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα διαφόρων δειγμάτων PCM ταυτόχρονα.



Σχήμα 2.9: Τυπική διάταξη της μεθόδου DTA[34].

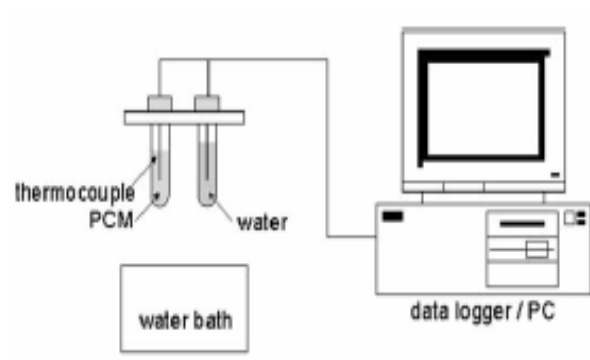
Όσον αφορά τώρα τις συμβατικές θερμιδομετρικές μεθόδους, έχουν στο σύνολό τους τα ίδια μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν και για τις άλλες δύο κατηγορίες, εκτός από το πρώτο. Άλλωστε, η διαδικασία αλλαγής φάσης ενός

δείγματος PCM κατά τη διάρκεια της μέτρησης είναι δύσκολο να παρατηρηθεί με σαφήνεια χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους.

Εξαιτίας αυτών των λόγων, έχει αναπτυχθεί μία καινούρια μέθοδος που ονομάζεται T-history. Αυτή η μέθοδος βοηθά να προσδιοριστεί το σημείο τήξης, ο βαθμός υπέρψυξης, η θερμότητα της τήξης, η ειδική θερμότητα και η ειδική αγωγιμότητα διαφορετικών δειγμάτων PCMs ταυτόχρονα. Είναι ιδιαίτερως χρήσιμη για την επιλογή των υποψηφίων PCM για κάθε εφαρμογή και για την προετοιμασία των PCM για πρακτική χρήση. Αυτή η μέθοδος αναλύεται στη συνέχεια.

2.6.1 Μέθοδος T-history[29,30]

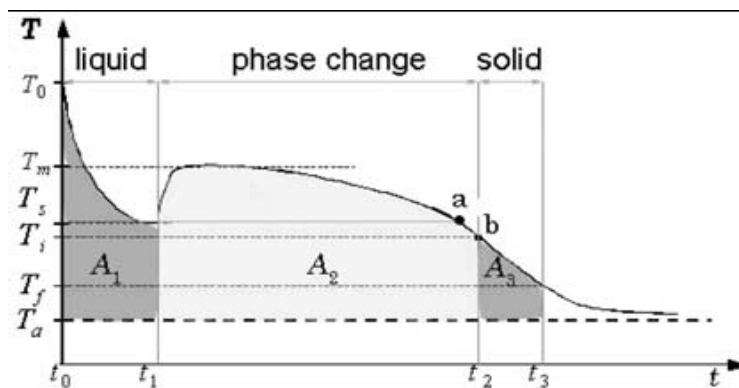
Η μέθοδος T-history βρίσκει τη λανθάνουσα θερμότητα του αντικειμένου με PCM, μέσα από τη σύγκριση του θερμοκρασιακού ιστορικού του PCM και του ιστορικού ενός υλικού αναφοράς, κάτω από σταθερές πειραματικές συνθήκες σύμφωνα με τη μέθοδο της συγκεντρωμένης χωρητικότητας (lumped capacitance method), η οποία ισχύει για αριθμό Biot < 0,1.



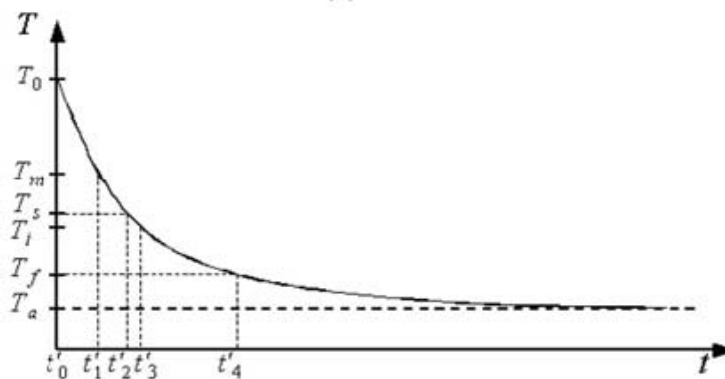
Σχήμα 2.10: Διάταξη μεθόδου T-history[1].

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 σωληνίων και του περιβάλλοντος ταυτόχρονα. Οι καμπύλες της μεθόδου T-history, οι οποίες είναι συναρτήσεις του

χρόνου λαμβάνονται από το PCM και το υλικό αναφοράς, όπως φαίνεται από τα παρακάτω σχήματα.



(a) PCM



(b) Pure water

Σχήμα 2.11: (α) Καμπύλη ψύξης υλικού με εμφάνιση supercooling, (β) Καμπύλη ψύξης νερού[35].

Η αρχική μέθοδος T-history, όπως προτάθηκε από τον Zhang και τους συνεργάτες του, παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Καταρχήν το σύστημα του πειράματος είναι αρκετά απλό και χρήσιμο για τη μέτρηση θερμικών ιδιοτήτων ανακατεμένων δειγμάτων, ενώ έχει μεγάλη ευελιξία ως προς το είδος των PCM που μπορεί να μετρήσει, αλλά και ως προς τις μετρούμενες ιδιότητες. Δεν απαιτείται διαδικασία δειγματοληψίας και τελικά η ακρίβεια των μετρήσεων είναι ικανοποιητική για τις μηχανικές εφαρμογές και επίσης η διαδικασία αλλαγής φάσης κάθε δείγματος PCM μπορεί να παρατηρηθεί με μεγάλη ευκρίνεια. Με αυτή τη μέθοδο έχουν μετρηθεί σε διάφορα πειράματα οι θερμοφυσικές ιδιότητες και των παραφινών και των ένυδρων αλάτων και τα αποτελέσματα ήταν πολύ κοντά στα αντίστοιχα θεωρητικά που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Όμως, υπάρχουν

κάποια προβλήματα, όπως η χρήση ενός βαθμού υπέρψυξης ως το τέλος της περιόδου λανθάνουσας θερμότητας ή ο παραμερισμός της αισθητής θερμότητας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά λάθη στον υπολογισμό της θερμότητας της τήξης.

2.7 Μέθοδοι προσομοίωσης της αλλαγής φάσης[36,37]

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 μη-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:

$$\lambda\rho\left(\frac{ds(t)}{dt}\right)=k_s\left(\frac{\delta T_s}{\delta t}\right)-k_l\left(\frac{\delta T_l}{\delta t}\right) \quad (2.3)$$

Όπου λ είναι 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.

2.7.1 Μέθοδος ενθαλπίας(Enthalpy Method)[36-38]

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.

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.

2.7.2 Μέθοδος ενεργούς θερμοχωρητικότητας(Thermal Capacity Method)[38,39]

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 $Cp_{eff}(T)$. Το στοιχείο εκείνο που χρειάζεται μεγάλη προσοχή είναι η επιλογή της σωστής συνάρτησης για το $Cp_{eff}(T)$.

Τα μόνα δεδομένα τα οποία χρειάζονται ώστε να δημιουργηθούν απλές συναρτήσεις του $Cp_{eff}(T)$ 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 Cp_s και Cp_l . 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. Στη θεωρητική προσομοίωση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται η μέθοδος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, ενώ επιλέγεται η τριγωνική συνάρτηση (triangular function) και αναφέρονται και όλες οι προκύπτουσες εξισώσεις οι οποίες και εφαρμόζονται. Άλλες πιθανές προσεγγίσεις θα ήταν η συνάρτηση αναβαθμού (rump function), η αντίστροφη συνάρτηση αναβαθμού (reversed rump function) και η συνάρτηση βήματος (step function).

Βιβλιογραφία 2^{ου} Κεφαλαίου

- [1] Χρήστος Τζιβανίδης, Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων, Υλικά Αλλαγής Φάσης
- [2] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments
- [3] Belén Zalba, José M Marín, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications
- [4] Εφαρμογές υλικών στα κτίρια,
http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153
- [5] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art
- [6] Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
- [7] D.Feldman, M.M.Shapiro, D.Banu, Organic phase change materials for thermal energy storage
- [8] en.wikipedia.org/wiki/Alkane
- [9] en.wikipedia.org/wiki/Paraffin
- [10] en.wikipedia.org/wiki/Fatty_acid
- [11] Takayuki Watanabe, Maria Natalia R.Dimaano, Solar energy:new research, Thermal performance characterization of capric acid and lauric acid mixture for low temperature energy storage
- [12] Mithat Akgün, Orhan Aydın, Kamil Kaygusuz, Experimental study on melting/solidification characteristics of a paraffin as PCM
- [13] Ing. Ivo BĚHUNEK, Properties of inorganic PCM
- [14] H.P.Carg, J.Prakash, Solar energy:Fundamentals and Applications
- [15] Maria Telkes, Thermal energy storage in salt hydrates
- [16] Stephen Marks, An investigation of the thermal energy storage capacity of Glauber`s salt with respect to thermal cycling
- [17] Lv Shilei, Zhu Neng, Feng Guohui, Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage
- [18] Jing-Cang Su, Peng-Sheng Liu, A novel solid–solid phase change heat storage material with polyurethane block copolymer structure

- [19] Types of phase change materials,
http://www.pcmproducts.net/products_pcm_solutions.htm
- [20] 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
- [21] <http://tangwansee.blogspot.com/2010/06/revision-topic-2-heatingcooling-process.html>
- [22] V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, T. Akiyama, Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review
- [23] A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review
- [24] Justin Ning-Wei Chiu, Dr. Viktoria Martin, and Prof. Fredrik Setterwall, A review of thermal energy storage systems with salt hydrate PCM for comfort cooling
- [25] Frédéric Kuznik, Damien David, Kevyn Johannes, Jean-Jacques Roux, A review on phase change materials integrated in building walls
- [26] Dong Zhang, Jianming Zhou, Keru Wu, Zongjin Li, Granular phase change composites for thermal energy storage
- [27] Yinping Zhang, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, Hongfa Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings:State-of-the-art and outlook
- [28] K.Darkwa, J.-S.Kim, Dynamics of energy storage in phase change drywall systems
- [29] Zhang Yinping, Jiang Yi, A simple method, the T –history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials
- [30] 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
- [31] H.Mehling, E.Günther, S.Hiebler, L.F.Cabeza, C.Castellón, A new measurement and evaluation method for DSC of PCM samples
- [32] E. Günther, S. Hiebler, H. Mehling, Determination of the heat storage capacity of PCM and PCM-objects as a function of temperature
- [33] en.wikipedia.org/wiki/Differential_thermal_analysis
- [34] <http://www.nobadscience.com/therm3.htm>

- [35] Hiki Hong, Sun Kuk Kim, Yong-Shik Kim, Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials
- [36] Piia Lamberg, Reijo Lehtiniemi, Anna-Maria Henell, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage
- [37] Yvan Dutil, Daniel R.Rousse, Nizar Ben Salah, Stephane Lassue, Laurent Zalewski, A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations
- [38] Eleftherios Dimitrios Kravvaritis, Kimon Antonopoulos, Christos Tzivanidis, Solar energy management using PCM passive systems in the Athens area buildings, (υπό δημοσίευση)
- [39] Haitian Yang, Yiqian He, Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods

Κεφάλαιο 3ο:Γενικές εφαρμογές των PCM

3.1 Εισαγωγή[1]

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 και αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο, αλλά καλύπτει μεγάλη γκάμα και είναι μία αποτελεσματική λύση για διάφορες καθημερινές και μη ανάγκες.

3.2 Φωτοβολταικά πλαίσια[2,3]

Τα φωτοβολταικά πλαίσια τα οποία έχουν ενσωματωθεί σε κτίρια (Building Integrated Photovoltaic systems-BIPVs) είναι αναγνωρισμένα ως η καλύτερη εφαρμογή της φωτοβολταικής 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 φωτοβολταικών συστημάτων.Το μεγαλύτερο πρόβλημα στα φωτοβολταικά 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.

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 PCM 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

ευηλεκτρικά 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.



Three test roof assemblies at Oak Ridge National Laboratory: From left, shingle roof, metal roof with infrared-reflective (IR) coating, and phase change material/photovoltaic/metal roof.

Σχήμα 3.1: Από αριστερά στέγη σκεπασμένη με λεπτές σανίδες, μεταλλική στέγη με υπέρυθρη-αντανακλαστική επίστρωση και μεταλλική στέγη με PV πάνελ με PCM[4].

3.3 Θερμική ένδυση[5,6]

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

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.

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. Ακολοθούν κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής.

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.



Σχήμα 3.2: Προϊόντα της Outlast για διάφορες αθλητικές δραστηριότητες[7].



Σχήμα 3.3: Προϊόντα της Outlast για χρήση ως εσώρουχα[7].

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.



Σχήμα 3.4: Προϊόντα της Outlast για χρήση ως ύπνου[7].



Σχήμα 3.5: Προϊόντα της Outlast για χρήση σε ένοπλες δυνάμεις και σώματα ασφαλείας[7].

3.4 Ιατρικές εφαρμογές[8,10]

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.



Σχήμα 3.6: Ειδικές θήκες για μεταφορά αίματος(RUBITHERM)[9].

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, όπως αυτό που φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.7: Ειδικό ζεστό μαξιλάρι με PCM για ιατρικές εφαρμογές(RUBITHERM)[8].

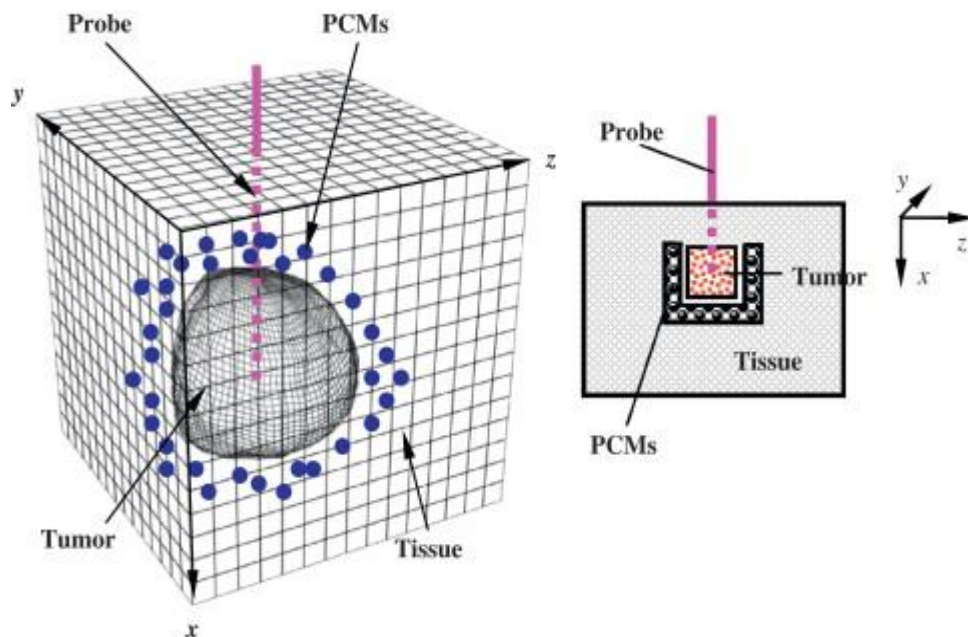
Επιπλέον, επειδή η θερμότητα μπορεί να αποτελεί πρόβλημα και για επαγγελματίες αθλητές και για ηλικιωμένους ανθρώπους με χρόνιες παθήσεις ή για παιδιά, έχουν αναπτυχθεί διάφορα ψυκτικά προϊόντα, όπως περικάρπια,καπέλα,γιλέκα και ειδικά βοηθήματα για τον αυχένα που περιέχουν PCM.Αν η θερμοκρασία του σώματος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



Σχήμα 3.8: Ειδικά ιατρικά βοηθήματα για αθλητές ή ηλικιωμένους με PCM(CLIMATOR)[8].

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 λιπώσματος ως

κάψουλα μπορεί να μειώσει την τοξικότητα των PCM, αλλά και να συμβάλλει στην περαιτέρω μείωση της θερμικής αγωγιμότητας.



Σχήμα 3.9: Εφαρμογή των PCM στην κρυοχειρουργική[10].

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.

3.5 Μεταφορές αγαθών[8]

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 διαφόρων 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.

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).



Σχήμα 3.10: Μονωμένα κουτιά με ενσωματωμένο PCM για μεταφορά αγαθών[11].

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 διακοπόμενη 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.



Σχήμα 3.11: Ειδικά πάνελ με PCM για μεταφορά αγαθών και διατήρηση της ``cold chain``[12].

3.6 Οχήματα[13-15]

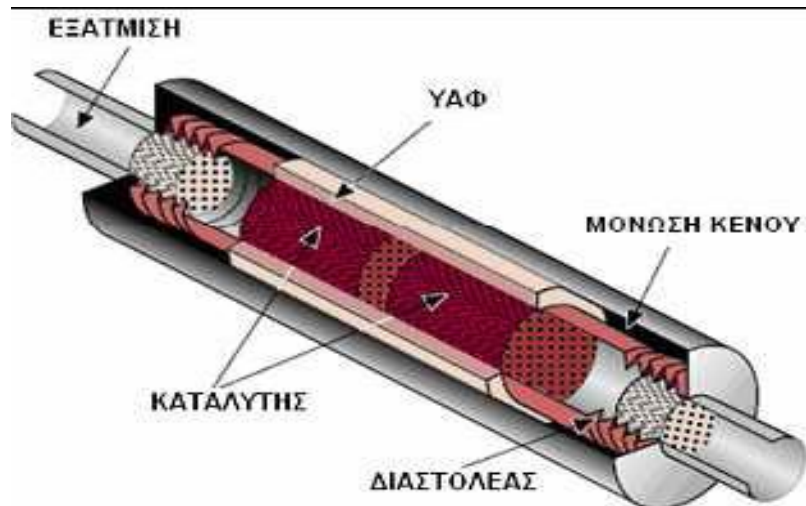
Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν βρει εφαρμογή και στην βιομηχανία των αυτοκινήτων, κυρίως ως βοηθητικά μέσα για επίλυση κάποιων προβλημάτων ή για βελτιστοποίηση κάποιων στοιχείων.

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 (CO) και υδρογονανθράκων (C_nH_n) στα καυσαέρια, μείωση του χρόνου ζωής της μηχανής και της ικανότητας για υψηλό φορτίο στους συσσωρευτές και στη μίζα.

Για παράδειγμα, η Schatz Thermo Engineering Company απέδειξε ότι η χρήση ενός HS system με υδροξείδιο του βαρίου ως PCM, επέφερε μείωση κατά 40 με 50% στις εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων και μονοξειδίου του άνθρακα. Επίσης, μία γνωστή εφαρμογή είναι αυτή της εταιρείας Bridgeway Ltd για τα οχήματα της BMW της σειράς 5. Πρόκειται για έναν προαιρετικό εξοπλισμό, δηλαδή μία μπαταρία λανθάνουσας θερμότητας. Η λειτουργία είναι απλή, δηλαδή το υλικό αποθήκευσης είναι συνδεδεμένο με το ψυγείο του αυτοκινήτου και

αποθηκεύει την επιπλέον θερμότητα όταν το όχημα βρίσκεται στη θερμοκρασία λειτουργίας. Αυτή η θερμότητα είναι διαθέσιμη στην επόμενη ``κρύα`` εκκίνηση για να ζεστάνει το όχημα γρήγορα, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη κατανάλωση καυσίμου, αλλά και για το εσωτερικό του οχήματος, ώστε να υπάρχει θερμική άνεση στην οδήγηση. Εξαιτίας, μάλιστα, της εξαιρετικής μόνωσης της μπαταρίας λανθάνουσας θερμότητας, η μηχανή μπορεί να διατηρήσει την αποθηκευμένη θερμότητα έως και δύο ημέρες για μία εξωτερική θερμοκρασία στους -20°C . Επιπλέον, το HS system σε αυτήν την περίπτωση πετυχαίνει μείωση κατά 30% σε εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων και σε μονοξείδιο του άνθρακα κατά τη διάρκεια της περιόδου εκκίνησης της μηχανής. Σε αυτήν την εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε μείγμα άλατος $Mg(NO_3)H_2O$ και $LiNO_3$ ως PCM με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Μία άλλη σημαντική εφαρμογή που έχει γίνει είναι η ενσωμάτωση ενός HS system στον καταλυτικό μετατροπέα. Ο καταλυτικός μετατροπέας έχει την ιδιότητα να μειώνει τις εκπομπές των υδρογονανθράκων και των άλλων ρύπων, αλλά η αποτελεσματικότητά του περιορίζεται από τα πρώτα λεπτά της εκκίνησης μέχρι να φτάσει στη θερμοκρασία λειτουργίας. Άρα και σε αυτήν την περίπτωση το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η ``κρύα`` εκκίνηση. Γι' αυτό και οι μελετητές της NREL σχεδίασαν και πρότειναν ένα καταλυτικό μετατροπέα VCI, δηλαδή με μεταβλητής αγωγιμότητας μόνωση, ο οποίος παραμένει αρκετά ζεστός, ώστε να είναι αμέσως αποτελεσματικός για την επόμενη διαδρομή σε ποσοστό 98% του χρόνου. Επίσης, βρέθηκε ότι αυτός ο μετατροπέας μειώνει δραστικά τις εκπομπές ρύπων, δηλαδή σχεδόν κατά 84% τις εκπομπές υδρογονανθράκων και κατά 91% τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα. Η ενσωμάτωση του PCM σε αυτό το σύστημα, που είναι και το κύριο στοιχείο που ενδιαφέρει την παρούσα εργασία, έγινε με ένα στρώμα περίπου 13mm PCM μεταξύ του καταλυτικού μετατροπέα και του κενού κελιού μονώσεως. Το PCM που χρησιμοποιείται, επιλέγεται ώστε να είναι συμβατό με τη θερμοκρασία λειτουργίας του μετατροπέα, για να οφελεί και στη διατήρησή του σε μία ομοιόμορφη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Αυτό έχει σαν πρόσθετο αποτέλεσμα να μειώνει την πίεση στο μετατροπέα και να παρατείνει επομένως τη διάρκεια ζωής του.



Σχήμα 3.12: PCM σε καταλυτικό μετατροπέα[14].

3.7 Ηλεκτρονικά εξαρτήματα

Η χρήση των PCM στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα έχει δύο διαφορετικούς σκοπούς. Ο πρώτος αφορά κυρίως την αντιμετώπιση της υπερθέρμανσης όλων των σύνθετων ηλεκτρικών συσκευών. Ο δεύτερος σκοπός είναι η χρήση αυτών των υλικών για δημιουργία πρωτοποριακών ηλεκτρονικών μνημών.

3.7.1 Χρήση PCM σε φορητές ηλεκτρικές συσκευές[16,17]

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 παραγόμενης 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.

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.

Η διαδικασία ψύξης με τη χρήση PCM μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις φάσεις. Στην 1^η πρώτη φάση, η θερμότητα από την ηλεκτρονική συσκευή απορροφάται, ώστε σταδιακά να αυξήσει τη θερμοκρασία του στερεού PCM μέχρι το σημείο τήξης. Στην 2^η φάση, το PCM ξεκινά να τήκεται σε μία σταθερή θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης θερμότητα απορροφάται χωρίς να επιφέρεται καμία μεταβολή στη θερμοκρασία, ενώ μπορεί να υπάρξει μία μικρή μεταβολή όγκου κατά τη διάρκεια της μεταβολής από τη στερεή στην υγρή φάση. Στην 3^η φάση, το στερεό PCM έχει λιώσει εντελώς. Κατα συνέπεια, η θερμοκρασία του λιωμένου PCM θα αυξηθεί αν συνεχίσει η παροχή θερμότητας. Με τη χρήση PCM, η θερμότητα μπορεί να αφαιρεθεί από τα ζεστά συστατικά και να χρησιμοποιηθεί για να λιώσει το υλικό. Αν και το PCM μπορεί να απορροφήσει μεγάλα ποσά ενέργειας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, η αποτελεσματικότητά του μπορεί να περιοριστεί στην περίοδο αλλαγής φάσης από

στερεό σε τελείως υγρό. Ως εκ τούτου, η διάρκεια λειτουργίας και ο παράγοντας χρήσης της ηλεκτρονικής συσκευής θα επηρεαστεί από αυτή τη τεχνική ψύξης.

Από διάφορες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στα κινητά τηλέφωνα, έχει προκύψει ότι η ενσωμάτωση ενός τέτοιου συστήματος με PCM, μπορεί να σταθεροποιήσει τη θερμοκρασία του κινητού τηλεφώνου για μία μεγαλύτερη περίοδο και να παρατείνει τη χρήση του. Χωρίς το PCM η θερμοκρασία του κινητού τηλεφώνου μπορούσε να ξεπεράσει τους 45°C, γεγονός που θα μπορούσε να προκαλέσει δυσφορία στο χρήστη. Ένα υψηλότερο επίπεδο ισχύος μειώνει το χρόνο που δίνεται για τήξη του PCM και οδηγεί σε ένα υψηλότερο μέγιστο της θερμοκρασίας της συσκευής. Αυτός ο παράγοντας είναι σημαντικός, καθώς το επίπεδο ισχύος για τα μελλοντικά κινητά τηλέφωνα αναμένεται να αυξηθεί με τις πρόσθετες λειτουργίες. Γι' αυτό και εκτός από τη καινοτομία με το PCM, προτάθηκε να προστεθούν εσωτερικά πτερύγια στη ψύκτρα, αφού διαπιστώθηκε ότι βοηθούν στο να μειωθεί το μέγιστο της θερμοκρασίας της συσκευής. Βέβαια, τα ευρήματα των ερευνών έδειξαν ότι η επαναστεροποίηση του PCM παραμένει προβληματική και απαιτεί περαιτέρω έρευνα, αφού ο χρόνος που απαιτείται είναι μεγαλύτερος από το χρόνο που απαιτείται για την τήξη.



Σχήμα 3.13: Το πρώτο τηλέφωνο από την Samsung με ηλιακές μπαταρίες και θήκη που περιέχει PCM[18].

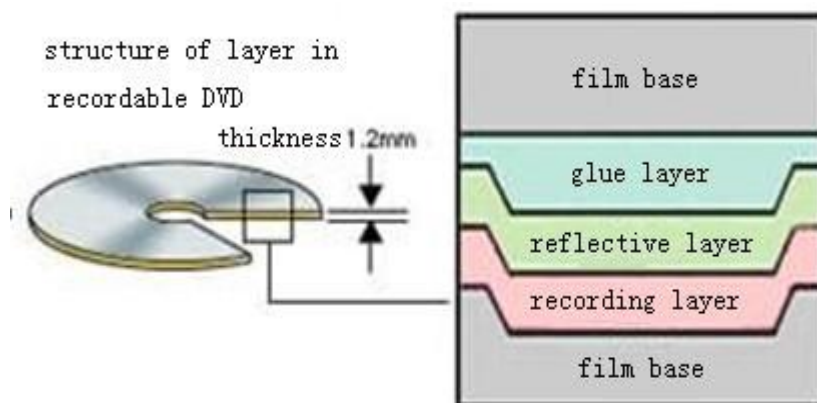
3.7.2 Χρήση PCM σε επαναγραφόμενα CDs και DVDs[19]

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 κυμαινόμενη θύρα 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.

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.

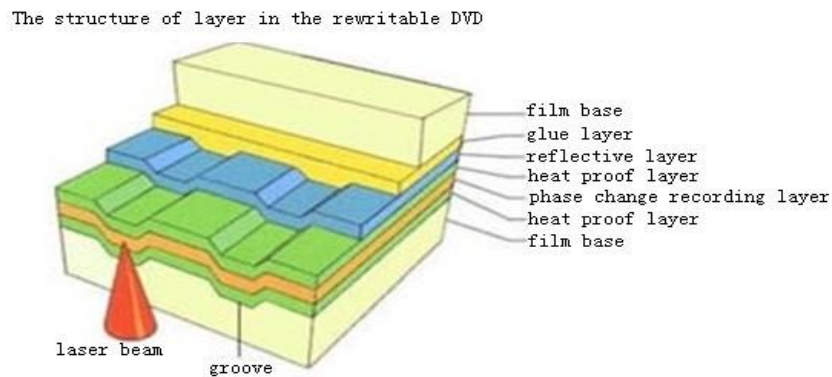
Τα υλικά αυτής της εφαρμογής φέρονται με το όνομα ``chalcogenides``, επειδή περιέχουν ένα από τα περιοδικά στοιχεία της 6ης ομάδας. Ένα υλικό που έχει ευρέως ελεχθεί είναι το GST, δηλαδή ένα υαλώδες κράμα από γερμάνιο, αντιμόνιο και τελλούριο.



Σχήμα 3.14: Σχηματική διάταξη ενός DVD, για το οποίο στο στρώμα εγγραφής (recording layer) έχει χρησιμοποιηθεί PCM[20].

Η ηλεκτρική μνήμη αλλαγής φάσης είναι σημαντική για δύο λόγους, εκτός από το ότι διατηρεί το σπουδαίο χαρακτηριστικό της ``flash memory``, που είναι η μη μεταβλητότητά της. Ο πρώτος είναι η ενισχυμένη λειτουργικότητα. Αυτή η μνήμη μπορεί να τροποποιηθεί στο επίπεδο των bit και μπορεί να επαναγραφεί πάνω

από ένα εκατομμύριο φορές, ενώ η ``flash memory`` μπορεί να τροποποιηθεί μόνο σε μεγάλες ομάδες bit και μπορεί να επαναγραφεί μόνο δέκα χιλιάδες φορές. Ο δεύτερος λόγος είναι το μικρό μέγεθος του στοιχείου μνήμης και η επεκτασιμότητα. Η έρευνα δείχνει ότι τέτοιου είδους μνήμες θα είναι στο μέλλον επεκτάσιμες σε διαστάσεις κάτω από 5nm, δίνοντας την ευκαιρία για ακόμα μικρότερο κόστος και για ακόμα υψηλότερη πυκνότητα ισχύος.



Σχήμα 3.15: Σχηματική παράσταση ενός επαναγραφόμενου DVD που περιέχει PCM[20].

Βιβλιογραφία 3^{ου} Κεφαλαίου

- [1] Χρήστος Τζιβανίδης, Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων, Υλικά Αλλαγής Φάσης
- [2] Ming Jun Huang, The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems
- [3] M.J. Huang, P.C. Eames, B. Norton, Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics
- [4] <http://www.durabilityanddesign.com/news/?fuseaction=view&id=4411>
- [5] S. Mondal, Phase change materials for smart textiles – An overview
- [6] A.Izzo Renzi, C.Carfagna, P.Persico, Thermoregulated natural leather using phase change materials: An example of bioinspiration
- [7] <http://www.outlast.com>
- [8] Luisa F.Cabeza, Harald Mehling, Temperature control with phase change materials
- [9] http://www.rubitherm.com/english/pages/03c_medical_therapy_products.htm
- [10] Yonggang Lv, Yang Zou, Li Yang, Feasibility study for thermal protection by microencapsulated phase change micro/nanoparticles during cryosurgery
- [11] <http://www.teappcm.com/products.htm>
- [12] <http://www.cryopak.com/phase-change-materials/>
- [13] 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
- [14] 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>
- [15] <http://www.teappcm.com/applications.htm>
- [16] F.L.Tan, C.P.Tso, Cooling of mobile electronic devices using phase change materials
- [17] G.Setoh, F.L.Tan, S.C.Fok, Experimental studies on the use of a phase change material for cooling mobile phones
- [18] <http://www.goodcellphonereviews.com/samsung-blue-earth-solar-powered-mobile/>
- [19] Greg Atwood, Phase-Change Materials for Electronic Memories, http://mypages.iit.edu/~segre/phys100/science_2008_321_210.pdf

[20] <http://www.powerdatarecovery.com/cd-dvd-resources/recordable-cd.html>

Κεφάλαιο 4^ο: Ηλιακά συστήματα για θέρμανση και ψύξη με PCM

4.1 Ηλιακά συστήματα με PCM

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην εφαρμογή των PCM σε υπάρχοντα ηλιακά συστήματα και αναλύεται η λειτουργία τους.

Οι εφαρμογές ηλιακής ενέργειας απαιτούν μία επαρκή αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η επιτυχία μίας τέτοιας εφαρμογής εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από τη μέθοδο θερμικής αποθήκευσης που θα επιλεγεί. Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας είναι αυτή η μέθοδος που έχει αποκτήσει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Για να γίνει αντιληπτή η ποσότητα της λανθάνουσας θερμότητας, η οποία εμφανίζεται κατά την αλλαγή φάσης ενός υλικού, μπορεί να συγκριθεί η αισθητή θερμοχωρητικότητα του σκυροδέματος (1.0kJ/kg K) με τη λανθάνουσα θερμότητα ενός υλικού αλλαγής φάσης, όπως είναι το κερί παραφίνης (154kJ/kg). Είναι, λοιπόν, εμφανές ότι όποιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας ενσωματώσει PCM, θα περιλαμβάνει πολύ μικρότερο όγκο από οποιοδήποτε άλλο σύστημα με ενσωματωμένο κάποιο υλικό που αποθηκεύει μόνο αισθητή θερμότητα. Επομένως, επαρκή και αξιόπιστα συστήματα αποθήκευσης για θερμική ενέργεια είναι καθοριστικής σημασίας για τις περισσότερες εφαρμογές. Ένας τομέας, όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται εκτενώς είναι η θέρμανση νερού. Για αυτή τη χρήση έχουν γίνει πολλές και ενδιαφέρουσες μελέτες[1].

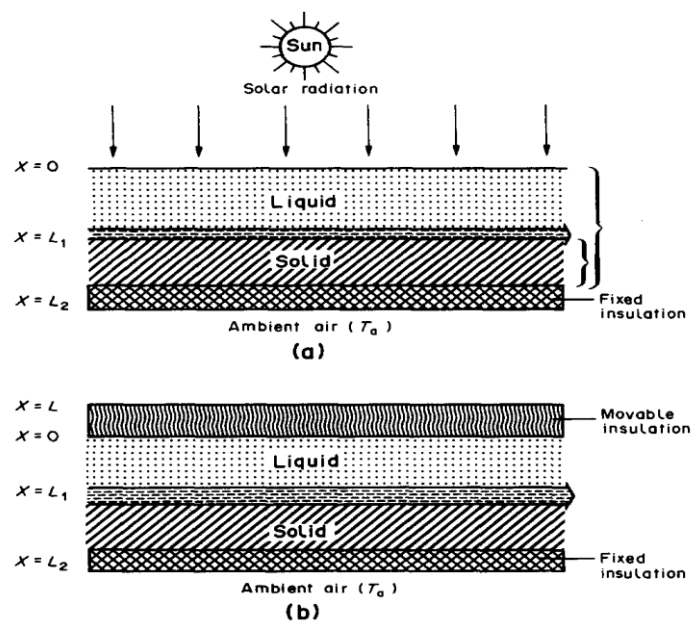
4.1.1 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM[1-5]

Ένας τομέας, όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται εκτενώς είναι η θέρμανση νερού. Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες αποκτούν μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς είναι σχετικά φθηνοί και είναι αρκετά εύκολη η κατασκευή και η συντήρησή τους. Είναι ένας βιώσιμος εξοπλισμός και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά από τους ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες. Αυτή η αντικατάσταση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των βλαβερών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου,

αφού έχει διαπιστωθεί ότι κατά τη διάρκεια 20 χρόνων, ένας ηλιακός θερμοσίφωνας μπορεί να αποτρέψει πενήντα τόνους εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε κλίμα, ενώ αναλόγως με τις εξωτερικές συνθήκες και με την ακρίβεια του σχεδιασμού μπορεί να καλύψει από το μισό μέχρι το σύνολο της ζήτησης ζεστού νερού. Ακολουθεί η αναφορά κάποιων εφαρμογών στο πεδίο αυτό.

Ο Kumar σχεδίασε και αξιολόγησε τη συμπεριφορά μίας μονάδας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για να καλύψει τις ανάγκες ζεστού νερού το πρωί και το βράδυ, χρησιμοποιώντας έναν ηλιακό συλλέκτη σχήματος κιβωτίου. Το σύστημά του περιλάμβανε τρεις εναλλάκτες θερμότητας με πτερύγια. Ως PCM χρησιμοποιήθηκε το κερί παραφίνης με σημείο τήξης τους 54°C. Βρέθηκε ότι η μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ήταν πολύ αποτελεσματική ώστε να παρέχει το ζεστό νερό στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος.

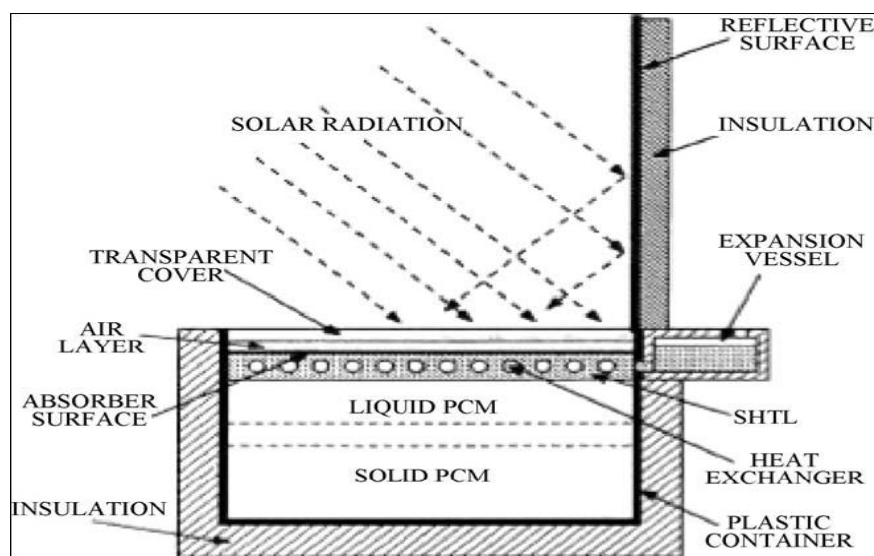
Ο Tiwari και οι συνεργάτες του, ανέλυσαν την αποθήκευση θερμότητας στο PCM ενός ηλιακού θερμοσίφωνα, ενσωματώνοντας στην μελέτη τους και την επίδραση της ροής του νερού πάνω σε μία παράλληλη πλάκα, η οποία τοποθετείται στην διεπιφάνεια των φάσεων στερεού και υγρού. Προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας κατά τη διάρκεια της νύχτας από την εκτεθειμένη επιφάνεια, υπήρχε και μία πρόβλεψη για κάλυψη του συστήματος με μόνωση, η οποία μπορούσε να μετακινηθεί.



Σχήμα 4.1: Άποψη της διατομής του προτεινόμενου συστήματος του Tiwari (a) κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας, (b) κατά τη διάρκεια των ωρών χωρίς ηλιοφάνεια[2].

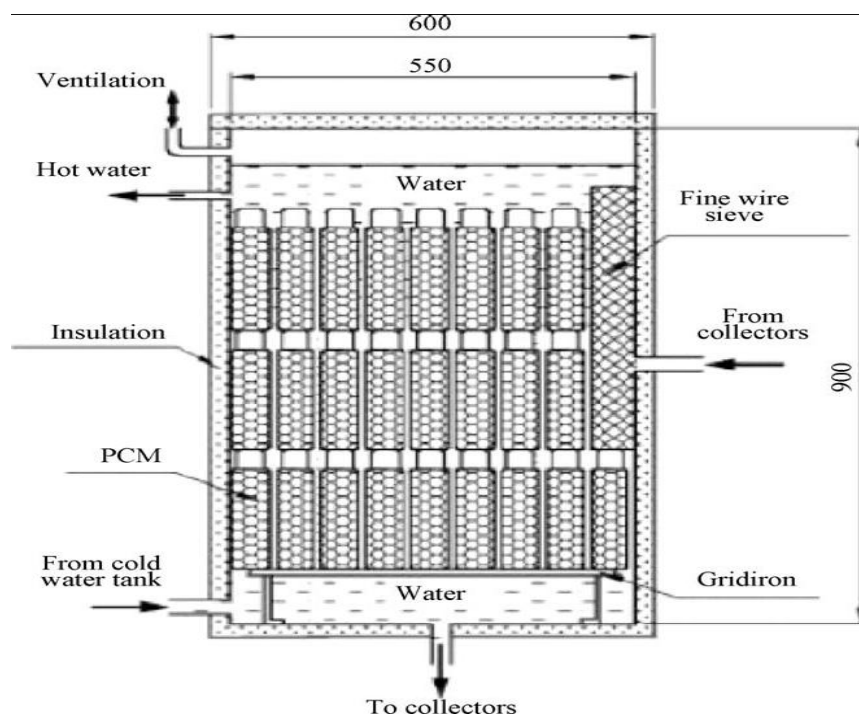
Συμπέραναν ότι, το ζεστό νερό μπορεί να διατηρηθεί σε όλη τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας σε μία θερμοκρασία περίπου 15-20°C υψηλότερα από τη θερμοκρασία του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του νερού μπορούν να μειωθούν με μία αύξηση της περιοχής τήξης του PCM.

Ο Rabin και η ομάδα του, παρουσίασαν έναν ηλιακό συλλέκτη με ενσωματωμένη αποθήκευση για παροχή ζεστού νερού, ο οποίος ενσωμάτωσε ένα ευτηκτικό μείγμα, βασισμένο σε ένα ένυδρο άλας, ως PCM. Η σχηματική απεικόνιση του συστήματος φαίνεται παρακάτω. Η διάταξη αποτελείται από ένα θερμικά μονωμένο πλαστικό δοχείο, το οποίο περιέχει ένα στρώμα από ένα υγρό μεταφοράς θερμότητας, χαμηλότερης πυκνότητας από το υγρό ένυδρο άλας στο οποίο επιπλέει. Επίσης, χρησιμοποιείται ένας εναλλάκτης θερμότητας με πτερύγια για να κρυώνει το νερό στη διαδικασία αποφόρτισης. Τα αποτελέσματα ελέγχου αυτού του συστήματος ήταν ότι, για μία χειμερινή ημέρα, περίπου τα 2/3 της συνολικής ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει πάνω στον ηλιακό συλλέκτη μπορούν να απορροφηθούν και να αποθηκευτούν στη θερμοκρασία των 28°C, χρησιμοποιώντας αυτό το ευτηκτικό μείγμα. Αυτό σημαίνει ότι για θερμοκρασίες της τάξεως των 15-30°C, μέσα στις οποίες περιλαμβάνεται το συγκεκριμένο ευτηκτικό μείγμα, η διάταξη μπορεί να είναι έως και 65-70% αποτελεσματική.



Σχήμα 4.2: Ηλιακός συλλέκτης με ενσωματωμένη αποθήκευση σχεδιασμένος από τον Rabin[3].

Ο Canbazoglu και η ομάδα του σύγκριναν ηλιακούς θερμοσίφωνες με PCM με συμβατικούς θερμοσίφωνες. Η συνολική μάζα του PCM που χρησιμοποιήθηκε στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας ήταν περίπου 180kg, η οποία είχε ενσωματωθεί σε μπουκάλια πολυαιθυλενίου. Διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία του νερού στο μέσο της δεξαμενής αποθήκευσης είχε μία ομαλή μείωση κάθε μέρα μέχρι η θερμοκρασία του PCM, μετά από τις υψηλές τιμές κατά την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, να μειωθεί και τελικά να διατηρηθεί σε μία θερμοκρασία των 45°C, για μία περίοδο δέκα ωρών κατά τη διάρκεια της νύχτας και μέχρι την ανατολή του ήλιου, εξαιτίας της μη κατανάλωσης ζεστού νερού. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του μέσου της δεξαμενής αποθήκευσης και του σημείου εξόδου του συλλέκτη της δεξαμενής με το PCM, ήταν μεγαλύτερη κατά 6°C από αυτήν της δεξαμενής χωρίς το PCM. Αυτή η διαφορά αποδεικνύει την υψηλή απόδοση σε αποθήκευση θερμότητας του συστήματος με το PCM. Όμως, έγινε κατανοητό ότι οι παθητικοί ηλιακοί θερμοσίφωνες συνδυασμένοι με το PCM μπορούν να λειτουργήσουν καλύτερα τη θερινή περίοδο, όπου η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγάλη και οι απώλειες θερμότητας του συστήματος μικρές.

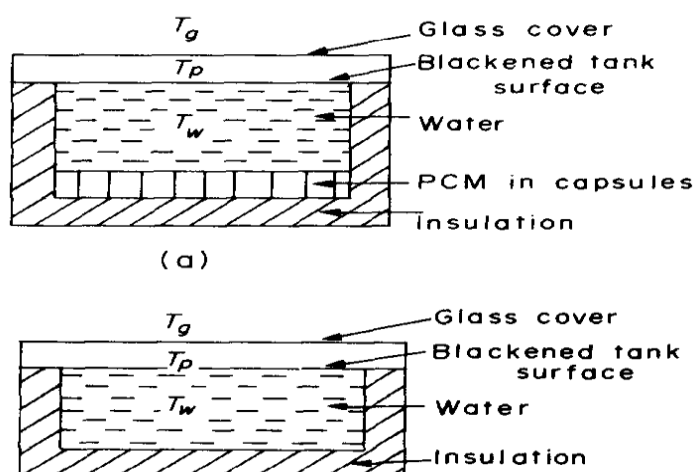


Σχήμα 4.3: Τομή της μονάδας αποθήκευσης, σχεδιασμένη από τον Canbazoglu[4].

Επίσης, ο χρόνος αποθήκευσης του ζεστού νερού, η ποσότητα προς χρήση του παραγόμενου ζεστού νερού και η συνολική ποσότητα που αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθήκευσης, ήταν περίπου 2,59-3,45 μεγαλύτερα στην περίπτωση του συστήματος με το PCM. Αυτά τα αποτελέσματα σημαίνουν ότι απαιτείται μικρότερος όγκος για τη δεξαμενή, λιγότερη ποσότητα μονωτικού υλικού, άρα και χαμηλότερο κόστος, όταν χρησιμοποιούνται PCM. Μάλιστα τα πιο κατάλληλα για αυτήν την εφαρμογή βρέθηκε ότι ήταν κάποια ένυδρα άλατα.

Ο Prakash και οι συνεργάτες του, ανέλυσαν έναν ηλιακό θερμοσίφωνα με ένα στρώμα PCM στο κάτω μέρος του, ώστε να πετύχουν και τη διατήρηση χαμηλής θερμοκρασίας του νερού στη δεξαμενή, αλλά ταυτόχρονα και μεγαλύτερη ποσότητα αποθηκευόμενης ενέργειας. Κατά τη διάρκεια των ωρών με ηλιοφάνεια, το νερό στη δεξαμενή θερμαίνεται και με τη σειρά του μεταφέρει θερμότητα στο PCM που βρίσκεται από κάτω του. Το PCM αποθηκεύει την ενέργεια στη μορφή λανθάνουσας θερμότητας και λιώνει. Κατά τη διάρκεια των ωρών χωρίς ηλιοφάνεια, το θερμό νερό αποσύρεται και αντικαθίσταται από κρύο νερό, το οποίο λαμβάνει θερμότητα από το PCM. Αυτή η ενέργεια απελευθερώνεται από το PCM, καθώς αλλάζει φάση από υγρό σε στερεό.

Ο έλεγχος της συγκεκριμένης διάταξης έγινε για δύο διαφορετικά βάθη τοποθέτησης του PCM και για σταθερή ή διακοπτόμενη ροή, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες θερμού νερού ενός οικιακού κτιρίου στην Ινδία. Επίσης, πραγματοποιήθηκε σύγκριση του ηλιακού θερμοσίφωνα με το στρώμα PCM με ένα συμβατικό ηλιακό θερμοσίφωνα, όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση (α) ηλιακού θερμοσίφωνα με στρώμα PCM, (β) συμβατικού ηλιακού θερμοσίφωνα, όπως κατασκευάστηκαν από τον Prakash[5].

