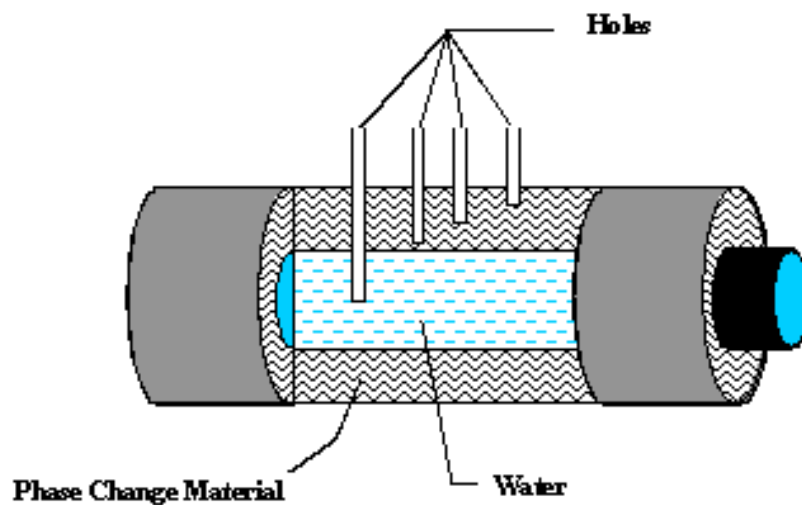




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



**‘ΧΡΗΣΗ PCM ΣΕ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ’**  
**‘USE OF PCM IN HOT WATER SOLAR SYSTEMS’**

**ΕΚΠΟΝΗΣΗ:** ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΣΟΦΙΑ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:** ΚΙΜΩΝΑΣ ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ

**ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ:** 02104058

**ΚΥΚΛΟΣ ΣΠΟΥΔΩΝ:** ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2010**

## Περιεχόμενα

### Θεωρητικό Μέρος

<b>1. Ενεργειακό πρόβλημα</b>	<b>7</b>
<b>2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)</b>	<b>10</b>
2.1. Γενικά	10
2.2. Είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	12
2.2.1. Αιολική ενέργεια	12
2.2.2. Γεωθερμική ενέργεια	13
2.2.3. Υδροηλεκτρική ενέργεια	14
2.2.4. Ενέργεια από παλίρροια	15
2.2.5. Ενέργεια από κύματα	16
2.2.6. Ηλιακή ενέργεια	17
<b>3. Ηλιακά συστήματα παραγωγής θερμότητας</b>	<b>21</b>
3.1. Παθητικά ηλιακά συστήματα	23
3.2. Ενεργητικά θερμικά ηλιακά συστήματα	23
<b>4. Συστήματα θερμικής ενεργειακής αποθήκευσης</b>	<b>26</b>
4.1. Γενικά	26
4.2. Χαρακτηριστικά ενεργειακού συστήματος αποθήκευσης	29
<b>5. Τρόποι αποθήκευσης θερμότητας</b>	<b>31</b>
5.1. Αποθήκευση ως αισθητή θερμότητα	31
5.2. Αποθήκευση ως ενέργεια χημικών δεσμών	33
5.3. Αποθήκευση ως λανθάνουσα θερμότητα	35
5.3.1. Αλλαγή φάσης	35
5.3.2. Λανθάνουσα θερμότητα τήξης	37
5.3.3. Υλικά αλλαγής φάσης (PCM)	38
5.3.3.1. Ιδιότητες PCM	41
5.3.3.2. Κατηγοριοποίηση των PCM	42
5.3.3.2.1. Οργανικά υλικά αλλαγής φάσης	43
5.3.3.2.2. Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης	45
5.3.3.2.3. Εύτηκτα μίγματα	47
<b>6. Προβλήματα των PCM</b>	<b>48</b>
6.1. Φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων	48
6.2. Φαινόμενο supercooling	49
6.3. Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση	50

6.4.	Τοποθέτηση PCM σε κάψουλες	51
<b>7.</b>	<b>Συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας</b>	<b>52</b>
7.1.	Εισαγωγή	52
7.2.	Ιστορική αναδρομή	54
7.2.1.	ΗΠΑ	54
7.2.2.	Δυτική Γερμανία	59
7.2.3.	Δανία	60
7.2.4.	Σουηδία	60
7.2.5.	Γαλλία	60
7.2.6.	Αγγλία	61
7.2.7.	Ιαπωνία	61
<b>8.</b>	<b>Τομείς χρήσης των PCM</b>	<b>62</b>
8.1.	Γενικά	62
8.2.	Συστήματα αποθήκευσης μη άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς (εναλλάκτες)	63
8.3.	Συστήματα αποθήκευσης άμεσης επαφής με το μέσο θερμότητας	64
8.4.	Κτιριακές εφαρμογές με PCM	65
8.4.1.	Δομικά υλικά	65
8.4.2.	Τοιχοποιία	67
8.5.	Ταβανοσανίδα με PCM	69
8.6.	Εφαρμογή PCM σε παντζούρια	70
8.7.	Ενδοδαπέδια θέρμανση με PCM	70
8.8.	Ηλιακά συστήματα με PCM	72
8.9.	Φωτοβολταϊκά πλαίσια με PCM	73
8.10.	Συστήματα κλιματισμού με PCM	74
8.11.	Χρήση PCM σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα	74
8.12.	Μεταφορές προϊόντων με PCM	76
8.13.	Θερμική ένδυση με PCM	77
8.14.	Οχήματα με PCM	78
<b>9.</b>	<b>Ηλιακός θερμοσίφωνας με PCM</b>	<b>79</b>
9.1.	Γενικά	79
9.2.	Ιστορική αναδρομή	80
9.3.	Στοιχεία της εγκατάστασης ηλιακού θερμοσίφωνα	85

9.3.1.	Ηλιακοί συλλέκτες	85
9.3.1.1.	Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες	86
9.3.1.2.	Συλλέκτες με σωλήνες κενού	89
9.3.1.3.	Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες	89
9.4.	Αποθήκευση σε δεξαμενή	90
9.4.1.	Αποθήκευση απευθείας σε δεξαμενές με εναλλάκτες θερμότητας	91
9.4.2.	Τοποθέτηση σε μακροκάψουλες	93
9.4.3.	Τοποθέτηση σε μικροκάψουλες	94

### Πειραματικό Μέρος

1.	Μέθοδοι υπολογισμού φαινομένου αλλαγής φάσης	95
1.1.	Γενικά	95
1.2.	Αριθμητικά μοντέλα	97
1.2.1.	Αριθμητικό μοντέλο ημι-άπειρης επιφάνειας	97
1.2.2.	Αριθμητικό μοντέλο απλής αποθήκευσης θερμότητας με PCM	99
1.3.	Υπολογιστικά μοντέλα	101
1.3.1.	Μέθοδος πεπερασμένων όγκων	102
1.3.2.	Μέθοδος ενθαλπίας	104
1.3.3.	Μέθοδος θερμοχωρητικότητας	107
2.	Περιγραφή εγκατάστασης	109
2.1.	Υπολογισμός θερμοκρασίας περιβάλλοντος $T_a$	113
2.2.	Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας $G_t$	116
2.3.	Υπολογισμοί	119
3.	Αποτελέσματα	121
4.	Συμπεράσματα	138
	Βιβλιογραφία	140

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα, σε αυτό το σημείο, να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Συγκεκριμένα θέλω πρώτα απ'όλα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Κίμωνα Αντωνόπουλο, καθηγητή στο Τομέα Θερμότητας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, για το χρόνο που διέθεσε καθώς και για την καθοδήγηση που μου προσέφερε, χάρη στην οποία κατάφερα να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα Λ.Κραβαρίτη για την βοήθεια που μου προσέφερε ως προς την εύρεση βιβλιογραφικού υλικού.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου καθώς και τους φίλους μου για την ηθική και υλική συμπαράσταση κατά την διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τα Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM) και συγκεκριμένα τη χρήση αυτών για την θέρμανση ζεστού νερού χρήσης. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η σύγκριση ενός τυπικού ηλιακού θερμοσίφωνα με ένα αντίστοιχο με PCM. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά υλικά προκειμένου να τονιστούν οι διαφορές των δύο ηλιακών συστημάτων.

Στο πρώτο μέρος γίνεται μια εισαγωγή στα υλικά αυτά καθώς και στα συστήματα στα οποία εισάγονται. Αναλυτικότερα :

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται η ανάγκη χρήσης των υλικών αυτών εξαιτίας του παγκόσμιου ενεργειακού προβλήματος. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενώ στο τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται τα ηλιακά συστήματα καθώς και τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης. Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται οι τρόποι αποθήκευσης θερμότητας και γίνεται αναφορά στα PCM καθώς και στις ιδιότητες τους. Στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται τα προβλήματα που παρουσιάζουν τα PCM. Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ιστορική αναδρομή στα λανθάνοντα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας ενώ στο όγδοο κεφάλαιο αναφέρονται οι εφαρμογές με χρήση PCM σε διάφορους τομείς. Τέλος στο ένατο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση ενός ηλιακού θερμοσίφωνα με PCM.

Το δεύτερο μέρος της διπλωματικής εργασίας ασχολείται με την αριθμητική επίλυση ενός ηλιακού θερμοσίφωνα με PCM. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό αναλύονται οι αριθμητικές και οι υπολογιστικές μέθοδοι επίλυσης φαινομένου μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας. Για την επικείμενη σύγκριση των ηλιακών θερμοσιφώνων χρησιμοποιήθηκε η υπολογιστική μέθοδος της θερμοχωρητικότητας.

## **1. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ**

Τον όρο ενέργεια τον συναντάμε για πρώτη φορά από τον Αριστοτέλη στο έργο «Ηθικά Νικομάχεια» αλλά με μεγάλη απόκλιση από την σημερινή έννοια του όρου. Το 1807, ο Thomas Young, έδωσε τον παρακάτω σύγχρονο ορισμό που σχετίζεται περισσότερο με την κινητική ενέργεια:

"The term energy may be applied, with great propriety, to the product of the mass or weight of a body, into the square of the number expressing its velocity."

Η ενέργεια αποτελεί την ζωογόνο πηγή των σύγχρονων κοινωνιών και ήταν σε όλες τις μορφές πάντα κρίσιμη για τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Είναι σημαντική δεδομένου ότι μας επιτρέπει να παρέχουμε τις υπηρεσίες που είναι σημαντικές στην ανθρώπινη ευημερία, όπως είναι ο φωτισμός, η θέρμανση και η ψύξη, οι επικοινωνίες, οι μεταφορές, οι κατασκευαστικές και άλλες βιομηχανικές και εμπορικές διαδικασίες. Οι σύγχρονες κοινωνίες, που παρέχουν ένα υψηλό επίπεδο υπηρεσιών στα μέλη τους, εξαρτώνται συνολικά από τις πηγές ενέργειας που ξεπερνούν την ανθρώπινη ή ζωική δύναμη. Το 1769, με την δημιουργία της πρώτης ατμομηχανής από τον James Watt, αποτέλεσε την απαρχή της βιομηχανικής επανάστασης της Αγγλίας και υποδηλώνει τη συστηματική εγκατάσταση και λειτουργία της εργοστασιακής βιομηχανίας. Η εκβιομηχάνιση, που στα αρχικά στάδιά της απαίτησε τη χρήση των μηχανών ατμού τροφοδοτούμενων με ξύλο, μεταπήδησε βαθμιαία στην εξάρτηση από τον άνθρακα και το πετρέλαιο.

Ο 20<sup>ος</sup> αιώνας είδε μια γρήγορη άνοδο του εξηλεκτισμού, και δεν διαφαίνεται κανένα τέλος σε αυτό. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αρχικά βασισμένη στον άνθρακα και έπειτα στο πετρέλαιο, εξαρτάται ακόμα από τον άνθρακα, αλλά όλο και περισσότερο από την υδροηλεκτρική ενέργεια, την πυρηνική διάσπαση, το φυσικό αέριο, και στις μέρες μας, στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ο αέρας και ο ήλιος.

Οι μεταφορές, που αποτελούν περισσότερο από το 20% της παγκόσμιας πρωτογενούς ενέργειας, αποτελούν τον παγκοσμίως γρηγορότερα αυξανόμενο καταναλωτή ενέργειας και ευθύνονται σε πολύ μεγάλο βαθμό για τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, σε 30 χρόνια από τώρα ο αριθμός των αυτοκινήτων αναμένεται να αυξηθεί από 600 εκατομμύρια (ή και παραπάνω) που κυκλοφορούν

σήμερα παγκοσμίως σε πολύ πάνω από 1,5 δισεκατομμύρια. Κατά συνέπεια οι μεταφορές σε ιδιωτικό επίπεδο θα χρειαστούν 2,5 φορές περισσότερη ενέργεια και θα παράγουν 2,5 φορές περισσότερους ρύπους.

Η αύξηση πληθυσμού, οι αυξανόμενες προσδοκίες και τα μέσα, οι επιστημονικές και τεχνολογικές εξελίξεις έχουν οδηγήσει σε απότομη αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Υπολογίζεται ότι ο πρωτόγονος άνθρωπος χρησιμοποιούσε για τις ανάγκες του ενέργεια ίση με 6,3 MJ την ημέρα που έπαιρνε μέσω της τροφής του. Ο σημερινός άνθρωπος χρησιμοποιεί περίπου 1000 MJ δηλαδή 150 φορές περισσότερη.

Είναι σαφές ότι η ενεργειακή παραγωγή και η χρήση, βασισμένες στην κατανάλωση συμβατικών καυσίμων μπορούν να ασκήσουν επιβλαβείς επιδράσεις στο περιβάλλον και στη ανθρώπινη υγεία, καθώς και να συμβάλουν στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Η εξάρτηση από τα συμβατικά καύσιμα, που αποτελούν ένα μη ανανεώσιμο ενεργειακό πόρο, των οποίων ο ανεφοδιασμός συγκεντρώνεται όλο και περισσότερο σε έναν περιορισμένο αριθμό θέσεων στον πλανήτη μας, έχει επίσης σοβαρές επιπτώσεις και στην παγκόσμια οικονομική ασφάλεια και την πολιτική σταθερότητα.

Η συνειδητοποίηση της υπάρχουσας κατάστασης οδήγησε στο συμπέρασμα ότι βρισκόμαστε παγκοσμίως στα αρχικά στάδια μιας αναπόφευκτης μετάβασης σε ένα νέο ενεργειακό σύστημα που, με το πέρασμα του χρόνου, θα είναι λιγότερο εξαρτώμενο από τη χρήση συμβατικών καυσίμων και όλο και περισσότερο εξαρτώμενο από τους ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους.

Οι προηγμένες πυρηνικές ενεργειακές τεχνολογίες θα μπορούσαν επίσης να διαδραματίσουν έναν αυξανόμενο ρόλο για την αντιμετώπιση της κατάστασης. Η χρήση πυρηνικής ενέργειας εμφανίστηκε για πρώτη φορά μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο σαν λύση φθηνής και καθαρής ενέργειας. Εντούτοις, απορρίφθηκε ο επεκτατικός της ρόλος λόγω του ατυχήματος του Τσερνομπίλ και της ανικανότητας αντιμετώπισης των ζητημάτων που την περιβάλλουν.

Είναι σημαντικό να εξεταστούν προσεκτικά οι επιλογές μας προκειμένου να εξασφαλιστεί ένα βιώσιμο μελλοντικά ενεργειακό σύστημα το οποίο θα είναι ικανό να καλύψει τις ολοένα και αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες.

Σήμερα σε ευρωπαϊκή κλίμακα η κατανομή των ενεργειακών πηγών σύμφωνα με στοιχεία από την European environmental agency της EU-27 του 2005 είναι το



πετρέλαιο στο 14,3%, τα ορυκτά καύσιμα στα 21,9% , το φυσικό αέριο στο 21,1%, η πυρηνική ενέργεια στο 28,9% ενώ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας βρίσκονται στο 13,4%. Από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας η ηλιακή ενέργεια είναι στο 0,7%, η αιολική στο 5,1%, η βιομάζα στο 67,6%, η υδροηλεκτρική ενέργεια στο 22,1% και η γεωθερμική στο 4,5%.

Πιο συγκεκριμένα, η χώρα μας χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του 2005 σε ποσοστό 15,9% ενώ σε ορυκτά καύσιμα 83%. Έχει πολύ υψηλά ποσοστά όσον αφορά την κατασπατάληση ενέργειας στον οικιακό τομέα, που απορροφά το 35% του συνόλου και μετέχει κατά 40% στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η λύση λοιπόν στο ενεργειακό αδιέξοδο του πλανήτη πρέπει να ξεκινήσει από την εξοικονόμηση ενέργειας και την σωστή διαχείριση της ζήτησης. Σήμερα μόνο το 20% των κτιρίων εξοικονομεί ενέργεια. Ένα κτίριο καταναλώνει ενέργεια για την κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων, τη θέρμανση και ψύξη χώρων και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια αλλά και η υποκατάσταση συμβατικών πηγών ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές οδηγεί σε μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, οικονομικά οφέλη για τους χρήστες των κτιρίων και μείωση της κατανάλωσης συμβατών καυσίμων. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις και τα υπάρχοντα στοιχεία της ΕΕ σήμερα είναι δυνατή η εξοικονόμηση ενέργειας στα δημόσια και εμπορικά κτίρια στην Ελλάδα σε ποσοστά που κυμαίνονται από 10% έως 50%.

Η χρήση ηλιακής ενέργειας αποτελεί έναν από τους βασικότερους στόχους της επιστημονικής έρευνας για την δημιουργία τέτοιων συστημάτων. Παρά βέβαια τα πλεονεκτήματα της, είναι διακοπτόμενη πηγή ενέργειας και πολλές φορές για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύχθηκαν συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, που είναι σημαντικά εξαιτίας της μεγάλης αποθηκευτικής τους ικανότητας και της απόδοσης ενέργειας μετά από κάποια χρονική καθυστέρηση.

[1],[2],[3],[4]

## **2. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **2.1. ΓΕΝΙΚΑ**

Οι ήπιες μορφές ενέργειας ή "ανανεώσιμες πηγές ενέργειας" (ΑΠΕ) ή "νέες πηγές ενέργειας" είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχεται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες.

Ο όρος "ήπιες" αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Πρώτον, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση, καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερο, πρόκειται για "καθαρές" μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Ως "ανανεώσιμες πηγές" θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας (π.χ. του πετρελαίου ή του άνθρακα).

Τα είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική και γεωθερμική ενέργεια και η ενέργεια από παλίρροιες, κύματα και ωκεανούς.

Οι ΑΠΕ βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση τη γεωθερμική ενέργεια, η οποία είναι ροή ενέργειας από το εσωτερικό του φλοιού της γης, και την ενέργεια απ' τις παλίρροιες που εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα, και γι' αυτό θεωρούνται θεωρητικά ανεξάντλητες. Δεν παρουσιάζουν περιβαλλοντικά προβλήματα αλλά μόνο οικονομικούς και τεχνολογικούς περιορισμούς.

Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικότερων τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους παρουσιάστηκε αρχικά μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1979 και παγιώθηκε την τελευταία δεκαετία, μετά την συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Τα εγγενή πλεονεκτήματα των ΑΠΕ και η ουσιαστική συμβολή τους στην ενεργειακή απεξάρτηση της ανθρωπότητας από τους εξαντλήσιμους ενεργειακούς πόρους, επιτάσσουν αυτή τη στροφή. Ιδιαίτερα ακριβές στην αρχή, ξεκίνησαν σαν πειραματικές εφαρμογές. Σήμερα όμως λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια και, αν και αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής, ετοιμάζονται βήματα για παραπέρα αξιοποίησή τους. Το κόστος δε των εφαρμογών ήπιων μορφών ενέργειας πέφτει συνέχεια τα τελευταία είκοσι χρόνια και ειδικά η

αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά και η βιομάζα, μπορούν πλέον να ανταγωνίζονται στα ίσα παραδοσιακές πηγές ενέργειας όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια.

Για πολλές χώρες οι ΑΠΕ αποτελούν μία σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης, σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό του ισοζύγιο συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα συντελούν και στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο πρωταρχικός υπεύθυνος για την ρύπανση του περιβάλλοντος. Ειδικά στην Ελλάδα, που έχει μορφολογία και κλίμα κατάλληλο για νέες ενεργειακές εφαρμογές, η εκμετάλλευση αυτού του ενεργειακού δυναμικού θα βοηθούσε σημαντικά στην ενεργειακή αυτονομία της χώρας.

Σχεδόν, το 95% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλεται στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και την χρήση συμβατικών καυσίμων. Φαίνεται συνεπώς ότι ο μόνος τρόπος προκειμένου να ανταποκριθεί η Ευρωπαϊκή Ένωση στο φιλόδοξο στόχο που έχει θέσει για τον περιορισμό του διοξειδίου το άνθρακα (20%-20%-20% μέχρι το 2020) είναι η επιτάχυνση των ΑΠΕ.

Χρησιμοποιούνται είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση) είτε μετατρεπόμενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια). Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό απ' τις ήπιες μορφές ενέργειας είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

Η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν τη μικρότερη επίδραση στο περιβάλλον. Αυτές οι “φιλικές προς το περιβάλλον” πηγές ενέργειας δίνουν στον καταναλωτή έναν εναλλακτικό τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αυτόν με την χρήση άνθρακα, πυρηνικής ενέργειας, φυσικού αερίου, πετρελαίου και μεγάλων υδροηλεκτρικών μονάδων. Σήμερα οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος που λειτουργούν με άνθρακα παράγουν το μεγαλύτερο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Όμως αυτή η φθηνή μέθοδος προκαλεί τη μεγαλύτερη καταστροφή στο περιβάλλον με την εκπομπή τοξικών αερίων. Αυτά τα τοξικά αέρια, διοξείδιο του θείου και οξειδία του αζώτου, σε συνδυασμό με το νερό της βροχής δημιουργούν την όξινη βροχή και συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη.

Από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας η αιολική ενέργεια και η ηλιακή ενέργεια εκτιμάται ότι αποτελούν την ενεργειακή λύση του μέλλοντος. Στο παγκόσμιο συνέδριο ενέργειας το 1988 έγινε μια προβολή στο χρόνο των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας: Καμιά ενεργειακή πηγή δεν μπορεί να εξασφαλίσει την αναγκαία ενέργεια στη Γη πάνω από 15000 χρόνια εκτός από την ηλιακή ενέργεια. Χωρίς καμιά αμφιβολία το ενεργειακό μέλλον του κόσμου είναι η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. [5],[6]

## **2.2. ΕΙΔΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **2.2.1. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του ανέμου που προέρχεται από τη μετακίνηση αερίων μαζών της ατμόσφαιρας. Το συνολικό εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό της Ελλάδας μπορεί να καλύψει ένα μεγάλο μέρος των ηλεκτρικών αναγκών της. Οι μηχανές με τις οποίες εκμεταλλευόμαστε το φαινόμενο αυτό, ονομάζονται ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Η σύγχρονη τεχνολογία χρήσης της αιολικής ενέργειας ξεκίνησε με μικρές Α/Γ δυναμικότητας 20 ως 75 KW. Σήμερα χρησιμοποιούνται Α/Γ δυναμικότητας 200 ως 2.000 KW.

Ενδιαφέρον, για την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού τους, έχουν οι περιοχές με ικανοποιητικές μέσες ταχύτητες ανέμου. Σημαντικό ρόλο παίζει ο τόπος εγκατάστασης των ανεμογεννητριών. Η ύπαρξη ανωμαλιών του εδάφους, κτιρίων, δέντρων ή εμποδίων γενικά μπορεί να δημιουργήσει στροβιλισμούς και να μειώσει την αποδοτικότητα. Πριν την επιλογή της περιοχής απαιτείται μελέτη στατιστικών μετεωρολογικών δεδομένων για τις κατευθύνσεις των κυρίαρχων ανέμων για περίοδο ενός χρόνου.

Η παραγωγή ηλεκτρισμού από τον άνεμο είναι σήμερα ελκυστική για πολλούς λόγους. Κατά αρχήν πρόκειται για "καθαρή" ενέργεια. Η χρήση μιας τουρμπίνας 600KW, σε κανονικές συνθήκες, αποτρέπει την αποβολή 1200 τόνων CO<sub>2</sub> ετησίως, που θα αποβάλλονταν στο περιβάλλον αν εχρησιμοποιείτο άλλη πηγή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως π.χ. άνθρακας.

Δεν έχει καμιά επιβάρυνση για το περιβάλλον και ο τρόπος παραγωγής έχει αδιαμφισβήτητη ασφάλεια. Η αιολική ενέργεια είναι σήμερα η πιο φτηνή απ' όλες τις υπάρχουσες ήπιες μορφές και είναι ανεξάντλητη. Η παραγωγή ενέργειας από μια ανεμογεννήτρια κατά τα 20 χρόνια λειτουργίας της ισοδυναμεί με την 80πλάσια

ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την κατασκευή, λειτουργία και καταστροφή της όταν αυτή κριθεί ανενεργή.

Θεωρητικά, η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού της Ευρώπης στο μέγιστο θα μπορούσε να καλύψει όλες τις ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια. Όσον αφορά την Ελλάδα, το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό της εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 13,6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι ότι εξαρτάται άμεσα από την ύπαρξη ικανοποιητικών ταχυτήτων ανέμου. Επειδή δεν υπάρχουν δυνατότητες για οικονομική αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, επιβάλλεται να υπάρχει εφεδρεία συμβατικών σταθμών για το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των ανεμογεννητριών, σε περίπτωση που το αιολικό δυναμικό δεν επαρκεί. Για ηλεκτρικά συστήματα, όπως το σύστημα της Κρήτης, όπου οι αιχμές φορτίου καλύπτονται με αεροστρόβιλους ντίζελ και με υψηλό κόστος παραγωγής, θα μπορούσε να εξεταστεί η περίπτωση συνδυασμού ανεμογεννητριών με αντλητικά υδροηλεκτρικά έργα. [7],[8]

### **2.2.2. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

Γεωθερμία ή Γεωθερμική ενέργεια ονομάζουμε τη φυσική θερμική ενέργεια της Γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια. Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

- Με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια με ρυθμό 0,04 - 0,06 W/m<sup>2</sup>
- Με ρεύματα μεταφοράς, που περιορίζονται όμως στις ζώνες κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων.

Μεγάλη σημασία για τον άνθρωπο έχει η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας για την κάλυψη αναγκών του, καθώς είναι μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Ανάλογα με το θερμοκρασιακό της επίπεδο μπορεί να έχει διάφορες χρήσεις.

- Η Υψηλής Ενθαλπίας (>150 °C) χρησιμοποιείται συνήθως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ισχύς τέτοιων εγκαταστάσεων το 1979 ήταν 1.916 MW με παραγόμενη ενέργεια 12×10<sup>6</sup> kWh/yr.
- Η Μέσης Ενθαλπίας (80 έως 150 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση ή και ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων καθώς και μερικές φορές και για την παραγωγή ηλεκτρισμού (π.χ. με κλειστό κύκλωμα φρέον που έχει χαμηλό σημείο ζέσεως).

- Η Χαμηλής Ενθαλπίας (25 έως 80 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρων, για θέρμανση θερμοκηπίων, για ιχθυοκαλλιέργειες, για παραγωγή γλυκού νερού.

Η πρώτη βιομηχανική εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έγινε στο Λαρνταρέλλο (Lardarello) της Ιταλίας, όπου από τα μέσα του περασμένου αιώνα χρησιμοποιήθηκε ο φυσικός ατμός για να εξατμίσει τα νερά που περιείχαν βορικό οξύ αλλά και να θερμάνει διάφορα κτίρια. Το 1904 έγινε στο ίδιο μέρος η πρώτη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τη γεωθερμία (σήμερα παράγονται εκεί 2,5 δισ. kWh/έτος).

Η Ελλάδα διαθέτει μεγάλο αριθμό επιβεβαιωμένων γεωθερμικών πεδίων και των τριών κατηγοριών σε οικονομικά βάθη 100-1500μ που είναι διάσπαρτα σε ολόκληρη σχεδόν τη χώρα. Η συστηματική εκμετάλλευση τους μπορεί να επιφέρει στη χώρα μας σημαντικά οφέλη, τόσο περιβαλλοντικά, αφού αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, όσο και οικονομικά.

Η έρευνα για την αναζήτηση γεωθερμικής ενέργειας άρχισε ουσιαστικά το 1971 με βασικό φορέα το ΙΓΜΕ και μέχρι το 1979 (πριν από τη δεύτερη ενεργειακή κρίση) αφορούσε μόνο τις περιοχές υψηλής ενθαλπίας. Κατά την εξέλιξη των εργασιών η ΔΕΗ, σαν άμεσα ενδιαφερόμενη για την ηλεκτροπαραγωγή, ανέλαβε τις παραγωγικές γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας και την ανάπτυξη των πεδίων, χρηματοδοτώντας επιπλέον τις έρευνες στις πιθανές για τέτοια ρευστά γεωθερμικές περιοχές. Συντάχθηκε ο προκαταρκτικός χάρτης γεωθερμικής ροής του ελληνικού χώρου, όπου φάνηκε ότι η γεωθερμική ροή στην Ελλάδα είναι σε πολλές περιοχές εντονότερη από τη μέση γήινη. Από το 1971 ερευνήθηκαν οι περιοχές: Μήλος, Νίσυρος, Λέσβος, Μέθανα, Σουσάκι Κορινθίας, Καμένα Βούρλα, Θερμοπύλες, Υπάτη, Αιδηψός, Κίμωλος, Σαντορίνη, Κως, Νότια Θεσσαλία, Αλμωπία, περιοχή Στρυμόνα, περιοχή Ξάνθης, Σαμοθράκη και άλλες.[9],[10]

### **2.2.3. ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

Η υδροηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από την εκμετάλλευση των υδάτων των ποταμών. Δεν παράγει βλαβερά αέρια και κατά συνέπεια έχει αισθητά μικρότερη επίδραση στην ατμόσφαιρα.

Για την παραγωγή της υδροηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλευόμαστε τη διαφορά του υψόμετρου που υπάρχει ανάμεσα στις δεξαμενές νερού και στις μηχανές. Το νερό, διαμέσου κατάλληλου φράγματος, συγκεντρώνεται σε τεχνητή λίμνη. Η τοποθεσία όπου κατασκευάζεται το φράγμα, πρέπει να είναι τέτοια, ώστε το νερό να

χρησιμοποιείται όχι μόνο για την παραγωγή ενέργειας αλλά και για την άρδευση των περιοχών που γειτονεύουν με το φράγμα.

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται τη στιγμή που απαιτείται από τους καταναλωτές το νερό το οποίο αποταμιεύεται σε ταμιευτήρες για μελλοντική χρήση για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων, σαν απόθεμα νερού, εμπλουτισμό λιμνών, αθλητικά γεγονότα, τουρισμό κ.λ.π. Παράλληλα το κύριο κριτήριο για την κατασκευή ή όχι ενός υδροηλεκτρικού εργοστασίου δεν είναι μόνο η δυνατότητα παραγωγής φτηνής και καθαρής για το περιβάλλον ενέργειας αλλά η σωστότερη, οικολογική επέμβαση στη φύση για διατήρηση της φύσης της περιοχής και τη σωστή Περιφερειακή ανάπτυξη της χώρας.

Το μέχρι σήμερα αναξιοποίητο υδροηλεκτρικό δυναμικό της ηπειρωτικής κυρίως Ελλάδος, θα μπορούσε να καλύψει σημαντικό ποσοστό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Μια από τις αναξιοποίητες πλουτοπαραγωγικές πηγές της Ηπείρου αποτελεί το τεράστιο υδάτινο δυναμικό το οποίο σύμφωνα με συντηρητικές εκτιμήσεις φαίνεται να πλησιάζει το 30% του συνολικού “φρέσκου” νερού της Ελλάδας. Όλοι οι ποταμοί της Ηπείρου έχουν τις πηγές τους στην οροσειρά της Πίνδου. Η οροσειρά της Πίνδου έχει σημαντικές βροχοπτώσεις και εδαφολογία τέτοια ώστε να μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το υδάτινο δυναμικό από μεγάλες υψομετρικές διαφορές ενώ από την άλλη πλευρά το έδαφος της οροσειράς είναι τέτοιο που ευνοεί τη δημιουργία τεχνητών λιμνών και δεξαμενών ύδατος.

Οι μέχρι τώρα έρευνες έδειξαν ότι στην Ήπειρο μπορούν να δημιουργηθούν μέχρι 18 μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια καθώς επίσης μέχρι και 50 περίπου μικρά, που μπορούν να παράγουν 5,000 GWh περίπου ετησίως. Η παραγωγή αυτή ενέργειας αντιστοιχεί στο 25% του αξιοποιήσιμου υδάτινου δυναμικού της χώρας και στο 15% της καταναλισκόμενης ισχύος στην Ελλάδα ανά έτος.[11]

#### **2.2.4. ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑ**

Το πιο απλό σύστημα παραγωγής ενέργειας από παλίρροιες περιλαμβάνει ένα φράγμα στην εκβολή ενός ποταμού. Κάποιες θύρες στο φράγμα επιτρέπουν την είσοδο θαλασσινού νερού στη δεξαμενή που σχηματίζεται πίσω από το φράγμα. Η κίνηση του νερού προς τη δεξαμενή κατά την άνοδο της παλίρροιας και από την δεξαμενή κατά την άμπωτη κινεί τουρμπίνες και γεννήτριες που παράγουν ηλεκτρισμό.

Η αξιοποίηση της παλιρροϊκής ενέργειας χρονολογείται από εκατοντάδες χρόνια πριν, αφού με τα νερά που δεσμεύονταν στις εκβολές ποταμών από την παλίρροια, κινούνταν νερόμυλοι. Ο τρόπος είναι απλός: Τα εισερχόμενα νερά της παλίρροιας στην ακτή κατά την πλημμυρίδα μπορούν να παγιδευτούν σε φράγματα, οπότε κατά την άμπωτη τα αποθηκευμένα νερά ελευθερώνονται και κινούν υδροστρόβιλο, όπως στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Τα πλέον κατάλληλα μέρη για την κατασκευή σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι οι στενές εκβολές ποταμών. Η διαφορά μεταξύ της στάθμης του νερού κατά την άμπωτη και την πλημμυρίδα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 μέτρα.

Σήμερα οι μικροί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το θαλασσινό νερό βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο. Η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες μιας πόλης μέχρι και 240 χιλιάδων κατοίκων. Ο πρώτος παλιρροϊκός σταθμός κατασκευάστηκε στον ποταμό La Rance στις ακτές της Βορειοδυτικής Γαλλίας το 1962 και οι υδροστρόβιλοί του μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καθώς το νερό κινείται κατά τη μια ή την άλλη κατεύθυνση. Άλλοι τέτοιοι σταθμοί λειτουργούν στη Ρωσία, στη θάλασσα Barents και στον κόλπο Fuhdy της Νέας Σκωτίας.[12],[13]

### **2.2.5. ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΚΥΜΑΤΑ**

Κυματική Ενέργεια είναι η μορφή ενέργειας που προκύπτει από την κινητική ενέργεια των κυμάτων. Το φαινόμενο των ανέμων έχει ως συνέπεια το σχηματισμό κυμάτων τα οποία είναι εκμεταλλεύσιμα σε περιοχές με υψηλό δείκτη ανέμων και σε ακτές ωκεανών.

Η κινητική ενέργεια των κυμάτων μπορεί να περιστρέψει την τουρμπίνα. Η ανυψωτική κίνηση του κύματος πιέζει τον αέρα προς τα πάνω, μέσα στο θάλαμο και θέτει σε περιστροφική κίνηση την τουρμπίνα έτσι ώστε η γεννήτρια να παράγει ρεύμα. Αυτός είναι ένας μόνο τύπος εκμετάλλευσης της ενέργειας των κυμάτων. Η παραγόμενη ενέργεια είναι σε θέση να καλύψει τις ανάγκες μιας οικίας, ενός φάρου, κλπ.

Η θαλάσσια επιφάνεια απορροφά τεράστιες ποσότητες ηλιακής και αιολικής ενέργειας, η οποία εμφανίζεται στη θάλασσα σε διάφορες μορφές, όπως κύματα ή ρεύματα. Επιπλέον, το θαλάσσιο σύστημα επηρεάζεται από τις βαρυτικές αλληλεπιδράσεις του πλανήτη μας με τον Ήλιο και τη Σελήνη. Ο μηχανισμός αυτός, αργά αλλά ρυθμικά, κινητοποιεί ασύλληπτες ποσότητες ύδατος, δημιουργώντας το



φαινόμενο της παλίρροιας. Διάφορες άλλες πηγές ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι το θερμικό δυναμικό μεταξύ των ανώτερων και των κατώτερων, ψυχρότερων, θαλάσσιων στρωμάτων, ή μεταβολές πυκνότητας σε θαλάσσια στρώματα διαφορετικής αλατότητας.[14],[15]

### **2.2.6. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

Η ηλιακή ενέργεια είναι η ενέργεια που έρχεται κατευθείαν από τον ήλιο. Ο ήλιος αποτελεί την κύρια και πρωταρχική πηγή ενέργειας της Γης. Η ηλιακή ακτινοβολία, έχει τροφοδοτήσει και εξακολουθεί να τροφοδοτεί με ενέργεια όλες σχεδόν τις ανανεώσιμες και μη πηγές ενέργειας. Θα μπορούσε να θεωρηθεί θεωρητικά ανεξάντλητη και περιβαλλοντικά καθαρή πηγή. Αξιοσημείωτο είναι ότι το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει ημερησίως στην Ελλάδα είναι ικανό να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες των κατοίκων της για ενάμισι χρόνο. Αυτός είναι και ο λόγος που οι άνθρωποι προσπάθησαν να εκμεταλλευτούν την ηλιακή ενέργεια από τα αρχαία ακόμα χρόνια, με πρωτοπόρο στον τομέα αυτόν τον Αρχιμήδη με τους περίφημους καθρέφτες του.

Μπορούμε να διακρίνουμε δύο μορφές αυτής της ενέργειας όσον αφορά την εκμετάλλευσή της: την θερμική και την φωτοβολταϊκή.

- Η φωτοβολταϊκή ονομάζεται έτσι λόγω του τρόπου απόκτησης της. Το φως μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια (βολτ) με την βοήθεια κατάλληλων διατάξεων, των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Μειονεκτήματα αυτής είναι το κόστος που παραμένει αρκετά υψηλό και η απαίτηση μεγάλων ελεύθερων επιφανειών προκειμένου να τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ.
- Η θερμική ενέργεια είναι το σύνολο της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων που συγκροτούν τα υλικά σώματα, καθώς αυτά κινούνται στο εσωτερικό τους. Αποτελεί από άποψη ποιότητας τη χειρότερη μορφή ενέργειας, γιατί μετατρέπεται δύσκολα και έχει πολλές απώλειες σε ενέργειες άλλων μορφών. Είναι αναπόφευκτο προϊόν κάθε ενεργειακής μετατροπής. Η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα επιτυγχάνεται μέσω θερμικών ηλιακών συστημάτων. Τα συστήματα αυτά συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπουν σε θερμότητα. Την θερμότητα αυτή μπορούμε να την χρησιμοποιήσουμε αμέσως ή να την αποθηκεύσουμε με τεχνητά μέσα και να την χρησιμοποιήσουμε όταν την χρειαστούμε.

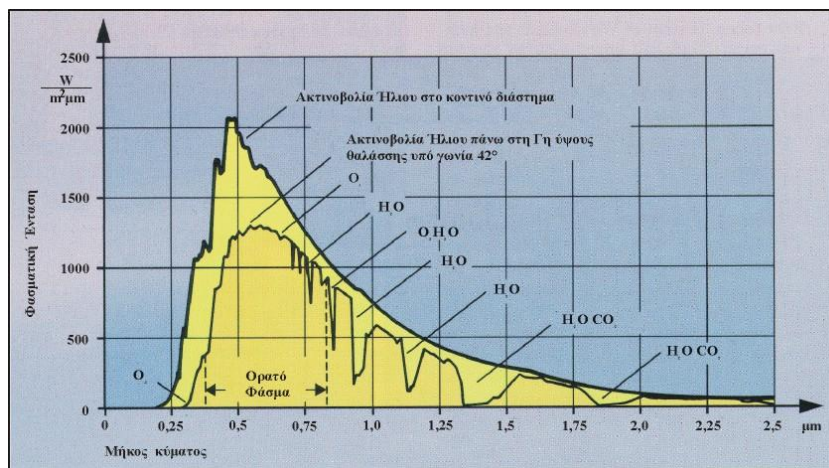
Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων συστημάτων είναι οι γνωστοί ηλιακοί θερμοσίφωνες. Η Ελλάδα είναι χώρα με μεγάλη ηλιοφάνεια και προσφέρεται για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Το κέρδος της χώρας, οικονομικό και κυρίως περιβαλλοντικό είναι αρκετά σημαντικό. Είναι χαρακτηριστικό ότι το 1996 πουλήθηκαν σε όλη την Ελλάδα 50.000 ηλιακοί θερμοσίφωνες.

Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρας του πλανήτη μας ισοδυναμεί με  $1,5 \cdot 10^{18}$  kWh και κατανέμεται ως εξής:

- Το ~31% ανακλάται από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας της ατμόσφαιρας της γης.
- Το ~47% φτάνει μέχρι την επιφάνεια της Γης
- Το ~23% συμβάλει στη δημιουργία των ανέμων, των κυμάτων και γενικά ρυθμίζει το κλίμα
- Το ~33% της ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης απορροφάται από τους ωκεανούς
- Το ~14% της ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης απορροφάται από την ξηρά και
- Το ~0,1% της ενέργειας απορροφάται από τα φυτά.

Ως ηλιακή σταθερά,  $G_{sc}$ , ορίζεται η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο η μονάδα επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας, όταν η απόσταση Γης-ήλιου λαμβάνει τη μέση τιμή της. Η τιμή της είναι  $G_{sc}=1353\text{W/m}^2$

Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την θερμοκρασία του ήλιου που είναι περίπου 5900K και δίνεται από το παρακάτω γράφημα.



Φασματική κατανομή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσεως του μήκους κύματος

Η υπεριώδης, η ορατή και η υπέρυθη ακτινοβολία αντιστοιχούν στις περιοχές μήκων κύματος  $\lambda < 0,38 \mu\text{m}$ ,  $0,38\mu\text{m} < \lambda < 0,78\mu\text{m}$  και  $\lambda > 0,78 \mu\text{m}$  με αντίστοιχη ενέργεια  $95 \text{ W/m}^2$ ,  $640\text{W/m}^2$  και  $618\text{W/m}^2$  ( $95+640+618=1353 \text{ W/m}^2 = G_{sc}$ )

Το 99% της ηλιακής ενέργειας εμφανίζεται σε μήκος κύματος από 0.25 έως 4.0  $\mu\text{m}$ .

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της ηλιακής ακτινοβολίας είναι:

- Γωνία ζενίθ,  $\theta_z$ , είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ηλίου.
- Ηλιακό ύψος,  $90^\circ - \theta_z$ , είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ηλίου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.
- Αζιμούθιο επιφάνειας,  $\gamma$ , είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Είναι:  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ , με  $\gamma=0^\circ$  στο νότο,  $\gamma=90^\circ$  στη δύση,  $\gamma=180^\circ$  στο βορρά και  $\gamma=-90^\circ$  στην ανατολή.
- Αζιμούθιο ηλίου,  $\gamma_s$ , είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.
- Κλίση επιπέδου,  $\beta$ , είναι η γωνία που σχηματίζει μία επίπεδος επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Είναι:  $-180^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ , με  $\beta=0^\circ$  στο οριζόντιο επίπεδο και  $\beta=90^\circ$  στο κατακόρυφο. Για  $\beta > 90^\circ$  το επίπεδο βλέπει προς τα κάτω.
- Ηλιακός χρόνος είναι ο χρόνος που μετράται με βάση τη φαινόμενη κίνηση του ήλιου στον ουρανό. Έτσι, το ηλιακό μεσημέρι είναι η χρονική στιγμή που ο ήλιος τέμνει τον μεσημβρινό του παρατηρητή. Ο ηλιακός χρόνος δε συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο,  $t_{\text{ρολ}}$ , που δείχνει το ρολόι. Η παρακάτω σχέση συνδέει τους δύο χρόνους:

$$\text{Ηλιακός χρόνος} = t_{\text{ρολ}} \pm 4(L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E$$

όπου  $L_{\text{st}}$  είναι το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού στον οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος (π.χ. για την Ελλάδα  $L_{\text{st}} = 30^\circ$ ) και  $L_{\text{loc}}$  είναι το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή. Η σχέση ισχύει με + για τα δυτικά μήκη και με - για τα ανατολικά. Ο συντελεστής 4 εκφράζει min/μόιρα και E (σε min) είναι η εξίσωση του χρόνου που λαμβάνεται για κάθε ημέρα του έτους.

- Ωριαία γωνία,  $\omega$ , είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό  $15^\circ / h = 0,25^\circ / \text{min}$ .

Ισχύει ότι:

$\omega = 0,25$  (min από το ηλιακό μεσημέρι)

Προφανώς ισχύει ότι  $\omega > 0$  για μμ και  $\omega < 0$  πμ.

- Ηλιακή απόκλιση,  $\delta$ , είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του Ισημερινού.

Ισχύει ότι:

$-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$  με θετικές τιμές προς το Βορρά.

Δίνεται από τη σχέση :

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

όπου  $n = 1 \div 365$  είναι η μέρα του έτους .

- Αέριος μάζα είναι ο λόγος της οπτικής διαδρομής της αμέσου ακτινοβολίας μέσα στη ατμόσφαιρα προς την οπτική διαδρομή αν ο ήλιος βρισκόταν στο ζενίθ.

Για  $0^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ , στο επίπεδο της θάλασσας, ισχύει:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

ενώ για  $\theta > 70^\circ$  η επίδραση της καμπυλότητας της γης γίνεται σημαντική και πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν. Έξω από την ατμόσφαιρα λαμβάνεται  $m = 0$ .

- Άμεσος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη κατ' ευθείαν από τον ήλιο χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Η στιγμιαία τιμή (σε  $W / m^2$ ) της αμέσου ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με  $G_b$  ενώ η στιγμιαία τιμή (σε  $W / m^2$ ) της αμέσου ακτινοβολίας που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο με  $G_{bT}$ . Για χρονική περίοδο μιας ώρας ή μιας ημέρας αντί του συμβόλου  $G$  χρησιμοποιείται το  $I$  και  $H$  αντιστοίχως (σε  $J / m^2$ ).
- Διάχυτος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα. Ο συμβολισμός είναι ίδιος όπως και στην άμεσο ακτινοβολία αλλά με δείκτη  $d$  αντί για  $b$ .

- Ολική ακτινοβολία είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συμπεριλαμβανομένου και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από παρακείμενες επιφάνειες. Συμβολισμοί όπως και στη άμεση και διάχυτη αλλά χωρίς τους δείκτες., πχ  $G$  είναι η ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου και  $G_T$  του κεκλιμένου.
- Ακτινοβολία καθέτου επιπέδου ή κάθετος ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες. Δηλώνεται θέτοντας το δείκτη  $n$  , πχ  $G_{bn}$  είναι η άμεσος ακτινοβολία καθέτου επιπέδου και  $G_{on}$  είναι η ακτινοβολία καθέτου επιπέδου εκτός ατμοσφαιράς. Ο δείκτης  $o$  δηλώνει ακτινοβολία εκτός ατμοσφαιράς.
- Γωνία πρόσπτωσης,  $\theta$ , της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσώνηλιακών ακτινών και της καθέτου στην επιφάνεια.
- Ο λόγος  $R_b$  της αμέσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο οριζοντίου επιπέδου:

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

Η τιμή του λόγου αυτού απαιτείται για τον υπολογισμό της αμέσου ακτινοβολίας κεκλιμένης επιφάνειας, πχ ηλιακού συλλέκτη, όταν είναι γνωστή η άμεσος ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας.[16],[17],[18],[19]

### 3. ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Τα ηλιακά συστήματα διακρίνονται σε τρεις υποκατηγορίες σύμφωνα με την θερμοκρασία της αποδοτικής λειτουργίας τους. Η εξάρτηση από την θερμοκρασία λειτουργίας συμβαίνει γιατί κάθε σύστημα έχει αποδοτική λειτουργία σε διαφορετικούς συντελεστές.

- Έτσι έχουμε τα συστήματα χαμηλών θερμοκρασιών μέχρι τους 100°C, όπως είναι οι γνωστοί επίπεδοι συλλέκτες που συνδέονται με τον θερμοσίφωνα και οι συλλέκτες που θερμαίνουν αέρα, (παθητικά συστήματα θέρμανσης).
- Η δεύτερη υποκατηγορία είναι τα συστήματα των μέσων θερμοκρασιών, όπου το ρευστό μπορεί να έχει θερμοκρασία άνω των 100 °C. Τα συστήματα αυτά δεν έχουν ακόμα περάσει ευρέως στην πράξη καθώς βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο. Στην κατηγορία αυτή έχουμε λοιπόν συστήματα τα οποία στηρίζονται στην

τεχνική του κενού, όπως επίσης και συστήματα τα οποία στηρίζονται στην συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας με χρήση κατόπτρων ή φακών διαφόρων τύπων.

- Η τρίτη υποκατηγορία είναι τα συστήματα υψηλών ή πολύ υψηλών θερμοκρασιών όπου οι θερμοκρασίες που μπορούν να επιτευχθούν είναι από 400 έως 3000°C. Υπάρχουν τέτοια συστήματα στην πράξη, όπου η υψηλή θερμοκρασία είτε χρησιμοποιείται για να παραχθεί μέσω του θερμοηλεκτρικού κύκλου ηλεκτρισμός με πολύ υψηλή απόδοση, είτε χρησιμοποιούνται σαν ηλιακοί φούρνοι για να χρησιμοποιηθεί η υψηλή θερμοκρασία για ειδικές επεξεργασίες υλικών ή παρατηρήσεων ή μετρήσεων ή ελέγχου που δεν μπορούν να γίνουν διαφορετικά και εύκολα με άλλες τεχνικές.

Οι εφαρμογές χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας περιλαμβάνουν τα ενεργητικά και παθητικά συστήματα παραγωγής θερμότητας από τον ήλιο. Τα ενεργητικά θερμικά ηλιακά συστήματα αποτελούν αντικείμενο βιομηχανικής παραγωγής ενώ τα παθητικά αποτελούν αντικείμενο αρχιτεκτονικής σχεδίασης.

Οι κατευθύνσεις της εφαρμοσμένης ηλιακής ενέργειας που έχουν ακολουθηθεί στο διεθνή χώρο είναι τρεις:

- Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική με τα φωτοβολταϊκά κύτταρα.
- Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική χαμηλής ή μέσης θερμοκρασίας.
- Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική υψηλής θερμοκρασίας και στη συνέχεια η μετατροπή της σε ηλεκτρική με ένα θερμοδυναμικό κύκλο.

Τα ηλιακά συστήματα ξεκίνησαν να παράγονται σε παγκόσμιο επίπεδο το 1974 μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973-74, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας. Η στροφή στα ηλιακά συστήματα έγινε εντονότερη στη δεύτερη κατεύθυνση, όπου υπήρχε ήδη μια καλή τεχνολογία στους επίπεδους κυρίως ηλιακούς συλλέκτες και μια σχετική εμπειρία στα προβλήματα της εφαρμογής τέτοιου είδους συστημάτων.

