



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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΗΛΙΑΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΟΙΚΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) ΣΕ ΜΙΚΡΟΚΑΨΟΥΛΕΣ**

**Φωτίκα Αγγελική**

**Επιβλέπων Καθηγητής:  
Κ. Αντωνόπουλος**

**Αθήνα, Μάρτιος 2011**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΗΛΙΑΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΟΙΚΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) ΣΕ ΜΙΚΡΟΚΑΨΟΥΛΕΣ**

**Φωτίκα Αγγελική**

**Επιβλέπων Καθηγητής:  
Κ. Αντωνόπουλος**

**Αθήνα, Μάρτιος 2011**



## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την θέρμανση νερού για οικιακές χρήσεις με την χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) και κατατέθηκε ως διπλωματική κατά το χειμερινό εξάμηνο του 2011 στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π..

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Κ. Αντωνόπουλο, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το θέμα αυτό και για την διαθεσιμότητά του να συζητήσει μαζί μου κάθε πρόβλημα που αντιμετώπισα κατά την επεξεργασία του θέματος. Η συμβολή του στην ολοκλήρωση της εργασίας ήταν αποφασιστική και οι συμβουλές και υποδείξεις του πολύτιμες.



## Περιεχόμενα

<b>ΜΕΡΟΣ 1<sup>ο</sup>- ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ .....</b>	<b>11</b>
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....</b>	<b>13</b>
1.1 Λόγοι αποθήκευσης ενέργειας .....	13
1.2 Αποθήκευση ενέργειας .....	13
1.3.Τεχνικοοικονομικά οφέλη από την αποθήκευση ενέργειας .....	14
1.3.1. Η ενεργειακή μεταφορά .....	14
1.3.2. Η αποταμίευση των δικτύων .....	15
1.4. Μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας.....	15
1.4.1. Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας .....	16
1.4.2. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας .....	16
1.4.3. Αποθήκευση θερμικής ενέργειας .....	16
1.4.3.1 Αισθητή θερμότητα .....	17
1.4.3.2. Λανθάνουσα θερμότητα .....	18
1.4.3.3. Αντιστρέψιμες ενδοχημικές αντιδράσεις .....	20
1.5. Κριτήρια επιλογής μεθόδου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας .....	20
<b>Κεφάλαιο 2: Αποθήκευση αισθητής θερμότητας .....</b>	<b>23</b>
2.1. Υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.....	23
2.2. Υγρά μέσα αποθήκευσης.....	23
2.2.1. Νερό .....	23
2.2.1.1. Θερμική διαστρωμάτωση του νερού .....	24
2.2.2. Έλαια μεταφοράς θερμότητας .....	26
2.2.3 Ανόργανα τήγματα άλατος.....	26
2.3 Στερεά μέσα αποθήκευσης .....	26
<b>Κεφάλαιο 3: Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας-Υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) 29</b>	
3.1. Γενικά για τα PCMs.....	29
3.2. Κατηγοριοποίηση των PCMs .....	30
3.3.Οργανικά υλικά αλλαγής φάσης.....	33
3.3.1.Παραφίνες .....	33
3.3.2. Μη –παραφίνες .....	35
3.4. Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης.....	36
3.4.1. Ένυδρα άλατα .....	37

3.4.2 Μεταλλικά υλικά αλλαγής φάσης .....	38
3.4.3 Ευτηκτικά υλικά .....	39
3.2 Μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων των PCMs .....	39
3.2.1 Μέθοδος T-history .....	40
3.2.2. Μέθοδος διαφορικής θερμιδομετρικής σάρωσης (DSC) .....	41
3.2.3. Μέθοδος διαφορικής θερμικής ανάλυσης (DTA).....	44
3.2.4 Μέθοδος double-cell.....	46
3.6. Συμβατότητα των PCM με άλλα υλικά .....	47
3.7. Βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας των PCM.....	48
<b>Κεφάλαιο 4: Μοντέλα προσομοίωσης αλλαγής φάσης .....</b>	<b>53</b>
4.1 Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης φαινομένων μεταφοράς .....	53
4.1.1. Μέθοδος ενθαλπίας.....	54
4.1.2. Μέθοδος ισοδύναμης θερμοχωρητικότητας.....	57
4.1.3 Μέθοδος μετασχηματισμού της θερμοκρασίας (temperature-transforming) .....	59
4.2. Προβλήματα συμπεριφοράς των PCM.....	61
4.2.1. Φαινόμενο υπέρψυξης (Supercooling) .....	61
4.2.2 Φαινόμενο διαχωρισμού φάσης.....	62
4.2.3. Απώλεια ιδιοτήτων σε εκτεταμένους κύκλους φόρτισης .....	63
<b>Κεφάλαιο 5: Ενθυλάκωση (encapsulation) υλικών αλλαγής φάσης (PCMs). .....</b>	<b>65</b>
5.1. Χαρακτηριστικά των μέσων συγκράτησης .....	65
5.2 Μακρο-ενθυλάκωση (macro-encapsulation) .....	65
5.3. Μικρο-ενθυλάκωση (micro-encapsulation).....	66
5.3.1. Μέθοδοι παραγωγής των μικροκάψουλων .....	68
5.3.1.1. Air-suspension coating .....	68
5.3.1.2. Ξήρανσης ψεκασμού (Spray drying).....	69
5.3.1.3. Ενδιάμεσος πολυμερισμός .....	69
5.3.1.4. Κανονικός πολυμερισμός .....	70
5.3.2. Υποψήφια υλικά αλλαγής φάσης για μικροενθυλάκωση.....	70
<b>Κεφάλαιο 6: Εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) .....</b>	<b>73</b>
6.1. Εφαρμογές στα κτίρια .....	73
6.1.1. Παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας .....	73
6.1.1.1. Εφαρμογή σε τοίχους ή άλλα οικοδομικά υλικά .....	74



6.1.1.2. Εφαρμογή στους υαλοπίνακες/πατζούρια .....	79
6.1.1.3. Εφαρμογές σε παθητικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης.....	80
6.1.1.4 Εφαρμογές στην οροφή.....	81
6.1.2. Ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.....	81
6.1.2.1. Εφαρμογές σε ενεργητικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης.....	82
6.1.2.2. Εφαρμογές στην οροφή.....	83
6.2. Εφαρμογές στους ηλιακούς θερμοσίφωνες.....	84
6.3. Θέρμανση αέρα με ηλιακή ενέργεια .....	88
6.4. Ηλιακές κουζίνες .....	90
6.5. Χρήση PCM σε φωτοβοταϊκά συστήματα .....	91
6.7. Εφαρμογές στις μεταφορές.....	91
6.8. Εφαρμογές στην ιατρική .....	92
6.9. Εφαρμογές σε ηλεκτρονικούς εξοπλισμούς και στην αυτοκινητοβιομηχανία.....	93
6.10. Εφαρμογές στην ενδυμασία.....	93
<b>ΜΕΡΟΣ 2<sup>ο</sup> -ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....</b>	<b>95</b>
<b>Κεφάλαιο 7: Χαρακτηριστικά 21<sup>ης</sup> ημέρας κάθε μήνα.....</b>	<b>97</b>
7.1. Περιγραφή συστήματος και αρχές λειτουργίας.....	97
7.1.1 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης.....	98
7.1.2. Δεξαμενή αποθήκευσης .....	101
7.2. Χαρακτηριστικά της μελετώμενης εγκατάστασης .....	102
7.3 Υπολογισμός της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας $T_a$ .....	103
7.4. Υπολογισμός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη .....	104
<b>Κεφάλαιο 8: Συμπεριφορά υλικού αλλαγής φάσης (PCM).....</b>	<b>117</b>
8.1. Υπολογισμός θερμοχωρητικότητας του PCM, της τελικής θερμοκρασίας του και της ωφέλιμης ενέργειας.....	117
8.3. Μεταβολή χαρακτηριστικών εγκατάστασης.....	130
8.4. Μεταβολή του χρονικού βήματος των μετρήσεων.....	139
8.5. Εφαρμογή της εγκατάστασης για θέρμανση νερού οικιακής χρήσης .....	142
<b>Κεφάλαιο 9: Σύγκριση αποθηκευτικών μέσων: Καθαρό νερό με PCM.....</b>	<b>148</b>
9.1. Θερμοκρασίας του νερού και ωφέλιμη ενέργεια.....	148
<b>Κεφάλαιο 10: Συμπεριφορά του υλικού αλλαγής φάσης (PCM) σε μεταβολές των ιδιοτήτων του.....</b>	<b>167</b>
10.1. Μεταβολή περιοχής αλλαγής φάσης.....	167

10.2. Μεταβολή της λανθάνουσας θερμότητας τήξης $H$ .....	172
10.3. Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας $C_p$ .....	175
<b>Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα</b> .....	<b>179</b>
<b>Παράρτημα</b> .....	<b>180</b>
Βιβλιογραφία.....	189

## **ΜΕΡΟΣ 1<sup>ο</sup>- ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ**



# **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή**

## **1.1 Λόγοι αποθήκευσης ενέργειας**

Η αναζήτηση μεγαλύτερων ποσών ενέργειας που προβάλλονται για την ανάπτυξη της οικονομίας, η αβεβαιότητα που συνδέεται με την τιμολόγηση των φυσικών καυσίμων και παράλληλα η συνειδητοποίηση των περιβαλλοντολογικών προβλημάτων που έχουν προκύψει συμβάλουν στην αναθεώρηση των διάφορων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Λόγω του προβλήματος της μη προβλεψιμότητας της απόδοσης των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, απαιτούνται αυτά τα συστήματα να διαθέτουν αξιόπιστες και αποδοτικές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Μεταξύ των διάφορων μορφών ενέργειας, η θερμική ενέργεια αντιμετωπίζεται ευρέως στη φύση ως ηλιακή ακτινοβολία, γεωθερμική ενέργεια και τα θερμικά επίπεδα στους ωκεανούς. Η θερμική ενέργεια είναι επίσης ένα δευτερεύον προϊόν ενός μεγάλου αριθμού συστημάτων μετατροπής ενέργειας. Παρά την αφθονία της, η θερμική ενέργεια είναι γενικά ταξινομημένη ως μορφή ενέργειας χαμηλής βαθμίδας και συνδέεται με την σπατάλη που πραγματοποιείται στις βιομηχανικές διαδικασίες. Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας μπορεί απλά να χρησιμεύσει ως ένας σταθμός εκμετάλλευσης προτού χρησιμοποιηθεί κατάλληλα ή μπορεί να αποτελέσει ένα μέσο θερμικής υποστήριξης στα κτίρια, διατήρηση της ενέργειας στους διάφορους τομείς της οικονομίας, αύξηση της λειτουργικής ζωής των ηλεκτρονικών συστημάτων ή ακόμα και στην αύξηση της αποδοτικότητας των βιομηχανικών διαδικασιών. [1]

## **1.2 Αποθήκευση ενέργειας**

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα προϊόντα στις μέρες και είναι διαθέσιμη με το χαμηλότερο δυνατό κόστος στις περισσότερες περιπτώσεις. Αυτή τη στιγμή, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας συγκεντρώνεται σε ιδιαίτερα μακρινή απόσταση από τους χρήστες. Το επίπεδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται αρχικά στην πρόβλεψη των καθημερινών και εποχιακών αναγκών, αλλά και, όταν η παραγωγή δεν είναι ικανοποιητική, βασίζεται και στη συμβολή δευτεροβάθμιων τρόπων όπως τις υδραυλικές και θερμικές εγκαταστάσεις. Στην πραγματικότητα, αυτές οι εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν επίσης αποθηκευμένη ενέργεια: νερό για συστήματα αντλησιοταμίευσης, και φυσικά καύσιμα για τις θερμικές εγκαταστάσεις.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η εισαγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή και αιολική, δημιουργούν δυσκολίες στην σταθεροποίηση του δικτύου τροφοδοσίας ηλεκτρικού ρεύματος, κυρίως λόγω της δυσαναλογίας που υπάρχει μεταξύ προσφοράς και ζήτησης. Είναι επομένως κατάλληλο να παραχθεί η ενέργεια, να διαβιβαστεί, να μετατραπεί, και στην συνέχεια να αποθηκευτεί για χρήση της σε περίπτωση αυξημένης ζήτησης. Έτσι λοιπόν η αποθήκευση της ενέργειας έχει γίνει επιτακτική ανάγκη. Αλλά η ηλεκτρική ενέργεια είναι δύσκολο να αποθηκευθεί δεδομένου ότι απαιτείται δαπανηρός και ογκώδης εξοπλισμός.

Είναι χρήσιμο να λάβουμε υπόψη μας ότι η συγκεντρωτική παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός σύνθετου συστήματος παραγωγής και μετάδοσης ενέργειας, πραγματοποιώντας ελάχιστη αποθήκευση (σήμερα, η ικανότητα αποθήκευσης είναι παγκοσμίως περίπου 90GW μιας συνολικής παραγωγής 3400 GW, ή κατά προσέγγιση 2.6%). Πριν το 1980 οι μέθοδοι μετατροπής ενέργειας για την αποθήκευση της ήταν εξαιρετικά δαπανηρές, αναξιόπιστες, ή απλά δεν χρησιμοποιούνταν. Μπορεί τώρα να βεβαιωθεί ότι η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί, ακόμα κι αν πρόκειται για έμμεση αποθήκευση. Αλλά αυτό απαιτεί το κόστος της επένδυσης και το λειτουργικό κόστος να διατηρούνται σε αποδεκτά επίπεδα, και τα περιβαλλοντικά ζητήματα έχουν ληφθεί υπόψη. [2]

### **1.3.Τεχνικοοικονομικά οφέλη από την αποθήκευση ενέργειας**

Τα κύρια τεχνικοοικονομικά πλεονεκτήματα που κάνουν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μια ενδιαφέρουσα επιχείρηση είναι τα εξής:

#### **1.3.1. Η ενεργειακή μεταφορά**

Η ενδιάμεση ενέργεια που λαμβάνεται από την ηλεκτρική ενέργεια, μέσω του μετασχηματισμού ενός χαμηλού κόστους πρωταρχικής ενέργειας, που χρησιμοποιείται στις συνηθισμένες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, θα αποθηκευτεί και θα χρησιμοποιηθεί σε κάποια άλλη ώρα αιχμής. Υπάρχουν δύο τρόποι παραγωγής ενέργειας για τους οποίους η αποθήκευση είναι σημαντική:

- Η συμβατική παραγωγή ενέργειας, η αποθήκευση της οποίας θα μπορούσε να αντισταθμίσει μια προσωρινή απώλεια παραγωγής ενέργειας μιας παραγωγικής μονάδας και να εκπληρώσει μια εμπορική υποχρέωση του προ-πωλημένου ενεργειακού ανεφοδιασμού, και να αποφύγει τις ποινικές ρήτρες. Το μέγεθος της ισχύος είναι συγκρίσιμο με αυτό που ορίζεται και η ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας πρέπει να

είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ της επιθυμητής διάρκειας της εφεδρικής ισχύος και των πιθανών ποινικών ρητρών.

- Η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, η αποθήκευση της οποίας προσθέτει την αξία στην παρεχόμενη ενέργεια καθιστώντας αυτόν τον τύπο ενέργειας προβλέψιμο (π.χ. η διανομή της ηλεκτρικής ισχύος κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής). Εντούτοις, το κόστος της αποθήκευσης πρέπει να εξεταστεί. Η αποθηκευμένη ισχύς μπορεί να ικανοποιήσει μια μερίδα της ονομαστικής παραγωγικής ικανότητας, ενώ η ενέργεια πρέπει να είναι διαθέσιμη ως αποτέλεσμα συμβιβασμού.[2]

### **1.3.2. Η αποταμίευση των δικτύων**

Τα δίκτυα ισχύος αποτελούνται από πολλές μονάδες, διάφορα επίπεδα γραμμών μετάδοσης και διανομής, σταθμούς και υποσταθμούς, και έναν μεγάλο αριθμό καταναλωτών με διαφορετικές ανάγκες.

Η κατανάλωση ισχύος από τους χρήστες, κατά τη διάρκεια της ημέρας, χαρακτηρίζεται από τη διακύμανση, που σημαίνει ότι η ελάχιστη κατανάλωση είναι σχεδόν η μισή από μία μέγιστη της αιχμής. Η απαίτηση των τελικών χρηστών, από άποψη αναλογίας μεταξύ του μέγιστου και μέσου επιπέδου ισχύος, φθάνει συχνά 10/1. Αυτό οδηγεί στην υπερ-διαστασιολόγηση του εξοπλισμού παραγωγής και μεταφοράς, τα οποία σχεδιάζονται για κατανάλωση σε ώρες αιχμής παρά για μέσης καθημερινής κατανάλωσης.

Παρόλα αυτά, η εξισορρόπηση των φορτίων βοηθά να μειώσει τις διακυμάνσεις σε ένα ελάχιστο, που καθιστούν τον ανεφοδιασμό πιο προβλέψιμο.

Επιπλέον, η εξισορρόπηση της κατανάλωσης στο τελικό επίπεδο διανομής θα βοηθούσε και να μειωθεί η εγκατεστημένη ισχύ και να προμηθευτεί την μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος από το υπάρχον δίκτυο. Είναι σημαντικό ότι, παρά την εξισορρόπηση της ισχύος, η απαίτηση ισχύος ποικίλλει αρκετά από την εποχή στην εποχή ή από ώρα σε ώρα. Έτσι λοιπόν η αποθήκευση ενέργειας εφαρμόζεται ώστε ο τοπικός ανεφοδιασμός να αντισταθμίζει τις εναλλαγές των φορτίων.[2]

## **1.4. Μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας**

Οι διαφορετικές μορφές ενέργειας που μπορούν να αποθηκευτούν περιλαμβάνουν τη μηχανική, ηλεκτρική και θερμική ενέργεια.

#### **1.4.1. Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας**

Τα συστήματα αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας περιλαμβάνουν την αντλιοταμίευση (PHPS), την ενεργειακή αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (CAES) και τους σφονδύλους-στρεφόμενων μαζών. Οι τεχνολογίες PHPS και CAES μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλης κλίμακα ενεργειακή αποθήκευση ενώ οι σφόνδυλοι είναι καταλληλότεροι για την αποθήκευση ενέργειας μεσαίας κλίμακας. Η αποθήκευση πραγματοποιείται εκτός ωρών αιχμής, αποθηκεύοντας την ισχύ που είναι διαθέσιμη, π.χ. τη νύχτα ή Σαββατοκύριακα. Ωστόσο αποθήκευση ενέργειας δεν πραγματοποιείται όταν απαιτείται ισχύς λόγω ανεπαρκούς παραγωγής από τα εργοστάσια.[3]

#### **1.4.2. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας**

Η αποθήκευση ενέργειας με την βοήθεια μπαταριών είναι ένας τρόπος. Η μπαταρία φορτίζεται συνδέοντας την με την πηγή και μετά το πέρας της αποφόρτισης η αποθηκευμένη χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Ενδεχόμενες εφαρμογές των μπαταριών είναι χρησιμοποίηση τους εκτός των ωρών αιχμής, για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται είτε από ανεμογεννήτριες είτε από φωτοβολταϊκά. Ο διαδεδομένος τύπος μπαταριών αποθήκευσης ενέργειας είναι το οξύ μολύβδου και το Ni-Cd. [3].

#### **1.4.3. Αποθήκευση θερμικής ενέργειας**

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES) έχουν τη δυνατότητα αύξησης της αποτελεσματικότητας του θερμικού ενεργειακού εξοπλισμού και της διευκόλυνσης της μεγάλης κλίμακας μετατροπής. Τα TES είναι χρήσιμα συστήματα για εξισορρόπηση μεταξύ προσφοράς και ζήτησης της ενέργειας.

Υπάρχουν κυρίως δύο τύποι συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Αυτά των συστημάτων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας και των συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Επίσης υπάρχει μία ακόμα κατηγορία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, μέσω της χρήσης των αντιστρέψιμων ενδοχημικών αντιδράσεων.

Μια πλήρης διαδικασία αποθήκευσης θερμότητας περιλαμβάνει τουλάχιστον τρία βήματα: χρέωση, αποθήκευση και εκφόρτιση. Στα πρακτικά συστήματα, μερικά από τα βήματα μπορούν να εμφανιστούν ταυτόχρονα, και κάθε βήμα μπορεί να συμβεί περισσότερο από μία φορά σε κάθε κύκλο αποθήκευσης.



Από άποψη αποθηκευτικών μέσων, υπάρχει μια ευρεία ποικιλία επιλογών ανάλογα με το εύρος των θερμοκρασιών και την εφαρμογή. [4]

#### **1.4.3.1 Αισθητή θερμότητα**

Καθώς η θερμοκρασία μιας ουσίας αυξάνεται, το ενεργειακό περιεχόμενό του επίσης αυξάνεται. Η ενέργεια που απελευθερώνεται (ή απορροφάται) από ένα υλικό καθώς η θερμοκρασία του μειώνεται (ή αυξάνεται) αποκαλείται αισθητή θερμότητα.

Στην αποθήκευση αισθητής θερμότητας (SHS), η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενός στερεού ή ενός υγρού χωρίς να υποβάλλεται σε αλλαγή φάσης. Τα συστήματα SHS κατά την διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης χρησιμοποιούν την μεταβολή της θερμοκρασίας του αποθηκευτικού μέσου. Το ποσό της αποθηκευμένης θερμότητας εξαρτάται από τη συγκεκριμένη θερμότητα του μέσου, την αλλαγή θερμοκρασίας, και την ποσότητα του υλικού αποθήκευσης. Το συνολικό ποσό θερμότητας το οποίο αποθηκεύεται δίνεται από την σχέση:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT = mC_p(T_f - T_i) \quad (1.1)$$

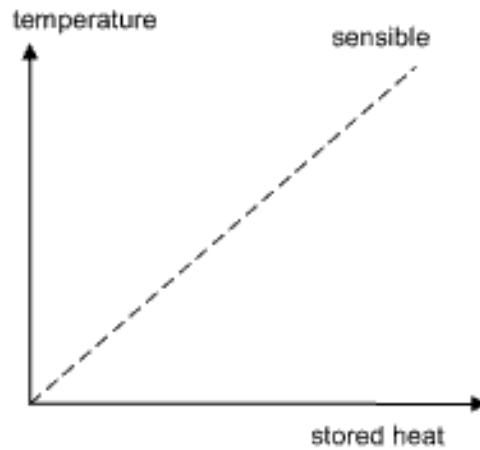
Όπου Q είναι το ποσό θερμότητας που απελευθερώθηκε ή απορροφήθηκε,

m είναι η μάζα του υλικού αποθήκευσης ή απελευθέρωσης θερμότητας,

$T_i$ ,  $T_f$  είναι η αρχική και η τελική θερμοκρασία αντίστοιχα και

$C_p$ , η ειδική θερμοχωρητικότητα του αποθηκευτικού υλικού.

Κατά την αποθήκευση αισθητής θερμότητας η μεταβολή της θερμοκρασίας του αποθηκευτικού μέσου έχει γραμμική εξάρτηση με την θερμότητα που αποθηκεύεται, η μεταβολή των οποίων παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα: [4], [5]



**Σχήμα 1.1:** Αποθήκευση αισθητής θερμότητας [5]

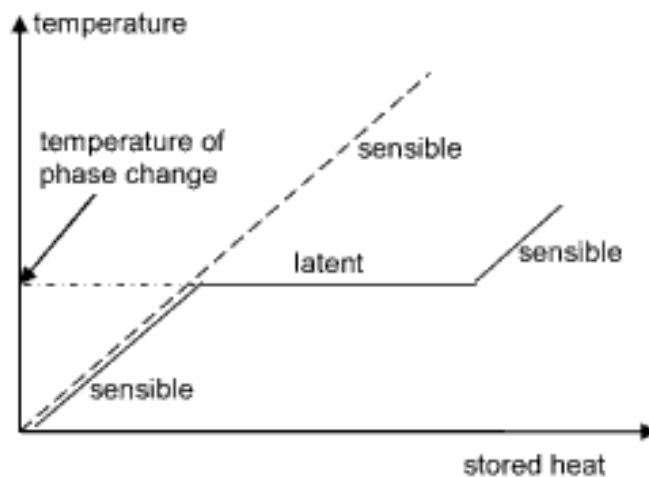
### **1.4.3.2. Λανθάνουσα θερμότητα**

Η αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας βασίζεται στην απορρόφηση θερμότητας ή στην απελευθέρωση θερμότητας όταν ένα υλικό αποθήκευσης θερμότητας υπόκειται σε αλλαγή φάσης.

Αφ' ενός, η ενέργεια που απαιτείται για να μετατρέψει ένα στερεό υλικό σε ένα υγρό υλικό, ή ένα υγρό υλικό σε ένα αέριο (αλλαγή φάσης ενός υλικού) καλείται θερμότητα τήξης στο σημείο τήξης (στερεό στο υγρό) και θερμότητα της εξάτμισης (υγρό στο αέριο), αντίστοιχα. Η λανθάνουσα θερμότητα συνδέεται με αυτές τις αλλαγές φάσης. [4], [5]

Το ποσό της αποθηκευμένης θερμότητας δίνεται από τον τύπο:

$$\begin{aligned}
 Q &= m a_m \Delta h_m + \int_i^m m C_p dT + \int_m^f m C_p dT = \\
 &= m [a_m \Delta h_m + C_{sp} (T_m - T_i) + C_{lp} (T_f - T_m)]
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$



**Σχήμα 1.2:** Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας [5]

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Το σημαντικότερο είναι ότι έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα μάζας και ανά μονάδα όγκου.

Από τις αλλαγές φάσεις στις οποίες υποβάλλεται το υλικό μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει αυτής από στερεό σε υγρό και αντίστροφα. Η μετάβαση από στερεό σε αέριο ή από υγρό σε αέριο παρουσιάζουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης, αλλά οι μεγάλες αλλαγές όγκου τους στη μετάβαση φάσης συνδέονται με προβλήματα τοποθέτησής τους σε δοχεία και για αυτό τον λόγο αποκλείονται από τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης. Οι μεγάλες αλλαγές στον όγκο τους καθιστούν το σύστημα σύνθετο και μη πρακτικό.

Σε αντίθεση η αλλαγή φάσης από στερεή σε υγρή έχει συγκριτικά μικρότερη λανθάνουσα θερμότητα από την αλλαγή φάσης από υγρή σε αέρια φάση. Η αλλαγή φάσης από στερεή κατάσταση σε υγρή περιλαμβάνει μόνο μια μικρή μεταβολή όγκου (< 10%). Η χρήση υλικών που μεταβαίνουν από την στερεή την υγρή φάση έχει αποδειχθεί οικονομικά ελκυστική στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

Οποιοδήποτε σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας πρέπει να έχει τουλάχιστον τις ακόλουθες τρεις ιδιότητες: ένα κατάλληλο PCM με το σημείο τήξης του στο επιθυμητό εύρος θερμοκρασίας, μια κατάλληλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας και ένα κιβώτιο αποθήκευσης συμβατό με το υλικό αλλαγής φάσης. [5]

### **1.4.3.3. Αντιστρέψιμες ενδοχημικές αντιδράσεις**

Η τελευταία κατηγορία αποθήκευσης θερμότητας πραγματοποιείται μέσω της χρήσης των αντιστρέψιμων ενδοθερμικών χημικών αντιδράσεων. Η χημική θερμότητα συνδέεται με αυτές τις αντιστρέψιμες χημικές αντιδράσεις, στις οποίες απαιτείται θερμότητα για να διαχωρίσει το χημικό προϊόν. Όλη αυτή η θερμότητα θα ανακτηθεί αργότερα, όταν πραγματοποιηθεί η αντίδραση σύνθεσης. Το ποσό θερμότητας που θα αποθηκευτεί εξαρτάται από την ποσότητα του αποθηκευτικού μέσου, την ενδοθερμική θερμότητα της αντίδρασης και την έκταση της μετατροπής. Το ποσό θερμότητας που αποθηκεύεται δίνεται από την σχέση:

$$Q = a_r \cdot m \Delta h_r \quad (1.3)$$

Τα πλεονεκτήματα αυτού του μηχανισμού είναι υψηλές ενεργειακές πυκνότητες αποθήκευσης, η μακροχρόνια αποθήκευση κοντά στην περιβαλλοντική θερμοκρασία και η ικανότητα άντλησης θερμότητας. Εν τούτοις, το επίπεδο ανάπτυξης της αντιστρέψιμης θερμοχημικής αντίδρασης (RTR) είναι ήδη σε ένα πολύ αρχικό στάδιο.

Αυτό το είδος αποθήκευσης ενέργειας είναι ελκυστική επιλογή για μακροχρόνιες χρήσεις και θα μπορούσε να προσφέρει σχετικά χαμηλό κόστος. Οι ηλιακές θερμικές τεχνολογίες σε αντίθεση με τις θερμοχημικές αντιδράσεις προσφέρονται για συνεχή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. [5]

## **1.5. Κριτήρια επιλογής μεθόδου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας**

Από τις ανωτέρω μεθόδους, τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας βρίσκουν ήδη εφαρμογές, ενώ τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης με την χρήση αντιστρέψιμων θερμοχημικών αντιδράσεων προτείνονται για χρήση στο μέλλον για εφαρμογές μέσης και υψηλής θερμοκρασίας. Η εφαρμογή στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας καθορίζει τη μέθοδο αποθήκευσης που υιοθετείται. Μερικές από τις εκτιμήσεις, που καθορίζουν την επιλογή της μεθόδου αποθήκευσης, είναι οι ακόλουθες:

- Το εύρος θερμοκρασίας, στο οποίο το σύστημα αποθήκευσης πρέπει να λειτουργήσει.
- Η ικανότητα της αποθήκευσης έχει σημαντική επίδραση στη λειτουργία του υπολοίπου συστήματος. Μια μικρότερη μονάδα αποθήκευσης λειτουργεί σε μια υψηλότερη μέση θερμοκρασία. Αυτό οδηγεί σε έναν μικρότερο εξοπλισμό μεταφοράς θερμότητας σε σύγκριση με ένα σύστημα που έχει μια μεγαλύτερη μονάδα αποθήκευσης. Η γενική παρατήρηση που

μπορεί να γίνει σχετικά με τη βέλτιστη ικανότητα είναι ότι οι «βραχυπρόθεσμες» μονάδες αποθήκευσης, που μπορούν να συναντήσουν διακυμάνσεις για μία περίοδο δύο ή τριών ημερών, έχουν βρεθεί γενικά πιο οικονομικές για την χρήση σε κτίρια.

- Οι απώλειες θερμότητας από την αποθήκευση πρέπει να περιοριστούν στο ελάχιστο. Οι απώλειες θερμότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη μακροπρόθεσμη αποθήκευση.

- ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης.

- Κόστος της μονάδας αποθήκευσης: Αυτό περιλαμβάνει το αρχικό κόστος του μέσου αποθήκευσης, των κιβωτίων, της μόνωσης και της λειτουργικής δαπάνης.

Άλλες εκτιμήσεις περιλαμβάνουν την καταλληλότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται σε κιβώτιο, τα μέσα που υιοθετούνται για τη μεταφορά της θερμότητας από και προς την αποθήκευση και την απαιτήσεων ισχύος για αυτούς τους λόγους. Η αποτελεσματικότητα της μονάδας δίνεται από την σχέση (1). Το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου υπολογίζεται αυτή η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από τη φύση της μονάδας αποθήκευσης. Για μια μονάδα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης, το χρονικό διάστημα είναι λίγες ημέρες, ενώ για μια μονάδα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης μπορεί να είναι μερικοί μήνες ή ακόμα και ένα έτος. Για μια καλά σχεδιασμένη μονάδα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης, η αποδοτικότητα της μονάδας φτάνει το 80%.

$$n = \frac{mC(T-T_0)}{mC(T_\infty-T_0)} \quad (1.4)$$

όπου  $mC$  η συνολική θερμοχωρητικότητα,

$T$  είναι η μέγιστη θερμοκρασία της αποθήκευσης κατά της διάρκεια της αποφόρτισης,

$T_0$  η ελάχιστη θερμοκρασία,

$T_\infty$  η μέγιστη θερμοκρασία στο τέλος της περιόδου φόρτισης. Απώλειες δεν λαμβάνονται υπόψη. [6]



## **Κεφάλαιο 2: Αποθήκευση αισθητής θερμότητας**

### **2.1. Υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας**

Μεγάλη ποικιλία υλικών έχουν χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση της αισθητής θερμότητας. Αυτά περιλαμβάνουν υγρά όπως το νερό, έλαια μεταφοράς θερμότητας και ορισμένα ανόργανα χυτά άλατα, στερεά υλικά όπως βράχοι, τα χαλίκια και πυρίμαχη ύλη. Στην περίπτωση των στερεών, το υλικό είναι αμετάβλητο με πορώδη μορφή και η θερμότητα αποθηκεύεται ή εξάγεται από τη ροή ενός αερίου ή ενός υγρού μέσω των πόρων ή των κενών.

Η επιλογή του υλικού του οποίου θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από το επίπεδο θερμοκρασίας της εφαρμογής, το νερό χρησιμοποιείται για θερμοκρασία κάτω από τους 100°C και τα πυρίμαχα τούβλα χρησιμοποιούνται για θερμοκρασίες γύρω στους 1000°C. Τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι απλούστερης κατασκευής από αυτά για την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας και από αυτά των αντιστρέψιμων θερμοχημικών αντιδράσεων. Εντούτοις έχουν το μειονέκτημα ότι καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο. Για αυτόν τον λόγο, ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή ενός υλικού για την αποθήκευση αισθητής θερμότητας είναι η τιμή του μεγέθους ( $\rho C_p$ ). Ένα δεύτερο μειονέκτημα που συνδέεται με τα συστήματα αισθητής θερμότητας είναι ότι δεν μπορούν να αποθηκεύσουν ή να αποδώσουν την ενέργεια σε μια σταθερή θερμοκρασία. [6]

### **2.2. Υγρά μέσα αποθήκευσης**

#### **2.2.1. Νερό**

Το νερό είναι το συνηθέστερο μέσο αποθήκευσης αισθητής θερμότητας λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητάς του. Το νερό ως μέσο θερμικής αποθήκευσης έχει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και χρειάζεται συνεπώς μεγαλύτερους όγκους, αντίστοιχα με τις μεγάλες απώλειες θερμότητας.

Ειδικά για μακροπρόθεσμη αποθήκευση η επιφάνεια με την αναλογία όγκου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας είναι μεταξύ 30-50 kWh/m<sup>3</sup>, και οι θερμοκρασίες αποθήκευσης είναι γύρω στους 90<sup>0</sup> C . Η αποδοτικότητα της εγκατάστασης θερμικής αποθήκευσης εξαρτάται από την θερμοκρασία για την νέα υγροποίηση

των ατμών του συστήματος εξαγωγής θερμότητας. Οι βελτιώσεις είναι δυνατές με την χρήση αντλιών θερμότητας, αν και το κόστος αυξάνεται.

Τα συστήματα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης θερμότητας είναι ευρέως διαδεδομένα κυρίως για οικιακή χρήση για την παραγωγή ζεστού νερού στους λέβητες. Το μέγεθος των συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας εξαρτάται από την ισχύ που παράγει ο βραστήρας νερού που απαιτείται για να καλύψει την ζήτηση ζεστού νερού στα κτίρια. Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης με χρήση λεβήτων χρησιμοποιούν συνήθως το νυχτερινό ηλεκτρικό ρεύμα για την ηλεκτρική θέρμανση αντιστάσεων. Η θερμότητα αποθηκεύεται για μετέπειτα χρήση. Μια σημαντική πτυχή της βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης είναι να διατηρηθεί η θερμική στρωματοποίηση. Η απόδοση των θερμαντήρων νερού για οικιακή χρήση είναι πολύ βελτιωμένη και η εξοικονόμηση ενέργειας βελτιστοποιείται. Οι βελτιστοποιημένες αναλογίες στην δεξαμενή και η καλύτερη θερμική στρωματοποίηση μέσα στη δεξαμενή έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλότερη απόδοση του συστήματος.

Η δεξαμενή αποθήκευσης νερού τοποθετείται είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά του κτιρίου. Το μέγεθος της δεξαμενής ποικίλλει από μερικές εκατοντάδες λίτρα σε μερικές χιλιάδες κυβικά μέτρα. Η δεξαμενή κατασκευάζεται από διάφορα υλικά όπως χάλυβα, σκυρόδεμα ή γυαλί σε μορφή ινών. Είναι κατάλληλα μονωμένη με υαλοβάμβακα ή πολυουρεθάνη. Το πάχος της μόνωσης είναι μεγάλο και κυμαίνεται από 10 έως 20 cm και λόγω αυτού, το κόστος της μόνωσης αποτελεί ένα σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους.

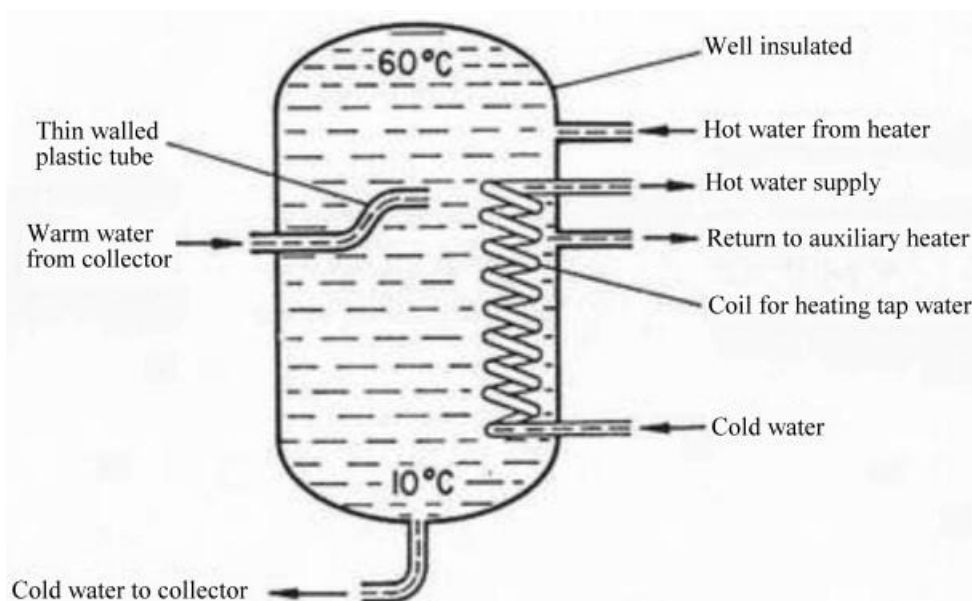
Προκειμένου να μειωθεί το κόστος της εγκατάστασης, ένας εναλλακτικός τρόπος, που εξετάζεται για αποθήκευση μεγάλης κλίμακας, είναι να χρησιμοποιηθούν τα φυσικά υπόγεια υδροφόρα στρώματα που περιέχουν ήδη το νερό. Προτείνεται η άντληση καυτού νερού και η αποθήκευσή του σε αυτά τα υδροφόρα στρώματα μετατοπίζοντας έτσι το υπάρχον υπόγειο κρύο νερό. Το κόστος αυτής της μεθόδου αναμένεται να είναι αρκετά χαμηλό. [6], [7]

#### **2.2.1.1. Θερμική διαστρωμάτωση του νερού**

Η βελτίωση αποθήκευσης θερμότητας με την χρήση νερού επιτυγχάνεται με τη θερμική στρωματοποίηση. Κατά την θερμική στρωματοποίηση νερό υψηλότερης θερμοκρασίας από αυτήν της θερμοκρασίας μίξης μπορεί να εξαχθεί στην κορυφή του κιβωτίου ενώ το νερό χαμηλότερης θερμοκρασίας από η θερμοκρασία μίξης μπορεί να κινηθεί ξεχωριστά από το κατώτατο σημείο του κιβωτίου για να εκμεταλλευθεί τα μικρά χρονικά διαστήματα έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία έτσι ώστε ο συλλέκτης να έχει μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Στην πράξη, η



τέλεια στρωματοποίηση δεν είναι εφικτή δεδομένου ότι η είσοδος του νερού στην δεξαμενή προκαλεί αναταραχή. Επιπλέον, υπάρχει ένα ορισμένο ποσό διάχυσης από το νερό που εισέρχεται (στο αποθηκευμένο νερό) προτού φθάσει στο κατάλληλο επίπεδο πυκνότητας. Λαμβάνοντας υπόψη την καλή θερμική στρωματοποίηση με την εξάλειψη της μίξης, είναι εξίσου σημαντικό να διατηρηθούν τα στρώματα θερμοκρασίας. Λόγω των απωλειών θερμότητας από την επιφάνεια της δεξαμενής, η θερμοκρασία του ύδατος κοντά στα τοιχώματα είναι χαμηλότερη, προκαλώντας φυσικά ρεύματα μεταφοράς που καταστρέφουν τα στρώματα θερμοκρασίας. Προκειμένου να διατηρήσουμε την στρωματοποίηση η δεξαμενή πρέπει να έχει αρκετά καλή θερμική μόνωση. Ένας τρόπος για να βελτιώσουμε την στρωματοποίηση είναι η χρήση ενός λεπτού πλαστικού σωλήνα ίδιας πυκνότητας με το νερό. Οι διαρκείς κινήσεις του σωλήνα σύμφωνα με την πυκνότητα του θερμού νερού, τοποθετούν το ζεστό νερό στο σωστό σημείο της δεξαμενής. [6], [7]



**Σχήμα 2.1: Θερμική στρωματοποίηση του νερού** [6]

### **2.2.2. Έλαια μεταφοράς θερμότητας**

Τα έλαια μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιούνται επίσης στα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας για την επίτευξη ενδιάμεσων θερμοκρασιών που κυμαίνονται από 100 έως 300 °C. Μερικά από τα ορυκτέλαια μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται για αυτόν τον σκοπό είναι Dowtherm και Therminol. Το πρόβλημα που συνδέεται με τη χρήση των ελαίων μεταφοράς θερμότητας είναι ότι χάνουν τις ιδιότητές τους με το πέρασ του χρόνου. Η υποβάθμιση τους είναι ιδιαίτερα αισθητή εάν χρησιμοποιούνται επάνω από το συνιστώμενο όριο θερμοκρασίας τους. Η χρήση των ελαίων παρουσιάζει επίσης προβλήματα ασφάλειας δεδομένου ότι υπάρχει η πιθανότητα ανάφλεξης σε θερμοκρασία υψηλότερη από την θερμοκρασία ανάφλεξής τους. Για αυτόν τον λόγο, συνιστάται να χρησιμοποιούνται στα συστήματα με μια αδρανή κάλυψη αερίου. Ένας ακόμα λόγος για τον οποίο έχουμε περιορισμένη χρήση των ελαίων μεταφοράς θερμότητας είναι το κόστος τους. Για αυτόν τον λόγο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε μικρά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. [6]

### **2.2.3 Ανόργανα τήγματα άλατος**

Ορισμένα ανόργανα τήγματα άλατος έχουν εξεταστεί για υψηλές θερμοκρασίες (300°C και άνω). Τα ανόργανα τήγματα άλατος είναι εύηκτα μίγματα. Ένα ευρέως διαδεδομένο τήγμα αυτής της κατηγορίας το οποίο έχει σύσταση 40%  $\text{NaNO}_2$ , 7%  $\text{NaNO}_3$  και 53%  $\text{KNO}_2$  (κατά βάρος) είναι διαθέσιμο με το εμπορικό όνομα Hitec. Το Hitec έχει χαμηλό σημείο τήξης 145°C και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι τους 425°C. Επάνω από αυτήν την θερμοκρασία αρχίζει να αποσυντίθεται και να οξειδώνεται. Ένα άλλο τήγμα που εξετάζεται για αποθήκευση σε υψηλές θερμοκρασίες είναι το υδροξειδίο το νατρίου, το οποίο έχει σημείο τήξης τους 320°C και μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες άνω των 800°C. Παρόλα αυτά είναι ένα έντονα διαβρωτικό υλικό.

## **2.3 Στερεά μέσα αποθήκευσης**

Η αισθητή θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί σε βράχους ή σε χαλίκια που συσκευάζονται σε μονωμένα σκεύη. Αυτός ο τύπος αποθήκευσης χρησιμοποιείται πολύ συχνά για θερμοκρασίες άνω των 100°C από κοινού με τους ηλιακούς αεροθερμαντήρες. Η κατασκευή τους είναι απλή και έχει χαμηλό κόστος. Το μέγεθος των κομματιών του βράχου που χρησιμοποιούνται ποικίλλει από 1 έως 5 cm. Η αποθήκευση σε βράχο ή χαλίκι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τις πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες μέχρι 1000°C.

Οι δυσκολίες και οι περιορισμοί σχετικά με τα υγρά υλικά αποθήκευσης μπορούν να αποφευχθούν με τη χρησιμοποίηση των στερεών υλικών για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας ως αισθητή θερμότητα. Το μειονέκτημα είναι ότι απαιτούνται μεγαλύτερες ποσότητες στερεών αποθηκευτικών υγρών από ότι τα υγρά αποθηκευτικά μέσα, λόγω της μικρής τους αποθηκευτικής ικανότητας. Το κόστος των μέσων αποθήκευσης ανά μονάδα ενέργειας που αποθηκεύεται διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα τιμών για τους βράχους.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των βράχων είναι

- Μη τοξικά και μη εύφλεκτα
- Χαμηλό κόστος
- Λειτουργούν παράλληλα ως αποθηκευτικά μέσα και ως επιφάνειες μετάδοσης θερμότητας και
- Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του αέρα και του βράχου είναι αρκετά καλή. [6]



## **Κεφάλαιο 3: Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας-Υλικά αλλαγής φάσης (PCMs)**

### **3.1. Γενικά για τα PCMs**

Τα PCMs είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας που έχουν αρκετά υψηλότερες πυκνότητες θερμικής ενεργειακής αποθήκευσης έναντι των υλικών αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Είναι σε θέση να απορροφήσουν ή να απελευθερώσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε μια σταθερή θερμοκρασία καθώς υποβάλλονται σε αλλαγή της φάσης τους, από στερεή σε υγρή και το αντίστροφο ή από υγρή σε αέρια και αντίστροφα.

Η αποθήκευση θερμότητας μέσω της αλλαγής φάσης έχει το πλεονέκτημα της κατάληψης μικρού χώρου, δεδομένου ότι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης των περισσότερων υλικών είναι πολύ μεγαλύτερη από την αλλαγή ενθαλπίας τους για 1 K ή ακόμα και 0 K. Παραδείγματος χάριν, η αναλογία της λανθάνουσας θερμότητας στη συγκεκριμένη θερμότητα του ύδατος είναι 80, το οποίο σημαίνει ότι η ενέργεια που απαιτείται για να λειώσει ένα κιλό πάγου είναι 80 φορές περισσότερο από αυτήν που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία ενός κιλού νερού κατά έναν βαθμό κελσίου.

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας εξαρτώνται από τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου PCM. Όσο υψηλότερη η ενεργειακή πυκνότητα του PCM, τόσο μικρότερος ο απαραίτητος όγκος αποθήκευσης που απαιτείται για κάθε προτεινόμενη εφαρμογή. Μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί παρουσίασαν ότι δεν μπορεί να εξετάσει απλά οποιαδήποτε διαθέσιμο στοιχείο όσον αφορά τον τεχνικό βαθμό των PCMs για το σχεδιασμό μιας αποτελεσματικής συσκευής αποθήκευσης θερμότητας, καθώς οι θερμοφυσικές ιδιότητες ποικίλλουν από κατασκευαστή σε κατασκευαστή, κυρίως λόγω του διαφορετικού επιπέδου ακαθαρσιών στον τεχνικό βαθμό του PCMs. Ένας μεγάλος αριθμός υλικών είναι γνωστό ότι τήκεται σε μια υψηλή θερμότητα τήξης σε οποιαδήποτε σειρά θερμοκρασίας.

Εντούτοις, η χρήση των PCM ως υλικά αποθήκευσης θερμότητας εξαρτάται από τις επιθυμητές θερμικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες και από οικονομικούς παράγοντες. Ένα χαρακτηριστικό τους είναι ότι υποβάλλονται σε στερεοποίηση και επομένως δεν μπορούν γενικά να χρησιμοποιηθούν ως μέσα μεταφοράς θερμότητας σε έναν ηλιακό συσσωρευτή.

Πολλά PCMs έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και επομένως απαιτούν μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Άλλα είναι διαβρωτικά και απαιτούν πρόσθετα κιβώτια.

Τα κύρια χαρακτηριστικά που απαιτούνται να διαθέτουν τα PCMs παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

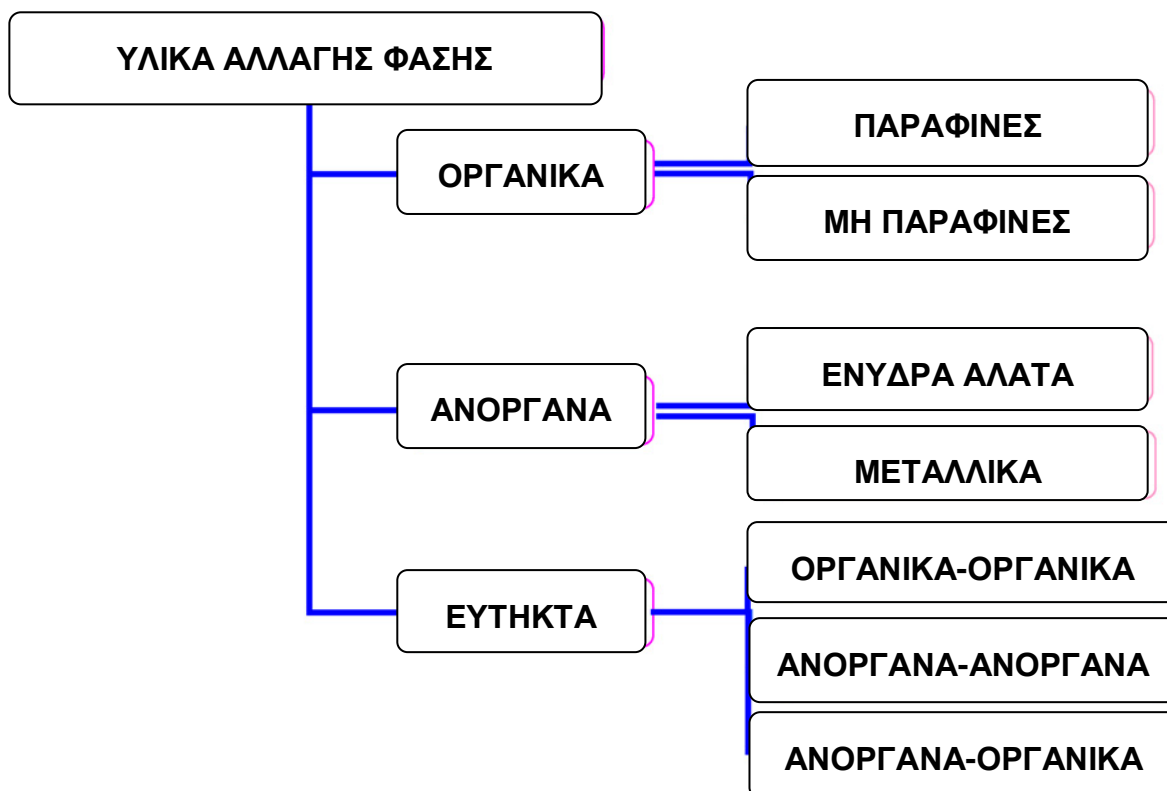
**Πίνακας 1:** Κύρια επιθυμητά χαρακτηριστικά των PCMs [7]

Θερμικές Ιδιότητες	Φυσικές Ιδιότητες	Χημικές ιδιότητες	Οικονομικός παράγοντας
Θερμοκρασία αλλαγής φάσης κατάλληλη για το επιθυμητό εύρος λειτουργίας	Υψηλή πυκνότητα	Χημική σταθερότητα	Διαθέσιμα σε μεγάλες ποσότητες
Υψηλή ειδική θερμότητα	Μικρή αλλαγή πυκνότητας κατά την διάρκεια αλλαγής φάσης	Όχι χημική αποσύνθεση	
Υψηλή θερμική αγωγιμότητα σε στερεή και υγρή κατάσταση		Συμβατά με διάφορα υλικά	Χαμηλό κόστος
Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα μάζας	Απουσία του φαινομένου της υπέρψυξης	Μη τοξικά, μη εύφλεκτα, μη εκρηκτικά	

Έτσι λοιπόν οποιοδήποτε σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας πρέπει να έχει τουλάχιστον τα ακόλουθα τρία συστατικά: ένα κατάλληλο υλικό αλλαγής φάσης(PCM) στο επιθυμητό εύρος θερμοκρασίας, ένα δοχείο συγκράτησης για το αποθηκευτικό υλικό, και ένα κατάλληλο ρευστό θερμότητας για να μεταφέρει τη θερμότητα αποτελεσματικά από την πηγή θερμότητας στο αποθηκευτικό υλικό. [8], [7]

### **3.2. Κατηγοριοποίηση των PCMs**

Ένας μεγάλος αριθμός αλλαγή φάσης υλικών (οργανικών, ανόργανων και εύτηκτων) είναι διαθέσιμα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Μια ταξινόμηση PCMs δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 3.1:** Κατηγοριοποίηση των PCMs [3]

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός υλικών, οργανικών και ανόργανων χημικών ουσιών, τα οποία μπορούν να προσδιοριστούν ως PCM από το σημείο θερμοκρασίας τήξης και από την λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Εντούτοις, εκτός από το σημείο τήξης, στην πλειοψηφία τους τα αλλαγή φάσης υλικά δεν ικανοποιούν τα απαραίτητα κριτήρια που απαιτούνται για ένα επαρκή αποθηκευτικό μέσο.

Γενικά οι ανόργανες ενώσεις έχουν σχεδόν τη διπλάσια χωρητικότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ( $250-400 \text{ kg/dm}^3$ ) από τις οργανικές ενώσεις ( $128-200 \text{ kg/dm}^3$ ). Η θερμική και χημική συμπεριφορά τους συμπεριφορά, καθώς και οι ιδιότητες κάθε μιας υποομάδα που επηρεάζουν το σχέδιο του συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας PCMs συζητούνται παρακάτω. [3]

**Πίνακας 2:** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των PCMs [7]

Οργανικά	Ανόργανα	Εύφλεκτα
<b>Πλεονεκτήματα</b>		
<p>1.διαθεσιμότητα σε μεγάλο εύρος υψηλών θερμοκρασιών</p> <p>2.ψύξη χωρίς την απαίτηση πολύ χαμηλών θερμοκρασιών</p> <p>3.δυνατότητα σύμφωνης τήξης</p> <p>4.χημική σταθερότητα</p> <p>5.υψηλή θερμότητα τήξης</p> <p>6.ασφαλή και μη-αντιδραστήρια</p> <p>7.ανακυκλώσιμα</p>	<p>1.μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας</p> <p>2.χαμηλό κόστος</p> <p>3.ταχεία τήξη</p> <p>4.υψηλή θερμική αγωγιμότητα</p> <p>5.υψηλή θερμότητα τήξης</p> <p>6.μη-εύφλεκτα</p> <p>7.μικρή αλλαγή όγκου</p>	<p>1.χαμηλό σημείο τήξης</p>
<b>Μειονεκτήματα</b>		
<p>1.χαμηλή θερμική αγωγιμότητα στην στερεή φάση</p> <p>2.μικρή χωρητικότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας</p> <p>3.εύφλεκτα</p> <p>4.υψηλό κόστος</p>	<p>1.μεγάλη μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης</p> <p>2.η ψύξη κάτω του σημείου πάγου αποτελεί πρόβλημα κατά την μετάβαση από στερεά σε υγρή φάση</p> <p>3.χημικές ιδιότητες επιβάλλονται κυρίως μετά από διαρκή ανακύκλωση του υλικού</p>	<p>1.περιορισμένος αριθμός δεδομένων είναι διαθέσιμος σχετικά με τις θερμοδυναμικές και φυσικές ιδιότητές τους καθώς είναι νέα υλικά και η χρήση τους περιορισμένη</p>



### **3.3.Οργανικά υλικά αλλαγής φάσης**

Τα οργανικά υλικά περιγράφονται περαιτέρω ως οι παραφίνες και μη παραφίνες. Τα οργανικά υλικά υποβάλλονται σε συνεχή τήξη και πήξη χωρίς το διαχωρισμό φάσης και ακολούθως γίνεται η αποικοδόμηση της λανθάνουσας θερμότητας της τήξης.

Επίσης από τα οργανικά υλικά αλλαγής φάσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα λιπαρά οξέα. Είναι υλικά χαμηλού κόστους και για αυτό τον λόγο βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορα πεδία. Το εύρος της θερμοκρασίας τους τήξης κυμαίνεται από  $-5^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $71^{\circ}\text{C}$ , ενώ η λανθάνουσα θερμότητα της τήξης παίρνει τιμές από 45 μέχρι 210 kJ/kg.

Μερικά πλεονεκτήματα των οργανικών υλικών αλλαγής φάσης είναι: το μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, η πήξη χωρίς υπέρψυξη, η ικανότητα σύμφωνης τήξης, δεν διαχωρίζονται, υψηλή θερμότητα τήξης, είναι συμβατά με άλλα υλικά και ανακυκλώσιμα. [3], [9], [10]

#### **3.3.1.Παραφίνες**

Οι παραφίνες αποτελούνται από ένα μίγμα συνήθως n-αλκανίων ευθείας αλυσίδας  $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)-CH}_3$ . Η κρυστάλλωση της αλυσίδας ( $\text{CH}_3$ ) απελευθερώνει μεγάλα ποσά λανθάνουσας θερμότητας. Τόσο το σημείο τήξης όσο και η λανθάνουσα θερμότητα της τήξης αυξάνονται όσο μεγαλώνει το μήκος της αλυσίδας. Οι παραφίνες είναι κατάλληλα υλικά αποθήκευσης της θερμότητας τήξης λόγω της διαθεσιμότητάς τους σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Όμως λόγω του υψηλού κόστους μόνο οι τεχνητές παραφίνες μπορούν να χρησιμοποιούνται ως PCMs στα λανθάνοντα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας. Οι παραφίνες είναι ασφαλείς, αξιόπιστες, προβλέψιμες, και μη διαβρωτικά υλικά. Είναι χημικά αδρανείς και σταθερά κάτω από τους  $500^{\circ}\text{C}$ , παρουσιάζουν μικρές αλλαγές όγκου κατά την διάρκεια της τήξης και έχουν τη χαμηλή πίεση ατμού στη υγρή φάση.

Το σημείο τήξης των αλκανίων αυξάνεται με τον αυξανόμενο αριθμό ατόμων άνθρακα. Εκτός από τα θετικά χαρακτηριστικά των παραφινών, όπως η σύμφωνη τήξη και οι καλές χημικές ιδιότητες παρουσιάζονται και μερικές ανεπιθύμητες ιδιότητες όπως: (α) χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, (β) μη συμβατότητα με πλαστικά δοχεία και (γ) η ευφλεκτότητα. Όλες αυτές οι ανεπιθύμητες ιδιότητες μπορούν να εξαλειφτούν ελαφρώς τροποποιώντας την μονάδα αποθήκευσης. Μερικές ενώσεις παραφινών παρουσιάζονται στους πίνακες 2 και 3 καθώς επίσης και το σημείο τήξης, η λανθάνουσα θερμότητα τήξης και οι ομάδες στις οποίες

ανήκουν. Τα PCMs είναι ταξινομημένα ως: (i) ομάδα I, πιο ελπιδοφόρα για χρήση (ii) ομάδα II, ελπιδοφόρα και (iii) ομάδα III, λιγότερο ελπιδοφόρα.[3], [5]

**Πίνακας 3:** Φυσικές ιδιότητες παραφινών [6]

Παραφίνες	Σημείο τήξης °C	Λανθάνουσα Θερμότητα τήξης(kJ/kg)	Κατηγορία
6106	42-44	189	I
P116	45-48	210	I
5838	48-50	189	I
6035	58-60	189	I
6403	62-64	189	I
6499	66-68	189	I

**Πίνακας 4:** Φυσικές ιδιότητες των η- αλκανίων [6]

Αριθμός ατόμων του άνθρακα	Σημείο τήξης °C	Λανθάνουσα θερμότητα τήξης(kJ/kg)	Κατηγορία
14	5,5	228	I
15	10,0	205	II
16	16,7	237,1	I
17	21,7	213	II
18	28,0	244	I
19	32,0	222	II
20	36,7	246	I
21	40,2	200	II
22	44,0	249	II
23	47,5	232	II
24	50,6	255	II
25	49,4	238	II
26	56,3	256	II
27	58,8	236	II
28	61,6	253	II
29	63,4	240	II

30	65,4	251	II
31	68,0	242	II
32	69,5	170	II
33	73,9	268	II
34	75,9	269	II

### **3.3.2. Μη –παραφίνες**

Οι μη-παραφίνες είναι σήμερα η μεγαλύτερη κατηγορία PCMs και τα υλικά που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία παρουσιάζουν διαφορετικότητα στα χαρακτηριστικά τους. Κάθε ένα από αυτά τα υλικά έχει διαφορετικές ιδιότητες σε σχέση με τα υλικά που ανήκουν στην κατηγορία των μη-παραφινών, σε αντίθεση με τα υλικά που ανήκουν στις παραφίνες και όλα παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες. Έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για τα οργανικά υλικά παρουσιάζουν πως διάφοροι εστέρες, λιπαρά οξέα του οινόπνεύματος και της γλυκόλης είναι κατάλληλα υλικά για ενεργειακή αποθήκευση.

Αυτά τα υλικά είναι εύφλεκτα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες ή σε διάφορα μέσα οξειδωσης. Μερικές μη-παραφίνες παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Οι ιδιότητες των παραπάνω υλικών είναι: (i) η υψηλή θερμότητα τήξης, (ii) ευφλεκτότητα, (iii) χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, (iv) χαμηλά σημεία ανάφλεξης, (β) ποικίλο επίπεδο τοξικότητας, και (vi) αστάθεια στις υψηλές θερμοκρασίες.

Τα λιπαρά οξέα έχουν υψηλή θερμότητα τήξης συγκριτικά με αυτές των παραφινών. Επίσης είναι ήπιες καυστικές ουσίες. Ο γενικός τύπος που περιγράφει τα λιπαρά οξέα δίνεται από τον τύπο  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$  και ως εκ τούτου, είναι κατάλληλα για χρήση ως PCMs. Το σημαντικό μειονέκτημά τους όμως, είναι το κόστος τους, το οποίο είναι 2-2.5 φορές μεγαλύτερο από αυτό των τεχνητών παραφινών. Είναι ελαφρώς διαβρωτικά υλικά. Μια ελπιδοφόρα χρήση τους, είναι ένα σύστημα που συνδυάζει τα λιπαρά οξέα σε θερμοκρασίες τήξης που κυμαίνονται από 20-30 °C με μια ακρίβεια  $\pm 0.5$  °C. Αυτό θα επέτρεπε στον σχεδιαστή να επιλέξει τη βέλτιστη θερμοκρασία για να λάβει τη μέγιστη απόδοση του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. Έχει παρατηρηθεί ότι τα λιπαρά οξέα τήκονται σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, παρουσιάζουν δύο σημεία τήξης και έχουν μεγάλες αλλαγές στη λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Αλλά, έχουν σταθερή θερμική συμπεριφορά μετά από 1500

επαναλαμβανόμενους κύκλους τήξης-πήξης. Η ποιότητα των λιπαρών οξέων ποικίλλει πολύ στην εμπορική αγορά λόγω της ευρείας χρήσης τους. [3], [5]

**Πίνακας 5:** Φυσικές ιδιότητες Λιπαρών οξέων [3]

Υλικό	Χημικός τύπος	Σημείο τήξης °C	Λανθάνουσα θερμότητα (kJ/kg)	Κατηγορία
Ακετικό οξύ (Acetic acid)	CH <sub>3</sub> COOH	16.7	184	I
Γλυκόλη πολυαιθυλενίου (Polyethylene glycol 6000)	H(OC <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> OH	20-25	164	I
Καπρικό οξύ (Capric acid)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH	36	152	-
(Ελαιϊδικό οξύ) Elaidic acid	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> C <sub>9</sub> H <sub>6</sub> COOH	47	218	I
Λαυρικό οξύ (Lauric acid)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH	49	178	II
Πενταδεκανοϊκό οξύ (Pentadecanoid acid)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>13</sub> COOH	55,2	178	-
Τριστεαρίνη (Tristearin)	(C <sub>17</sub> H <sub>35</sub> COO) <sub>3</sub> C <sub>3</sub> H <sub>5</sub>	56	191	I
Μυριστικό οξύ (Myristic acid)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> COOH	58	199	I
Παλματικό οξύ (Palmitic acid)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> COOH	55	163	I
Στεαρικό οξύ (Stearic acid)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOH	69,4	199	I
Ακεταμίδη (Acetamide)	CH <sub>3</sub> CONH <sub>2</sub>	81	241	I
Methyl fumarate	(CHCO <sub>2</sub> NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	102	242	I

### **3.4. Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης**

Τα ανόργανα υλικά δεν χρησιμοποιούνται στην ίδια έκταση όπως τα οργανικά υλικά αλλαγής φάσης ως υλικά αποθήκευσης θερμότητας. Τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης

ταξινομούνται ως ένυδρα άλατα και ως μεταλλικά υλικά αλλαγής φάσης. Αυτά τα υλικά αλλαγής φάσης δεν χρειάζονται επιπλέον ψύξη κάτω από το σημείο πήξης και οι θερμοότητες τήξης τους δεν υποβιβάζονται με την ανακύκλωση. [3], [7]

Μερικά πλεονεκτήματά τους είναι:

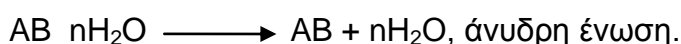
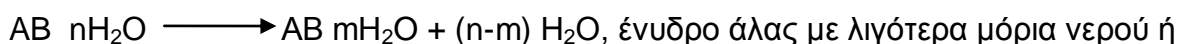
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- Μη εύφλεκτα υλικά
- Χαμηλό κόστος
- Υψηλή θερμοχωρητικότητα

Ενώ τα μειονεκτήματά τους είναι:

- Καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο κατά την αλλαγή φάσης
- Διαχωρίζονται
- Υπέρψυξη

### **3.4.1. Ένυδρα άλατα**

Τα ένυδρα άλατα μπορούν να θεωρηθούν ως κράματα των ανόργανων αλάτων και του ύδατος διαμορφώνοντας ένα χαρακτηριστικό κρυστάλλινο στερεό με γενικό τύπο  $AB_nH_2O$ . Η αλλαγή από στερεά σε υγρή φάση των ένυδρων αλάτων είναι μία αφυδάτωση της υδάτωσης του άλατος, αν και αυτή η διαδικασία απεικονίζεται θερμοδυναμικά ως τήξη και πήξη. Ένα ένυδρο άλας συνήθως κατά την διαδικασία της τήξης παραμένει ως έχει αλλά με λιγότερα μόρια νερού ή ως άνυδρη ένωση.