Το συμπέρασμα αυτών των ελέγχων ήταν, καταρχήν, ότι οι ηλιακοί θερμοσίφωνες με το στρώμα PCM είναι κυρίως κατάλληλοι για παροχή ζεστού νερού κατά τη διάρκεια των ωρών χωρίς ηλιοφάνεια. Η αποθήκευση θερμότητας σε έναν ηλιακό θερμοσίφωνα με PCM χωρίς την εφαρμογή νυχτερινής μόνωσης ήταν τόσο αποτελεσματική όσο η αποθήκευση θερμότητας σε συμβατικό ηλιακό θερμοσίφωνα με εφαρμογή νυχτερινής μόνωσης. Για την παροχή νερού κατά τη διάρκεια των ωρών της ημέρας (με ηλιοφάνεια) δεν ενδείκνυται η χρησιμοποίηση ηλιακού θερμοσίφωνα με στρώμα PCM, εξαιτίας της σχετικά χαμηλής μετάδοσης θερμότητας.

4.1.2 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα με PCM[6-9]

Μεγάλη προσοχή για διεξαγωγή μελετών και πειραμάτων έχει συγκεντρώσει και ο ηλιακός θερμοσίφωνα αέρα, για τον οποίο ακολουθούν οι κυριότερες εφαρμογές, από τις οποίες διαφαίνεται αν όντως υπάρχει προοπτική για πρακτική χρήση.

Ο Enibe ασχολήθηκε με το σχεδιασμό, την κατασκευή και την αξιολόγηση της επίδοσης ενός παθητικού ηλιακού θερμοσίφωνα αέρα. Το σύστημα που προτάθηκε περιλάμβανε έναν ηλιακό συλλέκτη με επίπεδη πλάκα απορρόφησης ενσωματωμένο με ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, το οποίο χρησιμοποιεί παραφίνη ως PCM με γνωστές θερμοφυσικές ιδιότητες. Η συνολική μάζα PCM στον ηλιακό θερμοσίφωνα είναι 65kg. Ο ηλιακός θερμοσίφωνα είναι φυσικής συναγωγής, δηλαδή εισέρχεται με φυσική συναγωγή φρέσκος αέρας στο χώρο θέρμανσης, ενώ ταυτόχρονα ο θερμός αέρας μεταπίπτει στο χώρο του θερμού αέρα και από εκεί αποφορτίζεται στο περιβάλλον.

Τα πειράματα διεξήχθησαν για τη συμπεριφορά του συστήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας, για 14 διαφορετικές ημέρες τον Μάιο και τον Ιούνιο στην περιοχή Nsukka, στη Νιγηρία. Οι έλεγχοι έγιναν κάτω από συνθήκες μηδενικού φορτίου και με φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένων και των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στο εύρος 19-41°C, αλλά και των διακυμάνσεων της ολικής ημερήσιας ακτινοβολίας στο εύρος 4,9-19,96MJ/m². Η

μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας ήταν περίπου 15K, ενώ η αθροιστική ωφέλιμη αποδοτικότητα ήταν περίπου 50%. Το σύστημα αυτό αποδείχθηκε κατάλληλο για χρήση ως ηλιακός χώρος για ξήρανση καλλιεργειών που δεν απαιτούν άμεση έκθεση στον ήλιο.

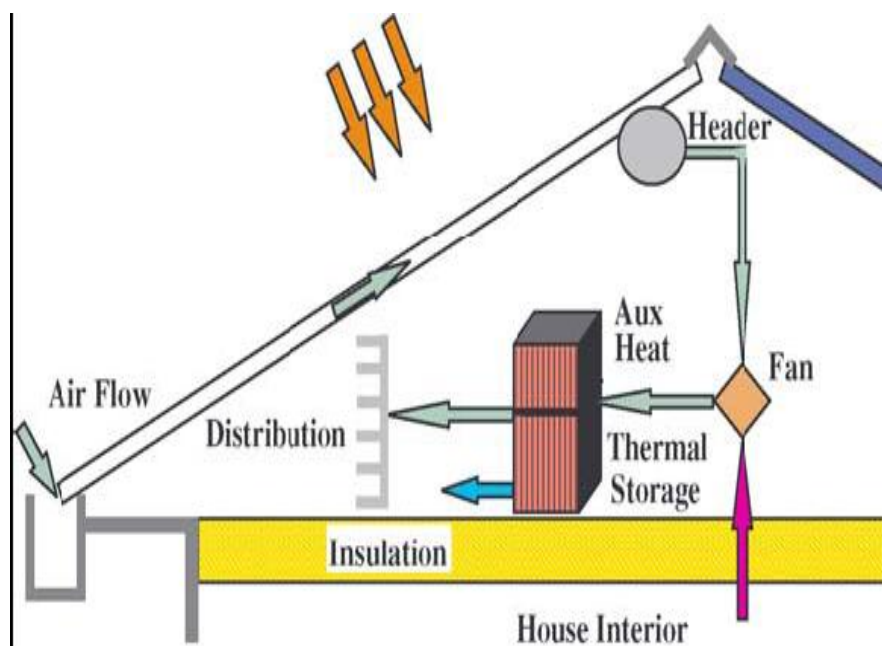


Σχήμα 4.5: Φωτογραφία ενός ηλιακού θερμοσίφωνα αέρα, όπου Α:συνδεσμολογία του συλλέκτη με την ενεργειακή αποθήκευση και τα υποσυστήματα θέρμανσης αέρα και Β:θερμαινόμενος χώρος[6].

Μία άλλη εφαρμογή είναι αυτή που πραγματοποιήθηκε από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Πανεπιστημίου της Νότιας Αυστραλίας, ώστε να σχεδιαστεί ένα ενσωματωμένο στη στέγη ηλιακό σύστημα θέρμανσης αέρα. Ο κύριος στόχος ήταν να παρουσιαστεί ένα τεχνικά αξιόπιστο σύστημα με ενδιαφέρον και από οικονομική άποψη. Προς αυτήν την κατεύθυνση υιοθέτησαν δύο στρατηγικές. Η πρώτη ήταν η χρησιμοποίηση της υπάρχουσας κατασκευής στη στέγη ως ηλιακό συλλέκτη, ώστε να μειωθεί το αρχικό κόστος, ενώ η δεύτερη ήταν ακριβώς η χρήση μίας μονάδας λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας με PCM, η οποία θα αποθήκευε την επιπλέον ηλιακή ενέργεια για χρήση για τη θέρμανση του σπιτιού, όταν δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, μειώνοντας έτσι την απαίτηση για βοηθητική πηγή θερμότητας.

Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος, όπως αυτό που παρουσιάστηκε από τον Belusko και δίνεται παρακάτω, μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες. Κατά τη διάρκεια των ωρών με ηλιοφάνεια και όταν απαιτείται θερμότητα για το σπίτι, ο αέρας περνάει από το συλλέκτη και ακολούθως στο εσωτερικό του σπιτιού. Όταν δεν απαιτείται θερμότητα, τότε ο αέρας διοχετεύεται στη μονάδα θερμικής αποθήκευσης, προκαλώντας την τήξη του PCM, δηλαδή φορτίζοντάς το για

μεταγενέστερη χρήση. Τις ώρες στις οποίες η ηλιοφάνεια δεν είναι διαθέσιμη, ο αέρας του δωματίου περνάει μέσα από τη μονάδα αποθήκευσης, θερμαίνεται και διοχετεύεται ξανά στο χώρο. Όταν η μονάδα αποθήκευσης δεν είναι φορτισμένη, τότε μία βοηθητική πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται για να θερμάνει το δωμάτιο.



Σχήμα 4.6: Ηλιακό σύστημα θέρμανσης αέρα ενσωματωμένο στη στέγη[8].

Τα αποτελέσματα τα οποία θα αναφερθούν αφορούν μία συγκεκριμένη εφαρμογή, η οποία πραγματοποιήθηκε στην Αδελαΐδα, στην Αυστραλία. Η θερμική μονάδα αποθήκευσης περιλάμβανε 45 επίπεδες πλάκες PCM, διατεταγμένες η μία πάνω στην άλλη. Το σύνολο αυτών των πλακών τοποθετήθηκε μέσα σε έναν ορθογώνιο αγωγό, μέσω του οποίου ο αέρας ρέει ώστε να προσθέσει ή να αφαιρέσει θερμότητα από το PCM. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε είχε σημείο τήξης τους 29°C, ενώ η συνολική ποσότητα του PCM στο σύστημα ήταν 600kg.

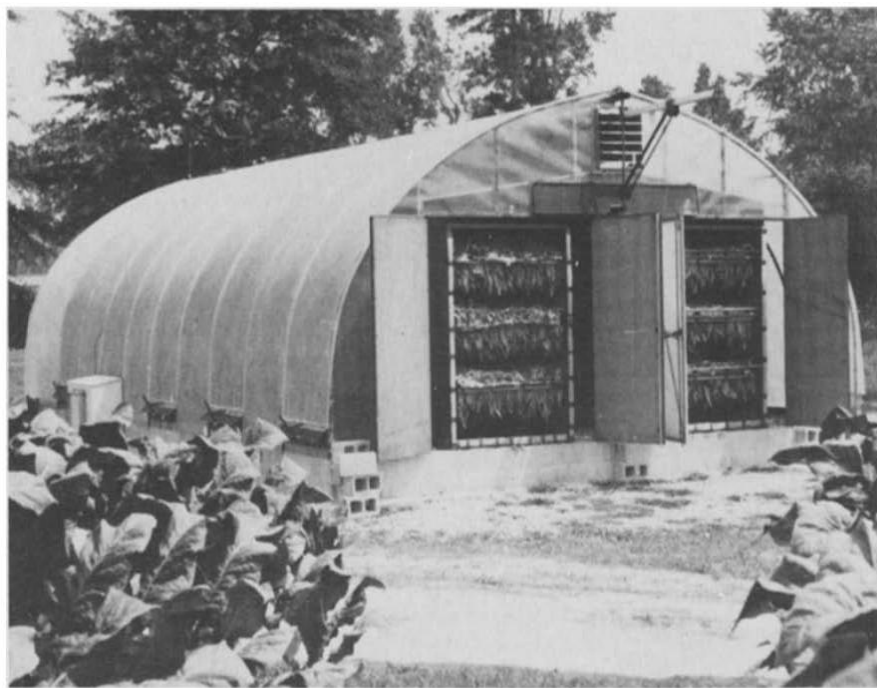
Τα συμπεράσματα συμπεριλάμβαναν και την επίδραση της αισθητής θερμότητας στη θερμική συμπεριφορά του παραπάνω συστήματος. Διαπιστώθηκε ότι η επίδραση αυτή γίνεται αντιληπτή και στην περίοδο τήξης και στην περίοδο στερεοποίησης. Αυτό είναι εμφανές από την πολύ μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα στην αρχική περίοδο τήξης και από την πολύ μεγάλη μείωση αυτής στην αρχική περίοδο στερεοποίησης. Για εφαρμογές θέρμανσης, αυτή η συμπεριφορά σημαίνει μία αυξημένη αίσθηση θερμικής

άνεσης, λόγω της αυξημένης αίσθησης του θερμού αέρα κατά την είσοδό του στο χώρο. Επίσης, μία υψηλότερη θερμοκρασία εισόδου του αέρα αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας και μειώνει το χρόνο τήξης. Αντίστροφα, κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, μία χαμηλότερη θερμοκρασία εισόδου του αέρα αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας και μειώνει το χρόνο στερεοποίησης. Ομοίως, μία υψηλότερη ροή αέρα αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας, μειώνει το χρόνο τήξης και αυξάνει τη θερμοκρασία του αέρα εξόδου. Για τη στερεοποίηση, μία υψηλότερη ροή αέρα αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας, μειώνει το χρόνο στερεοποίησης, αλλά μειώνει και τη θερμοκρασία του αέρα εξόδου.

Όσον αφορά, τέλος, τον ηλιακό συλλέκτη μίας τέτοιας εφαρμογής έχουν γίνει δύο εφαρμογές. Η πρώτη από τους Saman και Belusko χρησιμοποίησε την κυματοειδή μεταλλική οροφή ώστε να λειτουργήσει ως κάλυπτος από τζάμι ηλιακός συλλέκτης. Αυτή η μελέτη απέδειξε ότι, αν και ένα τέτοιο σύστημα είναι οικονομικό, εξαιτίας της χαμηλής επίδοσης του συλλέκτη, ήταν αμφίβολο αν θα μπορούσε να προσφέρει σε σημαντικές ποσότητες εξοικονόμησης ενέργειας. Η δεύτερη εφαρμογή των ίδιων επιστημόνων ήταν με ηλιακό συλλέκτη, για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε κάλυμμα από τζάμι. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι ένας τέτοιος συλλέκτης βελτίωσε πολύ την απόδοση του συστήματος και μάλιστα με πολύ μικρότερη χρήση συμβατικής ενέργειας από ότι μία αντλία θερμότητας ή ένας ηλεκτρικός θερμαντήρας.

4.1.3 Ηλιακά θερμοκήπια με PCM[10-14]

Τα ηλιακά θερμοκήπια προσφέρουν ένα προστατευόμενο περιβάλλον στις καλλιέργειες, αφού αντιμετωπίζονται με αυτόν τον τρόπο οι απρόβλεπτες κλιματικές συνθήκες. Σημαντική ποσότητα μεταφοράς ενέργειας λαμβάνει χώρα μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος του ηλιακού θερμοκηπίου. Επομένως, πρέπει αυτοί οι χώροι να θερμαίνονται, να ψύχονται και να αερίζονται σύμφωνα με τις εξωτερικές συνθήκες του περιβάλλοντος, έτσι ώστε να διατηρηθούν οι εσωτερικές συνθήκες κατάλληλες για την ανάπτυξη των φυτών και να αποτραπεί η καταστροφή των καλλιεργειών.



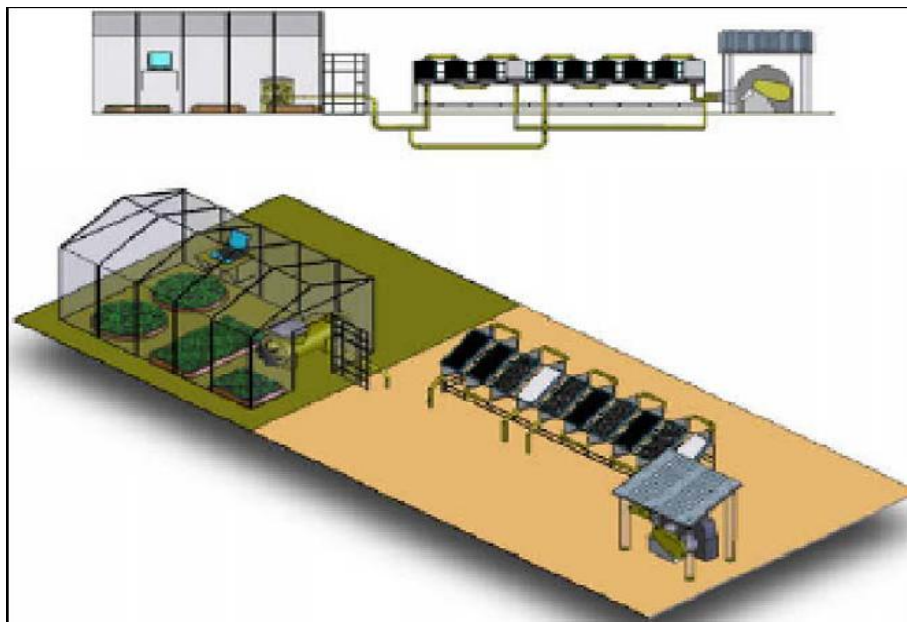
Σχήμα 4.7: Ηλιακό θερμοκήπιο με PCM[12].

Η χρήση των PCM στα θερμοκήπια για τη διαδικασία θέρμανσης, έχει αποδειχθεί ότι εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα. Μπορεί να είναι υψηλά τα αρχικά κόστη για την ενσωμάτωση των PCM στα θερμοκήπια, αλλά είναι χαμηλά τα κόστη λειτουργίας, είναι περιβαλλοντικά φιλικά και ασφαλή στη χρήση τους. Επίσης, τα PCM έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και παράγονται σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, στοιχεία τα οποία είναι πολύ ελκυστικά για εφαρμογές σε θερμοκήπια.

Η πρώτη εφαρμογή ήταν των Hung και Toksoy, οι οποίοι χρησιμοποίησαν εμπορικές κυλινδρικές ράβδους με υλικό αλλαγής φάσης, ως το κύριο μέσο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για ένα ηλιακό θερμοκήπιο. Τα πειράματα έγιναν σε ένα ηλιακό θερμοκήπιο παραγωγής τριανταφύλλων στη Γαλλία. Η ηλιακή ενέργεια που ήταν διαθέσιμη στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, μεταφερόταν και αποθηκευόταν ανακυκλώνοντας τον αέρα μέσω ενός δικτύου υπογείων επίπεδων εναλλακτών θερμότητας, οι οποίοι ήταν γεμάτοι με PCM. Συγκρινόμενο αυτό το θερμοκήπιο με ένα συμβατικό χωρίς λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας, αποδείχθηκε ότι το ηλιακό θερμοκήπιο με PCM πέτυχε 80% εξοικονόμηση στις εκπομπές προπανίου σε σχέση με το συμβατικό.

Οι Benli και Durmus μελέτησαν τη θερμική συμπεριφορά μίας μονάδας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Η μονάδα αποθήκευσης είναι ένα

σύστημα από δέκα μέρη ηλιακών συλλεκτών, η οποία σχεδιάστηκε για θέρμανση ενός θερμοκηπίου και στην οποία ενσωματώθηκε PCM. Ως PCM χρησιμοποιήθηκε το $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ με θερμοκρασία τήξης του $29^{\circ}C$.



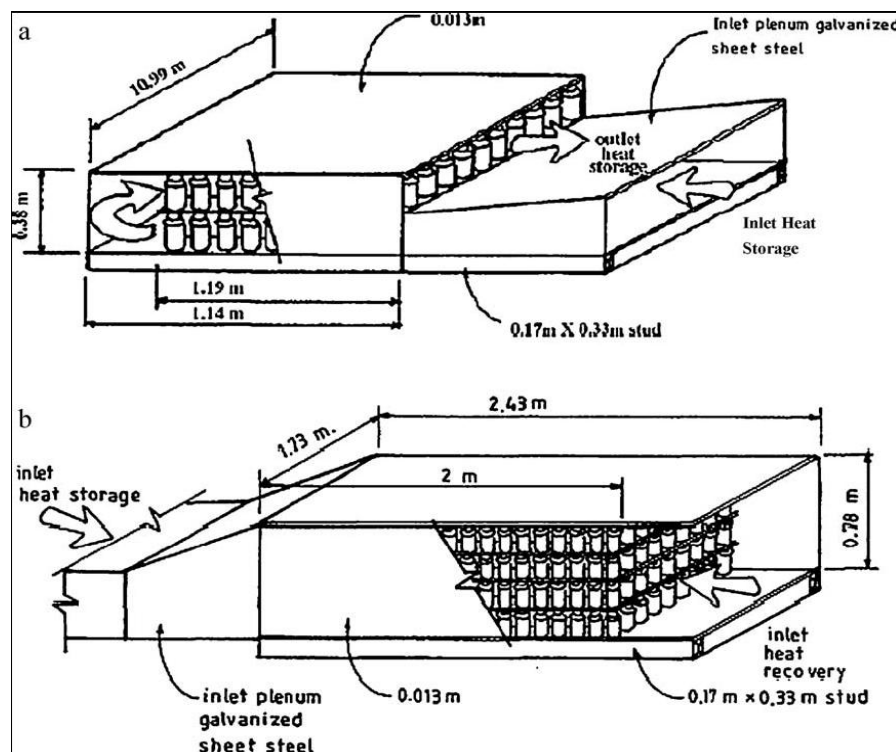
Σχήμα 4.8: Απεικονίσεις του πειραματικού εξοπλισμού ηλιακού θερμοκηπίου με PCM[14].

Ο θερμός αέρας που προέρχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες, διέρχεται από το PCM, προκειμένου να το λιώσει και να φορτίσει τη μονάδα. Αυτή η λανθάνουσα θερμότητα χρησιμοποιείται για να θερμάνει τον ατμοσφαιρικό αέρα πριν αυτός εισαχθεί στο θερμοκήπιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ηλιακοί συλλέκτες σε συνδυασμό με το PCM προκάλεσαν μία διαφορά θερμοκρασίας περίπου $6-9^{\circ}C$ μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου. Επίσης, το σύστημα λειτουργούσε πιο αποτελεσματικά σε μία ημέρα με υψηλές θερμοκρασίες της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι δεν είχε καλή απόδοση για τις κρύες ημέρες και για τις νυχτερινές ώρες. Σε αυτές τις ημέρες το θερμικό αυτό σύστημα μπορούσε να καλύπτει το 18-23% της ημερήσιας ανάγκης για ενέργεια του θερμοκηπίου για 3-4 ώρες, σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα χωρίς το PCM.

Οι Kern και Aldrich χρησιμοποίησαν το ίδιο PCM ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$) σε ποσότητα 1650kg ενσωματωμένη σε δοχεία από αεροζόλ, προκειμένου να ελεγχθεί η ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης εσωτερικά και εξωτερικά ενός θερμοκηπίου επιφάνειας $36m^2$. Όσο η εσωτερική μονάδα ενεργειακής

αποθήκευσης απορροφούσε την ενέργεια του θερμού αέρα από την κορυφή του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας, η κατεύθυνση της ροής του αέρα λάμβανε αντίστροφη τροχιά για την απελευθέρωση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ομοίως, και η εξωτερική μονάδα αποθήκευσης θερμότητας, η οποία περιλάμβανε και δύο ηλιακούς συλλέκτες, άλλαζε τη κατεύθυνση της ροής του αέρα κατά τη διάρκεια της αφαίρεσης της αποθηκευμένης θερμότητας.

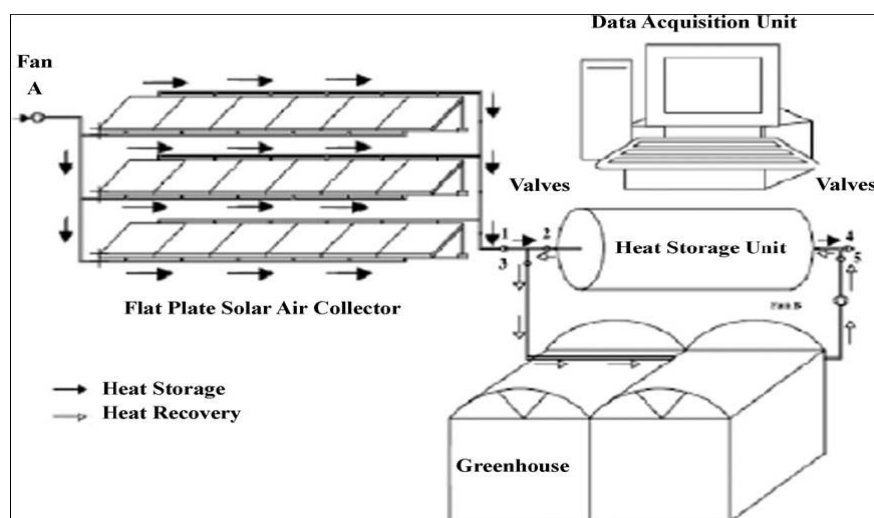
Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η αποθηκευόμενη ενέργεια στην εξωτερική μονάδα ήταν μεταξύ των τιμών 105,5 και 158,25MJ , ενώ η αποθηκευόμενη ενέργεια στην εσωτερική μονάδα ήταν μεταξύ των τιμών 21,1 και 31,65MJ. Επίσης, υπολογίστηκε ότι η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα διατηρήθηκε 2°C υψηλότερα από τις μέσες εξωτερικές συνθήκες, οι οποίες ήταν 8,5°C για τον Δεκέμβριο και 6,5°C για τον Ιανουάριο.



Σχήμα 4.9: Μονάδα θερμικής αποθήκευσης (α) εσωτερικά και (β) εξωτερικά του θερμοκηπίου[14].

Τέλος, ο Ozturk παρουσίασε ένα σύστημα εποχιακής αποθήκευσης ενέργειας, χρησιμοποιώντας κερί παραφίνης ως PCM, για τη θέρμανση ενός ηλιακού θερμοκηπίου επιφάνειας 180m². Το σύστημα περιλάμβανε πέντε ενότητες, δηλαδή επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, μονάδα λανθάνουσας

αποθήκευσης θερμότητας ενσωματωμένη σε μία δεξαμενή, πειραματικό θερμοκήπιο, μονάδα μεταφοράς θερμότητας και μονάδα λήψης δεδομένων.



Σχήμα 4.10: Πειραματική διάταξη της εφαρμογής του Ozturk[14].

Οι αναλύσεις της ενέργειας και της εξέργειας που πραγματοποιήθηκαν ώστε να διαπιστωθεί η αποδοτικότητα του συστήματος, έδειξαν 40,4% ενεργειακή απόδοση και 4,2% εξεργειακή απόδοση.

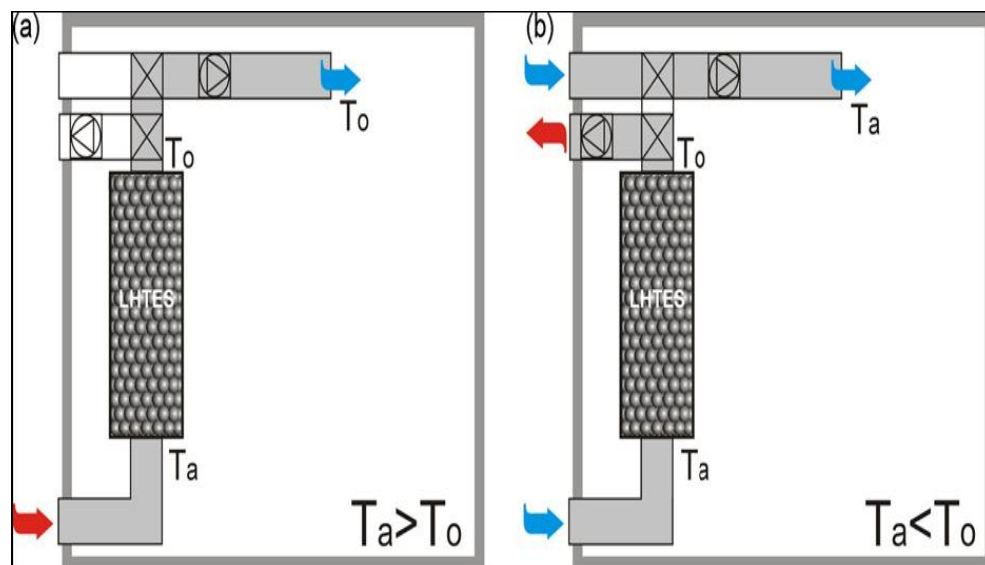
4.2 Συστήματα ψύξης με PCM

4.2.1 Free cooling

Η μέθοδος της ελεύθερης ψύξης (free cooling) σε συνδυασμό με τα PCM μπορεί να προσφέρει μεγάλες δυνατότητες για εξοικονόμηση ενέργειας. Από τη βιβλιογραφία free cooling ονομάζεται αυτή η ποσότητα της ψύξης, η οποία μπορεί να αποκτηθεί από υπάρχοντα, πρόσθετα ή τροποποιημένα εξαρτήματα κατά τη διάρκεια στην οποία επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες ατμοσφαιρικού αέρα, και η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει μερικώς ή ολικώς το μηχανικό φορτίο ψύξης[15].

Πρόκειται για μία εναλλακτική μέθοδο ψύξης και αερισμού του κτιρίου, η οποία συνδυάζει ενισχυμένη θερμική μάζα και νυχτερινό αερισμό. Η θερμική αδράνεια ενός κτιρίου προσαρμόζεται ενεργά από την ενσωμάτωση PCM στα δομικά στοιχεία του. Ο νυχτερινός ψυχρός αέρας χρησιμοποιείται για να ψύξει το εσωτερικό του κτιρίου και την αποθήκη με το PCM. Ο εξωτερικός αυτός αέρας

μπορεί να εισαχθεί στον εσωτερικό χώρο μέσω παραθύρων, ανεμιστήρων τοίχου ή συστήματος κεντρικής παροχής αέρα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, θερμός εσωτερικός αέρας κυκλοφορεί στη μονάδα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο σκοπός της χρήσης προϊόντων PCM είναι η μείωση της ενέργειας που απαιτείται για τη ψύξη ενός κτιρίου, στο οποίο υπάρχει πλεονάζουσα παραγωγή θερμότητας[16].



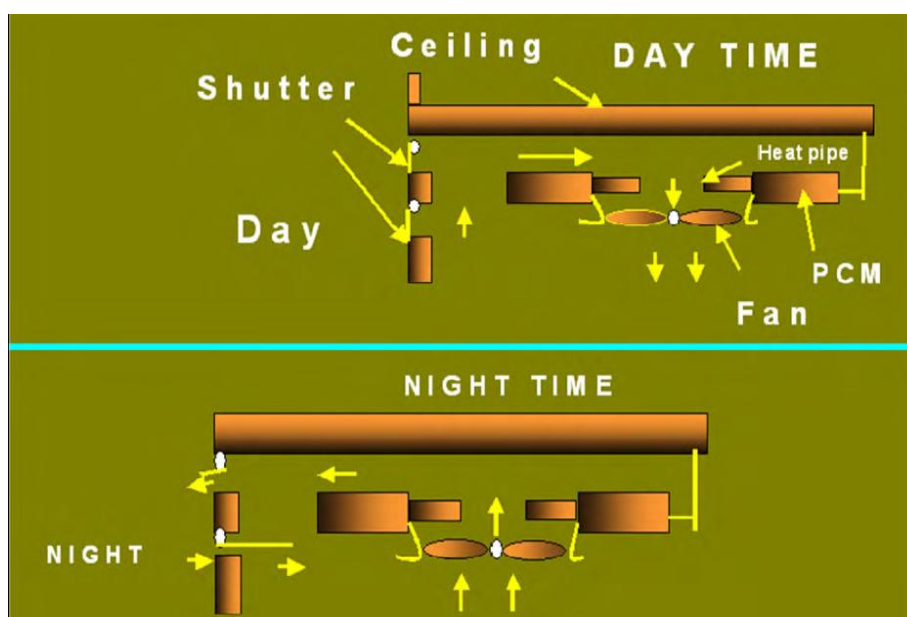
Σχήμα 4.11: Αρχή λειτουργίας συστήματος free cooling, (α) ημέρα, (β) νύχτα[18].

Τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνικής του free cooling είναι η απόδοση ψύξης με πολύ μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και εξαιρετική διατήρηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα. Από τη στιγμή που η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εσωτερικής θερμοκρασίας την ημέρα και της εξωτερικής θερμοκρασίας τη νύχτα είναι μικρή, η χρήση υλικών αλλαγής φάσης για τέτοια συστήματα είναι η πιο κατάλληλη. Τα συστήματα free cooling λειτουργούν καλύτερα σε χώρους στους οποίους το ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος είναι μεγαλύτερο από τους 15°C . Αν η θερμοκρασία τήξης του PCM είναι στο μέσο της διαφοράς των ακραίων θερμοκρασιών ενός χώρου, τότε ακριβώς η ίδια διαφορά είναι διαθέσιμη για τις διαδικασίες φόρτισης και αποφόρτισης[17].

Πρέπει να αναφερθεί ότι η τεχνική του free cooling δεν είναι πάντοτε δωρεάν. Σε μερικές περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται αντλίες νερού και ανεμιστήρες πύργων ψύξης, όταν ως μέσο λειτουργίας χρησιμοποιείται το νερό, ώστε να παρέχουν την απαραίτητη ένταση της κυκλοφορίας και επίσης χρησιμοποιούνται

ανεμιστήρες αερισμού ή σωλήνες απαγωγής θερμότητας, όταν ως μέσο λειτουργίας χρησιμοποιείται ο αέρας, ώστε να παρέχουν ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του αέρα και των αποθηκών PCM[15].

Στη βιβλιογραφία η πρώτη εφαρμογή που αναφέρεται είναι αυτή του Turnpenny και των συνεργατών του. Οι επιστήμονες αυτοί μελέτησαν ένα πρωτοποριακό σύστημα νυχτερινού αερισμού με μονάδα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας, η οποία χρησιμοποιεί αγωγούς θερμότητας ενσωματωμένους στο PCM[17,19].



Σχήμα 4.12: Το σύστημα που προτάθηκε από τον Turnpenny[17].

Ο αέρας από το δωμάτιο διέρχεται πάνω από τα εκτεθειμένα άκρα των αγωγών θερμότητας, χρησιμοποιώντας χαμηλής ισχύος ανεμιστήρες. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η θερμότητα μεταφέρεται στο PCM, προκαλώντας την τήξη του και μειώνοντας τη θερμοκρασία του δωματίου. Κατά τη διάρκεια της νύχτας και ενώ τα κλείστρα (παραθυρόφυλλα) είναι ανοιχτά, εξωτερικός ψυχρός αέρας διέρχεται πάνω από τους αγωγούς θερμότητας, ως εκ τούτου η θερμότητα εξάγεται από το ψυχόμενο τώρα PCM. Η καινοτομία σε αυτό το σύστημα είναι ότι οι αγωγοί θερμότητας είναι αντιστρεπτοί. Με αυτούς τους αγωγούς θερμότητας αποφεύγεται η ανάγκη για σύνθετες γεωμετρίες μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια του PCM που είναι εκτεθειμένη στον αέρα. Η σχηματική διάταξη του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα[17,19].

Τα πειράματα που διεξήχθησαν κάτω από τρεις διαφορετικές ροές αέρα που αναμένονται σε ένα δωμάτιο, είχαν ως αποτέλεσμα ένα ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από τον αέρα στο PCM της τάξεως των 40W σε ένα χρόνο τήξης 19 ωρών και ενώ η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και του PCM ήταν περίπου 5°C. Μία μεταγενέστερη βέλτισση του αρχικού συστήματος από τους ίδιους επιστήμονες χρησιμοποίησε έναν ανεμιστήρα οροφής τοποθετημένο ακριβώς πάνω από τους αγωγούς θερμότητας. Τη νύχτα ψυχρός αέρας, ο οποίος εισέρχεται στο εσωτερικό από τους ανώτερους αεραγωγούς, διέρχεται πάνω από τους αγωγούς θερμότητας με τη βοήθεια του ανεμιστήρα οροφής, του οποίου η κατεύθυνση ήταν προς τα κάτω. Αμέσως μετά ο θερμός αέρας εξέρχεται από τον αεραγωγό εξόδου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι αεραγωγοί παραμένουν κλειστοί και ο ανεμιστήρας οροφής, με την ίδια κατεύθυνση, ψύχει το δωμάτιο. Το αποτέλεσμα από το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας ήταν 200W, τιμή αρκετή για να καλύψει το θερινό φορτίο [17,19].

Το σύστημα ελεύθερης ψύξης που προτάθηκε από τους Arkar και Medved, περιλάμβανε μία μονάδα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας, η οποία ενσωματώθηκε στο μηχανικό σύστημα αερισμού ενός κτιρίου. Το χαμηλής ενέργειας κτίριο στο οποίο ενσωματώθηκε αυτή η μονάδα παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα [17,20].



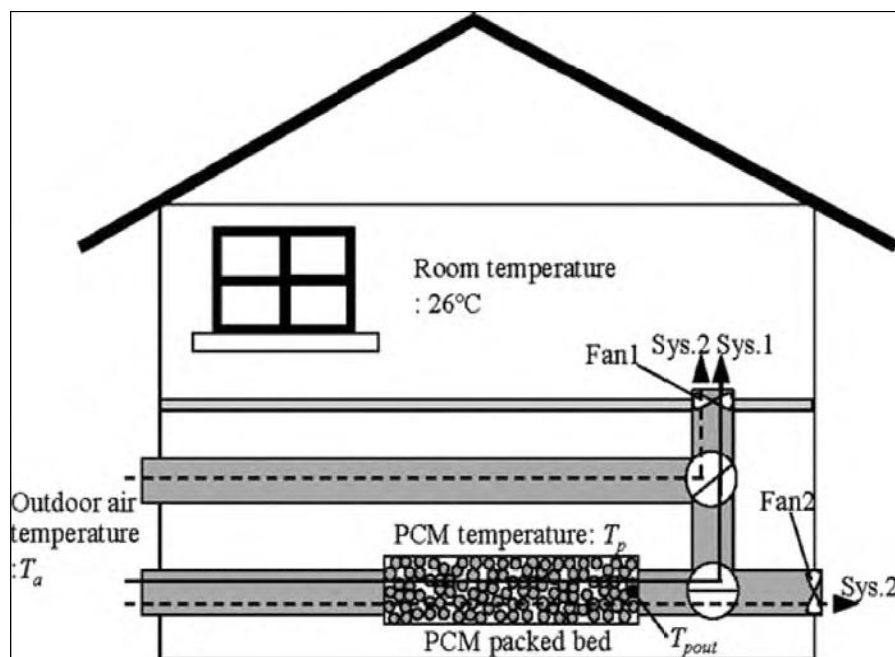
Σχήμα 4.13: Χαμηλής απαίτησης ενέργειας σπίτι με ενσωματωμένη μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας στη Σλοβενία [20].

Το συγκεκριμένο σπίτι έχει όλα τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ελαφρού βάρους κτιρίου, όπως καλή θερμική μόνωση, μηχανικό σύστημα αερισμού με

ανάκτηση θερμότητας, στοιχεία για φυσική θέρμανση του κτιρίου στη νότια πλευρά και σκίαστρα. Προκειμένου να διατηρηθεί η απλότητα και η ευκολία στην προσαρμογή, χρησιμοποιήθηκε μία κυλινδρική μονάδα αποθήκευσης, η οποία περιλάμβανε σφαίρες με ενσωματωμένες μικροκάψουλες PCM[17,20].

Μία από τις μετρήσεις τους ήταν η σύγκριση της ελεύθερης ψύξης με το νυχτερινό αερισμό. Από αυτή τη σύγκριση, η υπεροχή της ελεύθερης ψύξης με το PCM ήταν εμφανής. Μόνο με διασταυρώμενο νυχτερινό αερισμό με πέντε εναλλαγές αέρα την ώρα, ήταν δυνατό να επιτευχθεί η ίδια ψύξη, άρα και η ίδια θερμική αίσθηση στο εσωτερικό του κτιρίου, με αυτήν που επιτυγχάνεται με την ελεύθερη ψύξη με τη μονάδα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας. Επίσης, βρέθηκε ότι το σύστημα της ελεύθερης ψύξης με τη μονάδα λανθάνουσας αποθήκευσης με PCM, μπορεί να μειώσει το μέγεθος του συστήματος του μηχανικού αερισμού του κτιρίου[17,20].

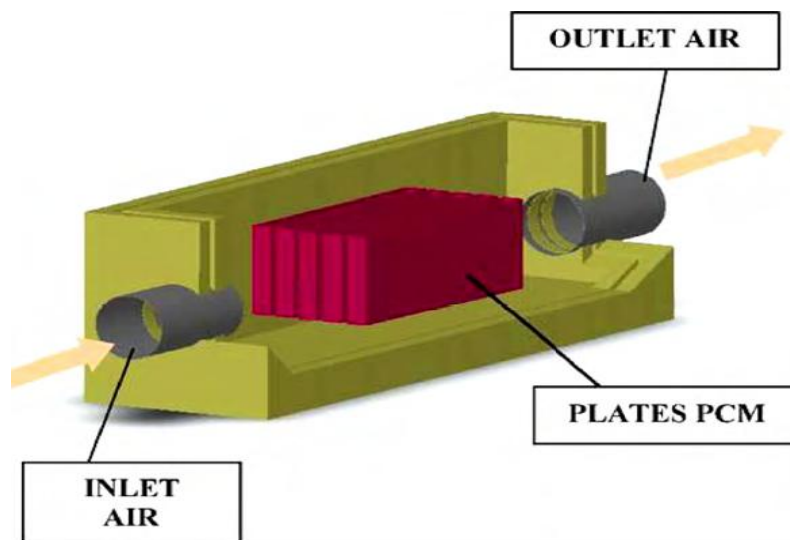
Μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή ήταν αυτή του Takeda και των συνεργατών του, οι οποίοι παρουσίασαν ένα βελτιωμένο σύστημα αερισμού, χρησιμοποιώντας αποθήκευση θερμικής ενέργειας με κόκκους υλικού αλλαγής φάσης. Το πειραματικό σύστημα που ελέγχθηκε, το οποίο δίνεται παρακάτω, εξασφάλιζε άμεση επαφή του εξαερισμού με τους κόκκους που περιείχαν υλικό αλλαγής φάσης. Οι συσκευασμένοι κόκκοι PCM ήταν ενσωματωμένοι σε έναν αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Η ενσωμάτωση ``packed bed`` έχει υψηλό δυναμικό όσον αφορά τη σταθεροποίηση των διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα. Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα ελεγχόταν όταν η θερμοκρασία εισόδου του αέρα είχε περιοδική μεταβολή, ώστε να γίνει προσομοίωση των αλλαγών της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα. Τα γενικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία εξόδου του αέρα σταθεροποιήθηκε και διατηρήθηκε μέσα στο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης[17,21].



Σχήμα 4.14: Σύστημα free cooling, όπως προτάθηκε από τον Takeda[16].

Η δυναμική ενός τέτοιου συστήματος ώστε να μειωθεί το φορτίο εξαερισμού κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου ελέγχθηκε για οκτώ πόλεις της Ιαπωνίας, με υπολογιστική προσομοίωση. Το μεγαλύτερο όφελος βρέθηκε να είναι στο Κιότο με μείωση του φορτίου εξαερισμού κατά 62,8%. Σε άλλες πόλεις, όπως το Τόκιο, οι οποίες είχαν χαμηλότερες μέσες θερμοκρασίες, η μείωση ήταν της τάξεως του 42,8%. Διαπιστώθηκε ότι το όφελος εξαρτάται περισσότερο από το εύρος στο οποίο κινούνται οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, παρά από τη μέση θερμοκρασία. Τέλος, μείωση υπήρχε και στο φορτίο ψύξης, το οποίο διαχωρίζεται σαφώς από το φορτίο εξαερισμού, με τη χρήση ενός τέτοιου συστήματος[17,21].

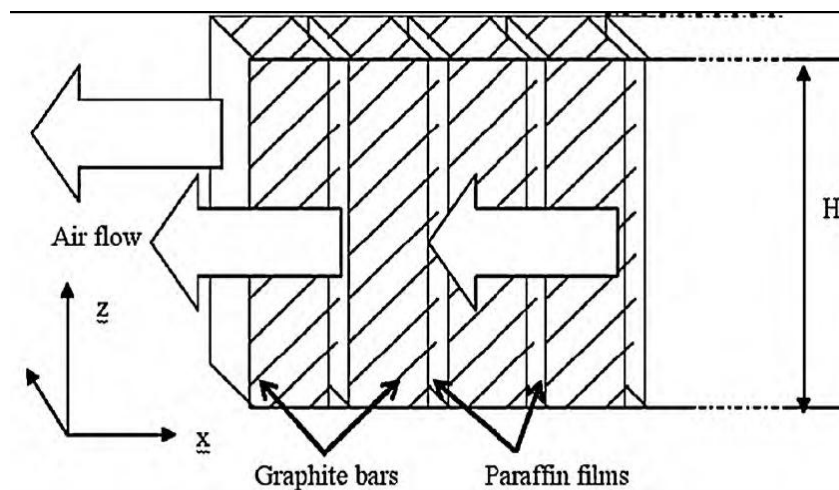
Ο Zalba ασχολήθηκε σε πολλές μελέτες του με τη σωστή εφαρμογή του free cooling. Στις μελέτες του Zalba επισημάνθηκαν και οι παράγοντες που κύριως επιδρούν στην απόδοση ενός συστήματος free cooling. Αρχικά κατέληξε στο βέλτιστο σχήμα του δοχείου στο οποίο γίνεται η ενθυλάκωση των PCM, το οποίο είναι η ενσωμάτωση σε κάψουλες σε επίπεδη πλάκα. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μορφής είναι ότι είναι δυνατόν να επιτευχθεί μεγαλύτερη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου του αποθηκευόμενου υλικού αλλαγής φάσης, με μικρό πάχος του PCM, ώστε να μειωθεί ο χρόνος στερεοποίησης. Επίσης, διαπίστωσε ότι αυτά τα δοχεία έχουν χαμηλότερο βάρος και όγκο, προκαλούν μικρότερη πτώση πίεσης του αέρα, ενώ παρέχουν και ευκολία στη κατασκευή της μονάδας αποθήκευσης[17,22].



Σχήμα 4.15: Πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε ο Zalba[16].

Η παραπάνω πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε, τον βοήθησε να ορίσει και τους υπόλοιπους παράγοντες που επιδρούν στη διαδικασία του free cooling. Διαπίστωσε, λοιπόν, ότι ο χρόνος στερεοποίησης του PCM είναι μικρότερος, στοιχείο που είναι επιθυμητό για την καλύτερη απόδοση του συστήματος, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και του σημείου τήξης του PCM είναι υψηλότερη και όταν ο ρυθμός κυκλοφορίας του αέρα είναι μεγαλύτερος. Τέλος, η ανάλυση για τη βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος free cooling έδειξε ότι δεν είναι μόνο τεχνικά απλό, αλλά και οικονομικά επωφελές για τα υπάρχοντα συστήματα ψύξης[17,22].

Η βελτίωση του παραπάνω συστήματος πραγματοποιήθηκε από τον Marin. Η προσπάθειά του επικεντρώθηκε κυρίως στην αντιμετώπιση της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας της παραφίνης, την οποία ήδη είχε χρησιμοποιήσει ο Zalba στην προηγούμενη εφαρμογή. Η τεχνική της χρήσης ενός συνθετικού από γραφίτη είχε τα πλεονεκτήματα ότι η ανισοτροπία του γραφίτη επιτρέπει να επικεντρώνεται η μεταφορά θερμότητας στο σημείο ενδιαφέροντος, δεν καταλαμβάνεται επιπλέον χώρος, άρα η ενεργειακή πυκνότητα του PCM παραμένει πολύ υψηλή, δεν υπάρχουν προβλήματα διάβρωσης και τέλος τέτοιου είδους συνθετικά είναι εμπορικά διαθέσιμα. Η απεικόνιση αυτών των σύνθετων πλακών δίνεται παρακάτω[17,23].



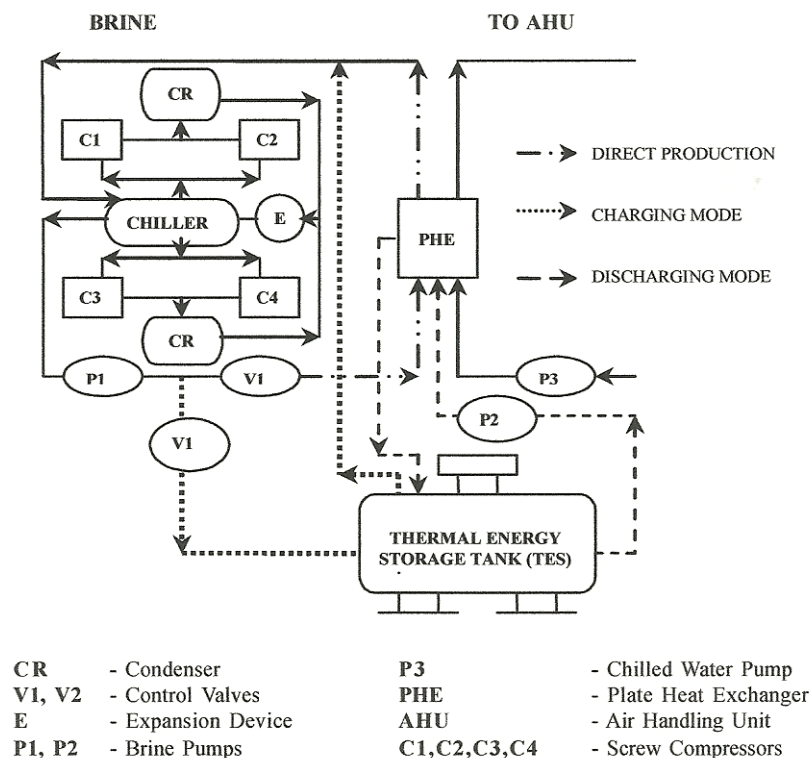
Σχήμα 4.16: Διάταξη του PCM και του γραφίτη, όπως προτάθηκε από τον Marin[16].

