



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ  
ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) ΣΤΗΝ  
ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

Μαρία Π. Καραμέρου

Επιβλέπων: Κίμων Α. Αντωνόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2011





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παραμετρική μελέτη ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού χρήσης  
με υλικά αλλαγής φάσης (PCM) στην περιοχή της Αθήνας

Μαρία Π. Καραμέρου

Επιβλέπων: Κίμων Α. Αντωνόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2011

## Περίληψη

Η χρήση ενός συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με τη βοήθεια υλικών αλλαγής φάσης (ΥΑΦ), είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Η παρούσα εργασία, παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά των υλικών αλλαγής φάσης και συνοψίζει τις κυριότερες εφαρμογές τους στα κτίρια, με ιδιαίτερη έμφαση στην ηλιακή θέρμανση νερού χρήσης. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η χρήση ΥΑΦ σε ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού χρήσης, με τη μελέτη ενός θεωρητικού μοντέλου εγκατάστασης για τους ψυχρότερους μήνες του έτους. Το θεωρούμενο μοντέλο εγκατάστασης, μελετάται για τέσσερα εμπορικά υλικά και για διαφορετικές παραμέτρους. Στόχος είναι να διαπιστωθούν οι δυνατότητες θερμικής αποθήκευσης των υλικών αλλαγής φάσης καθώς κι η προοπτική να αποτελέσουν μια βιώσιμη λύση για την ιδιαίτερα ενεργοβόρα εφαρμογή της θέρμανσης νερού χρήσης.

**Λέξεις – κλειδιά:** Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ), Συστήματα Αποθήκευσης Λανθάνουσας Θερμότητας, ηλιακή θέρμανση νερού χρήσης

## **Abstract**

Using a latent heat storage system by means of phase change materials (PCM) s is an effective way of storing thermal energy. This paper presents the basic characteristics of PCMs and summarizes their main applications in buildings with emphasis on solar water heating. In particular, this paper investigates the use of PCMs in a solar domestic water heating model system. The model system is studied in relation to four commercial materials and against different parameters, for the colder months of the year. The aim is to identify the potential of PCMs in thermal storage as well as their possibility to comprise a sustainable solution for the highly energy consuming application of water heating.

**Key - words:** Phase Change Materials (PCM)s, Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES) Systems, solar domestic water heating

## Ευχαριστίες

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Κίμωνα Αντωνόπουλο, για την ανάθεση του θέματος, την πολύτιμη καθοδήγηση και το χρόνο που μου διέθεσε για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συμφοιτήτρια και φίλη μου Μαρία Καλαδάμη, για την άριστη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης των διπλωματικών μας εργασιών.

Ακόμη, ευχαριστώ από καρδιάς την καλή μου φίλη Κωνσταντίνα Διαμαντογιάννη, για την ευγενική της χειρονομία να επιμεληθεί το εξώφυλλο και το σχήμα της θεωρούμενης εγκατάστασης.

Τέλος, είναι σημαντικό για μένα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου κι ιδιαίτερα την αδερφή μου Αθανασία καθώς και τους φίλους μου, για τη βοήθεια που μου προσέφεραν, την ενθάρρυνση και στήριξή τους.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	2
Abstract .....	3
Ευχαριστίες.....	4
Περιεχόμενα .....	5
Πίνακας Διαγραμμάτων .....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> . ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> . ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ .....	17
2.1. Μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.....	17
2.1.1. Αποθήκευση αισθητής θερμότητας .....	18
2.1.2. Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας κι αλλαγή φάσης .....	19
2.1.2.1. Αλλαγή φάσης μιας καθαρής ουσίας.....	20
Αλλαγή φάσης στερεού - υγρού .....	21
Αλλαγή στην κρυσταλλική δομή ενός στερεού μέσου .....	21
Αλλαγή φάσης υγρού - αερίου .....	21
2.1.2.2. Αλλαγή φάσης ενός μίγματος .....	22
2.1.2.3. Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης.....	24
2.1.2.3.1. Το πρόβλημα Stefan.....	24
2.1.2.3.2. Μέθοδοι επίλυσης.....	25
Η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας.....	26
Η μέθοδος ενθαλπίας .....	27
2.2. Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ) .....	28
2.2.1. Χαρακτηριστικές θερμικές ιδιότητες ΥΑΦ .....	29
2.2.2. Μέτρηση θερμικών ιδιοτήτων ΥΑΦ .....	31
2.2.2.1. Η μέθοδος Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης.....	31
Θέρμανση και ψύξη με σταθερό ρυθμό .....	32
Ισοθερμική θέρμανση και ψύξη .....	32
2.2.2.2. Η μέθοδος T – history .....	33
2.2.3. Κατηγοριοποίηση των ΥΑΦ .....	34

2.2.3.1. Οργανικά ΥΑΦ.....	35
Παραφίνες .....	36
Μη παραφίνες.....	37
2.2.3.2. Ανόργανα ΥΑΦ.....	37
Ένυδρα άλατα.....	37
Μεταλλικά άλατα.....	39
Εύτηκτα μίγματα.....	39
2.3. Το Σύστημα Αποθήκευσης Λανθάνουσας Θερμότητας (ΣΑΛΘ).....	39
2.3.1. Κύρια στοιχεία συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.....	39
2.3.1.1. Το ΥΑΦ .....	40
2.3.1.1.1. Επιθυμητές ιδιότητες ΥΑΦ σε ένα ΣΑΛΘ.....	40
2.3.1.1.2. Συχνά προβλήματα ΥΑΦ σε ένα ΣΑΛΘ και βασικές προσεγγίσεις επίλυσής τους.....	42
Το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων .....	42
Το φαινόμενο της υπόψυξης (subcooling).....	44
Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.....	45
2.3.1.2. Τοποθέτηση του ΥΑΦ στο ΣΑΛΘ - Το δοχείο αποθήκευσης.....	47
2.3.1.2.1. Τοποθέτηση ΥΑΦ σε δεξαμενή αποθήκευσης - εναλλάκτη ..	48
2.3.1.2.2. Τοποθέτηση ΥΑΦ σε μακροκάψουλες .....	50
2.3.1.2.3. Τοποθέτηση ΥΑΦ σε μικροκάψουλες .....	53
2.3.1.2.4. Ενσωμάτωση ΥΑΦ σε σύνθετα υλικά .....	55
2.3.1.2.5. Συμβατότητα ΥΑΦ με βασικά υλικά.....	55
2.3.1.3. Η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας.....	56
2.3.1.3.1. Πειραματικές διατάξεις εναλλακτών θερμότητας με ΥΑΦ ...	57
2.3.1.3.2. Εμπορικοί εναλλάκτες με προσθήκη ΥΑΦ .....	59
2.3.2. Εφαρμογές ΣΑΛΘ – εμπορικά ΥΑΦ.....	63
2.3.2.1. Εφαρμογές θερμικής άνεσης και θερμικής αποθήκευσης .....	63
2.3.2.2. Κύριες εφαρμογές ΥΑΦ σε κτίρια .....	63
Τοίχος Trombe με ΥΑΦ .....	64
ΥΑΦ σε γυψοσανίδες.....	66
ΥΑΦ σε ταβάνια κι οροφές.....	67
ΥΑΦ σε παντζούρια .....	70
ΥΑΦ σε συστήματα θέρμανσης χώρων με εργαζόμενο μέσο το νερό... ..	70
ΥΑΦ σε συστήματα θέρμανσης χώρων με εργαζόμενο μέσο τον αέρα ..	71

ΥΑΦ σε συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης .....	72
Μπετόν ενισχυμένο με ΥΑΦ .....	75
Μονωτικά υλικά κτιρίων ενισχυμένα με ΥΑΦ .....	76
2.3.2.3. ΥΑΦ ενσωματωμένα σε υφάσματα για θερμική άνεση .....	76
2.3.2.4. Ιατρικές εφαρμογές ΥΑΦ .....	78
2.3.2.5. ΥΑΦ σε οχήματα.....	79
2.3.2.6. Άλλες εφαρμογές ΥΑΦ.....	80
2.3.2.7. Εμπορικά ΥΑΦ και προϊόντα.....	81

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>. ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ:

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΥΑΦ .....	84
3.1. Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης.....	84
3.2. Περιγραφή τεχνολογίας.....	85
3.3. Τύποι ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού χρήσης.....	86
3.3.1. Συστήματα φυσικής κυκλοφορίας (παθητικά συστήματα).....	87
3.3.1.1. Ολοκληρωμένο σύστημα συλλέκτη - αποθήκευσης.....	87
3.3.1.2. Θερμοσιφωνικό σύστημα.....	89
3.3.2. Συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (ενεργητικά συστήματα) .....	90
3.3.2.1. Ανοιχτού βρόχου .....	90
3.3.2.2. Κλειστού βρόχου .....	91
Αντιψυκτικό σύστημα (γλυκόλης υπό πίεση).....	91
Σύστημα drainback.....	92
3.4. Ο ηλιακός συλλέκτης.....	94
3.5. Η ηλιακή δεξαμενή αποθήκευσης .....	96
3.5.1. Λειτουργία.....	96
3.5.2. Μέγεθος και σχήμα.....	97
3.5.3. Θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση στο εσωτερικό της δεξαμενής.....	98
3.5.3.1. Τεχνικές ενίσχυσης της θερμικής διαστρωμάτωσης κατά τη φόρτιση.....	99
3.5.3.2. Τεχνικές διατήρησης της θερμικής διαστρωμάτωσης κατά την αποφόρτιση/κατανάλωση .....	102
3.6. Εφαρμογές ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού – περιβαλλοντικά οφέλη.....	106
3.7. ΥΑΦ σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης – ανασκόπηση μελετών....	107



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΜΕ ΥΑΦ .....	117
4.1. Σκοπός της εφαρμογής.....	117
4.2. Ερωτήματα που αναμένεται να απαντηθούν .....	118
4.3. Βασικοί ορισμοί μεγεθών και συμβολισμοί.....	118
4.4. Περιγραφή του μοντέλου .....	120
4.4.1. Η εγκατάσταση.....	120
4.4.1.1. Τα υποψήφια ΥΑΦ .....	122
4.4.1.2. Ο ηλιακός συλλέκτης.....	124
4.4.1.3. Η δεξαμενή αποθήκευσης νερού .....	125
4.4.2. Ο χρόνος.....	125
4.4.3. Ο τόπος κι η συνθήκες περιβάλλοντος .....	126
4.4.3.1. Τοποθεσία .....	126
4.4.3.2. Ηλιακή ακτινοβολία.....	126
4.4.3.3. Θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος .....	131
4.4.3.4. Θερμοκρασία νερού του δικτύου .....	133
4.4.4. Το μοντέλο κατανάλωσης θερμού νερού.....	133
4.5. Παραμετρική μελέτη.....	134
4.5.1. Μεθοδολογία .....	134
4.5.2. Σενάριο 1 <sup>ο</sup> .....	138
4.5.2.1. Καθορισμός παραμέτρων.....	138
4.5.2.2. Αποτελέσματα .....	139
4.5.2.3. Παρατηρήσεις.....	147
4.5.3. Σενάριο 2 <sup>ο</sup> .....	150
4.5.3.1. Καθορισμός παραμέτρων.....	150
4.5.3.2. Αποτελέσματα .....	151
4.5.3.3. Παρατηρήσεις.....	158
4.5.4. Σενάριο 3 <sup>ο</sup> .....	160
4.5.4.1. Καθορισμός παραμέτρων.....	160
4.5.4.2. Αποτελέσματα .....	161
4.5.4.3. Παρατηρήσεις.....	168
4.5.5. Σενάριο 4 <sup>ο</sup> .....	170
4.5.5.1. Καθορισμός παραμέτρων.....	170

4.5.5.2. Αποτελέσματα .....	171
4.5.5.3. Παρατηρήσεις.....	178
4.5.6. Επιλογή υλικού και λοιπών χαρακτηριστικών της εγκατάστασης.....	179
4.5.7. Λειτουργία της εγκατάστασης για την περίοδο από Νοέμβριο έως κι Απρίλιο .....	180
4.6. Υπεροχή του συστήματος με ΥΑΦ έναντι του συμβατικού ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού.....	185
4.7. Συμπεράσματα.....	190
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>192</b>
5.1. Περίληψη συμπερασμάτων.....	192
5.2. Αξιολόγηση.....	192
5.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	193
Βιβλιογραφία .....	195
Παράρτημα .....	202

## Πίνακας Διαγραμμάτων

<b>Σχ. 4.1.</b> Σχηματική απεικόνιση της θεωρούμενης εγκατάστασης .....	121
<b>Σχ. 4.2.</b> Ωριαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου στην περιοχή της Αθήνας, την 21 <sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο .....	128
<b>Σχ. 4.3.</b> Ωριαία έμμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου στην περιοχή της Αθήνας, την 21 <sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο .....	129
<b>Σχ. 4.4.</b> Ωριαία ολική ακτινοβολία που προσπίπτει στο συλλέκτη, την 21 <sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο .....	130
<b>Σχ. 4.5.</b> Ωριαία θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος στην περιοχή της Αθήνας, την 21 <sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο .....	132
<b>Σχ. 4.6.</b> Ωριαία κατανάλωση θερμού νερού σε οικία κατά τη διάρκεια του 24ώρου .....	134
<b>Σχ. 4.7.</b> Τριγωνική συνάρτηση ενεργού θερμοχωρητικότητας .....	135
<b>Σχ. 4.8.</b> Πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 1).....	140
<b>Σχ. 4.9.</b> Διαδοχικές επαναλήψεις για την εύρεση λύσης (σενάριο 1).....	141
<b>Σχ. 4.10.</b> Θερμοκρασία υλικών συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 1).....	142
<b>Σχ. 4.11.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT21 (σενάριο 1).....	143
<b>Σχ. 4.12.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT27 (σενάριο 1).....	144
<b>Σχ. 4.13.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT58 (σενάριο 1).....	145
<b>Σχ. 4.14.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας SP25A8 (σενάριο 1).....	146
<b>Σχ. 4.15.</b> Πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 2).....	152
<b>Σχ. 4.16.</b> Θερμοκρασία υλικών συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 2).....	153
<b>Σχ. 4.17.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT21 (σενάριο 2).....	154
<b>Σχ. 4.18.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT27 (σενάριο 2).....	155
<b>Σχ. 4.19.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT58 (σενάριο 2).....	156

<b>Σχ. 4.20.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας SP25A8 (σενάριο 2).....	157
<b>Σχ. 4.21.</b> Πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 3).....	162
<b>Σχ. 4.22.</b> Θερμοκρασία υλικών συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 3).....	163
<b>Σχ. 4.23.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT21 (σενάριο 3).....	164
<b>Σχ. 4.24.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT27 (σενάριο 3).....	165
<b>Σχ. 4.25.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT58 (σενάριο 3).....	166
<b>Σχ. 4.26.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας SP25A8 (σενάριο 3).....	167
<b>Σχ. 4.27.</b> Πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 4).....	172
<b>Σχ. 4.28.</b> Θερμοκρασία υλικών συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 4).....	173
<b>Σχ. 4.29.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT21 (σενάριο 4).....	174
<b>Σχ. 4.30.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT27 (σενάριο 4).....	175
<b>Σχ. 4.31.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT58 (σενάριο 4).....	176
<b>Σχ. 4.32.</b> Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας SP25A8 (σενάριο 4).....	177
<b>Σχ. 4.33.</b> Πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη της εγκατάστασης με ΥΑΦ, για την 21 <sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο – Απρίλιο.....	182
<b>Σχ. 4.34.</b> Θερμοκρασίες του ΥΑΦ της εγκατάστασης για την 21 <sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο.....	183
<b>Σχ. 4.35.</b> Ισχύς βοηθητικής πηγής για την 21 <sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο	184
<b>Σχ. 4.36.</b> Σύγκριση των θερμοκρασιών της εγκατάστασης με ΥΑΦ και της συμβατικής με νερό, για δύο διαδοχικά 24ωρα του Δεκεμβρίου.....	188
<b>Σχ. 4.37.</b> Σύγκριση της εγκατάστασης με ΥΑΦ και της συμβατικής με νερό, ως προς τη θερμότητα που αποθηκεύουν δύο διαδοχικά 24ωρα του Δεκεμβρίου.....	189

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ολοένα αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας παγκοσμίως έχει εγείρει σοβαρές ανησυχίες που αφορούν την εξάντληση των ενεργειακών πηγών, την αδυναμία κάλυψης των αναγκών και τις σοβαρές περιβαλλοντικές συνέπειες, όπως η τρύπα του όζοντος, το φαινόμενο του θερμοκηπίου κι η κλιματική αλλαγή. Τα στοιχεία της ΙΕΑ (International Energy Agency) για την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας είναι τρομακτικά. Κατά τις δεκαετίες 1984 – 2004 η κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε κατά 49% κι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά 43%, με μια μέση ετήσια αύξηση της τάξης του 2% και 1.9% αντίστοιχα.

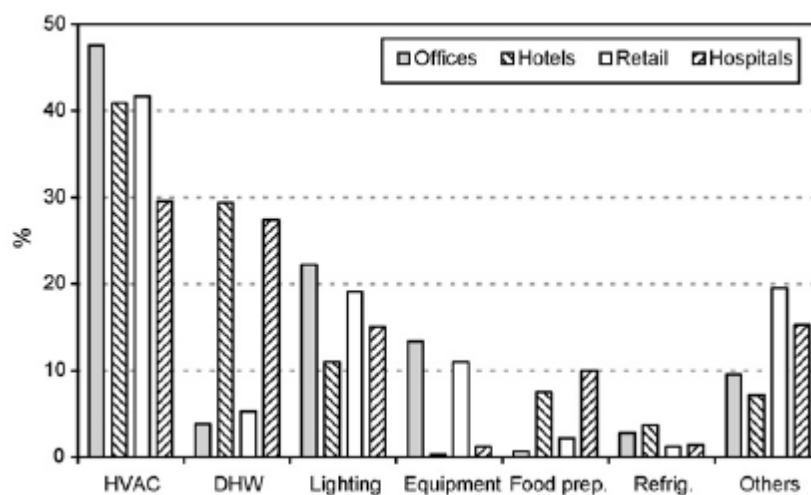
Τα στοιχεία πολλών δεικτών, επιβεβαιώνουν τη σχέση της κατανάλωσης ενέργειας με την οικονομική ανάπτυξη και την αύξηση του πληθυσμού. Η παγκοσμιοποίηση, η βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης κι η ανάπτυξη των δικτύων επικοινωνίας, προωθούν παγκοσμίως το μοντέλο ζωής των ανεπτυγμένων κρατών, αυξάνοντας τις ενεργειακές ανάγκες [9]. Παρόλη τη μικρή μείωση του ρυθμού αύξησης της κατανάλωσης που φαίνεται να συνοδεύει την παρούσα οικονομική κρίση, οι προβλέψεις δείχνουν πως η αυξητική τάση θα συνεχιστεί και τα επόμενα χρόνια. Χωρίς αμφιβολία, η ολοένα αυξανόμενη κατανάλωση θα οδηγήσει στην εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και την επιδείνωση του ενεργειακού προβλήματος. Με αυτήν την έννοια, οι περισσότεροι φορείς που δραστηριοποιούνται στον τομέα της οικονομίας, της ενέργειας και του περιβάλλοντος, συμφωνούν ότι τα υπάρχοντα κοινωνικό – οικονομικά συστήματα είναι μη βιώσιμα.

Παρόλο που τα στοιχεία για την ενεργειακή κατανάλωση στα κτίρια είναι ανεπαρκή, είναι σαφές, ότι τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του πληθυσμού, στην ανάπτυξη του τομέα των υπηρεσιών που περιλαμβάνει όλα τα εμπορικά και δημόσια κτίρια καθώς και στην αύξηση του χρόνου παραμονής στα κτίρια. Το 2004 η ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων στην ΕΕ ήταν 37% της συνολικής, ποσοστό που ξεπερνά το αντίστοιχο των μεταφορών (37%) και της βιομηχανίας (28%) [9].

Η αύξηση των αναγκών για υπηρεσίες, οδήγησε στην ανάγκη για κτίρια πολλών διαφορετικών τύπων (τράπεζες, σχολεία, εστιατόρια, μουσεία, ξενοδοχεία κτλ.), με ποικιλία ενεργειακών αναγκών σε θέρμανση, αερισμό και κλιματισμό (Heating, Ventilation and Air Conditioning – HVAC), θέρμανση νερού χρήσης (Domestic Hot Water – DHW), φωτισμό, ψύξη κι εξοπλισμό.

**Πίνακας 1.1** Ποσοστιαία κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης στον τομέα των κατοικιών [9]

Ποσοστό (%) της συνολικής κατανάλωσης	ΕΕ	ΗΠΑ
Κλιματισμός χώρων	68	53
Θέρμανση νερού χρήσης	14	17
Φωτισμός και συσκευές	18	30



**Σχ.1.1.** Ενεργειακή κατανάλωση για διαφορετικό τύπο κτιρίων [9]

Όπως μπορεί κανείς να διακρίνει από τον πίνακα 1.1 και το σχήμα 1.1, το μεγαλύτερο ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης στα κτίρια, αφορά θερμικές εφαρμογές με σημαντικότερες τον κλιματισμό χώρων και τη θέρμανση νερού χρήσης. Με διαφορά, η κατανάλωση για κλιματισμό χώρων (θέρμανση, ψύξη, αερισμός) στις αναπτυγμένες χώρες ευθύνεται για το 50% της ενεργειακής κατανάλωσης στα κτίρια και 20% της συνολικής. Η θέρμανση νερού χρήσης είναι η δεύτερη πιο σημαντική αιτία κατανάλωσης ενέργειας στις κατοικίες και σε ορισμένες κατηγορίες κτηρίων, όπως τα ξενοδοχεία και τα νοσοκομεία. Στις αναπτυγμένες χώρες, η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση νερού χρήσης ανέρχεται στο 5 – 10 % της συνολικής. Στη χώρα μας που ο τριτογενής τομέας των υπηρεσιών είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένος, το 2005 ο κτιριακός τομέας, ήταν υπεύθυνος για το 44% των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών CO<sub>2</sub>, έχει καταστήσει την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων βασική προτεραιότητα στην ενεργειακή πολιτική πολλών χωρών. Ένα σαφές παράδειγμα, είναι η Ευρωπαϊκή οδηγία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων του 2002 (European Energy Performance of Buildings Directive - EPB) η οποία ενσωματώθηκε στην ελληνική νομοθεσία με το νόμο 3661 του 2008 και τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK) του 2010. Όλες οι προσπάθειες προσανατολίζονται τόσο στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, όσο και στην αξιοποίηση ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών.

Στο πλαίσιο λοιπόν της προσπάθειας αποτελεσματικής αξιοποίησης ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, η ηλιακή ενέργεια αποτελεί την καλύτερη λύση για κτιριακές εφαρμογές, εξαιτίας της φυσιογνωμίας των αναγκών που είναι βασικά θερμικές. Η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο εύκολα αξιοποιήσιμη για θερμικές εφαρμογές με πληθώρα εφαρμογών παγκοσμίως.

Η ηλιακή ενέργεια στα κτίρια αξιοποιείται με συστήματα είτε παθητικά είτε ενεργητικά. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα είναι δομικά στοιχεία του κτιρίου, που, αξιοποιώντας τους νόμους μεταφοράς θερμότητας, συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν σε μορφή θερμότητας και τη διανέμουν στο χώρο. Η συλλογή της ηλιακής ενέργειας βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και ειδικότερα, στην είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του γυαλιού ή άλλου διαφανούς υλικού και τον εγκλωβισμό της θερμότητας στο εσωτερικό του χώρου. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα συνδυάζονται και με τεχνικές φυσικού φωτισμού καθώς και παθητικά συστήματα και τεχνικές για το φυσικό δροσισμό των κτιρίων το καλοκαίρι. Μπορούν δε να εφαρμοστούν τόσο σε καινούργια, όσο και σε ήδη υπάρχοντα κτίρια.

Τα ενεργητικά (ή θερμικά) ηλιακά συστήματα αποτελούν μηχανολογικά συστήματα που συλλέγουν, την ηλιακή ενέργεια, τη μετατρέπουν σε θερμότητα, την αποθηκεύουν και τη διανέμουν, χρησιμοποιώντας είτε κάποιο υγρό είτε αέρα ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας. Χρησιμοποιούνται για θέρμανση νερού οικιακής χρήσης, για τη θέρμανση και ψύξη χώρων, για βιομηχανικές διεργασίες, για αφαλάτωση, για διάφορες αγροτικές εφαρμογές, για θέρμανση του νερού σε πισίνες κ.λπ. Η πιο απλή και διαδεδομένη μορφή των θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι οι γνωστοί σε όλους μας ηλιακοί θερμοσίφωνες. Η χώρα μας είναι η πρώτη χώρα στην Ευρώπη μετά την Κύπρο σε εγκατεστημένους ηλιακούς συλλέκτες ανά κάτοικο [31].

Παρόλο που η ηλιακή ενέργεια μπορεί εύκολα να αξιοποιηθεί για θερμικές εφαρμογές στα κτίρια, έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Οποιοδήποτε ηλιακό σύστημα, συλλέγει ενέργεια μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν υπάρχει ηλιοφάνεια. Ωστόσο, η

ζήτηση για ενέργεια δε συμβαδίζει με τις ώρες που αυτή συλλέγεται, ιδιαίτερα στις οικίες που παρατηρείται μια ζήτηση αιχμής τις απογευματινές και βραδινές ώρες.

Κατά συνέπεια, είναι αναγκαίος ο συσχετισμός παραγωγής και ζήτησης με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας που θα βελτιώσουν την απόδοση των συστημάτων και θα συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Μια από τις πολλά υποσχόμενες τεχνικές αποθήκευσης ενέργειας, ιδιαίτερα εύκολα αξιοποιήσιμη σε ηλιακά συστήματα, είναι η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας με τη βοήθεια υλικών αλλαγής φάσης. Σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, το σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, απαιτεί μικρότερο βάρος και όγκο υλικού, για δεδομένη αποθήκευση ενέργειας. Επιπλέον, τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν θερμότητα σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία μετάβασης του υλικού αλλαγής φάσης από τη μία φάση στην άλλη.

Η έρευνα των υλικών αλλαγής φάσης ξεκίνησε από την Telkes και τον Raymond στη δεκαετία του 1940 αλλά δεν έτυχε μεγάλης προσοχής μέχρι την ενεργειακή κρίση του 1970 και τις αρχές του 1980 όταν κι ερευνήθηκαν για διάφορες εφαρμογές, ιδιαίτερα σε κτίρια για ηλιακή θέρμανση χώρων. Αργότερα, το ενδιαφέρον για τα υλικά αλλαγής φάσης μειώθηκε ξανά, μέχρι πρόσφατα που αναζωπυρώθηκε, μιας κι η ανάγκη για αποτελεσματικές μεθόδους αποθήκευσης είναι επίκαιρη όσο ποτέ.

Το γεγονός ότι τα υλικά αλλαγής φάσης, αποθηκεύουν κατευθείαν θερμική ενέργεια στη μάζα τους, τα καθιστά ιδανικά για αποθήκευση ενέργειας σε ηλιακά συστήματα σε κτίρια. Πριν την ευρεία εφαρμογή της μεθόδου μένει να επιλυθούν σημαντικά ζητήματα, ώστε να μπορούμε να μιλάμε για μια ασφαλή κι ώριμη τεχνολογία.

Ο συνδυασμός που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, είναι αυτός της ευρέως διαδεδομένης κι οικονομικά προσιτής τεχνολογίας του ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού και της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με υλικά αλλαγής φάσης.

Στόχος, είναι ακόμη και μέσα από ένα απλοϊκό μοντέλο εγκατάστασης να διαπιστωθούν οι δυνατότητες θερμικής αποθήκευσης των υλικών αλλαγής φάσης και να εξεταστεί κατά πόσο μπορούν να αποτελέσουν μια βιώσιμη λύση για την ιδιαίτερα ενεργοβόρα εφαρμογή της θέρμανσης νερού χρήσης.

Πιο συγκεκριμένα, στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές που διέπουν την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας κι οι κυριότερες εφαρμογές τους στα κτίρια. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, περιγράφεται η τεχνολογία των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού χρήσης και γίνεται



μα ανασκόπηση στις σημαντικότερες εφαρμογές των ΥΑΦ στα συστήματα αυτά. Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, το θεωρούμενο μοντέλο εγκατάστασης με ΥΑΦ δοκιμάζεται για διαφορετικές παραμέτρους και για τέσσερα διαφορετικά εμπορικά υλικά. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο, συνοψίζονται τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραμετρική μελέτη κι αξιολογείται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

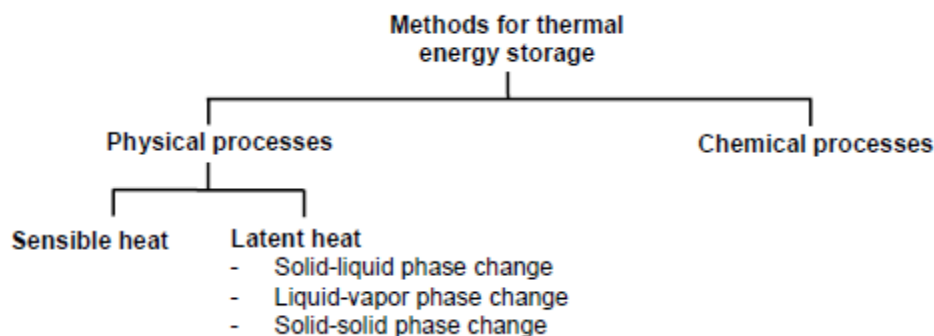
Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές αποθήκευσης θερμότητας και τις μεθόδους με τις οποίες πραγματοποιείται. Ιδιαίτερη έμφαση, δίδεται στην αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας ή στην μεταφορά θερμότητας με αλλαγή φάσης, όπως ακριβέστερα ονομάζεται. Στο κεφάλαιο αυτό, αναπτύσσονται λεπτομερώς οι ιδιότητες και οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης (ΥΑΦ) που χρησιμοποιούνται ως μέσα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

### 2.1. Μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας επιτρέπει την αποθήκευση θερμότητας για να χρησιμοποιηθεί αργότερα. Για να είναι δυνατή η ανάκτηση θερμότητας μετά από ορισμένο χρόνο, η μέθοδος αποθήκευσης πρέπει να είναι αντιστρεπτή [1].

Οι μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορούν να διακριθούν σε φυσικές και χημικές. Οι φυσικές μέθοδοι διακρίνονται σε μεθόδους αποθήκευσης αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας. Τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιούν αισθητή ή λανθάνουσα θερμότητα ή συνδυασμό τους [3].

Το σχήμα 2.1 που ακολουθεί απεικονίζει τη διάκριση των μεθόδων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.



Σχ. 2.1 Πιθανές αντιστρεπτές μέθοδοι αποθήκευσης θερμότητας [1]

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας ή αισθητή αποθήκευση θερμότητας όπως ονομάζεται, έχει εδραιωθεί τεχνικά με πολλές εφαρμογές σε λειτουργία παγκοσμίως. Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης έχει κάποιες ενδογενείς δυσκολίες, όπως μειωμένη ενεργειακή πυκνότητα και διακύμανση της θερμοκρασίας κατά τη διαδικασία της φόρτισης και αποφόρτισης [17]. Με τον όρο φόρτιση και αποφόρτιση εννοούμε την απορρόφηση και αντίστοιχα την απόδοση της θερμότητας από το μέσο αποθήκευσης για την εκάστοτε εφαρμογή.

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας ή λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας, όπως κοινά ονομάζεται, δε διαθέτει προς το παρόν το εύρος εφαρμογών της αισθητής. Παρολαυτά, η βιβλιογραφία είναι εξαιρετικά πλούσια σε έρευνες, μελέτες κι αναφορές σχετικά με την μοντελοποίηση και θερμική ανάλυση εφαρμογών λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας. Αυτά τα συστήματα είναι εξαιρετικά ελκυστικά χάρη στη μεγάλη δυνατότητα αποθήκευσης και τη σχεδόν ισοθερμική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της αποφόρτισης. Μειονέκτημα, ωστόσο, αποτελεί ο μικρός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια της φόρτισης κι αποφόρτισης.

Το υβριδικό σύστημα συνδυάζει αισθητή και λανθάνουσα αποθήκευση, εξομαλύνει τις δυσκολίες και ενσωματώνει κάποια από τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων [17].

### 2.1.1. Αποθήκευση αισθητής θερμότητας [1]

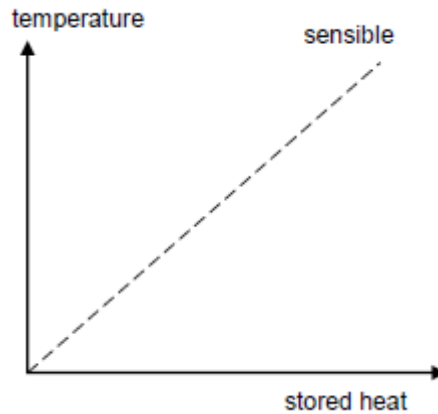
Η πιο κοινή μέθοδος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι με τη μορφή αισθητής θερμότητας. Αισθητή είναι η θερμότητα που όταν μεταφέρεται σε ένα μέσο οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του (Σχ. 2.2). Αυτή η αύξηση θερμοκρασίας μπορεί να ανιχνευτεί από έναν αισθητήρα, γι' αυτό κι η θερμότητα ονομάζεται αισθητή.

Ο λόγος της αποθηκευμένης θερμότητας  $\Delta Q$  προς την αύξηση της θερμοκρασίας του μέσου  $\Delta T$  ονομάζεται θερμοχωρητικότητα του μέσου  $C$ , δηλαδή:

$$\Delta Q = C\Delta T = mc \Delta T$$

Συχνά, η θερμοχωρητικότητα αναφέρεται στην ποσότητα της ύλης, τον όγκο ή τη μάζα και ονομάζεται γραμμομοριακή, ογκομετρική ή μαζική ειδική θερμοχωρητικότητα αντίστοιχα [1]. Γενικά, έχει επικρατήσει με τον όρο ειδική, να αναφέρεται η θερμοχωρητικότητα στη μονάδα της μάζας και γραμμομοριακή, η θερμοχωρητικότητα που αναφέρεται σε ένα mol του υλικού μέσου.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται γι' αυτόν τον σκοπό είναι κυρίως υλικά στερεά όπως το τούβλο και η πέτρα ή υγρά όπως το νερό. Τα αέρια έχουν μικρή ογκομετρική θερμοχωρητικότητα και γι' αυτόν το λόγο δεν χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αισθητής θερμότητας.



**Σχ. 2.2** Αποθήκευση αισθητής θερμότητας οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας

### 2.1.2. Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας κι αλλαγή φάσης

Για την αποθήκευση θερμότητας σε λανθάνουσα μορφή πρέπει να λάβει χώρα το φαινόμενο της αλλαγής φάσης. Κατά την αλλαγή φάσης τα φυσικά χαρακτηριστικά της ουσίας αλλάζουν από μια μορφή σε μια άλλη. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν θερμότητα συναλλάσσεται μεταξύ μιας ουσίας και του περιβάλλοντός της χωρίς να προκύψει αύξηση της θερμοκρασίας αυτής. Η αποθήκευση θερμότητας σε λανθάνουσα μορφή επομένως, δεν μπορεί να ανιχνευτεί από την αύξηση της θερμοκρασίας, γι' αυτό και ονομάζεται λανθάνουσα. Η λανθάνουσα θερμότητα εμφανίζεται με τη μορφή αλλαγής ή σπασίματος των δεσμών που συνδέουν τα μόρια του μέσου, σε αντίθεση με την αισθητή που εμφανίζεται ως αύξηση στην τυχαία κίνηση των μορίων [2].

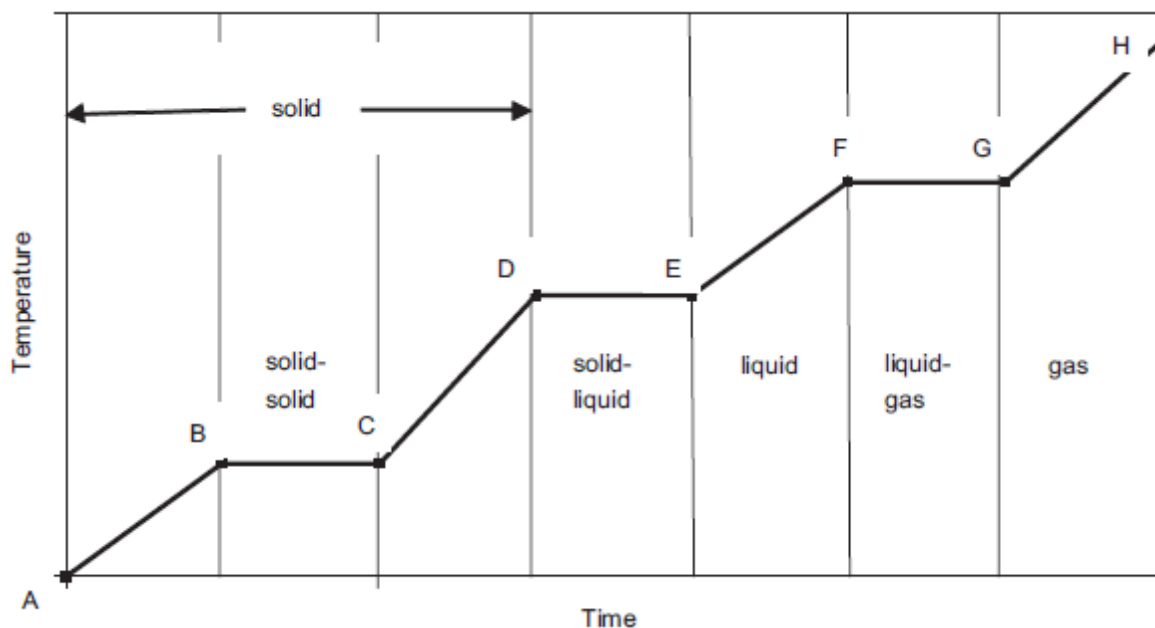
Οι τρεις πιο κοινές καταστάσεις τις ύλης είναι η αέρια, η υγρή κι η στερεά κατάσταση που συχνότερα καλούνται στερεά φάση (solid phase), υγρή φάση (liquid phase) κι αέρια φάση (gas phase) αντίστοιχα. Οι πιο συχνά συναντούμενες αλλαγές φάσης, είναι η αλλαγή φάσης μεταξύ στερεού κι υγρού, η αλλαγή φάσης μεταξύ υγρού κι αερίου και η αλλαγή στην κρυσταλλική δομή ενός στερεού.

### 2.1.2.1. Αλλαγή φάσης μιας καθαρής ουσίας

Οι αλλαγές φάσης μιας καθαρής ουσίας περιλαμβάνουν μια αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια αλλά όχι αλλαγή στη θερμοκρασία. Η σταθερή θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η διεργασία, ονομάζεται θερμοκρασία αλλαγής φάσης.

Το σχήμα 2.3 απεικονίζει τις αλλαγές στην εσωτερική ενέργεια μιας καθαρής ουσίας όταν προσδίδεται σε αυτή ενέργεια με τη μορφή θερμότητας. Ξεκινώντας από μια αρχική στερεά κατάσταση (A), πρόσδοση θερμότητας αρχικά προκαλεί αισθητή αλλαγή στη δομή του μέσου. Αυτή η αλλαγή εμφανίζεται ως αύξηση της θερμοκρασίας του (περιοχή A-B). Στη συνέχεια, όταν η θερμοκρασία φτάσει στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, αλλάζει η κρυσταλλική δομή του στερεού μέσου (περιοχή B-C), δηλαδή έχουμε αλλαγή φάσης από στερεό σε στερεό. Με το πέρας της αλλαγής φάσης, η θερμοκρασία αυξάνεται ξανά καθώς το στερεό συνεχίζει να απορροφά αισθητή θερμότητα (περιοχή C-D). Ακολουθεί αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό (περιοχή D-E), αισθητή θέρμανση του υγρού (περιοχή E-F), αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο (περιοχή F-G) και τέλος αισθητή θέρμανση του αερίου [6].

Η ποσότητα της θερμότητας που θα αποθηκευτεί κατά τη διαδικασία της θέρμανσης εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του κατάλληλου μέσου που θα υφίσταται την αλλαγή φάσης απορροφώντας ή αποδίδοντας θερμότητα.



Σχ. 2.3 Διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου κατά τη διεργασία θέρμανσης μιας ουσίας.

## Αλλαγή φάσης στερεού – υγρού

Η αλλαγή από στερεά σε υγρή φάση (τήξη) χαρακτηρίζεται από μικρή αλλαγή στον όγκο του μέσου συνήθως μικρότερη του 10%. Αν ένα δοχείο μπορεί να χωρέσει τη φάση με το μεγαλύτερο όγκο, συνήθως την υγρή, η πίεση δεν μεταβάλλεται σημαντικά και συνεπώς η τήξη και η στερεοποίηση του υλικού αποθήκευσης λαμβάνει χώρα σε σταθερή θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια της τήξης, όσο η θερμοκρασία μεταφέρεται στο υλικό αποθήκευσης, το υλικό διατηρεί σταθερή τη θερμοκρασία του στη θερμοκρασία τήξης. Η θερμότητα που παρέχεται κατά την τήξη ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Εξαιτίας της μικρής μεταβολής στον όγκο του μέσου η αποθηκευμένη θερμότητα είναι ίση με τη διαφορά ενθαλπίας  $\Delta Q = \Delta H = m \Delta h$ . Στην περίπτωση της αλλαγής φάσης από στερεά σε υγρή κατάσταση η ενθαλπία αλλαγής φάσης ονομάζεται ενθαλπία τήξης [2].

Τα υλικά που πραγματοποιούν αυτές τις μεταβάσεις έχουν αποδειχθεί οικονομικά και ελκυστικά για χρήση σε συστήματα αποθήκευσης θερμότητας [3].

## Αλλαγή στην κρυσταλλική δομή ενός στερεού μέσου

Σε αλλαγή από στερεά σε στερεά φάση, θερμότητα αποθηκεύεται καθώς το υλικό μεταβαίνει από μια κρυσταλλική δομή σε μια άλλη. Αυτή η μετάβαση έχει γενικά μικρότερη λανθάνουσα θερμότητα και μικρότερες αλλαγές σε όγκο σε σχέση με την αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό. Τα υλικά αλλαγής φάσης της μορφής στερεό – στερεό προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της μεγαλύτερης ευελιξίας στη σχεδίαση χωρίς αυστηρές απαιτήσεις δοχείου [3].

## Αλλαγή φάσης υγρού – αερίου

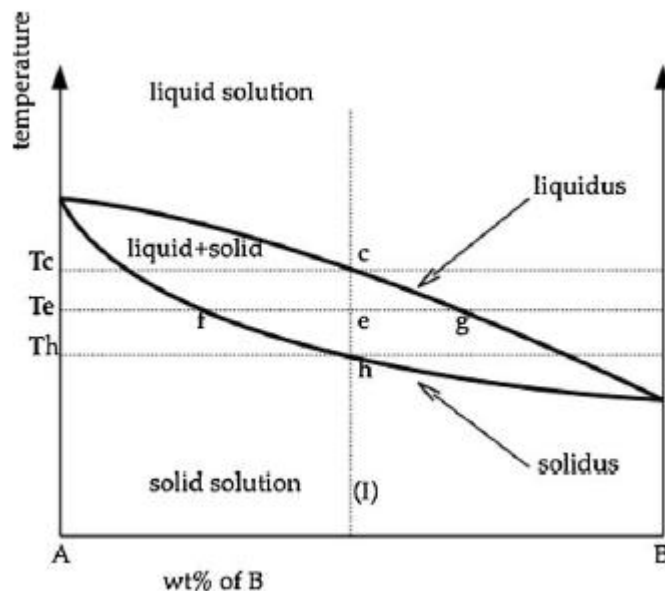
Στην αλλαγή από την υγρή στην αέρια φάση ή αντίστροφα, η θερμοκρασία αλλαγής φάσης εξαρτάται έντονα από τις οριακές συνθήκες, γι' αυτό και δεν χρησιμοποιείται απλά και μόνον για αποθήκευση θερμότητας. Συνήθως, αυτή η αλλαγή φάσης συνδέεται με μια διαφορά στην πίεση και τη θερμοκρασία κατά την φόρτιση (πρόσδωση θερμότητας) και αποφόρτιση (απελευθέρωση θερμότητας) του υλικού μέσου [2].

Οι μεταβάσεις από στερεή σε αέρια κι από υγρή σε αέρια φάση, γενικά δεν χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ενέργειας, παρόλο το μεγάλο ποσό λανθάνουσας θερμότητας, μιας και τα αέρια καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο. Μεγάλες αλλαγές σε όγκο, κάνει το σύστημα μεγάλο, περίπλοκο και μη πρακτικό [3].

### 2.1.2.2. Αλλαγή φάσης ενός μίγματος [86]

Τα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση θερμότητας είναι μίγματα κι όχι καθαρές ουσίες. Στη συνέχεια περιγράφονται οι αλλαγές κατάστασης ενός διφασικού μίγματος. Η θεωρία αλλαγής φάσης για μίγματα περισσότερων συνιστωσών είναι παρόμοια αλλά περισσότερο περίπλοκη για να παρουσιαστεί.

Το διφασικό διάγραμμα χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει τη θέση των διαφόρων φάσεων ενός μίγματος. Το σχήμα 2.4 δείχνει ένα διφασικό διάγραμμα ενός ισόμορφου συστήματος. Η τετμημένη αντιστοιχεί στην αναλογία του στοιχείου B στο μίγμα των A+B και η τεταγμένη είναι η θερμοκρασία του μίγματος. Ο όγκος και η πίεση είναι σταθερά.



Σχ. 2.4. Διφασικό διάγραμμα ισόμορφου συστήματος [86]

Το διάγραμμα αποτελείται από δύο μονοφασικές περιοχές, μία του στερεού (solid solution), μία του υγρού (liquid solution) που χωρίζονται από τη διφασική περιοχή. Το όριο

μεταξύ της μονοφασικής περιοχής του υγρού και της διφασικής ονομάζεται γραμμή liquidus, ενώ το όριο ανάμεσα στη διφασική και το στερεό ονομάζεται γραμμή solidus. Γενικά, η γραμμή liquidus είναι το σύνολο των σημείων που αναπαριστούν τις θερμοκρασίες στις οποίες τα μίγματα αρχίζουν να στερεοποιούνται κατά την ψύξη ή ολοκληρώνουν την τήξη τους κατά τη θέρμανση. Η solidus είναι το σύνολο των σημείων που αναπαριστούν τις θερμοκρασίες στις οποίες τα διάφορα μίγματα ολοκληρώνουν τη στερεοποίηση κατά την ψύξη ή ξεκινούν την τήξη κατά τη θέρμανση. Στη διφασική περιοχή οι φάσεις βρίσκονται σε ισορροπία ως διάλυμα υγρής και στερεής φάσης (liquid+solid).

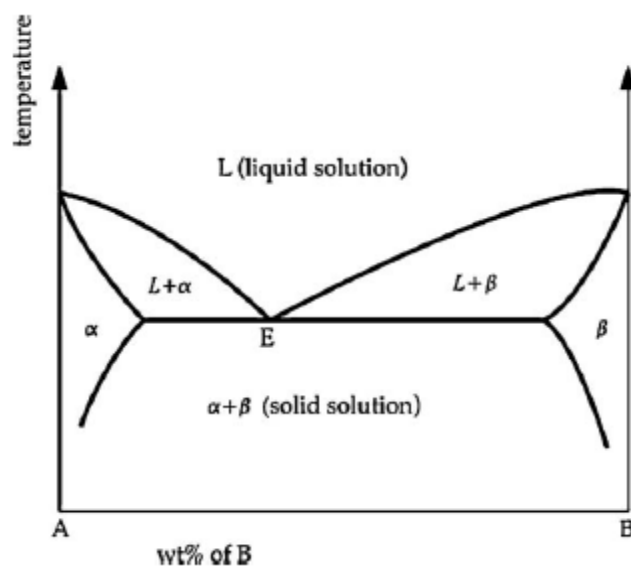
Ας θεωρήσουμε τη διεργασία θέρμανσης ή ψύξης του διφασικού μίγματος του σχήματος 2.4 που αναπαρίσταται από τη γραμμή (I). Αν το μίγμα είναι στερεό κι η θερμοκρασία αυξηθεί, η τήξη θα ξεκινήσει στη θερμοκρασία  $T_h$  (σημείο h), ενώ το μίγμα θα είναι απόλυτα υγρό σ' όλη του τη μάζα στη θερμοκρασία  $T_c$  (σημείο c). Αν το μίγμα είναι υγρό και η θερμοκρασία μειωθεί, η στερεοποίηση θα ξεκινήσει στη θερμοκρασία  $T_c$  (σημείο c), ενώ θα γίνει απόλυτα στερεό στη θερμοκρασία  $T_h$  (σημείο h). Υπάρχει ένα φαινόμενο υστέρησης στην αλλαγή φάσης. Αν το μίγμα βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T_e$  (σημείο e), η % σύνθεση του μίγματος δίνεται από τη θέση των σημείων f και g και σύμφωνα με τους τύπους:

$$\frac{eg}{fg} \times 100\% = \% \text{ στερεάς φάσης} \qquad \frac{fe}{fg} \times 100\% = \% \text{ υγρής φάσης}$$

Το σημαντικότερο συμπέρασμα από τη μελέτη του διφασικού διαγράμματος είναι ότι η θερμοκρασία κατά την αλλαγή φάσης δεν παραμένει σταθερή αλλά αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα αν το υλικό φορτίζεται ή αποφορτίζεται. Ακόμη, τα σημεία έναρξης της αλλαγής φάσης εξαρτώνται από την αναλογία των συνιστωσών στο μίγμα.

Ανάλογα με τις συνιστώσες του μίγματος, υπάρχουν διάφορα διαγράμματα φάσεων που περιγράφουν τη διαφορετική συμπεριφορά πιο περίπλοκων μιγμάτων. Το σχήμα 2.5 δείχνει την ειδική περίπτωση ενός ευτηκτικού μίγματος (σημείο E). Το ευτηκτικό μίγμα έχει τέτοια αναλογία συνιστωσών που το σημείο τήξης είναι όσο χαμηλότερο γίνεται ενώ όλες οι συνιστώσες κρυσταλλώνουν ταυτόχρονα.





Σχ. 2.5. Διφασικό διάγραμμα – ευτηκτικό σημείο [86]

### 2.1.2.3. Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης

Γενικά, η ανάλυση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας σε ένα πρόβλημα αλλαγής φάσης είναι πολύ πιο περίπλοκη σε σχέση με τα προβλήματα στα οποία δεν υπάρχει αλλαγή φάσης. Αυτό συμβαίνει κυρίως εξαιτίας: (1) της μη γραμμικότητας του προβλήματος που πηγάζει από την κίνηση του ορίου στερεής και υγρής φάσης κατά την αλλαγή φάσης, (2) της ανεπαρκούς γνώσης της διεργασίας μεταφοράς θερμότητας στη διεπιφάνεια στερεού – υγρού, (3) της αβεβαιότητας για τη θερμική αντίσταση στη διεπιφάνεια δοχείου και στερεού ΥΑΦ, (4) της μεταβολής του όγκου κατά την αλλαγή φάσης και (5) της ύπαρξης κενών σε ένα στερεό [6].

#### 2.1.2.3.1. Το πρόβλημα Stefan

Η αλλαγή φάσης ενός υλικού περιγράφεται από προβλήματα συνοριακών τιμών για μερικές διαφορικές εξισώσεις, όπου το όριο μεταξύ των φάσεων (διεπιφάνεια στερεού – υγρού, μέτωπο αλλαγής φάσης) μπορεί να κινείται με τον χρόνο. Αυτό το πρόβλημα μελετήθηκε για πρώτη φορά από τους Clapeyron και Lamé το 1831 ενώ ανέλυαν το σχηματισμό του φλοιού της γης από την ψύξη της θερμής μάζας. Το συγκεκριμένο πρόβλημα

σφαιρικής γεωμετρίας απλοποιήθηκε σε πρόβλημα ημιάπειρης πλάκας. Η λύση δόθηκε ανεξάρτητα από τον Franz Neumann, ο οποίος το εισήγαγε σε δικές του μελέτες της περιόδου 1835–1840. Παρολαυτά, τα προβλήματα αλλαγής φάσης έχουν πάρει το όνομά τους από τον Jozef Stefan, τον Σλοβένο φυσικό που εισήγαγε τη γενική κατηγορία αυτών των προβλημάτων το 1889 με αναφορά στα προβλήματα σχηματισμού του πάγου. Το 1951 ο Evans απέδειξε την ύπαρξη λύσης του προβλήματος Stefan, ενώ το 1957 ο Douglas απέδειξε την ύπαρξη μοναδικής λύσης.

#### 2.1.2.3.2. Μέθοδοι επίλυσης

Το πρόβλημα Stefan διαθέτει πολύ λίγες αναλυτικές λύσεις για απλοποιημένα προβλήματα με αλλαγή φάσης. Οι λύσεις αυτές αφορούν κυρίως περιπτώσεις μονοδιάστατων προβλημάτων άπειρης ή ημιάπειρης περιοχής, με απλές αρχικές και οριακές συνθήκες και σταθερές θερμικές ιδιότητες. Υπό αυτές τις συνθήκες, αυτές οι ακριβείς λύσεις συνήθως παίρνουν τη μορφή συναρτήσεων της μεταβλητής  $x/t^{1/2}$  και είναι γνωστές ως λύσεις ομοιότητας (similarity solutions) [89].

Γενικά, το πρόβλημα Stefan επιλύεται με διάφορες αριθμητικές μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Υπάρχουν δύο κατηγορίες μεθόδων, οι μέθοδοι εντοπισμού του μετώπου αλλαγής φάσης ή μέθοδοι μεταβλητού πλέγματος όπως αλλιώς ονομάζονται (front – tacking ή variable grid methods) και οι μέθοδοι σταθερού πλέγματος (fixed grid methods).

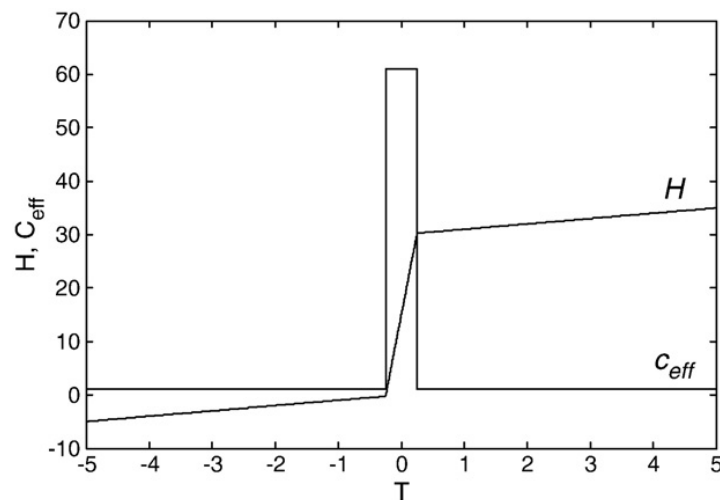
Η μέθοδοι εντοπισμού του μετώπου αλλαγής φάσης συνεχώς εντοπίζουν τη διεπιφάνεια αλλαγής φάσης. Ένα μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι απαιτούν πλέγμα που να αλλάζει συνεχώς, μετασχηματισμό συντεταγμένων ή χρήση χωροχρονικού πλέγματος που κοστίζει πολύ υπολογιστικά. Άλλο ένα μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι δεν είναι κατάλληλες για αλλαγή φάσης με πεπερασμένο εύρος ψύξης.

Οι μέθοδοι σταθερού πλέγματος αντιμετωπίζουν την υγρή και τη στερεά φάση του υλικού σαν ένα συνεχές μέσο. Η μέθοδος σταθερού πλέγματος μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα υπάρχον πρόγραμμα συναγωγής. Απ' την άλλη πλευρά, οι μέθοδοι σταθερού πλέγματος μπορούν να χειριστούν το πρόβλημα αλλαγής φάσης με πεπερασμένο εύρος ψύξης [91]. Οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες αριθμητικές μέθοδοι, ανήκουν στην κατηγορία του

σταθερού πλέγματος και είναι η μέθοδος ενθαλπίας κι η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας.

## Η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας [91]

Μία από τις παλιότερες και συχνότερα χρησιμοποιούμενες μεθόδους σταθερού πλέγματος είναι η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας (effective heat capacity method), στην οποία η ενεργός θερμοχωρητικότητα  $c_{eff}$  ορίζεται ως η κλίση της καμπύλης ενθαλπίας – θερμοκρασίας. Το σχήμα 2.6 δείχνει μια τυπική μεταβολή της ενθαλπίας  $H$  και της θερμοχωρητικότητας  $c_{eff}=dH/dT$  με τη θερμοκρασία. Κατά την αλλαγή φάσης, παρατηρείται μια ασυνέχεια, δηλαδή μια απότομη μεταβολή του  $c_{eff}$  (Σχ. 2.6) που ονομάζεται βηματικό άλμα (step - jump) και μπορεί να δημιουργήσει αριθμητικές διακυμάνσεις. Έχουν προταθεί διάφορες αριθμητικές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση των δυσκολιών που δημιουργούνται από την απότομη μεταβολή του  $c_{eff}$ .



**Σχ. 2.6.** Τυπική μεταβολή της ενθαλπίας και του  $c_{eff}$  με τη θερμοκρασία [91]

Στην περίπτωση της ισοθερμικής αλλαγής φάσης όπου το θερμοκρασιακό εύρος της ψύξης θεωρείται μικρό, το  $c_{eff}$  μπορεί να οριστεί από τη σχέση:

$$c_{eff} = \begin{cases} c_s (T < T_{sol}) \\ c_f + \frac{L}{T_{liq} - T_{sol}} (T_{sol} \leq T \leq T_{liq}) \\ c_l (T > T_{liq}) \end{cases}$$

$$c_f = (1 - f_l)c_s + f_l c_l$$

όπου  $T_{sol}$  και  $T_{liq}$  οι θερμοκρασίες στερεοποίησης και τήξης,  $f_l$  είναι το ποσοστό της υγρής φάσης,  $c_s$  και  $c_l$  η θερμοχωρητικότητα κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης και πάνω από τη θερμοκρασία τήξης αντίστοιχα. Το  $f_l$  θεωρείται ότι μεταβάλλεται γραμμικά με τη θερμοκρασία, δηλαδή:  $f_l = \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}}$ . Προφανώς τα βηματικά άλματα συμβαίνουν όταν  $T =$

$T_{sol}$  και  $T = T_{liq}$ .

## Η μέθοδος ενθαλπίας [89]

Με την εισαγωγή μιας μεθόδου ενθαλπίας, το πρόβλημα αλλαγής φάσης γίνεται πολύ πιο απλό, μιας και η εξίσωση που διέπει το πρόβλημα είναι η ίδια και για τις δύο φάσεις, με τη θεώρηση μιας ζώνης στην οποία το υλικό θεωρείται σε μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ στερεού κι υγρού, σαν πολτός. Με τη θεώρηση αυτής της ζώνης αποφεύγονται ασυνέχειες που μπορεί να δημιουργούν αριθμητικές αστάθειες.

Κατά συνέπεια, το πάχος κι η ποιότητα της διακριτοποίησης της ζώνης πολτού είναι κρίσιμα για την απόδοση του μοντέλου. Η μέθοδος ενθαλπίας μπορεί να αντιμετωπίσει τόσο ισοθεμικά προβλήματα όσο και προβλήματα με ζώνη πολτού αλλά η θερμοκρασία σε ένα σημείο του πλέγματος μπορεί να έχει διακυμάνσεις με το χρόνο. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε διάφορα προβλήματα αλλαγής φάσης. Ο Hunter το 1989 και ο Amdjadi το 1990 επιβεβαίωσαν ότι η μέθοδος ενθαλπίας είναι η πιο κατάλληλη για τυπικές εφαρμογές υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει μεταβολή στο αριθμητικό σχήμα στη διεπιφάνεια.

Για μια διεργασία αλλαγής φάσης, η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να εκφραστεί με όρους ολικής ογκομετρικής ενθαλπίας και θερμοκρασίας για σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες, ως εξής:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla [k_k (\nabla T)],$$

όπου  $H$  είναι η ολική ογκομετρική ενθαλπία που είναι το άθροισμα της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας.

$$H(T) = h(T) + \rho_l f(T) \lambda$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα,  $k$  η θερμική αγωγιμότητα,  $\lambda$  η θερμική αντίσταση και

$$h = \int_{T_m}^T \rho_k c_k dT$$

Στην περίπτωση ισοθερμικής αλλαγής φάσης, το ποσοστό της υγρής φάσης  $f$  δίνεται από τη σχέση:

$$f = \begin{cases} 0(T < T_m) \text{ στερεό} \\ ]0,1[(T = T_m) \text{ πολτός} . \\ 1(T > T_m) \text{ υγρό} \end{cases}$$

## 2.2. Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, υλικά με αλλαγή φάσης στερεού – υγρού (ή στερεού – στερεού) που είναι κατάλληλα για αποθήκευση θερμότητας αναφέρονται ως υλικά λανθάνουσας θερμότητας ή απλά υλικά αλλαγής φάσης ΥΑΦ (Phase Change Materials, PCM) [1]. Στη συνέχεια και για όλη την εργασία, θα χρησιμοποιείται η συντομογραφία ΥΑΦ για λόγους οικονομίας του λόγου.

Τα υλικά αυτά καθώς θερμαίνονται, αρχικά συμπεριφέρονται όπως τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης θερμότητας, με την θερμοκρασία να αυξάνεται καθώς απορροφούν θερμότητα [1]. Περαιτέρω πρόσδοση θερμότητας οδηγεί στην έναρξη του φαινομένου αλλαγής φάσης όπου σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά αισθητής αποθήκευσης θερμότητας, τα ΥΑΦ απορροφούν και αποδίδουν θερμότητα σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία.

Τα ΥΑΦ μπορούν επανειλημμένα να περνούν από τη στερεά στην υγρή φάση ώστε να χρησιμοποιήσουν τη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης για να απορροφήσουν, αποθηκεύσουν κι αποδώσουν θερμότητα. Πιο συγκεκριμένα, η αποθήκευση κι απόδοση θερμότητας γίνεται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους λειτουργίας.

Τα ΥΑΦ που μεταβαίνουν από τη στερεή στην υγρή κατάσταση κι αντίστροφα, είναι αυτά που κατεξοχήν χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές. Όταν τα ΥΑΦ αυτά θερμαίνονται, απορροφούν θερμότητα και τήκονται, με τη φάση αυτή του κύκλου να ονομάζεται φόρτιση. Όταν η θερμοκρασία πέσει ξανά κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης, αρχίζουν να αποδίδουν τη θερμότητα που έχουν αποθηκεύσει, με τη φάση αυτή του κύκλου να ονομάζεται αποφόρτιση [88].

Τα ΥΑΦ δεν είναι καινούργια υλικά, αλλά υπάρχουν στη φύση σε διάφορες μορφές. Το πιο κοινό παράδειγμα ΥΑΦ, είναι το νερό στους 0 °C που κρυσταλλώνει καθώς αλλάζει από υγρό σε στερεό για να γίνει πάγος. Αλλαγή φάσης πραγματοποιείται επίσης όταν το νερό θερμαίνεται σε θερμοκρασία 100 °C όπου και γίνεται ατμός.

Για να γίνει κατανοητή η σημασία της αποθήκευσης θερμότητας με τη βοήθεια ΥΑΦ, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα το νερό. Όταν ο πάγος λιώνει και γίνεται νερό απορροφά περίπου μια λανθάνουσα θερμότητα 335 kJ/kg. Όταν το νερό θερμαίνεται περαιτέρω, απορροφάται αισθητή θερμότητα μόνο 4 kJ/kg ενώ η θερμοκρασία αυξάνεται κατά έναν μόνο βαθμό κελσίου. Πιο συγκεκριμένα, τα ΥΑΦ μπορούν να αποθηκεύσουν 5 – 14 φορές περισσότερη θερμότητα στην μονάδα του όγκου σε σχέση με τα συμβατικά υλικά αισθητής αποθήκευσης όπως το νερό, το τούβλο ή η πέτρα. [3].

Για να είναι παρολαυτά, εκμεταλλεύσιμα τα πλεονεκτήματα των ΥΑΦ, θα πρέπει να επιλεγούν σωστά για την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, να διαθέτουν ορισμένα φυσικά και τεχνικά χαρακτηριστικά καθώς και να πληρούν κάποια οικονομικά κριτήρια.

### 2.2.1. Χαρακτηριστικές θερμικές ιδιότητες ΥΑΦ

Η συμπεριφορά ενός ΥΑΦ σε ένα σύστημα λανθάνουσας θερμικής αποθήκευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα θερμικά του χαρακτηριστικά.

Η θερμοχωρητικότητα (C) για όλα τα ΥΑΦ, ανεξαρτήτως αν πρόκειται για οργανικά ή ανόργανα, είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Προς το παρόν, δεν έχει βρεθεί μια γενική μεθοδολογία για την ακριβή εύρεση αυτής της συνάρτησης για κάθε υλικό. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες μελέτες που παρουσιάζουν πολυωνυμικές ή εκθετικές συναρτήσεις για να προσεγγίσουν τη θερμοχωρητικότητα του ΥΑΦ σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος της αλλαγής φάσης. Επί του παρόντος, χρησιμοποιείται η σύμβαση με την οποία οι δύο φάσεις (στερεή και υγρή) του υλικού αντιμετωπίζονται με δύο αντίστοιχες τιμές για τη θερμοχωρητικότητα, τιμές που θεωρούνται πρακτικά σταθερές για το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής στην οποία χρησιμοποιείται το υλικό. Ακόμα όμως δεν υπάρχει σαφής απάντηση για την τιμή της θερμοχωρητικότητας στη διφασική περιοχή. Το μοναδικό κοινό σημείο για τη θερμοχωρητικότητα, είναι ότι κατά κανόνα αποτελεί μια αύξουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας του υλικού. Στις εφαρμογές των ΥΑΦ χρησιμοποιείται η

θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ( $C_p$ ) με πληθώρα πειραματικών μελετών να έχουν καταλήξει σε συναρτήσεις για την προσέγγιση της τιμής της κατά την αλλαγή φάσης.

Μια ακόμη πολύ σημαντική θερμική ιδιότητα, είναι η τιμή της μέγιστης λανθάνουσας θερμότητας (latent heat of fusion) ή της θερμότητας αλλαγής φάσης όπως πιο σωστά λέγεται, που μπορούν να αποθηκεύσουν τα ΥΑΦ ανά μονάδα μάζας. Η τιμή αυτή είναι δείκτης αποδοτικότητας για κάθε εφαρμογή, καθώς είναι επιθυμητή η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη αποθήκευση ανά μονάδα μάζας υλικού. Τον ίδιο ρόλο (ποιοτικά κατά τις εφαρμογές) παίζει κι η πυκνότητα του ΥΑΦ.

Επιπλέον, για να υπάρχει αποδοτική μεταφορά θερμότητας πρέπει το υπεύθυνο υλικό να έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα ( $k$ ). Τα ΥΑΦ έχουν εν γένει μικρή τιμή θερμικής αγωγιμότητας, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα των ΥΑΦ στις διάφορες εφαρμογές τους. Η τιμή θεωρείται πρακτικά σταθερή σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό φάσμα εφαρμογής. Λόγω της μικρής τιμής του  $k$ , ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στα ΥΑΦ θεωρείται μη αποδοτικός, καθώς απαιτούνται υψηλές θερμοκρασιακές διαφορές, για γρήγορη κι αποτελεσματική χρήση των εφαρμογών των ΥΑΦ. Το μειονέκτημα αυτό, ανάλογα πάντα με την εφαρμογή, μπορεί σε κάποιο βαθμό να αντιμετωπιστεί με αντίστοιχα μεγάλες επιφάνειες μετάδοσης θερμότητας. Υπάρχουν βέβαια κάποιες εφαρμογές όπως η μεταφορά τροφίμων, στις οποίες τα παραπάνω δεν είναι ζωτικής σημασίας. Ως γνωστό, η πυκνότητα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, οπότε κάθε υλικό που αλλάζει φάση, υπόκειται σε ογκομετρικές αλλαγές. Σε περίπτωση λοιπόν που υπάρχει ΥΑΦ σε κλειστή συσκευασία, πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της ογκομετρικής αλλαγής και της συνεπαγόμενης μεταβολής της πίεσης στο εσωτερικό της συσκευασίας.

Τέλος, χαρακτηριστικές για ένα ΥΑΦ είναι και οι θερμοκρασίες έναρξης και ολοκλήρωσης της τήξης,  $T_i$  και  $T_e$  αντίστοιχα (Σχ. 2.8).

Για τη σωστή επιλογή ΥΑΦ σε ένα σύστημα αποθήκευσης πρέπει να είναι γνωστά όλα τα παραπάνω θερμικά χαρακτηριστικά με ακριβή στοιχεία. Οι κατασκευαστές προϊόντων ΥΑΦ δίνουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τις θερμικές ιδιότητες του υλικού ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σωστά στις εφαρμογές. Πολλές φορές, αντί για ακριβείς τιμές για τις θερμοκρασίες έναρξης κι ολοκλήρωσης της τήξης και της λανθάνουσας θερμότητας, οι κατασκευαστές δίνουν ένα θερμοκρασιακό εύρος που συμπεριλαμβάνει όλη την περιοχή αλλαγής φάσης και κάποιο κομμάτι της αισθητής περιοχής καθώς και τη συνολική θερμότητα που θα απορροφηθεί σε αυτό το εύρος.

Για τον προσδιορισμό των θερμικών ιδιοτήτων των ΥΑΦ έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι με πολλούς μελετητές να παρουσιάζουν συνεχώς βελτιώσεις και παραλλαγές.

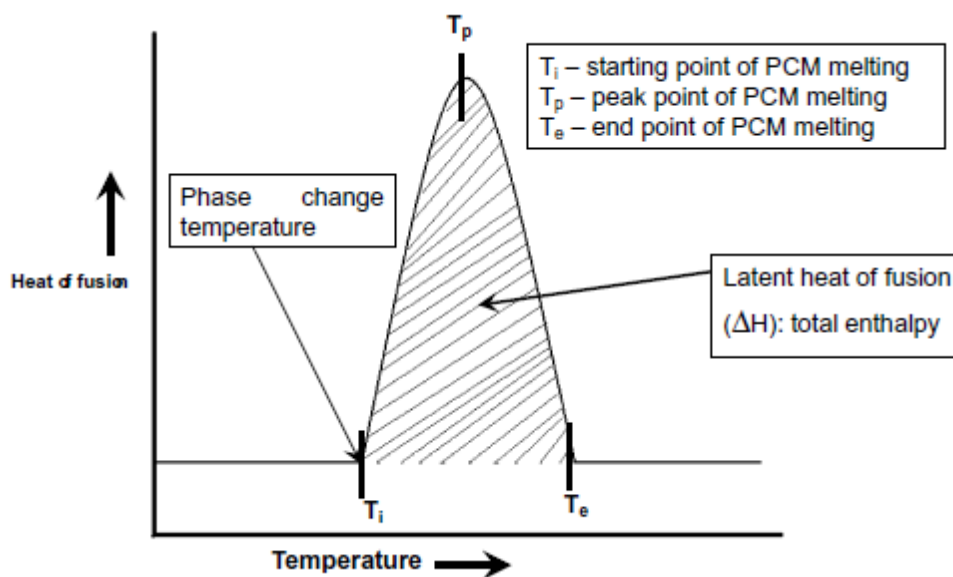
## 2.2.2. Μέτρηση θερμικών ιδιοτήτων ΥΑΦ [92]

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος θερμικής αποθήκευσης συνήθως απαιτεί ένα στενό θερμοκρασιακό εύρος. Έτσι, απαιτούνται αξιόπιστα και υψηλής ακρίβειας δεδομένα για το υποψήφιο ΥΑΦ. Ο ακριβής καθορισμός της θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ ως συνάρτηση της θερμοκρασίας είναι κρίσιμος. Άλλος ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τη σχεδίαση συστημάτων λανθάνουσας αποθήκευσης είναι η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του υλικού αποθήκευσης και του περιβάλλοντος. Οι κυριότερες μέθοδοι για τη μέτρηση ιδιοτήτων των ΥΑΦ είναι η μέθοδος διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry) και η μέθοδος T-History.

### 2.2.2.1. Η μέθοδος Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry-DSC)

Η βασική μέθοδος μέτρησης θερμικών ιδιοτήτων είναι η μέθοδος differential scanning calorimetry (DSC). Αυτή η μέθοδος βασίζεται στον εντοπισμό διαφορών στις αποκρίσεις που παρουσιάζουν ένα υλικό αναφοράς και το δείγμα, όταν υποβάλλονται ταυτόχρονα σε ένα πρόγραμμα θερμοκρασίας.

Στο σχήμα 2.8 φαίνονται τα βασικά θερμικά χαρακτηριστικά ενός ΥΑΦ όπως μετρήθηκαν με τη μέθοδο DSC.