Στο σημείο τήξης οι κρύσταλλοι υδρατμού διασπώνται σε άνυδρα άλατα και νερό.

Τα ένυδρα άλατα είναι η σημαντικότερη ομάδα PCMs, οι οποίες έχουν μελετηθεί εκτενώς για τη χρήση τους στα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Οι ιδιότητες των ένυδρων αλάτων είναι:

(i) υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου

(ii) σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (σχεδόν διπλάσια από αυτής της παραφίνης),

(iii) μικρές αλλαγές όγκου στην τήξη.

Τα ένυδρα άλατα δεν είναι διαβρωτικά υλικά, είναι συμβατά με τα πλαστικά και ελαφρώς τοξικά. Πολλά ένυδρα άλατα είναι ουσίες χαμηλού κόστους για χρήση στην αποθήκευση.

Ένα πρόβλημα με τα περισσότερα άλυδρα άλατα είναι αυτό της μη-σύμφωνης τήξης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το απελευθερωμένο νερό της κρυστάλλωσης δεν είναι επαρκές για να διαλύσει όλη τη παρούσα στερεά φάση. Λόγω της διαφοράς πυκνότητας, η χαμηλότερη ένυδρη ουσία (ή άλυδρο άλας) εγκαθιστά στο κατώτερο σημείο του κιβωτίου. Γενικά μπορούμε να διακρίνουμε 3 τύπους συμπεριφορών των υγρών αλάτων: την σύμφωνη, μη-σύμφωνη και ημι-σύμφωνη τήξη. Αναλυτικότερα η σύμφωνη τήξη εμφανίζεται όταν το άλυδρο άλας είναι απολύτως διαλυτό στο νερό υδάτωσής του στη θερμοκρασία τήξης, ενώ η ασύμφωνη τήξη εμφανίζεται όταν το άλας δεν είναι εξ ολοκλήρου διαλυτό στο νερό υδάτωσής του στο σημείο τήξης. Το φαινόμενο εξετάζεται σε επόμενο κεφάλαιο

Ένα επιπλέον κοινό μειονέκτημα των ένυδρων αλάτων είναι αυτό του φαινομένου της υπέρψυξης. Στη θερμοκρασία τήξης, το ποσοστό σχηματισμού μορίων είναι γενικά πολύ χαμηλό. Για να καταφέρουμε να επιτύχουμε ένα λογικό ποσοστό σχηματισμού ατόμων, πρέπει να πραγματοποιήσουμε υπέρψυξη έτσι ώστε η ενέργεια αντί να απελευθερώνεται στη θερμοκρασία τήξης, να απελευθερώνεται σε πολύ χαμηλότερη. [3]

### **3.4.2 Μεταλλικά υλικά αλλαγής φάσης**

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τα μέταλλα χαμηλής τήξης και τα εύτηκτα μέταλλα. Η κατηγορία των μεταλλικών υλικών αλλαγής φάσης ακόμα δεν έχει εξεταστεί σοβαρά για την τεχνολογία PCM λόγω των σοβαρών μειονεκτημάτων τους σχετικά με το βάρος τους. Εντούτοις, όταν ο όγκος μπορεί να εκτιμηθεί, είναι υποψήφια ως υλικά αλλαγής φάσης λόγω της υψηλής θερμότητας τήξης ανά μονάδα όγκου. Έχουν μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, και έτσι δεν απαιτούνται πληρωτικά υλικά. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταλλικών υλικών αλλαγής φάσης και άλλων PCMs είναι η υψηλή θερμική αγωγιμότητά τους.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των υλικών αυτών είναι τα ακόλουθα: (i) χαμηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα μάζας, (ii) υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου, (iii) υψηλή θερμική αγωγιμότητα και (iv) χαμηλή πίεση ατμών. [3]

**Πίνακας 6:** Φυσικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών αλλαγής φάσης [3]

Υλικό	Σημείο Τήξης ( <sup>0</sup> C)	Λανθάνουσα θερμότητα τήξης (kJ/kg)	Κατηγορία
Ευτηκτικό αντιμόνιο γαλλίου-γαλλίου (Gallium–gallium antimony eutectic)	29,8	-	-
Γάλλιο (Gallium)	30	80,3	I
Cerrolow eutectic	58	90,9	-
Bi–Cd–In ευτηκτικό	61	25	-
Cerrobend ευτηκτικό	70	32,6	I
Bi–Pb–In ευτηκτικό	70	29	-
Bi–In ευτηκτικό	72	25	-
Bi–Pb–tin ευτηκτικό	96	-	-
Bi–Pb ευτηκτικό	125	-	-

### **3.4.3 Ευτηκτικά υλικά**

Τα ευτηκτικά υλικά είναι μια σύνθεση δύο ή περισσότερων συστατικών, κάθε ένα από τα οποία τήκεται και πήξει και διαμορφώνουν ένα μίγμα κρυστάλλων κατά τη διάρκεια της κρυστάλλωσης. Τα ευτηκτικά υλικά σχεδόν πάντα τήκονται και πήζουν χωρίς διαχωρισμό δεδομένου ότι παγώνουν σε ένα οικείο μίγμα κρυστάλλων, αφήνοντας λοιπόν ελάχιστο χρόνο στα συστατικά να διαχωριστούν. Στην τήξη και τα δύο συστατικά υγροποιούνται ταυτόχρονα, και σε αυτήν την περίπτωση χωρίς τον διαχωρισμό των συστατικών.

Μερικές συνθέσεις PCM μερικές φορές χαρακτηρίζονται λανθασμένα ως ευτηκτικά. Τα συστατικά αυτών των PCM υποβάλλονται σε μια περιτηκτική αντίδραση κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, και για αυτόν τον λόγο η πιο κατάλληλη ονομασία τους είναι περιτηκτικά υλικά αλλαγής φάσης. [3]

## **3.2 Μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων των PCMs**

Οι διαθέσιμες μέθοδοι για τον καθορισμό της θερμότητας τήξης, των σημείων πήξης και τήξης μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις ομάδες: στην μέθοδο διαφορικής θερμικής

ανάλυσης (DTA), μέθοδο διαφορικής θερμιδομετρικής σάρωσης (DSC), μέθοδος T-history, και η Double cell.

### **3.2.1 Μέθοδος T-history**

Η μέθοδος T-history είναι ένας απλός και οικονομικός τρόπος για να καθοριστούν οι κύριες θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για θερμική ενεργειακή αποθήκευση κυρίως μέσω της διαδικασίας αλλαγής φάσης solid-liquid. Η μέθοδος βασίζεται στη σύγκριση της θερμοκρασίας ενός δείγματος PCM και ενός υλικού αναφοράς κατά την διάρκεια της ψύξης. Η σύγκριση των καμπυλών, που χρησιμοποιεί μια μαθηματική περιγραφή της μεταφοράς θερμότητας, επιτρέπει τον προσδιορισμό της θερμοχωρητικότητας  $C_p$ , και της ενθαλπίας  $H$ , του PCM από την γνωστή θερμοχωρητικότητα του υλικού αναφοράς. Σε αυτήν την μέθοδο χρησιμοποιούνται ένα θερμό ρευστό, δύο ίδιοι σωλήνες, μία μονωμένη δροσερή αίθουσα, τρεις αισθητήρες θερμοκρασιών και ένας υπολογιστής. Το υλικό αλλαγής φάσης που εξετάζεται τοποθετείται στον έναν από δύο ίδιους σωλήνες και ως υλικό αναφοράς χρησιμοποιείται νερό που έχει αποσταχθεί και τοποθετείται στον άλλο σωλήνα. Και οι δύο σωλήνες θερμαίνονται στους  $65 - 70^{\circ}\text{K}$   $T_0$ , πάνω από την θερμοκρασία τήξης του PCM  $T_1$ . Στην συνέχεια, οι σωλήνες τοποθετούνται στη δροσερή αίθουσα θερμοκρασίας  $T_a$  μικρότερη από την θερμοκρασία πήξης του PCM, και οι θερμοκρασίες των δειγμάτων καταγράφονται από τον υπολογιστή. Τελικά λαμβάνουμε τις καμπύλες  $T_{\text{PCM}}$ ,  $T_{\text{water}}$ ,  $T_{\text{air}}$  και τις καμπύλες θερμοκρασιών των δύο δειγμάτων.

Στις καμπύλες θερμοκρασίας χρόνου του PCM που λαμβάνουμε εμφανίζονται τρεις φάσεις: η ψύξη της υγρής φάσης, η στερεοποίηση του PCM, και η ψύξη της στερεάς φάσης. Η θερμική αγωγιμότητα του δείγματος λαμβάνεται με τη χρησιμοποίηση μιας αντίστροφης μεθόδου στο συνολικό χρόνο στερεοποίησης.

Για τον υπολογισμό της θερμότητας τήξης χρησιμοποιούμε την παρακάτω εξίσωση

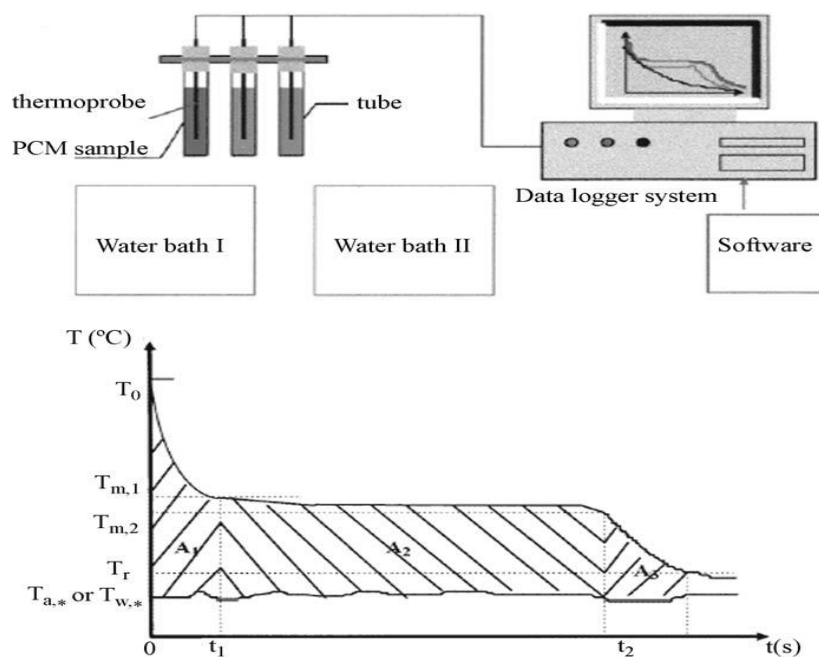
$$H_n = \frac{m_w C_{p,w} + m_t C_{p,t}}{m_p} \frac{A_2}{A_1} (T_0 - T_s) \quad (3.1)$$

όπου  $C_p$ ,  $C_{pw}$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού και του υλικού στο σωλήνα

$m_w$ ,  $m_t$ ,  $m_p$  οι μάζες του νερού, του σωλήνα και του PCM αντίστοιχα.

και  $T_0$ ,  $T_s$  η θερμοκρασίες έναρξης του πειράματος και υπέρψυξης του PCM.





**Σχήμα 3.2:** Μέθοδος T-history [10]

Μέχρι στιγμής έχουν γίνει πολλές προτάσεις σχετικά με την βελτίωση της συγκεκριμένης μεθόδου. Ένας τρόπος είναι να τοποθετηθούν οριζόντια οι σωλήνες προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές της ροής θερμότητας στην επιφάνεια. Η μέθοδος T-history βελτιώθηκε επίσης με τη χρησιμοποίηση ενός σημείου κάμψης αντί του σημείου απελευθέρωσης ως όριο μεταξύ της αλλαγής φάσης και των περιόδων στερεής φάσης. Τέλος έχει προταθεί η λήψη της ενθαλπίας συναρτήσεως του χρόνου αντί του υπολογισμού της θερμότητας τήξης. [10], [12], [13]

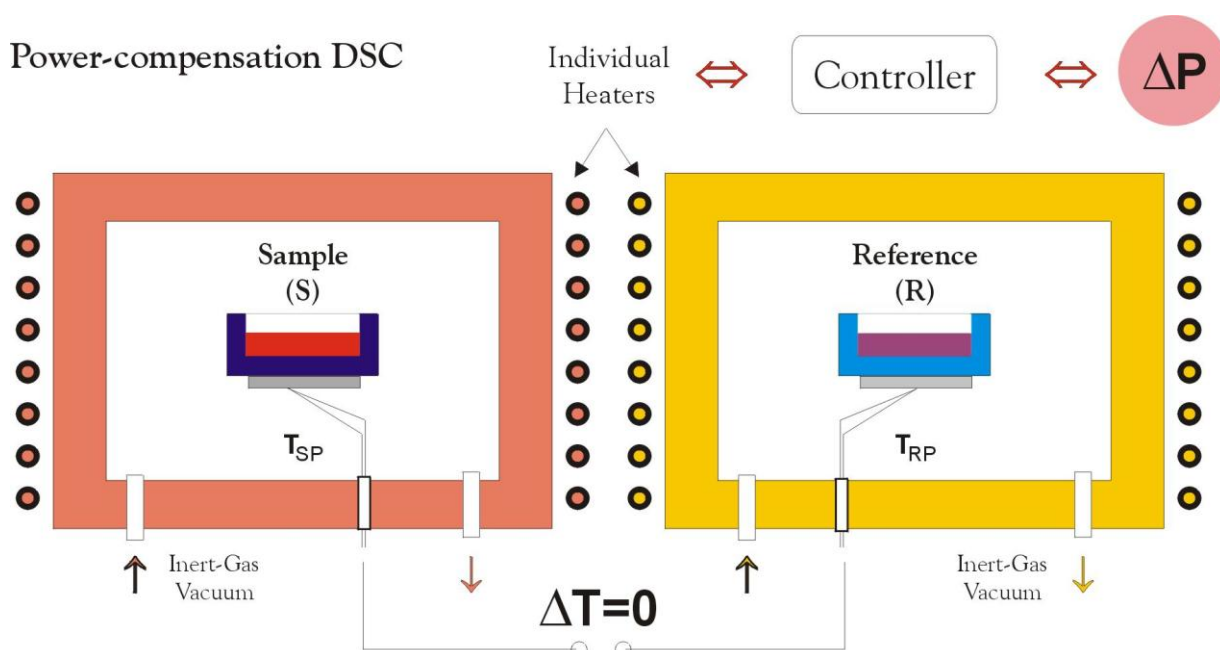
### **3.2.2. Μέθοδος διαφορικής θερμιδομετρικής σάρωσης (DSC)**

Αυτή η μέθοδος μέτρησης είχε αναπτυχθεί αρχικά για να χαρακτηρίσει τα ποσά ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ μερικών υλικών και του περιβάλλοντός κατά τη διάρκεια των μετασχηματισμών τους, όπως ο πολυμερισμός ή η αλλαγή φάσης των πολυμερών σωμάτων. Το όνομα της μεθόδου οφείλεται στα:

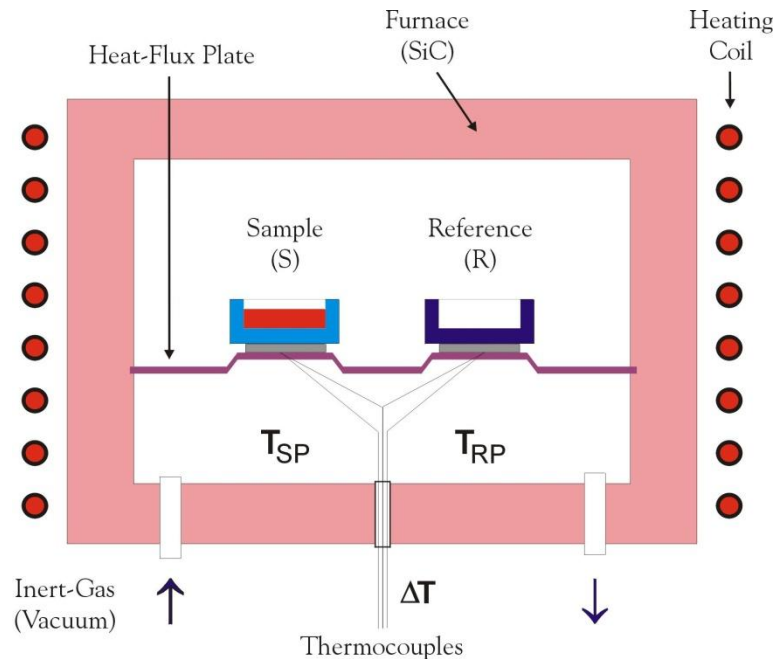
1. Θερμιδομέτρηση: είναι η μέτρηση της ποσότητας θερμότητας που μπορεί να απορροφηθεί ή να απελευθερωθεί από ένα σώμα που υποβάλλεται σε αλλαγή της θερμοκρασίας τους. Στην περίπτωσή μας, η μεταφορά θερμότητας οφείλεται στη διεξαγωγή.

2. Διαφορική: η οργάνωση της μέτρησης έχει ως σκοπό να έχει δύο διαφορετικά δείγματα στους ίδιους όρους. Η θερμική αντίδραση του δείγματος λαμβάνεται σε σύγκριση με τη θερμική αντίδραση του δείγματος αναφοράς (του οποίου οι ιδιότητες είναι γνωστές).
3. Σάρωση: Το ποσοστό θερμοκρασίας πρέπει να καθοριστεί από τον ερευνητή.

Υπάρχουν δύο είδη μεθόδων DSC. Η αποκατάσταση ισχύος DSC και η ροή θερμότητας DSC. Στην μέθοδο αποκατάστασης ισχύος η θερμοκρασία του δείγματος ( $T_s$ ) και του υλικού αναφοράς ( $T_r$ ) ελέγχονται ανεξάρτητα χρησιμοποιώντας ξεχωριστούς αλλά ίδιους κλίβανους. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του δείγματος (PCM) και του υλικού αναφοράς διατηρείται μηδενική, μεταβάλλοντας την προσφερόμενη ισχύ στους δύο κλίβανους. Η ενέργεια αυτή αποτελεί ένα μέτρο της ικανότητας μεταβολής της ενθαλπίας ή θερμότητας του δείγματος S (σχετικά με το υλικό αναφοράς R). Στην μέθοδο ροής θερμότητας το δείγμα S και το υλικό αναφοράς R (συνήθως ένα κενό δείγμα pan+lid) εσωκλείονται στον ίδιο κλίβανο μαζί με έναν μεταλλικό φραγμό ο οποίος έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα που εξασφαλίζει μια καλή ροή θερμότητας μεταξύ του δείγματος S (PCM) και του υλικού αναφοράς R. Οι μεταβολές στην ενθαλπία ή της θερμοχωρητικότητας στο δείγμα S οδηγούν στις διαφορές θερμοκρασίας σχετικά με το υλικό αναφοράς R. Αυτό οδηγεί στην ροή θερμότητας μεταξύ του S και του R. Η διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T$  μεταξύ του S και του R στην συνέχεια καταγράφεται και συσχετίζεται με την μεταβολή της ενθαλπίας στο δείγμα χρησιμοποιώντας τα πειράματα βαθμολόγησης.



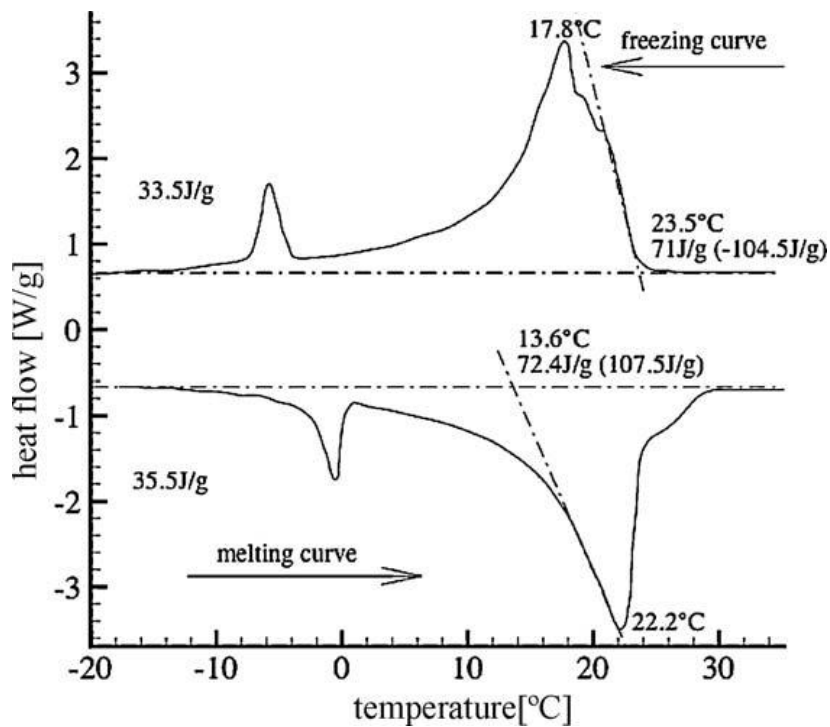
**Σχήμα 3.3:** Μέθοδος Power compensation DSC [14]



**Σχήμα 3.4:** Μέθοδος ροής θερμότητας DSC [14]

Τα δείγματα PCM τα οποία χρησιμοποιούμε για την μέτρηση των ιδιοτήτων του με την μέθοδο DSC είναι μόνο μερικών γραμμαρίων (1-10) gr. Κατά συνέπεια, η μέθοδος DSC παρέχει πληροφορίες για τις τοπικές ιδιότητες του υλικού. Αυτή η μέθοδος είναι χρήσιμη για τον υπολογισμό μικρών ποσοτήτων PCM, σε αντίθεση με την μέθοδο T-history που είναι αποτελεσματική για μεγάλες ποσότητες PCM.

Η μέθοδος DSC είναι ένα σύνθετο σύστημα και η άμεση χρήση των καμπυλών που προκύπτουν δεν είναι απολύτως σωστή επειδή μερικά φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας παραλείπονται, όπως η μεταφορά στο δείγμα, η ανομοιομορφία της θερμοκρασίας στο δείγμα (διεξαγωγή), ο χρόνος που απαιτείται για να θερμάνουμε ή να ψύξουμε το δείγμα (αδράνεια). Η μέθοδος DSC είναι η επικρατέστερη μέθοδος. Παρέχει γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα υπό μορφή διαγραμμάτων (Thermograms) ενέργειας-χρόνου. Η αξιολόγηση των thermograms παράγει τις ακριβείς τιμές των θερμοκρασιών μετάβασης φάσης κατά τη διάρκεια της τήξης και του πήξης του δείγματος, της θερμότητας της τήξης. [8], [10], [14]



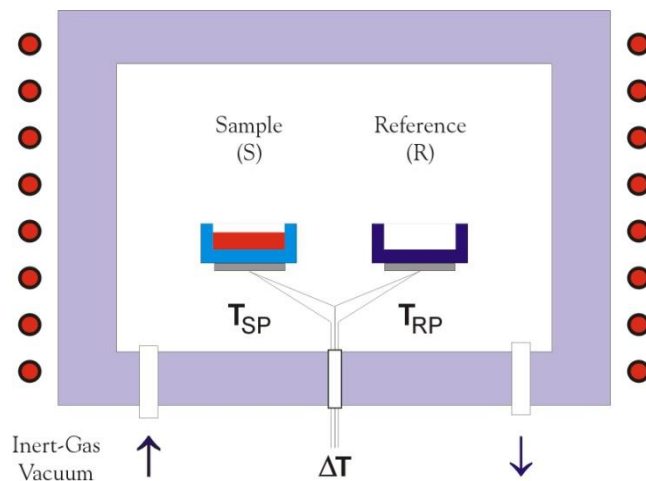
**Σχήμα 3.5:** Μέθοδος DSC, θερμιδομετρικές καμπύλες τήξης και πήξης [10]

### **3.2.3. Μέθοδος διαφορικής θερμικής ανάλυσης (DTA)**

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου DTA βασίζεται στην θέρμανση ενός δείγματος PCM (S) και ενός υλικού αναφοράς (R) υπό τις ίδιες συνθήκες ενώ ταυτόχρονα καταγράφεται η διαφορά θερμοκρασίας τους  $\Delta T$ . Στην συνέχεια κατασκευάζουμε το διάγραμμα  $\Delta T$ - t ή  $\Delta T$ - T. Οι φυσικές και χημικές αλλαγές στην δομή του δείγματος PCM οδηγούν στην απορρόφηση θερμότητας σχετικά με το υλικό (R).

Η καμπύλη του διαγράμματος παρουσιάζει ασυνέχειες στις μεταβολές θερμοκρασίας και η κλίση της σε κάθε σημείο εξαρτάται από την μικροδομή της θερμοκρασίας. Η περιοχή κάτω από το μέγιστο της καμπύλης μπορεί να συσχετιστεί με την αλλαγή της ενθαλπίας και δεν εξαρτάται από την θερμοχωρητικότητα του δείγματος.

Τα βασικά τμήματα μίας μονάδας διαφορικής θερμικής ανάλυσης (DTA) παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα. Το περιβάλλον των δειγμάτων αποτελείται από έναν κεραμικό (ή μεταλλικό) φραγμό για να εξασφαλίσει μια ομοιόμορφη διανομή θερμότητας, τα δοχεία στα οποία θα υποστούν το φαινόμενο της τήξης τα δείγματα και τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη.



**Σχήμα 3.6:** Μέθοδος DTA [14]

Η θερμική αγωγιμότητα του δείγματος (S) και του δείγματος αναφοράς (R) δεν είναι συνήθως ίδιες. Τα ακρότατα σημεία των καμπυλών που προκύπτουν από την μέθοδο DTA αντιστοιχούν στην εξέλιξη ή στην απορρόφηση της θερμότητας μετά από φυσικές ή χημικές αλλαγές στο δείγμα (S).

Η αναζήτηση των θερμοκρασιών μετάβασης φάσης δεν είναι πολύ ακριβής. Η αρχή του ακρότατου στην καμπύλη DTA δείχνει την έναρξη της μετάβασης φάσης, αλλά είναι πιθανό να εμφανιστούν αποκλίσεις της θερμοκρασίας από τις αληθινές τιμές, ανάλογα με τη θέση των θερμοηλεκτρικών ζευγών όσον αφορά το δείγμα. Επομένως, είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση του οργάνου που χρησιμοποιείται στην μέθοδο DTA χρησιμοποιώντας πρότυπα υλικά με γνωστές θερμοκρασίες τήξης.

Η περιοχή (A) που εσωκλείεται μεταξύ του ακρότατου της καμπύλης και της βασικής γραμμής συσχετίζεται με την αλλαγή της ενθαλπίας (H) του δείγματος κατά τη διάρκεια της μετάβασης φάσης. Με τον υπολογισμό του εμβαδού της κορυφής μπορούμε να υπολογίσουμε την μεταβολή της ενθαλπίας. Έτσι λοιπόν ισχύει:

$$A = -kGm\Delta H = -k'm\Delta H \quad (3.2)$$

όπου m: μάζα

G: ο παράγοντας βαθμονόμησης που εξαρτάται από τη γεωμετρία του δείγματος

K: σταθερά, που σχετίζεται με τη θερμική αγωγιμότητα του δείγματος,

(-): εξώθερμη μεταβολή της ενθαλπίας

(+): ενδόθερμη μεταβολή.

Ωστόσο είναι πιθανό να εμφανιστούν λάθη στον υπολογισμό των σωστών ακρότατων της καμπύλης και κυρίως σε υλικά που έχουν την μορφή σκόνης και σε συμπιεσμένα δείγματα που έχουν κάποιο βαθμό πορώδους. [14], [15]

### **3.2.4 Μέθοδος double-cell**

Τέλος έχει αναπτυχθεί μία νέα μέθοδος μέτρησης των ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης, η μέθοδος double-cell. Η μέθοδος double-cell είναι θερμοδομετρική μέθοδος που επιτρέπει τη μέτρηση και τη σύγκριση της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας μετά από πολυάριθμους κύκλους. Η μέθοδος βασίζεται στην εναλλακτική συμμετρική θέρμανση και ψύξη υπό ελεγχόμενες συνθήκες ποσότητας PCM συνήθως 1-2 kg που βρίσκονται μέσα σε έναν μονωμένο χώρο.

Στη μέθοδο double-cell η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας καθορίζεται από τη μέτρηση του ποσού της θερμικής ενέργειας που απαιτείται για να τηχθεί το δείγμα PCM υπό ορισμένες προϋποθέσεις. Το υλικό PCM, χωρίζεται σε δύο ίσες ποσότητες, τοποθετείται σε πλαστικές σακούλες και τοποθετούνται κάθετα σε καλά θερμικά μονωμένο κιβώτιο. Οι σακούλες χωρίζονται από μια λεπτή μεταλλική μεμβράνη και συμπιέζονται μεταξύ δύο θερμαινόμενων ή ψυχομένων χάλκινων δίσκων. Οι θερμαινόμενες ή ψυχομένες σακούλες είναι εξοπλισμένες με ένα σύνολο αισθητήρων θερμοκρασίας που βρίσκονται και στις δύο πλευρές τους. Στην συνέχεια οι σακούλες που περιέχουν τα PCM υποβάλλονται σε εναλλασσόμενους κύκλους θέρμανσης και ψύξης. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, ο ελεγκτής θερμοκρασίας ρυθμίζει αυτόματα τη θερμοκρασία των δίσκων θέρμανσης σε μία προκαθορισμένη θερμοκρασία (π.χ. 60°C για τον κύκλο θέρμανσης). Ο κύκλος θέρμανσης διαρκεί όσο χρόνο απαιτείται για να φθάσει στην προκαθορισμένη θερμοκρασία τα δείγματα PCMs. Μόλις όλοι οι αισθητήρες θερμοκρασίας υπερβούν την προκαθορισμένη θερμοκρασία η διαδικασία τήξης του PCM ολοκληρώνεται. Στην συνέχεια ενεργοποιείται το σύστημα ψύξης, η οποία επιτυγχάνεται με ψυκτικό υγρό θερμοκρασίας 8°C, το οποίο κυκλοφορεί μέσω σωληνώσεων που εφάπτονται στους χάλκινους δίσκους. Ο ψυκτικός κύκλος συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί θερμοκρασία των PCMs περίπου 6°C κάτω από την θερμοκρασία αλλαγής φάσης, ενώ το PCM βρίσκεται σε στερεά μορφή.

Μόνο κατά τη διάρκεια της θέρμανσης μετρίεται η κατανάλωση ενέργειας και καταγράφεται με σκοπό τον υπολογισμό της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας των PCM. Οι μετρήσεις της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται για τη θέρμανση του συστήματος είναι απλές και ακριβείς. Οι μετρήσεις της λανθάνουσας θερμότητας εκτελούνται εκατό κύκλους και χρειάζονται κατά μέσο όρο άνω 10 κύκλοι για την βελτίωση της ακρίβεια.

Τέλος η μέθοδος double-cell αν και είναι ανακριβής μέθοδος για τον προσδιορισμό της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας μικρών ποσοτήτων PCMs, θεωρείται ότι παρέχει καλές πληροφορίες για ερευνητές και υπεύθυνους για την ανάπτυξη εμπορικών ή μεγαλύτερης κλίμακας προϊόντων που θέλουν να προσδιορίσουν την θερμική συμπεριφορά μεγάλων ποσοτήτων υλικών αλλαγής φάσης μετά από έναν μεγάλο αριθμό κύκλων. [16]

### **3.6. Συμβατότητα των PCM με άλλα υλικά**

Αρκετές έρευνες έχουν διεξαχθεί σχετικά με την συμβατότητα των υλικών αλλαγής φάσης. Έχει εξεταστεί η απορρόφηση των οργανικών PCMs σε ένα ευρύ φάσμα οικοδομικών υλικών συμπεριλαμβανομένων ξύλα και τούβλα. Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι το σοβατεπί γύψου είναι συμβατό με μια ευρεία σειρά PCMs, συμπεριλαμβανομένων των λιπαρών οξέων και των εστέρων. Η συμβατότητα των συγκεκριμένων υλικών οφείλεται στην παρουσία υδροξειδίου του ασβεστίου ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), ενώ ορισμένα οργανικά PCMs θα αντιδράσουν με αυτό. Τα αποτελέσματα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

#### Σοβατεπί

- 25-30% κατά βάρος PCM οδήγησε σε πιο ικανοποιητική απόδοση
- Καμία σημαντική απαεριοποίηση (off-gasing)
- μη ανιχνεύσιμη διαρροή υγρού
- Πτητικές εκπομπές ίδιες με το δείγμα σκυροδέματος

#### Σκυρόδεμα

• Εκτός από την περίπτωση ενός πολύ πορώδους μίγματος, η απώλεια του PCM κατά τη διάρκεια του κύκλου ήταν αμελητέα.

Το σοβατεπί μπορεί να απορροφήσει μία ποσότητα PCM μέχρι περίπου 50% του βάρους του, και ανάλογα από τον τύπο του σκυροδέματος που χρησιμοποιούμε μπορεί να απορροφηθεί μέχρι 20% κατά βάρος του PCM. Από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έχει διαπιστωθεί ότι τα δείγματα εμποτισμένων PCMs έχουν καλύτερο κύκλο πήξης-τήξης από τα μη εμποτισμένα δείγματα λόγω της απορρόφησης χαμηλότερης υγρασίας.

Επομένως, η καταλληλότητα του σοβατεπί και του σκυροδέματος για αυτόν τον τύπο θερμικής αποθήκευσης είναι προφανής. Πρέπει να σημειωθεί ότι η δομή των υλικών αλλαγής φάσης είναι τέτοια, που ακόμη και στην υγρή κατάσταση, θα διατηρηθούν από το υλικό που τα φιλοξενεί. Στην περίπτωση άλλων υλικών, ιδιαίτερα τα λιπαρά οξέα, είναι απαραίτητο να επικαλυφθούν για να αποφευχθεί η διαρροή.

Τέλος μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά την συμβατότητα των υλικών αλλαγής φάσης με το πλαστικό καθώς γίνεται αποθήκευση τους σε αυτό σε ορισμένες περιπτώσεις. Στα πειράματα συμβατότητας του πλαστικού με τα PCMs που εκτελέστηκαν τα δείγματα των PCMs εισήχθησαν σε διαφορετικά πλαστικά μπουκάλια. Τα PCMs ήταν μοριακά κράματα C16-C18, RT20, RT25, RT26 και TH24, και τα πλαστικά υλικά ήταν PP, LDPE, HDPE, και PET.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα οργανικά PCM απορροφήθηκαν στο πλαστικό υλικό καθώς επίσης είχαμε και απορρόφηση υγρασίας. Τα μπουκάλια κατασκευασμένα από LDPE είχαν την υψηλότερη μαζική παραλλαγή και τη μεγάλη παραμόρφωση. Επομένως, το πλαστικό LDPE δεν είναι κατάλληλο υλικό για την αποθήκευση των οργανικών υλικών αλλαγής φάσης. Ενώ στην περίπτωση των οργανικών υλικών αλλαγής φάσης κατάλληλο πλαστικό για αποθήκευσή τους είναι το PET. Εάν λάβουμε υπόψη και την προσρόφηση υγρασίας, το πλαστικό υλικό PP θεωρείται κατάλληλο. Στην περίπτωση των ένυδρων αλάτων που η προσρόφηση ύδατος δεν επιδιώκεται, το καλύτερο υλικό για αποθήκευση είναι το HDPE. [16], [17]

### **3.7. Βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας των PCM**

Σε ένα λανθάνον σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, η επιφάνεια επαφής στερεής-υγρής κατάστασης απομακρύνεται από την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η επιφανειακή ροή θερμότητας μειώνεται λόγω της θερμικής αντίστασης του αυξανόμενου πάχους στρώματος του στερεού μέσου το οποίο τήκεται. Στην περίπτωση της πήξης, η αγωγή είναι ο μόνος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας, και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ασθενής. Στην περίπτωση

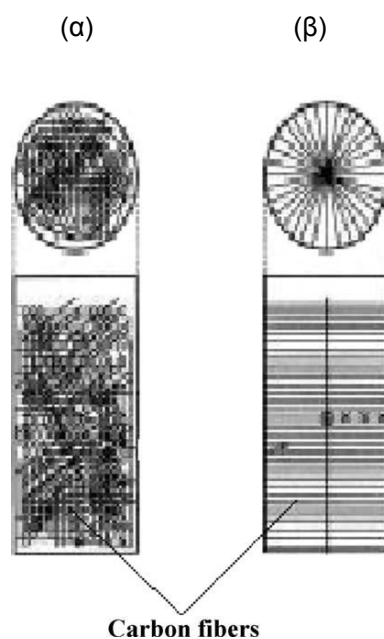


της πήξης, η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μπορεί να εμφανιστεί στο στρώμα που έχει τηχθεί πράγμα το οποίο αυξάνει γενικά το ποσοστό μεταφοράς θερμότητας έναντι της διαδικασίας πήξης. Εντούτοις, το γενικά χαμηλό ποσοστό μεταφοράς θερμότητας μπορεί να αυξηθεί αρκετά με τη χρησιμοποίηση μιας κατάλληλης τεχνικής αυξήσεων μεταφοράς θερμότητας. Διάφορες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί όσον αφορά την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας στα υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) και περιλαμβάνουν σωλήνες με πτερύγια σε διαφορετικούς σχηματισμούς, την εισαγωγή μεταλλικών καλουπιών στα PCMs, την ανάμειξη των PCMs με πορώδη υλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας ή τον εγκλεισμό των υλικών αλλαγής φάσης σε μικροκάψουλες (micro-encapsulation).

Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τις διάφορες μελέτες είναι ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο PCM. Η πλειοψηφία των τεχνικών για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας έχει βασιστεί στην εφαρμογή των πτερυγίων, διαφόρων σχηματισμών στα οποία ενσωματώνονται υλικά αλλαγής φάσης. Αυτό οφείλεται πιθανώς στην απλότητα, στην ευκολία στην επεξεργασία και στο χαμηλότερο κόστος της κατασκευής. Η διαδικασία ακολουθείται από τη εμπότιση του μεταλλικού καλουπιού με PCM χρησιμοποιώντας υλικά υψηλής αγωγιμότητας. Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι όταν ο αριθμός πτερυγίων είναι μεγαλύτερος από τέσσερα, τότε τα πτερύγια μπορούν να έχουν διαφορετικά ύψη. Μερικά πτερύγια μπορεί να υπόκεινται στον περιορισμό να έχουν ύψος ίσο με το μισό της ακτίνας των σωλήνων. Επίσης στην περίπτωση του σωλήνα με πτερύγια ο χρόνος για μια πλήρη στερεοποίηση είναι περίπου το  $1/n$  του χρόνου στερεοποίησης στην περίπτωση που δεν υπάρχει κανένα πτερύγιο στο σωλήνα. Επιπλέον μία ακόμη μέθοδος είναι η χρήση δακτυλίων μειούμενης διαμέτρου σε ένα κυλινδρικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με την χρήση της παραφίνης ως υλικό αλλαγής φάσης. Η θερμική αγωγιμότητα λοιπόν σε αυτήν την περίπτωση είναι δέκα φορές ( $2 \text{ W}/(\text{mK})$ ) μεγαλύτερη από αυτήν της παραφίνης ( $0,2 \text{ W}/(\text{mK})$ ). Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αύξησης μεταφοράς θερμότητας του κυκλικού πτερυγίου είναι η αναλογία του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα σωλήνων με πτερύγια και χωρίς πτερύγια. Επίσης μετά από σύγκριση που έγινε προέκυψε ότι η αναλογία των συνολικών ποσών θερμότητας που ανακτήθηκαν στα συστήματα σωλήνων με και χωρίς πτερύγια συσχετίζεται με τις αδιάστατες παραμέτρους Fourier, Stefan και Reynolds με έναν συντελεστή συσχετισμού 0,994 και μία σταθερή απόκλιση 0,023 και 0,028 αντίστοιχα.

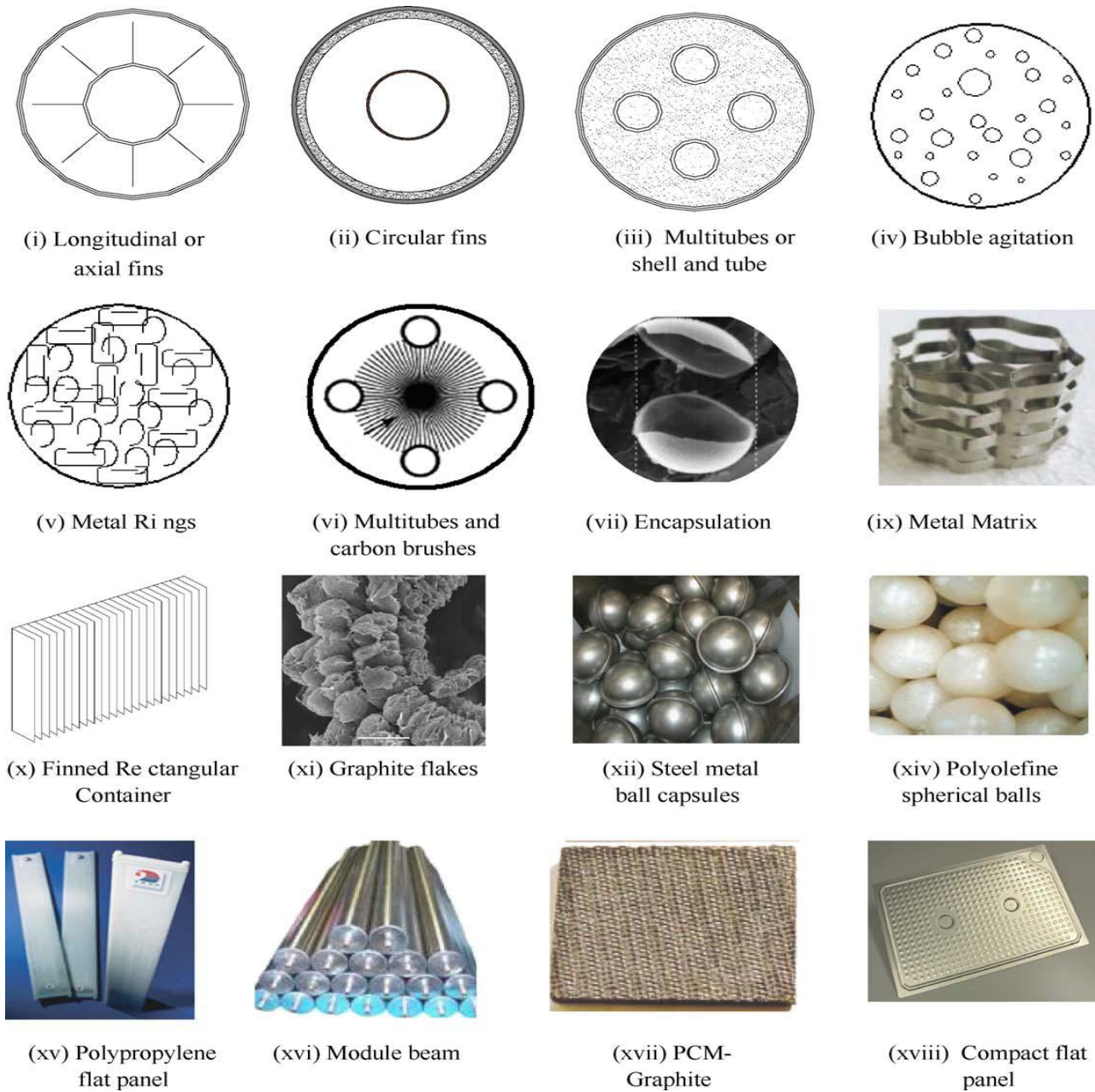
Επιπλέον ο εμπότισμός των PCMs με πορώδη υλικά υψηλής αγωγιμότητας είναι μία ευρέως διαδεδομένη μέθοδος. Τα πορώδη υλικά μπορεί να είναι είτε μεταλλικές μήτρες από χαλκό ή αλουμίνιο είτε φυσικά πορώδη υλικά όπως γραφίτης. Στο καθαρό υλικό αλλαγής

φάσης ο ρυθμός τήξης είναι αρκετά χαμηλός στον πάτο του δοχείου σε σύγκριση με την κορυφή. Με την προσθήκη πορωδών υλικών υψηλής αγωγιμότητας ο ρυθμός αυτός μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Η υψηλή αγωγιμότητα συσχετίζεται με το πορώδες, όσο μεγαλύτερο πορώδες έχουν τα υλικά τόσο υψηλότερη είναι η θερμική αγωγιμότητα και το αντίστροφο. Επίσης η χρήση ινών άνθρακα για την ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας της παραφίνης είναι διαδεδομένη. Οι ίνες άνθρακα έχουν μικρότερη πυκνότητα σε σχέση με τις μεταλλικές ίνες, αλλά περίπου ίδια θερμική αγωγιμότητα. Επίσης προστατεύουν τα συστήματα λανθάνουσας θερμότητας από την διάβρωση και βελτιώνουν την συμβατότητα των υλικών αλλαγής φάσης με άλλα υλικά. Οι ίνες άνθρακα προστίθενται στην παραφίνη για να συνθέσουν υλικά δύο διαφορετικών τύπων. Στην πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιούμε τυχαία προσανατολισμένες ίνες. Στην δεύτερη μέθοδο χρησιμοποιούμε τις ίνες άνθρακα που έχουν προσανατολισμό κατά μήκος της ακτίνας μιας κυλινδρικής κάψουλας. Μετά από μετρήσεις βρέθηκε ότι στην δεύτερη περίπτωση, δηλαδή στον τύπο με τις προσανατολισμένες ίνες άνθρακα η θερμική αγωγιμότητα είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτήν στην τυχαία κατανομή των ινών άνθρακα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στον τύπο των προσανατολισμένων ινών οι ίνες άνθρακα κατανεμήθηκαν κατά μήκος της ακτίνας, η οποία είναι και η κατεύθυνση της μετάδοσης θερμότητας.



**Σχήμα 3.8:** Ίνες άνθρακα σε κυλινδρική κάψουλα. (α) τυχαία διανομή (β) προσανατολισμένη κατανομή [18]

Τέλος μία ακόμη μέθοδος αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας των υλικών αλλαγής φάσης είναι η χρήση νερού που χρησιμοποιεί τρία διαφορετικά είδη υποστηρικτών, τα οποία είναι κομμάτια σωλήνων από ανοξείδωτο χάλυβα, κομμάτια σωλήνων χαλκού, και μήτρες από γραφίτη. Η μελέτη της μεθόδου πραγματοποιήθηκε σε μία ορθογώνια δεξαμενή που χωρίστηκε σε δύο μέρη με ένα χώρισμα αλουμινίου. Αυτό το χώρισμα λειτούργησε ως εναλλάκτης θερμότητας. Έξι θερμοηλεκτρικά ζεύγη τοποθετήθηκαν συμμετρικά σε διαφορετικές θέσεις μέσα στην δεξαμενή. Τα σήματα από τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη καταγράφηκαν για να μελετηθούν οι χρόνοι τήξης και πήξης. Έτσι λοιπόν τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα κομμάτια σωλήνων ανοξείδωτου χάλυβα δεν ενίσχυσαν τη μεταφορά θερμότητας. Ενώ, η χρήση των κομματιών σωλήνων από χαλκό και των μητρών από γραφίτη είχαν σημαντική επίδραση στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Επίσης οι χρόνοι τήξης και πήξης μειώθηκαν σημαντικά κατά έναν παράγοντα μέχρι 2,5. Ένα αναπόφευκτο μειονέκτημα που υπάρχει σε αυτήν την μέθοδο είναι ότι η θερμότητα που μεταφέρεται μέσω των δύο θαλάμων είναι άνιση εξαιτίας των διαφορετικών χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας των δύο πλευρών. [1], [9], [5], [18], [19]



**Σχήμα 3.9:** Μέθοδοι αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας των PCMs [19]

## **Κεφάλαιο 4: Μοντέλα προσομοίωσης αλλαγής φάσης**

### **4.1 Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης φαινομένων μεταφοράς**

Η μεταφορά θερμότητας στα PCMs είναι ένα παροδικό, μη γραμμικό φαινόμενο με μια κινούμενη στερεή-υγρή κοινή επιφάνεια. Η μη γραμμικότητα του φαινομένου δημιουργεί προβλήματα. Το πρόβλημα της κίνησης του στερεού-υγρού ορίου εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία αποθηκεύεται ή χάνεται λανθάνουσα θερμότητα από το υλικό. Ο αριθμός των προβλημάτων τα οποία λύνονται με την αναλυτική μέθοδο είναι πολύ περιορισμένος. Στην αποθήκευση θερμότητας με χρήση PCMs πρέπει να χρησιμοποιηθεί η αριθμητική μέθοδος για να βρεθεί η ακριβής λύση του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας.

Έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός αριθμητικών μεθόδων και μπορούν να διαχωριστούν σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα καλείται ισχυρή αριθμητική λύση. Σε αυτήν την κατηγορία παραμορφωμένα πλέγματα υιοθετούνται για να εξετάσουν τη θέση της κοινής στερεής-υγρής επιφάνειας. Σε αυτήν την μεθοδολογία, οι σύνθετες γεωμετρικές περιοχές των στερεών ή υγρών φάσεων μετασχηματίζονται σε σταθερές, απλές γεωμετρικές περιοχές μέσω της μεθόδου ισοδύναμου μετασχηματισμού (coordinate transformation technique). Συγχρόνως όμως οι εξισώσεις και οι οριακές συνθήκες γίνονται πιο περίπλοκες. Οι εξισώσεις του προβλήματος μπορεί να επιλυθούν με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Τέτοιες μέθοδοι ασχολούνται επίσης επιτυχώς με τα πολυδιάστατα προβλήματα με ή χωρίς φυσική μεταφορά στην υγρή φάση. Το μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι συχνά οδηγούν σε δύσκολους υπολογισμούς. Η δεύτερη ομάδα καλείται ασθενής λύση (weak solution). Σε αυτές τις μεθόδους, οι εξισώσεις εφαρμόζονται σε όλη την περιοχή των υλικών αλλαγής φάσης συμπεριλαμβανομένων των υγρών και στερεών φάσεων. Η θέση της στερεής-υγρής κοινής επιφάνειας καθορίζεται εφόσον γνωρίζουμε την κατανομή της θερμοκρασίας. Οι τρεις κύριες σημαντικές μέθοδοι σε αυτήν την ομάδα είναι η μέθοδος ενθαλπίας, η μέθοδος της ισοδύναμης θερμοχωρητικότητας, και η μέθοδος μετασχηματισμού της θερμοκρασίας (temperature-transforming method). Η μέθοδος μετασχηματισμού της θερμοκρασίας συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ενθαλπίας και αυτά της ισοδύναμης θερμοχωρητικότητας. [20], [21], [22]

#### 4.1.1. Μέθοδος ενθαλπίας

Με την μεθόδου της ενθαλπίας, το πρόβλημα της αλλαγής φάσης γίνεται πολύ απλούστερο δεδομένου ότι βασική εξίσωση είναι η κοινή και για τις δύο φάσεις. Η μέθοδος της ενθαλπίας μπορεί να αντιμετωπίσει τα ισόθερμα προβλήματα αλλαγής φάσης αλλά η θερμοκρασία σε ένα χαρακτηριστικό σημείο πλέγματος μπορεί να ταλαντευτεί με το χρόνο. Έτσι λοιπόν θεωρώντας ότι οι πυκνότητες της υγρής και στερεής φάσης είναι ίσες ( $\rho_l = \rho_s$ ) η εξίσωση της ενέργειας δίνεται από την σχέση:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial x} k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4.1)$$

Όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα,  $C_i$  η θερμοχωρητικότητα,  $k_i$  ο συντελεστής αγωγιμότητας, και  $H$  η ενθαλπία σαν σύνολο λανθάνοντος και αισθητού ποσού θερμότητας.

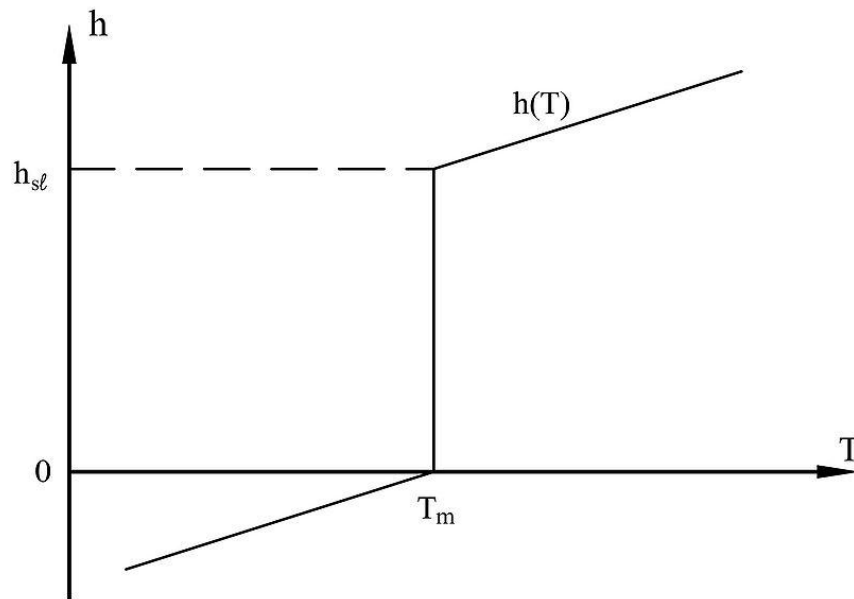
Η συναρτήσει της θερμοκρασίας δίνεται επίσης από την σχέση:

$$h(T) = \begin{cases} c_{ps}(T - T_m) & T < T_m \\ c_{pl}(T - T_m) + h_{sl} & T > T_m \end{cases} \quad (4.2)$$

Την οποία λύνοντας ως προς την θερμοκρασία προκύπτει:

$$T = \begin{cases} T_m + h/c_{ps} & h \leq 0 \\ T_m & 0 < h < h_{sl} \\ T_m + (h - h_{sl})/c_{pl} & h \geq h_{sl} \end{cases} \quad (4.3)$$

Επίσης στο σημείο τήξης του υλικού αλλαγής φάσης η ενθαλπία και η θερμοκρασία λαμβάνεται μηδενική όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 10:** Ενθαλπία συναρτήσει της θερμοκρασίας [41]

Επίσης η θερμική αγωγιμότητα του υλικού αλλαγής φάσης δίνεται από την σχέση:

$$k(T) = \begin{cases} k_s T < T_m \\ k_\ell T > T_m \end{cases} \quad (4.4)$$

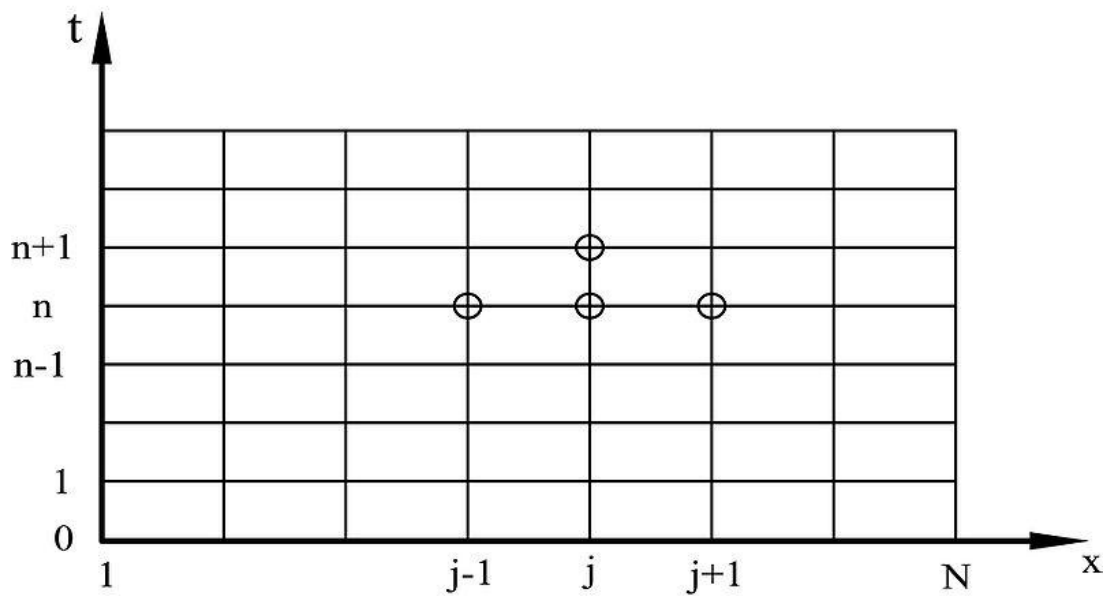
Και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος είναι:

$$T(x, t) = T_i < T_m \quad t = 0 \quad (4.5)$$

$$T(x, t) = T_0 > T_m \quad x = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = 0 \quad x = L \quad (4.7)$$

Για την επίλυση του προβλήματος προχωρούμε στην διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου τα οποία αντιπροσωπεύονται από τα σύμβολα  $j$ ,  $n$  αντίστοιχα. Η θερμοκρασία στην θέση  $x=(j-1)\Delta x$  την χρονική στιγμή  $t=n\Delta t$  συμβολίζεται με  $T_{jn}$ . [20], [22], [23], [24]



**Σχήμα 4.1:** Διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου [22]

Έτσι λοιπόν η εξίσωση (4.1) με εμπρός διαφορές ως προς τον χώρο και κεντρικές ως προς τον χρόνο μετασχηματίζεται στην παρακάτω σχέση:

$$\rho \frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t} = \frac{k_{j+\frac{1}{2}}(T_{j+1}^n - T_j^n) - k_{j-\frac{1}{2}}(T_j^n - T_{j-1}^n)}{(\Delta x)^2} \quad j = 2, \dots, N-1 \quad (4.8)$$

Και μετά από πράξεις η (4.8) σχέση γίνεται :

$$h_j^{n+1} = \frac{\Delta t}{\rho(\Delta x)^2} \left( k_{j+\frac{1}{2}} T_{j+1}^n + k_{j-\frac{1}{2}} T_{j-1}^n \right) + \left( h_j^n - \frac{\Delta t}{\rho(\Delta x)^2} \left( k_{j+\frac{1}{2}} + k_{j-\frac{1}{2}} \right) T_j^n \right) \quad j = 2, \dots, N-1 \quad (4.9)$$

ενώ οι θερμικές αγωγιμότητες υπολογίζονται από τους τύπους:



$$k_{j+\frac{1}{2}} = \frac{2k_j k_{j+1}}{k_j + k_{j+1}} \quad (4.10)$$

$$k_{j-\frac{1}{2}} = \frac{2k_{j-1} k_j}{k_{j-1} + k_j} \quad (4.11)$$

Η εξίσωση (4.3) και οι οριακές συνθήκες (4.5), (4.6), (4.7) γίνονται:

$$T_j^{n+1} = \begin{cases} T_m + h_j^{n+1}/c_{ps} & h_j^{n+1} \leq 0 & \text{(solid)} \\ T_m & 0 < h_j^{n+1} < h_{sl} & \text{(interface)} \\ T_m + (h_j^{n+1} - h_{sl})/c_{pl} & h_j^{n+1} \geq h_{sl} & \text{(liquid)} \end{cases} \quad j = 2, \dots, N-1 \quad (4.12)$$

$$T_j^0 = T_i \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (4.13)$$

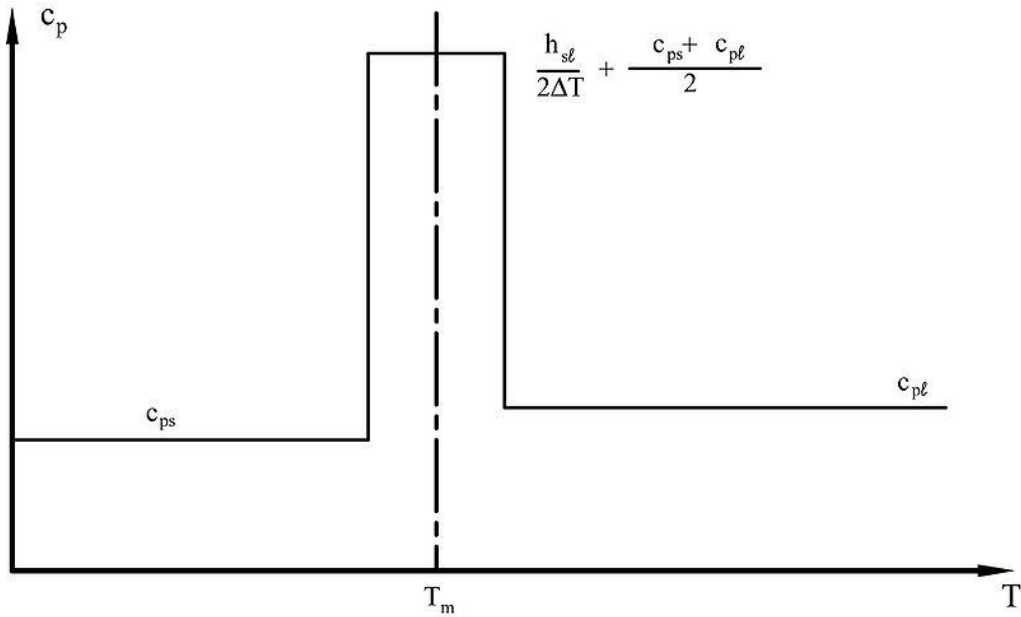
$$T_1^{n+1} = T_0 \quad (4.14)$$

$$T_N^{n+1} = T_{N-1}^{n+1} \quad (4.15)$$

#### **4.1.2. Μέθοδος ισοδύναμης θερμοχωρητικότητας**

Κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης από στερεή σε υγρή κατάσταση, το PCM μπορεί να απορροφήσει ή να απελευθερώσει τη θερμότητα σε μια σταθερή θερμοκρασία  $T_M$ . Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία του PCM παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια που απορροφά ή απελευθερώνει θερμότητα, πράγμα το οποίο υποδηλώνει ότι η θερμοχωρητικότητα του PCM στη θερμοκρασία  $T_M$  είναι άπειρη. Στην μέθοδο ενεργού θερμοχωρητικότητας, θεωρούμε ότι οι διαδικασίες τήξης και πήξης εμφανίζονται μετά από ένα εύρος θερμοκρασιών ( $T_M - \Delta T$ ,  $T_M + \Delta T$ ) αντί σε μια ενιαία θερμοκρασία  $T_M$ . Σε ένα σύστημα πολλών συστατικών, η διαφορά  $\Delta T$  μπορεί να επιλεχτεί με βάση το εύρος των θερμοκρασιών της αλλαγής φάσης. Για ένα σύστημα με ένα συστατικό με ένα προκαθορισμένο σημείο τήξης, η διαφορά  $\Delta T$  πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Επίσης, η λανθάνουσα θερμότητα μετατρέπεται στην ενεργό θερμοχωρητικότητα του PCM. Κατά συνέπεια, η ειδική θερμότητα του PCM μπορεί να εκφραστεί ως:

$$c_p(T) = \begin{cases} c_{ps} & T < T_m - \Delta T \\ \frac{h_{sl}}{2\Delta T} + \frac{c_{ps} + c_{pl}}{2} & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ c_{pl} & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (4.16)$$



**Σχήμα 4.2:** Ειδική θερμοχωρητικότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας [22]

Η παραπάνω εξίσωση προϋποθέτει ότι η θερμοκρασία του PCM αλλάζει από  $T_M - \Delta T$  μέχρι  $T_M + \Delta T$ , όταν η λανθάνουσα θερμότητα, απορροφάται από το PCM κατά τη διάρκεια της τήξης. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας στερεοποίησης, το PCM απελευθερώνει τη λανθάνουσα θερμότητα και η θερμοκρασία του μειώνεται από  $T_M + \Delta T$  σε  $T_M - \Delta T$ . Στην περίπτωση ενός τρισδιάστατου προβλήματος τήξης/στερεοποίησης στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, η ενεργειακή εξίσωση για την ολόκληρη περιοχή του PCM μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.17)$$

όπου η θερμική αγωγιμότητα δίνεται από την σχέση: [22], [23]

$$k(T) = \begin{cases} k_s & T < T_m - \Delta T \\ k_s + \frac{k_\ell - k_s}{2\Delta T} (T - T_m + \Delta T) & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ k_\ell & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (4.18)$$

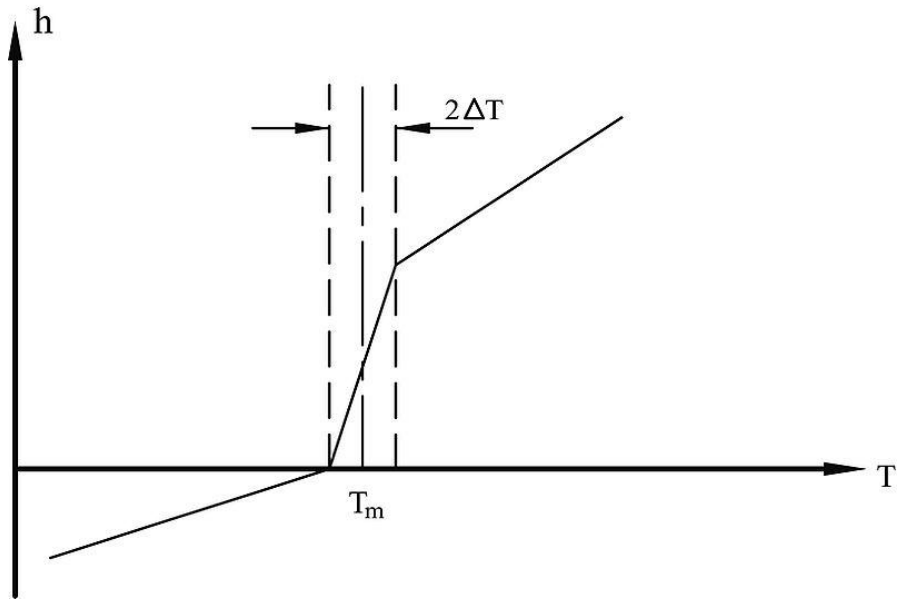
#### **4.1.3 Μέθοδος μετασχηματισμού της θερμοκρασίας (temperature-transforming)**

Αυτό το μοντέλο συνδυάζει όπως προαναφέραμε τα πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω μεθόδων. Για την μετάδοση θερμότητας σε ένα σύστημα τριών διαστάσεων η εξίσωση της ενθαλπίας δίδεται από την σχέση:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.19)$$

Η εξάρτηση της ενθαλπίας από την θερμοκρασία δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα η οποία εκφράζεται αναλυτικά και από την σχέση (4.20):

$$h(T) = \begin{cases} c_{ps}(T - T_m) + c_{ps}\Delta T & T < T_m - \Delta T \\ \left( \frac{c_{ps} + c_{p\ell}}{2} + \frac{h_{s\ell}}{2\Delta T} \right) (T - T_m) + \frac{c_{ps} + c_{p\ell}}{2} \Delta T + \frac{h_{s\ell}}{2} T_m - \Delta T & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ c_{p\ell}(T - T_m) + c_{ps}\Delta T + h_{s\ell}T & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (4.20)$$



**Σχήμα 4.3:** Εξάρτηση της ενθαλπίας από την θερμοκρασία [22]

Η σχέση (2) μπορεί να μετασχηματιστεί στην εξίσωση:

$$h(T) = c_p(T)(T - T_m) + b(T) \quad (4.21)$$

Όπου  $c_p(T)$  και  $b(T)$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$c_p(T) = \begin{cases} c_{ps} & T < T_m - \Delta T \\ c_m + \frac{h_{sl}}{2\Delta T} & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ c_{pl} & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (4.22)$$

$$b(T) = \begin{cases} c_{ps}\Delta T & T < T_m - \Delta T \\ c_m\Delta T + \frac{h_{sl}}{2} & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ c_{ps}\Delta T + h_{sl} & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (4.23)$$

Τέλος συγκρίνοντας τις δύο τελευταίες μεθόδους μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μέθοδος ισοδύναμης θερμοχωρητικότητας είναι μία ειδική περίπτωση του μοντέλου μετασχηματισμού της θερμοκρασίας (temperature-transforming) με  $\frac{\partial b}{\partial t} = 0$ . [22]

## **4.2. Προβλήματα συμπεριφοράς των PCM**

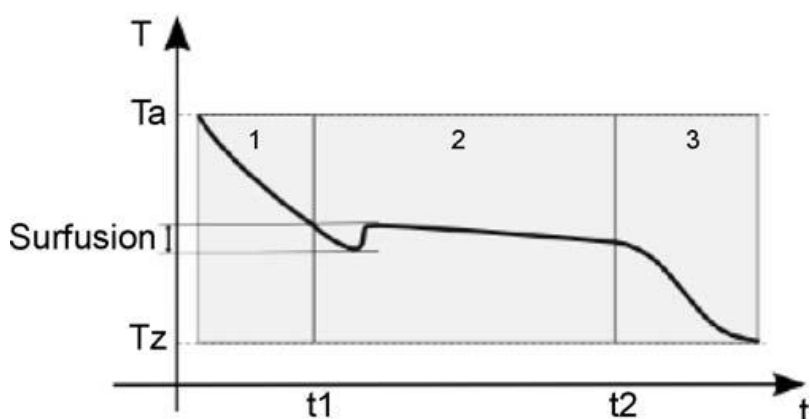
Τα υλικά αλλαγής φάσης εκτός από το σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία εμφανίζουν παρουσιάζουν και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα, τα σημαντικότερα των οποίων είναι το φαινόμενο της υπέρψυξης, το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσης και η εξασθένηση των ιδιοτήτων του σε εκτεταμένους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης.