Τα ηλιακά συστήματα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή θερμότητας, είτε είναι ενεργητικά είτε παθητικά, έχουν ορισμένα κοινά μέρη. Αυτά είναι:

1. Σύστημα συλλογής και μετατροπής της θερμικής ακτινοβολίας σε θερμότητα (οι ηλιακοί συλλέκτες, η επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας)
2. Σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας
3. Σύστημα απόδοσης της αποθηκευμένης ενέργειας για χρήση
4. Σύστημα ελέγχου του όλου συστήματος και της καλής λειτουργίας και αυτό πρέπει να συνυπολογίζεται στο συνολικό σύστημα και στο κόστος του.[20],[21]

### **3.1. ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

Τέτοια συστήματα είναι τα δομικά στοιχεία ενός κτιρίου που βοηθούν στην καλύτερη, άμεση ή έμμεση, εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση ή το δροσισμό του κτιρίου. Προϋπόθεση για την εφαρμογή παθητικών ηλιακών συστημάτων σε ένα κτίριο είναι η θερμομόνωσή του έτσι ώστε να περιοριστούν οι θερμικές απώλειες. Η αρχή λειτουργίας των παθητικών συστημάτων θέρμανσης βασίζεται στο "φαινόμενο του θερμοκηπίου" ενώ τα παθητικά συστήματα δροσισμού βασίζονται στην προστασία του κτιρίου από τον ήλιο, δηλαδή στην παρεμπόδιση της εισόδου των ανεπιθύμητων, κατά τη θερινή περίοδο, ακτινών του ήλιου στο κτίριο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μόνιμων ή κινητών σκιάστρων καθώς και με τη διευκόλυνση της φυσικής κυκλοφορίας του αέρα στο εσωτερικό των κτιρίων. Ένα κτίριο που περιλαμβάνει παθητικά συστήματα θέρμανσης, δροσισμού ή ακόμη και φυσικού φωτισμού, κατασκευασμένο εξ αρχής ή τροποποιημένο, ονομάζεται "βιοκλιματικό κτίριο" και είναι δυνατό να καλύψει μεγάλο μέρος των ενεργειακών του αναγκών από την άμεση ή έμμεση αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.[22]

### **3.2. ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

Τα ενεργητικά συστήματα ή ηλιακές εγκαταστάσεις είναι τα συστήματα στα οποία η μεταφορά της συλλεγόμενης ηλιακής θερμότητας πραγματοποιείται με κυκλοφορία του θερμικού υγρού με τη βοήθεια αντλίας ή ανεμιστήρα. Αυτά τα συστήματα εξαρτώνται συνεπώς από πρόσθετη πηγή ενέργειας, κυρίως ηλεκτρισμό, για την λειτουργία τους.

Η καρδιά ενός ενεργητικού ηλιακού συστήματος είναι ο ηλιακός συλλέκτης. Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στη μαύρη, μεταλλική συνήθως, επίπεδη επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη, η οποία απορροφά την ακτινοβολία και θερμαίνεται. Πάνω

από την απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα, από γυαλί ή πλαστικό, που αφήνει τις ακτίνες του ήλιου να περάσουν, αλλά εμποδίζει την θερμότητα να ξεφύγει. Αν τοποθετήσουμε σωληνώσεις με νερό σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια, μπορούμε να της αποσπάσουμε την πολύτιμη, συγκεντρωμένη ενέργεια. Αυτή την ενέργεια τη μεταφέρουμε, με τη μορφή ζεστού νερού, σε μια μονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης (boiler), απ' όπου θα την πάρουμε όταν τη χρειαστούμε.

Ανάλογα με διάφορους παράγοντες, όπως η εφαρμογή για την οποία προορίζονται, την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, το μέγεθος, τις κλιματικές συνθήκες τις περιοχής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικού τύπου θερμικά ηλιακά συστήματα. Τα συστήματα αυτά ποικίλουν από τα χαμηλού κόστους, συμβατικά θερμοσιφωνικά (χωρίς παρελκόμενο μηχανολογικό εξοπλισμό) έως τα αποτελεσματικά, περίπλοκα και δαπανηρά κεντρικά ηλιακά συστήματα όπου χρησιμοποιούνται αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας, αισθητήρες και συστήματα ελέγχου. Η ποικιλία που παρουσιάζουν οι διατάξεις των συστημάτων αυτών οφείλεται κυρίως στους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους τα συστήματα αυτά προστατεύονται από τον παγετό και στον τρόπο που επιτυγχάνεται η κυκλοφορία ζεστού νερού.

Συνεπώς, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες: τα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας και τα συστήματα βεβιασμένης κυκλοφορίας.

- Στα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας ο όρος «φυσική κυκλοφορία» χρησιμοποιείται γιατί το σύστημα αυτό δεν χρειάζεται κανένα μηχανισμό ώστε να παρέχει την επιπλέον ενέργεια όταν αποθηκεύει και μεταφέρει ηλιακή ενέργεια στον έμμεσο κύλινδρο. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τέτοιων συστημάτων.
  - Η πρώτη είναι οι συμπαγείς θερμαντήρες νερού ή, όπως αλλιώς ονομάζονται τα ολοκληρωμένα συστήματα συλλέκτη-αποθήκευσης που αποτελούνται από μία ή περισσότερες δεξαμενές αποθήκευσης και τοποθετούνται σε ένα μονωμένο περίβλημα με διάφανη πλευρά προς τον ήλιο.
  - Η δεύτερη κατηγορία είναι τα θερμοσιφωνικά συστήματα. Αυτά στηρίζονται στη φυσική κυκλοφορία του νερού στους συλλέκτες και τη δεξαμενή, η οποία βρίσκεται ψηλότερα από τον συλλέκτη. Συγκεκριμένα, καθώς το νερό θερμαίνεται στον ηλιακό συλλέκτη γίνεται



ελαφρύτερο και ανέρχεται με φυσικό τρόπο προς την δεξαμενή αποθήκευσης ενώ το ψυχρότερο νερό της δεξαμενής ρέει μέσω των σωληνώσεων προς το κατώτερο σημείο του συλλέκτη δημιουργώντας κυκλοφορία σε όλο το σύστημα. Εάν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί, τότε λειτουργεί βοηθητική πηγή ενέργειας.

- Στα συστήματα βεβιασμένης κυκλοφορίας χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές αντλίες, βαλβίδες και συστήματα ελέγχου για να κυκλοφορήσουν το νερό ή άλλα ρευστά μεταφοράς θερμότητας μέσα στους συλλέκτες. Αυτό το σύστημα δεν έχει συγκεκριμένους περιορισμούς τοποθέτησης σχετικούς με την απόσταση μεταξύ δεξαμενής και του ηλιακού συλλέκτη (εξαναγκασμένη κυκλοφορία). Χωρίς αμφιβολία είναι ένα πιο σύνθετο σύστημα που όμως παρέχει πολλά πλεονεκτήματα όπως την περιορισμένη οπτική θέα της εγκατάστασης και σαφώς καλύτερη αρχιτεκτονική άποψη, πλήρη έλεγχο της εγκατάστασης με απλό τρόπο, πολλές δυνατότητες εφαρμογών με εξαιρετικές επιδόσεις καθώς και πολλές δυνατότητες εγκατάστασης σύμφωνα την αρχιτεκτονική άποψη του χώρου.

Τέτοιου τύπου συστήματα μπορεί επίσης να είναι είτε ανοιχτού είτε κλειστού βρόγχου.

- Στα ανοιχτού βρόγχου, χρησιμοποιούνται αντλίες (κυκλοφορητές) για να κυκλοφορήσουν νερό χρήσης στους συλλέκτες. Πιο συγκεκριμένα, ο διαφορικός θερμοστάτης θέτει σε λειτουργία τον κυκλοφορητή όταν η θερμοκρασία του νερού στην κορυφή του συλλέκτη είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία στο πυθμένα της δεξαμενής. Βαλβίδα αντεπιστροφής εμποδίζει την αντίστροφη ροή του νερού και την απώλεια θερμότητας από τον συλλέκτη κατά την νύχτα. Η βοηθητική πηγή ενέργειας μπορεί να βρίσκεται στο σωλήνα εξόδου από την δεξαμενή με την μορφή θερμαντήρα εν σειρά χωρίς αποθηκευτική ικανότητα (ταχυθερμοσίφωνα).
- Τα συστήματα κλειστού βρόγχου συμπεριλαμβάνουν αντιπηκτικό κύκλωμα (το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι συνήθως μίγμα γλυκόζης και νερού) ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος παγώματος του συλλέκτη κατά των χειμώνα αλλά και να περιορίζεται η διάβρωση από τη συνεχή ροή του νερού του δικτύου ύδρευσης. Οι εναλλάκτες θερμότητας μπορεί να βρίσκονται είτε εντός είτε εκτός της δεξαμενής και η βοηθητική πηγή ενέργειας μπορεί να δίνεται είτε μέσα στη δεξαμενή είτε από θερμαντήρα με αποθηκευτική ικανότητα ( π.χ. ηλεκτρικός θερμοσίφωνα).

Τα ηλιακά συστήματα συμπληρώνονται από δοχείο διαστολής, βαλβίδες ασφαλείας και άλλα εξαρτήματα. Σημαντικό μειονέκτημα των θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι ότι έχουν χαμηλούς συντελεστές απόδοσης. Αυτό συμβαίνει γιατί η αρχική ποσότητα ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε κάποια επιφάνεια μειώνεται συνεχώς μέχρι την τελική χρήση. [23] ,[24]

#### **4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ**

##### **4.1. ΓΕΝΙΚΑ**

Οι εφαρμογές ηλιακής ενέργειας απαιτούν μια αποτελεσματική θερμική ενεργειακή αποθήκευση η οποία επιτυγχάνεται από ένα κατάλληλο σύστημα αποθήκευσης που διαθέτει το θερμικό ηλιακό σύστημα.

Η ανάγκη αυτή βασίζεται στα εξής:

- Υπάρχει διαφορά μεταξύ ενεργειακής διάθεσης και ενεργειακή ζήτησης.
- Η ηλιακή ενέργεια είναι μια ασυνεχής πηγή ενέργειας καθώς δεν παράγεται κατά την διάρκεια της νύχτας και
- Είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση της διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ενέργειας στα ηλιακά θερμικά συστήματα. Η διακύμανση αυτή στηρίζεται στη θέση του ήλιου κατά την διάρκεια της μέρας και από την παρουσία σύννεφων ή ρύπανσης του αέρα.

Ένας επιπλέον λόγος που καθιστά επιτακτική την ανάγκη ενεργειακής αποθήκευσης είναι προκειμένου να εξοικονομηθεί ενέργεια αφού το 50% της παγκόσμιας ενέργειας απορρίπτεται στο περιβάλλον αχρησιμοποίητο. Το ποσοστό αυτό μπορεί να μειωθεί αναπτύσσοντας κατάλληλα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης με την χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας και την βοήθεια της χρονικής μεταβολής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Οι χρονικοί ορίζοντες για τη χρήση των αποθηκευτικών διατάξεων για μία από τις παραπάνω δυνατές εφαρμογές τους χωρίζουν τις διατάξεις αποθήκευσης σε διατάξεις:

##### **Στιγμιαίας αποθήκευσης (buffer storage).**

Πρόκειται για τις διατάξεις αποθήκευσης που ο χρόνος συλλογής είναι ο θεωρητικά ίδιος με τον χρόνο διάθεσης της ενέργειας. Επειδή όμως ένα αποθηκευτικό σύστημα δημιουργείται εξαιτίας της ενεργειακής διαφοράς διάθεσης και ζήτησης τα συστήματα αυτά μπορούν να προσφέρουν ή να απορροφήσουν ενέργεια για μικρό χρονικό

διάστημα και έχουν μικρό μέγεθος. Τυπικές εφαρμογές αυτού του είδους είναι η παροχή αδιάλειπτης παροχής ισχύος και ευστάθειας λειτουργίας ΣΗΕ.

#### Ημερήσιας αποθήκευσης (Diurnal storage).

Σ' αυτού του είδους τα συστήματα οι απαιτήσεις ενέργειας αφορούν χρονικό ορίζοντα 24 ωρών ενώ η φάση συλλογής συμβαίνει κατά την διάρκεια έντονης ηλιοφάνειας. Έτσι σε αντίθεση με τα συστήματα στιγμιαίας αποθήκευσης, αυτά έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν ενέργεια για μία με δύο μέρες. Αυτού του είδους οι εφαρμογές είναι η διαχείριση των ΑΠΕ, η ενίσχυση της παροχής στρεφόμενης εφεδρείας και η διαχείριση παρεχόμενης ισχύος στους καταναλωτές.

#### Ετήσιας αποθήκευσης (Annual storage).

Σε αντίθεση με τα δύο παραπάνω συστήματα αυτό αποθηκεύει την ενέργεια κατά την διάρκεια του καλοκαιριού όπου υπάρχει υψηλή ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας και προσφέρει την διαθέσιμη ενέργεια τον χειμώνα, που η δυνατότητα συλλογής είναι πολύ μικρότερη από τις απαιτήσεις. Αφορά διατάξεις αποθήκευσης από αρκετές ώρες μέχρι εβδομάδα και μήνες. Κυρίως χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της ζήτησης μεταξύ ωρών αιχμής και μη αιχμής ή την ικανοποίηση ζήτησης αιχμής έχοντας αποθηκεύσει ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.

Τα συστήματα στιγμιαίας και ημερήσιας αποθήκευσης αποτελούν συστήματα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενώ τα ετήσιας αποτελούν σύστημα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης και είναι σαφώς μεγαλύτερα. Στα παραδοσιακά ενεργειακά συστήματα η ανάγκη θερμικής αποθήκευσης είναι συνήθως βραχυπρόθεσμη και οι τεχνικές λύσεις μπορεί να είναι απλές και στις περισσότερες περιπτώσεις να αφορούν εφαρμογές νερού.

Για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης λαμβάνεται υπόψη η διάρκεια αποθήκευσης, η οικονομική βιωσιμότητα και οι διάφορες λειτουργικές παράμετροι. Η πλειοψηφία αυτών των συστημάτων χρησιμοποιείται για θέρμανση και ψύξη. Αποτελούν ένα σύνδεσμο και μια προσωρινή αποθήκη μεταξύ της ενεργειακής πηγής και του χρήστη. Η ASHRAE έχει θεσπίσει ένα σύνολο από κανόνες και δοκιμασίες που μπορούμε να υποβάλουμε ένα σύστημα θερμικής αποθήκευσης έτσι ώστε να ελέγξουμε την απόδοσή του.

Σύμφωνα με έρευνες, η ενεργειακή αποθήκευση βελτιώνει την απόδοση των μεγάλων κυρίως ενεργειακών μονάδων, μειώνει τις ενεργειακές ανάγκες και το χρόνο

ή το ρυθμό υστέρησης μεταξύ διάθεσης και ζήτησης της ενέργειας και επιτρέπει την αποδοτικότερη χρήση των ενεργειακών πηγών.

Επίσης με την χρήση θερμικής αποθήκευσης είναι δυνατόν να μεγιστοποιηθεί η λειτουργικότητα του ηλιακού συστήματος διότι σε περιπτώσεις μεγάλης ηλιακής απολαβής, όπου υπάρχει πλήρης κάλυψη του φορτίου, το πλεόνασμα ενέργειας το οποίο είναι δυνατόν να συλλεχθεί, δεν αποβάλλεται αλλά αποθηκεύεται, ώστε να χρησιμοποιηθεί σε κάποια μελλοντική χρονική στιγμή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι δεξαμενές διεποχιακής αποθήκευσης οι οποίες είναι δεξαμενές μεγάλης μάζας νερού, οι οποίες αποθηκεύουν την θερμότητα κατά την διάρκεια του καλοκαιριού και την αποδίδουν κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών οπότε η ζήτηση είναι μεγαλύτερη και η ηλιακή ενέργεια μικρότερη.

Ο βαθμός απόδοσης σε ένα πλήρη κύκλο φορτισής /αποφόρτισης των θερμικών συστημάτων αποθήκευσης ορίζεται:

$$\eta = \frac{\text{ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ- ΑΠΩΛΕΙΕΣ}}{\text{ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ}}$$

Αν απαιτείται η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος σε σχέση με την ποιότητα της ενέργειας ή της διαθεσιμότητας της τότε θα χρησιμοποιηθεί η απόλυτη θερμοκρασία εισόδου της ενέργειας, η απόλυτη θερμοκρασία εξόδου της ενέργειας από την αποθήκη και η θερμοκρασία του μέσου που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση. Σε συστήματα που μετατρέπουν την θερμότητα σε μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια εκφράζεται ως ο λόγος της μηχανικής ή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την θερμότητα που αποθηκεύεται προς την ενέργεια που θα είχε παραχθεί στο ίδιο χρονικό διάστημα αν παρακαμπτόταν η αποθήκευση.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι θερμικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Τα θερμικά συστήματα που αποθηκεύουν θερμότητα με την μορφή αισθητής θερμότητας, τα θερμικά συστήματα που αποθηκεύουν ενέργεια με την ενέργεια χημικών δεσμών και θερμικά συστήματα που αποθηκεύουν με την μορφή λανθάνουσας θερμότητας.[24],[25]

#### **4.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ**

Τα βασικότερα στοιχεία που πρέπει να μελετηθούν σε ένα σύστημα θερμικής ενεργειακής αποθήκευσης είναι:

Η χωρητικότητα αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου ή βάρους, το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, το μέσον προσαγωγής και απαγωγής θερμότητας να έχει και τις κατάλληλες ιδιότητες για την ζητούμενη εφαρμογή, η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση στο σύστημα (μας ενδιαφέρει ο συντελεστής θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης), οι απαιτήσεις ισχύος για την προσαγωγή και απαγωγή της θερμότητας, τα κατασκευαστικά στοιχεία της δεξαμενής, οι θερμικές απώλειες (κυρίως στα μακροπρόθεσμα συστήματα αποθήκευσης) και το κόστος.

Η θερμοχωρητικότητα του συλλέκτη είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις ικανότητες αντίδρασης του συλλέκτη στις μεταβατικές περιόδους. Εξαρτάται από την συνολική μάζα και το είδος των υλικών που τον αποτελούν. Για την ακρίβεια όσο μικρότερη θερμοχωρητικότητα έχει τόσο λιγότερος χρόνος απαιτείται για τη θέρμανση της μάζα το πρωί και την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του προκειμένου να αρχίσει η συλλογή ωφέλιμης ενέργειας. Η πρωινή θέρμανση της μάζας του συλλέκτη πραγματοποιείται κατά την διάρκεια της νύχτας από την εκάστοτε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει ότι η πρωινή θέρμανση της μάζας του συλλέκτη είναι περίπου το σύνολο των απωλειών θερμότητας. Μπορούμε να πούμε ότι η θερμοχωρητικότητα του συλλέκτη αποτελεί μια έκφραση των ιδιοτήτων του στις μεταβατικές περιόδους και μια ένδειξη της απόδοσης αυτού αφού οι συλλέκτες με υψηλή απόδοση λειτουργούν ικανοποιητικά στις μεταβατικές περιόδους.

Ο συντελεστής θερμοκρασιακή διαστρωμάτωσης αντιπροσωπεύει την "ποιότητα" της θερμότητας την οποία αποδίδει ένα ηλιακό σύστημα θερμάνσεως νερού. Καθορίζεται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων της δοκιμής για την προσδιορισμό της απόδοσης χωρίς φορτίο (αναφέρεται σε ημερήσια βάση). Είναι ο λόγος της ημερήσιας ενεργειακής απολαβής με θερμοκρασία νερού 25° C πάνω από την μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος (για τις συνθήκες αναφοράς) προς την συνολική ημερήσια ενεργειακή απολαβή. Η συνολική ενεργειακή απολαβή από μια θερμοσιφωνική μονάδα εξαρτάται τόσο από τα κατασκευαστικά της χαρακτηριστικά

όσο και από τον τρόπο χρήσης του ζεστού νερού. Δείχνει το μέρος της ενέργειας που παίρνει ο καταναλωτής σε υψηλή και άμεσα χρησιμοποιούμενη θερμοκρασία.

Με την πάροδο του χρόνου υπάρχει η τάση να χάνεται η θερμική διαστρωμάτωση και να επικρατεί μία σχετικά ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασιών. Στην περίπτωση που γίνεται στην ίδια δεξαμενή η προσαγωγή της βοηθητικής ενέργειας τότε θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι τα δύο ρεύματα θερμότητας, το ηλιακό και αυτό της βοηθητικής πηγής, είναι αποχωρισμένα και η πρόσδοση της ηλιακής θερμότητας γίνεται στο χαμηλότερο τμήμα της δεξαμενής, ενώ της βοηθητικής στο υψηλότερο .

Σύμφωνα με παρατηρήσεις των Schmidt Willmott , η επιλογή του αποθηκευτικού μέσου γίνεται με βάση τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- Υψηλό ειδικό βάρος
- Να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως θερμικό και ως ψυκτικό μέσο
- Χημική και γεωμετρική σταθερότητα
- Να μην είναι εύφλεκτο, να μην διαβρώνει και να μην είναι τοξικό
- Να μην περιέχει χαμηλή πίεση ατμών στην περίπτωση που έχουμε αέριο αποθηκευτικό μέσο
- Να έχει χαμηλό κόστος τόσο αυτό όσο και το δοχείο που το περιέχει
- Να έχει ικανοποιητική μηχανική αντοχή
- Να έχει ευρύ φάσμα θερμοκρασιών λειτουργίας

Στις περιπτώσεις θέρμανσης ζεστού νερού η χρησιμοποίηση του νερού ως αποθηκευτικού μέσου είναι αρκετά λογική και συνήθως ενδείκνυται. Το νερό είναι ένα μέσον το οποίο έχει γνωστή θερμοδυναμική συμπεριφορά, έχει υψηλή θερμική χωρητικότητα ( $c_p=4.180 \text{ kJ/kg K}$ ), και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές εξαιτίας του μικρού κόστους όταν η θερμότητα που αποθηκεύεται πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασίες μικρότερες των  $100^\circ \text{C}$ .

Στην περίπτωση ηλιακών συλλεκτών αέρα, η θερμότητα αποθηκεύεται συνήθως σε κλίνη βότσαλων. Αυτή είναι μία δεξαμενή, θερμικά μονωμένη, η οποία περιέχει βότσαλα μικρής σχετικά διαμέτρου και ο αέρας οδηγούμενος μέσα σε αυτά αποβάλλει την θερμότητα του και εξέρχεται από την έξοδο με χαμηλότερη θερμοκρασία. Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι οι δεξαμενές από βότσαλα

προσφέρουν θερμική διαστρωμάτωση, ενώ στις περιπτώσεις δεξαμενής νερού η θερμική διαστρωμάτωση είναι πολύ δύσκολο να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Τέλος υπάρχουν αποθηκευτικά μέσα τα οποία στηρίζονται στην αλλαγή φάσης. Αυτά κατά την διάρκεια της φόρτισης τήκονται, ενώ κατά την αποφόρτιση, όταν δηλαδή αποδίδουν την αποθηκευμένη θερμότητα, αλλάζουν φάση και στερεοποιούνται. Τέτοια αποθηκευτικά μέσα είναι τα ένυδρα άλατα.

Τα κόστη που υπάρχουν σε ένα αποθηκευτικό σύστημα είναι το αρχικό κόστος, τα κόστη αντλιών και μονώσεων και τα κόστη λειτουργίας.

Τα κύρια προβλήματα σε μια εγκατάσταση αποθήκευσης θερμότητας είναι τα εξής:

- Η διαμόρφωση μιας κατάλληλης επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας με στόχο τη γρήγορη μεταφορά της στο σύστημα για αποθήκευση, αλλά και την ταχεία απόληψή της.
- Ο περιορισμός των απωλειών στο περιβάλλον με στόχο την αύξηση του χρόνου αποθήκευσης στα επίπεδα που χρειάζεται.

Τελευταία, εξετάζεται η αποθήκευση θερμότητας μέσα στη γη (underground storage). Στην περίπτωση αυτή, έχουμε ελαχιστοποίηση των μονώσεων.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος του αποθηκευτικού συστήματος εξαρτάται από την ζητούμενη εφαρμογή.[26]

## **5. ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

### **5.1. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΩΣ ΑΙΣΘΗΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ** **(SENSIBLE HEAT STORAGE)**

Σε αυτή την περίπτωση η ενέργεια αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται από την θέρμανση ή την ψύξη ενός υλικού (υγρού ή στερεού) το οποίο δεν αλλάζει φάση. Το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται εξαρτάται από την αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού αποθήκευσης και ισούται με:

$$Q = m \cdot \int_{T_1}^{T_2} C_p \cdot dT$$

Όπου  $m$  είναι η ποσότητα των moles,  $C_p$  είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα και τα  $T_1$  και  $T_2$  αντιπροσωπεύουν την χαμηλότερη και την υψηλότερη θερμοκρασία

αντιστοίχως καθώς πραγματοποιείται η αποθήκευση. Η διαφορά ( $T_2-T_1$ ) αναφέρεται σε διαφορά θερμοκρασίας.

Για την αποθήκευση θερμότητας ως αισθητή πρέπει τα υλικά να έχουν υψηλή θερμοχωρητικότητα και σχετικά χαμηλό κόστος. Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας εκμεταλλεύεται την θερμική θερμοχωρητικότητα και την αλλαγή θερμοκρασίας του υλικού κατά την διάρκεια φόρτισης και αποφόρτισης αυτού. Η αύξηση θερμοκρασίας μπορεί να ανιχνευθεί από έναν αισθητήρα. Μεγάλη ποικιλία τέτοιων υλικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτά τα συστήματα. Τέτοια μπορεί να είναι είτε υγρής μορφής όπως το νερό, πετρέλαιο, συγκεκριμένα ανόργανα άλατα υγρής φάσης είτε στερεής όπως πέτρες, βότσαλα, πυρίμαχα υλικά.

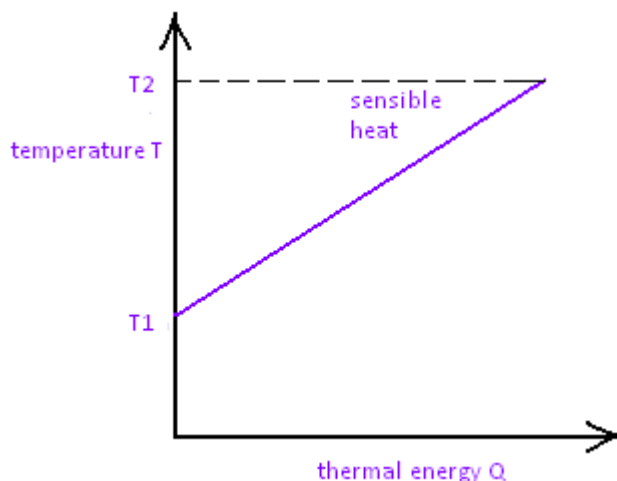
Το νερό σε υγρή μορφή είναι το πιο σύνηθες χρησιμοποιούμενο μέσο για τέτοιου είδους αποθήκευση καθώς έχει πολύ χαμηλή τιμή και υψηλή θερμοχωρητικότητα ( $C_p=4.180 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ ).

Τα περισσότερα συστήματα ηλιακής θέρμανσης νερού οικιακής χρήσης και χώρου χρησιμοποιούν δεξαμενές αποθήκευσης νερού που τοποθετούνται μέσα ή έξω από το κτίριο, ή κάτω από το έδαφος. Το μέγεθος που συνήθως χρησιμοποιείται είναι 75-100 λίτρα για κάθε τετραγωνικό μέτρο συλλεκτική επιφάνειας. Τα συστήματα αποθήκευσης τέτοιου τύπου λειτουργούν σε αρκετά μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών ( $5-95^\circ C$ ). Είναι προφανές ότι σε πολύ ψυχρά κλίματα απαιτείται η χρήση αντιπηκτικών ουσιών, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους.

Στην περίπτωση των στερεάς μορφής υλικών, αυτά είναι αμετάβλητα στην πορώδη τους φάση και η θερμότητα αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται από την ροή του αερίου ή του υγρού μέσω των πόρων ή του κενού. Η επιλογή του υλικού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το θερμοκρασιακό επίπεδο της εφαρμογής. Για την ακρίβεια χρησιμοποιείται νερό για θερμοκρασίες κάτω των  $100^\circ C$  και πυρίμαχα τούβλα για θερμοκρασίες γύρω στους  $1000^\circ C$ .

Τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι πιο απλά στη σχεδίαση από τα λανθάνοντα και των χημικών δεσμών αλλά είναι πολύ μεγάλα σε μέγεθος. Εξαιτίας του μεγάλου τους μεγέθους στα συστήματα αυτά πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν για την επιλογή του υλικού η τιμή ( $\rho C_p$ ). Ένα δεύτερο μειονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι ότι δεν μπορούν να αποθηκεύσουν ή να απελευθερώσουν ενέργεια σε σταθερή θερμοκρασία αλλά μεταβάλλεται όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



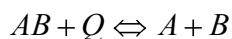


Γραφική παράσταση της αισθητής αποθήκευσης θερμότητας συνάρτησε της θερμοκρασίας

## 5.2. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΩΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΕΣΜΩΝ (THERMOCHEMICAL STORAGE)

Σε ένα σύστημα αποθήκευσης ως ενέργεια χημικών δεσμών μπορούν να πραγματοποιηθούν δύο διαδικασίες είτε απορρόφηση είτε απελευθέρωση ενέργειας σε μια απόλυτα αναστρέψιμη αντίδραση. Συγκεκριμένα, η αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για να πραγματοποιήσει μια ενδόθερμη χημική αντίδραση και κατόπιν να αποθηκεύσει τα προϊόντα αυτής. Αντίστροφα, πραγματοποιείται εξώθερμη αντίδραση για την απελευθέρωση ενέργειας. Και οι δύο οι αντιδράσεις συμβαίνουν σε διαφορετικές θερμοκρασίες και συγκεκριμένα στην ενδόθερμη αντίδραση παρατηρείται υψηλότερη θερμοκρασία από ότι στην εξώθερμη. Τα συστήματα αυτά είναι κατάλληλα μόνο για εφαρμογές μέσης και υψηλής θερμοκρασίας.

Η χημική αντίδραση είναι:



Από την παραπάνω αντίδραση καταλαβαίνουμε ότι στην ενδόθερμη αντίδραση μία ένωση AB σπάει στα στοιχεία A και B ενώ στην αντίστροφη διαδικασία (εξώθερμη αντίδραση) ενώνονται δύο στοιχεία A και B και προκύπτει η ένωση AB .

Η αποθηκευτική ικανότητα των συστημάτων αυτών στηρίζεται στην θερμότητα που απελευθερώνεται ή προσδίδεται κατά την διάρκεια της αντίδρασης. Σαν θερμότητα απορρόφησης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η ηλιακή ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο, τα συστήματα αυτά εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, απορροφώντας το φως του ήλιου, σε μια χημική αντίδραση, που γίνεται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν της φωτοσύνθεσης, σε εγκαταστάσεις αλλά χωρίς την χρήση ζωντανών οργανισμών.

Η ενδόθερμη αντίδραση πραγματοποιείται εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας είτε με την χρήση καταλύτη είτε χωρίς. Τα προϊόντα αυτής αποθηκεύονται σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς δεν απαιτείται η μόνωση στην δεξαμενή αποθήκευσης. Σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται καταλύτης, τα προϊόντα της ενδόθερμης αντίδρασης πρέπει να είναι ξεχωριστά κατά την θερμοκρασία της αντίδρασης προκειμένου να αποτραπεί η αντίστροφη αντίδραση. Τα προϊόντα πρέπει μετά να αποθηκευτούν ξεχωριστά. Αντίθετα, σε περίπτωση χρήσης καταλύτη, τα προϊόντα δεν είναι απαραίτητο να είναι ξεχωριστά.

Οι λόγοι προκειμένου να κριθεί η καταλληλότητα τέτοιων συστημάτων για ηλιακές εφαρμογές είναι οι εξής:

- Πρέπει η ενδόθερμη αντίδραση να πραγματοποιείται στο θερμοκρασιακό εύρος χρήσης των συλλεκτών.
- Η εξώθερμη αντίδραση πρέπει να πραγματοποιείται στο θερμοκρασιακό εύρος όπου η θερμότητα απελευθερώνεται.
- Η θερμοκρασίες των δύο αντιδράσεων πρέπει να είναι σε κοντινές θερμοκρασίες. Με αυτόν τον τρόπο η θερμοκρασία του συλλέκτη ελαχιστοποιείται ενώ η απόδοσή του μεγιστοποιείται.
- Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το μέγεθος της δεξαμενής αποθήκευσης πρέπει η ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα όγκου των αποθηκευμένων προϊόντων να είναι όσο μεγαλύτερη γίνεται και επιπλέον τα προϊόντα να είναι σε υγρή μορφή.
- Και οι δύο αντιδράσεις πρέπει να είναι γρήγορες και πλήρως αναστρέψιμες χωρίς δευτερεύουσες αντιδράσεις, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν άχρηστα ιζήματα.
- Πρέπει τα απαιτούμενα στοιχεία να είναι διαθέσιμα σε χαμηλό κόστος και εύκολα στην χρήση.

Πολλές χημικές αντιδράσεις έχουν μελετηθεί για την καταλληλότητα σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια. Μια μελλοντική πρακτική εφαρμογή είναι να χρησιμοποιηθεί η απαιτούμενη ηλιακή ενέργεια για να χωρίσει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο παρουσία ενός μεταλλικού καταλύτη όπως ο ψευδάργυρος. Αυτή η διαδικασία γίνεται σε δύο στάδια έτσι ώστε να αποφεύγονται οι ενδεχόμενες εκρήξεις που πραγματοποιούνται όταν το υδρογόνο και το οξυγόνο παράγονται στον ίδιο θάλαμο.

Μια επιπλέον χρήση τέτοιων συστημάτων αποθήκευσης είναι η χρήση της ηλιακής ενέργειας για την πραγματοποίηση βιομηχανικών χημικών αντιδράσεων και εφαρμογών χωρίς την απαίτηση ορυκτού καυσίμου. [20],[24]

### **5.3. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΩΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ** **(LATENT HEAT STORAGE)**

#### **5.3.1. ΑΛΛΑΓΗ ΦΑΣΗΣ**

Όλα τα υλικά που είναι γνωστά ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν μπορούν να βρίσκονται σε μία από τρεις φάσεις, στερεή, υγρή ή αέρια. Σε σπάνιες περιπτώσεις στις φάσεις συμπεριλαμβάνεται και το πλάσμα. Το πλάσμα είναι ένα ιδιαίτερα ιονισμένο αέριο σε υψηλή θερμοκρασία. Η ιονισμένη κατάσταση δημιουργεί ελκτικές και απωθητικές δυνάμεις που δίνουν ιδιαίτερες ιδιότητες στο πλάσμα που το ξεχωρίζουν από τα αέρια.

Η θερμοκρασία και η πίεση εκτός από το ότι εκφράζουν τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του κάθε υλικού, αποτελούν και τις συνθήκες ισορροπίας δύο διαφορετικών καταστάσεών του. Αντίθετα, στα μίγματα οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, που απαιτούνται για τις αλλαγές φάσεων, εξαρτώνται από τις αναλογίες των συστατικών τους και συνεπώς μεταβάλλονται.

Η αλλαγή φάσης είναι μία φυσική διαδικασία κατά την οποία ένα δοσμένο υλικό με συγκεκριμένες ιδιότητες μετατρέπεται, ολόκληρο ή μέρος του, σε ένα νέο υλικό με καινούργιες ιδιότητες. Η μετατροπή αυτή συναντάται παντού στη φύση. Στη θερμοδυναμική, η αλλαγή φάσης είναι η μετατροπή ενός θερμοδυναμικού συστήματος από μία μορφή σε μία άλλη. Στο σημείο αλλαγής φάσης παρατηρούνται απότομες αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες του υλικού. Για παράδειγμα ο όγκος του νερού σε υγρή μορφή που βράζει μπορεί να είναι πολύ διαφορετικός με τον αντίστοιχο όγκο του ατμού που θα δημιουργηθεί.

Η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται προκειμένου το υλικό να βρεθεί από την τρέχουσα κατάσταση σε κατάσταση περιβάλλοντος. Ακόμα όμως και σε κατάσταση περιβάλλοντος να βρίσκεται ένα μέρος του μετατρέπεται σε άλλη κατάσταση λόγω διαφοράς στη τάση ατμών.

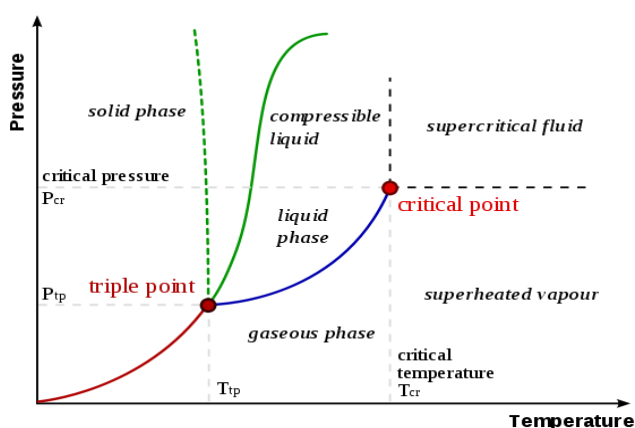
Πιο συγκεκριμένα, η μετατροπή του στερεού σε υγρό ονομάζεται τήξη, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται πήξη. Η μετατροπή από αέριο σε υγρό ονομάζεται υγροποίηση ή συμπύκνωση ενώ η αντίστροφη διαδικασία παρουσιάζεται σε δύο μορφές, τον βρασμό και την εξάτμιση. Ο βρασμός οφείλεται στην ασυμφωνία

τρέχουσας και κατάλληλης κατάστασης, ενώ η εξάτμιση γίνεται λόγω της μερικής πίεσης. Γι' αυτό 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. Τέλος, είναι δυνατή η απευθείας μετατροπή στερεού σε αέριο (εξάχνωση), όπως και το αντίστροφο.

Σημαντικό ρόλο στις αλλαγές φάσεις παίζει η θερμική ενέργεια. Συνήθως οι αλλαγές φάσης γίνονται σε κανονική πίεση (μία ατμόσφαιρα ή 760 mm Hg), οπότε οι μετατροπές οφείλονται στην αλλαγή της θερμοκρασίας, άρα και την πρόσληψη ή αποβολή θερμικής ενέργειας. Γενικά ένα σώμα είναι στερεό σε χαμηλές θερμοκρασίες, και καθώς αυτές αυξάνονται το σώμα μετατρέπεται διαδοχικά σε υγρό και έπειτα σε αέριο. Σε αυτήν την περίπτωση η θερμική ενέργεια του σώματος αυξάνεται. Αντίστροφα, ένα σώμα σε υψηλές θερμοκρασίες είναι αέριο και καθώς αυτή μειώνεται το σώμα μετατρέπεται διαδοχικά σε υγρό και έπειτα σε στερεό. Εδώ η θερμική ενέργεια του σώματος μειώνεται.

Κατά την πρόσληψη ή αποβολή θερμικής ενέργειας το σώμα μεταβάλλει τη θερμοκρασία του, εκτός κι αν αλλάζει κατάσταση. Όταν ένα σώμα αλλάζει κατάσταση, τότε η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή, ενώ η ανταλλασσόμενη θερμική ενέργεια αξιοποιείται στη διάλυση ή δημιουργία των διαμοριακών δυνάμεων. Αυτό το φαινόμενο σχετίζεται άμεσα με τη δομή του σώματος σε μικροσκοπικό, μοριακό επίπεδο. Επίσης, αυτή η δομή εξηγεί την ύπαρξη και συμπεριφορά των τριών καταστάσεων της ύλης.

Εκτός από τη θερμότητα, σημαντικό ρόλο παίζει και η πίεση, όταν αυτή μεταβάλλεται. Τότε η μελέτη των αλλαγών φάσεων γίνεται με διαγράμματα φάσεων.



Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει ένα σημείο, που προσδιορίζεται σε συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, στο οποίο οι διαφορές φάσεων δύσκολα διακρίνονται και ονομάζεται κρίσιμο σημείο. Υπάρχει ποικιλία τέτοιων σημείων, όπως κρίσιμα σημεία υγρού-αέριου ή υγρού-

υγρού. Εκτός όμως από αυτό, υπάρχει και ένα άλλο σημείο, το οποίο ονομάζεται τριπλό σημείο μίας ουσίας, στο οποίο οι τρεις φάσεις της συγκεκριμένης ουσίας συνυπάρχουν σε ισορροπία. Τα δύο αυτά σημεία απεικονίζονται σχηματικά στο προηγούμενο διάγραμμα. [27],[28]

### **5.3.2. ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΤΗΞΗΣ**

Ο όρος λανθάνουσα θερμότητα εμφανίστηκε για πρώτη φορά από τον Joseph Black γύρω στο 1750. Η λανθάνουσα θερμότητα είναι το ποσό της θερμικής ενέργειας που απελευθερώνεται ή απορροφάται από μία χημική ουσία κατά την αλλαγή φάσης της χωρίς την μεταβολή θερμοκρασίας. Όση επιπλέον θερμότητα απορροφά η ουσία χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την αλλαγή φάσης.

Δύο από τις πιο κύριες μορφές λανθάνουσας θερμότητας είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης (latent heat of fusion) και η λανθάνουσα θερμότητα εξαέρωσης (latent heat of vaporization). Τα ονόματα αυτά μας περιγράφουν ουσιαστικά την κατεύθυνση της αλλαγής φάσης.

Και στις δύο περιπτώσεις η αλλαγή επιτυγχάνεται ενδόθερμα, δηλαδή το σύστημα απορροφά θερμότητα κατά την μετάβαση από το στερεό στο υγρό και κατόπιν στο αέριο. Στην αντίθετη κατεύθυνση αλλαγής των φάσεων η μεταβολή επιτυγχάνεται εξώθερμα (απελευθερώνεται ενέργεια).

Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης είναι το ποσό της θερμικής ενέργειας που απαιτείται για τη μετατροπή 1 kg (ή 1 lb) της ουσίας από υγρό σε αέριο (ή αντίστροφα) χωρίς μεταβολή της θερμοκρασίας. Ομοίως, η λανθάνουσα θερμότητα τήξης (ή η μεταβολή της ενθαλπίας τήξης) είναι το ποσό της θερμικής ενέργειας που απαιτείται για τη μετατροπή 1 kg (ή 1 lb), μιας ουσίας από στερεά σε υγρά (ή αντίστροφα) χωρίς μεταβολή της θερμοκρασίας. Η σταθερή αυτή θερμοκρασία είναι η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στο σημείο τήξης.

Όταν η θερμική ενέργεια σταματήσει να προσφέρεται στο υλικό τότε η θερμοκρασία του πέφτει ενώ στην αντίθετη περίπτωση αυξάνει. Ωστόσο, στο σημείο αλλαγής φάσης απαιτείται επιπλέον θερμότητα (λανθάνουσα θερμότητα) για την μετατροπή. Για την μετάβαση από το υγρό στο στερεό, πρέπει τα μόρια της ουσίας να γίνουν περισσότερο διατεταγμένα και για να διατηρηθούν πρέπει να σταματήσει να προσφέρεται θερμότητα στο υλικό. Στην αντίθετη κατεύθυνση, πρέπει να προστεθεί θερμότητα για να δημιουργηθεί διαταραχή στους διαμοριακούς δεσμούς.

Το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από την μάζα  $m$ (moles) και από λανθάνουσα θερμότητα τήξης του υλικού  $\lambda$ .

Άρα ισχύει:

$$Q = m \cdot \lambda$$

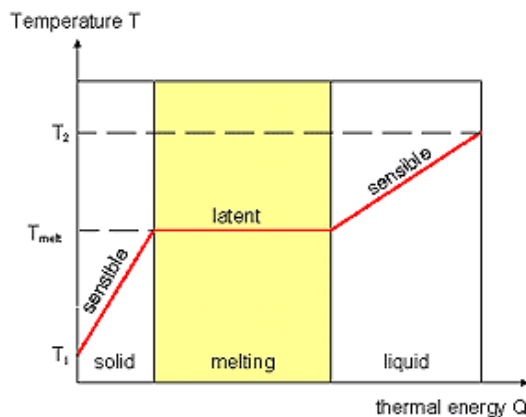
σε αυτήν την περίπτωση η διαδικασία αποθήκευσης γίνεται όπως έχει αναφερθεί ισοθερμοκρασιακά στο σημείο τήξης του υλικού (melting point).

Αν η διαδικασία αποθήκευσης γίνεται σε ένα φάσμα  $T_1$  και  $T_2$ , όπου εμπεριέχεται το σημείο τήξης τότε πρέπει να ληφθεί υπόψη η αισθητή θερμότητα αποθήκευσης. Άρα το ποσό της αποθηκευμένης θερμότητας δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Q = m \cdot \left( \int_{T_1}^{T^+} C_{PS} \cdot dT + \lambda + \int_{T^+}^{T_2} C_{PL} \cdot dT \right)$$

Όπου το  $C_{PS}$  και  $C_{PL}$  είναι ειδική θερμοχωρητικότητα του στερεού και του υγρού και  $T^+$  είναι το σημείο τήξης του υλικού.

Η θερμοκρασία σταματά να πέφτει στο σημείο πήξης εξαιτίας της λανθάνουσας θερμότητας πήξης. Η ενέργεια της θερμότητας τήξης πρέπει να αποσυρθεί, προκειμένου το υγρό να μετατραπεί σε στερεό, πριν αρχίσει η κάθοδος της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα:[24],[25],[29],[30]



Γραφική παράσταση θερμικής αποθήκευσης ενέργειας συναρτήση της θερμοκρασίας όταν εμπεριέχετε στο διάστημα αυτό αλλαγή φάσης

### 5.3.3. ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM)

Όλα τα υλικά αποθηκεύουν ενέργεια με δύο τρόπους, της αισθητής και της λανθάνουσας. Ανάλογα με τον μηχανισμό αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο υλικό αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα με την μορφή αισθητής θερμότητας σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους. Χαρακτηριστικό μέγεθος

αποτελεί στη θερμική συμπεριφορά η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή όγκο.

- Τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα με την μορφή λανθάνουσας θερμότητας σε ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης ενώ στο υπόλοιπο τμήμα συναλλάσσουν θερμότητα με την μορφή αισθητής θερμότητας. Εδώ χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται κατά την αλλαγή φάσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή της λανθάνουσας θερμότητας είναι πολλαπλάσια της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση ή όγκο.

Τα υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος θερμοκρασιών της εφαρμογής ονομάζονται υλικά αλλαγής φάσης (phase change material (PCM)). Τα PCM είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Συγκεκριμένα, όταν αυξάνει η θερμοκρασία της πηγής, και κατ' επέκταση και του υλικού, οι χημικοί δεσμοί του υλικού σπάνε και μόλις η θερμοκρασία του υλικού φτάσει στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης αυτό μετατρέπεται σε άλλη μορφή. Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι τα PCM αποθηκεύουν 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά όγκο από τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας όπως το μπετό, νερό και πέτρες.

Πολλά τέτοια υλικά έχουν μελετηθεί για την καταλληλότητα τους σε ηλιακές εφαρμογές. Τις περισσότερες φορές ως PCM χρησιμοποιούνται υλικά στερεής και υγρής φάσης. Τα υλικά που μεταπίπτουν σε αέρια φάση δεν μας ενδιαφέρουν εξαιτίας των πρακτικών δυσκολιών που παρουσιάζει η μεγάλη αλλαγή πυκνότητας καθώς και η ίδια η φύση των αερίων. Οι μετατροπές που συνήθως συναντώνται είναι από στερεό σε στερεό και από στερεό σε υγρό.

Κατά την μετατροπή από στερεό σε στερεό, η θερμότητα αποθηκεύεται όταν το υλικό μετατρέπεται από μια κρυσταλλική δομή σε μία άλλη. Αυτή η μετατροπή έχει μικρότερη λανθάνουσα θερμότητα και μικρότερες αλλαγές όγκου απ' ότι η αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό. Το πλεονέκτημα αυτής της μετατροπής όμως είναι ότι απαιτούνται λιγότερες απαιτήσεις στο δοχείο αποθήκευσης και υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία στην κατασκευή. Τέτοια υλικά μπορεί να είναι  $\text{Li}_2\text{SO}_4$  και  $\text{KHF}_2$ . Ο τοίχος Trombe με αυτά τα υλικά έχει καλύτερη απόδοση από από έναν απλό τοίχο Trombe από μπετό.

Κατά την μετατροπή από στερεό σε υγρό, παρατηρούνται αλλαγές στον όγκο του υλικού της τάξης του 10%, ή και λιγότερο. Αυτού του είδους η μετατροπή αποδείχθηκε οικονομικά ενδιαφέρουσα για την αποθήκευση θερμικών συστημάτων.

Τα PCM δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μέσο μεταφοράς θερμότητας καθώς αυτό πρέπει με την βοήθεια του εναλλάκτη να μεταφέρει θερμότητα από την πηγή στο pcm και εναλλάξ. Συνεπώς, ο εναλλάκτης πρέπει να σχεδιαστεί κατάλληλα έτσι ώστε να αντέχει στη θερμική διάχυση των PCM. Επιπλέον η αλλαγή όγκου στο σημείο τήξης επιβάλλει ανάλογη σχεδίαση όγκου του δοχείο αποθήκευσης. Ο εναλλάκτης θερμότητας πρέπει να απορροφά τις αλλαγές του όγκου και να είναι συμβατό με το χρησιμοποιούμενο PCM.

Άρα ένα σύστημα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας πρέπει να έχει τρεις τουλάχιστον ιδιότητες:

- Ένα κατάλληλο PCM , του οποίου η θερμοκρασία τήξης να εμπεριέχεται στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας,
- Μια κατάλληλη επιφάνεια εναλλάκτη
- Ένα κατάλληλο container συμβατό με το PCM.

Το ιδανικό PCM, θα ήταν ένα υλικό που παρουσίαζε μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας, υψηλή αγωγιμότητα, θερμοκρασία τήξης σύμφωνη με το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής, να τήκεται με την ελάχιστη εμφάνιση supercooling, να είναι χημικά σταθερό, φθινό στην παράγωγη του, να μην είναι τοξικό διαβρωτικό και εύφλεκτο.

Το πρώτο PCM που χρησιμοποιήθηκε ήταν το νερό, το οποίο κατά την αλλαγή φάσης σε πάγο αποθηκεύει περίπου 80 φορές περισσότερη θερμότητα από την αντίστοιχη του νερού σε υγρή φάση. Επιπλέον, το νερό έχει μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα. Παρόλα τα πλεονεκτήματα του, παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα, που οφείλονται στις ιδιότητες του (θερμοκρασία τήξης στους 0°C, μεγάλη μεταβολή της πυκνότητας με την θερμοκρασία, χαμηλή θερμοκρασία προσαγωγής στο σύστημα αποθήκευσης κλπ), που το καθιστούν ακατάλληλο. Έτσι, τα πλεονεκτήματα του νερού χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την ανάπτυξη PCM. Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν μελετηθεί τα ένυδρα άλατα, οι παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και τα εύτηκτα μίγματα οργανικών και μη οργανικών συστατικών.

Κύριο πλεονέκτημα του PCM έναντι του πάγου είναι η ρύθμιση της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (-40 °C έως 110 °C). Αυτό είναι αρκετά σημαντικό εξαιτίας της ποικιλίας εφαρμογών που υπάρχουν, οι οποίες



παρουσιάζουν ανάλογα και ποικιλία θερμοκρασιών αλλαγής φάσης. Για παράδειγμα , για εφαρμογή σε τοιχοποιία η θερμοκρασία αλλαγής φάσης θα πρέπει να κυμαίνεται από 25-27 °C ενώ για αποθήκευση ψύξης σε εφαρμογές κλιματισμού το υλικό πρέπει να αλλάζει φάση από 2-5 °C. [31],[28]

#### **5.3.3.1. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ PCM**

Για να χρησιμοποιηθεί ένα PCM σε ένα θερμικό σύστημα αποθήκευσης θα πρέπει να πληροί κάποιες θερμικές, κινητικές, χημικές και οικονομικές ιδιότητες.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες είναι:

- Η θερμοκρασία τήξης να εμπεριέχεται στο θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής,
- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά όγκο έτσι ώστε να έχω υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας συγκριτικά με την αποθήκευση ενέργειας ως αισθητή θερμότητα.
- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα προκειμένου να έχω επιπλέον μεγάλο ποσό αισθητής θερμότητας
- Υψηλή ειδική αγωγιμότητα και στις δύο φάσεις για να διευκολυνθεί η διαδικασία φόρτισης και αποφόρτισης σε ένα σύστημα αποθήκευσης.
- Μικρή μεταβολή του όγκου και μικρή τάση ατμών στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας ώστε να μειωθούν τα προβλήματα αποθήκευσης.
- Σταθερότητα των ιδιοτήτων του υλικού σε κάθε φόρτιση/ αποφόρτιση προκειμένου να έχω σταθερή αποθηκευτική ικανότητα.