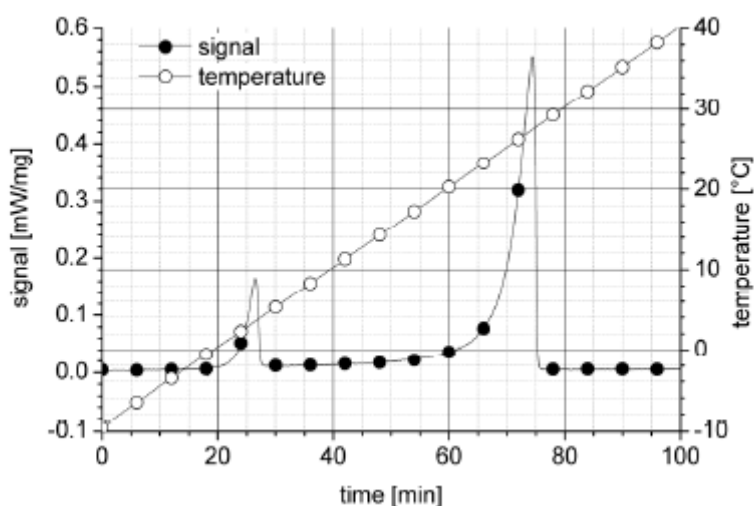
Σχ. 2.8. Σχηματικό διάγραμμα ενός θερμογράμματος DSC ενός ΥΑΦ [88]



## Θέρμανση και ψύξη με σταθερό ρυθμό (dynamic mode)

Ο πιο κοινός τρόπος για τη θέρμανση ενός δείγματος στη μέθοδο DSC είναι η θέρμανση με σταθερό ρυθμό. Τυπικές τιμές για ρυθμούς θέρμανσης ή ψύξης για τη μέτρηση του  $C_p$  είναι από 2 έως 10 K/min. Το σήμα είναι ανάλογο της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στο δείγμα και το υλικό αναφοράς. Ένα τυπικό διάγραμμα του σήματος και της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια θέρμανσης με σταθερό ρυθμό φαίνεται στο σχήμα 2.9. Το  $C_p$  του δείγματος ως συνάρτηση της θερμοκρασίας  $C_p(T)$  καθορίζεται με τη βοήθεια του υλικού αναφοράς. Από τα δεδομένα αυτά, η θερμότητα που αποθηκεύεται μπορεί να εξαχθεί με ολοκλήρωση.

Η μέθοδος DSC με σταθερό ρυθμό θέρμανσης δεν είναι η βέλτιστη για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας σε ΥΑΦ.



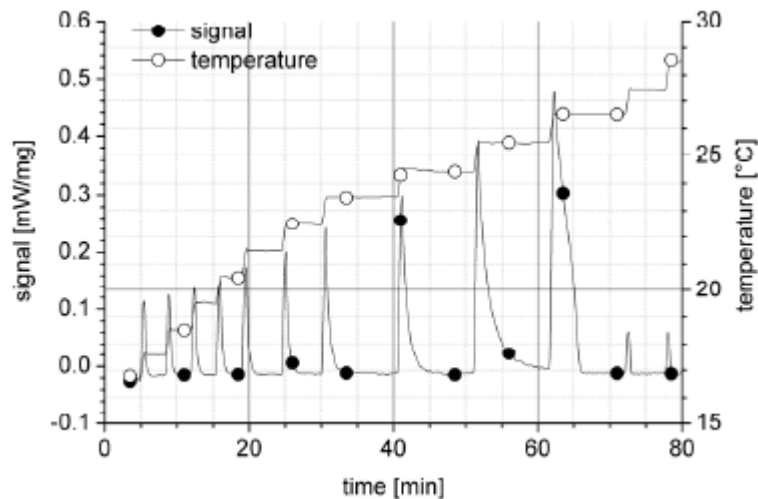
**Σχ. 2.9.** Τυπική ροή θερμότητας και εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια θέρμανσης με σταθερό ρυθμό σε μέτρηση με τη μέθοδο DSC [92]

## Ισοθερμική θέρμανση και ψύξη

Άλλη μια επιλογή για να πάρει κανείς δεδομένα για την δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας σε ένα υλικό είναι η μέθοδος DSC σε ισοθερμικά βήματα. Σε αυτήν την περίπτωση, το υλικό θερμαίνεται κατά βήματα σε δεδομένα θερμοκρασιακά διαστήματα. Το δείγμα ακολουθεί τα βήματα με κάποια χρονική καθυστέρηση και τότε ανιχνεύεται σήμα. Όταν το σήμα επιστρέφει πίσω στο μηδέν, το δείγμα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία. Τότε

το δείγμα θερμαίνεται ξανά. Η περιοχή κάτω από μία κορυφή είναι ανάλογη με τη θερμότητα που απορροφήθηκε από το δείγμα στο δεδομένο βήμα. Ένα παράδειγμα της DSC σε ισοθερμικά βήματα δίνεται στο σχήμα 2.10.

Το μεγάλο πλεονέκτημα σε σχέση με τη μέθοδο σταθερού ρυθμού είναι ότι η αβεβαιότητα στη θερμοκρασία είναι γνωστή, μιας και περιορίζεται στο θερμοκρασιακό εύρος του βήματος. Μειώνοντας το μέγεθος του βήματος, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης.



**Σχ. 2.10.** Τυπική ροή θερμότητας και εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μέτρησης σε ισοθερμικά βήματα [92]

#### 2.2.2.2. Η μέθοδος T-History

Η μέθοδος T-history προτάθηκε από τον Zhang ως ένας φθηνός κι εύκολος τρόπος για την αξιολόγηση ενός υποψήφιου ΥΑΦ όσον αφορά την ενθαλπία αλλαγής φάσης του. Η μέθοδος βελτιώθηκε από διάφορους συγγραφείς ώστε είναι πια κατάλληλη για τον προσδιορισμό του εξαρτώμενου από τη θερμοκρασία  $C_p$ .

Δύο πανομοιότυπα δοχεία που περιέχουν το δείγμα και ένα πρότυπο υλικό τοποθετούνται σε ένα μονωμένο κουτί. Οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος μέσα στο κουτί, του δείγματος και του πρότυπου υλικού καταγράφονται. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μέσα στο κουτί αλλάζει ακαριαία. Η απόκριση του δείγματος και του υλικού αναφοράς σε αυτήν την αλλαγή εξαρτάται από τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες. Με τη βοήθεια του υλικού αναφοράς, βαθμονομείται η θερμική αντίσταση ανάμεσα στο περιβάλλον

και το δοχείο και προσδιορίζονται η ειδική θερμοχωρητικότητα και η ενθαλπία του δείγματος ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας.

Σε αντίθεση με τη μέθοδο DSC, σε μια μέτρηση με τη μέθοδο T-history το σήμα δεν λαμβάνεται από τη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα σε δείγμα και πρότυπο αλλά από τις θερμοκρασιακές διαφορές σε σχέση με το περιβάλλον του κουτιού. Έτσι, ο λόγος σήμα προς θόρυβο μπορεί να κρατηθεί υψηλός ακόμα και για πολύ αργές μετρήσεις. Για τον λόγο αυτό, η μέθοδος είναι επίσης κατάλληλη για την απόκτηση δεδομένων για μεγάλα δείγματα. Η μέτρηση σε μεγάλα δείγματα είναι σημαντική για δύο λόγους. Πρώτον, πολλά ΥΑΦ είναι μίγματα υλικών και μόνο μεγάλα δείγματα μπορούν να εξασφαλίσουν ότι η μέτρηση έχει γίνει επί της σωστής σύνθεσης. Δεύτερον, πολλά ΥΑΦ παρουσιάζουν το πρόβλημα της υπόψυξης (subcooling) που μπορεί να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του δείγματος. Σε μια τυπική εφαρμογή, ένα ΥΑΦ χρησιμοποιείται σε συσκευασία τουλάχιστον 100 ml. Το μέγεθος του δείγματος σε μια μέτρηση ιδιοτήτων θα πρέπει επομένως να είναι παρόμοιο με αυτό της εφαρμογής, έτσι ώστε τα αποτελέσματα όσον αφορά το φαινόμενο της υπόψυξης να είναι αξιοποιήσιμα. Το πρόβλημα της υπόψυξης παρουσιάζεται σε ειδική παράγραφο στη συνέχεια, μαζί με τα άλλα συχνά προβλήματα που παρουσιάζονται στις εφαρμογές.

### 2.2.3. Κατηγοριοποίηση των ΥΑΦ

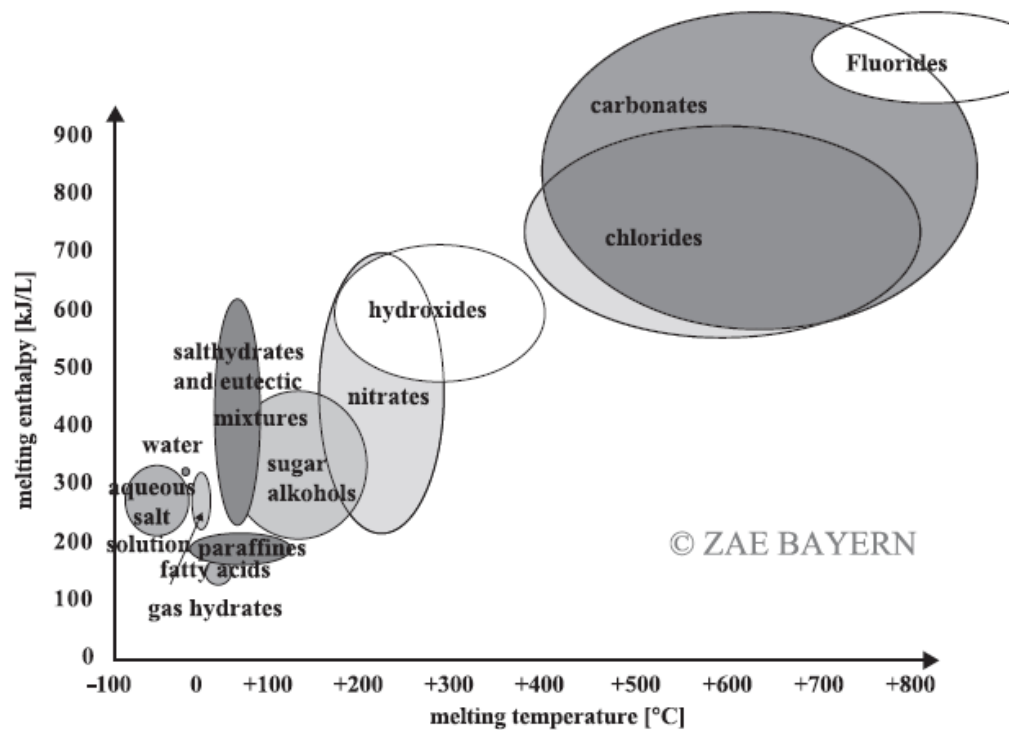
Τα δύο σημαντικότερα κριτήρια που είναι η θερμοκρασία τήξης και η ενθαλπία τήξης εξαρτώνται από τη μοριακή δομή των υλικών με αποτέλεσμα τα υλικά στην ίδια κατηγορία να έχουν παρόμοια συμπεριφορά ως υλικά αλλαγής φάσης [1].

Το σχήμα 2.11 δείχνει το τυπικό εύρος ενθαλπίας τήξης και θερμοκρασίας τήξης των πιο κοινών κατηγοριών υλικών αλλαγής φάσης.

Πλήθος υλικών αλλαγής φάσης είναι διαθέσιμα σε οποιοδήποτε θερμοκρασιακό εύρος. Ο πίνακας 1 του παραρτήματος παρουσιάζει τις κυριότερες ουσίες που χρησιμοποιούνται ως ΥΑΦ.

Υπάρχουν πολλά οργανικά κι ανόργανα χημικά υλικά που μπορούν να θεωρηθούν υλικά αλλαγής φάσης από τη σκοπιά της θερμοκρασίας και της λανθάνουσας ενθαλπίας τήξης. Παρόλο που αυτά τα υλικά συνήθως διαθέτουν θερμοκρασία τήξης μέσα στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας η πλειοψηφία δεν πληροί τα κριτήρια για μια επαρκή

αποθήκευση ενέργειας. Από τη στιγμή που κανένα υλικό δε διαθέτει όλες τις απαιτούμενες ιδιότητες ενός ιδανικού μέσου θερμικής αποθήκευσης κανείς θα πρέπει να προσπαθεί να αντισταθμίσει τυχόν ανεπιθύμητες φυσικές ιδιότητες με έναν καλό σχεδιασμό του συστήματος αποθήκευσης [3].



**Σχ. 2.11.** Κατηγορίες υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ΥΑΦ σε σχέση με το τυπικό εύρος θερμοκρασίας τήξης και ενθαλπίας τήξης (γράφημα: ZAE Bayern) [1]

### 2.2.3.1. Οργανικά ΥΑΦ

Οργανικά υλικά είναι τα υλικά που προέρχονται από έναν ζωντανό οργανισμό και κατά συνέπεια περιέχουν άνθρακα.

Τα οργανικά υλικά αλλαγής φάσης κατηγοριοποιούνται σε παραφίνες και μη (paraffins, non-paraffins).

## Παραφίνες [3,5]

Οι παραφίνες είναι κεριά που αποτελούνται από ένα μίγμα από αλυσίδες n αλκανίων  $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2) - \text{CH}_3$ . Η κρυσταλλοποίηση της  $(\text{CH}_3) -$  αλυσίδας απελευθερώνει μια μεγάλη ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας. Τόσο το σημείο τήξης όσο και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης αυξάνουν με το μήκος της αλυσίδας. Επίσης, το σημείο τήξης των αλκανίων αυξάνει με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα. Οι παραφίνες χρησιμεύουν ως υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας χάρις στο γεγονός ότι μπορούν να παραχθούν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Είναι ασφαλή, προβλέψιμα, αξιόπιστα υλικά που δεν παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης με κανένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο. Επιπλέον, τα εμπορικά προϊόντα των παραφινών είναι αρκετά φθηνότερα από τα ένυδρα άλατα που αποτελούν τον κυριότερο εκπρόσωπο των ανόργανων ΥΑΦ. Οι παραφίνες είναι υλικά χημικά αδρανή και σταθερά σε θερμοκρασία κάτω από τους  $500\text{ }^\circ\text{C}$  εμφανίζουν μικρές αλλαγές όγκου κατά την τήξη και έχουν μικρή πίεση ατμών στην υγρή φάση. Οι παραφίνες μπορούν να τήκονται και να ψύχονται επαναλαμβανόμενα χωρίς να παρουσιάζουν διαχωρισμό των φάσεων και επακόλουθη μείωση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης ή εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους. Εξαιτίας αυτών των ιδιοτήτων των παραφινών ένα σύστημα που χρησιμοποιεί παραφίνες συνήθως διαθέτει έναν πολύ μεγάλο κύκλο τήξης και ψύξης.

Από την άλλη μεριά, οι παραφίνες παρουσιάζουν μικρή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, ιδιότητα που περιορίζει τις εφαρμογές τους (περίπου  $0.2\text{ W/m }^\circ\text{C}$ ). Γι' αυτό το λόγο, έχουν εξεταστεί πολλές περιπτώσεις εμπλουτισμού του υλικού με μεταλλικά αντικείμενα διαφόρων σχημάτων ή χρήση δοχείων με πτερύγια με σκοπό την αύξηση του ρεύματος θερμότητας μέσα στο υλικό. Επιπλέον, οι παραφίνες είναι σχετικά εύφλεκτες ενώ παρουσιάζουν ασυμβατότητα με πλαστικά δοχεία. Τέλος, μια σημαντική ιδιαιτερότητα των παραφινών είναι ότι πραγματοποιούν την αλλαγή φάσης τους σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου  $10\text{ K}$  (περίπου  $9\text{ K}$  πριν το σημείο τήξης και  $1\text{ K}$  μετά το σημείο τήξης). Το χαρακτηριστικό αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη για την σωστή εκλογή υλικού στις εφαρμογές. Αλλαγές στην παραφίνη και την μονάδα αποθήκευσης μπορούν να εξαλείψουν την επίδραση όλων αυτών των ανεπιθύμητων ιδιοτήτων.

## Μη παραφίνες [3]

Τα περισσότερα υλικά αλλαγής φάσης δεν ανήκουν στην κατηγορία των παραφινών. Σε αντίθεση με τις παραφίνες που διαθέτουν παρόμοιες μεταξύ τους ιδιότητες, κάθε υλικό στην κατηγορία των μη παραφινών έχει τις δικές του ιδιότητες. Ουσιαστικά πρόκειται για μια κατηγορία που περιλαμβάνει πολλές ομάδες χημικών ενώσεων που κρίθηκαν κατάλληλες για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα, η κατηγορία περιλαμβάνει ορισμένο αριθμό εστέρων, λιπαρών οξέων, αλκοολών και γλυκόλων. Αυτά τα υλικά είναι εύφλεκτα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες, φλόγες ή οξειδωτικούς παράγοντες.

Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά αυτών των οργανικών υλικών είναι η υψηλή θερμότητα τήξης, η αναφλεξιμότητα, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, το χαμηλό σημείο ανάφλεξης, η αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες και τα ποικίλα επίπεδα τοξικότητας.

Τα λιπαρά οξέα έχουν υψηλές τιμές θερμότητας τήξης σε σύγκριση με αυτές των παραφινών. Επιπλέον, τα λιπαρά οξέα εμφανίζουν περιοδικά επαναλαμβανόμενη συμπεριφορά κατά την τήξη και την ψύξη και ψύχονται χωρίς την εμφάνιση φαινομένου της υπέρψυξης. Ο γενικός τύπος που περιγράφει όλα τα λιπαρά οξέα είναι  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\cdot\text{COOH}$  και όπως είναι προφανές το υψηλό μοριακό βάρος αυτών των ενώσεων έχει σαν αποτέλεσμα υψηλές τιμές θερμότητας τήξης. Για τον λόγο αυτό τα λιπαρά οξέα χρησιμεύουν σαν καλά υλικά αλλαγής φάσης. Τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι το κόστος τους που είναι 2 – 2.5 φορές μεγαλύτερο από αυτό των παραφινών και το γεγονός ότι είναι ήπια διαβρωτικά.

### 2.2.3.2. Ανόργανα ΥΑΦ

Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε ένυδρα άλατα και μεταλλικά άλατα.

## Ένυδρα άλατα [3,5]

Τα ένυδρα άλατα μπορούν να θεωρηθούν ως μίγματα ανόργανων αλάτων και νερού που σχηματίζουν στερεούς κρυστάλλους με γενικό τύπο  $\text{AB}\cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Η μετάβαση από στερεή

σε υγρή φάση για ένα ένυδρο άλας είναι στην πραγματικότητα μια διαδικασία ενυδάτωσης ή αφυδάτωσης του άλατος που μοιάζει από τη σκοπιά της θερμοδυναμικής την διεργασία της τήξης και ψύξης. Ένα ένυδρο άλας συνήθως τήκεται σχηματίζοντας είτε ένα ένυδρο άλας με λιγότερα mol νερού είτε την άνυδρη μορφή του. Στο σημείο τήξης το ένυδρο άλας σπάει σε ένα άνυδρο άλας και νερό ή σε ένα κατώτερο ένυδρο άλας και νερό.

Τα ένυδρα άλατα είναι η πιο σημαντική κατηγορία ΥΑΦ που έχουν μελετηθεί εκτενώς για την χρήση τους σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Οι κυριότερες ιδιότητες που καθιστούν τα ένυδρα άλατα ελκυστικά ως ΥΑΦ είναι η υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου, η σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (σχεδόν διπλάσια από αυτή των παραφινών) και οι μικρές μεταβολές όγκου κατά την τήξη. Επιπλέον, τα ένυδρα άλατα δεν είναι διαβρωτικά, είναι συμβατά με πλαστικά και μόνο ελαφρώς τοξικά, ενώ πολλά έχουν κριθεί αρκετά οικονομικά για χρήση στην αποθήκευση ενέργειας.

Τα κυριότερα προβλήματα κατά την χρήση ένυδρων αλάτων ως ΥΑΦ είναι ότι τα περισσότερα που κρίνονται ως κατάλληλα για θερμική αποθήκευση τήκονται απρόβλεπτα. Το διάλυμα που συνήθως προκύπτει στη θερμοκρασία τήξης είναι υπερκορεσμένο σε άλας αφού η mol νερού δεν αρκούν για να διαλύσουν ένα mol άλατος. Στη συνέχεια, το στερεό άλας κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας σχηματίζοντας ίζημα και δεν επαναμιγνύεται με το νερό κατά την αντίστροφη διεργασία της ψύξης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μίγμα ένυδρου άλατος να μειώνεται συνεχώς σε κάθε κύκλο φόρτισης και αποφόρτισης.

Τα προβλήματα αυτά μπορεί να αντιμετωπιστούν με πολλούς τρόπους όπως μηχανική ανάδευση, εγκλεισμό του ΥΑΦ σε κάψουλες για τη μείωση του διαχωρισμού και πρόσθεση παραγόντων διόγκωσης που κρατάνε το διάλυμα σε μορφή εναιωρήματος. Άλλες λύσεις είναι η χρήση επιπλέον νερού ώστε οι λιωμένοι κρύσταλλοι να μην δημιουργούν υπερκορεσμένο διάλυμα και η τροποποίηση της χημικής σύνθεσης του συστήματος.

Ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα των ένυδρων αλάτων είναι η ύπαρξη του φαινομένου της υπόψυξης. Όταν το υγρό ΥΑΦ φτάνει ψυχόμενο κοντά στην θερμοκρασία στερεοποίησης ο ρυθμός κρυστάλλωσης είναι γενικά πολύ χαμηλός. Για να επιτευχθεί ένας εύλογος ρυθμός κρυστάλλωσης στο διάλυμα παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας του υγρού ΥΑΦ κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης πριν την εκκίνηση της αλλαγής φάσης. Έτσι, η λανθάνουσα θερμότητα αποδίδεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία στερεοποίησης ή σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Ο βαθμός της υπέρψυξης δεν αποτελεί φυσική ιδιότητα ενός υλικού αλλά μεταβάλλεται από διάφορες παραμέτρους όπως ο όγκος του δείγματος, η καθαρότητα του υλικού, η επιφάνεια του υλικού

και ο ρυθμός ψύξης. Έχει παρατηρηθεί ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ψύξης τόσο μεγαλύτερος είναι κι ο βαθμός της υπέρψυξης.

## Μεταλλικά άλατα

Αυτή η κατηγορία δεν έχει ακόμη διερευνηθεί εκτενώς για χρήση στη βιομηχανία ΥΑΦ κυρίως εξαιτίας των προβλημάτων βάρους που εισάγουν στο σύστημα. Παρολαυτά, έχουν υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλή ειδική θερμότητα και χαμηλή πίεση ατμών.

## Εύτηκτα μίγματα

Πρόκειται για μίγμα ελάχιστης τήξης δύο ή περισσότερων συστατικών, όπου το καθένα από αυτά λιώνει και στερεοποιείται αναλόγως, δημιουργώντας κατά την κρυσταλλοποίηση ένα μείγμα των συστατικών κρυστάλλων σχεδόν πάντα χωρίς διαχωρισμό των φάσεων.

### 2.3. Το Σύστημα Αποθήκευσης Λανθάνουσας Θερμότητας (ΣΑΛΘ)

#### 2.3.1. Κύρια στοιχεία συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας

Ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έχει τα ακόλουθα τρία βασικά στοιχεία:

- ένα ΥΑΦ κατάλληλο για το θερμοκρασιακό πεδίο της εφαρμογής που να πληροί ορισμένες επιθυμητές ιδιότητες,
- το δοχείο που περιέχει το ΥΑΦ ή το σύνθετο υλικό στο οποίο περιλαμβάνεται
- και μια επιφάνεια που να μεταφέρει τη θερμότητα από την πηγή στο ΥΑΦ κι από το ΥΑΦ στο σημείο όπου αυτή πρέπει να αποδοθεί.



### 2.3.1.1. Το ΥΑΦ

#### 2.3.1.1.1. Επιθυμητές ιδιότητες ΥΑΦ σε ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας [1,3]

Οι κυριότερες επιθυμητές ιδιότητες των ΥΑΦ όταν χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας είναι:

- (i) Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης  $T_{pc}$  που εξασφαλίζει την απορρόφηση κι απόδοση θερμότητας στο πλαίσιο μια εφαρμογής που λειτουργεί σε δεδομένα θερμοκρασιακά όρια.
- (ii) Μεγάλη θερμότητα αλλαγής φάσης για μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας ειδικά στη μονάδα του όγκου, ώστε να ελαχιστοποιείται το φυσικό μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης.
- (iii) Σταθερότητα κατά τις επαναλαμβανόμενες κυκλικές φορτίσεις και αποφορτίσεις του υλικού (αποθήκευση κι απόδοση θερμότητας), ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί όσες φορές απαιτείται από την εφαρμογή. Ο αριθμός των κύκλων ποικίλει, από έναν όταν για παράδειγμα το ΥΑΦ χρησιμοποιείται για προστασία σε περίπτωση φωτιάς, σε μερικές χιλιάδες κύκλους σε εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης κτιρίων. Η σταθερότητα είναι σημαντικό χαρακτηριστικό για ΥΑΦ που αποτελούνται από διαφορετικές συνιστώσες, καθώς κατά τις κυκλικές φορτίσεις μπορούν να σχηματιστούν φάσεις με διαφορετικές συστάσεις που διαχωρίζονται μακροσκοπικά. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται διαχωρισμός των φάσεων (phase separation). Οι φάσεις με διαφορετική σύσταση από την αρχική που έχει κριθεί ως βέλτιστη, παρουσιάζουν σημαντική μείωση της δυνατότητας αποθήκευσης θερμότητας.
- (iv) Περιορισμένη εμφάνιση του φαινομένου της υπέρψυξης (subcooling ή supercooling), ώστε να εξασφαλίζεται ότι η τήξη και η στερεοποίηση μπορούν να πραγματοποιηθούν σε ένα στενό θερμοκρασιακό εύρος.
- (v) Καλή θερμική αγωγιμότητα ώστε να μπορεί να αποθηκεύει και να αποδίδει την λανθάνουσα θερμότητα σε δεδομένο όγκο του υλικού αποθήκευσης σε σύντομο χρονικό διάστημα. Το κατά πόσον το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό είναι αναγκαίο εξαρτάται άμεσα από την εφαρμογή και τη σχεδίαση του συστήματος αποθήκευσης.

Όσον αφορά την κατασκευή του συστήματος αποθήκευσης, οι επιθυμητές ιδιότητες των ΥΑΦ είναι:

- (i) Υψηλή πυκνότητα ΥΑΦ που επιτρέπει μικρότερο μέγεθος του δοχείου αποθήκευσης.

- (ii) Χαμηλή πίεση ατμών ώστε να μειωθούν οι απαιτήσεις σε μηχανική σταθερότητα και στεγανότητα του δοχείου που περιέχει το ΥΑΦ.
- (iii) Μικρή μεταβολή όγκου ώστε να μειωθούν οι απαιτήσεις σε μηχανική αντοχή στο δοχείο που περιέχει το ΥΑΦ.
- (iv) Χημική σταθερότητα του ΥΑΦ ώστε να εξασφαλιστεί η μεγάλη διάρκεια ζωής του ΥΑΦ ακόμα και σε περίπτωση που εκτεθεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τις αναμενόμενες, ακτινοβολία, αέρια κτλ.
- (v) Συμβατότητα του ΥΑΦ με άλλα υλικά ώστε να εξασφαλιστεί μεγάλος χρόνος ζωής του δοχείου που περιέχει το ΥΑΦ και των υλικών που το περιβάλλουν σε περίπτωση διαρροής του. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική για να προστατευτεί το ΥΑΦ από τη διάβρωση άλλα και για να αποφευχθούν φαινόμενα που επηρεάζουν σημαντικά λειτουργίες που επιτελούν τα γειτονικά υλικά.
- (vi) Περιορισμοί ασφαλείας όπως η χρήση μη τοξικών, πυρίμαχων και φιλικών προς το περιβάλλον υλικών.

Τέλος, ένα ΥΑΦ θα πρέπει να πληροί τις παρακάτω οικονομικές απαιτήσεις:

- (i) Διαθεσιμότητα και αφθονία του υλικού.
- (ii) Οικονομική απόδοση.
- (iii) Χαμηλή τιμή ώστε η λύση να είναι ανταγωνιστική με άλλες επιλογές αποθήκευσης θερμότητας καθώς και με μεθόδους παροχής θέρμανσης και ψύξης χωρίς αποθήκευση.
- (iv) Καλή ανακυκλωσιμότητα για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους.

**Πίνακας 2.1** Κύριες επιθυμητές ιδιότητες των ΥΑΦ σε ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας [6]

Thermal properties	Physical properties	Chemical properties	Economic factors
Phase change temperature suitable to the desired operating range	High density	Chemical stability	Available in large quantities
High latent heat per unit mass	Low density variation during phase change	No chemical decomposition	Inexpensive
High specific heat	Little or no supercooling during freezing	Compatibility with container materials	
High thermal conductivity in both solid and liquid phases		Non-poisonous, non-inflammable and non-explosive	

### 2.3.1.1.2. Συχνά προβλήματα ΥΑΦ σε ένα ΣΑΛΘ και βασικές προσεγγίσεις επίλυσής τους

Συνήθως ένα υλικό που επιλέχθηκε ως ΥΑΦ δεν πληροί όλα τα κριτήρια που συζητήθηκαν ανωτέρω. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφορες στρατηγικές για τη λύση ή την αποφυγή πιθανών προβλημάτων.

#### Το φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων [1]

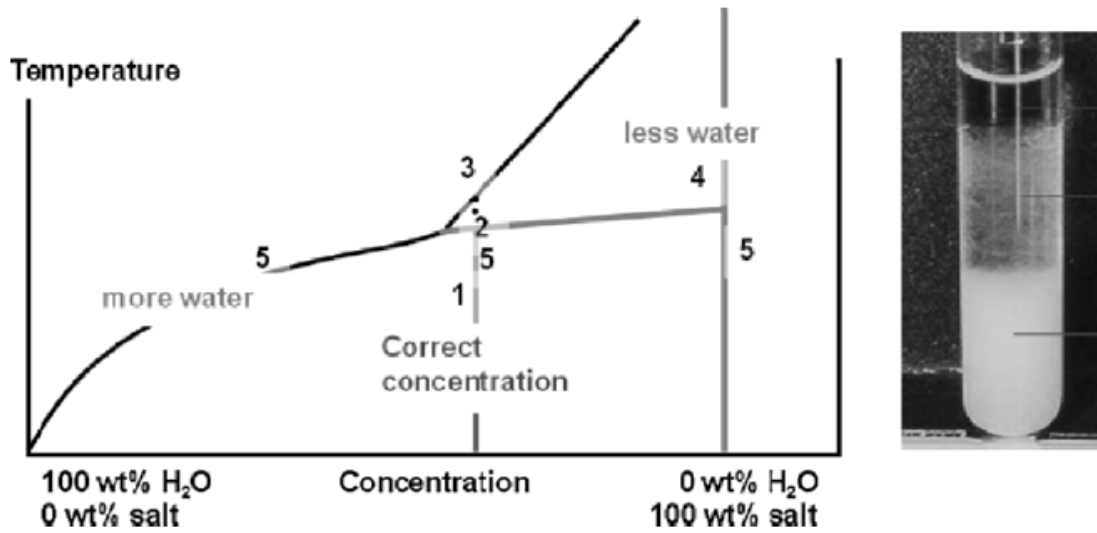
Το φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων είναι ένα πιθανό πρόβλημα σε ΥΑΦ που αποτελούνται από διαφορετικά συστατικά. Το φαινόμενο εξηγείται στο σχήμα 2.12, με ένα ένυδρο άλας ως παράδειγμα.

Ένα ένυδρο άλας αποτελείται από δύο συστατικά, το άλας (π.χ.  $\text{CaCl}_2$ ) και το νερό (π.χ.  $6\text{H}_2\text{O}$ ). Η ενιαία στερεή φάση του ένυδρου αλάτος θερμαίνεται αρχικά από το σημείο 1, στο σημείο 2. Στο σημείο 3 το υλικό έχει περάσει τη γραμμή liquidus κι είναι εξολοκλήρου υγρό. Κατά την ψύξη ή θέρμανση ανάμεσα στα σημεία 2 και 3 το υλικό βρίσκεται στη διφασική περιοχή όπου συνυπάρχουν το υγρό και μικρή ποσότητα μιας φάσης με λιγότερο νερό (σημείο 4). Αν αυτές οι φάσεις διαφέρουν σε πυκνότητα αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μακροσκοπικό διαχωρισμό των φάσεων και συνεπώς διαφορετικές συγκεντρώσεις των χημικών που συνθέτουν το ΥΑΦ.

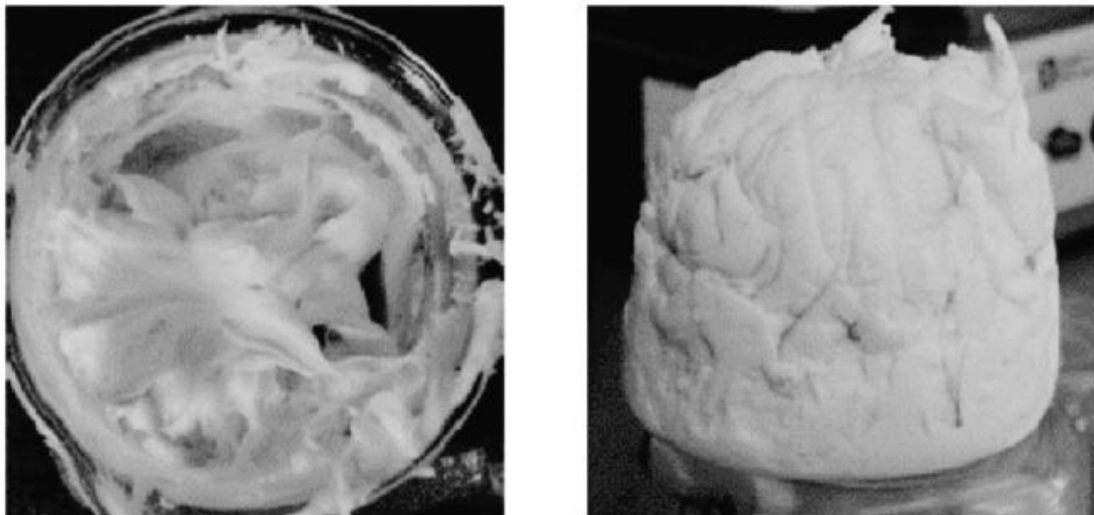
Όταν η θερμοκρασία του δείγματος μειώνεται κάτω από το σημείο τήξης, η λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης συνήθως δεν μπορεί να αποδοθεί, αφού κάτι τέτοιο θα απαιτούσε τη σωστή συγκέντρωση των χημικών συστατικών σε όλο το δείγμα έτσι ώστε να ξανασηματιστεί το στερεό ΥΑΦ. Όταν το δείγμα θερμαίνεται μέχρι μια θερμοκρασία όπου όλο το δείγμα βρίσκεται στην περιοχή του υγρού (σημείο 3) οι διαφορετικές φάσεις θα αναμειχθούν ξανά με μοριακή διάχυση. Αν το δείγμα δεν αναδευτεί τεχνητά, αυτή η διαδικασία μπορεί να διαρκέσει πολλές ώρες ή ακόμη και μέρες.

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο διαχωρισμός των φάσεων μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση ενός γελλώδους πρόσθετου. Το γελλώδες πρόσθετο σχηματίζει ένα λεπτόκοκκο δίκτυο μέσα στο ΥΑΦ και κατ' επέκταση χτίζει μικρά διαμερίσματα που εμποδίζουν τις φάσεις με διαφορετική πυκνότητα να διαχωριστούν σε μακροσκοπικό επίπεδο (Σχ. 2.13).

Σε μερικές περιπτώσεις ο διαχωρισμός των φάσεων μπορεί να ξεπεραστεί με προσθήκη άλλων χημικών συστατικών στο αρχικό ΥΑΦ που αλλάζουν τελείως το διάγραμμα φάσεων έτσι ώστε να αποφευχθεί τελείως ο διαχωρισμός.



Σχ. 2.12. Διαχωρισμός των φάσεων ενός ένυδρου άλατος  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  σε τρεις διαφορετικές φάσεις με διαφορετική συγκέντρωση (δεξιά) κι αντίστοιχο διάγραμμα φάσεων (αριστερά) [1]



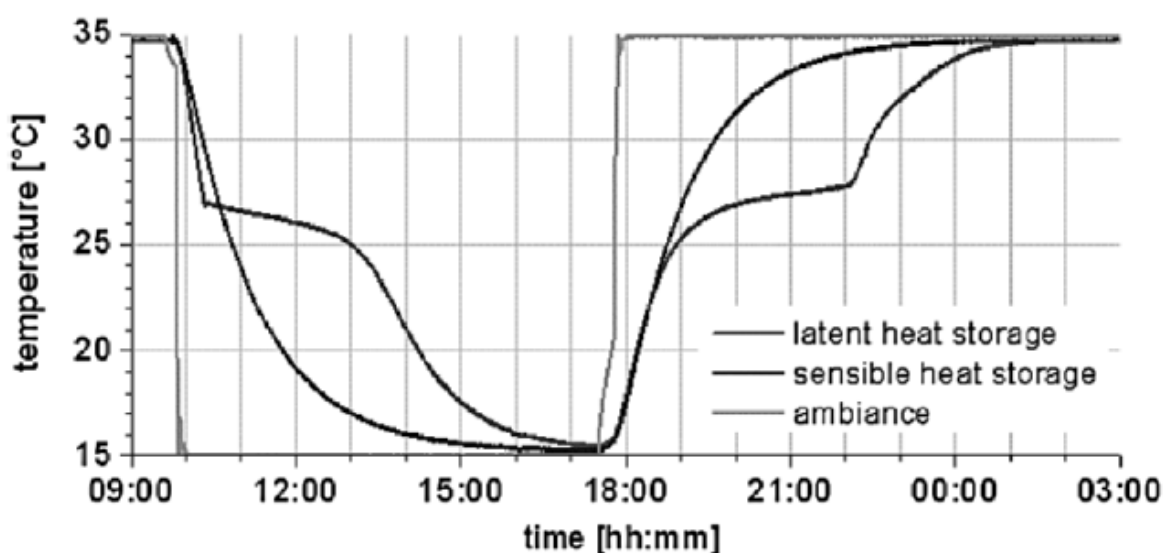
Σχ. 2.13. Γελλώδες πρόσθετο ενός ένυδρου άλατος ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) για την αποφυγή διαχωρισμού των φάσεων [1]

## Το φαινόμενο της υπόψυξης (subcooling) [1]

Ένα ιδανικό ΥΑΦ θα στερεοποιούνται και θα τήκονταν στην ίδια θερμοκρασία όπως φαίνεται στο σχήμα 2.14.

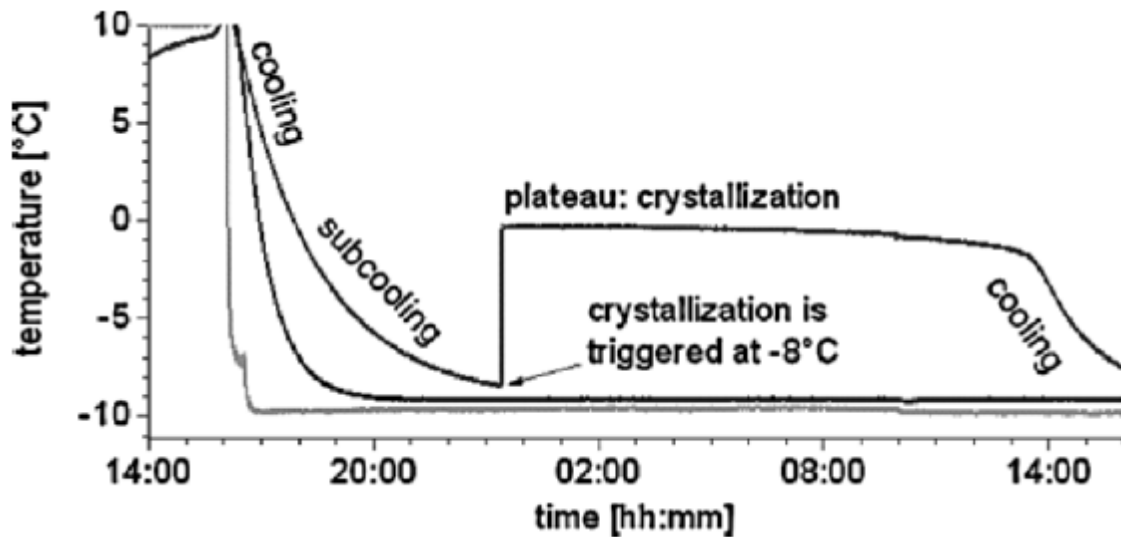
Ωστόσο, πολλά ΥΑΦ δε στερεοποιούνται αμέσως μόλις η θερμοκρασία πέσει κάτω από τη θερμοκρασία τήξης (Σχ. 2.15). Το φαινόμενο ονομάζεται υπόψυξη (subcooling) ή υπέρψυξη (supercooling). Κατά τη διάρκεια του φαινομένου το ΥΑΦ βρίσκεται σε μια μεταβατική κατάσταση που σημαίνει ότι δε βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Η υπόψυξη είναι σύνηθες φαινόμενο για πολλά ανόργανα ΥΑΦ.

Για να περιοριστεί ή να κατασταλεί το φαινόμενο, πρέπει να προστεθεί ένας παράγοντας πυρήνωσης για να εξασφαλίσει ότι η στερεή φάση θα σχηματιστεί με μικρή παρουσία υπόψυξης. Πιθανοί τέτοιοι παράγοντες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τους ενδογενείς και τους εξωγενείς. Οι ενδογενείς είναι σωματίδια στερεού του ίδιου του ΥΑΦ. Οι ενδογενείς παράγοντες πρέπει να κρατούνται ξεχωριστά από το ΥΑΦ αφού διαφορετικά θα λιώσουν μαζί με του και θα αχρηστευτούν ως παράγοντες στερεοποίησης. Οι εξωγενείς παράγοντες από την άλλη, είναι χημικά που παρουσιάζουν παρόμοια κρυσταλλική δομή με το στερεό ΥΑΦ. Αυτό συνήθως σημαίνει ότι έχουν παρόμοιες θερμοκρασίες τήξης όπως το ίδιο το ΥΑΦ και συνεπώς αδρανοποιούνται σε θερμοκρασίες πολύ κοντά στη θερμοκρασία τήξης του ίδιου του ΥΑΦ.



Σχ. 2.14. Στερεοποίηση και τήξη ενός ΥΑΦ που είναι σχεδόν ιδανικό [1]

Οι παράγοντες πυρήνωσης έχουν αναπτυχθεί για πολλά αλλά όχι για όλα τα ΥΑΦ που έχουν μελετηθεί εκτενώς. Η έρευνα για την εύρεση ενός παράγοντα πυρήνωσης για ένα νέο ΥΑΦ είναι συνήθως χρονοβόρα και συχνά ανεπιτυχής, αφού ακόμα δεν υπάρχει μια θεωρητική προσέγγιση για το θέμα.



Σχ. 2.15. Υπόψυξη του νερού [1]

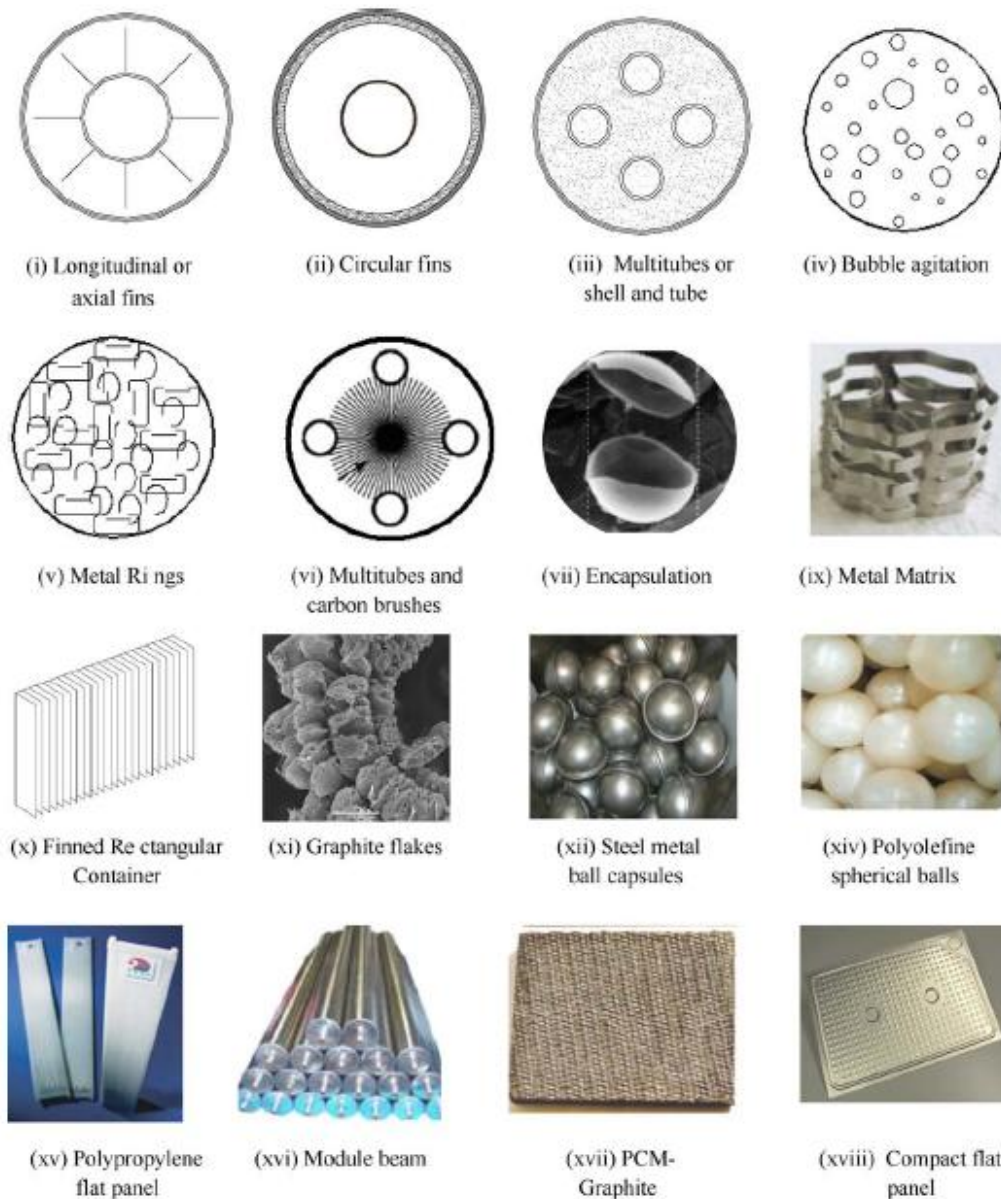
### Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα

Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα είναι μια ενδογενής ιδιότητα των μη μεταλλικών υγρών εν γένει. Το πρόβλημα με τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα στα συστήματα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας είναι ότι τα ΥΑΦ αποθηκεύουν μεγάλη ποσότητα θερμότητας σε μικρό όγκο κι αυτή η θερμότητα πρέπει να μεταφερθεί μέσω της επιφάνειας αυτού του όγκου και στη συνέχεια να αποδοθεί μέσω της ίδιας επιφάνειας στο σύστημα [1].

Τα περισσότερα ΥΑΦ έχουν ανεπίτρεπτα χαμηλή θερμική αγωγιμότητα με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε πολύ χαμηλούς ρυθμούς φόρτισης κι αποφόρτισης. Έτσι, τεχνικές ενίσχυσης της θερμικής αγωγιμότητας είναι απαραίτητες στα περισσότερα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες μελέτες για την εύρεση τεχνικών βελτίωσης της θερμικής αγωγιμότητας στα ΥΑΦ. Οι περισσότερες αφορούν σωληνώσεις με πτερύγια διαφορετικών διαμορφώσεων (Σχ. 2.16 i), ανάδευση με φυσαλίδες (Σχ. 2.16 iv), εισαγωγή μεταλλικού πλέγματος στο ΥΑΦ (Σχ. 2.16 ix), χρήση ΥΑΦ με

σωματίδια υψηλής αγωγιμότητας και εγκλεισμό του ΥΑΦ σε μικροκάψουλες (Σχ. 2.16 vii), κελύφη και σωληνώσεις (Σχ. 2.16 iii) [8].



**Σχ. 2.16.** Τεχνικές ενίσχυσης μεταφοράς θερμότητας σε συστήματα ΥΑΦ [8]

Η πλειοψηφία των τεχνικών βασίζονται στην προσθήκη περυγίων στο ΥΑΦ. Αυτή η λύση έχει επικρατήσει χάρη στην απλότητα, την ευκολία παρασκευής και το χαμηλό κόστος. Η τεχνική περιλαμβάνει την ενσωμάτωση πλέγματος μέσα στο ΥΑΦ με χρήση υλικών υψηλής αγωγιμότητας όπως οι ίνες άνθρακα σε διάφορους σχηματισμούς και η προσθήκη πολλαπλών σωληνώσεων (Σχ. 2.16 vi).

Οι γενικές παρατηρήσεις που έχουν εξαχθεί από τις διάφορες μελέτες είναι ότι άσχετα από το ΥΑΦ που χρησιμοποιείται, τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας του ΥΑΦ μπορούν να βελτιωθούν χρησιμοποιώντας όλες τις διαφορετικές μεθόδους. Η καλύτερη τεχνική όπως αυτή έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία είναι αυτή που μελετήθηκε το 1999 από τον Velraj και τους συνεργάτες του [74] όπου η θερμική αγωγιμότητα παραφίνης με δακτυλίου (2 W/mK ) ήταν 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή της κανονικής παραφίνης (0.2 W/mK).

### 2.3.1.2. Τοποθέτηση του ΥΑΦ στο ΣΑΛΘ – το δοχείο αποθήκευσης

Σχεδόν στην πλειοψηφία των εφαρμογών, το ΥΑΦ πρέπει να τοποθετηθεί σε κάποιο δοχείο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τεχνική χρήση. Όταν το ΥΑΦ έχει επιλεγεί, οι επόμενοι σημαντικότεροι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η γεωμετρία του δοχείου κι οι θερμικές και γεωμετρικές παράμετροι του δοχείου που απαιτούνται για μια δεδομένη ποσότητα ΥΑΦ. Κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους έχουν άμεση επίδραση στα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας του ΥΑΦ και τελικά το χρόνο τήξης και την απόδοση της μονάδας αποθήκευσης.

Για να εξασφαλίσουμε μακροχρόνια απόδοση οποιουδήποτε συστήματος ΥΑΦ, το σχήμα και μέγεθος του δοχείου του ΥΑΦ πρέπει να είναι κατάλληλο για το χρόνο τήξης του ΥΑΦ και την καθημερινή ηλιοφάνεια σε μια δεδομένη τοποθεσία, αν η πηγή ενέργειας είναι ο ήλιος [8].

Οι κυριότερες απαιτήσεις από το δοχείο που περιέχει το ΥΑΦ είναι:

- να έχει μηχανική αντοχή, ευελιξία, αντοχή στη διάβρωση και θερμική σταθερότητα
- να δρα ως φράγμα που θα προστατεύει το ΥΑΦ από επαφή με το περιβάλλον
- να παρέχει επαρκή επιφάνεια για μεταφορά θερμότητας
- να παρέχει σταθερότητα στη δομή και ευκολία στο χειρισμό
- και να έχει σχήμα και μέγεθος που να αντιστοιχεί στο χρόνο τήξης και την καθημερινή ηλιακή ακτινοβολία, αν η πηγή της θερμότητας είναι ο ήλιος.

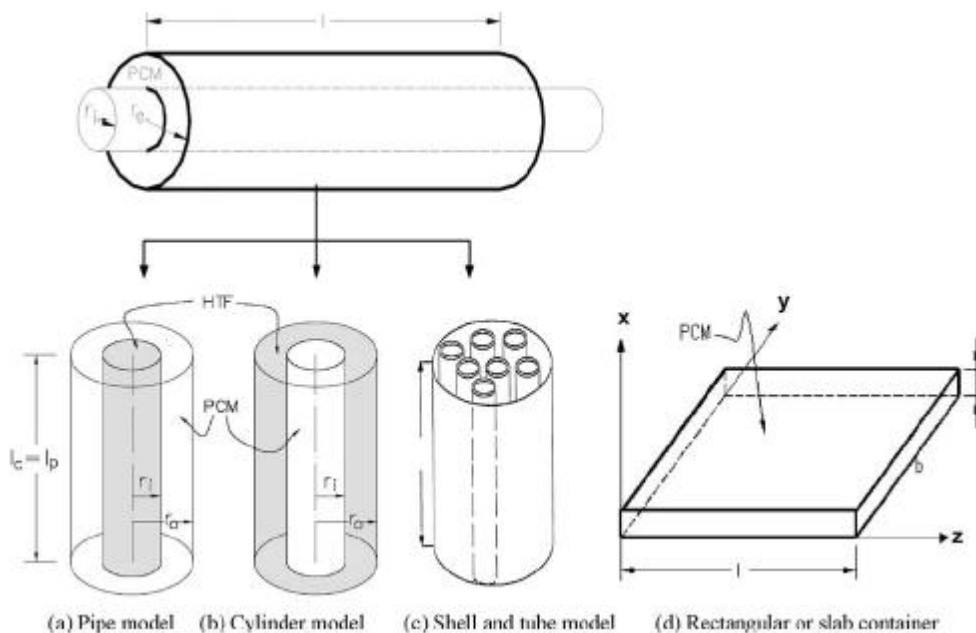
Τα κυριότερα είδη δοχείων που έχουν μελετηθεί είναι το δοχείο - δεξαμενή αποθήκευσης με εναλλάκτη θερμότητας, οι μικροκάψουλες και οι μακροκάψουλες [6]. Αυτές οι λύσεις για την τοποθέτηση του ΥΑΦ χρησιμοποιούνται μεμονωμένα ή ακόμα μπορεί και να συνδυάζονται σε κάποια εφαρμογή.



### 2.3.1.2.1. Τοποθέτηση ΥΑΦ σε δεξαμενή αποθήκευσης - εναλλάκτη

Τέτοιες διατάξεις προϋποθέτουν το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας να έχει κάποιο ρευστό μεταφοράς θερμότητας ως το μέσο που φορτίζει κι αποφορτίζει το ΥΑΦ. Οι δεξαμενές – εναλλάκτες για ΥΑΦ είναι παρόμοιες σε σχεδίαση με τις υπάρχουσες δεξαμενές που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση θερμότητας αλλά με ορισμένες σημαντικές διαφορές. Το βασικότερο χαρακτηριστικό των δεξαμενών με ΥΑΦ είναι η ανάγκη για μεγαλύτερο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας απ’ ότι στις δεξαμενές αποθήκευσης ενέργειας χωρίς ΥΑΦ μιας κι η πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας των ΥΑΦ είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με άλλα μέσα αποθήκευσης. Οι λύσεις που εφαρμόζονται για την επίτευξη τέτοιων υψηλών ρυθμών περιλαμβάνουν εσωτερικά περύγια ή χρήση σωματιδίων με υψηλή αγωγιμότητα, μεταλλικές δομές, ίνες στα άκρα του ΥΑΦ κι εναλλάκτες άμεσου επαφής [6].

Η γεωμετρία των δεξαμενών ποικίλλει. Μια μελέτη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας αποκαλύπτει ότι οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες γεωμετρίες είναι τα τετραγωνικά και τα κυλινδρικά δοχεία (Σχ. 2.17).

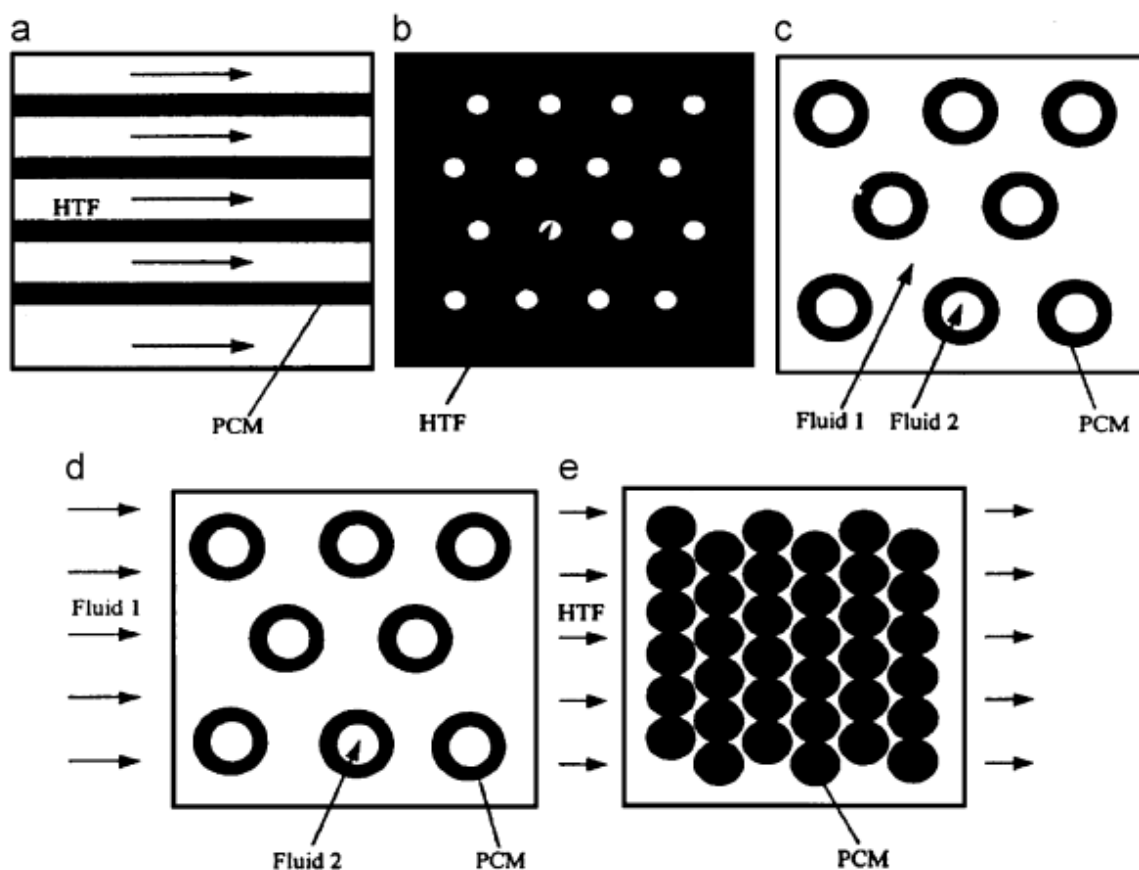


**Σχ. 2.17.** Κοινές διατάξεις και γεωμετρίες χρησιμοποιούμενων δεξαμενών αποθήκευσης θερμότητας με ΥΑΦ [8]

Τα ΥΑΦ τοποθετούνται μέσα στις δεξαμενές σε διάφορες διατάξεις, συνήθως σε επιμήκεις λεπτές σωλήνες, πλάκες, κάψουλες ή ακόμα και χύμα.

Η απλή περίπτωση είναι η ύπαρξη μιας κυλινδρικής δεξαμενής όπου το ΥΑΦ γεμίζει το κέλυφος της δεξαμενής (shell) και το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (heat transfer fluid) ρέει διαμέσου μιας μοναδικής σωληνώσεως (pipe model) (Σχ. 2.17 a). Άλλη εκδοχή αυτής της διάταξης είναι η τοποθέτηση του ΥΑΦ στο εσωτερικό της σωληνώσεως με το HTF να ρέει παράλληλα σε αυτή (cylinder model) (Σχ. 2.17 b). Αυτού του είδους οι διατάξεις συναντώνται συχνά στη βιβλιογραφία και χρησιμοποιούνται από τους μελετητές των ΣΑΛΘ λόγω της απλότητάς τους, ωστόσο, σε πραγματικές εφαρμογές οι διατάξεις είναι περισσότερο πολύπλοκες με συστοιχία πολλαπλών σωληνώσεων ή στρωμάτων ΥΑΦ.

Το σχήμα 2.18 παρουσιάζει διάφορους σχηματισμούς για την τοποθέτηση του ΥΑΦ στο εσωτερικό των δοχείων – δεξαμενών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (Σχ. 2.18).



**Σχ. 2.18.** Σχηματική απεικόνιση τυπικών συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας [9]. Σύστημα (a) επίπεδης πλάκας, (b) κελύφους – σωληνώσεων με εσωτερική ροή (c) κελύφους – σωληνώσεων με παράλληλη ροή (d) κελύφους – σωληνώσεων με διασταυρούμενη ροή (e) στρώματος με σφαιρικές κάψουλες.

Η πρώτη εκδοχή είναι η τοποθέτηση του ΥΑΦ σε πλάκες στο εσωτερικό της δεξαμενής κι η ροή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας πάνω και κάτω από αυτές (Σχ. 2.18 a).

Η διάταξη που έχει μελετηθεί εκτενέστερα είναι η μονάδα κελύφους – σωληνώσεων (shell and tube system) που χρησιμοποιείται στο 70% των περιπτώσεων (Σχ. 2.18 a-d). Κάτι τέτοιο είναι λογικό αν αναλογιστεί κανείς ότι τα περισσότερα μηχανικά συστήματα περιλαμβάνουν κυλινδρικές σωληνώσεις και επιπλέον, οι απώλειες θερμότητας από το σύστημα κελύφους – σωληνώσεων είναι αμελητέες [8]. Στη διάταξη αυτή, το ΥΑΦ περιλαμβάνεται στο εσωτερικό των σωληνώσεων στο εξωτερικό των οποίων ρέει ρευστό φορτίζοντας κι αποφορτίζοντας το ΥΑΦ. Μια εκδοχή του συστήματος κελύφους – σωληνώσεων είναι η τοποθέτηση του ΥΑΦ στο εσωτερικό των σωληνώσεων που βρίσκονται στη δεξαμενή γεμάτη από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (shell and tube with internal flow) (Σχ. 2.18 b). Άλλη εκδοχή του ίδιου συστήματος, είναι η τοποθέτηση του ΥΑΦ ως περίβλημα στις σωληνώσεις στο εσωτερικό των οποίων ρέει ένα ρευστό (fluid 2), ενώ η δεξαμενή είναι γεμάτη από ένα άλλο ρευστό (fluid 1) (shell and tube with parallel flow (Σχ. 2.18 c). Τέλος, η ίδια διάταξη μπορεί να πραγματοποιηθεί με το ρευστό 1 (fluid 1) να ρέει σε αντιστροφή με το ρευστό 2 που ρέει στο εσωτερικό των σωληνώσεων οι οποίες περιβάλλονται εξωτερικά από το ΥΑΦ (Σχ. 2.18 d).

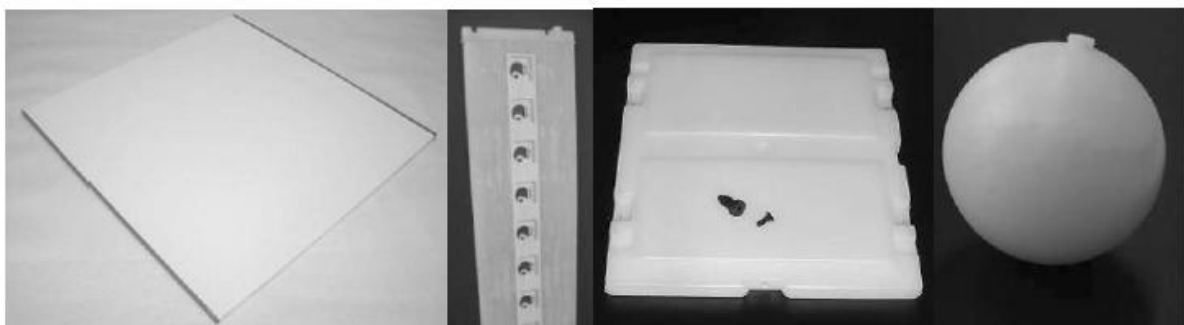
Μια επιπλέον εκδοχή είναι η τοποθέτηση του ΥΑΦ σε σφαιρικές κάψουλες μέσα στη δεξαμενή γύρω από τις οποίες ρέει το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (Σχ. 2.18 e).

#### 2.3.1.2.2. Τοποθέτηση ΥΑΦ σε μακροκάψουλες (μακροενθυλάκωση, macroencapsulation)

Ο πιο κοινός τύπος δοχείου ΥΑΦ είναι οι μακροκάψουλες (μακροθυλάκια). Σε μια μακροκάψουλα μπορεί να περιέχεται σημαντική ποσότητα ΥΑΦ με τη μάζα να ποικίλλει από μερικά γραμμάρια μέχρι ένα κιλό. Το πλεονέκτημα της τοποθέτησης του ΥΑΦ σε μακροκάψουλες είναι ότι ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας μπορεί εύκολα να χρησιμοποιείται τόσο υγρό όσο και αέριο, ενώ οι μακροκάψουλες είναι εύκολες στη χρήση και τη μεταφορά. Το σχήμα των μακροκαψουλών διαφέρει από τετραγωνικές κάψουλες σε σφαίρες ή θυλάκια χωρίς καθορισμένο σχήμα. Το κλειδί για μια επιτυχημένη σχεδίαση της μακροκάψουλας είναι να σχεδιασθεί για να πληροί τα κριτήρια της συγκεκριμένης

εφαρμογής για την οποία προορίζεται. Οι μακροκάψουλες μπορεί να αποτρέψουν την έκταση του φαινομένου του διαχωρισμού των φάσεων, να αυξήσουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, και να παρέχουν μια αυτοστηριζόμενη δομή για το ΥΑΦ. Από οικονομικής πλευράς, οι πιο συμφέρουσες λύσεις είναι τα πλαστικά μπουκάλια (υψηλής πυκνότητας και χαμηλής πυκνότητας μπουκάλια από πολυαιθυλένιο), τενεκεδένια και ήπια χαλύβδινα κουτιά. Ωστόσο, η διάβρωση θα μπορούσε να οδηγήσει σε καταστροφικές συνέπειες σε περίπτωση που οι εσωτερικές κι οι εξωτερικές επιφανειακές στρώσεις των χαλύβδινων κουτιών δεν έχουν εφαρμοστεί σωστά. Η τοποθέτηση σε μακροκάψουλες είναι η κυρίαρχη λύση αποθήκευσης του ΥΑΦ στα συστήματα λανθάνουσας θερμότητας. Με προσεκτική επιλογή της γεωμετρίας και του υλικού της κάψουλας, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πληθώρα περιπτώσεων θερμικής αποθήκευσης [6].

Τα ένυδρα άλατα συνήθως τοποθετούνται σε πλαστικά δοχεία για λόγους συμβατότητας. Τα πλαστικά δεν διαβρώνονται από τα ένυδρα άλατα, ωστόσο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη στεγανότητα του υλικού του δοχείου ώστε να εξασφαλιστεί ότι η σύνθεση του ένυδρου άλατος δεν αλλάζει με το χρόνο. Πλαστικά δοχεία μπορεί να χρησιμοποιηθούν και για οργανικά ΥΑΦ, αλλά ο συνδυασμός των ΥΑΦ και του υλικού του δοχείου πρέπει να επιλεγεί πολύ προσεκτικά αφού μερικά οργανικά υλικά μπορεί να μαλακώσουν τα πλαστικά. Το σχήμα 2.19 δείχνει αρκετά παραδείγματα πλαστικών δοχείων από διαφορετικούς κατασκευαστές. Εξαιτίας της ευκολίας παραγωγής πλαστικών δοχείων στις μέρες μας υπάρχουν ελάχιστοι περιορισμοί στη γεωμετρία [1].



**Σχ. 2.19.** Μακροενθυλάκωση ΥΑΦ σε πλαστικά δοχεία διαφόρων γεωμετριών [1]

Άλλη μια μορφή μακροενθυλάκωσης δείχνει το σχήμα 2.20. Ένα φύλλο πλαστικού σχηματίζει κοιλότητες όπου τοποθετείται το ΥΑΦ πριν κλειστεί αεροστεγώς με πλαστική

μεμβράνη όπως ακριβώς συμβαίνει με τις κάψουλες των χαπιών στα φάρμακα. Τέτοιου είδους δοχεία μπορούν να παραχθούν σε μια πλήρως αυτοματοποιημένη γραμμή παραγωγής.

Αν αντί για δοχείο χρησιμοποιηθεί μόνο μεμβράνη ως υλικό που περιβάλλει το ΥΑΦ το αποτέλεσμα είναι ένα ΥΑΦ τοποθετημένο σε σακουλάκια. Το σχήμα 2.21 δείχνει δύο τέτοια παραδείγματα. Για την εξασφάλιση της στεγανότητας, συνήθως οι πλαστικές μεμβράνες χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ένα μεταλλικό στρώμα.

Αν στην εφαρμογή είναι σημαντικό να υπάρχει καλή μεταφορά θερμότητας, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των τοιχωμάτων ενός πλαστικού δοχείου μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα. Μια επιλογή είναι να επιλεγεί δοχείο με μεταλλικά τοιχώματα. Τα μεταλλικά τοιχώματα έχουν το πλεονέκτημα της υψηλότερης μηχανικής σταθερότητας όταν έχει επιλεγεί επαρκές πάχος τοιχώματος. Παρολαυτά, είναι αναγκαία η επιλογή ενός κατάλληλου μετάλλου που δεν διαβρώνεται από το ΥΑΦ. Αυτή η επιλογή θα πρέπει επιπλέον να λαμβάνει υπόψη τυχόν περιορισμούς που αφορούν το σχήμα, τη συγκόλληση των τμημάτων του δοχείου κ.τ.λ. Το σχήμα 2.22 παρουσιάζει δύο παραδείγματα μεταλλικών δοχείων ενθυλάκωσης ΥΑΦ [1].



**Σχ. 2.20.** Μακροενθυλάκωση σε συστοιχία από πλαστικές κοιλότητες όπως αυτές έχουν παραχθεί για ανόργανα ΥΑΦ από τις εταιρείες PCP και Dörken (εικόνα: ZAE Bayern) [1]



**Σχ. 2.21.** Μακροενθυλάκωση σε σακουλάκια. Αριστερά, της εταιρείας Climator (εικόνα: Climator), και δεξιά της εταιρείας Dörken (εικόνα: Dörken) [1]



**Σχ. 2.22.** Μακροενθυλάκωση σε μεταλλικά δοχεία: αριστερά, προφίλ αλουμινίου με περύγια για βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας της εταιρείας Climator (εικόνα: Climator), και δεξιά, πλάκα αλουμινίου της εταιρείας Rubitherm Technologies GmbH (εικόνα: Rubitherm Technologies GmbH) [1]

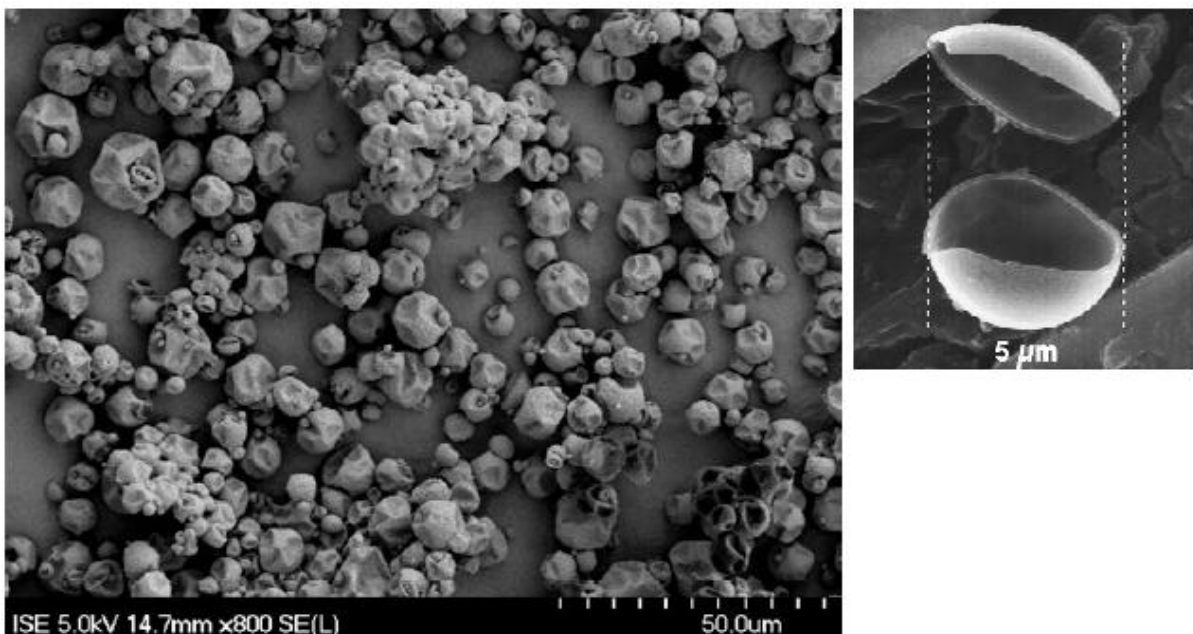
### 2.3.1.2.3. Τοποθέτηση ΥΑΦ σε μικροκάψουλες (μικροενθυλάκωση, microencapsulation)

Η τοποθέτηση σε μικροκάψουλες περιλαμβάνει τεχνικές που έχουν πρόσφατα αναπτυχθεί και κατά τις οποίες ένας μεγάλος αριθμός από μικρά σωματίδια (μικρότερα από 1 mm σε διάμετρο) ΥΑΦ περιλαμβάνονται σε ένα κλεισμένο, συνεχές πλέγμα ή στρώμα [6].

Το σύστημα με τις μικροκάψουλες βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας προς το περιβάλλον χάρη στη μεγάλη τιμή του λόγου επιφάνεια προς όγκο. Ακόμα, προσφέρει σταθερότητα κατά τη διάρκεια των κυκλικών φορτίσεων μιας και ο διαχωρισμός των φάσεων περιορίζεται σε μικροσκοπικές διαστάσεις.

Από την άλλη μεριά, εκτός από την περίπτωση που το πλέγμα που εμπεριέχει το ΥΑΦ έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, το σύστημα με τις μικροκάψουλες πάσχει από χαμηλό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Η δυσκαμψία του πλέγματος αποτρέπει κύματα συναγωγής και εξαναγκάζει όλη τη θερμότητα να μεταφερθεί με αγωγή. Αυτό μπορεί να μειώσει δραστικά τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας, ειδικά κατά τη φόρτιση. Προς το παρόν, το κόστος της τοποθέτησης ΥΑΦ σε μικροκάψουλες είναι υψηλό σε σχέση με άλλες μεθόδους αποθήκευσης και χρησιμοποιείται μόνο σε εφαρμογές θερμικού ελέγχου [6].