Πραγματοποιήθηκε πλήθος ελεγχών και της απλής διάταξης μόνο με την παραφίνη και της σύνθετης διάταξης με την παραφίνη και το γραφίτη. Είναι δεδομένο ότι η παραφίνη αποδείχτηκε επαρκής για την εξοικονόμηση ενέργειας για το θερμοκρασιακό εύρος που μελετήθηκε στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Αλλά η δεύτερη επιλογή με το συνδυασμό παραφίνης-γραφίτη είχε κάποια εμφανή πλεονεκτήματα. Διαπιστώθηκε ότι για τον ίδιο χρόνο απόκρισης του PCM, το πάχος των PCM μπορούσε να είναι 70% μεγαλύτερο, στοιχείο που σημαίνει μειωμένο κόστος, ενώ η κατανάλωση ισχύος από τους ανεμιστήρες μειώθηκε κατά 50%. Όταν μελετήθηκε ίδιο πάχος πλακών, ο χρόνος απόκρισης μειώθηκε κατά 50% και μάλιστα με πολύ μικρή μείωση της αποθηκευόμενης ενέργειας (περίπου 12-20%[17,23]).

4.2.2 PCM σε συστήματα κλιματισμού[9,15]

Έχει ήδη γίνει κατανοητή η δυναμική της χρήσης των PCM σε συστήματα θέρμανσης, αερισμού και κλιματισμού (Heating Ventilating Air-Conditioning systems). Μετά από την τεχνική της ελεύθερης φύξης, γίνεται μία αναφορά για τη χρήση των PCM στα ήδη υπάρχοντα συστήματα κλιματισμού με κύριο σκοπό την μετατόπιση των αιχμών φορτίου. Εδώ, αναφέρονται οι γενικές εφαρμογές ενσωμάτωσης, αφού οι περισσότερες από αυτές που υπάρχουν στη βιβλιογραφία αφορούν ενσωμάτωση σε δομικά στοιχεία των κτιρίων, οπότε παρατίθενται σε επόμενο κεφάλαιο.

Ο Velraj και οι συνεργάτες του, παρουσίασαν μία ολοκληρωμένη μελέτη σχετικά με μία μονάδα αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας βασισμένη στα PCM (Cool Thermal Energy Storage-CTES), ενσωματωμένη σε ένα σύστημα κλιματισμού στο Tidel Park στην Ινδία. Το Tidel Park είναι ένα συγκρότημα γραφείων λογισμικού, το οποίο είναι το μεγαλύτερο στη νότια Ασία και το τρίτο μεγαλύτερο στον κόσμο.

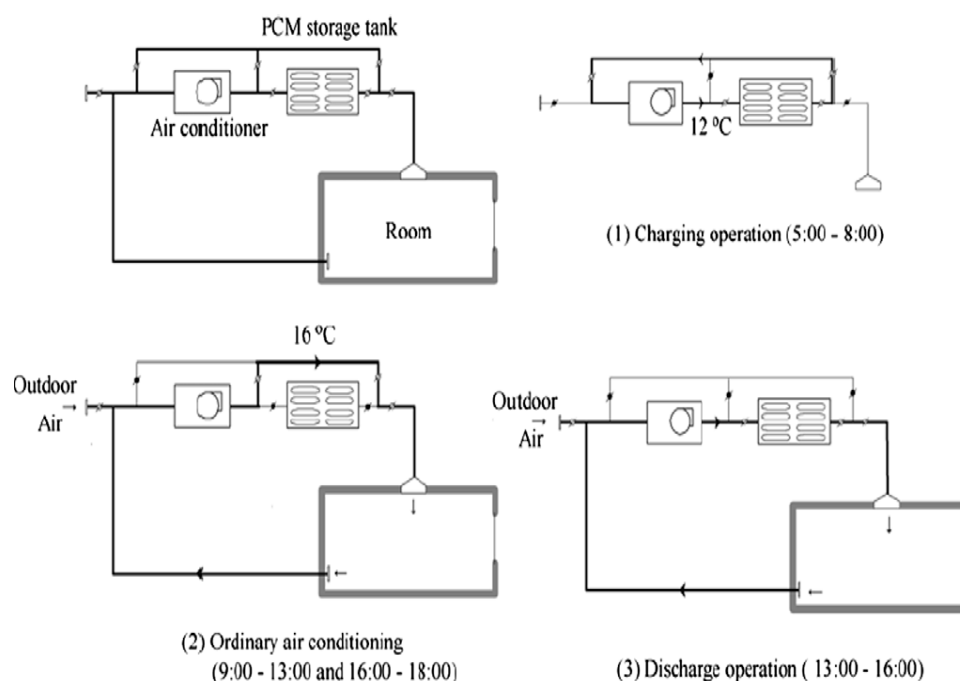


Σχήμα 4.17: Διάταξη του συστήματος κλιματισμού, όπως προτάθηκε από τον Velraj[9].

Αυτή η μελέτη πραγματοποιήθηκε στην υπάρχουσα αποθήκευση ψύξης βασισμένη στα PCM, η οποία είναι 302,4MJ-24000TRH, ενσωματωμένη σε ένα σύστημα ψυκτών 10500kW. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος CTES παρέχεται από τέσσερις δεξαμενές αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας, η κάθε μία χωρητικότητας 6000TRH, οι οποίες είναι συνδεδεμένες παράλληλα με τρεις επίπεδους εναλλάκτες θερμότητας. Ο επίπεδος εναλλάκτης δέχεται το υγρό που μεταφέρει ψυκτική ενέργεια από το συνδυασμό του συστήματος των ψυκτών-CTES και στη συνέχεια μεταφέρει αυτήν την ενέργεια στο ψυχόμενο νερό, το οποίο με τη σειρά του μεταφέρει την ενέργεια στον αέρα στη μονάδα χειρισμού αέρα (Air Handling Unit-AHU).

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι καταρχήν ότι η αιχμή ζήτησης ψυκτικού φορτίου μπορεί να μειωθεί. Στην προκειμένη περίπτωση η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των 240000TRH μείωσε την απαίτηση εγκατάστασης αερόψυκτου συστήματος κλιματισμού συμπίεσης ατμών από τα 6000TR σε 3000TR. Αυτό σημαίνει μείωση στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά 4000kVA, άρα και μείωση στο κόστος λειτουργίας της συγκεκριμένης μονάδας. Επίσης, μπορεί να αξιοποιηθεί η διαφορά στην κοστολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με την ώρα. Η απόδοση του συστήματος είναι υψηλή όταν λειτουργεί κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι χαμηλή. Το σύστημα CTES μπορεί να φορτιστεί κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, ενώ η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επιπλέον, είναι δυνατή η λειτουργία κάτω από συνθήκες πλήρους φορτίου, άρα η αποδοτικότητα μπορεί να είναι μέγιστη.

Ένα σύστημα παροχής αέρα με PCM σε αγωγούς αέρα προτάθηκε από τους Yamaha και Misaki για εξομάλυνση των αιχμών φορτίου.



Σχήμα 4.18: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος HVAC (heating ventilating air-conditioning), όπως προτάθηκε από τους Yamaha και Misaki [15].

Όπως φαίνεται και από το σχήμα που δίνεται παραπάνω, κατά τη διαδικασία της φόρτισης ο αέρας κυλούσε μέσα από το κλειστό δίκτυο της δεξαμενής με το

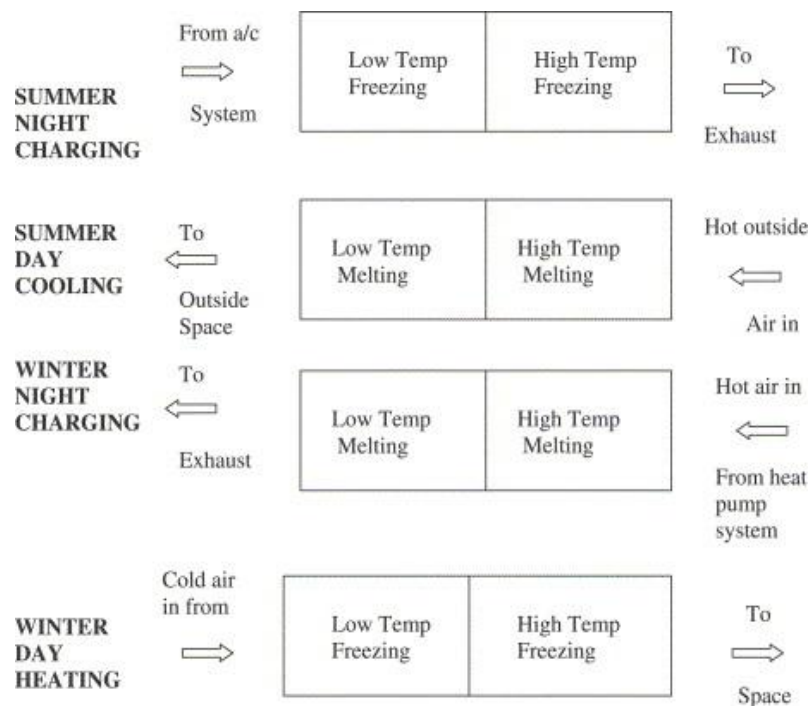
PCM και του κλιματιστικού μηχανήματος ταυτόχρονα. Μετά τη διαδικασία της φόρτισης, ήταν σειρά της κυρίως κλιματιστικής λειτουργίας, κατά τη διάρκεια της οποίας ο αέρας θεωρήθηκε ότι παρακάμπτεται τη δεξαμενή με το PCM. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποφόρτισης, ο αέρας κυλούσε μέσα από τη δεξαμενή με το PCM προς το κλιματιζόμενο χώρο.

Η μελέτη προσομοίωσης, η οποία βασίστηκε σε έναν όροφο ενός κτιρίου γραφείων στην Ιαπωνία, απέδειξε ότι η χρήση 400kg PCM για μία επιφάνεια 73,8m², ήταν ικανή για να διατηρήσει σταθερή εσωτερική θερμοκρασία χωρίς τη χρήση καμμίας άλλης βοηθητικής πηγής παροχής ψύξης σε μία ζεστή καλοκαιρινή ημέρα. Η κατάλληλη θερμοκρασία τήξης του συστήματος ήταν 19°C.

4.3 PCM σε συνδυασμένα συστήματα θέρμανσης και ψύξης[9]

Το Κέντρο Ανανεώσιμης Ενέργειας (ΚΑΕ) του Πανεπιστημίου της Νότιας Αυστραλίας πραγματοποίησε μία μελέτη με PCM στα μέσα του 1990, για την ανάπτυξη μίας μονάδας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για θέρμανση και για ψύξη. Το σύστημα για νυχτερινή φόρτιση και χρήση του φορτίου την ημέρα και στις δύο περιόδους της ανάγκης θέρμανσης και της ανάγκης ψύξης, περιλάμβανε δύο διαφορετικά PCM ενσωματωμένα σε ένα σύστημα αντλιών θερμότητας αντίστροφου ψυκτικού κύκλου, το οποίο χρησιμοποιούσε ισχύ εκτός των περιόδων αιχμής. Όταν ο αέρας κυκλοφορεί στο σύστημα υφίσταται μία διαδικασία θέρμανσης ή ψύξης δύο σταδίων. Αρχικά διέρχεται μέσα από το ένα PCM και στη συνέχεια μέσα από το άλλο.

Το σημείο τήξης-στερεοποίησης του πρώτου PCM είναι κάτω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης, ενώ το σημείο τήξης-στερεοποίησης του δεύτερου υλικού είναι πάνω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης. Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η ροή του αέρα καθορίζεται ώστε το σύστημα να αποθηκεύει θερμότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας (μέσα από τη διαδικασία τήξης και των δύο υλικών) και να απελευθερώνει τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας (μέσω της στερεοποίησης) σε μία θερμοκρασία πάνω από τις συνθήκες θερμικής άνεσης. Κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, η κατεύθυνση του αέρα αντιστρέφεται και το σύστημα αποθηκεύει ψυκτική ενέργεια κατά τη διάρκεια της νύχτας και απελευθερώνει αυτόν τον ψυχρό αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας σε μία θερμοκρασία κάτω από τις συνθήκες θερμικής άνεσης.



Σχήμα 4.19: Αναπαράσταση των διαδικασιών φόρτισης και αποφόρτισης στις περιόδους θέρμανσης και ψύξης[9].

Τα αποτελέσματα της χρήσης αυτού του συστήματος, με τα δύο διαφορετικά PCM, έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί μείωση της απαιτούμενης χωρητικότητας και του αρχικού κόστους του συστήματος κλιματισμού για ένα κατοικήσιμο σπίτι. Επίσης, αυτό το σύστημα μπορεί να μετατοπίσει μία ποσότητα των φορτίων θέρμανσης και ψύξης σε περιόδους εκτός των αιχμών των φορτίων, όπου το κόστος της ηλεκτρικής ισχύος είναι μειωμένο. Οι υπολογισμοί για ένα τυπικό σπίτι στην Αδελαΐδα, έδειξαν ότι το σύστημα αποθήκευσης που αποτελείται από 100kg ενός PCM με σημείο τήξης τους 29°C και από 80kg ενός PCM με σημείο τήξης τους 18°C, μείωσε το ονομαστικό βαθμό απαιτούμενου κλιματισμού έως και 50% του συνολικού φορτίου. Επίσης, το ετήσιο κόστος ηλεκτρισμού μειώθηκε για 32%, εξαιτίας της μετατόπισης των φορτίων σε περιόδους μειωμένου τιμολογίου.

Βιβλιογραφία 4^{ου} Κεφαλαίου

- [1] Anant Shukla, D.Buddhi, R.L.Sawhney, Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium: A review
- [2] G.N.Tiwari, S.N.Rai, Sant Ram, Madan Singh, Performance prediction of PCM collection-cum-storage water heater:quasi-steady state solution
- [3] Y.Rabin, I.Bar-Niv, E.Korin, B.Mikic, Integrated solar collector storage system based on a salt-hydrate phase-change material
- [4] Suat Canbazoğlu, Abdulmuttalip Şahinaslan, Ahmet Ekmekyapar, Ý.Gökhan Aksoy, Fatih Akarsu, Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water-heating system
- [5] J. Prakash, H.P.Garg, G.Datta, A solar water heater with a built-in latent heat storage
- [6] S.O.Enibe, Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage
- [7] W.Saman, F.Bruno, E.Halawa, Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system
- [8] M.Belusko, W.Saman, F.Bruno, Roof integrated solar heating system with glazed collector
- [9] A.Pasupathy, R.Velraj, R.V.Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments
- [10] Atyah Najjar, Afif Hasan, Modeling of greenhouse with PCM energy storage
- [11] Atul Sharma, V.V.Tyagi, C.R.Chen, D.Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
- [12] B.K.Huang, M.Toksoy, Design and analysis of greenhouse solar systems in agricultural production
- [13] Hüseyin Benli, Aydın Durmus, Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating
- [14] Mahmud M. Alkilani, K. Sopian, M.A. Alghoul, M. Sohif, M.H. Ruslan, Review of solar air collectors with thermal storage units

- [15] Na Zhu, Zhenjun Ma, Shengwei Wang, Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials:A review
- [16] Uros Stritih, Domen Resnik, Vincenc Butala, Energy conservation opportunities of PCM free cooling system
- [17] V.Antony Aroul Raj, R.Velraj, Review on free cooling of buildings using phase change materials
- [18] Saso Medved, Ciril Arkar, Correlation between the local climate and the free-cooling potential of latent heat storage
- [19] J.R.Turnpenny, D.W.Etheridge, D.A.Reay, Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings.: Part I: testing and theoretical modelling
- [20] C.Arkcar, S.Medved, Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system
- [21] S.Takeda, K.Nagano, T.Mochida, K.Shimakura, Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material
- [22] Belen Zalba, Jose M.Marin, Luisa F.Cabeza, Harald Mehling, Free-cooling of buildings with phase change materials
- [23] Jose M.Marin, Belen Zalba, Luisa F.Cabeza, Harald Mehling, Improvement of a thermal energy storage using plates with paraffin–graphite composite

Κεφάλαιο 5^ο: Ενσωμάτωση PCM σε οικοδομικά στοιχεία

5.1 Ιστορική αναδρομή και ερευνητική δραστηριότητα[1]

Οι εφαρμογές που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο δείχνουν ότι έχει γίνει εκτενής μελέτη για την παραγωγή και την εκμετάλλευση διαφόρων συστημάτων που περιέχουν PCM. Ωστόσο η χρήση των συστημάτων αυτών σε κτιριακές εφαρμογές, αν και όπως θα γίνει κατανοητό είναι αρκετά αποτελεσματική, δεν έχει γνωρίσει ακόμα ευρεία εμπορική εφαρμογή.

Έχουν υπάρξει αρκετές προσπάθειες όσον αφορά την ενσωμάτωση PCM σε κτίρια, με τις πρώτες να χρονολογούνται περίπου το 1920, ενώ τα πρώτα πρότυπα σπίτια κατασκευάστηκαν στα τέλη του 1940 και στα τέλη του 1970. Τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν αξιολογήθηκαν ως επιτυχή, αν και δεν υπήρξε καμία ανάπτυξη μετά από τα πρώτα αυτά δείγματα, εξαιτίας της έλλειψης χρηματοδότησης και αξιοπιστίας.

Τα παρακάτω παραδείγματα δίνονται ώστε να γίνει γνωστή η ιστορία της χρήσης PCM στα κτίρια, πριν από τη σημερινή ανάπτυξη.

5.1.1 Πρώτες εφαρμογές επιστημόνων σε ηλιακά σπίτια[1]

Μετά από την πρώτη προσπάθεια που έγινε το 1939 με το Solar One House από το Πανεπιστήμιο του MIT στις ΗΠΑ, το οποίο ήταν ένα πειραματικό σπίτι που χρησιμοποιούσε εποχιακή θερμική αποθήκευση για θέρμανση όλο το χρόνο, η επόμενη εφαρμογή ήταν το 1946 από την Δρ. Maria Telkes, η οποία απέδειξε το υπάρχον δυναμικό των PCM, ώστε να χρησιμοποιηθούν στη θέρμανση κτιρίων.

Το προτεινόμενο δοκιμαστικό σπίτι, το οποίο ονομάστηκε The Dover House, κατασκευάστηκε σε μία θέση στο Dover Mass, πέντε χιλιόμετρα από τη Βοστώνη, στις ΗΠΑ. Η τοποθεσία επιλέχθηκε από την Telkes, διότι οι ώρες ανατολής κατά τη διάρκεια του χρόνου ήταν κάτω από το μέσο όρο της περιοχής, στοιχείο που υποσχόταν τη μέγιστη εκμετάλλευση του ηλιακού συστήματος. Το σπίτι περιλάμβανε έναν όροφο, δύο υπνοδωμάτια, πέντε δωμάτια επιφάνειας 135m². Η

θερμική ακτινοβολία συλλεγόταν μέσω 18 ηλιακών συλλεκτών, οι οποίοι περιλάμβαναν λεπτές γαλβανισμένες πλάκες απορρόφησης, χρώματος μαύρου, διατεταγμένες πίσω από διπλά πάνελ με τζάμια. Η θερμότητα που παρήγαγαν αυτά τα πάνελ περνούσε κατά μήκος ενός αγωγού μέσω ενός ανεμιστήρα σε τρία δοχεία αποθήκευσης θερμότητας, τα οποία είχαν τοποθετηθεί σε κάθε πλευρά των δωματίων.

Τα δοχεία αποθήκευσης ήταν γεμισμένα με άλας του Glauber, με σημείο τήξης τους 32°C. Με συνολικά 21 τόνους PCM, το σύστημα είχε δυναμικό για θερμική αποθήκευση περίπου 4700000 Btu (11 MJ). Η κατασκευή του σπιτιού τελείωσε το 1948, με κόστος 20000 δολάρια, εκ των οποίων τα 3000 δολάρια ήταν για την ηλιακή συσκευή θέρμανσης.

Το σύστημα αυτό τα πρώτα δύο χρόνια αποδείχθηκε επιτυχημένο, ακόμα και για περιόδους με συνεχόμενες περίπου 7 νεφοσκεπείς ημέρες. Το σύστημα λειτουργούσε ικανοποιητικά, παρέχοντας ένα άνετο εσωτερικό περιβάλλον περίπου στους 21°C, μην έχοντας ανάγκη από βοηθητικό σύστημα θέρμανσης. Μετά τα δύο χρόνια, όμως, υπήρξε πρόβλημα με τη μείωση της αποθηκευτικής ικανότητας του άλατος Glauber εξαιτίας του διαχωρισμού του σε διάλυμα και άνυδρο άλας, αλλά και λόγω της διάβρωσης των δοχείων αποθήκευσης της θερμότητας.

Ένα παρόμοιο σπίτι σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε αργότερα, με τη χρήση παρόμοιων αρχών λειτουργίας, όπως και στο σπίτι της Dr. Maria Telkes. Το σπίτι κατασκευάστηκε από τον Lawrence Gardshire το 1953 στο Νέο Μεξικό, ενώ περιλάμβανε δύο ορόφους των 102 m², με τα τζάμια απορρόφησης να έχουν τοποθετηθεί στην οροφή της κατασκευής. Αντίθετα με το σχέδιο της Telkes, η οποία τοποθέτησε τα δοχεία αποθήκευσης θερμότητας στο επίπεδο του ισογείου και ανάμεσα στα δωμάτια, στο σχέδιο του Gardshire τα μεταλλικά κουτιά αποθήκευσης χωρητικότητας πέντε γαλονιών εγκαταστάθηκαν στη στέγη του σπιτιού. Η μόνη διαφορά στη διαδικασία παραγωγής των δοχείων με PCM ήταν η προσθήκη βόρακος (διφθοριούχου νατρίου) στο άλας του Glauber, ώστε να δράσει ως πυρηνιοποιητής.

Μία μεταγενέστερη εφαρμογή ήταν των Dr. J.W. Hodgins και Dr. T.W. Hoffman στο Κολλέγιο Βασιλικού Στρατού στον Καναδά, ώστε να κατασκευαστεί ένα ηλιακό σπίτι χρησιμοποιώντας την τεχνολογία αποθήκευσης θερμότητας με PCM. Η Telkes κλήθηκε να σχεδιάσει τη μονάδα αποθήκευσης

θερμότητας λόγω της προηγούμενης εμπειρίας της. Το σπίτι ολοκληρώθηκε το 1959 και περιλάμβανε επιφάνεια 111m^2 , χωρισμένη σε δύο ορόφους. Είχε γίνει από την Telkes ενσωμάτωση δώδεκα τόνων πυρηνοποιημένων αλάτων Glauber, με χρήση πυρηνικού νατρίου ως παράγοντα πάχυνσης και με χρώμιο ως παράγοντα αποφυγής διαβρωτικών φαινομένων. Όμοια με την προηγούμενη εφαρμογή, το PCM είχε ενσωματωθεί σε μεταλλικά κουτιά διαμέτρου 100mm και ύψους 600mm, τοποθετημένων κάθετα στους τοίχους.

5.1.2 Ερευνητική δραστηριότητα ως προς την καταλληλότητα των υλικών αλλαγής φάσης[1]

Από την προηγούμενη έρευνα και τις δοκιμαστικές εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο των υλικών αλλαγής φάσης, το Πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνια αξιολόγησε την ανάγκη για ένα καινούριο πρόγραμμα μελετών ώστε να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν. Το 1971 πραγματοποιήθηκε αυτό το πρόγραμμα από τρεις επιστήμονες, τους S.Freedman, M.Telkes και M.Altman, με χρηματοδότηση από τον Εθνικό Επιστημονικό Οργανισμό στις ΗΠΑ.

Σκοπός της έρευνας ήταν να ανακαλυφθεί ένας αριθμός οργανικών και μη-οργανικών PCM κατάλληλων για εφαρμογές ψύξης και θέρμανσης και επίσης να αξιολογηθεί το κόστος των PCM, το συνολικό κόστος της εγκατάστασης και η ικανότητα θερμικής αποθήκευσης των χρησιμοποιούμενων PCM. Το γενικό συμπέρασμα της έρευνας ήταν ότι το $K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$ (ένα μη-οργανικό PCM) και κάποια συγκεκριμένα κεριά παραφίνης (οργανικά PCM) ήταν αποτελεσματικά για εφαρμογή ψύξης χώρου, ενώ τα δύο περισσότερο υποσχόμενα PCM για θέρμανση χώρου ήταν το $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ και το $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$.

5.1.3 Κρατική έρευνα ανά τον κόσμο για τη χρησιμότητα των PCM[1]

Εξαιτίας του Αραβο-Ισραηλικού πολέμου το 1973 και του επακόλουθου Αραβικού αποκλεισμού πετρελαίου, πολλοί κυβερνητικοί οργανισμοί πραγματοποίησαν πλήθος ερευνών σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ειδικά στην ηλιακή ενέργεια και στους τρόπους συλλογής, αποθήκευσης και ανάκτησής της. Κάτι τέτοιο κρίθηκε αναγκαίο αφού έγινε κατανοητό ότι η απρόσκοπτη παροχή

πετρελαίου δεν ήταν εξασφαλισμένη λόγω πολιτικών γεγονότων και λόγω της μείωσης των διαθέσιμων πηγών πετρελαίου.

Τα προγράμματα μελέτης διεξήχθησαν κυρίως στο Ηνωμένο Βασίλειο, στις ΗΠΑ, στη Γερμανία και στη Γαλλία. Έκτοτε, η ανάπτυξη συστημάτων θερμικής αποθήκευσης έγινε υψίστης σημασίας σε όλες τις μελέτες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

5.1.3.1 ΗΠΑ[1]

Μετά το 1973 οι ΗΠΑ διεξήγαγαν το πρώτο πρόγραμμα μελέτης μεγάλης κλίμακας, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το Εθνικό Επιστημονικό Οργανισμό. Το πρόγραμμα περιλάμβανε 20000 πειράματα με PCM. Από αυτά τα 20000 PCM μόνο το 1% κρίθηκε ότι έχει ένα δυναμικό για χρήση σε κτιριακές εφαρμογές. Σε αυτό το 1% περιλαμβάνονταν κάποια ένυδρα άλατα συνεχούς τήξης και κάποια κοινά οργανικά υλικά.

Όσον αφορά τα επιλεγμένα ένυδρα άλατα η Dr. Maria Telkes προσπάθησε να μελετήσει τα προβλήματα που παρουσίασε σε προηγούμενες εφαρμογές το άλας του Glauber, δηλαδή το διαχωρισμό των συστατικών του κατά την τήξη και τη μείωση της θερμοχωρητικότητάς του μετά από μία σειρά θερμικών κύκλων. Τα πειράματα που πραγματοποίησε η Telkes απέδειξαν τη σπουδαιότητα κάποιων γελών ως παράγοντες πάχυνσης, ώστε να επιμηκυνθεί η διάρκεια ζωής του PCM. Δυστυχώς, η μείωση της θερμοχωρητικότητας συνέχισε να απασχολεί μετά από 1000 περίπου θερμικούς κύκλους. Ανάλογες μελέτες που πραγματοποίησε ο Dr. S.B. Marks στο Πανεπιστήμιο του Ντελάγουεαρ, ο οποίος χρησιμοποίησε έναν ειδικό πηλό ως γέλη, είχαν ως αποτέλεσμα αυξημένη αντοχή σε θερμικούς κύκλους, αλλά ακόμα ήταν εμφανής η μείωση στην αποθηκευόμενη λανθάνουσα θερμότητα. Ο ίδιος επιστήμονας μετά από επίμονη έρευνα, πρότεινε ένα πολυμερές του πολυκαρβοξυλικού οξέος ως παράγοντα που μπορεί να αυξήσει την αποθηκευτική ικανότητα του PCM, ακόμα και μετά από μακρά χρήση.

Μία αρκετά αποτελεσματική εναλλακτική λύση προτάθηκε από την εταιρεία Boardman Energy systems στις ΗΠΑ. Η εταιρεία αυτή χρησιμοποίησε ένα μείγμα PCM, το οποίο αποτελείται από άλας του Glauber και κοινό τσιμέντο από το Πόρτλαντ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα αυτό είναι χημικά σταθερό και έχει ένα δυναμικό πολύ υψηλό για χρήση ως σύστημα αποθήκευσης θερμότητας

σε κτιριακές εφαρμογές, αφού παρατηρήθηκαν πάνω από 2000 θερμικοί κύκλοι χωρίς καθόλου μείωση στη θερμική αποθήκευση.

Περαιτέρω ανάλυση για χρήση φθηνών ένυδρων αλάτων ως PCM πραγματοποιήθηκε από το Πανεπιστήμιο του Ντελάγουερ στις ΗΠΑ. Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης κατασκευάστηκε ένα ακόμα σπίτι πλήρους μεγέθους, το οποίο ονομάστηκε και αυτό Solar One House και πραγματοποιήθηκαν ανάλογα πειράματα.

Όσον αφορά τα επιλεγμένα οργανικά υλικά, το κερί παραφίνης είναι αυτό το οποίο αποδείχθηκε ως το πιο χρήσιμο για κτιριακές εφαρμογές λόγω του χαμηλού κόστους και της μεγάλης διαθεσιμότητας. Για παράδειγμα ο Dr.J.Bailey από το Πανεπιστήμιο της Βόρειας Καρολίνας μελέτησε θερμοσυσσωρευτές με πλέγμα αλουμινίου σε σχήμα κερήθρας, οι οποίοι περιλάμβαναν ένα κερί παραφίνης, συγκεκριμένα το εικοσάνιο με σημείο τήξης περίπου στους 36°C. Επίσης, ο Dr.T.R.Galloway χρησιμοποίησε το κερί παραφίνης σε τρεις διαφορετικές εφαρμογές. Αυτές ήταν η χρήση μίας ακαθόριστης μάζας PCM σε δεξαμενή με πλαστικά πτερυγία συναλλαγής θερμότητας, ατσάλινα δοχεία γεμάτα με PCM σε δεξαμενή με νερό και μεγάλοι δίσκοι με ενσωματωμένο σε μικροκάψουλες κερί παραφίνης σε δεξαμενή με νερό.

5.1.3.2 Ευρώπη[1]

Πολλές χώρες της Ευρώπης ασχοληθήκαν με τη χρήση των PCM και μάλιστα αρκετά νωρίς.

Στη Γερμανία ασχολήθηκαν πολύ με τη δημιουργία γραφημάτων και πινάκων για τις θερμικές και φυσικές ιδιότητες των PCM, για τα κατάλληλα υλικά για χρήση σε κατασκευές και για τις μονωτικές ιδιότητες αυτών. Η εφαρμογή που είναι άξια αναφοράς είναι αυτή μίας εταιρείας στη Δυτική Γερμανία, η οποία πραγματοποίησε έρευνα σε ένα ηλιακό σπίτι για να εξακριβώσει τη διαφορετική συμπεριφορά διαφόρων PCM. Αρχικά, το σπίτι θερμαινόταν από μία αντλία θερμότητας, χρησιμοποιώντας νερό ως αποθηκευτικό μέσο. Οι επιστήμονες αποφάσισαν να αντικαταστήσουν το νερό πρώτα με πάγο και μετά με παραφίνη (με σημείο τήξης μεταξύ 18 και 25°C) κατά τη διάρκεια τριών περιόδων θέρμανσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παραφίνη έχει το μεγαλύτερο δυναμικό και επίσης ότι έχει την ικανότητα να αυξήσει το συντελεστή συμπεριφοράς COP

της αντλίας θερμότητας από 2,6 σε 3,3. Επίσης, η παραφίνη απαιτούσε το μισό όγκο σε σχέση με αυτόν του νερού, οδηγώντας έτσι σε μείωση του κόστους της εφαρμογής.

Στη 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.

Στη Γαλλία 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. Τα συστήματά τους χρησιμοποιούσαν ένα PCM, το οποίο αποτελείται από $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ αναμειγμένο 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.

Στο Ηνωμένο Βασίλειο διεξήχθη εκτεταμένη έρευνα για τη χρήση των PCM. Η πιο σημαντική εφαρμογή ήταν των A.K.R.Bromley, E.M.McKay και J.P.Wilkins, οι οποίοι ασχολήθηκαν με τα συστήματα αποθήκευσης πάγου και γενικότερα με συστήματα λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης για θερμικές εφαρμογές.

5.1.3.3 Ιαπωνία[1]

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 Takahashi 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.

5.2 Αρχές λειτουργίας της εγκατάστασης PCM σε κτίρια[2,3]

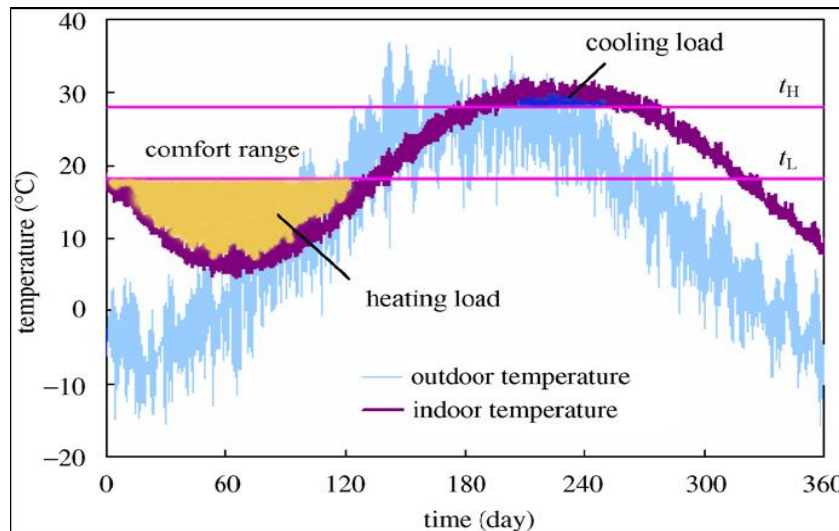
5.2.1 PCM ενσωματωμένα στο φάκελο του κτιρίου

5.2.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα ενός κτιρίου. Αυτοί περιλαμβάνουν τις κλιματικές συνθήκες (εξωτερική θερμοκρασία, ταχύτητα και προσανατολισμός του αέρα, ηλιακή ακτινοβολία), τη δομή του κτιρίου και τις θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών του κτιρίου (πάχος του τοίχου, λόγος της επιφάνειας του παραθύρου προς την επιφάνεια του τοίχου, θερμική αγωγιμότητα και ειδική θερμότητα του υλικού του τοίχου), τις εσωτερικές πηγές θερμότητας, το ρυθμό των εναλλαγών αέρα την ώρα (ACH) και τυχόν βοηθητικές εγκαταστάσεις θέρμανσης ή ψύξης. Το παρακάτω διάγραμμα αποδεικνύει ότι η διαφορά μεταξύ της εσωτερικής θερμοκρασίας και του εύρους θερμικής άνεσης είναι αυτή που καθορίζει το φορτίο θέρμανσης και ψύξης, όταν δεν υπάρχει καθόλου θέρμανση ή ψύξη του χώρου. Άρα, το φορτίο θέρμανσης και ψύξης μειώνεται όταν μειώνεται αυτή η διαφορά θερμοκρασίας.

Για ένα κτίριο του οποίου η τοποθεσία είναι γνωστή, οι παράμετροι της δομής του κτιρίου είναι γνωστοί. Η εξωτερική θερμοκρασία (t_{out}) και η ηλιακή ενέργεια ($q_{r, out}$) μεταβάλλονται ανάλογα με την ώρα και την ημέρα κατά τη διάρκεια ενός έτους, αλλά μπορούν να υπολογιστούν από κατάλληλες εξισώσεις που δίνονται σε κάποια υπολογιστικά πακέτα. Αν, λοιπόν, οριστεί μία συγκεκριμένη εσωτερική πηγή θερμότητας, τότε τα μεγέθη της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου χωρίς καμμία ενεργή ψύξη ή θέρμανση (t_{in}), της

θερμικής αγωγιμότητας (k) και του γινομένου της ειδικής θερμότητας επί τη πυκνότητα (ρc_p), εξαρτώνται το ένα από το άλλο. Είναι προφανές, επίσης, ότι τα τρία αυτά μεγέθη εξαρτώνται και από το ACH.



Σχήμα 5.1: Η εσωτερική και η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα και το φορτίο θέρμανσης και ψύξης[2].

Έχουν οριστεί για ευκολία δύο παράμετροι, ώστε να περιγράψουν τις επιδράσεις των διαφορετικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών στο βαθμό της εσωτερικής θερμικής άνεσης. Αυτές οι παράμετροι είναι:

$$I_{sum} = \int_{year} (t_{in} - t_H) d\tau \quad \text{όταν } t_{in} > t_H \quad (5.1)$$

$$I_{win} = \int_{year} (t_L - t_{in}) d\tau \quad \text{όταν } t_{in} < t_L \quad (5.2)$$

Οι δύο παράμετροι περιγράφουν το επίπεδο θερμικής δυσφορίας που επικρατεί σε ένα κτίριο το χειμώνα και το καλοκαίρι. Αν υπάρξουν συγκεκριμένα δομικά υλικά, των οποίων τα μεγέθη k και ρc_p , θα είναι τέτοια ώστε να προκύψει η συνθήκη $I_{win} = I_{sum} \approx 0$, τότε αυτά τα υλικά θεωρούνται τα ιδανικά δομικά υλικά. Συνήθως, απαιτείται πολύ υψηλή τιμή για το γινόμενο ρc_p , γεγονός που είναι αρκετά δύσκολο για τα συμβατικά δομικά υλικά. Τα PCMs, όμως, παρέχουν υψηλά επίπεδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε προκαθορισμένο θερμοκρασιακό εύρος, ως εκ τούτου υπολογίζονται να έχουν ένα υψηλό δυναμικό για πρακτικές κτιριακές εφαρμογές.

5.2.1.2 Μη γραμμικές ιδιότητες ενός τοίχου με PCM

Οι Asan και Sancaktar μελέτησαν την επίδραση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων ενός κοινού τοίχου στη ``χρονική καθυστέρηση ϕ `` και στον ``παράγοντα μείωσης f ``. Οι δύο αυτοί παράγοντες περιγράφουν την αλλαγή στο μήκος κύματος και στο πλάτος των κυμάτων θερμότητας, τα οποία μεταδίδονται από την εξωτερική προς στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου. Έγινε έλεγχος για το συνδυασμό των επιδράσεων της θερμοχωρητικότητας και της θερμικής αγωγιμότητας στους παράγοντες ϕ και f , για διαφορετικά δομικά υλικά.

Για τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε τοίχους και έχουν σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες, η μεταβολή της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου είναι παρόμοια με αυτήν της εξωτερικής θερμοκρασίας με γραμμικές ιδιότητες. Επομένως, η συναλλαγή θερμότητας και οι συνθήκες των ορίων είναι γραμμικές εξισώσεις. Αντίθετα, για τα PCM η μεταβολή της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου παρουσιάζει μη-γραμμικά χαρακτηριστικά. Η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου με το PCM εξαρτάται από τις μεταβολές της θερμότητας τήξης (H_m) και της θερμοκρασίας τήξης (t_m). Έχει, όμως, διαπιστωθεί ότι με σωστό συνδυασμό των δύο αυτών μεγεθών, μπορεί να διατηρηθεί η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου σε μία συγκεκριμένη επιθυμητή τιμή, συνήθως κοντά στο σημείο τήξης, για κάποιο χρονικό διάστημα, το οποίο ονομάζεται ``καθυστέρηση του PCM``. Αυτό συνηγορείται από το γεγονός ότι οι εξισώσεις μετάδοσης θερμότητας είναι μη γραμμικές, αφού η θερμοχωρητικότητα του PCM μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Για ένα συγκεκριμένο κτίριο και με σαφώς ορισμένες κλιματικές συνθήκες, η ``καθυστέρηση του PCM`` επηρεάζεται από τις θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM που χρησιμοποιείται στον τοίχο. Αν η ``καθυστέρηση του PCM`` είναι αρκετή σε χρόνο και με κατάλληλη θερμοκρασία τήξης, τότε η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας μπορεί να διατηρηθεί στο επίπεδο θερμικής άνεσης.

5.2.2 PCM και θερμοφυσικές ιδιότητες

5.2.2.1 Θερμότητα και θερμοκρασία τήξης

Είναι γνωστό ότι προκειμένου να διατηρηθεί η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα στο επίπεδο θερμικής άνεσης για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς

φορτίο ψύξης ή θέρμανσης, η θερμότητα της τήξης H_m πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να κρατήσει την εσωτερική επιφάνεια του τοίχου στη θερμοκρασία τήξης για μία ολόκληρη ημέρα ή για έναν ολόκληρο χρόνο. Ένα άλλο πολύ βασικό κριτήριο για την επιλογή του PCM, όπως έχει ήδη αναλυθεί, είναι η θερμοκρασία τήξης του t_m , η οποία θα πρέπει να κυμαίνεται στο θερμοκρασιακό εύρος θερμικής άνεσης. Για ένα δοσμένο κτίριο και για δοσμένες κλιματικές συνθήκες, αν η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ υψηλή τότε η ποσότητα της θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία που αποθηκεύεται στο PCM θα είναι πολύ χαμηλή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αν, αντίθετα, η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ χαμηλή τότε είναι δύσκολο να διατηρηθεί η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα σε ένα άνετο επίπεδο κατά τη διάρκεια της νύχτας.

5.2.2.2 Υποψήφια PCM

Δίνονται στον παρακάτω πίνακα διάφορα PCM, τα οποία έχουν διαπιστωθεί ως τα πιο κατάλληλα για κτιριακές εφαρμογές. Τα περισσότερα από αυτά έχουν σημεία τήξης από 18 έως 28°C, δηλαδή μέσα στο εύρος της ανθρώπινης θερμικής άνεσης.

PCM	Transition point/range (°C)	Heat of fusion (Kj/kg)
Hexadecane	18	236
Heptadecane	22	214
Octadecane	28	244
Black paraffin	25-30	150
Emerest2325(butyl stearate+butyl palmitate 49/48)	17-21	138-140
Butyl stearate	19	140
1-dodecanol	26	200
Capric-lauric 45/55	21	143
Capric-myristic 73.5/26.5	21.4	152
Capric-palmitate 75.2/24.8	22.1	153
Propyl palmitate	19	186
RT25	25	147

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των PCM, είτε είναι οργανικά είτε ανόργανα, έχουν ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Άρα ανάλογα με την εφαρμογή θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή.

Όμως, αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι ειδικά για τις κτιριακές εφαρμογές αξιολογούνται ως πολύ κατάλληλα τα ``PCM σταθερής μορφής`` ή ``PCM σταθεροποιημένου σχήματος``, τα οποία έχουν και αυτά αναφερθεί στο σχετικό κεφάλαιο. Αυτά τα PCM χρησιμοποιούνται στο ``φάκελο`` του κτιρίου εξαιτίας της καλής τους θερμικής συμπεριφοράς για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα και εξαιτίας της σταθερής τους δομής κατά τη διάρκεια της τήξης και της στερεοποίησης, στοιχεία που τα διαχωρίζουν αρκετά από τα κλασσικά οργανικά υλικά. Επίσης, τέτοιου είδους υλικά μπορούν πολύ εύκολα να συνδυαστούν με συμβατικά δομικά υλικά.

5.2.2.3 Μακρόχρονη σταθερότητα και αναφλεξιμότητα

Στις ιδιότητες που πρέπει να έχει ένα PCM, αλλά και στα προβλήματα που πολύ συχνά προκύπτουν από αυτά τα υλικά, έχει ήδη γίνει αναφορά. Εδώ, απλώς τονίζονται κάποιες από τις μελέτες που έχουν γίνει, και οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικά παρακάτω, σχετικά με τη ζητούμενη σταθερότητα και την αποφυγή της αναφλεξιμότητας, στοιχεία που θεωρούνται πιο σημαντικά για τις εφαρμογές των PCM στα οικοδομικά στοιχεία.

Όπως έχει αναφερθεί από τον Zalba και τους συνεργάτες του, η φτωχή σταθερότητα των ανόργανων PCM περιλαμβάνει δύο στοιχεία: χαμηλή σταθερότητα των ιδιοτήτων του υλικού μετά από επαναμβανόμενους θερμικούς κύκλους και διαβρωτικότητα ανάμεσα στο PCM και στο δοχείο που το περιβάλλει. Τα μείγματα των οργανικών PCM έχει διαπιστωθεί ότι παρουσιάζουν τέλεια θερμική σταθερότητα. Οι δοκιμές για τυχόν διάβρωση επικεντρώθηκαν κυρίως στα ένυδρα άλατα. Η Cabeza διεξήγαγε ένα μακράς διάρκειας τεστ διαβρωτικότητας σε ζευγάρια μετάλλου-PCM στο θερμοκρασιακό εύρος 24-29°C. Το PCM ήταν ένα εμπορικό προϊόν που περιείχε και έναν πυρηνοποιητή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το αλουμίνιο και ο χάλυβας δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με αυτά τα PCM, ενώ ο ορείχαλκος, ο χαλκός και ο ανοξειδωτός χάλυβας δεν έχουν δείξει κανένα πρόβλημα συνεργασίας.

Μελέτες, όμως, έχουν γίνει και για την αναφλεξιμότητα των οργανικών PCM. Οι Salyer και Sircar έχουν παρουσιάσει μία ανάλυση σχετικά με τη συμπεριφορά αυτών των υλικών σε πυρκαγιά και έχουν καταλήξει σε κάποια πιθανά οργανικά πρόσθετα, τα οποία μειώνουν την αναφλεξιμότητα των υλικών. Ο Banu και οι συνεργάτες του πραγματοποίησαν τεστ αναφλεξιμότητας σε γυψοσανίδες με εμποτισμένο περίπου 24% οργανικό PCM. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η γυψοσανίδα αποθήκευσης θερμότητας δεν πληρεί όλες τις προϋποθέσεις σχετικά με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά αναφλεξιμότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται στα κτίρια, αλλά αυτή η συμπεριφορά μπορεί να βελτιωθεί με ένα κατάλληλο επιβραδυντικό μέσο κατά της ανάφλεξης. Επίσης, οι Koschenz και Lehmann ανέπτυξαν ένα θερμικά ενεργό πάνελ οροφής, ενσωματώνοντας σε αυτό παραφίνη. Κατέλειξαν ότι η ενσωμάτωση σε μικροκάψουλες του PCM ή ο εγκλεισμός του σε φύλλα χάλυβα, εξασφαλίζουν ένα συγκεκριμένο επίπεδο προστασίας και αντίστασης σε ανάφλεξη.

5.3 Ανάπτυξη των PCM για θέρμανση και ψύξη στα κτίρια

Η ανάπτυξη των PCM στα κτίρια έχει δύο διαφορετικούς σκοπούς. Ο πρώτος από αυτούς είναι η χρήση φυσικών θερμών και ψυχρών πηγών, οι οποίες είναι η ηλιακή ενέργεια για τη θέρμανση και η νυχτερινή δροσιά για τη ψύξη, ενώ ο δεύτερος σκοπός είναι η χρήση ανθρωπογενών θερμών και ψυχρών πηγών ενέργειας. Το γεγονός ότι η αποθήκευση θερμότητας είναι πολύ αποτελεσματική προκειμένου να συνδυαστούν η προσφορά και η ζήτηση, έχει ήδη αναλυθεί. Σε αυτήν την παράγραφο αναλύονται οι τρόποι χρήσης των PCM στα κτίρια[4].