### **4.2.1. Φαινόμενο υπέρψυξης (Supercooling)**

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο το φαινόμενο της υπέρψυξης είναι ένα μειονέκτημα το οποίο εμφανίζεται στα υλικά αλλαγής φάσης και κυρίως στα ένυδρα άλατα. Όταν αναφερόμαστε σε αυτό το φαινόμενο εννοούμε την διαδικασία κατά την οποία μειώνουμε την θερμοκρασία ενός υγρού ή ενός αερίου κάτω από το σημείο πήξης του, χωρίς αυτό όμως να εισέρχεται στην στερεή κατάσταση.

Η στερεοποίηση ενός PCM αρχίζει με τον σχηματισμό κρυστάλλων, οι οποίοι αποκαλούνται πυρήνας. Στην συνέχεια οι κρύσταλλοι πολλαπλασιάζονται στο υλικό για να σχηματίσουν την στερεά φάση. Το ποσοστό του σχηματισμού των κρυστάλλων ενός υλικού είναι η ικανότητά του να δημιουργεί τον πυρήνα όταν η θερμοκρασία του μειώνεται κάτω από την θερμοκρασία τήξης. Στην περίπτωση που ο σχηματισμών κρυστάλλων ενός υλικού είναι πολύ χαμηλός, τότε το υλικό μπορεί να παραμείνει στην υγρή φάση ακόμα και όταν η θερμοκρασία του μειωθεί κάτω από την θερμοκρασία τήξης και η στερεοποίηση αρχίζει αργότερα όταν η θερμοκρασία του αρχίζει πάλι να αυξάνεται, αυτή η συμπεριφορά ονομάζεται το φαινόμενο της υπέρψυξης. Το φαινόμενο της υπέρψυξης παρατηρείται στο παρακάτω σχήμα θερμοκρασίας-χρόνου στο οποίο παρουσιάζεται η πτώση της θερμοκρασίας του υγρού PCM πριν την εκκίνηση της αλλαγής φάσης κάτω από την θερμοκρασία στερεοποίησης. Ενώ συνεχίζεται η ψύξη, η θερμοκρασία του υλικού αυξάνεται και σταθεροποιείται για ένα μικρό χρονικό διάστημα και στην συνέχεια ακολουθεί πτώση της μέχρι την ολοκληρωτική κρυστάλλωση. Ως αποτέλεσμα αυτού, μία σημαντική ποσότητα της ενθαλπίας που συνδέεται με τη μετάβαση φάσης ξοδεύεται για την αύξηση της θερμοκρασίας του υπέρψυκτου PCM καθώς η θερμοκρασία πρέπει να αυξηθεί για να ξεκινήσει η κρυστάλλωση. Όσο υψηλότερος είναι ο βαθμός του μηχανισμού υπέρψυξης (supercooling) τόσο μικρότερο ποσοστό λανθάνουσας θερμότητας μπορεί να αποσυρθεί στη σταθεροποιημένη θερμοκρασία αλλαγής φάσης.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να περιορισθεί με την προσθήκη πυρήνων στα υλικά αλλαγής φάσης. Έχουμε δύο ειδών πυρήνων: τους Εγγενής Πυρήνες (Intrinsic nucleators) και τους Συμβατούς (Extrinsic nucleators). Οι πρώτοι για πυρήνες του ίδιου του υλικού αλλαγής φάσης οι οποίοι πρέπει να φυλάσσονται ξεχωριστά από το PCM για να αποφευχθεί ο κίνδυνος της τήξης τους και ως αποτέλεσμα αυτού η μη αποδοτική συμπεριφορά τους. Οι συμβατοί πυρήνες πρόκειται για χημικά υλικά τα οποία παρουσιάζουν παρόμοια δομή με αυτή των υλικών αλλαγής φάσης που χρησιμοποιούμε, δηλαδή έχουν παρόμοια θερμοκρασία τήξης με αυτή του υλικού αλλαγής φάσης. [10], [25], [26], [27], [28]



**Σχήμα 4.4:** Φαινόμενο υπέρψυξης (Supercooling) [10]

#### **4.2.2 Φαινόμενο διαχωρισμού φάσης**

Το σημαντικότερο πρόβλημα των ένυδρων αλάτων ως υλικά αλλαγής φάσης όπως προαναφέραμε, είναι ότι υπόκεινται σε ασύμφωνη τήξη. Αναλυτικότερα τα η-μόρια του νερού ενυδάτωσης δεν είναι επαρκή για να διαλύσουν ένα μόριο του άλατος. Το στερεό άλας, λόγω της υψηλότερης πυκνότητάς του, επικάθεται στο κατώτατο σημείο του κιβωτίου με αποτέλεσμα να μην είναι διαθέσιμο για επανένωση με το νερό κατά τη διάρκεια της αντίστροφης διαδικασίας. Δηλαδή στην πήξη η αποκατάσταση του υγρού δύναται να ξεκινήσει στην κοινή επιφάνεια του διαλύματος και του ιζήματος. Όμως λόγω του συνόρου αυτού που έχει δημιουργηθεί μεταξύ του διαλύματος του άνυδρου άλατος και της υγρής φάσης η πήξη δεν μπορεί να διεξαχθεί. Αποτέλεσμα αυτού είναι η κακή κρυστάλλωση της ένωσης και η απώλεια των επιθυμητών ιδιοτήτων των PCMs.

Το πρόβλημα της ασύμφωνης τήξης μπορεί να αντιμετωπιστεί με ένα από τα ακόλουθα μέσα: (i) με μηχανική ανάδευση, (ii) με την τοποθέτηση των PCM σε κάψουλες, (iii) με την προσθήκη παραγόντων, (iv) μέσω υπερβολικής ποσότητας νερού έτσι ώστε τα μόρια κρυσταλλων τα οποία έχουν υποστεί τήξη να μην παράγουν υπερκορεσμένο διάλυμα, (v) και με την τροποποίηση της χημικής σύνθεσης του συστήματος.

Η προσθήκη παραγόντων επιτυγχάνεται είτε με προσθήκη υλικών που δημιουργούν τρισδιάστατο πλέγμα είτε με πηκτικές ουσίες. Με την προσθήκη ενός υλικού (π.χ. πολυμερές σώμα) στο άλας για να δημιουργήσουμε ένα τρισδιάστατο δίκτυο επιτυγχάνουμε την αύξηση της σταθερότητάς του, δηλαδή την συγκράτησή του,. Ενώ οι πηκτικές ουσίες προστίθενται στο διάλυμα για να αυξήσουν το ιξώδες και παράλληλα να συγκρατήσουν το ένυδρο άλας. Όταν κατάλληλη πηκτική ουσία προστεθεί στο PCM, τα άλυτα άλατα αναστέλλονται ομοιογενώς και υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να βελτιωθεί η πήξη.

Έχουν μελετηθεί πολλές πηκτικές ουσίες στις οποίες συμπεριλαμβάνονται διάφορες οργανικές ουσίες όπως το άμυλο και διάφοροι τύποι κυτταρίνης, καθώς επίσης και ανόργανες ουσίες.

Το αποτέλεσμα της ασύμφωνης τήξης είναι ο διαχωρισμός των φάσεων. Για να υπερνικήσουμε το πρόβλημα του διαχωρισμού του άλατος και τον υπερκορεσμό των ένυδρων αλάτων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα κυλινδρικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. [3], [12]

#### **4.2.3. Απώλεια ιδιοτήτων σε εκτεταμένους κύκλους φόρτισης**

Ένα επίσης μεγάλο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα υλικά αλλαγής φάσης είναι η υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους σε εκτεταμένους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης. Πρακτικά αυτό σημαίνει μεταβολή των σημείων τήξης και πήξης ή μεταβολή της θερμοχωρητικότητας. Αυτό το μειονέκτημα οφείλεται στην χαμηλή σταθερότητα των ιδιοτήτων των υλικών και στην διάβρωση μεταξύ του PCM και των καψουλών. Οι κάψουλες των PCMs πρέπει να έχουν την ικανότητα να διατηρήσουν την φυσική και θερμική σταθερότητα, δεδομένου ότι το PCM υποβάλλεται στους επαναλαμβανόμενους κύκλους θέρμανσης και ψύξης.

Αρκετές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με το παραπάνω μειονέκτημα των PCMs. Έτσι ενδεικτικά αξίζει να αναφέρουμε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στο στεαρικό οξύ, στο κερί ακεταμιδών και παραφίνης, έδειξαν ότι δεν υπήρξε καμία υποβάθμιση στις

φυσικές και χημικές τους ιδιότητες μετά από 1500 επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης. Επίσης μελετήθηκε η θερμική συμπεριφορά PCM εμποτισμένο σε γυψοσανίδα και μετά από εκτεταμένους κύκλους φόρτισης δεν παρατηρήθηκε μείωση της θερμοχωρητικότητας της παραφίνης.

Τέλος η πυκνότητα ενός PCM παίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα αποθήκευσής ανά μονάδα όγκου. Η μικρή αλλαγή όγκου κατά την διάρκεια αλλαγής φάσης από το στερεό σε υγρό ή από το υγρό σε στερεό είναι επιθυμητή καθώς επηρεάζει την θερμοχωρητικότητα του υλικού. Οι μεγάλες αλλαγές στον όγκο μπορούν να προκαλέσουν υψηλή ένταση στους τοίχους. Η συστολή κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης μπορεί όχι μόνο να μειώσει την περιοχή μεταφοράς θερμότητας αλλά και να διαχωρίσει το PCM από την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, πράγμα το οποίο αυξάνει την αντίσταση μεταφοράς θερμότητας. Η μεταβολή του όγκου αποτελεί ένα δευτερεύον πρόβλημα των υλικών αλλαγής φάσης. [5], [29]



## **Κεφάλαιο 5: Ενθυλάκωση (encapsulation) υλικών αλλαγής φάσης (PCMs).**

Η επιτυχής εκμετάλλευση των υλικών αλλαγής φάσης (PCM) και της θερμότητας την οποία αποθηκεύουν εξαρτάται από την ανάπτυξη των μέσων συγκράτησης. Με την ενθυλάκωση των PCMs με διαφορετική γεωμετρία των καψών όπως αναφέραμε και προηγουμένως επιτυγχάνουμε αύξηση της θερμικής τους αγωγιμότητας.

### **5.1. Χαρακτηριστικά των μέσων συγκράτησης**

Τα μέσα συγκράτησης των υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) πρέπει να έχουν τις εξής ιδιότητες:

- I. Να καλύπτουν τις απαιτήσεις ισχύος, ευελιξίας, αντίστασης στην διάβρωση και της θερμικής σταθερότητας,
- II. Να δρουν ως εμπόδια για να προστατεύουν τα PCMs από επιβλαβείς αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον
- III. Να παρέχουν ικανοποιητική επιφάνεια για τη μεταφορά θερμότητας
- IV. Να παρέχουν δομική σταθερότητα και εύκολο χειρισμό.
- V. Να μην αλληλεπιδρούν με τα υλικά αλλαγής φάσης
- VI. Να είναι υλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας

Οι μέθοδοι συγκράτησης των υλικών αλλαγής φάσης είναι η μαζική αποθήκευση σε δεξαμενές με εναλλάκτες θερμότητας, η μακρο-ενθυλάκωση και μικρο-ενθυλάκωση. [8], [30]

### **5.2 Μακρο-ενθυλάκωση (macro-encapsulation)**

Ο πιο κοινός τύπος συγκράτησης των PCMs είναι μακροενθυλάκωση. Κατά την μακροενθυλάκωση μια σημαντική ποσότητα του PCM είναι τοποθετημένη σε κάψα σε μια ιδιαίτερη μονάδα. Η ανά μονάδα μάζα του PCM μπορεί να κυμανθεί από μερικά γραμμάρια ως ένα χιλιόγραμμα. Το πλεονέκτημα της μακροενθυλάκωση είναι η δυνατότητα εφαρμογής της και σε υγρά και αέρια ως ρευστά μεταφοράς θερμότητας. Η μορφή των μακροκάψουλων ποικίλλει από ορθογώνια δοχεία ή σφαίρες ή σε σακούλες με ακαθόριστο σχήμα. Για να εξασφαλιστεί μια καλή ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του περιβάλλοντος και του PCM, οι

μονάδες πρέπει να έχουν μια υψηλή αναλογία μεταξύ της επιφάνειας και του όγκου, δηλαδή υψηλή περιοχή μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα όγκου.

Το κλειδί για μία επιτυχή μακροενθυλάκωση είναι το σχήμα της κάψουλας ώστε να ταιριάζει στην εφαρμογή. Με την μακροενθυλάκωση των PCMs επιτυγχάνουμε: (i) αποφυγή μεγάλων διαχωρισμών φάσεων (ii) αυξάνουμε το ποσοστό μεταφοράς θερμότητας και (iii) εξασφαλίζουμε την συντήρηση του υλικού αλλαγής φάσης (PCM). Τα πιο αποδοτικά κιβώτια από οικονομικής απόψεως οι είναι τα πλαστικά μπουκάλια (μπουκάλια πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας, μπουκάλια πολυπροπυλενίου), δοχεία επικαλυμμένα με κασσίτερο και δοχεία μαλακού χάλυβα.

Η μακροενθυλάκωση δεν είναι ευρέως διαδεδομένη μέθοδος λόγω του μικρού ποσοστού μεταφοράς θερμότητας. Το PCM παγώνει στην επιφάνεια εναλλακτών θερμότητας με συνέπεια να έχουμε φτωχό ποσοστό μεταφοράς θερμότητας λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας των PCMs. Επίσης μερικά ακόμη μειονεκτήματα είναι ότι οι μακροκάψουλες όταν χρησιμοποιούνται σε κτίρια πρέπει να προστατευθούν από τυχόν καταστροφές ενώ το κτίριο χρησιμοποιείται (πχ. τρύπες με τρυπάνια στους τοίχους ή καρφιά). Επίσης, οι μακροκάψουλες απαιτούν συχνά περισσότερη εργασία επί του κτιρίου ούτως ώστε να ενσωματωθούν στα υλικά, πράγμα το οποίο καθιστά αυτά τα συστήματα ακριβά. [2], [10], [31], [32], [33]

### **5.3. Μικρο-ενθυλάκωση (micro-encapsulation)**

Η μικροενθυλάκωση αναφέρεται στις τεχνικές στις οποίες ένας μεγάλος αριθμός μορίων PCMs (πυρήνας) περικλείεται μέσα σε μια σφραγισμένη, συνεχή μήτρα ( κέλυφος). Οι μικροκάψουλες μπορούν να περικλείουν στερεά ή υγρά υλικά. Υποβάλλονται σε αλλαγή φάσης και όγκου του πυρήνα τους. Η ακαμψία της μήτρας αποτρέπει την μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής και εξαναγκάζει όλη η μεταφορά θερμότητας να γίνεται μέσω αγωγής.

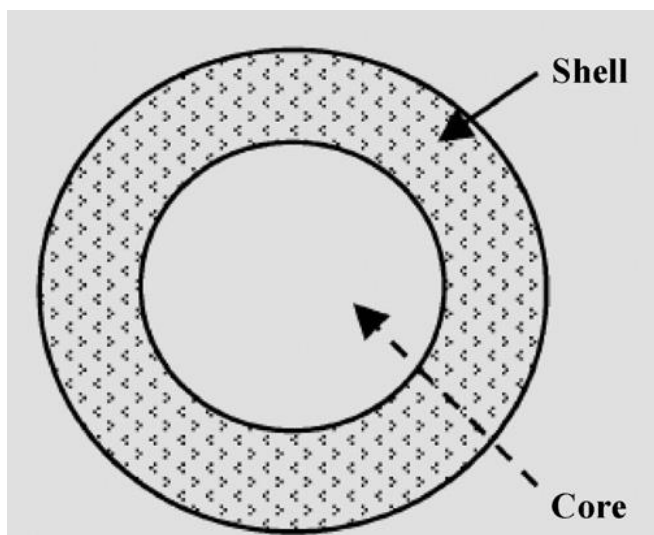
Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή του υλικού του κελύφους για να αποφύγουμε τις χημικές αντιδράσεις μεταξύ των μικροκάψουλων και των οικοδομικών υλικών. Τρία χαρακτηριστικά των μικροκάψουλων είναι σχετικά με την εκτίμηση της ποιότητας της σκόνης του PCM: η μέση διάμετρός τους, το πάχος του κελύφους τους και το ποσοστό της μάζας του PCM έναντι της συνολικής μάζας της κάψας. Όταν το μέγεθος των μικροκάψουλων

είναι κάτω από μερικά  $\mu\text{m}$ , οι πυρηνικοί παράγοντες, οι οποίοι είναι απαραίτητοι στην έναρξη της στερεοποίησης, σπανίζουν.

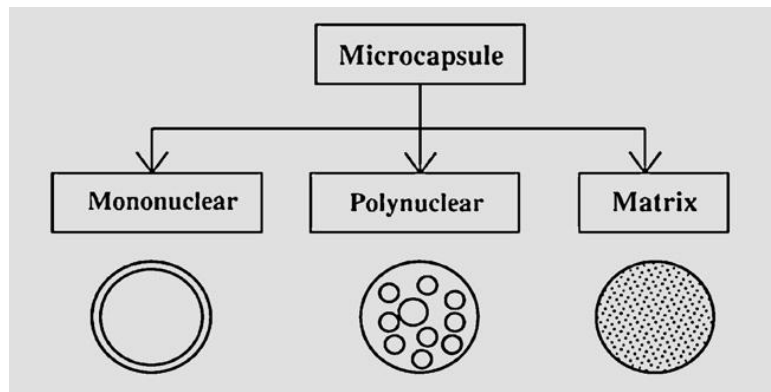
Προς το παρόν το κόστος των συστημάτων μικροενθυλάκωσης είναι υψηλό έναντι άλλων μεθόδων αποθήκευσης, και χρησιμοποιείται μόνο στις θερμικές εφαρμογές ελέγχου. Όπως αποδεικνύεται, η μακροενθυλάκωση είναι η κυρίαρχη μέθοδος συγκράτησης των PCMs. Με προσεκτική επιλογή της γεωμετρίας των καψών και του υλικού των καψών, η μακροενθυλάκωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα ευρύ φάσμα αναγκών ενεργειακής αποθήκευσης.

Η περιγραφή των μικροκάψουλων εξαρτάται κυρίως από το υλικό των πυρήνων και τη διαδικασία απόθεσης του κελύφους. Υπάρχουν τριών ειδών μικροκάψουλες οι οποίες είναι:

- Οι μονοπυρηνικές μικροκάψουλες οι οποίες περιέχουν το κέλυφος γύρω από τον πυρήνα.
- Οι πολυπυρηνικές μικροκάψουλες οι οποίες μπορεί να εσωκλείουν πολλούς πυρήνες μέσα στο κέλυφος.
- Ενθυλάκωση μητρών στην οποία το υλικό του πυρήνα έχουν διανεμηθεί ομοιογενώς στο υλικό του κελύφους. [8], [10], [34]



**Σχήμα 5.1:** Περιγραφή της μικροκάψουλας [34]



**Σχήμα 5.2:** Είδος μικροκάψουλας [34]

### **5.3.1. Μέθοδοι παραγωγής των μικροκάψουλων**

Διάφοροι φυσικές ή χημικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί σχετικά με την παραγωγή των μικροκάψουλων. Η χρήση μερικών τεχνικών έχει περιοριστεί λόγω του υψηλού κόστους επεξεργασίας, και της χρήσης των οργανικών διαλυτών, οι οποίοι είναι μια ανησυχία για την υγεία και το περιβάλλον. Οι πιο ευρέως διαδεδομένες λοιπόν μέθοδοι είναι οι εξής:

#### **Φυσικές μέθοδοι:**

- Επικάλυψη με τύμπανο (pan coating)
- επικάλυψη με αιώρηση σε ρεύμα αέρος (air-suspension coating)
- φυγοκεντρική εξώθηση
- παλμικά ακροφυσίων
- ξήρανση ψεκασμού (spray drying)

#### **Χημικές μέθοδοι:**

- ενδιάμεσος πολυμερισμός,
- κανονικός πολυμερισμός,
- πολυμερισμός μητρών

Παρακάτω αναλύονται οι σημαντικότερες των παραπάνω μεθόδων. [34], [35]

#### **5.3.1.1. Air-suspension coating**

Με αυτήν την διαδικασία μπορούμε να παράγουμε μικροκάψουλες μεγέθους μεγαλύτερες των 100μm. Είναι γνωστή ως διαδικασία Wurster η οποία περιλαμβάνει διασκορπισμένους πυρήνες στερεών υλικών σε ένα ρεύμα αέρα. Ο σχεδιασμός του θαλάμου και οι λειτουργικές

του παράμετροι επηρεάζουν τη ροή αναδιανομής των μορίων μέσω της ζώνης του επιστρώματος της αίθουσας, όπου ένα υλικό επιστρώματος, συνήθως μια πολυμερής λύση, ψεκάζεται επάνω στα ρευστοποιημένα μόρια. Η κυκλική διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να ληφθεί το επιθυμητό πάχος της επένδυσης. Η διαδικασία θεωρείται γενικά εφαρμόσιμη στην ενθυλάκωση των πυρήνων στερεών υλικών. [30], [32]

#### **5.3.1.2. Ξήρανσης ψεκασμού (Spray drying)**

Η μέθοδος ξήρανσης ψεκασμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μικροενθυλάκωση, αν και παραδοσιακά έχει συνδεθεί κυρίως με την ξήρανση των υλικών. Η ξήρανση ψεκασμού ονομάζεται ο μετασχηματισμός του τροφοδοτικού υλικού από ένα ρευστό στάδιο σε μια ξηρά μοριακή μορφή με τον ψεκασμό του τροφοδοτικού υλικού σε ένα μέσο.

Η μέθοδος ξήρανσης ψεκασμού αποτελείται από τέσσερα στάδια.

- Ο ψεκασμός του τροφοδοτικού υλικού.
- Επαφή spray-αέρα (μίξη και ροή)
- Ξήρανση του ψεκασμού (εξάτμιση υγρασίας)
- Χωρισμός του ξηρού προϊόντος από τον αέρα.

Τα υψηλά ποσοστά εξάτμισης της υγρασίας επιτρέπουν στη θερμοκρασία του προϊόντος να είναι αρκετά χαμηλότερη από αυτή του αέρα που έχει ξηρανθεί, ο οποίος αφήνει την αποξηραμένη αίθουσα. Το προϊόν έτσι δεν υποβάλλεται σε υψηλές θερμοκρασίες και σε υποβάθμιση. [30]

#### **5.3.1.3. Ενδιάμεσος πολυμερισμός**

Ο ενδιάμεσος πολυμερισμός περιλαμβάνει την αντίδραση διάφορων μονομερών στη κοινή επιφάνεια μεταξύ δύο αμιγών υγρών φάσεων για να διαμορφώσει μια ταινία του πολυμερούς σώματος η οποία ενθυλακώνει τη διασκορπισμένη φάση. Συνήθως δύο αντιδραστικά μονομερή υιοθετούνται, το ένα είναι διαλυμένο στην υγρή φάση και περικλείει διάλυση του υλικού του πυρήνα, και το άλλο είναι διαλυμένο μετά το βήμα γαλακτοποίησης στη μη υγρή συνεχή φάση. Το γαλάκτωμα ύδωρ-λαδιού που διαμορφώνεται απαιτεί σταθεροποιητή. Τα μονομερή διαχέονται και γρήγορα πολυμερίζονται στην κοινή επιφάνεια μεταξύ των φάσεων για να διαμορφώσουν ένα λεπτό επίστρωμα, και το υποπροϊόν της αντίδρασης εξουδετερώνεται από τον αλκαλικό απομονωτή. Ο βαθμός του πολυμερισμού

μπορεί να ελεγχθεί από την ικανότητα αμέσου αντιδράσεως των μονομερών που επιλέγονται, από τη συγκέντρωσή τους και από τη θερμοκρασία του συστήματος. Η αντίδραση μεταξύ των μονομερών αποσβήνεται από τη μείωση του αριθμού των μονομερών και συχνά ολοκληρώνεται με την προσθήκη υπερβολικής ποσότητας διαλύματος φάσης στο γαλάκτωμα. [30]

#### **5.3.1.4. Κανονικός πολυμερισμός**

Ο κανονικός πολυμερισμός περιλαμβάνει γενικά τη συγκέντρωση δύο αμιγών υγρών, π.χ. νερό και οργανικός διαλύτης, αντίστοιχα, που περιέχουν αντιδραστήρια, οργανικά μέσα τα οποία θα αντιδράσουν μεταξύ τους για να δημιουργήσουν την προαπαιτούμενη στερεή φάση. Τα πολυμερή σώματα συμπύκνωσης διαμορφώνονται συνήθως από τη σταδιακή ενδομοριακή συμπύκνωση των αντιδραστηρίων ομάδων. Οι δομικές μονάδες των πολυμερών σωμάτων συμπύκνωσης ενώνονται συνήθως από τις λειτουργικές ομάδες διά-μονάδων. Ο κανονικός πολυμερισμός έχει τη δυνατότητα να παράγει καλύτερη ποιότητα μικροκάψουλων από άποψη διάχυσης και συμπίεσης των τοιχωμάτων τους και το εύρος του μεγέθους των μικροκάψουλων κυμαίνεται μεταξύ 5 και 100  $\mu\text{m}$ . Κατάλληλα πολυμερή όπως το πολυαμιδίιο, ο πολυεστέρας, το πολυουρεθάνιο, ή παρόμοιες ουσίες, μπορούν να διαμορφωθούν από ενδιάμεσα προϊόντα ρητίνης ή από μονομερή. [32]

#### **5.3.2. Υποψήφια υλικά αλλαγής φάσης για μικροενθυλάκωση**

Τα πιθανά υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) που μπορούν να εφαρμοστούν στα κτίρια πρέπει να έχουν ένα εύρος θερμοκρασίας μεταξύ 18 και 28<sup>0</sup>C. Είναι ευρέως γνωστό ότι τα οργανικά PCMs, και χαρακτηριστικά τα ένυδρα άλατα, έχουν μερικές ελκυστικές ιδιότητες όπως, υψηλή θερμοχωρητικότητα, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, είναι μη-εύφλεκτα υλικά, έχουν χαμηλό κόστος και είναι εύκολα διαθέσιμα. Εντούτοις, έχουν επίσης μερικά μειονεκτήματα όπως το χαρακτηριστικό ότι είναι έντονα διαβρωτικά υλικά, ότι δεν είναι συμβατά με μερικά οικοδομικά υλικά και απαιτείται να περικλείονται σε κατάλληλα κιβώτια. Συγκεκριμένα, υπόκεινται σε υπέρψυξη και σε διαχωρισμό των φάσεων κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης και η εφαρμογή τους απαιτεί την χρήση μερικών χημικών παραγόντων και παραγόντων πήξης.

Τα τελευταία χρόνια, κάποια οργανικά PCMs τραβούν όλο και περισσότερο την προσοχή λόγω της αποφυγής των προβλημάτων που παρουσιάζουν τα ανόργανα PCMs. Παρουσιάζουν ελάχιστα το φαινόμενο της υπέρψυξης και το διαχωρισμό της φάσης, και είναι κατάλληλα για την ενσωμάτωσή τους σε διάφορα οικοδομικά υλικά. Παρόλα αυτά, είναι εύφλεκτα, παρουσιάζουν αλλαγές όγκου και έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Τα εύτηκτα ή μη-εύτηκτα μίγματα οργανικών ή ανόργανων PCMs θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για μικροενθυλάκωση ώστε να αποδώσουν το επιθυμητό σημείο τήξης.

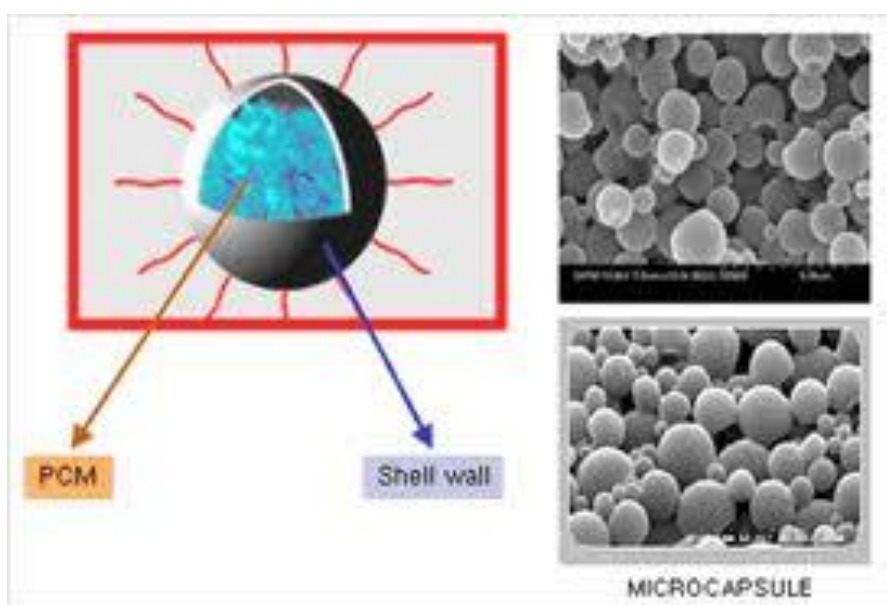
Επίσης έρευνες έχουν γίνει σχετικά με την εξάλειψη του φαινομένου της υπέρψυξης στις μικροκάψουλες. Αποτελεσματική μέθοδος είναι η χρήση του η-οκταδεκάνιου (n-octadecane) και η τοποθέτηση τους σε κάψα μελαμίνης-φορμαλδεΐδης στο κέλυφος ρητίνης με μέση διάμετρο περίπου 1 μm. Η ψυκτική συμπεριφορά της μικροκάψουλας εξαρτάται από την μέση διάμετρο. Επίσης έχει μελετηθεί και η χρήση του η-οκταδεκάνιου (n-octadecane) σε περίβλημα από χαλαζία. Η διάμετρος των μικροκάψουλων κυμαίνεται από 7-16 μm. Η μικροκάψουλα λαμβάνει μια ομαλή και συμπαγή δομή κελύφους, επιτυγχάνεται καλή αλλαγή φάσης, υψηλή αποδοτικότητα ενθυλάκωσης, και καλές ιδιότητες αντι-όσμωσης, εφ' όσον ελέγχονται κατάλληλα το φορτίο του υλικού του πυρήνα και η οξύτητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τήξης και πήξης.

Επίσης μορφολογικές έρευνες έδειξαν ότι οι μικροκάψουλες που συντέθηκαν χρησιμοποιώντας ζεφαμίνη (Jeffamine) ως μονομερή αμίνη, είχαν ομαλότερη και συμπαγέστερη επιφάνεια από εκείνες που συντέθηκαν από δισαμίνη αιθυλενίου και τριαμίνη διεθυλενίου, και κατείχαν ένα μεγαλύτερο μέγεθος μορίων (περίπου 16 nm). Επίσης παρουσίαζαν επίσης καλύτερες ιδιότητες αλλαγής φάσης, υψηλότερη αποδοτικότητα ενθυλάκωσης, και καλύτερες ιδιότητες αντι-όσμωσης από τις άλλες δύο περιπτώσεις.

Επίσης κατάλληλα υλικά αλλαγή φάση προς μικροενθυλάκωση είναι τρεις τύποι κεριών παραφίνης, η-οκταδεκάνιο (n-octadecane), η- νοναδεκάνιο (n-nonadecane), η-εξαδεκάνιο (n-hexadecane). Οι παραπάνω τύποι PCMs μπορούν να ενθυλακωθούν σε φυσικά και βιοδιασπώμενα πολυμερή. Επιπλέον η μικροενθυλάκωση πολυουρεθάνης είναι ευρέως διαδεδομένη. Τα μίγματα πολυουρεθάνης έχουν πολλές ιδιότητες που τα κάνουν υλικά κατάλληλα προς χρήση στα κτίρια, όπως υψηλή θερμότητα τήξης, χημική σταθερότητα, μη-διαβρωτικά υλικά και χαμηλό κόστος. Η μικροενθυλάκωση του η-οκτοεικοσανίου (n-octacosane) έχει μελετηθεί σαν υλικό αλλαγής φάσης για αποθήκευση θερμικής ενέργειας.

Μετά από πειράματα βρέθηκε ότι το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζει σταθερότητα κατά την διάρκεια του θερμικού κύκλου και παρουσιάζει υψηλή αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες.

Επίσης επιτυχημένη μέθοδος είναι η νανοενθυλάκωση του η-τετραδεκάνιου (n-tetradecane) ως υλικό αλλαγής φάσης και η χρήση φορμαλδεΐδης ως κέλυφος. Οι παραπάνω μικροκάψουλες έχουν μέγεθος 100nm και το υλικό του πυρήνα είναι καλά ενθυλακωμένο. Παρουσιάζουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ενώ η θερμική τους σταθερότητα μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη NaCl κατά την διάρκεια του πολυμερισμού. Τέλος χρησιμοποιούνται μικροκάψουλες μελαμίνης-φορμαλδεΐδης που περιέχουν εικοσάνιο (eicosane). Οι μικροκάψουλες έχουν σφαιρικό σχήμα και μέση διάμετρο μικρότερη από 10μm. [34], [36], [37]



**Σχήμα 5.3:** Μικροκάψουλες υλικού αλλαγής φάσης [34]

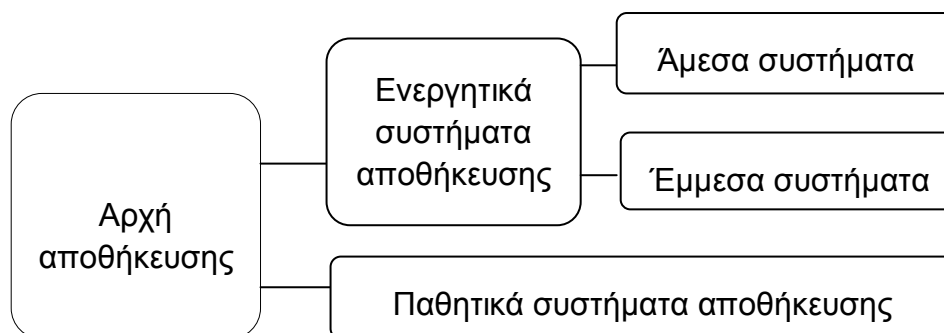


## Κεφάλαιο 6: Εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης (PCMs)

Τα υλικά αλλαγής φάσης βρίσκουν μία ευρεία εφαρμογή στην καθημερινή μας ζωή, παραδείγματος χάρη στα κτίρια, στην ενδυμασία, σε ηλιακούς συλλέκτες κ.τ.λ. . Μερικές από τις οποίες δίνονται παρακάτω:

### 6.1. Εφαρμογές στα κτίρια

Οι αρχές αποθήκευσης θερμότητας στις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλιακής ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν ως ενεργητικά ή παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας.



**Σχήμα 6.1:** Αρχές αποθήκευσης [4]

Τα υλικά αλλαγής φάσης βρίσκουν εφαρμογές τόσο σε παθητικά όσο και σε ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης. Οι κύριοι τρόποι χρήσης τους στα κτίρια είναι:

- Στην τοιχοποιία
- Σε μονάδες αποθήκευσης θερμότητας ή ψύχους
- Σε διάφορα οικοδομικά υλικά [10], [38]

#### 6.1.1. Παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας

Παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας είναι εκείνα τα οποία για την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας δεν κάνουν χρήση υψηλής τεχνολογίας και μηχανικών μέσων. Βασίζονται στη φυσική ροή της θερμικής ενέργειας, εκμεταλλεύονται τις φυσικές

ιδιότητες των υλικών του κτιρίου και δεν χρησιμοποιούν επιπρόσθετες μονάδες για την συλλογή της ηλιακής ενέργειας και την αποθήκευση της θερμότητας.

Στα παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας το ρευστό μεταφοράς θερμότητας διέρχεται μέσω της αποθηκευτικής μονάδας μόνο για τη φόρτιση και την εκφόρτιση ενός στερεού υλικού. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας μεταφέρει την ενέργεια που παραλαμβάνει από την πηγή ενέργειας στο μέσο αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της φόρτισης, και λαμβάνει ενέργεια από την αποθήκευση κατά την διάρκεια της εκφόρτισης (αυτά τα συστήματα καλούνται επίσης αναγεννητές). Στις περισσότερες παθητικές εφαρμογές, τα PCM ενσωματώνονται στα οικοδομικά υλικά (δηλαδή τοίχοι, στέγες, και πατώματα). Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το PCM υποβάλλεται στην διαδικασία τήξης απορροφώντας μέρος της ηλιακής θερμότητας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, το PCM σταθεροποιεί και απελευθερώνει την αποθηκευμένη θερμότητα στα περιβάλλοντα χώρο όταν πέφτει η εξωτερική ή εσωτερική θερμοκρασία. Επομένως, μπορούν να αποτρέψουν την υπερθέρμανση του εσωτερικού χώρου κατά τη διάρκεια της ημέρας το καλοκαίρι και να παρέχουν θερμότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας τον χειμώνα. Το κύριο μειονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι ότι η θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας μειώνεται κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης καθώς το υλικό αποθήκευσης ψύχεται. Και ένα ακόμα πρόβλημα είναι ότι η μεταφορά θερμότητας είναι χαμηλή, και συνήθως δεν υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και του υλικού αποθήκευσης, καθώς η θερμότητα μεταφέρεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Η αποθήκευση της θερμότητας και η διανομή της γίνεται χωρίς την χρήση άλλων ηλεκτρικών μέσων. [4], [11]

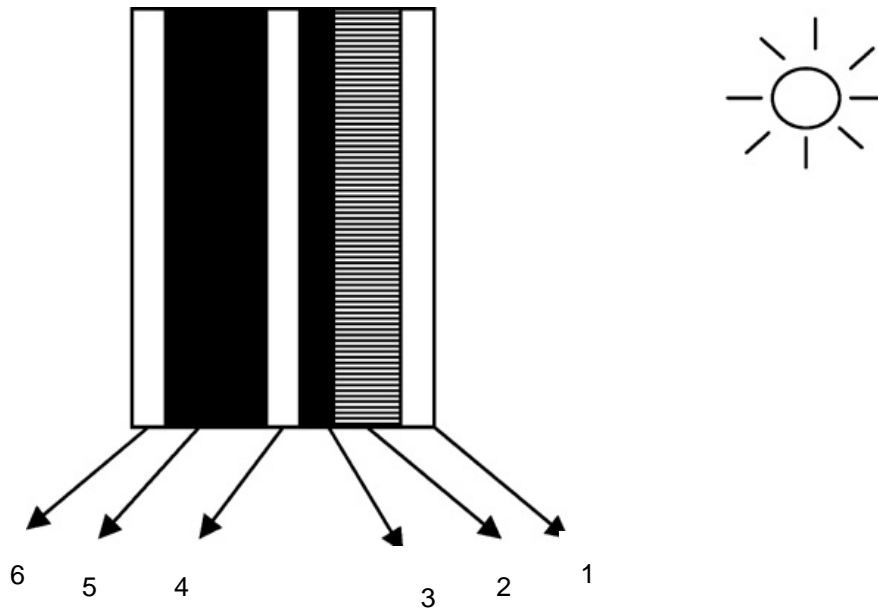
#### **6.1.1.1. Εφαρμογή σε τοίχους ή άλλα οικοδομικά υλικά**

Ένας τοίχος με ενσωματωμένο PCM είναι σε θέση να δεσμεύσει ένα μεγάλο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας. Λόγω της υψηλής θερμικής μάζας τους, είναι σε θέση να ελαχιστοποιήσουν την επίδραση των μεγάλων διακυμάνσεων της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας στην εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου. Επιπλέον μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικοί στην μετατόπιση του ψυκτικού φορτίου εκτός ωρών αιχμής της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα PCM έχουν ενσωματωθεί επιτυχώς στα υλικά των τοίχων όπως γυψοσανίδες, σκυρόδεμα. Τα υλικά αλλαγής φάσης τα οποία επιλέγονται για αυτές τις εφαρμογές πρέπει να υπόκεινται την αλλαγής φάσης μεταξύ των θερμοκρασιών 25-27,5 °C.

Η εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης στα κτίρια μπορεί να γίνει κυρίως με δύο τρόπους που εξαρτώνται από το PCM που χρησιμοποιούμε. Ο πρώτος τρόπος είναι η ενσωμάτωση τους σε άλλα υλικά, δηλαδή η χρήση τους ως αυτούσια υλικά μέσα στην τοιχοποιία (γύψος, σοβάς, τσιμέντο). Συγκεκριμένα η ενσωμάτωση των PCMs σε υλικά όπως γύψος και τσιμέντο εξασφαλίζει την πλήρη συγκράτηση του υλικού ακόμα και μετά την πλήρη υγροποίησή του. Ο δεύτερος τρόπος είναι η ενθυλάκωσή τους σε κατάλληλα υλικά. Συνήθως αναφερόμαστε για υλικά αλλαγής φάσης τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των λιπαρών οξέων και των ένυδρων αλάτων.

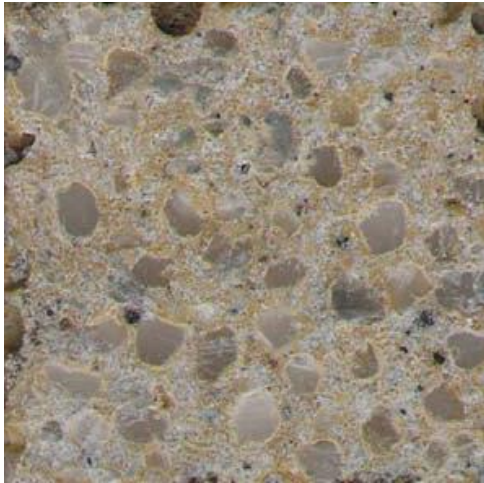
Το 2002 στην Σλοβενία μελετήθηκε ένα λανθάνον σύστημα αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε για τον εξαερισμό ενός κτηρίου. Χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικές κάψουλες πολυαιθυλενίου οι οποίες τοποθετήθηκαν σε έναν αγωγό του συστήματος εξαερισμού οικοδόμησης και ενέργησαν ως απορροφητικά και αποθηκευτικά μέσα. Η θερμότητα που απορροφήθηκε χρησιμοποιήθηκε για να προθερμάνει τον εξωτερικό αέρα που ρέει στο χώρο ενός κτηρίου.

Ο ηλιακός τοίχος είναι μια ακόμη εφαρμογή του PCM για θερμική αποθήκευση. Σε αυτήν την περίπτωση η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στον τοίχο απορροφάται από το PCM που βρίσκεται μέσα στον τοίχο. Ο τοίχος αποτελείται από έξι κύρια συστατικά όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Η ηλιακή ακτινοβολία περνά μέσω του γυαλιού με διαφανές υλικό μόνωσης (υλικά 1, 2 στο σχήμα), τα οποία εμποδίζουν την μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Το PCM (υλικό 3) σε ένα διαφανές πλαστικό περίβλημα απορροφά και αποθηκεύει την ενέργεια ως λανθάνουσα θερμότητα. Ο αέρας για τον εξαερισμό των σπιτιών θερμαίνεται στο κανάλι αέρα (4) και στην συνέχεια οδηγείται στον χώρο. Η μόνωση (υλικό 5) και το ασβεστοκονίαμα (υλικό 6) είναι τυποποιημένα στοιχεία.

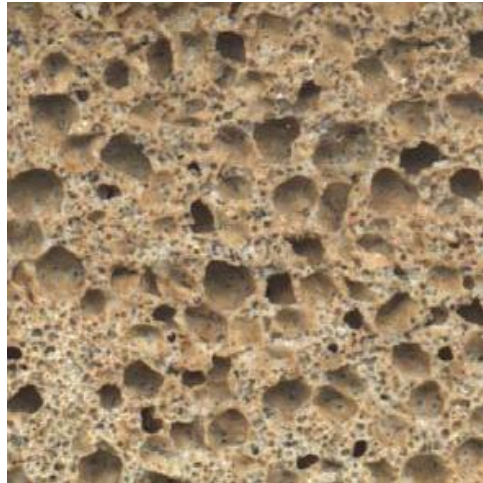


**Σχήμα 6.2:** Ηλιακός τοίχος [39]

Επίσης η ενσωμάτωση των υλικών αλλαγής φάσης σε γυψοσανίδες είναι ένας διαδεδομένος τρόπος συγκράτησης της θερμότητας. Συνήθης κατασκευή τους είναι ο εμποτισμός της γυψοσανίδας με PCM. Υπάρχουν δύο τρόποι ενσωμάτωσης των PCMs στις γυψοσανίδες. Στην πρώτη περίπτωση η γυψοσανίδα βυθίζεται σε λεκάνη που περιέχει το PCM σε υγρή μορφή, ώστε το πορώδες της γυψοσανίδας απορροφάει την ποσότητα του PCM. Στην δεύτερη περίπτωση τα υλικά αλλαγής φάσης εφαρμόζονται σε μορφή μικροκάψουλων. Αξίζει να αναφέρουμε ότι ο κίνδυνος ανάφλεξης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τον περιορισμό του κατά βάρος ποσοστού του PCM στο 15%-20%. Με την ενσωμάτωση των PCMs σε γυψοσανίδες μπορούμε να επιτύχουμε εξοικονόμηση έως και 15% του ετήσιου κόστους. Η χρήση τους στα τούβλα είτε σε μορφή κυκλικών καψούλων είτε σε μορφή κυλινδρικών σωλήνων είναι επίσης μία διαδεδομένη μέθοδος.



(α)



(β)

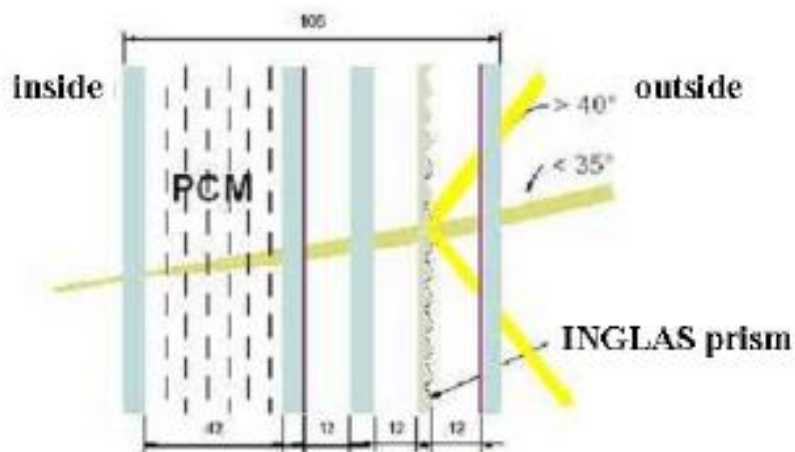
**Σχήμα 6.3:** Υλικό τοίχου α) με PCM β)χωρίς PCM [40]



**Σχήμα 6.4:** Τούβλα με PCM σε κυλινδρικά δοχεία [40]

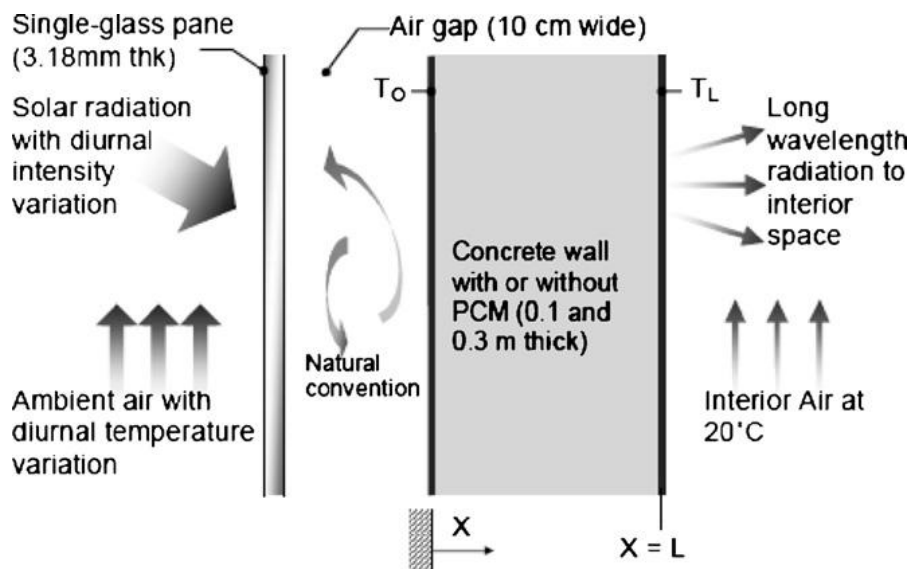
Μία ακόμη εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης είναι η χρήση τους με σκοπό να αντικαταστήσουν τον τοίχο Trombe. Για ένα δεδομένο ποσό αποθήκευσης θερμότητας, τα υλικά αλλαγής φάσης απαιτούν λιγότερο χώρο από τους τοίχους ύδατος ή τους τοίχους Trombe και είναι πολύ ελαφρύτερες σε βάρος. Συνήθως χρησιμοποιημένο PCM για αυτού του είδους τοίχο είναι τα ένυδρα άλατα και οι υδρογονάνθρακες. Αυτού του είδους τοίχοι ονομάζονται Power Glass και η λειτουργία τους είναι η εξής: κατά την διάρκεια την της ηλιοφάνειας το PCM απορροφά θερμότητα. Τα 4cm πάχους του PCM αποθηκεύουν τόση θερμότητα όση θα αποθήκευε ένας συνηθισμένος τοίχος στην θερμοκρασία των 50°C. Κατά

την διάρκεια της νύχτας ή τις ώρες χωρίς ηλιοφάνεια το PCM αποδίδει αυτή την θερμότητα στο εσωτερικό του δωματίου, ενώ κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών για να αποφεύγονται οι υπερβολική θέρμανση η ακτινοβολία ανακλάται προτού προσπέσει στην επιφάνεια του γυαλιού του τοίχου.



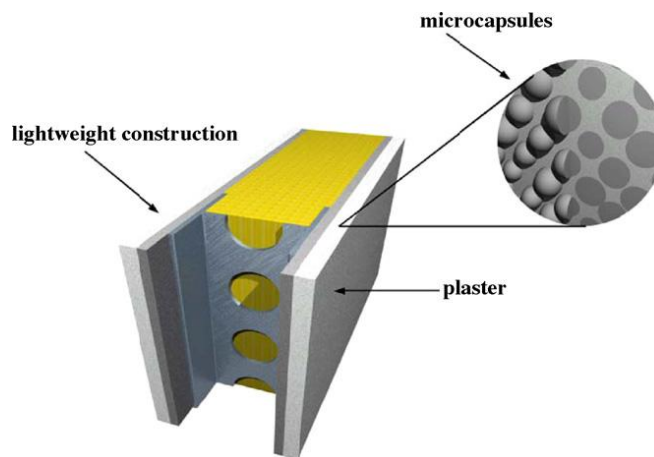
**Σχήμα 6.5:** Τοίχος Power Glass [40]

Εν συγκρίσει ο τοίχος Trombe αποτελείται από ένα μονό ή διπλό στρώμα γυαλιού ή πλαστικού το οποίο τοποθετείται περίπου τέσσερις ίντσες μπροστά από την επιφάνεια του τοίχου. Επίσης στο πάνω και στο κάτω τμήμα του τοίχου υπάρχουν θυρίδες για να διευκολύνουν την ροή του αέρα. Η ηλιακή θερμότητα συλλέγεται στο διάστημα μεταξύ του τοίχου και του υαλοπίνακα. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου είναι μαύρου χρώματος που απορροφά τη θερμότητα, η οποία αποθηκεύεται έπειτα στην μάζα του τοίχου. Η θερμότητα διανέμεται από τον τοίχο trombe στο σπίτι για αρκετό χρονικό διάστημα. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία μειώνεται κάτω από αυτήν της επιφάνειας του τοίχου, η θερμότητα αρχίζει να ρέει προς το δωμάτιο. Η διαμόρφωση του προτύπου τοίχου Trombe φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 6.6:** Τοίχος Trombe [3]

Στην περίπτωση του τοίχου PCM Trombe ο νότιος τοίχος του κτίσματος αποτελείται από PCM. Ο τοίχος θερμαίνεται κατά την διάρκεια της ημέρας με αποτέλεσμα να τήκεται το PCM, ενώ κατά την διάρκεια της νύχτας απελευθερώνεται η θερμότητα προς τον εσωτερικό χώρο. [3], [38], [39], [40], [41], [42], [43]



**Σχήμα 6.7:** Μικροενθυλάκωση PCMs σε ελαφριές κατασκευές [3]

### **6.1.1.2. Εφαρμογή στους υαλοπίνακες/πατζούρια**

Σε αυτήν την περίπτωση τα πατζούρια τα οποία τοποθετούνται εξωτερικά των παραθύρων περιέχουν PCMs. Κατά τη διάρκεια της ημέρας παραμένουν ανοιχτά και η εξωτερική τους πλευρά εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία, απορροφάται θερμότητα και το PCM τήκεται. Κατά την διάρκεια της νύχτας τα πατζούρια παραμένουν κλειστά και η θερμότητα

εκπέμπεται στον εσωτερικό χώρο. Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι η αποθηκευτική ικανότητα του στοιχείου με χρήση PCM αυξήθηκε έως και 4<sup>0</sup> C για 4 με 5 ώρες σε σχέση με το στοιχείο χωρίς PCM.

Επίσης έχει μελετηθεί η χρήση παράθυρου με εσωτερική σκίαση η οποία περιέχει PCM με σκοπό την μείωση του θερμικού κέρδους. Το παράθυρο ήταν εξοπλισμένο με διπλή επίστρωση όπου ανάμεσα στο κενό μπορεί να προστεθεί το υλικό αλλαγής φάσης ώστε να αποτρέπει την αύξηση της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου. [41]



**Σχήμα 6.8:** Εφαρμογή PCM στην εσωτερική σκίαση υαλοπινάκων [3]

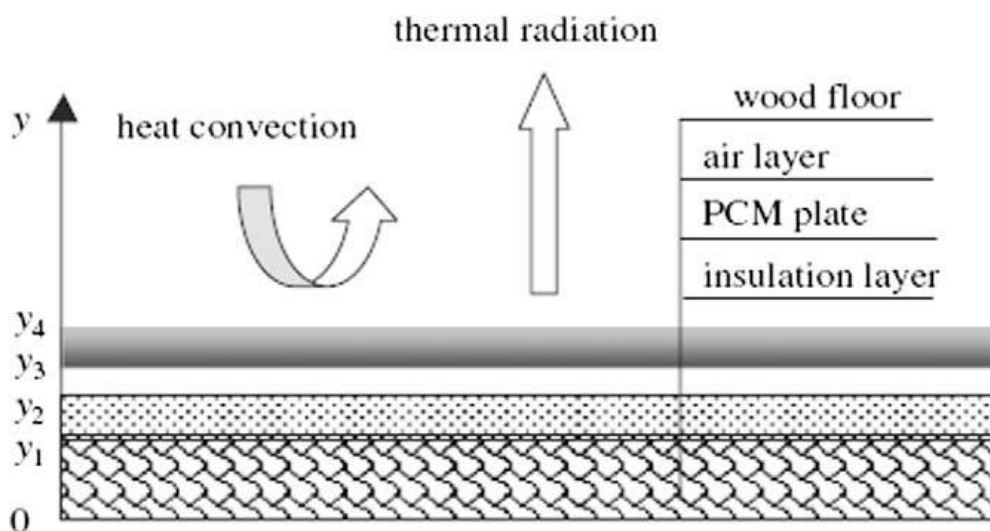
### **6.1.1.3. Εφαρμογές σε παθητικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης**

Το πάτωμα κατέχει σημαντικό ρόλο στην θέρμανση και την ψύξη των κτιρίων. Μελέτες έχουν γίνει σχετικά με την μεταφορά θερμότητας στα παθητικά συστήματα θέρμανσης πατωμάτων. Οι τάπητες καθώς επίσης και στρώματα κάλυψης σκληρού ξύλου πάνω από το σκυρόδεμα εξετάζονται ως μέσα θερμικής αποθήκευσης. Μελέτες οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί αποκαλύπτουν ότι η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει μια τοπική θερμοκρασία του πατώματος κατά 8<sup>0</sup>C υψηλότερη από αυτήν στην σκιασμένη περιοχή. Ενώ στην περίπτωση κάλυψης με τάπητες η διαφορά αυτή της θερμοκρασίας του πατώματος έφτασε μέχρι και 15<sup>0</sup>C. Η ηλιακή ακτινοβολία που αποθηκεύεται στη θερμική μάζα των πατωμάτων έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης κατά 30% ή και περισσότερο.

Μία εφαρμογή των PCM σε δάπεδο αποτελεί η εγκατάσταση δίσκων PCMs πάχους 8mm και μόνωση με πολυεστέρα πάχους 50mm. Σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε



ότι η θερμοκρασία του χώρου με τους δίσκους PCM είναι κατά 2 °C μεγαλύτερη από αυτήν του χώρου χωρίς δίσκους PCM. [41], [44]



**Σχήμα 6.9:** Χρήση PCM σε παθητικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης [44]

#### **6.1.1.4 Εφαρμογές στην οροφή**

Σε αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται ανακλαστήρες για να κατευθύνουν την ηλιακή ενέργεια που εισάγεται μέσω των παραθύρων προς το PCM τα οποία βρίσκονται εμποτισμένα σε σανίδες της οροφής. Η χρήση ενός τέτοιου συστήματος έχει τη δυνατότητα να ανακτήσει το 17-36% της θερμότητας που χάνεται. Το κύριο πλεονέκτημα της εγκατάστασης είναι ότι δίνεται η δυνατότητα σε μία μεγάλη επιφάνεια να λειτουργήσει ως αποθηκευτικό μέσο χωρίς να απαιτούνται επιπλέον μεγάλοι χώροι αποθηκευτικού μέσου. [44]

#### **6.1.2. Ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας**

Τα ενεργητικά συστήματα απαιτούν τη χρησιμοποίηση μηχανικών μέσων –απλών μέχρι και υψηλής τεχνολογίας παραδείγματος χάρη (αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας, ανεμιστήρες) και προϋποθέτουν σύνθετους μηχανισμούς συλλογής, μεταφοράς και αποθήκευσης της θερμότητας που έχει προέλθει από την ηλιακή ακτινοβολία που δεσμεύτηκε.