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν ανωτέρω, η μικροενθυλάκωση του ΥΑΦ είναι τεχνικά εφικτή μόνο για οργανικά ΥΑΦ, ενώ τα εμπορικά προϊόντα σχεδόν αποκλειστικά χρησιμοποιούν παραφίνη. Στο σχήμα 2.23 απεικονίζεται ΥΑΦ με τυπική διάμετρο θυλακίου μεταξύ 2 και 20  $\mu\text{m}$  της εταιρείας BASF. Οι εμπορικές λύσεις που υπάρχουν για παραφίνη σε μικροκάψουλες διατίθενται είτε σε υγρό διάλυμα είτε σε ξηρή σκόνη (Σχ. 2.24) [1].



**Σχ. 2.23.** Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Αριστερά, πολλές μικροκάψουλες (εικόνα: FhG-ISE) και δεξιά ανοιγμένη μικροκάψουλα (εικόνα: BASF) [1]



Σχ. 2.24. Μικροενθυλακωμένη παραφίνη που παράγεται από την εταιρεία BASF, στα αριστερά υπό τη μορφή διαλύματος και δεξιά υπό τη μορφή ξηρής σκόνης.(εικόνες: BASF) [1]

#### 2.3.1.2.4. Ενσωμάτωση ΥΑΦ σε σύνθετα υλικά [86]

ΥΑΦ ενσωματώνονται άμεσα κυρίως σε υλικά οικοδομών όπως γύψο, τσιμέντο, μπετόν, ή άλλα πορώδη υλικά με σκοπό τη δημιουργία ενός υλικού μικτού τύπου. Στη βιβλιογραφία συναντά κανείς διάφορες τεχνικές ενσωμάτωσης. Θερμότητα μεταφέρεται από τη μάζα του υλικού στους πόρους και αποθηκεύεται στο ΥΑΦ. Τα σημαντικότερα υλικά στα οποία ενσωματώνονται ΥΑΦ είναι ο πηλός, το τσιμέντο, το μπετό, το ξύλο κι άλλα μίγματα.

#### 2.3.1.2.5. Συμβατότητα ΥΑΦ με βασικά υλικά [1]

Η συμβατότητα του ΥΑΦ με άλλα υλικά είναι σημαντική αφού έχει άμεση σχέση με τη διάρκεια ζωής του δοχείου που το περιέχει και την πιθανότητα να υποστεί ζημιά το στενό περιβάλλον του ΥΑΦ σε περίπτωση διαρροής από το δοχείο.

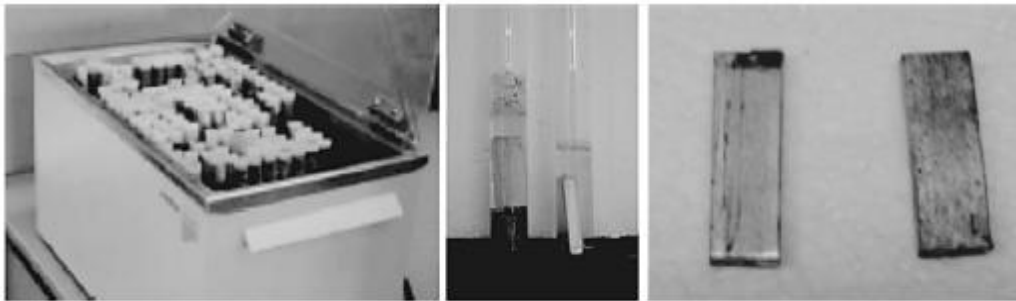
Τα συχνότερα προβλήματα που αφορούν τη συμβατότητα του ΥΑΦ με άλλα υλικά είναι:

- η διάβρωση μετάλλων σε επαφή με ανόργανα ΥΑΦ,
- η απώλεια της σταθερότητας των πλαστικών που έρχονται σε επαφή με οργανικά ΥΑΦ,



- και η εισχώρηση υγρού ή αερίου στα πλαστικά, πράγμα που επηρεάζει την απόδοση ενός οργανικού ή ανόργανου ΥΑΦ καθώς και το περιβάλλον του.

Για να αποφευχθούν τα ανωτέρω προβλήματα, έχουν αναπτυχθεί δοκιμές συμβατότητας (compatibility tests) υπό συνθήκες τυπικές για την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το ΥΑΦ. Από τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών γίνονται τελικά οι κατάλληλοι συνδυασμοί υλικών. Το σχήμα 2.25 δείχνει μια δοκιμή συμβατότητας μετάλλων που έρχονται σε επαφή με ανόργανο ΥΑΦ. Τα φιαλίδια που περιέχουν και τα δύο υλικά (κέντρο) φυλάσσονται σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον για δεδομένο χρονικό διάστημα (αριστερά) και στη συνέχεια μελετώνται οι επιδράσεις πάνω στο μέταλλο (δεξιά).



Σχ. 2.25. Δοκιμή συμβατότητας για συνδυασμό μετάλλου με ανόργανο ΥΑΦ

### 2.3.1.3. Η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας

Ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας (ΣΑΛΘ) θερμότητας πρέπει να διαθέτει έναν εναλλάκτη θερμότητας που να μεταφέρει θερμότητα από την πηγή στην ουσία αποθήκευσης κι από την τελευταία στο θερμοδοχείο όπου αυτή πρέπει τελικά να αποδοθεί. Το ίδιο το είδος της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας παίζει σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση του ΣΑΛΘ αφού επηρεάζει έντονα τη διακύμανση της θερμοκρασίας κατά τη φόρτιση κι αποφόρτιση του ΥΑΦ. Μια σωστή σχεδίαση ενός ΣΑΛΘ απαιτεί ποσοτική πληροφόρηση για τη διεργασία μεταφοράς θερμότητας κι αλλαγή φάσης στο ΥΑΦ. Η πλειοψηφία των ΥΑΦ (κυρίως στη στερεή φάση) παρουσιάζουν χαρακτηριστικά μόνωσης, με συνέπεια να δημιουργείται πρόβλημα ανάκτησης της θερμότητας κατά τις κυκλικές φορτίσεις κι αποφορτίσεις. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί με χρησιμοποίηση μεταλλικών επιφανειών με σωληνώσεις και πληθώρα διαμορφώσεων που έχουν προταθεί από τους ερευνητές [75].

Σε ένα ΣΑΛΘ μπορεί να μην υπάρχει τέτοια επιφάνεια όταν το ΥΑΦ είναι ενσωματωμένο σε σύνθετα υλικά και δεν υπάρχει κάποιο περίβλημα ή δοχείο που να παίζει το ρόλο της συναλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον.

Όταν το ΥΑΦ τοποθετείται στο σύστημα με το δοχείο του χωρίς επιπλέον δεξαμενή αποθήκευσης, η επιφάνεια συναλλαγής είναι η ίδια η επιφάνεια του δοχείου του ΥΑΦ συμπεριλαμβανομένων οποιονδήποτε τεχνητών διαμορφώσεων (επεκτάσεων) για ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας, όπως πτερύγια, κελύφη, κ.τ.λ.

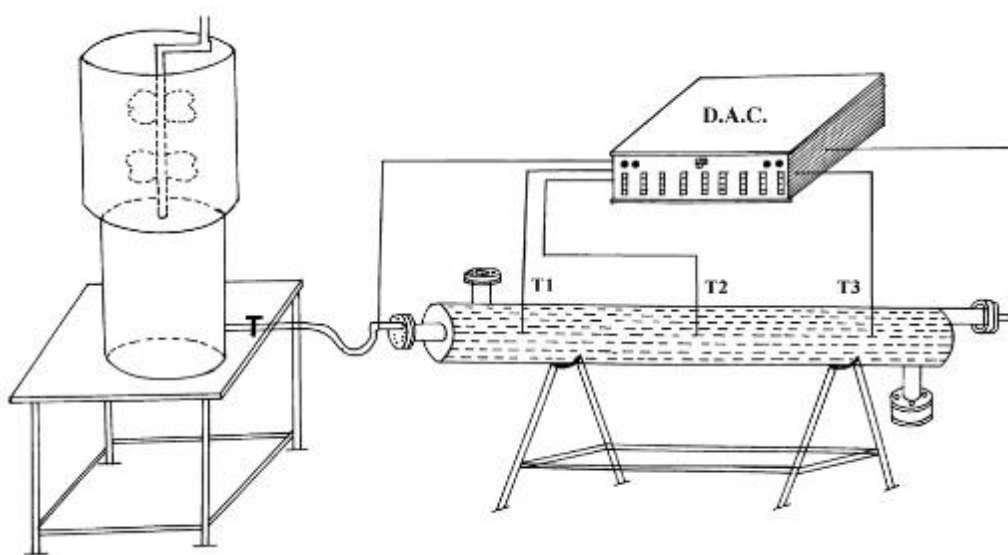
Σε συστήματα όπου το εργαζόμενο μέσο είναι κάποιο ρευστό και υπάρχει ξεχωριστή μονάδα αποθήκευσης θερμότητας (δεξαμενή αποθήκευσης), η επιφάνεια συναλλαγής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας κατάλληλα διαμορφωμένος ώστε να συναλλάσσει θερμότητα μεταξύ του ρευστού και του ΥΑΦ. Τέτοια συστήματα μπορεί να είναι ηλιακά συστήματα θέρμανσης χώρων ή νερού χρήσης σε μια οικία, με εργαζόμενο μέσο τον αέρα ή το νερό.

#### 2.3.1.3.1. Πειραματικές διατάξεις εναλλακτών θερμότητας με ΥΑΦ

Ο Buddhi [76] σχεδίασε και κατασκεύασε έναν εναλλάκτη κελύφους – σωληνώσεων με ΥΑΦ χωρίς πτερύγια, για την ανάκτηση θερμότητας που θα απορρίπτονταν στο περιβάλλον από μια βιομηχανία. Για τη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας του συστήματος, η ακτινική απόσταση μεταξύ των σωλήνων κρατήθηκε στα 3 – 4 cm. Η μελέτη εξέτασε τη θερμική απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας κατά τις διεργασίες φόρτισης και αποφόρτισης του ΥΑΦ για διαφορετικές παροχές μάζας και διαφορετικές θερμοκρασίες εισόδου του εισερχόμενου νερού. Ως ΥΑΦ στη διάταξη χρησιμοποιήθηκε στεατικό οξύ που πλήρωσε το 90% του όγκου της δεξαμενής. Εξαιτίας της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του ΥΑΦ, οι τιμές των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας βρέθηκαν χαμηλές. Στο σχήμα 2.26 απεικονίζεται σχηματικά ένας εναλλάκτης θερμότητας κελύφους – σωληνώσεων με πτερύγια και διβάθμια δεξαμενή τροφοδότησης της εγκατάστασης με νερό. Το νερό παίζει το ρόλο του ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Σε παρόμοια εγκατάσταση [77] ένας εναλλάκτης – σωλήνας με πτερύγια αποτελείται από ένα δοχείο με τετραγωνική διατομή που φέρει σωλήνα στο διαμήκη άξονα. Στην εξωτερική επιφάνεια της σωλήνωσης που έρχεται σε επαφή με το ΥΑΦ τοποθετήθηκε επίστρωση από χρώμιο για λόγους συμβατότητας του υλικού της σωλήνωσης με το ΥΑΦ. Το δοχείο καθώς επίσης και η σωλήνωση αποτελούνται από τρεις περιοχές, την περιοχή πηγής, την περιοχή αποθήκευσης και την περιοχή απόδοσης

της θερμότητας. Η σωλήνωση στην περιοχή της αποθήκευσης φέρει πτερύγια τοποθετημένα σε μικρά και ίσα διαστήματα.

Η Calmac Corporation [78] ανέπτυξε ένα ενεργητικό σύστημα για ηλιακή θέρμανση και ψύξη χώρων. Το σύστημα περιλάμβανε μια κυλινδρική δεξαμενή μέσα στην οποία ήταν τοποθετημένη πλαστική σωλήνωση μικρής διαμέτρου σε μορφή τυλίγματος, ως εναλλάκτης. Το σύστημα χρησιμοποιούσε ως ΥΑΦ ένα ένυδρο άλας. Ο πλαστικός εναλλάκτης θερμότητας είχε το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους και της μη διάβρωσης. Η σωλήνωση είχε 1.27 cm διάμετρο με 2.5 cm διάκενο για καλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Το σύστημα δοκιμάστηκε με επιτυχία σε 1000 κύκλους χωρίς υποβιβασμό της απόδοσής του.



Σχ. 2.26. Σχηματικό διάγραμμα εναλλάκτη κελύφους – σωληνώσεων με πτερύγια [3].

Άλλη μελέτη [79] εξέτασε εναλλάκτη θερμότητας αποτελούμενο από τετραγωνικό δοχείο για το ΥΑΦ κάτω από το οποίο υπήρχε ένα κανάλι τετραγωνικής διατομής μέσα στο οποίο κυκλοφορούσε το υγρό μεταφοράς θερμότητας. Ως ΥΑΦ χρησιμοποιήθηκε κερί (gulf wax) με σημείο τήξης 50 – 55° C. Η μελέτη κατέληξε στο ότι το σύστημα είχε κάποιους περιορισμούς στη μεταφορά θερμότητας εξαιτίας της αντίστασης που παρουσίαζε η στερεά φάση, γι' αυτό και προστέθηκε στο δοχείο τοίχωμα από αγωγίμο υλικό.

Άλλη μορφή εναλλάκτη που μελετήθηκε για ΣΑΛΘ ήταν ο εναλλάκτης κυλιόμενου κυλίνδρου. Ο Herrick [80] εξέτασε τον κυλιόμενο κύλινδρο για ηλιακή ψύξη και θέρμανση και χρησιμοποίησε ως ΥΑΦ το άλας του Glauber. Οι Santamouris και Lefas [81] σχεδίασαν έναν εναλλάκτη κυλιόμενου κυλίνδρου που αποτελούνταν από ένα σύνολο στοιχείων

εναλλαγής θερμότητας που λειτουργούσαν εν παραλλήλω, με σκοπό την παροχή ψύξης. Κάθε ένα από τα στοιχεία αυτά αποτελούνταν από έναν αριθμό μικρότερων κυλίνδρων τοποθετημένων σε έναν μεγαλύτερο, έτσι ώστε όλοι να περιστρέφονται ως μια μονάδα.

Τέλος, οι Farid και Kanzawa [82] εξέτασαν την απόδοση μιας μονάδας αποθήκευσης θερμότητας αποτελούμενης από κυλινδρικές κάψουλες γεμισμένες με ΥΑΦ, γύρω από τις οποίες κυκλοφορούσε αέρας για εναλλαγή θερμότητας. Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν τρεις εμπορικές παραφίνες με θερμοκρασίες τήξης 44, 53 και 64 °C [3].

Παραπάνω αναφέρθηκαν ορισμένες μόνο μορφές εναλλακτών θερμότητας με ΥΑΦ όπως αυτές μελετήθηκαν από ερευνητές, με πολλές ακόμα να υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, ωστόσο, έχει κι η μελέτη της χρήσης εναλλακτών θερμότητας που υπάρχουν στο εμπόριο για εφαρμογή σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

### 2.3.1.3.2. Εμπορικοί εναλλάκτες με προσθήκη ΥΑΦ [83]

Μελέτη ομάδας του πανεπιστημίου της πόλης Lleida της Ισπανίας παρουσίασε το 2009 μια συγκριτική μελέτη εναλλακτών θερμότητας του εμπορίου για χρήση ως συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

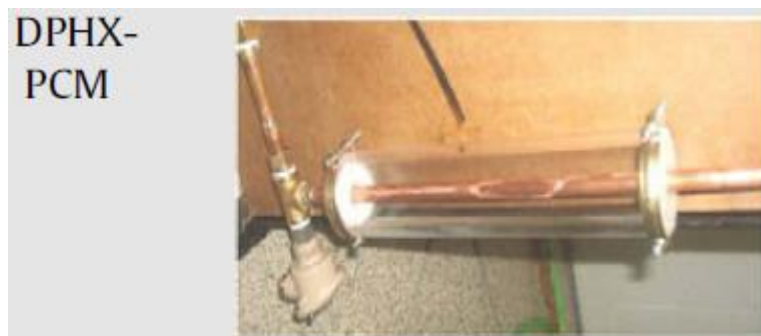
Η συγκεκριμένη ομάδα εξέτασε πειραματικά τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας πέντε μικρών εναλλακτών θερμότητας που εργάζονται ως συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας κατά τη διεργασία της φόρτισης κι αποφόρτισης. Σκοπός της έρευνας ήταν να αξιολογηθεί η πιθανή εφαρμογή τέτοιων εναλλακτών σε συστήματα μικρού μεγέθους όπως συσκευές τηλεπικοινωνιών ή οικιακών συσκευών. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από τυπικούς εναλλάκτες που βρίσκει κανείς στο εμπόριο και στους οποίους έχει τοποθετηθεί εμπορική παραφίνη RT35 ως ΥΑΦ. Το θερμοκρασιακό εύρος των εφαρμογών είναι 35 – 40 °C.

Ο πρώτος εναλλάκτης που εξετάστηκε ήταν ο εναλλάκτης ομόκεντρων σωληνώσεων ή διπλής σωληνώσεως όπως αλλιώς ονομάζεται (concentric tube heat exchanger ή double pipe heat exchanger) με προσθήκη ΥΑΦ σε τρεις παραλλαγές (Σχ. 2.32 a). Η πρώτη είναι εναλλάκτης που αποτελείται από δύο ομόκεντρες χάλκινες σωληνώσεις με το ΥΑΦ στο χώρο ανάμεσα στις δύο σωληνώσεις και το νερό να κυκλοφορεί στην εσωτερική σωληνώση όπως στο σχήμα 2.27 (DPHX – PCM). Η δεύτερη παραλλαγή είναι ουσιαστικά η ίδια παραπάνω διάταξη με πτερόγια (DPHX – fins PCM) (Σχ. 2.28), ενώ στην τρίτη παραλλαγή η διαφορά

είναι ότι το ΥΑΦ είναι ενσωματωμένο σε στρώμα γραφίτη για την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας (Σχ. 2.29) (DPHX – PCM matrix). Και στις τρεις παραλλαγές η εξωτερική σωλήνωση είναι διαφανής ώστε να επιτρέπει την οπτική εξέταση του ΥΑΦ.

Ο δεύτερος τύπος εναλλάκτη που εξετάστηκε είναι ο συμπαγής εναλλάκτης με ΥΑΦ (compact heat exchanger) (Comp HX – PCM) (Σχ. 2.30, Σχ. 2.32 c). Πρόκειται για τον κοινό εναλλάκτη θερμότητας με τη χάλκινη σωλήνωση και τα πτερύγια από αλουμίνιο που χρησιμοποιείται ως ατμοποιητής ή συμπυκνωτής σε κλιματιστικές μονάδες και προσφέρει μεγάλη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα όγκου. Το ΥΑΦ τοποθετήθηκε στην επιφάνεια μεταξύ των σωληνώσεων και των πτερυγίων ενώ όλος ο εναλλάκτης τοποθετήθηκε σε διαφανές κουτί (Σχ. 2.30)

Ο τρίτος τύπος εναλλάκτη είναι ένας εναλλάκτης – πλάκα (plate heat exchanger) που αποτελείται από 20 ανοξείδωτες χαλύβδινες πλάκες τοποθετημένες η μία πάνω στην άλλη σε πολύ κοντινή απόσταση σε δύο χαλύβδινα πλαίσια (Plate HX – PCM). Το ΥΑΦ είναι τοποθετημένο στα μισά από τα διάκενα ανάμεσα στις πλάκες (Σχ. 2.31, Σχ. 2.32 b)



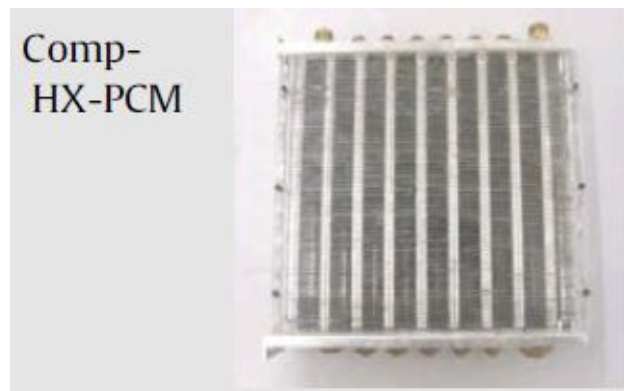
Σχ. 2.27. Εναλλάκτης διπλής σωλήνωσης με ΥΑΦ (DPHX- PCM) [83]



Σχ. 2.28. Εναλλάκτης διπλής σωλήνωσης με πτερύγια και ΥΑΦ (DPHX fins - PCM) [83]



**Σχ. 2.29.** Εναλλάκτης διπλής σωλήνωσης με ΥΑΦ σε στρώμα από γραφίτη (DPHX- PCM matrix) [83]



**Σχ. 2.30.** Συμπαγής εναλλάκτης με ΥΑΦ (Comp – HX – PCM) [83]

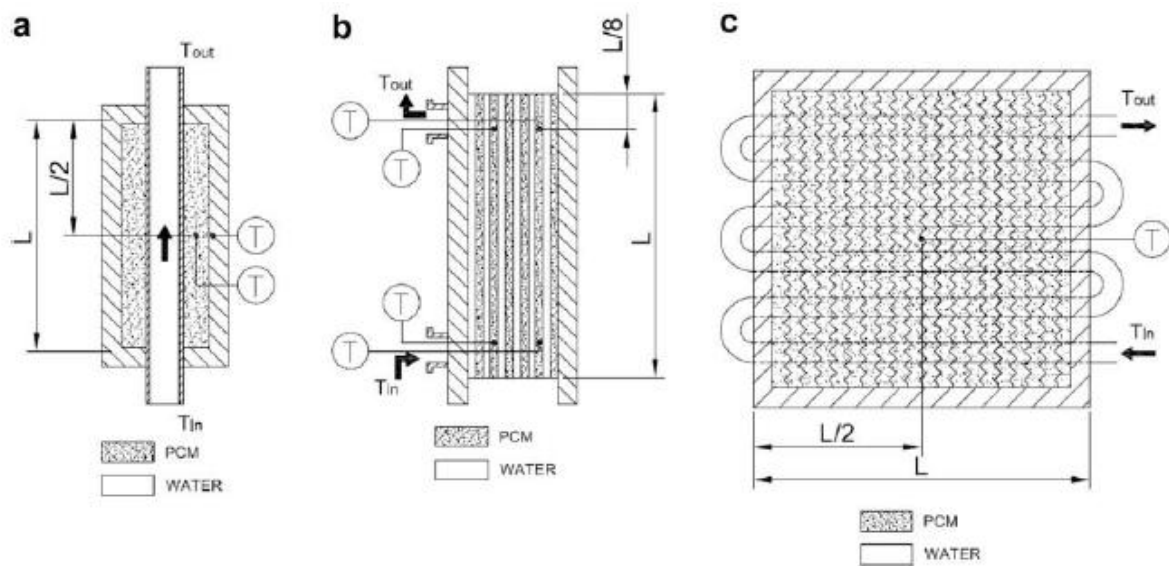


**Σχ. 2.31.** Εναλλάκτης – πλάκα με ΥΑΦ (Plate HX – PCM) [83]

Η ανάλυση των παραπάνω διατάξεων κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο εναλλάκτης διπλής σωλήνωσης (DPHX – PCM), κι ο εναλλάκτης - πλάκα (PlateHX- PCM) δεν επαρκούν για αποθήκευση θερμότητας, μιας και ο πρώτος παρουσιάζει πολύ χαμηλή επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, ενώ ο τελευταίος έχει πολύ χαμηλό λόγο αποθηκευτικής ικανότητας με ΥΑΦ προς αποθηκευτική ικανότητα χωρίς ΥΑΦ. Οι εναλλάκτες DPHX – PCM matrix,

DPHX fins – PCM και CompHX – PCM είναι περισσότερο υποσχόμενοι για εφαρμογή σε πραγματικές εφαρμογές.

Ο συμπαγής εναλλάκτης (CompHX – PCM) είναι με διαφορά ο εναλλάκτης με τη μεγαλύτερη μέση θερμική ισχύ, με τιμές πάνω από 1 kW τόσο για τη φόρτιση όσο και για την αποφόρτιση στις περιπτώσεις μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ νερού και ΥΑΦ. Ακόμα και στις περιπτώσεις που η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ νερού κι ΥΑΦ είναι μικρή, η μέση θερμική ισχύ που αποδίδει ο CompHX – PCM είναι τρεις φορές πιο μεγάλη από αυτή που επιτυγχάνει ο δεύτερος καλύτερος τύπος εναλλάκτη. Ο εναλλάκτης διπλής σωλήνωσης με ενσωματωμένο ΥΑΦ σε στρώμα γραφίτη (DPHX – PCM matrix) έχει την υψηλότερη μέση θερμική ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας και βαθμό θερμοκρασιακής διαφοράς με  $700 - 800 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , τιμή που είναι μια τάξη μεγέθους υψηλότερη από την τιμή του δεύτερου καλύτερου για αυτήν τη σύγκριση.



**Σχ. 2.32.** Λεπτομέρειες εναλλακτών θερμότητας με ΥΑΦ (a) εναλλάκτης θερμότητας διπλής σωλήνωσης (b) εναλλάκτης – πλάκα (c) συμπαγής εναλλάκτης [83]

## 2.3.2. Εφαρμογές ΣΑΛΘ – εμπορικά ΥΑΦ

### 2.3.2.1. Εφαρμογές θερμικής άνεσης και θερμικής αποθήκευσης

Ο πίνακας 2.2 συνοψίζει μερικές από τις σημαντικότερες εφαρμογές των ΥΑΦ σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, που συναντάμε στη βιβλιογραφία. Αυτές οι εφαρμογές μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες: εφαρμογές με σκοπό τη θερμική άνεση κι εφαρμογές με σκοπό τη θερμική αποθήκευση. Μια διαφορά ανάμεσα σε αυτές τις δύο βασικές κατηγορίες σχετίζεται με τη θερμική αγωγιμότητα. Σε κάποιες περιπτώσεις εφαρμογών για θερμική άνεση, είναι επιθυμητό να υπάρχουν χαμηλές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας στο σύστημα. Αντίθετα, σε συστήματα αποθήκευσης, αυτές οι χαμηλές τιμές μπορούν να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα, μιας και μπορεί σημαντική ποσότητα ενέργειας που είναι αποθηκευμένη να μην μπορεί να αποδοθεί αρκετά γρήγορα [6].

**Πίνακας 2.2.** Εφαρμογές ΥΑΦ – ΣΑΛΘ [6]

Sl. no.	Application
1	Thermal storage of solar energy
2	Passive storage in bioclimatic building/architecture
3	Cooling: use of off-peak rates and reduction of installed power, icebank
4	Heating and sanitary hot water: using off-peak rate and adapting unloading curves
5	Thermal protection of food: transport, hotel trade, ice-cream, etc.
6	Thermal protection of electronic devices (integrated in the appliance)
7	Medical applications: transport of blood, operating tables, hot and cold therapies
8	Cooling of engines (electric and combustion)
9	Thermal comfort in vehicles
10	Solar power plants

### 2.3.2.2. Κύριες εφαρμογές ΥΑΦ σε κτίρια

Η εφαρμογή των ΥΑΦ στα κτίρια μπορεί να έχει δύο διαφορετικούς στόχους. Πρώτον, τη χρήση φυσικής θερμότητας που προέρχεται από τον ήλιο για θέρμανση και ψύξη. Δεύτερον, την καλύτερη αξιοποίηση θερμότητας ή ψύξης από συμβατικές τεχνητές πηγές. Σε κάθε περίπτωση, αποθήκευση θερμότητας είναι απαραίτητη για την αντιστοίχιση της διαθεσιμότητας και της ζήτησης τόσο από πλευράς χρόνου όσο κι από πλευράς ισχύος.



Βασικά υπάρχουν τρεις τρόποι με τους οποίους γίνεται χρήση ΥΑΦ για θέρμανση και ψύξη στα κτίρια:

- (i) ΥΑΦ σε τοίχους
- (ii) ΥΑΦ σε λοιπά στοιχεία των κτιρίων
- (iii) ΥΑΦ σε μονάδες αποθήκευσης θερμότητας στα συστήματα θέρμανσης ή ψύξης των κτιρίων.

Οι δύο πρώτοι τρόποι αφορούν παθητικά συστήματα, όπου η θερμότητα αποθηκεύεται κι αποδίδεται αυτόματα όταν η εσωτερική ή η εξωτερική θερμοκρασία αυξηθεί ή πέσει πέρα από το σημείο τήξης. Ο τρίτος τρόπος αφορά ενεργητικά συστήματα, όπου η θερμότητα που αποθηκεύεται αξιοποιείται με τη βοήθεια τεχνικών μέσων μόνο όταν αυτό απαιτείται κι όχι αυτόματα. Στις εφαρμογές στα κτίρια εφαρμόζονται ΥΑΦ με διαφορετικά σημεία τήξης ανάλογα με το σημείο στο οποίο αυτά χρησιμοποιούνται. Προς το παρόν, υπάρχει μια έλλειψη εμπορικών ΥΑΦ στο χαμηλότερο θερμοκρασιακό εύρος ανάμεσα στους 5 και 25 °C. Ιδιαίτερα στο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 15 και 20 °C, τα διαθέσιμα προϊόντα παρουσιάζουν πολύ χαμηλές ενthalπίες. Τα σημαντικότερα ΥΑΦ βρίσκονται στο θερμοκρασιακό εύρος 22 – 25 °C, αφού σχεδόν όλοι συμφωνούν ότι αυτό είναι το κατάλληλο θερμοκρασιακό εύρος για παθητική θέρμανση και ψύξη [84].

Στη συνέχεια παρατίθενται οι σημαντικότερες εφαρμογές των ΣΑΛΘ στα κτίρια.

### Τοίχος Trombe με ΥΑΦ [84]

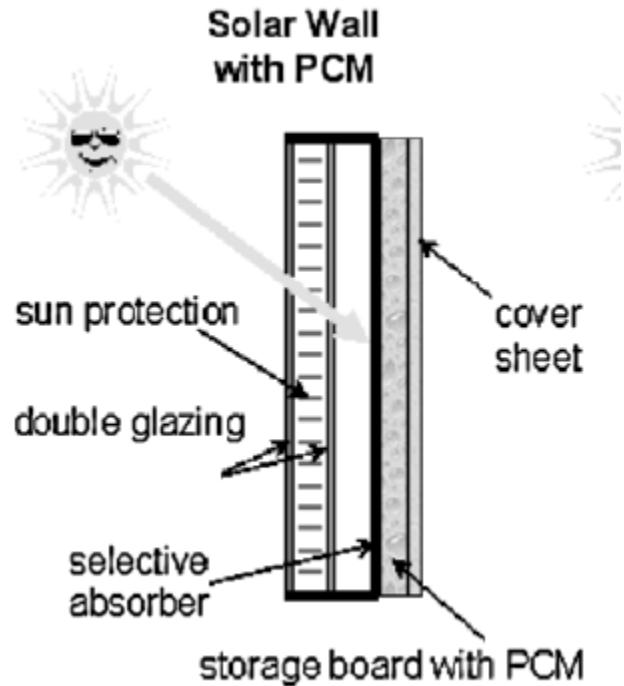
Ένας τοίχος Trombe (Σχ. 2.33) αποτελείται από έναν παχύ τοίχο στη νότια πλευρά του κτιρίου με μονό ή διπλό στρώμα από γυαλί ή πλαστικό τοποθετημένο στην εξωτερική πλευρά του τοίχου σε απόσταση περίπου 10 εκατοστών από τον τοίχο. Ο αέρας που υπάρχει στο διάκενο μεταξύ τοίχου και υαλοπίνακα θερμαίνεται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Η εξωτερική πλευρά του τοίχου έχει μαύρο χρώμα ώστε να απορροφά περισσότερη θερμότητα που στη συνέχεια θα αποθηκευτεί στη μάζα του τοίχου. Η θερμότητα μπορεί να αποδοθεί από τον τοίχο Trombe στον εσωτερικό χώρο μετά από αρκετές ώρες. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία πέσει κάτω από αυτή της επιφάνειας του τοίχου, θερμότητα αρχίζει να ακτινοβολεί στον εσωτερικό χώρο. Οι απώλειες θερμότητας από τον τοίχο Trombe μπορεί να περιοριστούν από μια κουρτίνα μόνωσης που είναι κλειστή το βράδυ στον χώρο ανάμεσα στον υαλοπίνακα και τον τοίχο. Παραδοσιακά, ο τοίχος

Trombe βασίζεται σε αισθητή αποθήκευση θερμότητας, ωστόσο, εξαιτίας της δυνατότητας για μεγαλύτερη αποθήκευση θερμότητας στη μονάδα μάζας, ο τοίχος Trombe με ΥΑΦ είναι μια ελκυστική ιδέα που ακόμα περιμένει μελλοντική επιτυχημένη εφαρμογή. Ένας τοίχος γεμάτος με ΥΑΦ μπορεί να κατασκευαστεί στη νότια πλευρά μιας οικίας με σκοπό τη θέρμανση του εσωτερικού χώρου κατά τη διάρκεια της νύχτας. Για δεδομένη ποσότητα αποθήκευσης θερμότητας, τα ΥΑΦ απαιτούν λιγότερο χώρο από τον τοίχο με νερό και ζυγίζουν πολύ λιγότερο. Τα ΥΑΦ που χρησιμοποιούνται σε τοίχους Trombe είναι τα ένυδρα άλατα κι υδρογονάνθρακες.

Η Telkes πρότεινε την τοποθέτηση ΥΑΦ σε τοίχους, χωρίσματα, ταβάνια και δάπεδα για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας. Τα ΥΑΦ χρησιμοποιήθηκαν ως αντικαταστάτες της τοιχοποιίας σε έναν τοίχο Trombe. Ο Askew τοποθέτησε μια λεπτή πλάκα από παραφίνη πίσω από έναν διπλό υαλοπίνακα και παρατήρησε ότι η θερμική απόδοση ενός τέτοιου συλλέκτη είναι συγκρίσιμη με αυτή ενός συμβατικού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη. Οι Farouk και Gucerı μελέτησε τη χρησιμότητα του τοίχου Trombe με ΥΑΦ για βραδινή θέρμανση οικίας χρησιμοποιώντας το άλας του Glauber και κερί. Παρατηρήθηκε ότι ο τοίχος από ΥΑΦ είναι σωστά κατασκευασμένος κι εξαλείφει κάποια από τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά της συμβατικής τοιχοποιίας με συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Ο Bourdeau δοκίμασε δύο παθητικά συστήματα τοίχων με εξαϋδρικό χλωρίδιο του ασβεστίου (calcium chloride hexahydrate) και σημείο τήξης  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ως ΥΑΦ. Η δοκιμή κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τοίχος Trombe  $8.1\text{ cm}$  έχει οριακά καλύτερη θερμική απόδοση από μια συμβατική τοιχοποιία πάχους  $40\text{ cm}$ . Πολλές θεωρητικές και πειραματικές έρευνες έχουν διεξαχθεί για να διαπιστωθεί η αξιοπιστία τοίχων Trombe με ΥΑΦ. Μελέτες διαφόρων ομάδων κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τοίχος Trombe με ΥΑΦ μικρότερου πάχους παρέχει αποτελεσματικότερη θερμική αποθήκευση σε σχέση με την κλασική τοιχοποιία. Ο Knowler χρησιμοποίησε παραφίνη με μεταλλικά πρόσθετα για την αύξηση της συνολικής αγωγιμότητας και απόδοσης του τοίχου Trombe.

Οι Smith και Novak παρουσίασαν έναν μαύρο ηλιακό τοίχο από παραφίνη (σημείο τήξης  $25 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) για θέρμανση κτιρίου. Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησίμευε για θέρμανση του αέρα που στη συνέχεια διοχετευόταν στο εσωτερικό της οικίας. Η αποτελεσματικότητα της απορρόφησης βρέθηκε  $79\%$ .



Σχ. 2.33. Τοίχος Trombe με ΥΑΦ [1]

### ΥΑΦ σε γυψοσανίδες [85]

Κατακόρυφα δομικά στοιχεία όπως οι γυψοσανίδες είναι φτηνά και ευρέως χρησιμοποιούμενα σε πληθώρα εφαρμογών. Η απόδοση των γυψοσανίδων με ΥΑΦ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες: τη θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ, το θερμοκρασιακό εύρος μέσα στο οποίο συμβαίνει η τήξη, η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας στη μονάδα επιφάνειας, ο τρόπος ενσωμάτωσης των ΥΑΦ στη γυψοσανίδα, ο προσανατολισμός του τοίχου, οι κλιματικές συνθήκες, τα άμεσα ηλιακά κέρδη κ.τ.λ. Ωστόσο, επειδή δεν είναι εύκολο να ληφθούν υπόψη όλοι αυτοί οι παράγοντες, οι περισσότερες έρευνες ασχολούνται με την επιλογή του ΥΑΦ, τις μεθόδους ενσωμάτωσης και δοκιμής.

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, συναντάμε τρεις διαφορετικές μεθόδους ενσωμάτωσης ΥΑΦ σε γυψοσανίδες. Η πρώτη μέθοδος συνίσταται στην πρόσθεση δισκίων γεμάτων με ΥΑΦ κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής της γυψοσανίδας. Αυτή η μέθοδος έχει αποδειχθεί ακατάλληλη εξαιτίας του χαμηλού λόγου επιφάνειας προς όγκο. Η δεύτερη μέθοδος συνίσταται στη διαδικασία συσσωμάτωσης δηλαδή στην απορρόφηση των ΥΑΦ στους πόρους της γυψοσανίδας, ώστε να προκύψει ένα σύνθετο υλικό. Το ΥΑΦ θερμαίνεται σε ένα δοχείο και σε ελεγχόμενη θερμοκρασία. Η γυψοσανίδα τοποθετείται στο

δοχείο υπό συνθήκες κενού ώστε οι πόροι να απορροφήσουν ΥΑΦ. Στη συνέχεια βγαίνει από το δοχείο κι αφήνεται για 48 ώρες να στεγνώσει και να αποβάλλει την περιττή ποσότητα ΥΑΦ. Τέλος, η γυψοσανίδα ζυγίζεται κι υπολογίζεται το ποσοστό απορρόφησης σε ΥΑΦ. Τα καλύτερα αποτελέσματα απορρόφησης παρατηρήθηκαν για διαδικασία συσσωμάτωσης που πραγματοποιήθηκε για 30 min σε θερμοκρασία 70 °C και πίεση κενού περίπου 65 mbar. Οι αναλύσεις δείχνουν ότι η διεργασία συσσωμάτωσης έχει τη δυνατότητα επίτευξης υψηλότερης αποθήκευσης θερμότητας σε σχέση με την πρόσθεση δισκίων ΥΑΦ κατά την κατασκευή της γυψοσανίδας. Η Τρίτη μέθοδος βασίζεται στη μέθοδο κατασκευής της συμβατικής γυψοσανίδας που γίνεται με τη μίξη  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$  με νερό και άλλα πρόσθετα. Ο σχηματιζόμενη πάστα γύψου εγχύεται ανάμεσα σε δύο σανίδες από χαρτί, κόβεται κι αφήνεται να στεγνώσει ώστε να αποβληθεί το επιπλέον νερό. Το ΥΑΦ εισάγεται στο μίγμα όταν αυτό είναι σε μορφή παχύρευστης πάστας και ανακατεύεται ώστε να γίνει ομογενές. Παρολαυτά, το ΥΑΦ θα δείξει μια τάση να μετακινηθεί προς την επιφάνεια της πάστας προκαλώντας αστάθεια στο μίγμα, γι' αυτό απαιτείται η προσθήκη παράγοντα που θα εξασφαλίσει την καλή κατανομή του ΥΑΦ στο στρώμα της γυψοσανίδας. Πιθανοί τέτοιοι παράγοντες είναι poly(vinyl alcohol) και sodium salt. Αυτή η μέθοδος έχει δώσει γυψοσανίδες με ιδιότητες συγκρίσιμες με αυτές των συμβατικών γυψοσανίδων και μπορεί να βρει ευρεία εφαρμογή.

## ΥΑΦ σε ταβάνια κι οροφές [84]

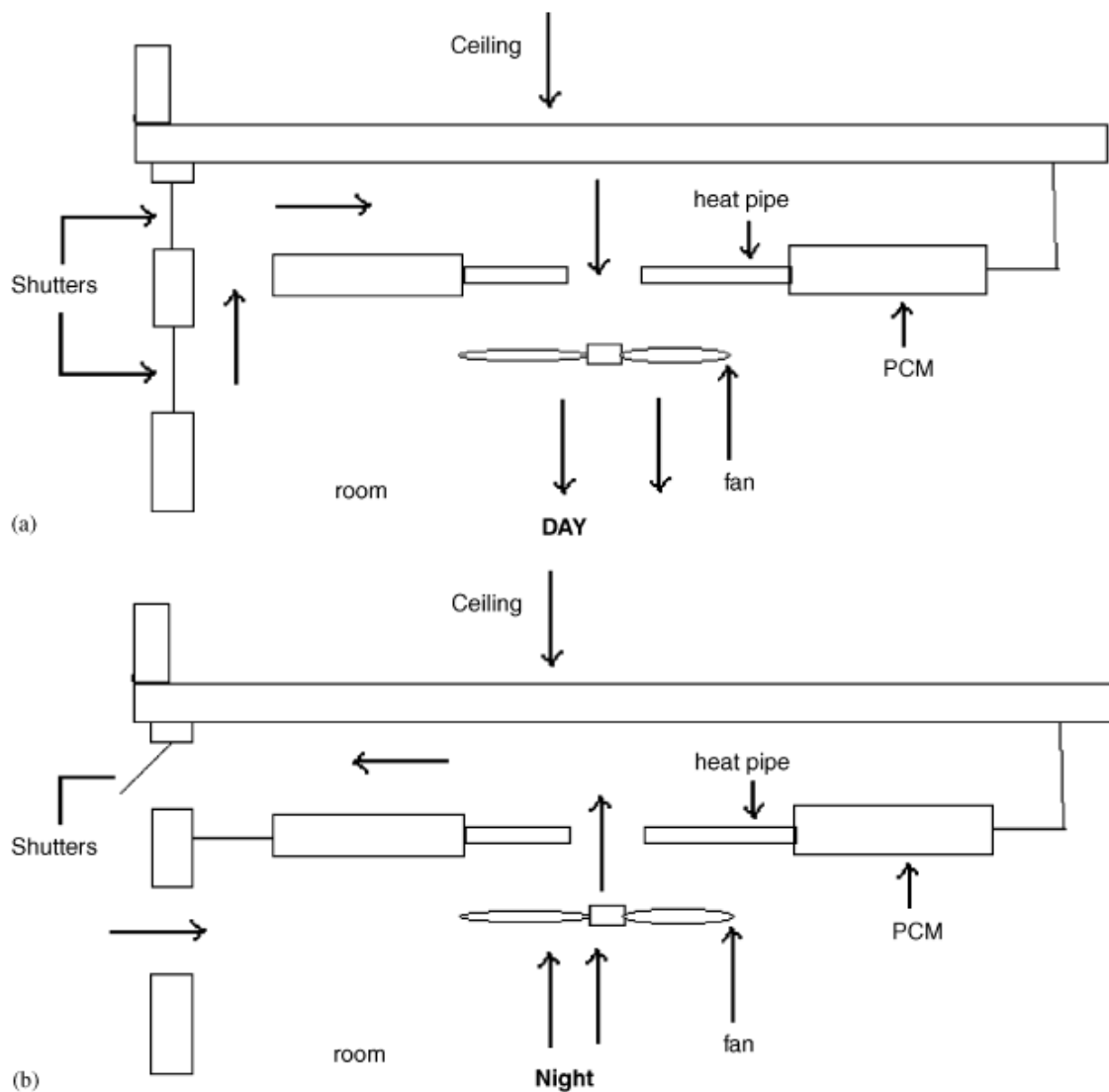
Η εφαρμογή ΥΑΦ σε ταβάνια κι οροφές αφορά τόσο παθητικά όσο κι ενεργητικά συστήματα.

Παράδειγμα παθητικού συστήματος είναι μια ηλιακή οροφή λανθάνουσας θερμότητας που δοκιμάστηκε σε ένα χωριό του Περού για τη διατήρηση σχεδόν ισοθερμικών συνθηκών σε εκκολαπτήριο πτηνών. Δύο ημικυλινδρικές δεξαμενές με το πάνω μέρος κλεισμένο με γυαλί περιείχαν 42 kg παραφίνη και ήταν τοποθετημένες κάτω από τη γυάλινη αεροστεγή οροφή. Κατά τη διάρκεια της νύχτας μόνωση από πολυουρεθάνη τοποθετούνταν ανάμεσα στην οροφή και τις για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας ανάμεσα στους 22 και τους 30 °C.

Ένα επιπλέον παθητικό σύστημα που ενσωματώνει ΥΑΦ σε ταβάνι αναπτύχθηκε από τους Gutherz και Schiler. Ηλιακά κάτοπτρα χρησιμοποιήθηκαν για να κατευθύνουν την

ηλιακή ενέργεια μέσω των παραθύρων στα στοιχεία ΥΑΦ. Το κυριότερο πλεονέκτημα του συστήματος ήταν ότι κατάφερε αποθήκευση θερμότητας σε μεγάλη επιφάνεια χωρίς να απαιτείται μεγάλος όγκος μέσου αποθήκευσης όπως θα χρειαζόταν σε σύστημα αισθητής αποθήκευσης θερμότητας. Η έρευνα κατέληξε στο ότι ένα τέτοιο σύστημα έχει τη δυνατότητα ανάκτησης 17 – 36% των απωλειών επί του αρχικού ηλιακού κέρδους.

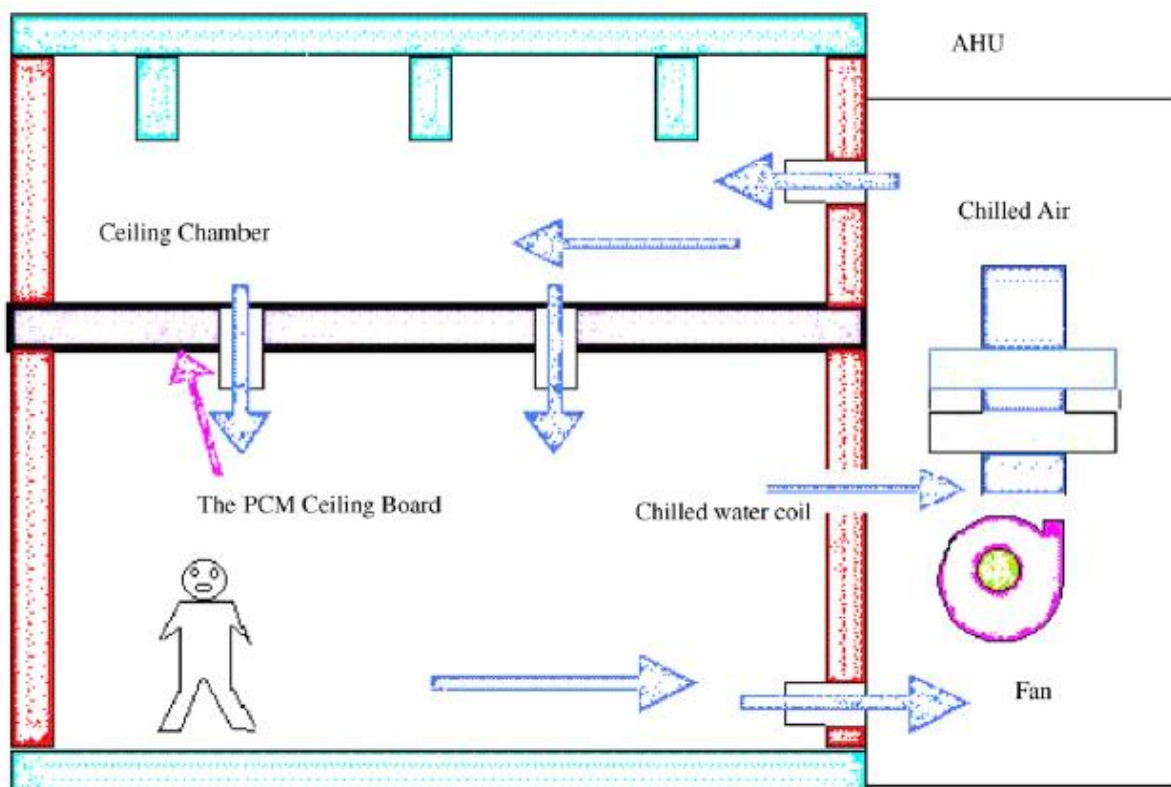
Ο Turnpenny κι οι συνεργάτες του ανέπτυξαν ένα παθητικό σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με σωληνώσεις παροχής θερμότητας τοποθετημένες σε στρώμα ΥΑΦ. Το σύστημά του αποθήκευε ψύξη κατά τη διάρκεια της νύχτας και την απέδιδε κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης σωληνώσεων/ΥΑΦ παρουσιάζεται στο σχήμα 2.34.



Σχ. 2.34. Ταβάνι με ενσωματωμένα ΥΑΦ και σωληνώσεις παροχής θερμότητας [84]

Όσον αφορά εφαρμογές σε ενεργητικά συστήματα, ο Bruno ανέπτυξε ένα σύστημα που αποθηκεύει ψύξη σε ΥΑΦ σε χρόνο εκτός αιχμής και την απέδιδε σε περιόδους αιχμής. Η ψύξη παρέχεται στο σύστημα από την κλιματιστική μονάδα και αποθηκεύεται στο στρώμα του ΥΑΦ που βρίσκεται στην ψευδοροφή. Το σημείο τήξης του ΥΑΦ βρίσκεται στο εύρος 20 – 30 °C που είναι σχεδόν ίσο με τη θερμοκρασία δωματίου που κρίθηκε κατάλληλη για την εφαρμογή.

Οι Kodo κι Ibamoto έκαναν μια προσπάθεια να μειώσουν το φορτίο αιχμής της κλιματιστικής συσκευής χρησιμοποιώντας ΥΑΦ στην ψευδοροφή. Το σημείο τήξης κι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του χρησιμοποιούμενου ΥΑΦ ήταν 24.5 °C και 174.4 KJ/kg αντίστοιχα. Τα βασικά στοιχεία του συστήματος ήταν τα ίδια με το σύστημα του Bruno. Κατά το χρονικό διάστημα της ψύξης, ο ψυχρός αέρας από τη μονάδα περνάει διαμέσου του θαλάμου της οροφής (ceiling chamber) αποθηκεύει την ψύξη στην ψευδοροφή από ΥΑΦ (PCM ceiling board). Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αποθηκευμένη ψύξη αποδόθηκε στο χώρο κατά τις δύο ώρες της αιχμής. Βρέθηκε ότι η άνοδος της θερμοκρασίας του χώρου αυξήθηκε μόνο 2 °C σε σύγκριση με την άνοδο 6 °C που είχε παρατηρηθεί χωρίς ΥΑΦ. Σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης φαίνεται στο σχήμα 2.35.



Σχ. 2.35. Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης ψευδοροφής με κλιματισμό κι ΥΑΦ [84]

## ΥΑΦ σε παντζούρια

Η ιδέα αυτή αφορά την τοποθέτηση ΥΑΦ στα εξωτερικά σκίαστρα ανοιγμάτων όπως παράθυρα και μπαλκονόπορτες και συγκεκριμένα στην πλευρά που εκτίθεται στον ήλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας τα παντζούρια είναι ανοιγμένα απορροφώντας θερμότητα που λιώνει το ΥΑΦ. Τη νύχτα που τα παντζούρια κλείνουν θερμότητα ακτινοβολεί στον εσωτερικό χώρο [3].

## ΥΑΦ σε συστήματα θέρμανσης χώρων με εργαζόμενο μέσο το νερό

Η αποθήκευση θερμότητας για συστήματα θέρμανσης με εργαζόμενο μέσο το νερό έχει μελετηθεί εκτενώς τις τελευταίες δεκαετίες. Οι συμβατικές μονάδες θέρμανσης εργάζονται στο θερμοκρασιακό εύρος 40–60 °C. Εξαιτίας του καλού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ( $100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ) και της υψηλής θερμοχωρητικότητας του νερού, η σωλήνωση που μεταφέρει το θερμό νερό βρίσκεται μέσα στο ΥΑΦ. Οι εταιρείες Bosch, SGL Technologies, Behr, Merck, και ZAE Bayern στο πλαίσιο του προγράμματος “Innovative PCM technology” ανέπτυξαν μια καινούργια ιδέα θερμικής αποθήκευσης. Η αποθήκευση στηρίζεται σε ένα μίγμα ΥΑΦ και γραφίτη ως το μέσο αποθήκευσης για την εξασφάλιση υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης και καλή μεταφορά θερμότητας. Η δεξαμενή αποθήκευσης γεμάτη με το ΥΑΦ περιέχει έναν εναλλάκτη θερμότητας στον οποίο περνούν οι σωληνώσεις μεταφέροντας θερμότητα στο ΥΑΦ (Σχ. 2.36). Η εγκατάσταση δοκιμάστηκε για περισσότερους από 1500 κύκλους λειτουργίας χωρίς να παρατηρηθούν απώλειες στην απόδοση [1].

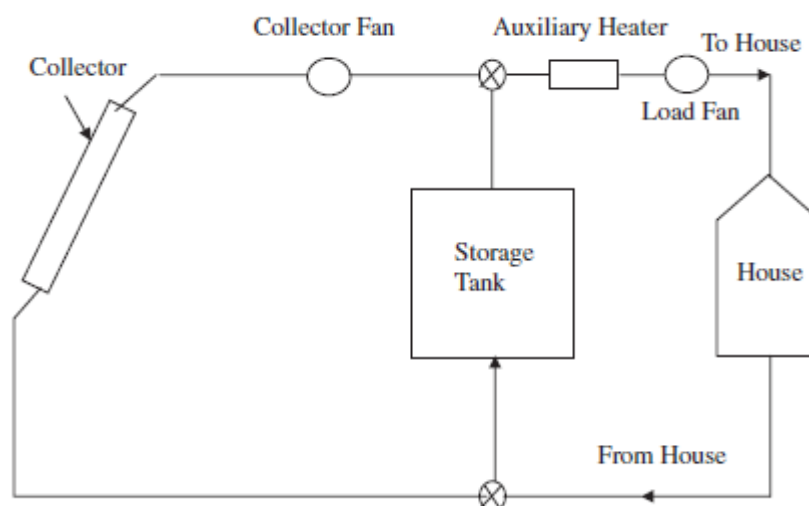
Ο Kenneth στο πανεπιστήμιο του Brighton διερεύνησε κι ανέλυσε ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης που ενσωμάτωνε ΥΑΦ για χρήση σε οικία. Το σύστημα περιλάμβανε ένα σύστημα επίπεδων ηλιακών συλλεκτών που μετέφερε ζεστό νερό σε μια δεξαμενή αποθήκευσης κι ένα σύνολο πάνελ από ΥΑΦ. Το ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε ήταν χλωρίδιο του ασβεστίου σημείου τήξης 29 °C. Τα πάνελ που έφεραν το ΥΑΦ ήταν κατασκευασμένα από φύλλα αλουμινίου και στο εσωτερικό τους περνούσε το χάλκινο τύλιγμα της σωλήνωσης του νερού. το νερό που θερμαινόταν από τους ηλιακούς συλλέκτες κυκλοφορούσε στο εσωτερικό του τυλίγματος και η θερμότητα μεταφερόταν στο ΥΑΦ, τήκοντάς το. Οι σωληνώσεις ήταν τοποθετημένες στο δάπεδο. Μια σειρά ανεμιστήρων περνούσε τον αέρα από τις σωληνώσεις και τα πάνελ του ΥΑΦ, ζεσταίνοντάς τον για να τον αποδώσει στη

συνέχεια στο χώρο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα είχε τη δυνατότητα να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας μεταξύ 18% και 32%.



**Σχ. 2.36.** Μοντέλο εναλλάκτη σε δεξαμενή αποθήκευσης συστήματος θέρμανσης χώρου (εικόνα: SGL Technologies) [1]

ΥΑΦ σε συστήματα θέρμανσης χώρων με εργαζόμενο μέσο τον αέρα



**Σχ. 2.37.** Σχηματική απεικόνιση ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης χώρων με εργαζόμενο μέσο τον αέρα [84]



Ηλιακά συστήματα με εργαζόμενο μέσο τον αέρα είναι κατάλληλα για θέρμανση χώρων. Ωστόσο, εξαιτίας της χαμηλής τιμής της θερμοχωρητικότητας του αέρα, η χρονική απόσταση ανάμεσα στις ώρες όπου υπάρχει ζήτηση για θέρμανση και τις ώρες που υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία είναι πρόβλημα. Η χρήση ΥΑΦ φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική χάρη στην υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης και την επίδραση του ΥΑΦ στη ρύθμιση της θερμοκρασίας του αέρα. Εφαρμογή της ιδέας έγινε από τις εταιρείες Grammer και ZAE Bayern στο πλαίσιο του προγράμματος έρευνας κι ανάπτυξης “Innovative PCM technology”. Κατά τη διάρκεια της έρευνας δοκιμάστηκε η εφαρμογή ΥΑΦ σε διαφορετικά στοιχεία ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης με εργαζόμενο μέσο τον αέρα. Πιο συγκεκριμένα, δοκιμάστηκε η χρήση ΥΑΦ στον απορροφητήρα του συλλέκτη, σε διπλές σωληνώσεις στο εσωτερικό των οποίων περνά ο αέρας, σε δεξαμενή αποθήκευσης με εναλλάκτη για τη θέρμανση του αέρα από το συλλέκτη και στο δάπεδο. Η έρευνα κατέληξε ότι καλύτερη λύση είναι η τοποθέτηση του ΥΑΦ στον εναλλάκτη θερμότητας που θερμαίνει τον αέρα με τη βοήθεια του αέρα που κυκλοφορεί στο συλλέκτη. Ο συλλέκτης της εγκατάστασης ήταν 20 m<sup>2</sup> και η παροχή του αέρα 180–300 m<sup>3</sup>/h [1].

Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού ηλιακού συστήματος θέρμανσης με εργαζόμενο μέσο τον αέρα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.37.

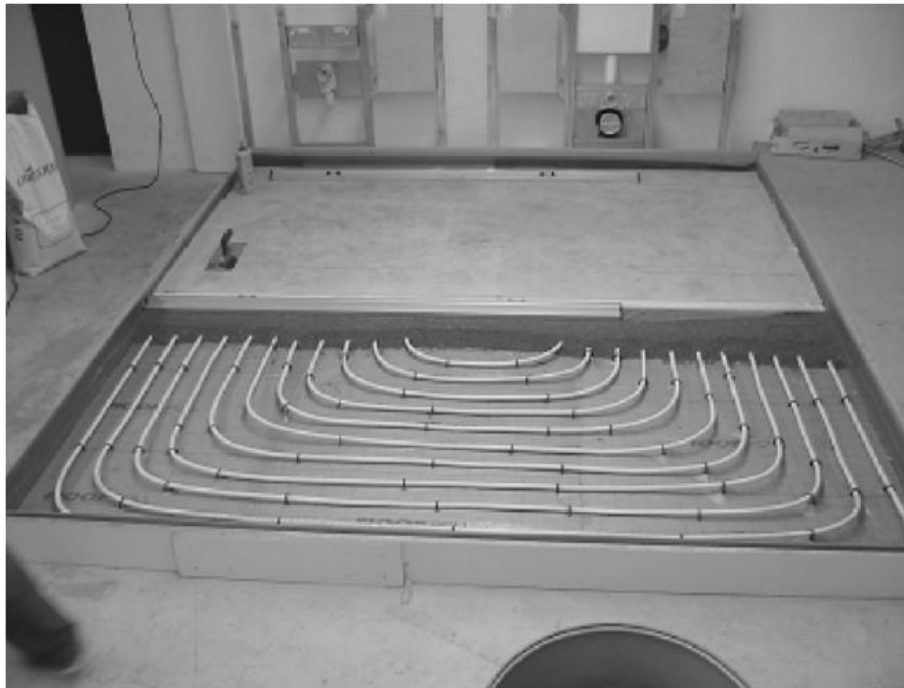
## ΥΑΦ σε συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης

Στα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης η θερμότητα προέρχεται από σωληνώσεις θερμού νερού ή αέρα, ηλεκτρικά στοιχεία ή την ηλιακή ακτινοβολία.

Το σχήμα 2.38 δείχνει ένα σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ΥΑΦ που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Rubitherm GmbH. Το υλικό αποθήκευσης που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα κοκκώδες υλικό με παραφίνη που θερμαίνεται από τις σωληνώσεις θερμού νερού. Παρόλο που το πάχος του δαπέδου μειώνεται, 0.5 kWh/m<sup>2</sup> θερμότητας μπορεί να αποθηκευτεί στο δάπεδο[1].

Ακόμα ένα σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ηλεκτρικά στοιχεία αναπτύχθηκε από την εταιρεία Sumika Plastech. Η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια με αυτή του συστήματος με νερό, ωστόσο, σε αυτήν την περίπτωση το ΥΑΦ βρίσκεται σε επαφή με τα ηλεκτρικά καλώδια [1].

Ενεργητικά συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ΥΑΦ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση θερμότητας σε περιόδους εκτός αιχμής σε κτίρια. Έτσι, τα φορτία αιχμής μπορούν να μειωθούν ή να μετατοπιστούν τις βραδινές ώρες όταν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μειωμένο, με την αποθηκευμένη ενέργεια να αποδίδεται όταν ζητηθεί κι όχι αυτόματα όπως στα παθητικά συστήματα. Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης με παραφίνη (σημείο τήξης 40 °C) ως ΥΑΦ προτάθηκε από τους Farid και Chen. Το ΥΑΦ τοποθετήθηκε σε ένα στρώμα 30 mm μεταξύ της θερμαντικής επιφάνειας και των πλακιδίων του δαπέδου. Σχηματική απεικόνιση του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 2.39. Οι μελετητές με χρήση προσομοίωσης σε υπολογιστή βρήκαν ότι η θερμότητα που αποδίδεται από το δάπεδο μπορεί να αυξηθεί σημαντικά από 30 σε 75 W/m<sup>2</sup> αν στο σύστημα χρησιμοποιηθεί ΥΑΦ.

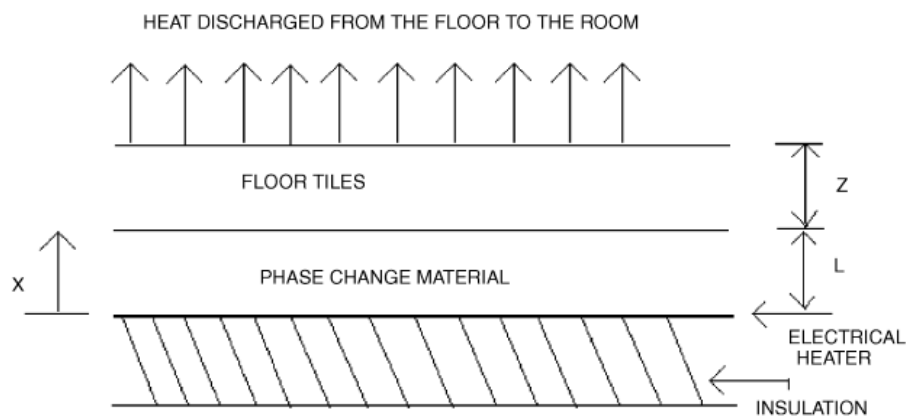


**Σχ. 2.38.** Σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με νερό και ΥΑΦ (εικόνα: rubitherm.com) [1]

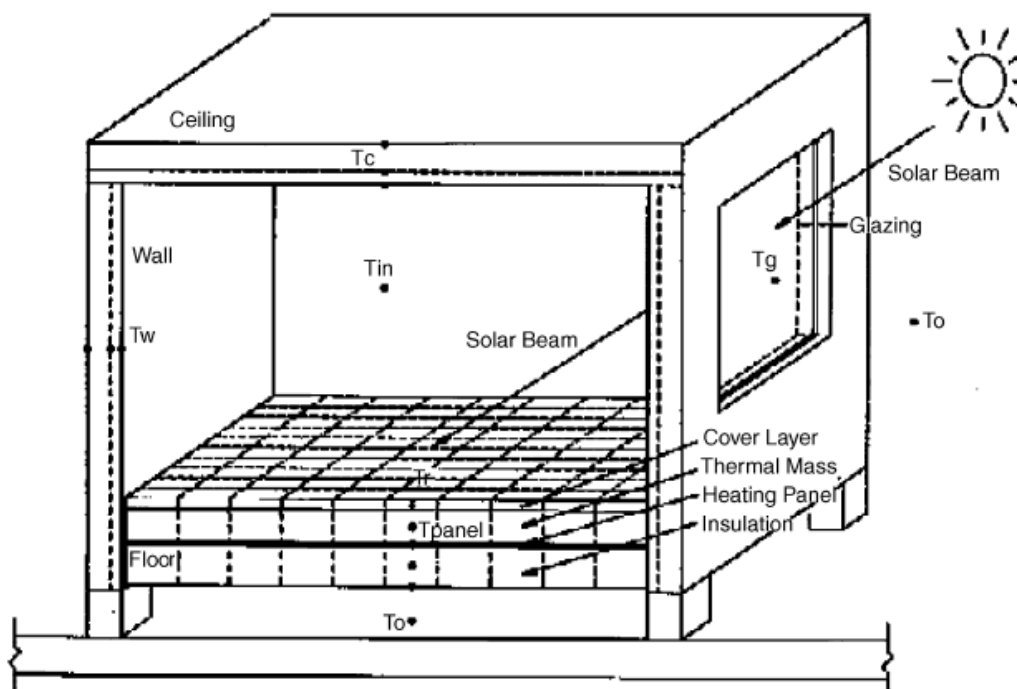
Ηλιακό πειραματικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης αναπτύχθηκε από τους Athienities και Chen (Σχ. 2.40). Η ηλιακή ακτινοβολία που αποθηκεύεται στη θερμική μάζα του δαπέδου βρέθηκε να μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση σημαντικά (30% ή περισσότερο), ενώ αύξηση του πάχους της θερμικής μάζας από 5 σε 10 cm δεν οδήγησε σε μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση. Έτσι, απαιτείται η ανάπτυξη προηγμένων

αλγόριθμων ελέγχου για τη βελτιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας και την ταυτόχρονη διατήρηση της θερμικής άνεσης.

Ο Nagano κι οι συνεργάτες του παρουσίασαν ένα ενεργητικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με εργαζόμενο μέσο τον αέρα κι ενσωματωμένο ΥΑΦ. Το μέγεθος του δαπέδου του πειραματικού κελιού που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες της δοκιμής ήταν  $0.5 \text{ m}^2$ . Στρώμα από ΥΑΦ πάχους  $3 \text{ cm}$  εγκαταστάθηκε κάτω από το πάτωμα με πολλαπλές μικρές τρύπες. Η αλλαγή στη θερμοκρασία του δωματίου και στην ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας που μετρήθηκε απέδειξε τις δυνατότητες μετατόπισης του ψυκτικού φορτίου [84].



Σχ. 2.39. Σχηματική απεικόνιση συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ΥΑΦ [84]



Σχ. 2.40. Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης των Athienities και Chen [84]

## Μπετόν ενισχυμένο με ΥΑΦ [85]

Μια ακόμη εφαρμογή είναι το μπετόν ενισχυμένο με ΥΑΦ ή θερμομπετόν (thermocrete), όπως αλλιώς ονομάζεται. Παραλλαγή αυτής της εφαρμογής είναι τα πλακίδια ενισχυμένα με ΥΑΦ. Το θερμομπετόν είναι ένα μέσο αποθήκευσης θερμότητας που συνδυάζει ένα κατάλληλο ΥΑΦ με ένα στρώμα μπετό, παράγοντας ένα υλικό χαμηλού κόστους με δομικές και θερμικές ιδιότητες.

Κατά τη διαδικασία εμποτισμού του μπετό με νερό, εσωτερικά εγκλείσματα απορροφούν νερό και χρησιμεύουν ως αποθέματα που παρέχουν νερό στον όγκο του μπετό για την καλύτερη ψύξη του. Εξαιτίας της πορώδους φύσης τους και της ιδιαίτερα υψηλής απορροφητικότητάς τους, αυτά τα εγκλείσματα μπορούν να χρησιμεύσουν και ως σημεία τοποθέτησης άλλων υλικών όπως των ΥΑΦ. Ένα τέτοιο σημείο με απορροφητικότητα 20% κατ' όγκο θα μπορούσε να φέρει 350 kg/m<sup>3</sup> ΥΑΦ για ένα τυπικό μπετό. Μια τεχνική που έχει βρει εμπορική εφαρμογή είναι το γέμισμα πόρων μπετό με στεατικό βουτυλίου με χρήση σφαιρών παραφίνης. Η τοποθέτηση ΥΑΦ κατά τη διάρκεια της υδατοπαγούς σκλήρυνσης του μπετό έχει ένα ακόμα πλεονέκτημα. Τα ΥΑΦ θα μειώσουν την αύξηση της θερμοκρασίας που παρατηρείται κατά την πρώτη φάση της σκλήρυνσης μεγάλης μάζας μπετό, μιας και η παραφίνη θα απορροφά ενέργεια. Απ' την άλλη μεριά, υψηλότερες θερμοκρασίες σκλήρυνσης επιταχύνουν την εμπότιση του μπετό με νερό και αυξάνουν σε πρώτη φάση την αντοχή του, παρόλο που μακροπρόθεσμα μπορεί να οδηγήσουν σε μειωμένη αντοχή.

Η δεύτερη τεχνική ενσωμάτωσης στηρίζεται στο μηχανισμό της διάχυσης. Η μεγάλη απορροφητική επιφάνεια του πορώδους μπετό μπορεί να απορροφήσει πάνω από το 57% του όγκου του σε ΥΑΦ, δημιουργώντας ένα σύνθετο υλικό.

Παρόλο που τα κτίρια από μπετό έχουν μια σχετικά υψηλή θερμική μάζα, μπετό με ενσωματωμένα ΥΑΦ μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη θερμοχωρητικότητα της κατασκευής. Προς το παρόν, το κύριο ερώτημα για τους ενδιαφερόμενους είναι αν το αποτέλεσμα αντισταθμίζει το υψηλό κόστος της εφαρμογής.

## Μονωτικά υλικά κτιρίων ενισχυμένα με ΥΑΦ [85]

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει μελέτες που αφορούν τον αφρό PU (PU – foam) και την κυτταρίνη. Αφρός PU τοποθετήθηκε σε δύο στρώματα των 6 mm ανάμεσα σε τρία φύλλα αλουμινίου και εγκαταστάθηκε πάνω από το στρώμα μόνωσης από μεταλλικό μαλλί. Ο αφρός PU περιείχε 0.49 kg/m<sup>2</sup> ΥΑΦ με σημείο τήξης 25.5 °C και μέγιστη ενθαλπία τήξης 140 kJ/kg. Η δοκιμή έδειξε ότι απαιτούνται τρεις ώρες για τη πλήρη φόρτιση του ΥΑΦ. Σύγκριση με συμβατική μόνωση έδειξε μια δυνατότητα μείωσης κατά 40% του φορτίου ψύξης στο χώρο. Η ίδια μέθοδος έχει εφαρμοστεί σε σοφίτα με τον αέρα δωματίου κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού να πέφτει από τους 43 °C στους 32°C.

Στο πλαίσιο πιλοτικού προγράμματος μικροενθλακωμένη παραφίνη αναμειχθηκε με συμβατική μόνωση από κυτταρίνη σε ποσοστό 22% κατά βάρος και τοποθετήθηκε σε κοιλότητες στον τοίχο κατοικιών χωρίς μεγάλες αλλαγές στην κατασκευή. Τα αποτελέσματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το προσανατολισμό του τοίχου και την τοποθεσία, παρολαυτά, παρατηρήθηκαν εμφανείς μειώσεις τόσο του ψυκτικού όσο και του θερμικού φορτίου.

### 2.3.2.3. ΥΑΦ ενσωματωμένα σε υφάσματα για θερμική άνεση [88]

Υφάσματα που ενσωματώνουν ΥΑΦ αντιδρούν αμέσως σε αλλαγές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στις θερμοκρασίες σε διάφορες περιοχές του σώματος. Όταν συμβεί μια αύξηση της θερμοκρασίας, οι μικροκάψουλες ΥΑΦ αντιδρούν απορροφώντας κι αποθηκεύοντας θερμότητα κατά την τήξη. Όταν η θερμοκρασία πέσει και πάλι, οι μικροκάψουλες αποδίδουν την αποθηκευμένη θερμότητα και τα ΥΑΦ στερεοποιούνται ξανά. Οι δυνατότητες θερμικής απορρόφησης ειδών ένδυσης κι υπόδησης μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά με την ενσωμάτωση μικρό – ΥΑΦ, δηλαδή μικρών καψουλών που περιέχουν μικρή ποσότητα ΥΑΦ. Μικροκάψουλες ΥΑΦ θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν απευθείας σε ίνες και αφρούς, ή να τοποθετηθούν ως επένδυση σε υφάσματα.

Εφαρμογές ΥΑΦ σε υφάσματα περιλαμβάνουν ενδύματα, κουβέρτες, στολές πυροσβεστών κι αστροναυτών, μπότες ορειβασίας, κράνη μοτοσικλετιστών, γάντια, αθλητικές στολές, στολές κατάδυσης και πολλά άλλα.

ΥΑΦ αναπτύχθηκαν αρχικά για χρήση σε διαστημικές στολές και γάντια με σκοπό την προστασία των αστροναυτών από τις χαμηλές θερμοκρασίες που συναντούν όταν δουλεύουν στο διάστημα. Η εφαρμογή ΥΑΦ σε διαστημικές στολές προσφέρει θερμική άνεση στους αστροναύτες στο διάστημα.