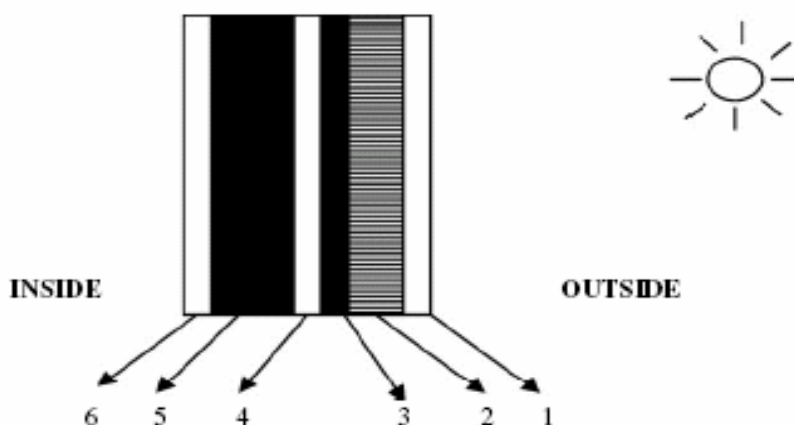
5.3.1 Ηλιακός τοίχος αποθήκευσης θερμότητας για αερισμό κτιρίων[4]

Ένας ηλιακός τοίχος με PCM δεν διαφέρει στον τρόπο λειτουργίας και στα βασικά πλεονεκτήματα, όπως αυτά περιγράφηκαν στο 1^ο Κεφάλαιο. 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.

Ο ηλιακός τοίχος αποτελείται από έξι βασικά μέρη, όπως φαίνεται και από την απεικόνιση που ακολουθεί.



Σχήμα 5.2: Στοιχεία ενός ηλιακού τοίχου με PCM[4].

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.

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.

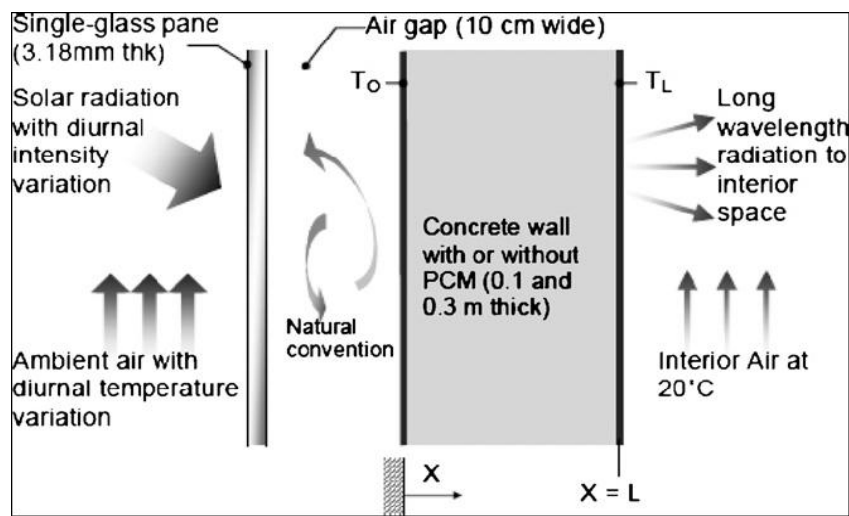
5.3.2 Τοίχος Trombe με PCM[5,6]

Τα PCM έχουν προταθεί προκειμένου να αντικαταστήσουν τη λιθοδομή σε έναν τοίχο Trombe, ο οποίος έχει ήδη αναφερθεί στα παθητικά συστήματα. Οι παραδοσιακοί τοίχοι Trombe βασίζονται στην αισθητή αποθήκευση ενέργειας, αλλά λόγω της επιθυμητής αυξημένης αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα μάζας, ο τοίχος Trombe με PCM είναι μία περίπτωση με αρκετό ενδιαφέρον.

Ένας τοίχος Trombe γεμάτος με PCM κατασκευάζεται πίσω από το παράθυρο της νότιας πλευράς ενός σπιτιού. Ο τοίχος θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, προκαλώντας την τήξη του PCM. Τη νύχτα η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται, ώστε να θερμανθεί το σπίτι. Για μία δοσμένη ποσότητα αποθήκευσης ενέργειας, οι μονάδες με PCM απαιτούν λιγότερο χώρο από τους τοίχους που είναι γεμάτοι με νερό ή από τους τοίχους της αυξημένης θερμικής μάζας, ενώ είναι και πιο ελαφροί σε βάρος. Επομένως, είναι αρκετά βολικοί τέτοιου είδους τοίχοι ως εκ των υστέρων εξοπλισμός σε διάφορες εφαρμογές ανακαίνισης των κτιρίων. Τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα PCM στους τοίχους Trombe είναι τα ένυδρα άλατα και οι υδρογονάνθρακες. Έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία διάφορα πειραματικά και θεωρητικά τεστ, τα οποία έχουν σκοπό να αναλύσουν την αξιοπιστία των PCM στους τοίχους Trombe.

Μία γενική εφαρμογή προκειμένου να ελεγχθεί η δυναμική ενός τοίχου Trombe με PCM είναι αυτή που δίνεται σχηματικά παρακάτω. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε είχε σκοπό να εκτιμήσει τη μεταβολή της θερμοκρασίας ενός συμβατικού τοίχου από τσιμέντο με πάχος 30cm και 10cm. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από έναν όμοιο κατασκευαστικά τοίχο, ο

οποίος όμως περιείχε 20% κατά βάρος ένα PCM που ανήκε στο είδος των παραφινών, το οποίο είχε ομοιογενώς αναμειχθεί με το τσιμέντο.



Σχήμα 5.3: Σχηματική αποτύπωση ενός τοίχου Trombe με PCM[6].

Οι Swet, Ghoneim και Sharma χρησιμοποίησαν στις μελέτες τους αντί για κερι παραφίνης, το δεκαένυδρο θειικό νάτριο (με σημείο τήξης τους 32°C) ως PCM για ενσωμάτωση σε νοτίου προσανατολισμού τοίχου Trombe. Τα αποτελέσματα των ερευνών τους έδειξαν ότι ένας τοίχος Trombe μικρού πάχους είναι πιο αποτελεσματικός από έναν συμβατικό τοίχο για την παροχή της επιθυμητής θερμικής αποθήκευσης. Μία άλλη επιτυχής εφαρμογή ήταν αυτή του Knowler, ο οποίος προκειμένου να αυξήσει τη θερμική αγωγιμότητα και την αποτελεσματικότητα ενός τοίχου Trombe με PCM, χρησιμοποίησε το CG κερι παραφίνης με μεταλλικά πρόσθετα.

Οι Farouk και Gucerι μελέτησαν τη χρησιμότητα των τοίχων Trombe με PCM σε ένα κτίριο για νυχτερινή θέρμανση του σπιτιού, στους οποίους το PCM ήταν ένα μείγμα από άλας του Glauber και από το κερι παραφίνης SUNOCO P-116. Σε αυτή τη μελέτη παρατηρήθηκε ότι αν ο τοίχος Trombe με PCM είναι σωστά κατασκευασμένος, μπορεί να μειώσει κάποια από τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά των παραδοσιακών τοίχων Trombe και μάλιστα με ανταγωνιστικά αποτελέσματα όσον αφορά την αποθήκευση και την απόδοση της ενέργειας.

5.3.3 Ξηρός τοίχος αλλαγής φάσης εμποτισμένος με PCM[4,7]

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.

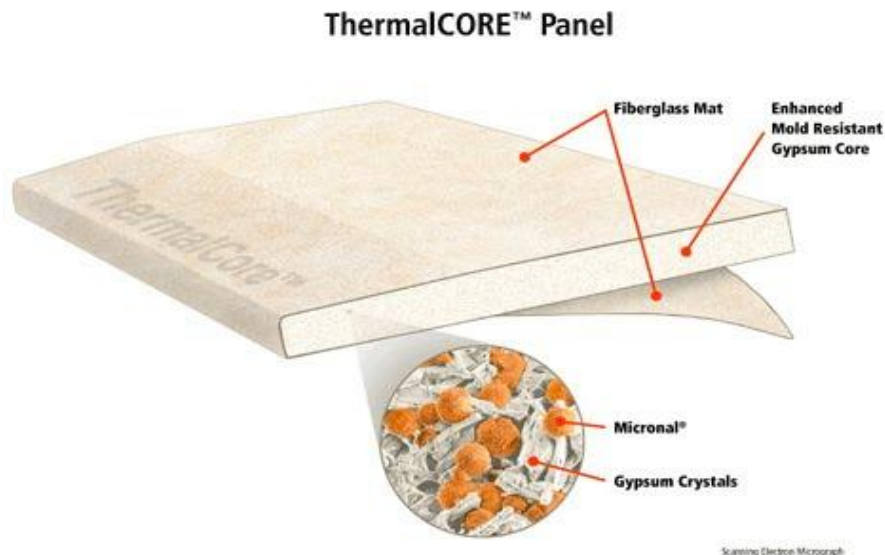
Λόγω αυτών των προβλημάτων υπήρχε η ανάγκη να βρεθεί άλλος τρόπος ενσωμάτωσης των PCM στους κτιριακούς ``φακέλους``. Σε αυτήν την παράγραφο αναλύονται οι τεχνικές παραγωγής, η θερμική συμπεριφορά και οι εφαρμογές της γυψοσανίδας και των μπλοκ τσιμέντου που είναι εμποτισμένα με PCM, ως τρόποι ενσωμάτωσης. 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.

5.3.3.1 Γυψοσανίδες με PCM[4,5,7]

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

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.



Σχήμα 5.4: Γυψοσανίδα με PCM κατασκευασμένη από την Knauff[8].

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.

Ο Peirro 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

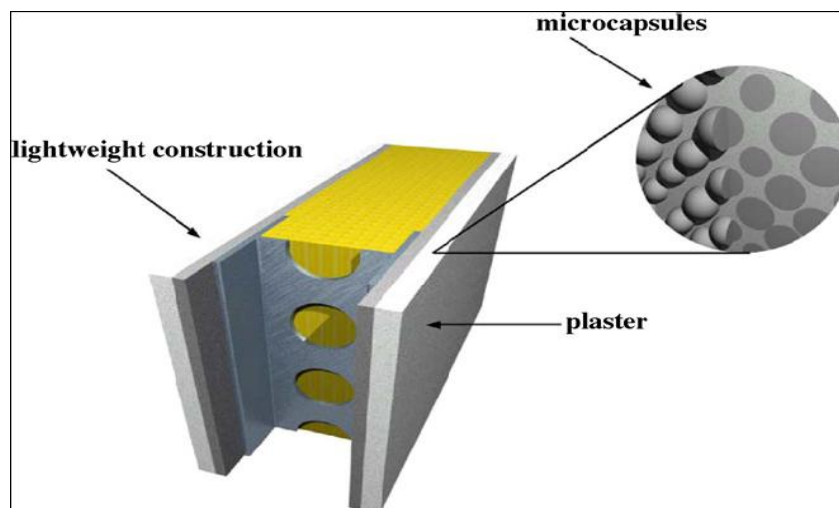
εύρος θερμοκρασιών. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από άλλες εφαρμογές, όπως αυτή του Neeper, ο οποίος χρησιμοποίησε λιπαρά οξέα και κεριά παραφίνης σε γυψοσανίδες, τις οποίες και εξέθεσε στην ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του δωματίου, αλλά όχι σε άμεση έκθεση στον ήλιο.

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.

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, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.5: Κατασκευή ενός ελαφρού βάρους τοίχου[6].

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. Ο πίνακας που ακολουθεί δείχνει τα θερμικά χαρακτηριστικά κάποιων από τους πιο ενδιαφέροντες συνδυασμούς γύψου και PCM.

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

PCM			Average latent heat of impregnated gypsum (J/g)
Nature	Melting point (°C)	Freezing point (°C)	
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

Σχήμα 5.6: Θερμικά χαρακτηριστικά διαφόρων συνδυασμών γύψου-PCM[7].

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.

5.3.3.2 Μπλοκ τσιμέντου με PCM[4,5,7]

Ένα μπλοκ τσιμέντου με PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε κατασκευή ενός κτιρίου, προσφέροντας μεγάλη θερμική αδράνεια χωρίς να περιλαμβάνει μεγάλη μάζα. Πολλές σημαντικές εφαρμογές έχουν πραγματοποιηθεί και για αυτήν την περίπτωση, μερικές από τις οποίες αναλύονται παρακάτω.

Ο Lee και οι συνεργάτες του μελέτησαν τα αποτελέσματα των τεστ μακροκλίμακας, στα οποία σύγκριναν τη συμπεριφορά σε θερμική αποθήκευση των συμβατικών μπλοκ τσιμέντου με αυτά στα οποία είχε γίνει ενσωμάτωση δύο ειδών PCM, του στεατικού βουτυλίου (BS) και της εμπορικής παραφίνης. Η ενσωμάτωση για να είναι επιτυχής έγινε με βύθιση των μπλοκ τσιμέντου, τα οποία είχαν ήδη θερμανθεί, σε μία δεξαμενή με το λιωμένο PCM, μέχρις ότου απορροφηθεί η απαιτούμενη ποσότητα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μπλοκ τσιμέντου ήταν ικανά να αποθηκεύσουν τη λανθάνουσα και την αισθητή θερμότητα του ενσωματωμένου PCM, αλλά και την αισθητή θερμότητα του τσιμέντου.

Ο Hadjievna και οι συνεργάτες του ανέλυσαν την ικανότητα θερμικής αποθήκευσης και τη δομική σταθερότητα σε συνθήκες επαναλαμβανόμενων θερμικών κύκλων ενός σύνθετου συστήματος τσιμέντου με PCM, το οποίο περιλάμβανε πενταένυδρο θειικό νάτριο απορροφημένο από πορώδεις τσιμέντο. Συμπέραναν ότι η μεγάλη επιφάνεια απορρόφησης του κυψελωτού πορώδους τσιμέντου λειτουργούσε ως ένα καλό υποστηρικτικό υλικό για το συγκεκριμένο PCM, το οποίο παρουσίαζε μη συνεχή τήξη και βελτίωνε τη δομική του σταθερότητα κατά τη διάρκεια των θερμικών κύκλων, ενώ η θερμοχωρητικότητα του σύνθετου συστατικού παρέμενε υψηλή.

Οι μέθοδοι εγκλεισμού του PCM στους πυρήνες των μπλοκ τσιμέντου που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, παρουσιάστηκαν από τον Salyer και τους συνεργάτες του. Αυτές είναι ο εμποτισμός του PCM σε πορώδες υλικό, η απορρόφηση του PCM σε ειδικό πολύ λεπτό πυρίτιο και η διείσδυση του PCM σε πολυμερείς μεταφορείς. Οι συγγραφείς υποστήριξαν ότι τέτοιες μορφές PCM αν

εισαχθούν στους πυρήνες των μπλοκ τσιμέντου μπορούν να οδηγήσουν σε πολύ μεγάλες ποσότητες αποθηκευόμενης θερμικής ενέργειας.

Πολύ σημαντική εφαρμογή θεωρείται και σε αυτήν την περίπτωση αυτή των Feldman και Hawes. Τα PCM τα οποία χρησιμοποίησαν ήταν το στεατικό βουτύλιο, δύο λιπαρά οξέα που ονομάζονται 1-dodecanol και 2-dodecanol και η παραφίνη. Αυτοί δοκίμασαν διάφορους συνδυασμούς τσιμέντου και PCM, οι θερμικές ιδιότητες των οποίων μπορούν να παρατηρηθούν από τον παρακάτω πίνακα.

TABLE 4. Thermal characteristics of various concrete-PCM combinations

Type of concrete	PCM			Average latent heat of impregnated concrete (J/g)	Age* (days)
	Nature	Melting point (°C)	Freezing point (°C)		
ABL	BS	15.2	19.3	5.7	692
REG	BS	15.4	20.4	5.5	391
PUM	BS	15.9	22.2	6.0	423
EXS	BS	14.9	18.3	5.5	475
ABL	DD	10.8	16.5	3.1	653
REG	DD	5.0	9.6	4.7	432
PUM	DD	14.9	12.0	12.7	377
REG	TD	26.2	32.0	5.7	406
PUM	TD	32.2	35.7	12.5	404
REG	PAR	52.4	60.2	11.9	428
ABL	PAR	53.2	60.6	18.9	421
PUM	PAR	52.9	60.8	22.7	407
OPC	PAR	51.7	60.4	7.6	407

Σχήμα 5.7: Θερμικά χαρακτηριστικά διαφόρων συνδυασμών τσιμέντου-PCM[7].

Οι δύο επιστήμονες διεξήγαγαν τεστ ελέγχου και σε αυτά τα μπλοκ τσιμέντου με PCM, συγκρίνοντάς τα με άλλα συμβατικά μπλοκ τσιμέντου. Τα αποτελέσματα σχετικά με τη θερμική αγωγιμότητα ήταν ότι μπορεί να ποικίλλει από -20% μέχρι 20% σε σχέση με τα συμβατικά μπλοκ τσιμέντου, ανάλογα με το συνδυασμό υλικών που χρησιμοποιούνται. Οι καμπτικές δυνάμεις των μπλοκ τσιμέντου με PCM ήταν συγκρίσιμες με τις άλλες, η αντοχή σε κύκλους ψύξης-απόψυξης ήταν σημαντικά βελτιωμένη σε σχέση με τα συμβατικά μπλοκ, η αντοχή σε ανάφλεξη ήταν ικανοποιητική, η απορρόφηση υγρασίας ήταν πολύ μειωμένη και η σταθερότητα των υλικών ήταν πολύ καλή. Η ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης του τσιμέντου με το PCM ήταν περίπου 200-230% πάνω από αυτήν των συμβατικών μπλοκ κατά τη διάρκεια μίας αλλαγής φάσης της τάξεως των 60°C.

5.3.3.2.1 Χρησιμοποίηση μικροκαψουλών PCM σε τοίχο από τσιμέντο για εξοικονόμηση ενέργειας, Cabezza-Castellon et al[9]

Ο κύριος σκοπός αυτής της εφαρμογής είναι να αναδείξει την πιθανότητα χρήσης μικροκαψουλών PCM στο τσιμέντο, χωρίς να αλλοιώνονται τα αρχικά χαρακτηριστικά του, επιτυγχάνοντας μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας από την ψυκτική ισχύ.



Σχήμα 5.8: Θάλαμοι με τοίχους από τσιμέντο και PCM[9].

Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε δύο όμοιου σχήματος θαλάμους με τσιμέντο, από τους οποίους ο ένας ήταν κατασκευασμένος από συμβατικό τσιμέντο και ο άλλος από τροποποιημένο τσιμέντο, το οποίο ονομάζεται τσιμέντο Morcon. Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα εμπορικό PCM σε μικροκάψουλες, το οποίο ονομάζεται Micronal PCM, με σημείο τήξης τους 26°C και ενθαλπία αλλαγής φάσης 110kJ/kg. Μετά από την ανάμειξη και την ενσωμάτωση αυτού του PCM με το τσιμέντο, βρέθηκε ότι το τσιμέντο Morcon μπορεί να επιτύχει αντοχή σε θλίψη πάνω από 25MPa και αντοχή σε πίεση πάνω από 6MPa (μετά από 28 ημέρες), στοιχεία που δείχνουν τη μεγάλη δυναμική αυτού του υλικού για χρήση του σε κατασκευαστικές εφαρμογές. Τα πάνελ με το τσιμέντο κατασκευάστηκαν στην Ελλάδα, ενώ οι θάλαμοι τελικά τοποθετήθηκαν στην περιοχή Puigverd de Lleida στην Ισπανία.

Οι θάλαμοι ήταν όμοιοι, όπως προέκυψαν από την ένωση έξι πάνελ από τσιμέντο, αλλά ο ένας από τους θαλάμους περιείχε σε περιεκτικότητα 5% κατά βάρος υλικό αλλαγής φάσης αναμεμειγμένο με το τσιμέντο σε τρία από τα πάνελ (νότιος και δυτικός τοίχος και στην οροφή). Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν χρησιμοποιήθηκε καθόλου μόνωση για τους θαλάμους, αφού έπρεπε να ελεγχθεί η επίδραση μόνο του υλικού αλλαγής φάσης.

Τα αποτελέσματα από τους θαλάμους λήφθηκαν από τις 23 Μαρτίου μέχρι τις 1 Απριλίου 2005. Ο θάλαμος χωρίς PCM παρουσιάζε μέγιστη θερμοκρασία 1°C υψηλότερη από αυτήν του θαλάμου με PCM και επίσης ελάχιστη θερμοκρασία 2°C χαμηλότερη. Επιπλέον, η μέγιστη θερμοκρασία στον τοίχο του θαλάμου με το υλικό αλλαγής φάσης εμφανιζόταν δύο ώρες μετά από ότι στον τοίχο χωρίς PCM, στοιχείο που δείχνει ότι η θερμική αδράνεια του τοίχου είναι υψηλότερη στην περίπτωση της χρήσης PCM. Αυτή η θερμική αδράνεια εμφανίζεται ξανά το απόγευμα εξαιτίας της στερεοποίησης του PCM, αλλά και νωρίτερα το πρωί εξαιτίας της τήξης του PCM. Η επίδραση της θερμικής αδράνειας είναι πολύ ενδιαφέρουσα σε εμπορικά κτίρια, καθώς μία καθυστέρηση της τάξεως των δύο ωρών στο κύμα θερμότητας θα μπορούσε να σημαίνει μία μείωση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, εξαιτίας της μειωμένης απαίτησης κλιματιστικής ισχύος.

Άρα η παραπάνω εφαρμογή είχε ως αποτέλεσμα βελτιωμένη θερμική αδράνεια και χαμηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το PCM που ενσωματώνεται στους θαλάμους τήκεται και στερεοποιείται σε κάθε θερμικό κύκλο. Επίσης, έγινε εμφανές ότι πιθανή νυχτερινή ψύξη μπορεί να εξασφαλίσει έναν τέτοιο ολοκληρωμένο θερμικό κύκλο.

5.3.3.2.2 Ενσωμάτωση PCM σε μείγμα ξύλου-ελαφρού βάρους τσιμέντο, Mehling et al[4].

Αναφέρεται εδώ ως υποκατηγορία η ενσωμάτωση των PCM αντί σε καθαρό μπλοκ τσιμέντου, σε μείγμα ξύλου και 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. Χρησιμοποίησαν 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.

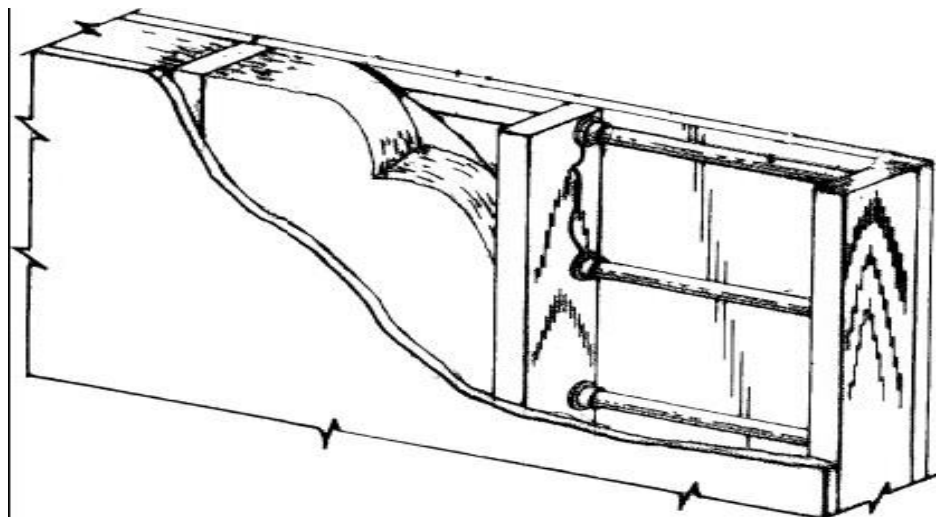
Όπως και σε όλες τις προηγούμενες εφαρμογές, η ενσωμάτωση των PCM ήταν κυρίως ωφέλιμη διότι οδήγησε σε αυξημένη ικανότητα θερμικής αποθήκευσης και καλύτερη θερμική συμπεριφορά και μάλιστα με αρκετά μειωμένα το βάρος και το πάχος των στοιχείων των τοίχων.

5.3.4 Θερμικά ενισχυμένο πλαίσιο τοίχου με PCM[10]

Ο Meng Zhang και οι συνεργάτες του παρουσίασαν ένα θερμικά ενισχυμένο πλαίσιο τοίχου με PCM, το οποίο μειώνει το μέγιστο της ζήτησης ψυκτικής ισχύος στα σπίτια. Οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν ως PCM υψηλής ποιότητας κρυσταλλική παραφίνη με σημεία τήξης και στερεοποίησης στο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 20-30°C, δηλαδή μέσα στο εύρος ανθρώπινης θερμικής άνεσης, όπως αυτό ορίζεται από την ASHRAE. Άλλοι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή αυτού του PCM ήταν τα πλεονεκτήματα της υψηλής θερμοκρασίας έναρξης της αποκρυστάλλωσης και της χαμηλής θερμοκρασίας έναρξης της τήξης. Εξαιτίας αυτού του στοιχείου, το PCM μπορούσε να φορτίζεται σε υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου και σε χαμηλότερη εσωτερική θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου. Άλλα πλεονεκτήματα αυτού του PCM ήταν η σταθερότητά του μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης, αλλά και κατά τη διάρκεια τυχόν υπερθέρμανσης, η χημική του αδράνεια με όλα τα υπόλοιπα υλικά του τοίχου και η οικολογική του συμπεριφορά.

Στο θερμικά ενισχυμένο πλαίσιο τοίχου (Phase Change Frame Wall-PCFW) χρησιμοποιήθηκε μία μέθοδος εγκλεισμού του PCM με μακροκάψουλες, αντί για

τη μέθοδο εμποτισμού (Imbibing Method-IM). Αυτή η μέθοδος είναι πιο ασφαλής και σταθερή, γιατί το PCM πρώτα ενσωματώνεται σε κάψουλες σε σωλήνες, οι οποίοι στη συνέχεια κλείνουν στα δύο τελειώματα για να αποφευχθεί η διαρροή. Επιπλέον πλεονεκτήματα που προέκυψαν με αυτή τη μέθοδο, ήταν η μείωση της αναφλεξιμότητας του τοίχου και της μεταφοράς υγρασίας κατά μήκος του ``φακέλου`` του κτιρίου, αλλά και η μείωση των προβλημάτων που προκαλούσε η μεταβολή του όγκου του PCM κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης, αφού οι σωλήνες δεν ήταν ποτέ εντελώς γεμάτοι με PCM. Τα τεστ ελέγχου αυτής της εφαρμογής έδειξαν ότι η πιο σημαντική παράμετρος για το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από και προς το PCM, ήταν η μόνωση του τοίχου και όχι το υλικό του σωλήνα. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι τοποθετώντας τους σωλήνες σε επαφή με την εσωτερική πλευρά του εσωτερικού καλύμματος, ο ρυθμός αποφόρτισης του PCM ήταν πολύ μεγαλύτερος από ότι με την τοποθέτηση των σωλήνων στη μέση της μόνωσης ή σε επαφή με το εξωτερικό κάλυμμα. Τέλος, αποδείχθηκε ότι η εσωτερική συναγωγή, το πάχος της μόνωσης και η εσωτερική και η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα, επηρέαζαν εξίσου το ρυθμό της αποφόρτισης. Μετά από όλες αυτές τις παρατηρήσεις κατασκευάστηκε το πλαίσιο, το οποίο παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.9: Σχηματική απεικόνιση του PCFW[10].

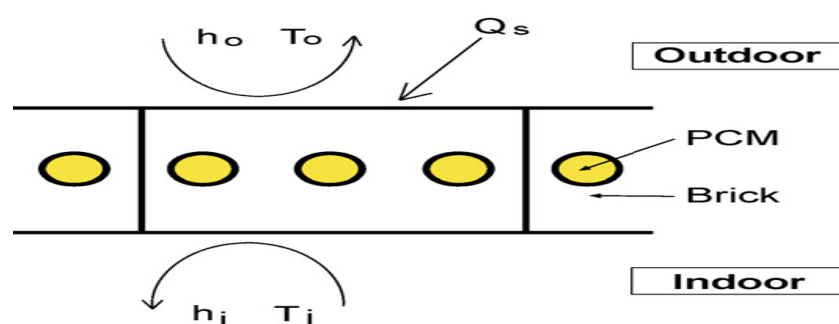
Στην παραπάνω απεικόνιση φαίνονται πάνω αριστερά η μόνωση και κάτω αριστερά η εξωτερική πλευρά. Επίσης, φαίνονται τα ενσωματωμένα σε κάψουλες PCM, που βρίσκονται μέσα στους σωλήνες, καθώς και οι βραχίονες που συγκρατούν τους σωλήνες.

Οι επιτόπιες δοκιμές του PCFW έδειξαν ότι μπορεί να μειώσει την αιχμή της ροής θερμότητας στον τοίχο κατά 38%. Για κτιριακές εφαρμογές αυτό αυτόματα σημαίνει μειωμένη ζήτηση για ψύξη από τους τοίχους και την οροφή, αφού ένα μέρος του θερμικού φορτίου μετατοπίζεται σε άλλες στιγμές της ημέρας, ενώ η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η θερμότητα από τα διάφορα στοιχεία του εξοπλισμού ενός σπιτιού αποθηκεύεται στο PCFW, ενώ αργότερα μπορεί να απελευθερωθεί πάλι στο θερμαινόμενο χώρο, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τους κύκλους λειτουργίας που απαιτούνται από τον εξοπλισμό, γεγονός που οδηγεί με τη σειρά του σε καλύτερη αποδοτικότητα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

5.3.5 Ενσωμάτωση PCM σε κατασκευές με τούβλο [11,12]

Αν και έχει πραγματοποιηθεί αρκετή έρευνα σχετικά με την ενσωμάτωση των PCM σε διάφορα οικοδομικά υλικά, σχεδόν καθόλου δεν έχει απασχολήσει η ενσωμάτωση των PCM σε διάφορες τεχνικές κατασκευής που χρησιμοποιούν τούβλο, οι οποίες ευρέως εφαρμόζονται στις Μεσογειακές χώρες.

Η πρώτη σημαντικότερη μελέτη για την εν λόγω ενσωμάτωση πραγματοποιήθηκε από τον Esam M. Alawadhi, με σκοπό την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος σε θερμά κλίματα για ψύξη. Αυτός ανέλυσε θερμικά ένα μοντέλο δύο διαστάσεων ενός κοινού πλίνθινου τοίχου (τούβλο), ο οποίος περιέχει κυλινδρικές τρύπες, οι οποίες γεμίζουν με PCM. Ο σκοπός αυτού του συνδυασμού τούβλου-PCM είναι να μειώσει τη ροή θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον, απορροφώντας το θερμικό κέρδος στο τούβλο, πριν αυτό φτάσει στον εσωτερικό χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται στους εσωτερικούς και στους εξωτερικούς χώρους. Η σχηματική απεικόνιση του συστήματος που μελέτησε, δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.10: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος τούβλου-PCM και των οριακών συνθηκών[12].

Ο Esam M.Alawadhi χρησιμοποίησε τρία διαφορετικά PCM για τη μελέτη του: ν-δεκαοκτάνιο (n-octadecane), ν-εικοσαίνη (n-eicosane) και P116. Διεξήγαγε πλήθος μελετών για να διαπιστώσει την επίδραση διαφόρων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα του είδους του PCM, της ποσότητάς του και της θέσης που αυτό πρέπει να τοποθετείται στο τούβλο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι πράγματι το θερμικό κέρδος μειώνεται όταν το PCM ενσωματώνεται στο τούβλο, ενώ η αύξηση της ποσότητας του PCM έχει θετική επίδραση στα τελικά αποτελέσματα. Η n-eicosane είχε τη καλύτερη απόδοση μεταξύ των τριών PCM, ενώ ως βέλτιστη θέση τοποθέτησης των κυλίνδρων με PCM από την άποψη της θερμικής αποτελεσματικότητας, αλλά και της ικανότητας να υποστηριχθεί η αντοχή του τούβλου, κρίθηκε η κεντρική γραμμή. Η ροή θερμότητας στον εσωτερικό χώρο μπορεί να μειωθεί κατά 17,55% με την τοποθέτηση των κυλίνδρων με PCM στην κεντρική γραμμή.

Η δεύτερη σημαντική εφαρμογή σε αυτό το πεδίο ήρθε από τον A.Castell και τους συνεργάτες του, οι οποίοι εφάρμοσαν αυτή την τεχνική σε μία τυπική Μεσογειακή κατασκευή, όπως έκαναν για την περίπτωση της ενσωμάτωσης σε τούβλο, η οποία ήδη αναλύθηκε παραπάνω. Σε αυτή τη μελέτη ελέγχθηκαν διάφορα PCM, για εφαρμογές ψύξης, τα οποία είχαν ενσωματωθεί σε μακροκάψουλες, σε συνδυασμό με Μεσογειακές κατασκευές. Χτίστηκαν θάλαμοι, στους οποίους τοποθετήθηκαν οι κάψουλες με PCM σε συμβατικό και σε κυψελιδικό τούβλο. Προκειμένου να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για την εξοικονόμηση ενέργειας και για τη μείωση των εκπομπών CO₂, χρησιμοποιήθηκε και μία αντλία θερμότητας, η οποία τοποθετήθηκε μέσα στους θαλάμους. Οι εξεταζόμενοι θάλαμοι χτίστηκαν στην περιοχή Puigverd de Lleida, η οποία αντιπροσωπεύει το τυπικό κλίμα της Ισπανίας, με αρκετά κρύους χειμώνες και ζεστά και υγρά καλοκαίρια. Οι σημαντικές ταλαντώσεις της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, ήταν κατάλληλες για τη λειτουργία του PCM, αφού το υλικό μπορούσε να λιώνει ολοκληρωμένα την ημέρα και να στερεοποιείται τη νύχτα.

Κατασκευάστηκαν τρεις θάλαμοι με συμβατικό τούβλο και δύο θάλαμοι με κυψελιδικό τούβλο. Οι θάλαμοι με το συμβατικό τούβλο ήταν ένας θάλαμος

αναφοράς χωρίς μόνωση, ένα θάλαμος με μονωτικό υλικό και ένας θάλαμος με μονωτικό υλικό και PCM.Ως μονωτικό υλικό χρησιμοποιήθηκε η πολυουρεθάνη και ως PCM η παραφίνη RT27.Οι θάλαμοι με το κυψελωτό τούβλο ήταν ένας θάλαμος αναφοράς και ένας θάλαμος με PCM, για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε το ένυδρο άλας SP-25 A8.

Το πρώτο πείραμα πραγματοποιήθηκε κάτω από ελεύθερα κυμαινόμενες συνθήκες.Τα αποτελέσματα έδειξαν χαμηλότερα μέγιστα της θερμοκρασίας (μέχρι και 1°C) και πιο σταθερές συνθήκες στους θαλάμους με τα PCM, αφού εξομαλύνονται οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.Η επίδραση του PCM ήταν εμφανής και στις δύο κατασκευαστικές λύσεις, αλλά ειδικά στην περίπτωση του κυψελωτού τούβλου, αφού η θερμική αντίσταση του τοίχου είναι χαμηλότερη στην περίπτωση αυτή.Επιπλέον, και στους δύο θαλάμους τα PCM ήταν μέσα στα θερμοκρασιακά όρια της τήξης τους σχεδόν σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων.Παρουσιάστηκαν, βέβαια, κάποια προβλήματα με τη στερεοποίηση των PCM κατά τη διάρκεια της νύχτας, ως εκ τούτου έγινε εμφανής η ανάγκη για χρήση κάποιου είδους ψύξης (φυσικής ή μηχανικής), ώστε να βελτιωθεί η απόδοση των PCM κάτω από ελεύθερα κυμαινόμενες συνθήκες.



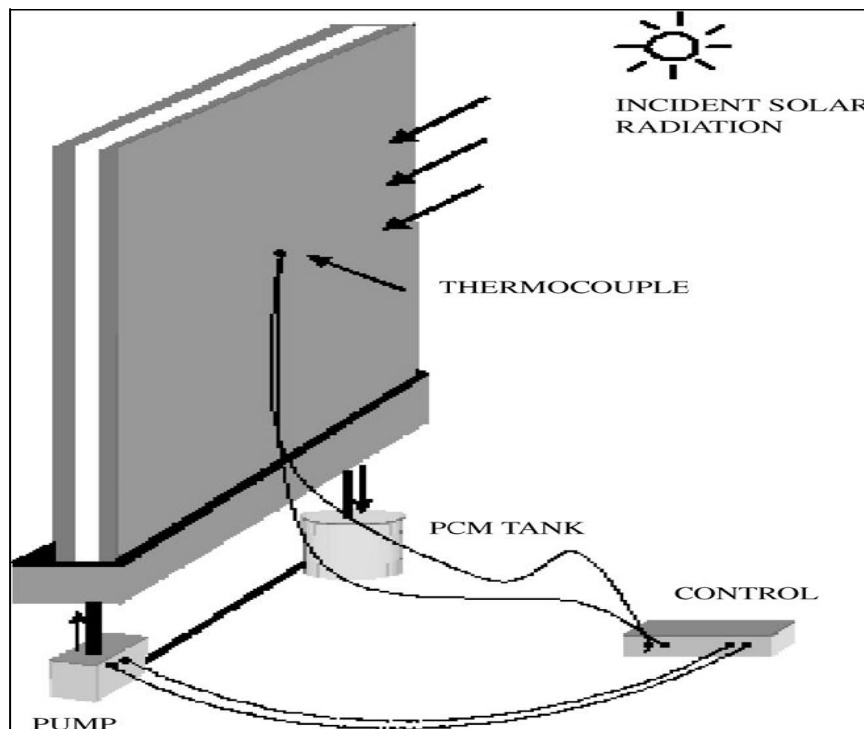
Σχήμα 5.11: Θάλαμος από τούβλο με RT27 και πολυουρεθάνη[11].

Αξίζει να γίνει και μία αναφορά στο δεύτερο πείραμα, όπου χρησιμοποιήθηκε μία αντλία θερμότητας, ώστε να καθορίζει και να ελέγχει την εσωτερική

θερμοκρασία των θαλάμων. Διαπιστώθηκε ότι η κατανάλωση ενέργειας στους θαλάμους με PCM ήταν μειωμένη κατά 15% σε σχέση με τους θαλάμους χωρίς PCM. Αυτό το γεγονός αναδεικνύει την πολύ μεγάλη δυναμική που έχουν τα PCM για χρήση στους ``φακέλους`` των κτιρίων, με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και τη θερμική άνεση. Επιπρόσθετα, περίπου 1-1,5kg/year/m² εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αποφεύχθηκαν, λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτή η μείωση των εκπομπών, η οποία είναι αποτέλεσμα της σωστής χρήσης της ενέργειας, μπορεί να μετριάσει την κλιματική αλλαγή και την υπερθέρμανση του πλανήτη.

5.3.6 Θερμικά ενεργά παράθυρα με κινούμενες κουρτίνες με PCM[13]

Η πρωτότυπη αυτή ιδέα προτάθηκε από τους Ismail και Henriquez, για εφαρμογές θέρμανσης. Το σύστημα αποτελείται από ένα παράθυρο και μία κουρτίνα PCM, η οποία μπορεί να κινείται. Το παράθυρο περιέχει διπλά τζάμια, ανάμεσα στα οποία υπάρχει ένα κενό, ενώ στην πάνω άκρη βρίσκεται ένας εξαεριστήρας. Οι πλευρές και το κάτω μέρος είναι σφραγισμένα, εκτός από δύο τρύπες στο κάτω μέρος, οι οποίες επικοινωνούν μέσω πλαστικού σωλήνα με μία αντλία και με τη δεξαμενή με το PCM. Η αντλία, με τη σειρά της, επικοινωνεί με τη δεξαμενή του PCM, το οποίο είναι στην υγρή φάση. Η λειτουργία της αντλίας ελέγχεται από έναν αισθητήρα διαφοράς θερμοκρασίας. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας φτάσει σε μία προκαθορισμένη τιμή, τότε η αντλία ξεκινά να λειτουργεί και το PCM αντλείται ώστε να γεμίσει το κενό μεταξύ των φύλλων του παραθύρου. Εξαιτίας της χαμηλότερης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας, το PCM ξεκινά να παγώνει, σχηματίζοντας ένα στερεό στρώμα, το οποίο αυξάνεται σε πάχος με το χρόνο, αποτρέποντας έτσι τη μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου όλη η ποσότητα του PCM να αλλάξει φάση και να πάει στη στερεή κατάσταση. Αν η σχεδίαση του παραπάνω συστήματος είναι σωστή, τότε έχει προβλεφθεί ότι η εκ νέου αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας θα ξεκινήσει πριν να ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του PCM.



Σχήμα 5.12: Απεικόνιση των παραθύρων με PCM[13].

Μετά από διεξοδικές αναλύσεις όσον αφορά τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν ένα τέτοιο σύστημα, το τελικό συμπέρασμα είναι ότι πρόκειται για μία πρόταση αρκετά βιώσιμη και θερμικά αποτελεσματική. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι το γέμισμα με PCM μπορεί να οδηγήσει στο φιλτράρισμα της ηλιακής ακτινοβολίας και να μειώσει τα θερμικά κέρδη και τις απώλειες, αφού η περισσότερη ενέργεια που μεταφέρεται, απορροφάται από το PCM κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το παράθυρο με το διπλό τζάμι που γεμίζει το κενό με PCM είναι περισσότερο θερμικά αποδοτικό από ότι το ίδιο παράθυρο που γεμίζει το κενό με αέρα. Τα πειράματα, τέλος, απέδειξαν ότι το έγχρωμο PCM έχει καλύτερη απόδοση, ενώ ειδικά το πράσινο χρώμα έχει τη βέλτιστη.

5.3.7 Σανίδες οροφής με PCM[5,6,14-16]

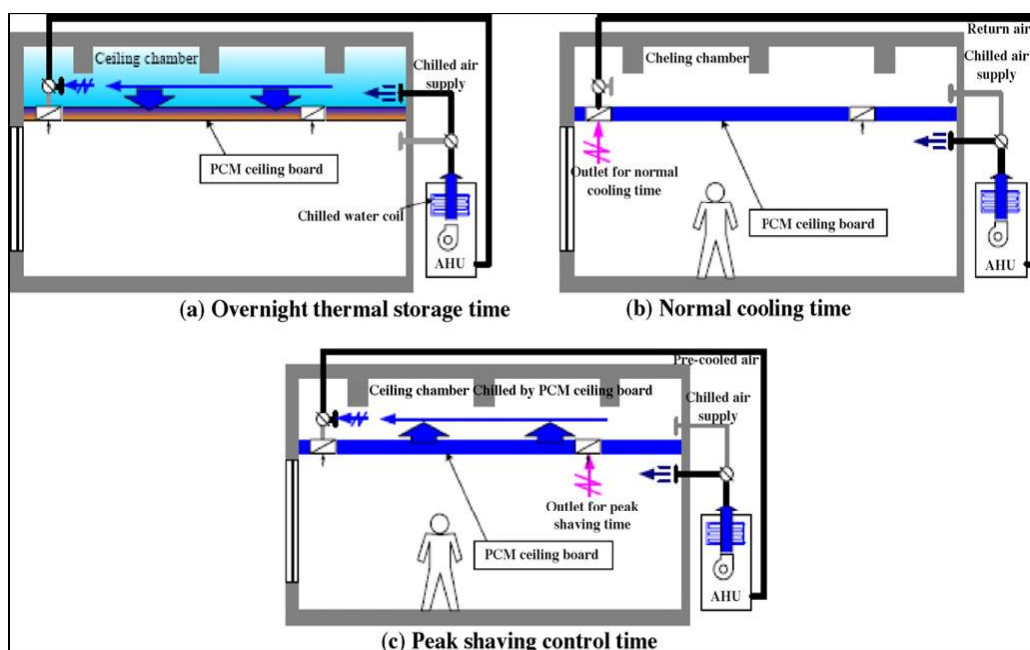
Οι σανίδες οροφής είναι ένα σημαντικό δομικό στοιχείο της στέγης, αφού χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και τη ψύξη των κτιρίων. Έχουν πραγματοποιηθεί και σε αυτό το πεδίο πολλές εφαρμογές, οι οποίες αφορούν εξίσου και ενεργητικά και παθητικά συστήματα.

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 ευθηκτικό 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.

Ο έλεγχος της διακύμανσης της θερμοκρασίας στη στέγη, είχε διαφορετικά αποτελέσματα σχετικά με τη αξιοπιστία του PCM για τους διαφορετικούς μήνες. Η χρήση του πάνελ με το PCM στο ένα δωμάτιο είχε ως αποτέλεσμα τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας στην οροφή, περίπου στους 27°C, για όλη τη διάρκεια της ημέρας, για τους μήνες μεταξύ του Δεκεμβρίου και Απριλίου. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια των μηνών μεταξύ Μαΐου και Νοεμβρίου, το δωμάτιο με το πάνελ με PCM, παρουσίαζε μέγιστο θερμοκρασίας περίπου 4°C πάνω από το μέγιστο θερμοκρασίας του δωματίου χωρίς το PCM, δηλαδή είχε αρνητική επίδραση στη θερμική συμπεριφορά του χώρου. Μάλιστα, η εναλλακτική λύση της χρήσης δεξαμενής κρύου νερού για αυτούς τους μήνες, αποδείχτηκε μη ωφέλιμη, καθώς η ποσότητα του απαιτούμενου νερού ανά μονάδα επιφάνειας, δεν ήταν εύκολα διαθέσιμη κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου.

Οι Kodo και Ibamoto χρησιμοποίησαν PCM σε σανίδες οροφής σε ένα κτίριο γραφείων για την εξομάλυνση των αιχμών φορτίου των συστημάτων κλιματισμού. Το σημείο τήξης και η θερμότητα τήξης του PCM σε μικροκάψουλες, που χρησιμοποιήθηκε για να ενισχύσει μία απλή σανίδα οροφής από πετροβάμβακα, ήταν αντίστοιχα 24,5°C και 174,4kJ/kg. Η λειτουργία του συστήματος δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Κατά τη διάρκεια της νυχτερινής θερμικής αποθήκευσης, ο ψυχρός αέρας από τη μονάδα χειρισμού αέρα (Air-Handling Unit, AHU) περνούσε μέσα από το χώρο του θαλάμου οροφής για να

αποθηκεύσει τη ψύξη στη σανίδα με το PCM. Η αποθήκευση της ψυκτικής ενέργειας γίνεται με τη χρήση μειωμένου τιμολογίου για την ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη διάρκεια της κανονικής περιόδου ψύξης, ο ψυχρός αέρας από τη μονάδα χειρισμού φυσούσε απευθείας στο εσωτερικό του δωματίου. Κατά τη διάρκεια της αιχμής του θερμικού φορτίου, ο αέρας από το δωμάτιο γυρνούσε στη μονάδα χειρισμού αέρα μέσα από το χώρο της οροφής. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδρομής ήταν ο θερμός αέρας του δωματίου να προ-ψύχεται περνώντας πάνω από τη ψυχρή σανίδα. Επομένως, το μέγιστο θερμικό φορτίο και η απαίτηση θερμικής ικανότητας της πηγής μπορούσαν να μειωθούν.

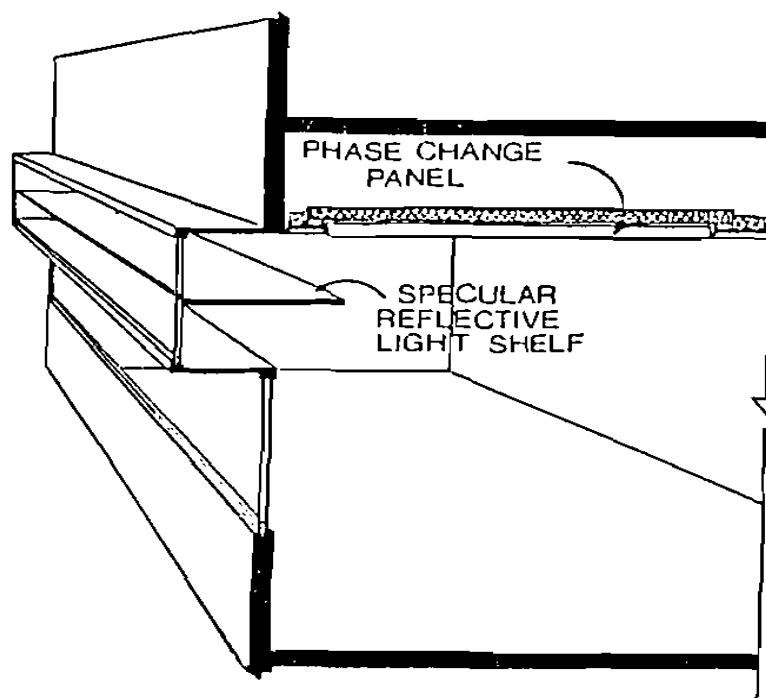


Σχήμα 5.13: Απεικόνιση των διαφορετικών περιόδων λειτουργίας του συστήματος με τις σανίδες οροφής[6].