Ένα ενεργό σύστημα αποθήκευσης χαρακτηρίζεται κυρίως από την εξαναγκασμένη μεταφορά θερμότητας στο υλικό αποθήκευσης. Το ίδιο το μέσο αποθήκευσης θερμότητας κυκλοφορεί μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί μία ή δύο δεξαμενές ως μέσα αποθήκευσης. Τα ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας

υποδιαιρούνται στα άμεσα και έμμεσα συστήματα. Σε ένα άμεσο σύστημα, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας χρησιμεύει επίσης και ως μέσο αποθήκευσης, ενώ σε ένα έμμεσο σύστημα, ένα δεύτερο μέσο χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της θερμότητας. Η διανομή της θερμότητας σε αυτά τα συστήματα γίνεται με την χρήση αντλιών ή ανεμιστήρων. [4], [11]

#### **6.1.2.1. Εφαρμογές σε ενεργητικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης**

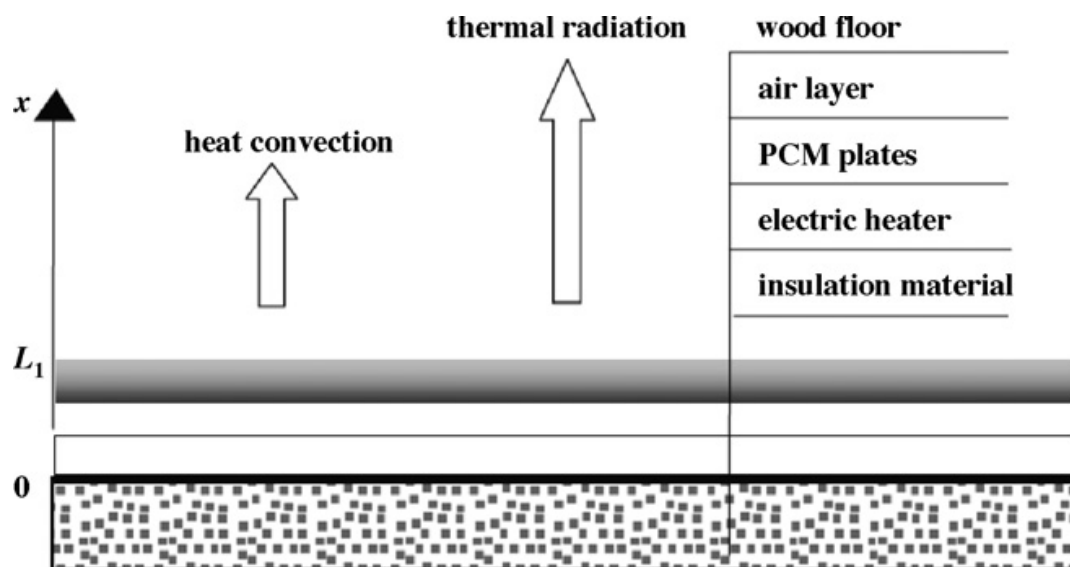
Η ενδοδαπέδια θέρμανση παρουσιάζει το πλεονέκτημα της ομοιόμορφης θερμικής άνεσης. Το σύστημα της ενδοδαπέδιας θέρμανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας εκτός ωρών αιχμής. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην εξής διαδικασία. Το υλικό αλλαγής φάσης αποθηκεύει αισθητή θερμότητα, την οποία λαμβάνει από ηλεκτρικούς θερμαντήρες τις ώρες μη αιχμής, μέχρι να φτάσει στο σημείο τήξης του. Ύστερα από εκείνο το σημείο η θερμότητα αποθηκεύεται ως λανθάνουσα. Η αποθήκευση συνεχίζεται μέχρι να αποθηκευτεί το μέγιστο ποσό λανθάνουσας θερμότητας. Στην συνέχεια η θερμότητα ρέει προς τον θερμαινόμενο χώρο από την οποία ένα μικρό ποσοστό διαφεύγει προς την αντίθετη κατεύθυνση αλλά συναντά την μόνωση. Όταν σταματήσει η λειτουργία των ηλεκτρικών θερμαντήρων η θέρμανση του χώρου επιτυγχάνεται με την αποφόρτιση του PCM. Συνεπώς τα μέγιστα φορτία μπορούν να μειωθούν και να μετατοπιστούν τη νύχτα όταν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερο.

Ένα σύστημα θέρμανσης πατωμάτων που χρησιμοποιεί την παραφίνη (σημείο τήξης 40 °C) ως PCM προτάθηκε το 1999. Κατά την εφαρμογή τοποθετήθηκαν 30mm στρώματος PCM, η οποία είναι επαρκής ποσότητα, μεταξύ του ηλεκτρικού θερμαντήρα και τις πλάκες του πατώματος. Διαπιστώθηκε ότι η παραγωγή θερμότητας του πατώματος μπορεί να αυξηθεί σημαντικά από 30 σε 75W/m<sup>2</sup>.

Το 2001 κατασκευάστηκαν δύο πλάκες, η μία περιέχει το PCM-CaCl<sub>2</sub> 6H<sub>2</sub>O. Αντίθετα από την επίπεδη πλάκα, η πλάκα η οποία περιείχε PCM παρουσίασε πολύ χαμηλότερη διακύμανση θερμοκρασίας επιφάνειας και διατήρησε μια αποδεκτή θερμοκρασία επιφάνειας κατά τη διάρκεια ολόκληρης της ημέρας ακόμα κι αν η διαδικασία θέρμανσης πραγματοποιήθηκε μόνο για 8 ώρες.

Το 2005 στο Πεκίνο μελετήθηκε η ηλεκτρική θέρμανση πατώματος σε συνδυασμό με δίσκους PCMs καθορισμένου σχήματος. Το αποτέλεσμα ήταν να αυξηθεί η εσωτερική θερμοκρασία χωρίς την παράλληλη αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας. Επίσης η

θερμοκρασίας των δίσκων PCMs διατηρήθηκε σταθερή στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα αφότου διακόπηκε η λειτουργία των ηλεκτρικών θερμαντήρων. Έτσι λοιπόν περισσότερο από τη μισή συνολική ηλεκτρική ενέργεια μετατοπίστηκε από την περίοδο αιχμής στην περίοδο εκτός ωρών αιχμής. [3], [38], [39], [41], [44]

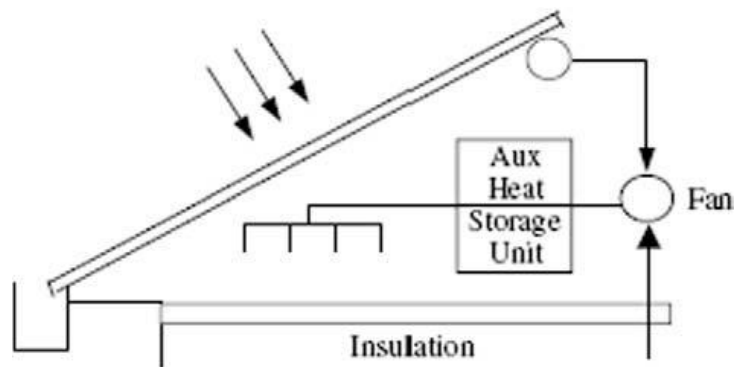


**Σχήμα 6.10:** Ενδοδαπέδια θέρμανση σε συνδυασμό με δίσκους PCMs [39]

### **6.1.2.2. Εφαρμογές στην οροφή**

Το 1997 στο πανεπιστήμιο της νότιας Αυστραλίας αναπτύχθηκε ένα σύστημα στέγης με ενσωματωμένο ηλιακό σύστημα θέρμανσης αέρα, το οποίο χρησιμοποιεί τα μεταλλικά φύλλα της οροφής ως ηλιακό συσσωρευτή. Επίσης μια αποθηκευτική μονάδα PCM χρησιμοποιείται για να αποθηκεύσει τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας έτσι ώστε να μπορεί να παράσχει θερμότητα κατά την διάρκεια της νύχτας ή όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.

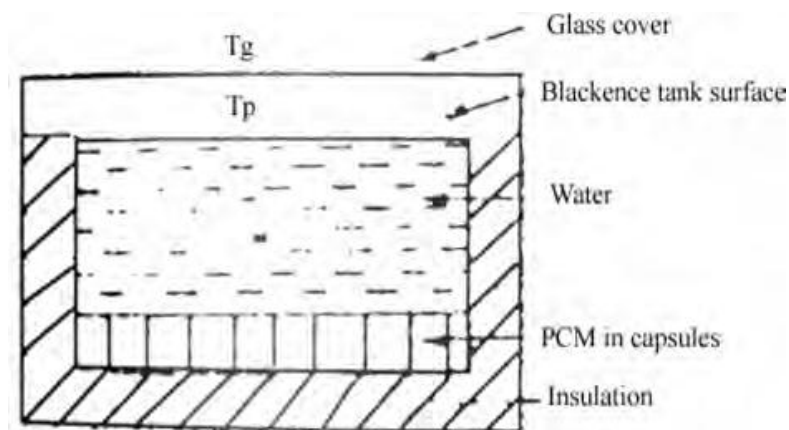
Το σύστημα λειτουργεί με τρεις τρόπους. Κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας και όταν απαιτείται θέρμανση, ο αέρας περνά μέσω του συλλέκτη και στη συνέχεια διοχετεύεται προς το σπίτι. Όταν δεν είναι απαραίτητη η θέρμανση του χώρου ο αέρας διοχετεύεται στο σύστημα αποθήκευσης, όπου τήκεται το PCM, και η θερμότητα αυτή θα χρησιμεύσει στο μέλλον. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια ο αέρας των δωματίων διαπερνά την συσκευή αποθήκευσης θερμότητας όπου θερμαίνεται και στη συνέχεια διοχετεύεται στο σπίτι. Η διάταξη παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα: [38]



**Σχήμα 6.11:** Σύστημα θέρμανση χώρων [38]

## **6.2. Εφαρμογές στους ηλιακούς θερμοσίφωνες**

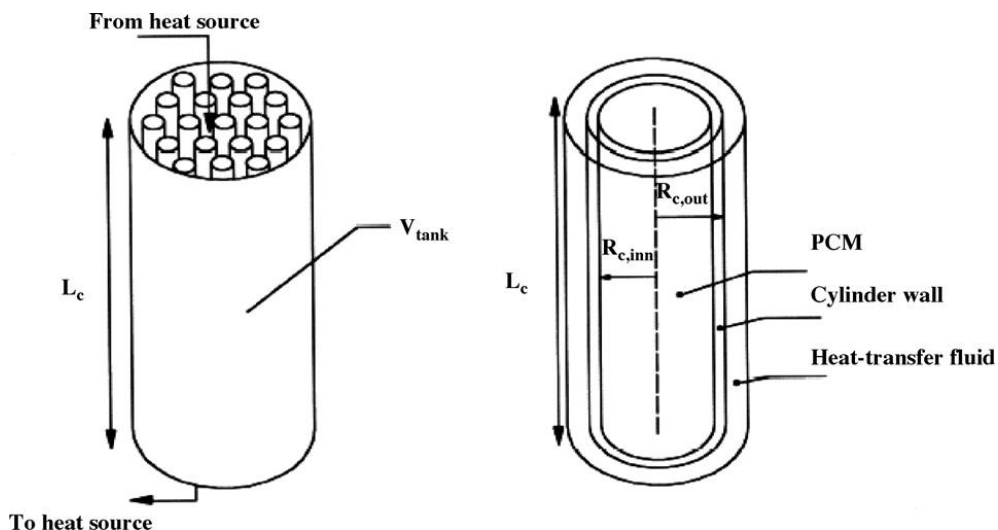
Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες είναι αρκετά δημοφιλή συστήματα καθώς έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης. Ένα είδος ηλιακού θερμοσίφωνα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 6.12:** Ηλιακός θερμοσίφωνα με στρώμα PCM [45]

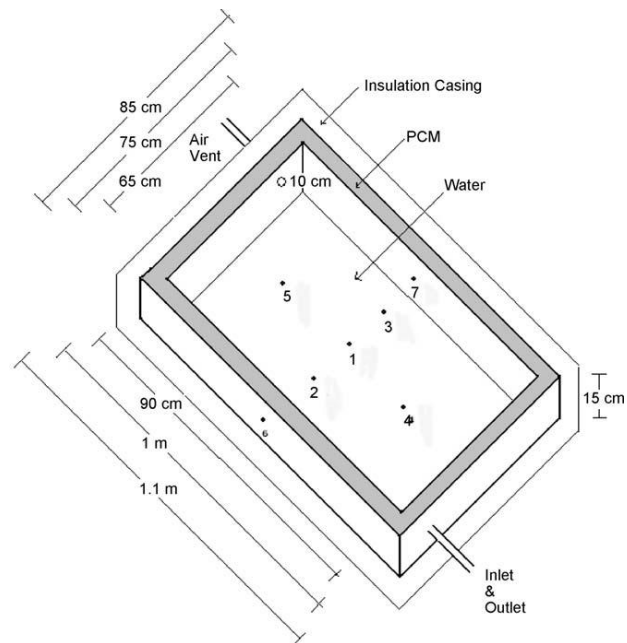
Το παραπάνω σύστημα περιέχει ένα στρώμα PCM στο κατώτατο σημείο. Κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας το νερό θερμαίνεται. Το PCM συλλέγει ενέργεια υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας και τήκεται. Κατά τη διάρκεια της μη-ηλιοφάνειας, το ζεστό νερό αποσύρεται και αντικαθίσταται από κρύο, το οποίο κερδίζει την ενέργεια από το PCM. Η ενέργεια απελευθερώνεται από το PCM κατά την αλλαγή φάσης του από το υγρό σε στερεό. Σε αυτόν τον τύπο συστήματος υπάρχει φτωχή μεταφορά θερμότητας μεταξύ του PCM και του ύδατος.

Ένας άλλος τύπος ο οποίος χρησιμοποιήθηκε είναι κυλινδρικά συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για θέρμανση νερού. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης του PCM, η κυλινδρική κάψουλα βρίσκεται μαζί με τον ηλιακό θερμοσίφωνα, και κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, ένα υγρό που διατρέχει τη μονάδα αποθήκευσης εξάγει την ενέργεια.



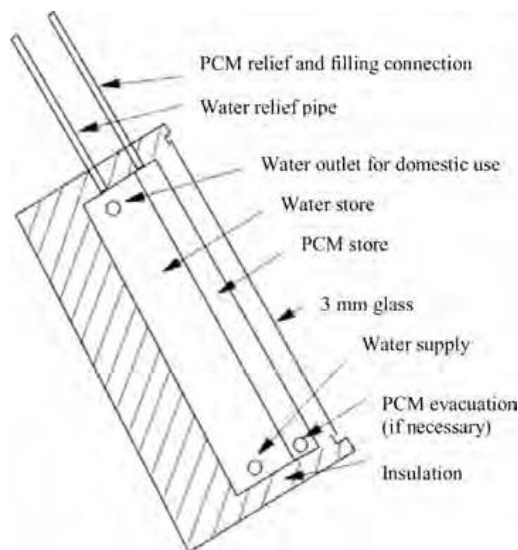
**Σχήμα 6.13:** Κυλινδρικό σύστημα ηλιακού θερμοσίφωνα [45]

Το 2001 εξετάστηκε η απόδοση μιας λανθάνουσας μονάδας αποθήκευσης θερμότητας χρησιμοποιώντας έναν ηλιακό συσσωρευτή σε μορφή κουτιού. Το σύστημά αποτελούταν από 3 εναλλάκτες θερμότητας με πτερύγια. Το κερί παραφίνης (θερμοκρασία τήξης  $54\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) χρησιμοποιήθηκε ως υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας και διαπιστώθηκε ότι η συγκεκριμένη μονάδα μπορούσε να προσφέρει στο νερό την κατάλληλη θερμότητα ώστε την λάβει την απαραίτητη θερμοκρασία.



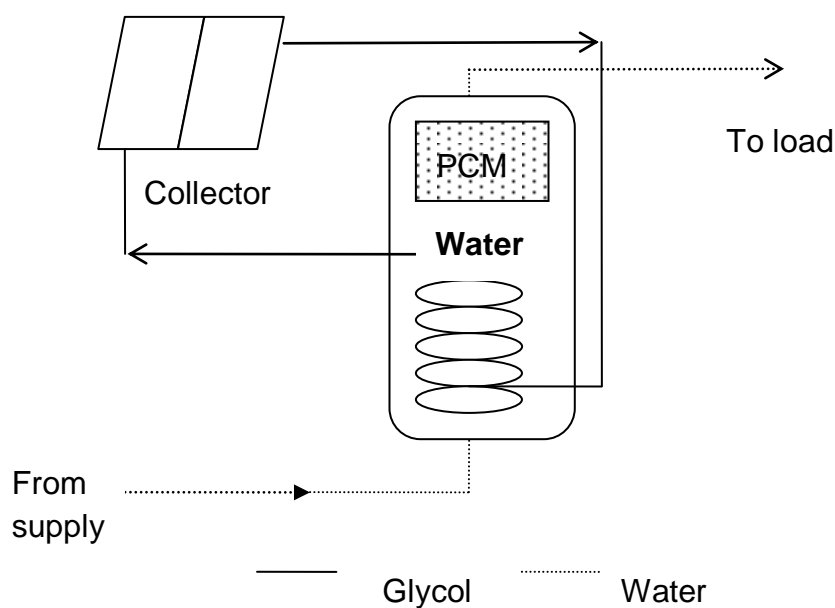
**Σχήμα 6.14:** Ηλιακός θερμοσίφωνας τύπου κουτιού [45]

Το 2002 στην Τουρκία αναπτύχθηκε ένας νέος τύπος ηλιακού θερμοσίφωνα. Ο συγκεκριμένος ηλιακός συσσωρευτής αποτελείται από δύο γειονικά τμήματα, το οποίο το ένα περιέχει νερό και το άλλο κερί παραφίνης ως PCM. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η θερμοκρασία του νερού υπερέβη τους 55 °C κατά τη διάρκεια μιας χαρακτηριστικής ημέρας και κρατήθηκε άνω των 30 °C για ολόκληρη τη νύχτα. Αυτός ο ηλιακός συσσωρευτής νερού-PCM έχει πολλά πλεονεκτήματα πέρα από τους παραδοσιακούς ηλιακούς συλλέκτες.



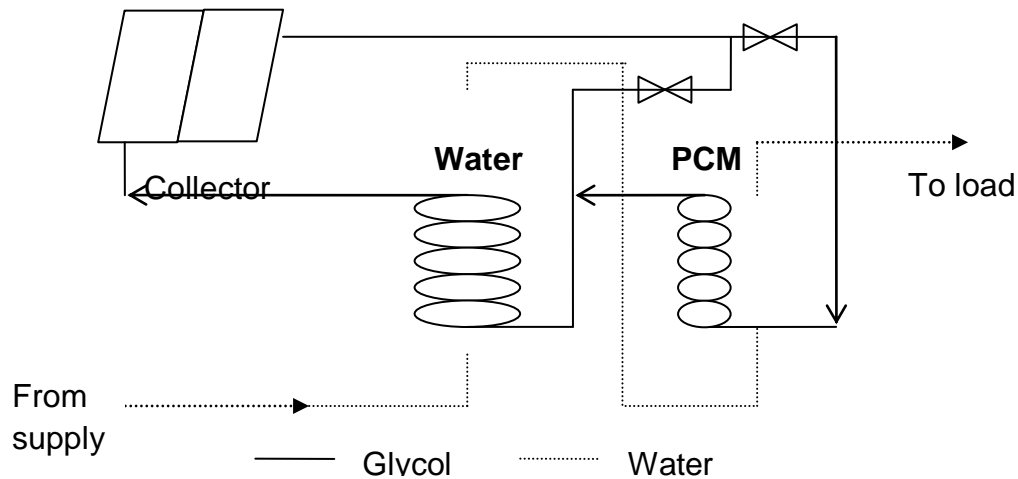
**Σχήμα 6.15:** Ηλιακός θερμοσίφωνας νερού-PCM [45]

Επίσης το 2002 εφαρμόστηκε ένας άλλος τύπος ηλιακού θερμοσίφωνα. Σε αυτήν την μονάδα είναι αποτελεσματική η διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών στην κορυφή της αποθήκευσης για μεγάλες χρονικές περιόδους χωρίς βοηθητική θέρμανση. Το PCM βρίσκεται μέσα στην δεξαμενή αποθήκευσης μαζί με εναλλάκτες θερμότητας. Η διάταξη φαίνεται παρακάτω:



**Σχήμα 6.16:** Άμεση θέρμανση από το PCM [46]

Το 2003 εφαρμόστηκε ένα σύστημα δύο δοχείων όπου στο ένα αποθηκεύεται το νερό και στο άλλο το PCM. Το σύστημα αποτελείται από μια σειρά βαλβίδων και εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιούνται για να αποθηκεύσουν και να εξαγάγουν τη θερμότητα. Η ηλιακή συμβολή χρησιμοποιείται ως προθερμαντήρας. Το σύστημα δεν περιέχει καμία βοηθητική θέρμανση.



**Σχήμα 6.17:** Διάταξη με 2 δοχεία [46]

Τέλος πολλές μελέτες πραγματοποιούνται μελέτη σχετικά με την επίδοση των συστημάτων θέρμανσης νερού για οικιακή χρήση, στο οποίο αποθηκεύεται το PCM σε δεξαμενή σε μορφή καψούλων. Συνήθως το υλικό αλλαγής φάσης είναι κάποιο ένυδρο άλας και η κάψουλα έχει σφαιρικό, ορθογώνιο ή κυλινδρικό σχήμα. Οι κάψουλες με το σφαιρικό σχήμα παρουσιάζονται να έχουν υψηλότερη απόδοση και μικρότερους χρόνους φόρτισης και εκφόρτισης. [3], [5], [45], [47], [48]

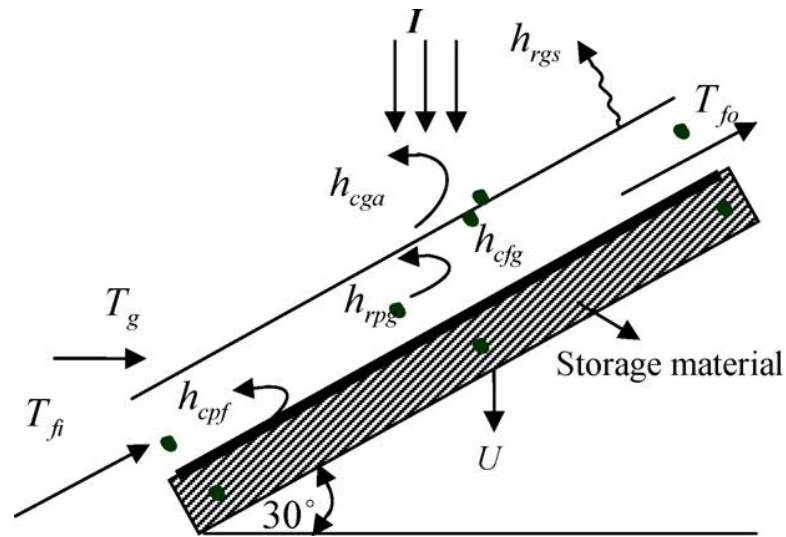
### **6.3. Θέρμανση αέρα με ηλιακή ενέργεια**

Οι θερμαντήρες αέρα λειτουργούν με βάση την ηλιακή ακτινοβολία και χρησιμοποιούνται για την θέρμανση κτιρίων ή για την αποξήρανση τροφίμων.

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα θερμαντήρων αέρα με την χρήση PCM. Το 1994 κατασκευάστηκε αεροθερμαντήρας ηλιακών συσσωρευτών, στο οποίο ενσωματώθηκε θερμικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης και σε ένα σύστημα σωλήνων τοποθετήθηκε το υλικό αλλαγής φάσης. Κατάλληλα PCMs θεωρήθηκαν αυτά που είχαν θερμοκρασία τήξης 43-51°C καθώς φαίνονται να έχουν την καλύτερη απόδοση.

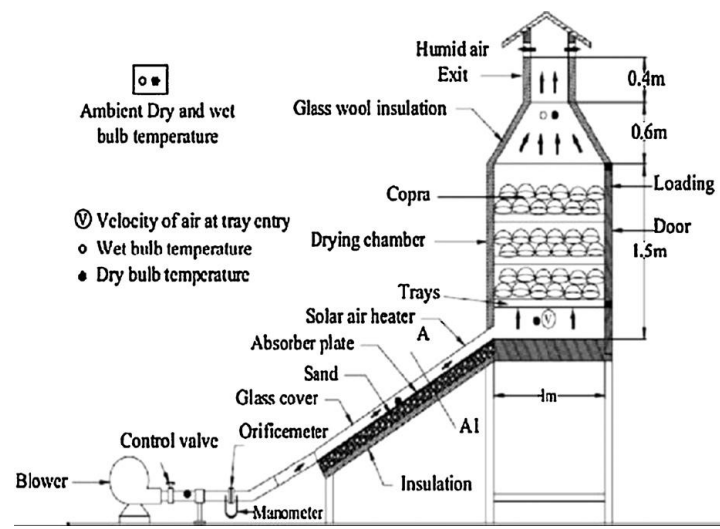
Το 2003 μελετήθηκε ένας κεκλιμένος ηλιακός αεροθερμαντήρας με θερμική αποθήκευση για την ξήρανση τροφίμων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο αεροθερμαντήρας σχεδιάζεται για να είναι σε θέση να δεχθεί τα διάφορα υλικά .





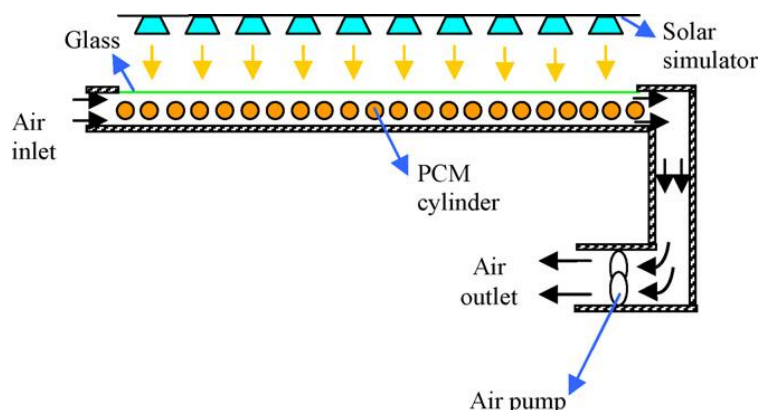
**Σχήμα 6.18:** Σύστημα θέρμανσης αέρα με PCM [49]

Το 2008 κατασκευάστηκε ένα νέο είδος για την ξήρανση τροφίμων. Τοποθετήθηκε μια κάλυψη γυαλιού πάχους 5mm. Το κενό μεταξύ του γυαλιού και της επιφάνειας απορροφητών διατηρήθηκε στα 25 mm για την κυκλοφορία αέρα. Μια πλευρά του συλλέκτη συνδέθηκε με τον ανεμιστήρα με τη βοήθεια του μειωτή και η άλλη πλευρά συνδέθηκε με την καμπίνα ξήρανσης. Το κενό 100mm μεταξύ του απορροφητή και της μόνωσης καλύφθηκε με άμμο που αναμίχθηκε με αργίλιο για να αποθηκεύσει τη θερμότητα κατά τη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας.



**Σχήμα 6.19:** Σύστημα για ξήρανση τροφίμων [49]

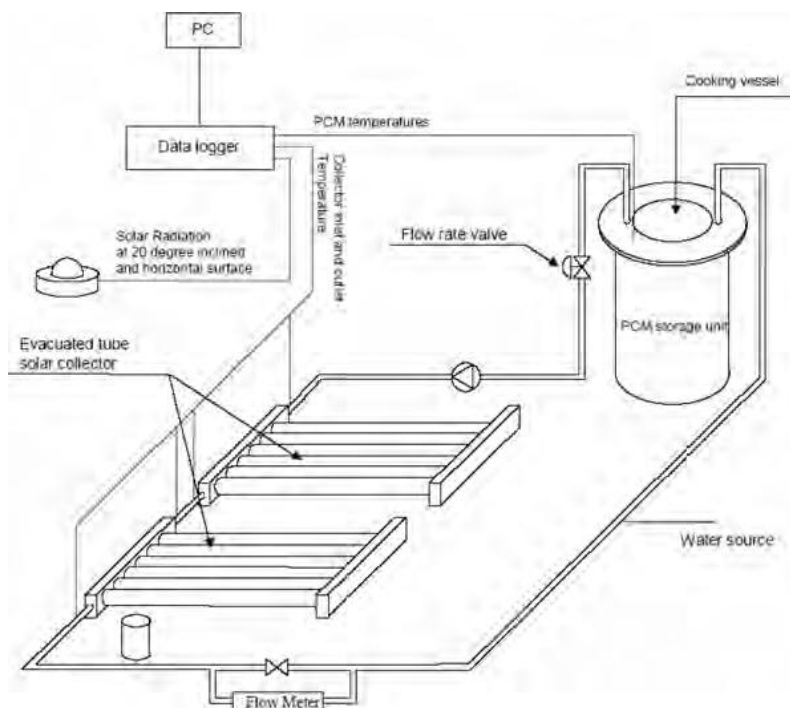
Το 2009 εφαρμόστηκε η παρακάτω διάταξη στην οποία κύλινδροι με PCM τοποθετήθηκαν κάτω από την επιφάνεια των συλλεκτών για την θέρμανση αέρα. [48], [49]



**Σχήμα 6.20:** Παθητικό σύστημα θέρμανσης αέρα [49]

### **6.4. Ηλιακές κουζίνες**

Μια ακόμα χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι στο μαγείρεμα χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους ηλιακών κουζινών. Η χρήση αυτών των ηλιακών κουζινών είναι περιορισμένη, καθώς το μαγείρεμα δεν είναι δυνατό το βράδυ. Έχει μελετηθεί η χρήση PCM ως μέσο αποθήκευσης για μια ηλιακή κουζίνα με σκοπό να μαγειρέψει τα τρόφιμα κατά την διάρκεια της νύχτας και τις ώρες που δεν έχει ηλιοφάνεια. Η συνιστώμενη θερμοκρασία τήξης του PCM πρέπει να είναι μεταξύ 105 και 110 °C για μαγείρεμα το βράδυ. [7]



**Σχήμα 6.21:** Ηλιακή κουζίνα με αποθηκευτική μονάδα PCM [3]

## **6.5. Χρήση PCM σε φωτοβολταϊκά συστήματα**

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν την ηλιακή ενέργεια. Όμως παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια του ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή τότε η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μειώνεται κατά 0,5%. Για αυτόν τον λόγο προτάθηκε η χρήση υλικών αλλαγής φάσης. Το PCM τοποθετείται σε ένα μονωμένο πλαίσιο κάτω από την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου έτσι ώστε να λαμβάνει την διαφεύγουσα θερμότητα. [50]

## **6.7. Εφαρμογές στις μεταφορές**

Μία εφαρμογή που βρίσκουν τα υλικά αλλαγής φάσης είναι στην συντήρηση των τροφίμων κατά στην μεταφορά και επίσης στον ιατρικό τομέα στις μεταφορές φαρμάκων, στις παγοκύστες κ.α. Εάν η συντήρησή τους γινόταν με την χρήση Diesel το κόστος σε αυτήν την περίπτωση θα ήταν αρκετά υψηλό.

Ακόμη υπάρχουν κιβώτια τα οποία δεν έχουν κατασκευαστεί αυστηρά για μεταφορά τροφίμων ή φαρμάκων και χρησιμοποιούνται με άλλους τρόπους. Η εταιρεία Va-Q-tec έχει κατασκευάσει ένα κιβώτιο το οποίο έχει την ικανότητα να διατηρήσει σταθερή θερμοκρασία 2-8<sup>0</sup> C για περίπου 96 ώρες. Το παραπάνω δοχείο χρησιμοποιείται για την μεταφορά προϊόντων με μεταγωγικά φορτηγά ή αεροπλάνα. Επίσης η εταιρεία Rubitherm έχει κατασκευάσει κάποιες πλάκες στις οποίες είναι ενσωματωμένα τα PCMs σε μορφή μικροκάψουλων. Οι συγκεκριμένες πλάκες χρησιμοποιούνται για την θέρμανση ή ψύξη τροφίμων. [51], [52]



**Σχήμα 6.22:** Εγκατάσταση με ενσωματωμένα PCMs της εταιρίας Va-Q- tec για την μεταφορά τροφίμων

[52]

## **6.8. Εφαρμογές στην ιατρική**

Επίσης τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ιατρικούς σκοπούς. Η αποθήκευση και η μεταφορά ιατροφαρμακευτικών προϊόντων καθώς και η μεταφορά και συντήρηση μοσχευμάτων είναι μία εφαρμογή. Πολλά από αυτά τα προϊόντα έχουν πολύ υψηλό κόστος και η ποιότητά τους εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες θερμοκρασίας κατά την μεταφορά και την αποθήκευση. Οι θερμοκρασίες στις οποίες διατηρούνται τέτοιου είδους προϊόντα είναι από 20 °C - 24 °C, άλλα από 2 °C - 6 °C και άλλα από -30 °C έως 26 °C.

Επίσης συνήθης είναι και χρήση πάγου για ψύξη σαν θεραπεία σε διάφορους μικροτραυματισμούς, βέβαια η χρήση του δεν είναι πάντα ιδανική. Για αυτό τον λόγο έχει προταθεί η χρήση PCM για την μείωση της θερμοκρασίας του σώματος όταν έχουμε πυρετό. Ο λόγος είναι ότι οι συνηθισμένοι τρόποι μείωσης της θερμοκρασίας όπως ψυχρές πετσέτες, παγάκια δεν προσφέρουν επαρκή ρύθμιση της θερμοκρασίας του σώματος. Όσον αφορά τα βρέφη τα οποία κινδυνεύουν από βλάβες στον εγκέφαλο εξαιτίας έλλειψης οξυγόνου, πρώτη η εταιρία «Osslon» διεξήγαγε πειράματα στα οποία ένυδρο άλας με θερμοκρασία τήξης 28 °C χρησιμοποιήθηκε για να μειώσει την θερμοκρασία του σώματος ενός μικρού χοιριδίου. Τέλος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διατηρήσουν την θερμοκρασία του σώματος στα χειρουργεία, λόγω χαμηλών θερμοκρασιών, όπως χειρουργικές ποδιές, καλύμματα και γάντια. [51], [52], [53]



**Σχήμα 6.23:** Χρήση PCM την μεταφορά και αποθήκευση μοσχευμάτων ή αίματος [53]

## **6.9. Εφαρμογές σε ηλεκτρονικούς εξοπλισμούς και στην αυτοκινητοβιομηχανία**

Τα ηλεκτρονικά στοιχεία κυκλωμάτων είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στην υπερθέρμανση, επηρεάζοντας αρνητικά τη διάρκεια ζωής και την αξιοπιστία των μονάδων. Μέχρι σήμερα, χρησιμοποιούσαν μεταλλικά πτερύγια για την βελτίωση της ικανότητας ψύξης τους μαζί με πρόσθετους ανεμιστήρες. Η χρήση των PCMs είναι μία αξιόπιστη μέθοδος δεδομένου ότι δεν απαιτείται καμία επιπλέον συσκευή ψύξης. Το PCM αναπαράγεται μεταξύ των περιόδων αιχμής εκπέμποντας θερμότητα με τα ψυκτικά πτερύγια. Έτσι λοιπόν έχουμε ένα πολύ μικρότερο ψυκτικό σύστημα με μια πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Ευρεία είναι η χρήση τους στις εταιρίες τηλεφωνίας που χρησιμοποιούν μπαταρίες για να τροφοδοτήσουν με ενέργεια τον εξοπλισμό, και επειδή πολλές φορές ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός πρέπει να βρίσκεται και να χρησιμοποιείται υπαίθρια, σε ψηλές ή σε χαμηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται από  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα. Η μπαταρίες έχουν πολύ μεγάλη ενεργειακή απώλεια όταν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή ή αστοχούν όταν είναι πολύ υψηλή και επιπλέον η διάρκεια ζωής μίας μπαταρίας εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται. Για αυτό τον λόγο έχει κατασκευαστεί ένα ειδικό περίβλημα το οποίο περιέχει σακούλες με PCMs και τυλίγεται γύρω από την μπαταρία. Επίσης τα PCMs εφαρμόζονται και στην αυτοκινητοβιομηχανία και κυρίως από την εταιρία BMW. Το PCM που χρησιμοποιείται στις μπαταρίες αποθηκεύει την υπερβολική θερμότητα που αναπτύσσεται όταν η μηχανή λειτουργεί σε λειτουργικές θερμοκρασίες. Αυτή η θερμότητα που αποθηκεύεται είναι έπειτα διαθέσιμη στην επόμενη κρύα έναρξη της μηχανής για να θερμάνει τη μηχανή γρήγορα και οπότε να επιτύχουμε εξοικονόμηση καυσίμων. Λόγω της άριστης μόνωσης της μπαταριών λανθάνουσας θερμότητας, η ενέργεια μπορεί να διατηρηθεί για 2 ημέρες για μια θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Σαν επέκταση σε αυτήν την εφαρμογή, τα PCMs μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στους σωλήνες αναρρόφησης (εξάτμιση) των οχημάτων. Αυτό διατηρεί τον καταλυτικό μετατροπέα στη θερμοκρασία σχεδιασμού του, που μειώνει τις υπερβολικές εκπομπές υδρογονανθράκων κατά τη διάρκεια της εκκίνησης των οχημάτων. [51], [52]

## **6.10. Εφαρμογές στην ενδυμασία**

Η ένδυση αναμένεται για να παρέχει μια θερμική ισορροπία μεταξύ της θερμότητας που παράγεται από το σώμα εκτελώντας ένα άθλημα και της θερμότητας που απελευθερώνεται

στο περιβάλλον. Τα κανονικά ενδύματα δεν ικανοποιούν πάντα αυτές τις ανάγκες. Η θερμότητα που παράγεται από το σώμα στην δραστηριότητα συχνά δεν απαλλάσσεται στο περιβάλλον. Αφ' ενός, στις περιόδους ανάπαυσης μεταξύ των δραστηριοτήτων παράγεται λιγότερη θερμότητα από το ανθρώπινο σώμα. Κατά συνέπεια η υποθερμία είναι πιθανό να εμφανιστεί. Έτσι λοιπόν τα PCMs μπορούν να εφαρμοστούν σε φανέλες, καπέλα, γάντια και αδιάβροχα. Επίσης σε σακάκια ή σε επενδύσεις σακακιών, μπότες, παπούτσια γκολφ, αθλητικά παπούτσια, κάλτσες, πάτους παπουτσιών και σε εξοπλισμούς χειμερινών αθλημάτων.

Επιπλέον η εταιρία «Climator AB» έχει αναπτύξει μία εφαρμογή όπου εγκλωβισμένα PCMs σε κάψουλες τοποθετούνται μέσα σε γιλέκα. Αυτά τα γιλέκα έχουν αναπτυχθεί έτσι ώστε να ψύχουν το ανθρώπινο σώμα σε περιπτώσεις βαριών χειρονακτικών εργασιών.

Τέλος τα υλικά αλλαγής φάσης βρίσκουν εφαρμογή στα διαστημικά κοστούμια και στα γάντια για να προστατεύσουν τους αστροναύτες από τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας εκτελώντας τις εκτός οχήματος δραστηριότητες στο διάστημα. [51], [52], [53]

## **ΜΕΡΟΣ 2<sup>ο</sup> -ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**





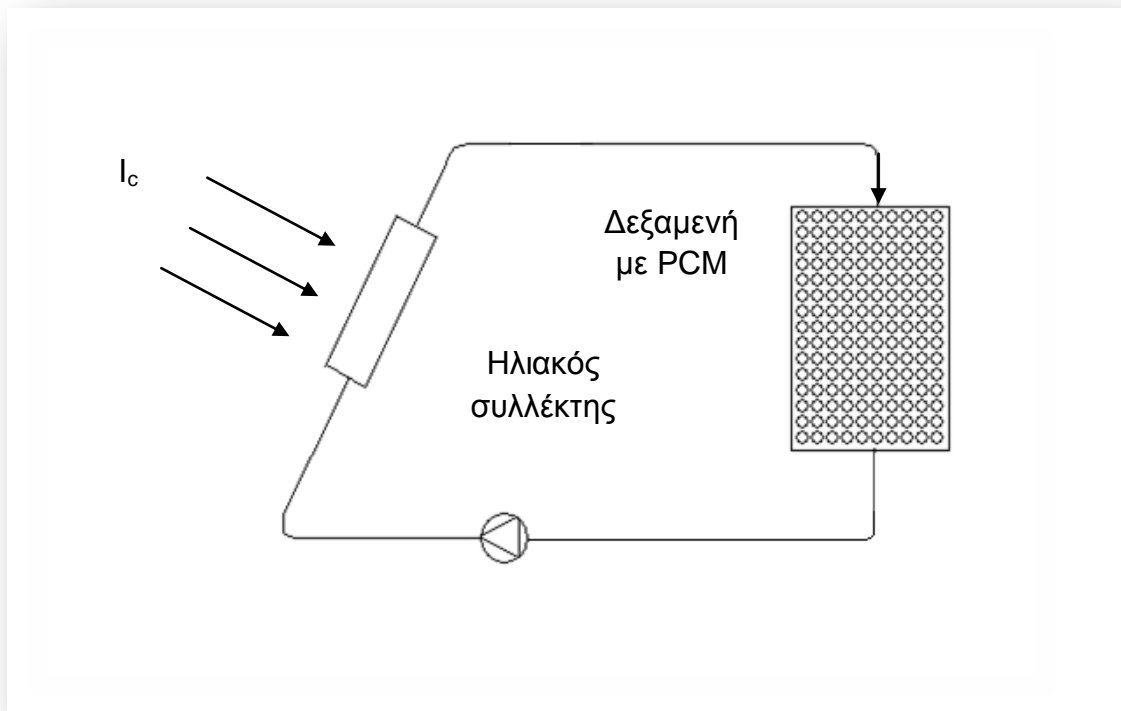
## **Κεφάλαιο 7: Χαρακτηριστικά 21<sup>ης</sup> ημέρας κάθε μήνα**

Στόχος της μελέτης που θα πραγματοποιήσουμε είναι η θερμική απόδοση μιας μονάδας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας που ενσωματώνεται με ηλιακό σύστημα θέρμανσης ύδατος στην περιοχή της Αθήνας για κάθε 21<sup>η</sup> μέρα κάθε μήνα του έτους. Η εγκατάσταση περιέχει PCM ενθυλακωμένο σε σφαιρικές κάψουλες, που περιβάλλονται από νερό που λειτουργεί ως μέσο αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.

Στο παρόν κεφάλαιο υπολογίζονται οι ωριαίες θερμοκρασίες του εξωτερικού περιβάλλοντος για κάθε 21<sup>η</sup> ημέρα για κάθε μήνα του έτους, η στιγμιαία προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη καθώς επίσης δίδονται και τα αντίστοιχα διαγράμματά τους.

### **7.1. Περιγραφή συστήματος και αρχές λειτουργίας**

Η πειραματική διάταξη την οποία θα μελετήσουμε φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Αποτελείται από έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη και μία δεξαμενή η οποία περιέχει PCMs σε κάψουλες.



**Σχήμα 7.1:** Μελετώμενη εγκατάσταση με δεξαμενή η οποία περιέχει PCMs σε μικροκάψουλες

### **7.1.1 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης**

Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης (Flat Plate Collector) είναι το πιο διαδεδομένο είδος ηλιακού συλλέκτη. Ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης εκμεταλλεύεται τόσο τη διάχυτη όσο και την άμεση ακτινοβολία και έχει μηχανικά συστήματα που χαρακτηρίζονται πολύ απλά. Τα βασικά του στοιχεία είναι:

1. Η απορροφητική επιφάνεια, η οποία μπορεί να προέρχεται από ειδικά επεξεργασμένο μέταλλο. Η συνηθέστερη επίστρωση των απορροφητικών επιφανειών είναι το μαύρο χρώμα. Συχνά όμως χρησιμοποιούνται και απορροφητικές επιφάνειες επιλεκτικής βαφής τόσο για την προστασία της επιφάνειας όσο και για την μείωση των θερμικών απωλειών.

2. Το κάλυμμα ή καλύμματα, συνήθως από γυαλί ή διαφανές πλαστικό υλικό, τα οποία έχουν την ικανότητα να μειώνουν τις θερμικές απώλειες λόγω μεταφοράς.

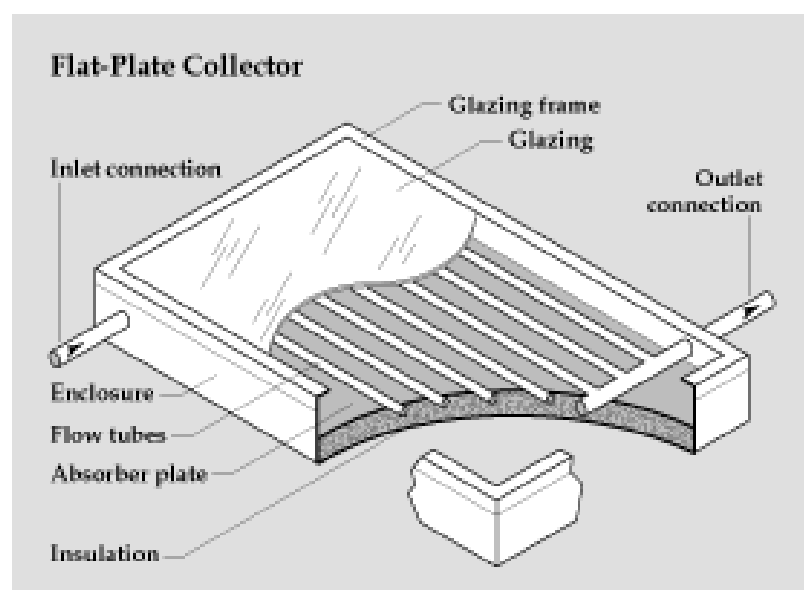
3. Το δίκτυο σωληνώσεων που εφάπτεται στην απορροφητική επιφάνεια, μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το ρευστό, που απάγει τη θερμική ενέργεια από την απορροφητική πλάκα.

4. Τη θερμομόνωση, στο πίσω μέρος του συλλέκτη και στις πλαϊνές επιφάνειες.

5. Το περίβλημα, που συνήθως είναι από πλαστικό ή μέταλλο, το οποίο προστατεύει την όλη κατασκευή. Η λειτουργία του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη καθορίζεται εξίσου από τις συνθήκες ηλιοφάνειας και θερμοκρασίας και από τις ιδιότητες των υλικών. Τοποθετούνται σε σταθερή θέση και με προσανατολισμό που καθορίζεται από τη γεωγραφική θέση και το σκοπό χρήσης τους. Ο απλούστερος επίπεδος ηλιακός συλλέκτης είναι ο λεγόμενος ακάλυπτος συλλέκτης, αφού αποτελείται μόνο από την απορροφητική επιφάνεια. Ο ακάλυπτος, επίπεδος συλλέκτης βρίσκει εφαρμογές σε περιπτώσεις περιορισμένου θερμικού φορτίου πχ για την θέρμανση πισινών κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου. Η τοποθέτηση διαφανών, προστατευτικών καλυμμάτων (που όχι μόνο προφυλάσσει τη μαύρη επιφάνεια από τη σκόνη ή τη βροχή αλλά δεν επιτρέπει και την ελεύθερη μεταφορά θερμότητας προς τα έξω) μας δίνει τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες στη βασική τους μορφή. Μέτρο της σωστής λειτουργίας ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη είναι η απόδοσή του. Η μαθηματική εξίσωση προσδιορισμού της στιγμιαίας απόδοσής ενός συλλέκτη είναι:

$$n_{th} = \frac{Q_u}{A_c G_T}, \quad (7.1)$$

όπου  $Q_u$  η ισχύς της ωφέλιμης ενέργειας ή απολαβής (W),  $A_c$  η επιφάνεια του συλλέκτη (σε  $m^2$ ) και  $G_T$  η ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία ( $W/m^2$ ).



**Σχήμα 7.2:** Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης

Ο ακριβής προσδιορισμός της απόδοσης ενός επιπέδου ηλιακού συλλέκτη απαιτεί την ανάλυση και ερμηνεία, των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα και που χαρακτηρίζονται από τα μεγέθη του παραπάνω τύπου. Αναλυτικότερα, ως ισχύς ωφέλιμης ενέργειας θεωρείται η διαφορά μεταξύ της απορροφημένης ισχύος ηλιακής ενέργειας και της θερμότητας λόγω απωλειών δηλ:

$$Q_u = A_c(S - U_L(T_{p,m} - T_a)) \quad (7.2)$$

όπου το  $S$  αναφέρεται στην ανά μονάδα επιφάνειας του συλλέκτη, απορροφώμενη ενέργεια, η οποία ισούνται με  $S = (\tau\alpha)GT$ , όπου  $(\tau\alpha)$  είναι η μέση τιμή του γινομένου διαπερατότητας – απορροφητικότητας. Το γινόμενο  $U_L(T_{p,m} - T_a)$  αναφέρεται στις θερμικές απώλειες. Πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι ο παραπάνω τύπος ισχύει με την αυτή του μορφή, όταν χρησιμοποιείται η μέση θερμοκρασία του απορροφητή δηλ η  $T_i$ . Η χρήση του δεν μπορεί να χαρακτηριστεί εύκολη γιατί είναι δύσκολο να γνωρίζουμε ανά πάσα χρονική στιγμή την  $T_i$  εξαιτίας της εξάρτησης της από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και το ρευστό που χρησιμοποιείται. Γι' αυτό το λόγο είναι πιο βολικό να χρησιμοποιήσουμε αντί της  $T_{p,m}$ , τη θερμοκρασία εισόδου του νερού δηλ την  $T_i$ , μέσω της εξίσωσης:

$$T_{f,i} = T_i + \frac{Q_u}{A_c U_L F_R} (1 - F_R) \quad (7.3)$$

και έτσι λοιπόν η ωφέλιμη ενέργεια του ηλιακού συλλέκτη δίνεται από την σχέση:

$$Q_u = A_c F_R (G_T (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)) \quad (7.4)$$

Παρατηρούμε ότι η αλλαγή σε  $T_{f,i}$ , εισήγαγε έναν καινούριο όρο, τον  $F_R$ . Ο παράγοντας αυτός είναι ισοδύναμος με τον λόγο της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη για συγκεκριμένη τιμή της θερμοκρασίας του ρευστού προς την ωφέλιμη ισχύς του ίδιου αν αυτός βρισκόταν στη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού, δηλ την  $T_{f,i}$ . Και αυτό γιατί η μέγιστη απόδοση ενός επιπέδου ηλιακού συλλέκτη επιτυγχάνεται όταν ο συλλέκτης φτάσει σε θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού. Η διεθνής ονομασία του παράγοντα αυτού είναι Heat Removal Factor και δίνεται από την σχέση:

$$F_R = \frac{m C_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{A_c [S - U_L (T_{f,i} - T_a)]} \quad (7.5)$$

Οι συντελεστές  $F_R(\tau_a)$  και  $F_{RU_L}$  δίνονται από τους κατασκευαστές των ηλιακών συλλεκτών.

Επιπλέον πρέπει να σημειώσουμε ότι η κλίση του ηλιακού συλλέκτη ( $\beta$ ) ως προς το οριζόντιο επίπεδο δίνεται από τα παρακάτω:

1. Για μέγιστη ετήσια ενέργεια απαιτείται κλίση του ηλιακού συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος, δηλαδή  $\beta = \varphi$
2. Για μέγιστη ενέργεια κατά την διάρκεια του καλοκαιριού απαιτείται η κλίση του συλλέκτη να είναι κατά  $15^\circ$  μικρότερη από αυτήν του γεωγραφικού πλάτους, δηλαδή  $\beta = \varphi - 15^\circ$
3. Και τέλος για μέγιστη ενέργεια κατά την διάρκεια του χειμώνα η κλίση του ηλιακού συλλέκτη πρέπει να είναι κατά  $15^\circ$  μεγαλύτερη από αυτήν του γεωγραφικού πλάτους, δηλαδή  $\beta = \varphi + 15^\circ$ .

Τέλος αξίζει να τονίσουμε ότι ο βέλτιστος προσανατολισμός του συλλέκτη είναι ο νότιος, δηλαδή  $\gamma = 0^\circ$ . [54], [55]

### **7.1.2. Δεξαμενή αποθήκευσης**

Η δεξαμενή θερμότητας αποτελεί το δεύτερο στοιχείο του συστήματος. Η σωστή μελέτη και διαστασιολόγηση της δεξαμενής θερμότητας, βοηθάει στην βελτίωση της απόδοσης μικρών και μεγάλων θερμικών ηλιακών συστημάτων, μειώνοντας τις ενεργειακές ανάγκες, επιτυγχάνοντας παράλληλα και προσεκτικότερη χρήση των ενεργειακών πηγών. Το σίγουρο είναι ότι η δεξαμενή αυτή απαιτείται να είναι θερμικά μονωμένη έτσι ώστε να διατηρείται η αποθηκευμένη θερμότητα και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η λειτουργικότητα της θερμικής αυτής αποθήκης καθορίζεται από:

- το μέσο αποθήκευσης,
- την χωρητικότητα και το ύψος της (δομικά χαρακτηριστικά),
- τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η εισαγωγή και η απομάστευση της θερμότητας,
- τη διάρκεια αποθήκευσης της αποθηκευμένης ενέργειας, το θερμοκρασιακό εύρος

λειτουργίας της (καθορίζεται από το χρησιμοποιούμενο ρευστό),

- την χρονική εξάρτηση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας,
- τη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση,
- τη διαθέσιμη βοηθητική ενεργειακή πηγή και,

- το λειτουργικό της κόστος, που θα καθορίσει τη βιωσιμότητα της.

Η δεξαμενή θερμότητας, συνηθίζεται να τοποθετείται λίγο ψηλότερα από τον συλλέκτη αν και υπάρχουν εφαρμογές στις οποίες αυτή τοποθετείται χαμηλότερα του συλλέκτη. Για να βρεθεί η εξίσωση που χρειάζεται έτσι ώστε να περιγράφεται ικανοποιητικά η θερμοκρασιακή διαφορά των στρωμάτων κάτι που θα βοηθήσει στον έλεγχο της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης, χρησιμοποιείται η αρχή διατήρησης της ενέργειας, ξεχωριστά για κάθε επίπεδο ομοιόμορφης θερμοκρασίας. Ο ακριβής προσδιορισμός της εξίσωσης όμως είναι αρκετά πολύπλοκος και χρονοβόρος και απαιτεί πληροφορίες για το πώς διανέμεται κατά μήκος της δεξαμενής η εισερχόμενη θερμική ενέργεια και τις ενεργειακές ανάγκες που είναι σχεδιασμένη να καλύψει.[56]

## **7.2. Χαρακτηριστικά της μελετώμενης εγκατάστασης**

Η εγκατάσταση την οποία μελετούμε θεωρούμε ότι αποτελείται από έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη με χαρακτηριστικά:

$$F_R(\tau\alpha)=0.7$$

$$F_R U_L=5.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) \text{ και}$$

$A_c=10\text{m}^2$  η συνολική επιφάνειά του. Επίσης έχει νότιο προσανατολισμό δηλαδή  $\gamma=0^\circ$  και η κλίση του ως προς το οριζόντιο επίπεδο για μέγιστη ετήσια ενέργεια είναι  $\beta=37,97^\circ$ , όσο και το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας.

Θεωρούμε ότι η δεξαμενή είναι τοποθετημένη στο κατακόρυφο επίπεδο έχει χωρητικότητα  $V=750 \text{ m}^3$ , λαμβάνοντας υπόψη ότι η αντιστοιχία μεταξύ επιφάνειας του συλλέκτη και της δεξαμενής είναι 75 λίτρα ανά  $\text{m}^2$  συλλεκτικής επιφάνειας και επίσης περιέχει 55 mm θερμικής μόνωσης με υαλοβάμβακα. Επίσης θεωρούμε ότι οι απώλειες της δεξαμενής προς το περιβάλλον είναι αμελητέες.

Η τοποθέτηση των υλικών αλλαγής φάσης σε κάψουλες μας επιτρέπει να κάνουμε την παραδοχή ότι η επιφάνεια διεπαφής μεταξύ των καψούλων PCM και του νερού που διέρχεται ανάμεσά τους είναι τόσο μεγάλη ώστε να μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το νερό στην έξοδο του από την δεξαμενή έχει ίση θερμοκρασία με αυτήν που αποκτά το υλικό αλλαγής φάσης. [55]

### 7.3 Υπολογισμός της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας $T_a$

Η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος για την περιοχή της Αθήνας υπολογίζεται σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο της ASHRAE, εφόσον είναι γνωστή η μέγιστη θερμοκρασία ημέρας και η ημερήσια θερμοκρασιακή διακύμανση και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$T_a(H) = M + \sum_{i=1}^3 C_i \cos\left(\frac{360i}{24}(H - 0,5)\right) + \sum_{i=1}^3 C_i \sin\left(\frac{360i}{24}(H - 0,5)\right) \quad (7.6)$$

Όπου  $H$  η ώρα της ημέρας 1:24 και  $M$ ,  $C_i$ ,  $S_i$ , συντελεστές που δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 7.1:** Τιμές των συντελεστών της συνάρτησης 7.1 [57]

Ημέρα	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$M$
21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου	-1.673	0.711	0.0085	-1.723	0.524	-0.241	9.384
21 <sup>η</sup> Φεβρουαρίου	-2.15	0.785	-0.107	-1.75	0.578	-0.072	10.984
21 <sup>η</sup> Μαρτίου	-1.898	0.651	-0.0097	-1.084	0.256	-0.0093	11.955
21 <sup>η</sup> Απριλίου	-2.668	0.727	0.269	-1.763	0.243	0.212	15.072
21 <sup>η</sup> Μαΐου	-2.796	0.759	0.0926	-1.344	0.119	0.308	20.724
21 <sup>η</sup> Ιουνίου	-3.393	1.115	0.156	-2.196	-0.139	0.157	26.192
21 <sup>η</sup> Ιουλίου	-3.359	0.811	0.272	-2.077	0.134	0.14	28.08
21 <sup>η</sup> Αυγούστου	-3.113	0.884	0.067	-1.978	0.486	0.361	27.880
21 <sup>η</sup> Σεπτεμβρίου	-3.31	1.035	-0.0495	-1.696	0.477	0.221	23.236
21 <sup>η</sup> Οκτωβρίου	-2.63	1.085	-0.144	-1.427	0.604	0.138	18.144
21 <sup>η</sup> Νοεμβρίου	-1.3	0.616	-0.252	-0.317	0.629	-0.049	11.968
21 <sup>η</sup> Δεκεμβρίου	-1.11	0.521	-0.152	-0.881	0.333	0.008	9.264

**Πίνακας 7.2:** Θερμοκρασία της 21<sup>ης</sup> ημέρας κάθε μήνα για κάθε μία ώρα

$T_a$ (°C)												
Μήνες	21 Ιαν.	21 Φεβ.	21 Μαρ.	21 Απρ.	21 Μαΐου	21 Ιουν.	21 Ιουλ.	21 Αυγ.	21 Σεπ.	21 Οκτ.	21 Νοεμ	21 Δεκ.
Ωρες												
7:00	7,30	8,65	10,44	12,81	18,74	23,33	25,62	25,04	20,64	15,69	11,01	7,88
8:00	7,66	9,15	11,03	13,95	19,90	24,86	26,98	26,20	21,74	16,45	11,08	8,13
9:00	8,26	10,02	11,82	15,20	21,25	26,57	28,44	27,71	23,22	17,67	11,49	8,65
10:00	9,12	11,16	12,71	16,37	22,53	28,17	29,79	29,26	24,82	19,13	12,22	9,37
11:00	10,18	12,42	13,57	17,30	23,49	29,46	30,89	30,59	26,26	20,55	13,09	10,15
12:00	11,27	13,57	14,26	17,96	24,06	30,30	31,69	31,51	27,30	21,64	13,86	10,81
13:00	12,17	14,38	14,69	18,38	24,23	30,68	32,19	32,00	27,82	22,22	14,31	11,21
14:00	12,68	14,71	14,78	18,60	24,12	30,65	32,41	32,12	27,83	22,24	14,31	11,28
15:00	12,68	14,54	14,54	18,59	23,82	30,29	32,32	31,94	27,40	21,78	13,91	11,07
16:00	12,19	13,97	14,04	18,31	23,38	29,66	31,89	31,51	26,66	20,99	13,24	10,68
17:00	11,40	13,15	13,39	17,71	22,79	28,84	31,11	30,82	25,71	20,05	12,52	10,23
18:00	10,54	12,28	12,70	16,83	22,04	27,90	30,06	29,88	24,66	19,08	11,88	9,81

#### **7.4. Υπολογισμός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη**

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω σε μια οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια, έχει δυο συνιστώσες: την άμεση και την διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία.

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία  $G_b$  είναι αυτή η οποία φτάνει απ' ευθείας από τον ηλιακό δίσκο στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση (αλλαγή κατεύθυνσης) κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα. Εξαρτάται από την απόσταση Ήλιου-Γης, την ηλιακή απόκλιση ( $\delta$ ), το ηλιακό ύψος ( $\alpha$ ), το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\varphi$ ), το υψόμετρο του τόπου ( $h$ ), την κλίση της επιφάνειας επί της οποίας προσπίπτει ( $\beta$ ), καθώς και από την απορρόφηση και διάχυση την οποία υφίσταται μέσα στην ατμόσφαιρα.

Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία  $G_d$  είναι το ποσό της ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους μετά την ανάκλαση ή σκέδαση μέσα στην ατμόσφαιρα, αλλά και μετά από ανάκλαση πάνω στην επιφάνεια της Γης. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το



ηλιακό ύψος ( $\alpha$ ), το υψόμετρο του τόπου, τη λευκαύγεια του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών, καθώς και από την παρουσία διαφόρων κέντρων σκεδάσεως (αερολυμάτων, υδροσταγόνων κ.α.) που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που διανύει η ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα, τόσο μικρότερο είναι το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης. [54], [58]

Ο υπολογισμός των παραπάνω μεγεθών γίνεται σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους σύμφωνα με την ASHRAE:

$$G_b = M_t + A_t \sin \left( \frac{360}{365} D - P_t \right) \quad (7.7)$$

η μέση στιγμιαία άμεση ακτινοβολία

$$G_d = m_t + a_t \sin \left( \frac{360}{365} D - P_t \right) \quad (7.8)$$

η μέση στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία

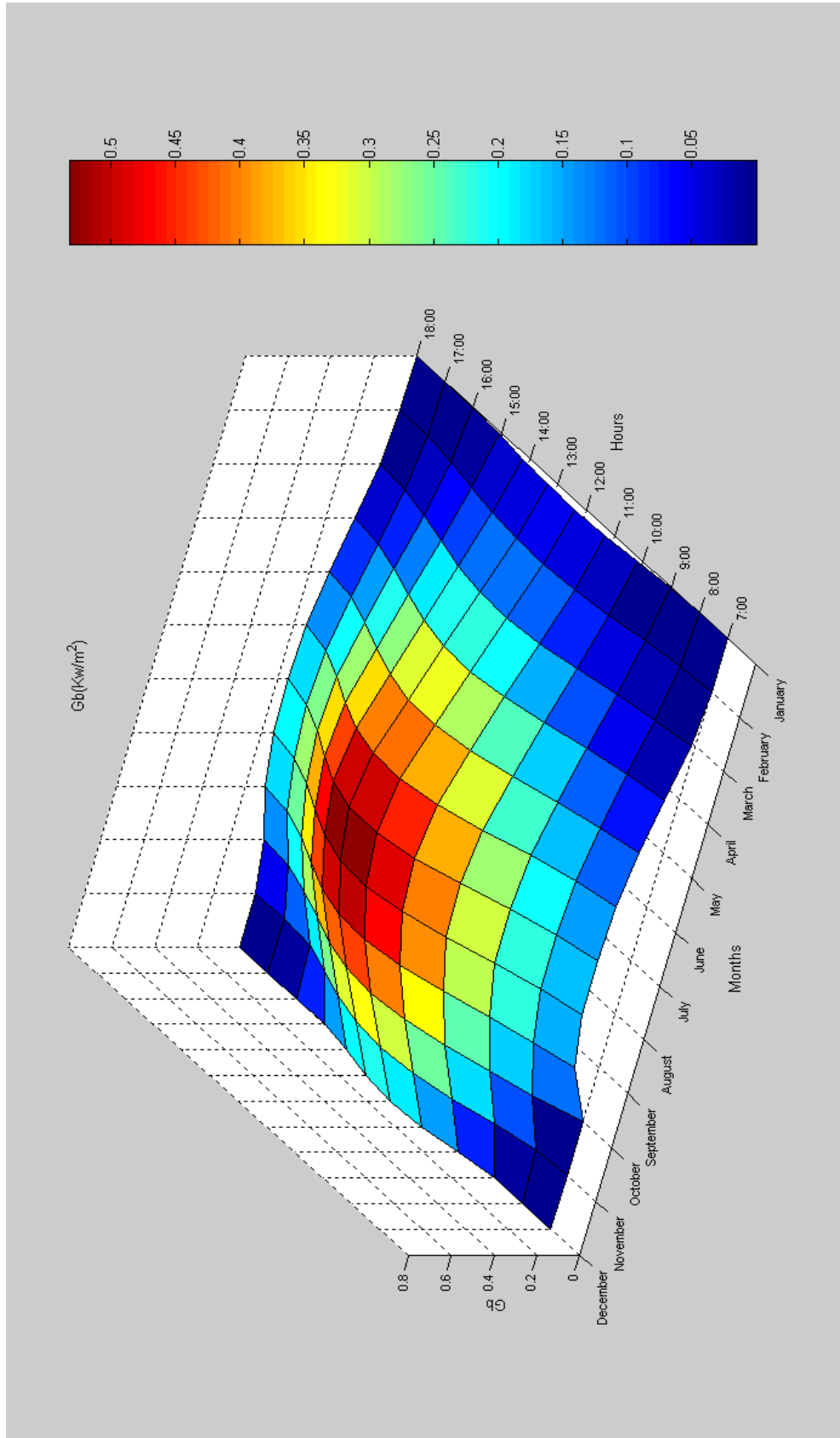
Στις σχέσεις (7.2), (7.3)  $D=1:365$  η ημέρα τους έτους για την οποία υπολογίζουμε την ακτινοβολία και  $M_t$ ,  $A_t$ ,  $a_t$ ,  $m_t$  είναι συντελεστές που δίνονται στον παρακάτω πίνακα για κάθε ώρα της ημέρας από τις 7 το πρωί μέχρι τις 6 το απόγευμα  $t=7:18$

**Πίνακας 7.3:** Τιμές των συντελεστών των εξισώσεων 7.7, 7.8 [54]

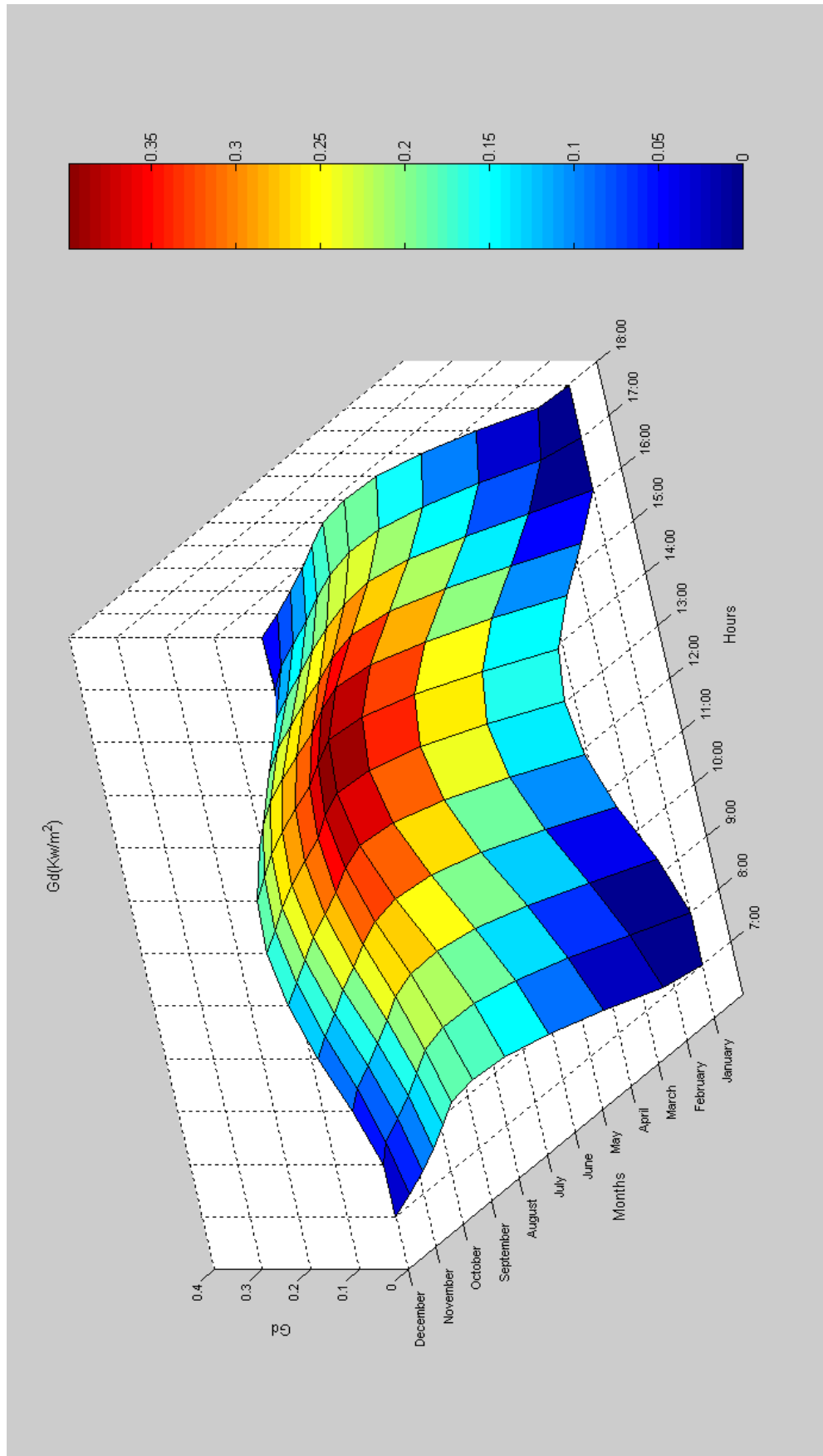
D	Ώρες	$M_t$	$A_t$	$P_t$	$m_t$	$a_t$	$p_t$
21	07:00	0.007	0.046	86.18	0.048	0.111	81.23
52	08:00	0.057	0.068	87.31	0.134	0.127	82.45
80	09:00	0.119	0.104	87.94	0.208	0.133	83.94
111	10:00	0.191	0.129	88.31	0.261	0.129	85.6
141	11:00	0.258	0.153	89.35	0.283	0.117	86.05
172	12:00	0.319	-0.181	-88.88	0.271	0.095	82.71
202	13:00	0.342	-0.194	-89.18	0.243	0.081	81.95
233	14:00	0.325	0.183	87.21	0.21	0.083	87.23
264	15:00	0.269	0.166	86.22	0.176	0.087	89.53
294	16:00	0.183	0.147	82.1	0.141	-0.085	-88.19

325	17:00	0.078	0.131	79.85	0.104	-0.079	-88.97
355	18:00	-0.025	0.114	77.36	0.051	0.091	86.79

Με την βοήθεια του προγράμματος Matlab του οποίου ο κώδικας δίδεται παρακάτω προκύπτουν τα διαγράμματα της μέσης στιγμιαίας άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας.



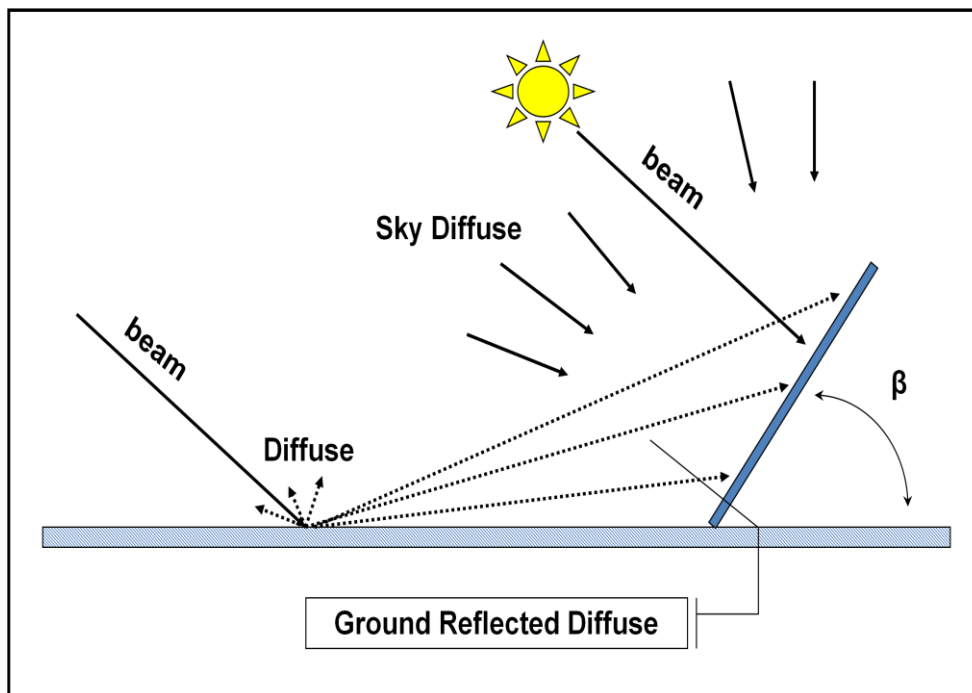
**Διάγραμμα 7.2:** Μέση στιγμιαία άμεση ακτινοβολία συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας κάθε μήνα του έτους



**Διάγραμμα 7.3:** Μέση στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας κάθε μήνα του έτους

Η συνολική ακτινοβολία η οποία προσπίπτει σε μία κεκλιμένη επιφάνεια ισούται με την παρακάτω σχέση:

$$G_t = \underbrace{G_b R_b}_{\text{Άμεση ακτινοβολία}} + \underbrace{I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right)}_{\text{Διάχυτη που προέρχεται από τον ουρανό}} + \underbrace{(G_b + G_d) \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)}_{\text{Διάχυτη ακτινοβολία που προέρχεται από την ανάκλαση της ολικής στο έδαφος}} \quad (7.9)$$



**Σχήμα 7.3 :** Προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο [58]

Επίσης στην παραπάνω σχέση ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους  $\rho$  λαμβάνεται ίσος με  $\rho=0,2$  και  $R_b$  είναι ο λόγος της άμεσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου και για την περίπτωση επιφάνειας με νότιο προσανατολισμό, δηλαδή  $\gamma=0^0$  δίνεται από την σχέση:

$$R_b = \frac{\sin\delta \sin(\varphi-\beta) + \cos\delta \cos(\varphi-\beta)\cos\omega}{\sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega} \quad (7.10)$$

Για τον προσδιορισμό του παραπάνω μεγέθους πρέπει αρχικά να ορίσουμε τα παρακάτω:

- $\delta$  συμβολίζει την ηλιακή απόκλιση και εκφράζει την γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού και δίνεται από την σχέση

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \quad (7.11)$$

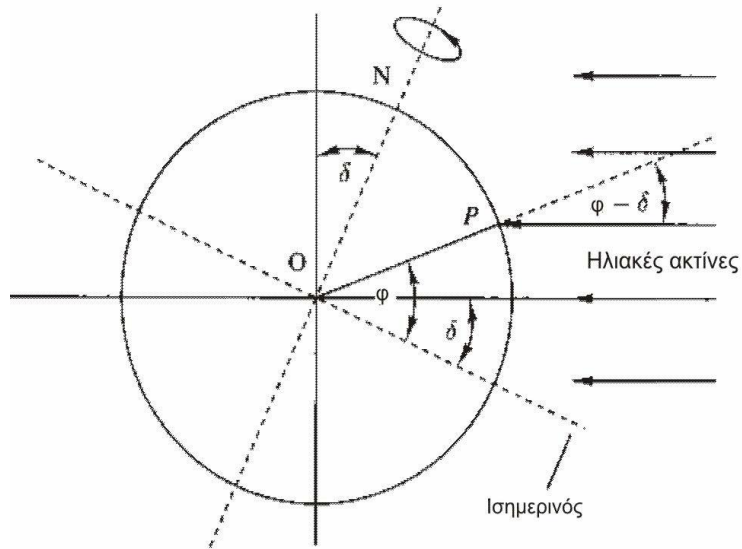
όπου  $n$  είναι η ημέρα του έτους.

- $\varphi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος και στην συγκεκριμένη περίπτωση για την περιοχή της Αθήνας είναι  $\varphi=37,97^\circ$
- $\omega$  συμβολίζουμε την ωριαία γωνία. Συμβολίζει τη γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της Γής περί τον άξονά της και δίνεται από τον τύπο:

$$\omega = \pm 0,25(\text{min από το ηλιακό μεσημέρι (12:00)}) \quad (7.12)$$

$\omega > 0$  για μ.μ και  $\omega < 0$  για π.μ

- Τέλος η γωνία  $\beta$  συμβολίζει την κλίση της επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Όπως προαναφέραμε λαμβάνουμε  $\beta=\varphi=37,97^\circ$ .



**Σχήμα 7.4:** Ηλιακή απόκλιση [59]

Σύμφωνα με τα παραπάνω λαμβάνουμε τα παρακάτω τιμές:

**Πίνακας 7.4:** Υπολογισμός ωραίας γωνίας

Ώρες	$\omega$
7:00	-75
8:00	-60
9:00	-45
10:00	-30
11:00	-15
12:00	0
13:00	15
14:00	30
15:00	45
16:00	60
17:00	75
18:00	90

**Πίνακας 7.5:** Υπολογισμός ηλιακής απόκλισης συναρτήσει των μηνών του έτους

Μήνες	$\delta$
21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου	-20,138
21 <sup>η</sup> Φεβρουαρίου	-11,226
21 <sup>η</sup> Μαρτίου	-0,404
21 <sup>η</sup> Απριλίου	11,579
21 <sup>η</sup> Μαΐου	20,138
21 <sup>η</sup> Ιουνίου	23,450
21 <sup>η</sup> Ιουλίου	20,442
21 <sup>η</sup> Αυγούστου	11,754
21 <sup>η</sup> Σεπτεμβρίου	-0,202
21 <sup>η</sup> Οκτωβρίου	-11,754
21 <sup>η</sup> Νοεμβρίου	-20,442
21 <sup>η</sup> Δεκεμβρίου	-23,450

**Πίνακας 7.6:** Υπολογισμός του συντελεστή  $R_b$

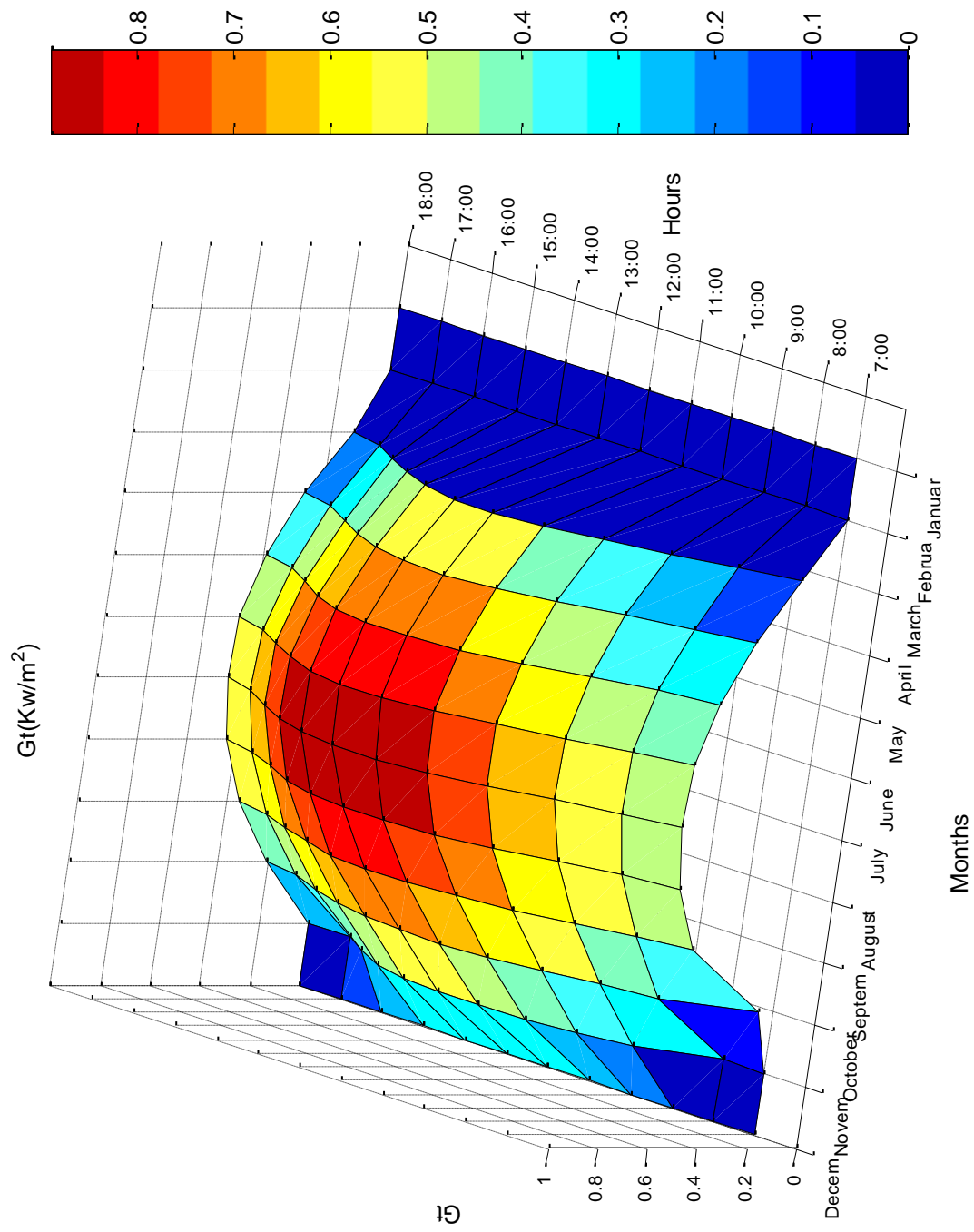
$R_b$												
Μήνες	21 Ιαν.	21 Φεβ.	21 Μαρ.	21 Απρ.	21 Μαΐου	21 Ιουν.	21 Ιουλ.	21 Αυγ.	21 Σεπ.	21 Οκτ.	21 Νοεμ.	21 Δεκ.
Ωρες												
<b>7:00</b>	-11,99	3,15	1,29	0,78	0,60	0,55	0,59	0,77	1,28	3,40	-10,23	-4,11
<b>8:00</b>	2,96	1,83	1,28	0,96	0,80	0,75	0,80	0,95	1,27	1,87	3,03	3,92
<b>9:00</b>	2,13	1,62	1,27	1,03	0,90	0,85	0,89	1,03	1,27	1,64	2,15	2,43
<b>10:00</b>	1,89	1,54	1,27	1,07	0,95	0,91	0,95	1,06	1,27	1,56	1,90	2,08
<b>11:00</b>	1,80	1,51	1,27	1,08	0,97	0,93	0,97	1,08	1,27	1,52	1,81	1,95
<b>12:00</b>	1,77	1,50	1,27	1,09	0,98	0,94	0,98	1,09	1,27	1,51	1,78	1,91
<b>13:00</b>	1,80	1,51	1,27	1,08	0,97	0,93	0,97	1,08	1,27	1,52	1,81	1,95
<b>14:00</b>	1,89	1,54	1,27	1,07	0,95	0,91	0,95	1,06	1,27	1,56	1,91	2,08
<b>15:00</b>	2,13	1,62	1,27	1,03	0,90	0,85	0,89	1,03	1,27	1,64	2,15	2,43
<b>16:00</b>	2,96	1,83	1,28	0,96	0,80	0,75	0,80	0,95	1,27	1,87	3,03	3,92
<b>17:00</b>	-11,99	3,15	1,29	0,78	0,60	0,55	0,59	0,77	1,28	3,40	-10,23	-4,11
<b>18:00</b>	-2,71E-16	-5,01E-16	-1,41E-14	4,86E-16	2,71E-16	2,29E-16	2,67E-16	4,78E-16	-2,83E-14	-4,78E-16	-2,67E-16	-2,29E-16



Έτσι λοιπόν η στιγμιαία προσπίπτουσα ακτινοβολία συναρτήσει της 21<sup>ης</sup> ημέρας κάθε μήνα του έτους και της ώρας της ημέρας δίνεται στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα.

**Πίνακας 7.7:** Στιγμιαία προσπίπτουσα ακτινοβολία συναρτήσει της ώρας της ημέρας και της 21<sup>ης</sup> ημέρας κάθε μήνα του έτους

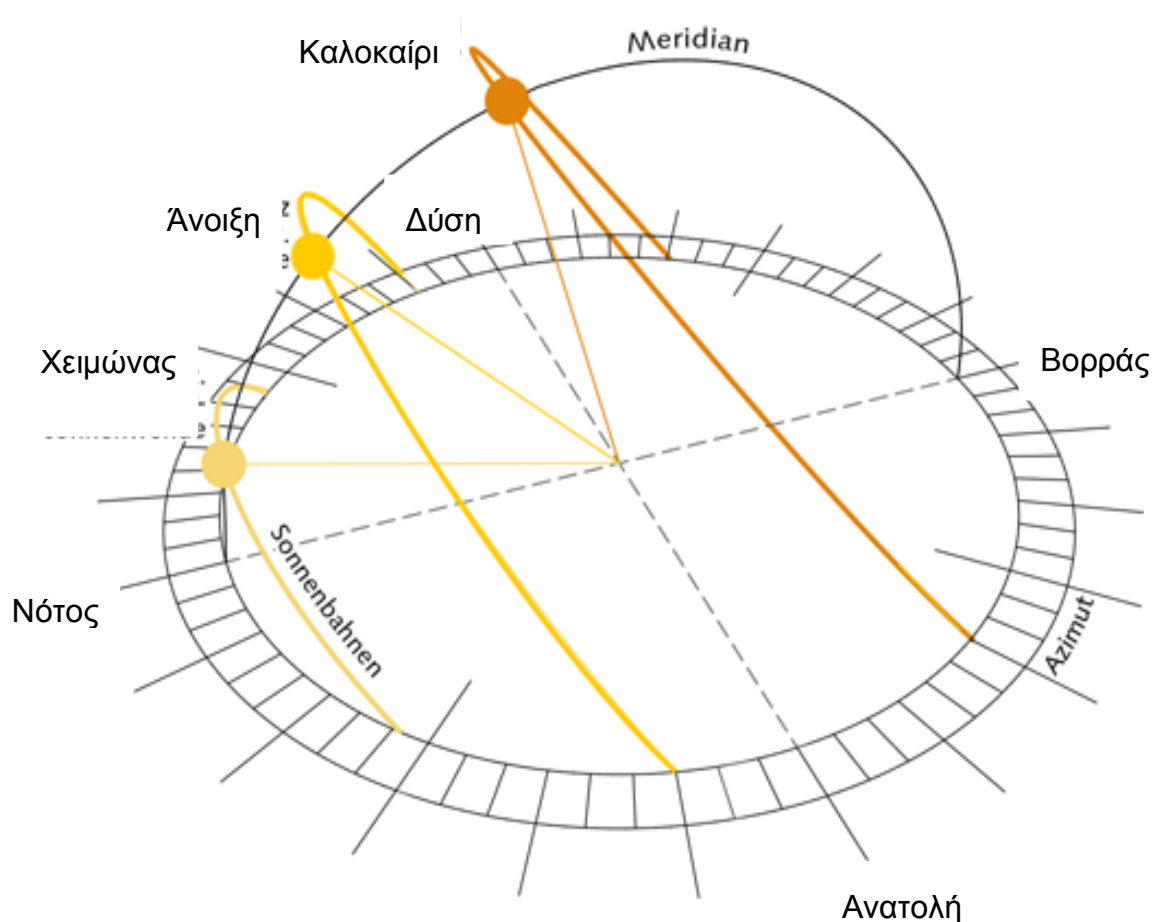
$G_t(KW/m^2)$												
Μήνες	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Ωρες	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.	Μαΐου	Ιουν.	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπ.	Οκτ.	Νοεμ.	Δεκ.
7:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9:00	0,141	0,235	0,338	0,445	0,519	0,554	0,545	0,491	0,399	0,290	0,179	0,116
10:00	0,288	0,375	0,481	0,593	0,673	0,714	0,708	0,655	0,561	0,447	0,335	0,271
11:00	0,397	0,481	0,587	0,700	0,783	0,827	0,825	0,776	0,683	0,568	0,454	0,387
12:00	0,467	0,548	0,652	0,765	0,845	0,889	0,890	0,848	0,761	0,650	0,534	0,462
13:00	0,477	0,555	0,656	0,763	0,839	0,880	0,884	0,845	0,765	0,659	0,546	0,474
14:00	0,448	0,521	0,611	0,705	0,772	0,808	0,809	0,772	0,698	0,602	0,503	0,441
15:00	0,359	0,423	0,503	0,587	0,647	0,680	0,682	0,650	0,584	0,500	0,412	0,354
16:00	0,061	0,295	0,365	0,434	0,483	0,509	0,507	0,476	0,417	0,341	0,258	0,203
17:00	0	0	0,194	0,256	0,298	0,318	0,314	0,283	0,225	0,121	0	0
18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



**Διάγραμμα 7.4:** Συνολική προσιπύουσα ακτινοβολία συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας κάθε μήνα του έτους

Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από το παραπάνω διάγραμμα η προσπίπτουσα ακτινοβολία παρουσιάζει υψηλότερες τιμές κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών σε σύγκριση με αυτές των χειμερινών μηνών, και μάλιστα εμφανίζει την μέγιστη τιμή κατά την διάρκεια του μήνα Ιουλίου ενώ την ελάχιστη κατά την διάρκεια του Δεκεμβρίου. Αυτή η συμπεριφορά είναι απολύτως δικαιολογημένη διότι καθώς κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών για την περιοχή της Αθήνας η απόσταση μεταξύ της Γής και του Ηλίου αυξάνεται σε σχέση με τον χειμώνα, η ακτινοβολία προσπίπτει πιο κάθετα στην επιφάνεια με αποτέλεσμα να προσπίπτει μεγαλύτερο ποσό ακτινοβολίας.

Επίσης διαπιστώνουμε ότι κατά την διάρκεια της ημέρας η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται κατά τις ώρες του μεσημεριού και αρχίζει να μειώνεται στην συνέχεια. Όπως παρατηρούμε και στο παρακάτω σχήμα κατά την διάρκεια του μεσημεριού η ακτινοβολία του ηλίου προσπίπτει σχεδόν κάθετα συγκριτικά με τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας.



**Σχήμα 7.5:** Θέση του ηλίου ως προς την Γή [59]



## Κεφάλαιο 8: Συμπεριφορά υλικού αλλαγής φάσης (PCM)

Όπως προαναφέραμε σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της αποδοτικότητας διαφορετικών υλικών PCM. Έτσι λοιπόν θα μελετήσουμε την συμπεριφορά και την αποδοτικότητα ενός υλικού PCM για κάθε 21<sup>η</sup> κάθε μήνα του έτους και στην συνέχεια θα γίνει σύγκριση με δεξαμενή η οποία περιέχει καθαρό νερό. Πρέπει να σημειώσουμε ότι η μελέτη πραγματοποιείται όχι για κάθε τυπική ημέρα κάθε μήνα αλλά για μία συγκεκριμένη ημέρα του μήνα αυτήν της 21<sup>ης</sup> ημέρας κάθε μήνα του έτους.

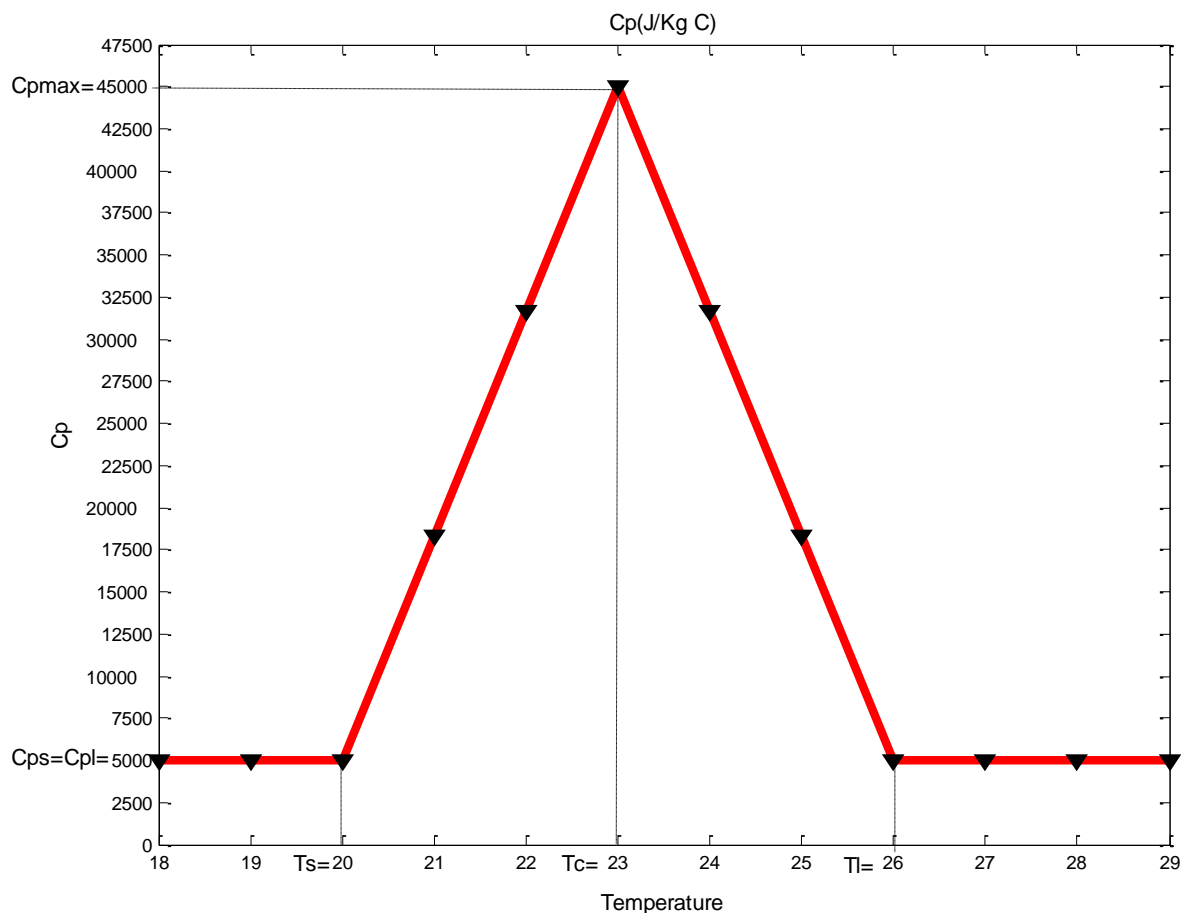
### 8.1. Υπολογισμός θερμοχωρητικότητας του PCM, της τελικής θερμοκρασίας του και της ωφέλιμης ενέργειας

Η παραφίνη τύπου I την οποία μελετάμε έχει προκύψει από μία ανάμειξη διαφόρων ειδών παραφινών. Έχει περιοχή αλλαγής φάσης 20-26<sup>o</sup> C και λανθάνουσα θερμότητα τήξης H=150000 J/Kg. Δηλαδή θεωρούμε της θερμοκρασία T<sub>s</sub>=20<sup>o</sup> C η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η υγροποίηση και T<sub>L</sub>=26<sup>o</sup> C η θερμοκρασία στην οποία ολοκληρώνεται. Η ειδική θερμοχωρητικότητα της ισούται με:

- C<sub>ps</sub>=5000 kJ/Kg<sup>o</sup>C για T≤T<sub>s</sub>
- C<sub>pL</sub>=5000 kJ/Kg<sup>o</sup>C για T>T<sub>L</sub>, ενώ στην περιοχή στην οποία αλλάζει φάση η θερμοχωρητικότητα υπολογίζεται σύμφωνα με την μέθοδο ενεργής θερμοχωρητικότητας και δίνεται από την σχέση:

$$C_{peff} = \begin{cases} \frac{4(H-bC_{ps})(T-T_s)}{b^2} + C_{ps} , \text{ για } T_s < T < T_c & (8.1) \\ \frac{4(b-C_{pL}-H)(T-T_s-\frac{b}{2})}{b^2} + \frac{2H}{b} - C_{pL} , \text{ για } T_c < T < T_L & (8.2) \end{cases}$$

Έτσι λοιπόν με την παραπάνω μέθοδο θεωρούμε πρακτικά σταθερή την  $C_p$  του PCM για θερμοκρασίες μικτότερες των  $20\text{ }^\circ\text{C}$  και μεγαλύτερες των  $26\text{ }^\circ\text{C}$ , ενώ στην περιοχή στην οποία θεωρούμε ότι λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης θεωρούμε ότι η θερμοχωρητικότητα του PCM μεταβάλλεται γραμμικά σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις. Στις οποίες ορίζουμε ως  $b=T_L-T_s=6\text{ }^\circ\text{C}$  και  $T_c=(T_s+T_L)/2=23\text{ }^\circ\text{C}$ . Η θερμοχωρητικότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



**Διάγραμμα 8.1:** Ενεργή θερμοχωρητικότητα του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας

Για τον υπολογισμό της ενέργειας  $Q_u$  και της τελικής θερμοκρασίας την οποία αποκτά το PCM  $T_2$  θα χρησιμοποιήσουμε επαναληπτική διαδικασία. Η ενέργεια την οποία προσλαμβάνει το νερό το οποίο διέρχεται από τον ηλιακό συλλέκτη δίνεται από την σχέση:

$$Q_u = A_c F_R [G_\tau (\tau \alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad (8.3)$$

ενώ η τελική θερμοκρασία του PCM υπολογίζεται από την σχέση:

$$Q_u \Delta t = m C_p (T_2 - T_1) \quad (8.4)$$

όπου  $A_c=10\text{m}^2$  η συλλεκτική επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη και  $F_R(\tau_\alpha)=0,7$  και  $F_R U_L=5,8 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$  τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη,  $m=600\text{Kg}$  η μάζα του PCM (θεωρούμε ότι έχει πυκνότητα  $\rho=1,25 \text{ Kg/m}^3$ ) και τέλος η σταθερά  $\Delta t$  εκφράζει το χρονικό βήμα των μετρήσεων το οποίο λαμβάνεται ίσο με  $3600\text{s}$ , δηλαδή μία ώρα.

Η  $T_i$  είναι η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον ηλιακό συλλέκτη και  $T_\alpha$  η εξωτερική θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον ηλιακό συλλέκτη  $T_i$  ισούται με την θερμοκρασία εξόδου του νερού από την δεξαμενή η οποία ταυτίζεται με την τελική θερμοκρασία του PCM  $T_2$ . Έτσι λοιπόν για την διαδικασία της επανάληψης για την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα ξεκινάει από τις 9:00 πμ και λαμβάνουμε ως αρχική θερμοκρασία της επανάληψης την μέση θερμοκρασία της ημέρας κάθε μήνα, η οποία δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 8.1:** Μέση θερμοκρασία ημέρας

<i>Μήνας</i>	<i>M</i>
21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου	9.384
21 <sup>η</sup> Φεβρουαρίου	10.984
21 <sup>η</sup> Μαρτίου	11.955
21 <sup>η</sup> Απριλίου	15.072
21 <sup>η</sup> Μαΐου	20.724
21 <sup>η</sup> Ιουνίου	26.192
21 <sup>η</sup> Ιουλίου	28.080
21 <sup>η</sup> Αυγούστου	27.880
21 <sup>η</sup> Σεπτεμβρίου	23.236
21 <sup>η</sup> Οκτωβρίου	18.144
21 <sup>η</sup> Νοεμβρίου	11.968
21 <sup>η</sup> Δεκεμβρίου	9.264

Μετά από υπολογισμούς προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα και διαγράμματα:

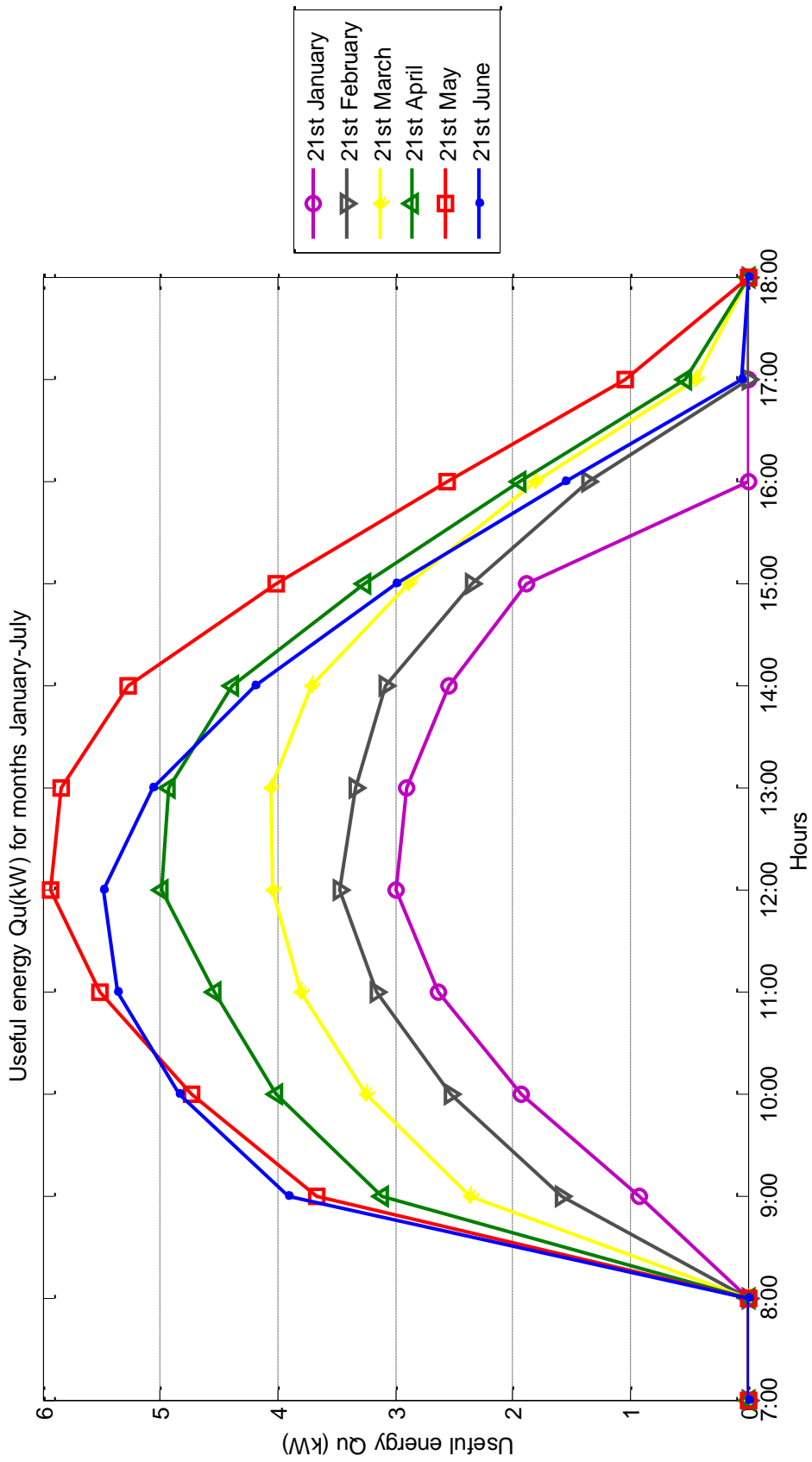
**Πίνακας 8.2:** Απορροφώμενο ποσό θερμότητας από το αποθηκευτικό μέσο-PCM

		$Q_{u,pcm}$ (kW)										
Μήνες	21 Ιαν.	21 Φεβ.	21 Μαρ.	21 Απρ.	21 Μαΐου	21 Ιουν.	21 Ιουλ.	21 Αυγ.	21 Σεπ.	21 Οκτ.	21 Νοεμ.	21 Δεκ.
Ωρες												
7:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9:00	0,94	1,60	2,37	3,13	3,67	3,92	3,85	3,44	2,80	2,02	1,23	0,78
10:00	1,95	2,54	3,25	4,02	4,73	4,90	4,80	4,44	3,99	3,06	2,28	1,86
11:00	2,64	3,18	3,82	4,55	5,50	5,43	5,35	5,06	4,90	3,87	3,01	2,59
12:00	3,01	3,49	4,05	5,00	5,93	5,53	5,48	5,26	5,44	4,47	3,40	2,97
13:00	2,92	3,35	4,07	4,95	5,84	5,11	5,08	4,91	5,37	4,53	3,28	2,87
14:00	2,55	3,09	3,72	4,46	5,26	4,25	4,22	4,06	4,53	4,09	2,94	2,45
15:00	1,90	2,36	2,90	3,32	4,00	3,03	3,03	2,91	3,39	3,30	2,24	1,80
16:00	0,00	1,39	1,84	2,00	2,55	1,59	1,57	1,47	1,94	2,07	1,09	0,71
17:00	0	0	0,48	0,58	1,04	0,1	0,1	0,0	0,4	0,3	0,0	0,0
18:00	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

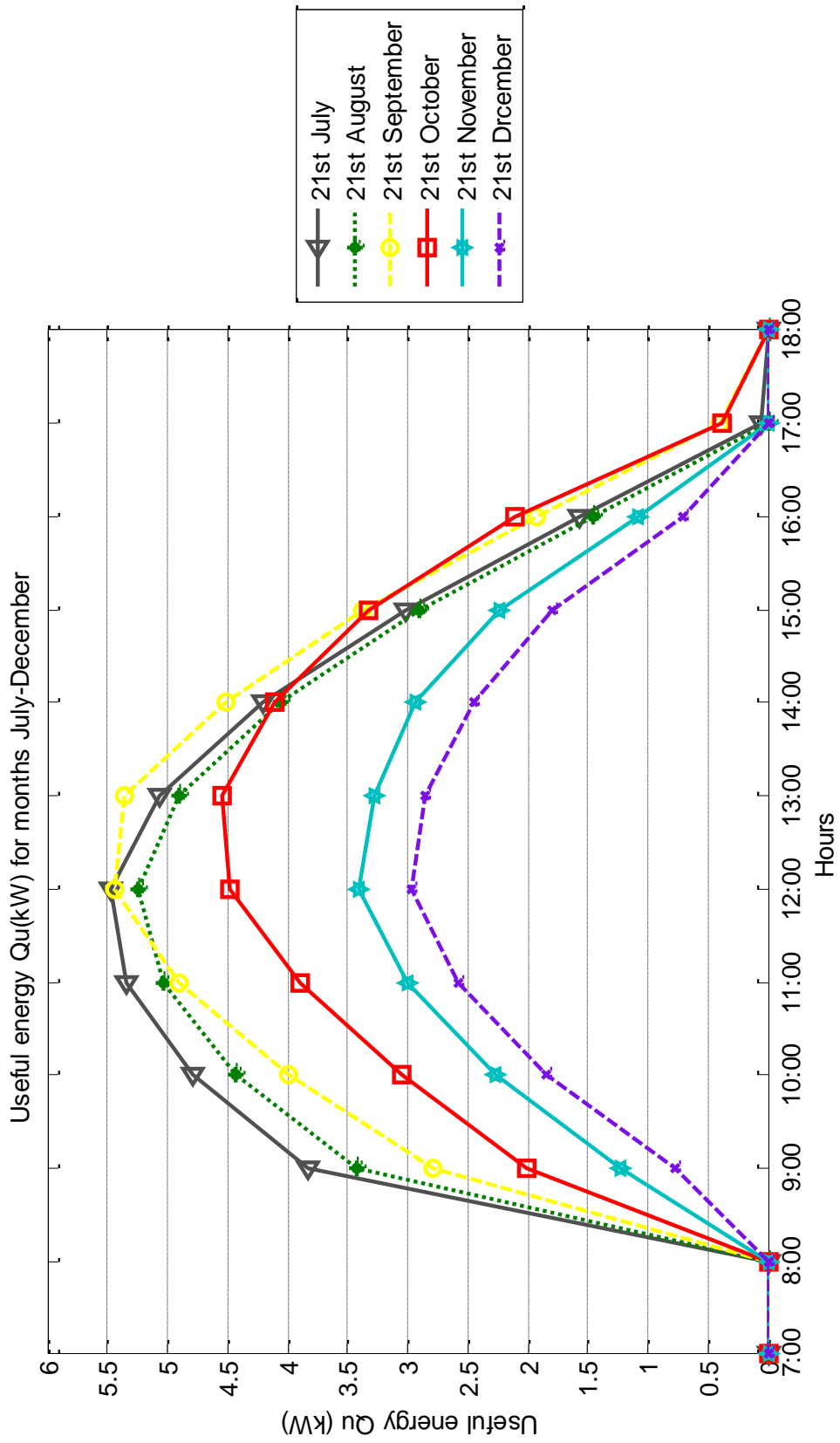
**Πίνακας 8.3:** Τελική θερμοκρασία του αποθηκευτικού μέσου-PCM και του νερού

		$T_{2,pcm}$ ( $^{\circ}$ C)										
Μήνες	21 Ιαν.	21 Φεβ.	21 Μαρ.	21 Απρ.	21 Μαΐου	21 Ιουν.	21 Ιουλ.	21 Αυγ.	21 Σεπ.	21 Οκτ.	21 Νοεμ.	21 Δεκ.
Ωρες												
9:00	9,38	10,98	11,95	15,07	20,72	26,19	28,08	27,88	23,23	18,14	11,96	9,26
10:00	10,49	12,88	14,78	18,81	22,22	30,87	32,68	31,99	23,63	20,54	13,44	10,19
11:00	12,81	15,92	18,68	23,62	23,04	36,68	38,43	37,30	24,29	22,03	16,16	12,41
12:00	15,96	19,71	23,25	24,36	23,78	43,12	44,84	43,35	25,35	22,76	19,76	15,50
13:00	19,55	23,89	23,83	25,48	24,81	49,69	51,40	49,64	27,73	23,40	23,84	19,06
14:00	23,04	24,49	24,55	27,97	26,50	55,76	57,48	55,52	34,17	24,09	24,43	22,49
15:00	23,38	25,22	25,47	33,24	32,82	60,80	62,53	60,38	39,59	24,90	25,10	22,87
16:00	23,67	26,14	26,92	37,15	37,63	64,38	66,15	63,86	43,64	25,91	25,90	23,12
17:00	23,63	27,78	29,08	39,49	40,69	66,24	68,03	65,60	45,96	27,97	26,92	23,22
18:00	23,51	26,76	29,62	40,12	41,94	66,31	68,10	65,56	46,44	28,44	25,92	23,11





**Διάγραμμα 8.2:** Απορροφώμενη θερμότητα συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας για τους μήνες Ιανουάριο- Ιούνιο



**Διάγραμμα 8.3:** Απορροφώμενη θερμότητα συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας για τους μήνες Ιούλιο- Δεκέμβριο

Στα παραπάνω διαγράμματα διακρίνεται ότι όλες οι καμπύλες των μηνών έχουν κοίλη μορφή και παρουσιάζουν την μέγιστη τιμή κατά την διάρκεια των μεσημβρινών ωρών και συγκεκριμένα κατά την 12<sup>η</sup> ώρα. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η μέγιστη προσπίπτουσα ακτινοβολία στον ηλιακό συλλέκτη εμφανίζεται κατά τις 12:00μμ όπου η ακτινοβολία του ηλίου έχει αυξημένη καθετότητα ως προς το επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη. Έτσι λοιπόν κατά την διάρκεια των πρωινών ωρών το ποσό θερμότητας το οποίο λαμβάνεται είναι μειωμένο, καθώς περνούν οι ώρες αυξάνεται όπου εμφανίζει και την μέγιστη τιμή και στην συνέχεια αρχίζει πάλι να μειώνεται καθώς αρχίζει να μειώνεται και η προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι το μέγιστο λαμβανόμενο ποσό θερμότητας εμφανίζεται κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου. Λαμβάνοντας υπόψη την σχέση (8.3)

$$Q_u = A_c F_R [G_t(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)]$$

προκύπτει ότι ο υπολογισμός της θερμότητας η οποία λαμβάνεται από τον ηλιακό συλλέκτη και κατά συνέπεια και από το υλικό αλλαγής φάσης είναι ένα σύνθετο πρόβλημα το οποίο εξαρτάται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Συγκεκριμένα την θερμοκρασία με την οποία εισέρχεται το νερό στον ηλιακό συλλέκτη και την θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος συναρτήσει της ημέρας του έτους και της ώρας της ημέρας.

Εξετάζοντας την σχέση (8.3) μπορούμε να πούμε ότι ο δεύτερος όρος του δεύτερου μέλους της, δηλαδή ο όρος  $A_c F_R U_L(T_i - T_a)$  συμβολίζει τις απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Στην συνέχεια υπολογίζοντας αυτό το γινόμενο:

$$A_c F_R U_L(T_2 - T_a),$$

(παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας του ποσού των απωλειών), παρουσιάζονται κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου μικρότερες απώλειες σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες, πράγμα το οποίο δικαιολογεί την εμφάνιση του μέγιστου  $Q_u$ . Συγκεκριμένα κατά την 12<sup>η</sup> ώρα όπου εμφανίζεται και η μέγιστη ωφέλιμη ενέργεια δεν παρουσιάζονται απώλειες προς το περιβάλλον εφόσον η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον ηλιακό συλλέκτη είναι μεγαλύτερη από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ενώ κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών παρά το γεγονός ότι έχουμε μεγαλύτερο ποσό προσπίπτουσας ακτινοβολίας οι απώλειες είναι ιδιαίτερα αυξημένες.

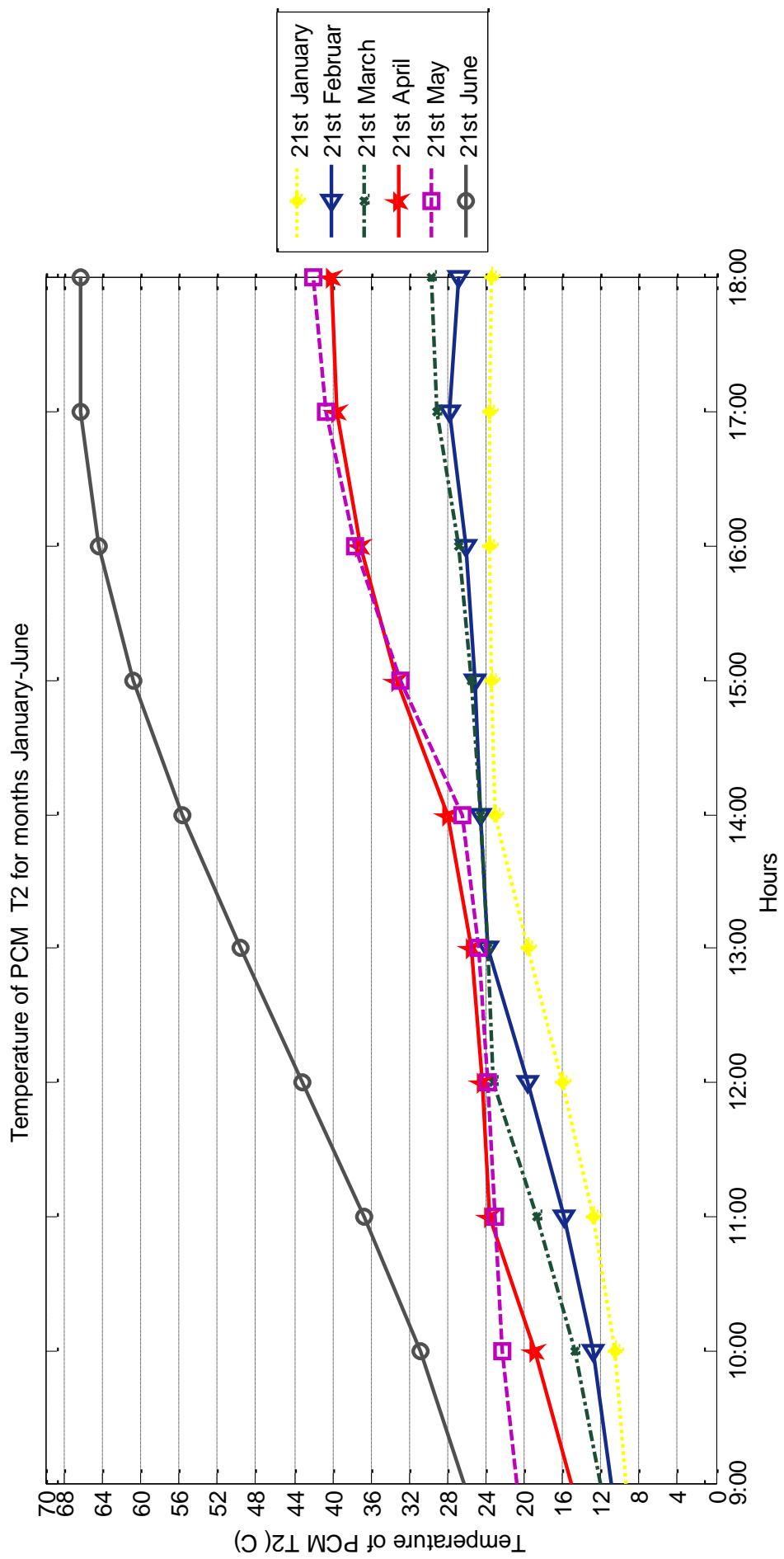
Τέλος μικρότερα ποσά απορροφώμενης ακτινοβολίας εμφανίζονται κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών και συγκεκριμένα οι ελάχιστες τιμές εμφανίζονται κατά την 21<sup>η</sup>

Δεκεμβρίου. Παρόλο που δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερα αυξημένα ποσοστά απωλειών περιβάλλοντος σε αυτόν τον μήνα η προσπίπτουσα ακτινοβολία παρουσιάζει αρκετά χαμηλές τιμές πράγμα το οποίο δικαιολογεί την παραπάνω συμπεριφορά.

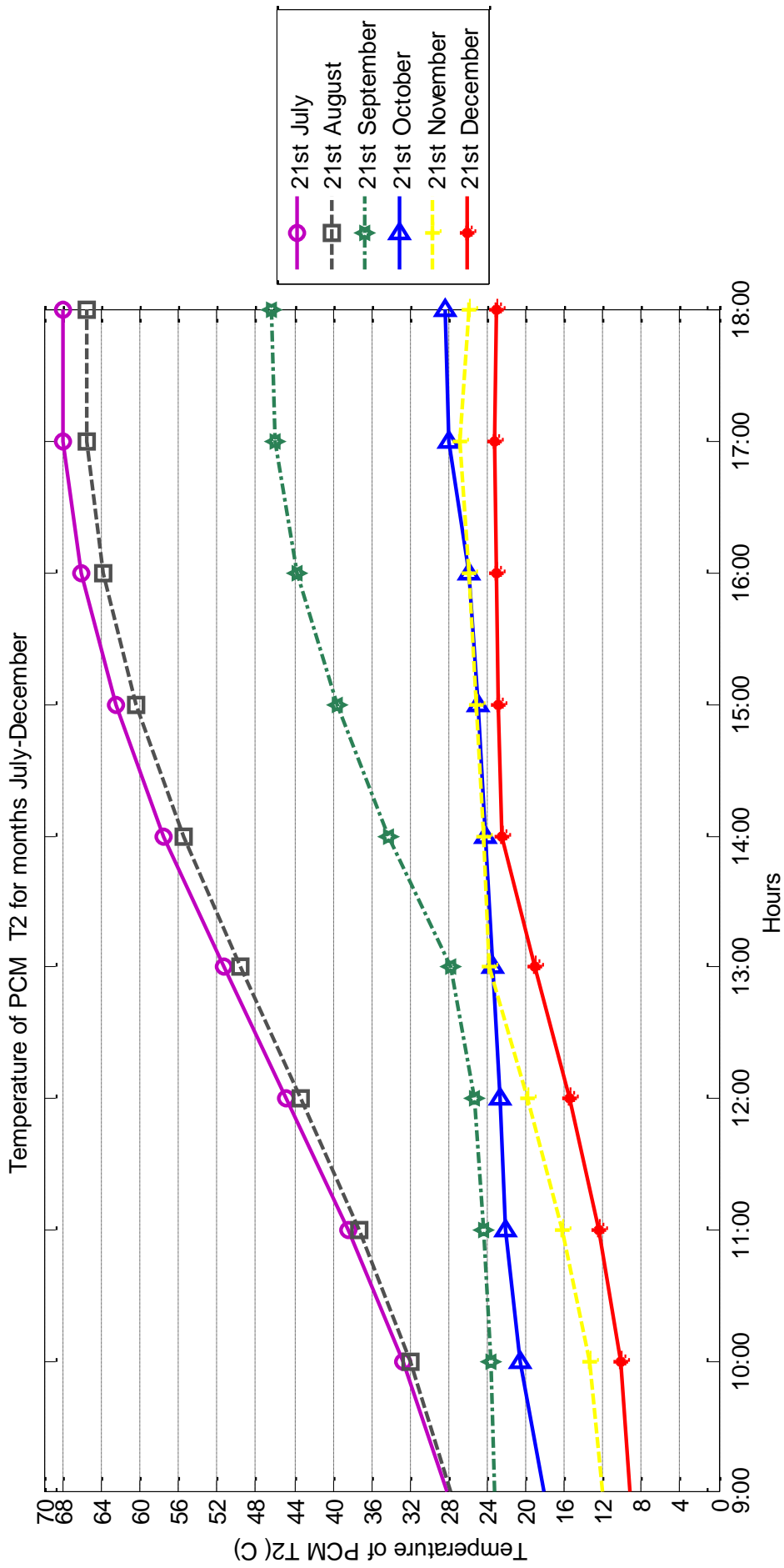
**Πίνακας 8.4:** Ποσό απωλειών προς το περιβάλλον συναρτήσει της ώρας της ημέρας και της 21<sup>ης</sup> ημέρας κάθε έτους

<b>Ποσό Απωλειών περιβάλλοντος (kW)</b>												
<b>Μήνες</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>21</b>
<b>Ωρες</b>	<b>Ιαν.</b>	<b>Φεβ.</b>	<b>Μαρ.</b>	<b>Απρ.</b>	<b>Μαΐου</b>	<b>Ιουν.</b>	<b>Ιουλ.</b>	<b>Αυγ.</b>	<b>Σεπ.</b>	<b>Οκτ.</b>	<b>Νοεμ.</b>	<b>Δεκ.</b>
<b>9:00</b>	0,07	0,06	0,01	-0,01	-0,03	-0,02	-0,02	0,01	0,00	0,03	0,03	0,04
<b>10:00</b>	0,08	0,10	0,12	0,14	-0,02	0,16	0,17	0,16	-0,07	0,08	0,07	0,05
<b>11:00</b>	0,15	0,20	0,30	0,37	-0,03	0,42	0,44	0,39	-0,11	0,09	0,18	0,13
<b>12:00</b>	0,27	0,36	0,52	0,37	-0,02	0,74	0,76	0,69	-0,11	0,06	0,34	0,27
<b>13:00</b>	0,43	0,55	0,53	0,41	0,03	1,10	1,11	1,02	0,00	0,07	0,55	0,46
<b>14:00</b>	0,60	0,57	0,57	0,54	0,14	1,46	1,45	1,36	0,37	0,11	0,59	0,65
<b>15:00</b>	0,62	0,62	0,63	0,85	0,52	1,77	1,75	1,65	0,71	0,18	0,65	0,68
<b>16:00</b>	0,67	0,71	0,75	1,09	0,83	2,01	1,99	1,88	0,99	0,29	0,73	0,72
<b>17:00</b>	0,71	0,85	0,91	1,26	1,04	2,17	2,14	2,02	1,17	0,46	0,84	0,75
<b>18:00</b>	0,75	0,84	0,98	1,35	1,15	2,23	2,21	2,07	1,26	0,54	0,81	0,77

Στην συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα της τελικής θερμοκρασίας την οποία αποκτά το υλικό αλλαγής φάσης συνεπώς και το νερό συναρτήσει των μηνών και των ωρών της ημέρας.



**Διάγραμμα 8.4:** Θερμοκρασία του νερού και PCM στην δεξαμενή συναρτίζει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας για τους μήνες Ιανουάριο- Ιούνιο



**Διάγραμμα 8.5:** Θερμοκρασία του νερού και του PCM στην δεξαμενή συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας για τους μήνες Ιούλιο- Δεκέμβριο

Όπως διακρίνεται οι παραπάνω καμπύλες παρουσιάζουν μεγάλη κλίση στην έναρξη της διαδικασίας της φόρτισης μέχρι τους 20 °C, στην περιοχή 20-26 °C η κλίση της καμπύλης μειώνεται, ενώ άνω των 26 °C όπου το PCM έχει υγροποιηθεί πλήρως η κλίση της καμπύλης είναι μεγάλη.

Αυτή η μορφή τους αποδίδεται στα εξής φαινόμενα: Κατά την διάρκεια φόρτισης το PCM λαμβάνει θερμότητα από το προθερμασμένο νερό του ηλιακού συλλέκτη. Το υλικό αλλαγής φάσης μέχρι να αποκτήσει την θερμοκρασία τήξης, στην προκειμένη περίπτωση 20 °C, λαμβάνει αισθητή θερμότητα αυξάνοντας αισθητά την θερμοκρασία του. Από τους 20 °C μέχρι τους 26 °C, κατά τους οποίους πραγματοποιείται η αλλαγή φάσης από στερεή κατάσταση σε υγρή, η θερμότητα αποθηκεύεται υπό μορφή λανθάνουσας χωρίς να έχουμε ουσιαστική μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM. Συγκεκριμένα το PCM χρησιμοποιεί ένα μέρος της θερμότητας την οποία λαμβάνει για την πραγματοποίηση της αλλαγής φάσης του ενώ το υπόλοιπο ποσό θερμότητας οδηγεί στην μικρή αυτή μεταβολή της θερμοκρασίας του. Τέλος από τους 26 °C και έπειτα το υλικό αλλαγής φάσης σε υγρή μορφή πλέον εξακολουθεί να λαμβάνει θερμότητα, αλλά σε αυτήν την περίπτωση ως αισθητή αυξάνοντας παράλληλα την θερμοκρασία του. Αξίζει να σημειώσουμε ότι κάποιες καμπύλες (π.χ. αυτές της 21<sup>ης</sup> Απριλίου και 21<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου) παρουσιάζουν μία μικρή απόκλιση από την αναμενόμενη, δηλαδή το υλικό αλλαγής φάσης εμφανίζεται να εισέρχεται στην περιοχή αλλαγής φάσης σε μία θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτή των 20 °C, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται να ολοκληρώνεται η αλλαγή φάσης σε μία θερμοκρασία άνω των 26 °C. Αυτή η συμπεριφορά όπως θα εξετάσουμε παρακάτω οφείλεται πιθανόν στο χρονικό βήμα το οποίο έχουμε επιλέξει  $\Delta t=3600 \text{ sec}$ .

Επίσης οι υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται κατά την διάρκεια των μηνών Ιουνίου, Ιουλίου, Αυγούστου και Σεπτεμβρίου πράγμα το οποίο υποδηλώνει ότι η θερμότητα που προσλαμβάνεται αποθηκεύεται κυρίως ως αισθητή και όχι ως λανθάνουσα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό αλλαγής φάσης συνήθως κατά την διάρκεια αυτών των μηνών βρίσκεται κατά την έναρξη της διαδικασίας φόρτισης του σε μία θερμοκρασία υψηλότερη των 26 °C, δηλαδή βρίσκεται σε υγρή μορφή. Ως αποτέλεσμα αυτού το PCM το όλο το μέρος της θερμότητας που προσλαμβάνει το αποθηκεύει ως αισθητή θερμότητα που συνεπάγεται και την μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του, δηλαδή και μεγαλύτερη κλίση της καμπύλης. Ομοίως κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης βρίσκεται κατά κύριο λόγο σε

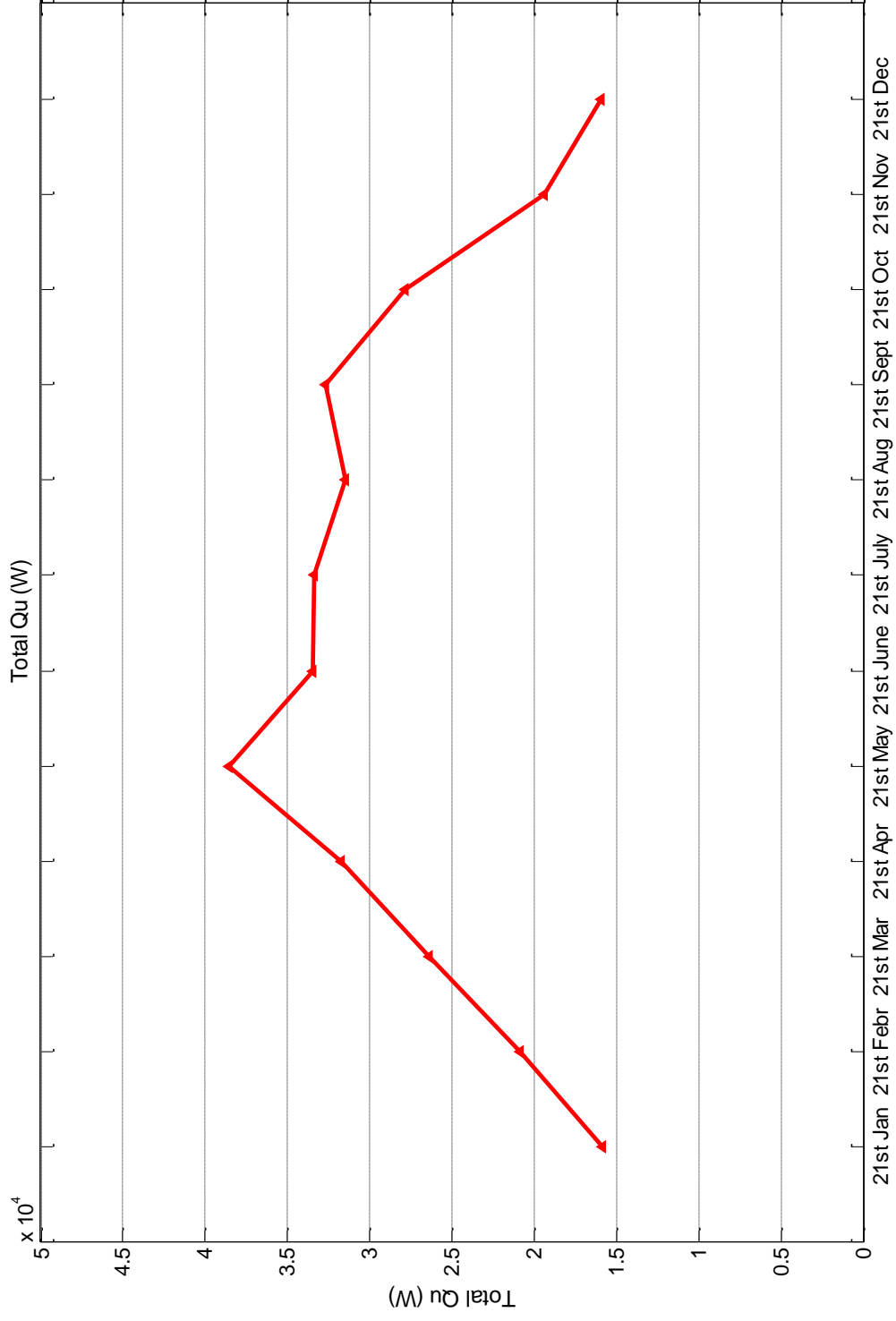
χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτή των 20 °C. Έτσι λοιπόν παρατηρείται μεγάλη κλίση της καμπύλης κατά της έναρξη της διαδικασίας φόρτισης.