Στις μέρες μας, χρησιμοποιούνται ευρέως υφάσματα ρουχισμού με θερμορυθμιστικές ιδιότητες με σκοπό τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης αθλητικών ενδυμάτων. Το θερμορυθμιστικό φαινόμενο σε τέτοια ενδύματα θα μπορούσε να βασιστεί στην εφαρμογή ΥΑΦ. Κατά τη διάρκεια της φυσικής δραστηριότητας ενός αθλητή που φοράει ρούχα με ενσωματωμένα ΥΑΦ, η θερμότητα του σώματός του αυξάνει και απορροφάται από τα μικροενθυλακωμένα ΥΑΦ για να αποδοθεί όταν είναι αναγκαίο. Μερικά μόνο παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι τα γάντια του σκι και του σνοουμπορντ, ισοθερμικά εσώρουχα (Σχ. 2.41) και αθλητικός εξοπλισμός για ορειβασία, ποδηλασία και τρέξιμο.

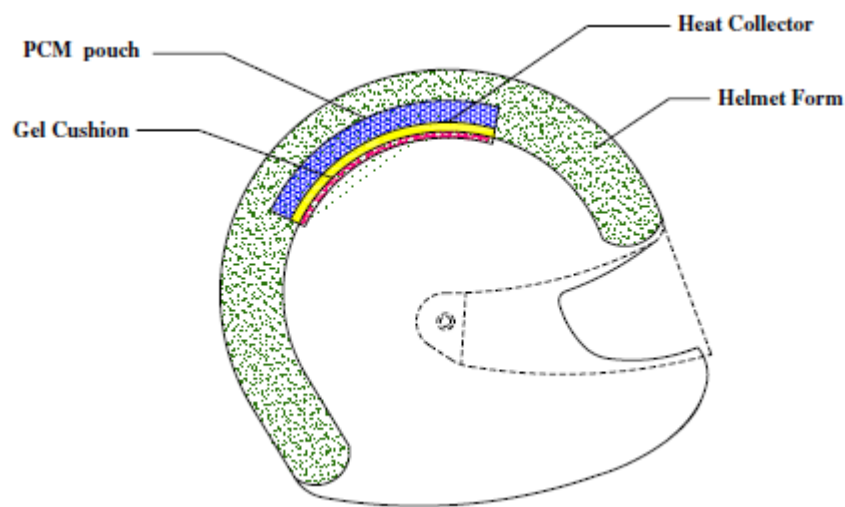
ΥΑΦ χρησιμοποιούνται επίσης σε υποδήματα, κυρίως σε μπότες ορειβασίας και σκι, αλλά και σε παπούτσια οδηγών αγώνων ταχύτητας και αθλητών του γκολφ. Στην περίπτωση των μποτών του σκι, το ΥΑΦ απορροφά την επιπλέον θερμότητα από τα πόδια του αθλητή και τη στέλνουν πίσω στα πόδια του αθλητή όταν κρυσώσουν.



Σχ. 2.41. Γάντι (εικόνα: [textileworld.com](http://textileworld.com)) και ισοθερμικό ένδυμα (εικόνα: [alpinestars.com](http://alpinestars.com)) με ενσωματωμένα ΥΑΦ

Ενσωματωμένα ΥΑΦ σε μαξιλάρια και καλύμματα στρωμάτων εξασφαλίζουν ενεργό ρύθμιση της θερμοκρασίας στο κρεβάτι. Όταν η θερμοκρασίας του σώματος αυξηθεί, η επιπλέον θερμότητα απορροφάται από τα ΥΑΦ και το σώμα ψύχεται. Όταν η θερμοκρασία του σώματος πέσει, η αποθηκευμένη θερμότητα αποδίδεται και το σώμα διατηρείται ζεστό.

Άλλη εφαρμογή με σκοπό τη θερμική άνεση αφορά ΥΑΦ ενσωματωμένα σε κράνη μοτοσυκλετιστών. Το ΥΑΦ είναι τοποθετημένο σε ένα θυλάκιο (PCM pouch) ανάμεσα στο κράνος και το κεφάλι του αναβάτη. Η θερμότητα από το κεφάλι μεταφέρεται στο ΥΑΦ με συναγωγή μέσω ενός συλλέκτη θερμότητας (heat collector) που είναι κατανομημένος πάνω από το κεφάλι του αναβάτη (Σχ. 2.42). Δεν απαιτείται ηλεκτρική ισχύ για το σύστημα ψύξης. Η θερμοκρασία του κεφαλιού διατηρείται λίγο πάνω από τη θερμοκρασία του ΥΑΦ, έτσι ο αναβάτης δε θα υποφέρει από τις υψηλές θερμοκρασίες μέσα στο κράνος και θα επηρεάσει το βαθμό εγρήγορσής του. Η μονάδα ψύξης έχει δυνατότητα να παρέχει ψύξη για 2 ώρες όταν το ΥΑΦ είναι πλήρως λιωμένο. Η αποθηκευμένη θερμότητα θα πρέπει να αποφορτιστεί με την τοποθέτηση της μονάδας σε νερό για 15 λεπτά πριν την επόμενη χρήση [93].



Σχ. 2.42. Σχηματικό διάγραμμα ενός κράνους που ψύχεται με τη βοήθεια ΥΑΦ [93]

#### 2.3.2.4. Ιατρικές εφαρμογές ΥΑΦ

Τα ΥΑΦ αλληλεπιδρούν με το μικροκλίμα γύρω από το ανθρώπινο σώμα αποκρινόμενα στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που δημιουργούνται από τις αλλαγές στα επίπεδα δραστηριότητας και στην εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι, τα υφάσματα με ΥΑΦ έχουν τη δυνατότητα εφαρμογής σε στολές χειρουργείου, σε υλικά για το κρεβάτι του ασθενούς, σε επιδέσμους και προϊόντα για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας των ασθενών σε μονάδες εντατικής θεραπείας. Υφάσματα με ΥΑΦ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χειρουργικές γάζες, πάνες και προϊόντα ακράτειας. Υφάσματα αποθήκευσης θερμότητας και θερμορυθμιστικά υφάσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διατηρήσουν τη

θερμοκρασία του δέρματος σε επίπεδα θερμικής άνεσης σε επιδέσμους και σε θεραπείες εγκαυμάτων ή άλλες θεραπείες όπου απαιτείται θέρμανση ή ψύξη του σώματος [88].

Μια άλλη εφαρμογή των ΥΑΦ στον τομέα της ιατρικής είναι η θερμική προστασία βιοϊατρικών προϊόντων και κυρίως του αίματος. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται μια σακούλα που περιέχει ΥΑΦ (Σχ. 2.43).



**Σχ. 2.43.** Σακούλα για την ασφαλή μεταφορά του αίματος (Εικόνα: rubitherm.com)

#### 2.3.2.5. ΥΑΦ σε οχήματα

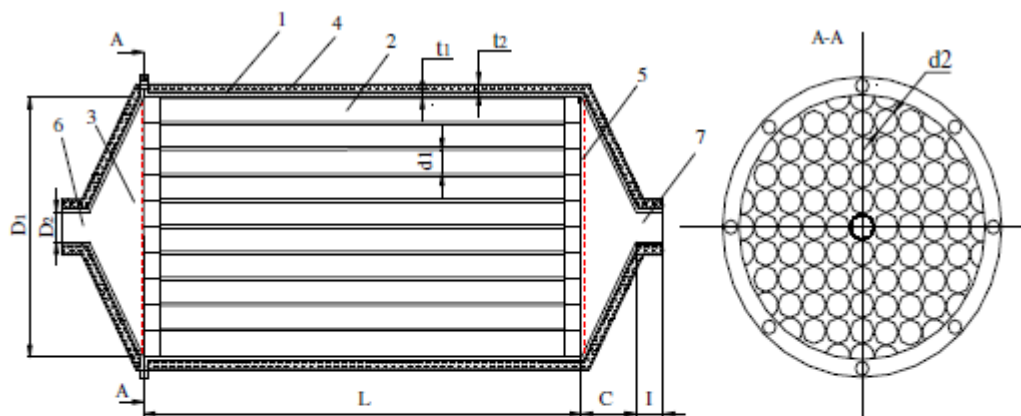
Τα ΥΑΦ χρησιμοποιούνται σε αυτοκίνητα ενσωματωμένα στα υφάσματα των καθισμάτων με σκοπό τη θερμική άνεση των επιβατών (Σχ. 2.44). Εφαρμογές στο εσωτερικό της καμπίνας των αυτοκινήτων χρησιμοποιούν παραφίνες χάρη στη μεγάλη αποθηκευτική τους ικανότητα, στην έλλειψη τοξικότητας και διάβρωσης, το χαμηλό κόστος και στη δυνατότητα ανάμειξης ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας. Οι παραφίνες είναι μικροενθυλακωμένες και ενσωματωμένες σε ένα στρώμα υφάσματος σε καθίσματα ή σε άλλα σημεία στην καμπίνα, παρέχοντας υψηλής ποιότητας θερμικό έλεγχο [88]. Η χρήση ΥΑΦ για θερμική άνεση σε αυτοκίνητα έχει εφαρμοστεί από εταιρείες όπως η BMW [87].

Άλλη εφαρμογή στα αυτοκίνητα, είναι η τοποθέτηση ΥΑΦ σε καταλυτικούς μετατροπείς (Σχ.2.45) για τη μείωση των τοξικών εκπομπών όταν ο κινητήρας εκκινεί κρύος. Για τον ίδιο λόγο, έχουν χρησιμοποιηθεί ΥΑΦ για την προθέρμανση κινητήρων εσωτερικής καύσης για τη μείωση των ανεπιθύμητων επακόλουθων που συμβαίνουν όταν ο κινητήρας είναι κρύος, όπως αντίσταση στην κίνηση, αύξηση του ιξώδους του λιπαντικού, αυξημένος θόρυβος και δονήσεις [94].





Σχ. 2.44. Κάθισμα αγωνιστικού αυτοκινήτου με ενσωματωμένα ΥΑΦ (εικόνα: apparelresources.com)



1. Envelope
2. Capsules include the phase change material
3. Conical cover
4. Thermal insulation
5. Stainless steel meshes
6. Inlet pipe
7. Outlet pipe

**Dimensions of the heat storage:**

$D_1$ -220 mm	$C$ = 50 mm
$D_2$ - 20 mm	$I$ = 30 mm
$d_1$ - 20.5mm	$t_1$ - 3 mm
$d_2$ - 22 mm	$t_2$ - 8 mm
$L$ = 400 mm	$t_3$ = 0.75mm

Σχ. 2.45. Σχεδίαση πειραματικής συσκευής αποθήκευσης θερμότητας σε καταλυτικό μετατροπέα αυτοκινήτου [94]

### 2.3.2.6. Άλλες εφαρμογές ΥΑΦ [87]

Εκτός από τις εφαρμογές των ΥΑΦ στα κτίρια που αναφέρθηκαν ανωτέρω, ΥΑΦ έχουν χρησιμοποιηθεί σε σύστημα θέρμανσης με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας και θερμοκήπια. Άλλη εφαρμογή των ΥΑΦ που είναι ευρέως διαδεδομένη στο εμπόριο είναι η αποθήκευση ψύξης. Πολλές εταιρείες έχουν μια ευρεία γκάμα προϊόντων για την

αποθήκευση κρύων προϊόντων σε διάφορες θερμοκρασίες. Τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν ψύξη λαχανικών ή άλλων ευπαθών προϊόντων. Στον τομέα της τεχνολογίας, ΥΑΦ χρησιμοποιούνται για την πρόψυξη του εισερχόμενου αέρα σε αεροστροβίλους και της Σημαντική εφαρμογή είναι και η ψύξη ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συσκευών όπως ηλεκτρονικοί υπολογιστές, μπαταρίες κλπ με τη χρήση ΥΑΦ.

Άλλη εφαρμογή των ΥΑΦ είναι η τοποθέτησή τους σε ηλιακές κουζίνες για την επέκταση του χρόνου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Η τοποθέτηση ΥΑΦ σε έναν ηλιακό συλλέκτη παρουσιάστηκε πρώτη φορά από τους Sokolon και Keizman, αλλά τελευταία έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές όπως οι Rabin, Epibe και Tey. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται εκτενής περιγραφή των εφαρμογών ΥΑΦ σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης.

### 2.3.2.7. Εμπορικά ΥΑΦ και προϊόντα [1]



**Σχ. 2.46.** Ετικέτα πιστοποίησης ποιότητας για προϊόν ΥΑΦ

(εικόνα: Gütegemeinschaft PCM e.V.) [1]

Στις μέρες μας, υπάρχουν αρκετές εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον τομέα των ΥΑΦ, με διάφορες εφαρμογές και προϊόντα. Οι κυριότεροι κατασκευαστές προϊόντων ΥΑΦ παγκοσμίως, παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4.

Η διαθεσιμότητα εμπορικών προϊόντων, μιγμάτων και σύνθετων υλικών καθώς και συσκευασμένων ΥΑΦ είναι σημαντική για την ανάπτυξη και διάδοση των εφαρμογών της

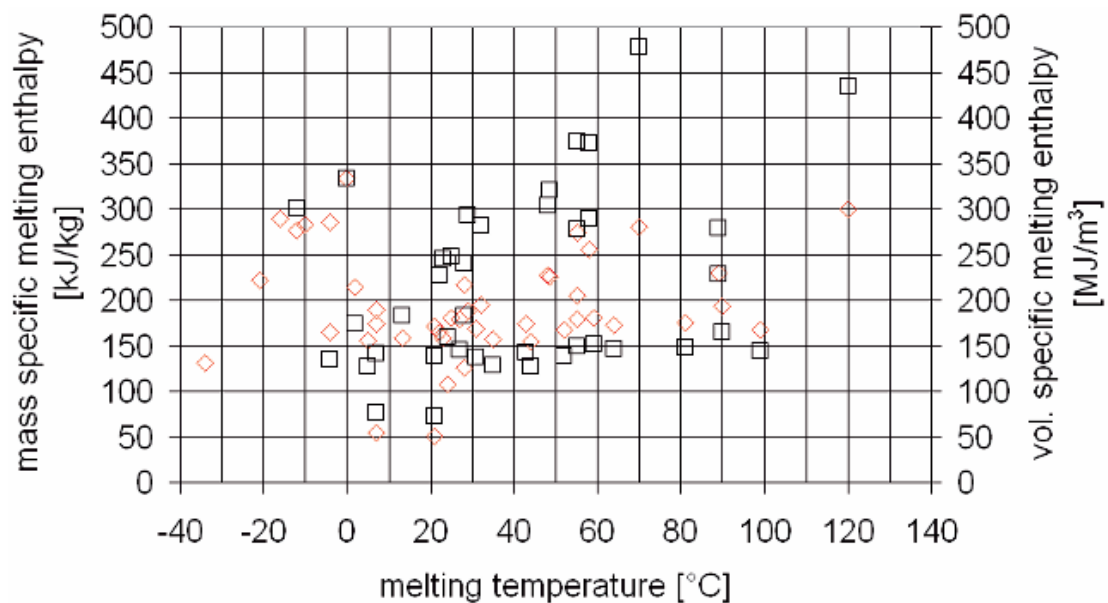
λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης. Ο λόγος είναι ότι από πλευράς καταναλωτών, μόνο εμπορικά ΥΑΦ έχουν καθορισμένες ιδιότητες, εγγύηση, σταθερή τιμή και μπορούν να παραδοθούν σε δεδομένη στιγμή για χρήση. Από πλευράς προμηθευτή, το μέγεθος της πιθανής αγοράς ενός ΥΑΦ είναι επίσης σημαντικό. Ο συνδυασμός αυτών των δύο απόψεων καθορίζουν τι θα είναι εμπορικά διαθέσιμο. Χύμα εμπορικά υλικά αλλαγής φάσης πρέπει να τηρούν υψηλότερες απαιτήσεις σε σχέση με συσκευασμένα ΥΑΦ. Συχνά, ένα υλικό δεν μπορεί να πωληθεί ως καθαρό ΥΑΦ, επειδή χειρισμός του καθαρού υλικού ενδέχεται να είναι κρίσιμος, για παράδειγμα σε σχέση με το περιεχόμενο του ΥΑΦ σε νερό. Παρολ' αυτά, σε μεγάλα συστήματα ίσως είναι προτιμότερη η επιλογή καθαρού, μη συσκευασμένου υλικού. Για παράδειγμα, ένα ΥΑΦ που παρουσιάζει διαχωρισμό των φάσεων μπορεί να μην είναι επιτυχημένο σε συσκευασμένη μορφή.

Η διαθεσιμότητα των εμπορικών ΥΑΦ επιτρέπει σε εταιρείες με καθόλου ή περιορισμένη γνώση πάνω στα ΥΑΦ να χρησιμοποιήσουν την τεχνολογία και στα δικά τους προϊόντα. Μια εταιρεία μπορεί να εμπορεύεται συσκευασμένα ΥΑΦ και πολλές άλλες στη συνέχεια μπορεί να ενσωματώνουν τα συσκευασμένα ΥΑΦ στα προϊόντα τους, χωρίς να ξέρουν πολλά για την τεχνολογία. Ένα καλό παράδειγμα είναι τα παγάκια που χρησιμοποιούνται από πολλούς καταναλωτές για τη διατήρηση της ψύξης σε διάφορα προϊόντα.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, συνήθως, είναι απαραίτητο τα κύρια προϊόντα των ΥΑΦ να είναι τεκμηριωμένα. Η RAL Quality Association έχει αναπτύξει ένα μοντέλο για τον έλεγχο της ποιότητας των προϊόντων ΥΑΦ. Από την άνοιξη του 2007, η ετικέτα του σχήματος 2.46 δείχνει ότι το προϊόν ΥΑΦ που τη φέρει έχει ελεγχθεί σύμφωνα με αυτό το πρότυπο. Παρόμοιες προσπάθειες για ανάπτυξη προτύπων ποιότητας έχουν πραγματοποιηθεί στην Κίνα και την Ινδία.

Τα περισσότερα εμπορικά ΥΑΦ στηρίζονται στις κατηγορίες υλικών των ένυδρων αλάτων, των παραφινών και των εύτηκτων μιγμάτων, χωρίς να ταυτίζονται απόλυτα με αυτές. Στην περίπτωση των ένυδρων αλάτων, γίνονται αλλαγές στη σύνθεση, προστίθενται στοιχεία πυρήνωσης, το υλικό γίνεται πιο παχύρευστο κτλ. Οι εμπορικές παραφίνες περιέχουν συνήθως ένα μίγμα αλκανίων μιας και τα καθαρά αλκάνια είναι ακριβά. Τα εμπορικά ΥΑΦ καλύπτουν ένα θερμοκρασιακό εύρος από  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Παρόλο που αρκετά υλικά έχουν διερευνηθεί για υψηλότερες θερμοκρασίες, κανένα δεν είναι διαθέσιμο εμπορικά λόγω έλλειψης αγοράς εφαρμογών σε αυτές τις θερμοκρασίες. Το σχήμα 2.47 παρουσιάζει μια σχηματική επισκόπηση της θερμοκρασίας και ενθαλπίας αλλαγής φάσης ανά μονάδα όγκου και μάζας των εμπορικών ΥΑΦ.

Η τιμή των εμπορικών ΥΑΦ τυπικά κυμαίνεται από 0.5 €/kg έως 10 €/kg. Μια πρόχειρη εκτίμηση για το κόστος της αποθήκευσης ενέργειας με ΥΑΦ είναι 0.05 €/kWh, δηλαδή 3600 kJ κοστίζουν 0.05 €. Με μία μέση πυκνότητα αποθήκευσης ΥΑΦ 180 kJ/kg (Σχ. 2.45), 20 kg ΥΑΦ απαιτούνται για να αποθηκεύσουν 3600 kJ (=1 kWh) με κόστος για την αποθήκευση 0.05 €. Ωστόσο, 20 kg ΥΑΦ κοστίζουν το λιγότερο 20 kg x 0.5 €/kg = 10 €. Για να αποθηκευτεί ποσότητα θερμότητας ικανή να αποσβέσει το κόστος της επένδυσης απαιτούνται 10 € / 0.05 € = 200 κύκλοι λειτουργίας. Επιπλέον κόστος επένδυσης για το δοχείο αποθήκευσης και τον εναλλάκτη θερμότητας δεν έχουν ληφθεί υπόψη. Έτσι, η εποχιακή αποθήκευση με χρήση ΥΑΦ δε φαίνεται προς το παρόν οικονομική με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων. Στα περισσότερα συστήματα των ΥΑΦ θα πρέπει κανείς να επιδιώκει φόρτιση κι αποφόρτιση σε καθημερινή βάση ή ακόμα και σε μικρότερες χρονικές περιόδους, ώστε να είναι αποδοτικά.



Σχ. 2.47. Θερμοκρασία και ενθαλπία ανά μονάδα όγκου (□) και μάζας (◇) εμπορικών ΥΑΦ (εικόνα: ZAE Bayern) [1]

Πίνακας 2.3. Κατασκευαστές προϊόντων ΥΑΦ παγκοσμίως [8]

Manufacturer	PCM temperature range	Number of PCMs listed
RUBITHERM ( <a href="http://www.rubitherm.de">www.rubitherm.de</a> )	-3°C to 100°C	29
Cristopia ( <a href="http://www.cristopia.com">www.cristopia.com</a> )	-33°C to 27°C	12
TEAP ( <a href="http://www.teappan.com">www.teappan.com</a> )	-50°C to 78°C	22
Doerken ( <a href="http://www.doerken.de">www.doerken.de</a> )	-22°C to 28°C	2
Mitsubishi Chemical ( <a href="http://www.mfc.co.jp">www.mfc.co.jp</a> )	9.5°C to 118°C	6
Climator ( <a href="http://www.climator.com">www.climator.com</a> )	-18°C to 70°C	9
EPS Ltd ( <a href="http://epsLtd.co.uk">epsLtd.co.uk</a> )	-114°C to 164°C	61
Merck		

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΥΑΦ

Εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας απαιτούν μια αποτελεσματική θερμική αποθήκευση. Κατά συνέπεια, η επιτυχής εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιείται [24].

Τα τελευταία 20 χρόνια έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες για την εξέλιξη των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού χρήσης. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με αλλαγή φάσης είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους να αποθηκευτεί θερμική ενέργεια για θέρμανση νερού χρήσης. Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου γίνεται μια περιγραφή των συμβατικών ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού για την καλύτερη κατανόηση της τεχνολογίας που χρησιμοποιούν πριν δοθεί έμφαση στις εφαρμογές των ΥΑΦ σε τέτοια συστήματα. Ακολουθεί μια αναδρομή στις κυριότερες μελέτες που έχουν γίνει για τη διερεύνηση της θερμικής αποθήκευσης με ΥΑΦ στα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης.

### 3.1. Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης

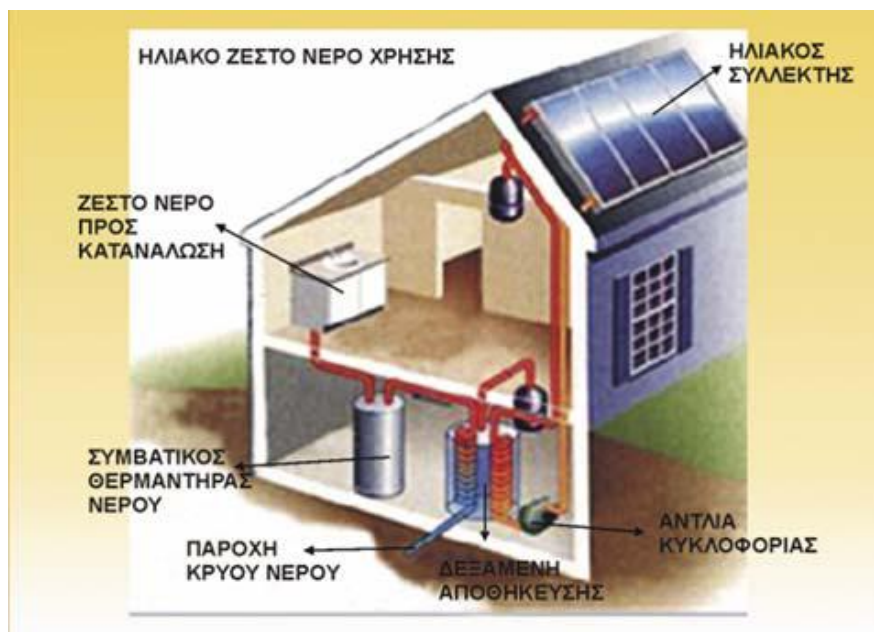
Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα για θέρμανση νερού χρήσης επιτυγχάνεται μέσω των θερμικών ηλιακών συστημάτων τα οποία χρησιμοποιούν συλλέκτες και δεξαμενές αποθήκευσης ως χωριστά υποσυστήματα ενώ η μεταφορά της ενέργειας μέσω ενός θερμαινόμενου ρευστού (π.χ. νερού, αέρα) πραγματοποιείται είτε μέσω φυσικής ροής είτε μέσω εξαναγκασμένης ροής (με κυκλοφορητή) [31].

Στις μέρες μας, όλο και περισσότεροι άνθρωποι ελκύονται από τα υψηλής τεχνολογίας ηλιακά – ηλεκτρικά (φωτοβολταϊκά) συστήματα. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού χρήσης συγκεντρώνει περισσότερη ενέργεια με ένα βιώσιμα μικρότερο κόστος σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Παρόλο που πρόκειται για δύο εντελώς διαφορετικά συστήματα και η σύγκρισή τους μπορεί να χαρακτηριστεί ατυχής, τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού είναι πάνω από τρεις φορές πιο αποδοτικά στην μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική απ' ό τι τα φωτοβολταϊκά σε ηλεκτρική.

Η επένδυση σε ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού χρήσης είναι μια έξυπνη και οικονομικά αποδοτική λύση για όλα τα νοικοκυριά. Αυτή η αποδεδειγμένα αξιόπιστη τεχνολογία προσφέρει μακροπρόθεσμη απόδοση με χαμηλή συντήρηση και σχετικά γρήγορη απόσβεση των χρημάτων της επένδυσης.

Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα θέρμανσης νερού χρήσης θα μπορούσε να προσφέρει το σύνολο ή τουλάχιστον ένα σημαντικό μέρος της αναγκαίας ποσότητας σε ζεστό νερό χρήσης για το μεγαλύτερο μέρος του έτους. Για την καλύτερη απόδοση απαιτείται μια καλή διαστασιολόγηση και σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος στις συνθήκες του κλίματος της περιοχής της εγκατάστασης και τις ανάγκες των ενοίκων.

### 3.2. Περιγραφή τεχνολογίας [31]



Σχ. 3.1. Οικιακή εγκατάσταση για θέρμανση νερού χρήσης [31]

Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής ζεστού νερού αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες, μια δεξαμενή αποθήκευσης του ζεστού νερού, τις απαραίτητες σωληνώσεις και το σύστημα ελέγχου (Σχ. 3.1). Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από το συλλέκτη και η συλλεγόμενη θερμότητα αντλείται, με φυσικό ή τεχνητό τρόπο στη δεξαμενή.

Το παραγόμενο ζεστό νερό χρήσης από θερμικά ηλιακά συστήματα αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές προκειμένου στη συνέχεια να καταναλωθεί σε διάφορα σημεία (ντους, κουζίνες, πλυντήρια κλπ.) του κτιρίου στο οποίο βρίσκεται η εγκατάσταση.

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα ποικίλουν από τα χαμηλού κόστους, συμβατικά θερμοσιφωνικά (χωρίς παρελκόμενο μηχανολογικό εξοπλισμό) έως τα πιο αποτελεσματικά, περίπλοκα και δαπανηρά κεντρικά ηλιακά συστήματα όπου χρησιμοποιούνται αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας, αισθητήρες και συστήματα ελέγχου.

### 3.3. Τύποι ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού χρήσης [31, 32]

Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, το μέγεθός τους, τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής κ.λπ. μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διαφορετικού τύπου θερμικά ηλιακά συστήματα. Η ποικιλία που παρουσιάζουν οι διατάξεις των συστημάτων αυτών οφείλεται κυρίως στους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους τα συστήματα αυτά προστατεύονται από τον παγετό και στον τρόπο που επιτυγχάνεται η κυκλοφορία του ζεστού νερού. Από τη σκοπιά της λειτουργίας τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ενεργητικά (συστήματα φυσικής κυκλοφορίας) και παθητικά (συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας). Ένα ενεργητικό σύστημα χρησιμοποιεί αντλία για την κυκλοφορία του υγρού μεταφοράς θερμότητας ενώ ένα παθητικό όχι. Γενικά τα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας είναι πιο αξιόπιστα, ευκολότερα στη συντήρηση και μεγαλύτερης διάρκειας ζωής από τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας. Τα ενεργητικά συστήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε συστήματα ανοιχτού βρόχου ή άμεσα και σε συστήματα κλειστού βρόχου ή έμμεσα. Ένα άμεσο σύστημα κυκλοφορεί το νερό του δικτύου στο συλλέκτη και δεν είναι κατάλληλο για κλίματα όπου σημειώνονται χαμηλές θερμοκρασίες. Το έμμεσο σύστημα χρησιμοποιεί ένα υγρό ως μέσο μεταφοράς θερμότητας που κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα στο σύστημα.

### 3.3.1. Συστήματα φυσικής κυκλοφορίας (παθητικά συστήματα)

Τα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους συμπαγείς θερμαντήρες νερού (solar batch heaters) και τα θερμοσιφωνικά συστήματα.

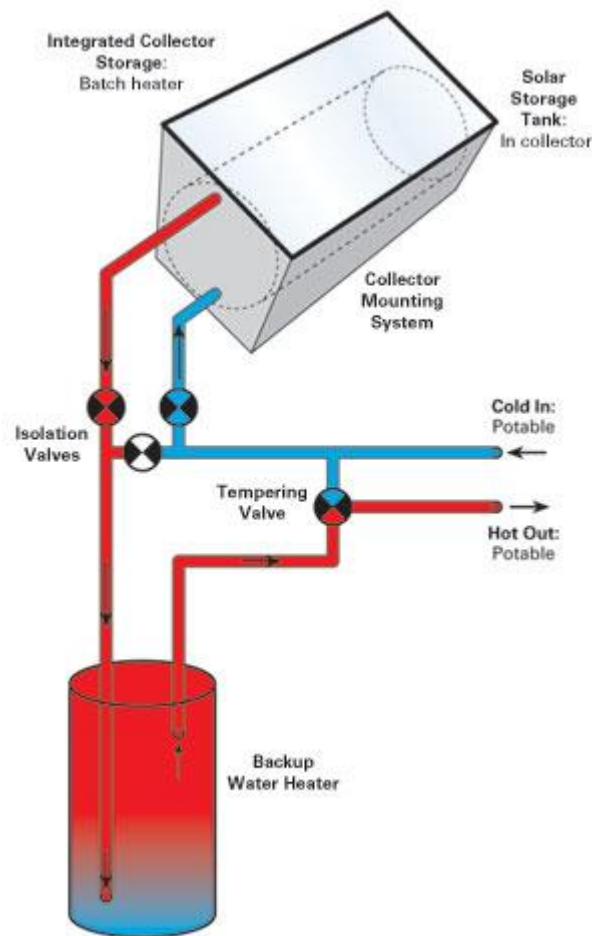
#### 3.3.1.1. Ολοκληρωμένο σύστημα συλλέκτη - αποθήκευσης (ICS)



Σχ. 3.2. Τομή συμπαγούς συλλέκτη με ενσωματωμένη δεξαμενή νερού [31]

Οι συμπαγείς θερμαντήρες νερού ή, όπως ονομάζονται αλλιώς, τα ολοκληρωμένα συστήματα συλλέκτη - αποθήκευσης (integrated collector storage - ICS) (Σχ. 3.2) τοποθετούνται σε ένα μονωμένο περίβλημα με τη διαφανή πλευρά προς τον ήλιο (νότιος προσανατολισμός). Αυτοί οι απλοί ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται εδώ και 100 χρόνια στις ΗΠΑ. Ο όρος ICS μας λέει ότι ο συλλέκτης και το δοχείο συνδυάζονται σε μία μονάδα. Μια δεξαμενή νερού που εσωκλείεται σε ένα μονωμένο κουτί που καλύπτεται με γυαλί, τοποθετείται κάτω από τον ήλιο με νότιο προσανατολισμό. Το κρύο νερό διοχετεύεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής. Ζεστό νερό λαμβάνεται από την κορυφή. Όποτε υπάρχει κατανάλωση ζεστού νερού, η πίεση του νερού από το σπίτι κινεί ζεστό νερό από την κορυφή του ηλιακού συλλέκτη αφού κρύο νερό ωθείται στο κάτω μέρος.





Σχ. 3.3. Κύρια συστατικά ολοκληρωμένου συστήματος συλλέκτη – αποθήκευσης [32]

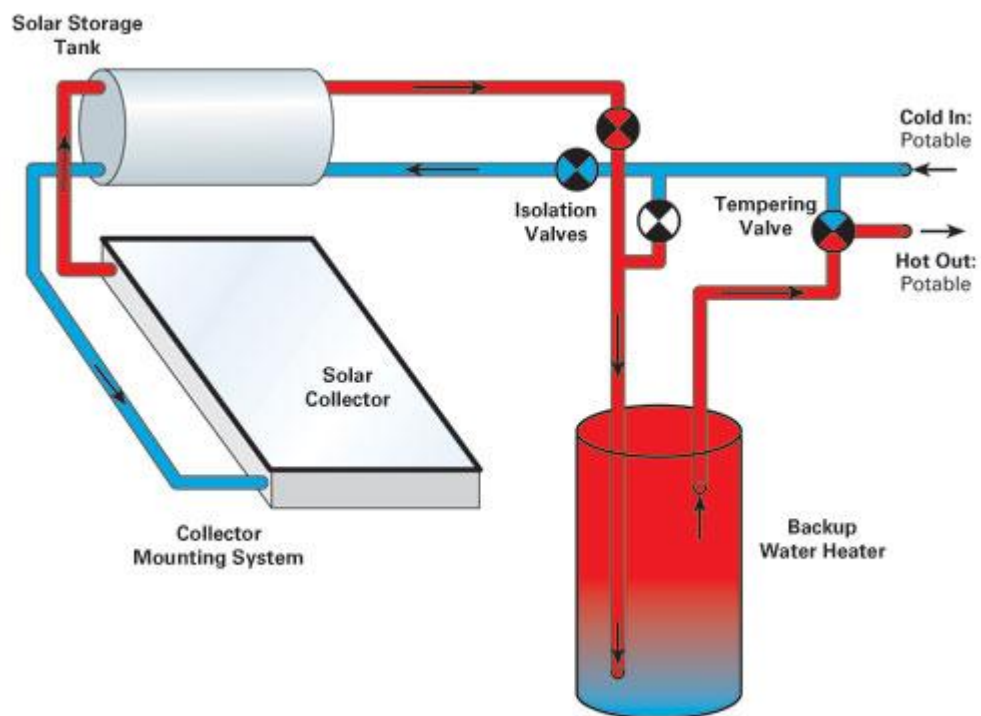
Δεδομένου ότι το νερό του δικτύου θερμαίνεται άμεσα και στη συνέχεια καταναλώνεται για να πάρει άλλη ποσότητα νερού από το δίκτυο τη θέση του στη δεξαμενή, αυτό είναι ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου. Το ολοκληρωμένο σύστημα συλλέκτη – αποθήκευσης χρησιμοποιείται σε ενδιάμεσα κλίματα όπου ο παγετός δεν αποτελεί ζήτημα. Εμπορικά το κόστος των συστημάτων αυτών είναι σχετικά χαμηλό ενώ μπορούν σε πολύ απλή μορφή να κατασκευαστούν κι από τους ίδιους τους χρήστες. Σε περιπτώσεις απλών εφαρμογών σε μέτρια κλίματα με καλή ηλιοφάνεια ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να αποτελέσει λύση για τη θέρμανση του νερού. Το βάρος των συστημάτων αυτών μπορεί να φτάνει τα 90 κιλά χωρίς νερό ενώ όταν είναι γεμάτα με 150 λίτρα νερό προστίθενται ακόμη 145 κιλά. Το σχήμα 3.3 περιλαμβάνει τα κύρια συστατικά του ολοκληρωμένου συστήματος συλλέκτη – αποθήκευσης (Σχ. 3.3).

### 3.3.1.2. Θερμοσιφωνικό σύστημα

Ένα άλλο σχετικά απλό σύστημα και το πιο δημοφιλές ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού παγκοσμίως είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνας. Το θερμοσιφωνικό σύστημα (Σχ. 3.4) είναι ιδιαίτερα δημοφιλές σε χώρες όπως η Ιαπωνία, η Αυστραλία, η Ινδία, η Ελλάδα, η Κύπρος και το Ισραήλ.

Τα θερμοσιφωνικά συστήματα αναγνωρίζονται εύκολα μιας και η δεξαμενή πρέπει να τοποθετείται ακριβώς πάνω από τον συλλέκτη. Καθώς το νερό θερμαίνεται στον ηλιακό συλλέκτη γίνεται ελαφρύτερο και ανέρχεται με φυσικό τρόπο προς τη δεξαμενή αποθήκευσης ενώ το ψυχρότερο νερό της δεξαμενής ρέει μέσω των σωληνώσεων προς το κατώτερο σημείο του συλλέκτη δημιουργώντας κυκλοφορία σε όλο το σύστημα. Σε ψυχρότερα κλίματα χρησιμοποιούνται αντιψυκτικά διαλύματα όπως η προπυλενογλυκόλη σε κλειστό κύκλωμα και σωληνώσεις ανθεκτικές στον παγετό κατασκευασμένες συνήθως από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο σταυροειδών δεσμών (PEX).

Τα θερμοσιφωνικά συστήματα έχουν βρει ευρεία εμπορική εφαρμογή με πολλούς κατασκευαστές παγκοσμίως. Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος έναντι του συμπαγούς θερμαντήρα νερού είναι ότι η θερμότητα αποθηκεύεται σε μια καλά μονωμένη δεξαμενή που εξασφαλίζει μειωμένες απώλειες κατά τη διάρκεια της νύχτας ώστε ζεστό νερό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε στιγμή έως την επόμενη ηλιόλουστη μέρα.



Σχ. 3.4. Κύρια στοιχεία θερμοσιφωνικού συστήματος [32]

### 3.3.2. Συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (ενεργητικά συστήματα)

Τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας χρησιμοποιούν ηλεκτρικές αντλίες, βαλβίδες και συστήματα ελέγχου για να κυκλοφορήσουν το νερό ή τα άλλα ρευστά μεταφοράς της θερμότητας μέσα στους συλλέκτες. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων συστημάτων: τα συστήματα ανοιχτού βρόχου και τα συστήματα κλειστού βρόχου.

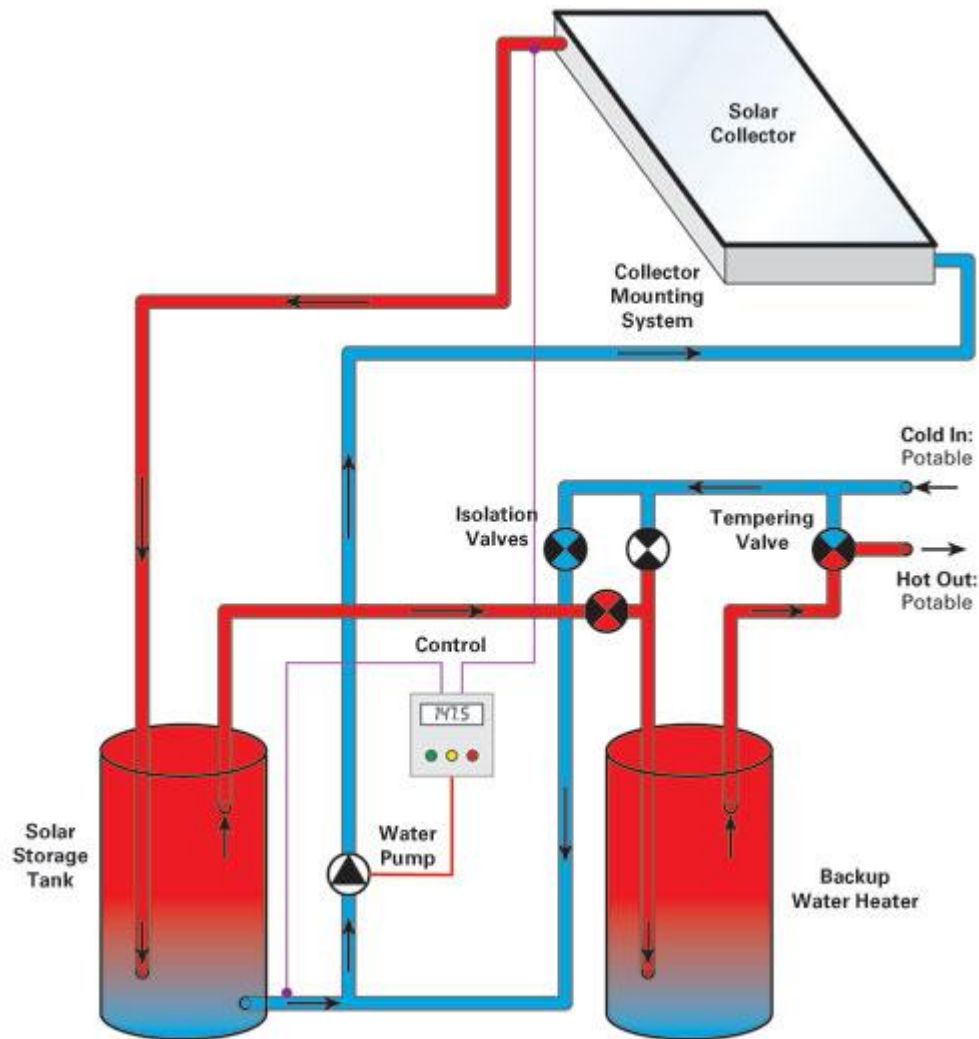
Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου χρησιμοποιούν αντλίες για να κυκλοφορήσουν το νερό του δικτύου στους συλλέκτες.

Τα συστήματα κλειστού βρόχου αντλούν το ρευστό μεταφοράς θερμότητας συνήθως από ένα μίγμα γλυκόλης και νερού μέσα στους συλλέκτες. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω εναλλακτών θερμότητας από το ρευστό στο νερό που αποθηκεύεται στις δεξαμενές.

#### 3.3.2.1. Ανοιχτού βρόχου

Τα άμεσα συστήματα ανοιχτού βρόχου (open – loop direct systems) (Σχ. 3.5) χρησιμοποιούνται σε τροπικά κλίματα όπου δεν υπάρχει η πιθανότητα παγετού. Συνήθως το σύστημα περιλαμβάνει μια δεξαμενή με ηλεκτρικό θερμαντή (ηλεκτρικό στοιχείο) περίπου 200 λίτρων και έναν συλλέκτη περίπου 3.7 τετραγωνικών μέτρων. Τις περισσότερες φορές το ηλεκτρικό στοιχείο δεν είναι ενεργό επομένως η δεξαμενή χρησιμεύει μόνο για αποθήκευση προθερμασμένου νερού που τροφοδοτεί έναν υπάρχοντα βοηθητικό (backup) θερμαντή νερού.

Στην κορυφή του ηλιακού συλλέκτη υπάρχει αυτόματο ή χειροκίνητο εξάρτημα εξαερισμού για την απομάκρυνση του αέρα. Η αντλία είναι ένας μικρός κυκλοφορητής που δεν καταναλώνει παραπάνω από 10 Watt και μπορεί να τροφοδοτείται από ένα μικρό φωτοβολταϊκό στοιχείο 10 Watt ή από μια αντλία εναλλασσόμενου ρεύματος που ελέγχεται από θερμοστάτη. Αισθητήρας θερμότητας που διακόπτει την παροχή σε δεδομένη θερμοκρασία μπορεί να εγκατασταθεί για να ελέγχει τη θερμοκρασία στην οποία θα φτάσει η ηλιακή δεξαμενή νερού. Συνήθεις τιμές θερμοκρασιών για τους αισθητήρες που βρίσκονται στο εμπόριο για τέτοιες εφαρμογές είναι 71 ή 82 °C.



Σχ. 3.5. Κύρια στοιχεία συστήματος ανοιχτού βρόχου [32]

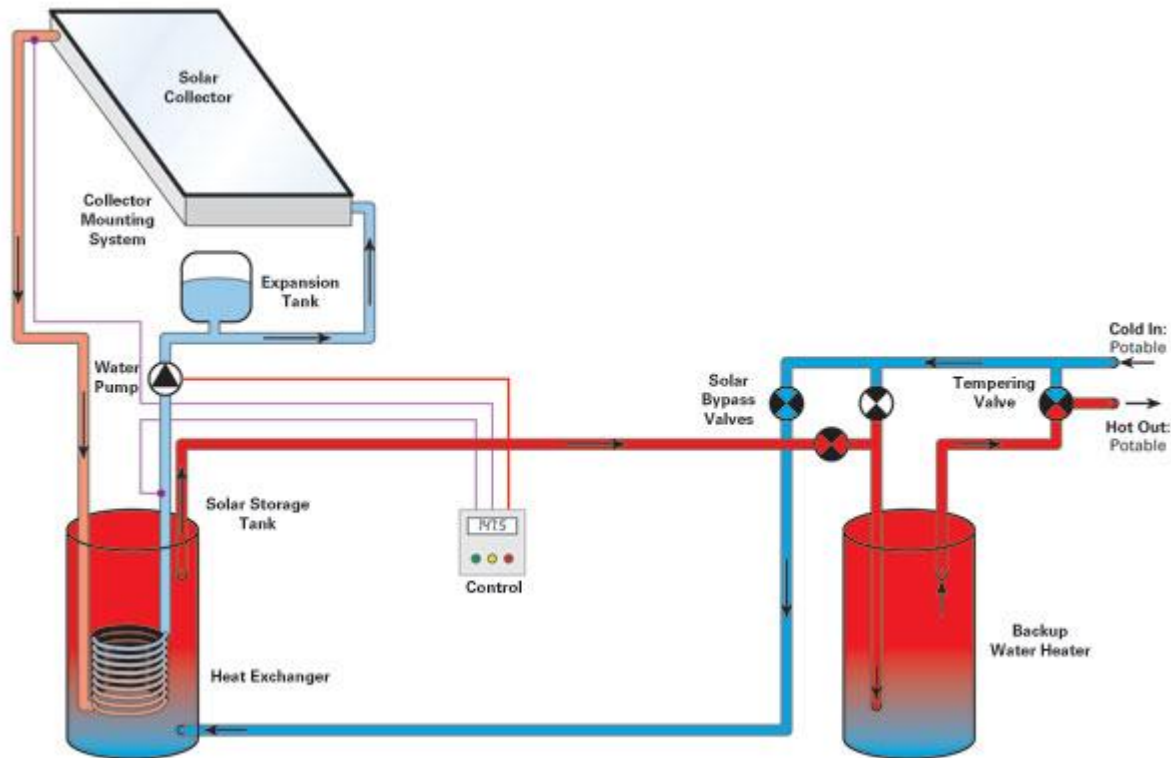
### 3.3.2.2. Κλειστού βρόχου

#### Αντιψυκτικό σύστημα (γλυκόλης υπό πίεση)

Σε αυτό το σύστημα το εισερχόμενο νερό του δικτύου κατευθύνεται στην ηλιακή δεξαμενή αποθήκευσης αλλά ποτέ στους συλλέκτες. Ένα μίγμα αντιψυκτικού και νερού κυκλοφορεί από τους συλλέκτες σε σπειροειδή σωλήνωση στην ηλιακή δεξαμενή και στη συνέχεια αντλείται πίσω στους συλλέκτες. Στα περισσότερα κλίματα ένα μίγμα 50/50 προπυλενογλυκόλης και νερού προστατεύει το συλλέκτη από την ψύξη. Το νερό του δικτύου θερμαίνεται μέσω της επαφής με την σπειροειδή σωλήνωση του ζεστού νερού που έρχεται από το συλλέκτη μέσα στη δεξαμενή.

Αυτά τα συστήματα απαιτούν την ύπαρξη δοχείου διαστολής και κάποια άλλα βοηθητικά στοιχεία για το γέμισμα, την εξαέρωση και τη συντήρηση του συστήματος. Ένα αδιαμφισβήτητο πλεονέκτημα του αντιψυκτικού συστήματος είναι ότι οι συλλέκτες μπορεί να τοποθετηθούν οπουδήποτε. Τα συστήματα αυτά είναι σχεδόν η μόνη λύση σε πολύ ψυχρά κλίματα.

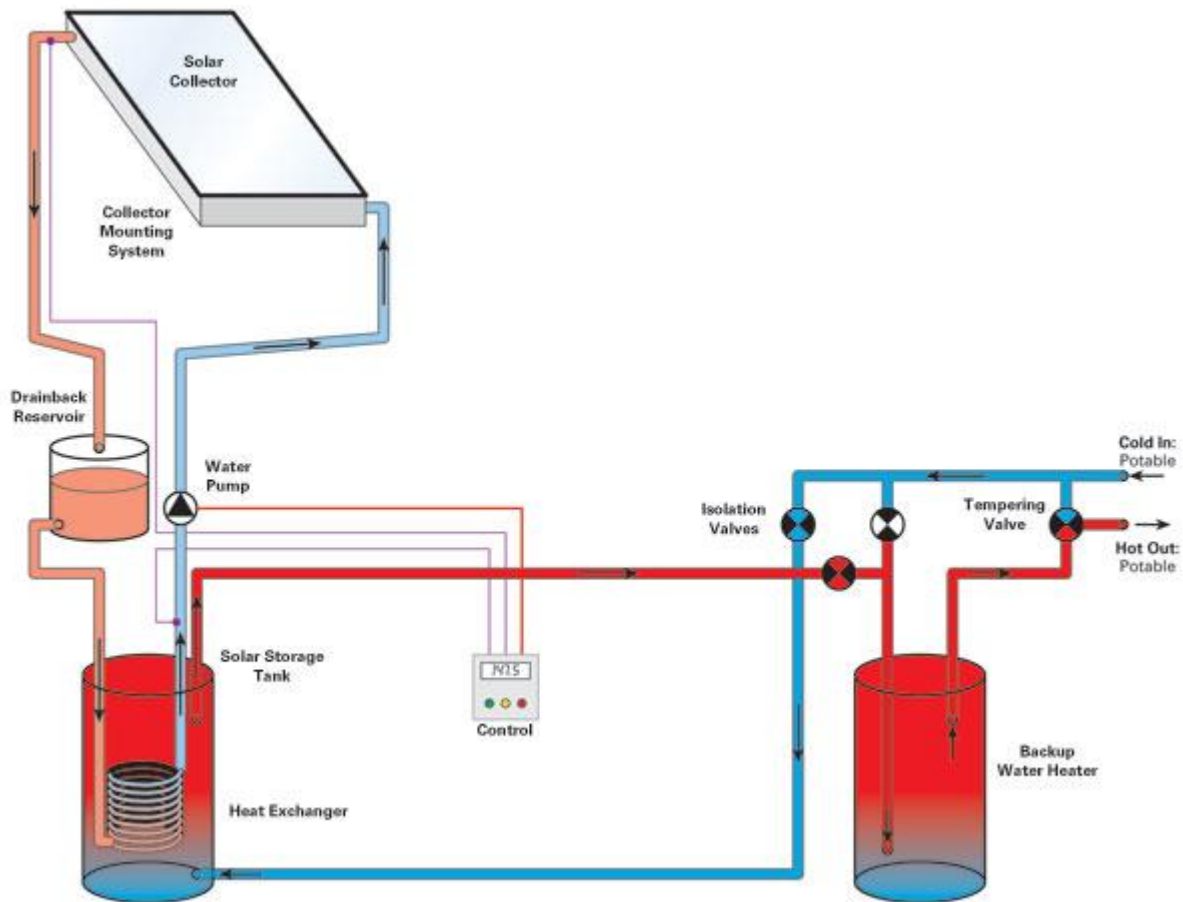
Το παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.6) περιλαμβάνει τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γλυκόλης υπό πίεση.



Σχ. 3.6. Κύρια στοιχεία συστήματος γλυκόλης υπό πίεση [32]

## Σύστημα drainback

Το σύστημα drainback (Σχ. 3.7) ίσως απαιτεί τη λιγότερη συντήρηση απ' όλα τα άλλα ενεργητικά συστήματα. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι απεσταγμένο νερό που σπάνια απαιτεί αντικατάσταση. Όταν το σύστημα δεν αντλεί ο ηλιακός συλλέκτης είναι άδειος και το απεσταγμένο νερό αποθηκεύεται σε δοχείο (drainback reservoir) περίπου 38 λίτρων που συνήθως υπάρχει ακριβώς πάνω από την ηλιακή δεξαμενή. Μεγαλύτερης χωρητικότητας δοχεία χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερα συστήματα.



Σχ. 3.7. Κύρια στοιχεία συστήματος drainback [32]

Όταν η αντλία λειτουργεί, το απεσταγμένο νερό κυκλοφορεί στον συλλέκτη, ζεσταίνεται και στη συνέχεια επιστρέφει στον εναλλάκτη θερμότητας μεταφέροντας θερμότητα στο νερό της δεξαμενής αποθήκευσης που είναι γεμάτη με το νερό του δικτύου. Όταν η αντλία σταματήσει να λειτουργεί ξανά το απεσταγμένο νερό επιστρέφει στο δοχείο. Συνεπώς, ο συλλέκτης πρέπει να βρίσκεται υψηλότερα από τη δεξαμενή αποθήκευσης και να υπάρχει συνεχής και επαρκής κλίση στην σωλήνωση για την αποφυγή ψύξης του συστήματος.

Τα συστήματα αυτά είναι αποτελεσματικά και αξιόπιστα. Δουλεύουν ικανοποιητικά από την πιο ζεστή έως την πιο ψυχρή μέρα του έτους και μπορούν να λειτουργούν για 20 χρόνια χωρίς συντήρηση. Το μόνο πρόβλημα είναι ότι συνήθως απαιτούνται μεγάλες αντλίες ειδικά αν πρέπει να αντληθεί νερό σε δύο ορόφους ή και πιο ψηλά αφού η αντλία πρέπει να ανεβάσει το απεσταγμένο νερό στο ύψος των ηλιακών συλλεκτών. Μια λύση θα μπορούσε να είναι η τοποθέτηση του δοχείου του απεσταγμένου νερού πιο κοντά στον συλλέκτη όπως

για παράδειγμα στη σοφίτα, εφόσον υπάρχει, ή στον ακριβώς κάτω όροφο από την σκεπή. Ωστόσο, σε τέτοιες περιπτώσεις και σε ψυχρά κλίματα που είναι πιθανό οι σωληνώσεις προς και από το δοχείο να παγώσουν είναι απαραίτητη η προσθήκη γλυκόλης στο απεσταγμένο νερό.

### 3.4. Ο ηλιακός συλλέκτης

Ο ηλιακός συλλέκτης είναι ειδικής μορφής εναλλάκτης θερμότητας που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Η ιδιορρυθμία του έγκειται κυρίως στο ότι μεταφέρει ενέργεια μορφής ακτινοβολίας από πολύ μακρινή πηγή (ήλιος) σε ένα ρευστό [12].

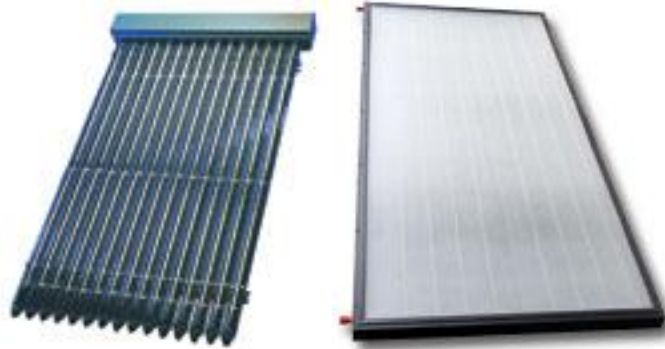
Ένας ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από ένα δίκτυο σωλήνων διαμέσου των οποίων ρέει νερό (ή αντιψυκτικό σε ψυχρότερα κλίματα) και θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο συλλέκτη. Οι συλλέκτες ποικίλλουν ως προς το μέγεθός τους με τις διαστάσεις ( $1.2 \times 2.4$  m) να είναι οι πιο συνηθισμένες [32].

Σε μια συνηθισμένη καλοκαιρινή μέρα το υγρό που κυκλοφορεί στους συλλέκτες φτάνει σε θερμοκρασία  $60^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$ , ενώ σε μια κρύα αλλά ηλιόλουστη ημέρα του χειμώνα (χωρίς νέφωση) το υγρό μπορεί να φτάσει τους  $50^{\circ}\text{C} - 65^{\circ}\text{C}$ . Όταν ο καιρός είναι ζεστός αλλά συννεφιασμένος οι συλλέκτες μπορούν να φτάσουν σε θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$  ενώ όταν είναι κρύος και συννεφιασμένος στους  $10^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}$ . Όσο η θερμοκρασία του συλλέκτη είναι υψηλότερη από αυτή του εισερχόμενου κρύου νερού, το ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού αποθηκεύει ενέργεια [32].

Στην αγορά μπορούμε να βρούμε διαφορετικούς τύπους ηλιακών συλλεκτών που κατηγοριοποιούνται σε επίπεδους συλλέκτες, συγκεντρωτικούς συλλέκτες και συλλέκτες σωληνοειδούς συλλεκτικού στοιχείου κενού.

Τα κύρια μέρη ενός επίπεδου συλλέκτη (Σχ. 3.8) είναι ο απορροφητήρας ή πλάκα απορρόφησης, ένα ή περισσότερα διαφανή καλύμματα πάνω από τον απορροφητήρα, η μόνωση και το πλαίσιο που περιβάλλει το συλλέκτη. Η πλάκα απορρόφησης είναι η μαύρη επιφάνεια που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. Ο απορροφητήρας είναι εφοδιασμένος με σύστημα μεταφοράς της ενέργειας σε ρευστό, π.χ. σωλήνες υγρού ή αεραγωγούς αν πρόκειται για θερμαντήρα αέρος. Τα καλύμματα μειώνουν τις θερμικές απώλειες δια συναγωγής κι ακτινοβολίας προς το περιβάλλον από τον απορροφητήρα ενώ η μόνωση μειώνει τις θερμικές απώλειες από την πίσω και την παράπλευρη επιφάνεια [12].

Για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών όπως η θέρμανση νερού πισίνας συχνά επιλέγονται συλλέκτες χωρίς κάλυμμα (Σχ. 3.8 αριστερά). Αυτοί οι απλοί και φτηνοί συλλέκτες συνήθως αποτελούνται από μαύρους πλαστικούς ή μεταλλικούς σωλήνες μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το νερό. Δεν έχουν μόνωση οπότε οι θερμοκρασίες περιορίζονται σε 20 πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος [74].



**Σχ. 3.8.** Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης χωρίς υαλοκάλυψη (αριστερά) και υαλοκάλυπτος (δεξιά) [32]

Τα κύρια μέρη του συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι ο συγκεντρωτής και ο δέκτης ο οποίος περιλαμβάνει τον απορροφητήρα με το σύστημα μετατροπής της ακτινοβολίας σε άλλη μορφή ενέργειας και τα σχετικά καλύμματα καθώς και τη μόνωση [12].

Στους συλλέκτες σωληνοειδούς συλλεκτικού στοιχείου κενού ένας γυάλινος σωλήνας κενού περιβάλλει κάθε έναν από τους σωλήνες του συλλέκτη για τη μείωση των απωλειών συναγωγής με το περιβάλλον. Τέτοιοι συλλέκτες αποδίδουν καλύτερα σε μια συννεφιασμένη ημέρα και μπορούν να επιτύχουν υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με άλλους τύπους συλλεκτών, ωστόσο συνήθως έχουν υψηλότερο κόστος [32].

Ένας τρίτος τύπος όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι οι συμπαγείς θερμαντήρες νερού ή, όπως ονομάζονται αλλιώς, τα ολοκληρωμένα συστήματα συλλέκτη – αποθήκευσης (integrated collector storage – ICS) (Σχ. 3.9). Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν τον ηλιακό συλλέκτη και τη δεξαμενή σε μία μονάδα. Ένα σύστημα ICS μπορεί να μοιάζει με επίπεδο συλλέκτη με μεγαλύτερο βάθος (15 cm) [32].





**Σχ. 3.9.** Ολοκληρωμένο σύστημα (integrated collector storage – ICS) [32]

### 3.5. Η ηλιακή δεξαμενή αποθήκευσης

#### 3.5.1. Λειτουργία

Η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας (Σχ. 3.10) είναι κομμάτι κλειδί ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού. Η βασική λειτουργία που επιτελεί είναι να παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα ζεστού νερού στην επιθυμητή θερμοκρασία.

Η πλειονότητα των ηλιακών συστημάτων διαθέτουν οριζόντια ή κατακόρυφη δεξαμενή νερού. Μια ηλιακή δεξαμενή είναι μια μονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης νερού [32]. Το νερό στο εσωτερικό της δεξαμενής ζεσταίνεται μέσω της κυκλοφορίας υγρού στο συλλέκτη. Σε ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου, το νερό από το συλλέκτη χύνεται άμεσα στη δεξαμενή αποθήκευσης. Στην περίπτωση συστήματος κλειστού βρόχου χρησιμοποιείται εναλλάκτης θερμότητας για τη μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στο συλλέκτη και το νερό [55].

Οι εναλλάκτες θερμότητας μεταφέρουν θερμότητα από ένα ρευστό σε ένα άλλο χωρίς ανάμειξη των δύο ρευμάτων. Εσωτερικοί εναλλάκτες θερμότητας βρίσκονται στο εσωτερικό της δεξαμενής και δεν είναι ορατοί. Ένας απλός εναλλάκτης μπορεί να είναι μια απλή σωλήνωση στον πυθμένα της δεξαμενής [32]. Συνήθως, σε οικιακούς ηλιακούς θερμαντήρες νερού χρησιμοποιείται ένα κυκλικό κέλυφος που περιβάλλει την περιφέρεια της δεξαμενής και φέρει το υγρό από το συλλέκτη (εναλλάκτης – μανδύας). Σε αυτά τα συστήματα η έξοδος του νερού συνδέεται σε κάποιο σημείο στο μέσο ή στο επάνω μέρος του εναλλάκτη θερμότητας. Το ζεστό νερό χρήσης αντλείται από το πάνω μέρος της δεξαμενής και αντικαθίσταται από κρύο νερό του δικτύου [55].

Σε θερμοσιφωνικά συστήματα η ροή νερού στο συλλέκτη είναι συνήθως χαμηλή (περίπου 0.6 l/min) και εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία κι από τους περιορισμούς της ροής στο συλλέκτη, ενώ η ροή νερού στην κατανάλωση είναι σημαντικά υψηλότερη κι εξαρτάται από τη ζήτηση από τους χρήστες [55].



**Σχ. 3.10** Δεξαμενή αποθήκευσης [32]

### 3.5.2. Μέγεθος και σχήμα

Το μέγεθος και το σχήμα του δοχείου αποθήκευσης έχει σημαντική επίδραση στην αποθήκευση ενέργειας. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του δοχείου που εκτίθεται στον ήλιο σε σχέση με τον όγκο του, τόσο λιγότερος χρόνος θα χρειαστεί για τη θέρμανση του νερού. Για παράδειγμα, για ένα ρηχό, τετραγωνικό δοχείο με έναν υψηλό λόγο εμβαδού/όγκου, η στιγμιαία προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία έχει να ζεστάνει μικρό βάθος. Ωστόσο, μια δεξαμενή με μια μεγάλη εκτεθειμένη επιφάνεια θα έχει επιπλέον μεγάλες απώλειες μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος προς το περιβάλλον και θα κρυώνει σημαντικά από απώλειες ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η σημασία του λόγου επιφάνειας/όγκο έγινε αντιληπτή από τον Haskell [53] που πατένταρε έναν βελτιωμένο συμπαγή συλλέκτη που χρησιμοποιούσε μια ρηχή, κυλινδρική δεξαμενή με λόγο επιφάνειας/όγκο σημαντικά υψηλότερο από τις συνηθισμένες [24].

Τέλος, σημαντική παράμετρος για τη σχεδίαση της δεξαμενής είναι η εύρεση του βέλτιστου λόγου του ύψους προς τη διάμετρο που επιτυγχάνει την καλύτερη θερμική κατανομή στο εσωτερικό της. Στη συνέχεια αναλύεται εκτενώς η σημασία της θερμικής διαστρωμάτωσης για την απόδοση της δεξαμενής αποθήκευσης.

### 3.5.3. Θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση στο εσωτερικό της δεξαμενής

Για να μπορεί η δεξαμενή να παρέχει ζεστό νερό στην επιθυμητή θερμοκρασία και ποσότητα είναι απαραίτητο να αποφεύγεται η ανάμειξη ζεστού και κρύου ρεύματος στη δεξαμενή μέσω της ανάπτυξης και διατήρησης μιας θερμικής διαστρωμάτωσης κατά τη διάρκεια τόσο της φόρτισης όσο και της αποφόρτισης [56, 57]

Πολλές πειραματικές κι αριθμητικές μελέτες έχουν γίνει για την ανάλυση της συμπεριφοράς των δεξαμενών αποθήκευσης με θερμική διαστρωμάτωση υπό διαφορετικές παραμέτρους λειτουργίας ή σχεδίασης. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως π.χ. επιλογή οριζόντιας ή κατακόρυφης δεξαμενής, το λόγο ύψους προς διάμετρο, το πάχος και το υλικό του τοιχώματος, το μέγεθος των στομιών εισόδου κι εξόδου, λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως η παροχή εισόδου κι η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα ρεύματα καθώς και κλιματικές συνθήκες [58].

Οι Lavan και Thompson [59] πραγματοποίησαν μια πειραματική μελέτη σε μια κατακόρυφη δεξαμενή με θερμική διαστρωμάτωση. Τα πειράματα διεξήχθησαν για διάφορους λόγους ύψους προς διάμετρο, θέσεις και γεωμετρίες του στομιού εισόδου, θερμοκρασιακές διαφορές εισόδου – εξόδου, και παροχές μάζας υγρού. Η μελέτη έδειξε ότι καλύτερη θερμική κατανομή μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση του λόγου ύψους προς διάμετρο, της διαμέτρου του στομιού εισόδου ή της θερμοκρασιακής διαφοράς εισόδου – εξόδου. Οι Cole και Bellinger [60] κατέληξαν στο ότι επιλέγοντας τον λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο με 4 μπορεί να επιτευχθεί μέγιστη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση, με άλλη μελέτη [61] να επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα των τελευταίων. Οι Nelson Balakrishnan και Murthy [62] πρότειναν για τον ίδιο λόγο την τιμή 3 [58].

Μια από τις σημαντικές παραμέτρους λειτουργίας που επηρεάζουν τη θερμική διαστρωμάτωση κατά τη λειτουργία της αποφόρτισης ή της κατανάλωσης σε ηλιακές δεξαμενές είναι το επίπεδο ανάμειξης που δημιουργείται γύρω από το στόμιο εισόδου. Διάφορες μορφές στομιών εισόδου ή εγχυτήρων έχουν σχεδιασθεί και μελετηθεί από πληθώρα μελετητών. Μελέτες των Wildin και Truman [63], Wildin [64], Zurigat, Ghajar, και Moretti [65] στόχευσαν στη διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη θερμική διαστρωμάτωση στις δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας.

Η παροχή εισόδου στη δεξαμενή συνδέεται άμεσα με τον ρυθμό κατανάλωσης ζεστού νερού. Οι Helwa, Mobarak, El-Sallak και El-Ghetany [66] μελέτησαν πειραματικά το φαινόμενο του ρυθμού κατανάλωσης στη θερμοκρασιακή κατανομή μέσα σε μια οριζόντια

δεξαμενή ενός συστήματος με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη. Η κατανάλωση νερού βασίστηκε σε μοντέλο που θεωρήθηκε πριν τη μελέτη. Η μελέτη κατέληξε ότι η θερμική διαστρωμάτωση μέσα στη δεξαμενή εξαρτάται από το μοντέλο κατανάλωσης που αποτελεί και το απαιτούμενο φορτίο.

Ο Hassan [67] προσομοίωσε έναν ηλιακό θερμοσίφωνα με τη βοήθεια του προγράμματος TRANSYS και μελέτησε την επίδραση του όγκου και σχήματος της δεξαμενής, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η κατακόρυφη δεξαμενή έχει ελαφρώς καλύτερη απόδοση από την οριζόντια.

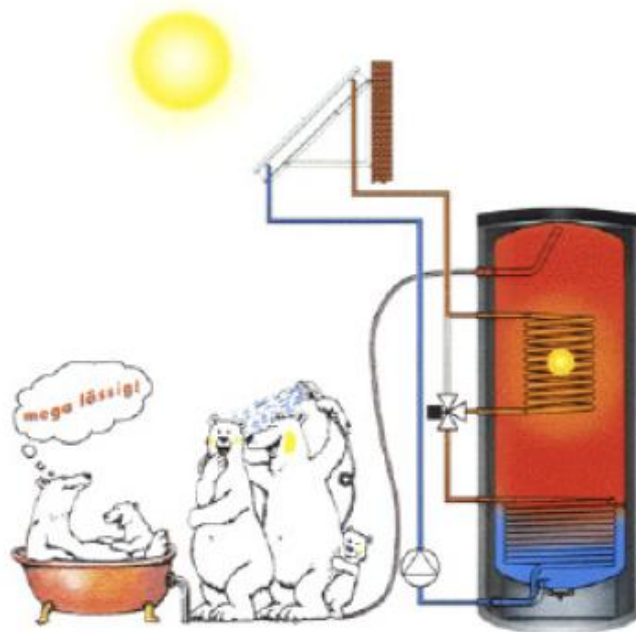
Σε άλλη μελέτη [68] γίνεται ανάλυση της απόδοσης ενός συστήματος άμεσου ή ανοιχτού βρόχου για θέρμανση νερού χρήσης σε οικία και προσομοίωση με χρήση εμπορικού προγράμματος. Ο στόχος της προσομοίωσης ήταν η εύρεση του βέλτιστου ύψους της δεξαμενής και του βέλτιστου λόγου του όγκου της δεξαμενής προς τη συλλεκτική επιφάνεια για διάφορες θερμοκρασίες φορτίου. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι για συλλεκτική επιφάνεια  $4 - 5 \text{ m}^2$ , η βέλτιστη τιμή του λόγου του όγκου της δεξαμενής προς τη συλλεκτική επιφάνεια είναι 4.

Οι Dehghan, Hosni και Shiryazdi [69] εξέτασαν πειραματικά τη συμπεριφορά μιας κατακόρυφης ηλιακής δεξαμενής ηλιακού συστήματος οικίας κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Τα θερμικά χαρακτηριστικά του συστήματος αξιολογήθηκαν με ωριαίες μετρήσεις της θερμοκρασιακής κατανομής στη δεξαμενή, της ροής στο συλλέκτη, των θερμοκρασιών εισόδου κι εξόδου του νερού από τη δεξαμενή και του ρυθμού κατανάλωσης (φορτίο). Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για τους μήνες Ιούνιο – Σεπτέμβριο και παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση έχει διαμορφωθεί πλήρως από τις 11 π.μ. έως τις 10 μ.μ. κυρίως κατά τον Αύγουστο και Σεπτέμβριο καθιστώντας τη δεξαμενή ικανή να παρέχει την απαραίτητη ποσότητα ζεστού νερού στους ενοίκους.

### 3.5.3.1. Τεχνικές ενίσχυσης της θερμικής διαστρωμάτωσης κατά τη φόρτιση

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την ενίσχυση της θερμικής διαστρωμάτωσης κατά τη διεργασία της φόρτισης της δεξαμενής. Σχεδόν σε όλες τις προτεινόμενες λύσεις η δεξαμενή είναι κατακόρυφη. Μια πρώτη λύση περιλαμβάνει τρεις βαλβίδες που ελέγχονται σύμφωνα με τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη. Το υγρό εγχύεται σε διάφορα επίπεδα της δεξαμενής σύμφωνα με τη θερμοκρασία που διαθέτει. Ο αριθμός των

θέσεων έγχυσης είναι συνήθως μικρότερος ή ίσος με τρεις εξαιτίας του κόστους των βαλβίδων. Μερικοί κατασκευαστές χρησιμοποιούν έναν διπλό εναλλάκτη θερμότητας: το κύριο υγρό ρέει πάντα διαμέσου του χαμηλότερου εναλλάκτη θερμότητας και ρέει στον υψηλότερο εναλλάκτη μόνον εφόσον επιβάλλεται από τα επίπεδα θερμοκρασιών (Σχ. 3.11). Άλλοι κατασκευαστές επιλέγουν την άμεση φόρτιση/αποφόρτιση σε διάφορα επίπεδα στη δεξαμενή με έναν εξωτερικό εναλλάκτη θερμότητας συνδεδεμένο με μια προσαρμοσμένη ρύθμιση.



Σχ. 3.11. Δεξαμενή με διπλό εναλλάκτη [59]

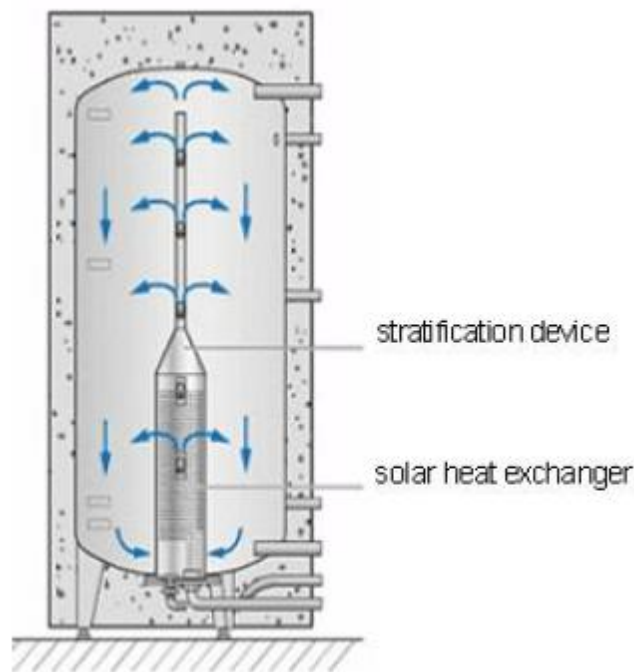
Επιπλέον, η χρήση του συστήματος των τριών βαλβίδων μπορεί να συνδυαστεί με έναν εναλλάκτη – μανδύα στο εσωτερικό του οποίου το υγρό εγχύεται στο κατάλληλο επίπεδο (Σχ. 3.12). Οι Knudsen και Furbo [70] συμβουλεύουν να χρησιμοποιείται μια υψηλή θέση εισόδου για υψηλές θερμοκρασίες και μια ενδιάμεση θέση για μέτριες θερμοκρασίες εισόδου.