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.

Στα αριθμητικά αποτελέσματα των μετρήσεων βρέθηκε, καταρχήν, ότι η θερμοχωρητικότητα της εν λόγω σανίδας ήταν 663kJ/m^2 , δηλαδή 4,9 φορές περισσότερη από αυτήν της απλής σανίδας από πετροβάμβακα. Επιπλέον, η αύξηση της θερμοκρασίας δωματίου ήταν 2°C συγκρινόμενη με την αύξηση των 6°C , στην περίπτωση της μη ύπαρξης του PCM. Επίσης, το μέγιστο του θερμικού φορτίου της σανίδας με το PCM ήταν το 85,2% του μεγίστου της σανίδας από πετροβάμβακα. Η μείωση αυτή του θερμικού φορτίου είχε ως αποτέλεσμα και τη μείωση της απαίτησης ισχύος και ικανότητας από τη μονάδα AHU. Το αποτέλεσμα αυτής της μείωσης, ήταν να μειωθεί και το κόστος λειτουργίας της μονάδας κατά 91,6% σε σχέση με αυτό της μονάδας που χρησιμοποιούσε απλές σανίδες από πετροβάμβακα. Άρα αποδείχτηκε από όλες τις παραμέτρους η αξιοπιστία της χρήσης ενισχυμένων με PCM σανίδων πετροβάμβακα για την εξομάλυνση των αιχμών του φορτίου κλιματισμού.

Ένα παθητικό σύστημα θέρμανσης χώρου για ένα κτίριο γραφείων, το οποίο ενσωματώνει PCM σε σανίδες οροφής αναπτύχθηκε από τους Gutherz και Schiler. Η σχηματική απεικόνιση του εν λόγω συστήματος δίνεται παρακάτω.



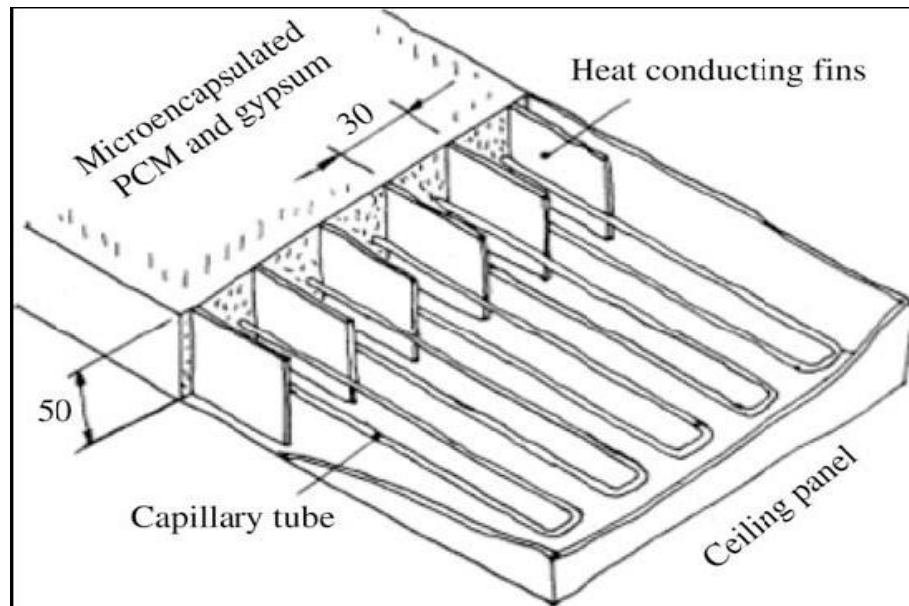
Σχήμα 5.14: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος των Gutherz και Schiler[16].

Η προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία από ένα νότιο κατοπτρικής ανακλάσης φωτός ράφι, κατευθύνεται σε ένα μαύρο πάνελ από υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο είναι τοποθετημένο στην οροφή. Οι συνδυασμένες ικανότητες του συγκεκριμένου πάνελ για αισθητή και λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας, δίνει μία μονάδα αποθήκευσης ενέργειας αυξημένης πυκνότητας. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου ήταν ότι επέτρεπε σε μία μεγάλη επιφάνεια να είναι αφιερωμένη στη θερμική αποθήκευση, χωρίς μάλιστα την ανάγκη μεγάλων όγκων αποθηκευτικού μέσου, στοιχείο που θα ήταν απαραίτητο στην περίπτωση αισθητής αποθήκευσης θερμότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση ενός τέτοιου συστήματος έχει τη δυναμική να ανακτήσει μέχρι και 17-36% των απωλειών θερμότητας από τα αρχικά κέρδη.

5.3.7.1 Θερμικά ενεργοποιημένο πάνελ οροφής με PCM, Koschenz-Lehmann[4,17]

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.

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.



Σχήμα 5.15: Θερμικά ενεργοποιημένο πάνελ οροφής[18].

Η λειτουργία είναι όμοια με τα υπόλοιπα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Το PCM στο πάνελ τήκεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, εξαιτίας της έκθεσής του στα θερμικά φορτία, ενώ στερεοποιείται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν δηλαδή ψύχεται από το ενσωματωμένο σύστημα σωλήνων νερού. Η προσωρινή αποθήκευση θερμικής ενέργειας στο PCM αποσβένει το εύρος της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου, ενώ επιτρέπει η διαδικασία απόρριψης θερμότητας να μην είναι ταυτόχρονη με το θερμικό κέρδος. Η χρήση, μάλιστα, του γύψου κρατάει και το PCM σε μία αρκετά σταθερή δομή, με το απαραίτητο νερό που περικλείεται μέσα στο γύψο να βοηθάει και στην προστασία κατά της πυρκαγιάς, η οποία μπορεί να προκληθεί εξαιτίας της διαρροής της υγρής παραφίνης.

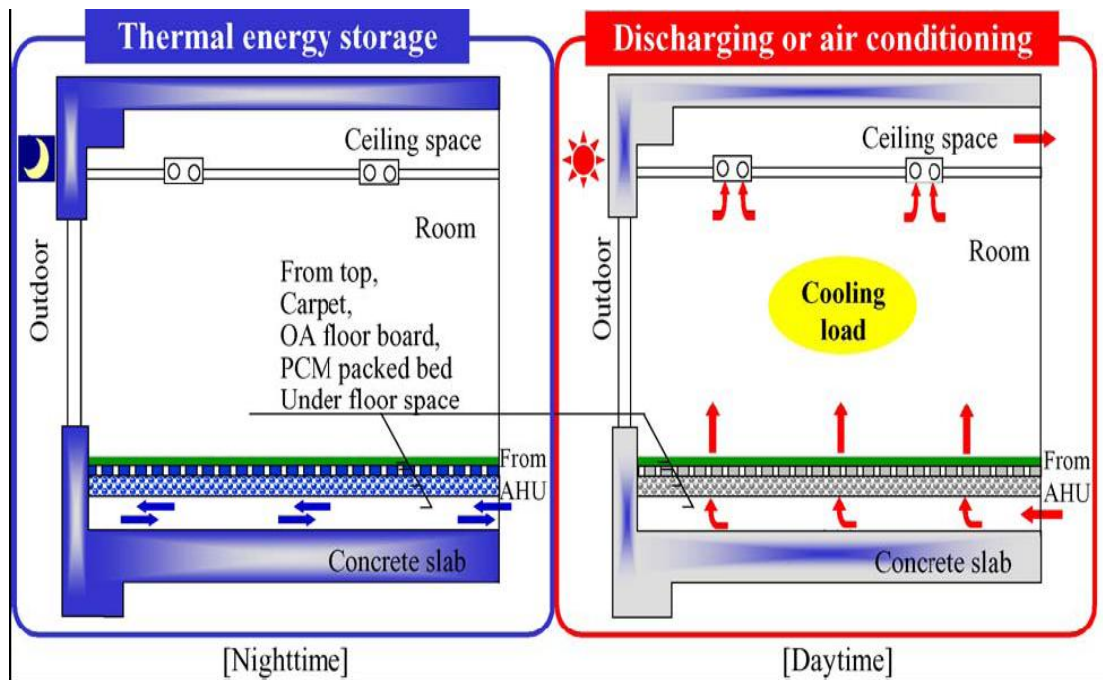
5.3.8 Υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με PCM[2,5,19-21]

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. 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. 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.

Μία σχηματική απεικόνιση του συστήματος που προτάθηκε από τον Nagano δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σε αυτό το σύστημα, η λανθάνουσα θερμότητα αποθηκεύεται στο υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο ενσωματώνεται άμεσα σε σανίδες δαπέδου ΟΑ σε μορφή κόκκων, οι οποίοι έχουν διάμετρο μερικά χιλιοστά. Αυτή η κλίση με το PCM είναι διαπερατή από τον αέρα, οπότε είναι κατάλληλη για χρήση σε συστήματα παροχής κλιματιστικής ισχύος στο δάπεδο. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η κυκλοφορία του ψυχρού αέρα στον υποδαπέδιο χώρο, επιτρέπει στη ψυκτική ενέργεια να φορτίσει το σύστημα της πλάκας τσιμέντου, των σανίδων δαπέδου ΟΑ και της κλίνης με PCM, ώστε κατά τη διάρκεια της ημέρας να χρησιμοποιηθεί αυτό το σύστημα για να μεταφέρει αυτό το ψυκτικό φορτίο στο δωμάτιο.

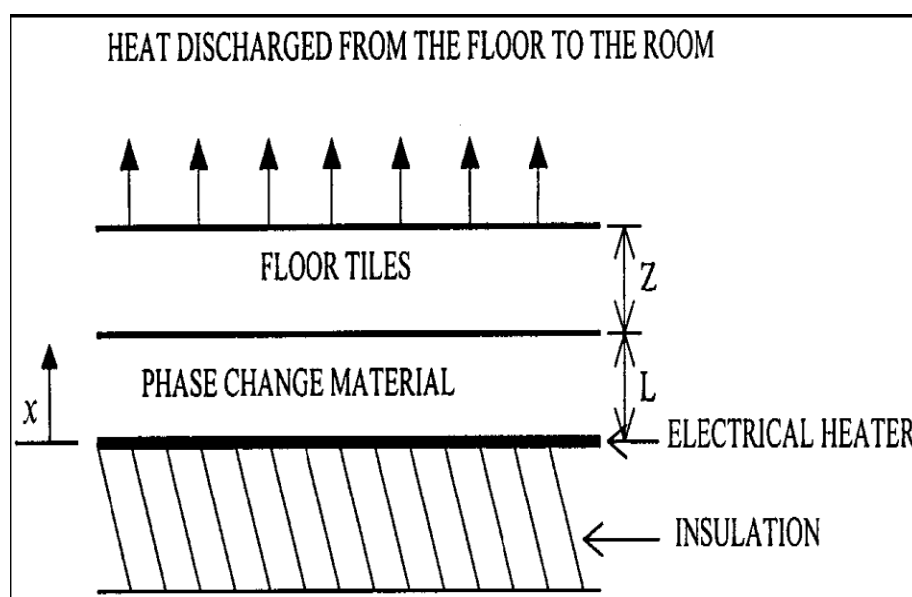


Σχήμα 5.16: Υποδαπέδιο σύστημα που προτάθηκε από τον Nagano[19].

Τα αποτελέσματα των τεστ της θερμικής συμπεριφοράς έδειξαν ότι η επίδραση της σταθεροποίησης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του χρόνου που συμβαίνει η αλλαγή φάσης, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου στον οποίο παραμένει σταθερή η θερμοκρασία του δωματίου, κατά ένα παράγοντα περίπου 1,5-2,1, όταν χρησιμοποιήθηκε η κλίση με το PCM. Επίσης, μετρήθηκε ότι κάτω από συνθήκες παροχής αέρα μέσα στο δωμάτιο κατά τη διάρκεια της νύχτας, η συνολική αποθηκευόμενη θερμότητα μέχρι το τέλος της νυχτερινής περιόδου, ήταν $1,79 \text{ MJ/m}^2$. Σε αυτήν την περίπτωση η λειτουργία των συστημάτων κλιματισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας περιορίστηκε σε 3 ώρες, δεδομένο που σημαίνει ένα βαθμό μετατόπισης των αιχμών τη νύχτα της τάξεως του 89%.

Οι Farid και Chen μελέτησαν αριθμητικά τη δυναμική ενός υποδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με ένα στρώμα PCM. Βρέθηκε ότι ένα στρώμα πάχους 30mm PCM, το οποίο έχει σημείο τήξης περίπου στους 40°C είναι αρκετό για να παρέχει θερμική αποθήκευση για μία ημέρα κάτω από τις συνθήκες περιβάλλοντος του πειράματος. Ο ηλεκτρικός θερμαντήρας που χρησιμοποιείται λειτουργεί μόνο για 8 ώρες κατά τη διάρκεια της εκτός των αιχμών λειτουργίας περιόδου, ενώ η θερμότητα που αποθηκεύεται στο υλικό αλλαγής φάσης είναι αρκετή για να παρέχει ομοιόμορφη θέρμανση σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, οπότε η θερμική αποθήκευση μπορεί να πραγματοποιείται αποκλειστικά στην

περίοδο εκτός των αιχμών λειτουργίας. Η λειτουργία αυτή είχε ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση περίπου $7,2\text{MJ/m}^2$ ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας από το φορτίο αιχμής σε φορτίο εκτός αιχμής. Ο Farid με τον Kong κατασκεύασαν δύο πλάκες από τσιμέντο, από τις οποίες η μία περιείχε PCM ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), ώστε να τις χρησιμοποιήσουν για να ελέγξουν το παραπάνω σύστημα. Αντίθετα με την πλάκα με το απλό τσιμέντο, η ενισχυμένη πλάκα με το PCM εμφάνισε μικρότερη θερμοκρασιακή διακύμανση στην επιφάνεια και διατήρησε μία αποδεκτή επιφανειακή θερμοκρασία σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, αν και η διαδικασία θέρμανσης πραγματοποιήθηκε μόνο για 8 ώρες.



Σχήμα 5.17: Σχηματική απεικόνιση του υποδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με χρήση στρώματος PCM από τους Farid και Chen[21].

Άλλη εφαρμογή ήρθε από τον Amir και τους συνεργάτες του, οι οποίοι εξέτασαν τη θερμική συμπεριφορά δύο ηλεκτρικά θερμαινόμενων πάνελ δαπέδου, τα οποία περιείχαν νερό και παραφίνη (ν-δεκαοκτάνιο) αντίστοιχα. Τα πάνελ χρησιμοποιήθηκαν σε μία κατασκευή από τσιμέντο, η οποία αποθήκευε ηλεκτρική ενέργεια στη μορφή θερμικής ενέργειας στη διάρκεια της περιόδου εκτός των αιχμών λειτουργίας και την απελευθέρωνε στις ώρες αιχμής. Διαπιστώθηκε ότι το πάνελ με την παραφίνη, το οποίο ήταν περισσότερο συμπαγές από αυτό με το νερό (134mm πάχος σε σχέση με τα 152mm του δεύτερου), αποθήκευε περισσότερη ενέργεια (2880 έναντι 2415kJ/m²) και επίσης παρείχε μεγαλύτερη

θερμική άνεση, καθώς οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας ήταν λιγότερο σημαντικές σε αυτήν την περίπτωση (1,3 έναντι 3,8°C).

5.3.8.1 Υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με τη χρήση ``σταθερής μορφής`` πλακών με PCM, Lin et al[20]

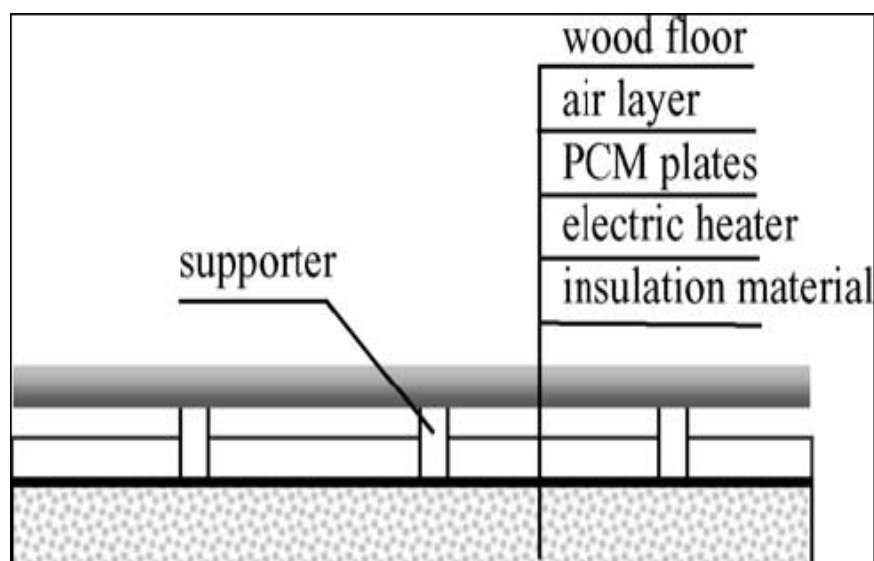
Επιλέγεται να αναφερθεί αυτή η εφαρμογή, των Lin, Xu και των συνεργατών τους, ξεχωριστά διότι προβάλλει ένα καινούριο είδος υποδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με χρήση των ``σταθερής μορφής`` (shape-stabilized) πλακών με PCM, για τα οποία έχει ήδη γίνει αναφορά στο 2^ο Κεφάλαιο. Η ιδιότητα αυτών 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 διάσπαστο 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, απεικόνιση του οποίου παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα.

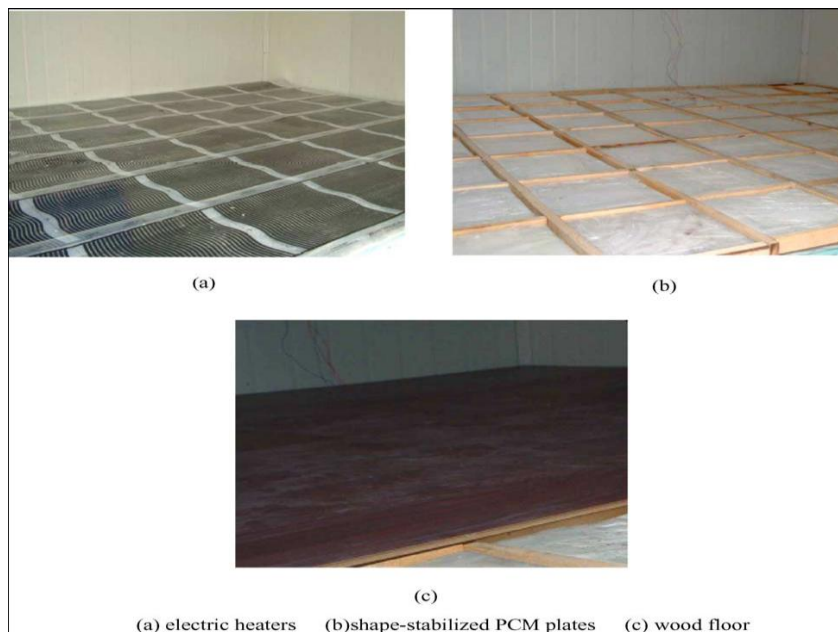


Σχήμα 5.18: Απεικόνιση του πειραματικού σπιτιού με shape-stabilized πλάκες με PCM[20].

Το σπίτι αυτό ήταν εξοπλισμένο με υποδαπέδιο ηλεκτρικό σύστημα συμπεριλαμβανομένων των shape-stabilized πλακών PCM. Το δάπεδο, το οποίο είναι και αυτό που ενδιαφέρει τη συγκεκριμένη εφαρμογή, περιλάμβανε μόνωση από πολυστυρένιο πάχους 120mm, ηλεκτρικούς θερμαντήρες, PCM σε πάχος 15mm, μερικούς ξύλινους υποστηρικτές, ένα στρώμα αέρα 10mm και ένα ξύλινο δάπεδο 8mm. Οι παρακάτω εικόνες δείχνουν τη δομή του συστήματος θέρμανσης και εικόνες ξεχωριστά των θερμαντήρων, των πλακών με PCM και των ξύλινων δαπέδων που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή.



Σχήμα 5.19: Απεικόνιση του ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με τις shape-stabilized πλάκες με PCM[20].



Σχήμα 5.20: Ηλεκτρικοί θερμαντήρες, shape-stabilized PCM πλάκες, ξύλινα δάπεδα[20].

Η περίοδος που απαιτείται θέρμανση στο Πεκίνο είναι από 15 Νοεμβρίου μέχρι 15 Μαρτίου. Η μέση θερμοκρασία σε αυτές τις ημέρες είναι περίπου $-1,3^{\circ}\text{C}$. Όμως, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν την περίοδο του Απριλίου, οπότε η μέση θερμοκρασία ήταν $13,6^{\circ}\text{C}$. Ως εκ τούτου, οι μετρούμενες εσωτερικές θερμοκρασίες ήταν υψηλές, εξαιτίας της υψηλής εξωτερικής θερμοκρασίας τον Απρίλιο, ενώ η ταλάντωση των εσωτερικών θερμοκρασιών ήταν μεγάλη, εξαιτίας της μικρής θερμικής χωρητικότητας του σπιτιού.

Μετρήθηκε ότι η μέση εσωτερική θερμοκρασία του σπιτιού ήταν 20°C και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ημέρας και της νύχτας ήταν 12°C , χωρίς ηλεκτρική θέρμανση. Όταν εφαρμόστηκε νυχτερινή ηλεκτρική θέρμανση, μετρήθηκε η μέση εσωτερική θερμοκρασία 31°C , ενώ η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ημέρας και της νύχτας διατηρήθηκε περίπου στους 12°C . Άρα, το εν λόγω σύστημα αύξησε την εσωτερική θερμοκρασία, ενώ δεν αύξησε την ταλάντωσή της.

Η θερμοκρασία της ανώτερης επιφάνειας των πλακών με PCM διατηρήθηκε πάνω από τους 45°C για περισσότερο από 10 ώρες, αφού οι θερμαντήρες είχαν σταματήσει να λειτουργούν. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο εσωτερικών σημείων μέτρησης (σε δύο διαφορετικά ύψη) ήταν λιγότερο από $0,5^{\circ}\text{C}$, στοιχείο που δείχνει ότι επικρατούσε υψηλή αίσθηση θερμικής άνεσης. Επίσης, οι απώλειες της θερμικής ενέργειας από τη μόνωση δεν ήταν περισσότερες από το 15%, ενώ περίπου $3,3\text{kWh}$ ηλεκτρικής ενέργειας μετατοπίστηκαν από τις ώρες αιχμής σε περίοδο εκτός των αιχμών λειτουργίας, ποσότητα που ήταν περίπου το 54% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό το γεγονός μπορούσε να προσφέρει σημαντικό ενεργειακό όφελος από τη διαφορετική κοστολόγηση της ενέργειας μεταξύ της ημέρας και της νύχτας.

Βιβλιογραφία 5^{ου} Κεφαλαίου

- [1] Phase change thermal energy storage,
http://freespace.virgin.net/m.eckert/carl_vener's_dissertation.htm
- [2] Yinping Zang, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, Hongfa Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook
- [3] Belen Zalba, Jose M. Marin, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications
- [4] A. Pasupathy, R. Velraj, R. V. Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments
- [5] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art
- [6] Atul Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
- [7] D. W. Hawes, D. Feldman, D. Banu, Latent heat storage in building materials
- [8] <http://www.ecohookups.com/profiles/blogs/melting-walls-that-heat-and>
- [9] Luisa F. Cabeza, Cecilia Castellon, Miquel Nogues, Marc Medrano, Ron Leppers, Oihana Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings
- [10] Meng Zhang, Mario A. Medina, Jennifer B. King, Development of a thermally enhanced frame wall with phase change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings
- [11] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Perez, L. F. Cabeza, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling
- [12] Esam M. Alawadhi, Thermal analysis of a building brick containing phase change material
- [13] K. A. R. Ismail, J. R. Henriquez, Thermally effective windows with moving phase change material curtains
- [14] A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj, R. V. Seeniraj, Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management

- [15] T.Kondo, T.Ibamoto, S.Iwamoto, Research on thermal storage using rock wool PCM ceiling board
- [16] James M.Gutherz, Marc E.Schiler, A passive solar heating system for the perimeter zone of office buildings
- [17] Markus Koschenz, Beat Lehmann, Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings
- [18] Na Zhu, Zhenjun Ma, Shengwei Wang, Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials:A review
- [19] K. Nagano, S.Takeda, T.Mochida , K.Shimakura , T.Nakamura, Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building mass thermal storage—Heat response in small scale experiments
- [20] Kunping Lin, Yiping Zhang, Xu Xu, Hongfa Di, Rui Yang, Penghua Qin, Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates
- [21] M.M.Farid,X.D.Chen, Domestic electrical space heating with heat storage

Μέρος 2^ο: Θεωρητική Προσομοίωση

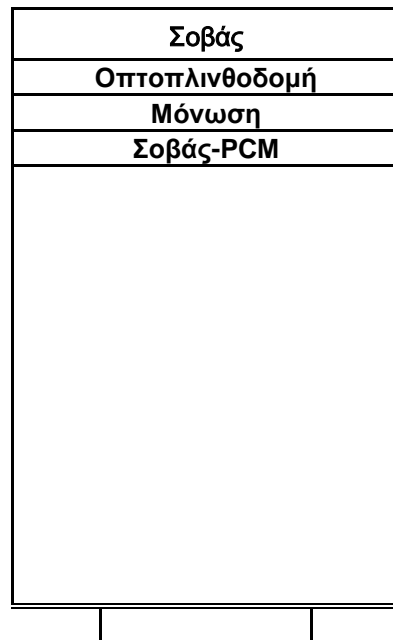
Κεφάλαιο 6^ο: Περιγραφή της προσομοίωσης και τυπολόγιο[1,2]

Στο 1^ο μέρος της εργασίας έγινε μία προσπάθεια για να αποδειχθεί η μεγάλη δυναμική που έχουν τα υλικά αλλαγής φάσης σε πλήθος εφαρμογών, όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας, την αύξηση του χρόνου ζωής των συστημάτων στα οποία ενσωματώνονται, την προστασία από περιβαλλοντικές μολύνσεις και τη μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση κεφαλαίου. Είναι πολύ σημαντικό να διαπιστωθεί η αξιοπιστία της χρήσης των PCM και σε πρακτικές εφαρμογές. Για αυτόν τον λόγο πραγματοποιείται στο 2^ο μέρος της εργασίας μία εκτενής μελέτη σχετικά με τη χρήση PCM σε μία απλή, αλλά πολύ χρήσιμη εφαρμογή.

Στόχος του 2^{ου} μέρους της παρούσας εργασίας είναι να διαπιστωθεί η συμπεριφορά του PCM, όταν χρησιμοποιείται σε νότιο εσωτερικό τοίχο δωματίου απέναντι από υαλοπίνακα, για την παθητική ηλιακή θέρμανση αυτού. Αυτό που κυρίως μελετάται είναι οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM, όταν μεταβάλλονται διάφοροι παράγοντες. Αυτοί οι παράγοντες είτε αφορούν εξωτερικές συνθήκες, όπως η αλλαγή του μήνα μελέτης, η αλλαγή της ηλιοφάνειας μίας ημέρας μελέτης ή η μεταβολή της θερμοκρασίας του δωματίου, είτε αφορούν το ίδιο το PCM, όπου μεταβάλλονται διάφορα χαρακτηριστικά του για διαπιστωθεί η επίδραση του καθενός στη λειτουργία του συστήματος. Η κάθε μεταβολή ενός παράγοντα αποτελεί μία ξεχωριστή παραμετρική μελέτη, όπως αναλυτικά περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Παρακάτω αναλύονται η κτιριακή διάταξη που χρησιμοποιείται, τα δεδομένα που λαμβάνονται και παραμένουν σταθερά σε όλες τις παραμετρικές μελέτες, οι σχέσεις που εφαρμόζονται και οι παραδοχές που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς.

Κτιριακή διάταξη



Θεωρείται δωμάτιο διαστάσεων 4m(μήκος)*3m(πλάτος)*2,5m(ύψος) και επιφάνεια υαλοπίνακα στον νότιο εξωτερικό τοίχο διαστάσεων 1m(πλάτος)*1,5m(ύψος). Άρα οι διατομές του νότιου τοίχου και του υαλοπίνακα θα είναι:

$$A = 3 \times 2,5 = 7,5m^2$$

$$A_f = 1 \times 1,5 = 1,5m^2$$

Το κτίριο που περιέχει το δωμάτιο βρίσκεται στην περιοχή της Αθήνας με γεωγραφικό πλάτος $\Phi = 37,97^\circ$. Η διαστρωμάτωση του νότιου εσωτερικού τοίχου από κάτω προς τα πάνω, όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα είναι η εξής:

- Μείγμα Σοβά-PCM:40mm
- Μόνωση Πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης:50mm
- Οπτοπλινθοδομή:70mm
- Σοβάς:30mm

Υπολογισμός προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας G (W) χρησιμοποιούνται καταρχήν οι σχέσεις της μέσης στιγμιαίας άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου G_b και G_d , οι οποίες δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$G_b = M_t + A_t \sin\left(\frac{360}{365} D - P_t\right) \quad (1)$$

$$G_d = m_t + a_t \sin\left(\frac{360}{365} D - P_t\right) \quad (2)$$

Στις παραπάνω σχέσεις η σταθερά D παίρνει τιμές από 1÷365 ανάλογα με την εκάστοτε ημέρα του έτους ενώ οι υπόλοιπες σταθερές των παραπάνω σχέσεων λαμβάνονται από τον ακόλουθο πίνακα για τις αντίστοιχες ώρες μελέτης:

Πίνακας 6.1: Σταθερές για τον υπολογισμό των G_b και G_d						
Time t	Mt	At	Pt	mt	at	Pt
hrs LST		KW/m ²	Degrees		KW/m ²	Degrees
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	85,6
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	0,21	0,083	87,23
15.00	0,269	0,166	86,22	0,176	0,087	89,53
16.00	0,183	0,147	82,1	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

Επίσης υπολογίζεται ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, για τον οποίο χρησιμοποιείται η σχέση:

$$R_b = \frac{\sin \delta \sin(\Phi - \beta) + \cos \delta \cos(\Phi - \beta) \cos \omega}{\sin \delta \sin \Phi + \cos \delta \cos \Phi \cos \omega} \quad (3)$$

Τα διάφορα μεγέθη στην παραπάνω σχέση υπολογίζονται ως εξής:

$\beta = 90^\circ$ διότι ο τοίχος μελέτης είναι κατακόρυφος.

$\Phi = 37,97^\circ$ έχει ήδη δοθεί παραπάνω.

•Ηλιακή απόκλιση

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right) \quad (4)$$

όπου n είναι ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους που μελετάται.

•Ωριαία γωνία

$$\omega = \pm 0,25(\text{min}_{\alpha\pi\acute{o}12:00\mu\mu}) \quad (5)$$

όπου το θετικό πρόσημο χρησιμοποιείται όταν μελετούνται ώρες μετά το ηλιακό μεσημέρι, ενώ το αρνητικό πρόσημο χρησιμοποιείται για τις ώρες πριν το ηλιακό μεσημέρι.

Οι τιμές που προκύπτουν από τις σχέσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της στιγμιαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου από την σχέση:

$$G_T = G_b R_b + G_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (G_d + G_b) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (6)$$

Στην παραπάνω σχέση η σταθερά λαμβάνεται ως εξής:

$\rho = 0,2$ διότι συμβολίζει την ανακλαστικότητα του εδάφους και για συνηθισμένο έδαφος έχει την τιμή αυτή.

Επίσης, για να αποκλιστούν κάποιες τιμές που είναι μη αποδεκτές θα πρέπει για κάθε μέρα που γίνεται εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων να υπολογίζονται οι ώρες δύσης και ανατολής από τις παρακάτω εξισώσεις, στις οποίες με N συμβολίζεται η διάρκεια της ημέρας:

$$time_{\delta\acute{\upsilon}\sigma\eta\varsigma} = 12 + \frac{N}{2} \quad (7)$$

$$time_{\alpha\nu\alpha\tau\omicron\lambda\eta\varsigma} = 12 - \frac{N}{2} \quad (8)$$

$$N = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \Phi \tan \delta) \quad (9)$$

Επιλογή υλικού PCM

Η επιλογή του PCM πρέπει να αφορά το κατά πόσον όλα τα χαρακτηριστικά του ανταποκρίνονται στην προσπάθεια για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εκμετάλλευσή του αλλά και στους περιορισμούς που τίθενται ανάλογα με την εφαρμογή ώστε να υπάρχει η επιθυμητή αλληλεπίδραση με τα υπόλοιπα υλικά. Στο πλαίσιο αυτού του στόχου το υλικό αλλαγής φάσης επιλέγεται αυθαίρετα, ενώ όπως θα φανεί και από τις παραμετρικές μελέτες, κάποια από τα χαρακτηριστικά του μεταβάλλονται, ώστε να γίνει η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού. Λαμβάνεται ως δεδομένο ότι κάθε υλικό αλλαγής φάσης μπορεί να κατασκευαστεί, μετά από εργαστηριακή έρευνα. Τα χαρακτηριστικά του PCM αναφέρονται ρητά κάθε φορά που μεταβάλλονται στις παραμετρικές μελέτες που

ακολουθούν. Εδώ, απλώς αναφέρονται τα μεγέθη του PCM, τα οποία θα απασχολήσουν την εργασία παρακάτω, δηλαδή:

- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης, το οποίο ορίζεται από τη θερμοκρασία έναρξης της τήξης, που συμβολίζεται ως T_s και τη θερμοκρασία ολοκλήρωσης της τήξης ή στερεοποίησης, που συμβολίζεται ως T_l .
- Θερμότητα αλλαγής φάσης ή αλλιώς θερμότητα της τήξης, η οποία συμβολίζεται ως H .
- Πυκνότητα ρ .
- Ειδική θερμική αγωγιμότητα K .
- Ειδικές θερμοχωρητικότητες στα σημεία έναρξης της τήξης και ολοκλήρωσης της τήξης, οι οποίες συμβολίζονται από τα μεγέθη Cp_s και Cp_l .

Κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης η ειδική θερμοχωρητικότητα μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM. Χρησιμοποιώντας για την προσομοίωση της αλλαγής φάσης την μέθοδο της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, όπως αυτή περιγράφηκε στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας, μπορούν να παρουσιαστούν οι σχέσεις που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της ειδικής θερμοχωρητικότητας λόγω αυτής της μεταβολής. Πριν από την παρουσίαση αυτών των σχέσεων θα οριστούν δύο βοηθητικά μεγέθη, δηλαδή:

$T_c = \frac{T_l + T_s}{2}$ η οποία συμβολίζει τη θερμοκρασία στο μέσο του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης του PCM.

$b = T_l - T_s$ το οποίο συμβολίζει το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του PCM.

Άρα οι γενικές σχέσεις της ειδικής θερμοχωρητικότητας διαμορφώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} & \bullet T \leq T_s \\ & Cp_{eff} = Cp_s \end{aligned} \quad (10.1)$$

$$\begin{aligned} & \bullet T_s \leq T \leq T_c \\ & Cp_{eff}(T) = 4(H - bCp_s)(T - T_s) / b^2 + Cp_s \end{aligned} \quad (10.2)$$

$$\begin{aligned} & \bullet T_c \leq T \leq T_l \\ & Cp_{eff}(T) = 4(bCp_l - H)(T - T_s - \frac{b}{2}) / b^2 + \frac{2H}{b} - Cp_l \end{aligned} \quad (10.3)$$

$$\begin{aligned} & \bullet T \geq T_l \\ & Cp_{eff} = Cp_l \end{aligned} \quad (10.4)$$

Μείγμα PCM-σοβά

Όπως ήδη αναφέρθηκε στη διαστρωμάτωση του τοίχου, θα χρησιμοποιηθεί μείγμα PCM-σοβά. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να αναφερθούν τα χαρακτηριστικά του σοβά και επίσης ποιά είναι αυτά τα μεγέθη της μελέτης που επηρεάζονται. Άρα για το σοβά λαμβάνεται:

Πυκνότητα $\rho = 1860 \text{ Kg} / \text{m}^3$.

Ειδική θερμοχωρητικότητα $C_p = 835 \text{ J} / \text{Kg}^\circ \text{C}$.

Επομένως στις εξισώσεις που υπεισέρχονται τα μεγέθη της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας θα υπολογίζονται κάθε φορά για το μείγμα ανάλογα με το ποσοστό που κατέχουν το PCM και ο σοβάς, σύμφωνα με τους ακόλουθους τύπους, όπου X_{PCM} και $X_{σοβά}$ τα ποσοστά % των δύο υλικών:

$$\rho_{\text{μείγματος}} = X_{PCM} \rho_{PCM} + X_{σοβά} \rho_{σοβά} \quad (11)$$

$$C_{p\text{μείγματος}} = X_{PCM} C_{p\text{eff}}(T) + X_{σοβά} C_{p\text{σοβά}} \quad (12)$$

Συντελεστής συναγωγής

Για το συντελεστή συναγωγής μεταξύ εσωτερικού τοίχου και εσωτερικού περιβάλλοντος, χρησιμοποιείται η τιμή που προτείνει η ASHRAE, δηλαδή:

$$h_{in} = 8 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ }^\circ \text{C}$$

Εξήγηση μαθηματικού μοντέλου

Οι βασικές παραδοχές που υπεισέρχονται εδώ είναι:

- Θεωρείται αδιαβατικό όριο μεταξύ του στρώματος PCM-σοβά και του στρώματος της μόνωσης, ώστε να μην υπάρχει κάποιου είδους συναλλαγή θερμότητας.
- Θεωρείται σταθερή και ομοιόμορφη θερμοκρασία μέσα στο δωμάτιο.
- Ομοιόμορφη θερμοκρασία στο στρώμα PCM-σοβά.

Η αρχική μορφή της βασικής εξίσωσης η οποία θα εφαρμοστεί είναι η εξής:

$$(G_T \times 3600) A_f - (Q_{\text{προσφερόμενο}} \times 3600) = m C_p (T_{PCM}^1 - T_{PCM}^0) \quad (13)$$

Όπου από την ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου που υπολογίζεται από τις προηγούμενες σχέσεις εδώ θα αντικατασταθεί ένα ποσοστό 85%

αυτής. Αυτό προκύπτει μετά από την παραδοχή ότι υπάρχει ένα ποσοστό της τάξης του 10% της ακτινοβολίας που προσπίπτει στον υαλοπίνακα που απορροφάται από αυτόν και επίσης υπάρχει ένα ποσοστό της τάξης του 5% της ακτινοβολίας που εισέρχεται στο χώρο που απορροφάται από τον αέρα του εσωτερικού περιβάλλοντος. Άρα τελικά στον τοίχο μελέτης προσπίπτει το 85% της αρχικής υπολογισθείσας ακτινοβολίας.

Επίσης ως $Q_{\text{προσφερόμενο}}$ αναφέρεται η θερμότητα που προσφέρει το υλικό αλλαγής φάσης στον εσωτερικό χώρο, οπότε δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Q_{\text{προσφερόμενο}} = h_{in}A(T_{PCM}^0 - T_{\text{δωματίου}}) \quad (14)$$

Η μάζα του μείγματος θα εκφραστεί ως γινόμενο της πυκνότητας του μείγματος και του όγκου που καταλαμβάνει. Άρα:

$$m = \rho_{\text{μείγματος}} V_{\text{μείγματος}} \quad (15)$$

όπου για την πυκνότητα έχει ήδη αναφερθεί ο υπολογισμός της, ενώ ο όγκος υπολογίζεται από τα αρχικά αριθμητικά δεδομένα:

$$V_{\text{μείγματος}} = 0,04 \times 3 \times 2,5 = 0,3m^3$$

Τέλος στη θερμοκρασία του PCM οι δείκτες 0 και 1 υποδηλώνουν τη μηδενική και την επόμενη στιγμή. Άρα η τελική εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$(0,85G_{TAf} \times 3600) - (h_{in}A(T_{PCM}^0 - T_{\text{δωματίου}}) \times 3600) = \rho_{\text{μείγματος}} V_{\text{μείγματος}} C_{p_{\text{μείγματος}}} (T_{PCM}^1 - T_{PCM}^0) \quad (16)$$

Κεφάλαιο 7ο: Παραμετρικές μελέτες

7.1 Παραμετρική μελέτη ως προς την περιεκτικότητα PCM το 24ωρο

• Επιλογή ημέρας:

21 Ιανουαρίου $\rightarrow D = 21$, $n = 21 \rightarrow$ από εξίσωση (4) $\delta = -20,138$

Διάρκεια ημέρας, ώρες δύσης και ανατολής, από εξισώσεις (7,8,9) αντίστοιχα:

$$N = 9,783hrs$$

$$time_{\text{δύσης}} = 16,891hrs$$

$$time_{\text{ανατολής}} = 7,109hrs$$

• Υπολογισμός G_b , G_d :

Υπολογίζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα τα G_b , G_d σύμφωνα με τις εξισώσεις (1) και (2) και με τα δεδομένα από τον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 7.1.1 : G_b, G_d για 21 Ιανουαρίου		
Time t	G_b	G_d
hrs LST	(KW/m ²)	(KW/m ²)
07:00	-0,0348	-0,0486
08:00	-0,0054	0,0221
09:00	0,0231	0,0893
10:00	0,0717	0,1442
11:00	0,1155	0,1767
12:00	0,1485	0,1871
13:00	0,1596	0,172
14:00	0,1572	0,1339
15:00	0,1179	0,0949
16:00	0,0540	0,0606
17:00	-0,0345	0,0296
18:00	-0,1202	-0,0322

Αμέσως μετά τον υπολογισμό του G_T ακολουθεί ο πίνακας τιμών και τα διαγράμματα των G_b και G_d συναρτήσεως της ώρας.

•Υπολογισμός G_T :

Υπολογίζεται αναλυτικά με τη βοήθεια του παρακάτω πίνακα το G_T σύμφωνα με την εξίσωση (6) αφού πρώτα υπολογιστούν το ω από την εξίσωση (5) και το R_b από την εξίσωση (3) για τις ώρες 09:00-16:00 όπου $G_b, G_d > 0$.

Πίνακας 7.1.2 : G_T για 21 Ιανουαρίου για 09:00-16:00			
Time t	ω	R_b	G_T
hrs LST			(W/m^2)
09:00	-45	2,1823	106,290
10:00	-30	1,7981	222,675
11:00	-15	1,6485	307,976
12:00	0	1,6071	365,738
13:00	15	1,6485	382,214
14:00	30	1,7981	378,664
15:00	45	2,1823	326,091
16:00	60	3,5401	232,742

Οπότε τελικά για όλες τις ώρες του 24ώρου η G_T δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

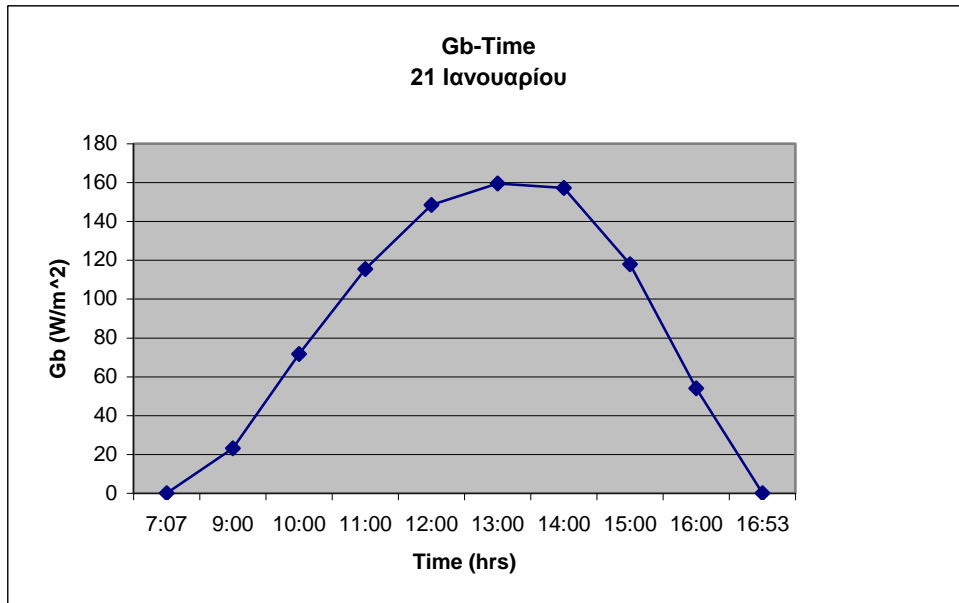
Πίνακας 7.1.3 : G_T για 21 Ιανουαρίου για όλο το 24ωρο			
Time t	G_T	Time t	G_T
hrs LST	(W/m^2)	hrs LST	(W/m^2)
06:00	0	18:00	0
07:00	0	19:00	0
08:00	0	20:00	0
09:00	106,290	21:00	0
10:00	222,675	22:00	0
11:00	307,976	23:00	0
12:00	365,738	24:00	0
13:00	382,214	01:00	0
14:00	378,664	02:00	0
15:00	326,091	03:00	0

16:00	232,742	04:00	0
17:00	0	05:00	0

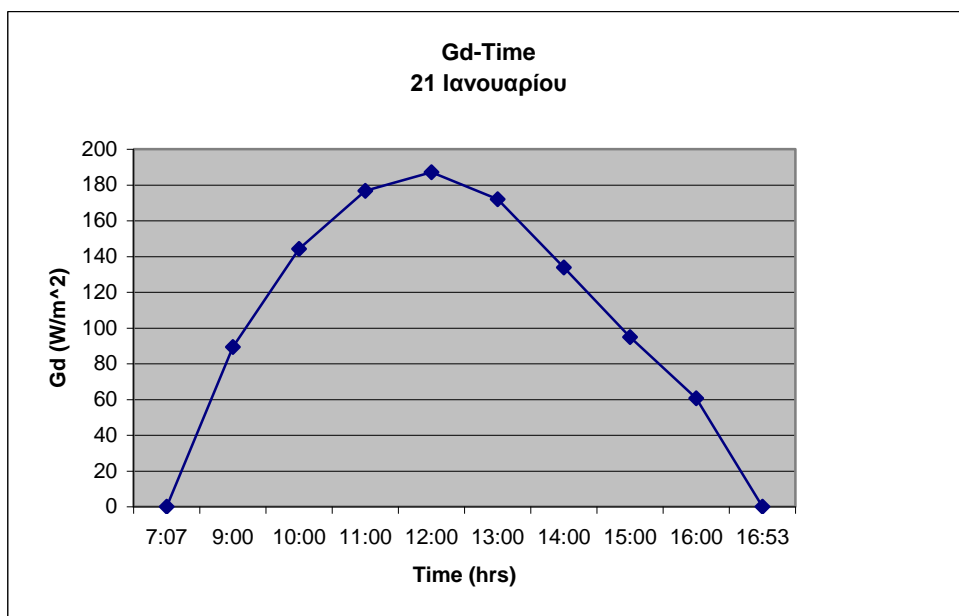
Ακολουθεί ο πίνακας τιμών και τα διαγράμματα των G_b, G_d και G_T συναρτήσει της ώρας. Πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιούνται οι ώρες δύσης και ανατολής και επίσης γίνονται δεκτές οι τιμές για τις ώρες όπου $G_b, G_d > 0$. Όπως είναι φανερό από τους πίνακες υπάρχουν περιπτώσεις που τυχαίνει για την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία, για κάποια ώρα, να προκύπτει αποδεκτή τιμή για την μία και μη αποδεκτή τιμή για την άλλη. Όμως προκειμένου να υπάρξει ομοιομορφία στα διαγράμματα γίνεται η παραπάνω θεώρηση.