Στην συνέχεια κατασκευάζουμε το διάγραμμα της συνολικής ημερήσιας ενέργειας για την 21<sup>η</sup> μέρα κάθε μηνός και προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

**Πίνακας 8.5:** Συνολική ημερήσια απορροφώμενη ενέργεια  
από το αποθηκευτικό μέσο-PCM

Μήνας	$\Sigma Q_{u,pcm}$ (W)
21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου	15811
21 <sup>η</sup> Φεβρουαρίου	20865
21 <sup>η</sup> Μαρτίου	26369
21 <sup>η</sup> Απριλίου	31705
21 <sup>η</sup> Μαΐου	38538
21 <sup>η</sup> Ιουνίου	33436
21 <sup>η</sup> Ιουλίου	33351
21 <sup>η</sup> Αυγούστου	31439
21 <sup>η</sup> Σεπτεμβρίου	32711
21 <sup>η</sup> Οκτωβρίου	27881
21 <sup>η</sup> Νοεμβρίου	19410
21 <sup>η</sup> Δεκεμβρίου	15960





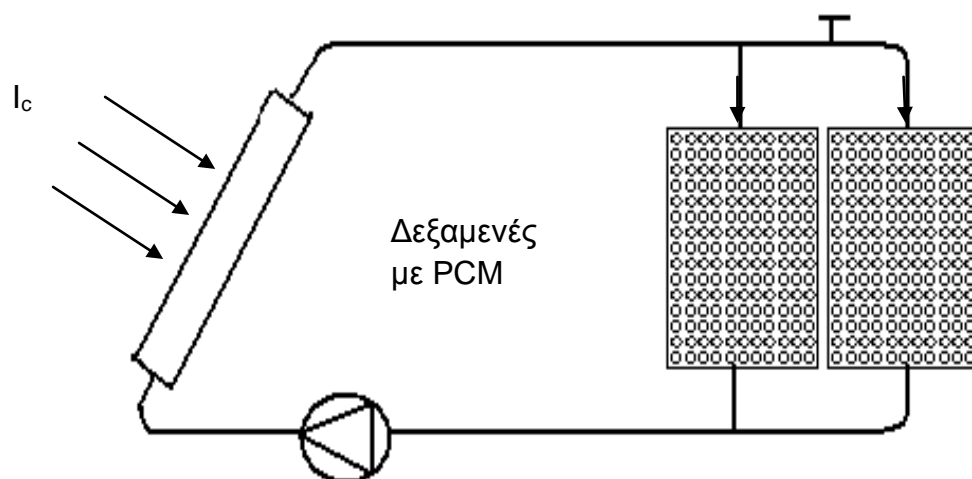
**Διάγραμμα 8.6:** Συνολική ημερήσια ενέργεια που απορροφά το PCM

Η παραπάνω καμπύλη έχει κοίλη μορφή και παρουσιάζει μέγιστη συνολική ημερήσια ενέργεια κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου ενώ ελάχιστη κατά την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι παρουσιάζεται μία μείωση της συνολικής ημερήσιας ενέργειας κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών ενώ στην συνέχεια κατά την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου παρατηρείται μία μικρή αύξηση. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά της καμπύλης αποδίδεται στις απώλειες προς το περιβάλλον. Συγκεκριμένα όπως έχει υπολογιστεί και προηγουμένως (πίνακας απωλειών περιβάλλοντος) κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών οι απώλειες προς το περιβάλλον είναι ιδιαίτερα αυξημένες σε σχέση με την 21<sup>η</sup> Μαΐου και την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου και σε συνδυασμό με την προσπίπτουσα ακτινοβολία προκαλείται αυτή η μείωση της συνολικής ημερήσιας ενέργειας η οποία προσλαμβάνεται από το υλικό αλλαγής φάσης.

### **8.3. Μεταβολή χαρακτηριστικών εγκατάστασης**

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε οι παραπάνω θερμοκρασίες τις οποίες αποκτά το PCM και κυρίως κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών είναι αρκετά μικρές ούτως ώστε να μπορέσει το σύστημα να αποτελέσει κύρια πηγή θέρμανσης νερού για οικιακή χρήση. Έτσι λοιπόν επιλέγουμε να μεταβάλουμε κάποια χαρακτηριστικά της εγκατάστασης για να αυξηθεί η απόδοσή του συστήματος και συνεπώς οι θερμοκρασίες του υλικού αλλαγής φάσης και του νερού.

Η μεταβολή αυτή αφορά την αύξηση της επιφάνεια των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών από  $A_c=10 \text{ m}^2$  σε  $A_c'=18 \text{ m}^2$  ενώ ταυτόχρονα επιλέγουμε χρήση ηλιακού συλλέκτη καλύτερης ποιότητας με χαρακτηριστικά  $F_r U_L=4,5 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$  και  $F_r(\text{τα})=0,8$ . Τέλος η σημαντικότερη αλλαγή που πραγματοποιούμε αφορά την δεξαμενή της εγκατάστασης. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούμε δύο όμοιες δεξαμενές με την ίδια ποσότητα PCM. Η συνολική μάζα του PCM που θα χρησιμοποιηθεί έχει μάζα 600 kg. Έτσι λοιπόν κάθε δεξαμενή περιέχει συνολικά 300 kg PCM. Η λειτουργία της εγκατάστασης βασίζεται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια των μηνών του καλοκαιριού της άνοιξης δηλαδή Απρίλιο, Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο βρίσκονται σε λειτουργία και οι δύο δεξαμενές, ενώ κατά την διάρκεια των υπολοίπων μηνών η εγκατάσταση λειτουργεί μόνο με την μία δεξαμενή σκοπός αυτού είναι η αποφυγή των υπερβολικά υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια του καλοκαιριού στην περίπτωση που η μία δεξαμενή περιέχει όλη την ποσότητα του PCM, και ταυτόχρονα να αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών με την αξιοποίηση μόνο της μίας δεξαμενής. Η παραπάνω εγκατάσταση δίδεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 8.1:** Νέα μελετώμενη εγκατάσταση με ταυτόχρονη λειτουργία και των δύο δεξαμενών κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών και λειτουργία της μίας δεξαμενής κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών

Όπως αναφέραμε η εγκατάσταση λειτουργεί με δύο όμοιες δεξαμενές με όγκο  $V=375 \text{ m}^3$  η κάθε μία και μάζα PCM  $m=300 \text{ kg}$ . Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού στην εγκατάσταση χρησιμοποιούνται και οι δύο δεξαμενές ενώ κατά την διάρκεια των μηνών Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Οκτώβριο, Νοέμβριο, Δεκέμβριο η βάνια που υπάρχει απομονώνει την δεύτερη δεξαμενή και έτσι λειτουργεί μόνο η πρώτη.

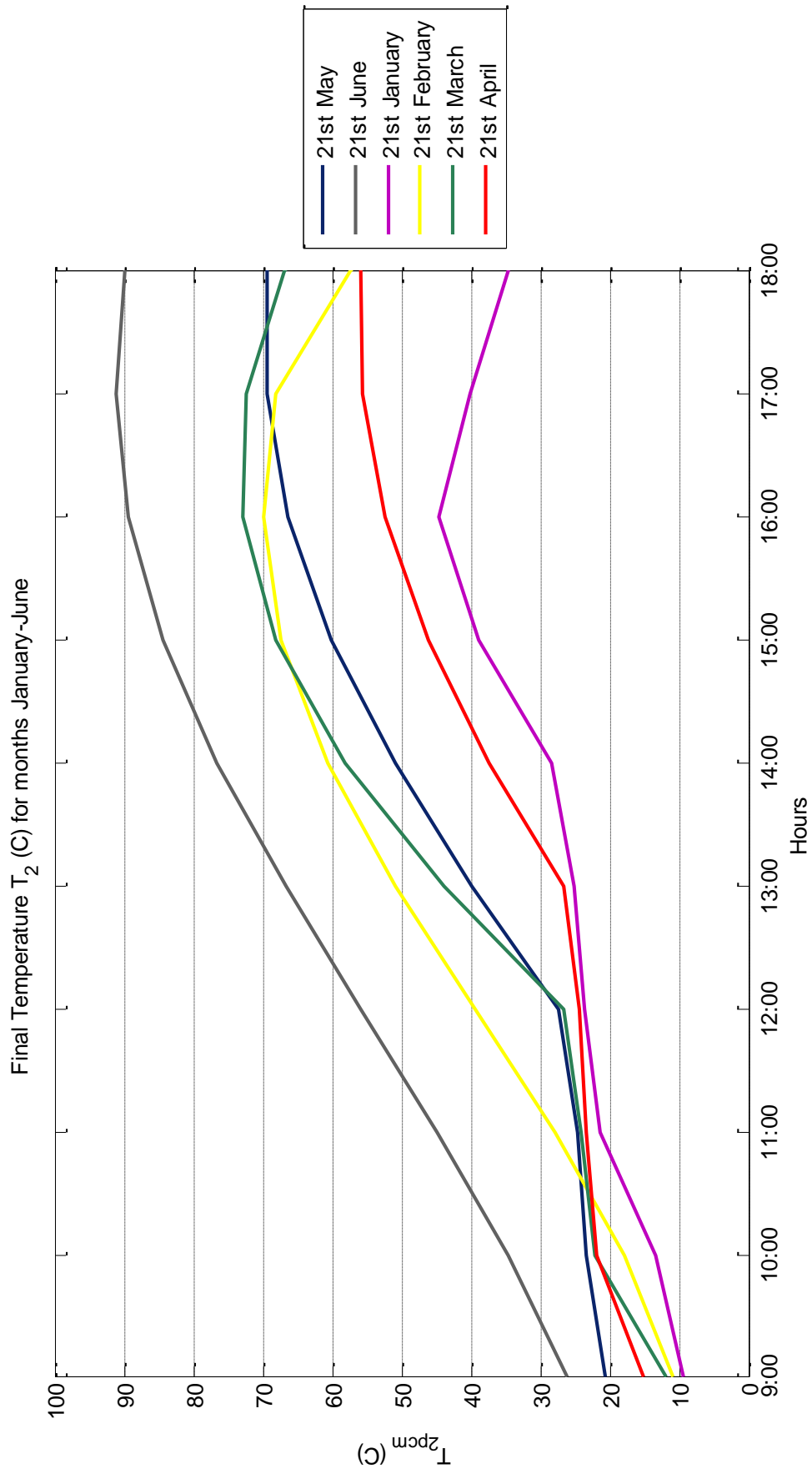
Έτσι λοιπόν πλέον είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τις νέες θερμοκρασίες που αποκτά το PCM με την χρήση του προγράμματος Matlab και με τις εξισώσεις (8.3), (8.4) που χρησιμοποιήσαμε προηγουμένως προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα και πίνακες θερμοκρασιών:

**Πίνακας 8.6:** Θερμοκρασία του αποθηκευτικού μέσου-PCM με την νέα εγκατάσταση

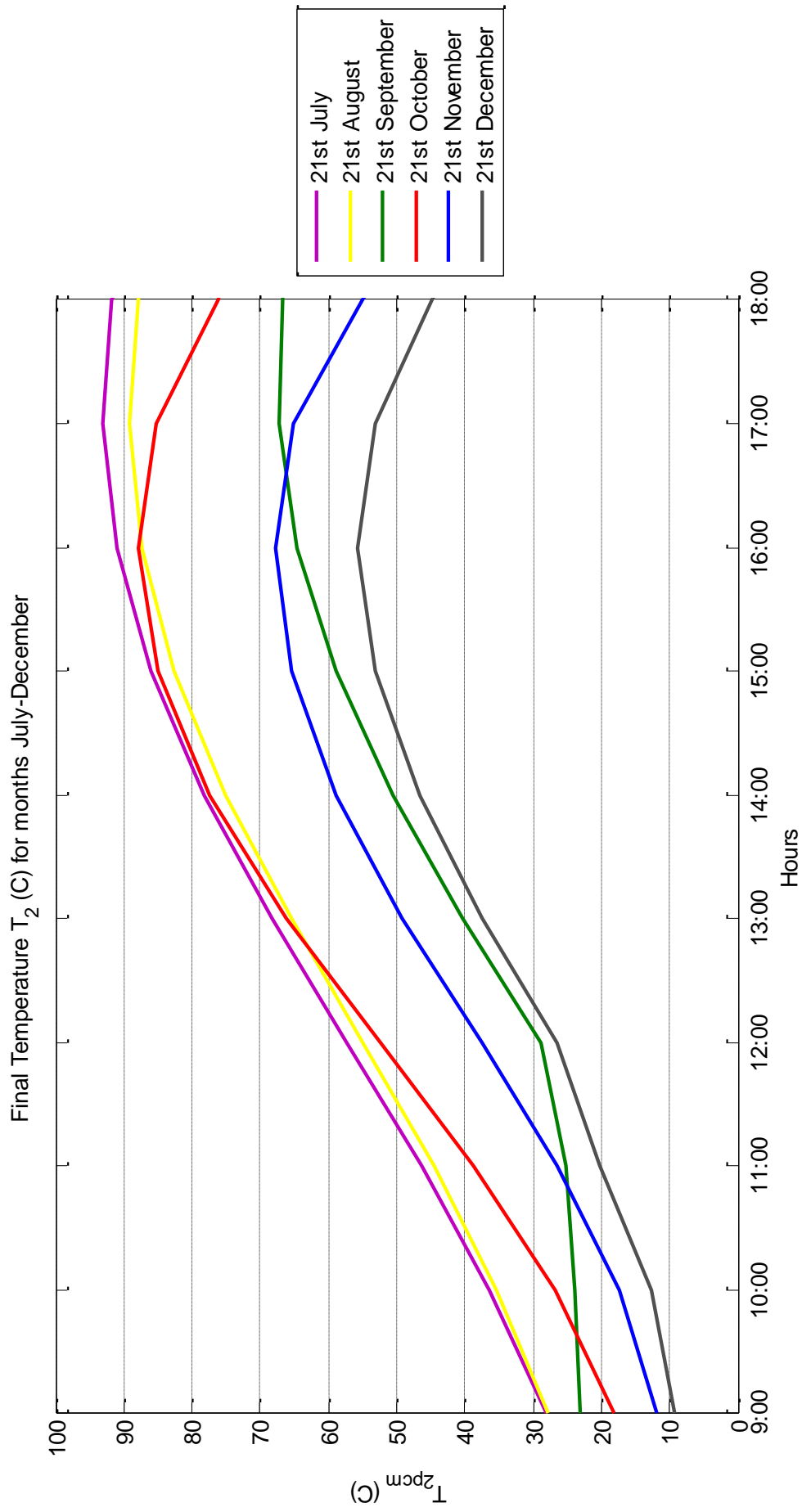
$T_{2,pcm} (^{\circ}C)$												
Μήνες	21 Ιαν.	21 Φεβ.	21 Μαρ.	21 Απρ.	21 Μαΐου	21 Ιουν.	21 Ιουλ.	21 Αυγ.	21 Σεπ.	21 Οκτ.	21 Νοεμ.	21 Δεκ.
Ωρες												
9:00	9,38	10,98	11,96	15,07	20,72	26,19	28,08	27,88	23,24	18,14	11,97	9,26
10:00	13,43	17,89	22,16	21,81	23,42	34,61	36,36	35,29	23,96	26,82	17,29	12,65
11:00	21,29	27,94	24,04	23,26	24,70	44,77	46,42	44,61	25,28	38,83	26,43	20,21
12:00	23,51	39,46	26,56	24,46	27,32	55,78	57,39	54,97	28,87	52,47	37,58	26,47
13:00	25,04	50,99	43,90	26,60	39,78	66,74	68,35	65,51	40,22	66,12	49,13	37,39
14:00	28,39	60,66	58,05	37,34	50,95	76,55	78,20	75,03	50,58	77,51	58,89	46,63
15:00	38,90	67,46	68,11	46,18	60,02	84,30	85,98	82,54	58,92	84,96	65,42	53,10
16:00	44,65	69,97	72,91	52,38	66,28	89,33	91,07	87,45	64,69	87,79	67,86	55,64
17:00	40,17	68,01	72,49	55,63	69,41	91,22	92,98	89,21	67,29	85,13	65,05	53,05
18:00	34,58	57,34	66,86	55,82	69,38	89,97	91,72	87,81	66,66	76,15	54,84	44,73

**Πίνακας 8.7:** Απορροφώμενη θερμότητα του αποθηκευτικού μέσου-PCM με την νέα εγκατάσταση

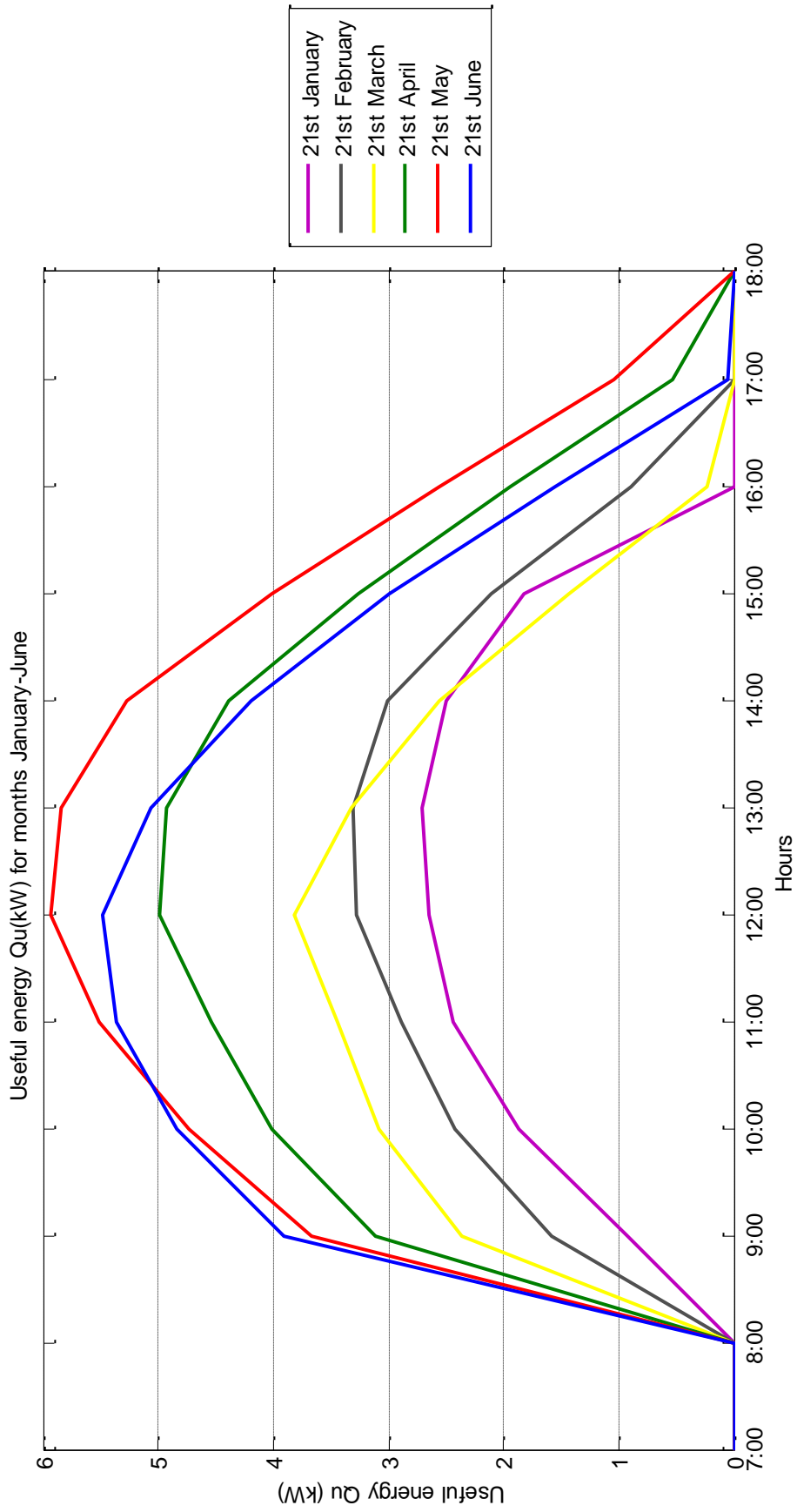
$Q_{u,pcm} (kW)$												
Μήνες	21 Ιαν.	21 Φεβ.	21 Μαρ.	21 Απρ.	21 Μαΐου	21 Ιουν.	21 Ιουλ.	21 Αυγ.	21 Σεπ.	21 Οκτ.	21 Νοεμ.	21 Δεκ.
Ωρες												
7:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9:00	1,68	2,88	4,25	5,61	6,58	7,02	6,90	6,17	5,03	3,61	2,22	1,41
10:00	3,28	4,18	5,29	7,03	8,41	8,47	8,39	7,76	7,13	5,01	3,81	3,15
11:00	4,10	4,80	6,54	8,34	9,77	9,17	9,14	8,64	8,68	5,68	4,64	4,06
12:00	4,89	4,80	7,22	9,11	10,39	9,13	9,14	8,78	9,46	5,69	4,81	4,55
13:00	4,96	4,03	5,90	8,95	9,31	8,17	8,20	7,94	8,63	4,75	4,07	3,85
14:00	4,38	2,84	4,19	7,37	7,55	6,46	6,48	6,26	6,95	3,10	2,72	2,70
15:00	2,40	1,04	2,00	5,16	5,22	4,19	4,24	4,09	4,81	1,18	1,01	1,06
16:00	0	0	0	3	2,61	1,57	1,59	1,47	2,17	0	0	0
17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



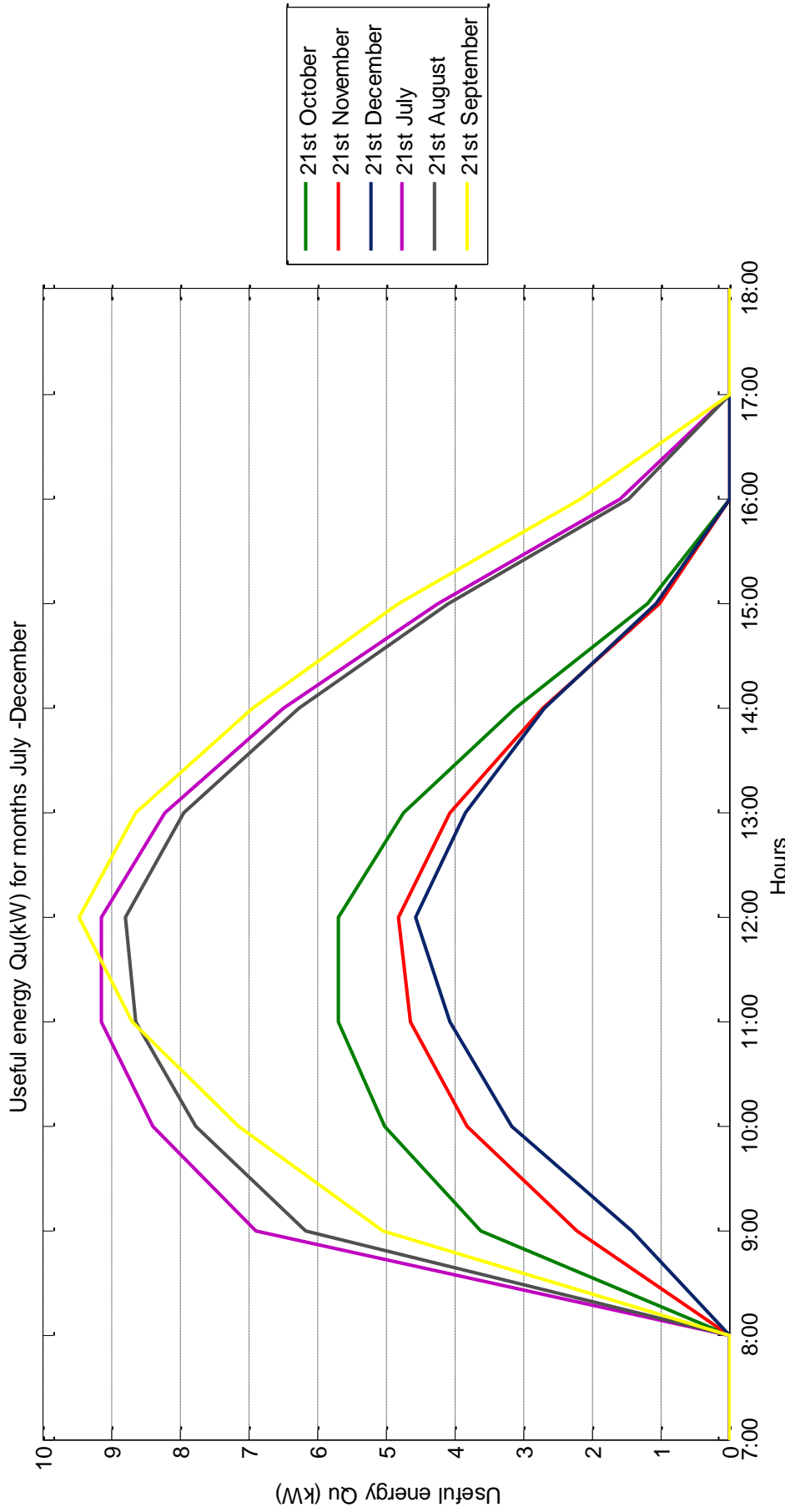
**Διάγραμμα 8.7:** Θερμοκρασία του νερού και του PCM στην δεξαμενή συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας για τους μήνες Ιανουάριο- Ιούνιο



**Διάγραμμα 8.8:** Θερμοκρασία του νερού και του PCM στην δεξαμενή συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας για τους μήνες Ιούλιο- Δεκέμβριο



**Διάγραμμα 8.9:** Απορροφώμενη θερμότητα συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας για τους μήνες Ιανουάριο- Ιούνιο



**Διάγραμμα 8.10:** Απορροφώμενη θερμότητα συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας για τους μήνες Ιούλιο-Δεκέμβριο



Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα με την συγκεκριμένη εγκατάσταση καταφέραμε να πετύχουμε αύξηση της τελικής θερμοκρασίας του PCM και συνεπώς και του νερού του οποίου λαμβάνουμε κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών.

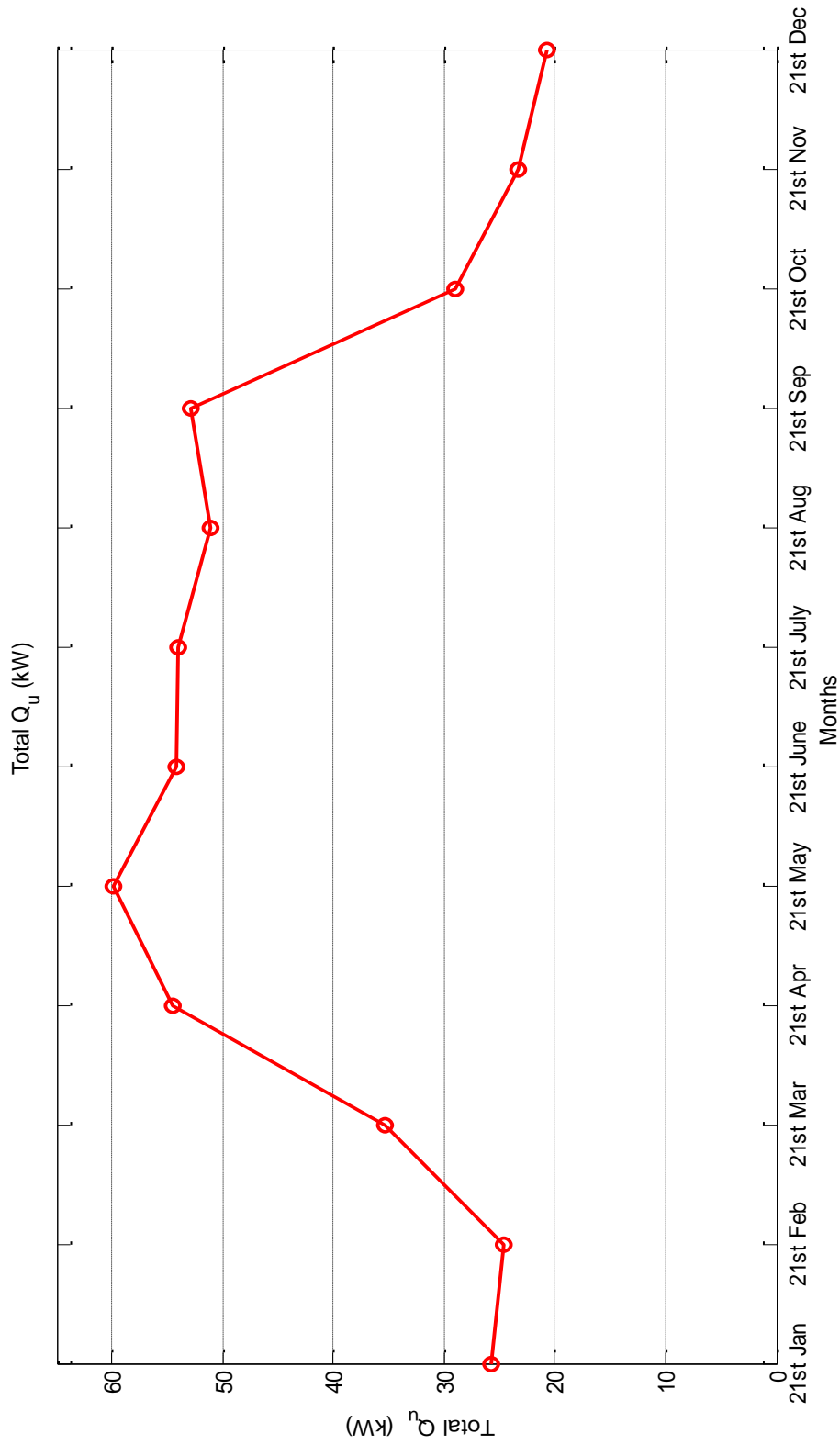
Επίσης το μέγιστο ποσό συνολικής θερμότητας εξακολουθεί να εμφανίζεται κατά την διάρκεια της 21<sup>ης</sup> Μαΐου και το ελάχιστο κατά την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου. Οι μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται κατά την 21 Ιουλίου. Επιπλέον παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση, λόγω του χρονικού βήματος που επιλέχθηκε μια απόκλιση της καμπύλης από την αναμενόμενη, καθώς σε κάποιους μήνες η θερμοκρασία έναρξης της υγροποίησης καθώς επίσης και η λήξη της φαίνονται να διαφοροποιούνται από αυτές των 20-26 °C. Τέλος παρατηρούμε ότι κατά την διάρκεια όλων των μηνών του έτους εμφανίζονται αρκετά υψηλές θερμοκρασίες πράγμα το οποίο μας δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε την εγκατάσταση για θέρμανση νερού οικιακής χρήσεως, όπως εξετάζεται και στο επόμενο κεφάλαιο. Ύστερα υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες περιβάλλοντος:

**Πίνακας 8.8:** Ποσό απωλειών προς το περιβάλλον με την νέα εγκατάσταση

Ποσό Απωλειών περιβάλλοντος (kW)												
Μήνες	21 Ιαν.	21 Φεβ.	21 Μαρ.	21 Απρ	21 Μαΐου	21 Ιουν.	21 Ιουλ.	21 Αυγ.	21 Σεπ.	21 Οκτ.	21 Νοεμ	21 Δεκ.
Ωρες												
9:00	0,09	0,08	0,01	-0,01	0,18	0,65	0,64	0,61	0,06	0,04	0,04	0,05
10:00	0,35	0,55	0,77	0,44	0,18	1,34	1,35	1,24	0,04	0,62	0,41	0,27
11:00	0,90	1,26	0,85	0,48	0,31	2,13	2,15	1,98	0,21	1,48	1,08	0,81
12:00	0,99	2,10	1,00	0,53	1,27	2,95	2,97	2,75	1,05	2,50	1,92	1,27
13:00	1,04	2,97	2,37	0,67	2,16	3,72	3,73	3,49	1,84	3,56	2,82	2,12
14:00	1,27	3,72	3,51	1,52	2,91	4,35	4,34	4,08	2,52	4,48	3,61	2,86
15:00	2,12	4,29	4,34	2,23	3,44	4,78	4,76	4,50	3,02	5,12	4,17	3,40
16:00	2,63	4,54	4,77	2,76	3,73	4,99	4,95	4,67	3,29	5,41	4,42	3,64
17:00	2,33	4,44	4,79	3,07	3,77	4,95	4,91	4,62	3,32	5,27	4,26	3,47
18:00	1,95	3,65	4,39	3,16	3,46	4,54	4,51	4,24	3,07	4,62	3,48	2,83

Παρατηρούμε ότι οι απώλειες περιβάλλοντος της παραπάνω εγκατάστασης είναι αυξημένες σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Παρόλο που επιλέξαμε επίπεδο ηλιακό συλλέκτη καλύτερης ποιότητας ώστε να διαφεύγει μικρότερο ποσό θερμότητας προς το περιβάλλον, η

αύξηση της επιφάνειάς του προκαλεί αυτήν την ταυτόχρονη αύξηση των απωλειών. Παρακάτω δίνεται η συνολική ημερήσια ενέργεια που απορροφάται:



**Διάγραμμα 8.11:** Συνολική ημερήσια ενέργεια που απορροφά το PCM

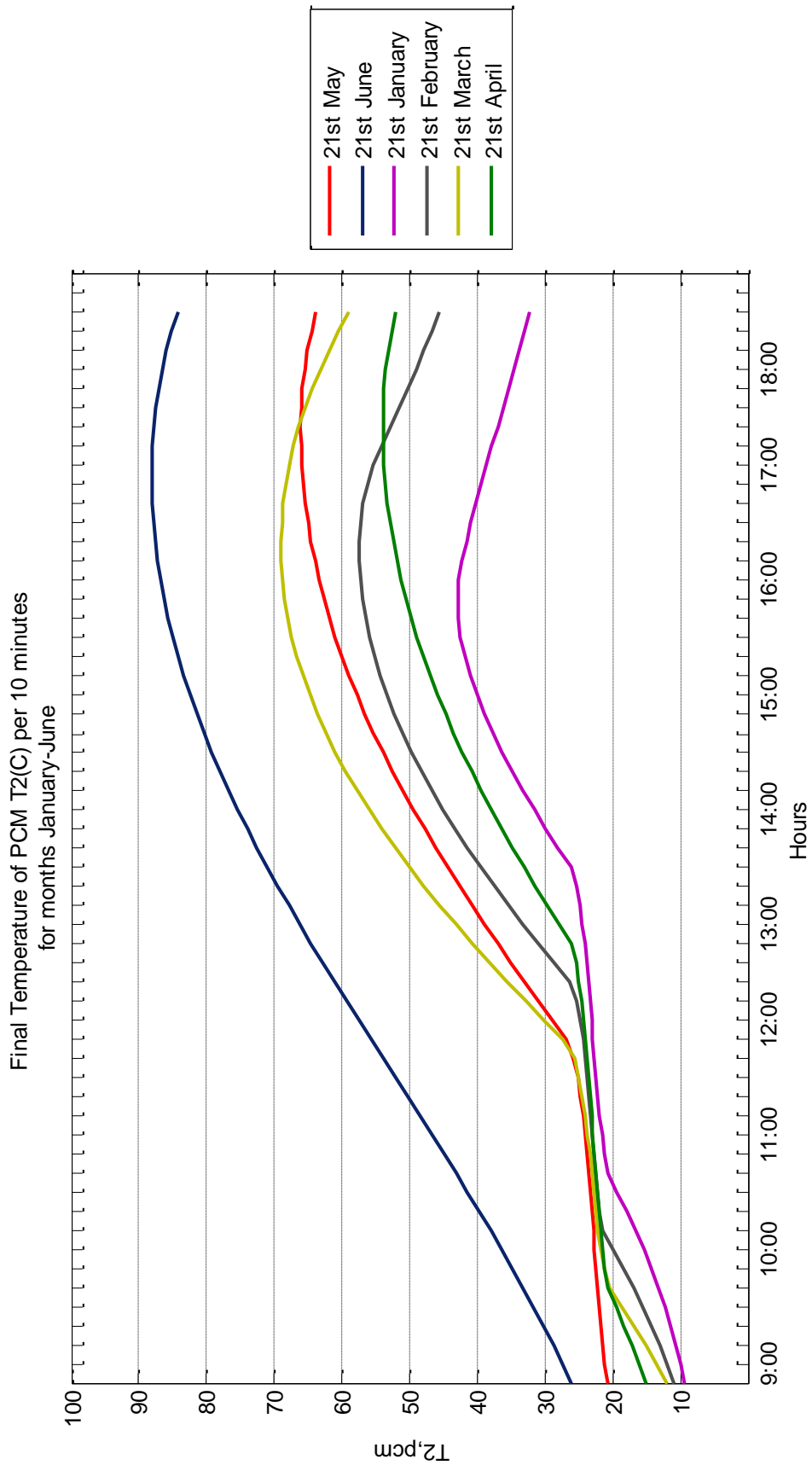
Ο πίνακας των απωλειών (πίνακας 8.8) που παρατίθεται παραπάνω σε συνδυασμό με την θερμοκρασία εισόδου του νερού στον ηλιακό συλλέκτη  $T_2$  δικαιολογούν την μορφή του παραπάνω διαγράμματος. Η συνολική ημερήσια ενέργεια εμφανίζεται αυξημένη και μάλιστα το μέγιστο εξακολουθεί να παρουσιάζεται την 21<sup>η</sup> Μαΐου, όπου οι απώλειες είναι σχετικά μικρές σε σχέση με την απορροφώμενη ακτινοβολία. Επίσης κατά την 21<sup>η</sup> ημέρα του Ιουνίου, Ιουλίου και Αυγούστου παρατηρούμε ότι απώλειες και σε αυτήν την περίπτωση είναι ιδιαίτερα αυξημένες στο οποίο οφείλεται η μείωση της συνολικής ημερήσιας απορροφώμενης ενέργειας.

#### **8.4. Μεταβολή του χρονικού βήματος των μετρήσεων**

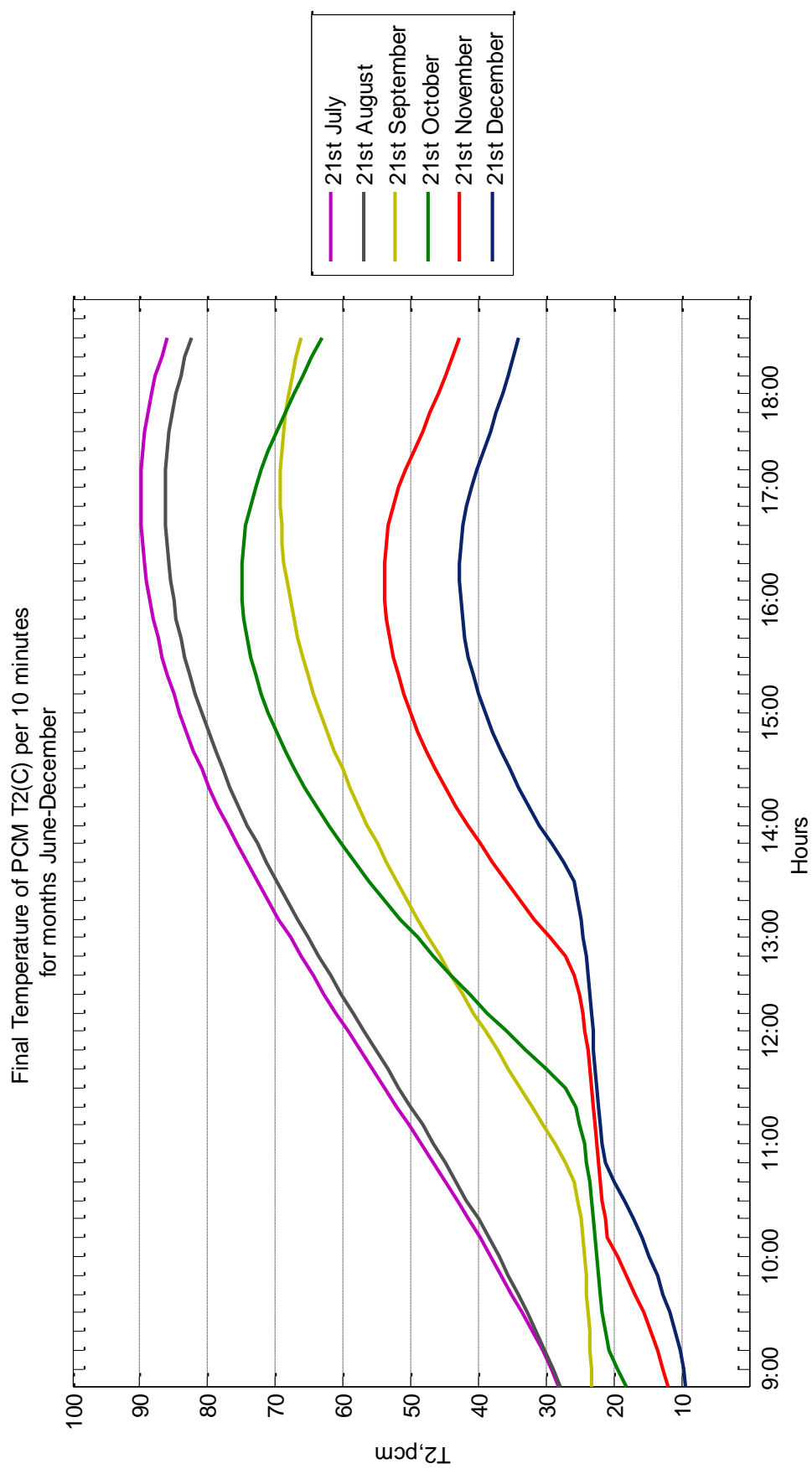
Στην συνέχεια για να μελετήσουμε την επίδραση του χρονικού βήματος στην μορφή των παραπάνω διαγραμμάτων παρατίθενται ενδεικτικά τα διαγράμματα τελικής θερμοκρασίας του υλικού αλλαγής φάσης PCM για την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μηνός στις οποίες η μέτρηση των θερμοκρασιών έχει γίνει ανά 10 λεπτά, δηλαδή το χρονικό βήμα της σχέσης (2) λαμβάνεται ίσο με  $\Delta t=600$  seconds. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζουμε την θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος και την συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία για κάθε 10λεπτο της ώρας με την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής με την βοήθεια της Matlab (στο τέλος της εργασίας παρατίθεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε). Μετά από υπολογισμούς προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα (οι θερμοκρασίες του παρακάτω πίνακα δίδονται για κάθε ώρα)

**Πίνακας 8.9:** Θερμοκρασία του αποθηκευτικού μέσου- PCM για χρονικό βήμα 10 λεπτά της ώρας

$T_{2,pcm} (^{\circ}C)$												
Μήνες	21 Ιαν.	21 Φεβ.	21 Μαρ.	21 Απρ.	21 Μαΐου	21 Ιουν.	21 Ιουλ.	21 Αυγ.	21 Σεπ.	21 Οκτ.	21 Νοεμ.	21 Δεκ.
Ωρες												
9:00	9,38	10,98	11,96	16,00	21,09	27,36	29,23	28,90	23,33	18,14	11,97	9,26
10:00	13,43	17,89	22,16	21,49	22,65	36,38	38,13	36,99	24,35	26,82	17,29	12,65
11:00	21,29	27,94	24,04	22,88	24,01	46,72	48,39	46,58	28,73	38,83	26,43	20,21
12:00	23,51	39,46	26,56	24,24	28,98	57,53	59,17	56,83	38,93	52,47	37,58	26,47
13:00	25,04	50,99	43,90	29,67	40,76	67,85	69,51	66,78	48,94	66,12	49,13	37,39
14:00	28,39	60,66	58,05	39,36	50,95	76,55	78,20	75,03	50,58	77,51	58,89	46,63
15:00	38,90	67,46	68,11	46,93	58,92	83,34	85,07	81,78	64,29	84,96	65,42	53,10
16:00	44,65	69,97	72,91	51,86	63,99	87,18	88,95	85,47	68,27	87,79	67,86	55,64
17:00	40,17	68,01	72,49	53,91	66,05	87,99	89,77	86,13	69,22	85,13	65,05	53,05
18:00	34,58	57,34	66,86	52,63	64,47	85,09	86,87	83,29	66,99	76,15	54,84	44,73



**Διάγραμμα 8.12:** Θερμοκρασία του νερού και του PCM στην δεξαμενή συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας για τους μήνες Ιανουάριο- Ιούνιο για χρονικό βήμα 10λεπτά



**Διάγραμμα 8.13:** Θερμοκρασία του νερού και του PCM στην δεξαμενή συναρτήσεϊ των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας για τους μήνες Ιούλιο Δεκέμβριο για χρονικό βήμα 10λεπτά

Όπως μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε με την μείωση του χρονικού βήματος των μετρήσεων, οι οποίες πραγματοποιούνται κάθε 10λεπτο της ώρας, οι θερμοκρασίες του υλικού αλλαγής φάσης μεταβάλλονται και μάλιστα παρουσιάζουν ελάχιστα μικρότερες τιμές (της τάξης των 2 °C) σε σχέση με τις αρχικούς υπολογισμούς, βέβαια κάποιες τιμές παραμένουν αμετάβλητες. Πλέον, οι καμπύλες στις οποίες το χρονικό βήμα λαμβάνεται ίσο με 600 seconds η αλλαγή φάσης διακρίνεται εύκολα και συγκεκριμένα παρουσιάζεται να λαμβάνει χώρο μεταξύ των θερμοκρασιών 20-26 °C, όπως έχουμε θεωρήσει στους υπολογισμούς.

Οι παραπάνω καμπύλες έχουν αυξημένη ακρίβεια και είναι πλέον δυνατόν να προσδιοριστεί η χρονική στιγμή στην οποία πραγματοποιείται η αλλαγή φάσης. Συγκεκριμένα εάν επιλέξουμε τυχαία την 21<sup>η</sup> Απριλίου παρατηρούμαι ότι η διαδικασία υγροποίησης του υλικού αλλαγής φάσης ξεκινάει κατά την 10:50πμ και η πλήρης υγροποίηση πραγματοποιείται στις 12:40μμ. Από εκείνη την χρονική στιγμή και ύστερα το PCM αποθηκεύει πλέον μόνο αισθητή θερμότητα.

## **8.5. Εφαρμογή της εγκατάστασης για θέρμανση νερού οικιακής χρήσης**

Στο παρόν εδάφιο θα μελετήσουμε την συμπεριφορά του υλικού αλλαγής φάσης θεωρώντας ότι η δεξαμενή με το PCM προμηθεύει ζεστό νερό μία μικρή ξενοδοχειακή μονάδα. Θεωρούμε ότι η εγκατάσταση προμηθεύει την ξενοδοχειακή μονάδα με μία παροχή θερμού νερού η οποία αναμιγνύεται με μία ποσότητα κρύου νερού. Το ποσό θερμού νερού το οποίο λαμβάνεται από την ξενοδοχειακή μονάδα ισούται με  $m_k$ , και θεωρείται ότι αυτή η ποσότητα παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της ημέρας αλλά και κατά την διάρκεια του έτους. Το θερμό νερό λαμβάνεται και από τις δύο δεξαμενές κατά την διάρκεια του χειμώνα. Επίσης υποθέτουμε ότι η ξενοδοχειακή μονάδα αποτελείται από 20 δωμάτια στα οποία η ημερήσια μέση κατανάλωση θερμού νερού ισούται με  $m_k=50 \text{ kg}/(18 \text{ hours})$  από τις 7:00πμ μέχρι τις 24:00πμ, ανά δωμάτιο. Επίσης η θερμοκρασία του νερού προς χρήση λαμβάνεται από το υπόγειο έδαφος με αρχική θερμοκρασία  $T_i=15 \text{ }^\circ\text{C}$  και η θερμοκρασία εξόδου του από την δεξαμενή ισούται με την τελική θερμοκρασία την οποία αποκτά το PCM  $T_2$ .

Η συνολική κατανάλωση θερμού νερού προκύπτει από την σχέση:

$$Q_k = m_k C_{pw} \Delta T \quad (8.4)$$

όπου  $\Delta T=(T_2-15) \text{ }^\circ\text{C}$  και  $C_{pw}=4190 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού.

Έτσι λοιπόν η ενέργεια την οποία προσλαμβάνει ο ηλιακός συλλέκτης και κατά συνέπεια και το PCM υπολογίζεται από την σχέση (8.5):

$$Q_u = A_c F_R [G_t(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (8.5)$$

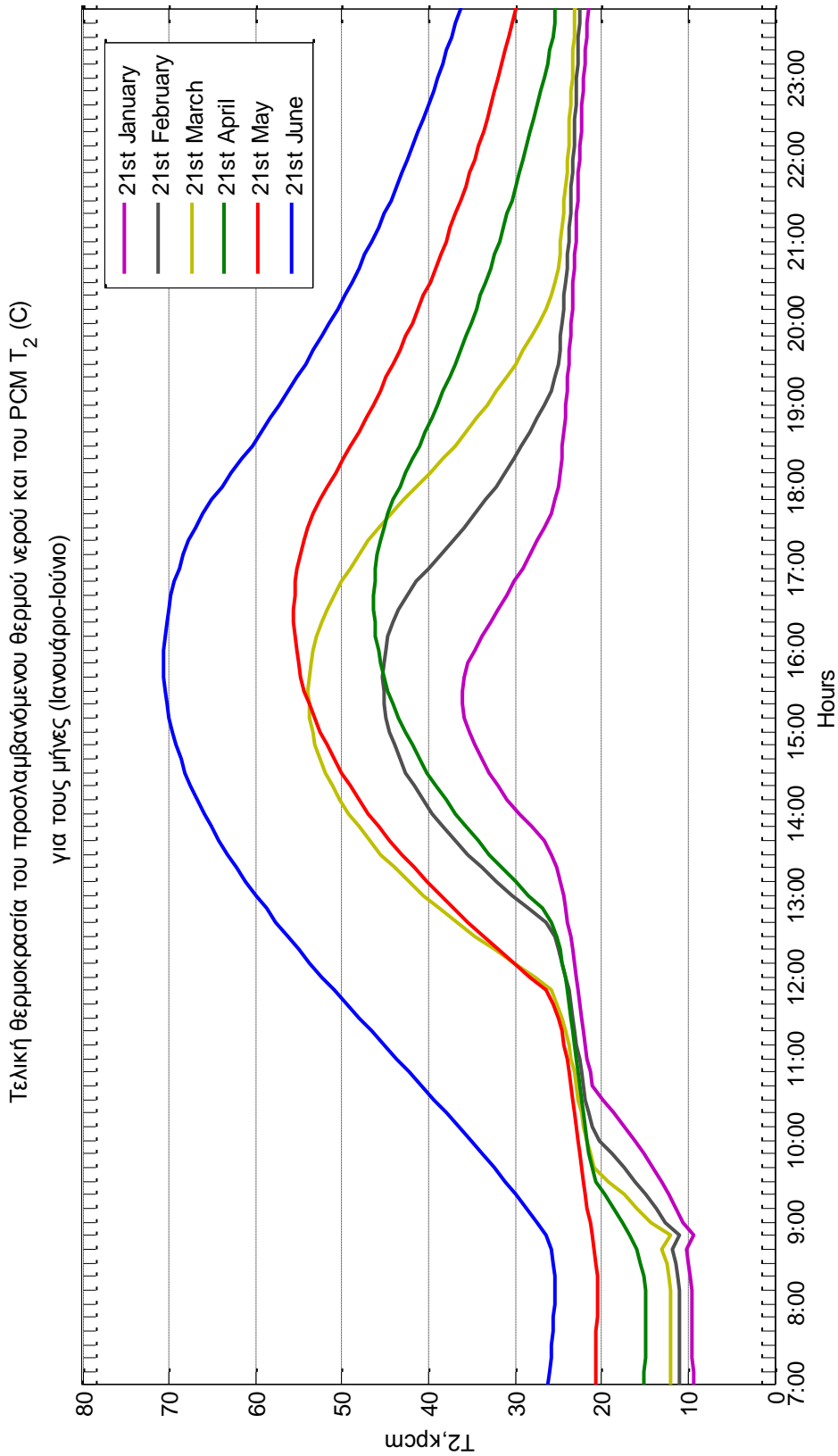
ενώ η τελική θερμοκρασία του PCM και συνεπώς του νερού που λαμβάνουμε υπολογίζεται από την σχέση (8.6):

$$(Q_u - Q_k)\Delta t = m_{pcm} C_{p,pcm}(T_2 - T_1) \quad (8.6)$$

όπου  $\Delta t$  το χρονικό βήμα υπολογισμού της θερμοκρασίας, το οποίο λαμβάνεται ίσο με 600 seconds για να αποφευχθούν ασάφειες. Με την βοήθεια της Matlab προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα που δίνουν την θερμοκρασία του νερού του οποίου λαμβάνεται για οικιακές χρήσεις. Πρέπει να τονίζουμε ότι στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται μόνο τα αποτελέσματα κάθε ώρας και όχι κάθε δεκαλέπτου όπως συμβαίνει στα διαγράμματα.

**Πίνακας 8.10:** Θερμοκρασία του νερού που είναι διαθέσιμο για οικιακές χρήσεις, καθώς επίσης και του PCM

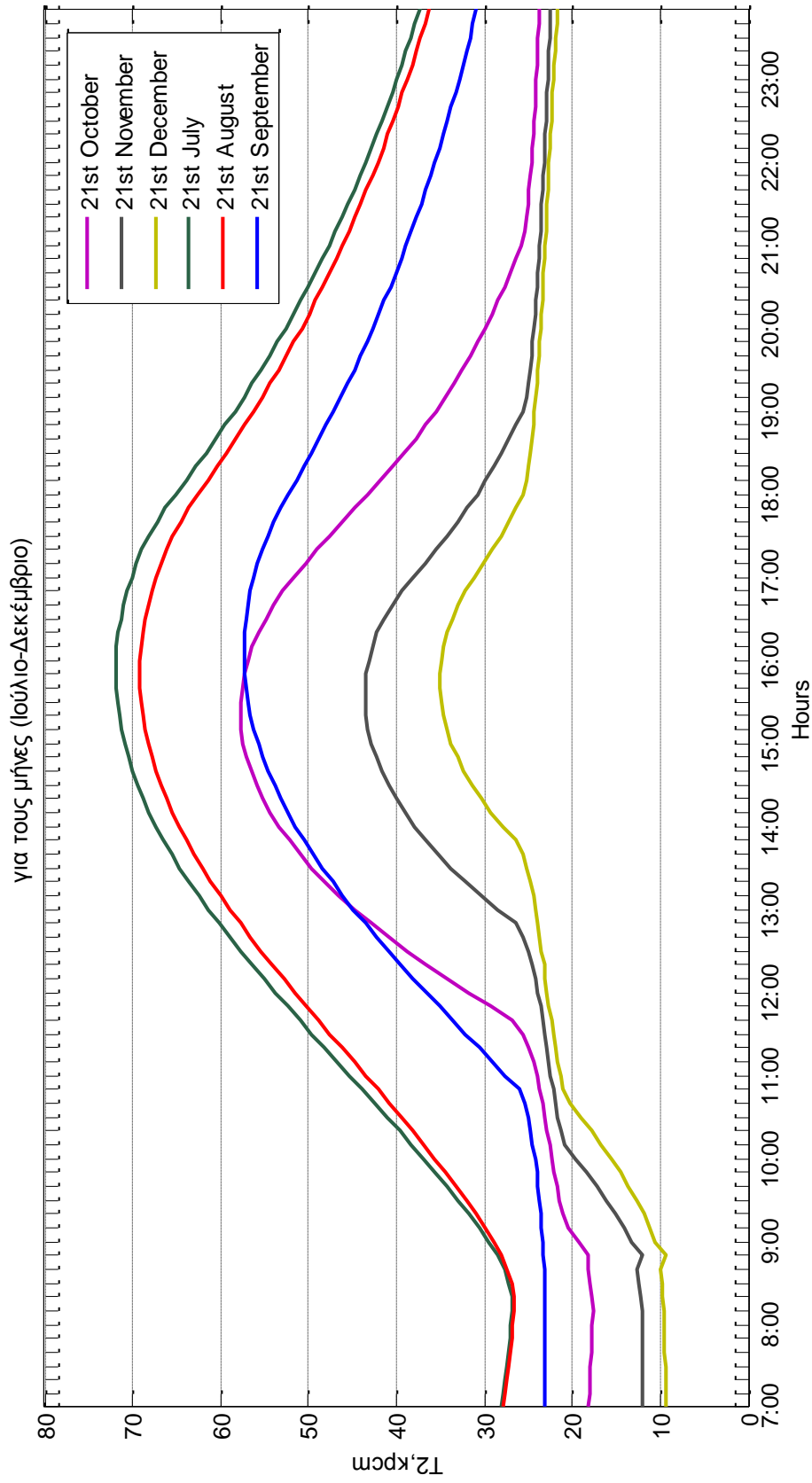
$T_{2k,pcm} (^{\circ}C)$												
Μήνες	21 Ιαν.	21 Φεβ.	21 Μαρ.	21 Απρ.	21 Μαΐου	21 Ιουν.	21 Ιουλ.	21 Αυγ.	21 Σεπ.	21 Οκτ.	21 Νοεμ.	21 Δεκ.
Ωρες												
7:00	9,38	10,98	11,96	15,07	20,72	26,19	28,08	27,88	23,24	18,14	11,97	9,26
8:00	9,61	11,08	12,06	14,91	20,51	25,47	26,98	26,75	23,14	17,73	12,10	9,56
9:00	10,69	12,63	14,23	17,54	21,38	27,40	29,44	28,86	23,35	19,20	13,31	10,53
10:00	16,20	20,20	21,77	21,69	22,71	35,16	36,93	35,63	24,25	22,35	19,64	15,60
11:00	21,65	22,61	23,49	22,93	23,98	43,74	45,30	43,47	27,62	24,01	22,43	21,37
12:00	23,02	24,14	27,70	24,19	28,24	52,30	53,74	51,53	36,59	31,85	23,87	22,84
13:00	24,45	30,37	40,59	28,43	38,63	59,99	61,36	58,92	44,84	44,73	28,51	24,17
14:00	29,57	39,55	49,25	36,84	46,91	65,96	67,29	64,70	51,42	53,34	37,89	27,90
15:00	35,33	44,44	53,47	42,74	52,57	69,62	70,92	68,24	55,71	57,39	42,80	33,76
16:00	34,68	44,98	53,27	45,84	55,31	70,61	71,89	69,17	57,37	56,89	43,14	34,88
17:00	29,20	40,07	49,13	46,13	55,16	68,88	70,12	67,38	56,21	51,65	38,14	31,14
18:00	25,05	32,29	41,47	43,36	51,73	63,94	65,15	62,58	52,29	43,29	30,84	25,55
19:00	24,12	26,67	33,21	38,93	46,43	57,20	58,40	56,22	47,12	35,52	25,60	24,30
20:00	23,50	24,54	27,31	35,12	41,90	51,46	52,63	50,79	42,69	29,92	24,37	23,62
21:00	23,01	23,83	24,69	31,84	38,02	46,57	47,70	46,13	38,89	25,87	23,72	23,11
22:00	22,56	23,30	23,94	29,04	34,72	42,42	43,50	42,15	35,64	24,65	23,23	22,65
23:00	22,04	22,86	23,40	26,66	31,90	38,90	39,94	38,76	32,87	24,08	22,81	22,15
24:00	21,42	22,40	22,97	25,22	29,53	35,92	36,93	35,90	30,54	23,65	22,38	21,54



**Διάγραμμα 8.13:** Θερμοκρασία του νερού και του PCM στην δεξαμενή με παράλληλη κατανάλωση συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας για τους μήνες Ιανουάριο- Ιούνιο για χρονικό βήμα 10λεπτά



Τελική θερμοκρασία του προσλαμβανόμενου θερμού νερού και του PCM  $T_2$  (C)



**Διάγραμμα 8.13:** Θερμοκρασία του νερού και του PCM στην δεξαμενή με παράλληλη κατανάλωση συναρτήσει των ωρών και της 21<sup>ης</sup> ημέρας για τους μήνες Ιούλιο- Δεκέμβριο για χρονικό βήμα 10λεπτά

Όπως διακρίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα οι θερμοκρασίες του νερού του οποίου λαμβάνουμε έχουν μικρότερες τιμές σε σχέση με αυτές του προηγούμενου κεφαλαίου. Ένας μέρος της θερμότητας την οποία λαμβάνει το PCM απορροφάται από το νερό για την θέρμανση του, για οικιακές χρήσεις. Παρατηρούμε επίσης ότι κατά την διάρκεια των πρωινών ωρών της ημέρας το νερό εμφανίζει σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες με εξαίρεση την 21<sup>η</sup> Ιουλίου και Αυγούστου που από την 9:00πμ είναι κατάλληλο προς χρήση. Επίσης κατά την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Νοεμβρίου, Φεβρουαρίου παρουσιάζονται χαμηλές θερμοκρασίες του νερού. Οι θερμοκρασίες οι οποίες αναπτύσσονται σε αυτούς τους μήνες δεν επαρκούν για την κάλυψη της απαίτησης θερμού νερού καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας και επομένως απαιτείται επιπρόσθετη πηγή θέρμανσης του νερού για τις απογευματινές ώρες.