**Σχ. 3.12.** Δεξαμενή με εναλλάκτη – μανδύα που ρυθμίζεται από τρεις βαλβίδες [59]

Μια άλλη συσκευή για την ενίσχυση της θερμικής διαστρωμάτωσης (Σχ. 3.13), καθιστά δυνατή τη διανομή της θερμότητας σε συγκεκριμένο σημείο με φυσική συναγωγή. Το υγρό ανεβαίνει κι εξέρχεται από τη συσκευή μεταφέροντας θερμότητα στα διάφορα σημεία, μεγιστοποιώντας έτσι τη θερμική διαστρωμάτωση. Τέτοιες συσκευές έχει διαπιστωθεί ότι είναι κατάλληλες για ροές μεταξύ 5 και 8 λίτρων, αλλά όχι για μικρότερες, με τους μελετητές να επισημαίνουν την ανάγκη για βελτίωση στο σχεδιασμό.

Ο Andersen και η ομάδα του [71] μελέτησαν έναν αριθμό από διαφορετικές υφασμάτινες σωλήνες συγκριτικά με μια συμπαγή συσκευή θερμικής διαστρωμάτωσης όπως αυτή του σχήματος 3.3. Η μελέτη δείχνει ότι η απόδοση των υφασμάτινων σωλήνων θερμικής διαστρωμάτωσης μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη χρήση δύο στρωμάτων υφάσματος με απόσταση 10 mm μεταξύ τους αντί της χρήσης ενός μόνο στρώματος. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των υφασμάτινων σωλήνων είναι η υψηλή μεταφορά θερμότητας διαμέσου του λεπτού υφάσματος κατά την οριζόντια κατεύθυνση. Έτσι, όταν το ζεστό νερό εισέρχεται στην κρύα δεξαμενή από τον πυθμένα στην κορυφή του υφασμάτινου σωλήνα, η συμπαγής συσκευή πλεονεκτεί χάρις στη χαμηλή οριζόντια μεταφορά θερμότητας διαμέσου του τοιχώματος της σωλήνωσης. Το πλεονέκτημα της σωλήνωσης με διπλό στρώμα υφάσματος έναντι του συμπαγούς σωλήνα είναι ότι διατηρεί καλύτερα τη θερμική διαστρωμάτωση σε υψηλές παροχές.



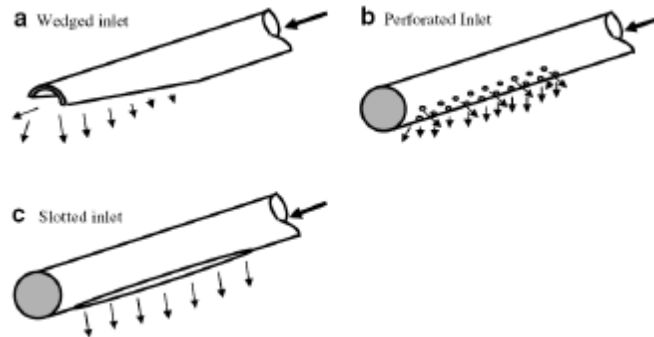
**Σχ. 3.13.** Φόρτιση μέσω μιας συμπαγούς συσκευής διαστρωμάτωσης (stratification device) [59]

### 3.5.3.2. Τεχνικές διατήρησης της θερμικής διαστρωμάτωσης κατά την αποφόρτιση/κατανάλωση

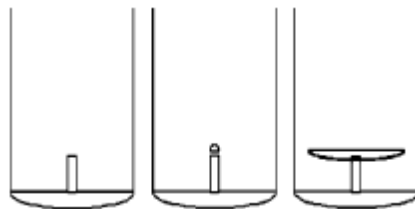
Με σκοπό τον περιορισμό της ανάμειξης κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης έχουν αναπτυχθεί άλλες διατάξεις και εσωτερικές δομές. Η κατανάλωση θερμού νερού οδηγεί στην έγχυση κρύου νερού στον πυθμένα της δεξαμενής. Για να περιοριστεί η διακύμανση στη θερμική διαστρωμάτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συσκευή εισόδου του κρύου νερού ή το υγρό μπορεί να ενσταλάζεται στον πυθμένα της δεξαμενής. Αποτελέσματα μελέτης [72] που έγιναν για να διαπιστωθεί η επίδραση του στομίου κρύου νερού στη θερμική διαστρωμάτωση έδειξαν ότι η εντροπία κι η εξέργεια επηρεάζεται από τον αριθμό Richardson, τον όγκο της κατανάλωσης και τις αρχικές συνθήκες.

Ο βαθμός ανάμειξης που παράγεται από τρεις διαφορετικές γεωμετρικές στομιών εισόδου (Σχ. 3.14 a, b, c) έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζει την απόδοση της δεξαμενής [73] με τη διαμόρφωση c (Σχ. 3.14c) να έχει αποδειχθεί η πιο αποτελεσματική. Η διαφορά στην απόδοση ανάμεσα στους τρεις τύπους στομιών εισόδου είναι πιο εμφανής για μεγάλες

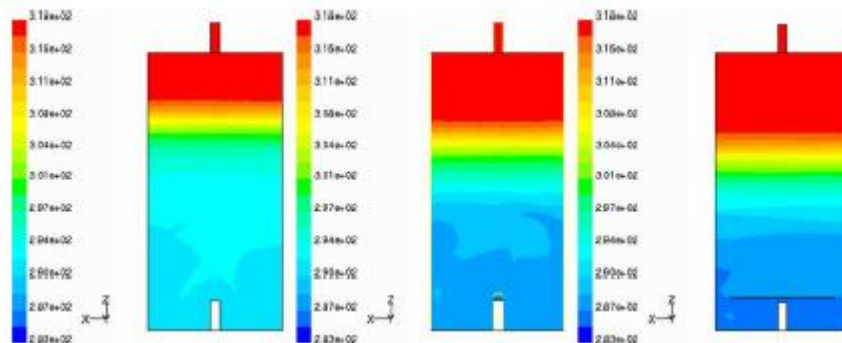
παροχές. Άλλη μελέτη προσομοίωσης [59] διάφορων μορφών στομίων εισόδου κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το στόμιο – πλάκα δίνει καλύτερη θερμική διαστρωμάτωση (Σχ. 3.15, 3.16).



Σχ. 3.14. Διαμορφώσεις στομίων εισόδου [59]



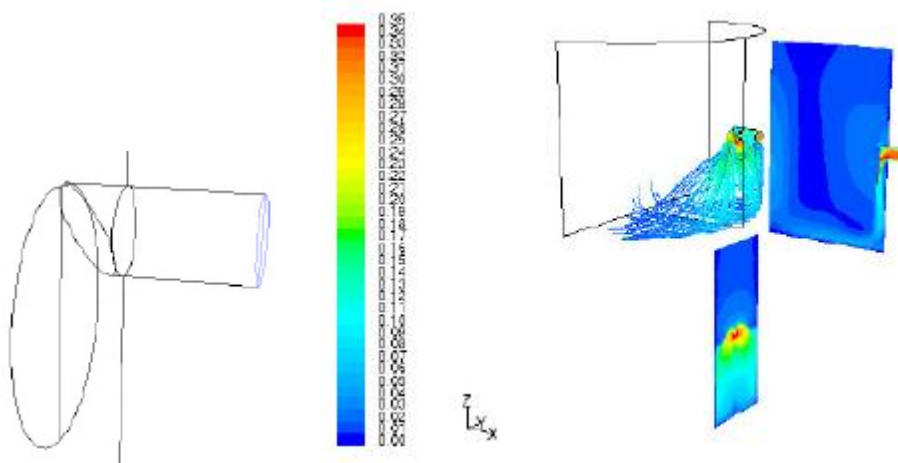
Σχ. 3.15. Απλό μοντέλο διαφορετικών στομίων εισόδου [59]



Σχ. 3.16. Θερμική διαστρωμάτωση των διαμορφώσεων του σχήματος 3.15 με τη βοήθεια μοντελοποίησης CFD Αριστερά: το στόμιο – σωλήνας. Στο κέντρο: το στόμιο – μετρό. Δεξιά: το στόμιο - πλάκα. [59]

Αριθμητικές μέθοδοι προσομοίωσης δείχνουν ότι το στόμιο εισόδου του κρύου νερού αλλάζει τη ροή μέσα στη δεξαμενή έτσι ώστε να μειωθεί η περιοχή ανάμειξης (Σχ. 3.17)



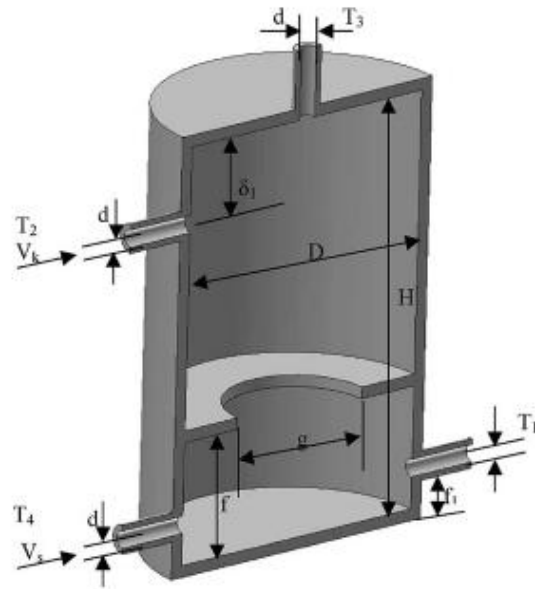


**Σχ. 3.17.** Διατάραξη της ροής γύρω από το στόμιο εισόδου [59]

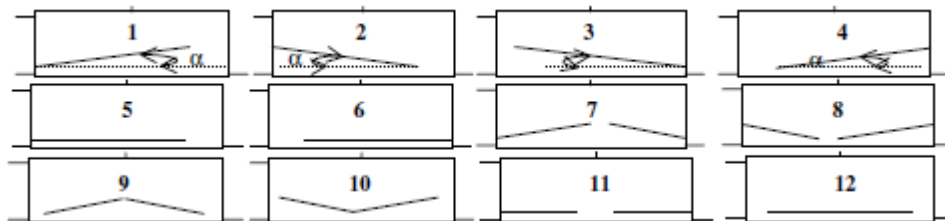
Πέραν της μορφής των στομιών εισόδου, πολλοί ερευνητές έχουν εξετάσει την τοποθέτηση εσωτερικών εμποδίων στη δεξαμενή με σκοπό τη διατήρηση της θερμικής διαστρωμάτωσης και της αποφυγής της μείωσης της θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής, εξαιτίας την ανάμειξης του κρύου εισερχόμενου νερού με το ζεστό. Οι μελέτες δείχνουν ότι οι δεξαμενές με προσθήκη εμποδίων διαμορφώνουν καλύτερη θερμική διαστρωμάτωση σε σχέση με αυτές χωρίς εσωτερικά εμπόδια [29].

Η χρήση εμποδίων σε κυλινδρική δεξαμενή (Σχ. 3.18) για αποφυγή της άμεσης ανάμειξης των ρευμάτων αναλύθηκε από ομάδα του πανεπιστημίου του Gaziantep της Τουρκίας [29] για 12 διαφορετικές διαμορφώσεις.

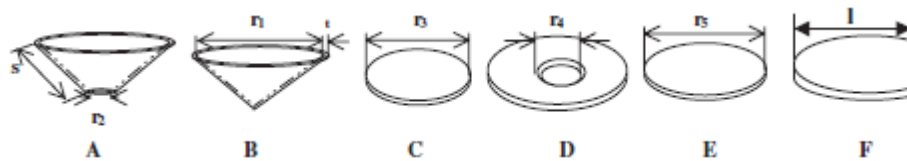
Τα εμπόδια που έχουν κενό στο κέντρο εμφανίζονται να διαμορφώνουν καλύτερη θερμική διαστρωμάτωση σε σχέση με αυτά που έχουν το κενό κοντά στο τοίχωμα της δεξαμενής. Το σχήμα κι η διαμόρφωση των εμποδίων στις δεξαμενές με αριθμό 7 και 11 (Σχ. 3.19, Πίνακας 3.1.) θεωρούνται τα πιο αποτελεσματικά, αφού οι δεξαμενές μπορούν να παρέχουν ζεστό νερό σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Άλλοι τύποι εμποδίων συμβάλουν ελάχιστα στη βελτίωση της θερμικής διαστρωμάτωσης στη δεξαμενή. Περαιτέρω σύγκριση των δεξαμενών 7 και 11 ως προς τη θερμοκρασία του ζεστού νερού που επιτυγχάνεται, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το εμπόδιο στη δεξαμενή 11 (εμπόδιο D) παρέχει την καλύτερη θερμική διαστρωμάτωση από όλες τις δομές που εξετάστηκαν.



Σχ. 3.18. Μοντέλο δεξαμενής θερμού νερού με εσωτερικά εμπόδια [29]



Σχ. 3.19. Γεωμετρία εμποδίων κι η τοποθέτησή τους στη δεξαμενή [29]

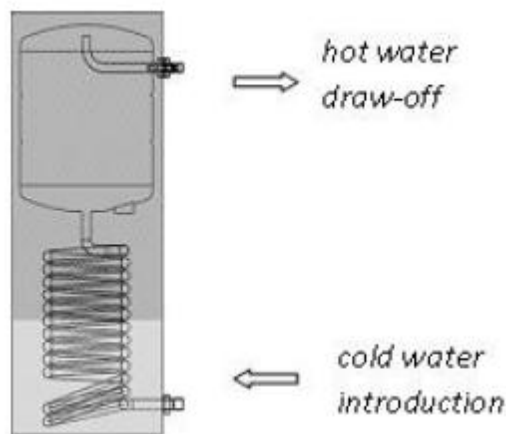


Σχ. 3.20. Λεπτομέρειες της γεωμετρίας των εμποδίων που εξετάστηκαν [29]

Πίνακας 3.1. Γεωμετρίες εμποδίων (A – F) και δεξαμενές στις οποίες τοποθετήθηκαν (1 -12) [29]

Obstacle type (Fig. 3)	Tank models in which the obstacle is placed (Fig. 2)
A	7,8
B	9,10
C	12
D	11
E	1,2,3,4
F	5,6

Τέλος, μια άλλη λύση για το πρόβλημα της ανάμειξης είναι η χρήση μιας μικρής δεξαμενής μέσα σε μια μεγαλύτερη (δεξαμενή μέσα στη δεξαμενή) κι ενός εναλλάκτη θερμότητας (Σχ. 3.21). Το νερό σε ένα τέτοιο σύστημα δε μένει στάσιμο στον πυθμένα της δεξαμενής οπότε αποφεύγεται κι ο κίνδυνος της νόσου των λεγεωνάριων. Από την άλλη μεριά, η απόδοση της λύσης δεξαμενή μέσα στη δεξαμενή μπορεί να μην είναι τόσο καλή εξαιτίας της μεταφοράς θερμότητας από τον εναλλάκτη στη μεγαλύτερη δεξαμενή. Αυτή η λύση αποφεύγει την ανάμειξη μέσω μεταφοράς μάζας άλλα ενισχύει τη μεταφορά μέσω συναγωγής. Απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για να γνωρίζουμε ποια είναι η συμμετοχή της κάθε μορφής μεταφοράς θερμότητας [59].



Σχ. 3.21. Δεξαμενή μέσα στη δεξαμενή [59]

### 3.6. Εφαρμογές ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού – περιβαλλοντικά οφέλη [31]

Ένα από τα πεδία εφαρμογών στα οποία χρησιμοποιείται ευρέως η ηλιακή ενέργεια είναι η θέρμανση νερού. Τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού κερδίζουν ολοένα έδαφος χάρις στο σχετικά χαμηλό κόστος, την ευκολία να κατασκευαστούν και να συντηρηθούν. Αποτελούν μια βιώσιμη λύση είτε ως συμπλήρωμα είτε ως εναλλακτική της παραγωγής θερμού νερού με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας ή καυσίμων όπως το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο, συντελώντας στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου που συνδέονται με την παραγωγή ενέργειας από συμβατικές πηγές. Το ζεστό νερό είναι απαραίτητο σε πληθώρα καθημερινών δραστηριοτήτων όπως το μπάνιο, το πλύσιμο ρούχων ή πιάτων κι η καθαριότητα χώρων σε μια οικία, αλλά και σε βιομηχανικές εφαρμογές κι οργανισμούς. Σε

μια εικοσαετία, ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού μπορεί να αποφύγει πάνω από 50 τόνους εκπομπών διοξειδίου του θερμοκηπίου. Ανάλογα με το κλίμα και τις απαιτήσεις της εφαρμογής, ένα καλά σχεδιασμένο, εγκατεστημένο και συντηρημένο σύστημα μπορεί να επιτύχει ικανοποίηση από 50% έως 100% των αναγκών σε ζεστό νερό. Τα ηλιακά συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν σε οποιοδήποτε σχεδόν κλίμα με την απόδοσή τους να ποικίλλει και να εξαρτάται εν μέρει από την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που είναι διαθέσιμη στην περιοχή και τη θερμοκρασία του νερού του δικτύου [24].

Τα κεντρικά ηλιακά συστήματα είναι τα πιο αποδοτικά καθώς εφαρμόζονται σε σύνολα κατοικιών, ξενοδοχεία, βιομηχανίες κλπ. και αποτελούνται από ένα κεντρικό σύστημα συλλεκτών και μια κεντρική δεξαμενή, η οποία παρέχει ζεστό νερό στις μεμονωμένες κατοικίες (π.χ. διαμερίσματα) μέσω δικτύου αγωγών. Ένα τέτοιο σύστημα εξυπηρετεί καλύτερα την ομαλότερη κατανομή ζεστού νερού στη διάρκεια του 24ώρου με αποτέλεσμα να μειώνονται οι θερμικές απώλειες του αποθηκευμένου νερού για την κάλυψη των απαιτήσεων του συνόλου των κατοικιών.

Μια μικρή αναφορά στα περιβαλλοντικά οφέλη που απορρέουν από τη χρήση ηλιακών συστημάτων δείχνει ότι επιτυγχάνεται εξοικονόμηση καυσίμων που ισοδυναμεί με 50 – 70 kg πετρελαίου ανά τετραγωνικό μέτρο ηλιακού συλλέκτη κάθε χρόνο. Όσον αφορά τη μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub>, όταν η ηλιακή θέρμανση αντικαθιστά τη θέρμανση με ηλεκτρικό ρεύμα έχουμε εξοικονόμηση 750 kg CO<sub>2</sub> ανά τετραγωνικό μέτρο ηλιακού συλλέκτη το χρόνο, ενώ όταν αντικαθίσταται η θέρμανση του νερού μέσω boiler που χρησιμοποιεί πετρέλαιο η εξοικονόμηση είναι 250 kg αντίστοιχα.

### 3.7. ΥΑΦ σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης – ανασκόπηση μελετών

Στο παρελθόν πολλές προσπάθειες είχαν γίνει σε ενεργητικά ηλιακά συστήματα για ενσωμάτωση δομών που αξιοποιούν την αλλαγή φάσης για θερμική αποθήκευση ενέργειας. Οι περισσότερες από αυτές αφορούσαν θέρμανση χώρων με συστήματα που ενσωμάτωναν ΥΑΦ είτε στον ηλιακό συλλέκτη είτε σε κάποια δεξαμενή όπου γινόταν η αποθήκευση θερμότητας. Αργότερα, η εμπειρία που αποκτήθηκε χρησιμοποιήθηκε και για τη θέρμανση νερού χρήσης.

Οι εφαρμογές των ΥΑΦ σε συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης άργησαν να υλοποιηθούν εξαιτίας δύο βασικών λόγων. Ο πρώτος λόγος είναι ότι για λόγους υγείας πρέπει να αποφεύγεται η επαφή του νερού χρήσης με τοξικά υλικά και η αποθήκευση νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες. Έτσι, μια ενδεχόμενη διαρροή τοξικού υλικού ή χαμηλή απόδοση του συστήματος δεν ενθάρρυνε την προοπτική εμπορικών εφαρμογών. Στις μέρες μας, το πρόβλημα αυτό λύνεται με χρήση εναλλάκτη θερμότητας ή μη τοξικών δοχείων που περιέχουν το ΥΑΦ. Ο δεύτερος λόγος είναι η υψηλή απαίτηση σε ενέργεια για τη θέρμανση του νερού χρήσης. Μια ροή νερού 1 l/min ( $\approx 1 \text{ kg/min}$ ) που θερμαίνεται από τους 20 στους 40 °C απαιτεί  $20^\circ\text{C} \times 4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 1 \frac{\text{kg}}{\text{min}} = 80 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 1 \frac{\text{kg}}{60\text{s}} \approx 1.25\text{kW}$  θερμικής ισχύος. Έτσι, οι εφαρμογές ΥΑΦ σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης δεν φάνταζαν ελκυστικές στους μελετητές με τις περισσότερες έρευνες να έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια. Η πρόσφατη ανάγκη για αποτελεσματικές μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας, βελτίωσης της απόδοσης ενεργειακών συστημάτων και εξοικονόμηση ενέργειας, ενίσχυσε το ενδιαφέρον των μελετητών για χρήση ΥΑΦ σε συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης.

Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική αναδρομή σε σχετικές έρευνες κι εργασίες των τελευταίων 25 ετών.

Ο Kumar στο πανεπιστήμιο Devi Ahilya της Ινδίας [33] σχεδίασε, ανέπτυξε και εξέτασε την απόδοση μιας μονάδας λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας για την κάλυψη των πρωινών και βραδινών απαιτήσεων σε ζεστό νερό χρησιμοποιώντας έναν ηλιακό συλλέκτη που έμοιαζε με κουτί. Το σύστημά του αποτελούνταν από τρεις εναλλάκτες θερμότητας με περύγια (Σχ. 3.22). Ως υλικό αλλαγής φάσης χρησιμοποιήθηκε παραφίνη με σημείο τήξης τους 54 °C. Η έρευνα κατέληξε στο ότι η απόδοση του συστήματος ήταν πολύ καλή, ικανή να φέρει το ζεστό νερό στο επιθυμητό εύρος θερμοκρασιών. Τα πειράματα έγιναν για 15 και 20 λίτρα νερό αντίστοιχα.

Ο Shukla [34] στο ίδιο πανεπιστήμιο της Ινδίας έχει σχεδιάσει δύο ηλιακούς θερμαντήρες νερού χρησιμοποιώντας παραφίνη ως ΥΑΦ. Ο πρώτος χρησιμοποιεί σύστημα αποθήκευσης με δεξαμενή νερού μέσα στη δεξαμενή από ΥΑΦ (Σχ. 3.23) ενώ ο δεύτερος έχει ολοκληρωμένο σύστημα συλλέκτη – αποθήκευσης. Τα δύο συστήματα ήταν ικανά να παρέχουν ζεστό νερό κατά τη διάρκεια της νύχτας και την ημέρα σε 24ώρη βάση με βαθμό απόδοσης 45 % και 60 % αντίστοιχα. Οι Galenen και Vanden [35] έκαναν επίσης χρήση της παραφίνης για ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού και χώρων.

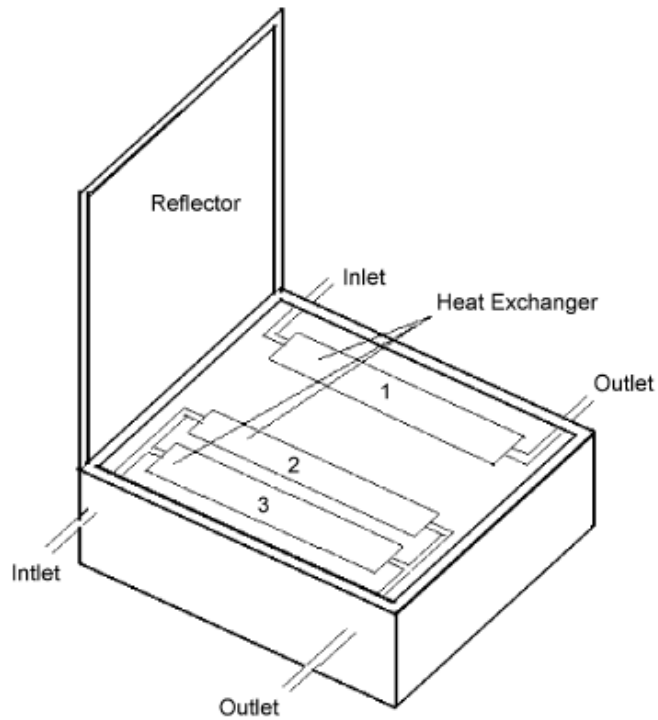
Ως υλικό αλλαγής φάσης για εφαρμογή σε θέρμανση νερού χρήσης ο Lane [36] εξέτασε την ένωση  $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , με σημείο τήξης τους 95 °C, ενώ ο Hasan [37-39]

διερεύνησε κάποια λιπαρά οξέα. Από την έρευνα που πραγματοποίησαν κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα πλέον υποσχόμενα ΥΑΦ για θέρμανση νερού χρήσης είναι το μυριστικό οξύ, το παλμιτικό οξύ και το στεατικό οξύ με σημεία τήξης ανάμεσα στους 50 °C και στους 70 °C.

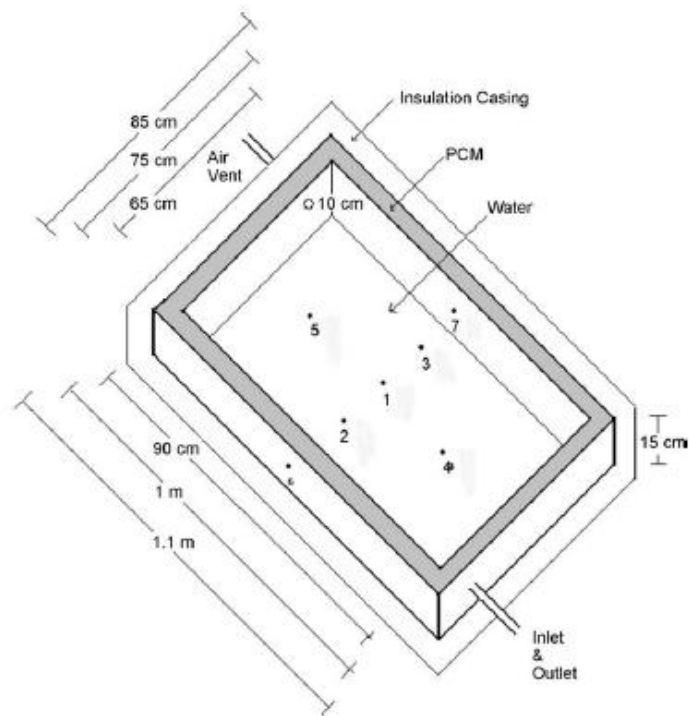
Το 1985 οι Prakash, Garg και Datta ανέλυσαν έναν θερμαντή νερού που περιείχε ένα στρώμα ΥΑΦ στον πυθμένα (Σχ. 3.24) και περιλάμβανε συλλέκτη και δοχείο αποθήκευσης σε μια μονάδα. Κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας το νερό ζεσταίνεται και στη συνέχεια μεταφέρει θερμότητα στο ΥΑΦ που βρίσκεται σε κάψουλες στον πυθμένα. Το ΥΑΦ συλλέγει ενέργεια σε λανθάνουσα μορφή και τήκεται. Τις ώρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια το ζεστό νερό καταναλώνεται και αντικαθίσταται από κρύο, που παίρνει ενέργεια από το ΥΑΦ όταν αυτό αλλάζει φάση από υγρό σε στερεό. Αυτός ο τύπος συστήματος δεν μπορεί να είναι αποτελεσματικός εξαιτίας της χαμηλού ρυθμού μεταφοράς θερμότητας.

Οι Bansal και Buddhi εξέτασαν θεωρητικά μια κυλινδρική μονάδα αποθήκευσης με ΥΑΦ σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου με επίπεδο συλλέκτη [41], κατά τη διεργασία φόρτισης κι αποφόρτισης. Οι υπολογισμοί για το κινούμενο όριο της διφασικής περιοχής και τη θερμοκρασία τήξης έγιναν με παραφίνη και στεατικό οξύ, ως ΥΑΦ.

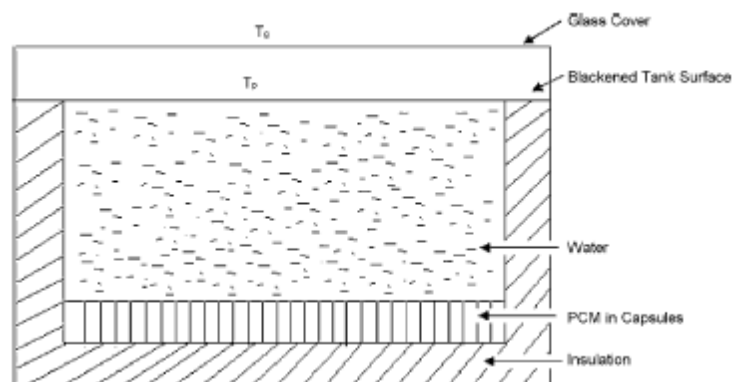
Οι Tiwari, Rai, Santram και Singh [42] παρουσίασαν μια μελέτη αποθήκευσης θερμότητας με ΥΑΦ για θερμαντή νερού όπου το νερό ρέει στο εσωτερικό μιας επίπεδης πλάκας τοποθετημένης στη διεπιφάνεια στερεού – υγρού. Για τη μείωση των απωλειών κατά τη διάρκεια της νύχτας έγινε προσθήκη κινητής μόνωσης. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου μπορεί να επιτευχθεί ζεστό νερό με θερμοκρασία 15 – 20 °C πάνω από τον αέρα περιβάλλοντος, ενώ οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του νερού μειώνονται με την αύξηση του ποσοστού του ΥΑΦ που τήκεται.



Σχ. 3.22. Ηλιακός θερμαντής νερού με ενσωματωμένο ΥΑΦ που σχεδιάστηκε από τον Kumar [33]



Σχ. 3.23. Δεξαμενή αποθήκευσης ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού χρήσης με ενσωματωμένο ΥΑΦ που σχεδιάστηκε από τον Shukla [34]



**Σχ. 3.24.** Ηλιακός θερμαντής νερού που ενσωματώνει ηλιακό συλλέκτη και δεξαμενή αποθήκευσης με ΥΑΦ [40]

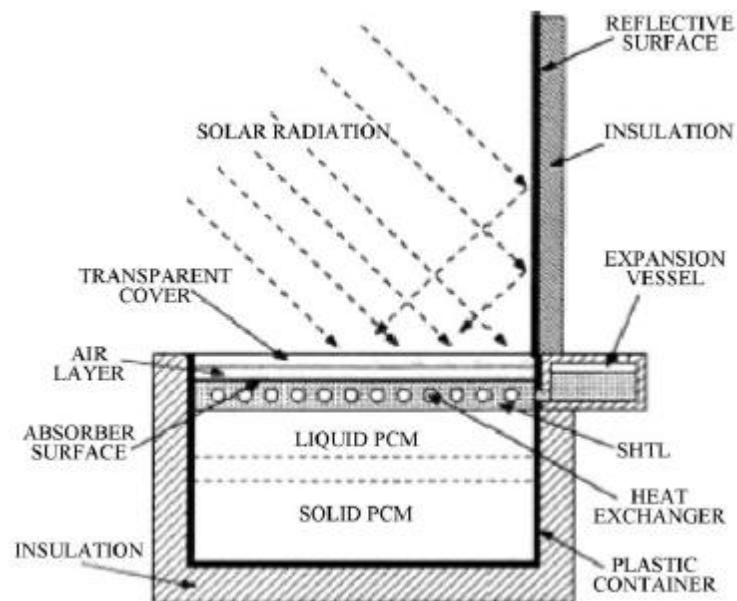
Ο Chaurasia [43] διεξήγαγε μια συγκριτική μελέτη ενός ηλιακού συστήματος αισθητής θερμότητας κι ενός συστήματος με αλλαγή φάσης ως προς τη διατήρηση του ζεστού νερού κατά τη διάρκεια της νύχτας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησε δύο πανομοιότυπες μονάδες αποθήκευσης με παραφίνη. Η πρώτη μονάδα αποτελούνταν από έναν εναλλάκτη θερμότητας από σωλήνες αλουμινίου στο εσωτερικό των οποίων είχαν τοποθετηθεί 17.5 kg παραφίνης με σημείο τήξης 54 °C. Η δεύτερη μονάδα ήταν μια απλή γαλβανισμένη δεξαμενή που περιείχε νερό. Και οι δύο δεξαμενές φορτίζονταν ξεχωριστά κατά τη διάρκεια της ημέρας με τη βοήθεια επίπεδων συλλεκτών με την ίδια επιφάνεια απορρόφησης. Αυτή η μελέτη κατέληξε στο ότι το σύστημα που έκανε χρήση και της λανθάνουσας θερμότητας συγκριτικά απέδιδε περισσότερο ζεστό νερό την επόμενη μέρα σε σχέση με το σύστημα αισθητής θερμότητας.

Ο Ghoneim [44] έκανε μια σύγκριση ανάμεσα σε δοχεία λανθάνουσας αποθήκευσης διαφορετικού μεγέθους και μια δεξαμενή αισθητής αποθήκευσης με νερό με διαφορετικό βαθμό θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης. Το δοχείο λανθάνουσας αποθήκευσης αποτελείται από έναν αριθμό κλειστών κυλινδρικών σωλήνων γεμάτων με το ΥΑΦ που περιρρέονται από το υγρό μεταφοράς θερμότητας. Ο Bajnoczy [45] εξέτασε διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας (60 - 30°C και 30 - 20 °C) που στηρίζεται στο εξαϋδρικό και τετραϋδρικό χλωρίδιο του ασβεστίου αντίστοιχα. Στη έρευνα εξετάστηκαν επίσης οι αλλαγές στη θερμοχωρητικότητα κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης και αποφόρτισης και η εφαρμογή του συστήματος για θέρμανση νερού χρήσης. Ο Kaygusuz [46] μελέτησε θεωρητικά και πειραματικά τη συμπεριφορά  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ως ΥΑΦ για εφαρμογές θέρμανσης νερού χρήσης. Οποτεδήποτε ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη κατά τη διάρκεια



της ημέρας συλλέγεται σε μια δεξαμενή που περιέχει κυλινδρικές σωλήνες από PVC στην οριζόντια κατεύθυνση. Η δεξαμενή περιέχει συνολική ποσότητα 1500 kg ΥΑΦ ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) που είναι τοποθετημένο στο εσωτερικό των σωλήνων σε κάψουλες ενώ το υγρό μεταφοράς θερμότητας ρέει παράλληλα με τις σωλήνες.

Οι Boy, Boss, και Lutz σε μελέτη που παρουσιάστηκε το 1987 [47] πρότειναν ένα σύστημα που ενσωματώνει συλλέκτη κι αποθηκευτική μονάδα και βασίζεται σε ένα ένυδρο άλας για την άμεση παροχή ζεστού νερού. Η μελέτη έδειξε ότι η θερμική απόδοση τέτοιων συστημάτων μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με προσθήκη ΥΑΦ. Παρολαυτά, στο σύστημά τους το ΥΑΦ περιεχόταν σε έναν ειδικό εναλλάκτη θερμότητας με πτερύγια που εισήγαγε υψηλό κόστος στο σύστημα. Άλλοι μελετητές που χρησιμοποίησαν ένυδρα άλατα στις εφαρμογές τους ήταν οι Rabin, Bor-Miv, και Karin [48] που σχεδίασαν και αυτοί σύστημα που ενσωματώνει συλλέκτη κι αποθήκευση σε μια μονάδα (Σχ. 3.25). Στη συγκεκριμένη μελέτη έγινε χρήση ενός ευτηκτικού μίγματος ένυδρου άλατος (48%  $\text{CaCl}_2$ , 4.5%  $\text{KCl}$ , 0.4%  $\text{NaCl}$  και 47.1%  $\text{H}_2\text{O}$ ) με  $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ως παράγοντα πυρήνωσης 1% κατά βάρος, θερμοκρασία αλλαγής φάσης 27 – 29 °C και θερμότητα αλλαγής φάσης 164 kJ/kg.



**Σχ. 3.25.** Ηλιακός θερμαντής που ενσωματώνει συλλέκτη κι αποθήκευση θερμότητας σε μία μονάδα [48]

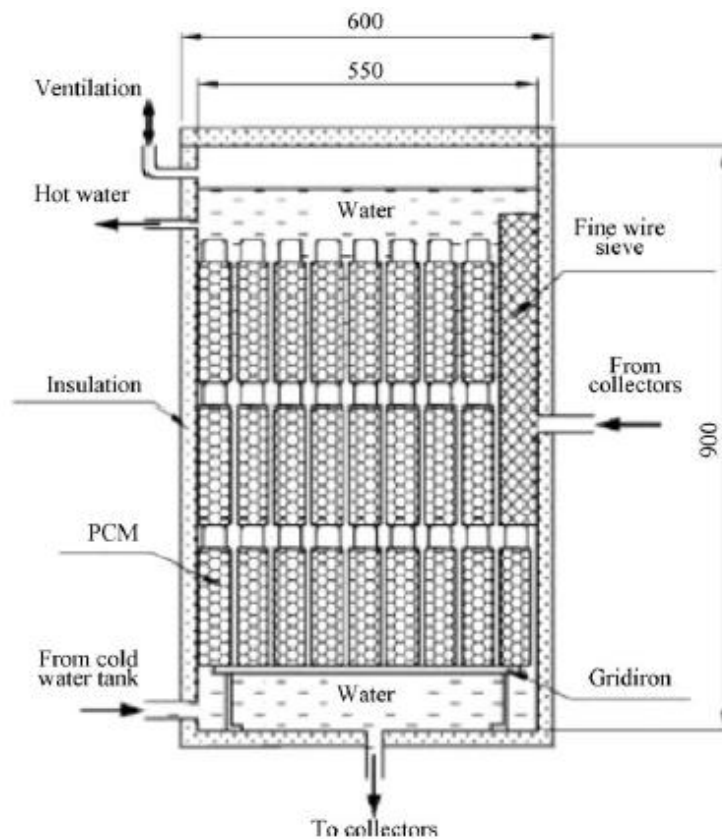
Ο Tayeb [49] ανέπτυξε ένα σύστημα για θέρμανση νερού χρήσης με  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  ως ΥΑΦ και το σύγκρινε με το μοντέλο προσομοίωσης που δίνει το βέλτιστο ρυθμό ροής του

εισερχόμενου νερού ώστε να διατηρηθεί σταθερή η θερμοκρασία του εξερχόμενου ζεστού νερού. Οι Font, Muntasell, και Cardoner [50] διεξήγαν μια προκαταρκτική μελέτη για τη σχεδίαση μιας συσκευής θέρμανσης νερού χρήσης με χρήση ΥΑΦ στερεού – στερεού. Η αριθμητική μοντελοποίηση έγινε με χρήση ενός μονοδιάστατου μοντέλου. Η συμφωνία πειραματικών κι αριθμητικών αποτελεσμάτων δείχνει ότι αυτό το μοντέλο είναι κατάλληλο για τη μελέτη του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας στο ΥΑΦ με σκοπό τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης της συσκευής.

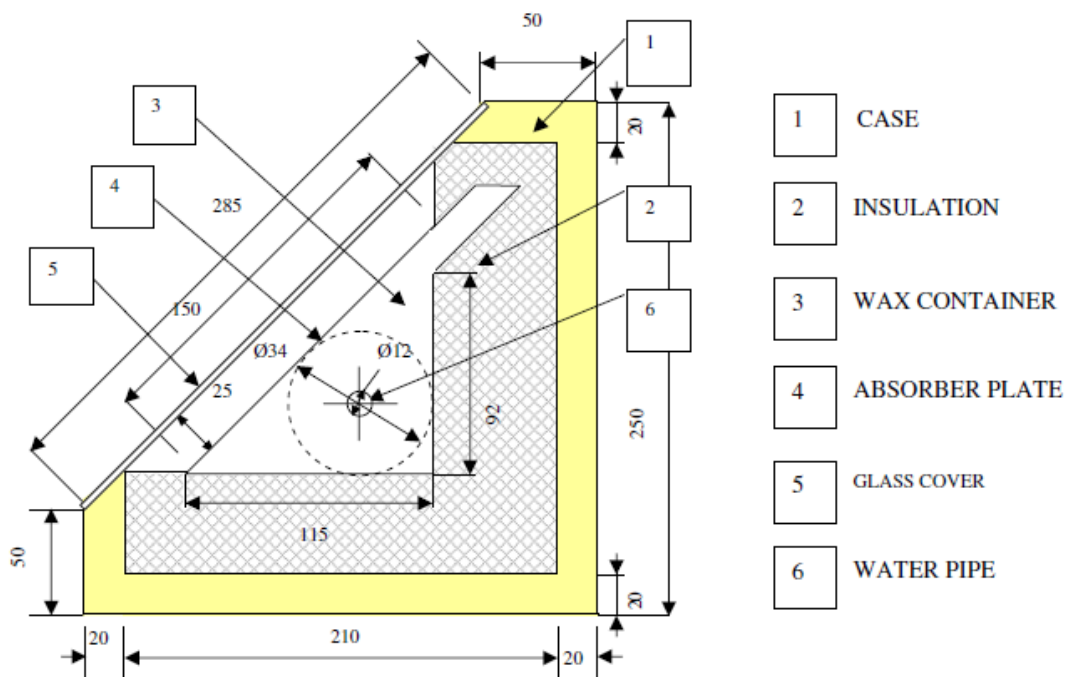
Οι Canbazoglu, Sahinaslan, Ekmekyapar, Aksoy, και Akarsu στην εργασία που παρουσίασαν το 2005 σύγκριναν συστήματα ηλιακής θέρμανσης νερού με ΥΑΦ με συμβατικά συστήματα. Φιάλες από πολυαιθυλένιο γεμάτες με ΥΑΦ τοποθετήθηκαν σε τρεις σειρές στο εσωτερικό μιας δεξαμενής (Σχ. 3.26). Η συνολική μάζα του ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε ήταν περίπου 180 kg. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το νερό είχε μια θερμοκρασία 46 °C κατά τη διάρκεια της νύχτας μέχρι την ανατολή του ηλίου μιας και το ζεστό νερό δεν καταναλωνόταν. Η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο μέσο της δεξαμενής και την έξοδο του νερού από το συλλέκτη είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 6 °C σε σχέση με το σύστημα χωρίς ΥΑΦ πράγμα που αποδεικνύει την υψηλή απόδοση του συστήματος με ΥΑΦ. Ο χρόνος αποθήκευσης του ζεστού νερού, η μάζα του ζεστού νερού χρήσης που παράγεται και η συνολική θερμότητα που αποθηκεύεται στη δεξαμενή που περιέχει ένυδρα άλατα ήταν κατά προσέγγιση 2.59 – 3.45 φορές μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα μεγέθη για το συμβατικό σύστημα. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε θεωρητικά η θερμική απόδοση ένυδρων αλάτων όπως  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  και  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .

Οι Mattawee και Assassa [26] διερεύνησαν τη θερμική απόδοση ενός συμπαγούς ηλιακού συλλέκτη με ΥΑΦ που στηρίζεται στην αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Σε αυτόν το συλλέκτη η πλάκα απορρόφησης επιτελεί τη λειτουργία τόσο της απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας όσο και της αποθήκευσης της παραφίνης που χρησιμοποιείται ως ΥΑΦ. Η παραφίνη αποδίδει την ενέργεια που αποθηκεύει στις σωλήνες κρύου νερού που είναι τοποθετημένες στο εσωτερικό του δοχείου που περιέχει την παραφίνη. Η ωφέλιμη επιφάνεια του συλλέκτη θεωρήθηκε 1 m<sup>2</sup> και ο συνολικός του όγκος διαιρέθηκε σε πέντε επιμέρους τμήματα. Η πειραματική διάταξη σχεδιάστηκε ώστε να προσομοιώνει ένα από αυτά τα τμήματα του συλλέκτη με ωφέλιμη επιφάνεια 0,2 m<sup>2</sup> (Σχ. 3.27). Η συγκεκριμένη διάταξη μελετήθηκε πειραματικά σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος ώστε να διαπιστωθεί εφόσον ένας τέτοιος τύπος συλλέκτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση νερού χρήσης. Κατά τις επαναλαμβανόμενες διεργασίες φόρτισης κι αποφόρτισης καταγράφηκαν οι

θερμοκρασίες του ΥΑΦ σε συνάρτηση με το χρόνο. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας καταγράφηκε κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Οι μελετητές διεξήγαγαν πειράματα με διαφορετικούς ρυθμούς ροής νερού από 8.3. έως 21.7. kg/h κι εξέτασαν την ωφέλιμη αποθήκευση θερμότητας. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας υπολογίστηκαν για τη φόρτιση του ΥΑΦ. Επιπλέον, εξετάστηκε η διάδοση του μετώπου τήξης – ψύξης κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης κι αποφόρτισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι στη διαδικασία της φόρτισης ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνει απότομα με την αύξηση του πάχους του τηγμένου στρώματος του ΥΑΦ, μιας και η συναγωγή θερμότητας αυξάνει σημαντικά. Κατά τη διεργασία της αποφόρτισης το ωφέλιμο θερμικό κέρδος βρέθηκε ότι αυξάνει με την αύξηση της παροχής μάζας του νερού.

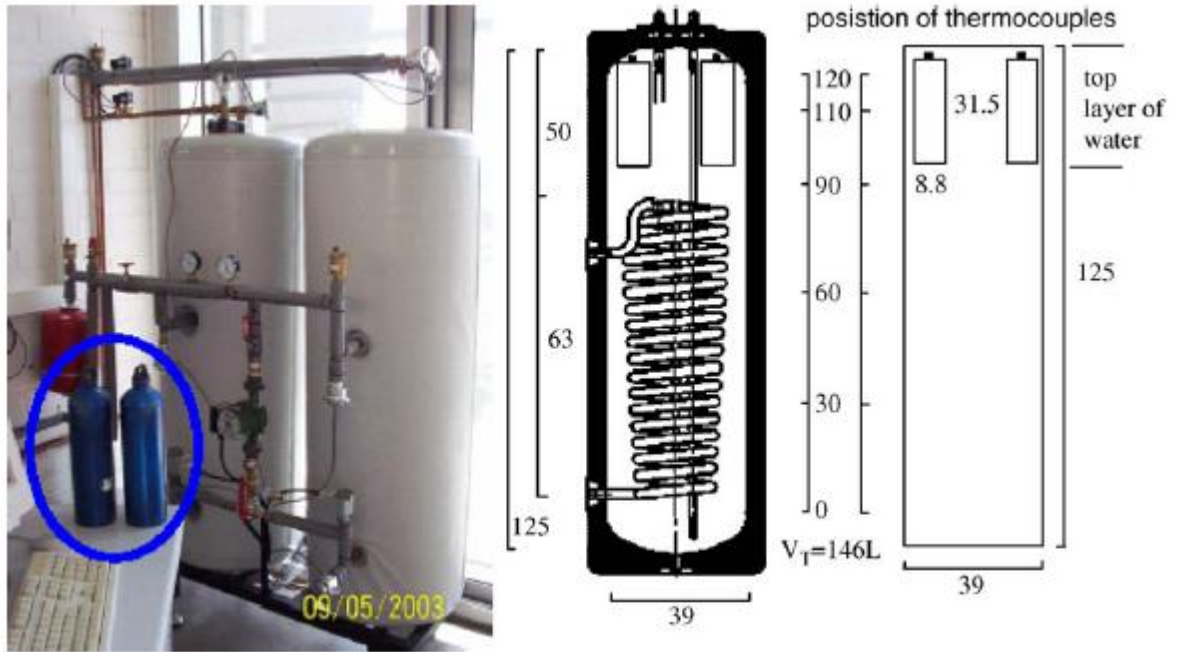


**Σχ. 3.26.** Μονάδα αποθήκευσης που σχεδιάστηκε από τους Canbazoglu, Sahinaslan, Ekmekyapar, Aksoy, και Akarsu [52]



Σχ. 3.27. Διατομή πειραματικής διάταξης συμπαγούς ηλιακού συλλέκτη με ΥΑΦ [26]

Ομάδα από το πανεπιστήμιο της πόλης Lleida της Ισπανίας [28] πρόσθεσε ΥΑΦ στο επάνω μέρος μιας ηλιακής δεξαμενής αποθήκευσης νερού με θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση. Για να εξετάσει τη συμπεριφορά ΥΑΦ σε πραγματικές συνθήκες, η ομάδα κατασκεύασε μια πιλοτική ηλιακή εγκατάσταση (Σχ. 3.29). Τα στοιχεία που επιλέχθηκαν για το ΥΑΦ είναι κύλινδροι στο επάνω μέρος της δεξαμενής (Σχ. 3.28). Στην πραγματική εγκατάσταση διεξήχθησαν πειράματα με δύο, τέσσερα και έξι στοιχεία ΥΑΦ. Στα πειράματα, ως ΥΑΦ, επιλέχθηκε ένα κοκκώδες μίγμα γραφίτη με 90% sodium acetate trihydrate και 10% γραφίτη. Οι συγγραφείς κατέληξαν ότι η προσθήκη ενός στοιχείου ΥΑΦ σε μια δεξαμενή νερού για θέρμανση νερού οικιακής χρήσης είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που θα μπορούσε να επιτρέψει τη διατήρηση ζεστού νερού για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα χωρίς εξωτερική βοηθητική πηγή ή τη χρήση μικρότερων δεξαμενών για τον ίδιο σκοπό.



Σχ. 3.28. Δεξαμενή με στοιχεία ΥΑΦ που σχεδιάστηκε από την ομάδα του πανεπιστημίου της πόλης Lleida της Ισπανίας [28]



Σχ. 3.29. Ηλιακή εγκατάσταση για μελέτη σε πραγματικές συνθήκες [28]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΜΕ ΥΑΦ

### 4.1. Σκοπός της εφαρμογής

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη ενός απλού μοντέλου ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού χρήσης με ΥΑΦ σε οικία.

Ένα από τα πιο σημαντικά μέρη ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού χρήσης είναι η δεξαμενή. Ο τύπος και η χωρητικότητα της δεξαμενής είναι παράμετροι σημαντικοί για την καλή λειτουργία του συστήματος. Σε ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης είναι απαραίτητο να περιλαμβάνεται μια δεξαμενή αποθήκευσης του νερού, επειδή η περίοδος της ηλιοφάνειας δεν συμπίπτει, εν γένει, με το χρόνο κατανάλωσης του ζεστού νερού. Οι ηλιακοί συλλέκτες εργάζονται μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, όσο διαρκεί η ηλιοφάνεια και η ισχύς τους εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Η κατανάλωση ζεστού νερού σε οικίες είναι γενικά μεγαλύτερη το βράδυ ενώ η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη το πρωί. Γι' αυτό το λόγο, η δεξαμενή αποθήκευσης είναι απαραίτητη για την αποθήκευση της χρησιμοποιούμενης ενέργειας. Οι συλλέκτες συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπουν σε θερμική του ρεύματος του νερού, αλλά δεν την αποθηκεύουν. Η αποθήκευση επιτυγχάνεται σε μια θερμομονωμένη δεξαμενή.

Στο πλαίσιο της προσπάθειας για εξοικονόμηση ενέργειας και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, η δεξαμενή με ΥΑΦ προβάλλει ως μια προτεινόμενη λύση. Με τη χρήση μιας τέτοιας δεξαμενής θεωρητικά μπορούμε να μειώσουμε τις διαστάσεις εξοικονομώντας πολύτιμο χώρο σε λεβητοστάσια και ταράτσες και να επιτύχουμε υψηλότερη θερμοχωρητικότητα σε σχέση με τις συμβατικές δεξαμενές. Επιπλέον, μια δεξαμενή με ΥΑΦ θα μπορούσε να δώσει τη δυνατότητα της λειτουργίας των συλλεκτών σε χαμηλότερη θερμοκρασία και της αύξησης της αποδοτικότητας του συστήματος.

Στην παρούσα εφαρμογή, το μοντέλο που εξετάζεται θεωρητικά, αποτελείται από έναν απλό, επίπεδο συλλέκτη και μια δεξαμενή αποθήκευσης όπου θα τοποθετηθεί το ΥΑΦ. Σκοπός της μελέτης είναι μέσα από μια διαδικασία παραμετρικών δοκιμών να βρεθεί το κατάλληλο υλικό που ικανοποιεί τις ανάγκες της οικίας σε θερμό νερό χρήσης. Γι' αυτόν το σκοπό, εξετάζονται τέσσερα υλικά σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας και με διαφορετικές παραμέτρους της εγκατάστασης.

## 4.2. Ερωτήματα που αναμένεται να απαντηθούν

Στην παρούσα εργασία διερευνάται απλό μοντέλο ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού χρήσης όπου η θερμομονωμένη δεξαμενή περιέχει αποκλειστικά υλικά αλλαγής φάσης. Ο στόχος της μελέτης είναι να διερευνηθούν τα ανωτέρω υπό συζήτηση οφέλη από τη χρήση ΥΑΦ σε ένα τέτοιο σύστημα.

Πιο συγκεκριμένα, τα ερωτήματα που αναμένεται να απαντηθούν μετά την πραγματοποίηση της παρούσας μελέτης είναι τα εξής:

- Μπορούμε να καλύψουμε τις ανάγκες της οικίας αν χρησιμοποιήσουμε δεξαμενή που περιέχει μόνο ΥΑΦ; Μπορεί να επιτευχθεί νερό χρήσης τουλάχιστον 45 °C;
- Ποιο/α από τα υποψήφια υλικά είναι κατάλληλο/α για την εφαρμογή;
- Πως συμπεριφέρεται κάθε ένα από τα υποψήφια υλικά στην αλλαγή των παραμέτρων του συστήματος;
- Μπορεί μια εγκατάσταση με ΥΑΦ να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση για αποθήκευση της συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας ώστε αυτή να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τις ώρες χωρίς ηλιοφάνεια;
- Διαπιστώνονται πλεονεκτήματα μιας τέτοιας εφαρμογής σε σχέση με το συμβατικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού;

## 4.3. Βασικοί ορισμοί μεγεθών και συμβολισμοί

Το **γεωγραφικό πλάτος (latitude)** είναι ένα από τα δύο μεγέθη των γεωγραφικών συντεταγμένων με τα οποία προσδιορίζεται η θέση των διαφόρων τόπων και πλοίων στην επιφάνεια της γης και κατά προβολή η θέση των αεροσκαφών υπεράνω αυτής. Συγκεκριμένα, προσδιορίζει την γωνιακή απόσταση των διάφορων τόπων από τον Ισημερινό, ο οποίος έχει γεωγραφικό πλάτος ίσο με 0. Συμβολίζεται με το γράμμα ( $\phi$ ), αγγλικά lat. Το γεωγραφικό πλάτος αποδίδεται σε μοίρες, πρώτα και δεύτερα της μοίρας ή και ως δεκαδικός αριθμός επί των προηγούμενων. Οι μοίρες του γεωγραφικού πλάτους αποδίδονται πάντα με διψήφιο αριθμό από 00° - 90° B (Βόρειο), ή 00° - 90° N (Νότιο) και στην αγγλική N (North) ή S (South) αντίστοιχα [10].

Η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στη γη διακρίνεται σε **άμεση** και **διάχυτη**. Η **άμεση ακτινοβολία** είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη κατ'

ευθείαν από τον ήλιο χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Η στιγμιαία τιμή σε ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) της άμεσης ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με  $G_b$  ενώ προκειμένου για κεκλιμένο επίπεδο, με  $G_{bT}$  [12].

**Διάχυτη ακτινοβολία** είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα. Η στιγμιαία τιμή σε ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) της διάχυτης ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με  $G_d$  ενώ προκειμένου για κεκλιμένο επίπεδο, με  $G_{dT}$  [12].

**Ολική ακτινοβολία** είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από παρακείμενες επιφάνειες. Με  $G$  συμβολίζεται η στιγμιαία τιμή της ολικής ακτινοβολίας του οριζοντίου επιπέδου ενώ με  $G_T$  του κεκλιμένου [12].

**Ωριαία γωνία  $\omega$**  του ήλιου είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό  $15^\circ/\text{h} = 0.25^\circ/\text{min} = \frac{0.25 \cdot \pi}{180} \text{ rad}/\text{min}$  [12].

**Ηλιακή απόκλιση  $\delta$**  είναι η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει  $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$  ή  $-0.41 \text{ rad} \leq \delta \leq 0.41 \text{ rad}$  με θετικές τιμές για τον βορρά [12].

**Λόγος της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση οριζοντίου επιπέδου  $R_b$** , δηλαδή  $R_b = \frac{G_{bT}}{G_b}$  [12].

**Αξιμούθιο επιφάνειας  $\gamma$**  είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Είναι  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$  με  $\gamma = 0^\circ$  στο νότο,  $\gamma = 90^\circ$  στη δύση,  $\gamma = 180^\circ$  στο βορρά και  $\gamma = -90^\circ$  στην ανατολή [12].

**Κλίση επιπέδου  $\beta$**  είναι η γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Είναι  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ . Για το οριζόντιο επίπεδο είναι  $\beta = 0^\circ$ , για το κατακόρυφο επίπεδο  $\beta = 90^\circ$  και για  $\beta > 90^\circ$  το επίπεδο βλέπει προς τα κάτω [12].

**Ανακλαστικότητα εδάφους  $\rho$** . Τα υλικά των εξωτερικών επιφανειών δέχονται την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, της οποίας ένα μέρος απορροφάται από τα υλικά και το υπόλοιπο ανακλάται. Το πηλίκο της ανακλώμενης ακτινοβολίας προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο υλικό, ονομάζεται ανακλαστικότητα. Συνήθης τιμή για το έδαφος είναι  $\rho = 0.2$



## 4.4. Περιγραφή του μοντέλου

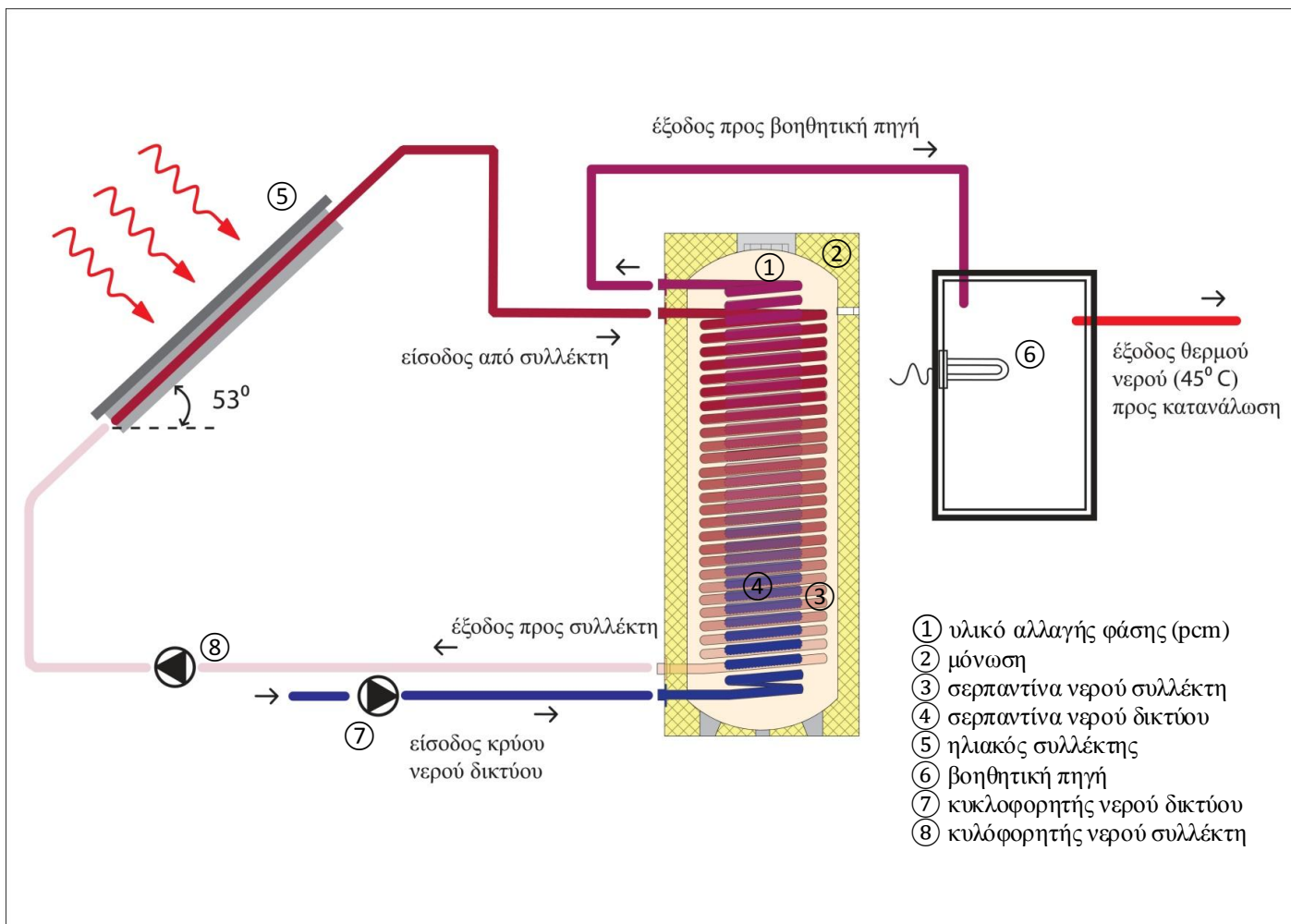
### 4.4.1. Η εγκατάσταση

Η εγκατάσταση που θεωρήθηκε και μελετάται στην παρούσα εφαρμογή, αποτελείται από έναν υαλοκάλυπτο ηλιακό συλλέκτη (Σχ. 4.1.(5)) και μια μονωμένη κυλινδρική δεξαμενή (Σχ.4.1.(2)). Στο εσωτερικό της δεξαμενής, είναι τοποθετημένο χύμα, μη ενθυλακωμένο υλικό αλλαγής φάσης (Σχ.4.1.(1)). Μέσα στη δεξαμενή, οι δύο ανεξάρτητες σωληνώσεις του νερού του δικτύου (Σχ.4.1.(4)) και του νερού του συλλέκτη (Σχ.4.1.(3)), σχηματίζουν σερπαντίνες σε ομόκεντρη διάταξη. Η ροή του νερού από τη δεξαμενή στο συλλέκτη είναι εξαναγκασμένη και γίνεται με τη βοήθεια κυκλοφορητή (Σχ.4.1.(8)). Ομοίως, η ροή του κρύου νερού από το δίκτυο ύδρευσης στη δεξαμενή, γίνεται με τη βοήθεια κυκλοφορητή (Σχ.4.1.(7)). Η εγκατάσταση διαθέτει δεξαμενή αποθήκευσης του ζεστού νερού με συμπληρωματική ηλεκτρική πηγή θέρμανσης, για την κάλυψη των αναγκών της οικίας τις ημέρες χωρίς ηλιοφάνεια.

Η επιλογή των χρωμάτων στο σχήμα 4.1 έχει γίνει σκόπιμα, ώστε να φαίνεται η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο νερό που κυκλοφορεί στο συλλέκτη και το κρύο νερό του δικτύου, καθώς και η λειτουργία του εναλλάκτη που θερμαίνει τελικά το νερό χρήσης. Κατά τη συνήθη πρακτική, το μπλε χρώμα αναπαριστά το κρύο και το κόκκινο το θερμό νερό χρήσης, με τις ενδιάμεσες αποχρώσεις να αναπαριστούν ενδιάμεσες θερμοκρασίες.

Ο συλλέκτης, όπως θα εξηγηθεί και στη συνέχεια, έχει θεωρηθεί ότι διαθέτει κλίση  $53^\circ$  έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ενέργεια που απορροφά κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Η διάταξη του σχήματος 4.1, είναι απλοϊκή και φέρει μόνο τα βασικά στοιχεία που θα διέθετε μια πραγματική εγκατάσταση θέρμανσης νερού με εξαναγκασμένη ροή. Η σχηματική απεικόνιση του σχήματος 4.1, έχει σαν στόχο να δώσει τη γενική ιδέα για τη διάταξη που εξετάζεται στην εφαρμογή, γι' αυτό και δεν είναι λεπτομερής.



Σχ. 4.1. Σχηματική απεικόνιση της θεωρούμενης εγκατάστασης

#### 4.4.1.1. Τα υποψήφια ΥΑΦ

Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους κατά τη διάρκεια της επιλογής του υλικού είναι το επιθυμητό σημείο τήξης και η υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Η επιλογή των υλικών που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από το εύρος θερμοκρασιών της εφαρμογής [15]. Κατοικίες, εμπορικά και βιομηχανικά κτίρια έχουν συχνά ανάγκες ζεστού νερού σε περίπου 50° - 60°. Γενικά, χρειάζεται θερμοκρασία περίπου 50 °C για τις ανάγκες μιας οικίας [16]. Το σωστό σημείο τήξης επιτρέπει ότι η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται σε κάθε κύκλο φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού ώστε να αξιοποιείται πλήρως η λανθάνουσα θερμότητα τήξης.

Εκτός από το εύρος θερμοκρασιών της εφαρμογής πρέπει να λάβουμε υπόψη το ποσό της λανθάνουσας θερμότητας του ΥΑΦ, αφού όσο υψηλότερη είναι τόσο μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας αποθηκεύεται.

Επιπλέον πρέπει να λάβουμε υπόψη τις χημικές ιδιότητες, τη θερμική διαστολή, τον παράγοντα της ασφάλειας και τη συμβατότητα με τα άλλα υλικά της κατασκευής.

Η πρώτη κατηγορία υλικών που θα μπορούσαν να εξεταστούν είναι τα οργανικά υλικά που δεν είναι παραφίνες. Αυτά τα υλικά είναι εν γένει ακριβά και τοξικά. Παρόλο που στην παρούσα εφαρμογή δεν υπάρχει επαφή του νερού με το ΥΑΦ, θα ήταν φρόνιμο να απορριφθεί αυτή η κατηγορία υλικών ώστε να αποφευχθεί τυχόν επαφή του νερού χρήσης με τοξικά υλικά σε περίπτωση διαρροής του ΥΑΦ.

Η επόμενη κατηγορία υποψηφίων υλικών είναι οι παραφίνες. Αυτά τα υλικά έχουν φυσικές και χημικές ιδιότητες συμβατές με την εφαρμογή καθώς και χαμηλή τιμή στο εμπόριο. Το βασικότερο μειονέκτημά τους είναι η αναφλεξιμότητα.

Τα ανόργανα υλικά έχουν τη μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα αλλά παρουσιάζουν υπόψυξη επομένως η αλλαγή φάσης δεν πραγματοποιείται πάντα στο σημείο τήξης – στερεοποίησης. Έτσι, δεν μπορούμε να αξιοποιήσουμε όλη την λανθάνουσα θερμότητα σε περίπτωση που το υλικό παραμένει στην υγρή φάση κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης του ΥΑΦ. Γι' αυτό το λόγο, στην παρούσα εφαρμογή, θα μελετήσουμε ένα μίγμα παραφίνης κι ένυδρου άλατος που εξομαλύνει τα μειονεκτήματα των δύο κατηγοριών.

Σε κάθε περίπτωση, σκοπός είναι η απορρόφηση λανθάνουσας θερμότητας κατά την τήξη και η απόδοσή της κατά τη στερεοποίηση του ΥΑΦ στο νερό χρήσης. Στόχος μας λοιπόν, είναι το υλικό που θα επιλεγεί για την εφαρμογή να τήκεται όσο το δυνατόν περισσότερο και να στερεοποιείται ξανά, ώστε να μπορεί να αποδώσει την αποθηκευμένη θερμότητα στο νερό.

Για την παρούσα εφαρμογή, επιλέξαμε να εξετάσουμε τέσσερα υποψήφια υλικά της εταιρείας Rubitherm με διαφορετικές θερμικές ιδιότητες και περιοχές αλλαγής φάσης. Τα τρία από αυτά τα υλικά ανήκουν στην κατηγορία των παραφινών και φέρουν τις εμπορικές ονομασίες RT21 (πρώην RT20), RT27 και RT58, ενώ το τέταρτο αποτελεί ένα μίγμα παραφίνης κι ένυδρου άλατος με εμπορική ονομασία SP25A8. Αυτά τα υλικά θα εξεταστούν ως προς την καταλληλότητα για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων. Όλα αυτά τα υλικά διαθέτουν υψηλή θερμοχωρητικότητα και πραγματοποιούν την αποθήκευση κι απόδοση της λανθάνουσας θερμότητας σε σχετικά σταθερές θερμοκρασίες. Ακόμα, δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο της υπόψυξης, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής με σταθερή απόδοση στους κύκλους αλλαγής φάσης, είναι μη τοξικά και δεν βλάπτουν το περιβάλλον. Τα υλικά κι οι ιδιότητες τους παρουσιάζονται στα εγχειρίδια της εταιρείας που παρατίθενται παρακάτω (πίνακες 2-5 του παραρτήματος) Τα θερμοκρασιακά εύρη που παρουσιάζονται στα συγκεκριμένα εγχειρίδια, δεν αποτελούν τα ακριβή όρια της διαφασικής περιοχής αλλά είναι ευρύτερα. Ο κατασκευαστής δίνει την ευρύτερη περιοχή που περιλαμβάνει τις θερμοκρασίες λίγο πριν και μετά την αλλαγή φάσης, δηλαδή κάποιο αισθητό και όλο το λανθάνον τμήμα της αλλαγής φάσης. Τα δεδομένα αυτά αρκούν για τον υποψήφιο χρήστη αλλά δεν είναι τα ακριβή.

Οι ακριβείς τιμές των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών αυτών έχουν προσδιοριστεί πειραματικά από την ομάδα του εργαστηρίου ψύξης και κλιματισμού αποτελούμενη από τον υποψήφιο διδάκτορα Ελευθέριο Κραββαρίτη, τον καθηγητή Κίμωνα Αντωνόπουλο και τον λέκτορα Χρήστο Τζιβανίδη. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων έγινε με εφαρμογή της μεθόδου Thermal Delay που αναπτύχθηκε από την παραπάνω ομάδα και αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή της γνωστής μεθόδου T-history. Η βασική διαφορά ανάμεσα στη μέθοδο Thermal Delay και στη μέθοδο T-history είναι ότι η πρώτη βασίζεται στη χρήση της θερμικής υστέρησης δηλαδή στη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο ΥΑΦ και ένα υλικό αναφοράς, ενώ η τελευταία στη χρονική υστέρηση σε οποιαδήποτε θερμοκρασία. Ο πίνακας 4.1 περιλαμβάνει τις

θερμικές ιδιότητες των ανωτέρω υλικών, σύμφωνα με τις μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο.

**Πίνακας 4.1.** Θερμικές ιδιότητες υποψήφιων για την εφαρμογή υλικών [95]

	RT21 (πρώην RT20)	RT27	RT58	SP25A8
Ονομαστικό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας $T_s' - T_1' (^{\circ}\text{C})$	11 - 26	19 - 35	50 - 65	15 - 30
Θερμότητα αλλαγής φάσης H (kJ/kg)	132.1	167.4	166.1	141.5
Πραγματικό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας $T_s - T_1 (^{\circ}\text{C})$	15 - 26	22 - 31	53 - 62	22 - 32
Ειδική θερμοχωρητικότητα στερεού $C_{ps}$ (kJ/kgK)	1.9	2.0	1.9	2.6
Ειδική θερμοχωρητικότητα υγρού $C_{pl}$ (kJ/kgK)	2.5	2.3	2.6	2.7

#### 4.4.1.2. Ο ηλιακός συλλέκτης

Στην παρούσα εφαρμογή, θεωρούμε ότι στην οικία θα χρησιμοποιηθεί συλλέκτης της εταιρείας Solene και συγκεκριμένα το μοντέλο Chromagen SL 40. Ο συλλέκτης είναι υαλοκάλυπτος με χαρακτηριστικά  $F_R(\tau\alpha) = 0.74$  και  $F_R U_L = 5.37$  (W/m<sup>2</sup>)/<sup>o</sup>C. Τα στοιχεία αυτά βρέθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος RETscreen International. Κατά τη συνήθη πρακτική, για να επιτύχουμε μεγιστοποίηση της ενέργειας κατά τη διάρκεια του χειμώνα, επιλέγουμε κλίση συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος (της Αθήνας) αυξημένο κατά 15°, δηλαδή κλίση 53°.

Η συλλεκτική επιφάνεια που εξυπηρετεί τις ανάγκες της κατοικίας θα προκύψει ως αποτέλεσμα της παραμετρικής μελέτης που θα ακολουθήσει.

#### 4.4.1.3. Η δεξαμενή αποθήκευσης νερού

Στην εγκατάσταση που θα εξεταστεί, θεωρείται παραλλαγή συμβατικής δεξαμενής νερού ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού χρήσης. Πιο συγκεκριμένα, η δεξαμενή θεωρείται ότι έχει τα χαρακτηριστικά μιας συμβατικής κυλινδρικής δεξαμενής από χαλυβδόελασμα που φέρει στρώμα μόνωσης από πολυουρεθάνη.

Η δεξαμενή θεωρείται ότι φέρει δύο σερπαντίνες από χαλυβδοσωλήνα σε διάταξη όπως στο σκαρίφημα (Σχ. 4.1). Στη μία σερπαντίνα κυκλοφορεί το νερό του δικτύου και στην άλλη το νερό που κυκλοφορεί στον συλλέκτη.