Πίνακας 7.1.4 : G_b, G_d, G_T για 21 Ιανουαρίου από $time_{δύσης}$ μέχρι $time_{ανατολής}$			
Time t	G_b	G_d	G_T
hrs LST	(W/m^2)	(W/m^2)	(W/m^2)
07:07	0	0	0
09:00	23,107	89,257	106,290
10:00	71,736	144,193	222,675
11:00	115,512	176,672	307,976
12:00	148,480	187,122	365,738
13:00	159,575	171,994	382,214
14:00	157,181	133,874	378,664
15:00	117,937	94,878	326,091
16:00	53,952	60,584	232,742
16:53	0	0	0

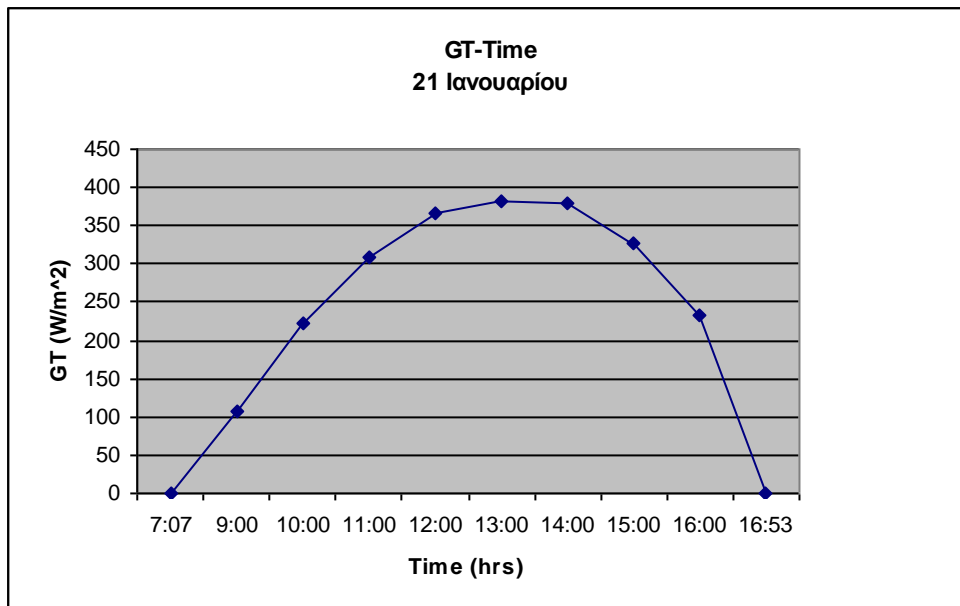
Άρα τα διαγράμματα προκύπτουν ως εξής:



Σχήμα 7.1.1: Μεταβολή της αμέσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιανουαρίου.



Σχήμα 7.1.2: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιανουαρίου.



Σχήμα 7.1.3: Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιανουαρίου.

•Επιλογή PCM

Στον πίνακα που ακολουθεί καταχωρούνται τα χαρακτηριστικά του PCM που χρησιμοποιείται σε αυτήν την εφαρμογή:

T_s	C	15
T_l	C	26
ρ	Kg/m ³	1019
H	J/Kg	132100
T_c	C	20,5
b		11
C_{ps}	J/Kg C	7000
C_{pl}	J/Kg C	7000

Άρα οι εξισώσεις (10.1-10.4) μετασχηματίζονται ως εξής:

$$\bullet T \leq 15$$

$$C_{p_{eff}} = 7000$$

$$\bullet 15 \leq T \leq 20,5$$

$$C_{p_{eff}}(T) = 4(132100 - 11 \times 7000)(T - 15) / 11^2 + 7000$$

ή

$$Cp_{eff}(T) = 1821,488(T - 15) + 7000$$

$$\bullet 20,5 \leq T \leq 26$$

$$Cp_{eff}(T) = 4(11 \times 7000 - 132100)(T - 15 - \frac{11}{2}) / 11^2 + \frac{2 \times 132100}{11} - 7000$$

ή

$$Cp_{eff}(T) = -1821,488(T - 20,5) + 17018,18$$

$$\bullet T \geq 26$$

$$Cp_{eff} = 7000$$

•Επιλογή ποσοστών PCM-σοβά

Στην παρούσα μελέτη θα εξεταστούν όλα τα πιθανά ποσοστά PCM οπότε στον παρακάτω πίνακα δίνονται η πυκνότητα του μείγματος ρ από την σχέση (11) και η ειδική θερμοχωρητικότητα του μείγματος Cp από την σχέση (12) ανάλογα και με το $Cp_{eff}(T)$. Σημειώνεται ότι τα χαρακτηριστικά του σοβά έχουν ήδη δοθεί καθώς παραμένουν σταθερά. Άρα:

Πίνακας 7.1.6 : $\rho_{μείγματος}$, $Cp_{μείγματος}$ για όλα τα πιθανά ποσοστά σοβά-PCM				
ΧPCM	Χσοβά	$\rho_{μείγματος}$	$Cp_{μείγματος}$	
%	%	Kg/m ³	J/Kg C	
0	100	1860	$T \leq 15$	835
			$15 \leq T \leq 20,5$	835
			$20,5 \leq T \leq 26$	835
			$T \geq 26$	835
10	90	1775,9	$T \leq 15$	1451,5
			$15 \leq T \leq 20,5$	$182,1488(T-15)+1451,5$
			$20,5 \leq T \leq 26$	$-182,1488(T-20,5)+2453,318$
			$T \geq 26$	1451,5
20	80	1691,8	$T \leq 15$	2068
			$15 \leq T \leq 20,5$	$364,2976(T-15)+2068$
			$20,5 \leq T \leq 26$	$-364,2976(T-20,5)+4071,636$
			$T \geq 26$	2068
30	70	1607,7	$T \leq 15$	2684,5
			$15 \leq T \leq 20,5$	$546,4464(T-15)+2684,5$
			$20,5 \leq T \leq 26$	$-546,4464(T-20,5)+5689,954$
			$T \geq 26$	2684,5
40	60	1523,6	$T \leq 15$	3301
			$15 \leq T \leq 20,5$	$728,5952(T-15)+3301$
			$20,5 \leq T \leq 26$	$-728,5952(T-20,5)+7308,272$
			$T \geq 26$	3301

50	50	1439,5	$T \leq 15$	3917,5
			$15 \leq T \leq 20,5$	$910,744(T-15)+3917,5$
			$20,5 \leq T \leq 26$	$-910,744(T-20,5)+8926,59$
			$T \geq 26$	3917,5
60	40	1355,4	$T \leq 15$	4534
			$15 \leq T \leq 20,5$	$1092,8928(T-15)+4534$
			$20,5 \leq T \leq 26$	$-1092,8928(T-20,5)+10544,908$
			$T \geq 26$	4534
70	30	1271,3	$T \leq 15$	5150,5
			$15 \leq T \leq 20,5$	$1275,0416(T-15)+5150,5$
			$20,5 \leq T \leq 26$	$-1275,0416(T-20,5)+12163,226$
			$T \geq 26$	5150,5
80	20	1187,2	$T \leq 15$	5767
			$15 \leq T \leq 20,5$	$1457,1904(T-15)+5767$
			$20,5 \leq T \leq 26$	$-1457,1904(T-20,5)+13781,544$
			$T \geq 26$	5767
90	10	1103,1	$T \leq 15$	6383,5
			$15 \leq T \leq 20,5$	$1639,3392(T-15)+6383,5$
			$20,5 \leq T \leq 26$	$-1639,3392(T-20,5)+15399,862$
			$T \geq 26$	6383,5
100	0	1019	$T \leq 15$	7000
			$15 \leq T \leq 20,5$	$1821,488(T-15)+7000$
			$20,5 \leq T \leq 26$	$-1821,488(T-20,5)+17018,18$
			$T \geq 26$	7000

Πρέπει να αναφερθεί ότι περιεκτικότητα PCM 100% δεν μπορεί να εφαρμοστεί πρακτικά. Ωστόσο κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί και αυτή η περίπτωση χάριν πληρότητας της παραμετρικής μελέτης.

•Επιλογή $T_{δομ}$ και T_{PCM}^0

Επιλέγεται για αυτήν την μελέτη:

$$T_{δομ} = 20$$

$$T_{PCM}^0 = 27$$

Αναφέρεται εδώ ότι η επιλογή μίας αρχικής τιμής για τη θερμοκρασία είναι εντελώς αυθαίρετη, αφού έχει εξασφαλιστεί η ανεξαρτησία του τελικού αποτελέσματος από αυτήν την αρχική υπόθεση.

•Εύρεση T_{PCM}

Η σχέση (16) επιλυμένη ως προς T_{PCM}^1 και έχοντας αντικαταστήσει τα μεγέθη που παραμένουν σταθερά σε όλη τη διαδικασία της παρούσας μελέτης, γίνεται:

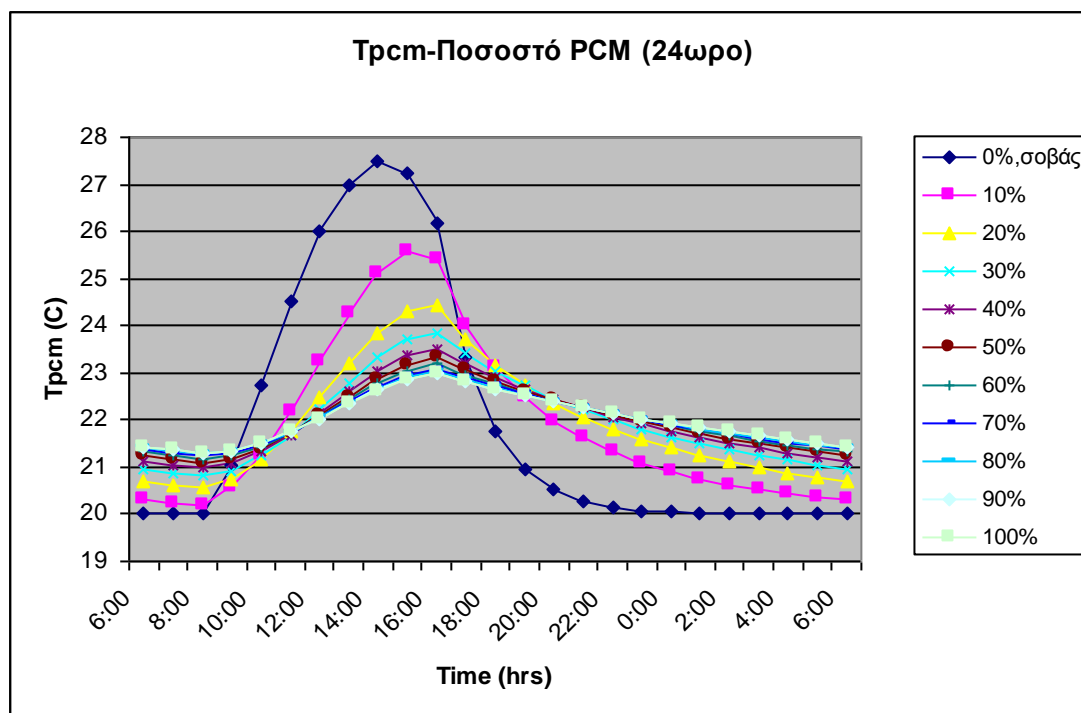
$$T_{PCM}^1 = T_{PCM}^0 + \frac{1}{\rho_{μείγματος} \times 0,3 \times C_{p_{μείγματος}}} ((0,85 \times G_T \times 1,5 \times 3600) - (8 \times 7,5(T_{PCM}^0 - 20) \times 3600))$$

ή

$$T_{PCM}^1 = T_{PCM}^0 + \frac{1}{\rho_{μείγματος} \times 0,3 \times C_{p_{μείγματος}}} (4590G_T - 216000(T_{PCM}^0 - 20)) \quad (7.1.1)$$

Άρα εφαρμόζεται η παραπάνω εξίσωση έντεκα φορές για όλα τα πιθανά ποσοστά που δίνονται στον Πίνακα 7.1.6. Ξεκινώντας από τις 06:00 λαμβάνεται η τιμή της G_T την αντίστοιχη ώρα από τον Πίνακα 7.1.3, η τιμή της ρ από τον Πίνακα 7.1.6 για το αντίστοιχο ποσοστό, τίθεται $T_{PCM}^0 = 27$, υπολογίζεται η C_p ανάλογα με το αντίστοιχο ποσοστό και τη θερμοκρασία του PCM από τον Πίνακα 7.1.6 και με βήμα μίας ώρας υπολογίζεται η T_{PCM}^1 δηλαδή η θερμοκρασία του PCM στις 07:00. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για όλο το εικοσιτετράωρο. Στη συνέχεια έχοντας ως T_{PCM}^0 τη θερμοκρασία που προέκυψε από την πρώτη επανάληψη για τις 05:00, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία μέχρι να συγκλίνουν οι τιμές των θερμοκρασιών του PCM που προκύπτουν.

Ακολουθεί το διάγραμμα που παρουσιάζει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM με την ώρα για όλα τα πιθανά ποσοστά:



Σχήμα 7.1.4: Μεταβολή θερμοκρασίας PCM το 24ωρο ανάλογα με το ποσοστό PCM για 21 Ιανουαρίου.

Από το διάγραμμα μπορούν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα. Καταρχήν πρέπει να τονιστεί ότι στο ποσοστό 0% το υλικό που χρησιμοποιείται είναι μόνο σοβάς. Επομένως, η θερμοκρασία της οποίας φαίνεται η μεταβολή είναι η θερμοκρασία που αναπτύσσει ο σοβάς υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο λόγος που περιέχεται αυτή η περίπτωση στο παραπάνω διάγραμμα είναι ακριβώς για να γίνει σαφές ότι όταν το υλικό είναι αποκλειστικά σοβάς, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι πολύ μεγαλύτερες από την περίπτωση που χρησιμοποιείται PCM. Αυτό συμβαίνει διότι όλη η θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για αύξηση της θερμοκρασίας (αισθητή θερμότητα), ενώ στην περίπτωση του PCM μέρος της ακτινοβολίας που προσπίπτει χρησιμοποιείται για την αλλαγή φάσης (λανθάνουσα θερμότητα).

Η επόμενη παρατήρηση αφορά τα ποσοστά PCM από 10%-100%. Το μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών παρατηρείται στο πιο μικρό ποσοστό, δηλαδή στο 10% με μέγιστη θερμοκρασία 25,57°C και ελάχιστη θερμοκρασία 20,21°C. Αυξανόμενου του ποσοστού του PCM το εύρος θερμοκρασιών μειώνεται αφού μειώνεται η μέγιστη θερμοκρασία φτάνοντας τους 22,99°C για ποσοστό 90% και 22,97°C για την περίπτωση του καθαρού PCM, ενώ η ελάχιστη αυξάνεται κατά περίπου 1°C, φτάνοντας τους 21,3°C για ποσοστό 90% ή τους

21,31°C για καθαρό PCM. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η περίπτωση του καθαρού PCM είναι θεωρητική, αλλά δείχνει με τη βοήθεια και του υπόλοιπου διαγράμματος ότι όταν χρησιμοποιείται μεγάλη ποσότητα PCM, τότε αφού προσπίπτει η ίδια ηλιακή ακτινοβολία το PCM δεν καταφέρνει να αναπτύξει υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα για το αν η αποθηκευμένη θερμότητα στο PCM είναι μεγαλύτερη στις μικρές ή στις μεγάλες περιεκτικότητες. Αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό αν παρατηρηθεί η αρχική εξίσωση, δηλαδή η εξίσωση (16):

$$(0,85GTA_f \times 3600) - (h_{in}A(T_{PCM}^0 - T_{\delta\omega\mu\alpha\tau\iota\omicron\nu}) \times 3600) = \rho_{\mu\epsilon\iota\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma} V_{\mu\epsilon\iota\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma} C_{p\mu\epsilon\iota\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma} (T_{PCM}^1 - T_{PCM}^0)$$

όπου, όταν αυξάνεται η περιεκτικότητα σε PCM ο πρώτος όρος στο αριστερό μέλος μένει σταθερός ενώ ο δεύτερος όρος στο αριστερό μέλος μειώνεται καθώς οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM πέφτουν. Άρα το δεξιό μέλος πρέπει να αυξηθεί. Το γεγονός ότι αυξάνεται το δεύτερο μέλος θα μπορούσε να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι αυξάνεται η αποθηκευόμενη θερμότητα. Αυτό το συμπέρασμα όμως είναι εσφαλμένο διότι η αύξηση αυτή μπορεί να μην είναι ποιοτική, αφού όταν αυξάνεται πολύ η μάζα, το PCM λόγω της μικρής θερμικής αγωγιμότητας κ αρχίζει και λειτουργεί σαν μόνωση και δεν επιτρέπει στην θερμότητα να εισχωρήσει στο εσωτερικό του PCM και να αποθηκευτεί ως ωφέλιμη λανθάνουσα θερμότητα. Επομένως, απαιτείται περαιτέρω έλεγχος για να διαπιστωθεί αν η αποθηκευόμενη θερμότητα είναι περισσότερη στις μικρές ή στις μεγάλες περιεκτικότητες.

Για να διαπιστωθεί αυτό κατασκευάζονται για τρία ποσοστά ενδεικτικά τα διαγράμματα $C_{p\text{eff}} - T_{PCM}$ που θα αποδείξουν τί ποσοστό της ενεργούς καμπύλης καλύπτεται. Για τους πίνακες τιμών που ακολουθούν έχουν χρησιμοποιηθεί η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM για κάθε ποσοστό και οι αντίστοιχες ειδικές θερμοχωρητικότητες που δίνουν, ενώ έχει γίνει παρεμβολή των σημείων της ενεργούς καμπύλης. Μετά τους πίνακες τιμών ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα:

Πίνακας 7.1.7 : $C_{p\text{eff}}$, T_{PCM} για 21 Ιανουαρίου, 10% ποσοστό, για 24ωρο	
T_{PCM}	$C_{p\text{eff}}$
C	J/Kg C

20,21	16488,08
20,5	17018,18
21	16107,44
22	14285,95
23	12464,46
24	10642,98
25	8821,488
25,57	7780,743

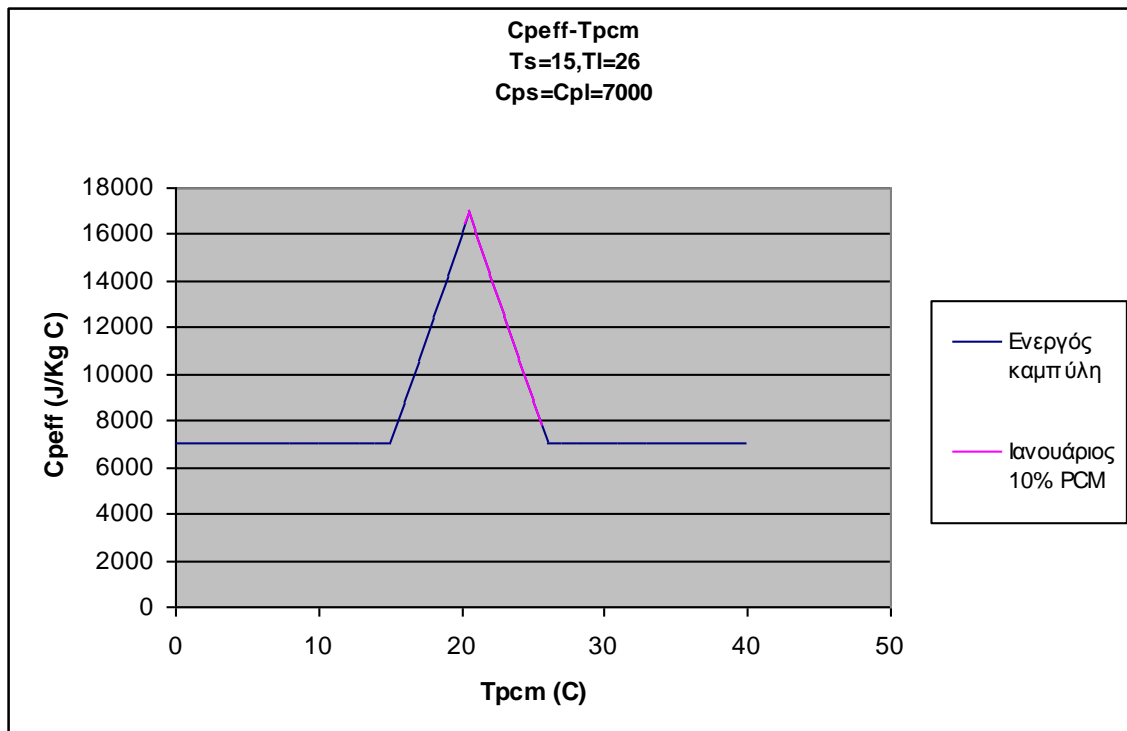
Πίνακας 7.1.8 : C_{peff}, TPCM για 21 Ιανουαρίου, 50% ποσοστό, για 24ωρο

TPCM	C_{peff}
C	J/Kg C
21,1	15930,18
22	14285,95
23	12464,46
23,32	11887,95

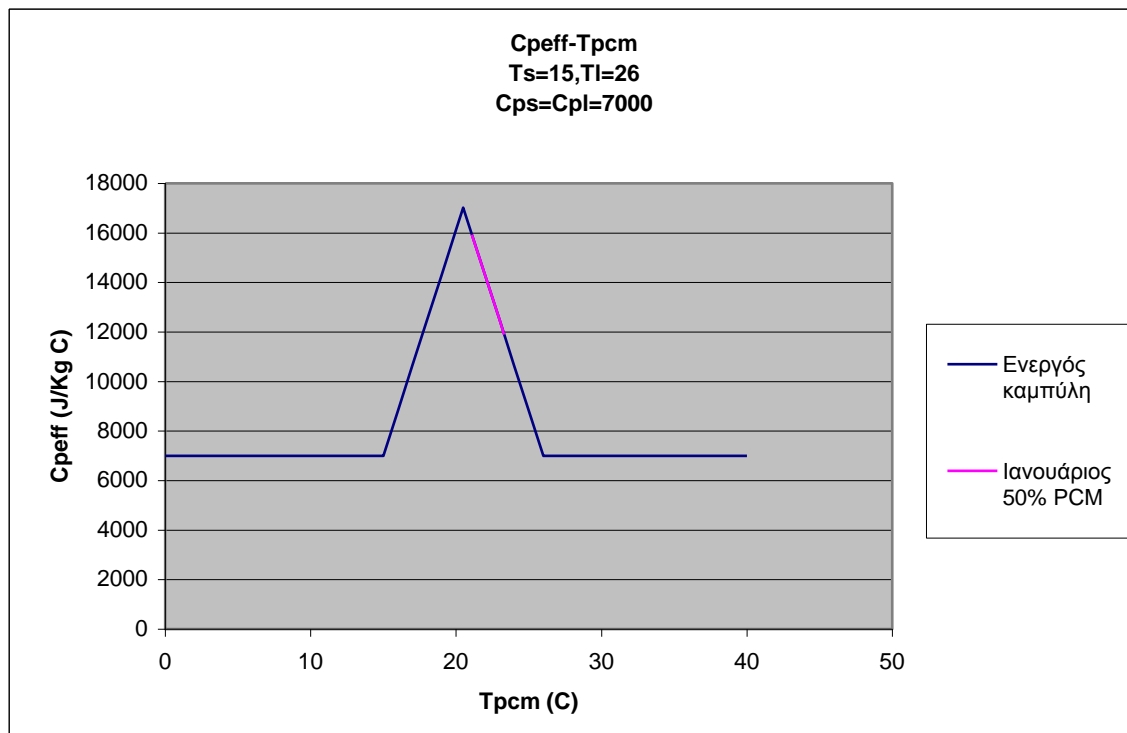
Πίνακας 7.1.9 : C_{peff}, TPCM για 21 Ιανουαρίου, 90% ποσοστό, για 24ωρο

TPCM	C_{peff}
C	J/Kg C
21,3	15567,18
22	14285,95
22,99	12473,96

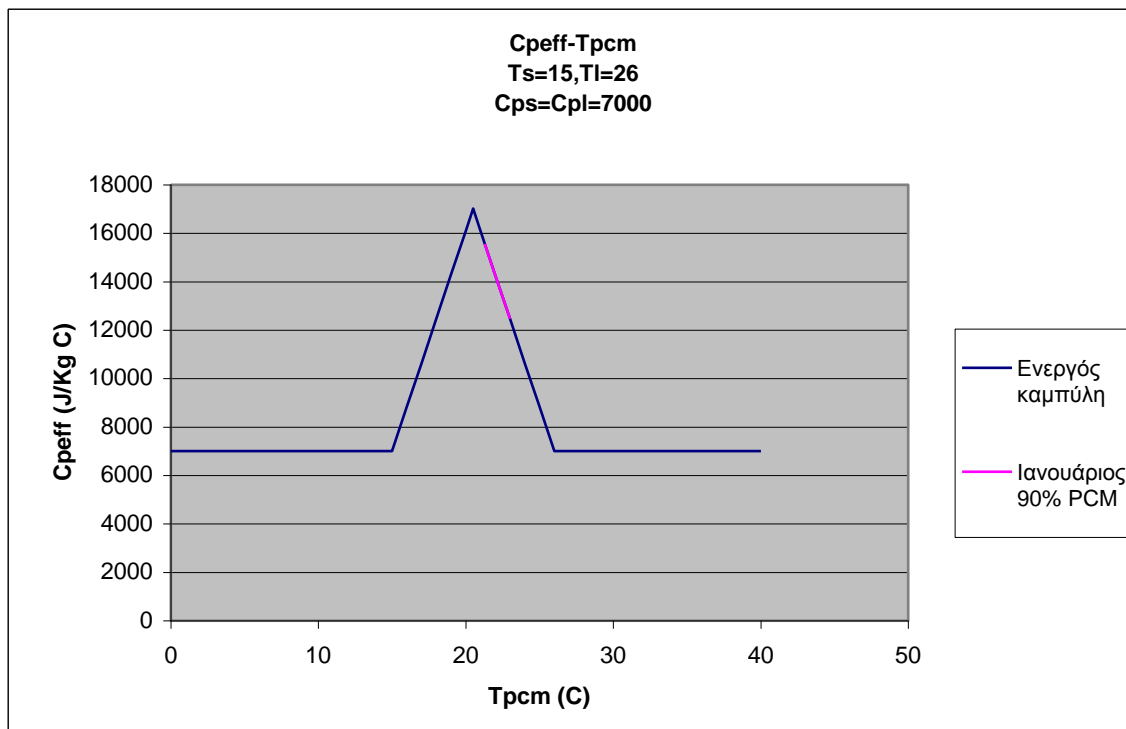
Διαγράμματα:



Σχήμα 7.1.5: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 10% PCM το 24ωρο.



Σχήμα 7.1.6: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 50% PCM το 24ωρο.



Σχήμα 7.1.7: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 90% PCM το 24ωρο.

Όπως είναι εμφανές από τα διαγράμματα, όταν χρησιμοποιείται ένα μικρό ποσοστό PCM, όπως το 10%, πραγματοποιείται καλύτερη εκμετάλλευση του PCM. Αυτό σημαίνει ότι καλύπτεται μεγαλύτερο μέρος του τριγώνου που σχηματίζει η καμπύλη που αντιστοιχεί στο εύρος αλλαγής φάσης. Αν υπολογιστεί και το εμβαδόν κάτω από τις έγχρωμες καμπύλες δίνει την αποθηκευμένη θερμότητα στο PCM. Η θερμότητα αυτή για τις τρεις περιπτώσεις είναι η εξής:

Ιανουάριος με 10% PCM:

$$Q_1 = \text{Εμβαδόν} = ((25,57137 - 20,20898) * 7780,743) + (((25,57137 - 20,20898) + (20,79102 - 20,20898)) * (16488,08 - 7780,743) / 2) + ((20,79102 - 20,20898) * (17018,18 - 16488,08) / 2) = 67757,73 \text{ J / Kg}$$

Ιανουάριος με 50% PCM:

$$Q_2 = \text{Εμβαδόν} = (15930,18 + 11887,95) * (23,31651 - 21,09732) / 2 = 30866,86 \text{ J / Kg}$$

Ιανουάριος με 90% PCM:

$$Q_3 = \text{Εμβαδόν} = (15567,18 + 12473,96) * (22,99479 - 21,2966) / 2 = 23809,59 \text{ J / Kg}$$

Άρα αποδεικνύεται ότι οι μικρές περιεκτικότητες είναι προτιμότερες γιατί επιτρέπουν στο PCM να αποθηκεύει περισσότερη θερμότητα, την οποία αποδίδει αργότερα με κάποια χρονική καθυστέρηση ώστε να θερμανθεί ο χώρος.

7.2 Παραμετρική μελέτη ως προς την περιεκτικότητα PCM το 48ωρο

•Επιλογή ημέρας:

Παραμένει η ίδια, δηλαδή 21 Ιανουαρίου και με τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην 1^η Παραμετρική μελέτη.

•Υπολογισμός G_b, G_d :

Από τη στιγμή που παραμένει η ίδια μέρα τα μεγέθη G_b και G_d δεν αλλάζουν, οπότε ισχύει ο Πίνακας 7.1.1, όπως δίνεται στην 1^η Παραμετρική μελέτη.

•Υπολογισμός G_T :

Αφου δεν αλλάζουν τα μεγέθη G_b και G_d , ο υπολογισμός του G_T για τις ώρες 09:00-16:00 όπου $G_b, G_d > 0$ δεν αλλάζει, οπότε ισχύει ο Πίνακας 7.1.2, όπως δίνεται στην 1^η Παραμετρική μελέτη. Όμως ακολουθεί ένας πίνακας που δείχνει πώς διαμορφώνεται η G_T σε ολόκληρο το σαρανταοκτάωρο. Η αλλαγή που πραγματοποιείται σε αυτή την μελέτη είναι ότι η ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου παραμένει σταθερή, όπως δίνεται στον Πίνακα 7.1.3 της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης για το πρώτο εικοσιτετράωρο. Το δεύτερο εικοσιτετράωρο θεωρείται ότι πρόκειται για μία νεφοσκεπή ημέρα, οπότε για τις ώρες 09:00-16:00 όπου $G_b, G_d > 0$, λαμβάνεται το 50% της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου που έχει υπολογιστεί για το πρώτο εικοσιτετράωρο, ενώ για όλες τις υπόλοιπες λαμβάνεται μηδενική ηλιακή ακτινοβολία. Άρα ο συνολικός πίνακας που δείχνει την μεταβολή της G_T συναρτήσει της ώρας για το σαρανταοκτάωρο είναι ο εξής:

Πίνακας 7.2.1 : G_T για 21 Ιανουαρίου για όλο το 48ωρο							
Time t	G_T	Time t	G_T	Time t	G_T	Time t	G_T
hrs LST	W/m ²	hrs LST	W/m ²	hrs LST	W/m ²	hrs LST	W/m ²
06:00	0	18:00	0	06:00	0	18:00	0
07:00	0	19:00	0	07:00	0	19:00	0
08:00	0	20:00	0	08:00	0	20:00	0
09:00	106,290	21:00	0	09:00	53,145	21:00	0

10:00	222,675	22:00	0	10:00	111,337	22:00	0
11:00	307,976	23:00	0	11:00	153,988	23:00	0
12:00	365,738	24:00	0	12:00	182,869	24:00	0
13:00	382,214	01:00	0	13:00	191,107	01:00	0
14:00	378,664	02:00	0	14:00	189,332	02:00	0
15:00	326,091	03:00	0	15:00	163,046	03:00	0
16:00	232,742	04:00	0	16:00	116,371	04:00	0
17:00	0	05:00	0	17:00	0	05:00	0

•Επιλογή PCM

Για αυτή την μελέτη θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο υλικό αλλαγής φάσης, οπότε τα χαρακτηριστικά του παραμένουν σταθερά, άρα ισχύει ο Πίνακας 7.1.5, όπως δίνεται στην 1^η Παραμετρική μελέτη. Επομένως και οι εξισώσεις (10.1-10.4) παίρνουν ακριβώς την ίδια μορφή όπως παρουσιάζονται στην 1^η Παραμετρική μελέτη.

•Επιλογή ποσοστών PCM-σοβά

Και στην παρούσα μελέτη θα εξεταστούν όλα τα πιθανά ποσοστά PCM-σοβά. Άρα ισχύει και ο Πίνακας 7.1.6, όπως δίνεται στην 1^η Παραμετρική μελέτη, ο οποίος παρουσιάζει πως διαμορφώνονται οι πυκνότητες και οι ειδικές θερμοχωρητικότητες του μείγματος ανάλογα με τα ποσοστά PCM-σοβά και τις θερμοκρασίες του PCM.

•Επιλογή $T_{δομ}$ και T_{PCM}^0

Και αυτά τα μέγεθη θα μείνουν σταθερά, ώστε να μπορεί να γίνει μία σωστή σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του εικοσιτετραώρου. Άρα:

$$T_{δομ} = 20$$

$$T_{PCM}^0 = 27$$

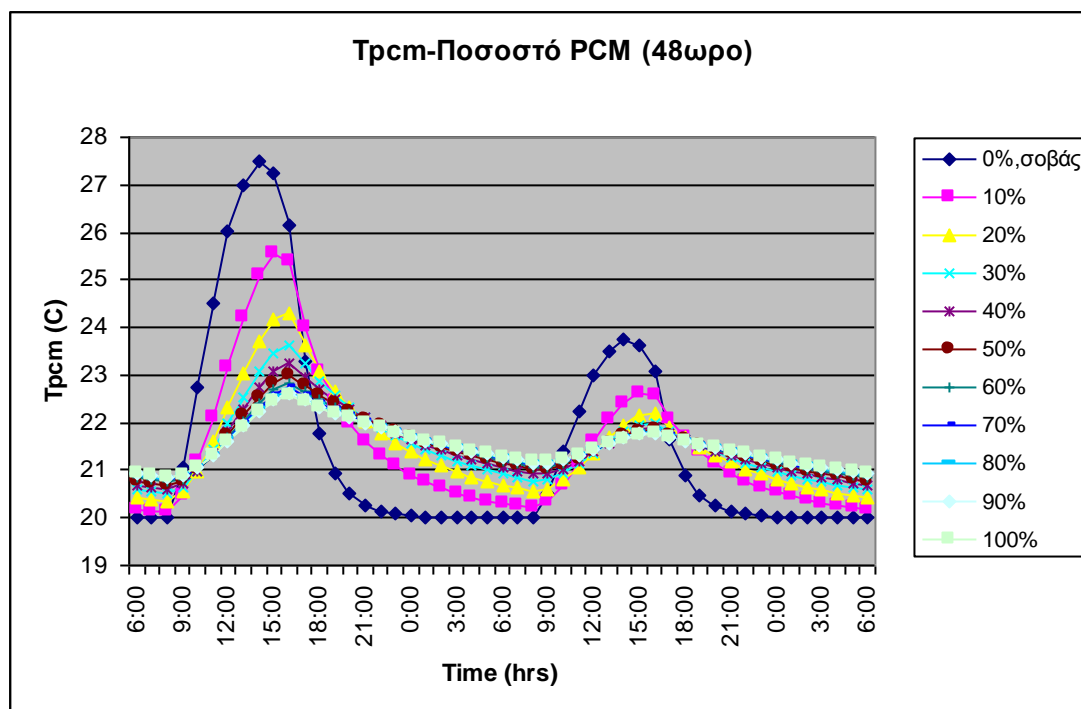
•Εύρεση T_{PCM}

Η σχέση η οποία εφαρμόζεται παραμένει η ίδια δηλαδή η σχέση (7.1.1):

$$T_{PCM}^1 = T_{PCM}^0 + \frac{1}{\rho_{μείγματος} \times 0,3 \times C_{p_{μείγματος}}} (4590G_T - 216000(T_{PCM}^0 - 20))$$

Απλώς εδώ θα αναφερθεί πάλι η διαδικασία, καθώς υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις σε σχέση με την 1^η Παραμετρική μελέτη. Εφαρμόζεται η παραπάνω εξίσωση έντεκα φορές για όλα τα πιθανά ποσοστά που δίνονται στον Πίνακα 7.1.6. Ξεκινώντας από τις 06:00 λαμβάνεται η τιμή της G_T την αντίστοιχη ώρα από τον Πίνακα 7.2.1, η τιμή της ρ από τον Πίνακα 7.1.6 για το αντίστοιχο ποσοστό, τίθεται $T_{PCM}^0 = 27$, υπολογίζεται η C_p ανάλογα με το αντίστοιχο ποσοστό και τη θερμοκρασία του PCM από τον Πίνακα 7.1.6 και με βήμα μίας ώρας υπολογίζεται η T_{PCM}^1 δηλαδή η θερμοκρασία του PCM στις 07:00. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για όλο το σαρανταοκτάωρο, όπου τώρα ως αρχική τιμή για την θερμοκρασία του PCM στις 06:00 του δεύτερου 24ώρου λαμβάνεται η τιμή της θερμοκρασίας που προκύπτει για τις 05:00 του πρώτου 24ώρου. Στη συνέχεια έχοντας ως T_{PCM}^0 τη θερμοκρασία που προέκυψε από την πρώτη επανάληψη για τις 05:00 του πρώτου 48ώρου, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία μέχρι να συγκλίνουν οι τιμές των θερμοκρασιών του PCM που προκύπτουν.

Ακολουθεί το διάγραμμα που παρουσιάζει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM με την ώρα για όλα τα πιθανά ποσοστά:



Σχήμα 7.2.1: Μεταβολή θερμοκρασίας PCM το 48ωρο ανάλογα με το ποσοστό PCM.

Εδώ δεν θα επαναληφθούν οι παρατηρήσεις σχετικά με τη συμπεριφορά της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του πρώτου εικοσιτετράωρου, διότι παραμένουν οι ίδιες όπως στην 1^η Παραμετρική μελέτη. Αυτό που έχει σημασία είναι να συγκριθεί καταρχήν το πρώτο με το δεύτερο εικοσιτετράωρο. Όπως αναμενόταν, τα μέγιστα της θερμοκρασίας για όλα τα ποσοστά PCM μειώθηκαν το δεύτερο εικοσιτετράωρο, αφού η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει είναι τώρα το 50% της αρχικής. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπήρξε αξιόλογη μεταβολή στα ελάχιστα των θερμοκρασιών μεταξύ πρώτου και δεύτερου εικοσιτετράωρου, ωστόσο παρατηρήθηκε μία μικρή αυξητική τάση των ελαχίστων το δεύτερο εικοσιτετράωρο. Επίσης, όσον αφορά τις παρατηρήσεις, αυξανόμενων των περιεκτικότητων οι διαφορές στα μέγιστα της θερμοκρασίας μεταξύ πρώτου και δεύτερου εικοσιτετράωρου είναι μικρότερες, παρατήρηση η οποία είναι προφανής αφού ούτως ή άλλως έχει ήδη αναφερθεί ότι στις μεγάλες περιεκτικότητες αναπτύσσονται ακόμα και στο πρώτο εικοσιτετράωρο χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να αποδείξει αν το PCM μπορεί να είναι ωφέλιμο ακόμα και σε περιπτώσεις όπου λόγω νεφοσκεπούς ημέρας, η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά μειωμένη. Για να αποδειχθεί κάτι τέτοιο κατασκευάζονται πάλι τα διαγράμματα $C_{peff} - T_{PCM}$ και υπολογίζεται το εμβαδόν κάτω από τις καμπύλες με όμοιο τρόπο όπως στην 1^η Παραμετρική μελέτη. Ακολουθούν οι πίνακες τιμών και τα διαγράμματα:

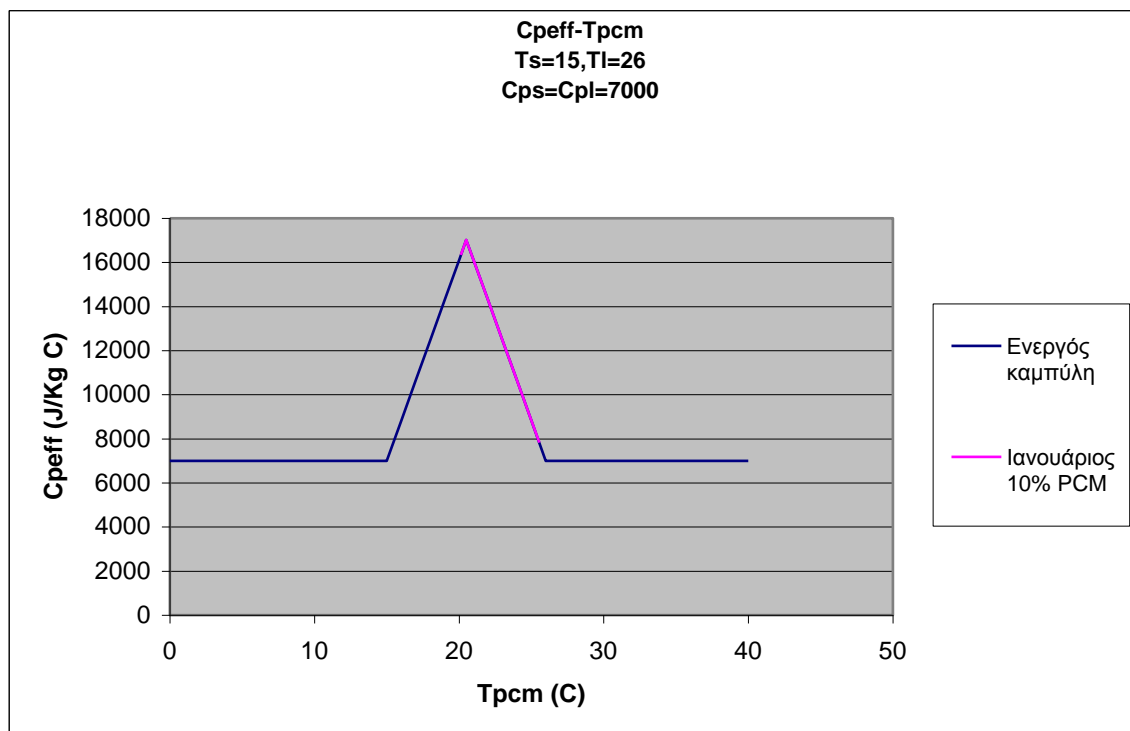
Πίνακας 7.2.2 : C_{peff} , T_{PCM} για 21 Ιανουαρίου, 10% ποσοστό, για 48ωρο	
T_{PCM}	C_{peff}
C	J/Kg C
20,12	16334,45
20,5	17018,18
21	16107,44
22	14285,95
23	12464,46
24	10642,98
25	8821,488
25,54	7833,799

Πίνακας 7.2.3 : C_{peff} , T_{PCM} για 21

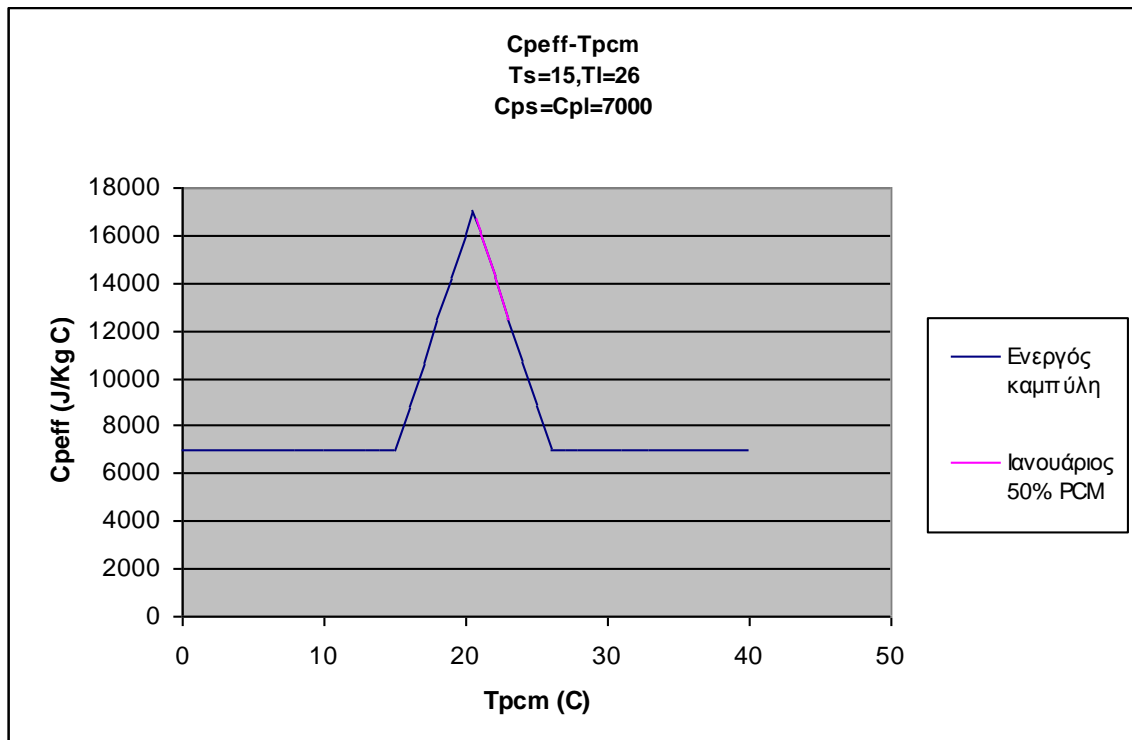
Ιανουαρίου, 50% ποσοστό, για 48ωρο	
ΤPCM	C _{peff}
C	J/Kg C
20,69	16675,36
21	16107,44
22	14285,95
23	12464,46
23,00004	12464,39

Πίνακας 7.2.4 : C _{peff} , ΤPCM για 21 Ιανουαρίου, 90% ποσοστό, για 48ωρο	
ΤPCM	C _{peff}
C	J/Kg C
20,84	16398,54
21	16107,44
22	14285,95
22,61	13167,97

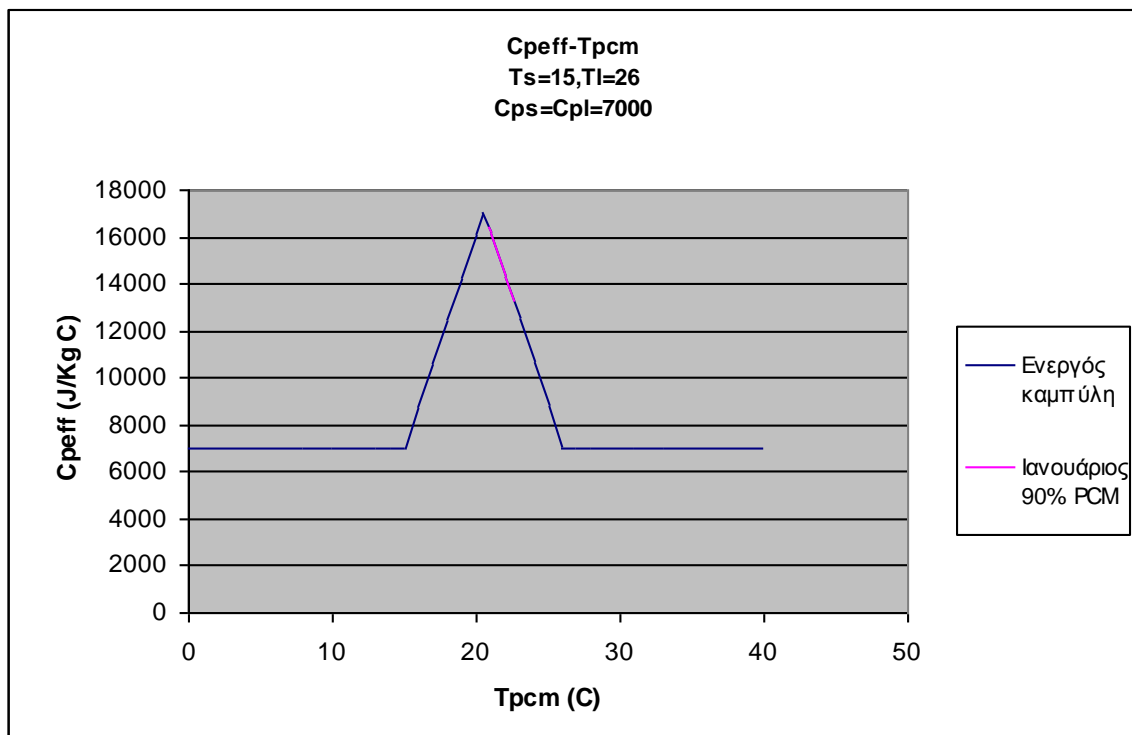
Διαγράμματα:



Σχήμα 7.2.2: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 10% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 7.2.3: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 50% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 7.2.4: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 90% PCM το 48ωρο.