Οι κινητικές ιδιότητες είναι:

- Υψηλή ταχύτητα σχηματισμού του πυρήνα προκειμένου να αποφεύγεται το φαινόμενο του supercooling κατά την υγρή φάση.
- Υψηλή ταχύτητα ανάπτυξης των κρυστάλλων, ώστε το σύστημα να καλύπτει τις ανάγκες ζήτησης ανακτώντας θερμότητα από το σύστημα αποθήκευσης.

Οι χημικές ιδιότητες είναι:

- Χημική σταθερότητα μεγάλης διάρκειας
- Απολύτως αναστρέψιμη διαδικασία αλλαγής φάσης.
- Να μην υπόκεινται υποβάθμιση μετά από ένα μεγάλο αριθμό κύκλων ώστε το υλικό να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές.
- Να μην διαβρώνει τα υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή

- Να μην είναι τοξικό, εύφλεκτο και να μην εκρήγνυται για λόγους ασφάλειας.

Τέλος, οι οικονομικές ιδιότητες είναι:

- Χαμηλή τιμή πώλησης, ώστε να είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλα προϊόντα που χρησιμοποιούνται για ίδιους σκοπούς.
- Να είναι διαθέσιμο σε πολύ μεγάλη κλίμακα.[31],[32]

### **5.3.3.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ PCM<sub>s</sub>**

Τα υλικά που αλλάζουν φάση και ειδικότερα αυτά που από στερεά μεταπίπτουν σε υγρά μπορούν να ομαδοποιηθούν με βάση τη σύστασή τους σε οργανικά, ανόργανα και εύτηκτα. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τέτοιων υλικών και είναι διαθέσιμα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

Συνήθως, η επιλογή ενός PCM γίνεται κυρίως με κριτήριο την θερμοκρασία αλλαγής φάσης, την ενθαλπία και την δυνατότητα αναστρεψιμότητας του κύκλου φόρτισης/ αποφόρτισης. Ωστόσο εκτός από την επιλογή του σημείο τήξης στο ζητούμενο λειτουργικό εύρος, η πλειονότητα των PCM δεν ικανοποιεί τα κριτήρια που πρέπει να πληροί ένα ικανοποιητικό αποθηκευτικό μέσο. Έτσι χρησιμοποιούνται τα διαθέσιμα PCM και για να αντιμετωπιστούν οι μειωμένες φυσικές ιδιότητες τους δημιουργούμε κατάλληλα θερμικά συστήματα. Για παράδειγμα, η χρήση μεταλλικών πτερυγίων μπορεί να αυξήσει την θερμική τους αγωγιμότητα.

Άλλου τύπου κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει σύμφωνα με τις εφαρμογές που καλύπτουν. Τα PCM 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.

Εξαιτίας της διαφορετικής θερμικής και χημικής συμπεριφοράς των οργανικών και μη οργανικών PCM μελετάται παρακάτω κάθε κατηγορία ξεχωριστά.[31],[32]

### **5.3.3.2.1. ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ**

Η κατηγορία των οργανικών υλικών εκπροσωπείται κυρίως από τις παραφίνες και γι' αυτό χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Η μια αποτελείται από τις παραφίνες και η άλλη από οργανικά υλικά εκτός παραφινών.

#### **5.3.3.2.1.1. ΠΑΡΑΦΙΝΕΣ**

Στη κατηγορία αυτή εντάσσονται, εκτός από τις παραφίνες, και τα μικροκρυσταλλικά κεριά (μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 μέχρι 25). Οι παραφίνες είναι το σύνηθες όνομα για τα αλκάνια, τα οποία είναι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες με γενικό μοριακό τύπο ( $C_nH_{2n+2}$ ). Πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες. Η πιο απλή παραφίνη είναι το μεθάνιο ( $CH_4$ ). Όταν ισχύει  $5 \leq n \leq 15$  τότε οι παραφίνες βρίσκονται σε υγρή μορφή ενώ όταν  $20 \leq n \leq 40$  τότε είναι σε εύπλαστη στερεή μορφή και λέγονται paraffin wax. Η παραφίνη σε στερεά μορφή είναι το κύριο χρησιμοποιούμενο εμπορικό οργανικό p.c.m., το οποίο παρουσιάζει θερμοκρασία τήξης που κυμαίνεται από  $23-67^\circ C$ . Γενικά, οι μη εμπορικές παραφίνες δεν χρησιμοποιούνται στην πράξη εξαιτίας του μεγάλου κόστους. Γενικά, οι παραφίνες είναι συνδεδεμένες με την αποθήκευση ενέργειας σε κτιριακές εφαρμογές.

Η εμπορική παραφίνη δημιουργείται από απόσταξη πετρελαίου και δεν είναι καθαρή ουσία αλλά συνδυασμός διαφόρων υδρογονανθράκων και έχει κυρίως την ευθεία αλυσίδα υδρογονανθράκων με μοριακό τύπο  $CH_3-(CH_2)-CH_3$ . Γενικά, η θερμοκρασία και η θερμότητα τήξης αυξάνει όσο αυξάνει ο αριθμός των ατόμων άνθρακα. Συνεπώς, η εμπορική παραφίνη παρουσιάζει μέτριες τιμές λανθάνουσας θερμότητας (περίπου  $150 kJ/kg$ ) και έχει δυνατότητα παραγωγής σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Είναι επίσης αρκετά φθηνότερη στην αγορά από τα ανόργανα υλικά. Η εμφάνιση του supercooling είναι αμελητέα, είναι χημικά αδρανής και σταθερή (κάτω από  $500^\circ C$ ) χωρίς να παρουσιάζει διαχωρισμό φάσεων και εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους. Είναι μη διαβρωτική με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα μέταλλα. Έχει μικρές μεταβολές όγκου στο σημείο τήξης και μικρή πίεση ατμών. Παρουσιάζουν άριστη συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση χωρίς καμία υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους, μέχρι και 1500 κύκλους.

Εκτός όμως απ' όλα αυτά τα πλεονεκτήματα οι παραφίνες έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (περίπου  $0,2 W/m \cdot ^\circ C$ ), είναι μη συμβατά με τα πλαστικά δοχεία και είναι αναφλέξιμα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες ( $\sim 200^\circ C$ ). Για την αντιμετώπιση των

παραπάνω 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 καθώς και κατάλληλος σχεδιασμός της μονάδας αποθήκευσης. Επιπλέον, θα πρέπει δοθεί επίσης ιδιαίτερη προσοχή στο ότι οι παραφίνες πραγματοποιούν ολοκληρωμένα την αλλαγή φάσης τους σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου 10 K (~ 9 K πριν το σημείο τήξης και ~ 1 K μετά το σημείο τήξης). Ένα τέτοιο φαινόμενο αν δεν ληφθεί υπ' όψη μπορεί να οδηγήσει σε μη σωστή εκλογή υλικού με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές.

#### 5.3.3.2.1.2. ΟΧΙ ΠΑΡΑΦΙΝΕΣ

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει την μεγαλύτερη πληθώρα PCM με την μεγαλύτερη ποικιλία ιδιοτήτων. Καθένα από αυτά τα υλικά έχει τις δικές του ιδιότητες, οι οποίες δεν είναι παρόμοιες όπως συμβαίνει με τις παραφίνες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα λιπαρά οξέα, εστέρες αλκοόλες λιπαρών οξέων και γλυκόλες. Αυτά τα υλικά είναι εύφλεκτα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, πύρινους ή οξειδωτικούς παράγοντες.

Χαρακτηριστικά τους είναι η υψηλή θερμότητα τήξης, η δυνατότητα ανάφλεξης, η μικρή θερμική αγωγιμότητα, τα χαμηλά σημεία ανάφλεξης, η ποικιλία επιπέδων τοξικότητας, η αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες.

Λιπαρά οξέα ονομάζονται τα καρβονικά οξέα, τα οποία έχουν μια μακριά αλυσίδα υδρογονανθράκων και είναι είτε κορεσμένα είτε ακόρεστα. Παράγονται από υδρόλυση των εστερικών δεσμών ενός λιπαρού ή βιολογικού ελαίου (καθένα από τα οποία είναι τριγλυκερίδια), με την αφαίρεση της γλυκερόλης. Αποτελείται από 10-30 άτομα άνθρακα (συνήθως είναι 12-18) και έχει μοριακό τύπο  $(CH_3(CH_2)_{2n}COOH)$ . Παραδείγματα κορεσμένων και ακόρεστων λιπαρών οξέων παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες:

#### Κορεσμένα λιπαρά οξέα

ΛΙΠΑΡΑ ΟΞΕΑ	ΜΟΡΙΑΚΟΙ ΤΥΠΟΙ	ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ
Lauric	$CH_3(CH_2)_{10}COOH$	+44
Palmitic	$CH_3(CH_2)_{14}COOH$	+63
Stearic	$CH_3(CH_2)_{16}COOH$	+70

### Ακόρεστα λιπαρά οξέα

ΛΙΠΑΡΑ ΟΞΕΑ	ΜΟΡΙΑΚΟΙ ΤΥΠΟΙ	ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ
Oleic	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	+16
Linoleic	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4(\text{CH}=\text{CHCH}_2)_2(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	-5
Linolenic	$\text{CH}_3\text{CH}_2(\text{CH}=\text{CHCH}_2)_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	-11
Arachidonic	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4(\text{CH}=\text{CHCH}_2)_4(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$	-50

Τα λιπαρά οξέα έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τις παραφίνες. Έχουν υψηλή θερμότητα τήξης (45-210kJ/kg) συγκρίσιμη με αυτή των παραφινών και η θερμοκρασία τήξης ποικίλει από -7 μέχρι 71°C. Έχουν προβλέψιμη συμπεριφορά τήξης και πήξης χωρίς εμφάνιση του φαινομένου supercooling . Είναι πολύ ελκυστικά υλικά για λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας για τις εφαρμογές θέρμανσης χώρου.

Το κύριο μειονέκτημα τους είναι το κόστος το οποίο είναι 2-2,5 φορές πάνω από το αντίστοιχο των παραφινών. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι η κακοσμία, γεγονός που περιορίζει δραματικά τη χρηστικότητα του χώρου στον οποίο αυτά εγκαθίστανται και η ελαφριά διαβρωτική συμπεριφορά τους. Ωστόσο το πρόβλημα της κακοσμίας θα μπορούσαν να ξεπεραστούν με κάποιου είδους συσκευασία, δίνοντας έτσι ένα κατάλληλο PCM φθινό, χημικά σταθερό, για κτιριακές εφαρμογές.

#### **5.3.3.2.2. ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ**

Κυριότερος εκπρόσωπος των ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης είναι τα ένυδρα άλατα.

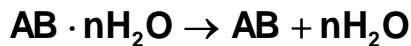
##### **5.3.3.2.2.1. ΕΝΥΔΡΑ ΑΛΑΤΑ**

Τα ένυδρα άλατα ήταν τα πρώτα pcm που δημιουργήθηκαν και αποτελούν τον κύριο εκπρόσωπο των ανόργανων υλικών. Σχετίζονται με την αποθήκευση ενέργειας από ηλιακές εφαρμογές. Τα ένυδρα άλατα έχουν μοριακό τύπο ( $AB \cdot nH_2O$ ). Είναι σχετικά ασταθείς ενώσεις αλάτων με μόρια νερού που ανάλογα με την πρόσδωση ή απορρόφηση θερμότητας από το σύστημα αποβάλλουν ή προσλαμβάνουν μόρια νερού. Η αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό είναι ουσιαστικά η αφύδρωση του ένυδρου άλατος και η δημιουργία ενός άλλου με λιγότερα(ή και καθόλου) μόρια

νερού. Η διαδικασία αυτή συγκρίνεται με αντίστοιχη θερμοδυναμική διαδικασία τήξης και γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Εκτός όμως από την παραπάνω μορφή μπορεί το άλας να αφυδατωθεί εντελώς και έχουμε την παρακάτω αντίδραση:



Τα ένυδρα άλατα έχουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα (~250Kj/kg), και σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (~0,6W/mK), που είναι σχεδόν διπλή από τις παραφίνες. Η θερμότητα τήξης αυξάνεται με το βαθμό υδάτωσης, αλλά υψηλή υδάτωση οδηγεί σε ανομοιογένεια της σύστασης του υλικού μετά την αλλαγή φάσης. Έχουν θερμοκρασιακό εύρος του σημείου τήξης από 15° C μέχρι 117° C. Επιπλέον, έχουν μικρές αλλαγές όγκου κατά την αλλαγή φάσης, δεν είναι διαβρωτικά, είναι συμβατά με τα πλαστικά υλικά, είναι μη αναφλέξιμα και είναι ελαφρώς τοξικά. Τέλος, έχουν μέτριο κόστος παραγωγής σε σχέση με τις παραφίνες αλλά υψηλό κόστος πώλησης λόγω της επιβεβλημένης ενσωμάτωσης τους σε προστατευτικό κάλυμμα και τη χρήση προσθέτων ουσιών σταθεροποίησης των ιδιοτήτων τους. Στα πλεονεκτήματα τους δεν πρέπει να παραληφθεί και ο ρόλος της πυκνότητας των υλικών, σημαντικός παράγοντας όταν απαιτείται οικονομία χώρου. Τα ένυδρα άλατα είναι γενικότερα πυκνότερα υλικά από τα οργανικά PCM γι' αυτό και παρουσιάζουν αυξημένες τιμές αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου. Ενδεικτικά μπορούν να αναφερθούν ότι οι τιμές αποθήκευσης ενέργειας είναι: για τα ένυδρα άλατα ~ 1500 Kg/m<sup>3</sup>, για τις παραφίνες ~ 800 Kg/m<sup>3</sup> ενώ για τα λιπαρά οξέα ~ 900 Kg/m<sup>3</sup>.

Υπάρχουν τρεις τρόποι με τους οποίους μπορεί να σχηματιστεί το καινούργιο ένυδρο άλας, congruent melting, incongruent melting, semi-congruent melting.

- Congruent melting συμβαίνει όταν η σχηματιζόμενη υγρή φάση έχει ίδια σύσταση με την στερεά. Αποτελεί τον ζητούμενο τρόπο τήξης.
- Incongruent melting πραγματοποιείται όταν το σχηματιζόμενο ένυδρο άλας είναι πλήρως άνυδρο και κατακάθεται στον πυρήνα σαν ίζημα.
- Semi-congruent melting πραγματοποιείται όταν η στερεή και η υγρή φάση βρίσκονται σε ισορροπία κατά την διάρκεια αλλαγής φάσης και με διαφορετικές συστάσεις και διαφορετικά σημεία τήξης.

Το σημαντικότερο πρόβλημα των ένυδρων αλάτων είναι ότι παρουσιάζουν το φαινόμενο incongruent (ή semi-congruent) melting. Αυτό συμβαίνει γιατί το νερό που

απελευθερώνεται κατά την αλλαγή φάσης δεν είναι ικανό να διαλύσει πλήρως την ήδη υπάρχουσα στερεά φάση, με αποτέλεσμα την δημιουργία υπερκορεσμού. Επιπλέον, εξαιτίας αυτής της διαφορετικής πυκνότητας των ένυδρων αλάτων, το ελαφρώς (ή πλήρως) αφυδατωμένο ένυδρο άλας πέφτει στο πάτο του δοχείου σαν ίζημα και αποκλείεται με αυτό τον τρόπο η ένωση του με το νερό για την πραγματοποίηση της αντίστροφης διαδικασίας.

Περαιτέρω προβλήματα που παρουσιάζει η χρήση ένυδρων αλάτων είναι η αβέβαιη χημική και θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση, το φαινόμενο της διάβρωσης μεταξύ του υλικού και του υλικού συσκευασίας, η εμφάνιση του φαινομένου supercooling και η μεταβολή του όγκου κατά 10%.

Ένα από τα πλέον γνωστά και πολυεξετασμένα ένυδρα άλατα είναι το άλας του Glauber ( $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) με τυπική κατά βάρος σύσταση, 44%  $\text{NaSO}_4$  και 56%  $\text{H}_2\text{O}$ . Έχει θερμοκρασία τήξης  $32,4^\circ\text{C}$  και λανθάνουσα θερμότητα  $254\text{kJ/kg}$ . Αυτό αποσυντίθεται σ' ένα κορεσμένο διάλυμα  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  σε ισορροπία με άνυδρο στερεό  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Η πυκνότητα ενέργειας που παρατηρείται είναι σχετικά υψηλή. Αν και είναι από τα φθηνότερα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας, τα προβλήματα διαχωρισμού των φάσεων, ο εκφυλισμός των ιδιοτήτων του, ο σχηματισμός ιζήματος και η εμφάνιση του φαινομένου supercooling περιορίζουν τις εφαρμογές του. Άλλα υλικά που έχουν μελετηθεί είναι  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaOAc} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (ένυδρο οξικό νάτριο),  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  και  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ .

#### 5.3.3.2.3. ΕΥΤΗΚΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

Εύτηκτα μίγματα είναι η χημική ένωση δύο ή περισσοτέρων υλικών PCM, που μπορεί να είναι είτε οργανικά είτε ανόργανα είτε συνδυασμός των δύο, καθένα από τα οποία δεν παρουσιάζει το φαινόμενο του incongruent melting ή freezing (οργανικά-οργανικά, οργανικά-ανόργανα ή ανόργανα-ανόργανα). Εξαιτίας αυτού μειώνεται η πιθανότητα διαχωρισμού των φάσεων κατά την φόρτιση /αποφόρτιση, αφού κατά την πήξη δημιουργείται ένας στερεάς μορφής ομοιογενές μίγμα ενώ κατά την τήξη τα υλικά του μίγματος λιώνουν ταυτόχρονα.

Η κατηγορία αυτών των PCM δημιουργήθηκε με απώτερο σκοπό να επιτύχουν τα επιθυμητά σημεία τήξης για την κάθε εφαρμογή. Τα εύτηκτα μίγματα παρουσιάζουν συνήθως τα πλεονεκτήματα των οργανικών και ανόργανων PCM ενώ δεν συγκεντρώνουν παράλληλα και τα μειονεκτήματά τους. Συγκεκριμένα, παρουσιάζουν υψηλό σημείο τήξης παρόμοιο με των καθαρών υλικών, η λανθάνουσα θερμότητα

αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου είναι ελαφρώς υψηλότερη από των οργανικών ενώσεων και αποτελούν σταθερές χημικές ενώσεις και διατηρούνται σε χάλυβα χρωμίου-νικελίου. Βασικό μειονέκτημα αυτών των υλικών είναι ότι δεν υπάρχουν πληροφορίες σχετικές με τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες καθώς είναι καινούργια στη διαθέσιμη αγορά. Στα μειονεκτήματα τους συγκαταλέγεται το κόστος παραγωγής, το οποίο είναι διπλάσιο έως τριπλάσιο απ' ότι των οργανικών και ανόργανων PCM. Τα μίγματα αυτά χρησιμοποιούνται σε συστήματα για την λειτουργία θερμικών μηχανών αλλά δεν είναι κατάλληλα για την θέρμανση χώρων εξαιτίας της μεγάλης θερμοκρασίας αποθήκευσης.

## **6. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΩΝ PCM**

### **6.1. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ**

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των ένυδρων αλάτων είναι ότι κατά την διάρκεια της κυκλικής φόρτισης επιτρέπεται ο σχηματισμός ενός διαφορετικού ένυδρου άλατος(είτε με λιγότερα μόρια νερού είτε εντελώς αφυδατωμένο). Αυτό συντελεί στη μείωση της μεγάλης αποθηκευτικής τους ικανότητας με αποτέλεσμα να μην μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών.

Κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός ιζήματος. Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα λόγω του ότι τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος, δημιουργώντας μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συνεχή εξασθένηση των ιδιοτήτων τους.

Το πρόβλημα διαχωρισμού των φάσεων μπορεί να αντιμετωπιστεί με κάποιον από τους παρακάτω τρόπους:

- Χρήση προσθέτων που προκαλούν πύκνωση και παρεμποδίζουν την καθίζηση άνυδρου άλατος ή ένυδρου με λιγότερα μόρια νερού, διατηρώντας τα σε αιώρηση.
- Με μηχανικά μέσα, όπως η ανάδευση.
- Με προσθήκη επιπλέον ποσότητας νερού, έτσι ώστε όλο το άνυδρο άλας να μπορεί να διαλυθεί στο νερό στο σημείο τήξης και να μην δημιουργείται υπερκορεσμός.
- Με τοποθέτηση του PCM σε κάψουλες για να μειωθεί ο διαχωρισμός.



- Με μετατροπή της χημικής σύστασης του συστήματος μετατρέποντας το incongruent υλικό σε congruent.

Για παράδειγμα το  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  λιώνει στους  $29,6^\circ \text{C}$  και λιώνει με semi-congruent melting. Γι' αυτό το pcm υπάρχει ένα μικρό θερμοκρασιακό εύρος λίγο πιο πάνω από το σημείο τήξης στο οποίο το  $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  είναι πιο σταθερό από το ζητούμενο. Συνεπώς, κατά την διάρκεια της πήξης είναι πιθανόν να σχηματιστεί μία μικρή ποσότητα  $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  όταν η θερμοκρασία φτάσει σε αυτό το εύρος και πριν το  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  αρχίζει να πήζει.

## **6.2. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ SUPERCOOLING**

Ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα που αφορά το σύνολο των ανόργανων PCMs αλλά και μέρος των οργανικών είναι το φαινόμενο του supercooling. Το ιδανικό PCM θα έπρεπε να πήζει και να τήκεται στην ίδια θερμοκρασία. Το φαινόμενο του supercooling είναι η διαδικασία ψύξης ενός υγρού (ή αερίου) σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη αντίστοιχη του σημείου πήξης, χωρίς το υγρό να έχει στερεοποιηθεί. Ένα υγρό που βρίσκεται κάτω από το σημείο πήξης του θα διαμορφώσει κρυσταλλική δομή γύρω από ένα πυρήνα κρυστάλλου. Αν λείπουν αυτοί οι πυρήνες τότε το υγρό θα παραμείνει στην ίδια φάση έως ότου παρατηρηθεί η ομογενής κρυσταλλική δομή στερεής φάσης, η οποία παρατηρείται σε θερμοκρασία χαμηλότερη του σημείου πήξης. Κατά την διαδικασία της τήξης του υλικού αυτό για δοσμένη πίεση θα λιώσει πάντα σχεδόν στη ίδια θερμοκρασία.

Το φαινόμενο του supercooling όσο εντείνεται τόσο μη αποδοτικότερη κάνει την αξιοποίηση της αποθηκευμένης θερμότητας. Το φαινόμενο είναι εμφανές αν παρατηρηθεί η καμπύλη θερμοκρασίας - χρόνου, κατά τη ψύξη ενός δείγματος PCM, όπου παρουσιάζεται πτώση της θερμοκρασίας του υγρού PCM πριν την εκκίνηση της αλλαγής φάσης κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης. Κατά τη συνέχιση της ψύξης η θερμοκρασία του δείγματος αυξάνεται και σταθεροποιείται, τις περισσότερες φορές για μικρό χρονικό διάστημα, στη θερμοκρασία στερεοποίησης καθώς ακολουθεί πτώση της μέχρι την ολοκλήρωση της στερεοποίησης.

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

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

Το φαινόμενο μπορεί να περιοριστεί με κάποια από τις παρακάτω διαδικασίες, οι οποίες επιταχύνουν τη διαδικασία δημιουργίας πυρήνων:

- Με προσθήκη μικρής ποσότητας παραγόντων πυρήνωσης.
- Με μηχανικά μέσα, όπως χρήση δοχείου με ανώμαλη επιφάνεια τοιχωμάτων ή εναλλάκτη θερμότητας με τραχεία επιφάνεια.
- Με διατήρηση μέσα στο PCM μίας περιοχής σε χαμηλή θερμοκρασία όταν το υπόλοιπο υλικό τήκεται με θέρμανση.

### **6.3. ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

Το σοβαρότερο κριτήριο για την αξιοποίηση των PCM σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών (χωρίς εκφυλισμό των ιδιοτήτων), ο οποίος μετριέται καλύτερα σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού παρά σε πραγματικό χρόνο. Ο σκοπός εκτέλεσης των κύκλων φόρτισης είναι προκειμένου να καθοριστεί ο χρόνος στον οποίο θα επιδράσουν οι θερμικές διεργασίες είτε στην διαρροή των PCM είτε στις θερμικές τους ιδιότητες.

Η ανεπάρκεια σταθερότητας των υλικών οφείλεται σε δύο λόγους:

- Σε μικρής σταθερότητας χημική σύνθεση του υλικού ή των υλικών που αποτελούν το PCM.
- Στο φαινόμενο της διάβρωσης που πιθανόν να λάβει χώρα μεταξύ του PCM και των υλικών που έρχεται σε επαφή, και κυρίως απέναντι στα μεταλλικά υλικά. Η διαβρωτικότητα ενός PCM μπορεί σε συνδυασμό με τις συνεχείς εναλλαγές θερμοκρασίας και φάσης, σε βάθος χρόνου (όχι υποχρεωτικό μεγάλο) να καταστρέψει την συσκευασία του και κατ' επέκταση το σύστημα αποθήκευσης.

Το μεγαλύτερο μέρος των ερευνών που ως αντικείμενο αναφοράς έχουν την διατήρηση των ιδιοτήτων των PCM κατά την περιοδική φόρτιση και αποφόρτιση τους ή τη διαβρωτική τους ικανότητα αφορούν τα ένυδρα άλατα. Για τις παραφίνες και τα παράγωγα υλικά τους έχει βρεθεί ότι έχουν άριστη σταθερότητα στις θερμικές τους

ιδιότητες καθώς επίσης και καμία επίδραση όταν έρχονται σε επαφή με τα περισσότερα διαδεδομένα μέταλλα (χαλκός, σίδηρος κλπ).

#### **6.4. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PCM ΣΕ ΚΑΨΟΥΛΕΣ**

Η χρήση των PCM στις περισσότερες φορές απαιτεί την προστασία του υλικού σε κάποιο από τα είδη διαθέσιμης συσκευασίας (τοποθέτηση σε κάψουλες ή σακούλες, ενσωμάτωση στο πορώδες υλικό άλλων υλικών, εναλλάκτες θερμότητας ενισχυμένοι με PCM), ώστε να προφυλαχθεί το υλικό από την επίδραση των συνθηκών του περιβάλλοντος ή και να διευκολύνει τη μετάδοση της αποθηκευμένης λανθάνουσας θερμότητας. Η τοποθέτηση των PCM σε κάψουλες είναι αναγκαίο για τεχνικούς λόγους, καθώς υπάρχει περίπτωση διαρροής της υγρής φάσης από το χώρο στον οποίο αυτή χρησιμοποιείται. Τα PCM που χρησιμοποιούνται ενσωματωμένα σε κάψουλες πρέπει να είναι συμβατά με το υλικό της συσκευασίας, το οποίο μπορεί να είναι πλαστικό για χαμηλές θερμοκρασίες και μέταλλο ή ειδική μεμβράνη για υψηλές θερμοκρασίες.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης των PCMs σε κάψουλες (σφαιρίδια διαμέτρου μεγαλύτερης του 1cm) ή μικροκάψουλες (σφαιρίδια διαμέτρου μικρότερης του 1mm) είναι ότι εξασφαλίζεται μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, ελαχιστοποιείται η αλληλεπίδραση του περιβάλλοντος και των υλικών των δοχείων αποθήκευσης με τα PCMs και επιτυγχάνεται πλήρης έλεγχος της αλλαγής του όγκου κατά την αλλαγή φάσης. Το υλικό που συνήθως χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των PCMs σε προστατευτικό κέλυφος είναι πλαστικό ή συνθετικές ρητίνες.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα κατά την ενσωμάτωση των PCMs σε κάψουλες είναι ότι αυτό τείνει να πήξει στην εσωτερική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, φαινόμενο το οποίο είναι υπεύθυνο για την ανεπιθύμητη μείωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Παρόμοιο φαινόμενο δεν παρατηρείται κατά την ενσωμάτωσή του σε μικροκάψουλες.

Κατάλληλη για θερμικά συστήματα με αέρα ως μέσο είναι η ενσωμάτωση του  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$  σε πλαστικές κάψουλες. Επιπλέον, αποδείχθηκε τεχνικά και οικονομικά βιώσιμη η ενσωμάτωση των PCM σε συσκευασίες για την ηλιακή θερμική αποθήκευση θερμότητας οικιακής χρήσης.

Η ενσωμάτωση του υλικού στο πορώδες άλλου υλικού αποτελεί τη βάση του σύνθετου τελικού προϊόντος. Σε αυτήν την περίπτωση σημαντικό κριτήριο για την επιτυχημένη ενσωμάτωση είναι η μη αλληλεπίδραση του PCM με το υλικό και η

περιορισμένη έως μηδενική 'μετανάστευση' του από το πορώδες όταν το PCM βρίσκεται στην υγρή φάση.

Με την χρήση σφαιριδίων ενισχυμένων με PCM είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν προβλήματα που οφείλονται στην αλλαγή όγκου. Η αλλαγή του όγκου των PCM (περίπου 10% είναι μια τυπική τιμή) δεν δημιουργεί προβλήματα μόνο κατά την τήξη του υλικού (αύξηση του όγκου) αλλά και κατά την πήξη (μείωση του όγκου) διότι υπάρχει πιθανότητα να σχηματισθούν κοιλότητες εντός του υλικού ή ακόμη και μερική αποκόλληση του υλικού από την επιφάνεια συναλλαγής, φαινόμενο που θα μειώσει δραματικά το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. [28], [31],[32],[33],[34],[35]

## **7. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΛΑΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

### **7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σαν τρόπος θερμικής αποθήκευσης εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια. Η πρώτη χρήση των PCM έγινε με την χρήση του πάγου προκειμένου να διατηρηθούν διαφόρων ειδών αντικείμενα σε σταθερή χαμηλή θερμοκρασία στους τομείς της ιατρικής και της συντήρησης τροφίμων. Τα ιγκλού κατασκευάστηκαν από μεγάλα κομμάτια πάγου, τα οποία κόβονταν από παγωμένους ποταμούς κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου και αποθηκευόταν σε μονωτικά από πριονίδι προκειμένου να προμηθεύσουν πάγο τις καλοκαιρινές περιόδους.

Η βιομηχανία τροφίμων χρησιμοποίησε τις αρχές θερμικής αποθήκευσης προκειμένου να διατηρήσουν τα τρόφιμα σε ελεγχόμενα χαμηλή θερμοκρασία κατά την διάρκεια της μεταφοράς και της αποθήκευσης τους. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται ψυχροί συσσωρευτές (cold accumulators) και αποτελούνται από επίπεδα μεταλλικά δοχεία γεμισμένα με παγωμένα μίγματα αλάτων χαμηλής θερμοκρασίας τήξης. Τα άλατα αυτά χρησιμοποιήθηκαν και στην βιομηχανία φαρμάκων, σε πλαστικά δοχεία, προκειμένου να διατηρήσουν τα χημικά και τα φάρμακα στην επιθυμητή θερμοκρασία. Το κύριο PCM για εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας ήταν μίγματα ανόργανων αλάτων, όπως το Θειικά άλατα του Νάτριου, Μαγνησίου, Καλίου, ασβεστίου ή χλωριούχου μαγνησίου.

Όταν οι επιστήμονες συνειδητοποίησαν τις δυνατότητες των υλικών αλλαγής φάσης σε χαμηλής θερμοκρασίας εφαρμογές, διεξήγαγαν μελέτες για την εύρεση των κατάλληλων PCM που θα είχαν υψηλότερα σημεία τήξης για τις θερμικές εφαρμογές.

Στην αρχή, οι επιστήμονες εστίασαν σε εφαρμογές που αφορούσαν το ευρύ καταναλωτικό κοινό και όχι σε ανεπτυγμένα τεχνολογικά συστήματα.

Οι πρώτες εφαρμογές αφορούσαν εστιατόρια και ξενοδοχεία, όπως η διατήρηση ζεστών πιάτων στη ζητούμενη θερμοκρασία κατά την διάρκεια του σερβιρίσματος. Άλλες εφαρμογές ήταν η διατήρηση ζεστών ροφημάτων καθώς και ενδύματα για ακραίες συνθήκες. Ένα τέτοιο σύστημα δημιουργήθηκε από τον Bower στο τέλος του 1940 και ήταν ένα θεραπευτικό προϊόν που περιείχε υπερβορικό Νάτριο (Sodium Metaborate) σαν θερμικό μέσο. Ένα παρόμοιο σύστημα κατασκευάστηκε από τον Truelock, το οποίο αποτελούνταν από δύο ίδιες συσκευές που εργάζονταν με διαφορετικό PCM. Σκοπός του συστήματος ήταν κάθε φορά που ενεργοποιείται το σύστημα να απελευθερώνεται όλη η αποθηκευμένη ενέργεια.

Το πρώτο προϊόν το οποίο αναπτύχθηκε από αθλητές και νοσοκομειακά ινστιτούτα ήταν το cool pack. Αυτό ήταν μία συσκευασία παροχής ψύξης σκοπός της οποίας ήταν ο περιορισμός του πρηξίματος και των μωλώπων των τραυματισμένων ατόμων. Αποτελούνταν από μία πλαστική σακούλα η οποία είναι εσωτερικά χωρισμένη σε δύο τμήματα. Στο ένα περιέχεται ένα χαμηλής θερμοκρασία σταθερό PCM σε υπέρψυκτη κατάσταση και στο άλλο ένας παράγοντας πυρηνοποίησης (nucleating material). Η συσκευή ενεργοποιείται όταν το διαχωριστικό των δύο υλικών σπάει προκαλώντας την ανάμιξη των δύο υλικών με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός σταθερού PCM και την απελευθέρωση της αποθηκευμένης θερμότητας από τον σχηματισμό αυτό. Παρόμοια, δημιουργήθηκε και συσκευή παροχής θέρμανσης (heat pack), το οποίο αποτελείται από ίδιο σύστημα με το cool pack, με την διαφορά ότι αυτό ήταν γεμισμένο με PCM σε υψηλότερη θερμοκρασία τήξης. Αυτού του είδους η συσκευή έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην τομέα εξοπλισμού επιβίωσης, συμπεριλαμβανομένου και του στρατιωτικού, όπως και σε ειδικά ενδύματα εξερευνητών οι οποίοι εκτίθενται για παρατεταμένο χρονικό διάστημα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Άλλες εφαρμογές είναι η διατήρηση θερμοκρασίας ενός μπουκαλιού (hot bottle) η οποία είναι διαδεδομένη εδώ και πολλά χρόνια και αναπτύχθηκε στην ονομασία 'Θερμός'.

Οι επιστήμονες σύντομα συνειδητοποίησαν τις δυνατότητες της τεχνολογικής προόδου των υλικών αλλαγής φάσης για την θέρμανση του ανθρώπινου σώματος όταν εκτίθεται για εκτεταμένη χρονική περίοδο σε χαμηλές θερμοκρασίες. Πολλά προϊόντα διατέθηκαν στην αγορά για δραστηριότητες επιβίωσης με διαφορετικά PCM και ποικίλα σημεία τήξης.[36],[37]

## **7.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

### **7.2.1. ΗΠΑ**

#### **7.2.1.1. NASA- ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**

Αναγνωρίζοντας δυνατότητες χρήσης των PCM's στη μείωση των θερμικών φορτίων και στη παροχή καλύτερων συνθηκών άνεσης, οι επιστήμονες που συμμετέχουν στο διαστημικό πρόγραμμα καθιέρωσαν την χρήση τέτοιων υλικών, και κατόπιν εφάρμοσαν διάφορες εφαρμογές τους σε αυτό. Οι επιστήμονες ενδιαφέρονταν περισσότερο για τις δυνατότητες των υλικών αυτών στην διατήρηση σταθερών θερμοκρασιακών συνθηκών.

Ένα από τα πρώτα PCM, που χρησιμοποιήθηκε στο διαστημικό πρόγραμμα 'Apollo 15' σε επένδυση χώρου, ήταν για να απορροφά τα επιπλέον θερμικά φορτία που απελευθερώνονταν από τα ηλεκτρικά συστήματα ώστε να μειώνεται η χρήση κλιματιστικών συσκευών. Η δεύτερη χρήση τεχνολογίας PCM εισήχθη μέσω ενός ηλιακού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξαιτίας των χαρακτηριστικών αποθήκευσης θερμότητας.

Οι επιστήμονες διεξήγαγαν σημαντικές μελέτες προκειμένου να καθιερώσουν το σωστό PCM μεταξύ της ακεταμίνης (acetamide), του μυριστικού οξέος (myristic acid), του  $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (Lithium Nitrate Trihydrate) και του  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_4$  (Methyl Fumarate). Περαιτέρω PCM έχουν ενσωματωθεί στο Apollo 15 Luna Rover Vehicle προκειμένου να σταθεροποιηθεί η θερμότητα που διαφεύγει μέσω της μονάδας επεξεργασίας σήματος, των ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου οδήγησης και μονάδων ελέγχου Luna του ρελέ. Το υλικό αλλαγής φάσης είναι μίγμα παραφινών, το οποίο αποθηκεύει μεγάλη παραγόμενη θερμότητα από τα τρία αυτά συστήματα και απελευθερώνει αυτή την ενέργεια από την κίνηση των μονωμένων συσκευών αφήνοντας την ενέργεια να διαχυθεί μέσω ακτινοβολίας.

#### **7.2.1.2. ΧΡΗΣΗ PCM ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΚΤΙΡΙΩΝ**

Παρόλο που έχει διεξαχθεί αξιοσημείωτη έρευνα και εφαρμογές με μεγάλη ποικιλία υλικών αλλαγής φάσης, η χρήση τους σε κτιριακές εφαρμογές δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες. Οι πρώτες προσπάθειες αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του 1920, ενώ παρουσιάστηκαν κάποιες πειραματικές κατασκευές σπιτιών στα τέλη τις δεκαετία 1940 και 1970. Τα συστήματα αυτά, αν και θα μπορούσαν να θεωρηθούν επιτυχημένα, δεν αναπτύχθηκαν εξαιτίας της έλλειψης χρηματοδότησης και πίστης του όλου εγχειρήματος.

Παρακάτω αναλύονται κάποιες αρχικές καινοτομίες θερμικής αποθήκευσης με υλικά αλλαγής φάσης στο πέρασμα των χρόνων.

#### **7.2.1.2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ**

Από τις έρευνες που είχαν διεξαχθεί πάνω στις δυνατότητες των υλικών αλλαγής φάσης και των συστημάτων θερμικής αποθήκευσης με αυτά, η Maria Telkes αναγνώρισε τη χρήση τους στη θέρμανση κτιρίων. Το 1946, το προτεινόμενο πειραματικό σπίτι με την ονομασία The Dover House θα σχεδιαζόταν στην πολιτεία Dover Mass, που είναι 5 miles από την Βοστώνη. Η θέση επιλέχθηκε από την Telkes επειδή τα ετήσια επίπεδα ηλιοφάνειας ήταν πάνω από τις μέσες τιμές και με αυτόν τον τρόπο θα εξασφαλιζόταν η μέγιστη δυνατή αξιοποίηση του ηλιακού συστήματος. Το σπίτι αποτελούταν από έναν όροφο 135 m<sup>2</sup> πέντε δωματίων, με δύο υπνοδωμάτια, κουζίνα, καθιστικό και γκαράζ. Η θερμική ακτινοβολία συλλεγόταν από 18 συλλέκτες και η θερμότητα που παραγόταν μέσω αγωγών με την βοήθεια ανεμιστήρων οδηγούνταν σε τρία δοχεία αποθήκευσης, που βρίσκονταν ανάμεσα στα δωμάτια. Τα δοχεία αποθήκευσης χρησιμοποιούσαν σαν PCM το άλας του Glauber. Συνολικά τα δοχεία περιείχαν 21 τόννους PCM και με αυτά το σπίτι είχε την δυνατότητα να αποθηκεύει θερμότητα 11MJ. Το PCM είχε την δυνατότητα να αποθηκεύσει την θερμότητα αυτή για 12 μέρες παρέχοντας αισθητή θερμότητα για θερμοκρασίες μέχρι το σημείο τήξης του στους 32 °C. Η κατασκευή του κτιρίου ολοκληρώθηκε το 1948 με συνολικό κόστος 20000 εκ των οποίων τα 3000 δαπανήθηκαν για την ηλιακή θέρμανση. Τα δύο πρώτα χρόνια το σύστημα θέρμανση αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποδοτικό ακόμα και σε περιόδους με επτά μέρες συνεφιάς. Το σύστημα λειτούργησε με επιτυχία προσφέροντας ένα άνετο περιβάλλον γύρω στους 21 °C χωρίς χρήση πρόσθετης πηγής ενέργειας. Το τρίτο χρόνο όμως άρχισε να πέφτει η απόδοση του συστήματος καθώς το άλας είχε διαχωριστεί σε άνυδρο άλας και διάλυμα χάνοντας με αυτόν τον τρόπο την αποθηκευτική του ικανότητα. Επίσης παρατηρήθηκε ότι τα δοχεία είχαν αρχίσει να διαβρώνονται με αποτέλεσμα την δραματική αύξηση των απωλειών.

Ο Lawrence Gardshire κατασκεύασε λίγο αργότερα ένα ηλιακό σπίτι με PCM παρόμοιο με αυτό της Telkes στην περιοχή του New Mexico. Το σπίτι αποτελούνταν από 2 ορόφους 102 m<sup>2</sup> ο καθένας. Όπως και η Telkes έτσι και ο Lawrence Gardshire χρησιμοποίησε δοχεία με υλικά αλλαγής φάσης μόνο που αντί να τα εγκαταστήσει ανάμεσα στα δωμάτια τα εγκατέστησε στη στέγη. Μία άλλη διαφορά ήταν ότι ο

Lawrence Gardshire πρόσθεσε στο άλας του Glauber έναν διφθορικό νάτριο, που είναι παράγοντας πυρηνοποίησης προκειμένου να μην παρατηρηθούν τα προβλήματα του διαχωρισμού του άλατος και να συνεισφέρει στην στερεοποίηση του. Δυστυχώς όμως και αυτή η κατασκευή παρουσίασε τα ίδια προβλήματα με την αντίστοιχη της Telkes λίγο πιο καθυστερημένα λόγω του παράγοντα πυρηνοποίησης.

Τη επόμενη προσπάθεια την έκαναν οι Dr. J.W.Hodgins και Dr. T.W.Hoffman στο Royal Military College στον Καναδά. Το σχεδιασμό αποθήκευσης ενέργειας τον ανέλαβε η Telkes λόγω της εμπειρίας της πάνω στο συγκεκριμένο τομέα. Το σπίτι ολοκληρώθηκε το 1959 και ήταν διώροφο με 111 m<sup>2</sup> ο κάθε όροφος. Η Telkes και σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποίησε το άλας του Glauber. Προκειμένου να ξεπεραστούν όμως τα προηγούμενα προβλήματα, εκτός από τους 12 τόνους του PCM, πρόσθεσε πυριτικό άλας του νατρίου και χρώμιο, ουσίες που αποφεύγουν την διάβρωση. Τα PCM ήταν ενσωματωμένα σε δοχεία χάλυβα τα οποία ήταν τοποθετημένα κάθετα στους τοίχους. Παρόλο που τα αποτελέσματα αυτής της προσπάθειας ήταν ικανοποιητικά δεν συνεχίστηκαν.

#### **7.2.1.2.2. ΑΝΤΛΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ PCM**

Στη δεκαετία του 1950 η Edison Illuminating Companies και η Edison Electric Institute διεξήγαγαν ένα πείραμα προκειμένου να προσθέσουν PCM μέσα σε αντλίες μεταφοράς θερμότητας. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε ως μέσο αποθήκευσης ήταν το Disodium Hydrogen Phosphate Dodecahydrate (DSP) με μοριακό τύπο Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>12H<sub>2</sub>O. Το σύστημα μεταφοράς θερμότητας ενσωμάτωσε μια σειρά δοχείων θερμότητας από χάλυβα, που περιείχαν το DSP. Τα δοχεία βυθίστηκαν στο νερό, το οποίο λειτούργησε σαν μέσο μεταφοράς θερμότητας. Τα αποτελέσματα του πειράματος δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά αφού το PCM δεν ήταν πλήρως αναστρέψιμο κατά την διάρκεια των κύκλων φόρτισης με αποτέλεσμα την δραματική μείωση της αποθηκευτικής ικανότητας του. Άλλα προβλήματα που παρουσιάστηκαν ήταν η διάβρωση των δοχείων και η ακανόνιστη διάταξη της θερμότητας λόγω ανομοιομορφίας της ροής ανάμεσα στα δοχεία. Η μελέτη σταμάτησε ταχέως το 1954 λόγω των επαναλαμβανόμενων προβλημάτων.

Παρόλ'αυτά η Telkes από το παραπάνω πείραμα ανακάλυψε μία μέθοδο στερεοποίησης του DSP προσδίδοντας ως συνεχή πηγή σε μία δεξαμενή με PCM κρυστάλλους Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>12H<sub>2</sub>O. Το σύστημα αυτό κατοχυρώθηκε από την Telkes και



αργότερα από τους Mr.C.S Herrick και Mr.T.L Etherington της General Electric και ήταν ευρέως διαδεδομένο στις ΗΠΑ.

### **7.2.1.3. ΠΡΩΤΗ ΜΕΓΑΛΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ**

Η δεκαετία του 1970 αποτέλεσε ορόσημο στην ανάπτυξη των υλικών αλλαγής φάσης και για τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας γενικότερα. Πιο συγκεκριμένα με τον αραβικό αποκλεισμό του πετρελαίου εμφανίζεται το 1973 η πρώτη πετρελαϊκή κρίση. Αυτό οδήγησε πολλές κυβερνήσεις στην αναζήτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το μεγαλύτερο πεδίο τεχνολογικής ανάπτυξης ήταν η ηλιακή ενέργεια, τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας και η θερμική αποθήκευση. Οι διάφορες έρευνες εστίασαν στην ηλιακή ενέργεια εξαιτίας της έλλειψης πλεονεκτημάτων των υπολοίπων πηγών. Η μέθοδοι λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας από την περίοδο αυτή και μετά αποτέλεσαν σημαντικό μέρος του προγράμματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με αξιοσημείωτη χρηματοδότηση στην έρευνα και στην ανάπτυξη των συστημάτων αυτών.

Η πρώτη μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα παρατηρήθηκε στο πανεπιστήμιο της Πενσυλβανίας το 1971. Το ερευνητικό πρόγραμμα εκτελέστηκε από τους S.Freedman, M. Telkes και M.Altman και χρηματοδοτήθηκε από το National Science Foundation των ΗΠΑ. Ο σκοπός της έρευνας ήταν να ανακαλυφθεί ένα αριθμός κατάλληλων ανόργανων και οργανικών PCMs για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης καθώς και να επιτευχθεί λεπτομερή ανάλυση των χαρακτηριστικών του συστήματος, όπως τα κόστη, η αποθηκευτική ικανότητα των υλικών και η οικονομική ανάλυση της επένδυσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ανόργανο PCM  $K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$  και ορισμένα μίγματα οργανικής παραφίνης ήταν κατάλληλα για εφαρμογές ψύξης ενώ για θέρμανση χώρου συνίστανται τα ανόργανα PCMs  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  και  $Ca(NO_3)_4 \cdot 4H_2O$ .

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου προγράμματος ο κυβερνητικός επιστημονικός οργανισμός των ΗΠΑ, Dow Chemical, διεξήγαγε πειράματα με 20000 PCMs ως προς τις προοπτικές που έδιναν αυτά για χρήση. Εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους του προγράμματος συμμετείχαν σε αυτό και επιστήμονες από τον Καναδά. Από αυτά τα PCMs μόνο το 1% βρέθηκε υποψήφιο για περαιτέρω χρήση και το σύνολό τους ήταν ένυδρα άλατα με ομογενή τήξη και συγκεκριμένες κατηγορίες οργανικών υλικών.

#### **7.2.1.3.1. ΑΛΑΣ ΤΟΥ GLAUBER**

Η M. Telkes συνέχισε την έρευνα της πάνω στον τομέα των PCMs και συγκεκριμένα στους τρόπους αύξησης της διάρκειας ζωής του άλατος Glauber. Ένα από τα κύρια προβλήματα του ήταν ότι ο διαχωρισμός του άνυδρου θειικού νατρίου προκαλούσε μείωση της αποθηκευτικής ικανότητας του υλικού ύστερα από κάποιους κύκλους φόρτισης. Σε πειράματα που ακολούθησαν προσθέτοντας στο άλας κάποιους πηκτικούς παράγοντες (gelling agents) παρατηρήθηκε ότι αν και αυξανόταν η διάρκεια ζωής του, η αποθηκευτική του ικανότητα εξακολουθούσε να παρατηρείται μετά από 1000 κύκλους φόρτισης.

Ο Dr. S.B.Marks , διεξήγαγε περαιτέρω πειράματα πάνω στο ίδιο αντικείμενο προκειμένου να λύσει το πρόβλημα. Αρχικά χρησιμοποίησε κάποιο είδος πυλού προκειμένου να αυτό να λειτουργήσει σαν πηκτικός παράγοντας. Κατέληξε στο ίδιο συμπέρασμα με την Telkes. Κατόπιν, χρησιμοποιώντας άλλους πηκτικούς παράγοντες, όπως πολυμερή του καρβοξυλικού οξέος παρατηρήθηκε αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας αλλά μείωση της διάρκειας ζωής.

Ο Dr. P.G Rueffel χρησιμοποίησε πλέγμα τύρφης, το οποίο απορρόφησε το άλας του Glauber. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να είναι τόσο συμβατά που το πλέγμα έδρασα σαν τέλειος πηκτικός παράγοντας, αυξάνοντας την διάρκεια ζωής του. Σε περαιτέρω έρευνες με αυτό το πλέγμα, που πραγματοποιήθηκε από το Boardman Energy Systems, πρόσθεσαν στο μίγμα του PCM τυπικό τσιμέντο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μίγμα δεν εμφάνιζε ελάτωση των θερμικών του ιδιοτήτων μετά από 2000 κύκλους φόρτισης. Το σύστημα ήταν χημικά σταθερό και παρουσιάζει αξιοσημείωτες προοπτικές στις κτιριακές εφαρμογές.

Περαιτέρω ανάλυση των φθηνών ένυδρων αλάτων σαν μέσο θερμικής αποθήκευσης παρουσιάστηκε από το πανεπιστήμιο του Delaware. Ένα πειραματικό σπίτι με την ονομασία "Solar one" κατασκευάστηκε στα όρια του πανεπιστημίου.

#### **7.2.1.3.2. ΠΑΡΑΦΙΝΕΣ**

Όταν συνειδητοποιήθηκε ότι η παραφίνη είναι μια οργανική ουσία ιδιαίτερα φθηνή και εύκολα διαθέσιμη, άρχισε να εξετάζεται το ενδεχόμενη χρήσης της σε κτιριακές εφαρμογές.

Ο Dr. John Bailey επικεντρώθηκε στους θερμοσυσσωρευτές, με κυψελοειδή πλέγμα αλουμίνιου και ενσωματωμένο κερί παραφίνης (N-eicosane), το οποίο έχει σημείο τήξης στους 36 °C για να καταστεί η παρακολούθηση λιγότερο περίπλοκη. Το

1974, διεξήχθησαν περισσότερες μελέτες πάνω στο ίδιο αντικείμενο από τον Dr.T.R Galloway του Lawrence Livermore Laboratory. Η έρευνα αυτή χρησιμοποίησε παραφίνη σε τρία διαφορετικά συστήματα θέρμανσης. Με αποθήκευση σε δεξαμενή με πλαστικά πτερύγια συναλλαγής θερμότητας, ατσάλινα δοχεία γεμισμένα με PCM σε δεξαμενή με νερό και μεγάλοι δίσκοι με PCM σε δεξαμενή με νερό.

Οι έρευνες που έχουν διεξαχθεί στις ΗΠΑ έχουν επικεντρωθεί σε ανόργανα PCM ενώ τα οργανικά έχουν εξεταστεί περισσότερο στην Ευρώπη. Αν και έχουν πραγματοποιηθεί πολύ περισσότερες έρευνες και για πολύ μεγαλύτερο διάστημα στον τομέα αυτό στις ΗΠΑ απ' ότι στις υπόλοιπες χώρες, παρ'ολαυτά σημαντικά συμπεράσματα έχουν προκύψει και στις υπόλοιπες χώρες. Τα περισσότερα συμπεράσματα που έχουν προκύψει σε αυτό τον τομέα παρουσιάζονται από τις ευρωπαϊκές χώρες στην Σουηδία, Δυτική Γερμανία, Γαλλία, Ιταλία και στην τότε ΕΣΣΔ και από τις ανατολικές στην Ιαπωνία.