Η χωρητικότητα της δεξαμενής σε ηλιακά συστήματα για οικία, είναι συνήθως συνάρτηση της συλλεκτικής επιφάνειας. Η συνήθης πρακτική που ακολουθείται είναι 6 λίτρα/0.1 m<sup>2</sup> συλλεκτικής επιφάνειας. Για οικιακές εφαρμογές, η δεξαμενή αποθήκευσης έχει χωρητικότητα που κυμαίνεται από 100 έως 200 λίτρα. Στην παρούσα μελέτη, ο όγκος της δεξαμενής αποτελεί μεταβλητή του προβλήματος και η τελική του τιμή θα προκύψει ως αποτέλεσμα των δοκιμών που θα πραγματοποιηθούν.

Η δεξαμενή των συμβατικών συστημάτων συνήθως έχει ενσωματωμένη κάποια ηλεκτρική αντίσταση ως βοηθητικό δευτερεύον στοιχείο. Από τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης θα αποφασιστεί αν είναι αναγκαίο ένα τέτοιο στοιχείο για την κάλυψη των αναγκών της οικογένειας. Όποτε η εγκατάσταση καλύπτει τις ανάγκες σε ζεστό νερό χρήσης, το ηλεκτρικό στοιχείο του σχήματος 4.1 δεν θα λειτουργεί κι η βοηθητική δεξαμενή θα χρησιμοποιείται μόνο για την αποθήκευση του ζεστού νερού.

#### 4.4.2. Ο χρόνος

Το θεωρούμενο μοντέλο εξετάζεται τους ψυχρότερους μήνες του έτους, από τον Νοέμβριο μέχρι και τον Απρίλιο. Πιο συγκεκριμένα, ως αντιπροσωπευτικές συνθήκες περιβάλλοντος για κάθε μήνα, θεωρούνται αυτές που επικρατούν την 21<sup>η</sup> ημέρα του. Έτσι, κάθε φορά που αναφέρεται κάποιος μήνας, εννοούνται οι συνθήκες που επικρατούν την 21<sup>η</sup> ημέρα του. Ακόμη, το χρονικό βήμα για όλα τα μεγέθη που εξετάζονται είναι μία ώρα. Το βήμα αυτό έχει θεωρηθεί αυθαίρετα αρκούντως μικρό

σε όλους τους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται, χωρίς προηγούμενη διερεύνηση.

#### 4.4.3. Ο τόπος κι οι συνθήκες περιβάλλοντος

##### 4.4.3.1. Τοποθεσία

Ως τόπος του εξεταζόμενου μοντέλου έχει θεωρηθεί η Αθήνα, με βόρειο γεωγραφικό πλάτος  $\varphi = 37.97^\circ$ .

##### 4.4.3.2. Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή απόκλιση υπολογίζεται από τη σχέση

$$\delta(^{\circ}) = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right)$$

$$\delta(rad) = 23.45 \frac{\pi}{180} \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right) \cong 0.41 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right),$$

όπου  $n$  ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους ξεκινώντας με  $n = 1$  την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου. Ο υπολογισμός του αύξοντος αριθμού του έτους γίνεται με τη βοήθεια του πίνακα 6 του παραρτήματος. Με  $i$  συμβολίζεται ο αύξων αριθμός της ημέρας σε ένα δεδομένο μήνα. Ο πίνακας 6 του παραρτήματος δίνει την ηλιακή απόκλιση για ορισμένες ημερομηνίες του έτους.

Το αστεροσκοπείο Αθηνών μετρά και καταγράφει τη στιγμιαία τιμή της ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου,  $G$  ( $W/m^2$ ) για κάθε ώρα της ημέρας και κάθε ημέρα του έτους. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας τρόπος υπολογισμού που βασίζεται στην στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων που αφορούν την περίοδο 1961-1980 και δημοσιεύτηκε το 1986 από τους καθηγητές Κουρεμένο, Αντωνόπουλο και Δουλγεράκη της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου [13].

Ο υπολογισμός της στιγμιαίας τιμής σε ( $W/m^2$ ) της άμεσης ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο,  $G_b$  καθώς και της αντίστοιχης διάχυτης  $G_d$  έγινε με τη βοήθεια των συσχετίσεων:

$$G_b (kW/m^2) = M_t + A_t \sin\left(\frac{360}{365}n - P_t\right) \quad (3)$$

$$G_d (kW/m^2) = m_t + a_t \sin\left(\frac{360}{365}n - p_t\right), \quad (4)$$

όπου  $M_t$ ,  $A_t$ ,  $P_t$ ,  $m_t$ ,  $a_t$ ,  $p_t$  συντελεστές που δίνονται για κάθε ώρα  $t$  στον πίνακα 7 του παραρτήματος.

Η ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου υπολογίζεται από τη σχέση:

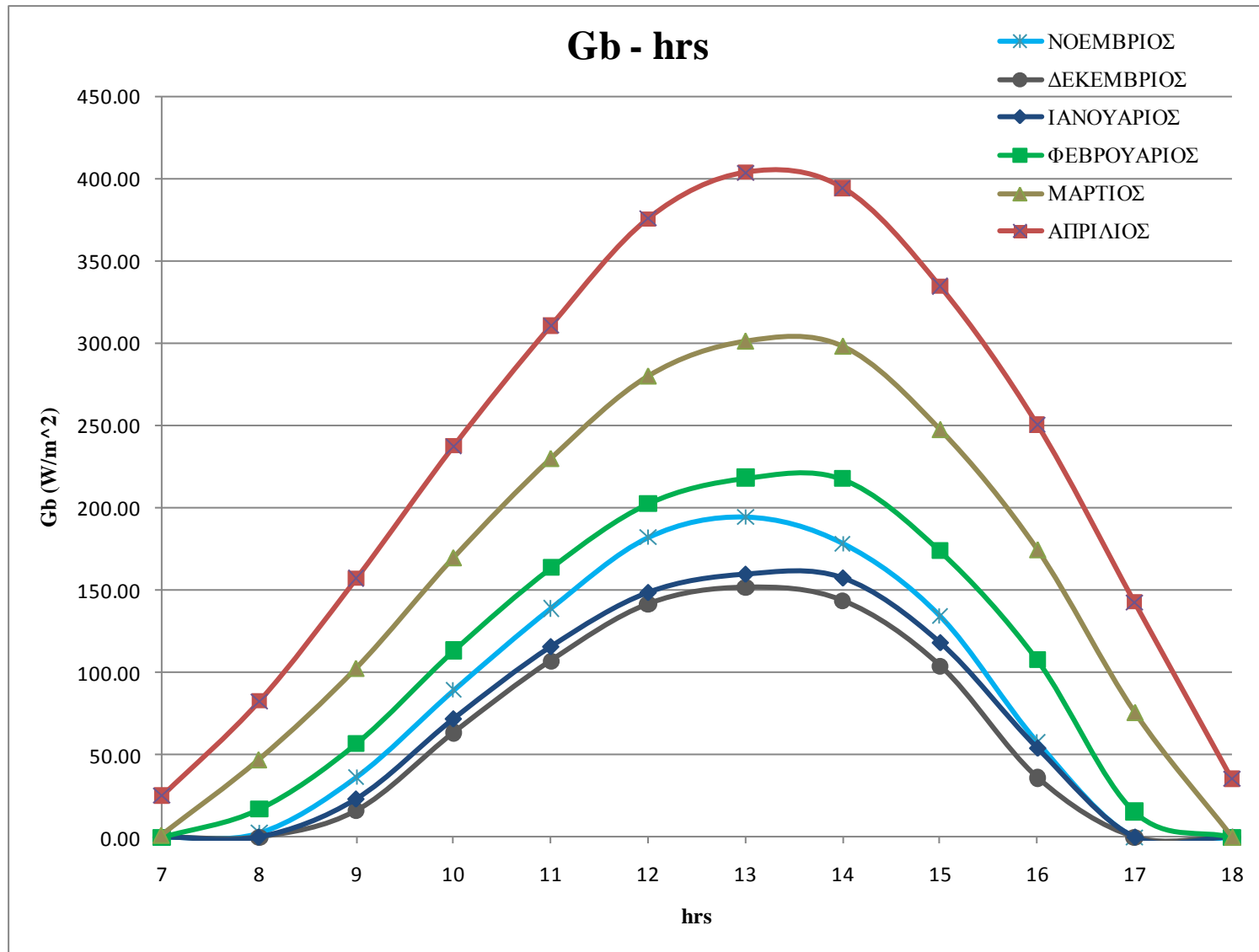
$$G_T = G_b R_b + G_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + (G_b + G_d) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (6)$$

Για νότιο προσανατολισμό συλλέκτη δηλαδή για αζιμούθιο επιφάνειας  $\gamma = 0^\circ$ , ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση οριζοντίου επιπέδου  $R_b$  δίνεται από τη σχέση:

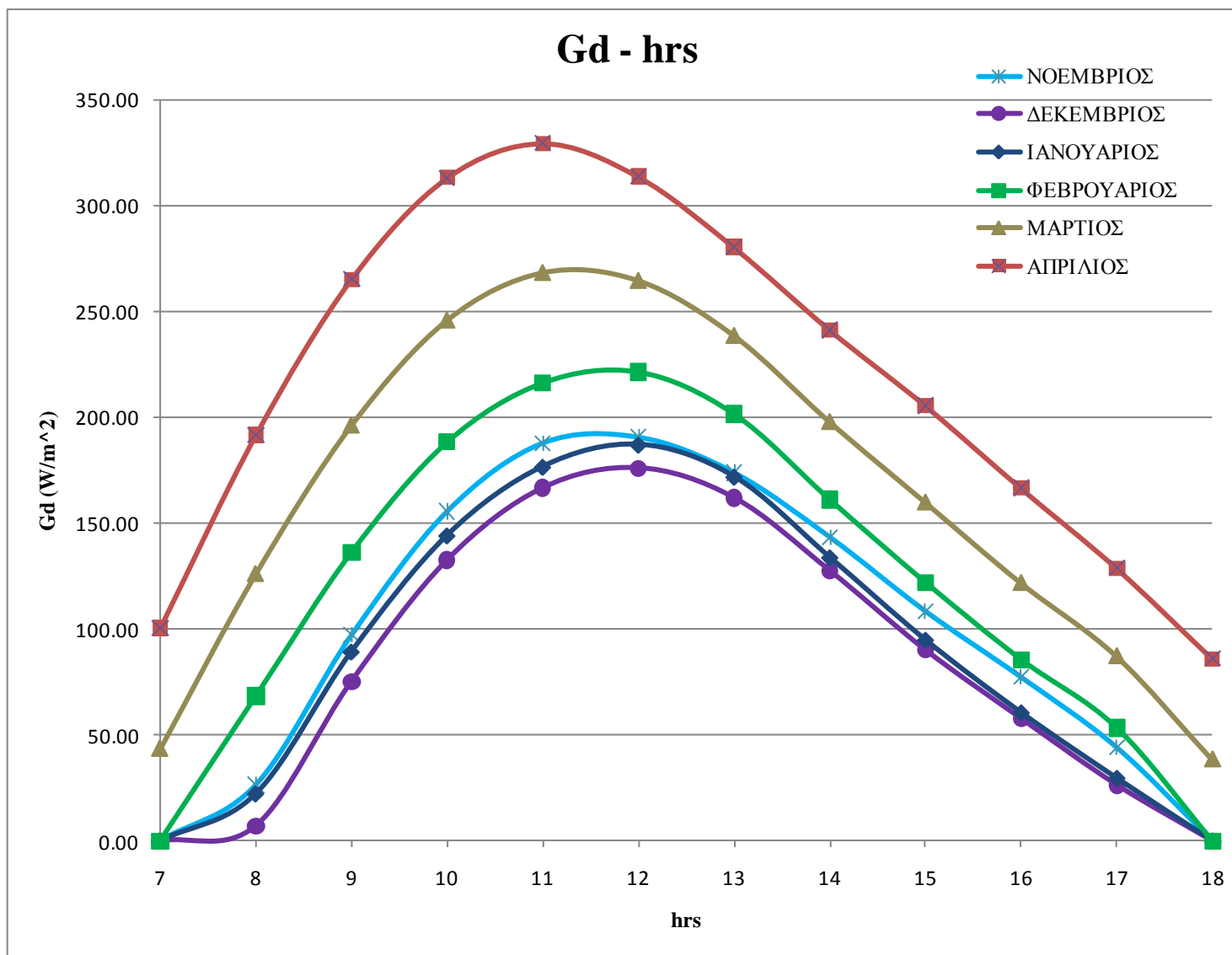
$$R_b = \frac{\sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega}{\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega} \quad (7)$$

Εφαρμογή των σχέσεων (6) και (7) στο Excel δίνει τα παρακάτω διαγράμματα για την άμεση (Σχ. 4.2) και διάχυτη (Σχ. 4.3) ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου και την ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου (Σχ. 4.4) συναρτήσει της ώρας της ημέρας.

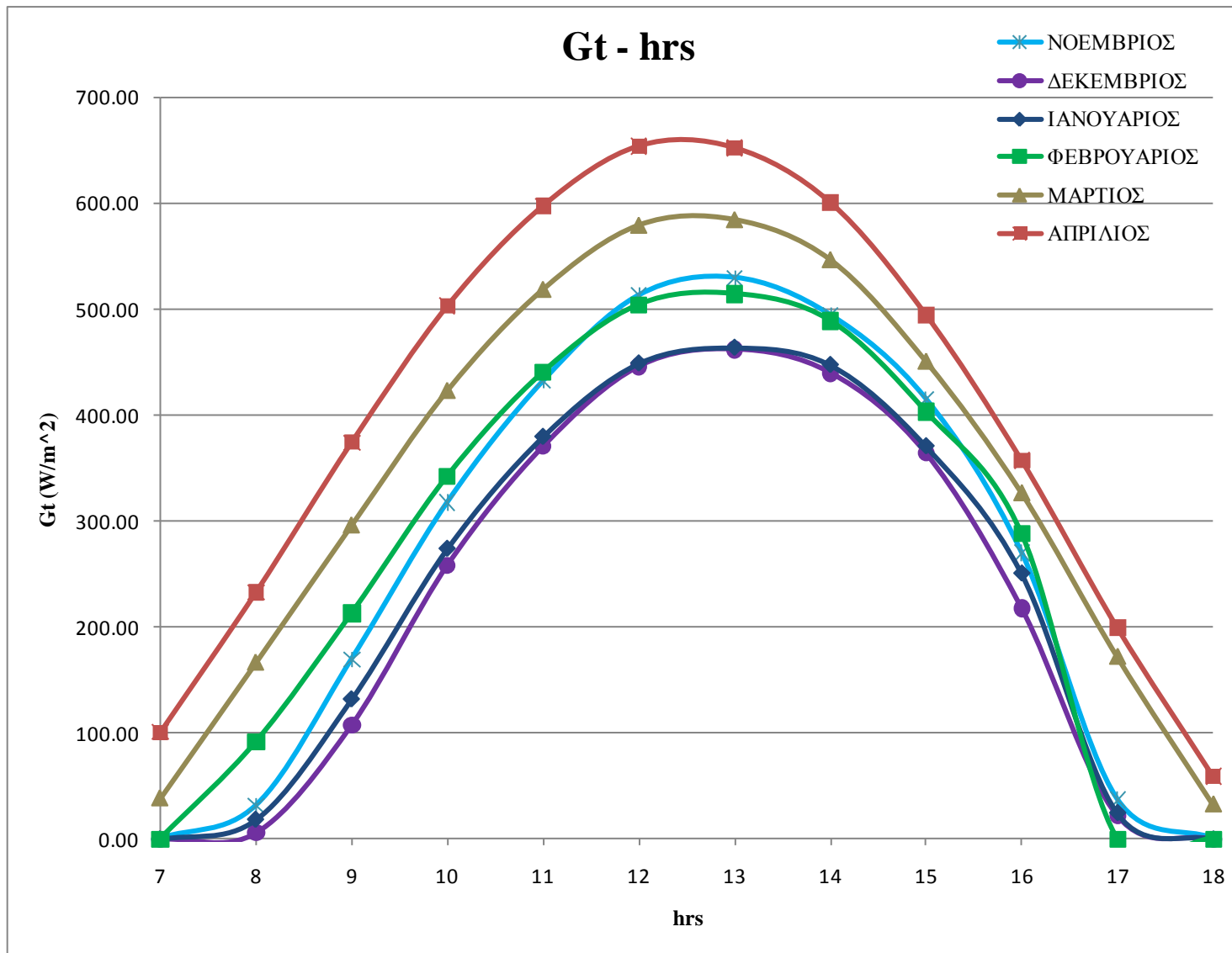




Σχ. 4.2. Ωριαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου στην περιοχή της Αθήνας, την 21<sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο



Σχ. 4.3. Ωριαία έμμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου στην περιοχή της Αθήνας, την 21<sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο



Σχ. 4.4. Ωριαία ολική ακτινοβολία που προσπίπτει στο συλλέκτη, την 21<sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο

#### 4.4.3.3. Θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος

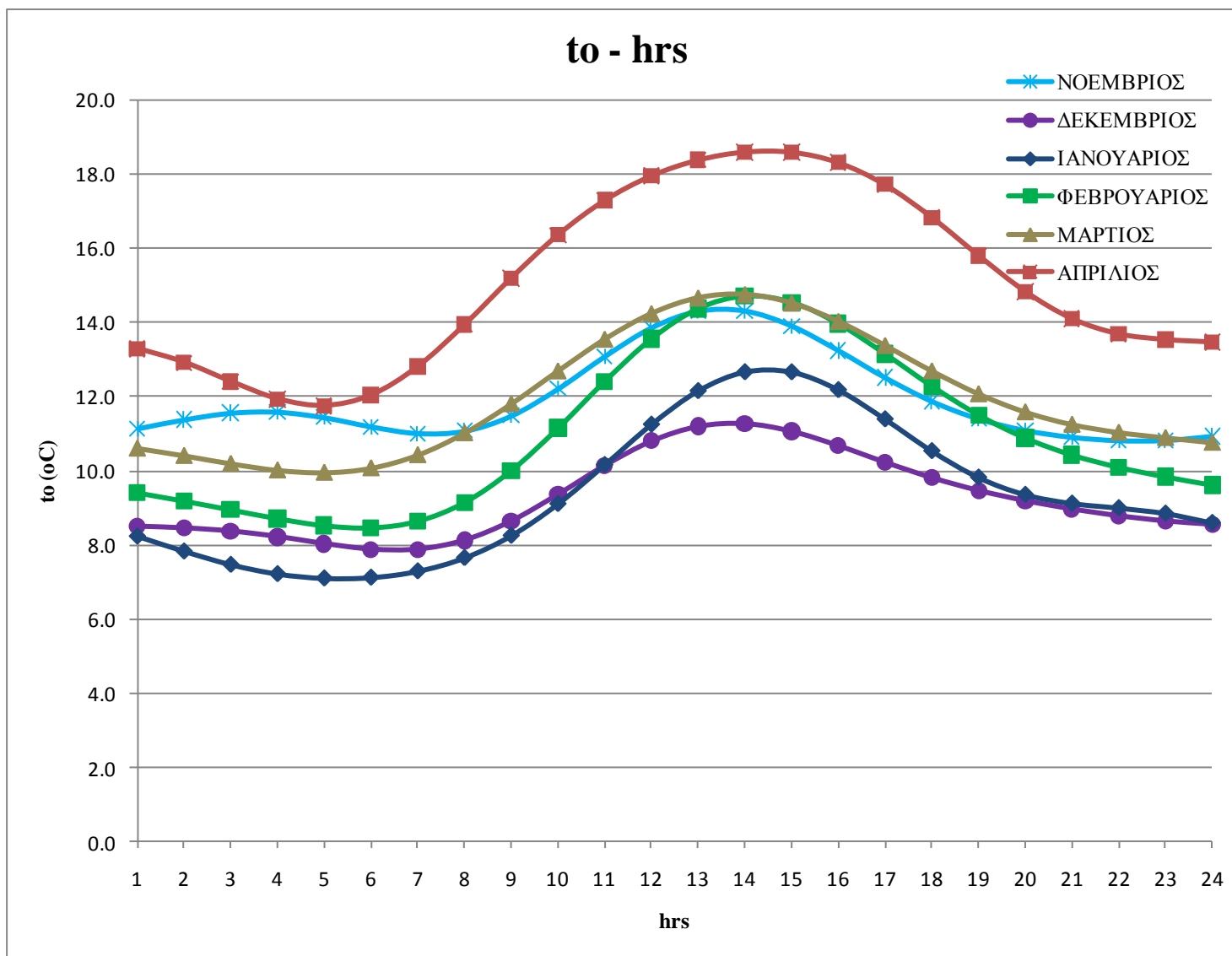
Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος χρησιμοποιείται η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τον τομέα Θερμότητας του Ε.Μ.Π. ύστερα από επεξεργασία των στατιστικών δεδομένων της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας για την περιοχή της Αθήνας, όπως αυτή παρουσιάζεται στο βιβλίο 'Κλιματισμός' του καθηγητή Κ. Α. Αντωνόπουλου [14].

Η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος κάθε ώρα της ημέρας ( $h$ ), υπολογίζεται από την προσεγγιστική σχέση (5) [14]:

$$t_o(h) = M + \sum_{i=1}^3 C_i \cos\left[i \frac{360}{24}(h - 0.5)\right] + \sum_{i=1}^3 S_i \sin\left[i \frac{360}{24}(h - 0.5)\right] \quad (5),$$

όπου  $M$ ,  $C_i$ ,  $S_i$ ,  $m$ ,  $c_i$ ,  $s_i$  συντελεστές που δίνονται από τον πίνακα 8 του παραρτήματος.

Εφαρμογή της σχέσης (5) για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου με τη βοήθεια του προγράμματος excel της Microsoft έδωσε το παρακάτω διάγραμμα της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος για κάθε ώρα του 24ώρου (Σχ. 4.5).



Σχ. 4.5. Ωριαία θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος στην περιοχή της Αθήνας, την 21<sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο

#### 4.4.3.4. Θερμοκρασία νερού δικτύου

Στο πρότυπο ΕΛΟΤ 1291, δίνονται τυπικές τιμές για την μέση μηνιαία θερμοκρασία νερού δικτύου, για διάφορες πόλεις της Ελλάδας. Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, γίνεται χρήση των στοιχείων του πίνακα 9 του παραρτήματος, για την Αθήνα, τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο και Απρίλιο.

#### 4.4.4. Το μοντέλο κατανάλωσης θερμού νερού

Η ποσότητα του θερμού νερού σε κάθε μελέτη που πραγματοποιείται για οικία καθορίζεται από τον αριθμό των ενοίκων και τις καταναλωτικές τους συνήθειες.

Η τυπική κατανάλωση θερμού νερού σε μια οικία παρουσιάζεται στον πίνακα 4.2.

Στην παραμετρική εξέταση που ακολουθεί, αρχικά χρησιμοποιείται σταθερό μοντέλο κατανάλωσης με σταθερή ωριαία κατανομή 10 λίτρα την ώρα. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται κυρίως για τον έλεγχο της μεθοδολογίας που ακολουθείται στην παραμετρική μελέτη και δε προσεγγίζει τις πραγματικές ανάγκες της οικίας.

Το μεταβλητό μοντέλο κατανάλωσης θερμού νερού χρήσης που χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία βασίζεται στη μελέτη των Pelman και Mills [11]. Η συνολική κατανάλωση θερμού νερού ανέρχεται σε 240 λίτρα ημερησίως και η ωριαία κατανομή σε λίτρα κατά τη διάρκεια του 24ώρου δίνεται στο σχήμα 4.6.

Το μοντέλο αυτό επιλέχθηκε επειδή προσεγγίζει τη ημερήσια κατανάλωση ενός νοικοκυριού με 4 μέλη καθένα από τα οποία καταναλώνει περίπου 60 λίτρα νερό την ημέρα.

**Πίνακας 4.2:** Τυπική κατανάλωση θερμού νερού χρήσης σε οικία [10]

Χαμηλή κατανάλωση	35 λίτρα ανά άτομο/ημέρα
Μεσαία κατανάλωση	60 λίτρα ανά άτομο/ημέρα
Υψηλή κατανάλωση	80 λίτρα ανά άτομο/ημέρα



Σχ. 4.6. Ωριαία κατανάλωση θερμού νερού σε οικία κατά τη διάρκεια του 24ώρου [11]

#### 4.5. Παραμετρική μελέτη

##### 4.5.1. Μεθοδολογία

Στην παραμετρική εξέταση του μοντέλου που περιγράφηκε ανωτέρω, γίνονται κάποιες βασικές υποθέσεις για σημαντικές μεταβλητές του προβλήματος και ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία επίλυσης. Συγκεκριμένα ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Βήμα 1<sup>ο</sup>

Για κάθε ένα από τα υποψήφια υλικά προσδιορίζεται η ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η ενεργός θερμοχωρητικότητα προσεγγίζεται από τριγωνική συνάρτηση με αναλυτική έκφραση:

$$\frac{[C_{p,eff}(T) - C_{ps}]}{T - T_s} = \frac{C_{p,max} - C_{ps}}{T_c - T_s}$$

όπου  $T_c = \frac{T_l + T_s}{2}$  είναι η θερμοκρασία στο μέσο της διφασικής περιοχής και  $C_{pmax}$  είναι η τιμή της ενεργού θερμοχωρητικότητας  $C_{p,eff}$  σε θερμοκρασία  $T = T_c$ . Η περιοχή  $H/2$  κάτω από τη γραμμή 1 2 (Σχ. 4.7.) μπορεί να εκφραστεί ως:

$$H/2 = (C_{pmax} + C_{ps})(T_c - T_s)/2.$$

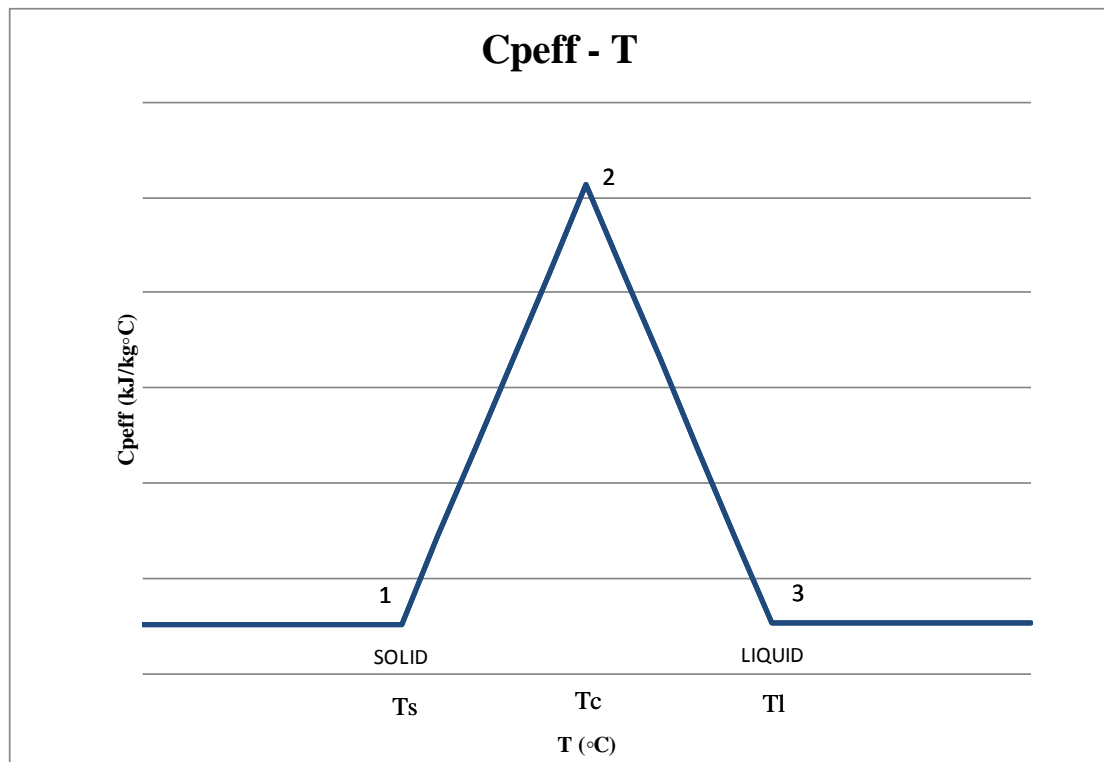
Για το θερμοκρασιακό εύρος  $T_s \leq T \leq T_c$  η ενεργός θερμοχωρητικότητα δίνεται από τη σχέση:

$$C_{p,eff}(T) = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps}$$

όπου  $b = T_l - T_s$  είναι το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του ΥΑΦ.

Για το θερμοκρασιακό εύρος  $T_c \leq T \leq T_l$  η ενεργός θερμοχωρητικότητα δίνεται από τη σχέση:

$$C_{p,eff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl}$$



Σχ. 4.7. Τριγωνική συνάρτηση ενεργού θερμοχωρητικότητας



- Βήμα 2<sup>ο</sup>

Στο 2<sup>ο</sup> βήμα ορίζονται οι παράμετροι με τις οποίες θα γίνει η δοκιμή των υποψήφιων υλικών.

Αρχικά, καθορίζεται ο χρόνος στον οποίο εξετάζεται το μοντέλο, δηλαδή επιλέγεται ο μήνας στον οποίο θα γίνει η δοκιμή. Ο μήνας που επιλέγεται ανήκει στη χρονική περίοδο από Νοέμβριο έως και Απρίλιο, σύμφωνα με την παράγραφο 4.4.2. Κάθε μήνας αντιπροσωπεύεται από μια τυπική ημέρα που στην περίπτωση μας θεωρείται η 21<sup>η</sup>. Για την ημέρα αυτή έχουν υπολογιστεί για κάθε ώρα, η ηλιακή ακτινοβολία (§ 4.4.3.2.) και η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος (§ 4.4.3.3.) και έχει καθοριστεί η θερμοκρασία του νερού του δικτύου (§4.4.3.4.). Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα για τα 4 υλικά, αρχικά επιλέγεται η 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου για τις βασικές δοκιμές, μέχρι να γίνει η επιλογή του υλικού. Για το υλικό που θα επιλεγεί, εξετάζεται η λειτουργία της εγκατάστασης για την περίοδο από Νοέμβριο έως και Απρίλιο, οπότε μεταβάλλεται η ημέρα της δοκιμής.

Στη συνέχεια επιλέγεται η τιμή του εμβαδού της συλλεκτικής επιφάνειας και ο όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης θερμού νερού. Ο όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης σχετίζεται με τη μάζα του υλικού που περιέχει η δεξαμενή ( $m_{PCM}$ ) και η οποία συμμετέχει στους υπολογισμούς. Για απλοποίηση των υπολογισμών, οι διαστάσεις της δεξαμενής δεν αποτελούν παράμετρο του προβλήματος. Στις δοκιμές που θα ακολουθήσουν θεωρούμε για όλα τα υλικά σταθερή πυκνότητα 0.7 kg/l.

Τέλος, καθορίζεται το μοντέλο της κατανάλωσης της θερμού νερού (§ 4.4.4.)

Το σύνολο των παραπάνω παραμέτρων αποτελούν το σενάριο στο οποίο εξετάζεται η συμπεριφορά των τεσσάρων υποψήφιων υλικών.

- Βήμα 3<sup>ο</sup>

Στο υπολογιστικό μοντέλο που έχουμε δημιουργήσει, κάθε ώρα του 24ώρου είναι γνωστές η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος και η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο συλλέκτη της εγκατάστασης. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία θερμαίνει το ΥΑΦ που βρίσκεται στη δεξαμενή. Η θερμοκρασία που έχει το ΥΑΦ στην αρχή κάθε ώρας καλείται  $T_{PCM, ΠΡΙΝ}$  ενώ η θερμοκρασία που έχει στο τέλος κάθε ώρας  $T_{PCM, ΜΕΤΑ}$ . Όπως είναι προφανές, το τέλος κάθε ωριαίου διαστήματος συμπίπτει με την αρχή της επόμενης ώρας, άρα η  $T_{PCM, ΜΕΤΑ}$  της προηγούμενης ώρας είναι η  $T_{PCM, ΠΡΙΝ}$  της επόμενης ώρας του 24ώρου. Στο

υπολογιστικό φύλλο που έχει δημιουργηθεί για την επίλυση του μοντέλου, το 24ώρο ξεκινά από τις 12:00 και τελειώνει στις 24:00.

Σε κάθε σενάριο θεωρούμε μια αρχική θερμοκρασία για το εξεταζόμενο υλικό ( $T_{PCM, ΠΡΙΝ}$ ) στην αρχή του 24ώρου. Η θερμοκρασία αυτή  $T_{PCM, ΠΡΙΝ}$  θεωρούμε ότι είναι ίση με τη θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη  $T_{f,i}$ , δηλαδή  $T_{f,i} = T_{PCM, ΠΡΙΝ}$ . Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff,PCM}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας  $T_{PCM, ΠΡΙΝ}$  με χρήση της τριγωνικής συνάρτησης καθώς και η πραγματικά αποδιδόμενη θερμική ισχύς του συλλέκτη. Η πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς του συλλέκτη  $Q_u$  (W) υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$Q_u (W) = A_c [G_T F_R (\tau \alpha)] - F_R U_L (T_{f,i} - T_a),$$

όπου:

- $A_c$  η συλλεκτική επιφάνεια σε ( $m^2$ ),
- $G_T$  η στιγμιαία ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου σε ( $W/m^2$ ),
- $F_R$  ο παράγοντας θερμικής απολαβής του συλλέκτη,
- $(\tau \alpha)$  το γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας του συλλέκτη,
- $U_L$  ο συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη σε ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ),
- $F_R(\tau \alpha) = 0.74$  και  $F_R U_L = 5.37$  ( $W/m^2$ )/ $^\circ C$  (βλ. § 4.4.1.2.),
- $T_{f,i}$  η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη σε ( $^\circ C$ ) και
- $T_a$  η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος (βλ. § 4.4.3.3.).

Ακολουθεί ο υπολογισμός του φορτίου της κατανάλωσης θερμού νερού  $Q_{κατ}$  σε (W). Κάθε ώρα που κάποιος καταναλώνει θερμό νερό, στη δεξαμενή εισέρχεται κρύο νερό από το δίκτυο θερμοκρασίας  $T_\delta$ . Η ισχύς που καταναλώνεται κάθε στιγμή είναι:

$$Q_{κατ} = m_{νερού} C_{p,νερού} (T_{f,i} - T_\delta),$$

όπου  $C_{p,νερού} = 4190$  J/kg $^\circ C$ .

Τέλος, υπολογίζεται η  $T_{PCM, ΜΕΤΑ}$  από τον τύπο:

$$T_{PCM, ΜΕΤΑ} = T_{PCM, ΠΡΙΝ} + \frac{3600(Q_u - Q_{κατ})}{m_{PCM} C_{p,eff,PCM}}$$

Για απλοποίηση των υπολογισμών, θεωρούμε ότι στο τέλος κάθε ώρας το θερμό νερό παίρνει τη θερμοκρασία που έχει το ΥΑΦ, δηλαδή η  $T_{PCM, ΜΕΤΑ}$  της προηγούμενης ώρας είναι ίση με το  $T_{f,i}$  της επόμενης ώρας. Έτσι, υπολογίζονται τα ανωτέρω για κάθε ώρα του 24ώρου. Στο τέλος του 1<sup>ου</sup> 24ώρου η τελική θερμοκρασία

$T_{PCM}$ , ΜΕΤΑ γίνεται  $T_{PCM}$ , ΠΡΙΝ για την 1<sup>η</sup> ώρα του επόμενου 24ώρου και επαναλαμβάνεται το βήμα 3. Η ίδια διαδικασία γίνεται για όσα διαδοχικά 24ωρα είναι αναγκαίο, σαν να επαναλαμβάνονται οι ίδιες ημέρες για το ίδιο σενάριο. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν η επαναληπτική μέθοδος συγκλίνει, δηλαδή όταν οι τιμές των θερμοκρασιών του ΥΑΦ δεν μεταβάλλονται πια από 24ώρο σε 24ώρο. Τότε, έχουμε προσδιορίσει τις θερμοκρασίες που παίρνει το ΥΑΦ και συνεπώς και το νερό χρήσης, τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη, την ενεργό θερμοχωρητικότητα και την πραγματικά αποδιδόμενη ισχύ του συλλέκτη για την τυπική μέρα του σεναρίου που εξετάζεται.

Στον πίνακα 4.3 συνοψίζονται οι παράμετροι του προβλήματος, σταθερές και μεταβλητές.

**Πίνακας 4.3.** Σταθερές και μεταβλητές παράμετροι του προβλήματος

<b>Παράμετροι προβλήματος</b>	
<b>Σταθερές</b>	<b>Μεταβλητές</b>
Πυκνότητα υλικών $\rho = 0.7 \text{ kg/l}$	Συλλεκτική επιφάνεια $A_c$
$F_R(\tau\alpha) = 0.74 \text{ (W/m}^2\text{)}^\circ\text{C}$	Όγκος δεξαμενής $V_{δεξ}$
$F_{RU_L} = 5.37$	Κατανάλωση θερμού νερού
	Ημέρα

#### 4.5.2. Σενάριο 1<sup>ο</sup>

##### 4.5.2.1. Καθορισμός παραμέτρων

Στην 1η παραμετρική εξέταση του μοντέλου, δοκιμάζουμε κάθε ένα από τα υλικά για λειτουργία την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου με σταθερή κατανάλωση θερμού νερού 10 λίτρα/ώρα. Με αυτήν την απλοϊκή θεώρηση μπορούμε να ελέγξουμε τη μεθοδολογία που ακολουθείται και να εντοπίσουμε λάθη. Οι υπόλοιπες παράμετροι που επιλέχθηκαν για αυτήν τη δοκιμή παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.

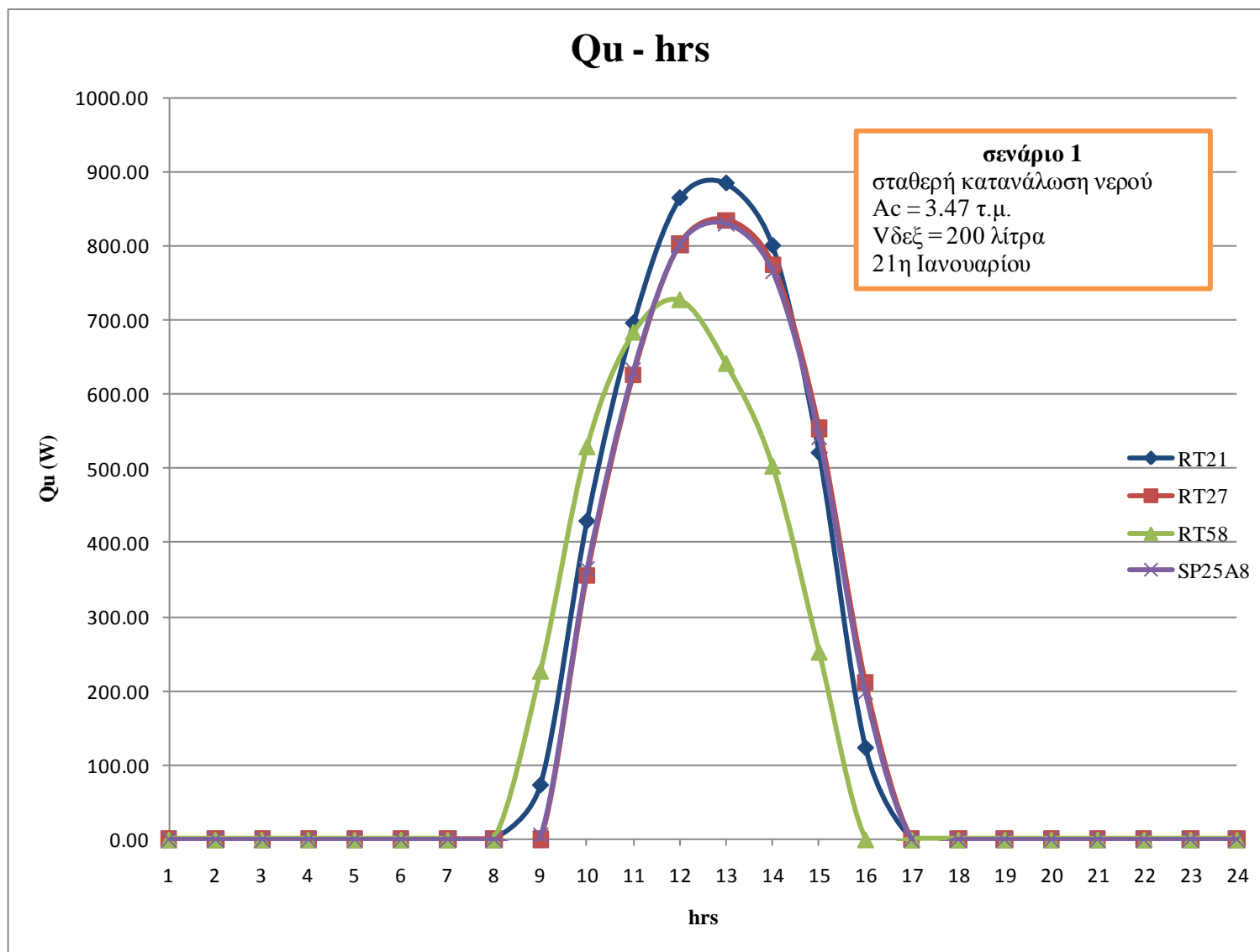
**Πίνακας 4.4.** Παράμετροι για το σενάριο 1

<b>Σενάριο 1</b>	
ημέρα	21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου
Συλλεκτική επιφάνεια $A_c$	3.47 m <sup>2</sup>
Όγκος δεξαμενής $V_{δεξ}$	200 λίτρα
Κατανάλωση θερμού νερού	Σταθερή (10 λίτρα/ώρα)

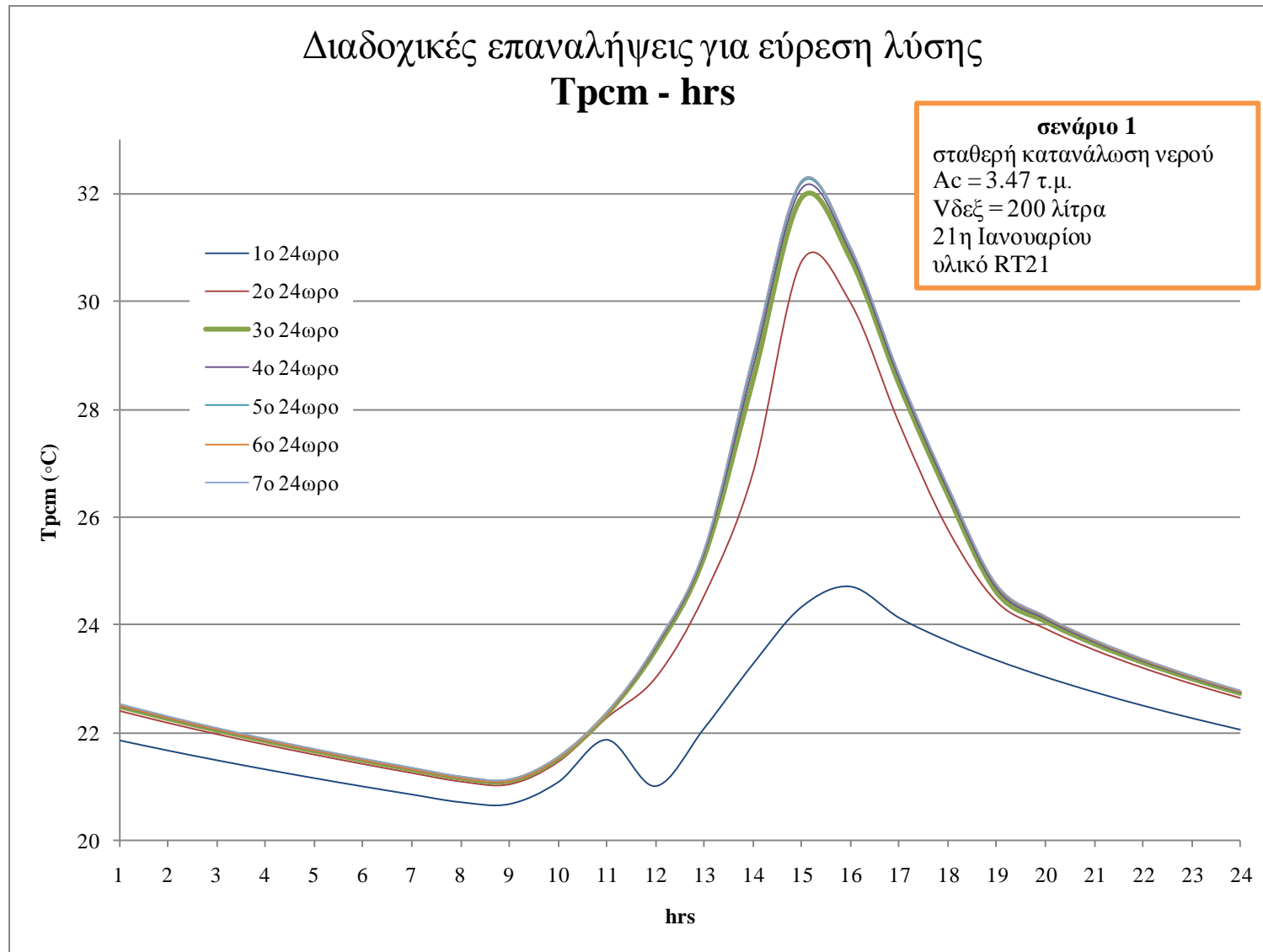
#### 4.5.2.2. Αποτελέσματα

Μετά από εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στην § 4.5.1. σε υπολογιστικά φύλλα του προγράμματος excel, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για το σενάριο 1 (πίνακας 10 του παραρτήματος). Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα της πραγματικά αποδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη,  $Q_u$  (Σχ. 4.8) και της θερμοκρασίας που αναπτύσσει κάθε ΥΑΦ,  $T_{p,m}$  (Σχ. 4.10) συναρτήσει των ωρών του 24ώρου. Για κάθε υποψήφιο υλικό, απεικονίζεται η ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας και το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας που προκύπτει για το δεδομένο σενάριο (Σχ. 4.11-4.14).

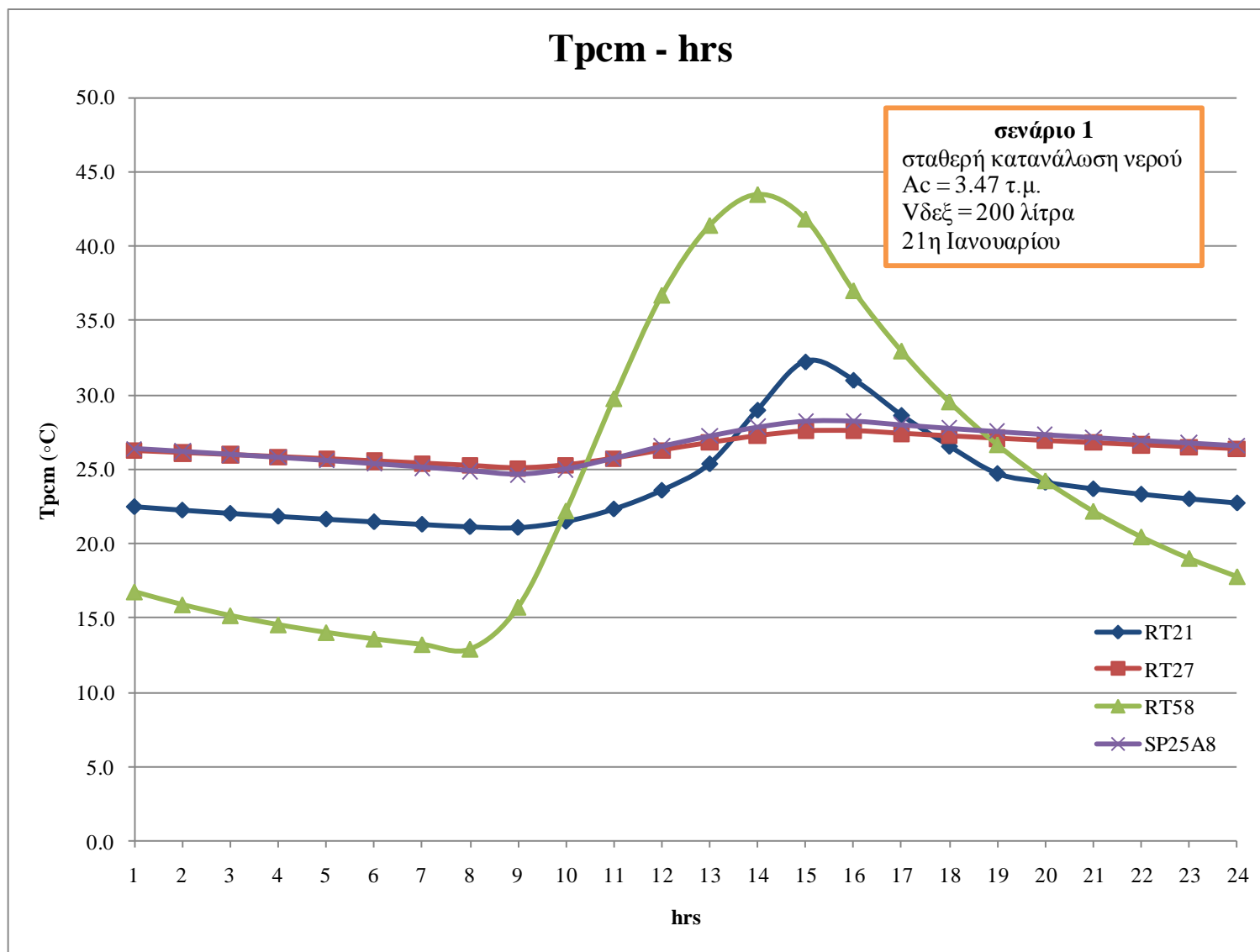
Το σχήμα 4.9, παρουσιάζει τις διαδοχικές επαναλήψεις που έγιναν για το σενάριο 1 και το υλικό RT21, μέχρι να βρεθεί η λύση, σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν στην § 4.5.1. Όπως παρατηρούμε από τη σύγκριση των διαγραμμάτων 4.9 - 4.10, η αρχική θερμοκρασία που θέσαμε ως αρχή του πρώτου 24ώρου, απέχει πολύ από την τελική λύση που προέκυψε μετά τη σύγκλιση. Τα τελευταία 24ωρα (4° – 7°), οι θερμοκρασίες συγκλίνουν, με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες να διαφέρουν ελάχιστα.



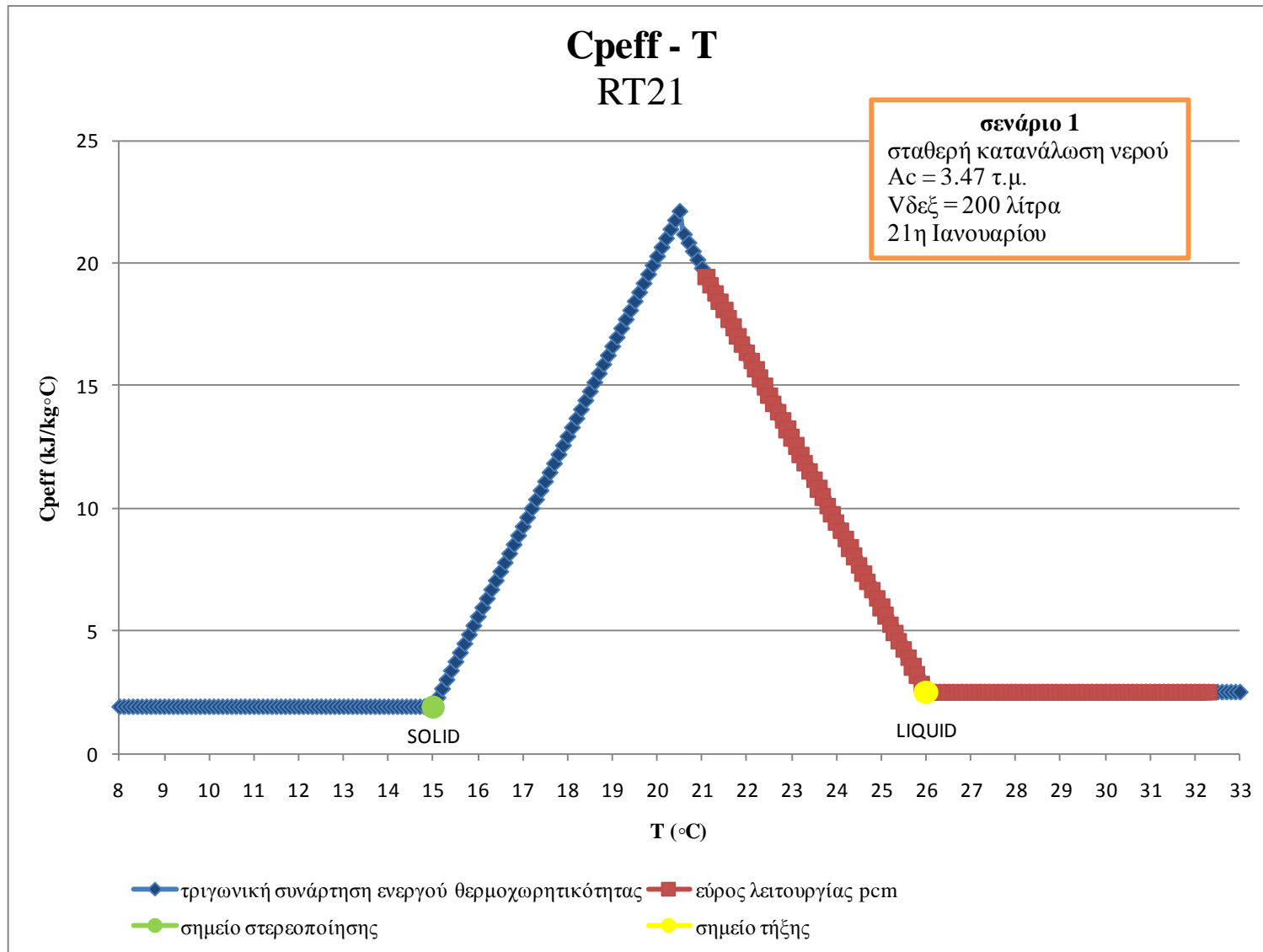
Σχ. 4.8. Πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη συναρτήσεως των ωρών του 24ώρου (σενάριο 1)



Σχ. 4.9. Διαδοχικές επαναλήψεις για την εύρεση λύσης (σενάριο 1)

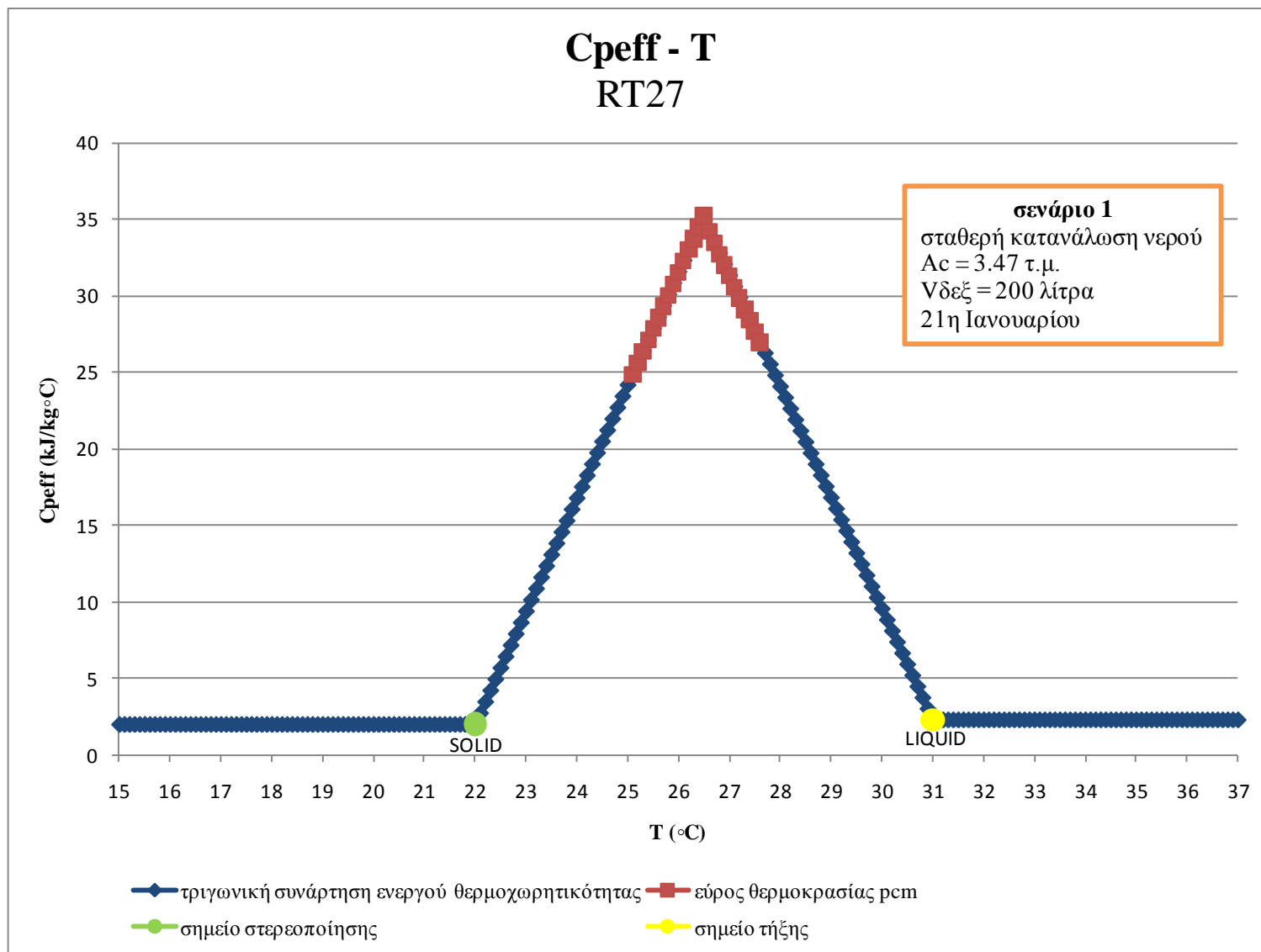


Σχ. 4.10. Θερμοκρασία υλικών συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 1)

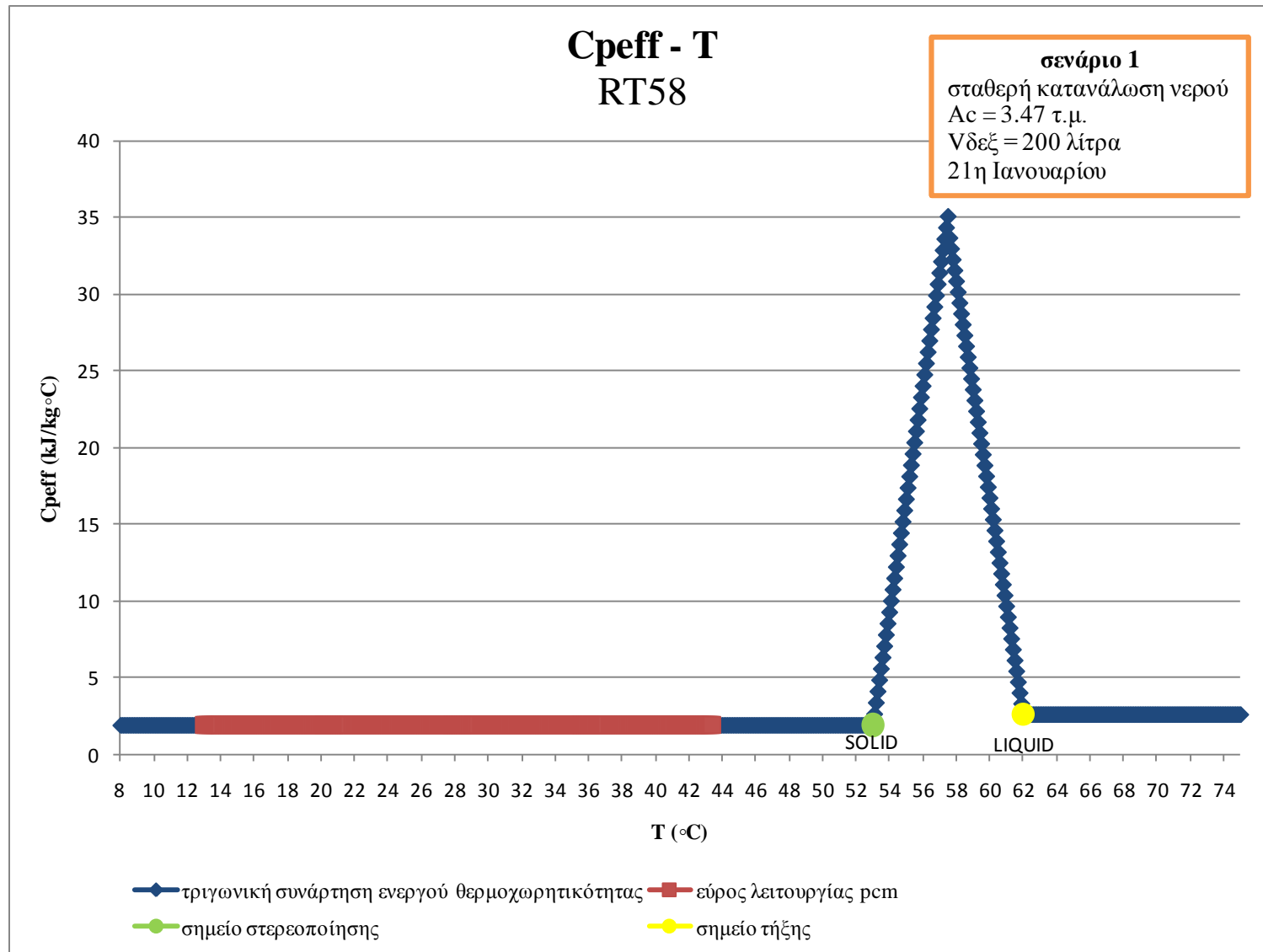


Σχ. 4.11. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT21 (σενάριο 1)

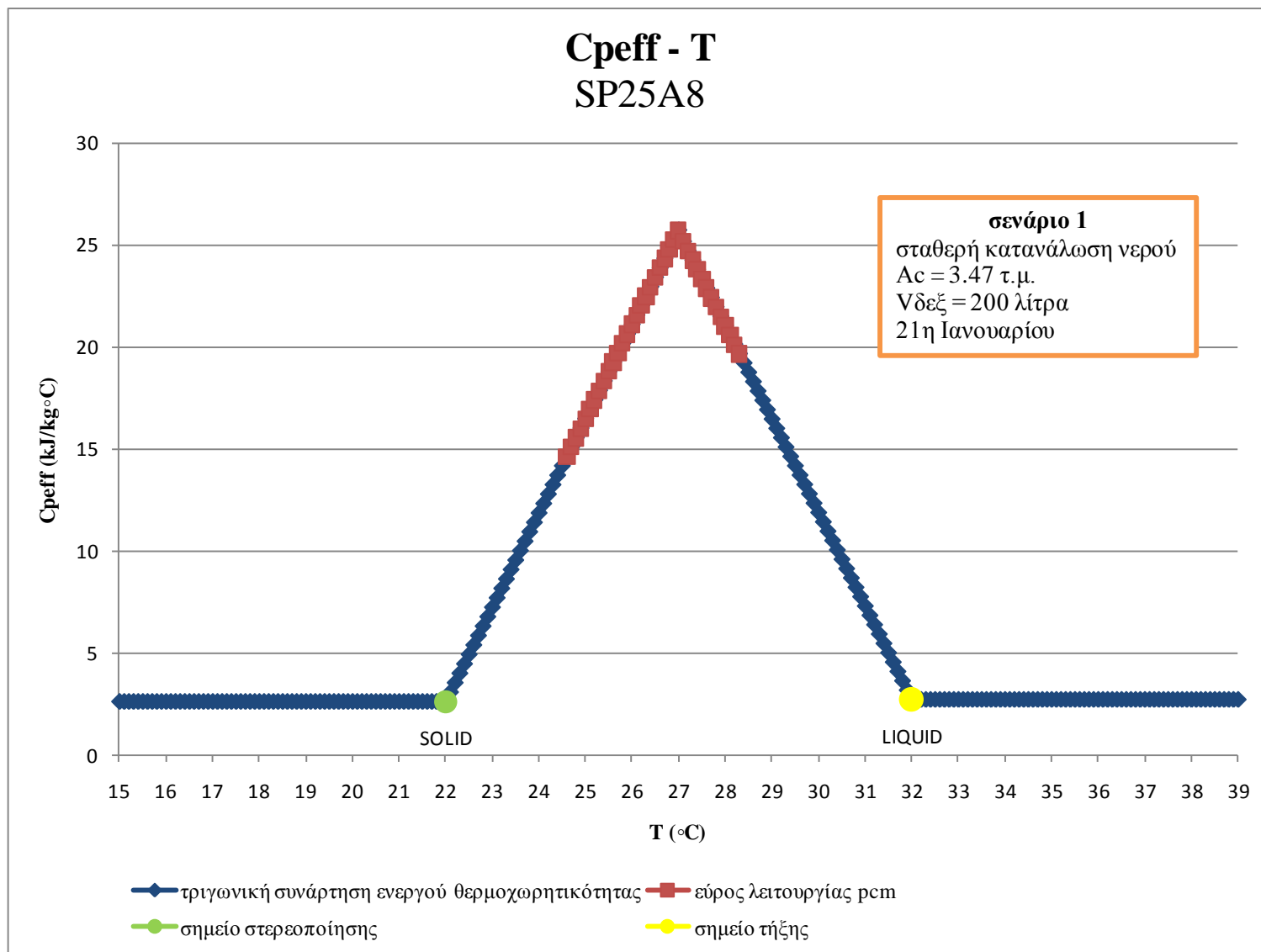




Σχ. 4.12. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT27 (σενάριο 1)



Σχ. 4.13. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT58 (σενάριο 1)



Σχ. 4.14. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας SP25A8 (σενάριο 1)

### 4.5.2.3. Παρατηρήσεις

#### Έλεγχος ορθότητας των αποτελεσμάτων

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4.8, η πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς του συλλέκτη είναι μέγιστη στη 1 μ.μ. (13) που υπάρχει έντονη ηλιοφάνεια και μηδενική τις ώρες 5-12 μ.μ. (17 – 24) και 1-8 π.μ. όπου την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Τα διαγράμματα για τις τιμές της άμεσης, έμμεσης και ολικής ακτινοβολίας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου έχουν παρουσιαστεί στην § 4.4.3.2. και μπορεί κανείς να τα συμβουλευτεί για περαιτέρω έλεγχο των αποτελεσμάτων.

Η πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς του συλλέκτη  $Q_u$  (W) υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$Q_u(W) = A_c [G_T F_R (\tau\alpha)] - F_R U_L (T_{f,i} - T_a),$$

Όπως είναι προφανές, η  $Q_u$  εξαρτάται από τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη  $T_{f,i}$ , για την οποία έχει γίνει η υπόθεση ότι κάθε ώρα παίρνει την τιμή της θερμοκρασίας του υλικού την προηγούμενη ώρα (π.χ.  $T_{f,i,3} = T_{PCM,2}$ ). Συνεπώς, η τιμή της  $T_{f,i}$  και της  $Q_u$  εξαρτάται από τη θερμοκρασία που επιτυγχάνει το υλικό, γι' αυτό και παρατηρούνται διαφορές ανάμεσα στα υποψήφια υλικά.

Πιο συγκεκριμένα, τα υλικά που επιτυγχάνουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες (βλ. σχήμα 4.10) μια ορισμένη ώρα του 24ώρου έχουν υψηλότερη  $T_{f,i}$ , και συνεπώς αυξημένο όρο απωλειών, οπότε μικρότερη τιμή της  $Q_u$ . Τις ώρες όπου δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, ο συλλέκτης έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κι επομένως ακτινοβολεί ενέργεια. Είναι λογικό λοιπόν, τις πρώτες πρωινές και τις βραδινές ώρες ο όρος των απωλειών να είναι μεγαλύτερος και η  $Q_u$  να μηδενίζεται. Όπως εύκολα μπορεί κανείς να διαπιστώσει από το σχήμα 4.8, τις μεσημεριανές ώρες με έντονη ηλιοφάνεια που το RT58 παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα άλλα υλικά, είναι λογικό να έχει μεγαλύτερες απώλειες προς το περιβάλλον και συνεπώς μικρότερη  $Q_u$ . Για τον ίδιο λόγο, τις ώρες της έντονης ηλιοφάνειας, το RT21 που παρουσιάζει γενικά μικρότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα άλλα υλικά, χάνει λιγότερο σε απώλειες και δίνει μεγαλύτερη  $Q_u$ .

Όσον αφορά τη θερμοκρασία των υλικών κατά τη διάρκεια του 24ώρου, όπως φαίνεται κι από το σχήμα 4.13, το RT58 παραμένει στερεό καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Έτσι, η θερμότητα που απορροφά από το συλλέκτη χρησιμεύει για αύξηση

της θερμοκρασίας του, με αποτέλεσμα τις ώρες της έντονης ηλιοφάνειας να επιτυγχάνει υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα άλλα υλικά που αλλάζουν φάση (Σχ. 4.11, 4.12, 4.14).

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4.11, το RT21 στο εύρος λειτουργίας της εφαρμογής εισέρχεται στη διφασική περιοχή αλλαγής φάσης αλλά προχωρά περαιτέρω και στην αισθητή περιοχή, αφού τήκεται πλήρως. Έτσι, το υλικό αναπτύσσει υψηλές θερμοκρασίες, αφού από τη θερμοκρασία τήξης και πάνω, η θερμότητα που απορροφά χρησιμεύει για αύξηση της θερμοκρασίας του.

Τα υλικά RT27 και SP25A8 παραμένουν στη διφασική περιοχή για όλο το εύρος λειτουργίας όπως φαίνεται και στα σχήματα 4.12 και 4.14. Στη διφασική περιοχή, όλη η θερμότητα που απορροφούν τα υλικά χρησιμεύει για την αλλαγή φάσης, που για μίγματα συμβαίνει σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να παρουσιάζουν σταθερά σχετικά υψηλές θερμοκρασίες όλο το 24ώρο. Ωστόσο, τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας τα RT27 και SP25A8 παρουσιάζουν μικρότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα RT58 και RT21, αφού τα τελευταία απορροφούν αισθητή θερμότητα κι αυξάνουν τη θερμοκρασία τους. Είναι λογικό λοιπόν, τα RT27 και SP25A8 να παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά και γενικά μικρότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.10.

## Τα υποψήφια υλικά ως ΥΑΦ

Το σενάριο 1 που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν τη δοκιμή, χρησιμεύει περισσότερο για έλεγχο της ορθότητας της μεθοδολογίας που ακολουθείται και δεν είναι ρεαλιστικό, αφού θεωρεί σταθερή κατανάλωση νερού όλο το 24ώρο. Παρολαυτά, μπορεί να χρησιμεύσει για να βγουν κάποια πρώτα συμπεράσματα ως προς τη συμπεριφορά των υποψηφίων υλικών.

Ιδανικά, θα έπρεπε να καταλήξουμε σε κάποιο υλικό που στο εύρος λειτουργίας της εφαρμογής να τήκεται πλήρως και να στερεοποιείται ξανά, ώστε να μπορεί να αποδώσει στο ρευστό τη θερμότητα που έχει απορροφήσει κατά τη φόρτιση. Όμως, κάτι τέτοιο είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί και συμβαίνει σπάνια στην πράξη. Ακόμα κι έμπειροι ερευνητές δεν καταφέρνουν να βελτιστοποιήσουν το

σύστημα τους έτσι ώστε τα ΥΑΦ να εκτελούν πλήρη κύκλο φόρτισης κι αποφόρτισης.

Το RT58 στο εύρος λειτουργίας της εφαρμογής, δε συμπεριφέρεται ως ΥΑΦ μιας και δεν υπόκειται σε αλλαγή φάσης (Σχ. 4.13). Παραμένει μόνιμα στην περιοχί αισθητής θερμότητας και δεν αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα. Έτσι, απαιτούνται επιπλέον δοκιμές για να διαπιστωθεί αν σε επόμενο σενάριο με μεταβλητή κατανάλωση θερμού νερού, το υλικό αυτό μπορεί να χρησιμεύσει για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας.

Το RT21 για το σενάριο που εξετάζεται, εισέρχεται στη διφασική περιοχί και στη συνέχεια τήκεται πλήρως αποθηκεύοντας λανθάνουσα κι αισθητή θερμότητα (Σχ. 4.11). Ενώ κρατά το χαρακτήρα του ΥΑΦ, δεν πλησιάζει κοντά στη στερεοποίηση ώστε να αποδώσει την αποθηκευμένη θερμότητα στο ρευστό. Μέχρι στιγμής κρίνεται κατάλληλο για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας και θα εξεταστεί περαιτέρω σε επόμενες δοκιμές.

Τα RT27 και SP25A8 παραμένουν στη διφασική περιοχί για όλο το 24ώρο, χωρίς να στερεοποιούνται με αποτέλεσμα να μην μπορούν να αποδώσουν όλη τη θερμότητα που έχουν αποθηκεύσει στο ρευστό. Έτσι, απαιτούνται περαιτέρω δοκιμές για να διαπιστωθεί αν μπορούν να λιώσουν πλήρως ή να πλησιάσουν περισσότερο στη στερεοποίηση υπό συνθήκες μεταβλητής κατανάλωσης νερού.