Τα διαγράμματα δεν παρουσιάζουν αξιόλογη διαφορά με τα αντίστοιχα διαγράμματα της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης εκ πρώτης όψεως. Άρα υπολογίζεται και η αποθηκευόμενη θερμότητα από τα εμβαδόν κάτω από τις έγχρωμες καμπύλες. Οι τύποι είναι όμοιοι με την 1^η Παραμετρική μελέτη οπότε δεν αναφέρονται ξανά εδώ, παρά μόνο τα αποτελέσματα:

$$Q_1 = 68914,61 J / Kg$$

$$Q_2 = 33863,07 J / Kg$$

$$Q_3 = 26219,29 J / Kg$$

Συμπερασματικά φαίνεται από τις θερμότητες ότι είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του εικοσιτετραώρου της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης, αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό αν συνυπολογιστεί μάλιστα ότι πρόκειται για τον διπλάσιο χρόνο ο οποίος πρέπει να καλυφθεί. Άρα φυσικά η απόδοση του συστήματος μειώνεται στην περίπτωση που υπάρχει επίδραση από μία νεφοσκεπή ημέρα, αλλά εφόσον αυτή ακολουθεί μετά από μία ημέρα με πλήρη ηλιακή ακτινοβολία, το σύστημα με το PCM μπορεί να παραμείνει οριακά ωφέλιμο.

7.3 Παραμετρική μελέτη ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου

•Επιλογή ημέρας:

Παραμένει η ίδια, δηλαδή 21 Ιανουαρίου και με τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην 1^η Παραμετρική μελέτη.

•Υπολογισμός G_b, G_d :

Από τη στιγμή που παραμένει η ίδια μέρα τα μεγέθη G_b και G_d δεν αλλάζουν, οπότε ισχύει ο Πίνακας 7.1.1, όπως δίνεται στην 1^η Παραμετρική μελέτη.

•Υπολογισμός G_T :

Αφου δεν αλλάζουν τα μεγέθη G_b και G_d , ο υπολογισμός του G_T για τις ώρες 09:00-16:00 όπου $G_b, G_d > 0$ δεν αλλάζει, οπότε ισχύει ο Πίνακας 7.1.2, όπως δίνεται στην 1^η Παραμετρική μελέτη. Επίσης, επειδή σε αυτή την μελέτη δεν μεταβάλλεται και το χρονικό διάστημα στο οποίο παρατηρείται η μεταβολή της θερμοκρασίας, άρα η διαμόρφωση των τιμών της G_T όπως δίνεται στον Πίνακα 7.1.3 παραμένει η ίδια.

•Επιλογή PCM

Για αυτή την μελέτη θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο υλικό αλλαγής φάσης, οπότε τα χαρακτηριστικά του παραμένουν σταθερά, άρα ισχύει ο Πίνακας 7.1.5, όπως δίνεται στην 1^η Παραμετρική μελέτη.Επομένως και οι εξισώσεις (10.1-10.4) παίρνουν ακριβώς την ίδια μορφή όπως παρουσιάζονται στην 1^η Παραμετρική μελέτη.

•Επιλογή ποσοστών PCM-σοβά

Στις παραμετρικές μελέτες που θα ακολουθήσουν, επιλέγονται ενδεικτικά τρία ακραία ποσοστά PCM-σοβά, ώστε να υπάρχει σωστή εποπτεία των διαφορών μεταξύ των περιεκτικοτήτων.Επομένως, από τον Πίνακα 7.1.6 θα χρησιμοποιηθούν τα ποσοστά 10%,50% και 90% και οι αντίστοιχες τιμές και εξισώσεις.

•Επιλογή $T_{\delta\omega\mu}$ και T_{PCM}^0

Όπως είναι προφανές σε αυτήν την μελέτη σκοπός είναι να παρατηρηθεί η επίδραση της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου στις θερμοκρασίες του PCM που αναπτύσσονται.Επομένως, πραγματοποιούνται δύο εφαρμογές με δύο τιμές για την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου και στη συνέχεια συγκρίνονται με την αρχική θερμοκρασία που είχε χρησιμοποιηθεί, δηλαδή τους 20°C.Άρα οι δύο τιμές θα είναι:

$$T_{\delta\omega\mu 1} = 17 \text{ και } T_{\delta\omega\mu 2} = 23$$

$$T_{PCM}^0 = 27$$

•Εύρεση T_{PCM}

Η σχέση η οποία εφαρμόζεται αλλάζει μόνο ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου, δηλαδή:

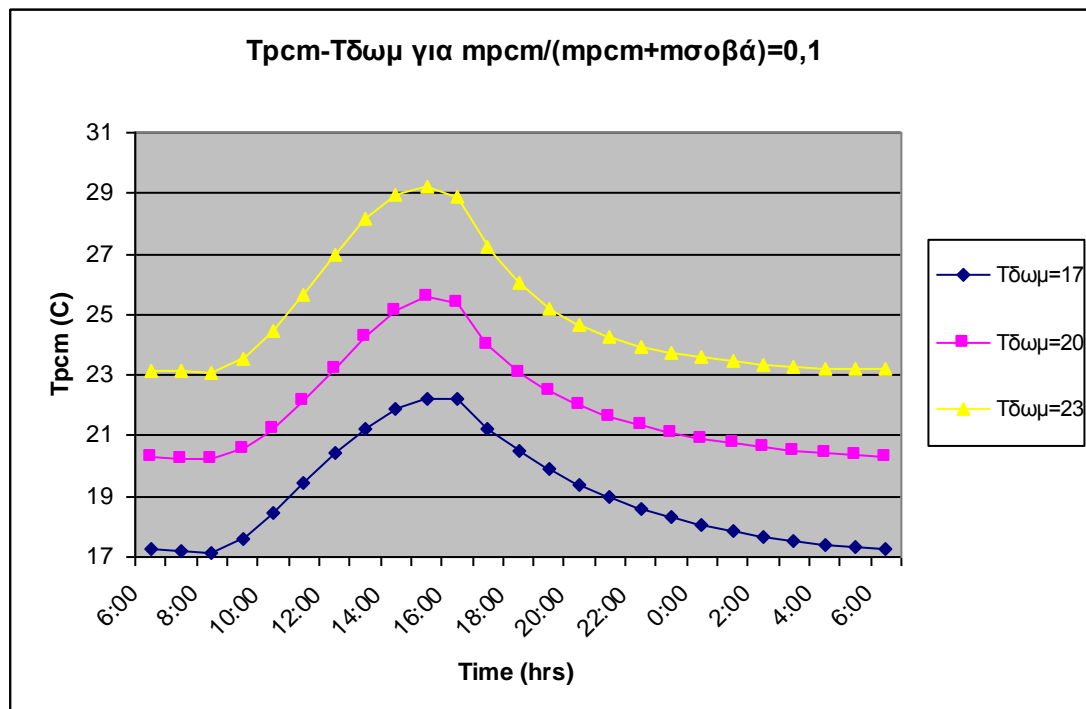
$$T_{PCM}^1 = T_{PCM}^0 + \frac{1}{\rho_{\mu\epsilon\iota\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma} \times 0,3 \times C p_{\mu\epsilon\iota\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma}} (4590G_T - 216000(T_{PCM}^0 - 17)) \quad (7.3.1)$$

και

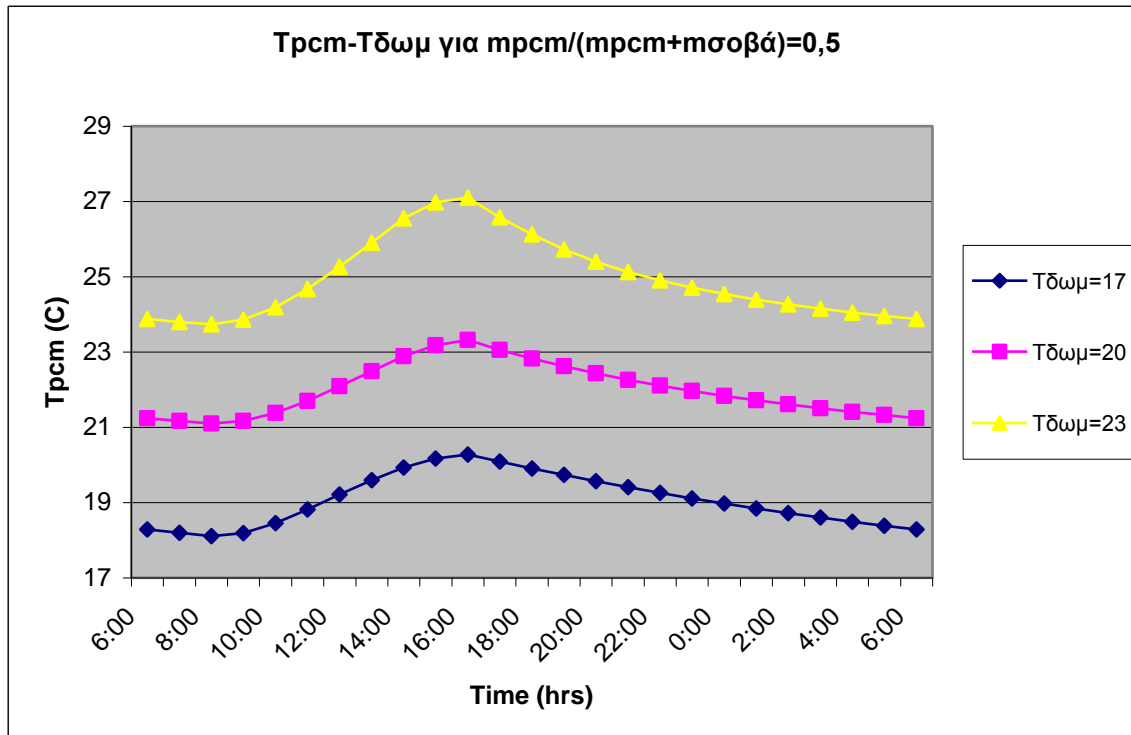
$$T_{PCM}^1 = T_{PCM}^0 + \frac{1}{\rho_{\mu\epsilon\iota\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma} \times 0,3 \times C p_{\mu\epsilon\iota\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma}} (4590G_T - 216000(T_{PCM}^0 - 23)) \quad (7.3.2)$$

Η διαδικασία εφαρμογής της εξίσωσης παραμένει ακριβώς η ίδια με αυτή που περιγράφεται στην 1^η Παραμετρική μελέτη με τη διαφορά ότι εδώ η κάθε μία

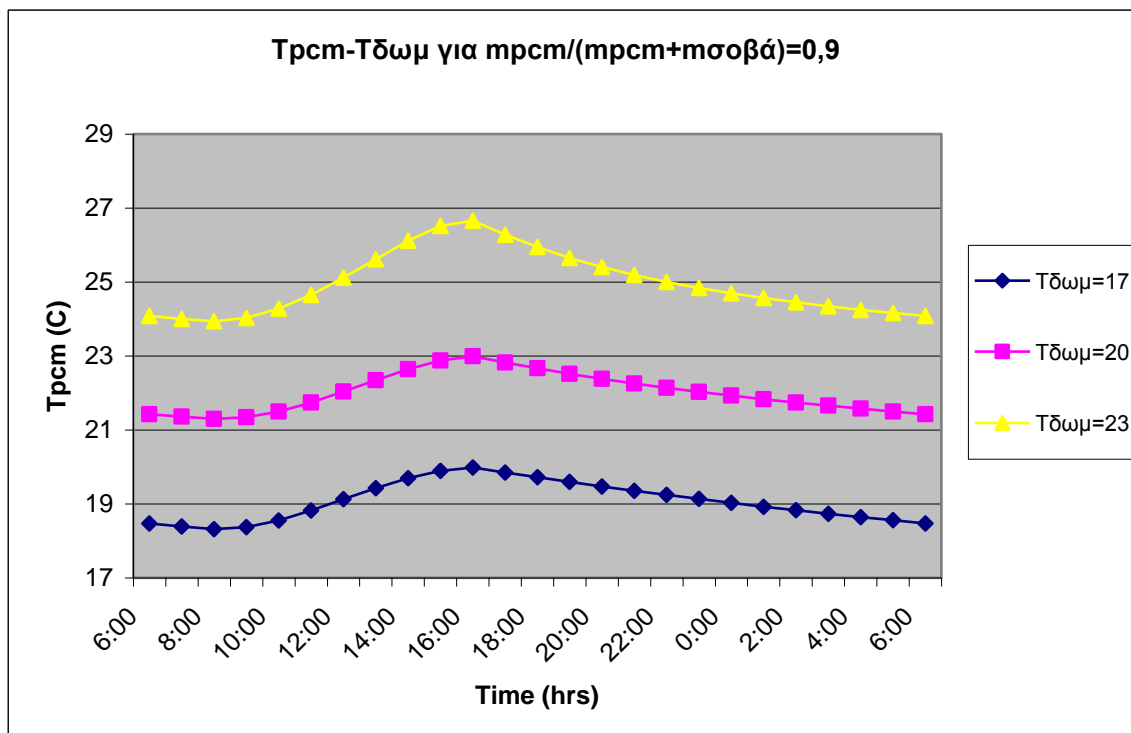
από τις παραπάνω εξισώσεις εφαρμόζεται τρεις φορές, μία φορά για κάθε ποσοστό. Κατά αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα της μεταβολής της θερμοκρασίας. Σε αυτήν την μελέτη έχει προτιμηθεί να γίνουν τρία διαγράμματα, ένα για κάθε ποσοστό, με διακριτές καμπύλες που αντιστοιχούν στις τρεις διαφορετικές τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας δωματίου:



Σχήμα 7.3.1: Μεταβολή θερμοκρασίας PCM το 24ωρο ανάλογα με την εσωτερική θερμοκρασία δωματίου για 21 Ιανουαρίου για ποσοστό PCM 10%.



Σχήμα 7.3.2: Μεταβολή θερμοκρασίας PCM το 24ωρο ανάλογα με την εσωτερική θερμοκρασία δωματίου για 21 Ιανουαρίου για ποσοστό PCM 50%.



Σχήμα 7.3.3: Μεταβολή θερμοκρασίας PCM το 24ωρο ανάλογα με την εσωτερική θερμοκρασία δωματίου για 21 Ιανουαρίου για ποσοστό PCM 90%.

Όπως ήταν αναμενόμενο και στα τρία ποσοστά όταν στο δωμάτιο επικρατεί η μεγαλύτερη εσωτερική θερμοκρασία, αναπτύσσονται και υψηλότερες θερμοκρασίες στο PCM. Επίσης, όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα μειώνονται οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM σε κάθε περίπτωση εσωτερικής θερμοκρασίας δωματίου, στοιχείο που ήδη έχει παρατηρηθεί και έχει αναλυθεί. Αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό αν παρατηρηθεί πάλι η αρχική εξίσωση, δηλαδή η (16):

$$(0,85G_{TAf} \times 3600) - (h_{in}A(T_{PCM}^0 - T_{\delta\omega\mu\alpha\tau\iota\omicron\upsilon}) \times 3600) = \rho_{\mu\epsilon\iota\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma} V_{\mu\epsilon\iota\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma} C_{p\mu\epsilon\iota\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma} (T_{PCM}^1 - T_{PCM}^0)$$

όπου εδώ όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του δωματίου, ο πρώτος όρος του αριστερού μέλους παραμένει σταθερός ενώ ο δεύτερος όρος μειώνεται. Επομένως το δεύτερο μέλος της εξίσωσης αυξάνεται. Αν, λοιπόν, είναι η περίπτωση του σταθερού ποσοστού 10%, ούτε η μάζα μεταβάλλεται, επομένως ούτε η πυκνότητα του μείγματος, ούτε η ειδική θερμοχωρητικότητα του μείγματος, οπότε η αύξηση του δεξιού μέλους της εξίσωσης οδηγεί απευθείας σε αύξηση της θερμοκρασίας του PCM. Το PCM, δηλαδή, καλείται να δώσει λιγότερη θερμότητα στο δωμάτιο, οπότε αποθηκεύει μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας. Η αποθηκευόμενη αυτή θερμότητα μάλιστα, εφόσον βέβαια επιλεγεί μία σχετικά μικρή περιεκτικότητα στην οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί παρατηρείται καλύτερη συμπεριφορά, είναι και ποιοτικά καλύτερη αφού εδώ δεν υπεισέρχεται το θέμα της μεγάλης μάζας, άρα και της μικρής θερμικής αγωγιμότητας, οπότε το PCM θα αποδώσει με χρονική καθυστέρηση περισσότερη θερμότητα για να θερμανθεί ο χώρος σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση μίας χαμηλότερης εσωτερικής θερμοκρασίας δωματίου.

7.4 Παραμετρική μελέτη ως προς τον μήνα

•Επιλογή ημέρας:

Σε αυτήν την μελέτη σκοπός είναι να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του PCM σε διαφορετικές ημέρες του χρόνου. Για να είναι αντιπροσωπευτική η σύγκριση επιλέγεται η ίδια ημέρα άλλων δύο μηνών, δηλαδή 21 Νοεμβρίου που είναι στην αρχή της χειμερινής περιόδου και 21 Μαρτίου που είναι στο τέλος της χειμερινής περιόδου. Προφανώς δεν υπήρχε λόγος να επιλεγεί κάποια ημέρα της καλοκαιρινής περιόδου, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ υψηλή άρα το

PCM θα είχε σίγουρα αποδοτική συμπεριφορά. Άρα τα χαρακτηριστικά των παραπάνω ημερών είναι τα εξής:

$$21 \text{ Νοεμβρίου} \rightarrow D = 325, n = 325 \rightarrow \text{από εξίσωση (4)} \delta = -20,4415$$

Διάρκεια ημέρας, ώρες δύσης και ανατολής, από τις σχέσεις (7,8,9) αντίστοιχα:

$$N = 9,745 \text{hrs}$$

$$\text{time}_{\text{δύσης}} = 16,873 \text{hrs}$$

$$\text{time}_{\text{ανατολής}} = 7,127 \text{hrs}$$

$$21 \text{ Μαρτίου} \rightarrow D = 80, n = 80 \rightarrow \text{από εξίσωση (4)} \delta = -0,40365$$

Διάρκεια ημέρας, ώρες δύσης και ανατολής, από τις σχέσεις (7,8,9) αντίστοιχα:

$$N = 11,958 \text{hrs}$$

$$\text{time}_{\text{δύσης}} = 17,979 \text{hrs}$$

$$\text{time}_{\text{ανατολής}} = 6,021 \text{hrs}$$

•Υπολογισμός G_b, G_d :

Υπολογίζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα τα G_b, G_d και για τις δύο ημέρες σύμφωνα με τις εξισώσεις (1) και (2) και με τα δεδομένα από τον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 7.4.1 : G_b, G_d για 21 Νοεμβρίου		
Time t	G_b	G_d
hrs LST	KW/m^2	KW/m^2
07:00	-0,0304	-0,0475
08:00	0,0025	0,0262
09:00	0,0364	0,097
10:00	0,0890	0,1554
11:00	0,1388	0,1878
12:00	0,1815	0,1906
13:00	0,194	0,1739
14:00	0,1782	0,1434
15:00	0,1341	0,1084
16:00	0,0577	0,0771
17:00	-0,0362	0,0439
18:00	-0,1267	-0,0224

Πίνακας 7.4.2 : G_b, G_d για 21 Μαρτίου		
Time t	G_b	G_d
hrs LST	KW/m^2	KW/m^2
07:00	0,0012	0,0435
08:00	0,0471	0,1261
09:00	0,1027	0,1963
10:00	0,1699	0,246
11:00	0,2303	0,2684
12:00	0,2807	0,2647
13:00	0,3019	0,2387
14:00	0,2986	0,198
15:00	0,2479	0,16
16:00	0,1748	0,1220
17:00	0,0758	0,0874
18:00	-0,0219	0,0385

Αμέσως μετά τον υπολογισμό του G_T ακολουθεί ο πίνακας τιμών και τα διαγράμματα των G_b και G_d συναρτήσεως της ώρας.

•Υπολογισμός G_T :

21 Νοεμβρίου:

Υπολογίζεται αναλυτικά με τη βοήθεια του παρακάτω πίνακα το G_T σύμφωνα με την εξίσωση (6) αφού πρώτα υπολογιστούν το ω από την εξίσωση (5) και το R_b από την εξίσωση (3) για τις ώρες 08:00-16:00 όπου $G_b, G_d > 0$.

Πίνακας 7.4.3 : G_T για 21 Νοεμβρίου για 08:00-16:00			
Time t	ω	R_b	G_T
hrs LST			W/m^2
08:00	-60	3,6485	25,168
09:00	-45	2,2214	142,606
10:00	-30	1,8232	264,439
11:00	-15	1,6689	358,112
12:00	0	1,6262	427,679

13:00	15	1,6689	447,452
14:00	30	1,8232	428,786
15:00	45	2,2214	376,428
16:00	60	3,6485	262,67

Οπότε τελικά για όλες τις ώρες του 24ώρου η G_T δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7.4.4 : G_T για 21 Νοεμβρίου για όλο το 24ωρο			
Time t	G_T	Time t	G_T
hrs LST	W/m^2	hrs LST	W/m^2
06:00	0	18:00	0
07:00	0	19:00	0
08:00	25,168	20:00	0
09:00	142,606	21:00	0
10:00	264,439	22:00	0
11:00	358,112	23:00	0
12:00	427,679	24:00	0
13:00	447,452	01:00	0
14:00	428,786	02:00	0
15:00	376,428	03:00	0
16:00	262,67	04:00	0
17:00	0	05:00	0

21 Μαρτίου:

Υπολογίζεται αναλυτικά με τη βοήθεια του παρακάτω πίνακα το G_T σύμφωνα με την εξίσωση (6) αφού πρώτα υπολογιστούν το ω από την εξίσωση (5) και το R_b από την εξίσωση (3) για τις ώρες 07:00-17:00 όπου $G_b, G_d > 0$.

Πίνακας 7.4.5 : G_T για 21 Μαρτίου για 07:00-17:00			
Time t	ω	R_b	G_T
hrs LST			W/m^2
07:00	-75	0,8252	27,184

08:00	-60	0,8034	118,199
09:00	-45	0,7966	209,846
10:00	-30	0,7936	299,417
11:00	-15	0,7922	366,516
12:00	0	0,7918	409,158
13:00	15	0,7922	412,626
14:00	30	0,7936	385,591
15:00	45	0,7966	318,207
16:00	60	0,8034	231,122
17:00	75	0,8252	122,607

Οπότε τελικά για όλες τις ώρες του 24ώρου η G_T δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

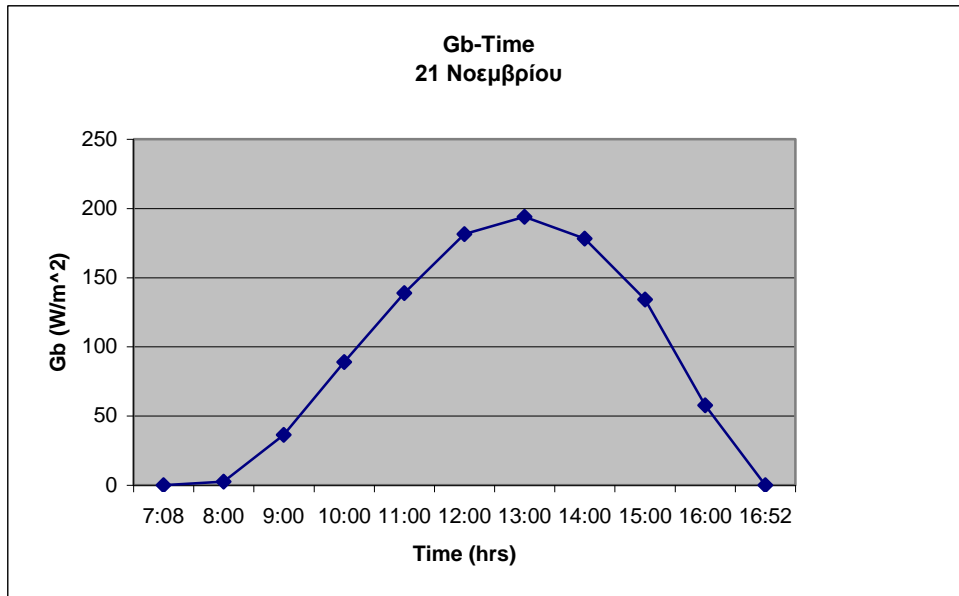
Πίνακας 7.4.6 : G_T για 21 Μαρτίου για όλο το 24ωρο			
Time t	G_T	Time t	G_T
hrs LST	W/m ²	hrs LST	W/m ²
06:00	0	18:00	0
07:00	27,184	19:00	0
08:00	118,199	20:00	0
09:00	209,846	21:00	0
10:00	299,417	22:00	0
11:00	366,516	23:00	0
12:00	409,158	24:00	0
13:00	412,626	01:00	0
14:00	385,591	02:00	0
15:00	318,207	03:00	0
16:00	231,122	04:00	0
17:00	122,607	05:00	0

Ακολουθεί ο πίνακας τιμών και τα διαγράμματα των G_b, G_d και G_T συναρτήσει της ώρας. Πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιούνται οι ώρες δύσης και ανατολής και επίσης γίνονται δεκτές οι τιμές για τις ώρες όπου $G_b, G_d > 0$, σύμφωνα με την ανάλυση που έχει ήδη γίνει στην 1^η Παραμετρική μελέτη.

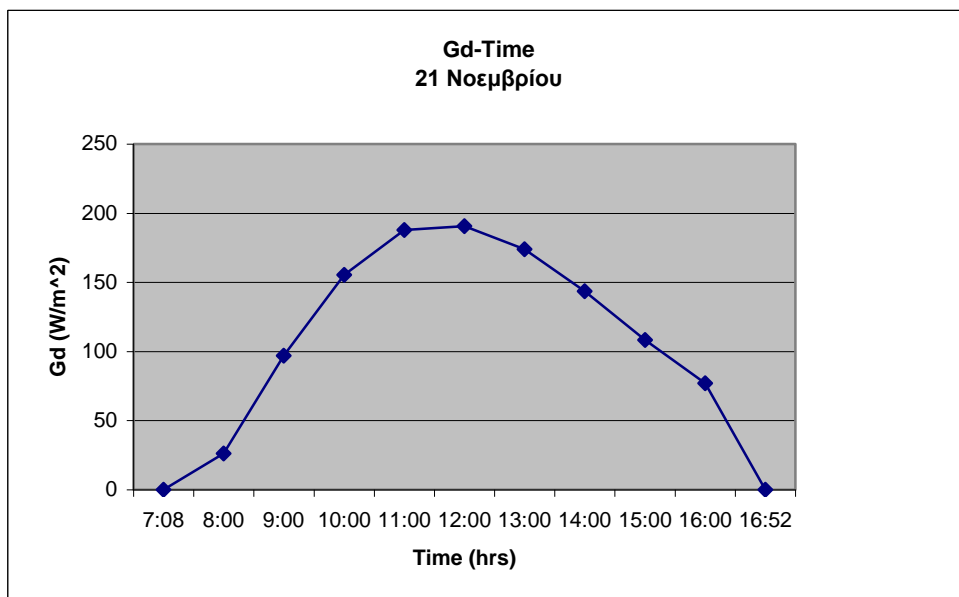
Πίνακας 7.4.7 : Gb, Gd, G _T για 21 Νοεμβρίου από <i>time</i> _{δύσης} μέχρι <i>time</i> _{ανατολής}			
Time t	Gb	Gd	G _T
hrs LST	W/m ²	W/m ²	W/m ²
07:08	0	0	0
08:00	2,523	26,183	25,168
09:00	36,372	96,955	142,606
10:00	89,018	155,397	264,439
11:00	138,765	187,751	358,112
12:00	181,515	190,578	427,679
13:00	193,981	173,864	447,452
14:00	178,203	143,437	428,786
15:00	134,147	108,371	376,428
16:00	57,732	77,105	262,67
16:52	0	0	0

Πίνακας 7.4.8 : Gb, Gd, G _T για 21 Μαρτίου από <i>time</i> _{δύσης} μέχρι <i>time</i> _{ανατολής}			
Time t	Gb	Gd	G _T
Hrs LST	W/m ²	W/m ²	W/m ²
06:01	0	0	0
07:00	1,174	43,495	27,184
08:00	47,059	126,145	118,199
09:00	102,667	196,325	209,846
10:00	169,918	245,959	299,417
11:00	230,26	268,446	366,516
12:00	280,701	264,694	409,158
13:00	301,944	238,696	412,626
14:00	298,564	197,981	385,591
15:00	247,862	159,958	318,207
16:00	174,805	122,015	231,122
17:00	75,837	87,405	122,608
17:59	0	0	0

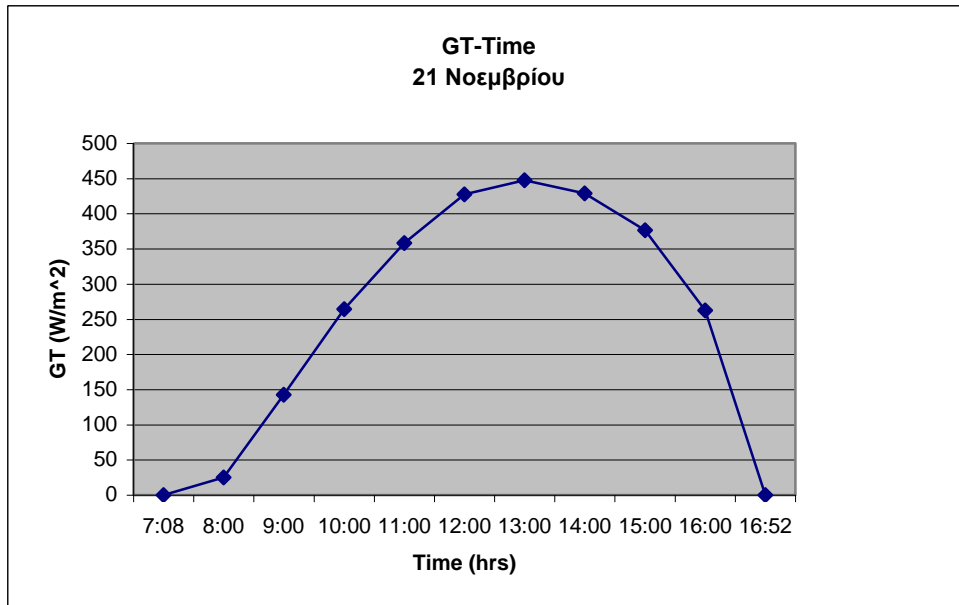
Άρα τα διαγράμματα προκύπτουν ως εξής:



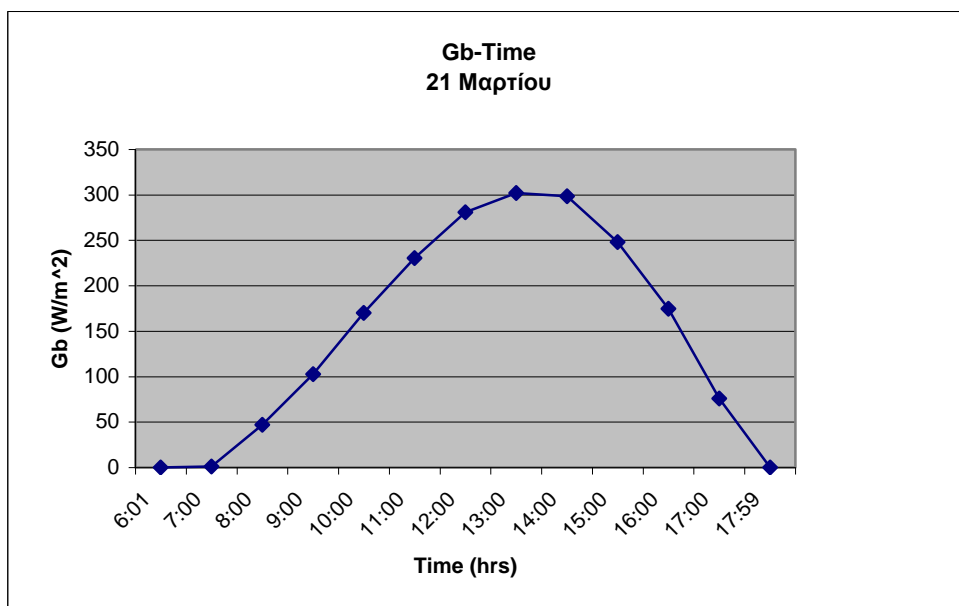
Σχήμα 7.4.1: Μεταβολή της αμέσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Νοεμβρίου.



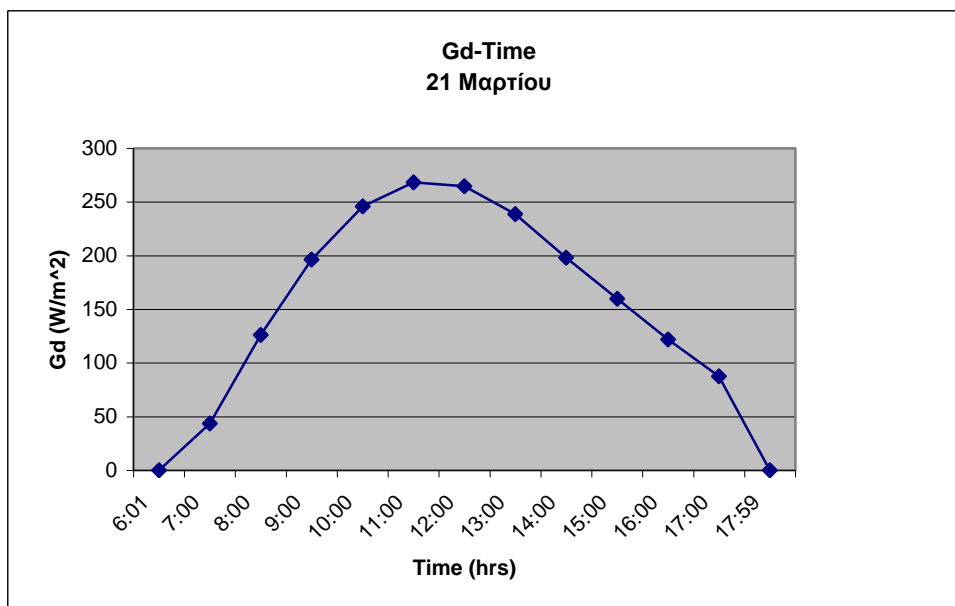
Σχήμα 7.4.2: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Νοεμβρίου.



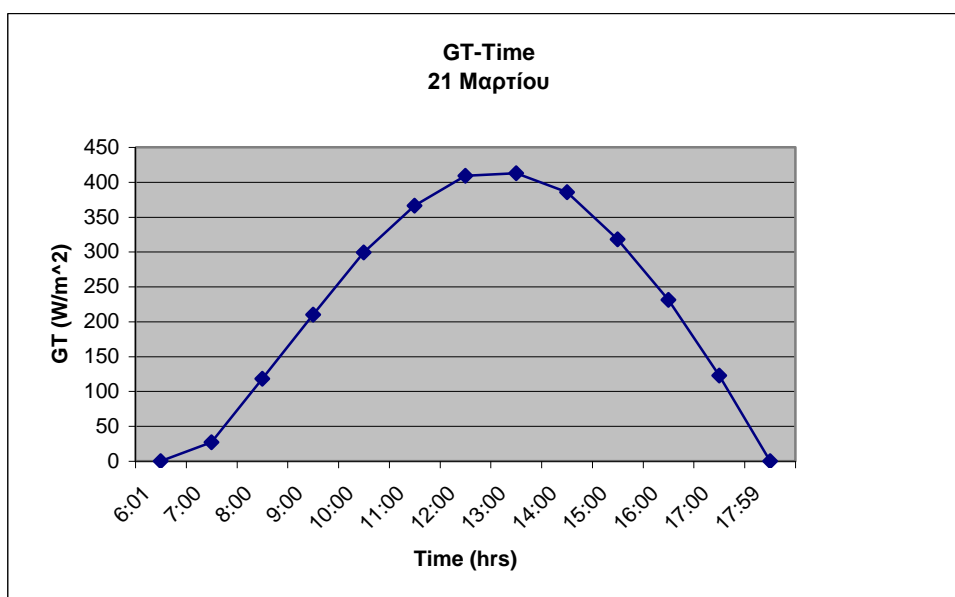
Σχήμα 7.4.3: Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει της ώρας στις 21 Νοεμβρίου.



Σχήμα 7.4.4: Μεταβολή της αμέσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαρτίου.



Σχήμα 7.4.5: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαρτίου.



Σχήμα 7.4.6: Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαρτίου.

•Επιλογή PCM

Για αυτή την μελέτη θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο υλικό αλλαγής φάσης, οπότε τα χαρακτηριστικά του παραμένουν σταθερά, άρα ισχύει ο Πίνακας 7.1.5, όπως δίνεται στην 1^η Παραμετρική μελέτη. Επομένως και οι εξισώσεις (10.1-10.4) παίρνουν ακριβώς την ίδια μορφή όπως παρουσιάζονται στην 1^η Παραμετρική μελέτη.

•Επιλογή ποσοστών PCM-σοβά

Και σε αυτήν την μελέτη επιλέγονται ενδεικτικά τρία ακραία ποσοστά PCM-σοβά, ώστε να υπάρχει σωστή εποπτεία των διαφορών μεταξύ των περιεκτικοτήτων.Επομένως, από τον Πίνακα 7.1.6 θα χρησιμοποιηθούν τα ποσοστά 10%,50% και 90% και οι αντίστοιχες τιμές και εξισώσεις.

•Επιλογή $T_{δομ}$ και T_{PCM}^0

Και αυτά τα μέγεθη θα μείνουν σταθερά, ώστε να μπορεί να γίνει μία σωστή σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του εικοσιτετραώρου.Άρα:

$$T_{δομ} = 20$$

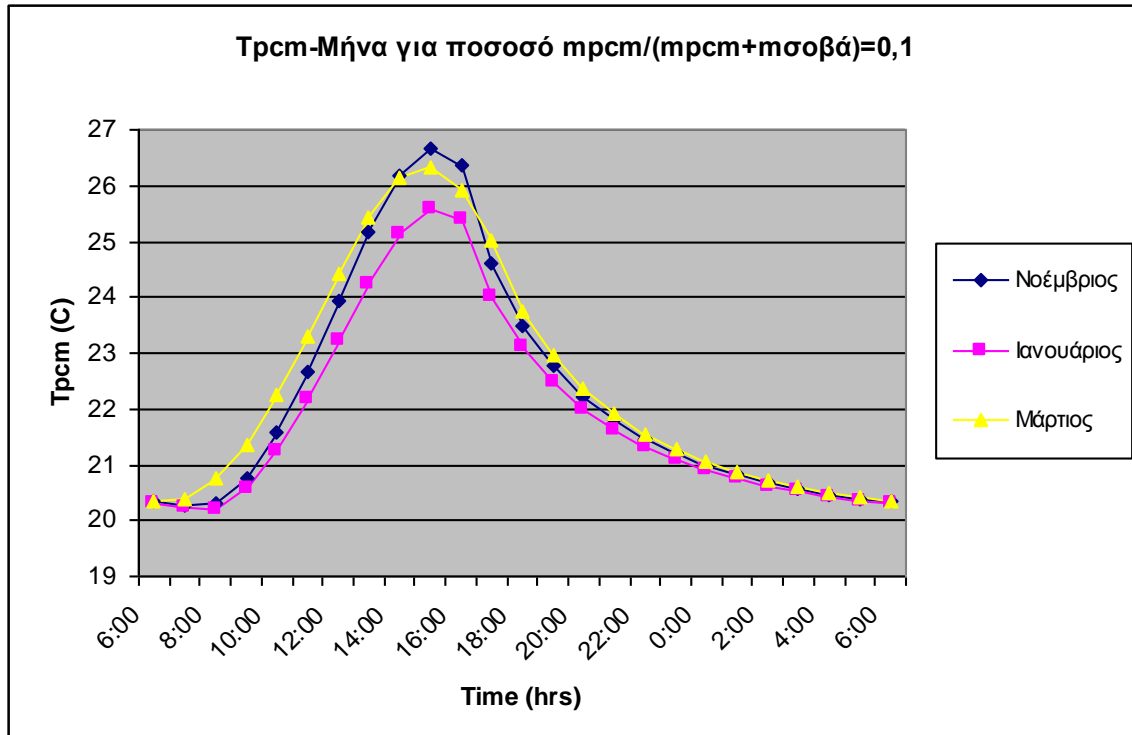
$$T_{PCM}^0 = 27$$

•Εύρεση T_{PCM}

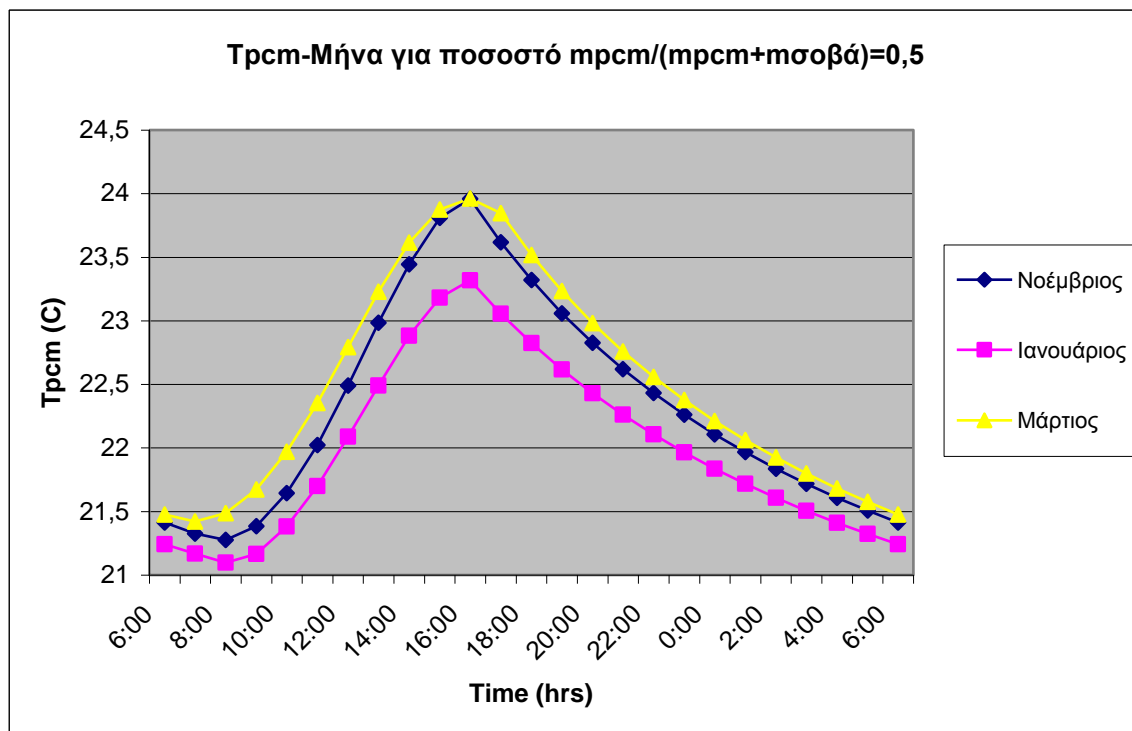
Η σχέση η οποία εφαρμόζεται παραμένει η ίδια, δηλαδή η (7.1.1):

$$T_{PCM}^1 = T_{PCM}^0 + \frac{1}{\rho_{μείγματος} \times 0,3 \times C_{p_{μείγματος}}} (4590G_T - 216000(T_{PCM}^0 - 20))$$

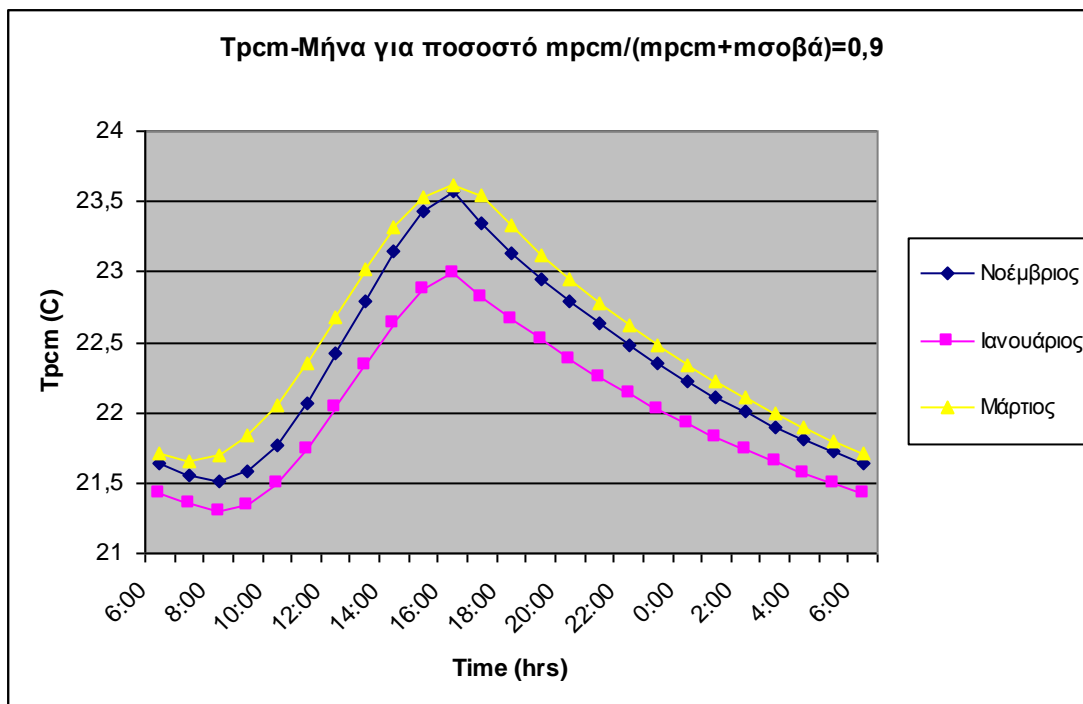
Όπου και η διαδικασία παραμένει η ίδια όπως στην 1^η Παραμετρική μελέτη με το εικοσιτετράωρο, με μόνη διαφορά ότι η εξίσωση εφαρμόζεται τρεις φορές για τις 21 Νοεμβρίου και τρεις φορές για τις 21 Μαρτίου.Επίσης, η G_T λαμβάνεται από τον Πίνακα 7.4.4 για τις 21 Νοεμβρίου και από τον Πίνακα 7.4.6 για τις 21 Μαρτίου.Επειδή σκοπός αυτής της μελέτης είναι να γίνει η σύγκριση των διαφορετικών μηνών και της αντίστοιχης συμπεριφοράς του PCM ακολουθούν τρία διαγράμματα, ένα για κάθε ποσοστό, στα οποία οι καμπύλες αφορούν τις τρεις ημέρες των τριών μηνών του Νοεμβρίου, του Ιανουαρίου και του Μαρτίου:



Σχήμα 7.4.7: Μεταβολή θερμοκρασίας PCM το 24ωρο ανάλογα με τον μήνα για ποσοστό PCM 10%.



Σχήμα 7.4.8: Μεταβολή θερμοκρασίας PCM το 24ωρο ανάλογα με τον μήνα για ποσοστό PCM 50%.



Σχήμα 7.4.9: Μεταβολή θερμοκρασίας PCM το 24ωρο ανάλογα με τον μήνα για ποσοστό 90%.