### **7.2.2. ΔΥΤΙΚΗ ΓΕΡΜΑΝΙΑ**

Η επιστημονική κοινότητα της Γερμανίας στον τομέα της ανάπτυξης τεχνολογιών αποθήκευσης θερμότητας με PCM παρουσίασαν λεπτομερή γραφήματα και πίνακες των φυσικών και θερμικών ιδιοτήτων των PCM καθώς επίσης και χαρακτηριστικές ιδιότητες των PCM στο τομέα της κατασκευής και της μόνωσης. Τα υλικά στα οποία επικεντρώθηκε η ερευνητική δραστηριότητα της Γερμανίας ήταν η παραφίνη, το ένυδρο άλας και κάποια εύηκτα μίγματα καθώς θεωρούνται τα πιο κατάλληλα για εφαρμογές κάτω των 100°C. Οι ερευνητικές ομάδες του Πανεπιστημίου της Στουτγάρδης πραγματοποίησαν σημαντικές έρευνες σε διάφορα οργανικά και ένυδρα άλατα. Οι δοκιμές περιλάμβαναν τη χρήση των υλικών σε σωλήνες με πτερύγια.

Μια ιδιωτική εταιρεία στη Δυτική Γερμανία διεξήγαγε έρευνα σχετικά με το BBC Solar House προκειμένου να εξετάσει τις αποδόσεις διαφόρων PCM. Το Solar House θερμαίνεται με αντλία θερμότητας, η οποία χρησιμοποιεί το νερό ως μέσο αποθήκευσης. Οι ερευνητές αποφάσισαν να αλλάξουν το μέσο αποθήκευσης αρχικά με πάγο και κατόπιν με παραφίνη (σημείο τήξης από 18 έως 25 °C) για τρία έτη. Το πείραμα απέδειξε ότι η παραφίνη είχε την καλύτερη απόδοση και επίσης ότι αυξάνει το συντελεστή συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας COP από 2,6 έως 3,3. Τέλος, για την εγκατάσταση της παραφίνης απαιτείται μόνο το ήμισυ του όγκου του νερού με αποτέλεσμα να παρατηρείται και μικρότερο κόστος εγκατάστασης.

### **7.2.3. ΔΑΝΙΑ**

Μια ερευνητική ομάδα στη Δανία έχει πραγματοποιήσει σημαντικές έρευνες τόσο για τα οργανικά PCM όσο και για τα ανόργανα ένυδρα άλατα. Ο στόχος της έρευνας είναι να επεκταθεί η χημική ανάλυση των εν λόγω υλικών.

### **7.2.4. ΣΟΥΗΔΙΑ**

Σημαντική εξέλιξη της τεχνολογίας αποθήκευσης με PCM λαμβάνει χώρα στο Studsvik Energiteknik AB με επικεφαλής τον καθηγητή H. Hedman. Η έρευνα πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ένυδρο άλας ως PCM και αέρα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Τα συστήματα PCM, τα οποία βρίσκονται σε μεταλλικές κάψουλες, κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε ένα επιμέρους μοντέλο κλίμακας και αποδείχθηκαν πιο αποτελεσματικά από τις δεξαμενές νερού και τις κλίνες βότσαλων που χρησιμοποιούνται σήμερα για παθητική ηλιακή θέρμανση στο εσωτερικό των κτιρίων της Δανίας. Αργότερα κατασκευάστηκε ένα πλήρες σπίτι προκειμένου να ενσωματωθεί η θερμική τεχνολογία αποθήκευσης της Energiteknik AB PCM.

Ένα έργο, που περιλαμβάνει τρεις μεγάλες σουηδικές κατασκευές, πραγματοποιήθηκε για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων της ενσωμάτωσης PCM στο κτιριακό τομέα. Το έργο περιελάμβανε την κατασκευή τριών διαφορετικών συστημάτων θέρμανσης. Το πρώτο περιλαμβάνει μια τυπική θέρμανση νερού μέσω τηλεθέρμανσης, το δεύτερο χρήση βεβιασμένης κυκλοφορίας με αέρα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας και σε ώρες εκτός αιχμής χρησιμοποίηση της θερμότητας για την φόρτιση του PCM, που βρίσκεται μέσα σε γραμμικούς σωλήνες πολυαιθυλενίου και το τρίτο, ένα παρόμοιο σύστημα με το δεύτερο, αλλά με τη διαφορά ότι η θερμότητα από την ψύξη του αέρα στους ηλιακούς συλλέκτες θεωρείται ως κύρια πηγή θερμότητας.

### **7.2.5. ΓΑΛΛΙΑ**

Για πολλά χρόνια, η Γαλλία έχει διεξάγει έρευνα στον τομέα ανάπτυξης τεχνολογίας θερμικής αποθήκευσης σε PCM στο Εργαστήριο Center National de la Recherche Scientifique (CNRS), στη Νίκαια, και έχουν κατασκευαστεί πολλά κτίρια. Οι δύο δομές αποτελούνται από ένα ηλιακό σπίτι για οικιακή χρήση, καθώς και ένα θερμοκήπιο για παραγωγή κοντά στη Νίκαια. Το σύστημα χρησιμοποιεί ως PCM «Clairolithe», που αποτελείται από  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  το οποίο αναμειγνύεται με κάποιον

παράγοντα πυρηνοποίησης και το οποίο βρίσκεται ενσωματωμένο σε κύτταρα που αποτελούν μέρος της δομής του τοίχου. Το CNRS στηρίζει επίσης την έρευνα σχετικά με την παραφίνη, εξετάζοντας την ενσωμάτωση των μεταλλικών μειγμάτων σε αυτά προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση των χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας. Οι επιστήμονες από το Center Scientific et Technique du Bâtiment, έχουν κατοχυρώσει προϊόντα τα οποία περιέχουν PCM με σημεία τήξης από 15 έως 40°C για εφαρμογές ψύξης.

#### **7.2.6. ΑΓΓΛΙΑ**

Η Αγγλία εδώ και πολλά χρόνια διεξάγει μελέτες στο τομέα θερμική αποθήκευσης με PCM καθώς και είναι μια από της χώρες, μαζί με την Γερμανία και την Σουηδία, που είναι παραγωγοί PCM. Οι A.K.R.Bromley, E.M.McKay και J.P Wilkins έχουν ασχοληθεί διεξοδικά με μελέτες στον τομέα της λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας για εφαρμογές θέρμανσης και κυρίως για συστήματα αποθήκευσης πάγου. Υπάρχει αξιοσημείωτη χρήση συστημάτων αποθήκευσης πάγου με μεγάλους παγκόσμιους οργανισμούς συμπεριλαμβανομένου και του Baltimore Cristopia (σε συνεργασία με την Γαλλία). Μια μικρή ομάδα επιστημόνων του πανεπιστημίου του Salford, διεξάγει έρευνα σχετικά με το Hydrated Disodium Phosphate and Calcium Chloride Hexahydrate και το  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , και μαζί με το Πανεπιστήμιο του Cardiff, στην Ουαλία, ανέπτυξε μία τεχνολογία αποθήκευσης χρησιμοποιώντας παραφίνη ως PCM.

#### **7.2.7. ΙΑΠΩΝΙΑ**

Η Ιαπωνία κατέχει ηγετικό ρόλο, μαζί με τις ΗΠΑ, στο τομέα ανάπτυξης θερμική τεχνολογία αποθήκευσης με PCM και έχουν διεξαχθεί σημαντικές ερευνητικές δραστηριότητες με ισχυρή κρατική υποστήριξη. Ο τομέας της έρευνας στον οποίον ηγείται η Ιαπωνία είναι ο τομέας της αποθήκευσης θερμότητα με PCM για εφαρμογές θέρμανσης με πολλά αρχικά σχέδια που αργότερα κατασκευάστηκαν και πέρασαν επιτυχώς στο εμπόριο.

Τα υλικά που κρίθηκαν ως κατάλληλα κατά τη διάρκεια της έρευνας με την Mitsubishi Electronic Corp και την Tokyo Electric Power Co. ήταν ένυδρα άλατα νιτριδίων, άλατα φθορίου, φωσφορικά άλατα, και το χλωριούχο ασβέστιο. Η έρευνα μέχρι τη δεκαετία του 1970 επικεντρώθηκε στις εφαρμογές θέρμανσης ενώ από το σημείο αυτό και μετά ανακαλύφθηκαν και οι προοπτικές των εφαρμογών ψύξης. Στις

αρχές της δεκαετίας του 1980, πολλές νέες οργανώσεις, συμπεριλαμβανομένης της Nirron Pillar Packing Co., κατοχύρωσαν το εξαϋδρικό βρωμιούχο ασβέστιο (Calcium Bromide Hexahydrate) ως PCM με παράγοντες πυρηνοποίησης. Άλλες, όπως η Kureha Chemical Industry Inventors χρησιμοποίησαν στην έρευνα τους το άλας του Glauber για θέρμανση και ψύξη χώρων μαζί με γύψο και άλλα ελαφριών μεγεθών μίγματα για τη σταθεροποίηση του PCM.

Σημαντική έρευνα και ανάπτυξη πραγματοποιήθηκε σε μια σειρά από εύτηκτα νιτρικά άλατα για εφαρμογές σταθεροποίησης θερμοκρασίας δωματίου. Η Yoneda και η Takamashi του Τμήματος Βιομηχανικής Χημείας και Τεχνολογίας της Επιστήμης του Πανεπιστημίου Tokyo ανέπτυξε μια σειρά από μοντέλα που χρησιμοποιούν έναν απλό εναλλάκτη θερμότητας για την παρακολούθηση του συστήματος PCM. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το σύστημα ήταν πολύ αποτελεσματικό, αλλά όταν συνδεόταν με έναν ηλιακό συλλέκτη παρατηρούνταν σημαντική μείωση της αποδοτικότητας του. Οι ΗΠΑ αργότερα διεξήγαγαν περαιτέρω έρευνα της ιαπωνικής αυτής μελέτης, διόρθωσαν τις ανακρίβειες, και κατοχύρωσαν το σύστημα.[36],[37]

## **8. ΤΟΜΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ PCM**

### **8.1. ΓΕΝΙΚΑ**

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

Τα πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας με μικρότερη διακύμανση κατά την ανάκτηση της με μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά από την πηγή θερμότητας (μέχρι και ισοθερμοκρασιακά). Επιπλέον, η ελευθερία που δίνει το εύρος θερμοκρασιών που παράγονται τα υλικά δίνει την ευχέρεια εφαρμογής των PCM σε πλήθος περιπτώσεων έμμεσης και άμεσης αποθήκευσης θερμότητας.

Οι πρακτικές δυσκολίες που ανακύπτουν οφείλονται στην χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, στην μεταβολή της πυκνότητας, στην αξιοπιστία – σταθερότητα των ιδιοτήτων σε μακρόχρονη χρήση καθώς και στο διαχωρισμό των φάσεων με πιθανότατη αλλαγή χημικής σύστασης των υλικών και εμφάνιση του φαινομένου supercooling. Η ανεπάρκεια της σταθερότητας οφείλεται είτε σε μικρής

χημικής σταθερότητας είτε στην ενδεχόμενη διάβρωση μεταξύ του PCM και του υλικού που έρχεται σε επαφή.

Η αποθήκευση ενέργειας είναι ένα πολύ σημαντικό μέσο εξοικονόμησης ενέργειας, βελτιώνοντας την αξιοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας. Μικρής διάρκειας αποθήκευση είναι απαραίτητη σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές ενώ πλέον μελετώνται και εγκαταστάσεις μεγάλης διάρκειας αποθήκευσης (εποχιακή αποθήκευση).

Η ασυνέχεια και η δυναμική φύση της των πηγών ενέργειας που υπάρχουν στη φύση, αλλά και η ανάγκη για εκμετάλλευση των συστημάτων αυτών σε ένα συνεχές και στατικό φορτίο συνετέλεσαν στην αναγκαιότητα χρήσης συστημάτων αποθήκευσης για την περίσσεια της ενέργειας και την ανάκτηση της σε ώρες μη διαθέσιμης ενέργειας από την πηγή.

Το ίδιο σκεπτικό επικρατεί και στα συστήματα ανάκτησης θερμότητας όπου οι περίοδοι διαθεσιμότητας της περισσευόμενης ενέργειας και ζήτησης συνήθως δεν ταυτίζονται ή ταυτίζονται εν μέρη. Το ίδιο γίνεται και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, ιδιαίτερα σε χώρες με ακραίες κλιματικές συνθήκες (κρύο ή ζέστη) κυρίως λόγω των οικιακών καταναλωτών για ανάγκες ψύξης ή θέρμανσης. Αυτή η διακύμανση παρουσιάζει συνήθως τις ελάχιστες τιμές της μετά τα μεσάνυχτα μέχρι τις πρώτες πρωινές ώρες. Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως και το σύστημα διανομής, έχουν σχεδιαστεί και διαστασιολογηθεί για τις περιόδους μέγιστης ζήτησης, οπότε είναι επόμενο να υπολειτουργούν τις νυχτερινές ώρες. Είναι λοιπόν προφανές ότι καλύτερη διανομή των φορτίων στο εικοσιτετράωρο είναι πάντα ευπρόσδεκτη από την εταιρία διαχείρισης του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένας σχετικά εύκολος μετατόπισης των μεγίστων μιας εγκατάστασης σε περιόδους εκτός των αιχμών του συστήματος είναι η αποθήκευση θερμότητας σε χαμηλή ή υψηλή θερμοκρασία ανάλογα με την εφαρμογή.[28]

## **8.2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ)**

Εκτενείς προσπάθειες έχουν γίνει και γίνονται στο τμήμα των εφαρμογών των PCM με συστήματα αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας όπου η απαιτούμενη θερμότητα αποθηκεύεται την ημέρα για να χρησιμοποιηθεί τη διάρκεια της νύχτας ή σε ώρες μη ηλιοφάνειας.

Η χαμηλή τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας δεν βοηθάει την ταχεία απορρόφηση της προσφερόμενης θερμότητας και για αυτό το λόγο εφαρμόζονται πλήθος τεχνικών ενίσχυσης της.

Οι εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως οι εξής :

1. Το PCM τοποθετείται μεταξύ παραλλήλων πλακών σε λεπτά και διαδοχικά στρώματα αφήνοντας μεταξύ τους ικανό κενό για τη ροή του μέσου (συνήθως αέρας, νερό, διάλυμα νερού γλυκόλης, λάδι κλπ).
2. Το PCM τοποθετείται εντός σωληνώσεων μικρής διαμέτρου, σχηματίζοντας δέσμη σωληνώσεων και το ρευστό κινείται κατά μήκος ή κάθετα της δέσμης. Οι σωλήνες πολλές φορές είναι και πτερυγιοφόροι.
3. Το PCM τοποθετείται στο κέντρο ενός δοχείου αποθήκευσης διπλού κελύφους και το ρευστό κυκλοφορεί περιφερειακά.
4. Σε μικρή κλίμακα μόνο έχουν χρησιμοποιηθεί και διατάξεις παρόμοιες του πλακοειδή εναλλάκτη. Στην κυψελοειδή διάταξη αντιμετωπίζονται προβλήματα από τις τάσεις που δημιουργούνται με την αύξηση του όγκου κατά την τήξη του υλικού, φαινόμενο που θέτει όρια στις εφαρμογές της.
5. Το PCM τοποθετείται σε δοχείο το οποίο το διαπερνούν πτερυγιοφόροι σωλήνες. Κατ' αυτή τη διάταξη το υλικό καλύπτει όλη την περιοχή μεταξύ δοχείου και σωλήνα καθώς και την απόσταση μεταξύ των πτερυγίων. Τέτοιου είδους διάταξη είναι αρκετά αποδοτική αν το ρευστό που ρέει εντός των σωληνώσεων είναι υγρό και όχι αέριο.
6. Το PCM βρίσκεται σε μορφή μικρής σφαίρας (συνήθως με πλαστικό κέλυφος) και τοποθετείται εντός δοχείου. Το ρευστό που μεταφέρει τη θερμότητα, εισέρχεται και εξέρχεται από το δοχείο μέσω μιας σωλήνωσης εισαγωγής και εξαγωγής αντίστοιχα ή ένας αεραγωγός εισόδου και εξόδου στην περίπτωση αερίου μέσου. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη πτώση πίεσης που παρουσιάζεται μεταξύ εισόδου και εξόδου.[28]

### **8.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΜΕΣΟ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

Η ιδέα έχει πραγματοποιηθεί μόνο σε ερευνητικό επίπεδο χρησιμοποιώντας ένυδρο άλας για PCM και λάδι για μέσο μεταφοράς της θερμότητας από την πηγή στο σύστημα αποθήκευσης. Στη πειραματική διάταξη φυσαλίδες λαδιού διαπερνούν το PCM μεταφέροντας την απαιτούμενη θερμότητα. Αξιοσημείωτο είναι ότι η



αναταραχή που δημιουργούν οι φυσαλίδες μειώνουν και το φαινόμενο του supercooling και του διαχωρισμού των φάσεων.[28]

#### **8.4. ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕ PCM**

Τα υλικά αλλαγής φάσης βρίσκουν εφαρμογές τόσο σε ενεργητικά όσο και σε παθητικά συστήματα αποθήκευσης. Σε οποιοδήποτε όμως σύστημα είναι απαραίτητη η αποθήκευση θερμότητας ή ψύχους προκειμένου να επέλθει ισορροπία μεταξύ διαθεσιμότητας και ζήτησης. Τα PCM μπορούν να τοποθετηθούν στην τοιχοποιία, σε άλλα μέρη του κτιρίου εκτός των τοίχων ή σε μονάδες αποθήκευσης θερμότητας και ψύχους.

Οι δύο πρώτες εφαρμογές αποτελούν παθητικά συστήματα αφού η αποθήκη θερμότητας( ή ψύχους) γίνεται αυτόματα αναφορικά πάντα με το σημείο τήξης του υλικού. Το τρίτο είναι ενεργητικό σύστημα αφού η αποθηκευμένη θερμότητα (ή ψύχους) βρίσκεται σε δεξαμενή θερμικά χωρισμένη από το κτίριο και προσδίδεται κατόπιν ζήτησης.

##### **8.4.1. ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ**

Η ικανότητα αποθήκης θερμότητας σε πέτρα είναι γνωστή από τα αρχαία ακόμη χρόνια και έχει αξιοποιηθεί στην κατασκευή σπιτιών. Η χρήση όμως υλικών που αποθηκεύουν με την μορφή αισθητής θερμότητας παρουσιάζει διάφορα προβλήματα με κυριότερα την υπερβολική ποσότητα του υλικού που απαιτείται και τις ανεπιθύμητες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, που παρουσιάζονται στη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου.

Τα δομικά υλικά από τα οποία χρησιμοποιούνται στα κτίρια παραμένουν στη στερεή κατάσταση σε ολόκληρο το εύρος των θερμοκρασιών χρήσης τους. Ομοίως συμπεριφέρονται και τα συμβατικά μονωτικά υλικά τα οποία ως χαρακτηριστικό γνώρισμα έχουν την αντίσταση που παρουσιάζουν στη διάβαση της θερμότητας μέσα από το σώμα τους. Αντίθετα με αυτή τη προσέγγιση μόνωσης των κτιρίων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν υλικά που θα αποθήκευαν τη θερμότητα που εισέρχεται στο κτίριο από το κέλυφος κατά την καλοκαιρινή περίοδο, ώστε να μην αυξηθεί η θερμοκρασία των χώρων ή να αποθηκεύουν τη θερμότητα που προσπίπτει στο κτίριο με μορφή ηλιακής ακτινοβολίας ώστε μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας κατά την χειμερινή περίοδο.

Η βασική ιδέα των συστημάτων αποθήκευσης ως μέσα εξοικονόμησης ενέργειας είναι η μετατόπιση των μεγίστων ενεργειακών απαιτήσεων της εγκατάστασης σε ώρες εκτός των περιόδων μέγιστης ζήτησης του συστήματος διανομής ενέργειας ή η εξομάλυνση της καμπύλης ενεργειακής απαίτησης της εγκατάστασης ώστε να μην παρουσιάζονται σημεία αιχμής κατά την εικοσιτετράωρη λειτουργία της. Οι έρευνες που έχουν γίνει και γίνονται καθώς και οι εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί αποδεικνύουν ότι δομικά υλικά τα οποία έχουν εμποτιστεί με PCM ή δομικές κατασκευές που εμπεριέχουν PCM, μπορούν να αποθηκεύσουν 5 – 14 φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου σε σχέση με τα συμβατικά δομικά υλικά.

Η εφαρμογή τους στις κτιριακές εγκαταστάσεις μπορεί να γίνει είτε με χρήση των PCM αυτούσια ως στρώμα υλικού μέσα στην τοιχοποιία ή σαν συστατικό σύνθετου υλικού με κύριο συστατικό το γύψο ή το τσιμέντο (π.χ. γυψοσανίδα με πρόσθετο συστατικό το PCM ή σοβάς με PCM). Η χρήση των PCM σε συνδυασμό με γυψοσανίδα συνήθως γίνεται σε αναλογία 20-30% PCM κατά βάρος. Ειδικά όταν χρησιμοποιούνται οργανικά PCM η ενσωμάτωσή τους σε υλικά με υψηλό δείκτη πυραντίστασης εξασφαλίζει εν μέρη τη μη ανάφλεξη των PCM σε περίπτωση πυρκαγιάς. Η ενσωμάτωση των PCM σε υλικά όπως ο γύψος ή το τσιμέντο εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό τη συγκράτηση του υλικού ακόμη και μετά την πλήρη υγροποίησή του, καθώς και τη μη πρόσληψη υγρασίας από τον αέρα του περιβάλλοντος. Σε πολλές περιπτώσεις ανάλογα με την κατηγορία του υλικού (όπως τα λιπαρά οξέα, ένυδρα άλατα) είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση του PCM σε προστατευτικό κάλυμμα πριν την ενσωμάτωσή τους σε δομικό υλικό. Για την κατηγορία των παραφινών πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει τη συμβατότητά τους με το γύψο, καθώς και με το τσιμέντο και γι' αυτό το λόγο έχουν χρησιμοποιηθεί δομικά υλικά εμποτισμένα με παραφίνες.

Το πλέον προσιτό δείγμα χρήσης των PCM ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία τους είναι η εφαρμογή τους στην τοιχοποιία. Κατά την καλοκαιρινή περίοδο η θερμότητα από το εξωτερικό περιβάλλον εισέρχεται στο κέλυφος του κτιρίου διαπερνώντας τα στρώματα του σοβά και του τούβλου και αντιμετωπίζει τη θερμική αντίσταση της μόνωσης. Στη κοινή κατασκευή τοιχοποιίας όσο ποσό θερμότητας διαπεράσει το στρώμα της μόνωσης θα εισέλθει στο χώρο μέσω των στρωμάτων του τούβλου και του σοβά. Στην περίπτωση της ενισχυμένης τοιχοποιίας με PCM το επιπλέον ποσό θερμότητας αποθηκεύεται στο υλικό και δεν περνά προς τον εσωτερικό χώρο.

Κατά την χειμερινή περίοδο ο αέρας του εσωτερικού χώρου έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από το εξωτερικό περιβάλλον. Σ' αυτή την περίπτωση η θερμότητα από τον εσωτερικό χώρο διαπερνά τα στρώματα του σοβά και του τούβλου και εγκλωβίζεται στο PCM μην αφήνοντας να διαφύγει θερμότητα προς το περιβάλλον. Στη συμβατική περίπτωση όσο ποσό θερμότητας διαφεύγει από το στρώμα της μόνωσης καταλήγει στο περιβάλλον.

Κατά τα τελευταία 30 χρόνια, η τεχνολογία επέτρεψε τη δημιουργία και την ανάπτυξη μικροσυσσκευασμένων PCM σε κάψουλες, μορφή η οποία είναι κατάλληλη για την χρήση σε συνεργασία με δομικά υλικά οποιασδήποτε μορφής. Πλέον η χρήση τέτοιων υλικών είναι διαδεδομένη στα κτίρια τα οποία σχεδιάζονται ώστε να είναι υψηλής ενεργειακής απόδοσης και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.

#### **8.4.2. ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ**

Αν και έχουν γίνει αρκετές μελέτες για χρήση διαφόρων PCM σε διαφορετικούς τοίχους, δεν έχει καθιερωθεί μέχρι τώρα μια καθολική μέθοδος χρήσης των υλικών αυτών σε τοίχους, βάσει της οποίας να παρέχονται γενικές κατευθύνσεις χρήσης και εγκατάστασης, τεχνικά και θερμικά μεγέθη και γενικές οδηγίες αναφορικά με την τελική επιλογή του είδους, της ποσότητας και του τρόπου εφαρμογής του PCM στον τοίχο συναρτήσει των κλιματικών συνθηκών.

Καθίσταται πάρα πολύ σημαντικό το γεγονός ότι η θερμοκρασία τήξης του PCM καθορίζει την βέλτιστη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας του τοίχου κατά την διάρκεια μίας ημέρας. Σύμφωνα με πειράματα αποδεικνύεται ότι ο αποδοτικότερος τρόπος ρύθμισης του τοίχου επιτυγχάνεται με κατάλληλη επιλογή PCM τέτοια ώστε η θερμοκρασία τήξης του να είναι πολύ κοντά στην μέση ημερήσια θερμοκρασία του τοίχου και όχι του περιβάλλοντος. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μέγιστη αποθηκευτική ικανότητας του PCM καθώς και την εξομάλυνση των εσωτερικών θερμοκρασιών.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα (πχ υπερθέρμανση, κατασκευές όχι ελαφρού τύπου) που προκύπτουν από τις κλασικές εγκαταστάσεις παθητικών ηλιακών συστημάτων. Χρησιμοποιείται το PCM προκειμένου να απορροφά ή να αποβάλλει σημαντικό ποσό θερμότητας διατηρώντας τη θερμοκρασία πρακτικά σταθερή με αποτέλεσμα τη χρήση μικρότερων, και συνεπώς πιο αποδοτικών, θερμαντικών ή κλιματιστικών συσκευών. Επιπλέον δεδομένου ότι η

αποθηκευτική ικανότητα των PCM είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τα παραδοσιακά δομικά υλικά, είναι εφικτή η ίδια αποθηκευτική ικανότητα με πολύ λιγότερη μάζα. [38],[39],[40],[41]

#### **8.4.2.1. ΤΟΙΧΟΣ TROMBE**

Ο Τοίχος Trombe ενισχυμένος με PCM θεωρείται ένα παράδειγμα βελτίωσης της απόδοσης της ενέργειας. Ο κλασικός τοίχος Trombe αποτελείται από ένα συμπαγή τοίχο μεγάλης θερμοχωρητικότητας από σκυρόδεμα πάχους 30-40cm, βαμμένο με σκούρο χρώμα, συνήθως μαύρο, στην εξωτερική πλευρά. Σε απόσταση 3cm υπάρχει γυάλινη επιφάνεια με μονό ή διπλό στρώμα και ενίοτε πλαστική. Στο πάνω και κάτω μέρος του τοίχου υπάρχουν θυρίδες που διευκολύνουν την κίνηση του αέρα, ενώ θυρίδα υπάρχει και στο πάνω μέρος του υαλοστασίου.

Η ηλιακή θερμότητα συλλέγεται στο χώρο μεταξύ του τοίχου και του υαλοστασίου και διανέμεται στο εσωτερικό μετά από ένα διάστημα αρκετών ωρών. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία πέσει κάτω από την θερμοκρασία επιφάνειας του τοίχου, η θερμότητα αρχίζει και απελευθερώνεται στο εσωτερικό χώρο. Η απώλεια θερμότητας μπορεί να ελεγχθεί με μία μονωτική κουρτίνα κατά την διάρκεια της νύχτας μεταξύ του τοίχου και του υαλοστασίου ώστε να μην διαφεύγει η θερμότητα προς το εξωτερικό περιβάλλον. Ενώ οι απλοί τοίχοι Trombe στηρίζονται στην αποθήκευση αισθητής θερμότητας, οι ενισχυμένοι με PCM έχουν μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα μάζας και συνεπώς καλύτερα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Ένας τοίχος Trombe με PCM κατασκευάζεται στη νότια πλευρά του σπιτιού. Για μια δεδομένη ποσότητα αποθήκευσης θερμότητας οι τοίχοι με PCM απαιτούν λιγότερο χώρο και είναι πιο ελαφριές και συνεπώς είναι πιο εύχρηστη σε κτιριακές εφαρμογές. Ενδεικτικά αναφέρεται πως ένας τοίχος με PCM πάχους 8,1 cm έχει ελαφρώς καλύτερη θερμική απόδοση από τοίχο από μπετό πάχους 40 cm. Τα συνηθέστερα υλικά αλλαγής φάσης που χρησιμοποιούνται σε τοίχους Trombe είναι οι παραφίνες και τα ένυδρα άλατα.

#### **8.4.2.2. ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑ**

Στα επενδυτικά υλικά της τοιχοποιίας είναι πιθανόν να προστεθούν διάφορα PCM , συνήθως παραφίνες, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ένα είδος δομικού υλικού που λειτουργεί σαν αποθηκευτικό μέσο. Όταν υπάρχουν διαθέσιμες ψυκτικές πηγές

το PCM στερεοποιείται ελευθερώνοντας θερμότητα ενώ όταν απαιτείται ψύξη υγροποιείται και απορροφά θερμότητα. Τα PCM επιδρούν σημαντικά στην θερμοχωρητικότητα της εγκατάστασης και οι καθαρές ουσίες αποθηκεύουν την θερμότητα με μηδενική αλλαγή της θερμοκρασίας τους και συνεπώς του δωματίου. Η αυξημένη αποθηκευτική ικανότητα της γυψοσανίδας μπορεί, χωρίς βοηθητικό σύστημα κλιματισμού, να διατηρήσει την θερμοκρασία του χώρου κοντά στο ανώτατο όριο θερμικής άνεσης. Σε περιοχές με μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κατά την διάρκεια της μέρας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα εξαερισμού κατά την διάρκεια της νύχτας προκειμένου απομακρυνθεί η αποθηκευμένη θερμότητα της γυψοσανίδας.

Μετά από έρευνες βρέθηκαν δύο τρόποι ενσωμάτωσης των PCM σε γυψοσανίδα:

- Κατά την πρώτη, βυθίζεται η γυψοσανίδα σε λεκάνη με υγρό PCM, ώστε το πορώδες της γυψοσανίδας να απορροφήσει το PCM. Σημειώνεται ότι μία τυπική γυψοσανίδα απορροφά το 30% του βάρους της σε λιγότερο από δέκα λεπτά.
- Κατά την δεύτερη η γυψοσανίδα περιλαμβάνει μικροσυσκευασία του PCM σε σφαιρικής μορφής κάψουλες, διαμέτρου 3μm, σκοπός της οποίας είναι η συγκράτηση του PCM κατά την υγρή φάση.

Από μελέτες αποδείχθηκε ότι ο περιορισμός του κατά βάρος ποσοστού του PCM στο 15-20% καθώς επίσης και η επίστρωση πυροπροστατευτικού υλικού ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο ανάφλεξης. Τα οφέλη μια τέτοιας εγκατάστασης αναγνωρίστηκαν αμέσως, δεδομένου ότι πλέον στις ΗΠΑ κατασκευάζονται πάνω από 7 δις τετραγωνικά μέτρα τέτοιας γυψοσανίδας ετησίως. [28],[38],[39],[40],[41]

#### **8.5. ΤΑΒΑΝΟΣΑΝΙΔΑ ΜΕ PCM**

Ένα σύστημα θέρμανσης χώρου με ενσωματωμένα PCM στην οροφή σχεδιάστηκε από τους Guthertz και Schiler. Η ηλιακή ενέργεια κατευθύνεται από ηλιακούς ανακλαστήρες μέσω των παραθύρων στα υλικά αλλαγής φάσης. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος είναι ότι επιτρέπεται σε μια μεγάλη επιφάνεια να αποτελέσει αποθηκευτικό μέσο χωρίς να απαιτούνται μεγάλοι όγκοι αποθηκευτικού μέσου. Η χρήση ενός τέτοιου συστήματος ανακτά το 17-36% των θερμικών απωλειών. Οι ταβανοσανίδες χρησιμοποιούνται για θέρμανση και ψύξη. Η χρήση PCM σε ταβανοσανίδα είναι ικανή να μειώσει το φορτίο αιχμής σε ένα σύστημα

κλιματισμού. Συγκεκριμένα, την χειμερινή περίοδο, ο ψυχρός αέρας από τους αεραγωγούς διέρχεται από το κενό στο θάλαμο οροφής για να αποθηκεύσει την ψύξη. Η ψύξη ανακτάται κατά την διάρκεια δύο ωρών αιχμής. Έχει αποδειχθεί ότι η αύξηση στη θερμοκρασία του δωματίου ήταν 2 °C ενώ αν ήταν μία τυπική γυψοσανίδα θα αυξανόταν κατά 6°C.[41]

### **8.6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ PCM ΣΕ ΠΑΝΤΖΟΥΡΙΑ**

Τα παντζούρια αυτά περιέχουν PCM στο εξωτερικό των παραθυροφύλλων. Με αυτόν τον τρόπο, καθώς τα παντζούρια ανοίγουν προς τα έξω, η ηλιακή ακτινοβολία λιώνει το PCM το οποίο απορροφά θερμότητα. Κατά την διάρκεια της νύχτα στερεοποιείται με αποτέλεσμα να ανακλάται η θερμότητα μέσα στα δωμάτια. Σύμφωνα με μελέτη που έγινε, η αποθηκευτική ικανότητα του στοιχείου αυξήθηκε μέχρι 4 °C για 4-5 ώρες συγκριτικά με τον αντίστοιχο παντζούρι χωρίς PCM.[41]

### **8.7. ΕΝΔΟΔΑΠΕΔΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ PCM**

Η ενδοδαπέδια θεωρείται από πολλούς καινοτομία στο πεδίο των εφαρμογών θέρμανσης, αποτελεί όμως τεχνική που εμφανίζεται για πρώτη φορά στην αρχαιότητα με βασική καύσιμη ύλη τα καυσόξυλα και μέσο μετάδοσης τον αέρα, ο οποίος διαχέονταν σε υπόγεια κανάλια κάτω από τα δάπεδο.

Τα τελευταία τριάντα χρόνια και σχεδόν παράλληλα με την εμφάνιση των πλαστικών σωλήνων, ξανακάνει έντονη την παρουσία της με εξελιγμένες τεχνικές μεθόδους εφαρμογής. Η ενδοδαπέδια θέρμανση παρουσιάζει το μεγάλο πλεονέκτημα της ομοιόμορφης θερμικής άνεσης σε ολόκληρο το χώρο που θερμαίνεται για ένα εύρος θερμοκρασιών από 25-28 °C. Το περιβάλλον που διαμορφώνει είναι πολύ φιλικό προς τον άνθρωπο, δεν παρουσιάζει προβλήματα ή κινδύνους για τους χρήστες και δεν παρεμβαίνει στην ήδη υπάρχουσα αισθητική του χώρου, κάτι που το καθιστά εύχρηστο σε οποιοδήποτε εσωτερικό χώρο.

Η ενδοδαπέδια είναι δυνατόν να εφαρμοστεί με δύο τρόπους:

- Με τα συστήματα ύδατος (θερμά-υγρά) και
- Με τα ηλεκτρικά συστήματα (ξηρά)

Ο πρώτος τρόπος εφαρμογής γίνεται κατά βάση με χρήση πετρελαίου ή φυσικού αερίου με αποτέλεσμα η χρήση του PCM να μην προσφέρει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα υπάρχοντα συμβατικά καύσιμα. Σε περίπτωση όμως που για την θέρμανση νερού χρησιμοποιείται κάποια άλλη πηγή ενέργεια, όπως ηλιακή

ακτινοβολία, τότε αυτή πρέπει σε ώρες μη αιχμής να μπορεί να αποθηκευτεί. Δηλαδή αν κατά την διάρκεια θέρμανσης του νερού δεν υπάρχουν απαιτήσεις για ζεστό νερό ή θέρμανση χώρου τότε αυτή η θερμική ενέργεια πρέπει να αποθηκευτεί. Η αποθήκευση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί στο PCM που βρίσκεται στο δάπεδο για μετέπειτα χρήση.

Όσον αφορά τον δεύτερο τρόπο, τα PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καταναλώνοντας τα φορτία αιχμής κατά την διάρκεια της νύχτας, όπου το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος είναι μικρότερο. Στο σύστημα αυτό τα PCM τοποθετούνται σε σφαιρίδια τα οποία καλύπτουν τις ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Η λειτουργία της εγκατάστασης προσδιορίζεται κυρίως για τις ώρες μη αιχμής, προσφέροντας θερμότητα από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Η θερμότητα αυτή πρώτα θα απορροφηθεί από το PCM που περιβάλλει τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Το PCM αποθηκεύει την θερμότητα με την μορφή αισθητής θερμότητας και αφού φτάσει στο σημείο τήξης του αρχίζει να λιώνει αποθηκεύοντας θερμική ενέργεια με την μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Πρακτικά, ένα μικρό ποσοστό από την παραγόμενη από τις αντιστάσεις θερμότητα διαφεύγει από το PCM και κατευθύνεται προς τη βάση του πατώματος, πριν ακόμα αποκτήσει το PCM την ονομαστική λανθάνουσα θερμότητα. Η ροή θερμότητας προς την αντίθετη κατεύθυνση συναντά την μεγάλη θερμική αντίσταση της θερμομόνωσης και είναι ανεπιθύμητη. Η λειτουργία του συστήματος συνεχίζει φορτίζοντας το PCM μέχρι να αποθηκευτεί η μέγιστη λανθάνουσα θερμότητα στο σύστημα. Από τη στιγμή εκείνη και μετά ότι ενέργεια παράγεται από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις κατευθύνεται στο χώρο, αφού έχει πρώτα αποθηκευτεί στη βάση του δαπέδου κατασκευής. Η παραπάνω διαδικασία εμφανίζει ως χρονική καθυστέρηση το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που μπαίνει σε λειτουργία η εγκατάσταση θέρμανσης μέχρι τη πλήρη φόρτιση του PCM. Αυτή την χρονική καθυστέρηση πρέπει να την χρησιμοποιήσουμε προκειμένου να επιτύχουν μείωση του κόστους λειτουργία της εγκατάστασης.

Όταν οι ηλεκτρικές αντιστάσεις παύουν να λειτουργούν, το σύστημα συνεχίζει να προσφέρει θερμότητα, η οποία προέρχεται από την αποφόρτιση του PCM. Με άλλα λόγια το PCM αρχίζει να αποφορτίζεται προσφέροντας στο χώρο τη λανθάνουσα θερμότητα που έχει αποκτήσει από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Συνεπώς, το χρονικό διάστημα που θα συνεχίσει να λειτουργεί το σύστημα μετά την διακοπή λειτουργία των αντιστάσεων είναι ο χρόνος αποφόρτισης του PCM.

Τα αποτελέσματα από την χρήση PCM στην ενδοδαπέδια θέρμανση εμφανίζονται ιδιαίτερα θετικά. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι σε εφαρμογή κεριού παραφίνης σε ενδοδαπέδιο σύστημα αποθήκευσης με στρώμα πάχους 30mm μεταξύ της θερμαινόμενης επιφάνειας και των πλακιδίων του δαπέδου βρέθηκε πως η θερμότητα που προέρχεται από το έδαφος μπορεί να αυξηθεί σημαντικά από 30-75 W/m<sup>2</sup> όταν γίνεται χρήση του PCM. [42],[43]

### **8.8. ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ PCM**

Εξαιτίας της ασυνέχειας που εμφανίζουν οι πηγές ενέργειας στη φύση απαιτείται αποθήκευση της ενέργειας που παραμένει αχρησιμοποίητη κατά την διάρκεια της μέρας προκειμένου να διατεθεί για κατανάλωση κατά τις ώρες μη ηλιοφάνειας. Συνεπώς, πρέπει να υπάρχει δυνατότητα τόσο αποθήκευσης αυτής της ενέργειας όσο και ανάκτηση της για την κάλυψη των θερμικών αναγκών. Η μόνη διαφορά ενός συμβατικού ηλιακού συστήματος και ενός με PCM είναι ως προς το δοχείο αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας. Στις ηλιακές εφαρμογές χρησιμοποιούνται κυρίως ένυδρα άλατα.

Η αρχή λειτουργία του συστήματος βασίζεται στη θέρμανση του εργαζόμενου μέσου, συνήθως υγρή σιλικόνη ή ορυκτέλαιο, από την ηλιακή ακτινοβολία που δεσμεύεται από τον συλλέκτη. Το εργαζόμενο μέσο αφού θερμανθεί διαβιβάζεται στο δοχείο αποθήκευσης, όπου βρίσκεται το PCM. Η θερμότητα αυτή διαβιβάζεται στο ένυδρο άλας και απελευθερώνει το κρυσταλλικό νερό. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται κορεσμένο υδάτινο διάλυμα του άλατος, στερεό υπόλειμμα του αδιάλυτου άλατος και επίπλευση του εργαζόμενου μέσου. Ένα μέρος του εργαζόμενου μέσου οδηγείται στους συλλέκτες ενώ το υπόλοιπο οδηγείται στο δοχείο ανάδευσης όπου αναδύεται με το υπόλοιπο μέσο και παραλαμβάνει θερμότητα από μία ηλεκτρική αντίσταση αν αυτό θεωρηθεί σκόπιμο. Για την ανάκτηση της αποθηκευμένης θερμότητας, οδηγείται στον εναλλάκτη όπου μεταφέρει θερμότητα σε ένα άλλο μέσο, συνήθως νερό για τη χρήση αυτής. Αφού το εργαζόμενο μέσο ψυχθεί στον εναλλάκτη διαβιβάζεται στο κορεσμένο διάλυμα για να προσλάβει θερμότητα. Καθώς το τελευταίο ψύχεται, επανακρυσταλλώνεται και αποδίδει την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια.

Σε περίπτωση που το PCM είναι οργανικό η διαφορά της διαδικασίας έγκειται στο ότι η φόρτιση και η αποφόρτιση του πραγματοποιείται με την τήξη και την στερεοποίησή του αντίστοιχα. Τα οργανικά υλικά αλλαγής φάσης είναι προτιμότερα

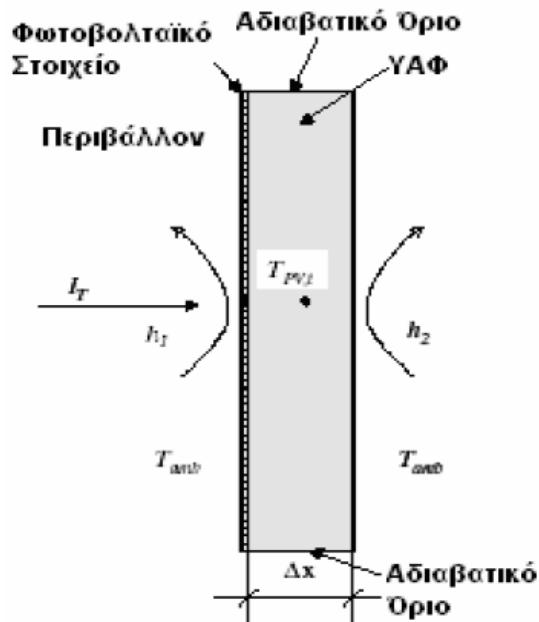


όταν στο σύστημα υπάρχουν μικρές θερμοκρασιακές διαφορές και μικρός αποθηκευτικός όγκος.

Ένα σύστημα με PCM προσφέρει μικρότερο όγκο και μεγαλύτερη αποδοτικότητα από ένα παραδοσιακό ηλιακό σύστημα νερού εξαιτίας της μικρότερης θερμοκρασιακής διαφοράς κατά την φόρτιση και αποφόρτιση του.[44],[45],[46]

### 8.9. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΜΕ PCM

Κατά την μετατροπή της ηλιακής ενέργεια σε ηλεκτρική, με χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων, έχουν παρατηρηθεί αρκετές απώλειες εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών στα κτίρια. Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει σχεδιαστεί για να εργάζεται σε συγκεκριμένες συνθήκες. Μια χαρακτηριστική τιμή της θερμοκρασίας είναι οι 25°C. Όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στοιχείου υπερβεί την τιμή αυτή, τότε η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μειώνεται σε ποσοστό 0,5%. Για να αντιμετωπίσει το συγκεκριμένο πρόβλημα προτάθηκε η εισαγωγή PCM στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το PCM τοποθετημένο σε αδιαβατικό προς το περιβάλλον πλαίσιο, απορροφά την εξέχουσα θερμότητα, διατηρώντας σταθερή την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου με αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.[47]



Γραφική απεικόνιση φωτοβολταϊκού πλαισίου με PCM

### **8.10. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ PCM**

Τα συμβατικά συστήματα κλιματισμού λειτουργούν στο μέγιστο φορτίο, γεγονός που αναδεικνύει την υπερδιαστασιολόγηση των συστημάτων αυτών. Δηλαδή, τα συστήματα κλιματισμού καλύπτουν τις μέγιστες απαιτήσεις για ψύξη κατά την διάρκεια της μέρας, ενώ κατά την διάρκεια της νύχτα παραμένουν απενεργοποιημένα.

Οι βιομηχανικές ψυκτικές εγκαταστάσεις διαστασιολογούνται προκειμένου να καλύπτουν την μέγιστη στιγμιαία ζήτηση ψύξεως η οποία εμφανίζεται μόνο λίγες μέρες το χρόνο. Αυτού του είδους τα συστήματα ψύξης παρέχουν ψύξη σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, από τις οποίες αρκετές απαιτούν μεγάλα ψυκτικά φορτία σε μικρό χρονικό διάστημα. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν εισάγοντας PCM. Σύμφωνα με έρευνες ένα τέτοιο σύστημα ψύξης είναι ικανό να μειώσει το μέγιστο φορτίο, δηλαδή το φορτίο σύμφωνα με το οποίο γίνεται η διαστασιολόγηση της εγκατάστασης, μέχρι και 70%, μειώνοντας έτσι και το κόστος εγκατάστασης. [48],[49]

### **8.11. ΧΡΗΣΗ PCM ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ**

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών συσκευών βρίσκεται σε μία συνεχόμενη ανάπτυξη. Η ολοένα και αυξανόμενη εξέλιξη τους οδηγεί σε μικρότερες, και συνεπώς μεγαλύτερης ισχύος συσκευές με μεγαλύτερες θερμικές απώλειες. Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις που συναντά το ρεύμα καθώς διαπερνά καλώδια, τα επίπεδα πυριτίου, τα transistors των επιμέρους ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, αυξάνουν την θερμοκρασία του με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος φθοράς.

Υπάρχει συνεπώς ανάγκη εύρεσης τρόπου διατήρησης της θερμοκρασίας των εξαρτημάτων μέσα στα επιτρεπόμενα όρια, που είναι συνήθως μέχρι 50° C, χωρίς παράλληλη αύξηση του μεγέθους των συσκευών. Σήμερα χρησιμοποιούνται συνήθως μεταλλικά πτερύγια για την απαγωγή θερμότητας από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Η χρήση PCM σε αυτά τα συστήματα για την απομάκρυνση των σημείων αιχμής που παρουσιάζει η χρονική κατανομή της θερμοκρασίας του εξαρτήματος, είναι απολύτως αξιόπιστη, αφού το PCM ανανεώνεται από μόνο του και επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων αιχμής της θερμοκρασίας και συνεπώς δεν είναι απαραίτητος κανενός είδους κινητήρας ή διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας. Για να μπορέσουν να εισαχθούν τα PCM με

επιτυχία στις ηλεκτρονικές εφαρμογές πρέπει θεωρητικά να μην βρεθούν στη φάση της αποφόρτισης, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση.

Για παράδειγμα, στου φορητούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές για την αποφυγή της υπερθέρμανσης τοποθετήθηκε μια μικρή αλουμινένια πλάκα η οποία φέρει τέσσερις κοιλότητες με PCM. Επάνω στην πλάκα τοποθετείται μια λεπτή στρώση αλουμινίου, επάνω στην οποία έχουν τοποθετηθεί τέσσερις θερμαντήρες μέγιστης ισχύος 30W ο καθένας. Η στρώση αλουμινίου αποτελεί καλό αγωγό θερμότητας και τοποθετείται στην πλάκα με τέτοιο τρόπο ώστε ο κάθε θερμαντήρας να βρίσκεται πάνω από μία κοιλότητα PCM. Ως υλικό αλλαγής φάσης χρησιμοποιήθηκε το εικοσάνιο με σημείο τήξης  $35,6^{\circ}\text{C}$ .

Έπειτα από πειράματα που έγιναν σχετικά με την χρήση ή όχι PCM σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα κατέληξαν ότι με την σωστή επιλογή υλικού είναι εφικτό να διατηρηθεί η θερμοκρασία εντός των επιτρεπτών ορίων.

Τα πλεονεκτήματα με την χρήση είναι:

- Αύξηση του χρονικού διαστήματος πρώτης εκκίνησης του ανεμιστήρα και συγκεκριμένα από τα 20 λεπτά περίπου στις 4 ώρες
- 25% μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του υπολογιστή
- Αύξηση της ζωής του επεξεργαστή και των επιδόσεων του λόγω ελάττωσης της μέσης θερμοκρασίας λειτουργίας.

Μία άλλη εφαρμογή των υλικών αυτών εμφανίζεται στις τηλεπικοινωνίες και συγκεκριμένα προκειμένου να διατηρηθεί η επιθυμητή θερμοκρασία του πομποδέκτη βάσης. Ο πομποδέκτης βάσης είναι το κομμάτι εκείνο του κλασικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας το οποίο διαχειρίζεται την κίνηση, το σήμα του δικτύου, καθώς επίσης εκτελεί και εργασίες όπως η αποκωδικοποίηση των συνομιλιών, ο διαχωρισμός των καναλιών, κ.α. Ο πομποδέκτης βάσης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στη θερμότητα και πρέπει να διατηρείται διαρκώς σε θερμοκρασία κάτω των  $35^{\circ}\text{C}$ . Τα PCM σε αυτή την περίπτωση απορροφούν θερμότητα από το εσωτερικό του θαλάμου που παράγεται από την λειτουργία του πομποδέκτη βάσης ελαχιστοποιώντας ή ακόμα εξαλείφοντας την ανάγκη χρήσης γεννήτριας για κλιματισμό έχοντας μικρότερο κόστος αφού δεν χρησιμοποιούνται συμβατικά καύσιμα για την γεννήτρια. Το PCM θα επαναφορτιστεί οπότε είναι διαθέσιμη η πηγή ενέργειας, οπότε θα δουλεύει το κανονικό σύστημα κλιματισμού, όπου και θα αποβάλλει την αποθηκευμένη ενέργεια.

Τα περισσότερα από αυτά τα προϊόντα που διατίθεται στο εμπόριο, και τα οποία θυμίζουν δεσμίδες με μικρά αυτοκόλλητα χαρτιά, έρχονται σε άμεση επαφή με το εξάρτημα στο οποίο προορίζονται. [50],[51],[52],[53]

### **8.12. ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ PCM**

Η μεταφορά προϊόντων σε συγκεκριμένα και στενά θερμοκρασιακά πλαίσια απαιτείται σε προϊόντα τα οποία είναι ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Τέτοια προϊόντα είναι το συσκευασίες που μεταφέρουν αίμα, φάρμακα κ.α. Το τεράστιο πλεονέκτημα των PCM είναι ότι μπορούν να απορροφήσουν ή να απελευθερώσουν μεγάλα ποσά θερμότητας ισοθερμοκρασιακά. Ένα ακόμα θετικό στοιχείο είναι ότι το PCM παρέχει δυνατότητα φόρτισης καταναλώνοντας ενέργεια μη αιχμής, που είναι φθηνότερη. Βέβαια ή χρήση τους επηρεάζει το συνολικό κόστος μεταφοράς, το οποίο είτε έχει να κάνει με την διατήρηση της θερμοκρασίας.

Σε γενικές γραμμές πριν από την μεταφορά φορτίζονται τα PCM είτε σε ψυγείο είτε σε φούρνο ώστε να είναι έτοιμα για μετέπειτα χρήση.

Σε εφαρμογές μεταφορά τροφίμων έχει χρησιμοποιηθεί ως PCM μοριακό μίγμα αλκανίων. Αυτού του είδους τα υλικά έχουν το πλεονέκτημα ότι οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με επιλογή κατάλληλων συστατικών. Το αποτέλεσμα της χρήσης κατέληξε σε πολύ καλύτερους χρόνους ανόδου της θερμοκρασίας σε σύγκριση με τον παραδοσιακό τρόπο.