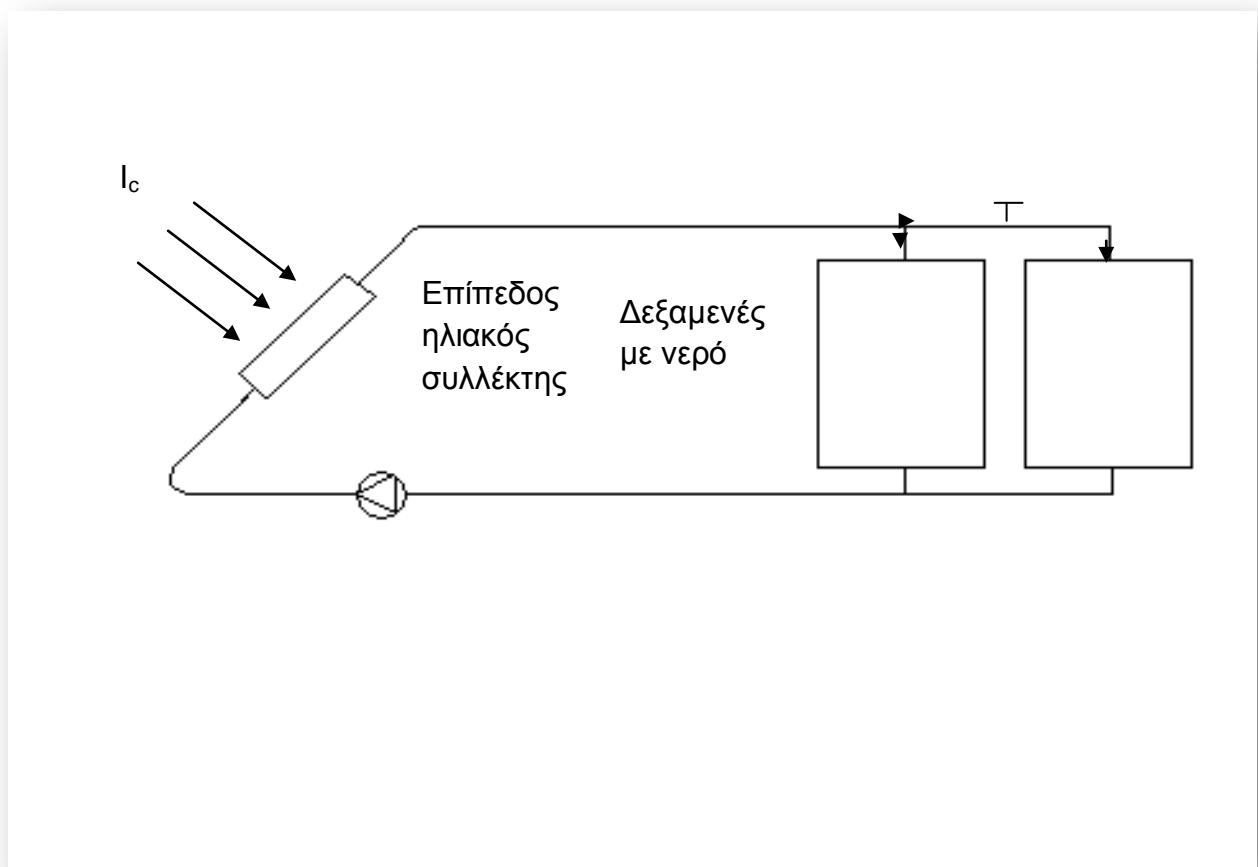
Σε αντίθεση για την 21<sup>η</sup> ημέρα των υπολοίπων μηνών παρουσιάζονται αυξημένες θερμοκρασίες στο νερό και κατά συνέπεια και στο υλικό αλλαγής φάσης, έτσι λοιπόν η θερμότητα που απορροφάται επαρκεί για να καλύψει την ζήτηση του ξενοδοχείου. Βέβαια παρατηρούμε ότι καθώς περνούν οι ώρες και κυρίως τις απογευματινές ώρες οι θερμοκρασίες του νερού μειώνονται καθώς εκείνες τις ώρες η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι μηδενική και η θέρμανση του νερού πλέον γίνεται αποκλειστικά από την θερμότητα που έχει αποθηκεύσει το PCM. Το γεγονός ότι το PCM βρίσκεται για αρκετές ώρες της ημέρας και συγκεκριμένα και τις απογευματινές ώρες μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μπορούμε να εξασφαλίσουμε την κάλυψη θερμού νερού της ξενοδοχειακής μονάδας και κατά τις ώρες που δεν έχουμε ηλιοφάνεια (δηλαδή το απόγευμα) χωρίς πρόσθετη πηγή θέρμανσης του νερού. Σε ορισμένους όμως μήνες κατά τις βραδινές ώρες περιπτώσεις απαιτηθεί επιπλέον πηγή θέρμανσης του νερού



## Κεφάλαιο 9: Σύγκριση αποθηκευτικών μέσων: Καθαρό νερό με PCM

### 9.1. Θερμοκρασίας του νερού και ωφέλιμη ενέργεια

Στην συνέχεια θα πραγματοποιήσουμε τους ίδιους υπολογισμούς για την περίπτωση στην οποία έχουμε αποθηκευτική δεξαμενή χωρίς PCM και χωρίς να προσλαμβάνεται θερμό νερό για οικιακές χρήσεις. Σε αυτήν την περίπτωση η δεξαμενή περιέχει μόνο νερό το οποίο λειτουργεί σε αυτήν την περίπτωση ως αποθηκευτικό μέσο όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 9.1:** Διάταξη με 2 δεξαμενές οι οποίες χρησιμοποιούν ως αποθηκευτικό μέσο το νερό

Στην περίπτωση του νερού θεωρούμε ότι η μάζα του μέσα στην δεξαμενή είναι  $m=750$  Kg εφόσον η πυκνότητά του είναι  $\rho=1\text{Kg/m}^3$  και ο όγκος της δεξαμενής κάθε δεξαμενής είναι  $V=375 \text{ m}^3$  έτσι λοιπόν κάθε δεξαμενή αποτελείται από 375 Kg νερού . Επίσης κάνουμε την παραδοχή ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού παραμένει σταθερή καθ' όλη την διαδικασία της φόρτισης του αποθηκευτικού μέσου, δηλαδή  $C_p=4190 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}$ . Οι εξισώσεις (9.1) και (9.2) δίδονται ακολούθως:

$$Q_{uw} = A_c F_R [G_t(\tau\alpha) - U_L(T_{iw} - T_a)] \quad (9.1)$$

$$Q_u \Delta t = m_w C_{pw} (T_{2w} - T_{1w}) \quad (9.2)$$

Το χρονικό βήμα  $\Delta t$  λαμβάνεται ίσο με 600 seconds και δίνονται τα αποτελέσματα σε πίνακες μόνο για κάθε μια ώρα και όχι για κάθε δεκάλεπτο της ώρας (τα αντίστοιχα διαγράμματα κατασκευάζονται με τους υπολογισμούς κάθε δεκαλέπτου). Αντίστοιχα λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα

**Πίνακας 9.1:** Θερμοκρασία του αποθηκευτικού μέσου-νερό

		$T_{2,w} (^\circ \text{C})$											
Μήνες	Ωρες	21 Ιαν.	21 Φεβ.	21 Μαρ.	21 Απρ.	21 Μαΐου	21 Ιουν.	21 Ιουλ.	21 Αυγ.	21 Σεπ.	21 Οκτ.	21 Νοεμ.	21 Δεκ.
	7:00	9,38	10,98	11,96	16,00	21,09	27,36	29,23	28,90	23,33	18,14	11,97	9,26
	8:00	9,09	10,66	11,76	14,93	20,60	26,01	27,93	27,69	23,07	17,82	11,83	9,07
	9:00	9,98	12,30	14,35	16,64	22,64	28,16	30,05	29,55	24,57	19,93	13,14	9,85
	10:00	14,66	19,35	24,14	23,22	30,27	36,29	38,06	36,81	30,60	28,60	18,91	14,00
	11:00	22,41	29,02	36,12	31,35	39,46	46,03	47,72	45,81	38,44	40,14	27,82	21,48
	12:00	31,70	39,83	48,76	40,19	49,26	56,41	58,06	55,62	47,25	52,93	38,30	30,67
	13:00	41,00	50,31	60,61	48,93	58,85	66,52	68,18	65,36	56,17	65,31	48,75	39,93
	14:00	48,81	58,96	70,19	56,70	67,27	75,40	77,09	73,97	64,12	75,37	57,34	47,63
	15:00	54,07	64,71	76,37	62,74	73,77	82,24	83,96	80,60	70,23	81,74	62,86	52,67
	16:00	54,30	66,51	78,24	66,45	77,75	86,47	88,24	84,70	73,94	83,68	64,35	53,91
	17:00	48,22	63,06	75,63	67,54	78,94	87,78	89,56	85,87	74,81	80,31	60,45	50,34
	18:00	41,71	54,40	68,51	65,66	76,92	85,71	87,49	83,80	72,69	72,15	52,13	43,37
	19:00	36,16	46,91	58,75	61,31	72,04	80,57	82,38	78,99	68,40	62,80	44,99	37,42
	20:00	31,48	40,61	50,47	57,16	67,41	75,69	77,51	74,41	64,31	54,87	39,03	32,46
	21:00	27,55	35,33	43,57	53,31	63,12	71,19	72,99	70,15	60,51	48,22	34,07	28,33
	22:00	24,28	30,91	37,84	49,75	59,16	67,04	68,81	66,19	56,99	42,66	29,97	24,89

<b>23:00</b>	21,57	27,21	33,09	46,47	55,53	63,22	64,97	62,55	53,75	38,03	26,58	22,03
<b>24:00</b>	19,31	24,13	29,16	43,49	52,20	59,72	61,45	59,21	50,78	34,21	23,80	19,66

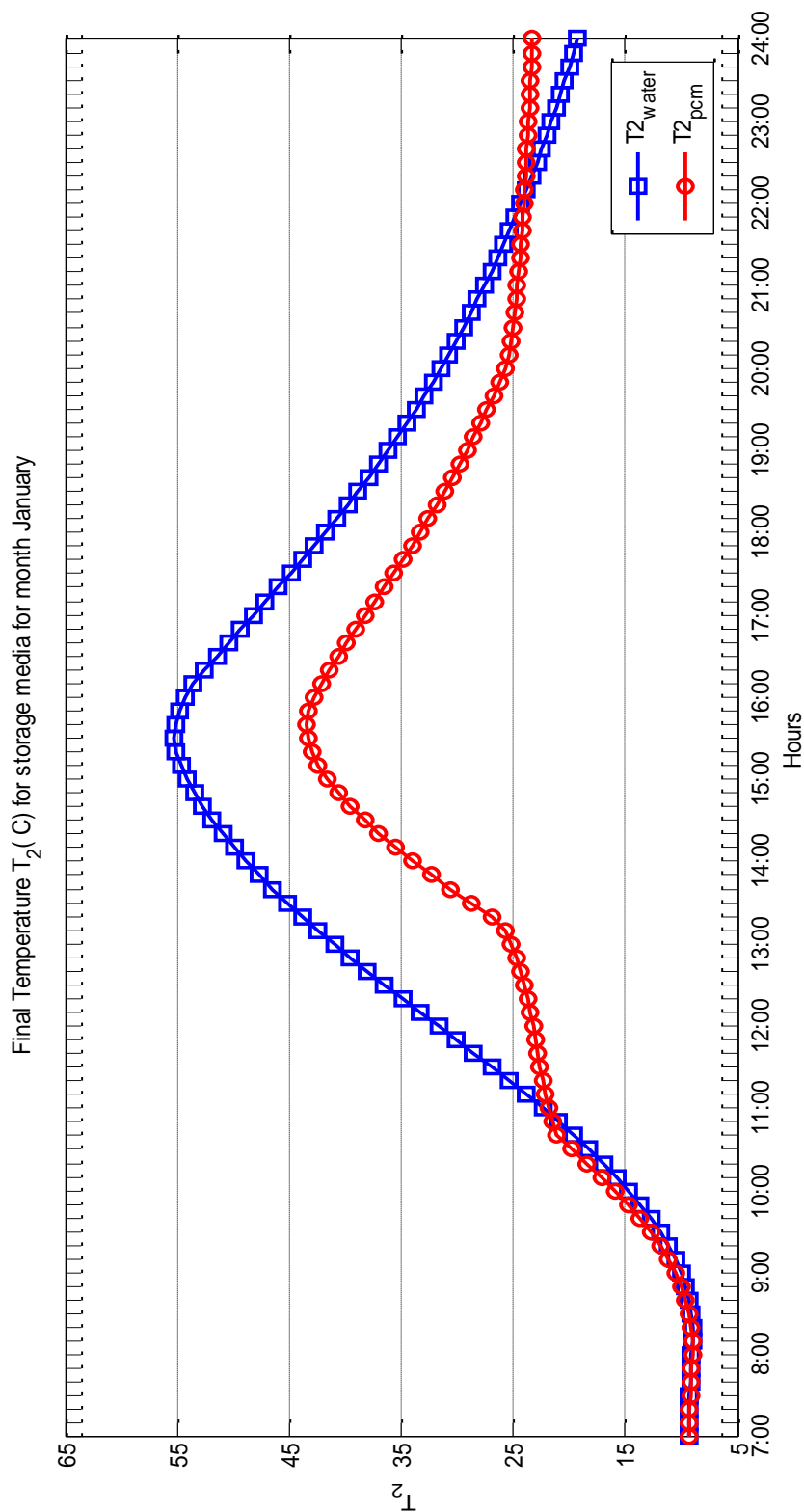
Και στην συνέχεια υπολογίζεται το μέγεθος των απωλειών του περιβάλλοντος στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε το νερό ως αποθηκευτικό μέσο:

$$A_c F_R U_L (T_i - T_a)$$

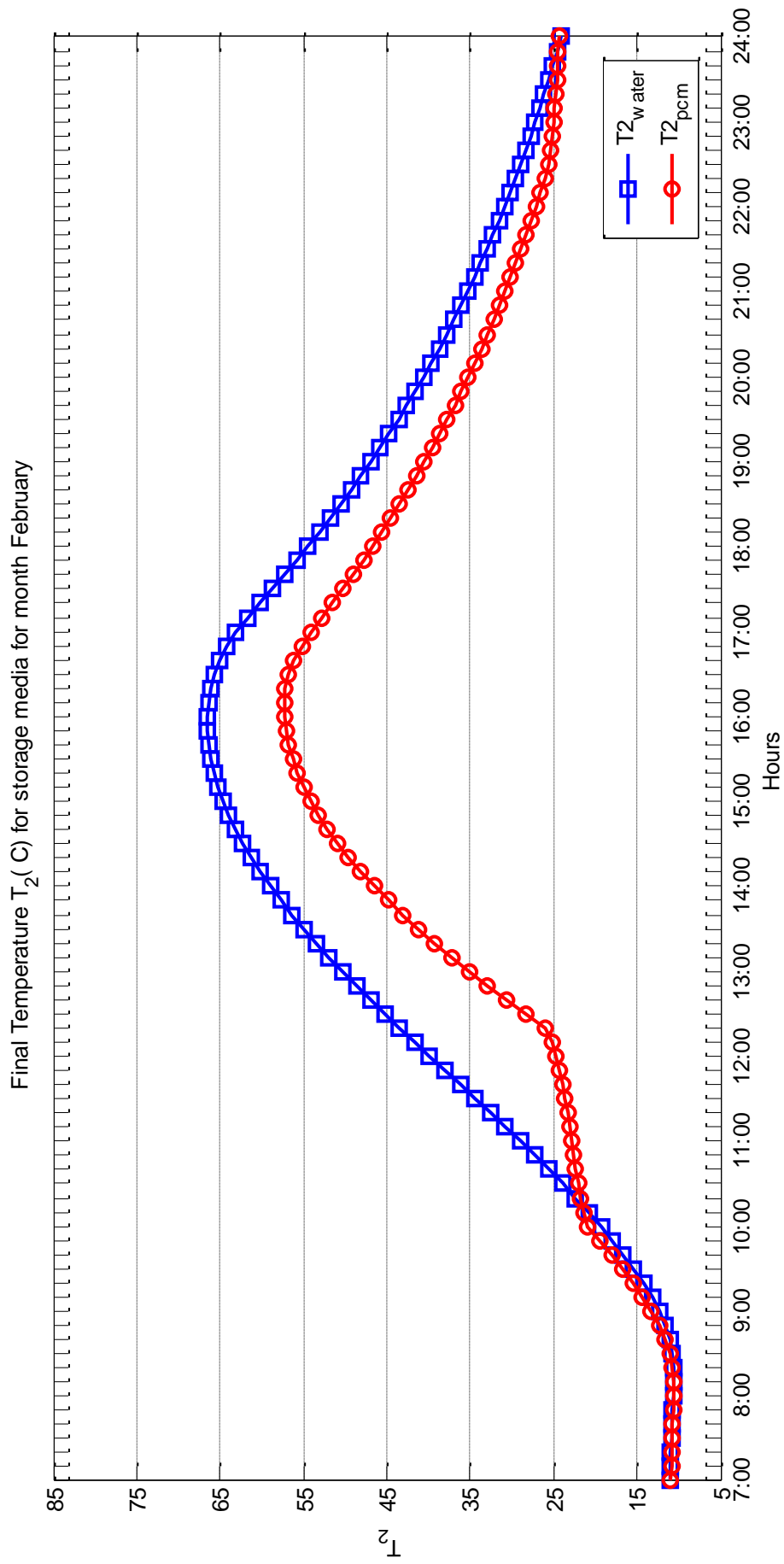
**Πίνακας 9.2:** Ποσό απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον

Ποσό Απωλειών περιβάλλοντος (kW)												
Μήνες	21 Ιαν.	21 Φεβ.	21 Μαρ.	21 Απρ.	21 Μαΐου	21 Ιουν.	21 Ιουλ.	21 Αυγ.	21 Σεπ.	21 Οκτ.	21 Νοεμ.	21 Δεκ.
Ωρες												
<b>7:00</b>	0,17	0,19	0,12	0,26	0,19	0,33	0,29	0,31	0,22	0,20	0,08	0,11
<b>8:00</b>	0,12	0,12	0,06	0,08	0,06	0,09	0,08	0,12	0,11	0,11	0,06	0,08
<b>9:00</b>	0,14	0,18	0,20	0,12	0,11	0,13	0,13	0,15	0,11	0,18	0,13	0,10
<b>10:00</b>	0,45	0,66	0,93	0,56	0,63	0,66	0,67	0,61	0,47	0,77	0,54	0,37
<b>11:00</b>	0,99	1,34	1,83	1,14	1,29	1,34	1,36	1,23	0,99	1,59	1,19	0,92
<b>12:00</b>	1,65	2,13	2,79	1,80	2,04	2,12	2,14	1,95	1,62	2,53	1,98	1,61
<b>13:00</b>	2,33	2,91	3,72	2,47	2,80	2,90	2,91	2,70	2,30	3,49	2,79	2,33
<b>14:00</b>	2,93	3,58	4,49	3,09	3,49	3,62	3,62	3,39	2,94	4,30	3,49	2,94
<b>15:00</b>	3,35	4,06	5,01	3,58	4,05	4,21	4,18	3,94	3,47	4,86	3,97	3,37
<b>16:00</b>	3,41	4,26	5,20	3,90	4,40	4,60	4,56	4,31	3,83	5,08	4,14	3,50
<b>17:00</b>	2,98	4,04	5,04	4,04	4,55	4,77	4,73	4,46	3,98	4,88	3,88	3,25
<b>18:00</b>	2,52	3,41	4,52	3,96	4,45	4,68	4,65	4,37	3,89	4,30	3,26	2,72
<b>19:00</b>	2,13	2,87	3,78	3,69	4,12	4,34	4,33	4,07	3,63	3,61	2,72	2,26
<b>20:00</b>	1,79	2,41	3,15	3,43	3,82	4,01	4,02	3,79	3,38	3,03	2,26	1,88
<b>21:00</b>	1,49	2,02	2,62	3,18	3,53	3,70	3,72	3,52	3,14	2,54	1,88	1,57
<b>22:00</b>	1,24	1,69	2,17	2,92	3,25	3,40	3,42	3,25	2,89	2,11	1,55	1,30
<b>23:00</b>	1,03	1,41	1,80	2,67	2,97	3,12	3,14	2,98	2,65	1,75	1,28	1,08
<b>24:00</b>	0,87	1,18	1,49	2,43	2,71	2,87	2,87	2,71	2,42	1,44	1,04	0,90

Παρακάτω δίδονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας των δύο αποθηκευτικών μέσων συναρτήσει των ωρών της ημέρας και των μηνών:

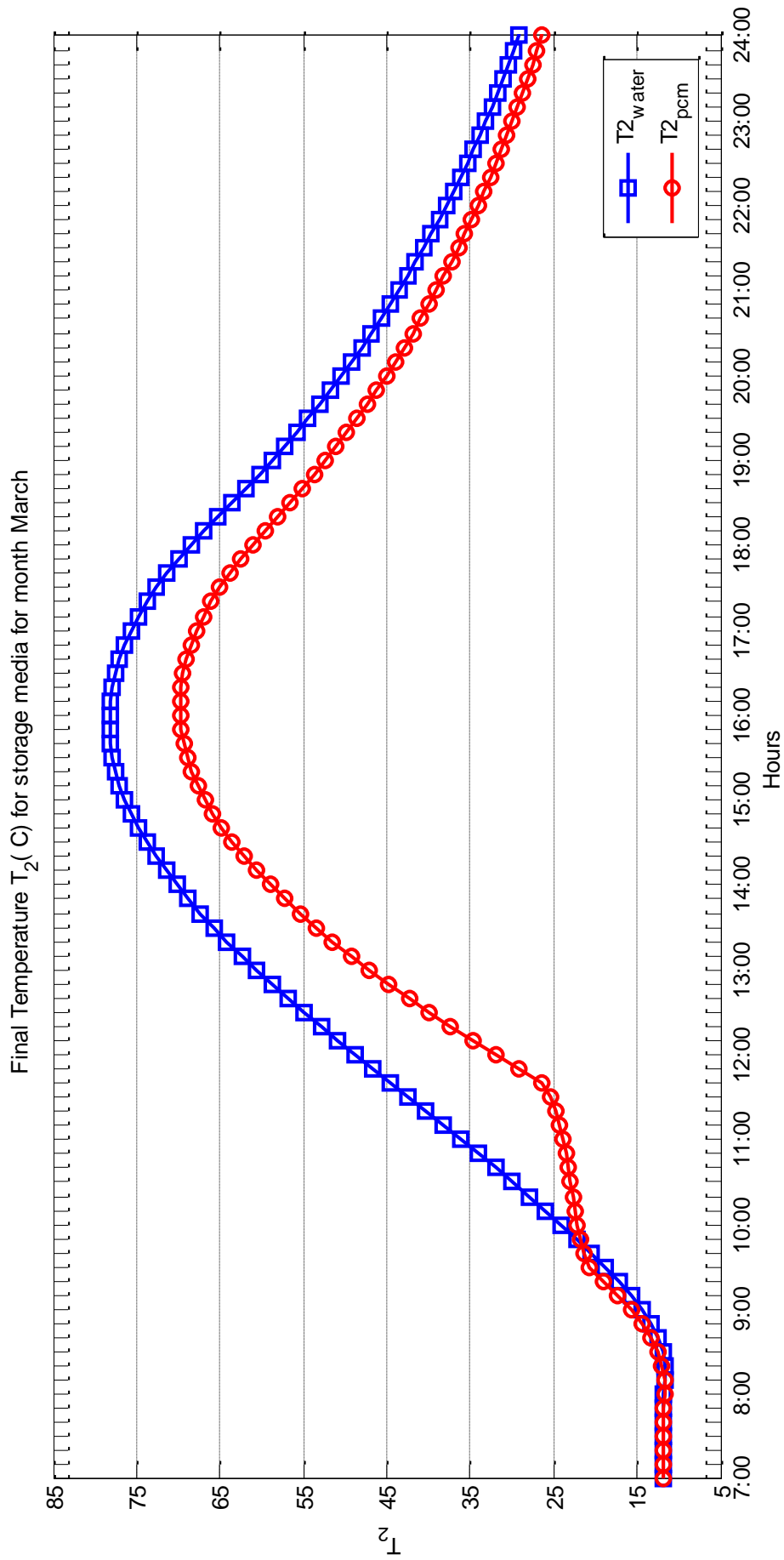


**Διάγραμμα 9.1:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Ιανουαρίου για χρονικό βήμα 10λεπτά

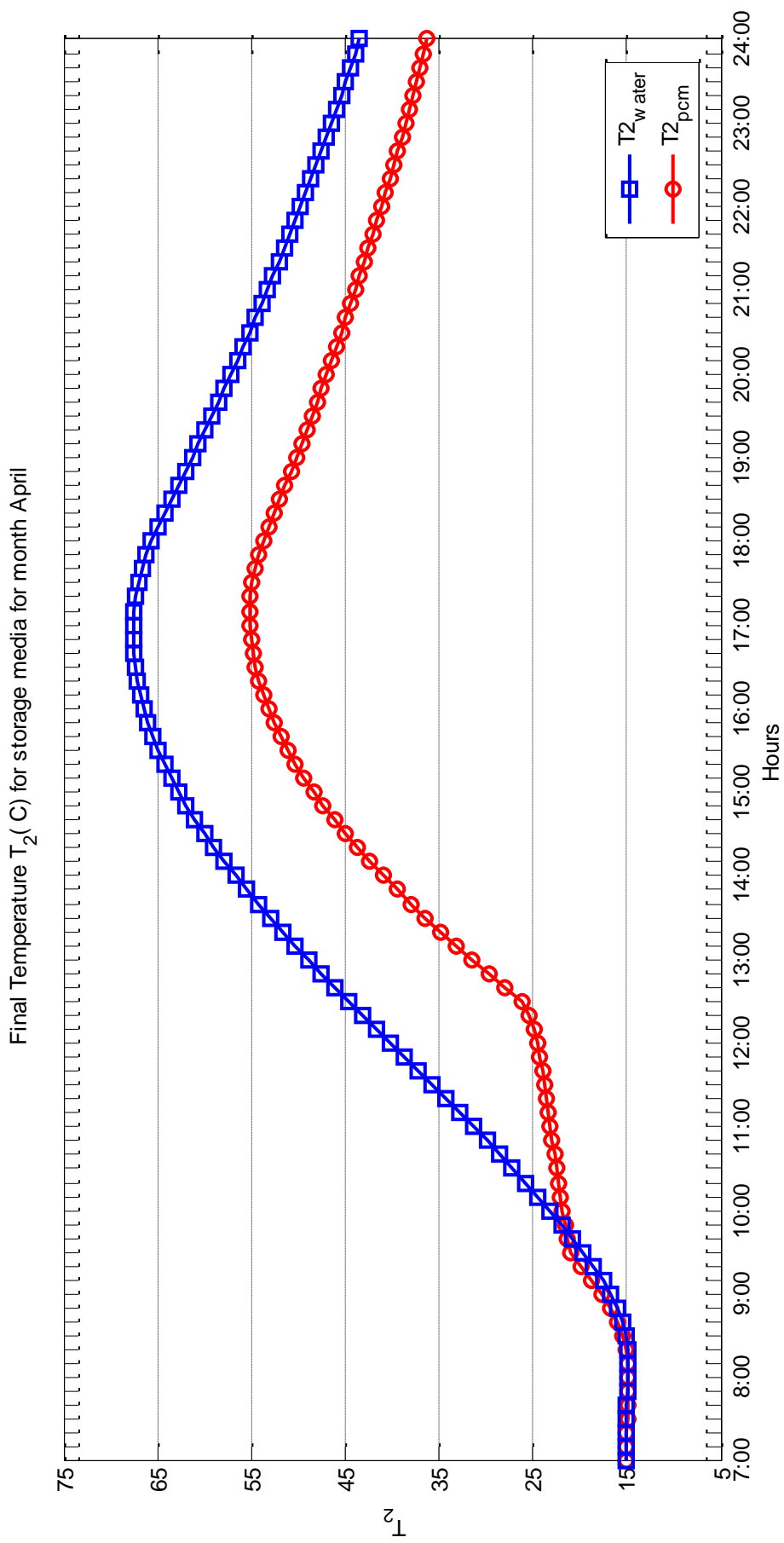


**Διάγραμμα 9.2:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Φεβρουαρίου για χρονικό βήμα 10λεπτά

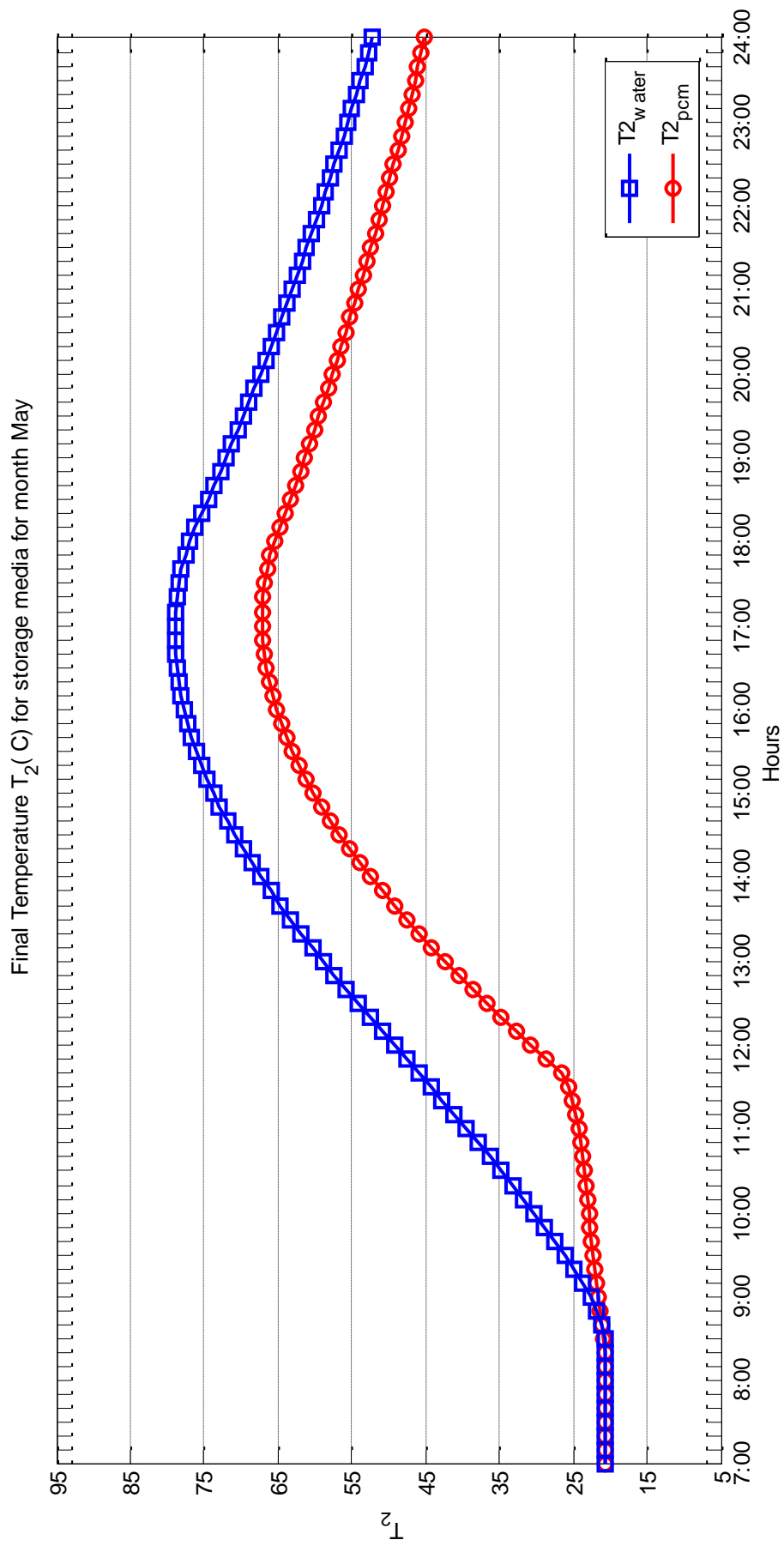




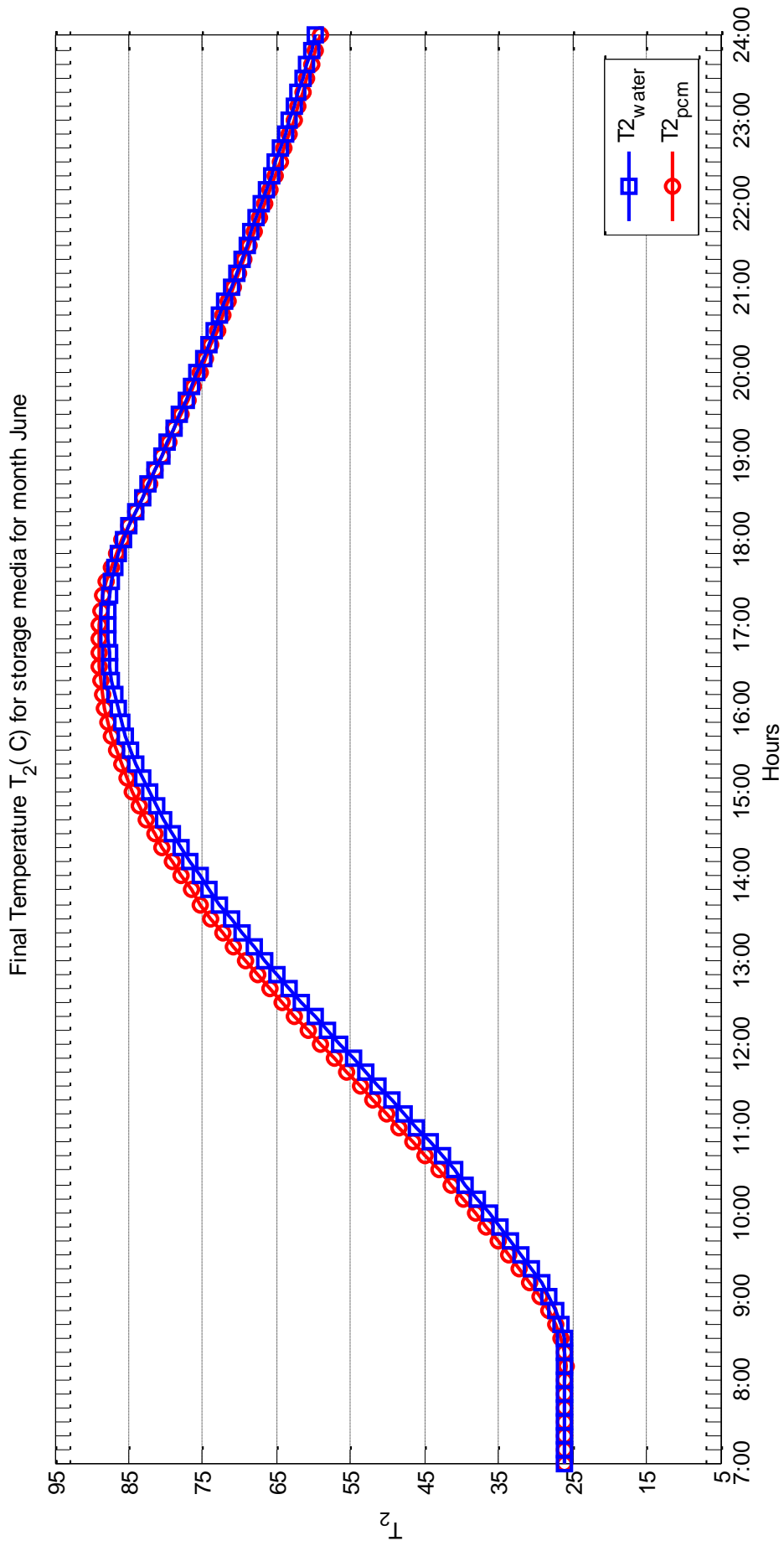
**Διάγραμμα 9.3:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Μαρτίου για χρονικό βήμα 10λεπτά



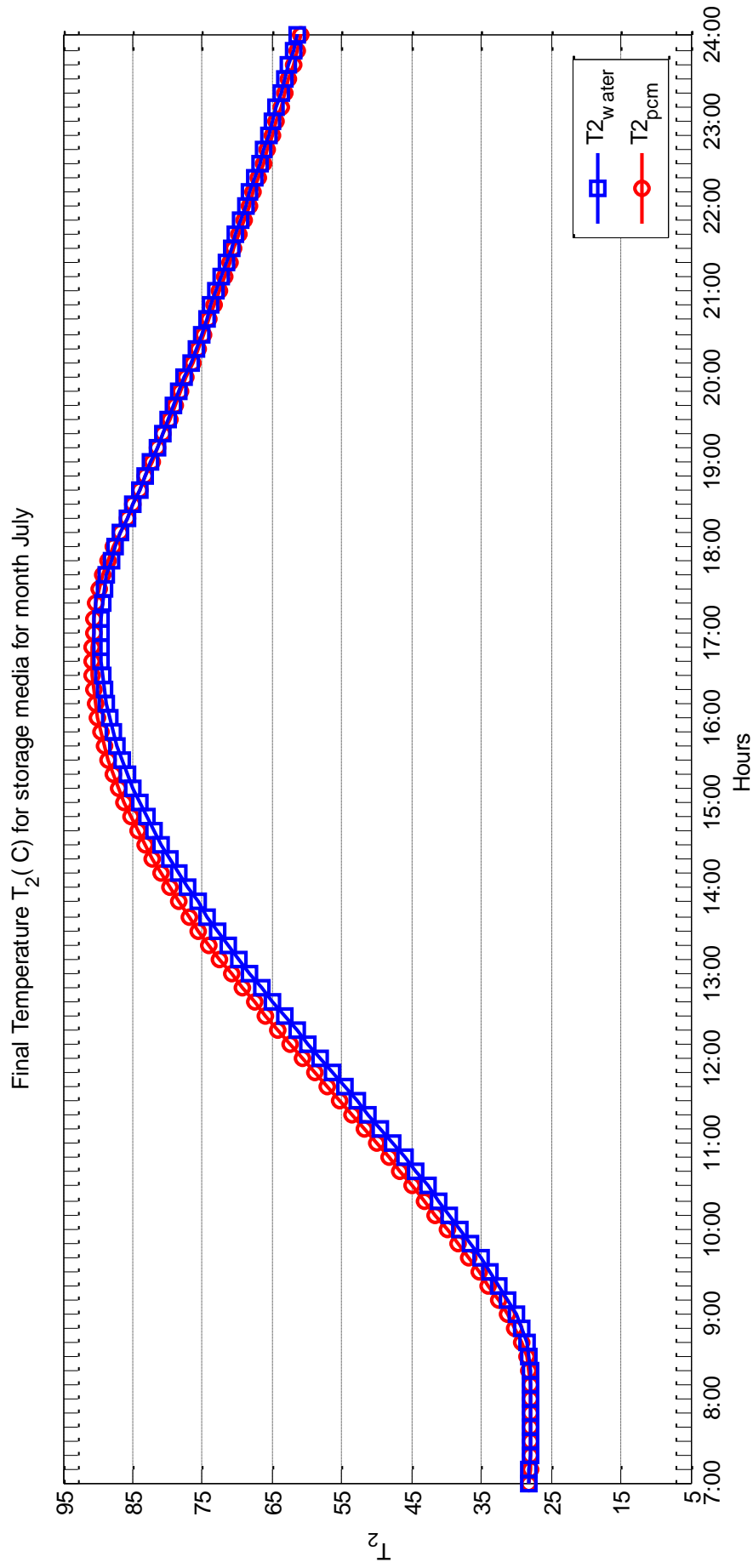
**Διάγραμμα 9.4:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Απριλίου για χρονικό βήμα 10λεπτά



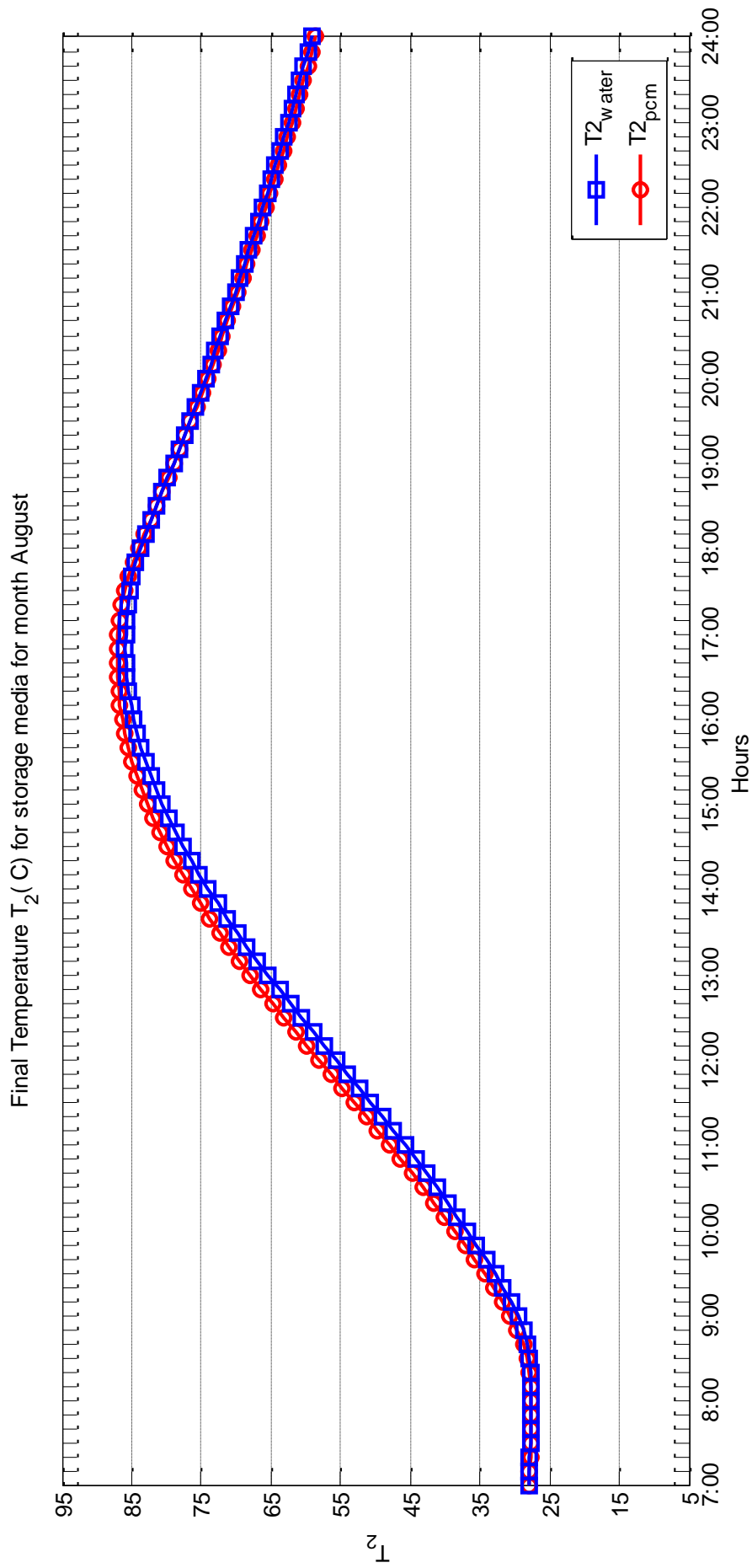
**Διάγραμμα 9.5:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Μαΐου για χρονικό βήμα 10λεπτά



**Διάγραμμα 9.6:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Ιουνίου για χρονικό βήμα 10λεπτά

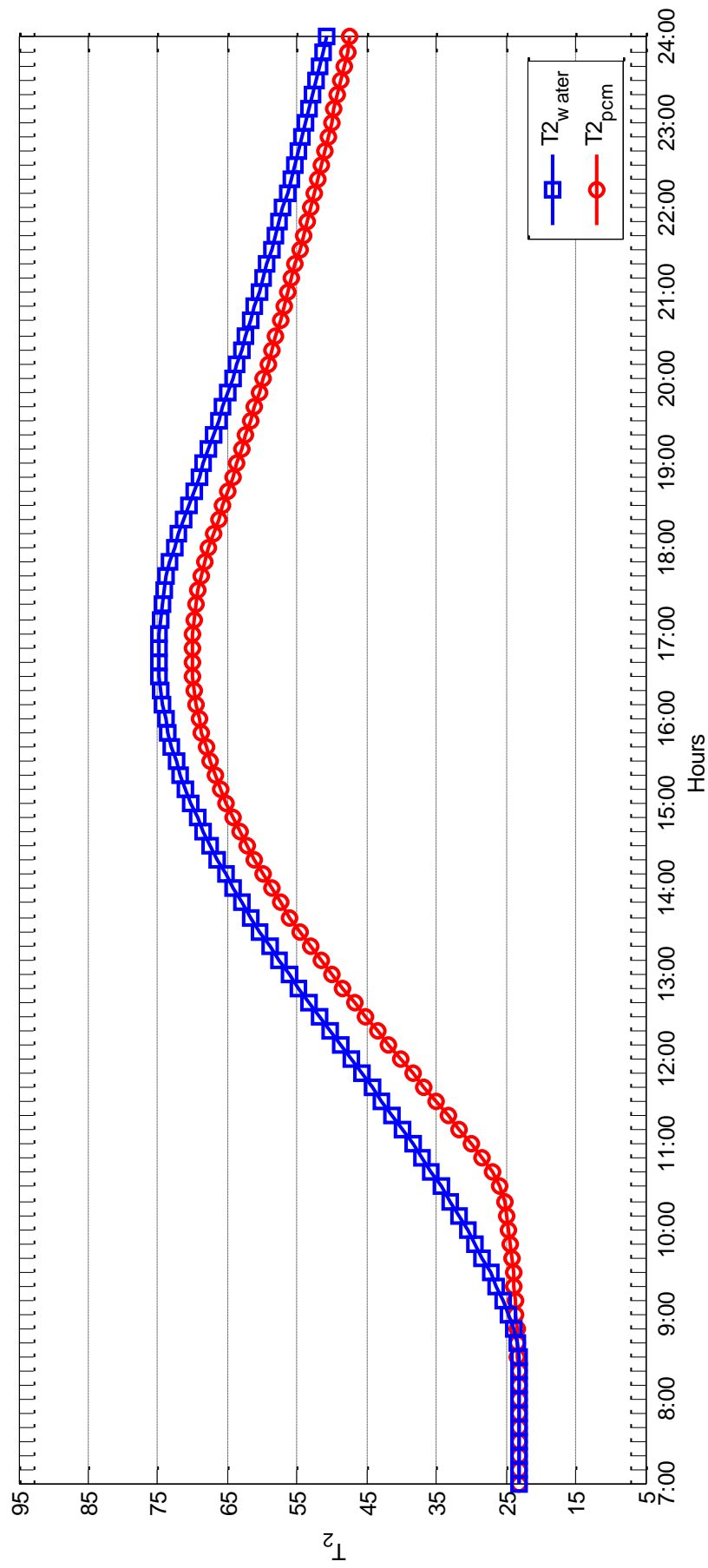


**Διάγραμμα 9.7:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Ιουλίου για χρονικό βήμα 10λεπτά

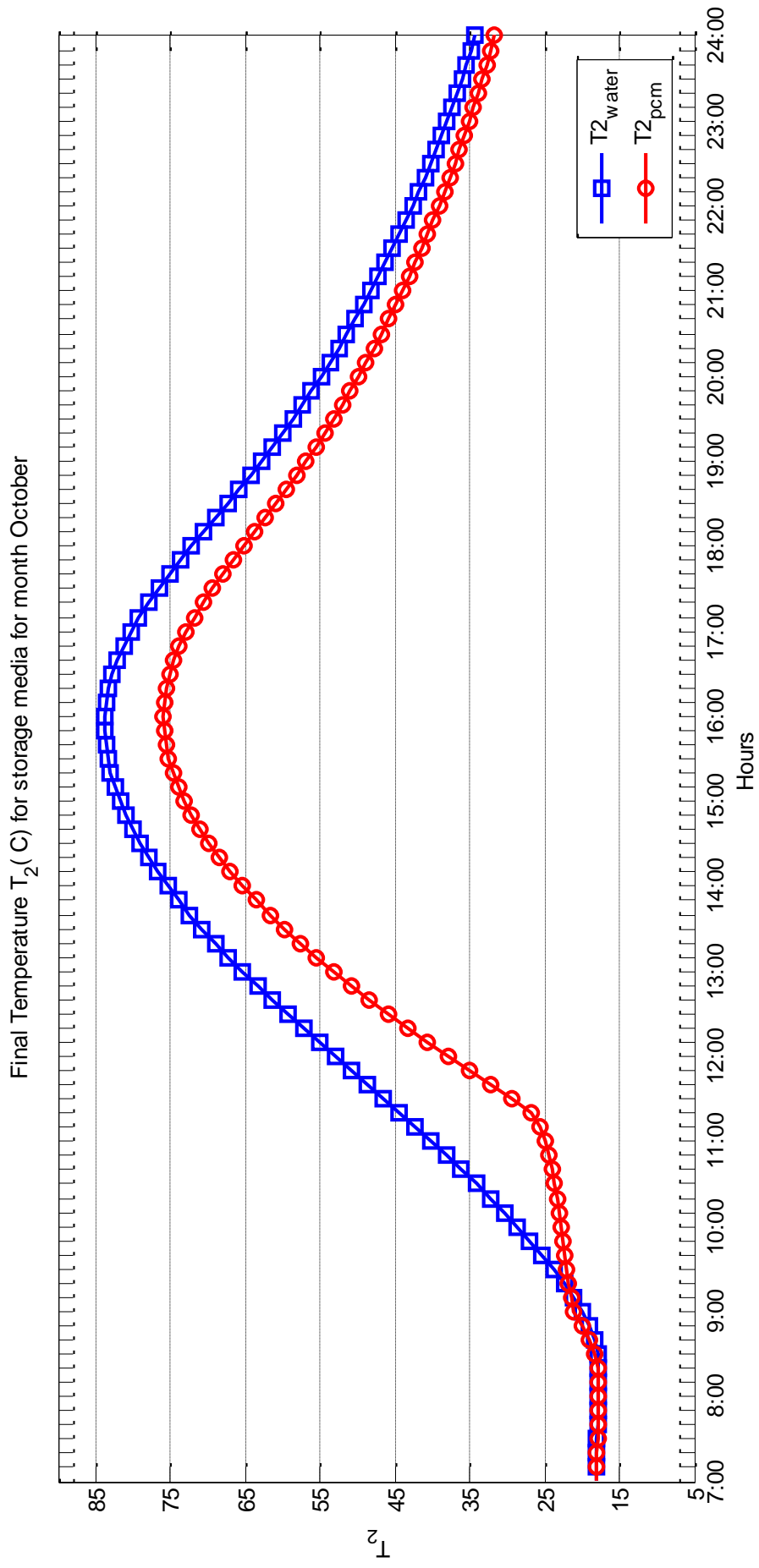


**Διάγραμμα 9.8:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Αυγούστου για χρονικό βήμα 10λεπτά

Final Temperature  $T_2$  (C) for storage media for month September



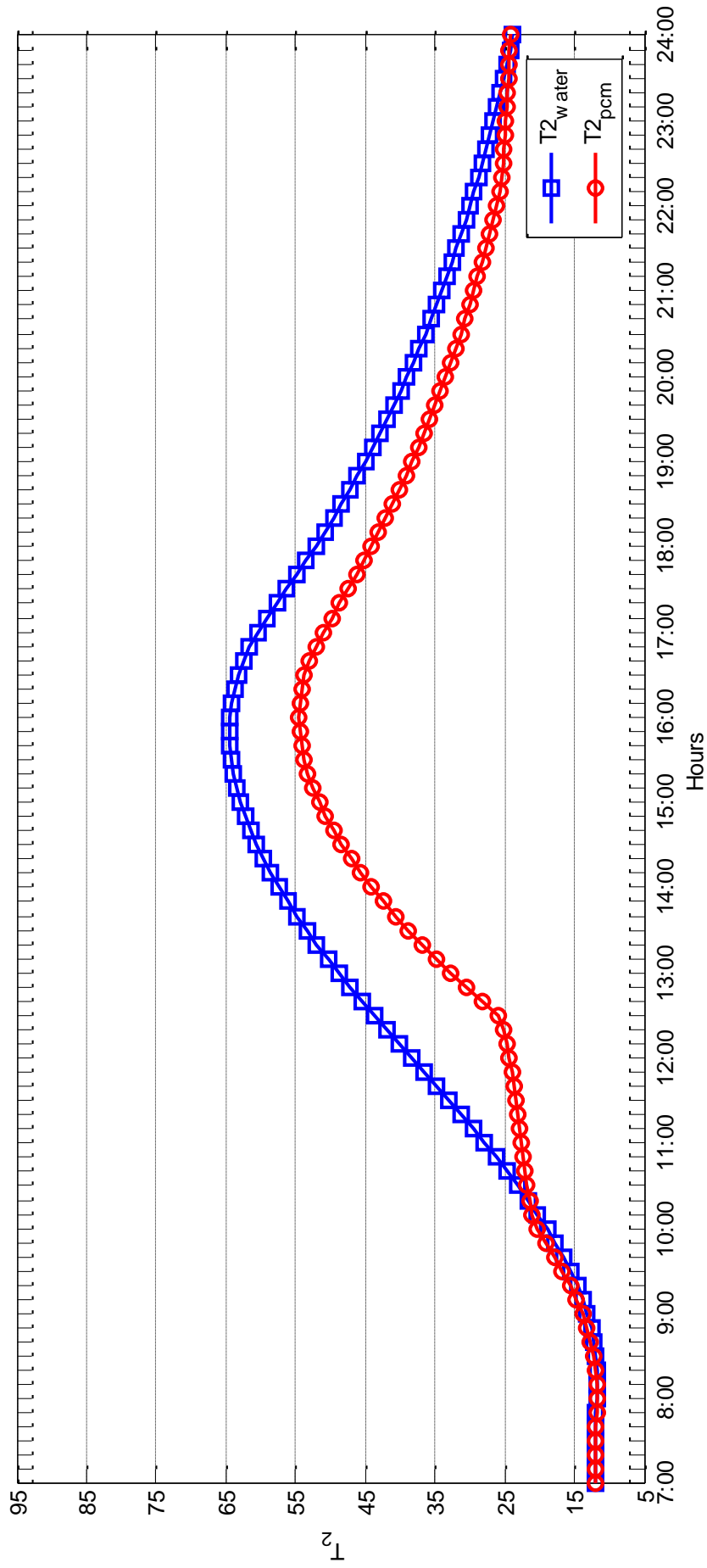
**Διάγραμμα 9.9:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Σεπτεμβρίου για χρονικό βήμα 10λεπτά



**Διάγραμμα 9.10:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Οκτωβρίου για χρονικό βήμα 10λεπτά

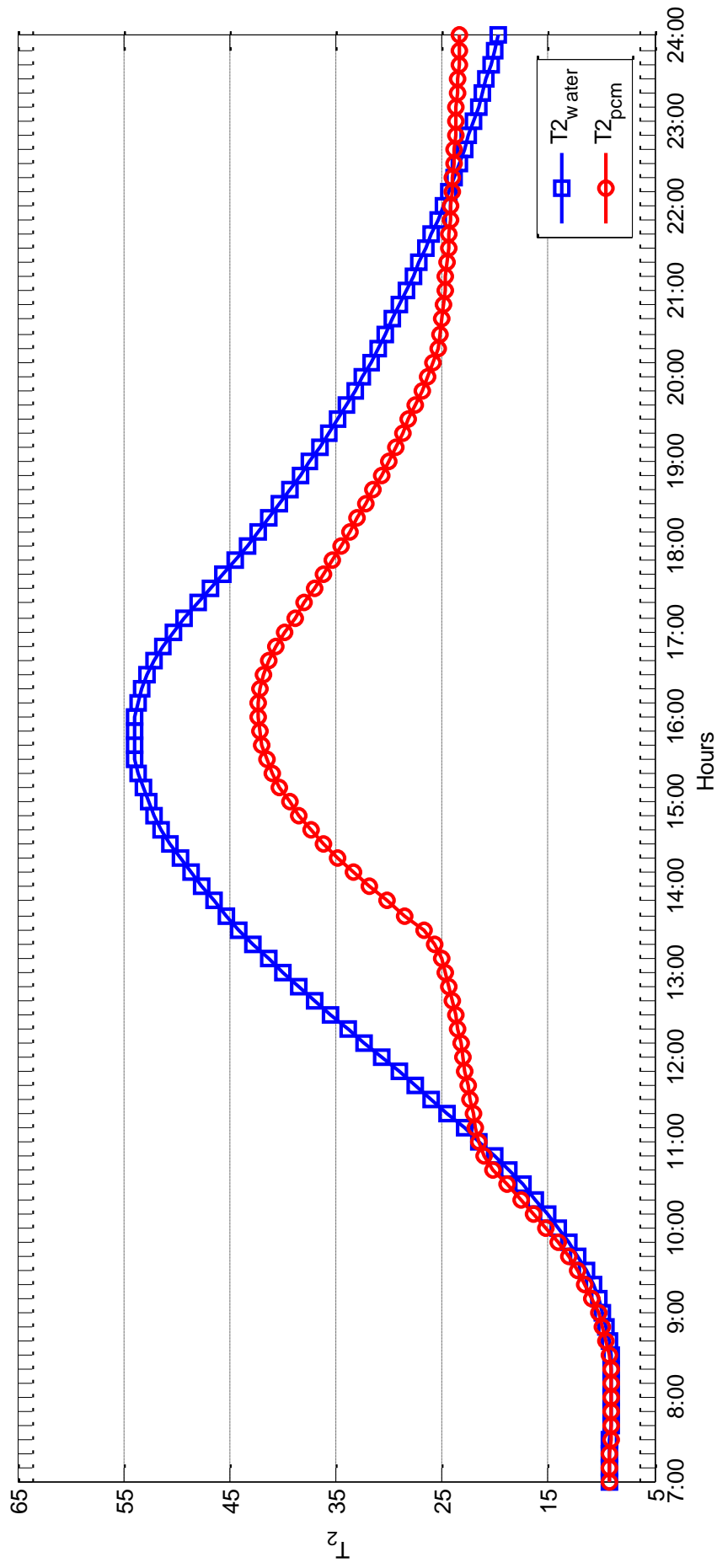


Final Temperature  $T_2$  (C) for storage media for month November



**Διάγραμμα 9.11:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Νοεμβρίου για χρονικό βήμα 10λεπτά

Final Temperature  $T_2$  (C) for storage media for month December



**Διάγραμμα 9.12:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Δεκεμβρίου για χρονικό βήμα 10λεπτά

Εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται μία σημαντική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο αποθηκευτικών μέσων, και συγκεκριμένα η τελική θερμοκρασία του νερού είναι μεγαλύτερη από αυτή του υλικού αλλαγής φάσης. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό αλλαγής φάσης μεταξύ των θερμοκρασιών 20-26 °C όλο το ποσό θερμότητας το οποίο λαμβάνει το αποθηκεύει υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας πράγμα το οποίο δεν επιφέρει μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του, ενώ σε αντίθεση το νερό το οποίο υφίσταται αλλαγή φάσης στους 100 °C μέχρι να καταφέρει να φτάσει αυτή την θερμοκρασία όλη την θερμότητα την οποία λαμβάνει την αποθηκεύει ως αισθητή, που συνεπάγεται και μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας του σε σχέση με το υλικό αλλαγής φάσης.

Σε γενικές γραμμές για όλους τους μήνες του έτους οι καμπύλες παρουσιάζουν κοίλη μορφή. Συγκεκριμένα κατά την έναρξη της διαδικασίας φόρτισης και των δύο αποθηκευτικών μέσων παρατηρείται μία ελάχιστη διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ τους, ενώ όσο περνάει η ώρα αυτό το εύρος μεταξύ των δύο καμπυλών θερμοκρασίας αυξάνεται.

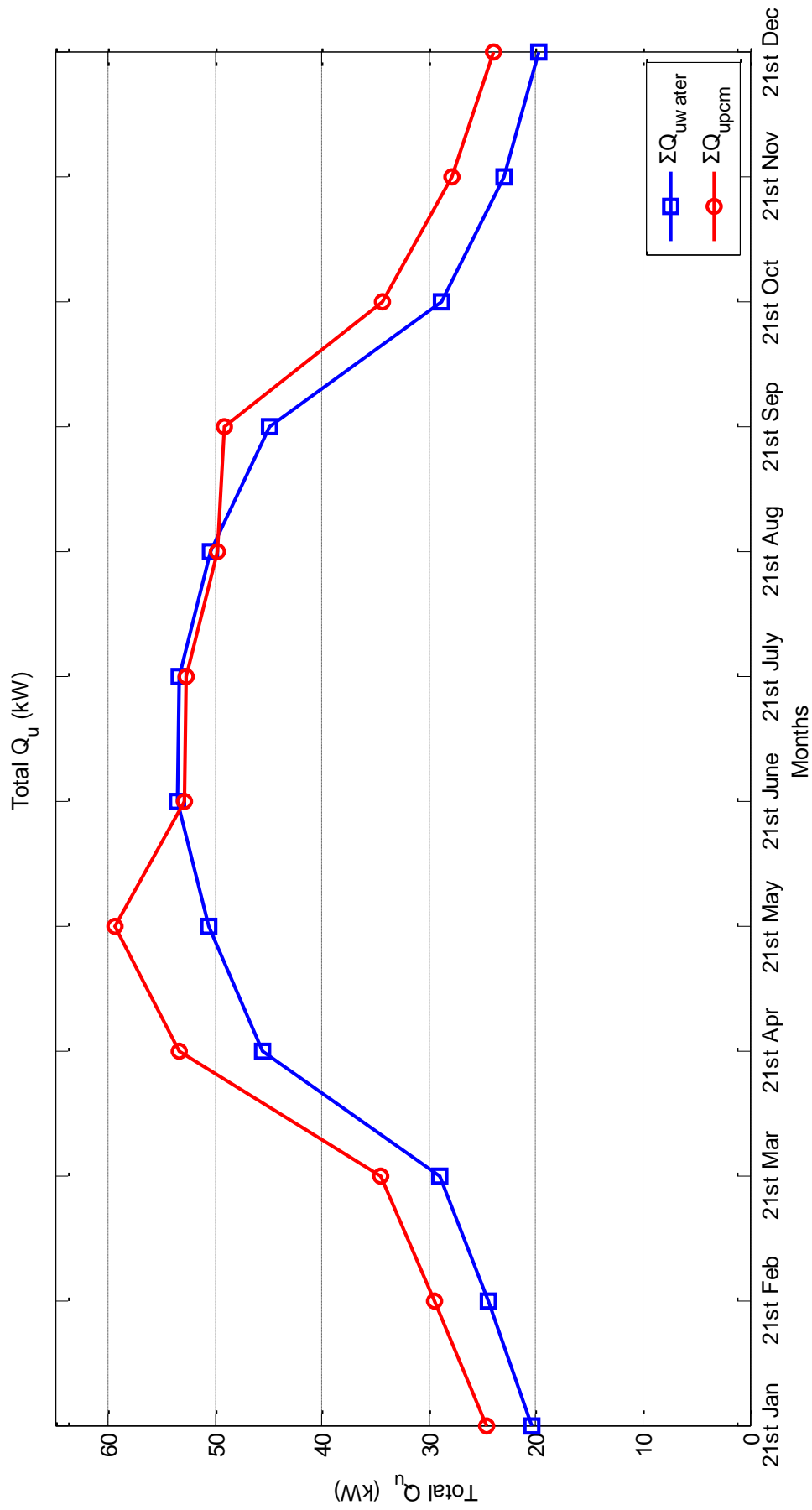
Αναλυτικότερα κατά τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο παρατηρείται μείωση αυτού του εύρους μεταξύ των δύο καμπυλών και σχεδόν ταύτισή τους. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια αυτών των μηνών οι θερμοκρασίες τις οποίες αποκτά το PCM είναι μεγαλύτερες από αυτήν στην οποία ολοκληρώνεται η αλλαγή φάσης, δηλαδή τους 26 °C και ως αποτέλεσμα αυτού το PCM συμπεριφέρεται όπως το νερό, δηλαδή αποθηκεύει όλο το ποσό θερμότητας το οποίο λαμβάνει υπό μορφή λανθάνουσας. Ωστόσο οι ελάχιστα υψηλότερες οι θερμοκρασίες του PCM που παρατηρούνται, παρά το γεγονός ότι παρουσιάζει μεγαλύτερη ειδική θερμοχωρητικότητα από αυτήν του νερού, οφείλονται στην μεγαλύτερη μάζα νερού που χρησιμοποιούμε στην δεξαμενή. Σε αντίθεση κατά την διάρκεια των υπόλοιπων μηνών που το υλικό αλλαγής φάσης αποθηκεύει θερμότητα και υπό μορφή λανθάνουσας και αισθητής, παρατηρείται ταύτιση των καμπυλών θερμοκρασιών στην έναρξη, ενώ στην συνέχεια το εύρος μεταξύ τους αυξάνεται. Κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου και 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου η μεγάλη διαφορά αυτή μεταξύ των θερμοκρασιών παρατηρείται από την αρχή της διαδικασίας φόρτισης των αποθηκευτικών μέσων εφόσον το PCM κατά την διάρκεια αυτών των μηνών από τις πρώτες πρωινές ώρες βρίσκεται ταυτόχρονα σε στερεή και υγρή φάση, δηλαδή το PCM κατά την έναρξη της διαδικασίας φόρτισης βρίσκεται στην περιοχή αλλαγής φάσης. Επιπλέον κατά την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου και Ιανουαρίου παρατηρείται ότι κατά την διαδικασία της εκφόρτισης όταν το PCM φτάσει τις θερμοκρασίες της περιοχής αλλαγής φάσης αρχίζει και παρουσιάζει υψηλότερες τιμές από αυτές του νερού. Λόγω της λανθάνουσας θερμότητας που έχει

αποθηκεύσει μπορεί να αποδίδει θερμότητα χωρίς να μεταβάλει ιδιαίτερα την θερμοκρασία του ενώ το νερό για να αποδώσει θερμότητα πρέπει χάσει μεγάλα ποσά αισθητής θερμότητας, συνεπώς μειώνεται και γρήγορα η θερμοκρασία του. Ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας του νερού είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν του υλικού αλλαγής φάσης. Έτσι λοιπόν μπορούμε να συμπεράνουμε ότι κατά την διάρκεια της νύχτας το PCM μπορεί να διατηρήσει ένα μεγάλο μέρος της θερμότητας την οποία έχει απορροφήσει οπότε η διαδικασία φόρτισής του την επόμενη μέρα δύναται να ξεκινήσει από μία υψηλότερη θερμοκρασία, που συνεπάγεται και μεγαλύτερο κέρδος.

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την συνολική ημερήσια ενέργεια που απορροφάται ως το άθροισμα της ενέργειας κάθε ώρας και στην συνέχεια κατασκευάζουμε το αντίστοιχο διάγραμμα το οποίο δίδεται παρακάτω:

**Πίνακας 9.3:** Συνολική ημερήσια θερμότητα που προσλαμβάνει το αποθηκευτικό μέσο- νερό

Μήνας	$\Sigma Q_{u,νερού}$ (kW)
21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου	20,41
21 <sup>η</sup> Φεβρουαρίου	24,44
21 <sup>η</sup> Μαρτίου	29,05
21 <sup>η</sup> Απριλίου	45,63
21 <sup>η</sup> Μαΐου	50,57
21 <sup>η</sup> Ιουνίου	53,54
21 <sup>η</sup> Ιουλίου	53,42
21 <sup>η</sup> Αυγούστου	50,47
21 <sup>η</sup> Σεπτεμβρίου	44,97
21 <sup>η</sup> Οκτωβρίου	28,85
21 <sup>η</sup> Νοεμβρίου	23,06
21 <sup>η</sup> Δεκεμβρίου	19,74



**Διάγραμμα 9.13:** Συνολική ημερήσια απορροφώμενη θερμότητα δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων νερό-PCM συναρτήσει για χρονικό βήμα 10λεπτά

Στο παραπάνω διάγραμμα η συνολική ημερήσια ενέργεια το νερού παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές σε σχέση με αυτές του υλικού αλλαγής φάσης. Έχοντας υπολογίσει τις απώλειες που δίδονται σε παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι το ποσό των απωλειών του νερού είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το ποσό απωλειών του PCM.

Οι απώλειες του περιβάλλοντος είναι μία συνάρτηση της θερμοκρασίας την οποία αποκτά το αποθηκευτικό μέσο και της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Για μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας του αποθηκευτικού μέσου οι απώλειες αυτές αυξάνονται εφόσον αναφερόμαστε στον ίδιο επίπεδο ηλιακό συλλέκτη και στην ίδια περιοχή. Έτσι λοιπόν λαμβάνοντας υπόψη την σχέση (9.1):

$$Q_u = A_c F_R [G_t(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (9.1)$$

προκύπτει ότι για το ίδιο ποσό απορροφώμενης ακτινοβολίας από τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, στην περίπτωση χρήσης νερού ως αποθηκευτικού μέσου προκύπτουν μικρότερα ποσά ωφέλιμης θερμότητας σε σχέση με το υλικό αλλαγής φάσης.