## Καταλληλότητα των υποψηφίων υλικών για την εφαρμογή

Η καταλληλότητα των υποψηφίων υλικών για την εφαρμογή, αφορά κυρίως το κατά πόσο τα υλικά μπορούν να επιτύχουν υψηλές θερμοκρασίες όλο το 24ώρο. Μέχρι στιγμής, η πρώτη δοκιμή έδειξε ότι το RT58 επιτυγχάνει υψηλές θερμοκρασίες τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας αλλά χαμηλές τις υπόλοιπες ώρες (Σχ. 4.10). Κάτι τέτοιο, είναι λογικό, εφόσον παραμένει στην ίδια φάση και όλη η θερμότητα που απορροφά χρησιμεύει για αύξηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, δε συμπεριφέρεται ως ΥΑΦ, γι' αυτό και μέχρι στιγμής κρίνεται ακατάλληλο για την εφαρμογή.

Το RT21 επιτυγχάνει υψηλές θερμοκρασίες τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας αλλά χαμηλές τις υπόλοιπες ώρες. Αξιοποιεί την αισθητή και τη λανθάνουσα θερμότητα κάνοντας έναν ικανοποιητικό κύκλο φόρτισης κι αποφόρτισης (Σχ. 4.11).

Μέχρι στιγμής κρίνεται κατάλληλο για την εφαρμογή και θα δοκιμαστεί περαιτέρω σε επόμενες δοκιμές για να διαπιστωθεί αν μπορεί να επιτύχει υψηλότερες θερμοκρασίες.

Τα RT27 και SP25A8 έχουν το πλεονέκτημα ότι παρουσιάζουν σταθερά υψηλές θερμοκρασίες (Σχ. 4.10). Ωστόσο, οι θερμοκρασίες δεν είναι όσο υψηλές απαιτείται από τις ανάγκες της εφαρμογής. Απαιτούνται περαιτέρω δοκιμές για να διαπιστωθεί αν μπορούν να αξιοποιήσουν μεγαλύτερο τμήμα της διφασικής περιοχής και να πραγματοποιήσουν μεγαλύτερο κύκλο φόρτισης κι αποφόρτισης.

#### 4.5.3. Σενάριο 2<sup>ο</sup>

Για όλους τους παραπάνω λόγους που εξηγήθηκαν στο σενάριο 1, είναι απαραίτητο να εξετάσουμε τα παραπάνω υλικά για συνθήκες που να ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματικότητα. Το σενάριο 2 που ακολουθεί, εφαρμόζει μεταβλητό μοντέλο κατανάλωσης που περιγράφει πιο ρεαλιστικά της ανάγκες της οικίας σε θερμό νερό.

##### 4.5.3.1. Καθορισμός παραμέτρων

Στην 2η παραμετρική εξέταση του μοντέλου, δοκιμάζουμε κάθε ένα από τα υλικά για λειτουργία την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου με μεταβλητή κατανάλωση θερμού νερού. Το μεταβλητό μοντέλο κατανάλωσης που χρησιμοποιείται παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.4.4.

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παραμένουν ίδιες με αυτές του σεναρίου 1. Οι παράμετροι για αυτήν τη δοκιμή παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5.

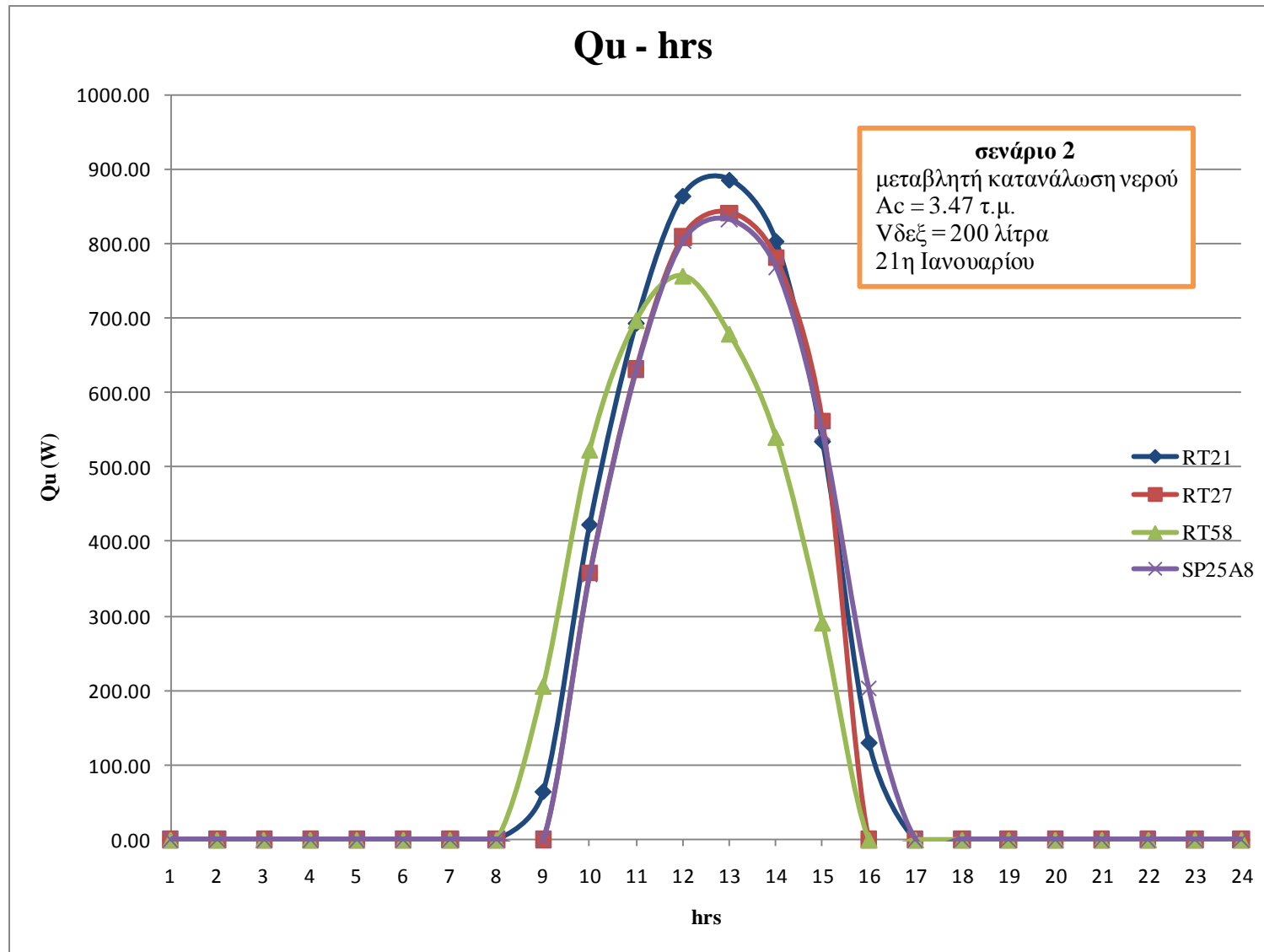
**Πίνακας 4.5.** Παράμετροι για το σενάριο 2

<b>Σενάριο 2</b>	
ημέρα	21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου
Συλλεκτική επιφάνεια $A_c$	3.47 m <sup>2</sup>
Όγκος δεξαμενής $V_{δεδ}$	200 λίτρα
Κατανάλωση θερμού νερού	Μεταβλητή

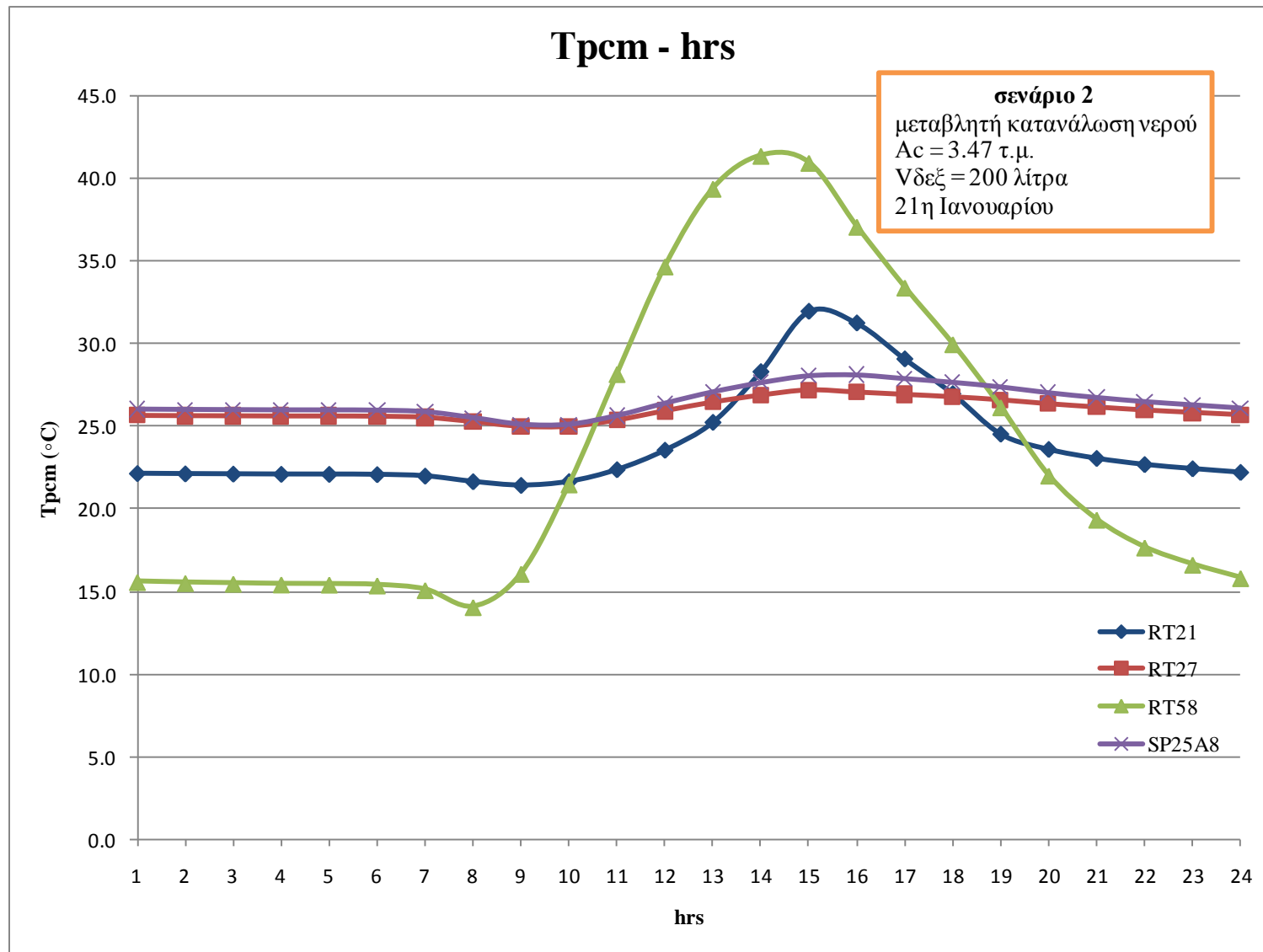
#### 4.5.3.2. Αποτελέσματα

Μετά από εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στην § 4.5.1. σε υπολογιστικά φύλλα του προγράμματος excel, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για το σενάριο 2 (πίνακας 11 του παραρτήματος). Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα της πραγματικά αποδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη,  $Q_u$  (Σχ. 4.15) και της θερμοκρασίας που αναπτύσσει κάθε ΥΑΦ,  $T_{pcm}$  (Σχ. 4.16) συναρτήσει των ωρών του 24ώρου. Για κάθε υποψήφιο υλικό, απεικονίζεται η ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας και το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας που προκύπτει για το δεδομένο σενάριο (Σχ. 4.17-4.20).

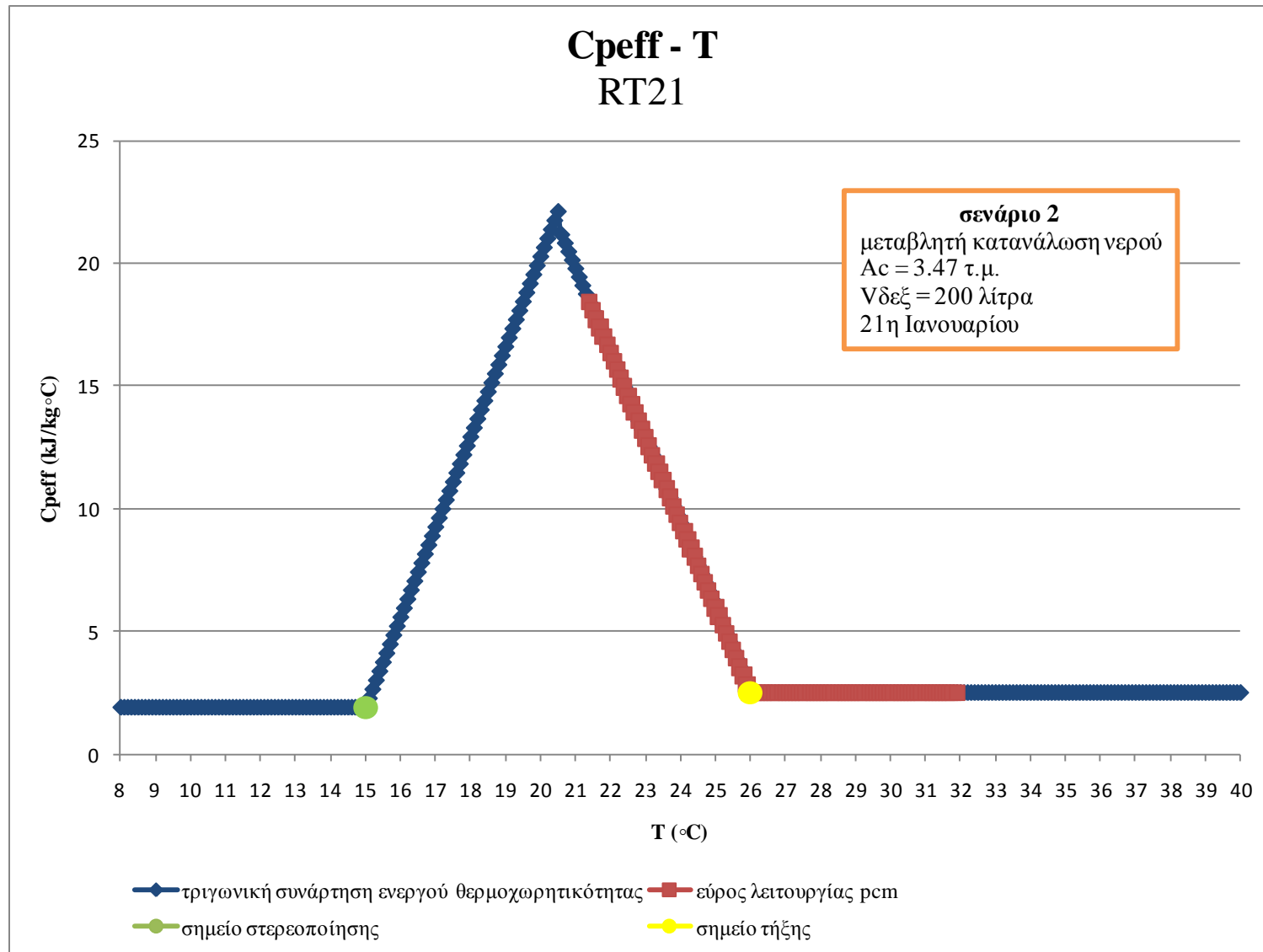




Σχ. 4.15. Πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 2)

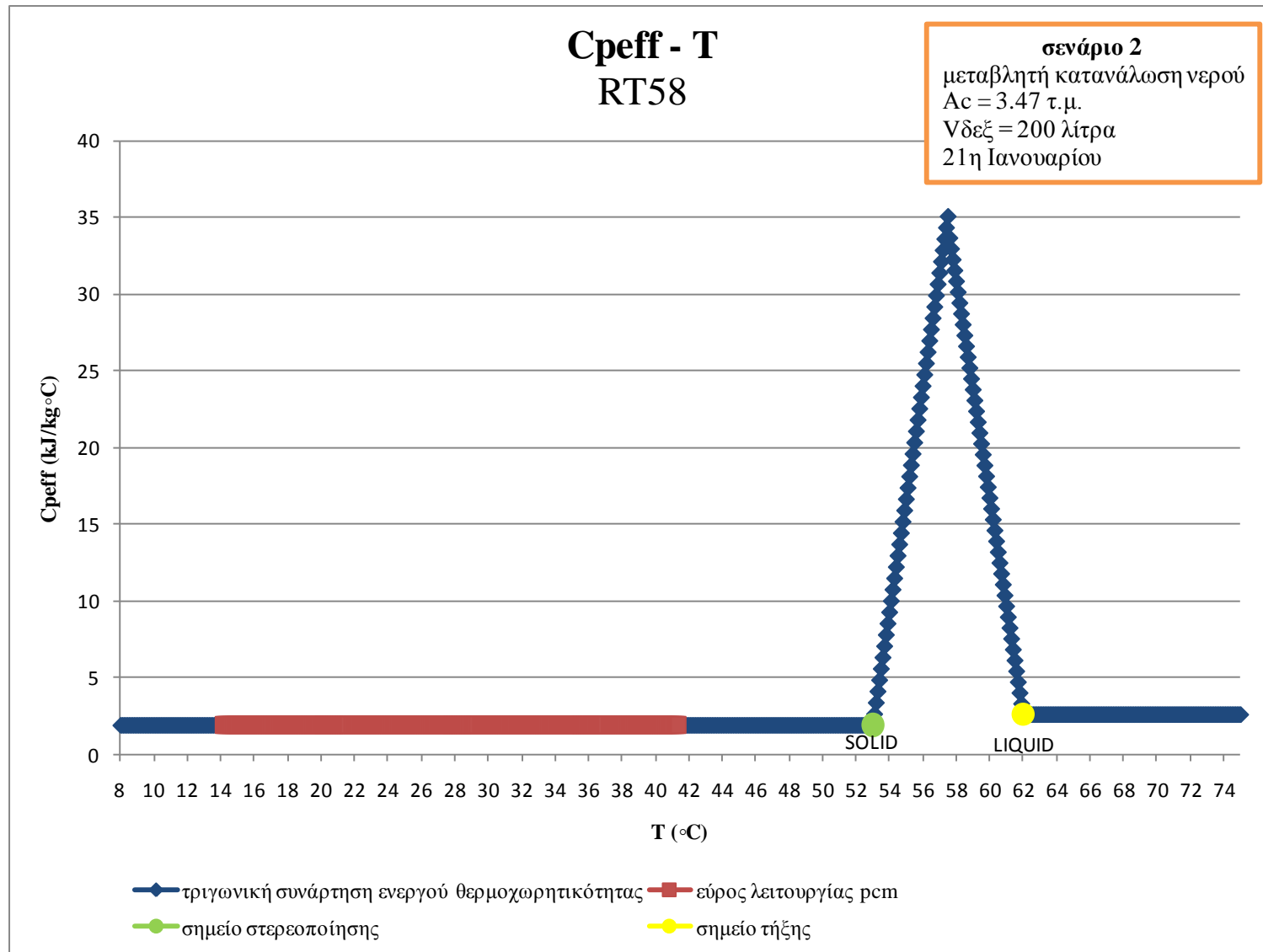


Σχ. 4.16. Θερμοκρασία υλικών συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 2)

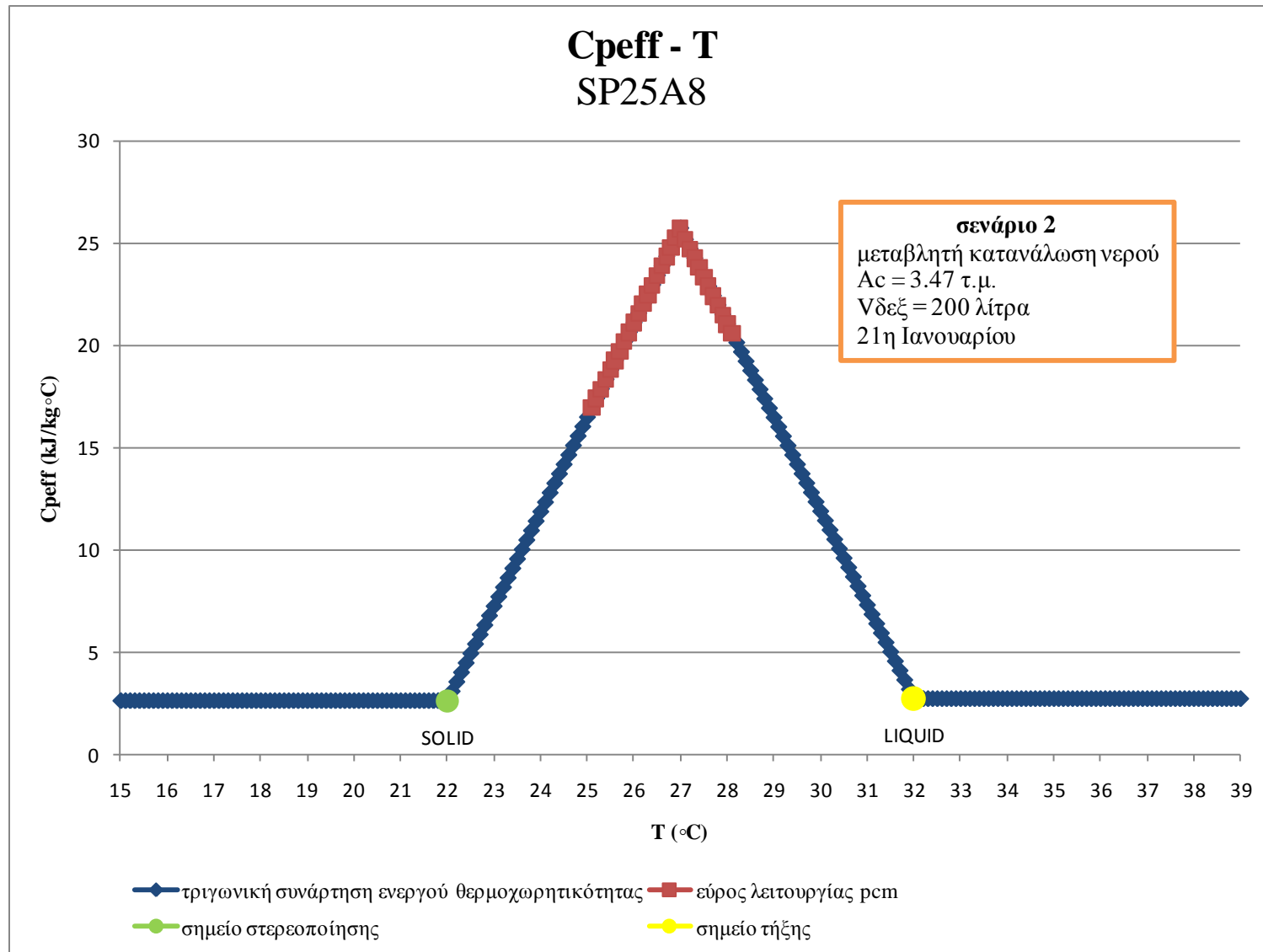


Σχ. 4.17. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT21 (σενάριο 2)





Σχ. 4.19. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT58 (σενάριο 2)



Σχ. 4.20. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας SP25A8 (σενάριο 2)

### 4.5.3.3. Παρατηρήσεις

#### Έλεγχος ορθότητας των αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με όσα έχουν ειπωθεί στην § 4.5.2.3. και τις παρατηρήσεις που έχουν γίνει για το σενάριο 1, η πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς του συλλέκτη παρουσιάζει μέγιστο για όλα τα υλικά τις ώρες της έντονης ηλιοφάνειας και μηδενίζεται για τις ώρες που οι απώλειες του συλλέκτη είναι μεγαλύτερες από το κέρδος λόγω ηλιοφάνειας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το σενάριο 2, διαφέρουν ελάχιστα από τα αντίστοιχα του σεναρίου 1. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4.15, η πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς του συλλέκτη είναι μέγιστη στη 1 μ.μ. (13) που υπάρχει έντονη ηλιοφάνεια και μηδενική τις ώρες 5-12 μ.μ. (17 – 24) και 1-8 π.μ. όπου την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.

Όπως έχει ειπωθεί ανωτέρω, η τιμή της  $T_{fi}$  κάθε ώρα, έχει υποτεθεί ίση με την τιμή του υλικού την προηγούμενη ώρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η  $T_{fi}$  σε σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος, τόσο μεγαλύτερος είναι ο όρος των απωλειών του συλλέκτη και συνεπώς τόσο μικρότερη η τιμή της  $Q_u$ . Όπως και στο σενάριο 1, τα υλικά που επιτυγχάνουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες (βλ. σχήμα 4.16) μια ορισμένη ώρα του 24ώρου έχουν υψηλότερη  $T_{fi}$ , και συνεπώς αυξημένο όρο απωλειών, οπότε μικρότερη τιμή της  $Q_u$ . Τις ώρες όπου δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, ο συλλέκτης έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κι επομένως ακτινοβολεί ενέργεια. Είναι λογικό λοιπόν, τις πρώτες πρωινές και τις βραδινές ώρες ο όρος των απωλειών να είναι μεγαλύτερος και η  $Q_u$  να μηδενίζεται.

Γενικά, παρατηρούμε ότι η αλλαγή του μοντέλου κατανάλωσης (σενάριο 2) δεν επέφερε ποιοτικά καμία αλλαγή στη συμπεριφορά των υλικών ως προς τη θερμοκρασία που επιτυγχάνουν κι επομένως την πραγματικά αποδιδόμενη ισχύ του συλλέκτη. Οι μόνες διαφορές ανάμεσα στη θερμοκρασία για το σενάριο 1 και 2, είναι ποσοτικές κι αφορούν το θερμοκρασιακό εύρος που επιτυγχάνουν τα υλικά, δηλαδή την υψηλότερη και τη χαμηλότερη θερμοκρασία του κύκλου τους. Οι διαφορές αυτές είναι πολύ μικρές για κάθε ώρα του 24ώρου. Αυτό είναι λογικό, αν αναλογιστεί κανείς ότι το μόνο που άλλαξε είναι η κατανομή στην κατανάλωση θερμού νερού κι όχι οι βασικές παράμετροι του συστήματος όπως η επιφάνεια συλλέκτη, ο όγκος της δεξαμενής ή ημέρα της δοκιμής. Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα δύο μοντέλα

κατανάλωσης που συγκρίθηκαν έχουν την ίδια συνολική ημερήσια κατανάλωση και διαφέρουν ως προς την ωριαία κατανομή.

## Τα υποψήφια υλικά ως ΥΑΦ

Η δοκιμή με τις συνθήκες του σεναρίου 2, έδειξε ότι το RT58 όπως και στο σενάριο 1, δε συμπεριφέρεται ως ΥΑΦ μιας και δεν υπόκειται σε αλλαγή φάσης (Σχ. 4.19). Η μετάβαση από σταθερή σε μεταβλητή κατανάλωση δεν επέφερε σημαντικές αλλαγές στη συμπεριφορά του ως ΥΑΦ, παρά μόνο μια ελάχιστη διαφορά στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι πρέπει να επιτευχθούν υψηλότερες θερμοκρασίες ώστε να καταφέρουμε να εισέλθει το RT58 στη διφασική περιοχή. Κάτι τέτοιο μένει να αποδειχθεί σε επόμενες δοκιμές.

Το RT21 για το σενάριο 2, εισέρχεται στη διφασική περιοχή και στη συνέχεια τήκεται πλήρως αποθηκεύοντας λανθάνουσα κι αισθητή θερμότητα (Σχ. 4.17). Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει για τα σενάρια 1 και 2 κατά τη διάρκεια του 24ώρου δεν είναι ικανοποιητικές για τη ζητούμενη εφαρμογή. Είναι λοιπόν σκόπιμο να αλλάξουμε τις μεταβλητές του προβλήματος ώστε να επιτευχθούν υψηλότερες θερμοκρασίες.

Όπως και στο σενάριο 1, τα RT27 και SP25A8 παραμένουν στη διφασική περιοχή για όλο το 24ώρο, χωρίς να στερεοποιούνται με αποτέλεσμα να μην μπορούν να αποδώσουν τη θερμότητα που έχουν αποθηκεύσει στο ρευστό. Στόχος μας είναι η αύξηση των θερμοκρασιών που επιτυγχάνουν ώστε αν είναι δυνατόν, να λιώσουν πλήρως.

## Καταλληλότητα των υποψήφιων υλικών για την εφαρμογή

Μέχρι στιγμής, οι δύο πρώτες δοκιμές για τα σενάρια 1 και 2, έδειξαν ότι το RT58 επιτυγχάνει υψηλές θερμοκρασίες τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας αλλά χαμηλές τις υπόλοιπες ώρες (Σχ. 4.10 και Σχ. 4.16). Κάτι τέτοιο, είναι λογικό, εφόσον παραμένει στην ίδια φάση και όλη η θερμότητα που απορροφά χρησιμεύει για



αύξηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, δε συμπεριφέρεται ως ΥΑΦ, γι' αυτό και μέχρι στιγμής κρίνεται ακατάλληλο για την εφαρμογή.

Το RT21 στο σενάριο 2 παρουσιάζει συμπεριφορά όμοια με το σενάριο 1 με υψηλές θερμοκρασίες τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας και χαμηλές τις υπόλοιπες ώρες. Η διαφοράς στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας για τα δύο πρώτα σενάρια είναι μικρές (Σχ. 4.10 και Σχ. 4.16). Μέχρι στιγμής κρίνεται κατάλληλο για την εφαρμογή και θα δοκιμαστεί περαιτέρω σε επόμενες δοκιμές για να διαπιστωθεί αν μπορεί να επιτύχει υψηλότερες θερμοκρασίες.

Όπως και στο σενάριο 1, τα RT27 και SP25A8 παρουσιάζουν σταθερά υψηλές θερμοκρασίες (Σχ. 4.16) αλλά όχι όσο υψηλές απαιτείται για τις ανάγκες της εφαρμογής. Απαιτούνται περαιτέρω δοκιμές για να διαπιστωθεί αν μπορούν να αξιοποιήσουν μεγαλύτερο τμήμα της διαφασικής περιοχής και να πραγματοποιήσουν μεγαλύτερο κύκλο φόρτισης κι αποφόρτισης.

#### 4.5.4. Σενάριο 3<sup>ο</sup>

Για τους λόγους που εξηγήθηκαν στην § 4.5.3.3, πρέπει να γίνουν αλλαγές στις μεταβλητές του προβλήματος έτσι ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία που επιτυγχάνουν τα υλικά. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε με αύξηση της επιφάνειας του συλλέκτη, είτε με μείωση του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης. Στην 3<sup>η</sup> δοκιμή εξετάζεται η πρώτη από τις δύο λύσεις.

##### 4.5.4.1. Καθορισμός παραμέτρων

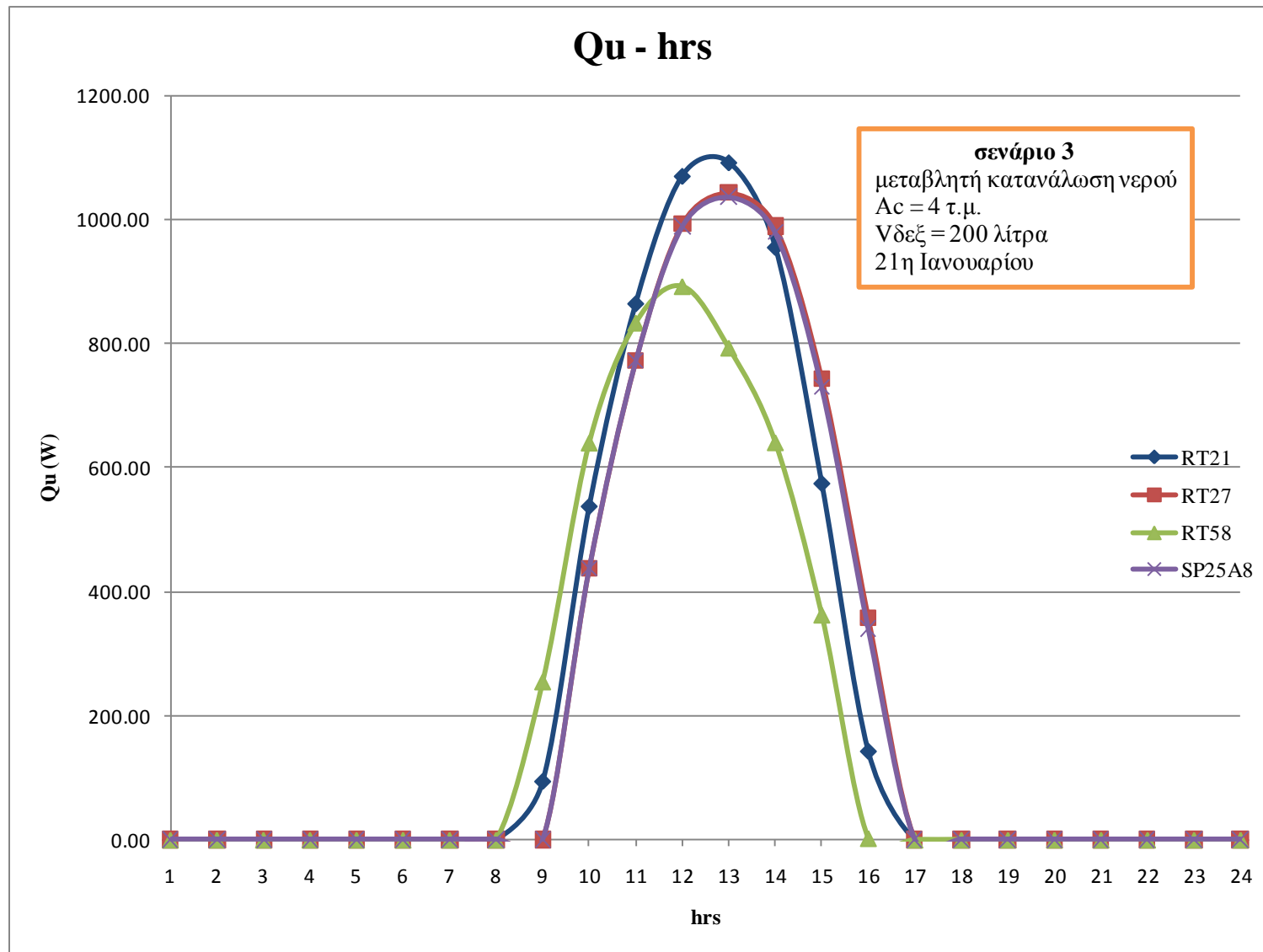
Η επιφάνεια του συλλέκτη για αυτή τη δοκιμή αυξάνεται από τα 3.47 στα 4 τ.μ., ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι είναι αυτές του σεναρίου 2. Ο πίνακας 4.6 συνοψίζει τις παραμέτρους του προβλήματος γι' αυτή τη δοκιμή.

**Πίνακας 4.6.** Παράμετροι για το σενάριο 3

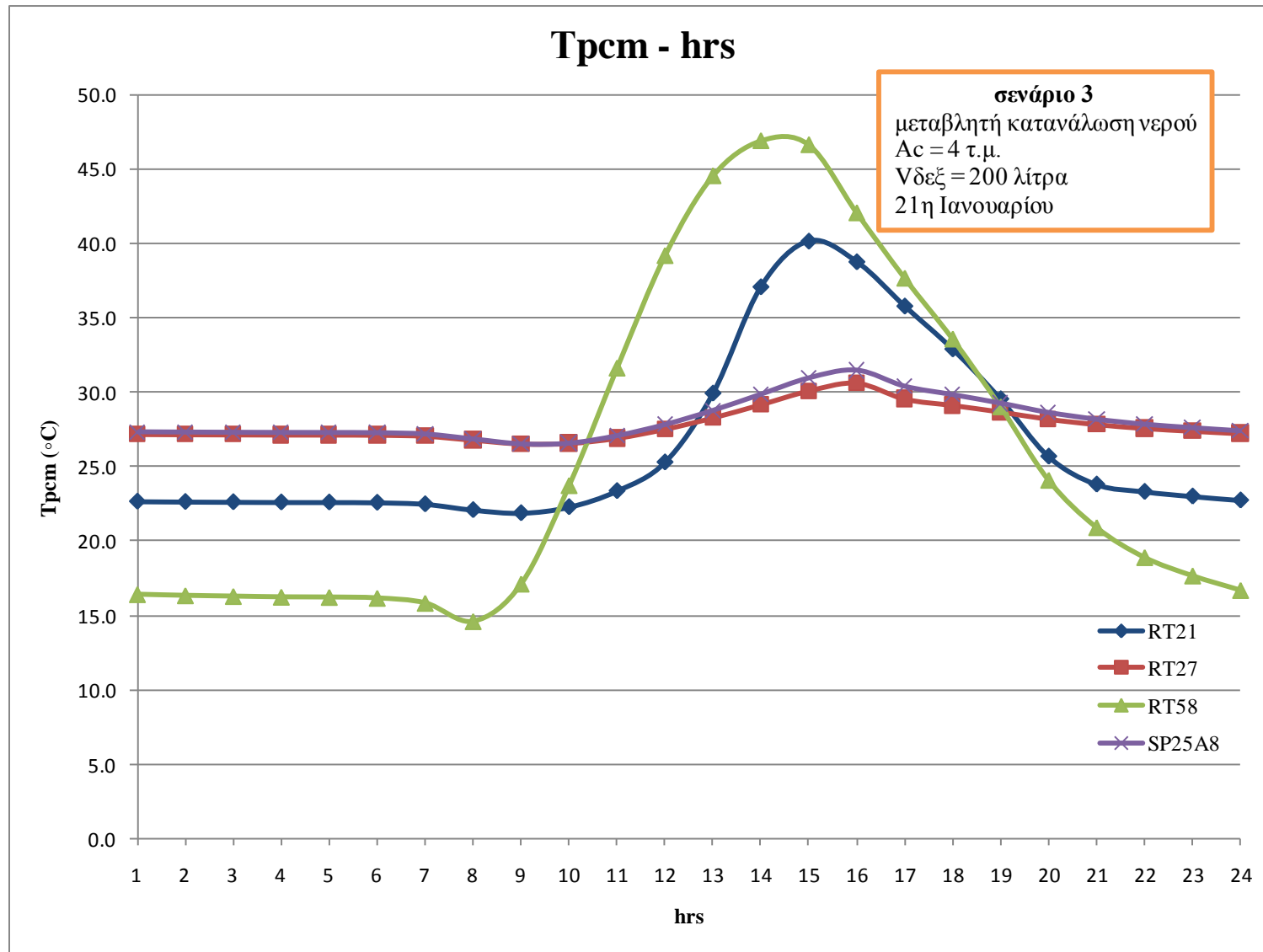
<b>Σενάριο 2</b>	
ημέρα	21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου
Συλλεκτική επιφάνεια $A_c$	4 m <sup>2</sup>
Όγκος δεξαμενής $V_{δεξ}$	200 λίτρα
Κατανάλωση θερμού νερού	Μεταβλητή

#### 4.5.4.2. Αποτελέσματα

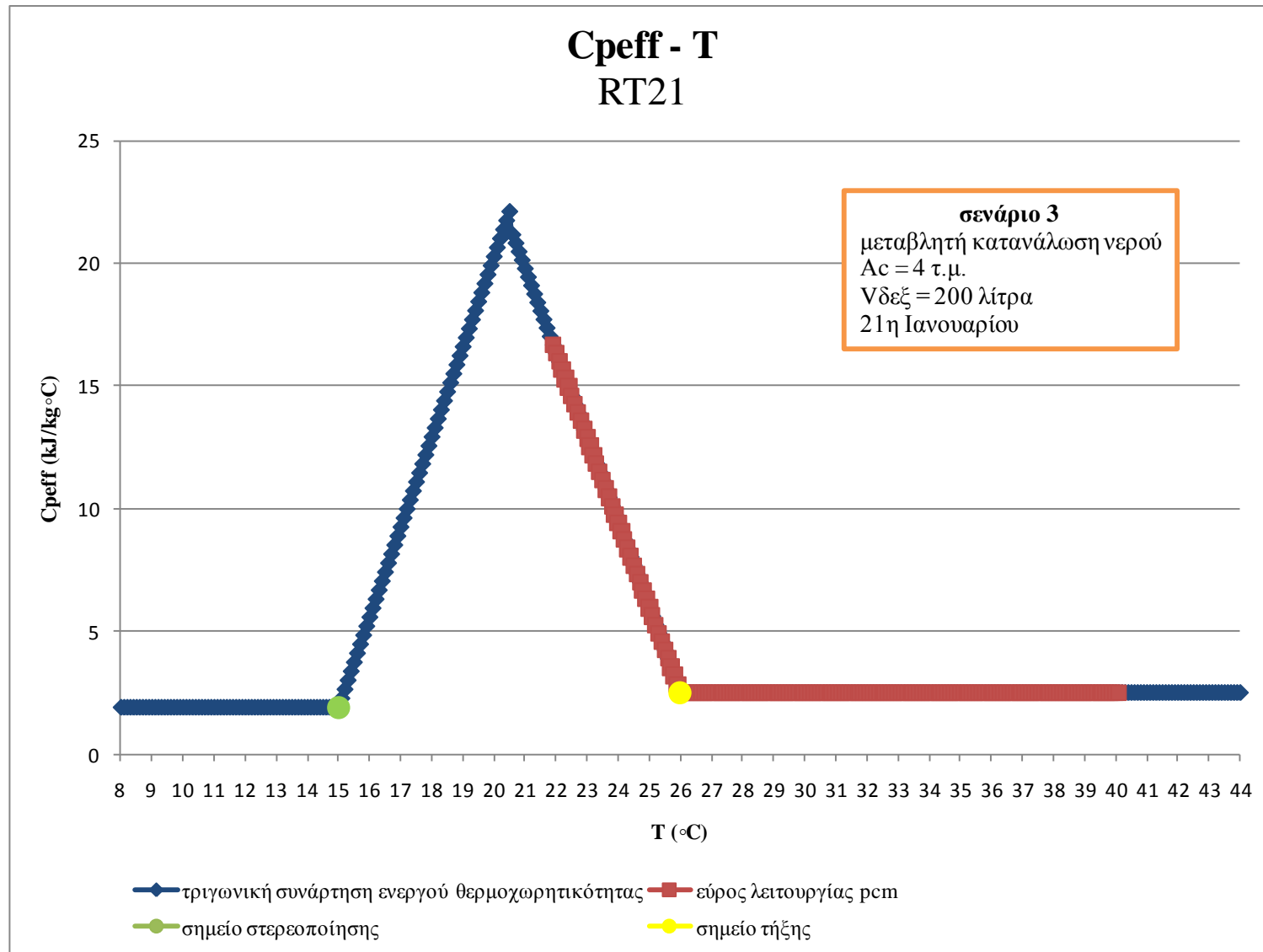
Μετά από εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στην § 4.5.1. σε υπολογιστικά φύλλα του προγράμματος excel, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για το σενάριο 3. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα της πραγματικά αποδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη,  $Q_u$  (Σχ. 4.21) και της θερμοκρασίας που αναπτύσσει κάθε ΥΑΦ,  $T_{pcm}$  (Σχ. 4.22) συναρτήσει των ωρών του 24ώρου. Για κάθε υποψήφιο υλικό, απεικονίζεται η ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας και το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας που προκύπτει για το σενάριο 3 (Σχ. 4.23 - 4.26). Ο πίνακας 12 του παραρτήματος δίνει τα ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την υπολογιστική διαδικασία.



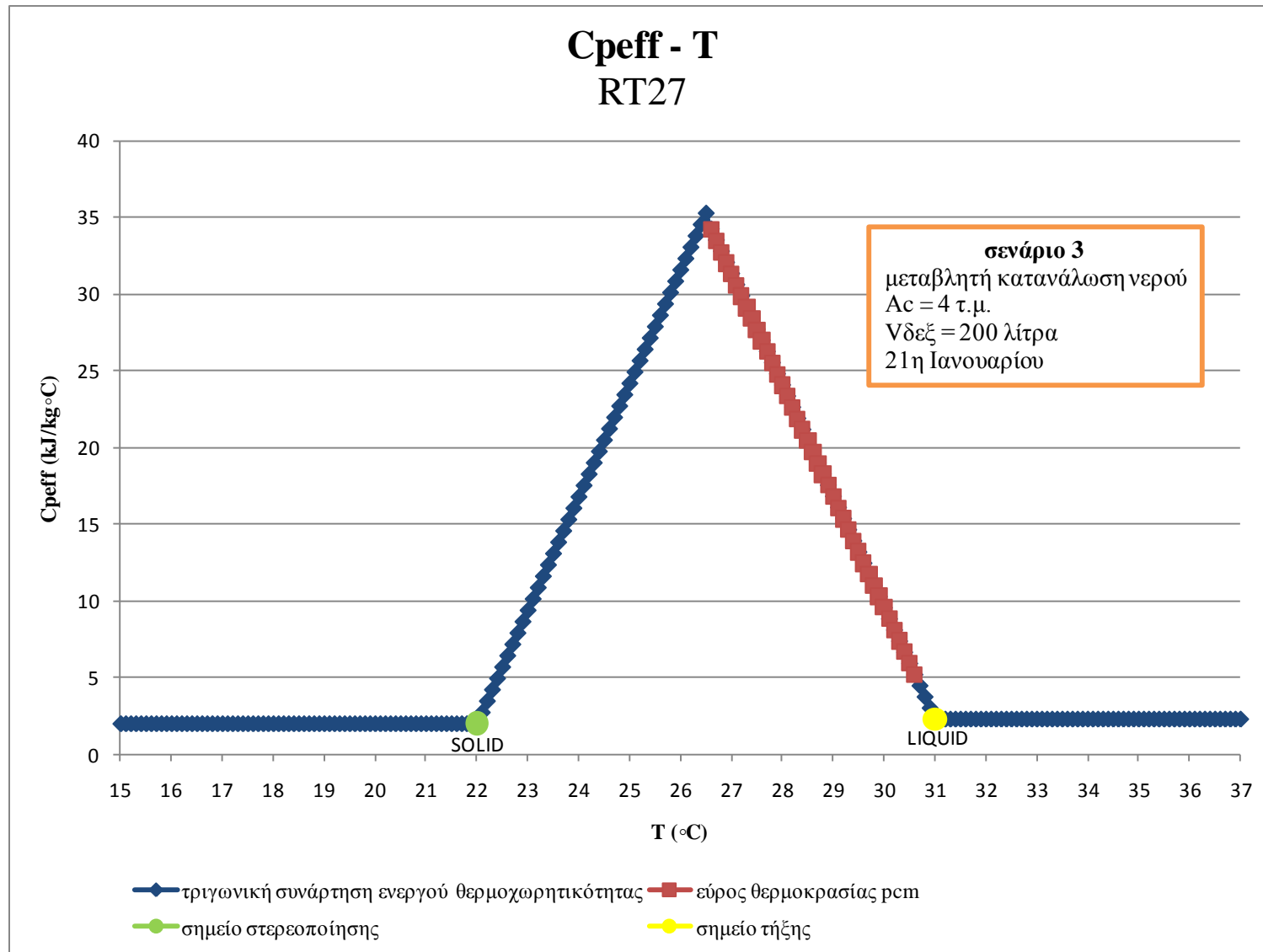
Σχ. 4.21. Πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη συναρτήσεως των ωρών του 24ώρου (σενάριο 3)



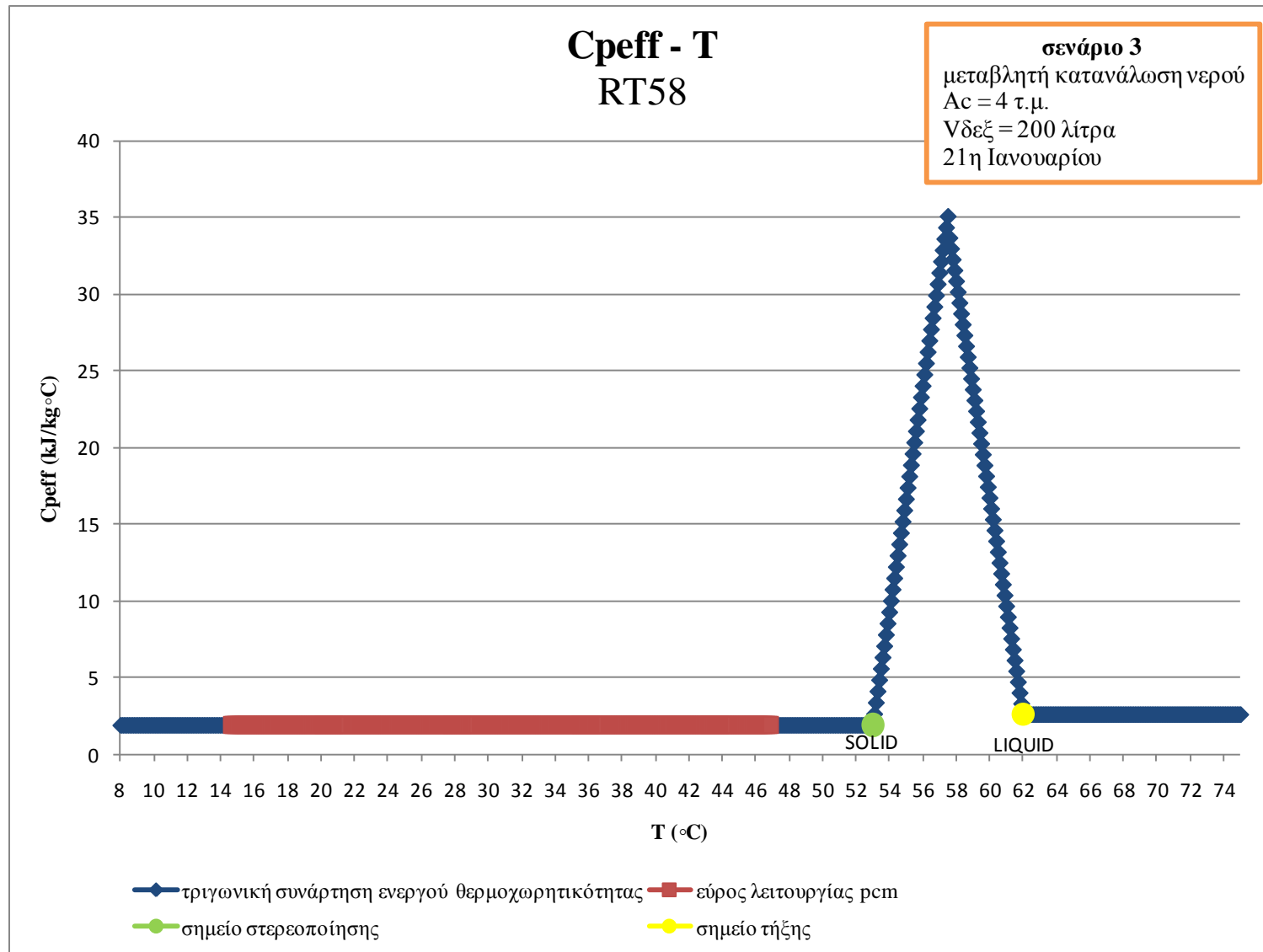
Σχ. 4.22. Θερμοκρασία υλικών συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 3)



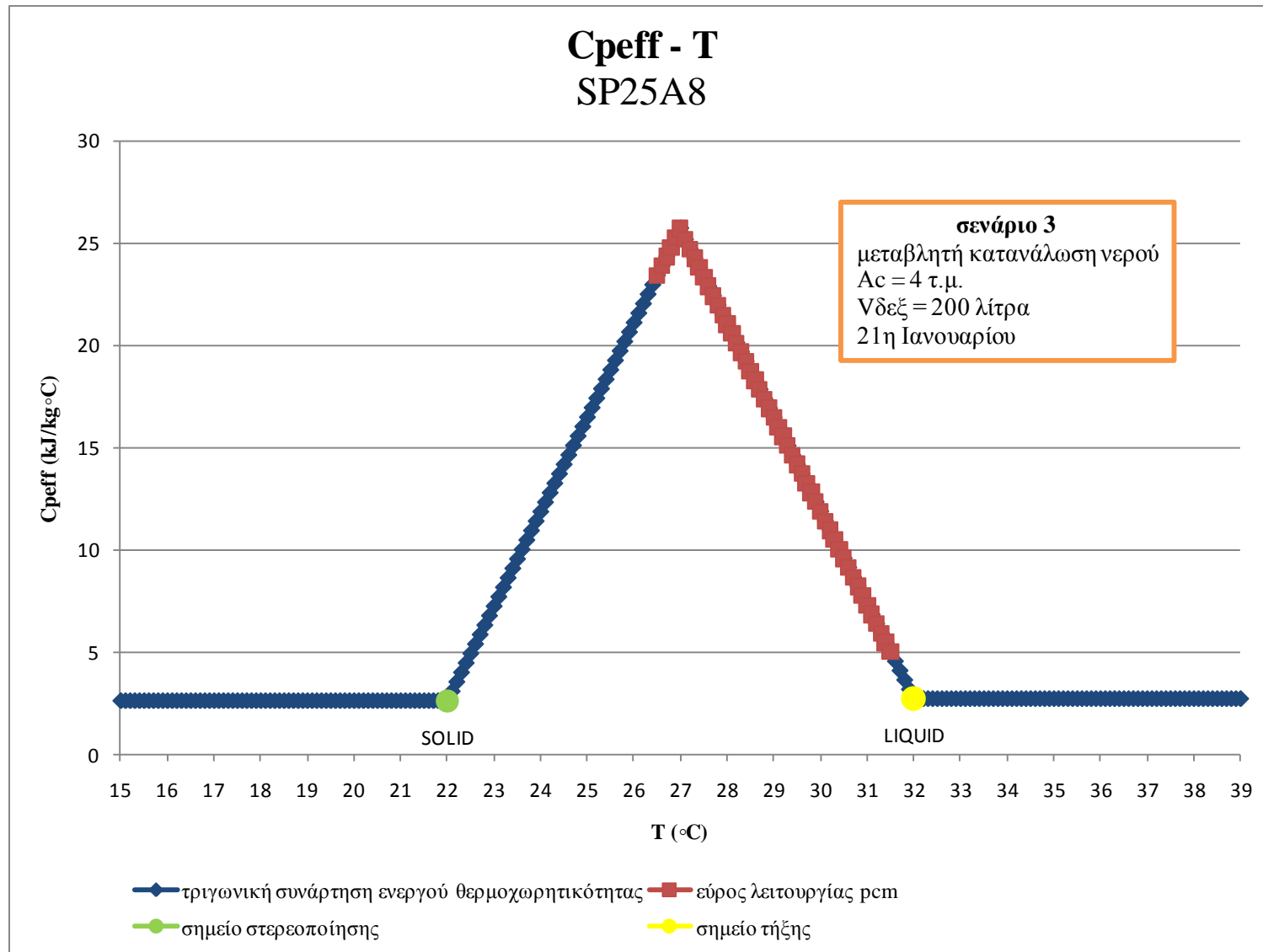
Σχ. 4.23. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT21 (σενάριο 3)



Σχ. 4.24. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT27 (σενάριο 3)



Σχ. 4.25. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT58 (σενάριο 3)



Σχ. 4.26. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας SP25A8 (σενάριο 3)



#### 4.5.4.3. Παρατηρήσεις

##### Έλεγχος ορθότητας των αποτελεσμάτων

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των σεναρίων 2 και 3, παρατηρούμε ότι όπως ήταν αναμενόμενο, τις ώρες 9-14 που υπάρχει έντονη ηλιοφάνεια, ο μεγαλύτερος συλλέκτης του σεναρίου 3 αποδίδει μεγαλύτερη ωφέλιμη ισχύ. Η τιμή της  $Q_u$  για τις μεσημεριανές ώρες είναι αρκετά μεγαλύτερη της αντίστοιχης στο σενάριο 2. Η μορφή του διαγράμματος και η συμπεριφορά του κάθε υλικού δε διαφέρει από τα σενάρια 1 και 2, με το RT58 να έχει τις μεγαλύτερες και το RT21 τις μικρότερες απώλειες, οπότε τη μικρότερη και τη μεγαλύτερη τιμή της  $Q_u$  αντίστοιχα.

Οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνουν τα υλικά για το σενάριο 3, είναι όπως αναμενόταν, υψηλότερες σε σχέση με αυτές του σεναρίου 2, ειδικά τις ώρες της έντονης ηλιοφάνειας. Το RT21 αυξάνει τη μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνει από τους 31.9 στους 40.1 το RT27 από τους 27.2 στους 30.6, το RT58 από τους 41.4 στους 46.9 και το SP25A8 από τους 28.1 στους 31.5 °C. Τις βραδινές ώρες όταν οι απώλειες του συλλέκτη είναι μεγάλες, τα δύο σενάρια δίνουν παραπλήσιες θερμοκρασίες, με το σενάριο 2 να δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Κάτι τέτοιο είναι λογικό, μιας και στο σενάριο 3 επιτυγχάνονται γενικά μεγαλύτερες θερμοκρασίες, οπότε τις βραδινές ώρες αυξάνεται ο όρος των απωλειών προς το περιβάλλον.

Όσον αφορά τους κύκλους λειτουργίας των υλικών, η αύξηση της επιφάνειας του συλλέκτη δεν επέφερε ποιοτικές αλλαγές στη συμπεριφορά των υλικών. Όπως παρατηρούμε στα σχήματα 4.23 - 4.26, τα υλικά εκτελούν τους ίδιους κύκλους φόρτισης κι αποφόρτισης με τα σενάρια 1 και 2, με τη διαφορά ότι επιτυγχάνουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Αυτό ήταν αναμενόμενο, μιας και η μόνη παράμετρος που άλλαξε σε σχέση με το σενάριο 2, ήταν η συλλεκτική επιφάνεια. Για τα σχήματα 4.23 - 4.26 ισχύουν τα σχόλια που έχουν γίνει για το σενάριο 2 (§ 4.5.3.3).

## Τα υποψήφια υλικά ως ΥΑΦ

Όπως φαίνεται κι από τα σχήματα 4.23 - 4.26, η αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας από το σενάριο 2 στο 3, επέφερε μόνο ποσοτικές αλλαγές στους κύκλους που εκτελούν τα ΥΑΦ.

Πιο συγκεκριμένα, το RT21 συμπεριφέρεται όπως και στο σενάριο 2 εκτελώντας κύκλο ανάμεσα στη διφασική περιοχή και την αισθητή περιοχή του υγρού. Η μόνη διαφορά στο σενάριο 3, είναι ότι με την αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας, ενώ το υλικό ξεκινά από παραπλήσια θερμοκρασία στη διφασική περιοχή, καταλήγει σε υψηλότερη θερμοκρασία στην αισθητή περιοχή. Συνεπώς, με την αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας καταφέραμε να διευρύνουμε τον κύκλο λειτουργίας του RT21 και να επιτύχουμε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Επίσης, όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4.24, το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του RT27 μετατοπίστηκε από τους 25-27.2 στο σενάριο 2, στους 26.6-30.6 °C στο σενάριο 3, παραμένοντας στη διφασική περιοχή.

Ομοίως, το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του RT58 μετατοπίστηκε από τους 14.1-41.4, στους 14.6-46.9 °C παραμένοντας στη φάση του στερεού όλο το 24ώρο. Και σε αυτήν τη δοκιμή το RT58 δε συμπεριφέρεται ως ΥΑΦ, οπότε μέχρι στιγμής είναι ακατάλληλο για να τοποθετηθεί σε ΣΑΛΘ.

Τέλος, το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας για το SP25A8 μετατοπίστηκε από τους 25.1-28.1 στο σενάριο 2, στους 26.5-31.5 °C στο σενάριο 3, παραμένοντας στη διφασική περιοχή.

Απ' όλα τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι κανένα υλικό δεν τήκεται και στερεοποιείται πλήρως, όπως θα ήταν το ιδανικό. Έτσι, απαιτείται περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών ώστε να διευρύνουν περισσότερο τον κύκλο φόρτισης κι αποφόρτισής τους.

## Καταλληλότητα των υποψήφιων υλικών για την εφαρμογή

Το RT58 στο σενάριο 3 παρουσίασε όπως αναμενόταν υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με το σενάριο 2. Ωστόσο, όπως και στα προηγούμενα δύο σενάρια, παραμένει μόνιμα στην αισθητή περιοχή του στερεού και παρουσιάζει

χαμηλές θερμοκρασίες τις ώρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Μέχρι στιγμής κρίνεται ακατάλληλο για τις ανάγκες της εφαρμογής.

Το RT21 στο σενάριο 3 παρουσιάζει συμπεριφορά όμοια με το σενάριο 2, με υψηλές θερμοκρασίες τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας και χαμηλές τις υπόλοιπες ώρες. Μέχρι στιγμής κρίνεται κατάλληλο για την εφαρμογή και θα δοκιμαστεί περαιτέρω σε επόμενες δοκιμές για να διαπιστωθεί αν μπορεί να επιτύχει υψηλότερες θερμοκρασίες.

Όπως και στο σενάριο 2, τα RT27 και SP25A8 παρουσιάζουν σταθερά υψηλές θερμοκρασίες αλλά όχι όσο υψηλές απαιτείται για τις ανάγκες της εφαρμογής. Απαιτούνται περαιτέρω δοκιμές για να διαπιστωθεί αν μπορούν να αξιοποιήσουν μεγαλύτερο τμήμα της διφασικής περιοχής και να πραγματοποιήσουν μεγαλύτερο κύκλο φόρτισης κι αποφόρτισης.

#### 4.5.5. Σενάριο 4<sup>ο</sup>

Για τους λόγους που εξηγήθηκαν στην § 4.5.3.3, πρέπει να γίνουν αλλαγές στις μεταβλητές του προβλήματος έτσι ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία που επιτυγχάνουν τα υλικά. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε με αύξηση της επιφάνειας του συλλέκτη, είτε με μείωση του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης. Στην παρούσα δοκιμή, αντί να αυξήσουμε περαιτέρω τη συλλεκτική επιφάνεια, αυξάνοντας το κόστος της εγκατάστασης, μειώνουμε τον όγκο της δεξαμενής κρατώντας τη συλλεκτική επιφάνεια του σεναρίου 3.

##### 4.5.5.1. Καθορισμός παραμέτρων

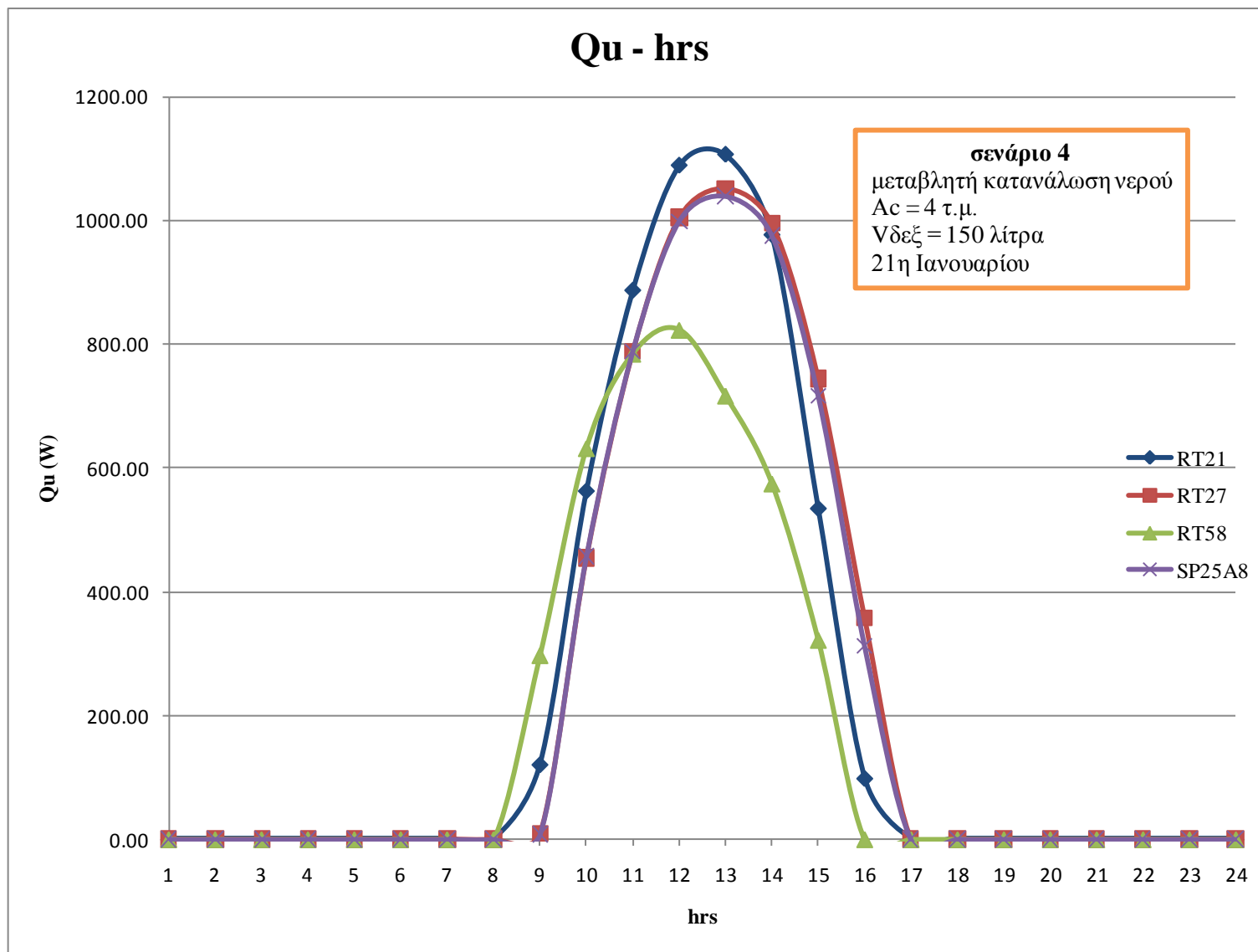
Για αυτή τη δοκιμή ο όγκος της δεξαμενής μειώνεται από τα 200 στα 150 λίτρα με αποτέλεσμα η μάζα κάθε ΥΑΦ που τοποθετούμε στη δεξαμενή να είναι 105 kg. Αφού η αρκετά μεγάλη συλλεκτική επιφάνεια θα θερμαίνει μικρότερη ποσότητα ΥΑΦ, αναμένουμε αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών. Οι υπόλοιπες παράμετροι για την παρούσα δοκιμή, είναι αυτές του σεναρίου 3 (πίνακας 4.7).

**Πίνακας 4.7.** Παράμετροι για το σενάριο 4

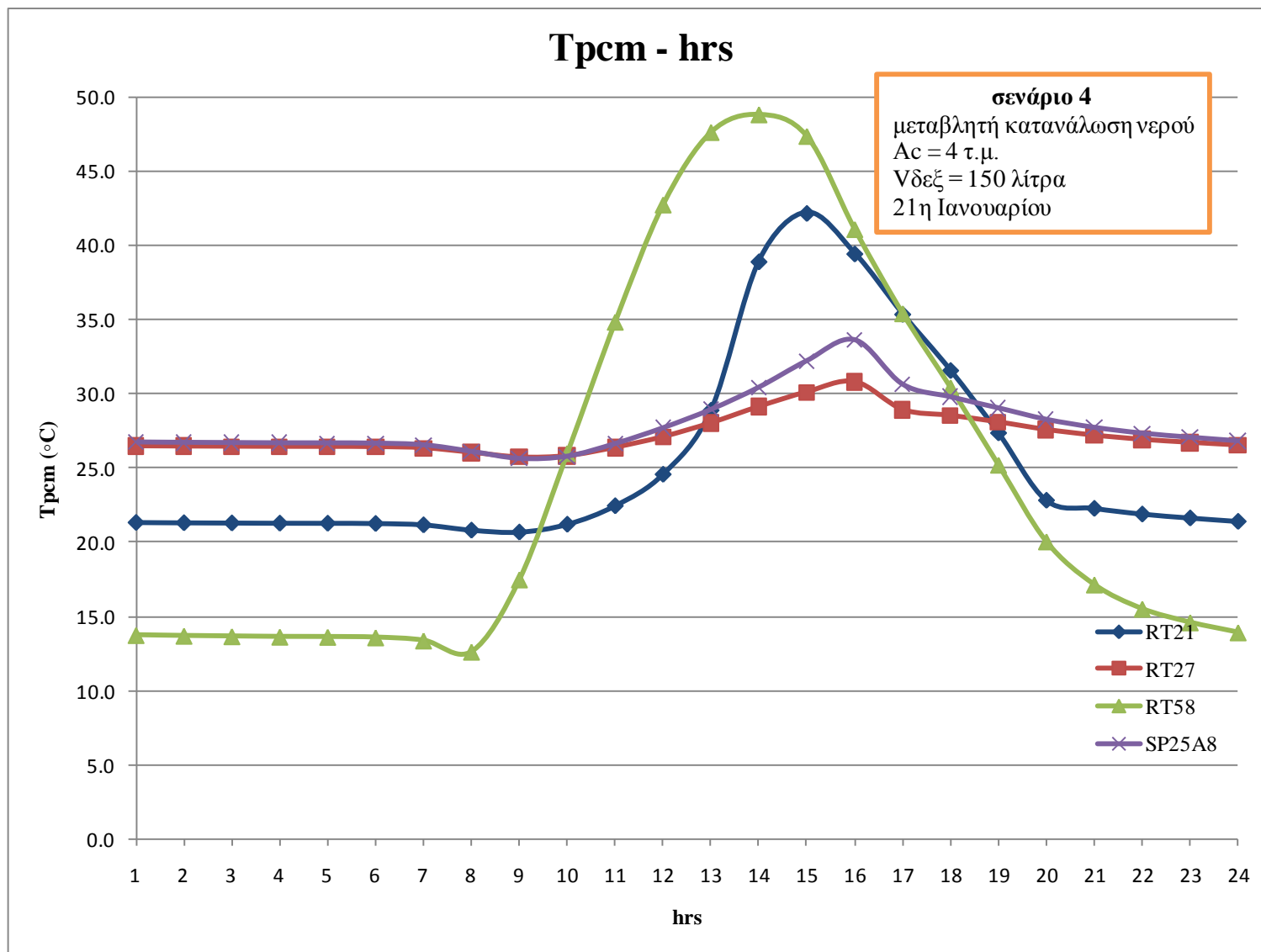
<b>Σενάριο 4</b>	
ημέρα	21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου
Συλλεκτική επιφάνεια $A_c$	4 m <sup>2</sup>
Όγκος δεξαμενής $V_{δεξ}$	150 λίτρα
Κατανάλωση θερμού νερού	Μεταβλητή

#### 4.5.5.2. Αποτελέσματα

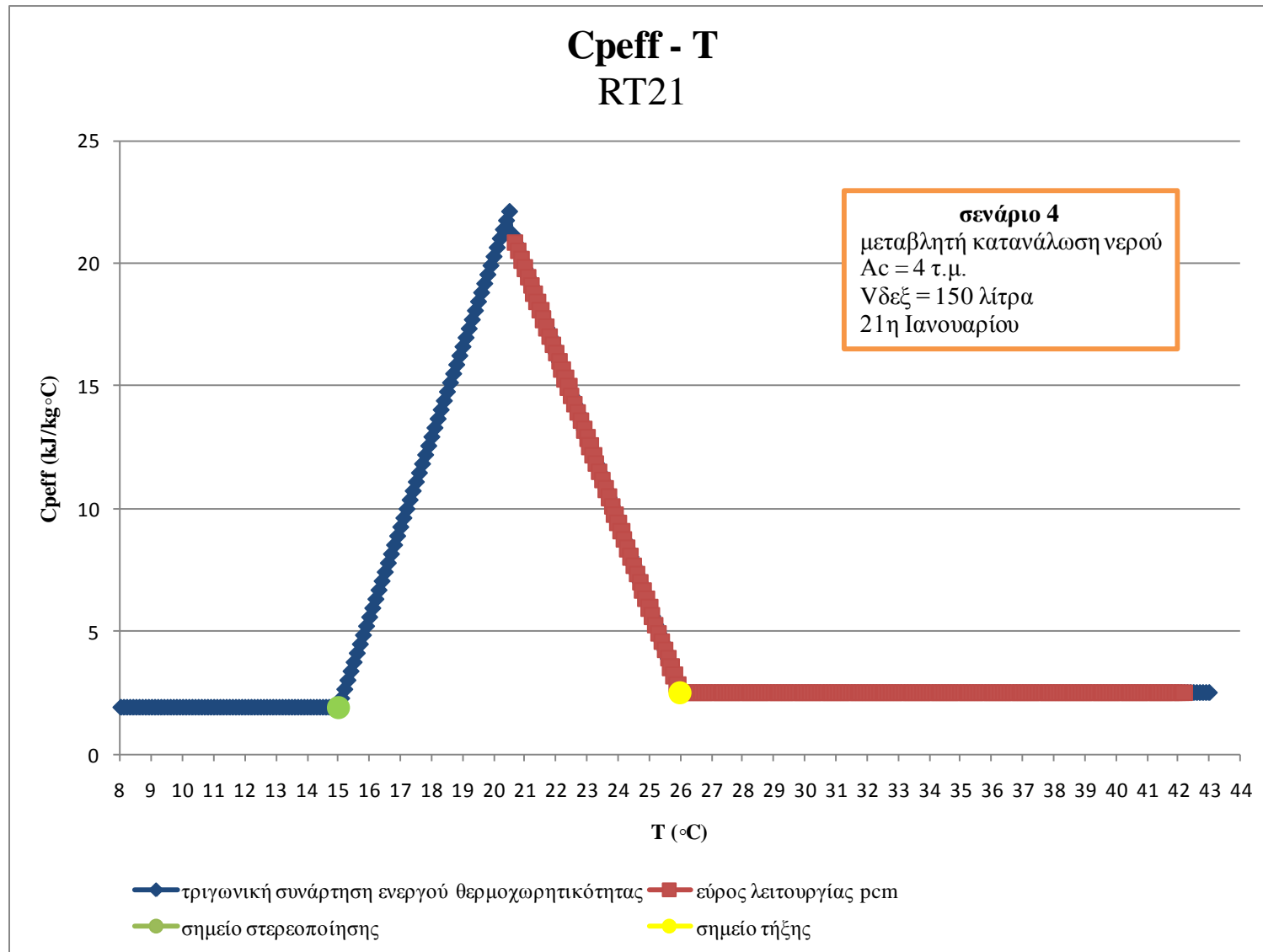
Μετά από εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στην § 4.5.1. σε υπολογιστικά φύλλα του προγράμματος excel, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για το σενάριο 4. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα της πραγματικά αποδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη,  $Q_u$  (Σχ. 4.27) και της θερμοκρασίας που αναπτύσσει κάθε ΥΑΦ,  $T_{rcm}$  (Σχ. 4.28) συναρτήσει των ωρών του 24ώρου. Για κάθε υποψήφιο υλικό, απεικονίζεται η ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας και το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας που προκύπτει για το σενάριο 4 (Σχ. 4.29 - 4.32). Ο πίνακας 13 του παραρτήματος δίνει τα ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την υπολογιστική διαδικασία.