Όσον αφορά τις μεταφορές αίματος χρησιμοποιείται πάλι μίγμα αλκανίων. Το αίμα πρέπει να βρίσκεται στους  $4^{\circ}\text{C}$  με απόκλιση  $2^{\circ}\text{C}$ . Συνεπώς το PCM πρέπει να έχει σημείο τήξης  $4-8^{\circ}\text{C}$ . Η διάταξη περιλαμβάνει μία σακούλα με διπλό τοίχωμα που περιβάλλει τη σακούλα που περιλαμβάνει το αίμα και τοποθετούνται μέσα σε ειδικό κουτί για μεταφορά. Παρατηρήθηκε ότι η συσκευασία με PCM δύναται να διατηρήσει το αίμα κάτω από τους  $10^{\circ}\text{C}$  για τουλάχιστον 10 ώρες, πράγμα που αντιστοιχεί σε 8 φορές περισσότερο χρόνο από τον παραδοσιακό τρόπο μεταφοράς.

Η μεταφορά ζεστών ροφημάτων με PCM είναι μία ιδανική λύση, αφού επιτρέπεται η κατασκευή ενός αυτό-θερμαινόμενου σκεύους μεταφοράς κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες.

Η κατασκευή δοχείων μεταφοράς προβλέπει την προθέρμανση των πλακών που περιέχουν τα PCM σε ένα κοινό φούρνο ή μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων. Μόλις φορτιστούν οι πλάκες τοποθετούνται σε θερμικά μονωμένα δοχεία σαν εσωτερική επένδυση.

Η μεταφορά κρύων προϊόντων επιτυγχάνεται με τον ίδιο τρόπο, με διαφορά την αλλαγή του υλικού, η οποία να συνάδει με την ζητούμενο θερμοκρασιακό εύρος και τον τρόπο φόρτισης του, συνήθως κάποιο ψυγείο.

Τα εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα μεταφοράς είναι εφοδιασμένα με εγκοπές, τα οποία εκτός από την ευελιξία και την ευκολία στον τομέα της συναρμολόγησης του κιβωτίου μεταφοράς, προσφέρουν και αεροστεγή, όσον είναι δυνατόν, μεταφορά αγαθών, ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο τις θερμικές απώλειες. Επιπλέον προσφέρονται και έτοιμα κιβώτια ενισχυμένα με PCM για την μεταφορά οποιουδήποτε μεγάλου όγκου προϊόντων για την κάλυψη οποιονδήποτε αναγκών.[54],[55]

### **8.13. ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΔΥΣΗ ΜΕ PCM**

Τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται και σε ρουχισμό, συνήθως για ενδύματα επιβίωσης, όπως ενδύματα για ορειβάτες, πυροσβέστες, αστροναύτες κ.α. Η χρήση του ξεκίνησε από διαστημικές εφαρμογές στις στολές των αστροναυτών, προκειμένου να προστατευτούν από απότομες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Στις μέρες μας έχει επεκταθεί η χρήση τους και σε υφάσματα γενικότερα. Χρησιμοποιούνται σε στολές που εκτίθενται σε μεγάλη θερμοκρασία αλλά και σε υφάσματα όπως, κουβέρτες, κάλτσες, παπούτσια, κ.α. η εισαγωγή τους στα ρούχα σκοπό έχει την εξασφάλιση θερμικής άνεσης, ομοιόμορφα κατανεμημένης και λιγότερου ιδρώτα. Τα PCM που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι οργανικής φύσεως υλικά τοποθετημένα σε μικροκάψουλες για να αποφευχθούν οι διαρροές κατά την υγρή φάση. Η εισαγωγή τους στις υφασμάτινες ίνες, ή στα στρώματα των ενδυμάτων, μπορούν να ελαττώσουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και να αυξήσουν περίπου 10 φορές τη θερμοχωρητικότητα του ενδύματος. Εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας των PCM αλλά και του αντίστοιχου κόστους τους χρησιμοποιείται PCM κατά 20-35% του ολικού βάρους του ενδύματος.

Η αρχή λειτουργίας του είναι η εξής: Για θερμοκρασίες μικρότερες από το σημείο τήξης του, το υλικό βρίσκεται στη στερεή φάση, αν και εξαιτίας της θερμοκρασίας του σώματος στους 36° C προσφέρεται ένα ποσό θερμότητας στο PCM το οποίο μπορεί να επανακτήσει αν μειωθεί η θερμοκρασία του. Σε περίπτωση που η θερμοκρασία τείνει να αυξηθεί απορροφάται θερμότητα από το PCM για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του ανθρώπινου σώματος. Εξαιτίας αυτή της απορρόφησης το υλικό αλλάζει φάση αποθηκεύοντας θερμότητα ανάλογα με την θερμοκρασία του σώματος.

Η θερμότητα διατηρείται έως ότου έρθει η ώρα να απελευθερωθεί σταδιακά δημιουργώντας ένα ομοιόμορφο θερμομονωτικό στρώμα σταθερής θερμοκρασίας μεταξύ του δέρματος και του περιβάλλοντος.[56]

#### **8.14. ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕ PCM**

Η εφαρμογή των PCM σε οχήματα , σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει σε αυτόν τον τομέα, έχουν επιφέρει εντυπωσιακά αποτελέσματα. Χρησιμοποιούνται για αποφυγή της υπερθέρμανσης της μηχανής εσωτερικής καύσης και την προθέρμανση της πριν την ανάφλεξη. Υπάρχουν δύο αξιοσημείωτα παραδείγματα εφαρμογής.

Στην πρώτη, το PCM τοποθετείται μέσα σε λεπτούς σωλήνες, όπου αυτοί με την σειρά τους τοποθετούνται σε ένα μεγάλο κύλινδρο, ο οποίος ενώνεται με το ψυγείο του αυτοκινήτου και αποθηκεύει την πλεονάζουσα θερμότητα όταν ο κινητήρας λειτουργεί στα θερμοκρασιακά του όρια. Μ' αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η υπερθέρμανση της μηχανής. Όταν η σταματήσει η λειτουργία της μηχανής, τότε τα PCM απελευθερώνουν την θερμότητα που έχουν αποθηκεύσει, διατηρώντας την μηχανή ζεστή ώστε να είναι ευκολότερη η εκκίνησή της την επόμενη φορά. Με αυτό τον τρόπο βελτιώνεται ο συνολικό συντελεστής κατανάλωσης καυσίμου και η θερμική άνεση της καμπίνα του αυτοκινήτου. Μια μπαταρία λανθάνουσας θερμότητας, που ακολουθεί σαν αρχή λειτουργία την παραπάνω διαδικασία προσφέρεται από την BMW . Ενδεικτικά, αξίζει να αναφερθεί ότι εξαιτίας της μόνωσης της μπαταρίας μπορεί να διατηρεί την αποθηκευμένη ενέργεια με το όχημα σταματημένο στους  $-20^{\circ}\text{C}$  για 48 ώρες.

Η δεύτερη εφαρμογή εφαρμόζεται στο σύστημα εξαγωγής των αυτοκινήτων και συγκεκριμένα στον καταλύτη, σκοπός του οποίου είναι η εξάλειψη των υδρογονάνθρακων και των υπόλοιπων ρύπων από τα καυσαέρια του αυτοκινήτου. Για να μπορέσει ο καταλύτης να λειτουργήσει πρέπει η θερμοκρασία του να είναι γύρω στους  $300^{\circ}\text{C}$ , θερμοκρασία η οποία επιτυγχάνεται μετά από λίγα λεπτά από την εκκίνηση του οχήματος. Σύμφωνα με έρευνες έχει παρατηρηθεί ότι κατά την κρύα εκκίνηση εκπέμπονται το 60-80% των τοξικών καυσαερίων. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος χρησιμοποιούνται υλικά αλλαγής φάσης προκειμένου να αποθηκεύσουν ενέργεια κατά την εκκίνηση και να την απελευθερώσουν στην επόμενη εκκίνηση. Μαζί με το PCM τοποθετείται και μόνωση προκειμένου εμποδιστούν οι απώλειες θερμότητας και η υπερθέρμανση του συστήματος. Σε αυτοκίνητα, που εφαρμόστηκε η παραπάνω διαδικασία, και τα οποία τέθηκαν σε

λειτουργία μετά από 24 ώρες από την προηγούμενη εκκίνηση τους, διαπιστώθηκε ότι οι εκπομπές υδρογονανθράκων και μονοξειδίου του άνθρακα ήταν μειωμένες κατά 84% και 91% αντίστοιχα σε σχέση με τον συμβατικό καταλύτη. [57],[58],[59]

## **9. ΗΛΙΑΚΟΣ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΑΣ ΜΕ PCM (ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ)**

### **9.1. ΓΕΝΙΚΑ**

Η αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική χρήση της ενέργειας εξαιτίας της αστάθειας των χαρακτηριστικών της κατά την διάρκεια της ημέρας και της απουσίας της κατά την διάρκεια της νύχτας. Συνήθως η διαθέσιμη θερμότητα αποθηκεύεται με την μορφή αισθητής θερμότητας και στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιείται νερό σαν αποθηκευτικό μέσο. Τα τελευταία χρόνια, η αποθήκευση ενέργειας με την μορφή λανθάνουσας θερμότητας αποτελεί μια καινούργια και αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Έχει αποδειχθεί ότι για την ανάπτυξη τέτοιου είδους συστημάτων καθοριστικό ρόλο στο μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας παίζει η κατάλληλη επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης.

Μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές των συστημάτων λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας είναι η θέρμανση νερού με την βοήθεια υλικών αλλαγής φάσης. Επιλέγοντας ένα κατάλληλο υλικό για την απορρόφηση λανθάνουσας θερμότητας, μεγάλο μέρος αυτής της ενέργειας αποθηκεύεται κατά την διάρκεια της μέρας, το οποίο είναι ικανό να καλύψει τις ανάγκες ζεστού νερού κατά την διάρκεια της νύχτας.

Ένας τέτοιου τύπου ηλιακός θερμοσίφωνας αποτελείται από έναν ή περισσότερους συλλέκτες συνδεδεμένους με μία δεξαμενή λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας η οποία περιλαμβάνει PCM, και από ένα υλικό μεταφοράς θερμότητας το οποίο κυκλοφορεί στους συλλέκτες απορροφά μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας και μεταφέρει την θερμότητα στο PCM κατά την διάρκεια της φόρτισης.

Η λειτουργία του συστήματος που περιλαμβάνει τα PCM, διαφέρει από τις συνήθεις ηλιακές εφαρμογές, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μόνο στο δοχείο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Στις ηλιακές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται σήμερα περισσότερο τα ένυδρα άλατα.

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος, στηρίζεται στη θέρμανση του εργαζόμενου μέσου (το οποίο μπορεί να είναι υγρή σιλικόνη ή ορυκτέλαιο σε κλειστού τύπου συστήματα ή νερό σε ανοιχτού τύπου) από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που παίρνει ο συλλέκτης. Το εργαζόμενο μέσο, αφού θερμανθεί, οδηγείται εξαιτίας

της άνωσης στο δοχείο θερμικής αποθήκευσης, όπου είναι τοποθετημένο και το PCM και του μεταφέρει τη θερμότητα. Αυτό απορροφά την θερμότητα και όταν φτάσει στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης τήκεται και αποθηκεύει τη λανθάνουσα θερμότητα (διαδικασία φόρτισης). Για την ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας, το εργαζόμενο μέσο οδηγείται στον εναλλάκτη, όπου μεταφέρει θερμότητα στο νερό, για την απαιτούμενη θέρμανση του νερού. Όταν η θερμοκρασία του νερού μέσα στη δεξαμενή αρχίζει να πέφτει τότε το εργαζόμενο μέσο ψύχεται στον εναλλάκτη και μαζί με αυτό ψύχεται και το PCM. Κατά την διαδικασία αυτή το PCM απελευθερώνει την αποθηκευμένη ενέργεια του και πήζει (διαδικασία αποφόρτισης).

Ένα σύστημα βασισμένο σε PCM προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα. Μικρότερο όγκο σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα νερού και μεγαλύτερη αποδοτικότητα χάρη στην μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης της ενέργειας. Συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορούν επίσης να συνδυαστούν με συμβατικά συστήματα θέρμανσης. Ένα «ενισχυμένο» με ΥΑΦ σύστημα ζεστού νερού, παρέχει καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας του νερού.[60]

## **9.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες άρχισαν να αναπτύσσονται επειδή είναι φθηνοί και απλοί στην κατασκευή και στη συντήρηση. Τα τελευταία χρόνια όμως μελετάται η χρήση ηλιακών θερμοσιφώνων με PCM εξαιτίας της ανάγκης για ενεργειακή αποθήκευση και των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν τα PCM. Τα PCM όπως τα ένυδρα άλατα, οι παραφίνες και τα λιπαρά οξέα χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών για ηλιακή αποθήκευση. Οι παραφίνες είναι εμπορικά διαθέσιμες, φθηνές και έχουν ευρύ φάσμα θερμοκρασιών αλλαγής φάσης ανάλογα με το μήκος της ανθρακικής τους αλυσίδας. Τα λιπαρά οξέα βρίσκονται σε υποπροϊόντα κρέατος και λαχανικών και είναι φθηνά, ανανεώσιμα και εμπορικά διαθέσιμα. Τα λιπαρά οξέα όπως και οι παραφίνες έχουν διαφορετικά σημεία τήξης.

Τα λανθάνοντα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας άρχισαν να μελετώνται μόνο τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Διάφορες μελέτες πραγματοποιήθηκαν τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο για την απόδοση αυτών των συστημάτων με την βοήθεια των PCMs, τα οποία βρίσκονται σε διάφορες γεωμετρίες.

Παρακάτω παρατίθεται η ερευνητική δραστηριότητα που πραγματοποιήθηκε στο τομέα θέρμανσης νερού στο πέρασμα των χρόνων:



Το **1983** ο Bhargava εκμεταλλευόμενος το PCM σε έναν ηλιακό θερμοσίφωνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αποτελεσματικότητα του συστήματος και η θερμοκρασία εξόδου του νερού κατά την νύχτα αυξάνεται με την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας της στερεής και της υγρής φάσης του υλικού.

Το **1985** ο Prakash και άλλοι ερευνητές σχεδίασαν ένα σύστημα αποθήκευσης με ένα στρώμα πάχους από PCM στο πάτο του. Το σύστημα αυτό, κατά την διάρκεια της μέρας ζεσταίνει το νερό το οποίο με την σειρά του μετέφερε τη θερμότητα στο PCM. Αυτό τηκόταν και αποθήκευε την θερμότητα ως λανθάνουσα θερμότητα. Κατά την διάρκεια της νύχτα, όπου πλέον το ζεστό νερό είχε αντικατασταθεί από κρύο, το νερό κέρδιζε την θερμότητα από την αλλαγή φάσης του PCM από την υγρή στη στερεή κατάσταση. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αυτό το σύστημα δεν είναι αποτελεσματικό εξαιτίας της μικρή μεταφοράς θερμότητας.

Το **1986** οι Galenen and Vanden μελέτησαν και αυτοί την παραφίνη σαν υλικό αποθήκευσης ενέργειας για ζεστό νερό οικιακής χρήσης ενώ ο Lane το **1989** μελέτησε αντίστοιχα το  $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , με σημείο τήξης  $95^\circ \text{C}$ .

Το **1987** ο Boy και άλλοι ερευνητές πρότειναν ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλέκτη-αποθήκης θερμότητας (συσκευές ICS), το οποίο βασιζόταν σε ένυδρα άλατα ως PCMs για συνεχόμενη εφαρμογή ζεστού νερού. Υποστήριζαν ότι η θερμική απόδοση τέτοιων συστημάτων μπορεί να βελτιωθεί αποτελεσματικά με τη βοήθεια κατάλληλης συσκευής PCM. Ωστόσο, στο σύστημα που δημιούργησαν το PCM ήταν συσκευασμένο σε αυλακωιδή εναλλάκτη θερμότητας με πτερύγια (corrugated fin heat exchanger), ο οποίος αύξησε το κόστος του συστήματος.

Το **1988** ο Tiwari και άλλοι συνεργάτες παρουσίασαν μία ανάλυση ενός συστήματος αποθήκευσης ηλιακού θερμοσίφωνα με PCM ενσωματώνοντας την επίδραση της ροής του νερού μέσω μιας παράλληλης επιφάνειας που τοποθετήθηκε στη θέση διεπιφάνειας. Προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες κατά την νύχτα από την εκτεθειμένη επιφάνεια, κατασκευάστηκε διάταξη που κάλυπτε το σύστημα με κινητή μόνωση. Κατέληξαν στα συμπεράσματα ότι το ζεστό νερό θερμοκρασίας  $15\text{-}20^\circ \text{C}$  περισσότερο από την θερμοκρασία περιβάλλοντος διατηρείται όλο το 24ωρο, και ότι οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του νερού μειώνονται με την αύξηση της περιοχής τήξης του PCM.

Το **1989** ο Ghoneim έκανε σύγκριση μεταξύ διαφορετικών διαστάσεων δεξαμενών σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας και συστημάτων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας σε δεξαμενή νερού με διαφορετικά επίπεδα

διαστρωμάτωσης. Η δεξαμενή αποθήκευσης περιλάμβανε κυλινδρικούς σωλήνες με PCM περιτριγυρισμένους από μέσο μεταφοράς θερμότητας.

Το **1992** οι Bansal και Buddhi μελέτησαν αναλυτικά ένα κυλινδρικό σύστημα λανθάνουσας θερμότητας το οποίο ήταν σε κλειστό κύκλωμα με ένα επίπεδο συλλέκτη και ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο για το σύστημα αυτό. Οι υπολογισμοί για την θέση διεπιφάνειας κινητών ορίων και για την θερμοκρασία του ρευστού έγιναν χρησιμοποιώντας σαν PCM's εμπορική παραφίνη και στεαρικό οξύ.

Το **1993** ο Tayeb και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν ένα σύστημα για τις ανάγκες ζεστού νερού οικιακής χρήσης χρησιμοποιώντας  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  σαν PCM και συγκρίνοντας το με το μοντέλο προσομοίωσης που δίνει την ιδανική ροή του εισαγόμενου νερού απαιτώντας να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία του νερού στην έξοδο.

Το **1994** ο Font και οι συνεργάτες του έκαναν μια προμελέτη για την σχεδίαση μια συσκευής για ζεστό νερό οικιακής χρήσης χρησιμοποιώντας σαν PCM στέρεο υλικό το οποίο μετατρέπεται πάλι σε στέρεο άλλης μορφής. Η υπολογιστική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε σε μη γραμμικό μοντέλο και κατόπιν συγκρίθηκε με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η συμφωνία των αποτελεσμάτων απέδειξε ότι το μοντέλο ήταν ικανό να μελετηθεί ως προς τη μεταφορά θερμότητας προκειμένου να βελτιστοποιήσουν την συσκευή.

Το **1994** ο Hassan και άλλοι ερευνητές ερεύνησαν λιπαρά οξέα σαν PCM's για να καλύψουν τις απαιτήσεις ζεστού νερού και συγκεκριμένα πρότειναν τα μυριστικά, παλμιτικά και στεαρικά οξέα, με σημεία τήξης 50-70°C. Κατέληξαν ότι μετά από 450 κύκλους φόρτισης/ αποφόρτισης άρχισε να παρατηρείται μείωση της λανθάνουσα θερμότητας.

Το **1995** ο Kaygusuz πραγματοποίησε μια πειραματική και θεωρητική μελέτη προκειμένου να καθορίσει την απόδοση των PCM's στους ηλιακούς θερμοσίφωνες χρησιμοποιώντας  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$  ως PCM. Επιπλέον σύγκριναν την απόδοση των συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας που βασίζονται σε PCM, νερό και πέτρα. Μετά την συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας, αυτή μεταφέρεται στη δεξαμενή αποθήκευσης η οποία είναι γεμισμένη με 1500kg συσκευασμένα PCM. Αποτελείται από μία δεξαμενή τοποθετημένη σε οριζόντια κατεύθυνση με τους κυλινδρικούς σωλήνες. Το PCM βρίσκεται μέσα στους σωλήνες οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από πλαστικό PVC ενώ το νερό ρέει παράλληλα σε αυτούς.

Το **1995** ο Rabin και οι συνεργάτες του σχεδίασαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής θερμότητας το οποίο βασιζόταν σε ένυδρα άλατα. Συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν ένα εύτηκτο μίγμα ένυδρων αλάτων (48%  $\text{CaCl}_2$ , 4.5%  $\text{KCl}$ , 0.4%  $\text{NaCl}$  and 47.1%  $\text{H}_2\text{O}$  με ένα παράγοντα πυρήνων  $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  σε ποσοστό 1% κατά βάρος, θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης 27-29° C και λανθάνουσα θερμότητα 164 kJ kg<sup>-1</sup>). Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το στρώμα πάχους του PCM έπαιζε κύριο ρόλο στην απόσταση διάδοσης της στερεής επιφάνειας από την θέση διεπιφάνειας και μικρότερο ρόλο στην απόσταση διάδοσης της υγρής επιφάνειας.

Το **1999** ο Bajnoczy μελέτησε ένα διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας για τα θερμοκρασιακά εύρη 60-30° C και 30-20° C βασιζόμενα σε  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  και  $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Επιπλέον μελέτησε αλλαγές θερμοχωρητικότητας κατά την διάρκεια των κύκλων και την πιθανή χρήση του στα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού οικιακής χρήσης.

Το **2000** ο Chaurasia πραγματοποίησε μια παρόμοια μελέτη με αυτή των Bansal και Buddhi (1992) προκειμένου να εμποδιστεί η αποφυγή θερμότητας κατά την διάρκεια της νύχτας βασιζόμενη στην αισθητή και λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας. Χρησιμοποίησε δύο ιδανικές μονάδες αποθήκευσης. Στη μία χρησιμοποιήθηκαν 17,5kg εμπορικής παραφίνης συσκευασμένης σε εναλλάκτη θερμότητας από σωλήνα αλουμινίου ενώ η άλλη περιλάμβανε μόνο το νερό σε μια γαλβανισμένη δεξαμενή. Και οι δύο οι μονάδες κατά την διάρκεια της μέρας απορροφούσαν την ηλιακή ακτινοβολία με την βοήθεια επίπεδων συλλεκτών οι οποίοι είχαν την ίδια επιφάνεια απορρόφησης. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το πρώτο σύστημα απέδιδε περισσότερο ζεστό νερό κατά την διάρκεια της επόμενης μέρα απ' ότι το δεύτερο.

Το **2001** ο Kumar σχεδίασε, ανέπτυξε και αποτίμησε την απόδοση ενός συστήματος λανθάνουσας θερμότητας για να καλύψει τις απαιτήσεις ζεστού νερού τόσο το πρωί όσο και το βράδυ, χρησιμοποιώντας ένα ξύλινο ηλιακό συλλέκτη. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τρεις πτερυγωτούς εναλλάκτες θερμότητας και έχει υλικό αλλαγής φάσης την εμπορική παραφίνη, με σημείο τήξης 54°C. Εφαρμόστηκε για 15 και 20 λίτρα νερού. Μετά το πείραμα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η απόδοση του συστήματος αυτού ήταν πολύ καλή για το ζητούμενο θερμοκρασιακό εύρος.

Το **2002** ο Kurklu και οι συνεργάτες του σχεδίασαν, ανέπτυξαν και εκτίμησαν την θερμική απόδοση ενός καινούργιου τύπου συλλέκτη με νερό και PCM. Ο συλλέκτης

αυτός αποτελείται από δύο εφαπτόμενα τμήματα. Το ένα είναι γεμισμένο με νερό ενώ το άλλο με παραφίνη με θερμοκρασία τήξης 50° C. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία του νερού κατά την διάρκεια μιας τυπικής μέρας με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία ξεπερνούσε τους 55°C ενώ κατά την διάρκεια της νύχτας διατηρούνταν πάνω από τους 30°C. Αυτός ο συλλέκτης είχε πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με του παραδοσιακούς συλλέκτες στη Τουρκία αναφορικά με το βάρος, το κόστος και τις εφαρμογές ενεργειακής αποθήκευσης.

Το **2003** ο Baran και ο Sari απέδειξαν ότι το μίγμα παλμικού και στεαρικού οξέος, με κατά βάρος σύσταση 64,2 % και 35,8% αντίστοιχα, θερμοκρασία τήξης 52,3°C και λανθάνουσα θερμότητα 182 kJ kg<sup>-1</sup>, είναι κατάλληλο για θέρμανση νερού.

Το **2005** ο Canbazoglu και οι συνεργάτες του σύγκριναν ένα ηλιακό θερμοσίφωνα με PCM με ένα συμβατικό. Μπουκάλια πολυεθυλενίου ήταν γεμισμένα με 180kg PCM και τοποθετημένα μέσα στη δεξαμενή σε τρεις σειρές. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία κατά την διάρκεια της νύχτας, εάν το νερό δεν καταναλώνεται έχει σταθερή τιμή 46 °C. Η διαφορά θερμοκρασίας στο μέσο της δεξαμενής αποθήκευσης και στην έξοδο του συλλέκτη είναι μεγαλύτερη στο ηλιακό θερμοσίφωνα με το PCM (περίπου 6 °C). Αυτό δείχνει την υψηλή αποθηκευτική ικανότητα που παρουσιάζει κατά την διάρκεια του Νοεμβρίου ο ηλιακός θερμοσίφοντας με PCM. Αποδείχθηκε ότι η χρόνος που απαιτείται για την αποθήκευση, η μάζα του ζεστού νερού που παράγεται και η συνολική θερμότητα είναι 2,59-3,45 φορές μεγαλύτερη από τον συμβατικό ηλιακό θερμοσίφωνα.

Το **2006** ο Shukla σχεδίασε δύο ηλιακούς συλλέκτες με παραφίνη σαν υλικό αποθήκευσης. Το ένα σύστημα περιλαμβάνει μία δεξαμενή μέσα σε μία άλλη ενώ το δεύτερο είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα αποθήκευσης με την χρήση ανακλαστήρα. Και τα δύο συστήματα ήταν ικανά να καλύψουν τις ανάγκες ζεστού νερού σε 24ωρη βάση και ήταν 45% και 60% αποτελεσματικά αντίστοιχα.

Το **2006** ο Mettawee και ο Assassa μελέτησαν την θερμική απόδοση ενός συμπαγούς συλλέκτη με PCM. Σ' αυτό το συλλέκτη επιτυγχάνεται τόσο την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας όσο και την αποθήκευση στο PCM. Σαν PCM χρησιμοποιήθηκε παραφίνη η οποία κατά την αποφόρτιση της ζεσταίνει το κρύο νερό που ρέει στους σωλήνες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι μέσα στην παραφίνη. Μελετήθηκε για διαφορετικές παροχές μάζας που κυμαίνονται από 8,3-21,7kg/h. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι κατά την φόρτιση, η αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας αυξάνει απότομα με την αύξηση του τηγμένου πάχους του

PCM, αφού αυξάνει η φυσική μεταφορά θερμότητας με αγωγή. Κατά την αποφόρτιση, η ωφέλιμη ενέργεια αποδείχθηκε ότι αυξάνεται με την αύξηση της παροχής μάζας.

Το **2006** ο Cabeza και οι συνεργάτες του κατασκεύασαν μία ηλιακή πρότυπη μονάδα στο πανεπιστήμιο της Lleida προκειμένου να μελετήσουν την συμπεριφορά του PCM σε πραγματικές συνθήκες, η οποία θα λειτουργούσε σε συνεχή βάση με ηλιακή ενέργεια ή θα μπορούσε να λειτουργήσει και με ηλεκτρική αντίσταση. Η γεωμετρία του PCM ήταν τέτοια ώστε να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους κυλίνδρους στο πάνω μέρος της δεξαμενής. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για 2,4 και 6 κυλίνδρους με PCM και σαν PCM χρησιμοποιήθηκε μία ένωση γραφίτη σε ποσοστό 10% και  $C_2H_3NaO_2 \cdot H_2O$  σε ποσοστό 90%. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ενσωμάτωση του PCM σε δεξαμενές νερού είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία καθώς παρέχεται περισσότερο ζεστό νερό για μεγάλα χρονικά διαστήματα ακόμα και χωρίς εξωτερική πηγή ενέργειας, ή χρήση μικρότερων δεξαμενών για τον ίδιο σκοπό.[60],[61]

### **9.3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΑ**

#### **9.3.1. ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ**

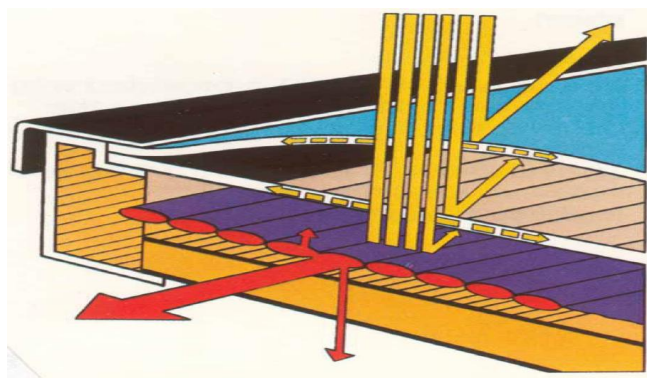
Ο ηλιακός συλλέκτης είναι ειδικής μορφής εναλλάκτης θερμότητας, που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Η ιδιορρυθμία του έγκειται κυρίως στο ότι μεταφέρει ενέργεια μορφής ακτινοβολίας από πολύ μακρινή πηγή (ήλιος) σε ένα ρευστό. Τα ιδιαίτερα προβλήματα που συναντώνται κατά την ανάλυση των ηλιακών συλλεκτών σχετίζονται με τις χαμηλές και συνεχώς μεταβαλλόμενες τιμές της προσπίπτουσας ενέργειας και τη σχετικά μεγάλη σημασία της μετάδοσης θερμότητα δι' ακτινοβολίας.

Υπάρχουν δύο είδη θερμικών ηλιακών συλλεκτών οι συγκεντρωτικοί και οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες. Από αυτούς, αυτοί που χρησιμοποιούνται για θέρμανση χώρου και ζεστού νερού χρήσης είναι οι επίπεδοι και οι συλλέκτες με σωλήνες κενού.

Για θερμοκρασίες του νερού χρήσης από 60°C ως 70°C μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλοί ή επιλεκτικοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες. Όταν απαιτούνται θερμοκρασίες της τάξης των 90°C, χρησιμοποιούνται συλλέκτες κενού. Μ' αυτό τον τρόπο, ελαχιστοποιούνται οι απώλειες προς το περιβάλλον και επιτυγχάνονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες λειτουργίας.

### 9.3.1.1. ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ (Flat Plate Solar Collectors)

Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, αν και δεν παρουσιάζει τα μονωτικά οφέλη του συγκεντρωτικού, αποτελεί τον κλασικό τύπο συλλεκτών σε πολλές χώρες. Κύριες εφαρμογές του είναι η θέρμανση νερού χρήσης και η θέρμανση κτιρίων ενώ στις δυνατές εφαρμογές συμπεριλαμβάνεται ο κλιματισμός και η παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση.



Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα, είναι ένα επίπεδο, μονωμένο, αδιάβροχο κουτί το οποίο περιέχει μια σκούρα πλάκα απορρόφησης κάτω από ένα ή περισσότερα ημιδιαφανή ή διαφανή καλύμματα. Το εργαζόμενο μέσο ή το νερό

κυκλοφορεί διαμέσου σωλήνων, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι πίσω από τον απορροφητήρα. Ο συλλέκτης αυτός είναι ακίνητος και συλλέγει την μέγιστη ακτινοβολία του ήλιου όταν τον έχει ακριβώς απέναντι του. Όλες τις άλλες φορές βλέπει τον ήλιο υπό γωνία και η ενεργή επιφάνεια είναι μικρότερη από την ολική με αποτέλεσμα το χάσιμο ενέργειας.

Η ηλιακή ακτινοβολία περνά από το κάλυμμα και προσπίπτει πάνω στον απορροφητήρα, όπου ένα μεγάλο μέρος από τη θερμότητα αυτή απορροφάται και παραλαμβάνεται από το εργαζόμενο μέσο του απορροφητήρα ενώ ένα άλλο μέρος αντανακλάται από τον απορροφητήρα στο κάλυμμα και αντίστροφα. Γενικά δημιουργούνται οι συνθήκες του γνωστού φαινομένου του “θερμοκηπίου” με αποτέλεσμα την θέρμανση του υγρού. Το εργαζόμενο μέσο του απορροφητήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ή ακόμα μπορεί να θερμαίνει άλλο ρευστό με τη βοήθεια εναλλάκτη θερμότητας (σερπαντίνας).

Όπως φαίνεται, τα κύρια μέρη ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη είναι:

- Ο απορροφητήρας, ή πλάκα απορρόφησης, που είναι μία μαύρη επιφάνεια που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. Ο απορροφητήρας είναι εφοδιασμένος με σύστημα μεταφοράς ενέργειας σε ρευστό, π.χ. σωλήνες αν πρόκειται για συλλέκτη θέρμανσης υγρού ή αεραγωγούς για θερμαντήρα αέρος. Οι απορροφητήρες γίνονται από μέταλλο (χαλκό, χάλυβα, αλουμίνιο,

επιψευδαργυρομένο χάλυβα κ.λ.π) αλλά ακόμα μπορεί να είναι και γυάλινοι ή πλαστικοί.

- Ένα ή περισσότερα διαφανή καλύμματα πάνω από τον απορροφητήρα ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες δια συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Τα καλύμματα του συλλέκτη είναι κατασκευασμένα από ηλιακό ή πλαστικό τζάμι.
- Μόνωση της πίσω και των παράπλευρων επιφανειών ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες. Συνήθως η μόνωση στο πίσω μέρος είναι ορυκτοβάμβακας, υαλοβάμβακας, πολυουρεθάνη, πολυστέριο κ.λ.π. Η πολυουρεθάνη χρησιμοποιείται με επιφύλαξη γιατί αποσυντίθεται.
- Πλαίσιο που περιβάλλει τον συλλέκτη το οποίο κατασκευάζεται από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα.

Οι επίπεδοι συλλέκτες τοποθετούνται στραμμένοι στον ισημερινό ( $\gamma=0^\circ$ ) και έχουν κλίση  $\beta$  τέτοια ώστε να μεγιστοποιείται η προσπίπτουσα ακτινοβολία κατά την περίοδο του έτους που ενδιαφέρει η χρησιμοποίηση του συλλέκτη.

Η επιλογή της κατάλληλης κλίσης του συλλέκτη επιλέγεται με κάποιον από τους παρακάτω κανόνες:

- Για μέγιστη ετήσια ενέργεια απαιτείται κλίση συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος,  $\beta=\phi$
- Για μέγιστη ενέργεια θέρους απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά  $15^\circ$  μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους,  $\beta=\phi-15^\circ$
- Για μέγιστη ενέργεια χειμώνας απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά  $15^\circ$  μεγαλύτερη του γεωγραφικού πλάτους,  $\beta=\phi+15^\circ$

Εξαιτίας της στροφής τους προς τον ισημερινό ο λόγος  $R_b$  δίνεται απο τον παρακάτω τύπο:

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

Η αποδιδόμενη θερμική ισχύ και η στιγμιαία απόδοση του συλλέκτη σε διάστημα  $\tau$  δίνεται από τους παρακάτω τύπους:

$$\begin{aligned}
 Q_u &= A_c \cdot F_R \cdot \left[ (I_T - U_L \cdot (T_{f,i} - T_a)) - m \cdot C_p \cdot (T_{f,o} - T_{f,i}) \right] \\
 &= A_c \cdot \left[ F_T (\alpha) - U_L (T_{p,m} - T_a) \right] \\
 \eta &= F_R \cdot (\alpha) - F_R \cdot U_L \frac{T_{f,i} - T_a}{G_T}
 \end{aligned}$$

Όπου

$Q_u$  είναι η ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύ σε W

$A_c$  είναι η επιφάνεια του συλλέκτη (επιφάνεια καλύμματος) σε  $m^2$

$S = (\alpha) G_T$  είναι η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή η διαφορά της προσπίπτουσας και των θερμικών απωλειών σε  $W/m^2$

$G_T$  είναι η στιγμιαία τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας σε  $W/m^2$

(τα) είναι το μέσο και το προσαυξημένο γινόμενο διαπερατότητας απορροφητικότητας

$U_L$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, που εκφράζει τις θερμικές απώλειες από το συλλέκτη στο περιβάλλον διάγωγής συναγωγής και ακτινοβολίας σε  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ .

$(T_{f,i} - T_a)$  η διαφορά της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού μείον της θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε  $^\circ C$ .

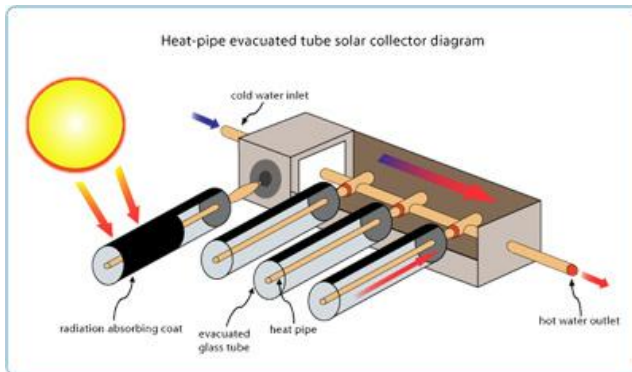
$(T_{f,o} - T_{f,i})$  η διαφορά της θερμοκρασίας εξόδου του ρευστού μείον της θερμοκρασίας εισόδου σε  $^\circ C$ .

$F_R$  είναι ο παράγων θερμικής απολαβής του συλλέκτη.

$T_{p,m}$  είναι η μέση θερμοκρασία της απορροφητικής πλάκας.[19]



### 9.3.1.2. ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΜΕ ΣΩΛΗΝΕΣ ΚΕΝΟΥ (THE EVACUATED TUBE SOLAR COLLECTOR)



Οι συλλέκτες αυτοί, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα, αποτελούνται από ένα σύστημα με αρθρωτούς σωλήνες, στο κέντρο των οποίων βρίσκεται απορροφητική επιφάνεια σε θερμική επαφή με λεπτό μεταλλικό αγωγό, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα.

Μέσα στους σωλήνες έχει δημιουργηθεί κενό αέρος μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό τις θερμικές απώλειες του συλλέκτη. Σε τέτοιους συλλέκτες ο θερμικός φορέας απαγωγής θερμότητας που δημιουργείται στην απορροφητική επιφάνεια είναι είτε νερό είτε ρευστό αλλαγής φάσης όπως αλκοόλη. Στην ίδια κατηγορία εντάσσονται οι συλλέκτες σωλήνων κενού με χρήση ανακλαστήρων για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και οι συλλέκτες κενού διπλών εξωτερικών σωλήνων για καλύτερη θερμική προστασία.

Η λειτουργία των σωληνωειδών συσσωρευτών κενού μοιάζει με αυτήν μιας φιάλης "θερμός". Οι ηλιακές ακτίνες παγιδεύονται καθώς το κενό μεταξύ των δύο τοιχωμάτων των σωλήνων λειτουργεί σα φράχτης, ώστε η θερμότητα να παραμένει στο σύστημα και να μην επιστρέφει στον αέρα.

Το μειονέκτημά τους όμως είναι ότι συγκεντρώνουν μόνο την άμεση ακτινοβολία και όχι τη διάχυτη. Επίσης χρειάζονται πολύπλοκοι μηχανισμοί που ανεβάζουν το κόστος.[62]

### 9.3.1.3. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ (CONCENTRATING SOLAR COLLECTORS)

Όταν είναι επιθυμητή η απόδοση της ενέργειας σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές που επιτυγχάνονται με τους συνήθεις επίπεδους συλλέκτες, μπορεί να γίνει χρήση των συγκεντρωτικών συλλεκτών. Σε αυτούς, οι υψηλές θερμοκρασίες αναπτύσσονται με συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μικρή επιφάνεια απορρόφησης, μειώνοντας έτσι και τις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον.

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες, που χρησιμοποιούνται για οικιακή χρήση είναι παραβολικοί και χρησιμοποιούν αντικατοπτρικές επιφάνειες προκειμένου να

συγκεντρώσουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα σωλήνα απορρόφησης που περιλαμβάνει το εργαζόμενο μέσο.

Σε αυτούς η ηλιακή ακτινοβολία, αφού περάσει από το κάλυμμα, προσπίπτει σε κοίλη κυλινδρική κατοπτρική επιφάνεια όπου ανακλάται και συγκεντρώνεται σε γραμμική εστία. Στην εστία αυτή είναι τοποθετημένος ο αγωγός του απορροφητήρα που κυκλοφορεί το ρευστό.

Στο κάτω μέρος των διάφανων σωλήνων κενού έχει τοποθετηθεί ανακλαστική κατοπτρική επιφάνεια. Έτσι σε αυτή την επιφάνεια που είναι σχετικά μικρότερη έχουμε αφ' ενός περισσότερη προσπίπτουσα ακτινοβολία αλλά και μικρότερες απώλειες προς το περιβάλλον.

Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που επιτυγχάνονται με τους συνήθεις επίπεδους συλλέκτες. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες ταξινομούνται ανάλογα με το λόγο συγκέντρωσης που επιτυγχάνεται, το είδος των ανακλαστών που χρησιμοποιούνται και το είδος εστίασης που επιτυγχάνουν (για παράδειγμα σημειακή ή γραμμική).[19]

#### **9.4. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΗ**

Μία εγκατάσταση αποθήκευσης με PCM αποτελείται από το σύστημα που περιέχει το PCM και το μέσο μεταφοράς θερμότητας. Κατά την ανάπτυξη του πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη κάποιοι παράγοντες, όπως το υλικό κατασκευής, η προστασία που παρέχει από τις αρνητικές επιδράσεις του περιβάλλοντος και ο χειρισμός.

Τα συστήματα που έχουν μελετηθεί, ελεγχθεί είναι τα εξής:

- Αποθήκευση όγκου σε δεξαμενές με εναλλάκτες θερμότητας.
- Τοποθέτηση σε μακροκάψουλες
- Τοποθέτηση σε μικροκάψουλες

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος εξαρτάται από την εφαρμογή, την ύπαρξη κατάλληλου PCM, τη μέθοδο και τις απαιτήσεις για τη μεταφορά θερμότητας, το κόστος και αρκετούς άλλους παράγοντες. Οι απαιτήσεις για ένα σύστημα το οποίο θα περιέχει το PCM είναι ποικίλες και σημαντικές.

Επομένως, το υλικό πρέπει να πληροί τα εξής:

- Να είναι συμβατό με το PCM

- Να έχει την ικανότητα να μεταφέρει θερμότητα αρκετά γρήγορα για να φορτίζει και να εκφορτίζει την εγκατάσταση αποθήκευσης θερμότητας
- Να είναι σταθερό στις ακραίες θερμοκρασίες λειτουργίας
- Να αντέχει στις τάσεις που προκύπτουν από τη μεταβολή όγκου που συνοδεύει την αλλαγή φάσης

Η πιο σημαντική ιδιότητα είναι η συμβατότητα του υλικού κατασκευής με το PCM. Ως υλικά κατασκευής χρησιμοποιούνται μέταλλα, πλαστικά, ενώ λιγότερο συχνά το τσιμέντο ή το γυαλί. Εκτός από τις παραπάνω ιδιότητες, είναι απαραίτητο το σύστημα να αντέχει στις συνήθεις για όλα τα δοχεία τάσεις κατά την αποστολή, τη μεταφορά, το χειρισμό ή τις επιδράσεις του περιβάλλοντος. Σημαντική δυσκολία των συστημάτων που περιέχουν PCM δεν είναι ο τύπος της τάσης, αλλά η διάρκειά της, καθώς τα PCM πρέπει να παραμένουν στα δοχεία για όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Παρακάτω αναλύονται οι δυνατότητες του κάθε συστήματος .

#### **9.4.1. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

Η δεξαμενή με τον εναλλάκτη θερμότητας είναι η μέθοδος που επιλέγεται συνήθως όταν το μέσο μεταφοράς είναι υγρό. Σε αυτό το σύστημα το PCM περιέχεται σε μία δεξαμενή, η οποία συγκρατεί και προστατεύει το PCM ενώ υπάρχει μία επιφάνεια η οποία διαχωρίζει το μέσο μεταφοράς θερμότητας και το PCM διαμέσου της οποίας γίνεται η εναλλαγή θερμότητας. Σε αυτού του είδους τα συστήματα είναι δυνατόν να επιτευχθούν αναλογίες όγκων PCM/νερού μεγαλύτερες από 80%. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των δεξαμενών με PCM είναι η ανάγκη για πιο μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής ή για τη βελτίωση των ιδιοτήτων μεταφοράς θερμότητας επειδή:

- Κατά το κύκλο φόρτισης/αποφόρτισης, η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας τείνει να καλυφθεί με ένα στρώμα στερεοποιημένου PCM του οποίου το πάχος μεγαλώνει καθώς ο βαθμός εκφόρτισης αυξάνει, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας.
- Ενώ τα PCM, λόγω της μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητάς τους, απαιτούν μικρότερο όγκο συστήματος για την αποθήκευση ενός συγκεκριμένου ποσού θερμότητας, ο ρυθμός μεταφοράς, ο οποίος είναι ο ίδιος, επιβάλλει την ύπαρξη μίας μεγάλης επιφάνειας συναλλαγής.

- Για την φόρτιση και την εκφόρτιση, λοιπόν, ενός συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας απαιτείται ένας κατάλληλος εναλλάκτης θερμότητας με μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής.

Γενικά, ο εναλλάκτης θερμότητας χρειάζεται να ικανοποιεί τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Θα πρέπει να εξασφαλίζει έναν υψηλό βαθμό μεταφοράς θερμότητας, έτσι ώστε να είναι εφικτή η απότομη φόρτιση και εκφόρτιση του συστήματος. Αυτή η απαίτηση εξαιτίας της μικρής θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση μεταλλικών ελασμάτων, με φυσική ή και εξαναγκασμένη κυκλοφορία του PCM ή ακόμη με την προσθήκη πτερυγίων στους σωλήνες του εναλλάκτη.
- Θα πρέπει να επιτρέπει μόνο μικρές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κατά τους κύκλους φόρτισης/αποφόρτιση, εξασφαλίζοντας μία σημαντικά μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής και μικρά αυλάκια μεταφοράς θερμότητας μέσα στο μέσο.
- Θα πρέπει να εξασφαλίζουν υψηλή θερμική διαχυτότητα.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι ο εναλλάκτης πρέπει να είναι γεωμετρικά συμμετρικός σε σχέση με τη δεξαμενή αποθήκευσης προκειμένου να μεταφέρεται θερμότητα σε όλο το όγκο του PCM.

Στα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας παρατηρούνται δύο ειδών εναλλάκτες:

- Παθητικοί εναλλάκτες οι οποίοι δε διαθέτουν κινούμενα μέρη. Αυτοί, τυπικά, περιλαμβάνουν σωλήνες μικρής διαμέτρου (30-50 mm) ή επίπεδους δίσκους (flat pans) (20-30 mm βάθος) μέσα στους οποίους βρίσκεται το PCM. Οι σωλήνες μπορούν να είναι ενισχυμένοι με μικρά πτερύγια για αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής.
- Ενεργητικοί εναλλάκτες στους οποίους υπάρχουν συστήματα για την ανάδευση του PCM βελτιώνοντας έτσι τη μεταφορά θερμότητας, αλλά παρεμποδίζοντας τον πιθανό διαχωρισμό των φάσεων. Στα ενεργητικά συστήματα συμπεριλαμβάνονται και οι εναλλάκτες με απευθείας επαφή, οι οποίοι παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της μεγάλης επιφάνειας εναλλαγής και της απουσίας εναπόθεσης στερεοποιημένου PCM κατά την αποφόρτιση της επιφάνειας του εναλλάκτη.

Οι εφαρμογές των δεξαμενών με PCM εμφανίζονται σε εγκαταστάσεις αντλιών θερμότητας με κλειστό σύστημα κυκλοφορίας νερού για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, για άλλες οικιακές χρήσεις, όπως το μαγείρεμα, σε βιομηχανικά συστήματα ανάκτησης θερμότητας, σε συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες μη αιχμής και σε μονάδες λήψης ηλιακής ακτινοβολίας για διαστημικές εφαρμογές. Σε περίπτωση θέρμανσης και ψύξης με αέρα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας τότε είναι προτιμότερη τα PCM να βρίσκονται μέσα σε μικρο-ή μακροκάψουλες.

#### **9.4.2. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΕ ΜΑΚΡΟΚΑΨΟΥΛΕΣ**

Στη μέθοδο αυτή, το δοχείο λειτουργεί και ως επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Ο όγκος του PCM ανά μονάδα μπορεί να ποικίλλει από μερικά γραμμάρια έως μερικά κιλά. Σε αυτά τα συστήματα δίνεται μικρότερη προσοχή στην εναπόθεση στερεού PCM στην επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Το σχήμα τους ποικίλλει από ορθογώνια πλαίσια έως πλαστικούς σάκους (rouches) με συγκεκριμένο σχήμα.

Τα συστήματα αυτά επιλέγονται, συνήθως, όταν η μεταφορά θερμότητας γίνεται με εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα, όταν έχουμε εφαρμογές με PCM χαμηλότερης θερμοκρασίας τήξης όπου απαιτούνται και μικρότεροι όγκοι ή όταν ο όγκος του συστήματος δεν είναι κρίσιμος.

Μία ποικιλία δοχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως φιάλες, πλαστικοί σωλήνες, δοχεία με ελαστικές πλαστικές μεμβράνες κ.α.

Η θερμική διαλυτότητα του υλικού της κάψουλας δεν πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από αυτή του PCM. Οι περισσότερες μακροκάψουλες είναι από πλαστικό, που είναι κατάλληλο για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών, υπάρχουν όμως και ορισμένες που χρησιμοποιούν μέταλλα και μεμβράνες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για υψηλά σημεία τήξης.

Το σύστημα αποθήκευσης όπου το PCM περιέχεται σε μακροκάψουλες πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και να ταιριάζει απόλυτα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Για να εξασφαλισθεί ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας, τα PCM σε μακροκάψουλες έχουν μεγάλη αναλογία επιφάνειας/όγκο. Λόγω του μικρού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του αέρα, η διεπιφάνεια δοχείου-αέρα θα περιορίζει τη μεταφορά θερμότητας. Η ανάπτυξη στερεού στρώματος στην εσωτερική επιφάνεια μεταφοράς μπορεί να μειώσει σημαντικά το συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Ταυτόχρονα, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των PCM

μειώνει σημαντικά τον όγκο σε σύγκριση με το νερό ή τα πετρώματα, όμως η απαίτηση για μεταφορά θερμότητας παραμένει η ίδια.

#### **9.4.3. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΕ ΜΙΚΡΟΚΑΨΟΥΛΕΣ**

Στον τρόπο αυτό αποθήκευσης έχουμε πολύ μικρές διακριτές μονάδες με PCM, της τάξης των μερικών μm, διεσπαρμένες και συνδεδεμένες μεταξύ τους με μία συνεχή φάση. Η συνεχής αυτή μήτρα πολλές φορές παρέχει όλα όσα απαιτούνται από ένα δοχείο, όπως το να λειτουργεί ως φράγμα για την υγρασία.

Λόγω του μικρού όγκου που έχει κάθε μονάδα του PCM, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο φαινόμενο του supercooling, το οποίο πρέπει να μην εμφανίζεται ή να εμφανίζεται ελάχιστα. Η ποσότητα του παράγοντα πυρήνοποίησης πρέπει να είναι μεγάλη και η διασπορά της άριστη, έτσι ώστε να παρέχει ικανοποιητική σταθερότητα.

Πλεονέκτημα, όμως, του μικρού όγκου αποτελεί η δυνατότητα που παρέχεται στα PCMs τα οποία δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο congruent melting, να σταθεροποιούνται και να μη διαχωρίζονται οι φάσεις.

Ένα άλλο μειονέκτημα των PCMs σε μικροκάψουλες είναι η μεγάλη αναλογία του υλικού κατασκευής ως προς το PCM. Αυτό μειώνει την ενεργειακή πυκνότητα και αυξάνει το κόστος. Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να παρουσιάσει, επίσης, προβλήματα καθώς η μήτρα που περιέχει τις μικροκάψουλες σταματά τη μεταφορά με συναγωγή κατά τη φόρτιση, μειώνοντας έτσι σημαντικά το ρυθμό φόρτισης. Το φαινόμενο αυτό είναι περισσότερο έντονο για τις οργανικές μήτρες.