Επίσης στις καμπύλες παρουσιάζεται διαφορά ως προς την μέγιστη εμφανιζόμενη συνολική ημερήσια ενέργεια. Σε αντίθεση με την καμπύλη του PCM η μέγιστη συνολική ημερήσια ενέργεια την οποία αποθηκεύει το νερό εμφανίζεται κατά την 21<sup>η</sup> Ιουνίου και η ελάχιστη κατά τον 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου. Τέλος παρατηρείται ότι κατά την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου ενώ στο PCM η συνολική ημερήσια ενέργεια παρουσιάζει αύξηση, στο νερό παρατηρείται μείωση σε σχέση με τους καλοκαιρινούς μήνες εφόσον οι απώλειες περιβάλλοντος είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές των καλοκαιρινών μηνών.

Το PCM παρόλο τις χαμηλότερες θερμοκρασίες που αποκτά σε σχέση με το νερό έχει την ικανότητα να αποθηκεύει μεγαλύτερο ποσό θερμότητας το οποίο στην συνέχεια το αποδίδει στο νερό για την θέρμανσή του. Με βεβαιότητα μπορούμε να καταλήξουμε στο γεγονός ότι η χρήση των PCMs σε δεξαμενή είναι πιο συμφέρουσα από ενεργειακής απόψεως καθώς αυτά έχουν την ικανότητα να διατηρούν τις υψηλές θερμοκρασίες τους για μεγάλο χρονικό διάστημα μέσω της αλλαγής φάσης που υφίστανται. Σε αντίθεση το νερό παρουσιάζει υψηλές θερμοκρασίες όμως η αποθηκευτική του ικανότητα είναι μειωμένη σε σχέση με αυτή του PCM.

## **Κεφάλαιο 10: Συμπεριφορά του υλικού αλλαγής φάσης (PCM) σε μεταβολές των ιδιοτήτων του**

Στην συνέχεια θα μελετήσουμε την συμπεριφορά του υλικού αλλαγής φάσης (PCM), για κάθε 21<sup>η</sup> κάθε μήνα του έτους μεταβάλλοντας τις χαρακτηριστικές του ιδιότητες. Έτσι λοιπόν ουσιαστικά θα μελετήσουμε την απόδοση διαφορετικών PCM για την ίδια εγκατάσταση την οποία μελετήσαμε προηγουμένως, δηλαδή αυτή με την χρήση δύο δεξαμενών κατά την διάρκεια των μηνών Απριλίου, Μαΐου, Ιουνίου, Ιουλίου, Αυγούστου και Σεπτεμβρίου. Αναλυτικότερα θα μελετήσουμε PCM με παρεμφερείς ιδιότητες, δηλαδή θα μεταβάλλουμε σταδιακά την λανθάνουσα θερμότητα τήξης H, την ειδική θερμοχωρητικότητα C<sub>p</sub>, και την περιοχή στην οποία πραγματοποιείται η αλλαγή φάσης, δηλαδή το εύρος ΔT

### **10.1. Μεταβολή περιοχής αλλαγής φάσης**

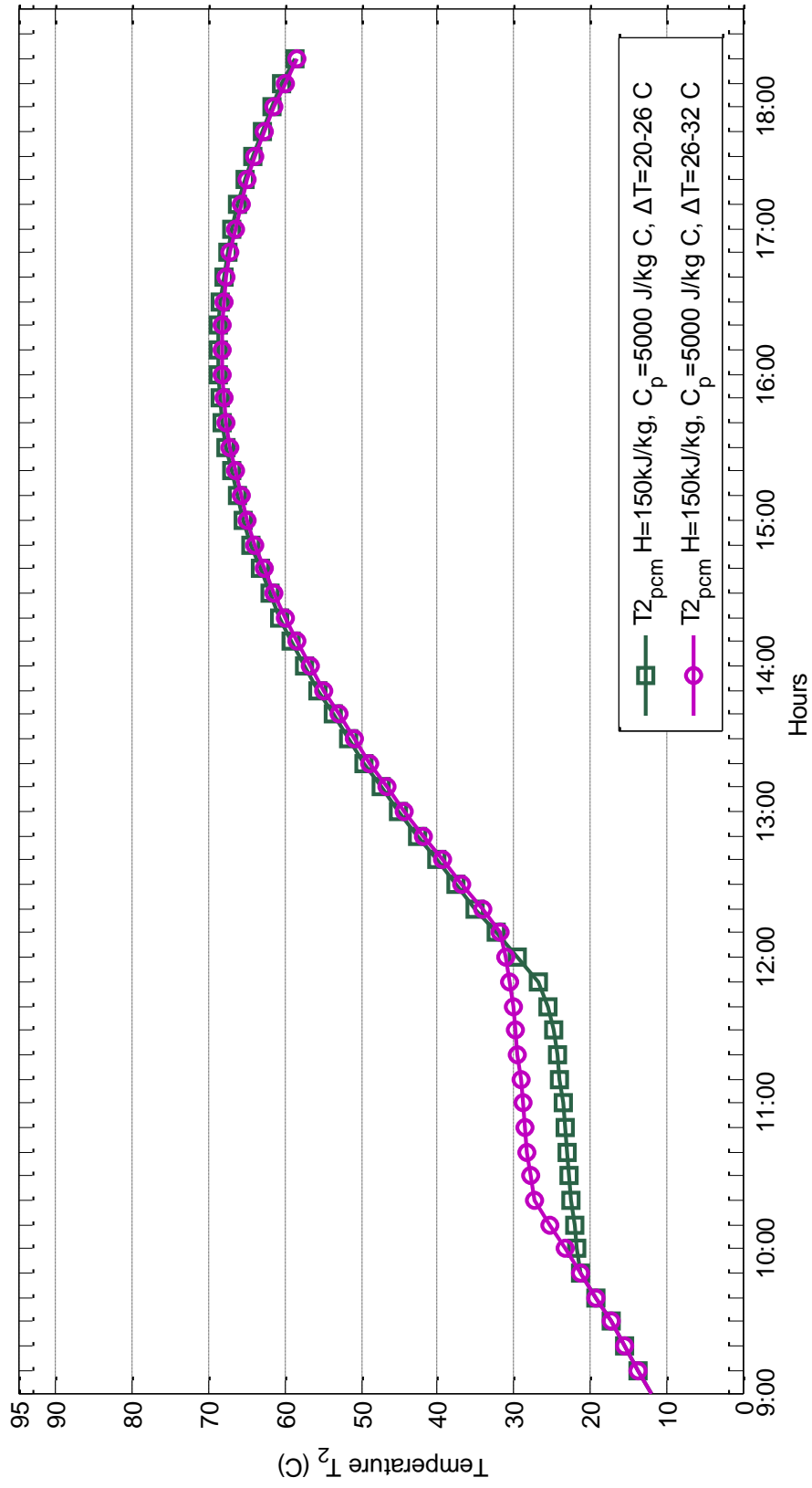
Διατηρώντας την λανθάνουσα θερμότητα τήξης H=150 kJ/kg σταθερή και την ειδική θερμοχωρητικότητα C<sub>p</sub>=5000 kJ/kg °C επίσης σταθερή, μεταβάλλουμε την θερμοκρασία στην οποία ξεκινά η αλλαγή φάσης καθώς και αυτή στην οποία ολοκληρώνεται από τους 20-26 °C στους 26-32 °C. Κάνοντας χρήση των σχέσεων που έχουν δοθεί σε προηγούμενα κεφάλαιο:

$$Q_u = A_c F_R [G_\tau(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] ,$$

$$Q_u \Delta t = m C_p (T_2 - T_1) ,$$

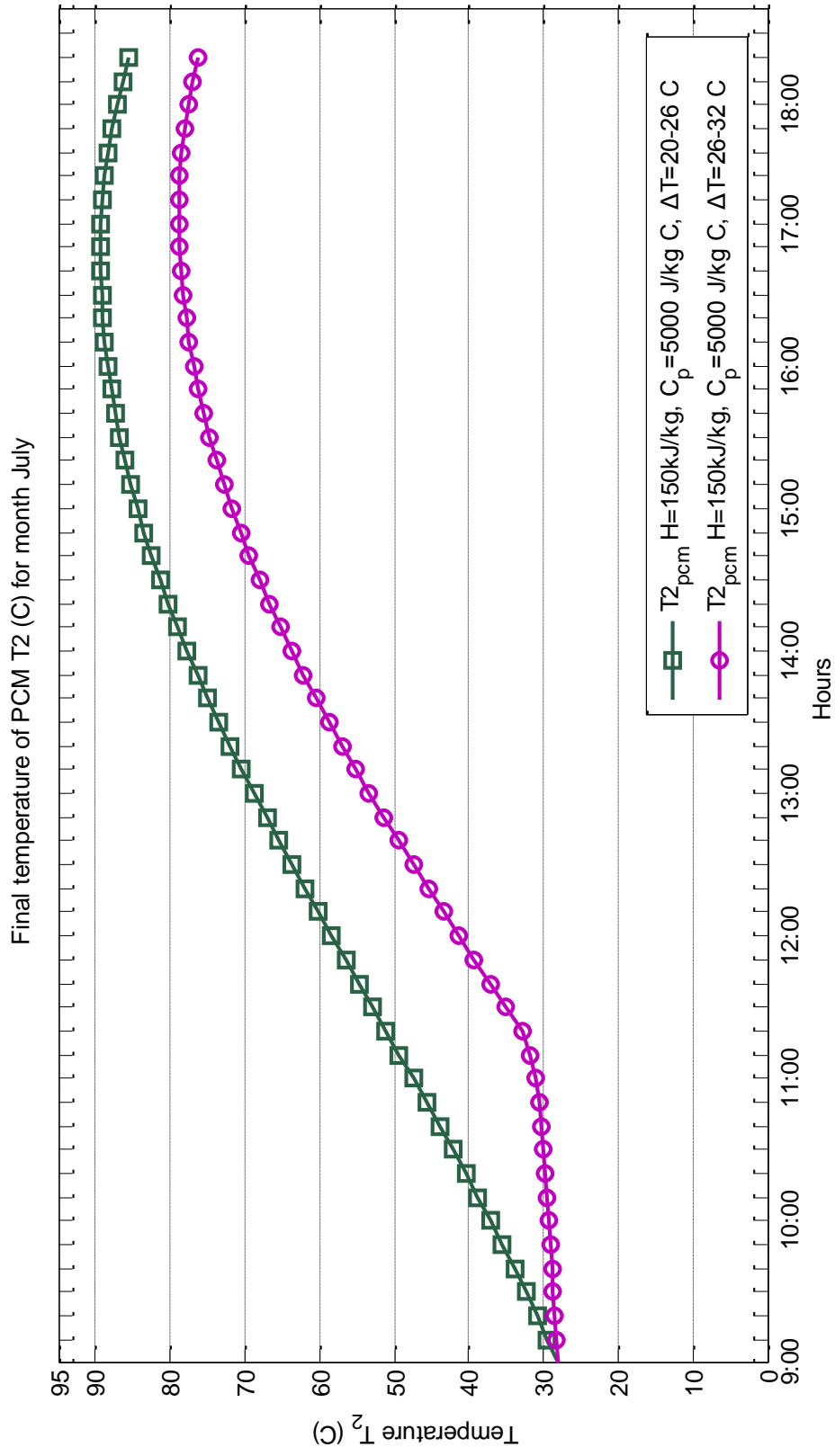
και με την χρήση της Matlab προκύπτουν τα παρακάτω συγκριτικά διαγράμματα. Επιλέγεται ενδεικτικά η παράθεση των διαγραμμάτων των ημερών 21<sup>ης</sup> Μαρτίου, 21<sup>ης</sup> Ιουλίου και 21<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου καθώς οι συγκεκριμένοι παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Οι υπόλοιποι μήνες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τους παραπάνω μήνες. Αναλυτικότερα οι μήνες Ιούνιος, Ιούλιος και Αύγουστος παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, οι Απρίλιος, Μάιος, Σεπτέμβριος αντίστοιχα ενώ οι υπόλοιποι παρουσιάζουν ομοιότητες με τον Μάρτιο.

Final temperature of PCM T<sub>2</sub> (C) for month March



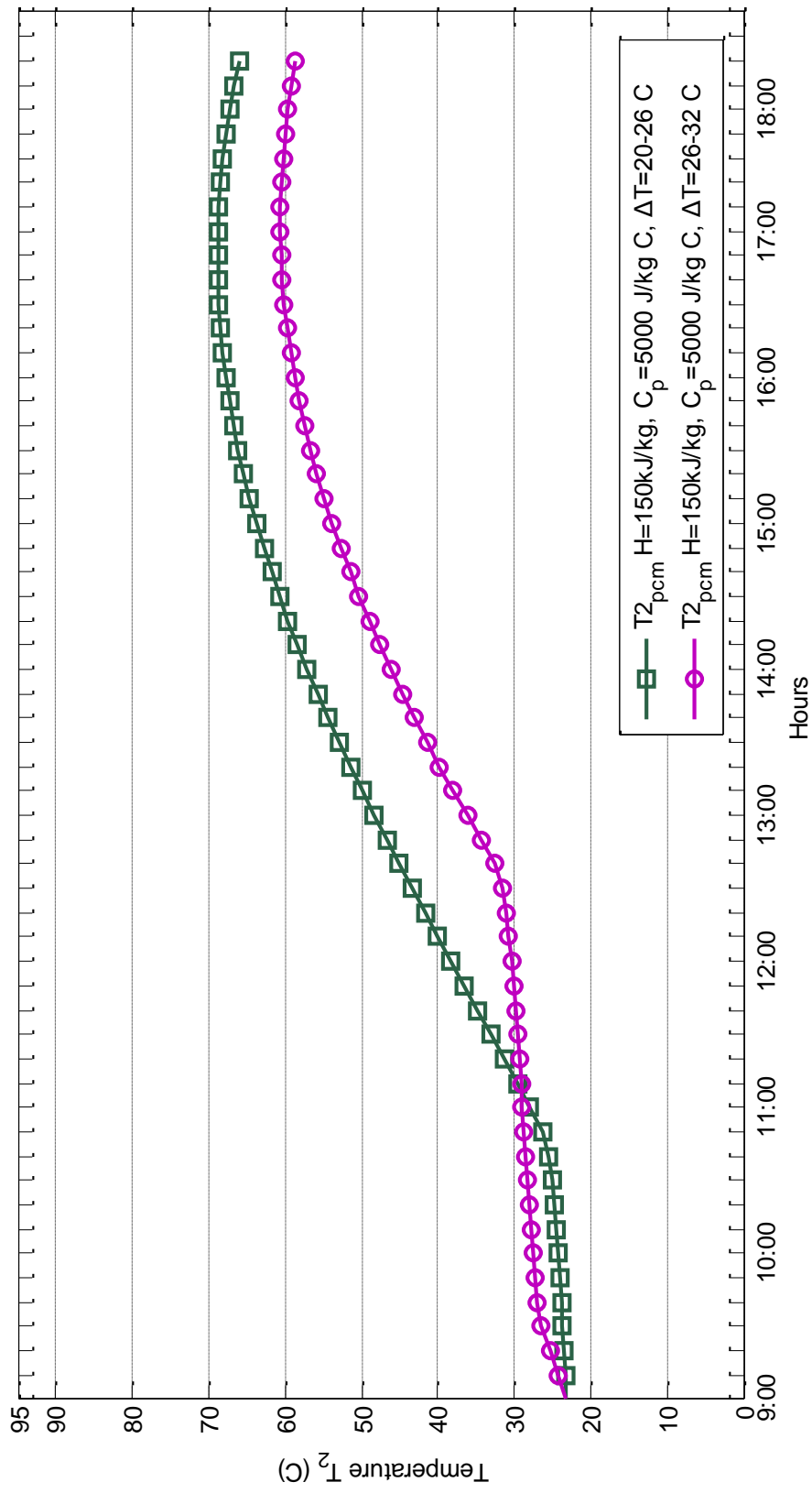
**Διάγραμμα 10.1:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσω PCM, με διαφορετική περιοχή αλλαγής φάσης συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Μαρτίου για χρονικό βήμα 10λεπτά





**Διάγραμμα 10.2:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσω PCM, με διαφορετική περιοχή αλλαγής φάσης συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Ιουλίου για χρονικό βήμα 10λεπτά

Final temperature of PCM T<sub>2</sub> (C) for month September



**Διάγραμμα 10.3:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων PCM, με διαφορετική περιοχή αλλαγής φάσης συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Σεπτεμβρίου για χρονικό βήμα 10λεπτά

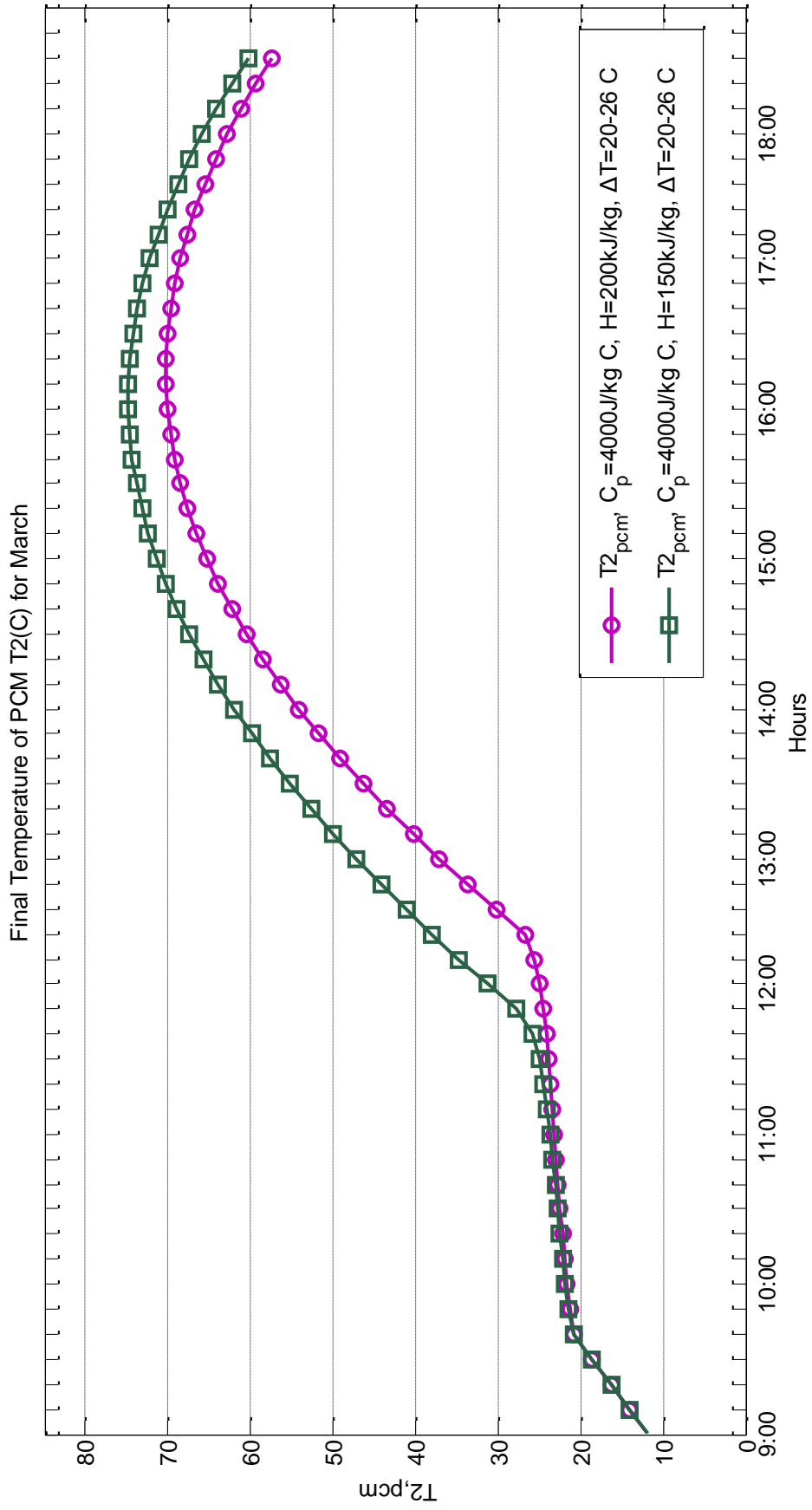
Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα η αύξηση της θερμοκρασίας τήξης προκαλεί μεταβολή στην καμπύλη της θερμοκρασίας την οποία αποκτά το υλικό αλλαγής φάσης. Η μεταβολή αυτή παρουσιάζεται την χρονική στιγμή κατά την οποία το ένα PCM εισέρχεται στην περιοχή αλλαγής φάσης. Συγκεκριμένα την χρονική στιγμή κατά την οποία το 1<sup>ο</sup> PCM με θερμοκρασία τήξης 20 °C φτάνει σε αυτήν την θερμοκρασία, τότε αυτό αρχίζει να αποθηκεύει την θερμότητα που προσλαμβάνει ως λανθάνουσα, ενώ σε αντίθεση το δεύτερο PCM με θερμοκρασία τήξης 26 °C εξακολουθεί να αποθηκεύει αισθητή θερμότητα, πράγμα και το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγαλύτερων θερμοκρασιών. Έτσι λοιπόν αναμένεται να εμφανίζονται υψηλότερες θερμοκρασίες στο PCM με την υψηλότερη θερμοκρασία τήξης, δηλαδή αυτό στο οποίο η υγροποίηση εκκινεί στους 26 °C.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα κατά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου και τα 2 υλικά αλλαγής φάσης ξεκινούν την διαδικασία φόρτισης με μία θερμοκρασία μικρότερη από αυτήν της τήξης και για αυτόν τον λόγο εμφανίζουν ίδιες θερμοκρασίες. Στην συνέχεια όμως στην τιμή των 20 °C παρατηρείται διαφοροποίηση των δύο καμπυλών για τον λόγο που επεξηγήσαμε προηγουμένως. Κατά την διάρκεια της 21<sup>ης</sup> Ιουλίου παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες τις οποίες λαμβάνουν τα PCM είναι μεγαλύτερες σε αυτό το PCM με θερμοκρασία τήξης 20-26 °C. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η θερμοκρασία έναρξης της διαδικασίας φόρτισης του 1<sup>ου</sup> PCM είναι μεγαλύτερη από της θερμοκρασίας πλήρους υγροποίησης, ενώ το 2<sup>ο</sup> PCM ξεκινά την διαδικασία φόρτισης με μία θερμοκρασία μέσα στο εύρος της περιοχής αλλαγής φάσης. Για τον παραπάνω λόγο το 1<sup>ο</sup> PCM εμφανίζει θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτές του 2<sup>ου</sup> PCM. Τέλος κατά την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου παρατηρείται ότι ενώ στην αρχή οι θερμοκρασίες του PCM με περιοχή αλλαγής φάσης  $\Delta T=26-32$  °C είναι μεγαλύτερες από αυτές του PCM με  $\Delta T=20-26$  °C, στην συνέχεια το PCM με  $\Delta T=20-26$  °C παρουσιάζει μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Όπως παρατηρείται το PCM με  $\Delta T=20-26$  °C στην έναρξη της φόρτισης του βρίσκεται στην περιοχή αλλαγής φάσης και για αυτό τον λόγω αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα ενώ το PCM με  $\Delta T=26-32$  °C αποθηκεύει αισθητή καθώς η θερμοκρασία έναρξης είναι μικρότερη των 26 °C. Κατά την 10:50 πμ και το PCM με  $\Delta T=26-32$  °C εισέρχεται στην περιοχή αλλαγής φάσης και αποθηκεύει και αυτό λανθάνουσα θερμότητα, για αυτό και παρατηρείται και μικρή διαφορά μεταξύ των καμπυλών. Όμως κατά την 12:50μμ το PCM με  $\Delta T=20-26$  °C βρίσκεται πλέον και υγρή μορφή και αποθηκεύει αισθητή θερμότητα για αυτό παρατηρείται μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του, ενώ το PCM με  $\Delta T=26-32$  °C μέχρι τις 11:20 μμ υφίσταται αλλαγή φάσης και συνεπώς μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του. Το παραπάνω υλικό αλλαγής φάσης με περιοχή αλλαγής φάσης 26-32 °C μπορεί να

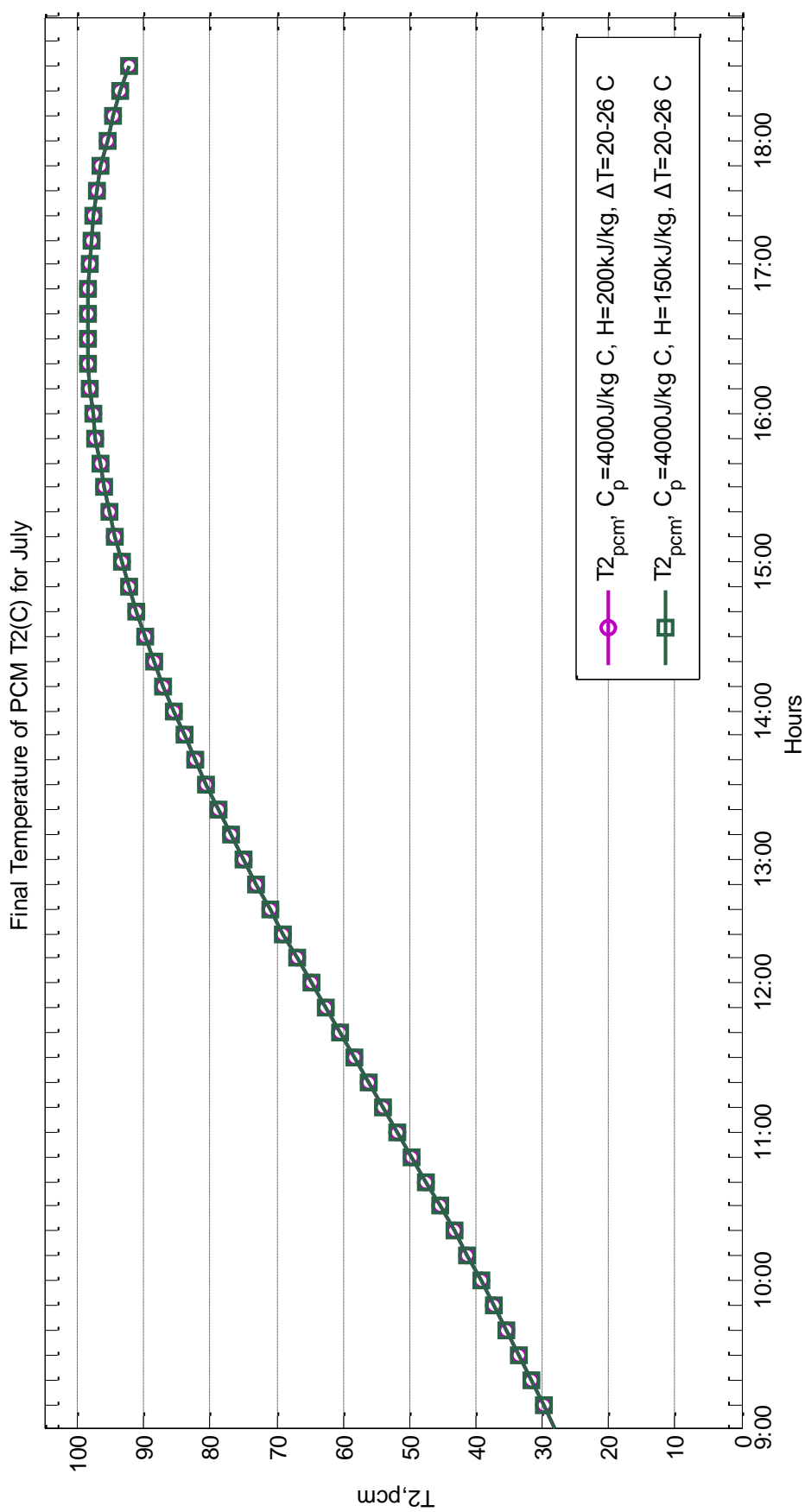
χρησιμοποιηθεί στην εγκατάσταση καθώς παρατηρούμε ότι κατά την διάρκεια των θερινών μηνών που έχουμε το πρόβλημα πολύ υψηλών θερμοκρασιών η μεταβολή αυτή της περιοχής αλλαγής φάσης προκαλεί μικρή τους μείωση, πράγμα το οποίο επιθυμούμε για να μην φτάσει το νερό σε σημείο βρασμού. Τέλος παρατηρούμε πχ για τον μήνα Μάρτιο, παρομοίως και για τους υπόλοιπους μήνες, να εμφανίζονται υψηλότερες θερμοκρασίες κατά τις πρωινές ώρες. Έτσι λοιπόν κατά την 11<sup>η</sup> πμ ενώ το PCM με περιοχή αλλαγής φάσης 20-26 °C, συνεπώς και το νερό, έχει θερμοκρασία 23<sup>ο</sup> C, το PCM με περιοχή αλλαγής φάσης 26-32 °C βρίσκεται στους 29 °C. Με αυτήν την μεταβολή λοιπόν μπορούμε να επιτύχουμε υψηλότερες θερμοκρασίες κατά την διάρκεια των πρωινών ωρών όπου συνήθως εμφανίζονται μειωμένες θερμοκρασίες και κυρίως κατά τους χειμερινούς μήνες. Τέλος το ποσό θερμότητας που αποθηκεύεται στο PCM με περιοχή αλλαγής φάσης 26-32<sup>ο</sup>C είναι μεγαλύτερο καθώς εμφανίζονται χαμηλότερες θερμοκρασίες πράγμα το οποίο σημαίνει ότι αποθηκεύει μεγάλα ποσά θερμότητας υπό μορφή λανθάνουσας.

## **10.2. Μεταβολή της λανθάνουσας θερμότητας τήξης H**

Σε αυτήν την παράγραφο μελετάμε την επίδραση που έχει η μεταβολή της λανθάνουσας θερμότητας τήξης H στην θερμοκρασία την οποία αποκτά το υλικό αλλαγή φάσης μετά το τέλος της διαδικασίας φόρτισης. Έτσι λοιπόν διατηρώντας σταθερή την ειδική θερμοχωρητικότητα  $C_p=4000\text{J/kg } ^\circ\text{C}$  και την περιοχή αλλαγής φάσης του υλικού  $\Delta T= 20-26 ^\circ\text{C}$  μεταβάλλουμε την λανθάνουσα θερμότητα τήξης από  $H=150\text{kJ/kg}$  σε  $H=200\text{kJ/kg}$ .



**Διάγραμμα 10.4:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων PCM, με διαφορετικό Η συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Μαρτίου για χρονικό βήμα 10λεπτά



**Διάγραμμα 10.5:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσω PCM, με διαφορετικό H συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Ιουλίου για χρονικό βήμα 10λεπτά

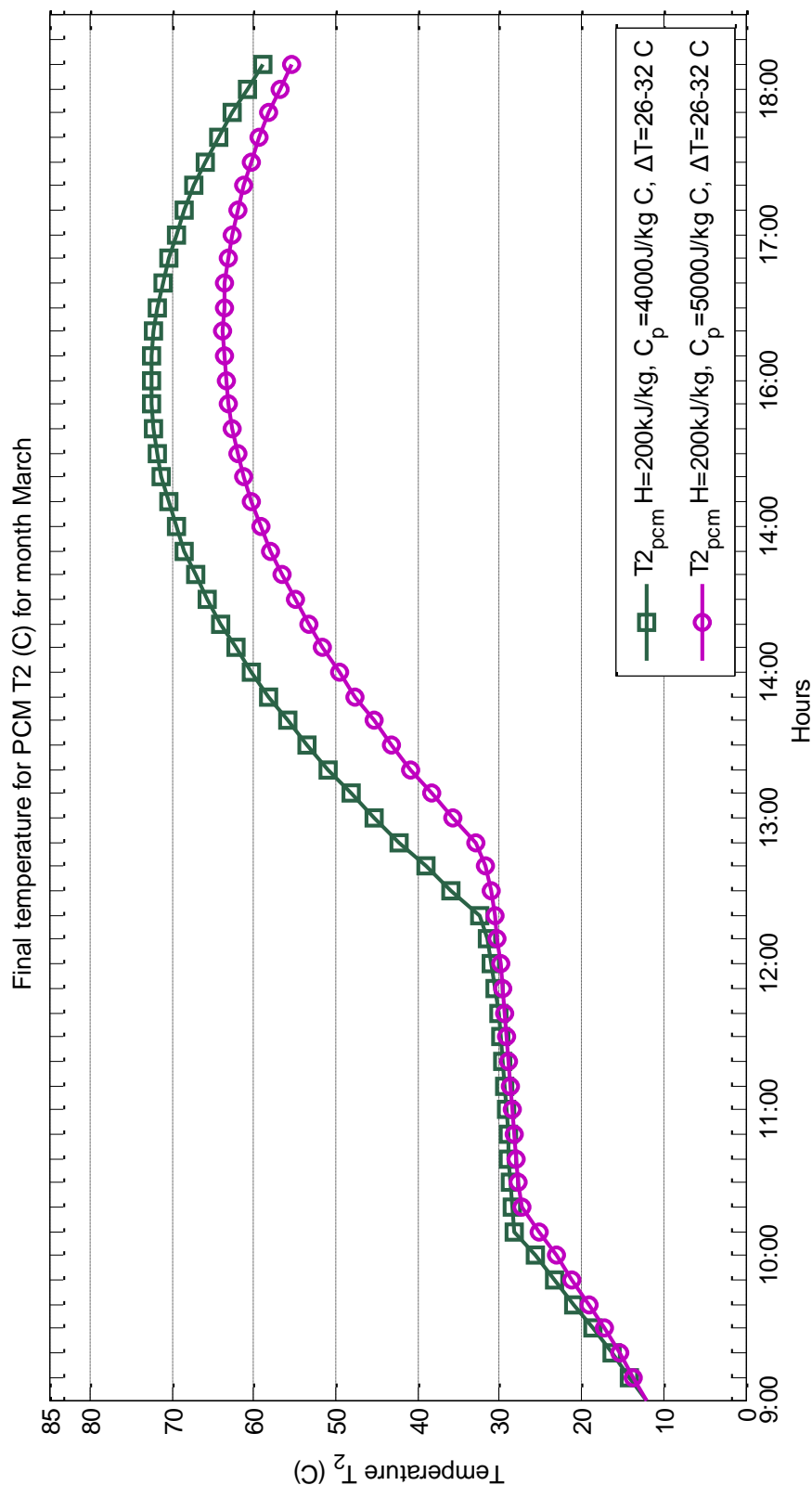
Επιλέγεται η παράθεση των παραπάνω διαγραμμάτων των συγκεκριμένων μηνών καθώς οι υπόλοιποι μήνες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτούς. Έτσι λοιπόν η 21<sup>η</sup> ημέρα των μηνών Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου, Μαρτίου, Απριλίου, Μαΐου, Σεπτεμβρίου, Οκτωβρίου, Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά, επίσης παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν η 21<sup>η</sup> ημέρα των μηνών Ιουνίου, Ιουλίου και Αυγούστου.

Όπως γνωρίζουμε η λανθάνουσα θερμότητα τήξης εκφράζει το ποσό της λανθάνουσας θερμότητας το οποίο πρέπει να απορροφήσει το υλικό αλλαγής φάσης ούτως ώστε από στερεή κατάσταση να επέλθει σε υγρή. Έτσι λοιπόν αναμένουμε την επίδραση της μεταβολής της λανθάνουσας θερμότητας τήξης να εμφανίζεται στην περιοχή αλλαγή φάσης, ενώ οι περιοχές στις οποίες το PCM αποθηκεύει αισθητή θερμότητα να παραμένουν αμετάβλητες.

Όπως διακρίνεται στα παραπάνω διαγράμματα κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών και συγκεκριμένα κατά την διάρκεια της 21<sup>ης</sup> Ιουλίου δεν παρουσιάζεται μεταβολή της καμπύλης με την αύξηση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης καθώς το υλικό αλλαγής φάσης κατά την έναρξη της διαδικασίας φόρτισής του βρίσκεται σε υγρή μορφή και το ποσό θερμότητας το οποίο απορροφά το αποθηκεύει με μορφή αισθητής θερμότητας που συνεπάγεται και παράλληλα μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του. Επίσης κατά την διάρκεια της 21<sup>ης</sup> Μαρτίου παρατηρείται ταύτιση των δύο καμπυλών μέχρι την θερμοκρασία των 20 °C. Από το σημείο αυτό και ύστερα παρατηρείται μία μικρή διαφορά των θερμοκρασιών με την παράλληλη αύξηση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η αύξηση του  $H$  παρατείνει την παραμονή του PCM στην περιοχή αλλαγής φάσης. Παραδείγματος χάριν με  $H=150\text{kJ/kg}$  η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται από την 9:20πμ μέχρι 11:30μμ ενώ με λανθάνουσα θερμότητα τήξης  $H=200\text{kJ/kg}$  η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται από τις 9:20πμ μέχρι 12:30μμ. Τέλος παρατηρούνται κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών ιδιαίτερα αυξημένες θερμοκρασίες, γύρω στους 100°C πράγμα το οποίο δεν είναι αποδεκτό καθώς το νερό από αυτή την θερμοκρασία και ύστερα αρχίζει να βράζει. Επομένως το συγκεκριμένο PCM δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή την εφαρμογή με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά επίπεδου ηλιακού συλλέκτη .

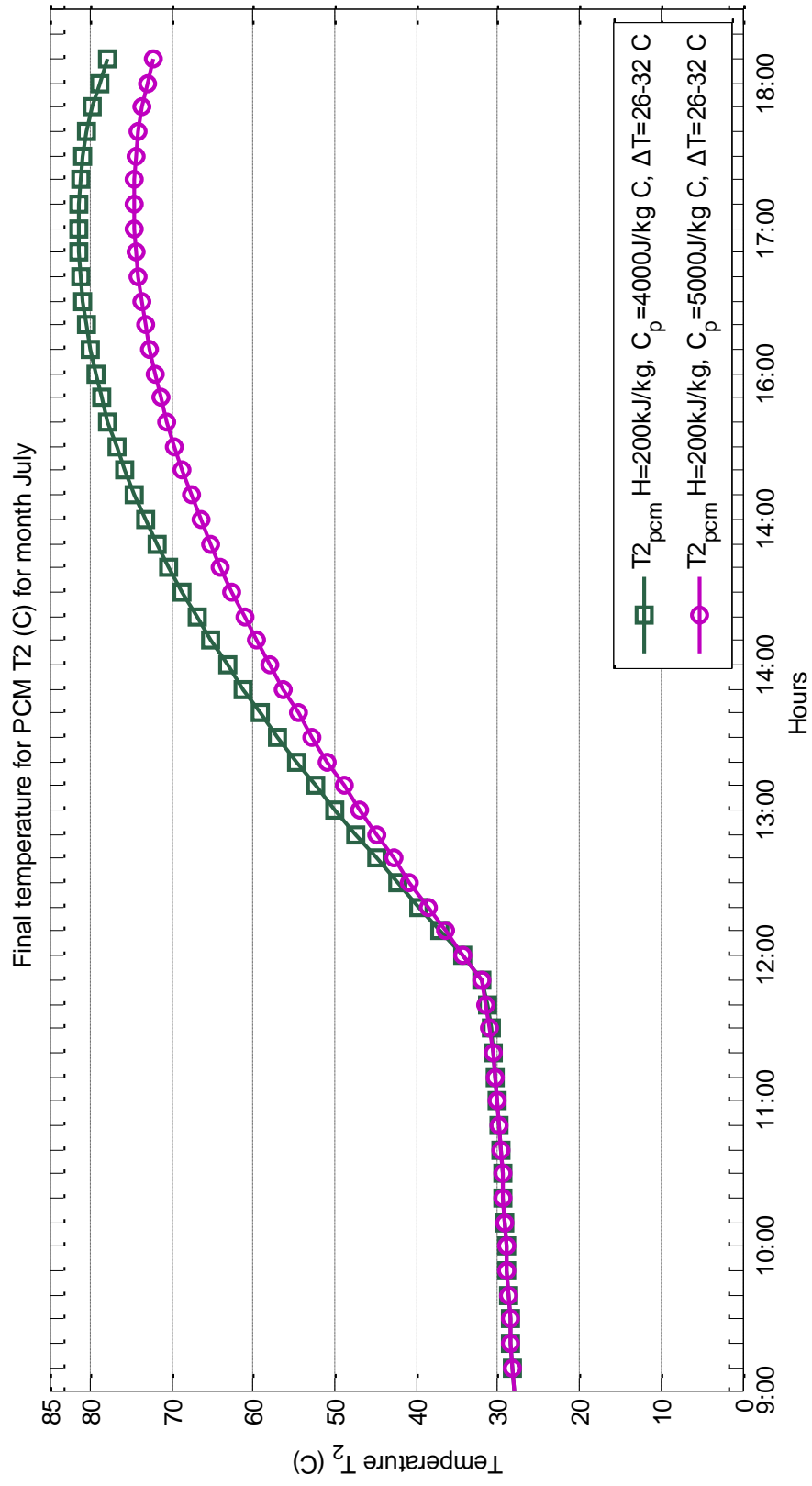
### **10.3. Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας $C_p$**

Στην συνέχεια διατηρώντας σταθερές την λανθάνουσα θερμότητα τήξης  $H=200\text{kJ/kg}$  και τις θερμοκρασίες στις οποίες πραγματοποιείται η αλλαγή φάσης  $\Delta T=26-32\text{ }^\circ\text{C}$  μεταβάλουμε την ειδική θερμοχωρητικότητα  $C_p$  και προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα.



**Διάγραμμα 10.6:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσω PCM, με διαφορετική ειδική θερμοχωρητικότητα συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> ημέρας του Μαρτίου για χρονικό βήμα 10λεπτά





**Διάγραμμα 10.7:** Θερμοκρασία δύο διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων PCM, με διαφορετική ειδική θερμοχωρητικότητα συναρτήσει των ωρών της 2<sup>ης</sup> ημέρας του Ιουλίου για χρονικό βήμα 10λεπτά

Επιλέγουμε ενδεικτικά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου και την 21<sup>η</sup> Ιουλίου καθώς οι υπόλοιπες ημέρες του έτους παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Στις παραπάνω καμπύλες παρατηρούμε ότι υπάρχει μία διαφοροποίηση των καμπυλών σε περιοχές στις οποίες το PCM αποθηκεύει την θερμότητα την οποία λαμβάνει υπό μορφή αισθητής θερμότητας. Ενώ στην περιοχή αλλαγής φάσης οι καμπύλες διαφορετικής ειδικής θερμοχωρητικότητας ταυτίζονται. Μάλιστα οι θερμοκρασίες που αποκτά το PCM είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση που μειώνουμε την ειδική θερμοχωρητικότητα, δηλαδή για  $C_p=4000 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$ .

Εξ ορισμού γνωρίζουμε ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα εκφράζει το ποσό θερμότητας που παράγεται ή απορροφάται (στην προκειμένη περίπτωση απορροφάται) όταν η θερμοκρασία του μεταβληθεί κατά έναν βαθμό Κελσίου. Έτσι λοιπόν εφόσον στην περιοχή θερμοκρασιών μικρότερες των  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  και μεγαλύτερες των  $32 \text{ }^\circ\text{C}$  παρουσιάζεται μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας οι καμπύλες διαφοροποιούνται με την μεταβολή του  $C_p$ , και μάλιστα παρουσιάζονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες για  $C_p=4000 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$  καθώς αποθηκεύονται μικρότερα ποσά θερμότητας σε σχέση με το PCM το οποίο έχει  $C_p=5000 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$ . Ενώ στην περιοχή στην οποία το PCM αλλάζει φάση η επίδρασή του  $C_p$  είναι μικρή καθώς οι μεταβολή της θερμοκρασίας είναι μικρή. Με την αύξηση του  $C_p$  παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας. Αυτή η μείωση της θερμοκρασίας είναι επιθυμητή κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών όμως κατά τους χειμερινούς μήνες είναι ανεπιθύμητο λόγω των ήδη χαμηλών θερμοκρασιών που επικρατούν. Τέλος μπορούμε να πούμε ότι το PCM με μεγαλύτερο  $C_p$  έχει την ικανότητα να αποθηκεύει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται.

## **Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα**

Στην παρούσα διπλωματική αρχικά μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός υλικού αλλαγής φάσης (PCM), δηλαδή μελετήθηκαν οι θερμοκρασίες τις οποίες αποκτά αυτό καθώς και το νερό της δεξαμενής και το συνολικό ποσό ενέργειας το οποίο απορροφάται. Όμως λόγω των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών που προέκυψαν κατά την διάρκεια κυρίως του χειμώνα μεταβάλαμε κάποια χαρακτηριστικά της εγκατάστασης προκειμένου να μπορέσουμε να αξιοποιήσουμε αυτήν την θερμότητα που απορροφάται από το PCM για οικιακές χρήσεις.

Οι μεταβολές αυτές αφορούν κυρίως τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη καθώς επιλέξαμε καλύτερης ποιότητας επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες και την δεξαμενή που χρησιμοποιούμε ενώ το PCM παρέμεινε το ίδιο. Στην δεύτερη περίπτωση η εγκατάσταση αποτελείται από δύο πανομοιότυπες δεξαμενές του μισού όγκου της αρχικής και κάθε μία περιέχει την μισή ποσότητα PCM σε σχέση με την αρχική. Με αυτήν την τροποποίηση αυτή παρατηρούμε ότι επιτυγχάνουμε την αύξηση της θερμοκρασίας του PCM συνεπώς και του νερού κατά την διάρκεια των πρωινών και μεσημεριανών ωρών χωρίς όμως να αυξάνονται άνω των  $100^{\circ}\text{C}$  κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, το οποίο είναι ανεπιθύμητο. Στην συνέχεια μελετάται η παραπάνω εγκατάσταση θεωρώντας ότι η δεξαμενή προμηθεύει μία ξενοδοχειακή μονάδα με θερμό νερό. Μελετώντας τις θερμοκρασίες που προκύπτουν παρατηρούμαι μία σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του PCM συνεπώς και του νερού προς χρήση εφόσον ένα σημαντικό μέρος της θερμότητας που λαμβάνεται χρησιμοποιείται για την θέρμανση του νερού. Βέβαια η εγκατάσταση μπορεί να αποτελέσει μοναδική πηγή θέρμανσης του νερού για αρκετές ώρες της ημέρας και κυρίως κατά την διάρκεια των μηνών της άνοιξης και του καλοκαιριού σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.

Επίσης γίνεται και η σύγκριση του υλικού αλλαγής φάσης με άλλο αποθηκευτικό μέσο το νερό. Μπορούμε να καταλήξουμε με βεβαιότητα ότι το PCM αποτελεί την καλύτερη επιλογή καθώς έχει την ικανότητα να αποθηκεύσει μεγάλα ποσά θερμότητας τα οποία μπορούν να αποδοθούν σε ώρες της ημέρας με χαμηλή ηλιοφάνεια ή με καθόλου. Τέλος μελετήσαμε την επίδραση που έχουν κάποια χαρακτηριστικά του υλικού αλλαγής φάσης στην αποθηκευτική του ικανότητα. Η επιλογή του κατάλληλου PCM αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα στο οποίο όλες οι παράμετροί του πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά. Σε κάθε εφαρμογή το υλικό

αλλαγής φάσης διαφέρει και πρέπει να είναι έχει την ικανότητα να αποδίδει τα ποσά θερμότητας που απαιτούνται.

## Παράρτημα

Δίνεται ο κώδικας της Matlab που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς.

```
M=[9.384 10.984 11.955 15.072 20.724 26.192 28.08 27.880 23.236 18.144 11.968
9.264];
C1=[-1.673 -2.15 -1.898 -2.668 -2.796 -3.393 -3.359 -3.113 -3.31 -2.63 -1.3 -1.11];
C2=[0.711 0.785 0.651 0.727 0.759 1.115 0.811 0.884 1.035 1.085 0.616 0.521];
C3=[0.0085 -0.107 -0.0097 0.269 0.0926 0.156 0.272 0.067 -0.0495 -0.144 -0.252 -
0.152];
S1=[-1.723 -1.75 -1.084 -1.763 -1.344 -2.196 -2.077 -1.978 -1.696 -1.427 -0.317 -
0.881];
S2=[0.524 0.578 0.256 0.243 0.119 -0.139 0.134 0.486 0.477 0.604 0.629 0.333];
S3=[-0.241 -0.072 -0.0093 0.212 0.308 0.157 0.14 0.361 0.221 0.138 -0.049 0.008];

for j=1:12
    for i=1:18
        Ta(i,j)=M(1,j)+C1(1,j)*cos(360*pi*(i+6-
0.5)/(180*24))+C2(1,j)*cos(2*360*pi*(i+6-0.5)/(180*24))+C3(1,j)*cos(3*360*pi*(i+6-
0.5)/(180*24))+S1(1,j)*sin(360*pi*(i+6-0.5)/(180*24))+S2(1,j)*sin(2*360*pi*(i+6-
0.5)/(180*24))+S3(1,j)*sin(3*360*pi*(i+6-0.5)/(180*24));
    end
end

x1=1:18;

y1=Ta;

xi1=1:18/108:18;

Tai=interp1(y1,xi1);

Mt=[0.007 0.057 0.119 0.191 0.258 0.319 0.342 0.325 0.269 0.183 0.078 -0.025];
At=[0.046 0.068 0.104 0.129 0.153 -0.181 -0.194 0.183 0.166 0.147 0.131 0.114];
Pt=[86.18 87.31 87.94 88.31 89.35 -88.88 -89.18 87.21 86.22 82.1 79.85 77.36];
mt=[0.048 0.134 0.208 0.261 0.283 0.271 0.243 0.21 0.176 0.141 0.104 0.051];
at=[0.111 0.127 0.133 0.129 0.117 0.095 0.081 0.083 0.087 -0.085 -0.079 0.091];
pt=[81.23 82.45 83.94 85.6 86.05 82.71 81.95 87.23 89.53 -88.19 -88.97 86.79];

for i=1:12

    n=[21 52 80 111 141 172 202 233 264 294 325 355];

    for j=1:12

        Gb(i,j)=Mt(1,i)+At(1,i)*sin((360*n(1,j)/365-Pt(1,i))*pi/180);

        Gd(i,j)=mt(1,i)+at(1,i)*sin((360*n(1,j)/365-pt(1,i))*pi/180);

        if Gb(i,j)<0 ;

            Gb(i,j)=0;
```

```

        end

        if Gd(i,j)<0;

            Gd(i,j)=0;

        end

        Gb(10,1)=0;

    end

end

n=[21 52 80 111 141 172 202 233 264 294 325 355];

for j=1:12

    d(1,j)=23.45*sin(360*(284+n(1,j))*pi/(365*180));

end

f=37.97;

b=37.97;

w=[-75 -60 -45 -30 -15 0 15 30 45 60 75 90];

for i=1:12

    for j=1:12

        Rb(i,j)=(sin(d(1,j)*pi/180)*sin((f-
b)*pi/180)+cos(d(1,j)*pi/180).*cos(w(1,i)*pi/180)*cos((f-
b)*pi/180))./(sin(d(1,j)*pi/180)*sin(f*pi/180)+cos(d(1,j)*pi/180).*cos(w(1,i)*pi/18
0)*cos(f*pi/180));

    end

end

for i=1:12

    for j=1:12

Gt(i,j)=Gb(i,j).*Rb(i,j)+Gd(i,j)*(0.5+cos(b*pi/180)/2)+(Gb(i,j)+Gd(i,j))*(0.5-
cos(b*pi/180)/2);

        if Gt(i,j)<0;

            Gt(i,j)=0;

        end

```

```

    end

end

Gt(1,:) = 0;

Gt(2,:) = 0;

Gt(12,:) = 0;

Gt(11,1) = 0;

Gt(11,2) = 0;

Gt(11,11) = 0;

Gt(11,12) = 0;

Gt(13,:) = 0;

Gt(13:18,1:12) = 0;

x = 1:18;

y = Gt;

xi = 1:18/108:18;

Gti = interp1(y, xi);

Ts = 20;

Tl = 26;

Cps = 5000;

Cpl = 5000;

H = 150000;

Tc = 23;

bm = 6;

for T = 1:12

    if T+17 <= Ts

        Cp(1, T) = Cps;

    elseif T+17 > Ts & T+17 <= Tc

        Cp(1, T) = (4 * (H - bm * Cps) * (T+17 - Ts)) / (bm^2) + Cps;
    end
end

```

```

elseif T+17>Tc & T+17<Tl
    Cp(1,T) = (4*(bm*Cp1-H) * (T+17-Ts-bm/2)) / (bm^2)+2*H/(bm) -Cp1;

else
    Cp(1,T)=Cp1;

end

end

Ac=18;

Frta= 0.7;

FrUl=4.5;

m=600;

Dt=600;

T2(1,1)=9.384;
T2(1,2)=10.984;
T2(1,3)=11.955;
T2(1,4)=15.072;
T2(1,5)=20.724;
T2(1,6)=26.192;
T2(1,7)=28.08;
T2(1,8)=27.880;
T2(1,9)=23.236;
T2(1,10)=18.144;
T2(1,11)=11.968;
T2(1,12)=9.264;

Cp(1,1)=5000;
Cp(1,2)=5000;
Cp(1,3)=5000;
Cp(1,4)=5000;

```



```

Cp(1,5)=14653.3;
Cp(1,6)=5000;
Cp(1,7)=5000;
Cp(1,8)=5000;
Cp(1,9)=41853.3;
Cp(1,10)=5000;
Cp(1,11)=5000;
Cp(1,12)=5000;

for j=1:12
    for i=1:103
        Qu(i,j)=Ac*(Frta*Gti(i,j)-FrUl/(1000)*(T2(i,j)-Tai(i,j))); %se Kw
        if T2(i,j)<=Ts
            Cp(i,j)=Cps;
        elseif T2(i,j)>Ts & T2(i,j)<=Tc
            Cp(i,j)=(4*(H-bm*Cps)*(T2(i,j)-Ts))/(bm^2)+Cps;
        elseif T2(i,j)>Tc & T2(i,j)<Tl
            Cp(i,j)=(4*(bm*Cpl-H)*(T2(i,j)-Ts-bm/2))/(bm^2)+2*H/(bm)-Cpl;
        else
            Cp(i,j)=Cpl;
        end
        T2(i+1,j)=1000*Dt*Qu(i,j)./(Cp(i,j)*m)+T2(i,j);
        if Qu(i,j)<0
            Qu(i,j)=0;
        end
    end
end

for j=1:12

```

```

    SQu(j)=sum(Qu(:,j));
end
T2k(1,1)=9.384;
T2k(1,2)=10.984;
T2k(1,3)=11.955;
T2k(1,4)=15.072;
T2k(1,5)=20.724;
T2k(1,6)=26.192;
T2k(1,7)=28.08;
T2k(1,8)=27.880;
T2k(1,9)=23.236;
T2k(1,10)=18.144;
T2k(1,11)=11.968;
T2k(1,12)=9.264;
mk=20*50/64800;
Cpk=4190;
for j=1:12
    for i=1:102
        Quk(i,j)=Ac*(Frta*Gti(i,j)-FrU1/(1000)*(T2k(i,j)-Tai(i,j)));
        if T2k(i,j)<=Ts
            Cp(i,j)=Cps;
        elseif T2k(i,j)>Ts & T2k(i,j)<=Tc
            Cp(i,j)=(4*(H-bm*Cps)*(T2k(i,j)-Ts))/(bm^2)+Cps;
        elseif T2k(i,j)>Tc & T2k(i,j)<Tl
            Cp(i,j)=(4*(bm*Cpl-H)*(T2k(i,j)-Ts-bm/2))/(bm^2)+2*H/(bm)-Cpl;
        else
            Cp(i,j)=Cpl;
        end
    end
end

```

```

T2k(i+1,j)=(Quk(i,j)*1000+mk*Cpk*15+m*Cp(i,j)*T2k(i,j)/Dt)/(mk*Cpk+m*Cp(i,j)/Dt);

    if Qu(i,j)<0
        Qu(i,j)=0;

    end

end

end

T2w(1,1)=9.384;
T2w(1,2)=10.984;
T2w(1,3)=11.955;
T2w(1,4)=15.072;
T2w(1,5)=20.724;
T2w(1,6)=26.192;
T2w(1,7)=28.08;
T2w(1,8)=27.880;
T2w(1,9)=23.236;
T2w(1,10)=18.144;
T2w(1,11)=11.968;
T2w(1,12)=9.264;

Cpw=4190;
mw=750;

for j=1:12
    for i=1:103
        Quw(i+1,j)=Ac*(Frta*Gti(i,j)-FrU1/1000*(T2w(i,j)-Tai(i,j)));
        T2w(i+1,j)=1000*Dt*Quw(i,j)./(Cpw*mw)+T2w(i,j);

        if Quw(i,j)<0
            Quw(i,j)=0

        end

    end

end

```

```
end
```

```
for j=1:12
```

```
    SQuw(j)=sum(Quw(:,j));
```

```
end
```

## Βιβλιογραφία

- [1] Liwu Fan, J.M. Kodadadi, Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage, *Renewable and sustainable energy reviews*, 2010(24-46)
- [2] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, Energy storage systems—Characteristics and Comparisons, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.12, 2008(1221-1250)
- [3] Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 2009 (318-345)
- [4] Antoni Gil, Marc Medrano, Ingrid Martorell, Ana La´zaro, Pablo Dolado, Bele´n Zalba, Luisa F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation.Part 1—Concepts, materials and modellization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, 2010 (31-35)
- [5] S.D. Sharma, Kazunobu Sagara, Latent heat storage materials and systems: A Review, *International Journal of Green Energy*, Vol.2, 2005 (1–56)
- [6]<http://www.eolss.net/ebooks/Sample%20Chapters/C08/E3-14-02-00.pdf>
- [7][http://www.cepe.ethz.ch/publications/workingPapers/CEPE\\_WP24.pdf](http://www.cepe.ethz.ch/publications/workingPapers/CEPE_WP24.pdf)
- [8] A. Felix Regin\_, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol.12, 2008(2438-2458)
- [9] Murat Kenisarin, Khamid Mahkamov, Solar energy storage using phase change materials, *Renewable and sustainable energy Reviews*, Vol.11, 2007(1913-1965)
- [10] Frederic Kuznik, Damien David, Kevyn Johannes, Jean-Jacques Roux, A review on phase change materials integrated in building walls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, 2011 (379-391)
- [11] V.V. Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, (2007) 1146–1166
- [12][http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy\\_studies/content/docs/FINAL\\_PAPERS/4B-4.pdf](http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/FINAL_PAPERS/4B-4.pdf)
- [13] Yinping Zhang, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, Hongfa Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, *Building and Environment*, Vol. 42, 2007 (2197–2209)

- [14] [wwwswt.informatik.uni-rostock.de](http://wwwswt.informatik.uni-rostock.de)
- [15] <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2002/Thermal1.pdf>
- [16] [http://www.solarbuildings.ca/c/sbn/file\\_db/Doc\\_File\\_e/Long%20term%20performance%20of%20the%20phase%20change%20material.pdf](http://www.solarbuildings.ca/c/sbn/file_db/Doc_File_e/Long%20term%20performance%20of%20the%20phase%20change%20material.pdf)
- [16] <http://www.cibse.org/pdfs/Latent%20heat%20storage.pdf>
- [17] [http://talon.stockton.edu/eyos/energy\\_studies/content/docs/effstock09/Session\\_4\\_2\\_PCM\\_in\\_Buildings/31.pdf](http://talon.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_4_2_PCM_in_Buildings/31.pdf)
- [18] S. Jegadheeswaran, Sanjay D. Pohekar, Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 2009 (2225–2244)
- [19] Francis Agyenim, Neil Hewitt, Philip Eames, Mervyn Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, 2010 (615-628)
- [20] <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2002/papers/020.pdf>
- [21] Yvan Dutil, Daniel R. Rousse, Nizar Ben Salah, Stephane Lassue, Laurent Zalewski, A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, 2011 (112–130)
- [22] [https://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Numerical\\_simulation\\_of\\_melting\\_and\\_solidification](https://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Numerical_simulation_of_melting_and_solidification)
- [23] Piia Lamberg, Reijo Lehtiniemi, Anna-Maria Henell, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 43, 2004 (277–287)
- [24] Amir Faghri, Yuwen Zhang, *Transport phenomena in multiphase systems*, Springer 2006
- [25] <http://en.wikipedia.org/wiki/Supercooling>
- [26] B. Sandnes, J. Rekstad, Supercooling salt hydrates: Stored enthalpy as a function of temperature, *Solar energy*, Vol. 80, 2006 (616-625)
- [27] Xing-xiang Zhang, Yao-feng Fan, Xiao-ming Tao, Kit-lun Yick, Crystallization and prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 281, (2005) 299–306
- [28] İbrahim Dinçer, Marc A. Rosen, *Thermal energy storage systems and applications*, Wiley 2002

- [29][http://researchspace.ukzn.ac.za/xmlui/bitstream/handle/10413/106/Zulu\\_NM\\_2010.pdf?sequence=1](http://researchspace.ukzn.ac.za/xmlui/bitstream/handle/10413/106/Zulu_NM_2010.pdf?sequence=1)
- [30][https://scholarbank.nus.edu.sg/bitstream/handle/10635/13553/MYA\\_MYA\\_KHIN\\_M.ENG\\_THESIS.pdf?sequence=1](https://scholarbank.nus.edu.sg/bitstream/handle/10635/13553/MYA_MYA_KHIN_M.ENG_THESIS.pdf?sequence=1)
- [31][http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/Session%20PDFs/35\\_New.pdf](http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/Session%20PDFs/35_New.pdf)
- [32] P. Schossig, H.-M. Henning, S. Gschwander, T. Haussmann, Microencapsulated phase change materials Integrated into construction materials, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 89, 2005 (297-306)
- [33][http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy\\_studies/content/docs/FINAL\\_PAPERS/8B-4.pdf](http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/FINAL_PAPERS/8B-4.pdf)
- [34] V.V. Tyagi, S.C.Kaushik, S.K.Tyagi, T.Akiyama, Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010
- [35] Nihal Sarier, Emel Onder, The manufacture of microencapsulated phase change materials suitable for the design of thermally enhanced fabrics, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), *Thermochimica acta* 452, 2007 (149-160)
- [36] Huanzhi Zhang, Xiaodong Wang, Dezhen Wu, Silica encapsulation of n-octadecane via sol-gel process: A novel microencapsulated phase-change material with enhanced thermal conductivity and performance, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 343, 2010 (246-255)
- [37] [http://www.sid.ir/en/VEWSSID/J\\_pdf/813201011804.pdf](http://www.sid.ir/en/VEWSSID/J_pdf/813201011804.pdf)
- [38] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, 2008 (39–64)
- [39] Yinping Zhang, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, Hongfa Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, *Building and Environment*, Vol. 42, 2007 (2197–2209)
- [40] H. Mehling, S. Hiebler, L. F. Cabeza, News on the applications of PCMs for heating and cooling systems, ZAE Bayern, Div. of Energy conversion and storage, Germany
- [41] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, 2007 (1146–1166)
- [42]<http://www.fskab.com/annex17/Workshops/EM6%20Arvika/Presentations/Metivaud.pdf>
- [43] Dariusz Heim, Isothermal storage of solar energy in building construction, *Renewable Energy*, Vol. 35, 2010 (788–796)

- [44] Na Zhu, Zhenjun Ma, Shengwei Wang, Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, 2009 (3169–3181)
- [45]<http://www.zju.edu.cn/jzus/2006/A0608/A060817.pdf>
- [46]<http://www.scribd.com/doc/34650181/water-based-Thermal-Storage>
- [47] Anant Shukla, D. Buddhi, R.L. Sawhney, Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13 2009 (2119–2125)
- [48] Mahmud M. Alkilani, K. Sopian, M.A. Alghoul, M. Sohif, M.H. Ruslan, Review of solar air collectors with thermal storage units, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, 2011 (1476–1490)
- [49][http://www.eurojournals.com/ejsr\\_27\\_3\\_03.pdf](http://www.eurojournals.com/ejsr_27_3_03.pdf)
- [50] M.J. Huang, P.C. Eames and B. Norton ,Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics, 2005
- [51] Harald Mehling-Luisa F. Cabeza, *Heat and cold Storage with PCM, an up to date introduction into basics and applications*, Springer 2008
- [52]<http://www.teappcm.com/applications.htm>
- [53]<http://ezinearticles.com/?Pcm-In-Textiles&id=367030>
- [54] Θερμικά-ηλιακά συστήματα, Κ. Αντωνόπουλος, 2004
- [55] Budihardjo I., Morrison D. L., Performance of water – in – glass evacuated tube solar water heaters, *Solar Energy* , Vol.83, 2009 (49 – 56)
- [56] Kulkarni N. Govind, Kedare B. Shireesh, Bandyopandhyay, Determination of design space and optimization of solar water heating system, *Solar Energy*, Vol. 81, 2007 (958-968)
- [57] Κλιματισμός, Κ. Αντωνόπουλος ,2004
- [58][http://www.tisoft.com/totee2010\\_klimatika\\_dedomena\\_ellhnikon\\_perioxon.html](http://www.tisoft.com/totee2010_klimatika_dedomena_ellhnikon_perioxon.html)
- [59]<http://ecologic-architecture.org/main/index.php?id=79&L=1>