Αν παρατηρηθεί το πρώτο διάγραμμα που αφορά ποσοστό 10%, συνάγεται καταρχήν κάτι προφανές, ότι δηλαδή όταν προσπίπτει περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία αναπτύσσει το PCM και υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτό φαίνεται για παράδειγμα από την κορυφή των καμπυλών του Μαρτίου και του Νοεμβρίου, όπου επειδή τον Νοέμβριο το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μέγιστο του Μαρτίου, η καμπύλη της θερμοκρασίας του Νοεμβρίου έχει υψηλότερη κορυφή από την αντίστοιχη του Μαρτίου. Βέβαια στο σύνολο σε κάποιες ώρες η καμπύλη του Μαρτίου ανεβαίνει υψηλότερα από την καμπύλη του Νοεμβρίου, στοιχείο που δικαιολογείται από το γεγονός ότι στις 21 Μαρτίου το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερο αλλά τις υπόλοιπες ώρες η ηλιακή ακτινοβολία συνεχίζει να έχει αξιόλογες τιμές, ενώ οι μεγαλύτερες διαφορές με τον Νοέμβριο εμφανίζονται στις πρώτες πρωινές και τις τελευταίες βραδινές ώρες, αφού η συγκεκριμένη ημερομηνία του Μαρτίου προσεγγίζει αρκετά την καλοκαιρινή περίοδο με τις έντονες ηλιοφάνειες σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η καμπύλη του Ιανουαρίου είναι σαφώς πιο χαμηλά από τις άλλες δύο λόγω της αρκετά μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα ίδια συμπεράσματα ισχύουν και για τα άλλα δύο διαγράμματα. Απλώς, σε αυτά λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε PCM, το θερμοκρασιακό εύρος που αναπτύσσει το PCM μειώνεται αρκετά, επομένως οι διαφορές μεταξύ των τριών

μηνών δεν είναι αξιόλογες. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι μεταξύ των καμπυλών Νοεμβρίου και Μαρτίου, η καμπύλη του Μαρτίου είναι στο σύνολο των ωρών υψηλότερα από την καμπύλη του Νοεμβρίου.

7.5 Παραμετρική μελέτη ως προς το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του PCM

•Επιλογή ημέρας:

Επειδή στην παρούσα και στην επόμενη μελέτη σκοπός είναι να μεταβληθούν τα χαρακτηριστικά του PCM για να παρατηρηθούν οι διαφορές, η ημερομηνία μελέτης θα παραμείνει η ίδια όπως στην 1η Παραμετρική μελέτη, δηλαδή 21 Ιανουαρίου και με τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην 1η Παραμετρική μελέτη.

•Υπολογισμός G_b, G_d :

Από τη στιγμή που παραμένει η ίδια μέρα τα μεγέθη G_b και G_d δεν αλλάζουν, οπότε ισχύει ο Πίνακας 7.1.1, όπως δίνεται στην 1η Παραμετρική μελέτη.

•Υπολογισμός G_T :

Αφου δεν αλλάζουν τα μεγέθη G_b και G_d , ο υπολογισμός του G_T για τις ώρες 09:00-16:00 όπου $G_b, G_d > 0$ δεν αλλάζει, οπότε ισχύει ο Πίνακας 7.1.2, όπως δίνεται στην 1η Παραμετρική μελέτη. Επίσης, επειδή σε αυτή την μελέτη δεν μεταβάλλεται και το χρονικό διάστημα στο οποίο παρατηρείται η μεταβολή της θερμοκρασίας, άρα η διαμόρφωση των τιμών της G_T όπως δίνεται στον Πίνακα 7.1.3 παραμένει η ίδια.

•Επιλογή PCM

Όπως αναφέρθηκε ήδη σε αυτήν την μελέτη θα μεταβληθεί το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του PCM με σκοπό να αποδειχθεί σε ποιά περίπτωση γίνεται πιο σωστή εκμετάλλευση του PCM. Θα γίνει εφαρμογή δύο φορές με δύο διαφορετικά εύρη, ενώ σε κάθε εφαρμογή τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του PCM θα παραμείνουν σταθερά. Άρα στους παρακάτω πίνακες

εισάγονται για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις τα χαρακτηριστικά του PCM:

Πίνακας 7.5.1 : Χαρακτηριστικά του PCM για την 1 ^η εφαρμογή		
T_s	C	19
T_l	C	24
ρ	Kg/m ³	1019
H	J/Kg	132100
T_c	C	21,5
b		5
C_{ps}	J/Kg C	7000
C_{pl}	J/Kg C	7000

Πίνακας 7.5.2 : Χαρακτηριστικά του PCM για την 2 ^η εφαρμογή		
T_s	C	20
T_l	C	26
ρ	Kg/m ³	1019
H	J/Kg	132100
T_c	C	23
b		6
C_{ps}	J/Kg C	7000
C_{pl}	J/Kg C	7000

Ενώ οι εξισώσεις (10.1-10.4) μετασχηματίζονται τώρα ως εξής:

1^η Εφαρμογή:

$$\bullet T \leq 19$$

$$C_{p_{eff}} = 7000$$

$$\bullet 19 \leq T \leq 21,5$$

$$C_{p_{eff}}(T) = 4(132100 - 5 \times 7000)(T - 19) / 5^2 + 7000$$

ή

$$Cp_{eff}(T) = 15536(T - 19) + 7000$$

$$\bullet 21,5 \leq T \leq 24$$

$$Cp_{eff}(T) = 4(5 \times 7000 - 132100)(T - 19 - \frac{5}{2}) / 5^2 + \frac{2 \times 132100}{5} - 7000$$

ή

$$Cp_{eff}(T) = -15536(T - 21,5) + 45840$$

$$\bullet T \geq 24$$

$$Cp_{eff} = 7000$$

2^η Εφαρμογή:

$$\bullet T \leq 20$$

$$Cp_{eff} = 7000$$

$$\bullet 20 \leq T \leq 23$$

$$Cp_{eff}(T) = 4(132100 - 6 \times 7000)(T - 20) / 6^2 + 7000$$

ή

$$Cp_{eff}(T) = 10011,111(T - 20) + 7000$$

$$\bullet 23 \leq T \leq 26$$

$$Cp_{eff}(T) = 4(6 \times 7000 - 132100)(T - 20 - \frac{6}{2}) / 6^2 + \frac{2 \times 132100}{6} - 7000$$

ή

$$Cp_{eff}(T) = -10011,111(T - 23) + 37033,333$$

$$\bullet T \geq 26$$

$$Cp_{eff} = 7000$$

•Επιλογή ποσοστών PCM-σοβά

Σε αυτήν την παραμετρική μέλετη επιλέγονται πάλι τα τρία ενδεικτικά ακραία ποσοστά PCM-σοβά, ώστε να υπάρχει σωστή εποπτεία των διαφορών μεταξύ των περιεκτικοτήτων. Ακολουθούν οι πίνακες στους οποίους δίνονται η πυκνότητα του μείγματος ρ από την σχέση (11), αν και επειδή δεν αλλάζει η πυκνότητα του PCM, δεν αλλάζει και η πυκνότητα του μείγματος, η ειδική θερμοχωρητικότητα του μείγματος Cp από την σχέση (12) ανάλογα και με το $Cp_{eff}(T)$. Σημειώνεται ότι τα χαρακτηριστικά του σοβά έχουν ήδη δοθεί καθώς παραμένουν σταθερά. Άρα:

Πίνακας 7.5.3 : $\rho_{μείγματος}$, $Cp_{μείγματος}$ για όλα τα πιθανά ποσοστά σοβά-PCM για την 1^η εφαρμογή

ΧPCM	Χσοβά	$\rho_{μείγματος}$	$Cp_{μείγματος}$
------	-------	--------------------	------------------

%	%	Kg/m ³	J/Kg C	
			T	Value
10	90	1775,9	T ≤ 19	1451,5
			19 ≤ T ≤ 21,5	1553,6(T-19)+1451,5
			21,5 ≤ T ≤ 24	-1553,6(T-21,5)+5335,5
			T ≥ 24	1451,5
50	50	1439,5	T ≤ 19	3917,5
			19 ≤ T ≤ 21,5	7768(T-19)+3917,5
			21,5 ≤ T ≤ 24	-7768(T-21,5)+23337,5
			T ≥ 24	3917,5
90	10	1103,1	T ≤ 19	6383,5
			19 ≤ T ≤ 21,5	13982,4(T-19)+6383,5
			21,5 ≤ T ≤ 24	-13982,4(T-21,5)+41339,5
			T ≥ 24	6383,5

Πίνακας 7.5.4 : $\rho_{\text{μείγματος}}$, $C_{p\text{μείγματος}}$ για όλα τα πιθανά ποσοστά σοβά-PCM για την 2^η εφαρμογή

ΧPCM	Χσοβά	$\rho_{\text{μείγματος}}$	$C_{p\text{μείγματος}}$	
			T	Value
%	%	Kg/m ³	J/Kg C	
10	90	1775,9	T ≤ 20	1451,5
			20 ≤ T ≤ 23	1001,111(T-20)+1451,5
			23 ≤ T ≤ 26	-1001,111(T-23)+4454,833
			T ≥ 26	1451,5
50	50	1439,5	T ≤ 20	3917,5
			20 ≤ T ≤ 23	5005,556(T-20)+3917,5
			23 ≤ T ≤ 26	-5005,556(T-23)+18934,167
			T ≥ 26	3917,5
90	10	1103,1	T ≤ 20	6383,5
			20 ≤ T ≤ 23	9010(T-20)+6383,5
			23 ≤ T ≤ 26	-9010(T-23)+33413,5
			T ≥ 26	6383,5

•Επιλογή $T_{\text{δομ}}$ και T_{PCM}^0

Επιλέγονται για αυτήν την μελέτη οι ίδιες τιμές όπως στην 1^η Παραμετρική μελέτη:

$$T_{\text{δομ}} = 20$$

$$T_{PCM}^0 = 27$$

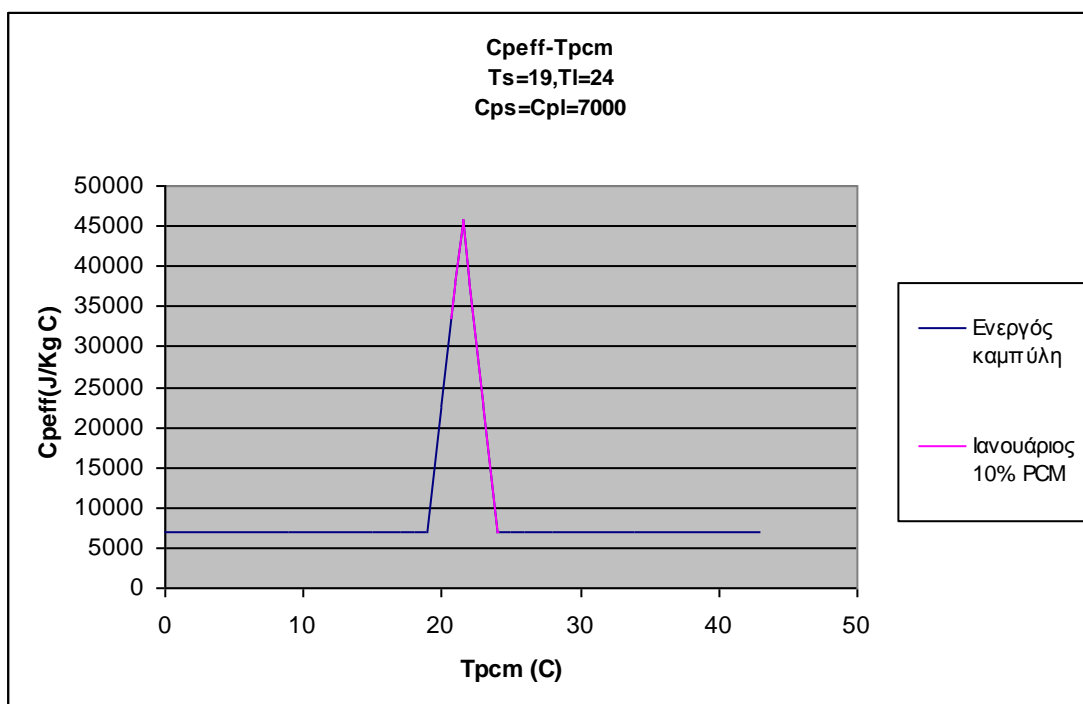
•Εύρεση T_{PCM}

Η σχέση η οποία εφαρμόζεται παραμένει η ίδια, δηλαδή η σχέση (7.1.1):

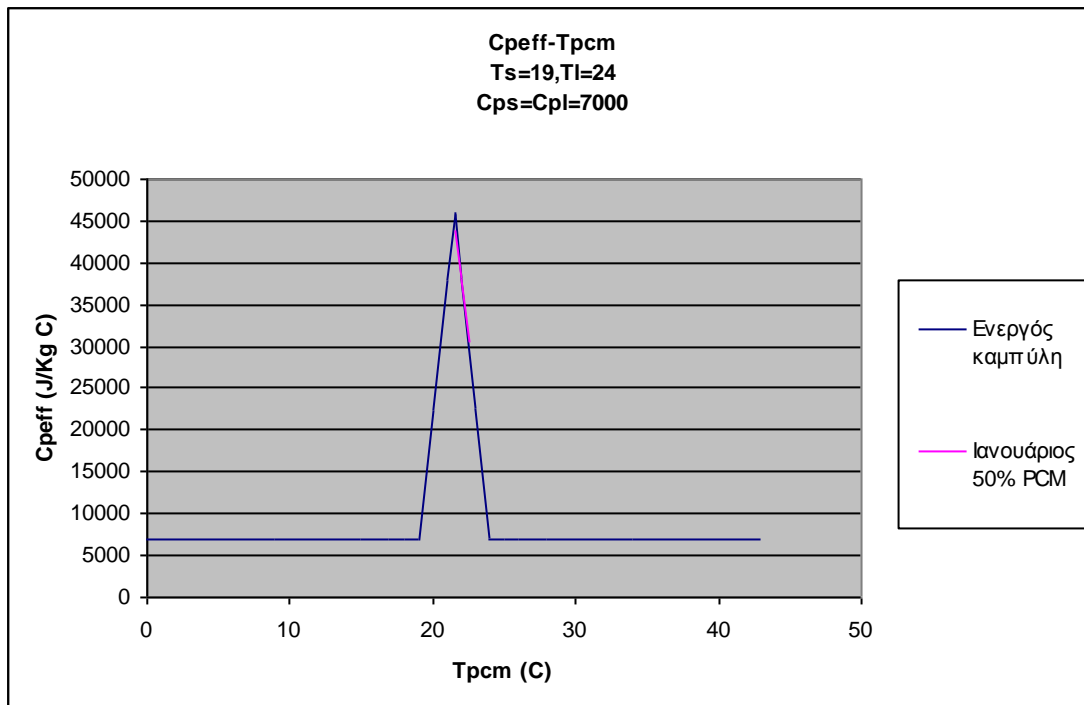
$$T_{PCM}^1 = T_{PCM}^0 + \frac{1}{\rho_{\text{μείγματος}} \times 0,3 \times C_{p_{\text{μείγματος}}}} (4590G_T - 216000(T_{PCM}^0 - 20))$$

Όπου και η διαδικασία παραμένει η ίδια όπως στην 1^η Παραμετρική μελέτη με το εικοσιτετράωρο, με μόνη διαφορά ότι η εξίσωση εφαρμόζεται τρεις φορές για το θερμοκρασιακό εύρος της 1^{ης} Εφαρμογής και τρεις φορές για το θερμοκρασιακό εύρος της 2^{ης} Εφαρμογής. Επίσης, η πυκνότητα του μείγματος και η ειδική θερμοχωρητικότητα λαμβάνονται τώρα από τον Πίνακα 7.5.3 για την 1^η Εφαρμογή και από τον Πίνακα 7.5.4 για την 2^η Εφαρμογή. Επειδή σκοπός αυτής της μελέτης είναι να γίνει η σύγκριση των θερμοκρασιακών ευρών αλλαγής φάσης και η επίδραση αυτών στις θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM, κατασκευάζονται τρία διαγράμματα για κάθε μία εφαρμογή, ένα για κάθε περιεκτικότητα, που απεικονίζουν τη σχέση της ενεργούς θερμοχωρητικότητας του PCM με τις θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM, ώστε να διαπιστωθεί σε ποια περίπτωση γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση του PCM:

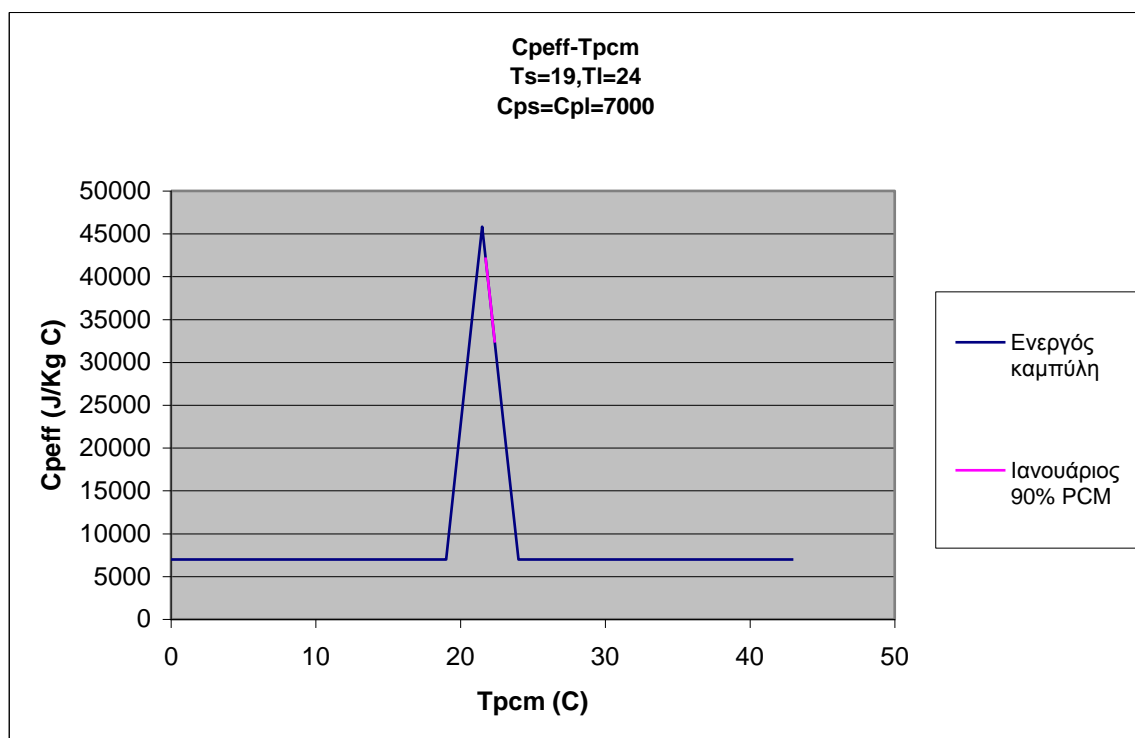
1^η Εφαρμογή:



Σχήμα 7.5.1: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 10% PCM το 24ωρο για την 1^η εφαρμογή.



Σχήμα 7.5.2: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 50% PCM το 24ωρο για την 1^η εφαρμογή.



Σχήμα 7.5.3: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 90% PCM το 24ωρο για την 1^η εφαρμογή.

Επίσης με τους αντίστοιχους τύπους όπως στην 1^η Παραμετρική μελέτη θα υπολογιστούν και τα εμβαδά κάτω από τις καμπύλες, δηλαδή η αποθηκευόμενη θερμότητα:

$$Q_1 = 101184,1J / Kg$$

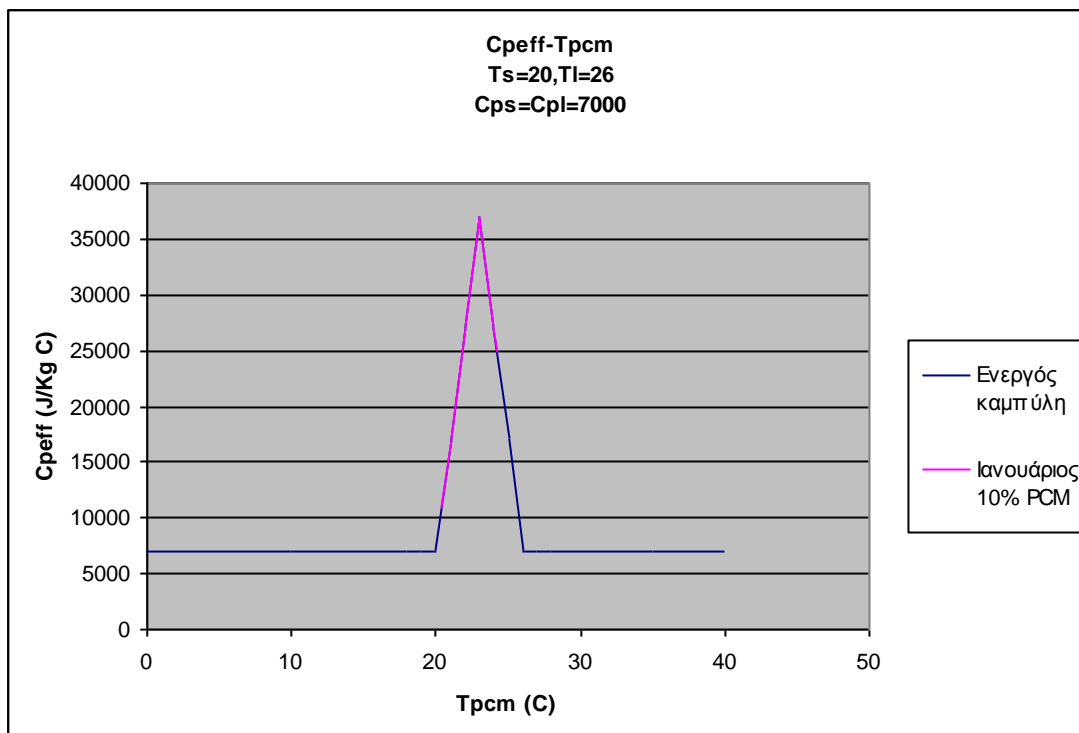
$$Q_2 = 32176J / Kg$$

$$Q_3 = 23827,36J / Kg$$

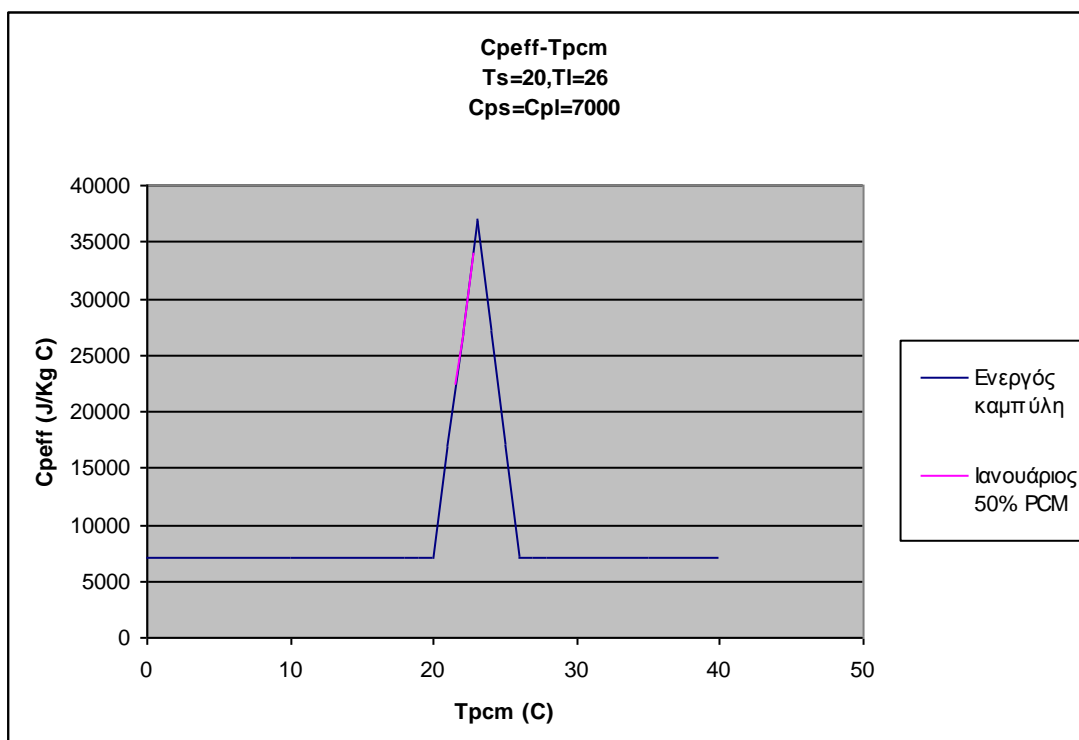
Όσον αφορά την αποθηκευμένη θερμότητα στην περιεκτικότητα PCM 10%, είναι προφανές ότι όταν μεταβάλλεται το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης με τρόπο ώστε να αυξάνεται αρκετά η θερμοκρασία έναρξης της τήξης, $T_s = 15 \rightarrow T_s = 19$, και να μειώνεται λίγο η θερμοκρασία ολοκλήρωσης της τήξης, $T_l = 26 \rightarrow T_l = 24$, τότε καλύπτεται μεγαλύτερο μέρος της ενεργούς καμπύλης, δηλαδή το PCM καλύπτει μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης του, οπότε αυξάνεται και πολύ η θερμότητα που αποθηκεύει το PCM, $Q_1 = 67757,53J / Kg \rightarrow Q_1 = 101184,1J / Kg$, την οποία στη συνέχεια το PCM θα αποδώσει στο χώρο.

Στις μεγαλύτερες περιεκτικότητες του 50% ή του 90%, η μεταβολή του θερμοκρασιακού εύρους έχει οριακά οφέλη στην αποθηκευόμενη θερμότητα, $Q_2 = 30866,86J / Kg \rightarrow Q_2 = 32176J / Kg$ και $Q_3 = 23809,59J / Kg \rightarrow Q_3 = 23827,36J / Kg$, εφόσον σε αυτές τις περιπτώσεις, όπως έχει ήδη αναλυθεί στην 1^η Παραμετρική μελέτη, έχει πολύ μεγάλη επίδραση η μεγάλη μάζα του PCM που προστίθεται, η οποία σε συνδυασμό με την μικρή θερμική αγωγιμότητα που είναι γνώρισμα του PCM, δεν επιτρέπει στο PCM να πραγματοποιήσει μία ολοκληρωμένη αλλαγή φάσης και να αποθηκεύσει μεγάλα ποσά λανθάνουσας θερμότητας.

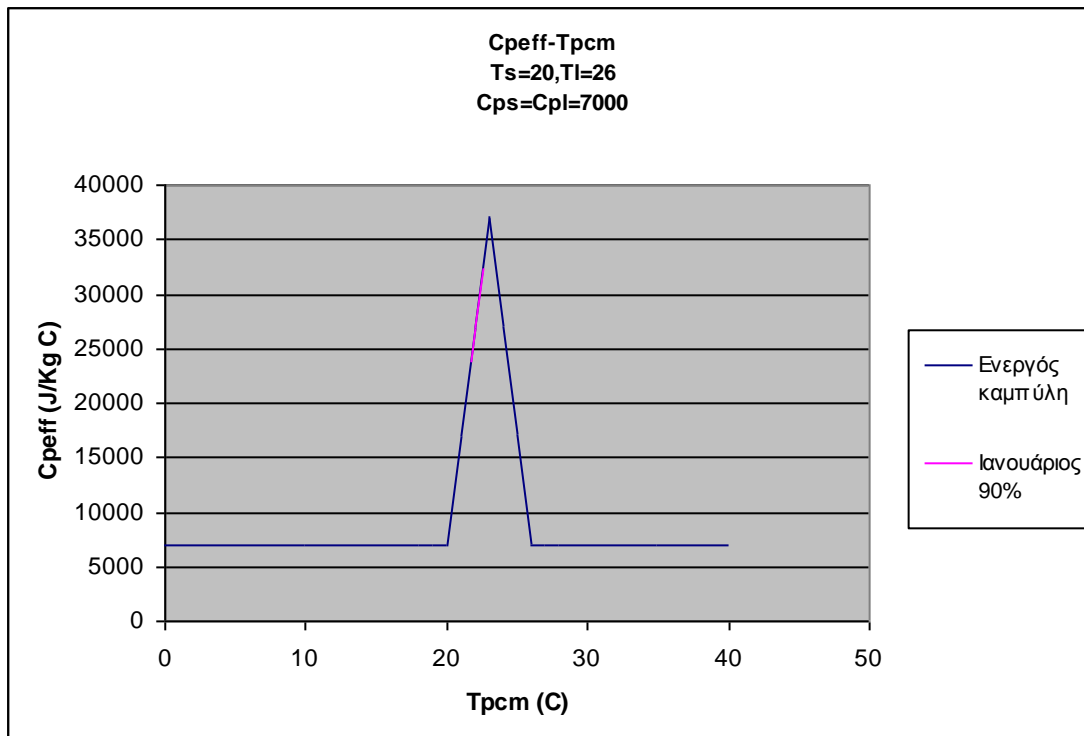
2^η Εφαρμογή:



Σχήμα 7.5.4: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 10% PCM το 24ωρο για την 2^η εφαρμογή.



Σχήμα 7.5.5: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 50% PCM το 24ωρο για την 2^η εφαρμογή.



Σχήμα 7.5.6: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 90% PCM το 24ωρο για την 2^η εφαρμογή.

Στην 2^η Εφαρμογή τα αποτελέσματα όσον αφορά την αποθηκευόμενη θερμότητα είναι παρόμοια, δηλαδή:

$$Q_1 = 100476,1 J / Kg$$

$$Q_2 = 33049,6 J / Kg$$

$$Q_3 = 24447,17 J / Kg$$

Η μόνη διαφορά που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι στην περιεκτικότητα 10% η αποθηκευόμενη θερμότητα μειώθηκε οριακά σε σχέση με την 1^η Εφαρμογή, ενώ στις μεγαλύτερες περιεκτικότητες η αποθηκευόμενη θερμότητα αυξήθηκε σε σχέση με την 1^η Εφαρμογή. Επειδή, όμως, έχει ήδη γίνει σαφές ότι είναι πιο αποτελεσματικές οι μικρές περιεκτικότητες, θα προτιμηθεί το θερμοκρασιακό εύρος της 1^{ης} Εφαρμογής, με το οποίο μεγιστοποιείται η αποθηκευόμενη θερμότητα στην περίπτωση της μικρής περιεκτικότητας του 10%.

7.6 Παραμετρική μελέτη ως προς την ειδική θερμοχωρητικότητα στερεής-υγρής φάσης του PCM

•Επιλογή ημέρας:

Έχει ήδη αναφερθεί στην προηγούμενη μελέτη ότι η ημερομηνία μελέτης θα παραμείνει η ίδια όπως στην 1η Παραμετρική μελέτη, δηλαδή 21 Ιανουαρίου και με τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην 1^η Παραμετρική μελέτη.

•Υπολογισμός G_b, G_d :

Από τη στιγμή που παραμένει η ίδια μέρα τα μεγέθη G_b και G_d δεν αλλάζουν, οπότε ισχύει ο Πίνακας 7.1.1, όπως δίνεται στην 1^η Παραμετρική μελέτη.

•Υπολογισμός G_T :

Αφου δεν αλλάζουν τα μεγέθη G_b και G_d , ο υπολογισμός του G_T για τις ώρες 09:00-16:00 όπου $G_b, G_d > 0$ δεν αλλάζει, οπότε ισχύει ο Πίνακας 7.1.2, όπως δίνεται στην 1^η Παραμετρική μελέτη. Επίσης, επειδή και σε αυτή την μελέτη δεν μεταβάλλεται και το χρονικό διάστημα στο οποίο παρατηρείται η μεταβολή της θερμοκρασίας, άρα η διαμόρφωση των τιμών της G_T όπως δίνεται στον Πίνακα 7.1.3 παραμένει η ίδια.

•Επιλογή PCM

Σε αυτήν την μελέτη θα μεταβληθεί η ειδική θερμοχωρητικότητα στερεής-υγρής φάσης του PCM με σκοπό να αποδειχθεί σε ποιά περίπτωση γίνεται πιο σωστή εκμετάλλευση του PCM. Θα γίνει εφαρμογή μία φορά επιλέγοντας πάλι μία κοινή τιμή για τις δύο θερμοχωρητικότητες, ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του PCM θα παραμείνουν σταθερά. Άρα στον παρακάτω πίνακα εισάγονται συγκεντρωτικά για την παραπάνω περίπτωση τα χαρακτηριστικά του PCM:

Πίνακας 7.6.1 : Χαρακτηριστικά του PCM για αλλαγή C_{ps}, C_{pl}		
T_s	C	15
T_l	C	26
ρ	Kg/m ³	1019
H	J/Kg	132100
T_c	C	20,5
b		11
C_{ps}	J/Kg C	2700

C_{pl}	J/Kg C	2700
-----------------------	--------	------

Άρα οι εξισώσεις (10.1-10.4) μετασχηματίζονται ως εξής:

$$\bullet T \leq 15$$

$$C_{p_{eff}} = 2700$$

$$\bullet 15 \leq T \leq 20,5$$

$$C_{p_{eff}}(T) = 4(132100 - 11 \times 2700)(T - 15) / 11^2 + 2700$$

ή

$$C_{p_{eff}}(T) = 3385,124(T - 15) + 2700$$

$$\bullet 20,5 \leq T \leq 26$$

$$C_{p_{eff}}(T) = 4(11 \times 2700 - 132100)(T - 15 - \frac{11}{2}) / 11^2 + \frac{2 \times 132100}{11} - 2700$$

ή

$$C_{p_{eff}}(T) = -3385,124(T - 20,5) + 21318,182$$

$$\bullet T \geq 26$$

$$C_{p_{eff}} = 2700$$

• Επιλογή ποσοστών PCM-σοβά

Σε αυτήν την παραμετρική μέλετη επιλέγονται πάλι τα τρία ενδεικτικά ακραία ποσοστά PCM-σοβά, ώστε να υπάρχει σωστή εποπτεία των διαφορών μεταξύ των περιεκτικοτήτων. Ακολουθεί ο πίνακας στον οποίο δίνονται η πυκνότητα του μείγματος ρ από την σχέση (11), αν και επειδή δεν αλλάζει η πυκνότητα του PCM, δεν αλλάζει και η πυκνότητα του μείγματος, και η ειδική θερμοχωρητικότητα του μείγματος C_p από την σχέση (12) ανάλογα και με το $C_{p_{eff}}(T)$. Σημειώνεται ότι τα χαρακτηριστικά του σοβά έχουν ήδη δοθεί καθώς παραμένουν σταθερά. Άρα:

Πίνακας 7.6.2 : $\rho_{μείγματος}$, $C_{p_{μείγματος}}$ για όλα τα πιθανά ποσοστά σοβά-PCM για την αλλαγή των C_{ps} και C_{pl}				
Χ _{PCM}	Χ _{σοβά}	$\rho_{μείγματος}$	$C_{p_{μείγματος}}$	
				J/Kg C
%	%	Kg/m ³		
10	90	1775,9	T ≤ 15	1021,5
			15 ≤ T ≤ 20,5	338,512(T-15)+1021,5
			20,5 ≤ T ≤ 26	-338,512(T-20,5)+2883,3182
			T ≥ 26	1021,5
50	50	1439,5	T ≤ 15	1767,5
			15 ≤ T ≤ 20,5	1692,562(T-15)+1767,5
			20,5 ≤ T ≤ 26	-1692,562(T-20,5)+11076,591

			$T \geq 26$	1767,5
90	10	1103,1	$T \leq 15$	2513,5
			$15 \leq T \leq 20,5$	$3046,612(T-15)+2513,5$
			$20,5 \leq T \leq 26$	$-3046,612(T-20,5)+19269,864$
			$T \geq 26$	2513,5

•Επιλογή $T_{δομ}$ και T_{PCM}^0

Επιλέγονται για αυτήν την μελέτη οι ίδιες τιμές όπως στην 1^η Παραμετρική μελέτη:

$$T_{δομ} = 20$$

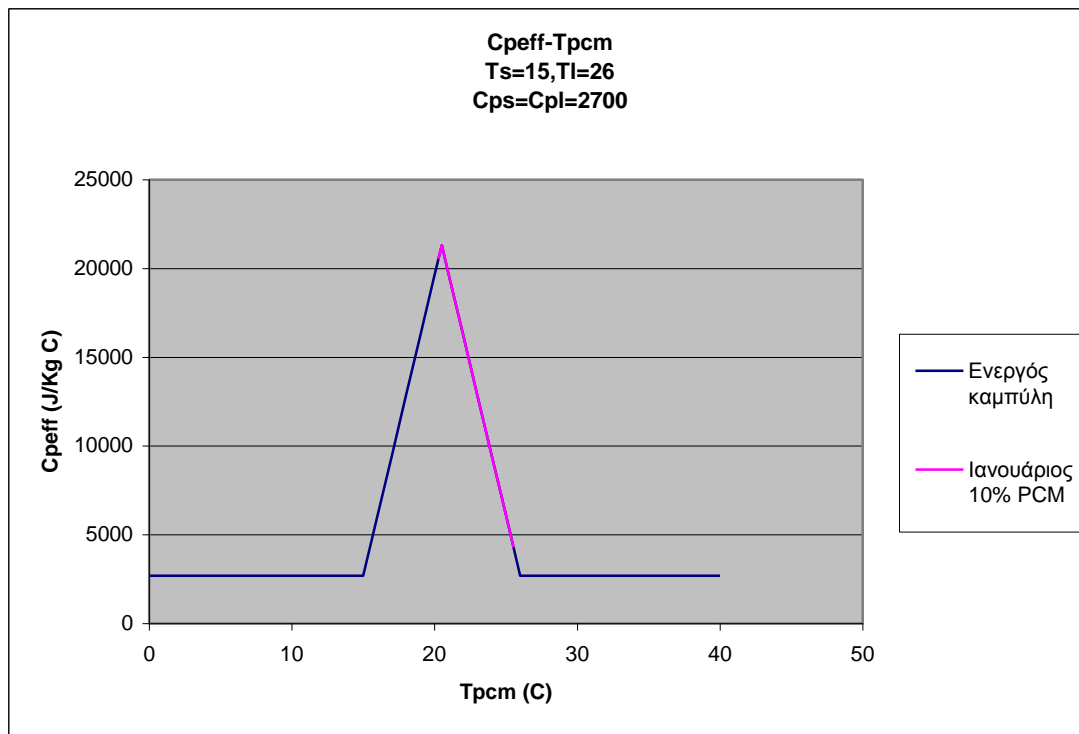
$$T_{PCM}^0 = 27$$

•Εύρεση T_{PCM}

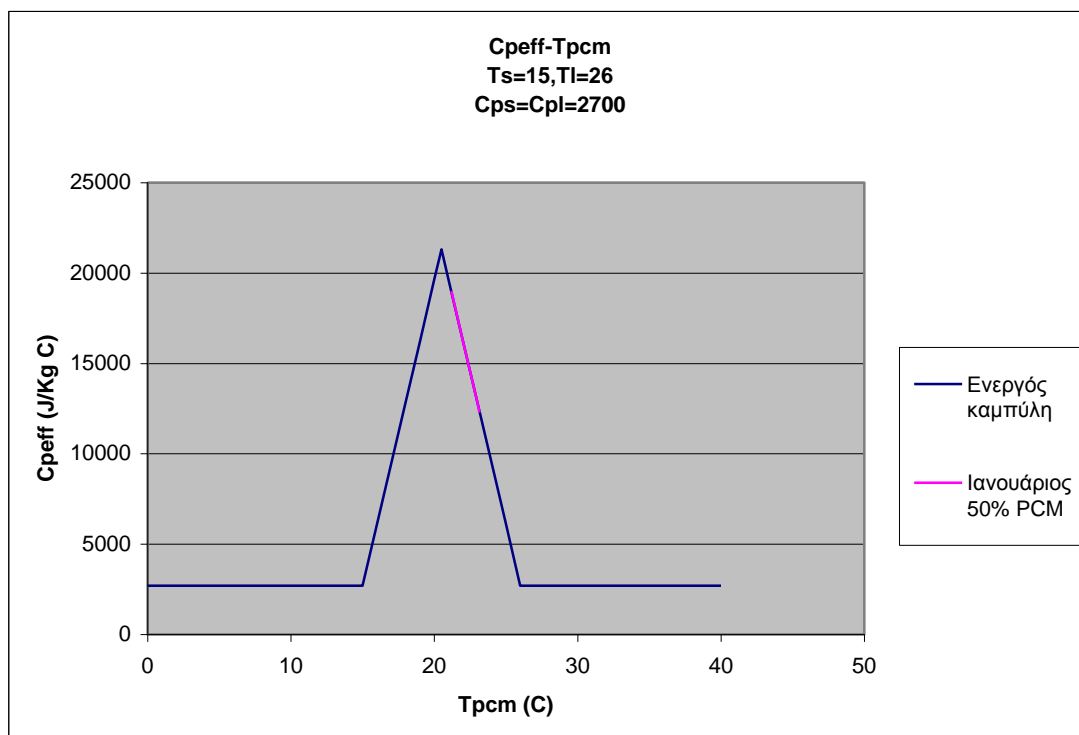
Η σχέση η οποία εφαρμόζεται παραμένει η ίδια, δηλαδή η σχέση (7.1.1):

$$T_{PCM}^1 = T_{PCM}^0 + \frac{1}{\rho_{μείγματος} \times 0,3 \times C_{p_{μείγματος}}} (4590G_T - 216000(T_{PCM}^0 - 20))$$

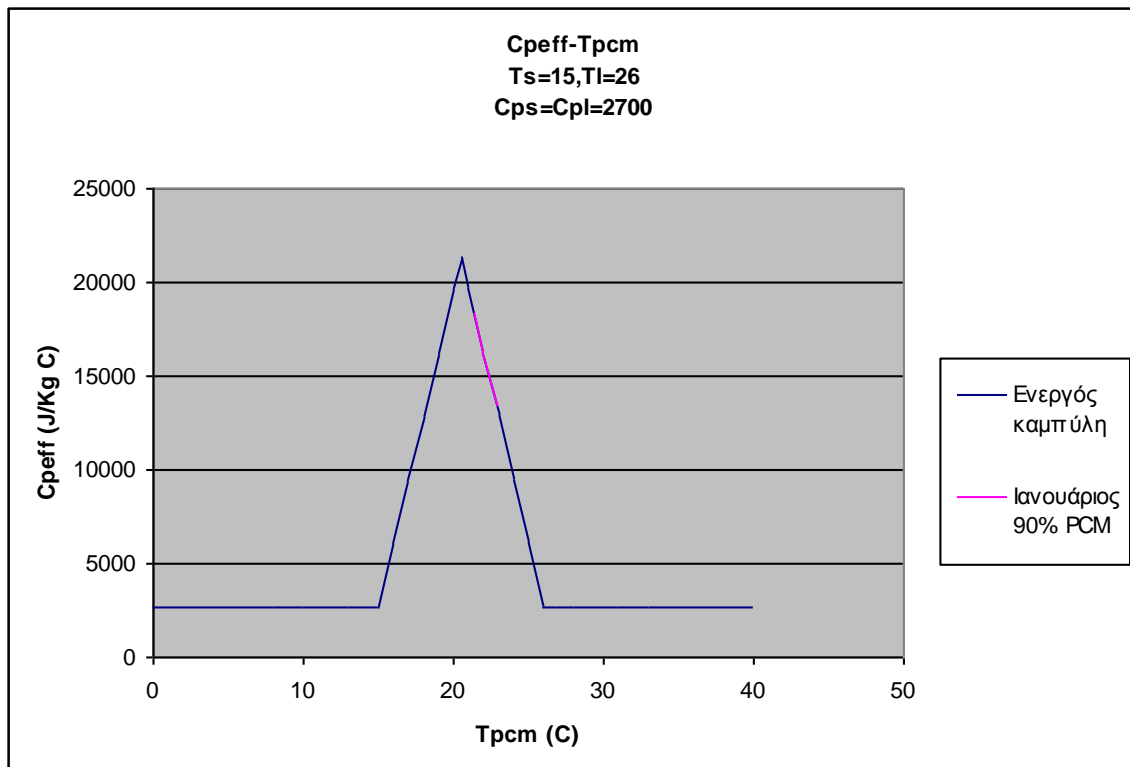
Όπου και η διαδικασία παραμένει η ίδια όπως στην 1^η Παραμετρική μελέτη με το εικοσιτετράωρο, δηλαδή εφαρμόζεται η σχέση αυτή τρεις φορές, μία για κάθε ποσοστό. Επίσης, η πυκνότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα του μείγματος λαμβάνονται τώρα από τον Πίνακα 7.6.2. Επειδή και σε αυτήν την μελέτη σκοπός είναι να συγκριθούν οι περιπτώσεις του $C_{ps} = C_{pl} = 7000 J / KgC$ και του $C_{ps} = C_{pl} = 2700 J / KgC$, ως προς την αποτελεσματικότητα του PCM, κατασκευάζονται τα παρακάτω τρία διαγράμματα που απεικονίζουν τη σχέση της ενεργούς θερμοχωρητικότητας του PCM με τις θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM, ώστε να διαπιστωθεί σε ποιά περίπτωση γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση του PCM:



Σχήμα 7.6.1: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 10% PCM το 24ωρο για αλλαγή C_{ps} και C_{pl}.



Σχήμα 7.6.2: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 50% PCM το 24ωρο για αλλαγή C_{ps} και C_{pl}.



Σχήμα 7.6.3: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 90% PCM το 24ωρο για αλλαγή C_{ps} και C_{pl}.

Υπολογίζεται τώρα και η αποθηκευόμενη θερμότητα στο PCM:

$$Q_1 = 69206,28 J / Kg$$

$$Q_2 = 31017,33 J / Kg$$

$$Q_3 = 23760,2 J / Kg$$

Το συμπέρασμα είναι ότι μειώνοντας την ειδική θερμοχωρητικότητα στερεής-υγρής φάσης του PCM από $C_{ps} = C_{pl} = 7000 J / KgC \rightarrow C_{ps} = C_{pl} = 2700 J / KgC$, παρατηρείται μία μικρή αύξηση της αποθηκευόμενης θερμότητας στο PCM στις μικρές περιεκτικότητες του PCM, όπως σε αυτήν του 10%, δηλαδή από $Q_1 = 67757,73 J / Kg$ πηγαίνει στο $Q_1 = 69206,28 J / Kg$. Η συμπεριφορά αυτή είναι παρόμοια και στην περιεκτικότητα του 50% PCM, όπου από $Q_2 = 30866,86 J / Kg$ πηγαίνει στο $Q_2 = 31017,33 J / Kg$, ενώ οριακά παρουσιάζει την αντίστροφη τάση στην περιεκτικότητα του 90% PCM, όπου από $Q_3 = 23809,59 J / Kg$ πηγαίνει στο $Q_3 = 23760,2 J / Kg$. Έχει ήδη γίνει φανερό από όλες τις παραμετρικές μελέτες, ότι οι υψηλές περιεκτικότητες παρουσιάζουν μία αποκλίνουσα συμπεριφορά σε σχέση με τις μικρότερες, άρα το αντίστροφο αποτέλεσμα εδώ είναι το αναμενόμενο. Όμως σε σύγκριση με την προηγούμενη αλλαγή χαρακτηριστικών στην 5^η Παραμετρική μελέτη, στην οποία μεταβάλλοντας το θερμοκρασιακό εύρος

αλλαγής φάσης του PCM προέκυψε μία κατακόρυφη αύξηση της αποθηκευόμενης θερμότητας στην μικρή περιεκτικότητα, σε αυτήν την μελέτη η αύξηση που παρατηρήθηκε είναι μάλλον αμελητέα, άρα και χωρίς πειραματικό και πρακτικό ενδιαφέρον.

Βιβλιογραφία Θεωρητικής Προσομοίωσης

[1] Κίμων Α.Αντωνόπουλος, Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα, Μέρος Πρώτο, Αθήνα 2008

[2] Eleftherios Dimitrios Kravvaritis, Kimon Antonopoulos, Christos Tzivanidis, Solar energy management using PCM passive systems in the Athens area buildings, (υπό δημοσίευση)