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τα συστήματα αυτά αντισταθμίζονται από την ικανότητά τους να αντικαθιστούν εύκολα συμβατικά υλικά, όπως είναι τα οικοδομικά υλικά, αυξάνοντας το ποσό της ενέργειας που μπορούν να αποθηκεύσουν και παρέχοντας δυνατότητα διαχείρισης του φορτίου.[63],[64]

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

#### 1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η στερεοποίηση ενός υλικού λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένη θερμοκρασία μόνο στην περίπτωση ομογενούς υλικού ενός συστατικού (π.χ. καθαρά μέταλλα). Στην περίπτωση μιγμάτων και κραμάτων μετάλλων η στερεοποίηση ολοκληρώνεται σε εύρος θερμοκρασιών με δημιουργία ζώνης συνύπαρξης των δύο φάσεων (mushy zone). Επομένως, αναγνωρίζονται τρεις περιοχές κατά την εξέλιξη του φαινομένου: η στερεή, η υγρή και η χυλώδης περιοχή (mushy zone), όπου στερεές μάζες του υλικού κινούνται μαζί με υλικό που βρίσκεται στην υγρή κατάσταση. Ένα σημαντικό πρόβλημα που δημιουργείται κατά την διάρκεια αλλαγής φάσης είναι ότι μπορεί να παρατηρηθούν περισσότερες από μία θέσεις διεπιφάνειας ή και καμία. Εξαιτίας της μη ισοθερμοκρασιακής μεταβολής κατά την αλλαγή φάσης, η εύρεση της θέσης διεπιφάνειας μπορεί να είναι δύσκολα υπολογίσιμη έως αδύνατη. Από την άποψη των υπολογισμών είναι επωφελές ότι το πρόβλημα αναδιατυπώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι συνθήκες Stefan αναμφίβολα να συνδέονται με νέες μορφές εξισώσεων και ότι οι εξισώσεις θερμότητας εφαρμόζονται σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση αλλαγής φάσης είναι κυρίως δύο: κινητά όρια ή σταθερό πλέγμα. Εκτός αυτής της διάκρισης μπορεί να γίνει διαχωρισμός των προσεγγίσεων με το αν λαμβάνεται υπ' όψη η επίδραση της κίνησης του υγρού PCM στη μετάδοση θερμότητας ή θεωρείται ότι το φαινόμενο εξελίσσεται μόνο με αγωγή και αν η αλλαγή φάσης θεωρείται ότι πραγματοποιείται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία ή σε εύρος θερμοκρασιών.

Προβλήματα στη μοντελοποίηση του φαινομένου της τήξης παρουσιάζονται κατά κύριο λόγο από την τυχαία κίνηση του υλικού στη χυλώδη περιοχή και την επίδραση της βαρύτητας, ενώ για το φαινόμενο της στερεοποίησης πρόσθετο πρόβλημα είναι η μεγάλη μεταβολή του όγκου που μπορεί να δημιουργήσει κοιλότητες αλλά και αποκόλληση μάζας υλικού από τις επιφάνειες συναλλαγής.

Η μοντελοποίηση με τεχνικές κινητών ορίων, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη λόγω της αλληλεξάρτησης της κίνησης του ορίου στερεό – υγρό, με το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Η δυσκολία πρόβλεψης της θέσης διεπιφάνειας, ενισχύεται από την επίδραση της βαρύτητας και την ανομοιογένεια του μίγματος. Επιπλέον σε

περιπτώσεις κυκλικής φόρτισης δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια η θερμική υστέρηση που παρουσιάζει το υλικό.

Η μοντελοποίηση φαινομένων αλλαγής φάσης ανάγεται κυρίως στην επίλυση της εξίσωσης της ενέργειας. Η επίδραση της βαρύτητας και μεταφορά μαζών κατά τη διάρκεια του φαινομένου της αλλαγής φάσης βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της βελτίωσης. Στη γενικότερη έκφρασή της η εξίσωση της ενέργειας μπορεί να γραφεί ως :

$$\frac{\partial (\rho \cdot H)}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{U} \cdot H) = \text{div}(k \cdot \text{grad}T) + S_h \quad (1)$$

Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του υλικού στην εκάστοτε φάση,  $\vec{U}$  η ταχύτητα του υλικού,  $k$  η ειδική αγωγιμότητα,  $S_h$  οι πηγές και  $H$  η ενθαλπία. Αν θεωρηθεί η κίνηση του υγρού PCM αμελητέα τότε η εξίσωση της ενέργειας μπορεί να απλοποιηθεί παραλείποντας τους όρους συναγωγής και πηγών διατηρώντας μόνο το χρονικό όρο και τους όρους της αγωγής. Η επίλυση της εξίσωσης απαιτεί γνώση των τιμών των ιδιοτήτων του υλικού ( $C_p$ ,  $\rho$ ,  $k$ ) σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής. Η δυσκολία προσδιορισμού των ιδιοτήτων στο θερμοκρασιακό εύρος που λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης, οδηγεί στην υπόθεση συναρτήσεων που περιγράφουν την μεταβολή της κάθε ιδιότητας κατά την μετάβαση από την στερεή στην υγρή φάση.

Συνεπώς η λύση των προβλημάτων αλλαγής φάσης με βάση τις παραπάνω παραδοχές μεταπίπτει από την (1) στην παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\partial (\rho \cdot H)}{\partial t} = \text{div}(k \cdot \text{grad}T) \quad (2)$$

Η θέση διεπιφάνειας στην κατάσταση ισορροπίας κατά την διάρκεια της τήξης, θεωρώντας ότι η πυκνότητα της στερεάς και υγρής φάσης του υλικού είναι ίσες και αγνοώντας τη συναγωγή της υγρής φάσης, δίνεται από τον παρακάτω τύπο (Lane 1983):

$$k_s \left. \frac{\partial T_s}{\partial n} \right|_s - k_l \left. \frac{\partial T_s}{\partial n} \right|_s = \rho_s \cdot L \cdot \frac{dS_n}{dt} \quad (3)$$

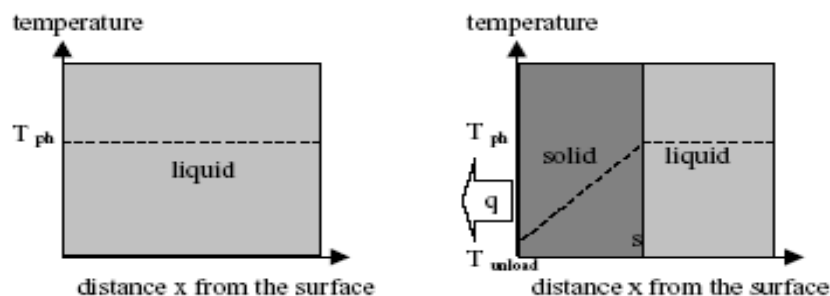


Όπου  $S$  ή θέση διεπιφάνειας και  $n$  κανονικό διάνυσμα της διεπιφάνειας και  $L$  η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του PCM. Η παραπάνω εξίσωση στη φάση στερεοποίησης αλλάζει εναλλάσσοντας τα  $l$  και  $s$  καθώς και την λανθάνουσα  $L$  με  $-L$ . [28],[65]

## 1.2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

### 1.2.1. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΗΜΙ-ΑΠΕΙΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Ο πρώτος και ο πιο εύκολος τρόπος διερεύνησης της μετάδοσης θερμότητας σε ένα PCM είναι η μελέτη μιας μονοδιάστατης, ημιάπειρης πλάκας PCM η οποία ψύχεται ή θερμαίνεται, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



*Γραφική απεικόνιση της θερμοκρασίας της ημιάπειρης επιφάνειας με PCM συναρτήσει της κατά μήκος απόστασης της πλάκας σε περίπτωση ψύξης της*

Υπάρχουν διάφοροι γεωμετρικοί περιορισμοί αλλά προκειμένου να επιτευχθεί μια αναλυτική λύση προτείνονται κάποιες παραδοχές σε κάθε περίπτωση.

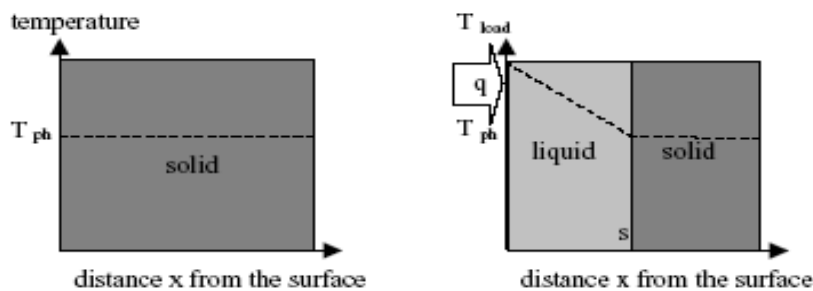
Στην συγκεκριμένη περίπτωση προτείνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- Θεωρούμε ότι η θερμοχωρητικότητα  $C_p$  είναι αμελητέα συγκριτικά με την ενθαλπία αλλαγής φάσης ( δηλ.  $C_p \cdot \Delta T \ll \Delta H$  ), συνεπώς μόνο το ποσό της λανθάνουσας θερμότητα κατά την αλλαγή φάσης θεωρείται άξιο υπολογισμού.
- Θεωρούμε αμελείται τη συναγωγή θερμότητας και υπολογίζεται μόνο η αγωγή.
- Θεωρούμε ότι τη χρονική στιγμή  $t = 0$ , το PCM είναι πλήρως στην υγρή κατάσταση και η θερμοκρασία του είναι οριακά μεγαλύτερη από την θερμοκρασία αλλαγής φάσης.
- Θεωρούμε ότι την χρονική στιγμή, όπου  $x = 0$ , έχουμε μεταφορά θερμότητας με σταθερή θερμοκρασία  $T_{unload}$ .

Εξαιτίας της αμελητέας θερμοχωρητικότητας, οι μεταβολές της θερμοκρασίας είναι γραμμικές. Η θερμοροή στην διεπιφάνεια συναρτήσκει της μετατόπισης, κατά την διάρκεια στερεοποίησης, δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$q = -\lambda \cdot \frac{T_{ph} - T_{unload}}{s} \quad (4)$$

Σε περίπτωση τήξης, αντιστρέφονται οι όροι της διαφοράς θερμοκρασίας  $\Delta T$ , δηλ.  $\Delta T = T_{unload} - T_{ph}$ . Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το μοντέλο της πλάκας στην περίπτωση αυτή



Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσκει της κατά μήκους αποστασης της πλάκας σε περίπτωση τήξης της

Η εξάρτηση της θερμοροής από τη μετατόπιση της διεπιφάνειας της αλλαγής φάσης, είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου η πλάκα PCM έχει πεπερασμένο πάχος. Αν η θερμότητα παράγεται ή απορροφάται από μια πλευρά, και αν η μεταβλητή  $s$  είναι ίση με το πάχος της πλάκας του PCM, τότε η μεταβλητή  $q(s)$  είναι η ροή θερμότητας στο τέλος της αλλαγής φάσης και σε εκείνο το σημείο θα έχει την κατώτερη τιμή της. Αν και η κατώτερη τιμή της θερμοροής μπορεί να είναι χρήσιμη, περισσότερο χρήσιμη είναι εξάρτηση της συναρτήσκει του χρόνου.

Η θερμοροή στη διεπιφάνεια θα είναι ίση με τη θερμότητα η οποία απελευθερώνεται καθώς η διεπιφάνεια αλλαγής φάσης κινείται.

Συνεπώς θα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$q = \Delta H \cdot \frac{ds}{dt} \quad (5)$$

Εξισώνοντας τις εξισώσεις (4) και (5), διαχωρίζοντας τις μεταβλητές  $s$  και  $t$  και επιλύοντας το ολοκλήρωμα από  $t'=0$  σε  $t'=t$  έχουμε :

$$\frac{\lambda \cdot (T_{ph} - T_{unload})}{\Delta H} \cdot t = \frac{1}{2} \cdot s^2 \Rightarrow s = \sqrt{2 \cdot \frac{\lambda \cdot (T_{ph} - T_{unload})}{\Delta H} \cdot t} \quad (6)$$

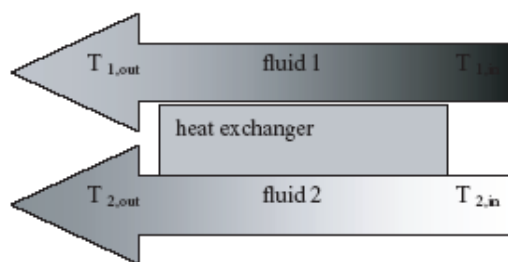
Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4) και (6), η θερμοροή δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$q = \sqrt{\frac{\lambda \cdot \rho_{ph} \cdot (T_{ph} - T_{unload}) \cdot \Delta H}{2 \cdot t}} \quad (7)$$

Παρατηρούμε ότι η θερμοροή εξαρτάται από την ενθαλπία αλλαγής φάσης, και μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η ενθαλπία αλλαγής φάσης τόσο πιο αργά κινείται το μέτωπο αλλαγής φάσης.

### 1.2.2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΛΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ PCM

Αν και η προηγούμενη παρουσίαση αναφερόταν σε μονοδιάστατη ανάλυση, η προσέγγιση αυτή για μία πραγματική αποθήκευση θερμότητας δεν είναι αποτελεσματική. Στις περισσότερες των περιπτώσεων όμως τα μοντέλα που καλούμαστε να υπολογίσουμε είναι 2 και 3 διαστάσεων, οπότε θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας ότι το μέσο μεταφορά θερμότητας θα συναλλάσει θερμότητα με το μέσο αποθήκευσης. Συνεπώς το μέσο μεταφοράς θερμότητας θα αλλάζει την θερμοκρασία και η κλίση της θερμοκρασίας, η οποία εισέρχεται ως μεταβλητή στην εξίσωση της θερμοροής μεταβάλλεται κατά μήκος του εναλλάκτη. Συνεπώς πλέον έχουμε, αντί για μονοδιάστατο πρόβλημα, πρόβλημα τουλάχιστον δύο διαστάσεων.



Μοντέλο Εναλλάκτη Ομοροής

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ένα απλό μοντέλο ενός εναλλάκτη ομοροής, ο οποίος χρησιμοποιείται για να θερμάνει το ρευστό 1 καθώς διέρχεται το θερμότερο ρευστό 2. Είναι προφανές ότι έχουμε μετάδοση θερμότητας από το ρευστό 2 στο ρευστό 1. Το ολικό ποσό θερμότητας που μεταφέρεται από το ρευστό 2 στο ρευστό 1 είναι :

$$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta T_{lm} \quad (8)$$

όπου  $A$  : είναι η επιφάνεια συναλλαγής,  $k$  ο ολικός συντελεστής αγωγιμότητας και  $\Delta T_{lm}$  η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ρευστών 1 και 2, η οποία ορίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\ln \frac{\Delta T_{in}}{\Delta T_{out}}} \quad (9)$$

Επομένως, από τις δύο παραπάνω σχέσεις η θερμοροή δίνεται από τον τύπο:

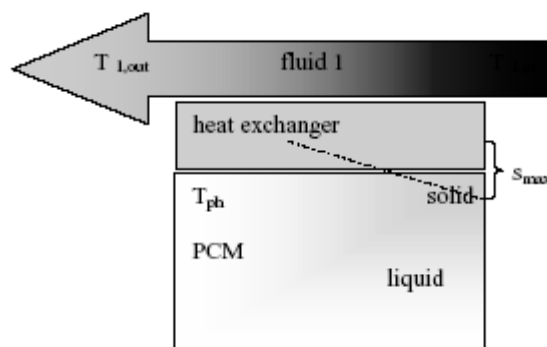
$$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\ln \frac{\Delta T_{in}}{\Delta T_{out}}} \quad (10)$$

Η θερμότητα η οποία μεταφέρεται στο ρευστό 1, θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας του εισερχομένου ρεύματος, οπότε θα έχουμε :

$$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\ln \frac{\Delta T_{in}}{\Delta T_{out}}} = c_p \cdot \frac{dV}{dt} (T_{1,out} - T_{1,in}) \quad (11)$$

Όπου  $\frac{dV}{dt}$  είναι ο όγκος ανά μονάδα χρόνου του ρευστού 1.

Εάν αντικαταστήσουμε το ρευστό 2 με ένα PCM , τότε ο εναλλάκτης χρησιμοποιείται για αποθήκευση θερμότητας στο υλικό αλλαγής φάσης. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Μοντέλο Εναλλάκτη για θερμική αποθήκευση με PCM

Για την απλοποίηση των υπολογισμών θα θεωρήσουμε αρχικά ότι το PCM έχει τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης.

Όμοια με πριν, η θερμότητα που μεταφέρεται στο PCM θα είναι, χρησιμοποιώντας τη σχέση (11) :

$$c_p \cdot \frac{dV}{dt} (T_{out} - T_{in}) = A \cdot k \cdot \frac{(T_{ph} - T_{in}) (T_{ph} - T_{out})}{\ln \frac{T_{ph} - T_{in}}{T_{ph} - T_{out}}} = A \cdot k \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln \frac{T_{ph} - T_{in}}{T_{ph} - T_{out}}} \quad (12)$$

$$\ln \frac{T_{ph} - T_{in}}{T_{ph} - T_{out}} = \frac{A \cdot k}{c_p \cdot \frac{dV}{dt}} \quad (13)$$

Από τις εξισώσεις (11) και (13) η θερμική ισχύς που αποθηκεύεται στο PCM δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\dot{Q} = c_p \cdot \frac{dV}{dt} (T_{ph} - T_{in}) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{A \cdot k}{c_p \cdot \frac{dV}{dt}} \right) \right] \quad (14)$$

Επομένως καταλήγουμε σε μια σχέση στην οποία μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμική ισχύ που αποθηκεύεται στο PCM συναρτήσει της γνωστής θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού και της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης του PCM.

### 1.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Τα αναλυτικά μοντέλα μας δείχνουν τα αποτελέσματα με χρήση απλών σχέσεων μεταφοράς θερμότητας. Αυτές οι σχέσεις μας δείχνουν μια γενική εικόνα για το πως οι διάφορες μεταβλητές επηρεάζουν η μια την άλλη και πως τελικά επιδρούν στα τελικά μεγέθη. Ωστόσο τίθενται αυστηροί περιορισμοί όσον αφορά τη γεωμετρία και τη συμβολή της αισθητής θερμότητας. Εξαιτίας των παραδοχών που τέθηκαν ήταν εφικτή η επίλυση των προαναφερθέντων διαφορικών εξισώσεων.

Για μια πιο λεπτομερή και ρεαλιστική ανάλυση των φαινομένων που αναλύονται είναι απαραίτητη η χρήση μίας διαφορετικής προσέγγισης. Είναι απαραίτητη λοιπόν η χρήση υπολογιστικών μεθόδων οι οποίες απλοποιούν τις διαφορικές εξισώσεις που διέπουν το εξεταζόμενο φαινόμενο. Με αυτήν την προσέγγιση είναι δυνατόν να επιλυθούν οι καινούργιες εξισώσεις με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

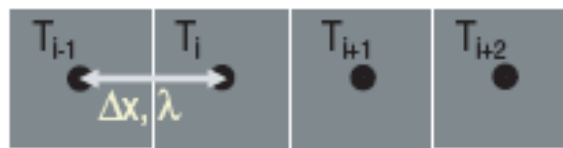
Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι υπολογισμού των προβλημάτων αγωγής θερμότητας των PCM είναι η μέθοδος της ενθαλπίας, της θερμοχωρητικότητας και η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών.

### 1.3.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΟΓΚΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες υπολογιστικές μεθόδους και βασίζεται στην μετατροπή των γνωστών διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές εξισώσεις με ακρίβεια ανάλογη με τον αριθμό των εξισώσεων αυτών.

Η παρουσίαση της μεθόδου θα γίνει με ένα παράδειγμα, μονοδιάστατης ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας σε ράβδο.

Αρχικά διακριτοποιούμε την ράβδο σε όγκους αναφοράς, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Κάθε όγκος αντιπροσωπεύεται από ένα κόμβο και σε κάθε κόμβο αποθηκεύεται ενέργεια η οποία συναλλάσσεται μεταξύ των γειτονικών σημείων.



Οι θερμικές ιδιότητες του κάθε όγκου  $\Delta V$ , είναι η θερμοκρασία του  $T$  και η θερμοχωρητικότητά του  $C_p$ . Το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας ανάμεσα σε δύο κόμβους δίνεται από τη σχέση :

$$q = A \cdot \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (15)$$

Όπου  $A$  είναι η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας μεταξύ των κόμβων,  $\lambda$  η θερμική αγωγιμότητα,  $\Delta T$  : η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων και  $\Delta x$  η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων.

Η θερμότητα που παράγεται σε κάποιο χρονικό διάστημα  $t$ , από τον ένα κόμβο στον επόμενο για χρονικό διάστημα  $\Delta t$ , δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$Q = q \cdot \Delta t = \Delta t \cdot A \cdot \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (16)$$

Από τη θερμότητα που συναλλάσσεται, την αρχική θερμοκρασία και τη θερμοχωρητικότητα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία κάθε επόμενου κόμβου.

Αυτοί οι υπολογισμοί πρέπει να γίνουν επιτυχώς με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για όλους του όγκους.

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό αριθμούμε τους κόμβους χρησιμοποιώντας δυο μεταβλητές :

- Η πρώτη μεταβλητή  $i$  υποδηλώνει μετατόπιση κατά  $\Delta x$  και
- Η δεύτερη μεταβλητή  $k$  υποδηλώνει χρονική μεταβολή κατά  $\Delta t$

Η θερμότητα  $q$  οποία μεταφέρεται από ένα στοιχειώδη όγκο  $i$  στους γειτονικούς του  $i+1$  και  $i-1$ , με χρονικό βήμα  $k$ , δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$Q_{i,k} = \Delta t \cdot A \cdot \lambda \cdot \frac{T_{i+1,k} - T_{i,k}}{\Delta x} + \Delta t \cdot A \cdot \lambda \cdot \frac{T_{i-1,k} - T_{i,k}}{\Delta x} \quad (17)$$

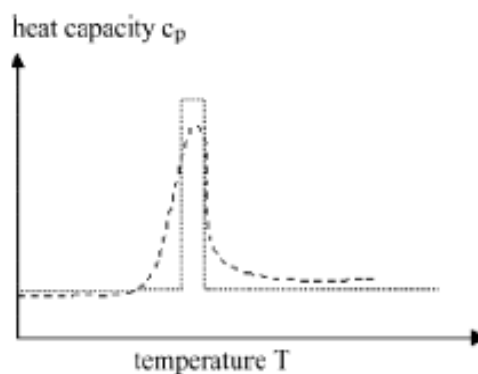
Η θερμότητα που συναλλάσσεται οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασία και είναι:

$$Q_{i,k} = \Delta V \cdot c_p \cdot (T_{i,k+1} - T_{i,k}) \quad (18)$$

Από τις εξισώσεις (17) και (18) και χρησιμοποιώντας ότι  $\Delta V = A \cdot \Delta x$  καταλήγω ότι η καινούργια θερμοκρασία του κόμβου  $i$  το επόμενο χρονικό βήμα  $k+1$  είναι:

$$T_{i,k+1} = T_{i,k} + \frac{\Delta t \cdot A \cdot \lambda}{c_p \cdot \Delta x^2} \cdot (T_{i+1,k} - 2 \cdot T_{i,k} + T_{i-1,k}) \quad (19)$$

Προκειμένου να μετρήσουμε το επίδραση της αλλαγής φάσης χρησιμοποιούμε ότι η θερμοχωρητικότητα μεταβάλλεται σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα.



Μεταβολή θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας

Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας με την παραπάνω μέθοδο έγινε γνωρίζοντας τις τιμές των παραμέτρων από το προηγούμενο χρονικό βήμα, η μέθοδος αυτή υπολογισμού ονομάζεται ρητή.

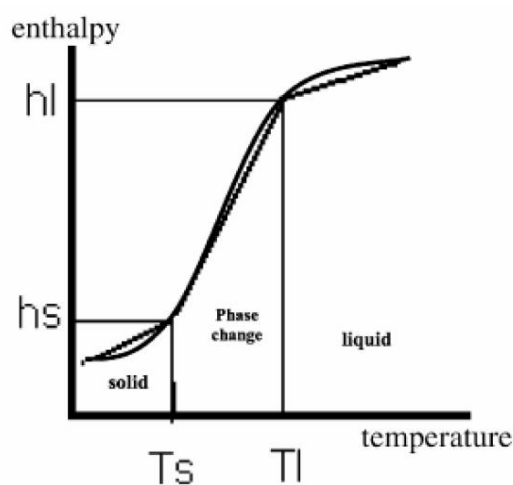
### 1.3.2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

Η ανάλυση των φαινομένων μεταφοράς σε προβλήματα αλλαγής φάσης είναι ιδιαίτερα σύνθετη εξαιτίας της κινούμενης θέσης της διεπιφάνειας, κίνηση η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα απελευθέρωσης ή απορρόφησης της λανθάνουσας θερμότητας. Συνεπώς, η θέση της διεπιφάνειας δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή. Εξαιτίας της χυλώδους φάσης είναι προτιμότερο η εξίσωση ενέργειας να γραφτεί σε όρους ενθαλπίας. Αμελώντας την κίνηση του PCM η εξίσωση της ενέργειας γράφεται:

$$\rho \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) \quad (20)$$

Όπου  $H$  η ενθαλπία, η οποία εκφράζεται σαν σύνολο λανθάνοντος και αισθητού ποσού θερμότητας,  $T$  η θερμοκρασία,  $k$  η θερμική αγωγιμότητα και  $\rho$  η πυκνότητα.

Η επίλυση αυτής της εξίσωσης απαιτεί τη σχέση μεταξύ ενθαλπίας και θερμοκρασίας η οποία φαίνεται στο παρακάτω γράφημα και εξαρτάται από την φύση της αλλαγής φάσης. Επομένως πρέπει να γνωρίζουμε τη διαφορά θερμοκρασίας και τη θερμοχωρητικότητα ώστε να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε την ενθαλπία.



Μεταβολή ενθαλπίας συναρτήσει της θερμοκρασίας

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της λύσης είναι:

- Η εξίσωση είναι ικανοποιεί και στις 3 φάσεις
- Η θερμοκρασία είναι προσδιορίσιμη σε κάθε σημείο και τιμή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων μπορούν να εκτιμηθούν
- Επιπλέον γνωρίζοντας τις τιμές του θερμοκρασιακού πεδίου, είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε τη θέση του ορίου αλλαγής φάσης, αν και αυτό δεν απαιτείται για



την επίλυση του προβλήματος, γεγονός που μας επιτρέπει να διακριτοποιήσουμε το χώρο ευκολότερα.

Έτσι αν εξετάζουμε ένα υλικό το οποίο υφίσταται αλλαγή φάσης, όλο το λανθάνον ποσό θερμότητας συναλλάσσεται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία την  $T = T_{ph}$ , οπότε θα έχουμε :

$$H = \left\{ \begin{array}{l} C \cdot T \rightarrow T < T_{ph} \\ C \cdot T + L \rightarrow T > T_{ph} \end{array} \right\} \quad (21)$$

Όπου  $C$  είναι η αισθητή θερμότητα και  $L$  η λανθάνουσα θερμότητα.

Ένας εναλλακτικός τρόπος γραφής της εξίσωσης της ενέργειας με όρους λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας, συνδυάζοντας τις εξισώσεις (20) και (21) είναι ο ακόλουθος :

$$\rho \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left( \kappa \cdot \vec{\nabla} h \right) + S \quad (22)$$

όπου και  $S$  ο όρος της λανθάνουσας θερμότητας και  $\kappa$  η δαχτυσιμότητα τα οποία δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$S = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (23)$$

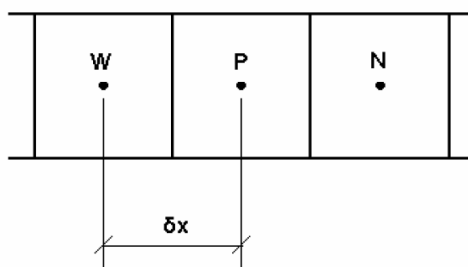
$$\kappa = \frac{k}{C \cdot \rho} \quad (24)$$

Ο όρος  $\Delta H$  είναι το λανθάνον ποσό θερμότητας που συναλλάσσεται κατά την αλλαγή φάσης και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta H = \left\{ \begin{array}{l} 0 \rightarrow T < T_{ph} \\ L \rightarrow T > T_{ph} \end{array} \right\} \quad (25)$$

Η επίλυση της εξίσωσης γίνεται με υπολογιστικές μεθόδους. Για την καλύτερη παρουσίαση της μεθόδου θεωρούμε μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας και η επίλυση θα γίνει με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων.

Αρχικά διακριτοποιούμε το χώρο σε κόμβους και στον κάθε κόμβο αντιστοιχεί ένας πεπερασμένος όγκος. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται 3 πεπερασμένοι όγκοι με έναν κεντρικό κόμβο ( $P$ ) και δυο γειτονικούς ( $W$  &  $E$ ), οι οποίοι έχουν σταθερό διάστημα μεταξύ τους  $\delta x$ .



Σχηματική απεικόνιση του διακριτοποιημένου χώρου σε κόμβους

Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση μετασχηματίζεται στην παρακάτω μορφή:

$$\begin{aligned}
 h_p - h_p^* &= \frac{dt}{dx^2} \cdot (-\theta) \cdot F_p^* + \frac{dt}{dx^2} \cdot \theta \cdot F_p + S_p \\
 F_p &= \kappa_w \cdot (h_w - h_p) + \kappa_e \cdot (h_p - h_e) \\
 S_p &= \Delta H_p^* - \Delta H_p
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Όπου οι τιμές με \* αντιστοιχούν στην προηγούμενη χρονική στιγμή.

Η μεταβλητή  $\theta$  αντιστοιχεί στη μέθοδο λύσης,  $\theta=0$  για ρητή και  $\theta=1$  για πεπλεγμένη. Η τιμή του όρου  $S_p$ , δίνει την τιμή της κομβικής μεταβολής της λανθάνουσας θερμότητας  $\Delta H_p$  σε κάθε χρονικό βήμα.

Θεωρούμε ότι σε μια χρονική στιγμή  $t$ , η διεπιφάνεια αλλαγής φάσης βρίσκεται στον κόμβο N. Για το συγκεκριμένο όγκο αναφοράς, κατά το ήμισυ θα είναι σε υγρή φάση και το υπόλοιπο θα είναι σε στερεά φάση. Στην περιοχή που είναι στερεό το ποσό λανθάνουσας θερμότητας θα είναι μηδενικό ενώ εκεί που έχουμε υγρή φάση το ποσό λανθάνουσας θερμότητας θα είναι  $L$ . Επομένως το λανθάνον ποσό θερμότητας τη χρονική στιγμή  $t$ , θα είναι :

$$\Delta H_N^* = \frac{L}{2}
 \tag{27}$$

Αν μετά από χρονικό διάστημα  $t + \Delta t$ , η διεπιφάνεια αλλαγής φάσης έχει μετακινηθεί κατά  $\Delta x$ , τότε στον κόμβο  $N + 1$  το λανθάνον ποσό θερμότητας θα είναι:

$$\Delta H_{N+1}^* = \frac{L}{2}
 \tag{28}$$

Το σημείο σύγκλισης αυτής της διαδικασίας θα είναι όταν στον κόμβο  $N+1$ , έχουμε στερεοποίηση και τότε η τιμή της ενθαλπίας θα είναι: [34],[66],[67]

$$h_{N+1} = C \cdot T_{ph}
 \tag{29}$$

### 1.3.3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στη μέθοδο αυτή η ειδική θερμοχωρητικότητα αποτελεί συνάρτηση του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης. Οι υπολογισμοί εξαρτώνται τόσο από την θερμοκρασία όσο και από την λανθάνουσα θερμότητα. Κάτω από το σημείο τήξης το υλικό είναι πλήρως στερεοποιημένο και η προστιθέμενη ενέργεια αποθηκεύεται σαν θερμότητα. Κατά το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης, οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι περιορισμένες, σχεδόν ισοθερμοκρασιακές τόσο στη φάση τήξης όσο και στερεοποίησης. Η θερμοκρασία ίση ή μεγαλύτερη από την θερμοκρασία στερεοποίησης είναι πιθανή μόνο όταν το υλικό είναι πλήρως φορτισμένο. Ως εκ τούτου, το υλικό μπορεί να βρίσκεται εκτός του θερμοκρασιακού εύρους μόνο αλλαγής φάσης όταν είναι πλήρως φορτισμένο ή αποφορτισμένο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

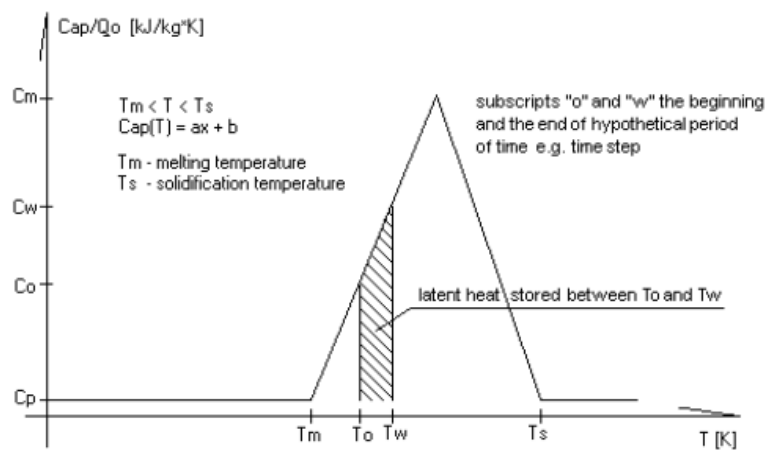


Figure 1. Graphical representation of "Effective Heat Capacity Method".

Γραφική παράσταση της θερμοχωρητικότητας συναρτήσεως της θερμοκρασίας

Η ειδική θερμοχωρητικότητα κατά το εύρος αλλαγής φάσης είναι γραμμικά εξαρτώμενη από την αποθηκευμένη ενέργεια και απελευθερώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το εύρος κατά την αλλαγή φάσης.

Κατά την αλλαγή φάσης η ειδική θερμοχωρητικότητα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$c_{\text{eff}} = \frac{L}{T_2 - T_1} + c_p \quad (30)$$

Όπου  $T_1$  είναι η θερμοκρασία έναρξης της τήξης ή της στερεοποίησης και  $T_2$  η θερμοκρασία όπου το υλικό είναι πλήρως τηγμένο ή στερεοποιημένο.

Όμοια με την μέθοδο ενθαλπίας η εξίσωση της ενέργειας παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho} \cdot \nabla^2 T \quad (31)$$

Όπου :

$$c_p = \left\{ \begin{array}{l} c_{ps} \rightarrow T < T_1 \\ c \frac{L}{T_2 - T_1} + c_p \rightarrow T_1 < T < T_2 \\ c_{pl} \rightarrow T > T_2 \end{array} \right\} \quad (32)$$

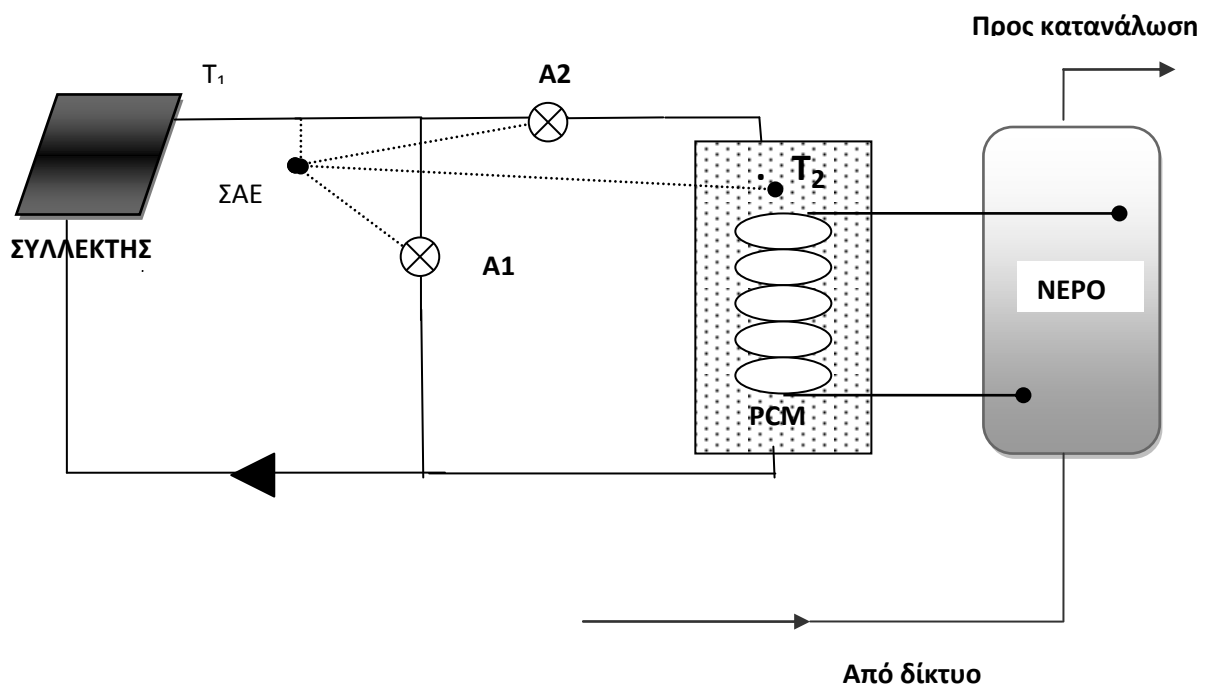
Στους υπολογισμούς το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσεις είναι:

- Πολύ μικρό θερμοκρασιακό εύρος: κατά την διάρκεια τήξης  $dT=T_2-T_1=27-25^\circ\text{C}$  και κατά την διάρκεια στερεοποίησης  $dT=T_2-T_1=24-26^\circ\text{C}$
- Πολύ μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος: κατά την διάρκεια τήξης  $dT=T_2-T_1=28-21^\circ\text{C}$  και κατά την διάρκεια στερεοποίησης  $dT=T_2-T_1=20-25^\circ\text{C}$  [65],[68]

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στη παρούσα εργασία θα εξεταστούν ένας τυπικός ηλιακός θερμοσίφωνας και θα συγκριθεί με έναν αντίστοιχο, ο οποίος περιλαμβάνει ένα υλικό αλλαγής φάσης. Τα υλικά αλλαγής φάσης είναι τοποθετημένα σε μικροκάψουλες σφαιρικού σχήματος και μεταφέρεται η θερμότητα στο νερό μέσω μίας σερπαντίνας. Έχουν εξεταστεί τέσσερα διαφορετικά PCM. Θα υπολογιστούν οι θερμοκρασίες για τις δύο διατάξεις για διάστημα 6 μηνών κάθε ώρα της ημέρας. Το επιλεγόμενο χρονικό διάστημα αντιστοιχεί στους μήνες από Νοέμβριο μέχρι Απρίλιο.

Η διάταξη του ηλιακού θερμοσίφωνα που περιλαμβάνει υλικό αλλαγής φάσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

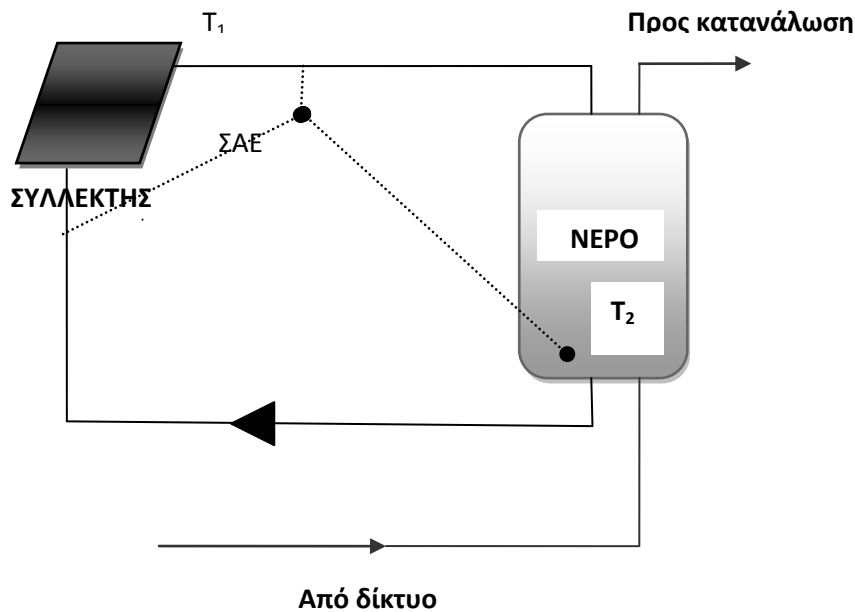


- Το σύστημα αυτομάτου ελέγχου (ΣΑΕ), που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, σκοπό έχει σε περίπτωση που το  $T_2 < T_1$  να κλείνει την βάννα A2 και να ανοίγει την βάννα A1 για να αποφευχθούν ενδεχόμενα προβλήματα στην δεξαμενή αποθήκευσης με το PCM (πχ επιρροή κατά την αλλαγή φάσης).
- Ο συντελεστής πορώδους (όγκος PCM/όγκος νερού) είναι 80%
- Η αλλαγή φάσης γίνεται διαδοχικά από το PCM στο νερό.
- Θεωρώ ότι και για στα τέσσερα PCM η λανθάνουσα θερμότητα είναι  $H=150 \text{ kJ/kg}$
- Θεωρώ ότι κατά την αλλαγή φάσης η ειδική θερμοχωρητικότητα μεταβάλλεται με τριγωνική κατανομή και σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$c_p = \left\{ \begin{array}{l} c_{ps} \rightarrow T < T_s \\ c_{ps} + \frac{4 \cdot (H - b \cdot c_{ps}) \cdot (T - T_s)}{b^2} \rightarrow T_s < T < T_{max} \\ \frac{2 \cdot H}{b} - c_{pl} + \frac{4 \cdot (c_{pl} \cdot H - H) \cdot (T - T_s - \frac{b}{2})}{b^2} \rightarrow T_{max} < T < T_1 \\ c_{pl} \rightarrow T > T_2 \end{array} \right\} \quad (33)$$

Όπου  $c_{ps}$  και  $c_{pl}$  αντιστοιχούν στην θερμοχωρητικότητα στην στερεή και υγρή φάση αντίστοιχα,  $T_s$  και  $T_1$  η θερμοκρασία λήξης στερεοποίησης και έναρξης τήξης αντίστοιχα, το  $T_{max}$  είναι η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη μέγιστη θερμοχωρητικότητα, το  $b$  είναι το εύρος της αλλαγής φάσης και ισούται με  $T_1 - T_s$  και  $H$  η λανθάνουσα θερμότητα.

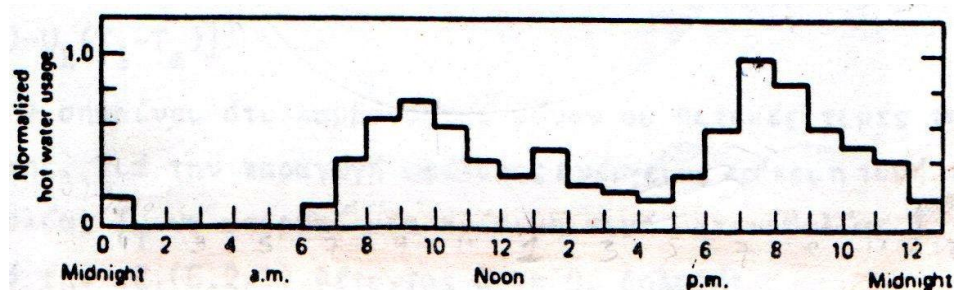
Αντίστοιχα ο τυπικός ηλιακός θερμοσίφωνας, που είναι ανοιχτού κυκλώματος βεβιασμένης κυκλοφορίας έχει το παρακάτω σχήμα:



- Ανάλογα με πριν το ΣΑΕ στην περίπτωση αυτή σκοπό έχει να θέτει σε λειτουργία τον κυκλοφορητή όταν η θερμοκρασία στην έξοδο του συλλέκτη είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία στο πυθμένα της δεξαμενής ( $T_2 < T_1$ ).

Προκειμένου επιλυθεί το πρόβλημα θεωρούνται οι παρακάτω παραδοχές και για τα δύο συστήματα:

- Η θερμοκρασία την 1<sup>η</sup> Νοεμβρίου θεωρείται ότι είναι 30 °C
- Θεωρείται ότι οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος κάθε ώρα της μέρας για κάθε μήνα ισούται με τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος στις 21 του εκάστοτε μήνα.
- Ο συλλέκτης είναι 3m<sup>2</sup> με χαρακτηριστικά μεγέθη  $F_R U_L = 6,21 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$  και  $F_R(\tau_\alpha) = 0,74$  και κλίση  $\beta = \varphi + 15$ , προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη ενέργεια το χειμώνα.
- Η πυκνότητα του νερού παραμένει σταθερή, όπως και του PCM
- Η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού είναι σταθερή και ίση με  $C_p = 4190 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$
- Η δεξαμενή περιέχει 180 λίτρα νερού
- Χρησιμοποιείται νερό σαν μέσο μεταφοράς θερμότητας
- Η χρήση ζεστού νερού γίνεται όταν αυτό βρίσκεται πάνω από θερμοκρασία 39° C. Στη πράξη όμως, σε μικρότερες θερμοκρασίες οι ανάγκες ζεστού νερού καλύπτονται κατά ένα μέρος από τον ηλιακό θερμοσίφωνα και το υπόλοιπο από την βοηθητική πηγή ενέργειας
- Θεωρώ ότι το έδαφος εγκατάστασης του ηλιακού θερμοσίφωνα είναι συνηθισμένο.
- Θεωρώ ένα διαμέρισμα 90m<sup>2</sup> , με 4 άτομα τα οποία καταναλώνουν 54m<sup>3</sup> σε 106 ημέρες στην περιοχή της Αθήνας ( $\varphi = 37,97^\circ$ ). Η κατανομή της κατανάλωσης θερμού νερού κατά το 24ώρο φαίνονται στον παρακάτω σχήμα:



Τυπική κατανομή της κατανάλωσης θερμού νερού σε κατοικίες κατά το 24ωρο

Συνεπώς από το παραπάνω σχήμα έχω τα παρακάτω ποσοστά κατανάλωσης κατά την διάρκεια του 24ωρου και τις αντίστοιχες καταναλώσεις:

Ωριαία ποσοστά κατανάλωσης και οι αντίστοιχες καταναλώσεις

<b>Ωρες</b>	<b>Ποσοστά</b>	<b>Καταναλώσεις (m<sup>3</sup>)</b>
<b>1:00</b>	0,0249	12,688
<b>2:00</b>	0	0
<b>3:00</b>	0	0
<b>4:00</b>	0	0
<b>5:00</b>	0	0
<b>6:00</b>	0	0
<b>7:00</b>	0,0125	6,344
<b>8:00</b>	0,0498	25,377
<b>9:00</b>	0,0760	38,699
<b>10:00</b>	0,0872	44,409
<b>11:00</b>	0,0685	34,893
<b>12:00</b>	0,0498	25,377
<b>13:00</b>	0,0374	19,032
<b>14:00</b>	0,0249	12,688
<b>15:00</b>	0,0274	13,957
<b>16:00</b>	0,0249	12,688
<b>17:00</b>	0,0187	9,516
<b>18:00</b>	0,0374	19,032
<b>19:00</b>	0,0623	31,721



<b>20:00</b>	0,1121	57,097
<b>21:00</b>	0,0996	50,753
<b>22:00</b>	0,0747	38,065
<b>23:00</b>	0,0623	31,721
<b>24:00</b>	0,0498	25,377

Η αποδιδόμενη θερμική ισχύ από τους συλλέκτες χρησιμοποιείται για να ζεστάνει το νερό της δεξαμενής στον τυπικό ηλιακό θερμοσίφωνα ή το PCM στον ηλιακό θερμοσίφωνα με PCM.

Η ισχύς αυτή και η στιγμιαία απόδοση του συλλέκτη δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$Q_u = A_c \cdot F_R \cdot [\alpha \cdot G_T - U_L \cdot (T_{d,o} - T_a)] \quad (34)$$

$$\eta = F_R \cdot [\alpha \cdot G_T - U_L \cdot (T_{d,o} - T_a)] \quad (35)$$

Προκειμένου να υπολογιστούν οι ζητούμενες τιμές πρέπει να υπολογιστούν η ηλιακή ακτινοβολία  $G_T$  και η 24ωρη θερμοκρασία  $T_a$ .

### 2.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ $T_a$

Η ημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά την 21<sup>η</sup> κάθε μήνα στην περιοχή της Αθήνας προέκυψε με στατιστική επεξεργασία σχετικών μετρήσεων της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, στον τομέα θερμότητας ΕΜΠ. Οι μέσες καμπύλες συναρτήσεως των ωρών  $h$  (1-24) της ημέρας προσεγγίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

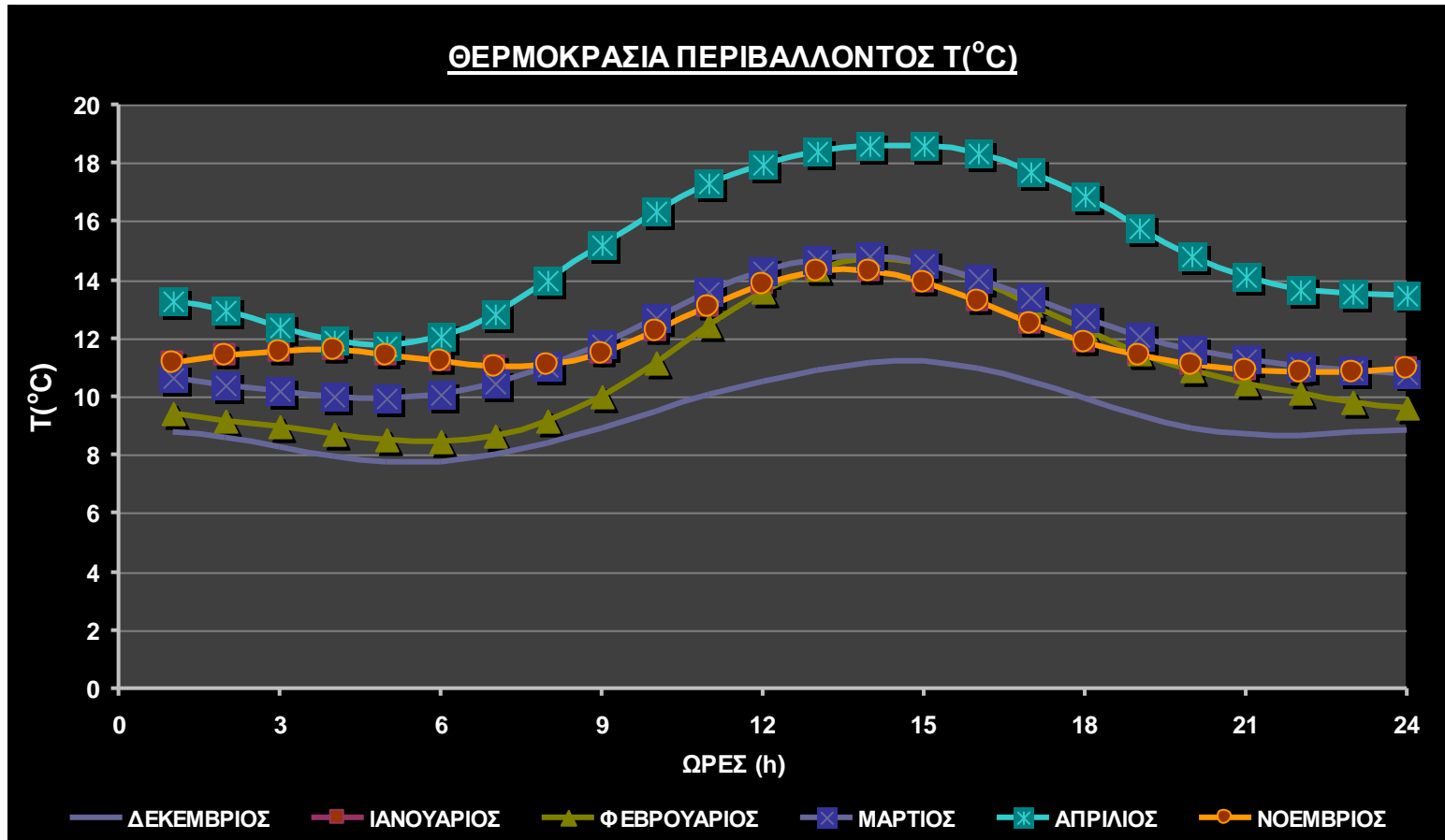
$$T_a = M + \sum_{i=1}^3 C_i \cdot \cos\left[i \cdot \frac{360}{24} \cdot (h - 0,5)\right] + \sum_{i=1}^3 S_i \cdot \sin\left[i \cdot \frac{360}{24} \cdot (h - 0,5)\right] \quad (36)$$

Τα  $M$ ,  $C_i$ ,  $S_i$  δίνονται από τον παρακάτω πίνακα:

*Τιμές των συντελεστών της συνάρτησης  $M$ ,  $C_i$ ,  $S_i$*

	<b>M</b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>3</sub></b>	<b>S<sub>1</sub></b>	<b>S<sub>2</sub></b>	<b>S<sub>3</sub></b>
<b>ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ</b>	9,384	-1,6730	0,7110	0,0085	-1,7230	0,5240	-0,2410
<b>ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ</b>	10,984	-2,1500	0,7850	-0,1070	-1,7500	0,5780	-0,0724
<b>ΜΑΡΤΙΟΣ</b>	11,955	-1,8980	0,6510	-0,0097	-1,0840	0,2550	-0,0093
<b>ΑΠΡΙΛΙΟΣ</b>	15,072	-2,6680	0,7270	0,2690	-1,7630	0,2430	0,2120
<b>ΜΑΙΟΣ</b>	20,724	-2,7960	0,7590	0,0926	-1,3440	0,1190	0,3080
<b>ΙΟΥΝΙΟΣ</b>	26,192	-3,3930	1,1150	0,1560	-2,1960	-0,1390	0,1570
<b>ΙΟΥΛΙΟΣ</b>	28,080	-3,3590	0,8110	0,2720	-2,0770	0,1340	0,1400
<b>ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ</b>	27,880	-3,1130	0,8840	0,0670	-1,9780	0,4860	0,3610
<b>ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ</b>	23,236	-3,3100	1,0350	-0,0495	-1,6960	0,4770	0,2210
<b>ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ</b>	18,144	-2,6300	1,0850	-0,1440	-1,4270	0,6040	0,1380
<b>ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ</b>	11,968	-1,300	0,6160	-0,2520	-0,3170	0,6290	-0,0490
<b>ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ</b>	9,264	-1,1100	0,5210	-0,1520	-0,8810	0,3330	0,0080

Παρακάτω απεικονίζονται οι διακυμάνσεις θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά την διάρκεια της ημέρας χρησιμοποιώντας την εξίσωση (36) και τους παραπάνω συντελεστές:



Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος συναρτήσει των ωρών της 21 ης κάθε μήνα

## 2.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ $G_T$

Σύμφωνα με το μοντέλο του Liu και Jordan (1963) η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται μία κεκλιμένη επιφάνεια αποτελείται από την άμεση ακτινοβολία, την διάχυτη ακτινοβολία (που προέρχεται από τον ουρανό) και την διάχυτη ακτινοβολία που προέρχεται από την ανάκλαση της ολικής στο έδαφος και δίνεται από τον τύπο:

$$G_T = G_b \cdot R_b + G_d \cdot \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (G_d + G_b) \cdot \rho \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (37)$$

Όπου  $\beta$  είναι η γωνία κλίσης του κεκλιμένου επιπέδου ως προς το οριζόντιο επίπεδο,  $\left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right)$  και  $\left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$  είναι οι παράγοντες όρασης ουρανού και εδάφους αντίστοιχα του κεκλιμένου επιπέδου και η  $\rho$  η ανακλαστικότητα του εδάφους ( $\rho=0,2$  για συνηθισμένο έδαφος έως  $\rho=0,7$  για χιονισμένο). Στην περίπτωση μας έχουμε  $\rho=0,2$ .

Για τον υπολογισμό του  $R_b$  χρησιμοποιώ τον παρακάτω τύπο:

$$R_b = \frac{\sin \delta \cdot \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\phi - \beta) \cdot \cos \omega}{\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega} \quad (38)$$

Όπου  $\omega=0,25$  (min από το ηλιακό μεσημέρι) και

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left( \frac{360 \cdot (84 + n)}{365} \right) \quad (39)$$

όπου  $n = 1 \div 365$  είναι η μέρα του έτους.

Η μέση στιγμιαία άμεση και διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου υπολογίζεται με βάση την στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων του Αστεροσκοπείου Αθηνών για τα έτη 1961-1980 για κάθε ώρα,  $t=7,8,\dots,18$  και για κάθε μέρα  $D$  ( $1 \div 365$ ) του έτους και είναι:

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

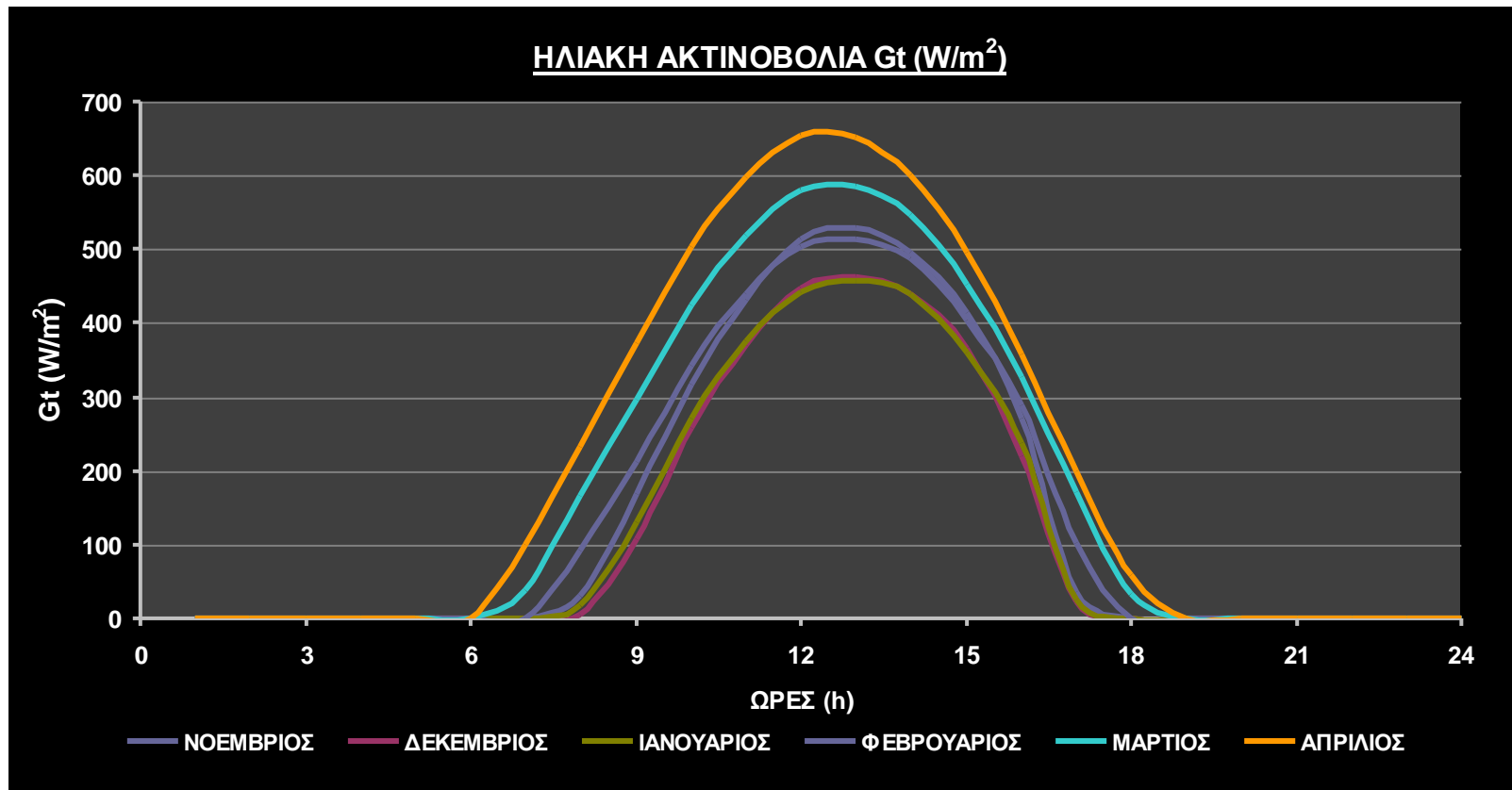
$$G_d = m_t + a_t \cdot \sin \left( \frac{360}{365} D - p_t \right) \quad (40)$$

Όπου οι συντελεστές δίνονται από τον παρακάτω πίνακα:

Τιμές των συντελεστών των εξισώσεων (40)

	$M_t$ $\frac{W}{m^2}$	$A_t$ $\frac{W}{m^2}$	$P_t$ degrees	$m_t$ $\frac{W}{m^2}$	$a_t$ $\frac{W}{m^2}$	$\rho_t$ degrees
<b>7:00</b>	7	46	86,18	48	111	81,23
<b>8:00</b>	57	68	87,31	134	127	82,45
<b>9:00</b>	119	104	87,94	208	133	83,94
<b>10:00</b>	191	129	88,31	261	129	85,6
<b>11:00</b>	258	153	89,35	283	117	86,05
<b>12:00</b>	319	-181	-88,88	271	95	82,71
<b>13:00</b>	342	-194	-89,18	243	81	81,95
<b>14:00</b>	325	183	87,21	210	83	87,23
<b>15:00</b>	269	166	86,22	176	87	89,53
<b>16:00</b>	183	147	82,1	141	-85	-88,19
<b>17:00</b>	78	131	79,85	104	-79	-88,97
<b>18:00</b>	-25	114	77,36	51	91	86,79

Με βάση τα παραπάνω υπολογίζω από τον τύπο (37) για κάθε ώρα και κάθε μέρα του μήνα τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου. Παρακάτω παρατίθεται η γραφική παράσταση ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου για την 21<sup>η</sup> για τους μήνες από Νοέμβριο μέχρι Απρίλιο.



Γραφική παράσταση της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει των ωρών της 21 ης κάθε μήνα

### 2.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Αφού λοιπόν γνωρίζουμε την ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύ για να υπολογίσουμε την θερμοκρασία την επόμενη ώρα χρησιμοποιώ την παρακάτω διαδικασία:

Για τον τυπικό ηλιακό θερμοσίφωνα η αποδιδόμενη ισχύς του συλλέκτη χρησιμοποιείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής επομένως:

- Όταν η θερμοκρασία της δεξαμενής είναι  $<$  των  $39^\circ \text{C}$  (δεν έχω κατανάλωση) και ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$Q_u = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{PH}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{d,i}} - T_{\text{d,o}}) \quad (41)$$

Συνεπώς η θερμοκρασία του νερού είναι:

$$T_{\text{d,i}} = T_{\text{d,o}} + \frac{Q_u}{C_{\text{PH}_2\text{O}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (42)$$

- Σε περίπτωση που έχω κατανάλωση νερού ( $T > 39^\circ \text{C}$ ) ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$Q_u - Q_K = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{PH}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{d,i}} - T_{\text{d,o}}) \quad (43)$$

Όπου  $Q_K = m_1 \cdot C_{\text{PH}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{d,i}} - T_\delta)$ , όπου  $T_\delta$  είναι η θερμοκρασία νερού του δικτύου και  $m_1$  η μάζα κατανάλωσης.

Και συνεπώς η θερμοκρασία του νερού κατόπιν πράξεων είναι:

$$T_{\text{d,i}} = \frac{Q_u + m_1 \cdot C_{\text{PH}_2\text{O}} \cdot T_\delta + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{PH}_2\text{O}} \cdot T_{\text{d,o}}}{C_{\text{PH}_2\text{O}} \cdot (m_{\text{H}_2\text{O}} + m_1)} \quad (44)$$

Για τον ηλιακό θερμοσίφωνα με PCM, η αποδιδόμενη ισχύς του συλλέκτη χρησιμοποιείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του PCM η οποία θερμότητα προμηθεύεται στο νερό με σερπαντίνα. Επομένως:

- Όταν η θερμοκρασία της δεξαμενής είναι  $<$  των  $39^\circ \text{C}$  (δεν έχω κατανάλωση), και συνεπώς και του νερού, ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$Q_u = m_{\text{PCM}} \cdot C_{\text{P,PCM}} \cdot (T_{\text{d,i}} - T_{\text{d,o}}) \quad (45)$$

Συνεπώς η θερμοκρασία του νερού είναι:

$$T_{d,i} = T_{d,o} + \frac{Q_u}{C_{P,PCM} \cdot m_{PCM}} \quad (46)$$

- Σε περίπτωση που έχω κατανάλωση νερού ( $T > 39^\circ \text{C}$ ) ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$Q_u - Q_K = m_{PCM} \cdot C_{P,PCM} \cdot (T_{d,i} - T_{d,o}) \quad (47)$$

Όπου  $Q_K = m_1 \cdot C_{PH_2O} \cdot (T_{d,i} - T_\delta)$ , όπου  $T_\delta$  είναι η θερμοκρασία νερού του δικτύου  $m_1$  η μάζα κατανάλωσης.

Και συνεπώς η θερμοκρασία του νερού κατόπιν πράξεων είναι:

$$T_{d,i} = \frac{Q_u + m_1 \cdot C_{PH_2O} \cdot T_\delta + m_{PCM} \cdot C_{P,PCM} \cdot T_{d,o}}{m_1 \cdot C_{PH_2O} + m_{PCM} \cdot C_{P,PCM}} \quad (48)$$

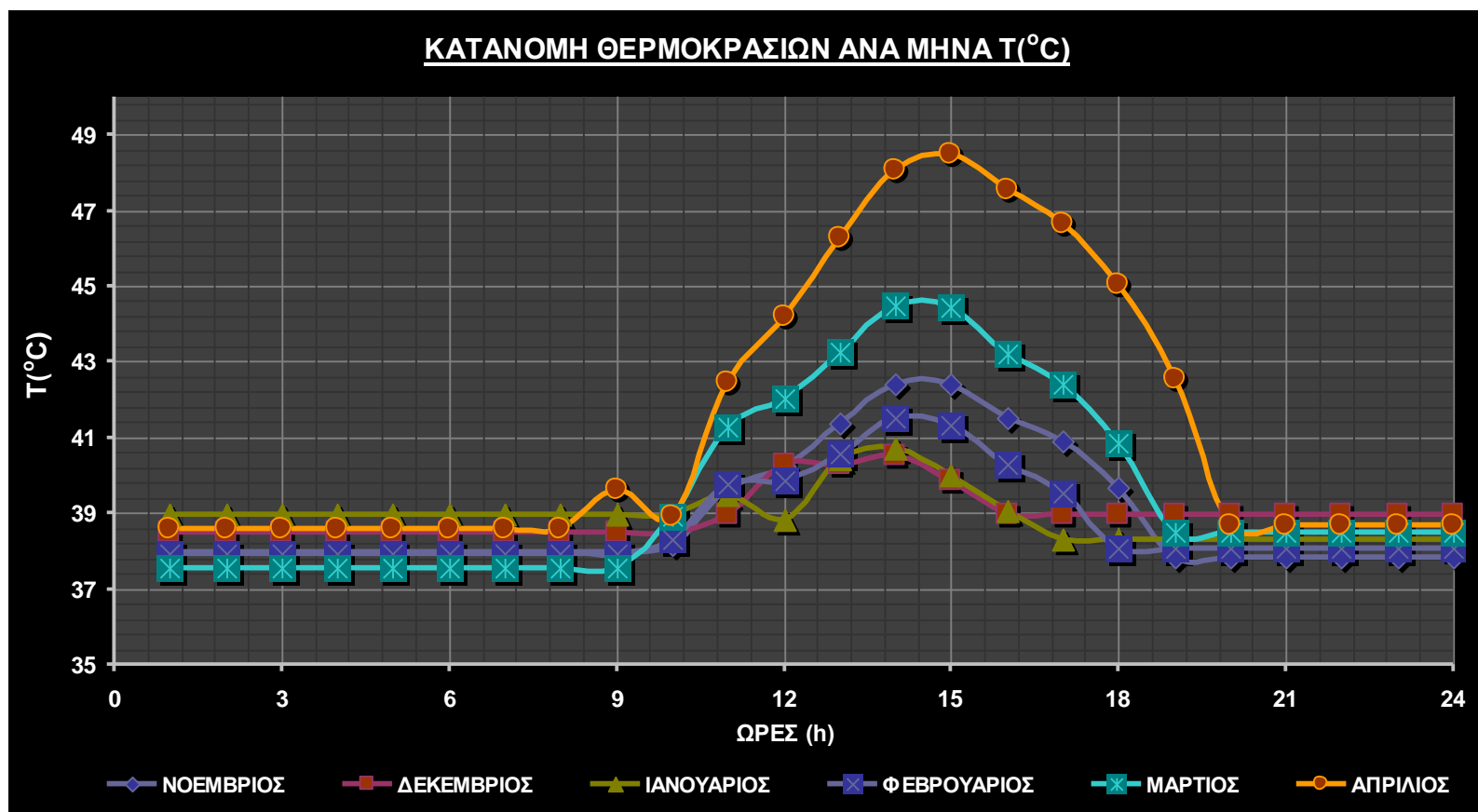
[69]



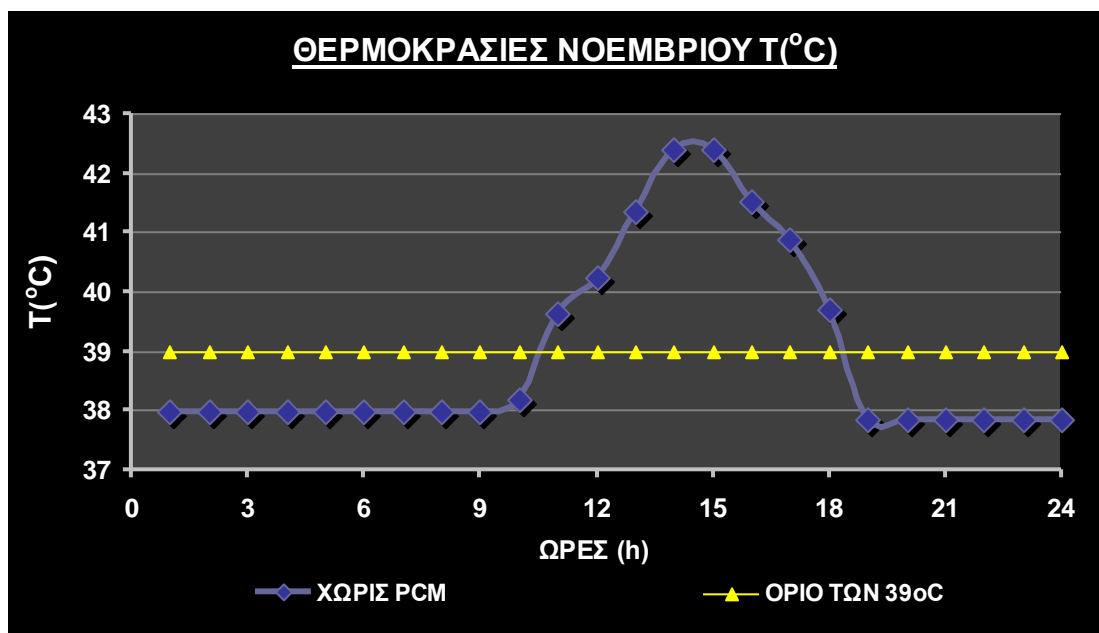
### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### ΤΥΠΙΚΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΑΣ

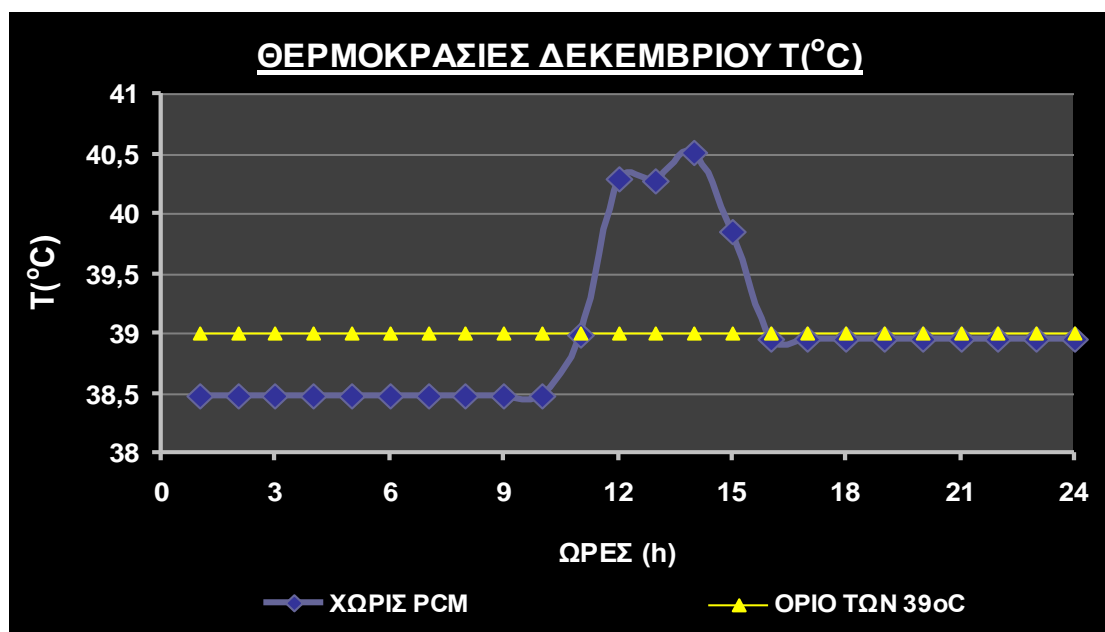
Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω τύπους, (42) και (44), και κατόπιν πράξεων έχω τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις της θερμοκρασίας σε °C συναρτήσει των ωρών της ημέρας για την 21 κάθε μήνα:



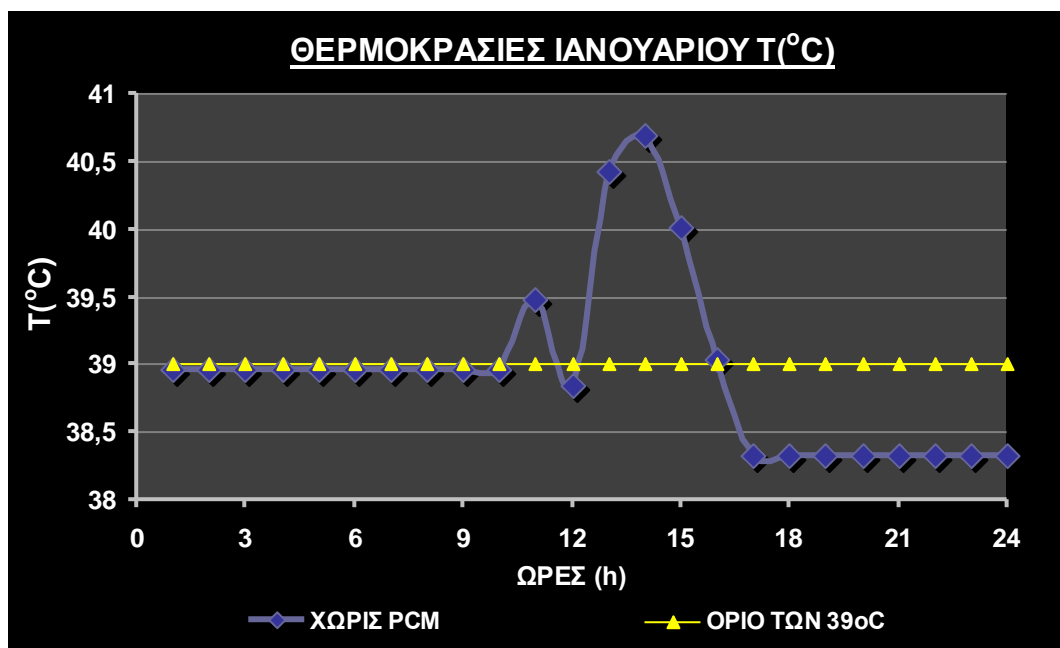
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας της του νερού συναρτήσει των ωρών της 21 ης κάθε μήνα



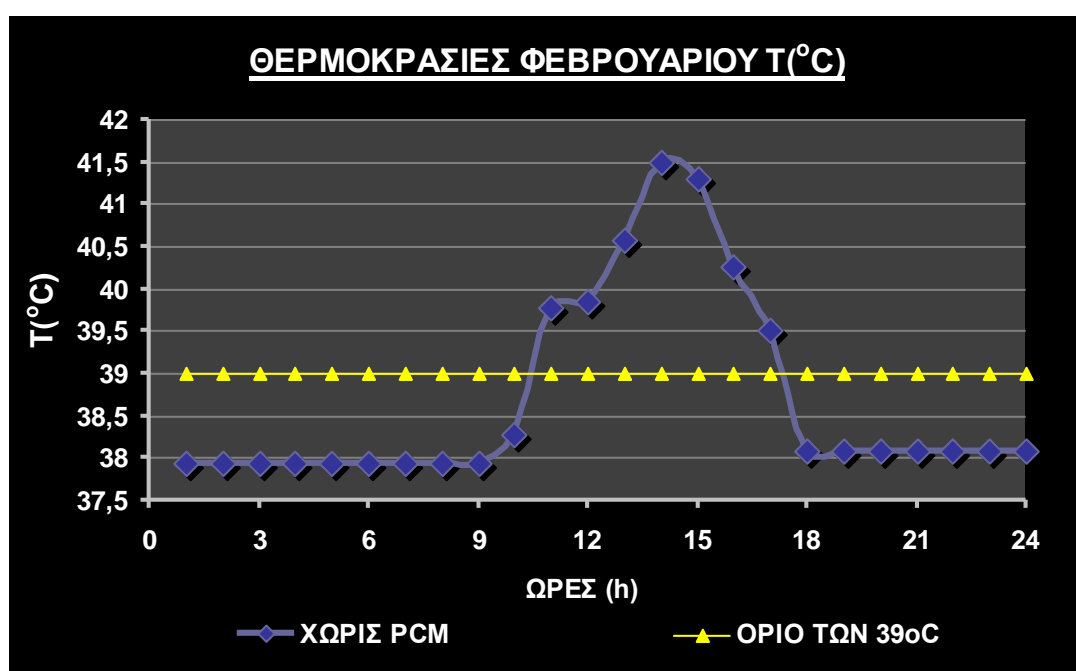
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου



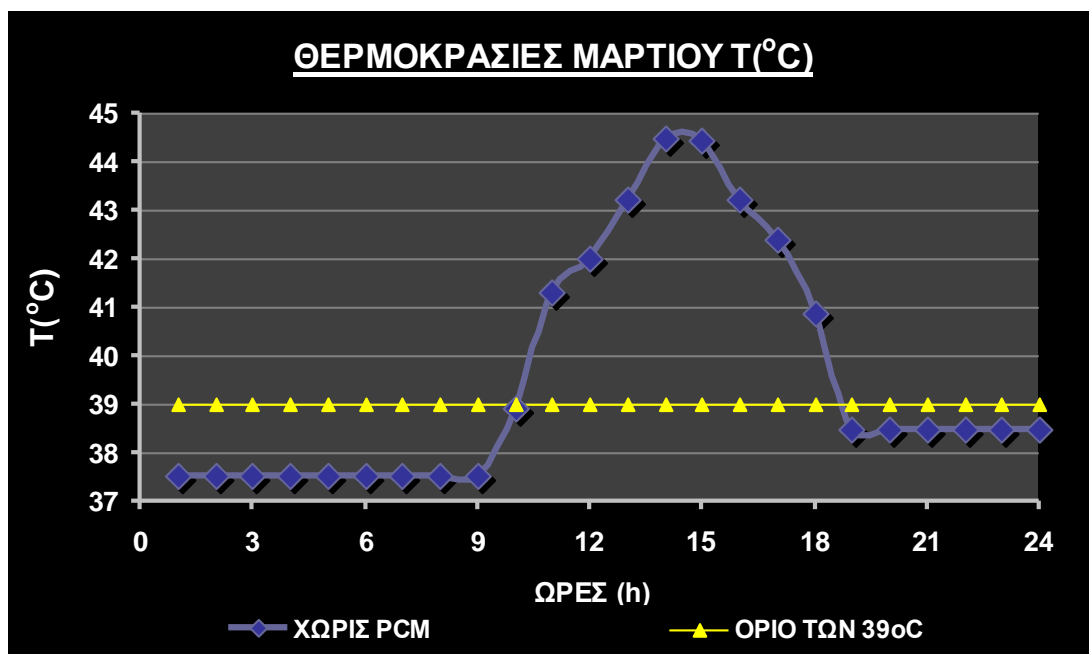
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου



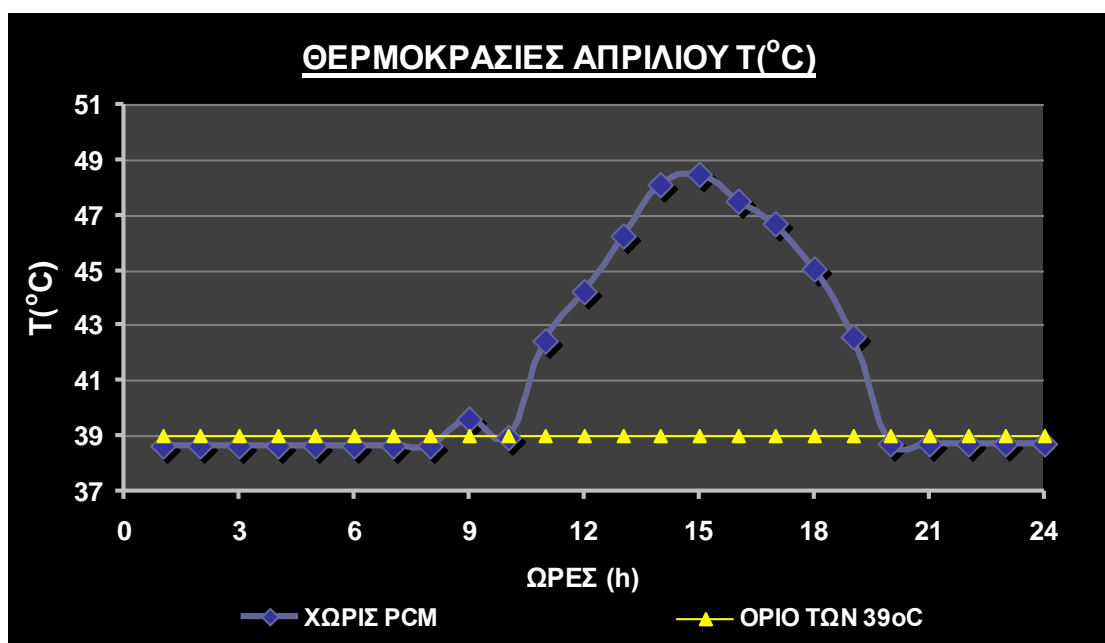
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου



Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Φέβρουαρίου



Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει των ωρών για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου



Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει των ωρών για την 21<sup>η</sup> Απριλίου

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάστηκαν οι θερμοκρασίες της δεξαμενής ενός τυπικού ηλιακού θερμοσίφωνα ενώ η κίτρινη γραμμή αποτελεί τη γραμμή του ορίου των 39° C.

## ΗΛΙΑΚΟΣ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΑΣ ΜΕ PCM

Εξετάστηκαν 4 διαφορετικά PCM με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Το 1<sup>ο</sup> PCM είχε εύρος φάσης (39,41) με μέγιστο το  $T_{\max}=40^{\circ}\text{C}$ ,

$$c_{\text{ps}} = 5000 \frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \text{ και } c_{\text{pl}} = 10000 \frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}.$$

- Το 2<sup>ο</sup> PCM είχε εύρος φάσης (39,41) με μέγιστο το  $T_{\max}=40^{\circ}\text{C}$ ,

$$c_{\text{ps}} = 5000 \frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \text{ και } c_{\text{pl}} = 7000 \frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}.$$

- Το 3<sup>ο</sup> PCM είχε εύρος φάσης (40,42) με μέγιστο το  $T_{\max}=41^{\circ}\text{C}$ ,

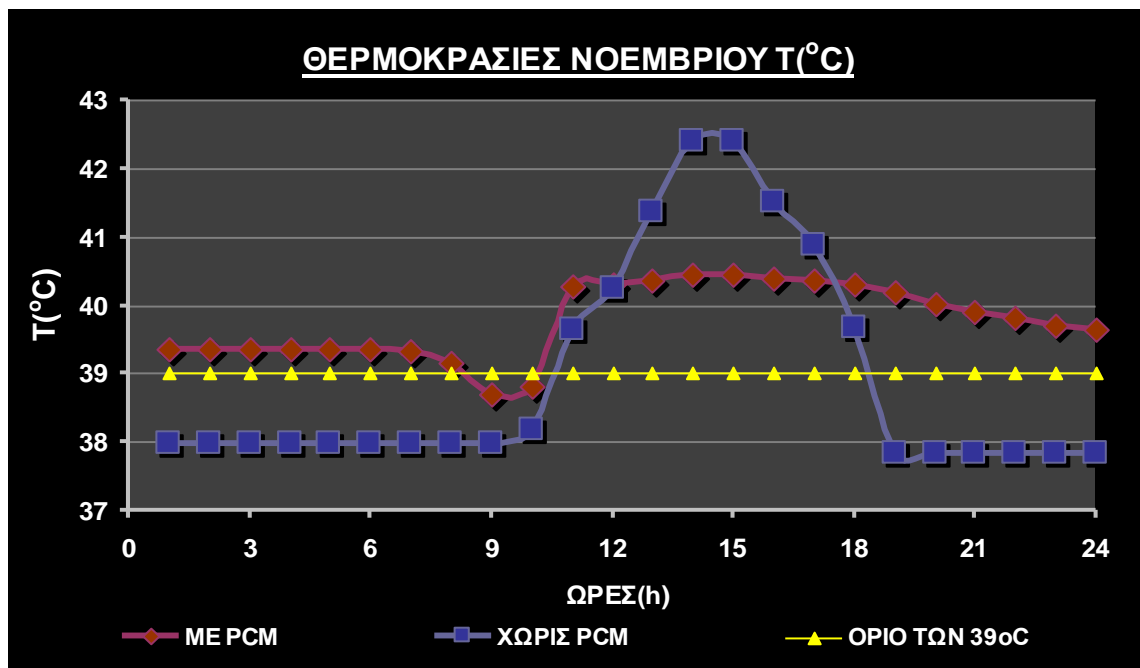
$$c_{\text{ps}} = 5000 \frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \text{ και } c_{\text{pl}} = 10000 \frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \text{ και το}$$

- Το 4<sup>ο</sup> PCM είχε εύρος φάσης (40,42) με μέγιστο το  $T_{\max}=41^{\circ}\text{C}$ ,

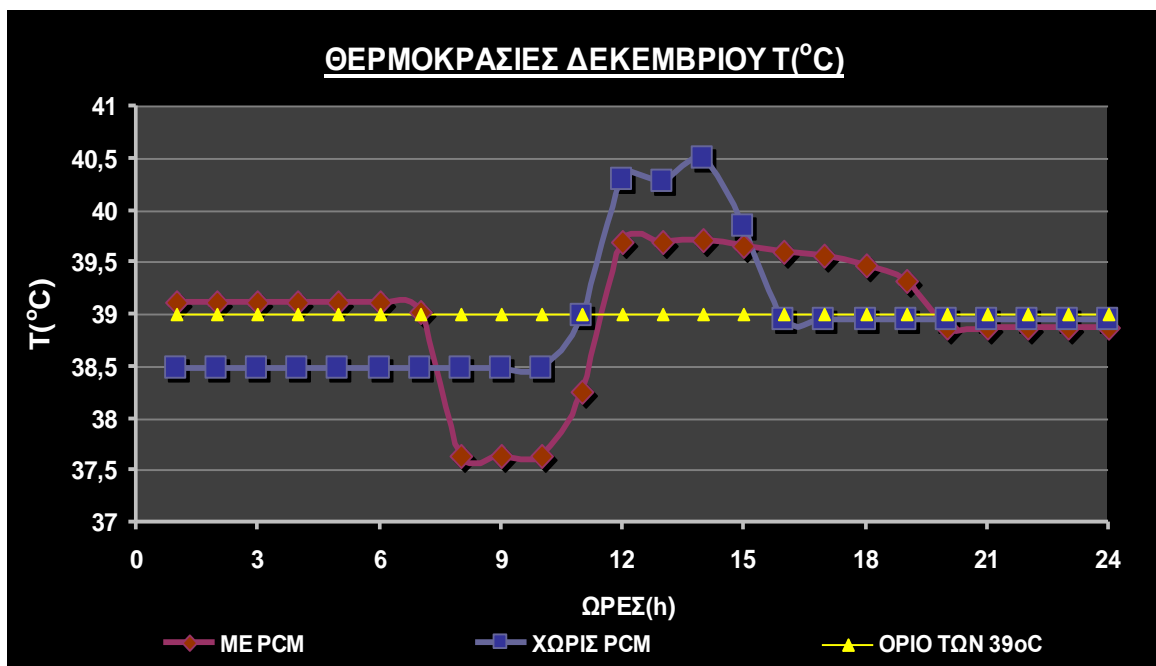
$$c_{\text{ps}} = 5000 \frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \text{ και } c_{\text{pl}} = 7000 \frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}.$$

Χρησιμοποιώντας τους τύπους (46) και (48) και την τριγωνική κατανομή της θερμοχωρητικότητας από τον δοσμένο τύπο έχω τα παρακάτω διαγράμματα για καθένα PCM.

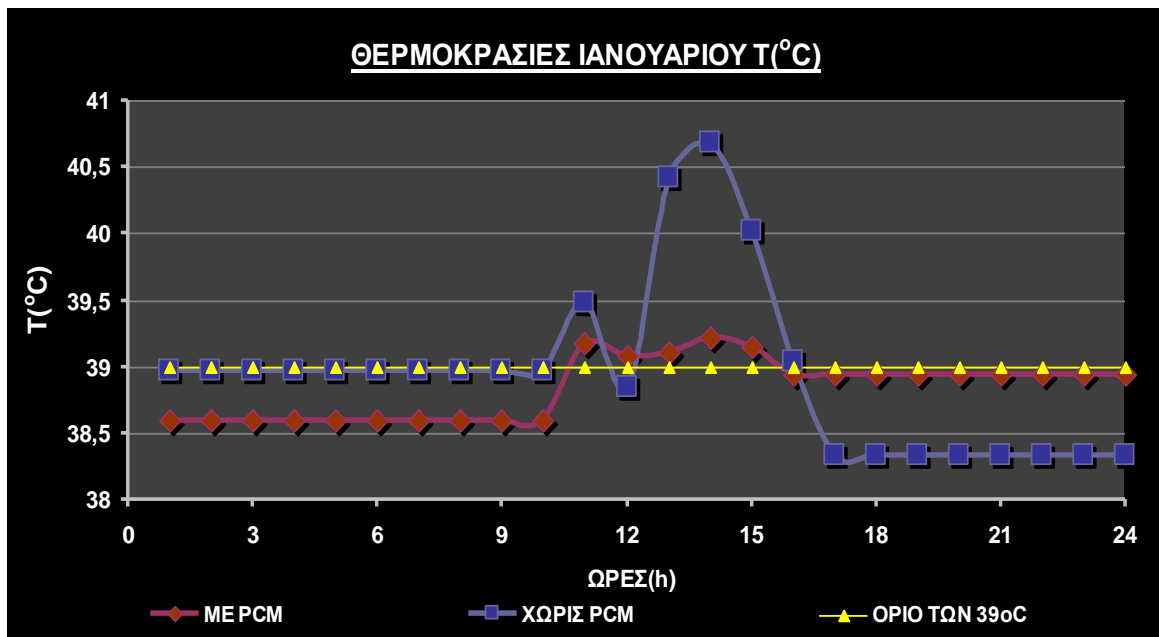
## 1<sup>ο</sup> PCM



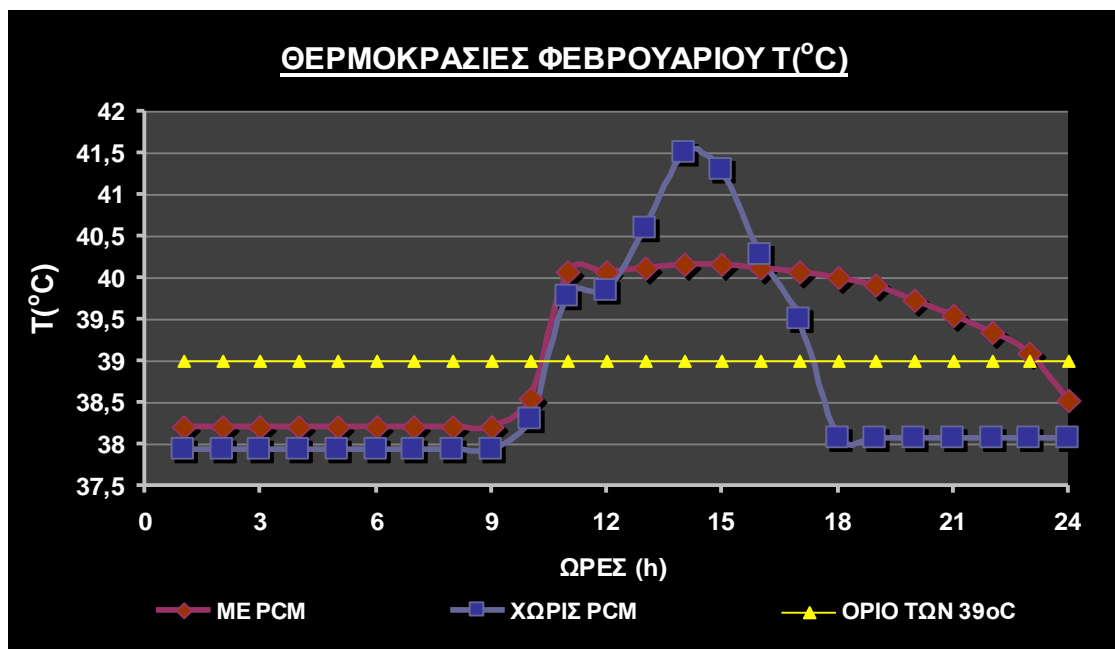
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει των ωρών για την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου με και χωρίς PCM



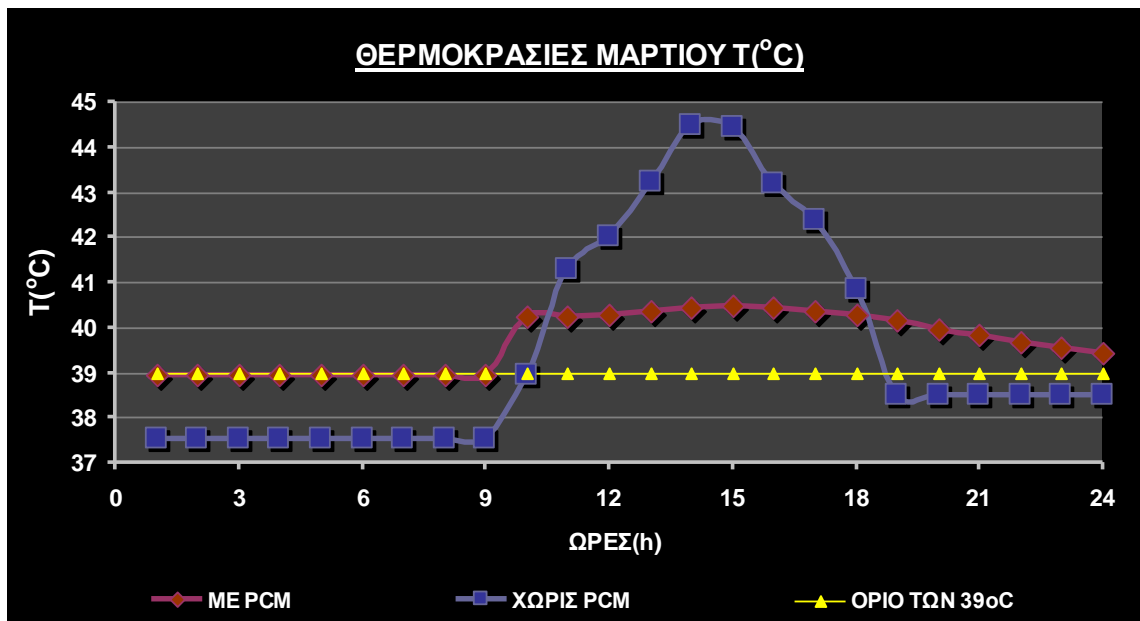
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει των ωρών για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου με και χωρίς PCM



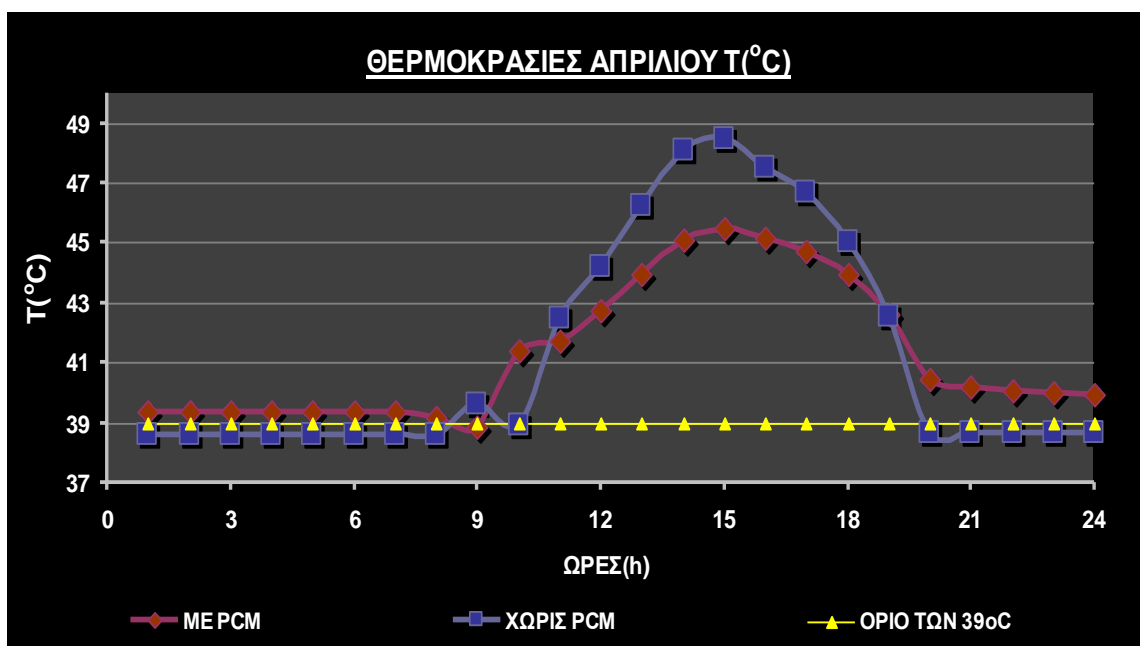
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου με και χωρίς PCM



Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου με και χωρίς PCM



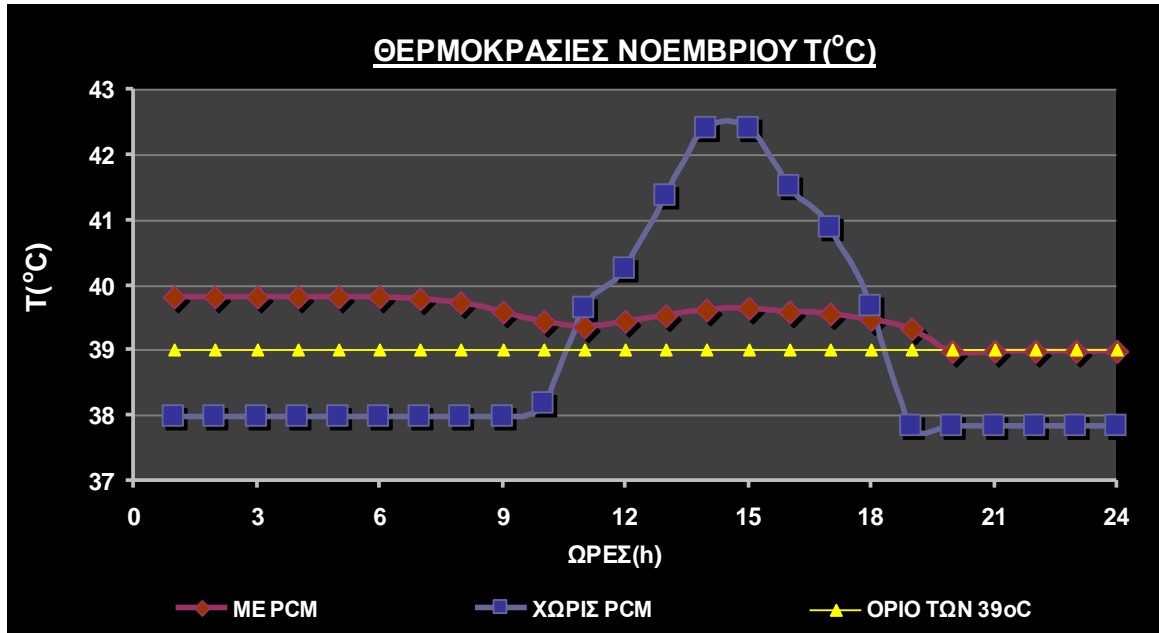
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει των ωρών για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου με και χωρίς PCM



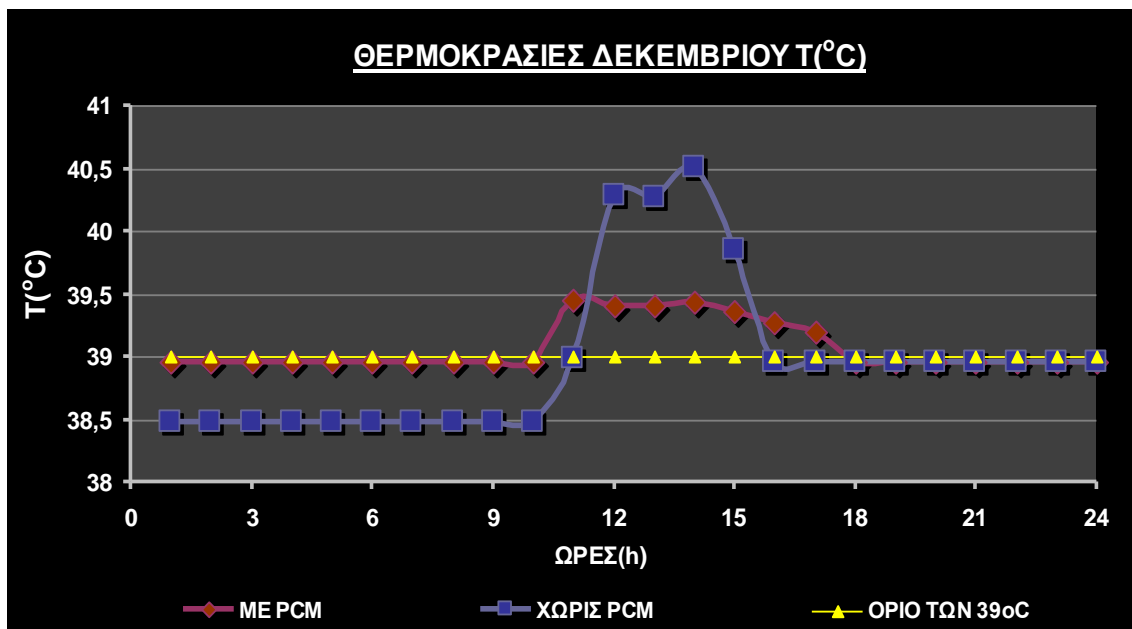
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει των ωρών για την 21<sup>η</sup> Απριλίου με και χωρίς PCM



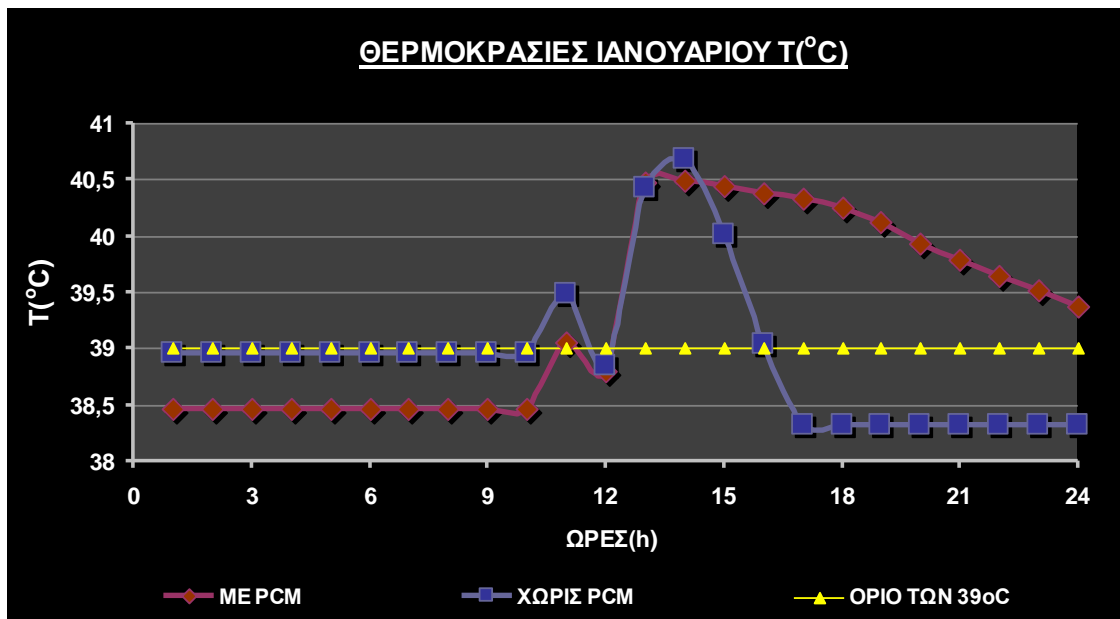
## 2° PCM



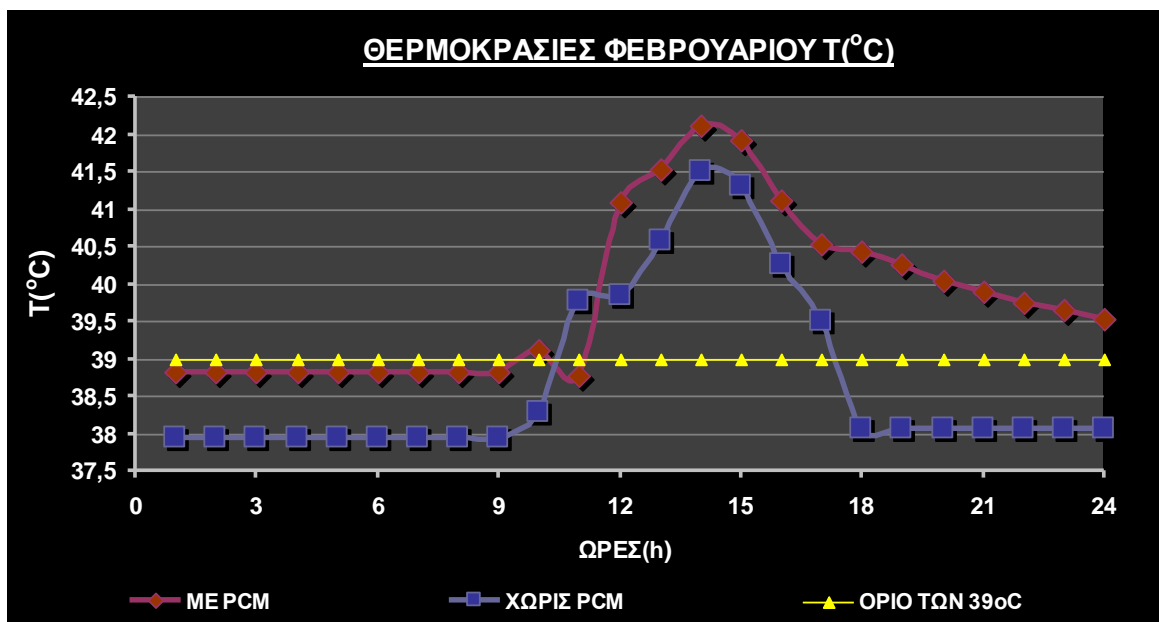
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου με και χωρίς PCM



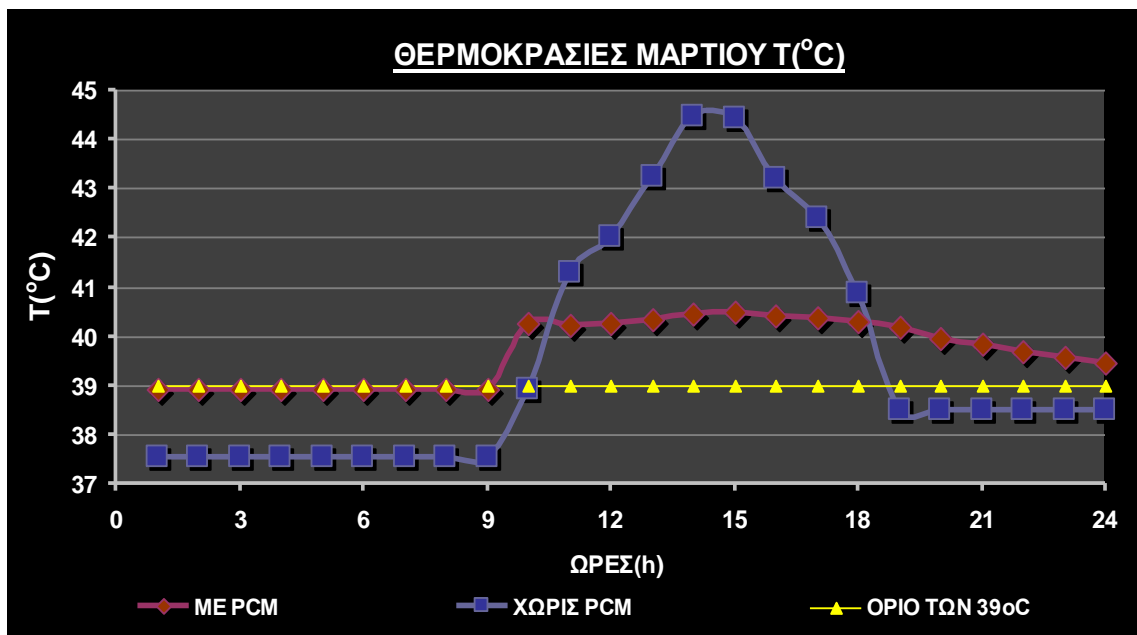
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου με και χωρίς PCM



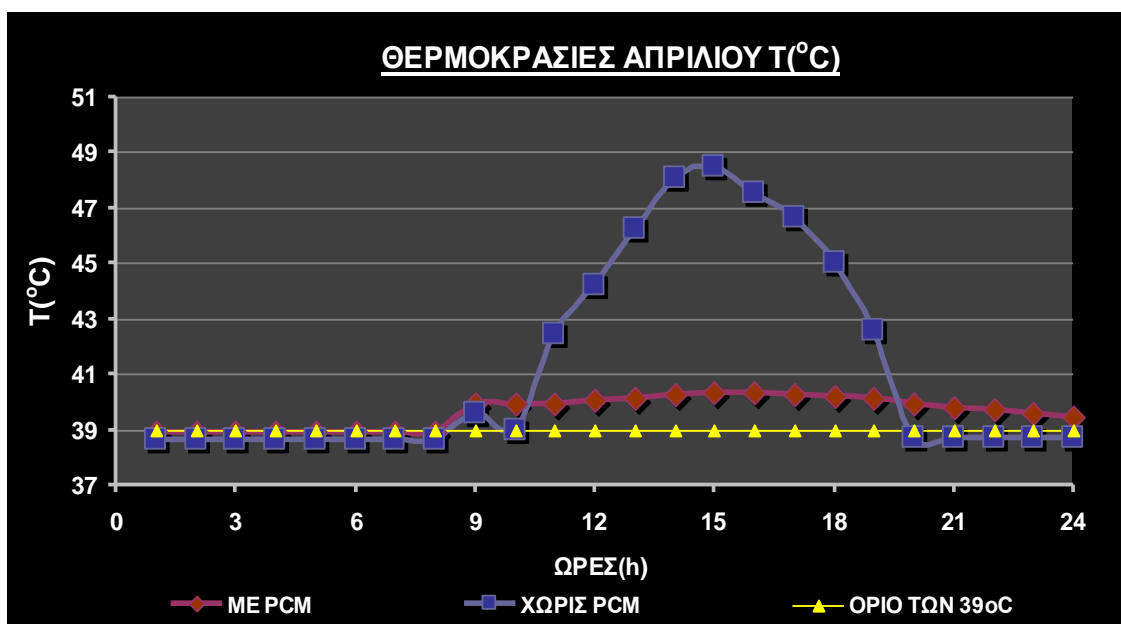
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου με και χωρίς PCM



Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου με και χωρίς PCM

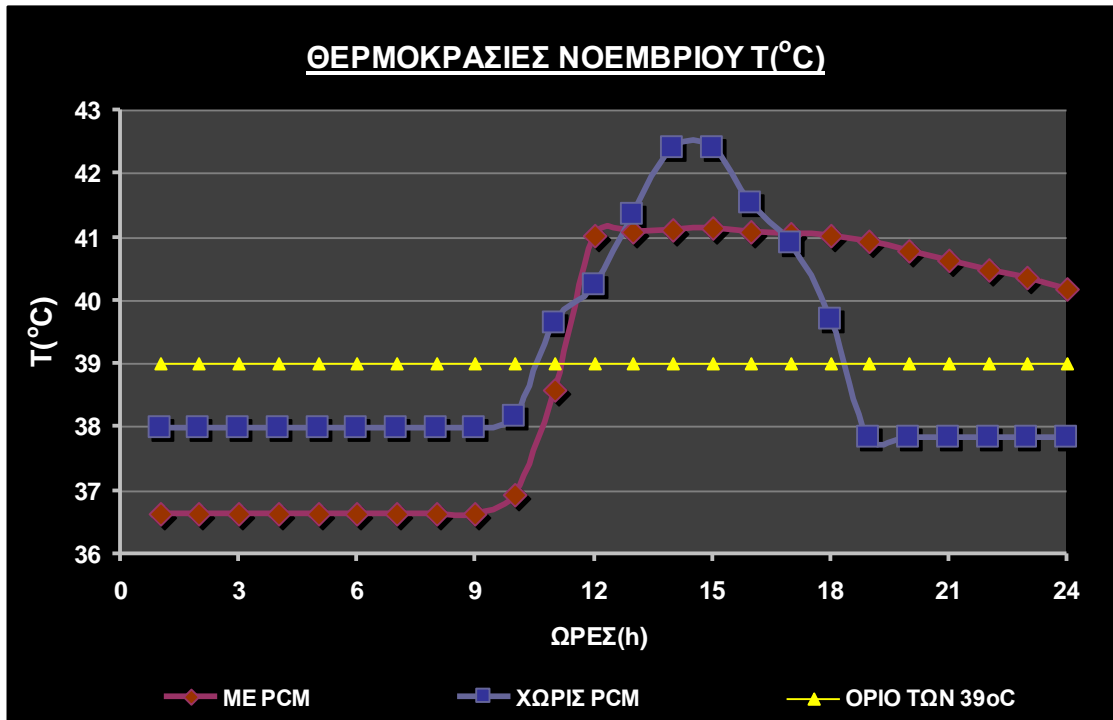


Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου με και χωρίς PCM

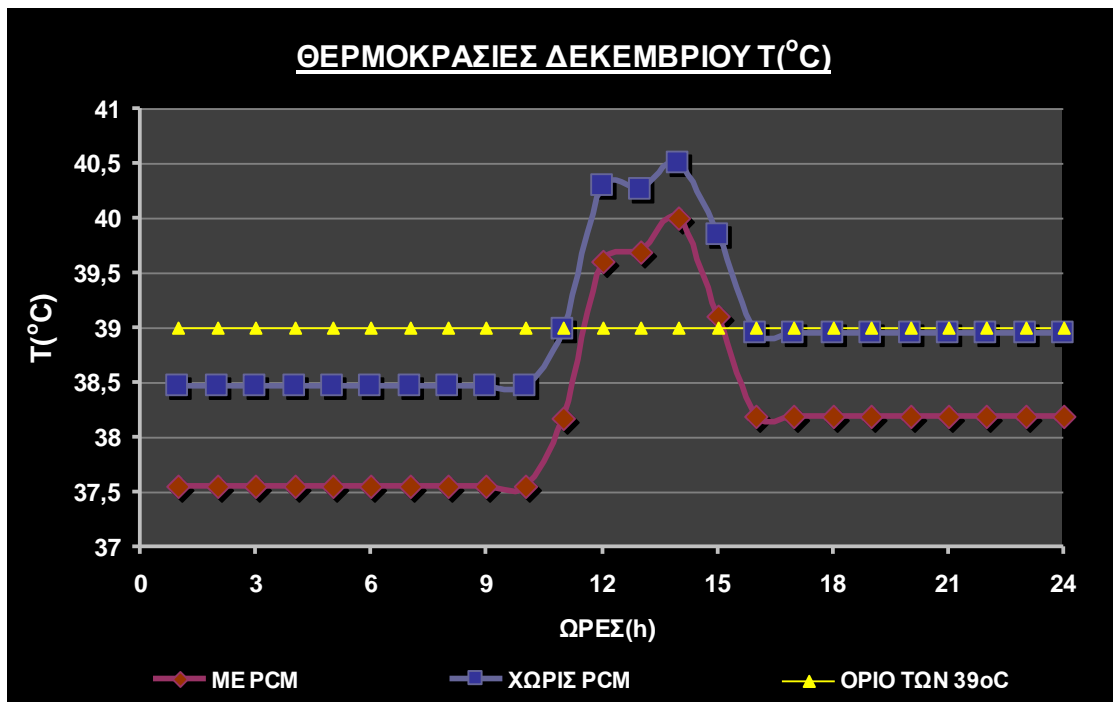


Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Απριλίου με και χωρίς PCM

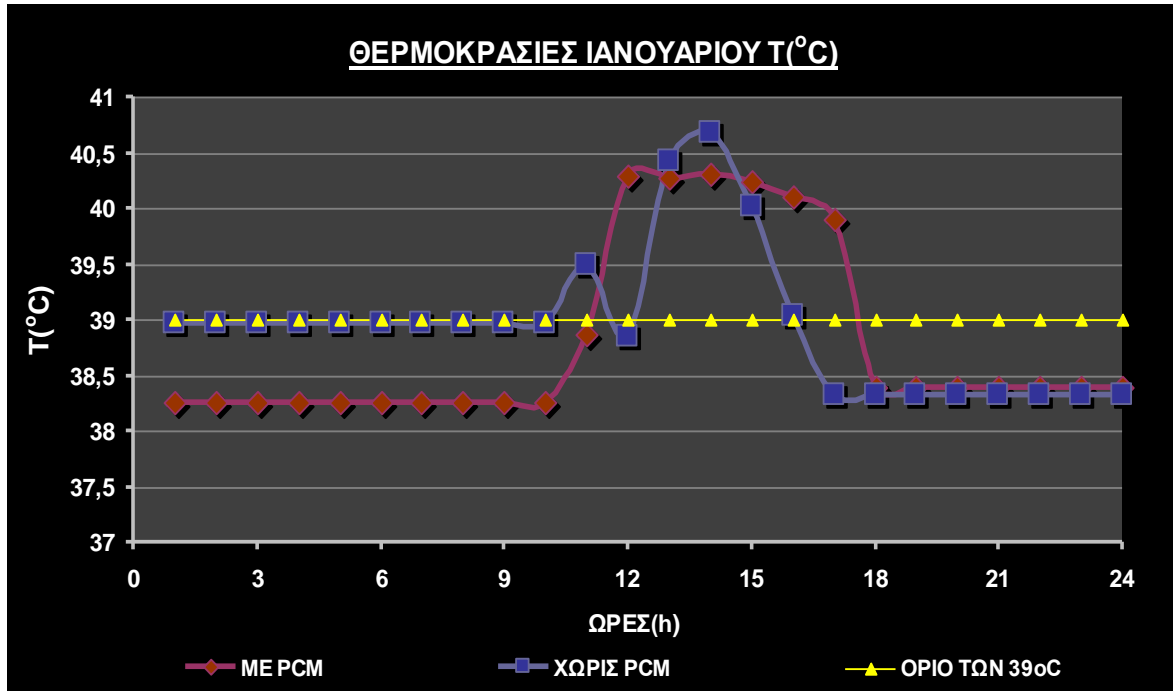
### 3° PCM



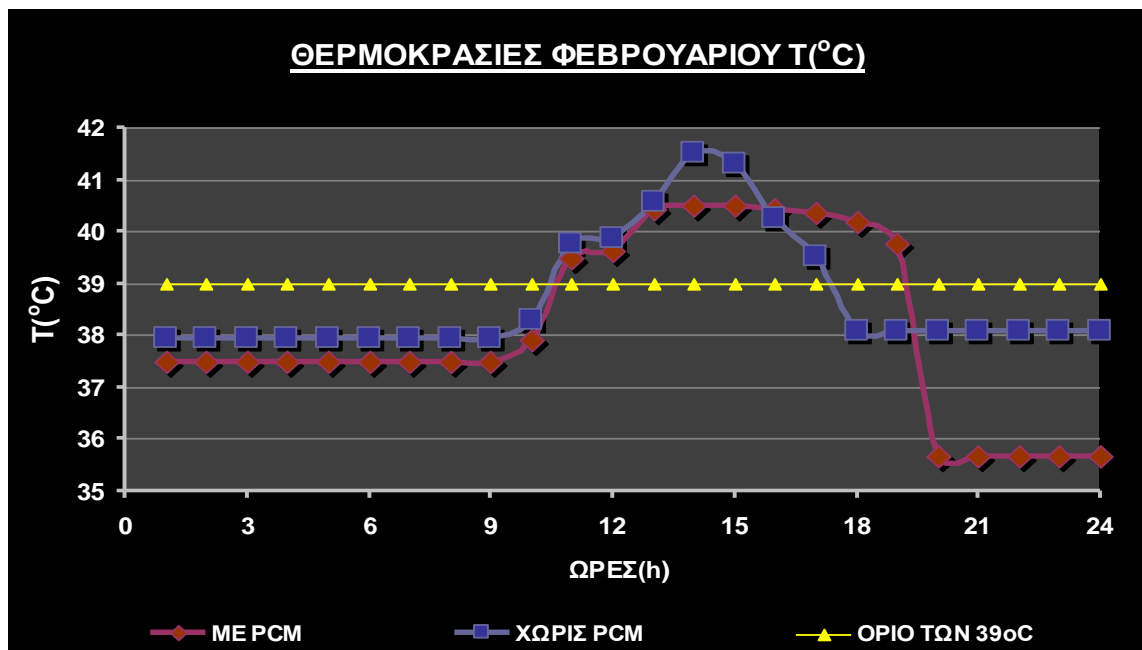
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου με και χωρίς PCM



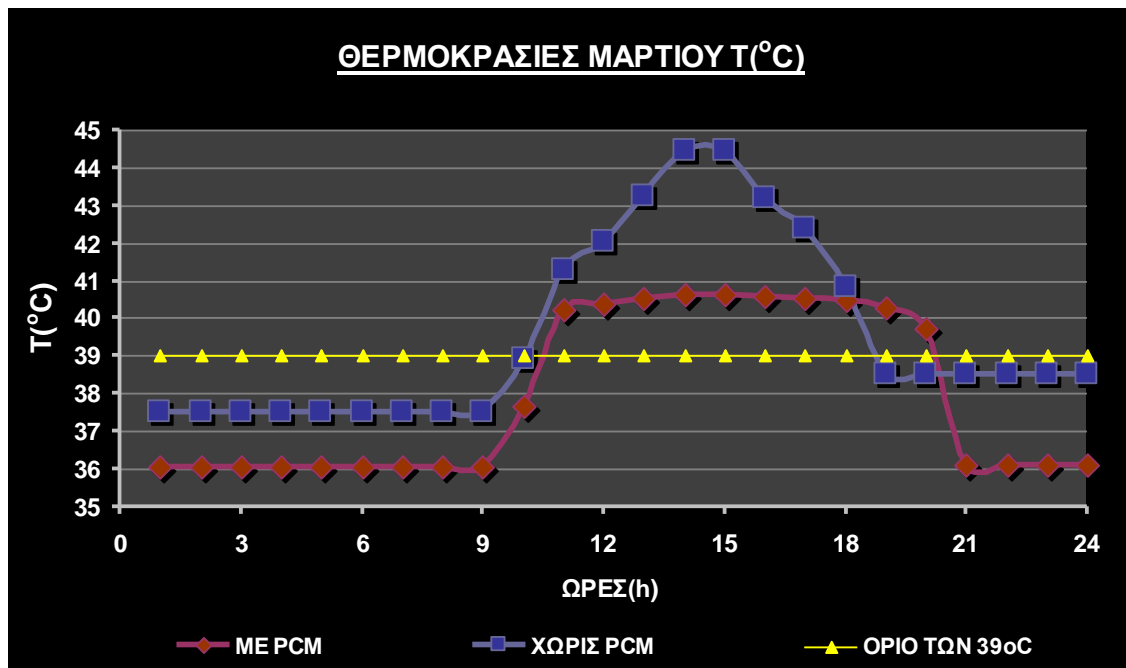
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου με και χωρίς PCM



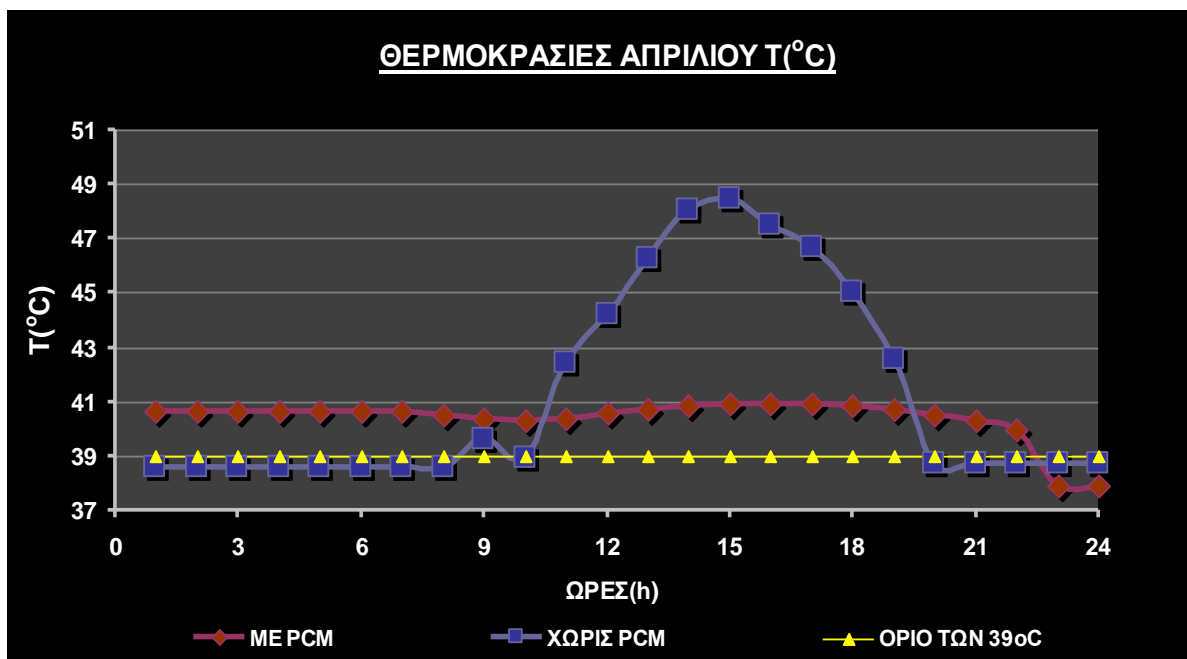
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει των ωρών για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου με και χωρίς PCM



Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει των ωρών για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου με και χωρίς PCM

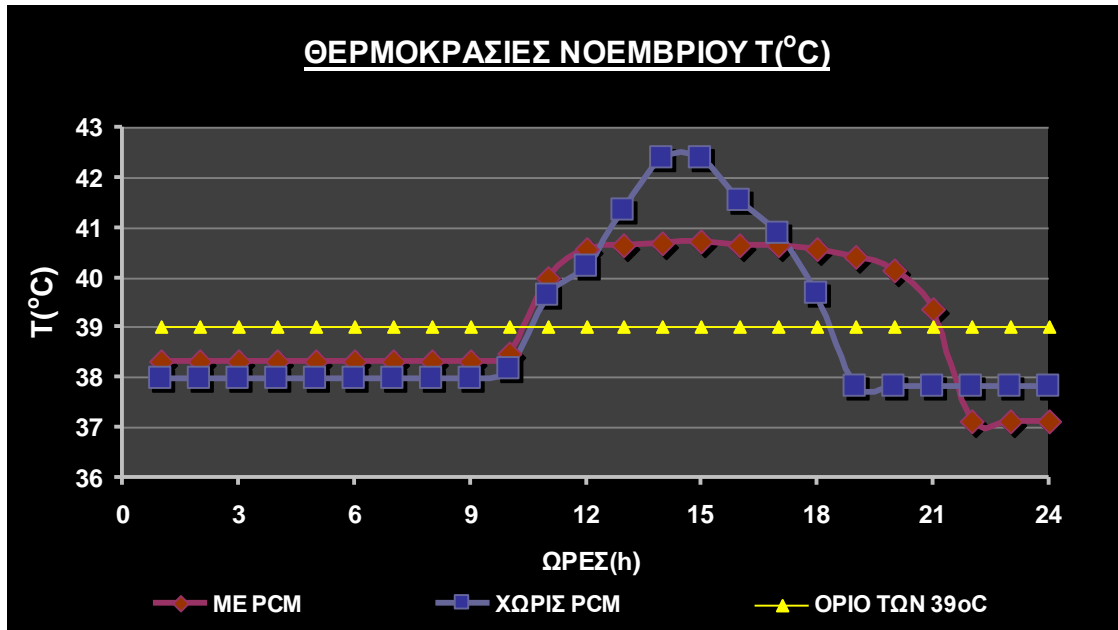


Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου με και χωρίς PCM

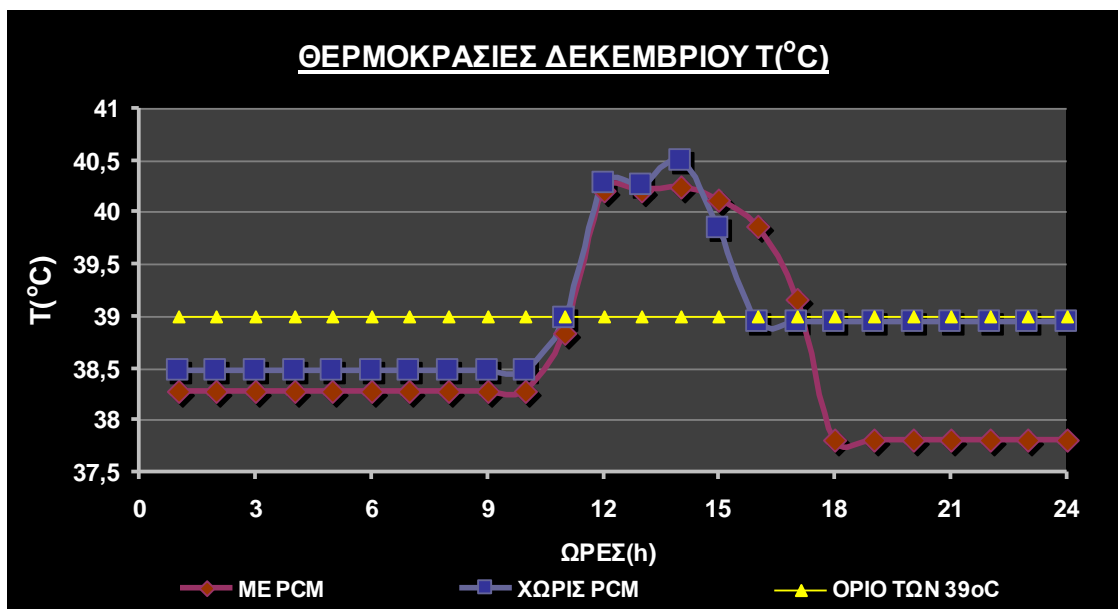


Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Απριλίου με και χωρίς PCM

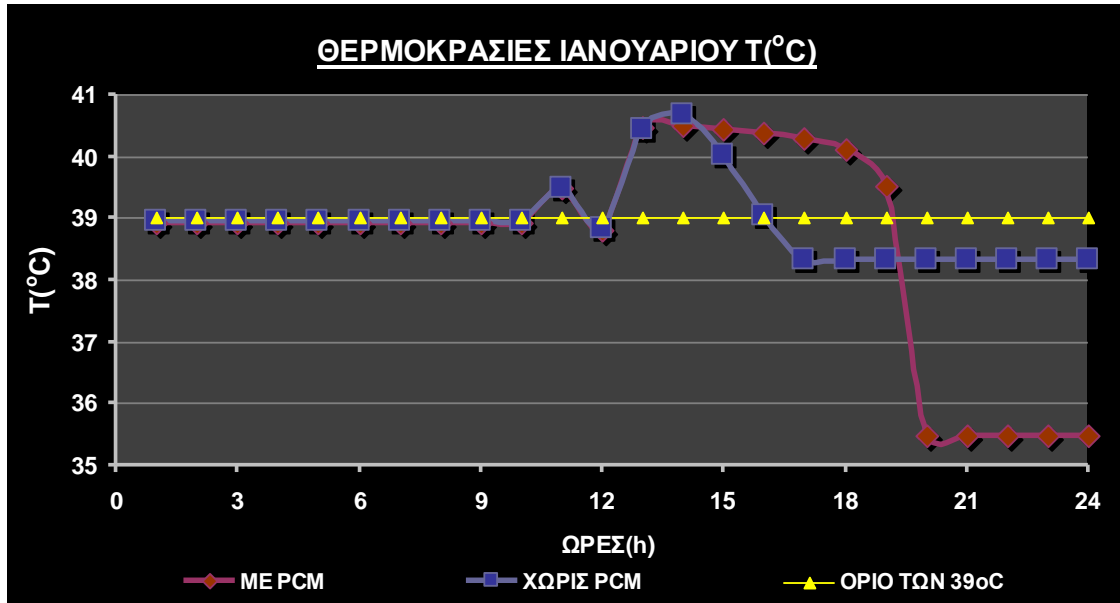
#### 4° PCM



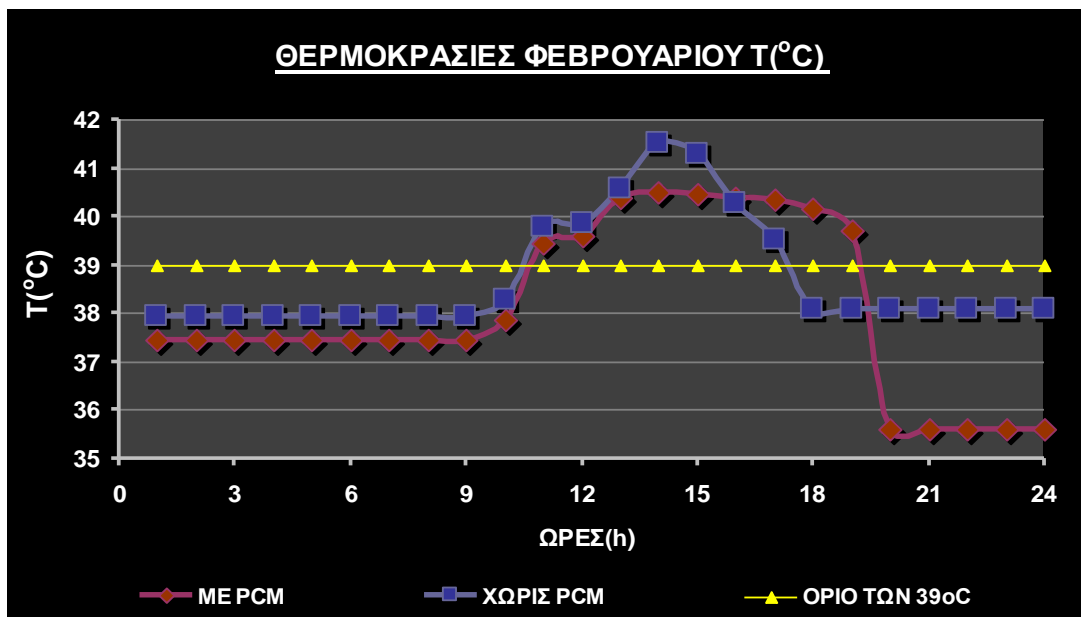
Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου με και χωρίς PCM



Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσεως των ωρών για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου με και χωρίς PCM

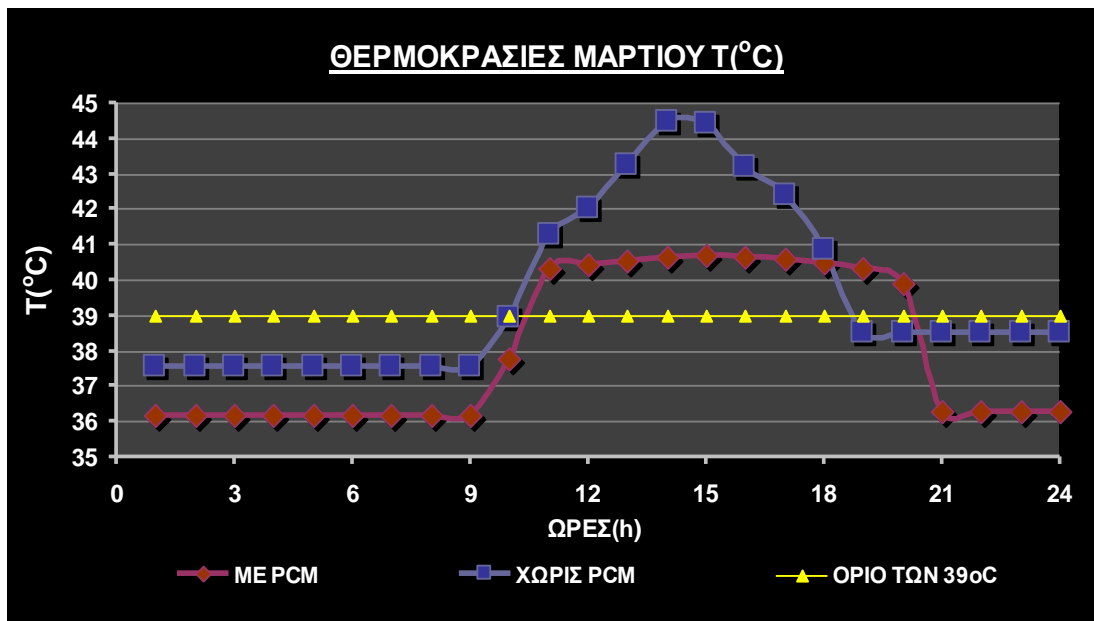


Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει των ωρών για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου με και χωρίς PCM

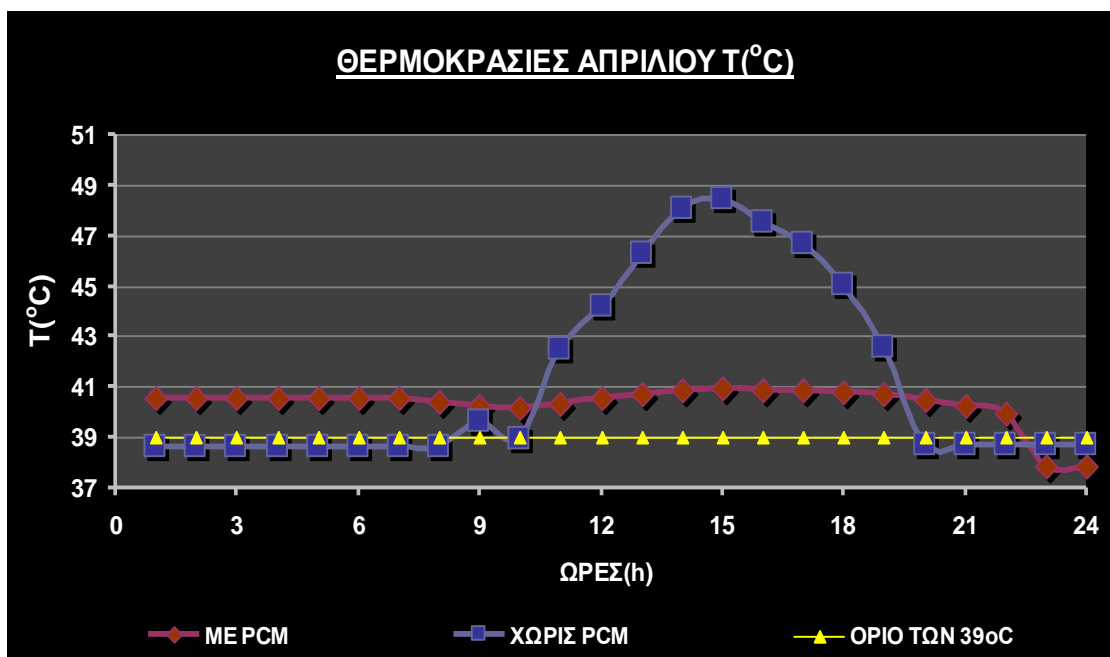


Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει των ωρών για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου με και χωρίς PCM





Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει των ωρών για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου με και χωρίς PCM



Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει των ωρών για την 21<sup>η</sup> Απριλίου με και χωρίς PCM

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η κίτρινη γραμμή αντιστοιχεί στο όριο των 39° C, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, θερμοκρασία που αντιστοιχεί στο κατώτερη θερμοκρασία που μπορώ έχω κατανάλωση χρήσης ζεστού νερού. Παρατηρούμε από τα προηγούμενα διαγράμματα, ότι με τη δεδομένη κατανάλωση, έχουμε το παρακάτω εύρος χρήσης ζεστού νερού για καθένα PCM αλλά και για τον τυπικό ηλιακό θερμοσίφωνα αντίστοιχα:

- **Ο τυπικός ηλιακός θερμοσίφωνα** προσφέρει ζεστό νερό χρήσης τον Νοέμβριο για 8 ώρες περίπου, τον Δεκέμβριο 5, τον Ιανουάριο 4, τον Φεβρουάριο 7, τον Μάρτιο 9 ώρες και τον Απρίλιο 10 ώρες.
- **Για το 1° PCM** ο ηλιακός θερμοσίφωνα προσφέρει ζεστό νερό χρήσης τον Νοέμβριο για 22 ώρες περίπου, τον Δεκέμβριο 16, τον Ιανουάριο 5, τον Φεβρουάριο 13, τον Μάρτιο 15 ώρες και τον Απρίλιο 23 ώρες. Συνεπώς, προσφέρει κέρδος σε σχέση με τον τυπικό ηλιακό θερμοσίφωνα 14 ωρών τον Νοέμβριο, 11 ωρών το Δεκέμβριο, 1 ώρα τον Ιανουάριο, 6 ωρών το Φεβρουάριο, 6 ωρών τον Μάρτιο και 13 ωρών τον Απρίλιο.
- **Για το 2° PCM** ο ηλιακός θερμοσίφωνα προσφέρει ζεστό νερό χρήσης τον Νοέμβριο για 20 ώρες περίπου, τον Δεκέμβριο 8, τον Ιανουάριο 12, τον Φεβρουάριο 13, τον Μάρτιο 15 ώρες και τον Απρίλιο 16 ώρες. Συνεπώς, προσφέρει κέρδος σε σχέση με τον τυπικό ηλιακό θερμοσίφωνα 12 ωρών τον Νοέμβριο, 3 ωρών το Δεκέμβριο, 8 ωρών τον Ιανουάριο, 6 ωρών το Φεβρουάριο, 6 ωρών τον Μάρτιο και 6 ωρών τον Απρίλιο.
- **Για το 3° PCM** ο ηλιακός θερμοσίφωνα προσφέρει ζεστό νερό χρήσης τον Νοέμβριο για 13 ώρες περίπου, τον Δεκέμβριο 4, τον Ιανουάριο 7, τον Φεβρουάριο 9, τον Μάρτιο 10 ώρες και τον Απρίλιο 22 ώρες. Συνεπώς, προσφέρει κέρδος σε σχέση με τον τυπικό ηλιακό θερμοσίφωνα 5 ωρών τον Νοέμβριο, 3 ωρών τον Ιανουάριο, 2 ωρών το Φεβρουάριο, 1 ώρα τον Μάρτιο, 12 ωρών τον Απρίλιο, ενώ δεν προσφέρει κέρδος κατά το μήνα Δεκέμβριο.

- **Για το 4<sup>ο</sup> PCM** ο ηλιακός θερμοσίφωνας προσφέρει ζεστό νερό χρήσης τον Νοέμβριο για 11 ώρες περίπου, τον Δεκέμβριο 6, τον Ιανουάριο 8, τον Φεβρουάριο 9, τον Μάρτιο 10 ώρες και τον Απρίλιο 22 ώρες. Συνεπώς, προσφέρει κέρδος σε σχέση με τον τυπικό ηλιακό θερμοσίφωνα 3 ωρών τον Νοέμβριο, 1 ώρας το Δεκέμβριο, 4 ωρών τον Ιανουάριο, 2 ωρών το Φεβρουάριο, 1 ώρας τον Μάρτιο και 12 ωρών τον Απρίλιο.

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Τα τρία PCM (το 1<sup>ο</sup>, 2<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup>) παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος ζεστού νερού από ένα τυπικό ηλιακό θερμοσίφωνα.
- Το 3<sup>ο</sup> PCM παρατηρώ ότι τον Δεκέμβριο έχει μικρότερο θερμοκρασιακό εύρος από ένα τυπικό ηλιακό θερμοσίφωνα, το μήνα Δεκέμβριο.
- Τα PCM που έχουν θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης (39,41) °C, δηλαδή το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> παρουσιάζουν μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος χρήσης ζεστού νερού σε σχέση με τα PCM που έχουν αντίστοιχα (40,42)°C, δηλαδή το 3<sup>ο</sup> και το 4<sup>ο</sup>
- Τέλος, η δεξαμενή με PCM έχει μικρότερη κατά βάση θερμοκρασία από την αντίστοιχη τυπική εγκατάσταση ηλιακού θερμοσίφωνα, με αποτέλεσμα να έχω καλύτερο βαθμό απόδοσης του συλλέκτη.

Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι ένας ηλιακός θερμοσίφωνας που περιλαμβάνει κατάλληλο PCM (στη συγκεκριμένη περίπτωση το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup>) προσφέρει δυνατότητα χρήσης ζεστού νερού για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ακόμα και κατά τους χειμερινούς μήνες, που η θερμοκρασία και η ακτινοβολία δεν είναι επαρκής για μία τυπική εγκατάσταση.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

[1]

<http://science.duth.gr/modules.php?name=News&file=article&sid=92>

‘Το ενεργειακό πρόβλημα και οικολογικά οχήματα’

[2]

[http://www.diplomatikoperiskopio.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=181:2008-06-15-19-05-42&catid=41:2008-05-31-14-21-01&Itemid=68](http://www.diplomatikoperiskopio.com/index.php?option=com_content&view=article&id=181:2008-06-15-19-05-42&catid=41:2008-05-31-14-21-01&Itemid=68)

‘Το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα’

[3]

<http://www.eoht.info/page/Thomas+Young>

[4]

<http://physics.info/energy/>

[5]

[http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%89%CF%80%CE%B9%CE%B5%CF%82\\_%CE%BC%CE%BF%CF%81%CF%86%CE%AD%CF%82\\_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%89%CF%80%CE%B9%CE%B5%CF%82_%CE%BC%CE%BF%CF%81%CF%86%CE%AD%CF%82_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82)

[6]

<http://www.cea.org.cy/kids%20corner/teachers/Secondary%20Education/Teacher%20Secondary.pdf>

[7]

<http://www.physics4u.gr/energy/windenergy.html>

[8]

[http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AE\\_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1)

[9]

<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CF%89%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%AF%CE%B1>

[10]

[http://www.ee.teihal.gr/labs/pkoukos/PROSTASIA  
PERIBALONTOS/Geothermiki\\_Energieia.htm](http://www.ee.teihal.gr/labs/pkoukos/PROSTASIA_PERIBALONTOS/Geothermiki_Energieia.htm)

[11]

<http://1gym-ag-parask.att.sch.gr/environment/iliako/energy/idr/index.htm>

[12]

<http://www.allaboutenergy.gr/EnergeiaOkeanon.html>

[13]

[http://www.daskaloi.com/perivallon/palirroiki\\_energeia.htm](http://www.daskaloi.com/perivallon/palirroiki_energeia.htm)

[14]

[http://www.daskaloi.com/perivallon/kumatiki\\_energeia.htm](http://www.daskaloi.com/perivallon/kumatiki_energeia.htm)

[15]

<http://aioliki-energeia.wikidot.com/sel4>

[16]

ΕΓΚΥΚΛΟΠΑΙΔΕΙΑ 'ΚΟΣΜΟΣ'

[17]

[http://www.industrynews.gr/index.php?option=com\\_content&view=section&layout=blog&id=18&Itemid=312&limitstart=18](http://www.industrynews.gr/index.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=18&Itemid=312&limitstart=18)

[18]

[http://ape.chania.teicrete.gr/gr/files/hpies\\_1\\_3.ppt](http://ape.chania.teicrete.gr/gr/files/hpies_1_3.ppt)

[19]

Κίμωνας Αντωνόπουλος, Καθηγητής του Ε.Μ.Π., 'ΘΕΡΜΙΚΑ-ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ', Αθήνα 2007

[20]

S. P. Sukhatme (1991), Solar Energy, Principles of Thermal Collection and Storage, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.

[21]

[http://www.europeangreencities.com/pdf/TrainingTools/65.%20SOLAR%20ENERGY\\_GR.pdf](http://www.europeangreencities.com/pdf/TrainingTools/65.%20SOLAR%20ENERGY_GR.pdf)

[22]

<http://www.allaboutenergy.gr/HliakaSistimata.html>

[23]

[www.cres.gr/kape/education/thermika%20Hliaka.pdf](http://www.cres.gr/kape/education/thermika%20Hliaka.pdf)

[24]

Dincer, Ibrahim (2002), Thermal Energy Storage: Systems and Applications, John Wiley and Sons Ltd

[25]

M.Fatih Demirbas(2006), Thermal energy storage and Phase change Materials: An Overview, Taylor and Francis Group

**[26]**

Ανδρέας Ε. Μοσχάτος Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός, “Ηλιακή Ενέργεια – Συνιστώσες της Ηλιακής Θερμικής Διαδικασίας”, Έκδοση ΤΕΕ, 1992.

**[27]**

[http://en.wikipedia.org/wiki/Phase\\_transition](http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_transition)

**[28]**

Χρήστος Τζιβανίδης, Λέκτορας Ε.Μ.Π., Σημειώσεις της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών για το Μάθημα ‘Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων’, Μάϊος 2006

**[29]**

[http://en.wikipedia.org/wiki/Latent\\_heat](http://en.wikipedia.org/wiki/Latent_heat)

**[30]**

[http://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_of\\_fusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_of_fusion)

**[31]**

Dutt SHARMA†, Hiroaki KITANO and Kazunobu SAGARA† (2006), ‘Phase Change Materials for Low Temperature Solar Thermal Applications’

**[32]**

Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi (2009) ‘Review on thermal energy storage with phase change materials and applications’

**[33]**

Mohammed M.Farid, Amar M.Khudhair, Siddique Ali K. Razack, Said Al-Hallaj (2004), ‘A Review on phase change energy storage: materials and applications’

**[34]**

Belen Zalba, Jose Marin, Luisa F. Cabeza, Harald (2003), ‘Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications’

**[35]**

Murat Kenisarin, Khamid Mahkamov (2007), ‘Solar energy storage using phase change materials’

**[36]**

Lane, G.A. (1983), Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I, RC Press Inc.

**[37]**

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

**[38]**

Ghonein,A.A (1991), Building Walls Using Phase Change Materials,Solar Energy, Vol 47

**[39]**

Hawes, D.W., Feldman, D., Banu, D. (1993), “Latent Heat Storage in Building Materials,” Energy and Building, Vol. 20

**[40]**

Feldman, D., Banu, D., Hawes, D.W. (1995), “Development and Application of Organic Phase Change Mixtures in Thermal Storage Gypsum Wallboard,” Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 36

**[41]**

V. Métivaud 1, L. Ventola 1, T. Calvet 1, M.A. Cuevas-Diarte 1, D. Mondieig, Thermal insulation of Buildings using Phase Change Materials, Energy and Buildings

**[42]**

Kunping Lin, Yinping Zhang, Xu Xu, Hongfa Di, Rui Yang, Penghua Qin (2004), “Experimental study of under-floor electric heating system,with shape-stabilized PCM plates, Energy and Buildings”

**[43]**

K. Nagano, S. Takeda , T. Mochida , K. Shimakura , T. Nakamura (2005), ‘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’

**[44]**

Y. Rabin, B.Niv, (1995) “Integrated Solar Collector storage system based on PCM, Solar Energy”, Vol 55

**[45]**

Suat Canbazoğlu , Abdulmuttalip Şahinaslan, Ahmet Ekmekyapar, Ý. Gökhan Aksoy and Fatih Akarsu (2004), “Enhancement of solar thermal using PCM of solar water system”

**[46]**

A.Vijay Padmaraju 1, M.Viginesh 1, N.Nallusamy ‘Comparitive study of sensible and latent heat storage systems integrated with solar water heating units’

**[47]**

M.J. Huang, P.C. Eames and B. Norton (2005), 'Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics'

**[48]**

Belén Zalba, José M. Marín, Luisa F. Cabeza, and Harald Mehling (2004), 'Free-cooling of buildings with phase change materials', International journal of refrigeration, Vol 27

**[49]**

L. Shiley, Z. Neng (2005), 'Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter', Energy and Buildings, Vol 38

**[50]**

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

**[51]**

<http://www.mjm-engineering.com/telecomconsulting.html>

**[52]**

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

**[53]**

[http://en.wikipedia.org/wiki/Base\\_Station\\_Subsystem](http://en.wikipedia.org/wiki/Base_Station_Subsystem)

**[54]**

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

**[55]**

<http://www.polyfoam.com>

**[56]**

<http://www.outlast.de>

**[57]**

L. Vasiliev, V. Burak, "'Latent storage modules for preheating internal combustion petrol engines, Applied Engineering", Vol 20

**[58]**

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

**[59]**

<http://www.bmw.com>



**[60]**

Anant Shukla , D. Buddhi and R.L. Sawhney (2009), Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium: A review

**[61]**

S.D. Sharma, Kazunobu Sagara (2005), LATENT HEAT STORAGE MATERIALS AND SYSTEMS:A REVIEW

**[62]**

<http://www.ydrometal.gr/el/company/interesting-texts/143-2008-07-21-09-21-00>

**[63]**

A.X. Χριστοφοριδης, Β. Χρυσαιφίδης, Β. Σωτηρόπουλος, 'Δυναμική Συμπεριφορά Αποθήκης Θερμότητας σε Στρώμα Υλικών που αλλάζουν φάση, Δ' Επιστημονικά Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Ξάνθη, 1992

**[64]**

A. Heinz, W. Streicher , 'Application of Phase Change Materials and PCM-Slurries for thermal energy storage'

**[65]**

Piia Lamberg (2003) ,Mathematical Modelling and Experimental Investigation of Melting and Solidification in a finned phase change material storage

**[66]**

Harald Mehling<sup>1</sup>, Luisa F. Cabeza<sup>2</sup> and Motoi Yamaha<sup>3</sup> ( 2007) PHASE CHANGE MATERIALS: APPLICATION FUNDAMENTALS

**[67]**

V. R. Voller, (1986 ) 'An implicit enthalpy solution for phase change problems: with application to a binary alloy solidification'

**[68]**

Dariusz Heim (2005), 'Two solution methods of heat transfer with phase change within whole building dynamic simulation'

**[69]**

Κίμωνας Αντωνόπουλος, Καθηγητής του Ε.Μ.Π., 'ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ', Αθήνα 2007