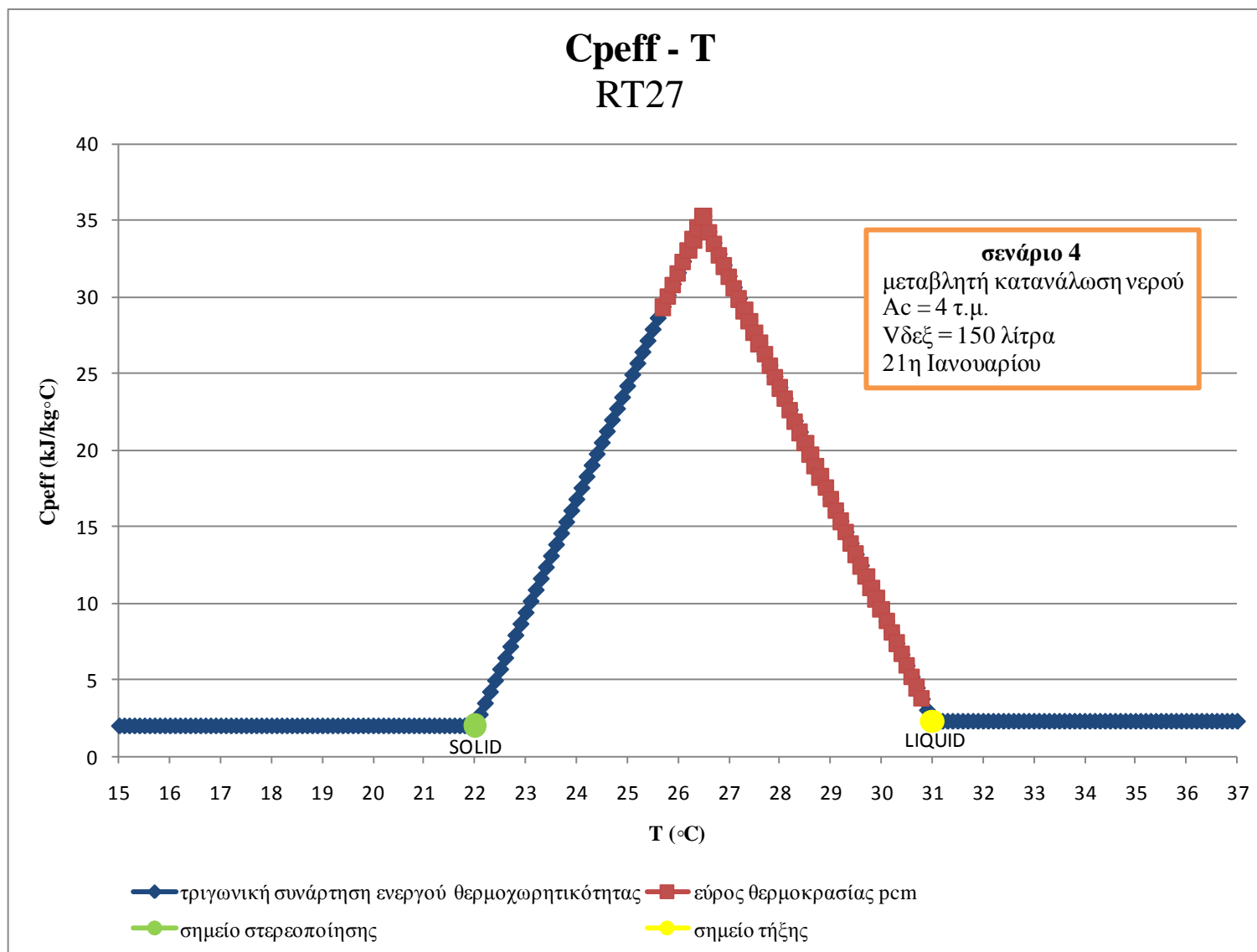
Σχ. 4.27. Πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 4)



Σχ. 4.28. Θερμοκρασία υλικών συναρτήσει των ωρών του 24ώρου (σενάριο 4)

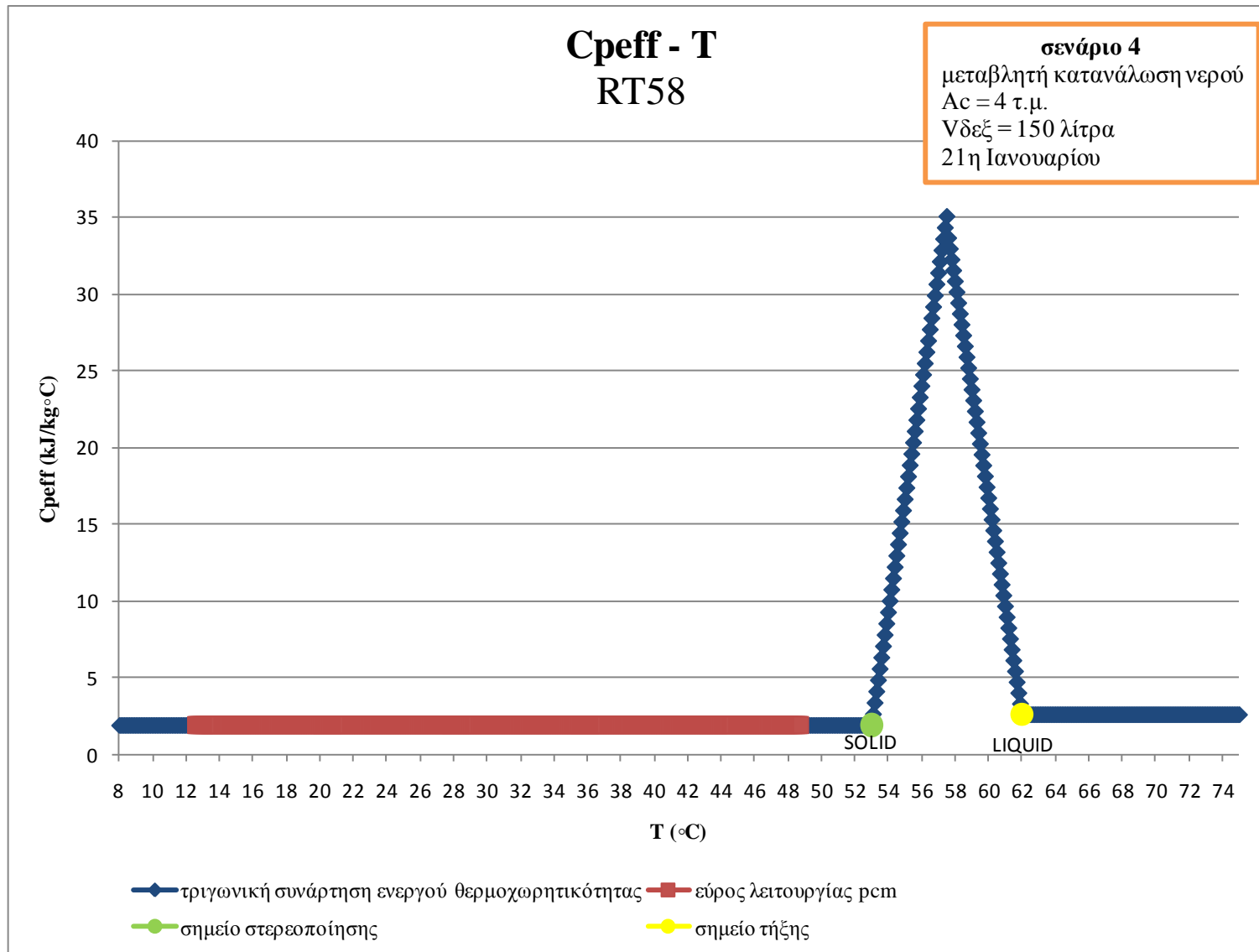


Σχ. 4.29. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT21 (σενάριο 4)

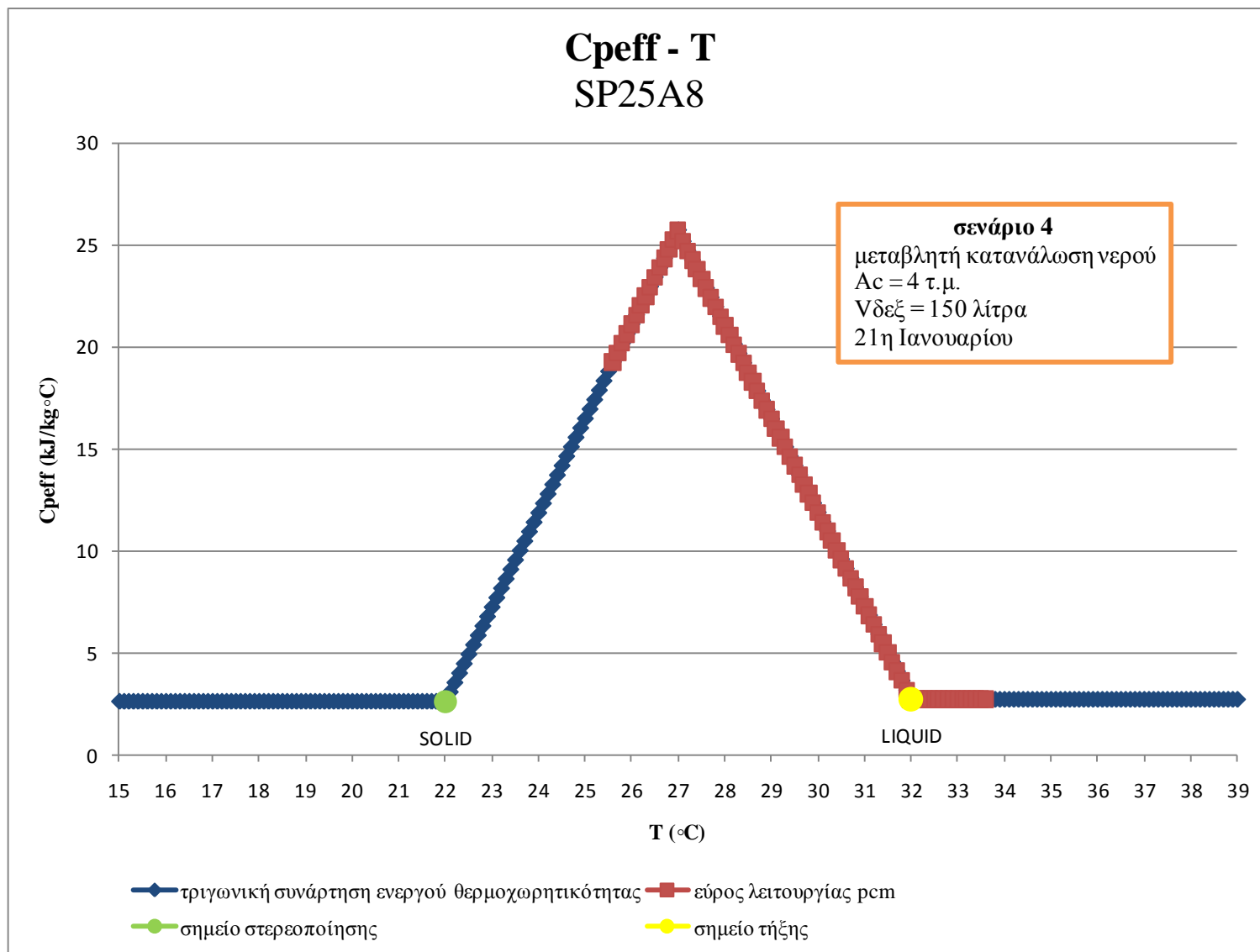


Σχ. 4.30. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT27 (σενάριο 4)





Σχ. 4.31. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας RT58 (σενάριο 4)



Σχ. 4.32. Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας SP25A8 (σενάριο 4)

#### 4.5.5.3. Παρατηρήσεις

##### Έλεγχος ορθότητας των αποτελεσμάτων

Όπως ήταν αναμενόμενο, στο σενάριο 4 παρουσιάζονται για όλα τα υλικά μεγαλύτερες τιμές της  $Q_u$ , σε σχέση με το σενάριο 3, μιας και ο ίδιος συλλέκτης θερμαίνει μικρότερη ποσότητα ΥΑΦ.

Οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνουν τα υλικά για το σενάριο 4, είναι όπως αναμενόταν, υψηλότερες σε σχέση με αυτές του σεναρίου 3, ειδικά τις ώρες της έντονης ηλιοφάνειας. Το RT21 αυξάνει τη μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνει από τους 40.1 στους 42.2, το RT27 από τους 30.6 στους 30.8, το RT58 από τους 46.9 στους 48.8 και το SP25A8 από τους 31.5 στους 33.6 °C. Τις βραδινές ώρες όταν οι απώλειες του συλλέκτη είναι μεγάλες, τα δύο σενάρια δίνουν παραπλήσιες θερμοκρασίες, με το σενάριο 4 να δίνει ελαφρώς μικρότερες θερμοκρασίες. Ο λόγος που παρουσιάζονται μικρότερα ελάχιστα θερμοκρασιών στο σενάριο 4, είναι ότι τα υλικά πλησιάζουν περισσότερο την τήξη κι απομακρύνονται από τη στερεοποίηση, επομένως αποδίδουν μικρότερη ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας στο υλικό κατά την αποφόρτιση.

##### Τα υποψήφια υλικά ως ΥΑΦ

Όπως φαίνεται κι από τα σχήματα 4.27 - 4.32, η μείωση του όγκου της δεξαμενής από το σενάριο 3 στο 4, επέφερε σημαντικές αλλαγές στους κύκλους που εκτελούν τα ΥΑΦ.

Πιο συγκεκριμένα, το RT21 συμπεριφέρεται όπως και στο σενάριο 3 εκτελώντας κύκλο ανάμεσα στη διφασική περιοχή και την αισθητή περιοχή του υγρού. Η διαφορά στο σενάριο 4, είναι ότι με τη μείωση του όγκου της δεξαμενής, ενώ το υλικό ξεκινά από παραπλήσια θερμοκρασία στη διφασική περιοχή, καταλήγει σε υψηλότερη θερμοκρασία στην αισθητή περιοχή. Συνεπώς, με την μείωση του όγκου της δεξαμενής διευρύνουμε τον κύκλο λειτουργίας του RT21 και επιτύχαμε υψηλότερες θερμοκρασίες στην αισθητή περιοχή του υγρού. Ωστόσο, αυτή η μετατόπιση περαιτέρω μέσα στην αισθητή περιοχή του υγρού, μας απομακρύνει

περισσότερο από τη στερεοποίηση, με αποτέλεσμα το ΥΑΦ να μη μπορεί να αποδώσει τη λανθάνουσα θερμότητα που αποθηκεύει.

Επίσης, όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4.30, το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του RT27 μετατοπίστηκε από τους 26.6-30.6 στο σενάριο 3, στους 25.7-30.8 °C στο σενάριο 4, παραμένοντας στη διφασική περιοχή και πλησιάζοντας περισσότερο το σημείο τήξης.

Ομοίως, το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του RT58 μετατοπίστηκε από τους 14.6-46.9, στους 12.6-48.8 °C παραμένοντας στη φάση του στερεού όλο το 24ώρο. Παρόλο που σε αυτήν τη δοκιμή το RT58 πλησιάζει περισσότερο τη διφασική περιοχή, συνεχίζει να μένει στη στερεά φάση και έτσι κρίνεται ακατάλληλο για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας.

Τέλος, η μείωση του όγκου της δεξαμενής είχε σαν αποτέλεσμα το SP25A8 να εισέλθει στην αισθητή περιοχή του υγρού, επιτυγχάνοντας υψηλότερη θερμοκρασία κύκλου. Το SP25A8 έχει την ιδανικότερη συμπεριφορά απ' όλα τα υλικά της δοκιμής μιας και τήκεται πλήρως και στερεοποιείται ικανοποιητικά, ώστε να αποδώσει την αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα.

#### 4.5.6. Επιλογή υλικού και λοιπών παραμέτρων της εγκατάστασης

Μετά από τις 4 παραμετρικές δοκιμές που προηγήθηκαν, καταλήξαμε σε ικανοποιητικά αποτελέσματα που μας επιτρέπουν να επιλέξουμε το υλικό και τα λοιπά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης. Από τα 4 υλικά που δοκιμάστηκαν, το RT58 κρίθηκε ακατάλληλο για την εγκατάσταση, αφού σε όλες τις δοκιμές παρέμεινε στερεό και δε συμπεριφέρθηκε ως ΥΑΦ. Το RT21 δίνει υψηλές θερμοκρασίες τις μεσημεριανές ώρες αλλά χαμηλές τις υπόλοιπες ώρες. Επιπλέον, το γεγονός ότι τον Ιανουάριο λιώνει σε μεγάλο βαθμό, μας αποθαρρύνει από τη χρήση του σε πιο ζεστούς μήνες, μιας και ο στόχος μας είναι κυρίως η αξιοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας κι όχι της αισθητής. Απ' όλα τα παραπάνω, είναι σαφές ότι η επιλογή υλικού θα γίνει ανάμεσα στο RT27 και το SP25A8, που παρουσιάζουν σταθερά καλές θερμοκρασίες όλο το 24ώρο και παρόμοια συμπεριφορά. Για τις συνθήκες του σεναρίου 4, το SP25A8 έχει το πλεονέκτημα ότι τήκεται πλήρως και επιτυγχάνει υψηλότερη μέγιστη και χαμηλότερη ελάχιστη θερμοκρασία κύκλου.

Με υλικό το SP25A8, το σενάριο 4 δίνει ικανοποιητικές θερμοκρασίες το μήνα Ιανουάριο για αρκετές ώρες του 24ώρου, αλλά όχι όσο υψηλές απαιτείται για ένα σύστημα θέρμανσης νερού χρήσης. Έτσι, η εγκατάσταση απαιτεί μια βοηθητική πηγή, ώστε να υπάρχει θερμό νερό χρήσης όλο 24ώρο. Σύμφωνα με τα παραπάνω, καταλήγουμε στις παρακάτω παραμέτρους για την εγκατάσταση που μελετάται:

**Πίνακας 4.8.** Χαρακτηριστικά της θεωρούμενης εγκατάστασης

<b>Χαρακτηριστικά εγκατάστασης με ΥΑΦ</b>	
Υλικό	SP25A8
Συλλεκτική επιφάνεια	4 m <sup>2</sup>
Χαρακτηριστικά συλλέκτη	$F_R(\tau\alpha) = 0.74$ $F_R U_L = 5.37 \text{ (W/m}^2\text{)}^\circ\text{C}$ .
Όγκος δεξαμενής	150 λίτρα
Βοηθητική ηλεκτρική πηγή	

#### 4.5.7. Λειτουργία της εγκατάστασης για την περίοδο από Νοέμβριο έως και Απρίλιο

Μετά την επιλογή του υλικού και των υπόλοιπων χαρακτηριστικών, είμαστε σε θέση να εξετάσουμε την λειτουργία της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Τα σχήματα 4.33 και 4.34 δίνουν την πραγματική ωφέλιμη ισχύ που αποδίδει ο συλλέκτης και τη θερμοκρασία που παρουσιάζει το υλικό όλο το 24ώρο για την περίοδο από Νοέμβριο έως και Απρίλιο, αντίστοιχα.

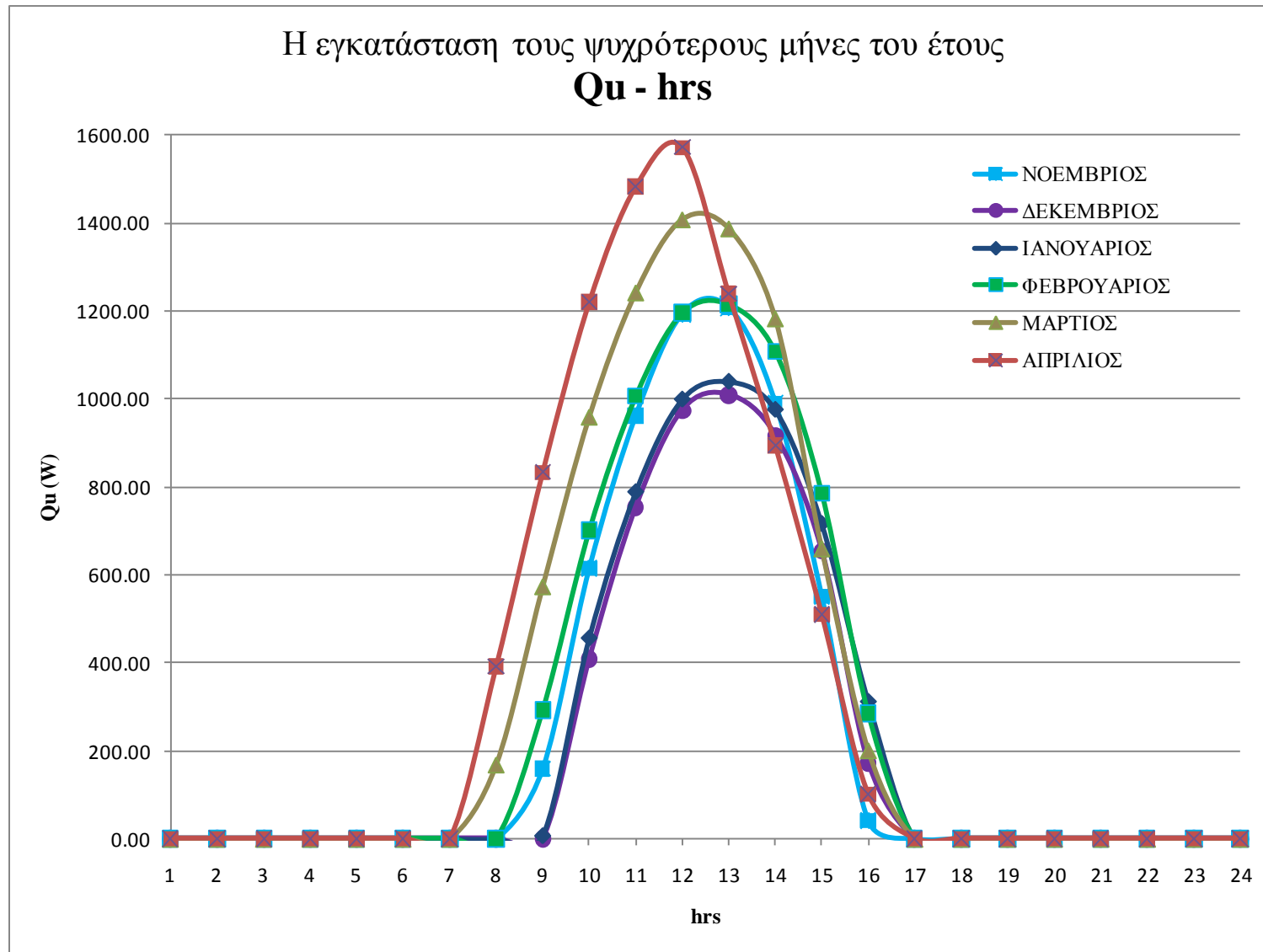
Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στην § 4.5.1., το νερό που ρέει στο εσωτερικό του εναλλάκτη παίρνει κάθε ώρα την αντίστοιχη θερμοκρασία του υλικού της δεξαμενής. Έτσι, εξετάζοντας το σχήμα 4.35, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η εγκατάσταση χωρίς τη χρήση της βοηθητικής πηγής μπορεί να επιτύχει θερμοκρασία νερού κατάλληλο για χρήση, τις ώρες της έντονης ηλιοφάνειας, δηλαδή από τις 2 έως τις 4 μ.μ. Πιο συγκεκριμένα, τον Απρίλιο, επιτυγχάνουμε θερμοκρασία νερού πάνω από 40 °C, τις ώρες 11 - 8 μ.μ., τον Νοέμβριο και τον Μάρτιο τις ώρες 2 – 5 μ.μ. και τον Φεβρουάριο τις ώρες 3 - 4 μ.μ.. Τους ψυχρότερους μήνες της περιόδου, Δεκέμβριο κι

Ιανουάριο, οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται είναι χαμηλότερες και απαιτείται βοηθητική πηγή όλο το 24ώρο.

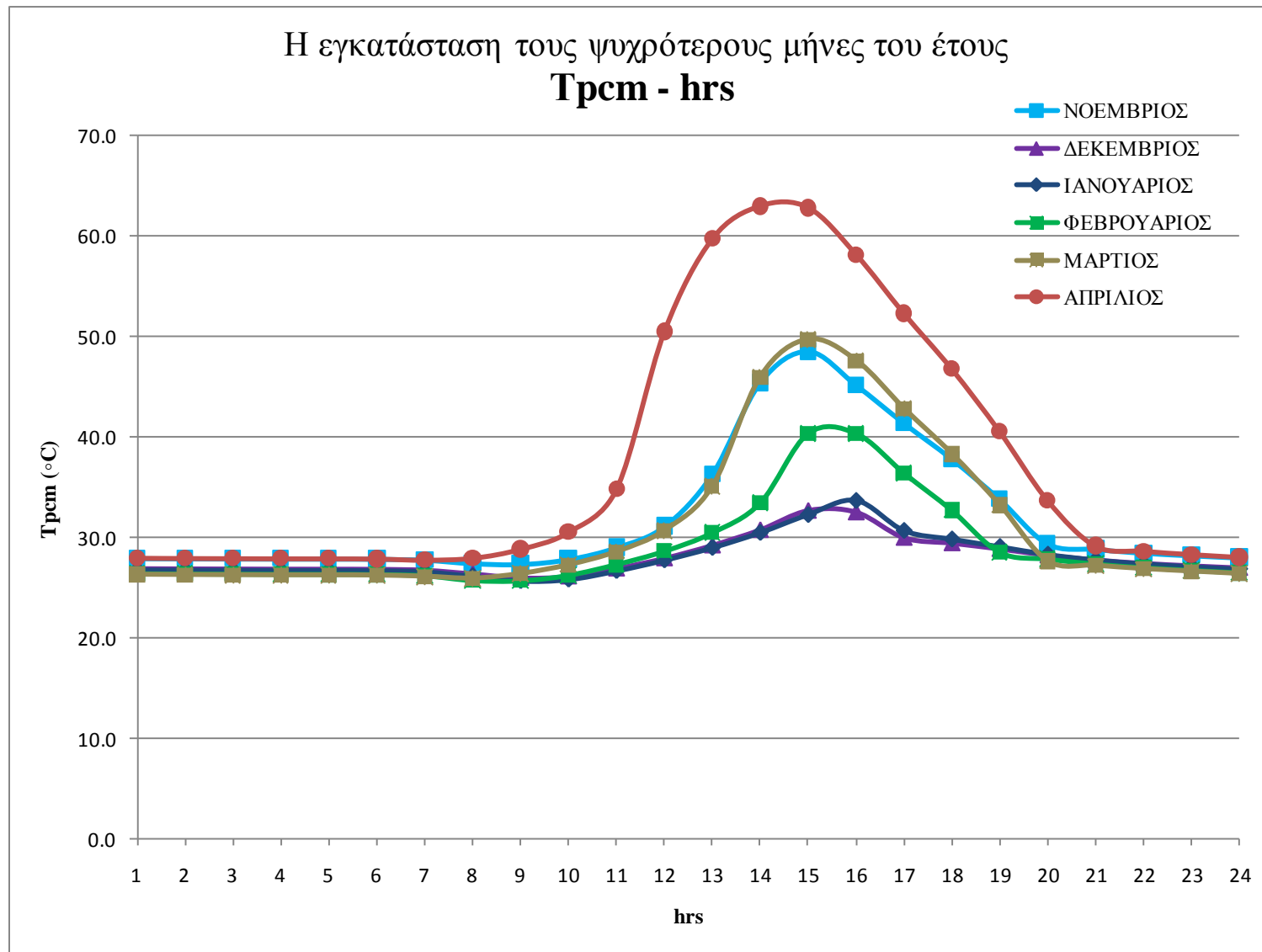
Αν θεωρήσουμε ότι μια καλή θερμοκρασία για το νερό είναι οι 45 °C, τότε η ισχύς που κάθε ώρα θα πρέπει να συνεισφέρει η βοηθητική πηγή θα είναι:

$$Q_{\text{βοηθ}} = \dot{m}_{\text{νερου}} C_{p,\text{νερου}} (45 - T_{\text{PCM}})$$

όπου  $T_{\text{PCM}}$  σε °C και  $Q_{\text{βοηθ}}$  σε W.

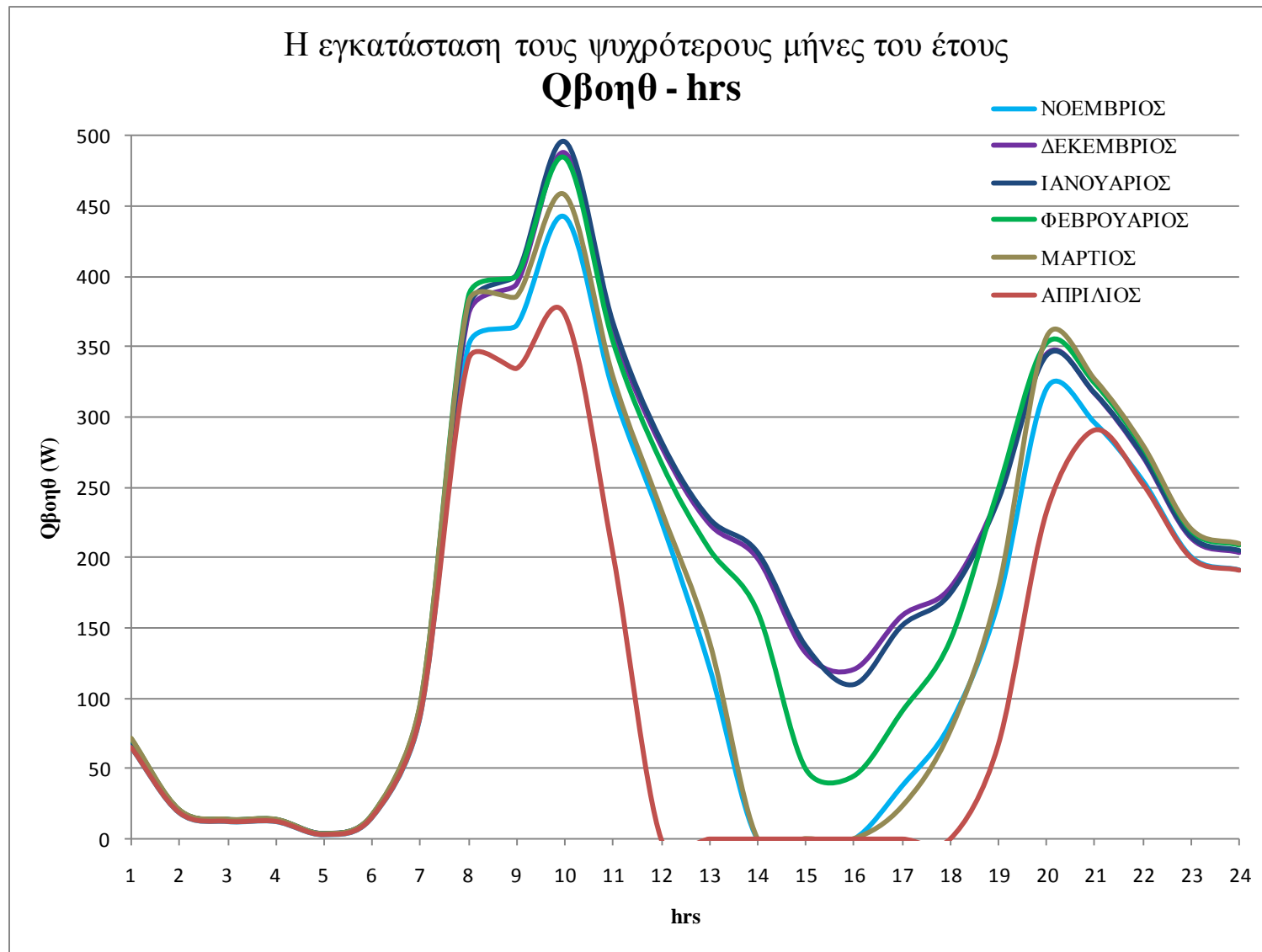


Σχ. 4.33. Πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη για την 21<sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο



Σχ. 4.34. Θερμοκρασίες του ΥΑΦ της εγκατάστασης για την 21<sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο





Σχ. 4.35. Ισχύς βοηθητικής πηγής για την 21<sup>η</sup> ημέρα των μηνών από Νοέμβριο - Απρίλιο

#### 4.6. Υπεροχή του συστήματος με ΥΑΦ έναντι του συμβατικού ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού

Στη συνέχεια, εξετάζονται τα πλεονεκτήματα του συστήματος με ΥΑΦ σε σχέση με το συμβατικό σύστημα θέρμανσης νερού χρήσης και επιχειρείται να αναδειχθεί η υπεροχή του ΥΑΦ ως αποθηκευτικού μέσου σε σχέση με το νερό. Με τον όρο συμβατικό σύστημα νερού, εννοούμε ένα πανομοιότυπο σύστημα με τα ίδια χαρακτηριστικά συλλέκτη και δεξαμενή που ως αποθηκευτικό μέσο της παραγόμενης θερμότητας έχει το νερό. Η σύγκριση των δύο συστημάτων γίνεται για δύο διαδοχικές ημέρες το μήνα Δεκέμβριο, με τις ίδιες εξωτερικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, την ίδια μάζα αποθηκευτικού υλικού αλλά με διαφορετικές τιμές της ολικής ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι οι δύο πανομοιότυπες εγκαταστάσεις λειτουργούν δύο διαδοχικές ημέρες του Δεκεμβρίου με την πρώτη να είναι κρύα αλλά ηλιόλουστη ενώ τη δεύτερη να είναι κρύα αλλά συννεφιασμένη. Στα δύο αυτά διαδοχικά 24ώρα επικρατούν οι θερμοκρασίες της τυπικής 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου. Ωστόσο, θεωρούμε ότι το 2ο 24ωρο η ηλιακή ακτινοβολία κάθε ώρα είναι η μισή της αντίστοιχης του 1ου 24ώρου, εξαιτίας νέφωσης. Οι μάζες νερού κι ΥΑΦ στο εσωτερικό των δεξαμενών είναι ίσες με 105 kg. Και στις δύο εγκαταστάσεις, επιβάλλεται το ίδιο μεταβλητό μοντέλο κατανάλωσης νερού χρήσης του σχήματος 4.6.

Συγκρίνοντας τη συμπεριφορά της εγκατάστασης με ΥΑΦ και της συμβατικής με τη βοήθεια του σχήματος 4.36, παρατηρούμε ότι η εγκατάσταση με ΥΑΦ επιτυγχάνει χαμηλότερα μέγιστα θερμοκρασιών αλλά διατηρεί μια μικρή θερμοκρασιακή διακύμανση στη διάρκεια του 24ώρου. Το ΥΑΦ φαίνεται να υπερέχει ως αποθηκευτικό μέσο θερμότητας, μιας και τις πρώτες πρωινές και τις βραδινές ώρες όπου δεν υπάρχει ηλιοφάνεια καταφέρνει να διατηρήσει τις θερμοκρασίες του και μάλιστα να ξεπεράσει τις αντίστοιχες θερμοκρασίες του νερού. Σε αντίθεση με τη συμβατική εγκατάσταση, όταν η θερμοκρασία του συλλέκτη μειωθεί, το ΥΑΦ αποδίδει τη θερμότητα που είχε αποθηκεύσει στο νερό με αποτέλεσμα να αποφορτίζεται και να φτάνει κοντά στη στερεοποίηση. Έτσι, το νερό στην εγκατάσταση με ΥΑΦ διατηρεί υψηλότερη θερμοκρασία. Το 1<sup>ο</sup> 24ωρο η αποφόρτιση του ΥΑΦ είναι μικρότερη και συμβαίνει κατά τη διάρκεια της νύχτας και τις πρώτες

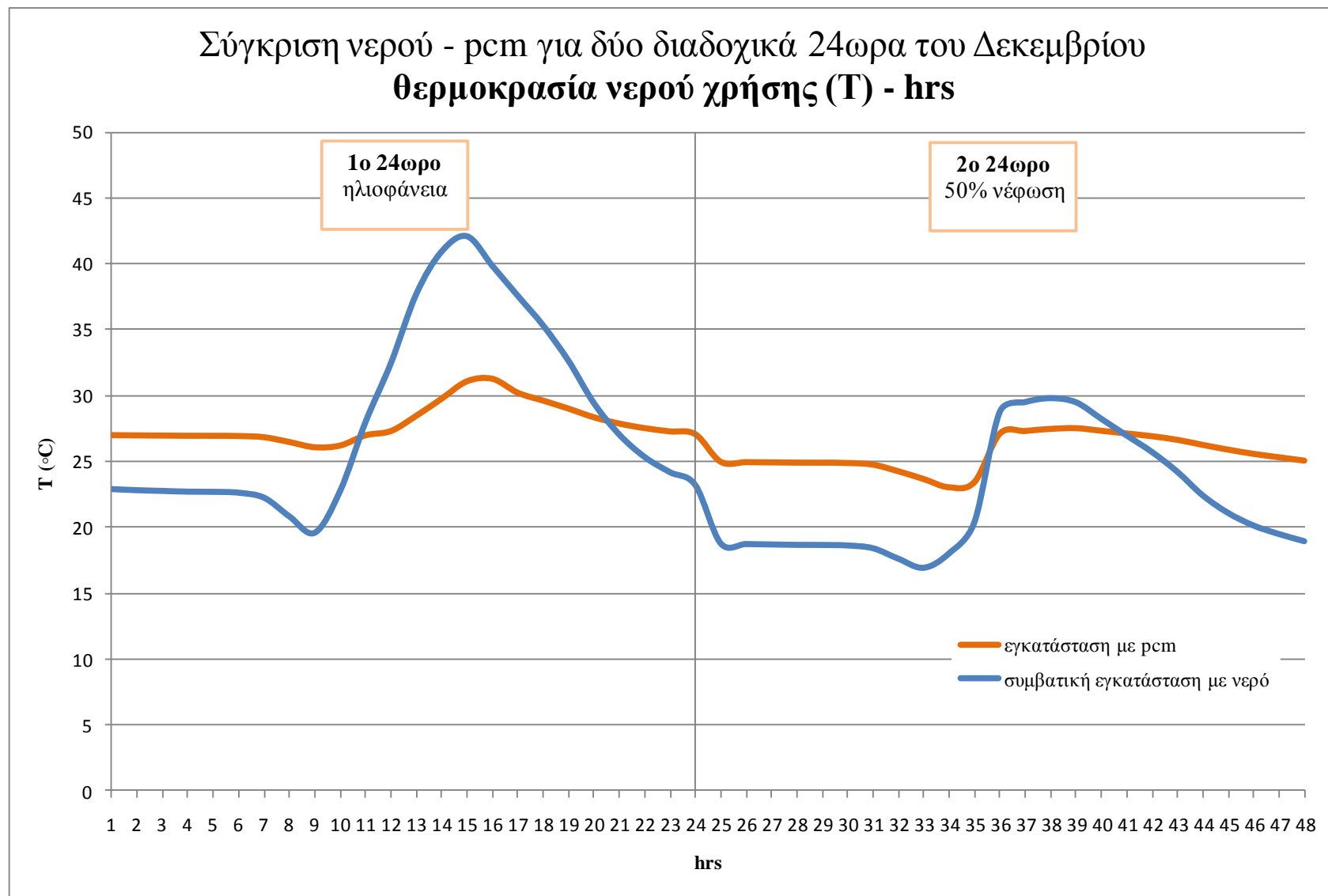
πρωινές ώρες, ενώ τη δεύτερη ημέρα η αποφόρτιση είναι μεγαλύτερη εξαιτίας της νέφωσης.

Αυτή η υπεροχή του ΥΑΦ είναι πολύ σπουδαία γιατί μπορεί να συμβάλλει στην άμβλυνση των διαφορών ανάμεσα στην παραγωγή και τη ζήτηση, που είναι κι ο πρωταρχικός στόχος της αποθήκευσης ενέργειας. Η υπεροχή του ΥΑΦ ως αποθηκευτικού μέσου γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτή, αν συγκρίνει κανείς τη συμπεριφορά των δύο εγκαταστάσεων το 2<sup>ο</sup> 24ωρο που παρατηρείται νέφωση. Τις ημέρες με υψηλά ποσοστά νέφωσης, ο συλλέκτης συλλέγει μικρότερη ποσότητα ακτινοβολίας κι επιτυγχάνει μικρότερες θερμοκρασίες. Το ΥΑΦ ακόμη και το 2<sup>ο</sup> 24ωρο, καταφέρνει να διατηρήσει τις θερμοκρασίες του στα ίδια επίπεδα, έχοντας απώλειες της τάξης των 3 °C. Αντίθετα, στο νερό παρατηρήθηκε μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας ίση με 12 °C.

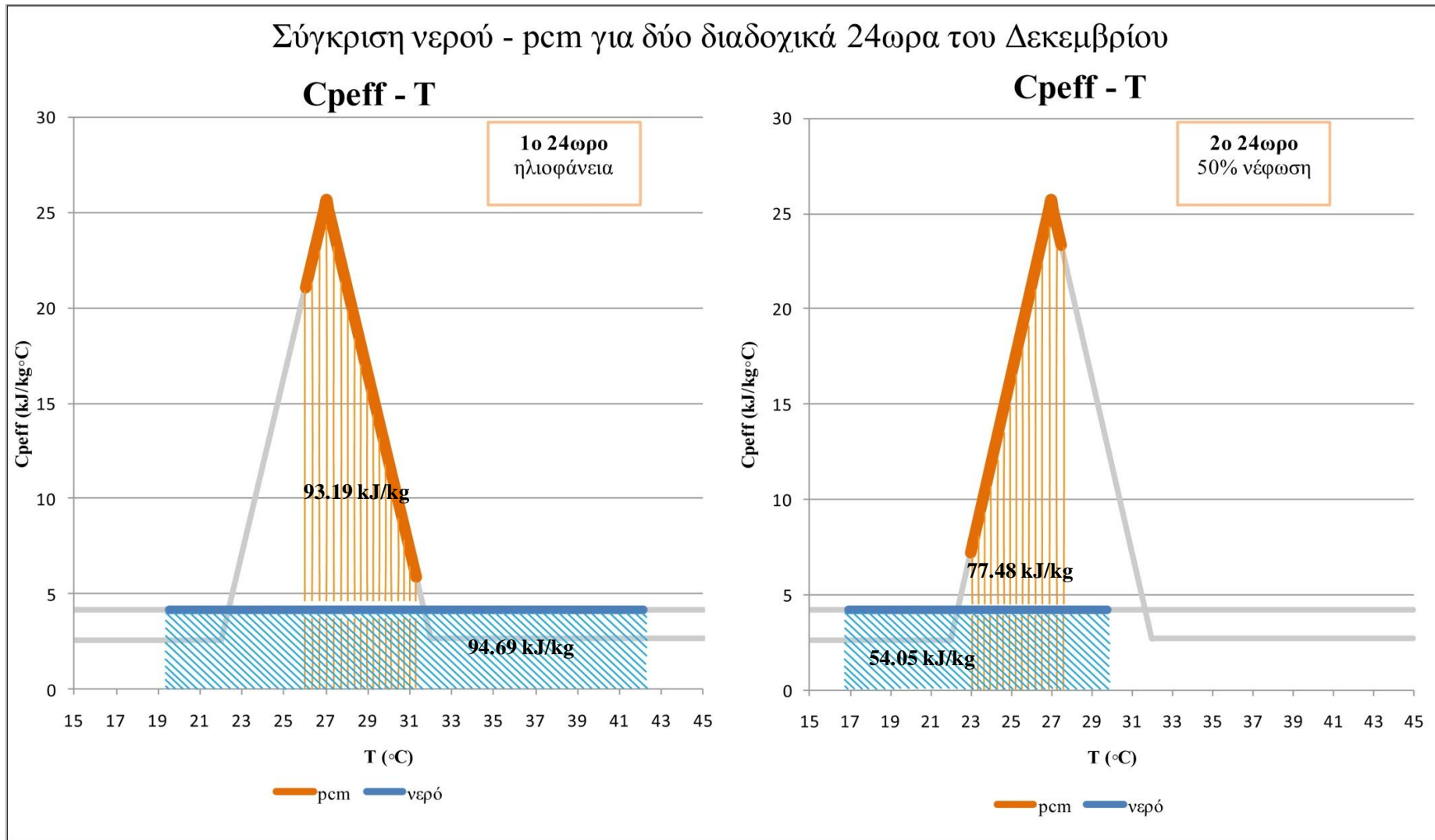
Στο σχήμα 4.37 η γραμμοσκιασμένη περιοχή κάτω από την καμπύλη της ενεργού θερμοχωρητικότητας παριστάνει την ενέργεια ανά μονάδα μάζας που αποθηκεύεται από το μέσο, για κάθε 24ωρο. Έτσι, το 1<sup>ο</sup> 24ωρο, το ΥΑΦ αποθηκεύει 93.19 kJ/kg, ενώ το νερό 94.69 kJ/kg. Το 2<sup>ο</sup> 24ωρο, το ΥΑΦ αποθηκεύει 77.48 kJ/kg, ενώ το νερό 54.05 kJ/kg. Επειδή οι μάζες των υλικών στις δύο θεωρούμενες εγκαταστάσεις είναι ίδιες, η συνολική θερμότητα που αποθηκεύεται το 1<sup>ο</sup> 24ωρο είναι 9785.3 kJ για το σύστημα με ΥΑΦ και 9942.9 kJ για το συμβατικό σύστημα. Οι αντίστοιχες τιμές για το 2<sup>ο</sup> 24ωρο είναι 8135.3 kJ για το σύστημα με ΥΑΦ και 5675.4 kJ για το συμβατικό σύστημα. Από το σχήμα 4.37, φαίνεται πως το 1<sup>ο</sup> 24ωρο τα δύο υλικά αποθηκεύουν παραπλήσια ποσά θερμότητας, ενώ το 2<sup>ο</sup> 24ωρο είναι εμφανής η υπεροχή του ΥΑΦ που έχει αποθηκεύσει 43% περισσότερη θερμότητα σε σχέση με το νερό. Η υπεροχή δεν έγκειται μόνον στο γεγονός ότι το ΥΑΦ αποθηκεύει περισσότερη θερμότητα την ημέρα με νέφωση, αλλά στο γεγονός ότι αποθηκεύει μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας επιτυγχάνοντας μικρότερες θερμοκρασίες. Για να αποθηκεύσουν τα δύο υλικά παραπλήσιες ποσότητες θερμότητας (1<sup>ο</sup> 24ωρο), το νερό πρέπει να θερμανθεί σε υψηλότερη θερμοκρασία. Έτσι, το 2<sup>ο</sup> 24ωρο με λιγοστή ηλιοφάνεια, αποθηκεύει λιγότερη ενέργεια επειδή επιτυγχάνει σαφώς μικρότερες θερμοκρασίες.

Από τα σχήματα 4.36 και 4.37, συμπεραίνουμε ότι η εγκατάσταση με ΥΑΦ έχει μια σταθερά καλή συμπεριφορά αποθηκεύοντας υψηλότερα ποσά θερμότητας σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και σε ένα στενό θερμοκρασιακό εύρος. Ακόμη, ίδια μάζα ΥΑΦ έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει και να αποδώσει περισσότερη

ενέργεια σε σχέση με το νερό και για μικρότερες θερμοκρασίες συλλέκτη, δηλαδή τις ώρες χωρίς ηλιοφάνεια. Έτσι, φαίνεται πως θα μπορούσαμε να επωφεληθούμε από τη χρήση ΥΑΦ για να μειώσουμε τον όγκο των δεξαμενών αποθήκευσης και πιθανώς την επιφάνεια των συλλεκτών.



Σχ. 4.36. Σύγκριση των θερμοκρασιών της εγκατάστασης με ΥΑΦ και της συμβατικής με νερό, για δύο διαδοχικά 24ωρα του Δεκεμβρίου



**Σχ. 4.37.** Σύγκριση της εγκατάστασης με ΥΑΦ και της συμβατικής με νερό, ως προς τη θερμότητα που αποθηκεύουν δύο διαδοχικά 24ωρα του Δεκεμβρίου

#### 4.7. Συμπεράσματα

Το μοντέλο της εγκατάστασης που θεωρήθηκε για αυτήν την εργασία, διερευνήθηκε για τέσσερα διαφορετικά σενάρια την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, στα οποία κάθε φορά άλλαζε μια από τις παραμέτρους του προβλήματος. Οι παράμετροι αυτοί είναι η ζήτηση θερμού νερού, η συλλεκτική επιφάνεια κι ο όγκος της δεξαμενής. Τα υλικά που δοκιμάστηκαν είναι της εταιρείας Rubitherm και φέρουν τις εμπορικές ονομασίες RT21, RT27, RT58 και SP25A8. Στο τέλος κάθε δοκιμής, εξετάζονταν η συμπεριφορά αυτών των υλικών και καθορίζονταν οι παράμετροι της επόμενης δοκιμής, με σκοπό να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα.

Στο σενάριο 1, εξετάστηκε η εγκατάσταση με συλλεκτική επιφάνεια 3.47 m<sup>2</sup>, όγκο δεξαμενής 200 λίτρα και σταθερή κατανάλωση θερμού νερού 10 λίτρα/ώρα. Στο σενάριο 2, χρησιμοποιήθηκε η ίδια συλλεκτική επιφάνεια κι ο όγκος της δεξαμενής, αλλά μεταβλητή κατανάλωση θερμού νερού κάθε ώρα. Η αλλαγή από το μοντέλο σταθερής στο μοντέλο μεταβλητής κατανάλωσης δεν οδήγησε σε σημαντικές αλλαγές στο σύστημα.

Στο σενάριο 3, αυξήθηκε η επιφάνεια του συλλέκτη στα 4 m<sup>2</sup>, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι ήταν αυτές του σεναρίου 2. Τέλος, στο σενάριο 4, μειώθηκε ο όγκος της δεξαμενής στα 150 λίτρα, ενώ οι λοιπές παράμετροι ήταν αυτές του σεναρίου 3. Η αύξηση της επιφάνειας του συλλέκτη καθώς κι η μείωση του όγκου της δεξαμενής, οδήγησαν σε αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας που επιτυγχάνουν τα υλικά, όπως αναμενόταν. Αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας που επιτυγχάνουν τα υλικά, συνεπάγεται μετατόπιση του κύκλου προς το σημείο τήξης και απομάκρυνση από το σημείο στερεοποίησης. Έτσι, αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου συνεπάγεται μια μικρή μείωση στην ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου, αφού τα υλικά στερεοποιούνται λιγότερο κατά την αποφόρτιση, αποδίδοντας μικρότερη ποσότητα της λανθάνουσας θερμότητας που έχουν αποθηκεύσει.

Από την παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε, έγινε σαφές ότι κάθε υλικό συμπεριφέρεται διαφορετικά στην αλλαγή των παραμέτρων του συστήματος και τις εξωτερικές συνθήκες. Έτσι, η τεράστια ποικιλία υλικών που συναντά κανείς στα ΥΑΦ σε συνδυασμό με μια καλή σχεδίαση του συστήματος, μπορεί να δώσει αποθηκευτικό μέσο σε στενό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, κατάλληλο για τις ανάγκες κατανάλωσης κάθε κτιρίου.

Μετά την 4<sup>η</sup> δοκιμή, πήραμε ικανοποιητικά αποτελέσματα από το ένα από τα υποψήφια υλικά. Περαιτέρω δοκιμή του μοντέλου με επιπλέον αύξηση του συλλέκτη ή

μείωση του όγκου της δεξαμενής, θα οδηγούσε σε εγκατάσταση με μη ρεαλιστικά χαρακτηριστικά για οικία.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών, έγινε η επιλογή του υλικού και των χαρακτηριστικών της εγκατάστασης. Έτσι, επιλέχθηκε το υλικό SP25A8, το οποίο παρουσιάζει σταθερά υψηλές θερμοκρασίες όλο το 24ώρο, τήκεται πλήρως και στερεοποιείται ικανοποιητικά ώστε να αποδώσει την αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα στο νερό.

Η εγκατάσταση με το SP25A8 επιτυγχάνει αρκετά υψηλές θερμοκρασίες τις μεσημεριανές ώρες για τους μήνες Νοέμβριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο κι Απρίλιο, εξοικονομώντας ενέργεια. Για τους ψυχρότερους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο, οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες και είναι περισσότερο αναγκαία η συνδρομή μιας ηλεκτρικής βοηθητικής πηγής.

Παρόλο που το απλοϊκό μοντέλο της παρούσας εργασίας δε μας επιτρέπει ασφαλή συμπεράσματα, μια δεξαμενή με εμπορικά ΥΑΦ φαίνεται να μπορεί να εξυπηρετήσει μέρος των αναγκών μιας οικίας σε θερμό νερό, κατά τους ψυχρότερους μήνες του έτους.

Τέλος, από τη σύγκριση του προτεινόμενου συστήματος με ΥΑΦ και του συμβατικού συστήματος με νερό, συμπεραίνουμε ότι το ΥΑΦ υπερέχει σαφώς του νερού ως αποθηκευτικό μέσο. Το ΥΑΦ αποθηκεύει μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας στις ίδιες θερμοκρασίες εμφανίζοντας μικρότερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Τις πρώτες πρωινές και τις βραδινές ώρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, το ΥΑΦ εμφανίζει υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με το νερό. Αξίζει να σημειωθεί ότι την ημέρα με νέφωση το ΥΑΦ αποθηκεύει συνολικά 43% υψηλότερη ποσότητα θερμότητας. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την υπεροχή του ΥΑΦ ως αποθηκευτικού μέσου, μιας και η αποθήκευση ενέργειας έχει στόχο τη χρήση της τις ώρες που αυτή δεν παράγεται αλλά ζητείται.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΕΠΙΛΟΓΟΣ

### 5.1. Περίληψη συμπερασμάτων

Από την παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε, έγινε σαφές ότι κάθε υλικό από αυτά που εξετάστηκαν, συμπεριφέρεται διαφορετικά στην αλλαγή των παραμέτρων του συστήματος και τις εξωτερικές συνθήκες. Έτσι, η ποικιλία υλικών που συναντά κανείς στα ΥΑΦ σε συνδυασμό με μια καλή σχεδίαση του συστήματος, μπορεί να δώσει αποθηκευτικό μέσο σε στενό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, κατάλληλο για να καλύψει σημαντικό κομμάτι των αναγκών μιας οικίας.

Ακόμη, το ΥΑΦ φαίνεται να υπερέχει ως αποθηκευτικό μέσο σε σχέση με το νερό. Η σύγκριση του συστήματος με ΥΑΦ και του συμβατικού με τα ίδια χαρακτηριστικά, έδειξε ότι ίδια μάζα ΥΑΦ έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το νερό και για μικρότερες θερμοκρασίες συλλέκτη, εμφανίζοντας σαφώς μικρότερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Έτσι, ένα σύστημα με ΥΑΦ μπορεί να συμβάλλει στην άμβλυνση των διαφορών ανάμεσα στην διαθεσιμότητα και τη ζήτηση, που είναι κι ο πρωταρχικός στόχος της αποθήκευσης ενέργειας. Τέλος, φαίνεται πως θα μπορούσαμε να επωφεληθούμε από τη χρήση ΥΑΦ για να μειώσουμε τον όγκο των δεξαμενών αποθήκευσης και πιθανώς την επιφάνεια των συλλεκτών.

### 5.2. Αξιολόγηση – περιορισμοί

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να διερευνηθεί κατά πόσο μια δεξαμενή με συγκεκριμένα εμπορικά ΥΑΦ μπορεί να εξυπηρετήσει τις ανάγκες μιας οικίας για θέρμανση νερού χρήσης. Για το σκοπό αυτό, θεωρήθηκε το απλό μοντέλο που περιγράφηκε στην § 4.4 και έγιναν ορισμένες παραδοχές ώστε το πρόβλημα να απλοποιηθεί και να μπορεί να επιλυθεί με μια απλή μέθοδο.

Πιο συγκεκριμένα, η δεξαμενή της εγκατάστασης θεωρήθηκε αδιαβατική, χωρίς να ληφθούν υπόψη οι απώλειες που έχει κάθε στιγμή προς το περιβάλλον. Ακόμα, οι εναλλάκτες θερμότητας που είναι τοποθετημένοι στη δεξαμενή θεωρήθηκαν ιδανικοί, με βαθμό απόδοσης 1. Οι δύο παραπάνω παραδοχές, οδήγησαν στην απλοποίηση ότι κάθε ώρα η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη είναι ίση με τη θερμοκρασία που έχει το

ΥΑΦ την προηγούμενη ώρα. Κάτι τέτοιο φυσικά απέχει πολύ από την πραγματικότητα, μιας και στο διάστημα μίας ώρας οι δύο θερμοκρασίες διαφέρουν σημαντικά εξαιτίας των απωλειών.

Το βήμα μιας ώρας, επιλέχθηκε αυθαίρετα και θεωρήθηκε επαρκώς μικρό, χωρίς προηγουμένως να εξεταστεί η επίδρασή του στη λύση. Ορθότερη επίλυση του προβλήματος θα απαιτούσε τη δοκιμή πολλών χρονικών βημάτων, μέχρι η λύση που επιτυγχάνεται να είναι ανεξάρτητη του βήματος που χρησιμοποιείται. Μια τέτοια λύση, ωστόσο, ξεφεύγει από τα χρονικά περιθώρια μιας διπλωματικής εργασίας γι' αυτό και δεν εξετάστηκε. Άλλωστε, στόχος της εργασίας δεν ήταν η ακρίβεια της λύσης αλλά η ποιοτική της προσέγγιση.

Επιπλέον, κατά την επίλυση, αμελήσαμε τη θερμική διαστρωμάτωση, θεωρώντας κοινή θερμοκρασία σε όλο το εσωτερικό της δεξαμενής. Για να μπορέσει κανείς να λάβει υπόψη τη θερμική διαστρωμάτωση σε παρόμοιο πρόβλημα με δεξαμενή που περιέχει αποκλειστικά νερό, θα πρέπει να αφιερώσει πολύ χρόνο στο να μελετήσει και να συμπεριλάβει μοντέλα που περιγράφουν τη θερμική διαστρωμάτωση. Κάτι τέτοιο θα εισήγαγε μεγάλη πολυπλοκότητα και το πρόβλημα θα απαιτούσε επίλυση με κάποια αριθμητική μέθοδο όπως αυτή των πεπερασμένων διαφορών. Αξίζει να σημειωθεί, ότι επειδή οι εφαρμογές των ΥΑΦ σε συστήματα θέρμανσης νερού είναι περιορισμένες, η βιβλιογραφία είναι πολύ φτωχή όσον αφορά τη θερμική διαστρωμάτωση σε δεξαμενές που χρησιμοποιούν ΥΑΦ.

Τέλος, ιδανικά, θα έπρεπε να καταλήξουμε σε κάποιο υλικό που στο εύρος λειτουργίας της εφαρμογής να τήκεται πλήρως και να στερεοποιείται ξανά, ώστε να μπορεί να αποδώσει στο ρευστό τη θερμότητα που έχει απορροφήσει κατά τη φόρτιση. Όμως, κάτι τέτοιο είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί και συμβαίνει σπάνια στην πράξη. Ακόμα κι έμπειροι ερευνητές δεν καταφέρνουν να βελτιστοποιήσουν το σύστημα τους έτσι ώστε τα ΥΑΦ να εκτελούν πλήρη κύκλο φόρτισης κι αποφόρτισης.

### 5.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας, διαπιστώθηκε ότι η βιβλιογραφία όσον αφορά τα συστήματα θέρμανσης νερού με ΥΑΦ είναι περιορισμένη σε σχέση με άλλες εφαρμογές των υλικών αυτών. Στο πλαίσιο της προσπάθειας εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια, ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού με ΥΑΦ θα μπορούσε να

αποτελέσει ελκυστική λύση. Ένας μελλοντικός ερευνητής θα μπορούσε να διερευνήσει ένα παρόμοιο πρόβλημα εξετάζοντας περισσότερα υλικά καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ακόμη, θα μπορούσε να συνδυάσει τη λύση της δεξαμενής που περιέχει αποκλειστικά ΥΑΦ και εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, με μια συμβατική ηλιακή δεξαμενή νερού, με στόχο μεγαλύτερη κάλυψη των αναγκών της οικίας.

## Βιβλιογραφία

- [1] Harald Mehling, Luisa F. Cabeza: Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications, Springer, New York, 2008
- [2] Raymond A. Serway, John W. Jewett, Principles of physics: a calculus – based text, BrooksCole, 2006
- [3] Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Atul Sharma, V.V. Tayagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (2009) 318 – 345
- [4] Lorenz Ratke, Utilization of Space: Today and Tomorrow, Springer, Berlin, 2006
- [5] Χρήστος Τζιβανίδης, Σημειώσεις θερμικής συμπεριφοράς κτιρίων, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2010
- [6] A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy system using PCM capsules, a review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12 (2008) 2438 - 2458
- [7] Ruben Baetens, Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen, Phase change materials for building applications: A state – of – the – art review, Energy and Buildings, 42 (2010) 1361 – 1368
- [8] 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 14 (2010) 615–628
- [9] Luis Perez – Lombard, Jose Ortiz, Christine Pout, A review on buildings energy consumption information, Energy and Buildings, 40 (2008) 394 - 398
- [10] <En.wikipedia.org/wiki/Latitude>
- [11] Perlman M, Mills BE, Development of residential hot water use patterns, ASHRAE Transactions, 91part2 (1985) 657–79
- [12] Κίμων Α. Αντωνόπουλος, Θερμικά – ηλιακά συστήματα, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2008
- [13] D. A. Kouremenos , K. A. Antonopoulos, S. Doulgerakis, Direct and diffuse solar radiation correlations for tilted surfaces in Athens Greece, Solar Energy, 38 (1987) 203 - 217
- [14] Κίμων Α. Αντωνόπουλος, Κλιματισμός, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2008
- [15] M. Ravikumar, Dr. Pss. Srinivasan, Phase change material as a thermal energy storage material for cooling of building, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 4 (2008) 503-511

- [16] Dharuman C, Arakeri JH, Srinivasan K, Performance evaluation of an integrated solar water heater as an option for building energy conservation, *Energy and Buildings*, 38 (2006) 214–219
- [17] K.A.R. Ismail, R.I.R. Moraes, A numerical and experimental investigation of different containers and PCM options for cold storage modular units for domestic applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (2009) 4195–4202
- [18] A. Barba, M. Spiga, Discharge mode for encapsulated PCMs in storage tanks, *Solar Energy*, 74 (2003) 141–148
- [19] T. Kousksou, P. Bruel, G. Cherreau, V. Leoussoff, T. El Rhafiki, PCM storage for solar DHW: From an unfulfilled promise to a real benefit, *Solar Energy*, (2011), (article in press)
- [20] Muhsin Mazmana, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling Miquel Nogues, Hunay Evliya, Halime O. Paksoy, Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems, *Renewable Energy*, 34 (2009) 1639–1643
- [21] Yasin Varol, Ahmet Koca, Hakan F. Oztop, Engin Avci, Forecasting of thermal energy storage performance of Phase Change Material in a solar collector using soft computing techniques, *Expert Systems with Applications*, 37 (2010) 2724–2732
- [22] I. Al-Hinti, A. Al-Ghandoor, A. Maaly, I. Abu Nageera, Z. Al-Khateeb, O. Al-Sheikh, Experimental investigation on the use of water-phase change material storage in conventional solar water heating systems, *Energy Conversion and Management*, 51 (2010) 1735–1740
- [23] Suat Canbazoglu, Abdulmuttalip Sahinaslan, Ahmet Ekmekyapar, Y. Gokhan Aksoy, Fatih Akarsu, Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water-heating system, *Energy and Buildings*, 37 (2005) 235–242
- [24] 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*, 13 (2009) 2119–2125
- [25] Murat Kenisarin, Khamid Mahkamov, Solar energy storage using phase change materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (2007) 1913–1965
- [26] Eman-Bellah S. Mettaweea, Ghazy M.R. Assassab, Experimental study of a compact PCM solar collector, *Energy*, 31 (2006) 2958–2968
- [27] Manuel Ibaneza, Luisa F. Cabeza, Cristian Soleb, Joan Roca, Miquel Nogues, Modelization of a water tank including a PCM module, *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 1328–1333

- [28] Luisa F. Cabeza, Manuel Ibanezb, Cristian Sole, Joan Roca, Miquel Nogues, Experimentation with a water tank including a PCM module, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90 (2006) 1273–1282
- [29] Necdet Altuntop, Mevlut Arslan, Veysel Ozceyhan, Mehmet Kanoglu, Effect of obstacles on thermal stratification in hot water storage tanks, *Applied Thermal Engineering*, 25 (2005) 2285–2298
- [30] Y.M. Han, R.Z. Wang, Y.J. Dai, Thermal stratification within the water tank, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009) 1014–1026
- [31] ΚΑΠΕ, Θερμικά Ηλιακά Συστήματα, οδηγός για σπουδαστές, 25 Απριλίου 2011 <<http://www.cres.gr/kape/education/thermika%20Hliaka.pdf>>
- [32] John Patterson, Solar Hot Water Basics, *Home Power Magazine*, 25 Απριλίου 2011 <[homepower.com](http://homepower.com)>
- [33] Kumar B. Design, development and performance evaluation of a latent heat storage unit for evening and morning hot water using a box type solar collector. Project Report, M. Tech. (Energy Management), Indore, India: School of Energy and Environmental Studies, Devi Ahilya University, 2001
- [34] Shukla A. Heat transfer studies on phase change materials and their utilization in solar water heaters. Thesis Report, Ph.D. Energy & Environment, Indore, India: School of Energy and Environmental Studies, Devi Ahilya University, 2006
- [35] Galenen E, Vanden GJ. Brink, Energy storage in phase change materials for solar applications, *International Journal of Ambient Energy*, 7(1) (1986)
- [36] Lane GA. Phase change thermal storage material. In: Guyer C, editor. *Hand book of thermal design*. Mc. Graw Hill Book Company, 1989
- [37] Hasan A. Phase change material energy storage system employing palmitic acid, *Solar Energy*, 52(2) (1994) 143–54
- [38] Hasan A. Thermal energy storage system with stearic acid as phase change material, *Energy Conversion and Management*, 35(10) (1994) 843–56
- [39] Hasan A, Sayigh AA, Some fatty acids as phase change thermal energy storage materials, *Renewable Energy* 4(1), (1994) 69–76
- [40] Prakash J, Garg HP, Datta G, A solar water heater with a built-in latent heat storage, *Energy Conversion and Management*, 25(1) (1985) 51–6
- [41] Bansal NK, Buddhi D, An analytical study of a latent heat storage system in a cylinder, *Solar Energy*, 33(4) (1992) 235–42

- [42] Tiwari GN, Rai SN, Santram, Singh M. Performance prediction of PCCM collection cum-storage water heater: quasi-steady state solution, *Energy Conversion and Management*, 28(3) (1988) 219–23
- [42] Tiwari GN, Rai SN, Santram, Singh M. Performance prediction of PCCM collection cum-storage water heater: quasi-steady state solution, *Energy Conversion and Management*, 28(3) (1988) 219–23
- [43] Chaurasia PBL, Phase change material in solar water heater storage system, *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Thermal Energy Storage*, 2000
- [44] Ghoneim AA, Comparison of theoretical models of phase change and sensible heat storage for air and water solar heating systems, *Solar Energy*, 42(3) (1989) 209–30
- [45] Bajnoczy G. Heat storage by two grade phase change material, *Periodica Polytechnica Ser Chem Eng*,43(2) (1999) 137–47
- [46] Kaygusuz K, Experimental and theoretical investigation of latent heat storage for water based solar heating systems, *Energy Conversion and Management*, 36(5) (1995) 315–23.
- [47] Boy E, Boss R, Lutz M, A collector storage module with integrated phase change material, *Proceeding ISES*, 1987
- [48] Rabin Y, Bor-Miv I, Karin E, Integrated solar collector storage system based on a salt hydrate phase change material, *Solar Energy*, 55(6) (1995) 435–44
- [49] Tayeb AM, A simulation model for a phase change energy storage system: experimental and verification, *Energy Conversion and Management*, 34(4) (1993) 243–50
- [50] Font J, Muntasell J, Cardoner F, Preliminary study of a heat storage unit using a solid solid transition, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 33(2) 1994 169–76
- [51] Bhargava AK, Solar water heater based on phase changing material, *Applied Energy*, 14(3) (1983) 197–209
- [52] Canbazoglu S, Sahinaslan A, Ekmekyapar A, Aksoy YG, Akarsu F, Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water-heating system, *Energy and Buildings*, 37(3) (2005) 235–42
- [53] Haskell C. US Patent no. 842658, January 1907
- [54] Chinnappa JCV, Gnanalingan K. Performance in Colombo, Ceylon of a pressurized solar water heater of the combined collector and storage type, *Solar Energy*,15 (1973) 195–204
- [55] Alizadeh S, An experimental and numerical study of thermal stratification in a horizontal cylindrical solar storage tank, *Sol Energy*, 66 (1999) 409–421

- [56] Zurigat YH, A comparison study of one-dimensional models for stratified thermal storage tanks, *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 111 (1989) 205–210
- [57] Shyu RJ, Lin JY, Fang LJ, Thermal analysis of stratified storage tanks. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 111 (1989) 54–61
- [58] A.A. Dehghan, A. Barzegar, Thermal performance behavior of a domestic hot water solar storage tank during consumption operation, *Energy Conversion and Management*, 52 (2011) 468–476
- [59] Lavan Z, Thompson Y, Experimental study of thermally stratified hot water storage tanks, *Solar Energy*, 19 (1977) 519–24
- [60] Cole RL, Bellinger FO, Thermally stratified tanks, *ASHRAE Transactions*, 88:1982 1005–17
- [61] Ismail KAR, Leal JFB, Zanardi MA, Models of liquid storage tanks, *International Journal of Energy Research*, 22 (1997) 805–815
- [62] Nelson JEB, Balakrishnan AR, Murthy SS, Parametric study on thermally stratified child water storage systems, *Applied Thermal Engineering*, 19 (1997) 89–115
- [63] Wildin MW, Truman CR, A summary of experience with stratified child water tanks, *ASHRAE Transactions*, 92 (1985) 956–976
- [64] Wildin MW, Experimental results from single-pipe diffusers for stratified thermal energy storage, *ASHRAE Transactions*, 102 (part 2) (1996) 123–32
- [65] Zurigat YH, Ghajar AH, Moretti PM, Stratified thermal energy storage tank inlet mixing characterization, *Applied Energy* 30 (1988) 99–111
- [66] Helwa NH, Mobarak AM, El-Sallak MS, El-Ghetany HH, Effect of hot water consumption on temperature distribution in a horizontal solar water storage tank, *Applied Energy*, 52 (1995) 185–97
- [67] Hassan A, Thermosiphon solar water heaters: effect of storage tank volume and configuration on efficiency, *Energy Conversion and Management*, 38(9) (1997) 847–54
- [68] Shariha AM, GOG L, The optimization of tank volume to collector area ratio for thermosiphon solar water heater, *Renewable Energy*, 7 (1996) 289–300
- [69] Dehghan AA, Hosni MH, Shiryazdi SH, Experimental evaluation of the thermal behavior of a vertical solar tank using energy and energy analysis, In: *Proceeding of IMECE2005*, Florida, USA, 2005
- [70] Knudsen S. and Furbo S, Thermal stratification in vertical mantle heat-exchangers with application to solar domestic hot-water systems, *Applied Energy* 78, (2004) 257-272



- [71] Andersen, E. et al., Multilayer fabric stratification pipes for solar tanks, *Solar Energy*, (2007)
- [72] Shah L.J., Andersen E. and Furbo S, Theoretical and experimental investigations of inlet stratifiers for solar storage tanks, *Applied Thermal Engineering* 25, (2005) 2086-2099
- [73] Hegazy AA, Effect of inlet design performance of storage-type domestic electrical water heaters, *Applied Energy*, (2007)
- [74] Velraj R, Seeniraj RV, Hafner B, Faber C, Swarzer K, Heat transfer enhancement in a latent heat storage system, *Solar Energy*, 65(3) (1999) 171-180
- [75] S. M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, part 1: heat storage materials and techniques, *Energy Conversion and Management*, 39 (11), (1998) 1127-1138
- [76] Buddhi D, Thermal performance of a shell and tube PCM storage heat exchanger for industrial waste heat recovery, Presented at solar world congress, Taejon, Korea, August 24–30, 1977
- [77] Abhat A, Performance studies of a finned heat pipe latent heat thermal energy storage system, Sun NY: Pergamon Press, 1981, 541–546
- [78] Maccracken CD, PCM bulk storage, Proceedings of the international conference on energy storage,(1981), 159–165
- [79] Smith RN, Ebersole TE, Griffin FP. *Solar Energy Engineering*, 102 (1980) 112
- [80] Herrick CS, Multi-freeze cycle life testing of Glauber's salt in a rolling cylinder heat store, *Solar Energy*, 28 (1982) 99
- [81] Santamouris MJ, Lefas CC, On the coupling of PCM stores to active solar systems, *International Journal of Energy Research*, 12 (1988) 603–10
- [82] Farid MM, Kanzawa A, Thermal performance of heat storage module using PCMs with different melting temperatures: mathematical modeling, *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 111 (1989) 152–157
- [83] M. Medrano, M.O, Yilmaz, M. Nogues, I. Martorell, Joan Roca, Luisa F. Cabeza, Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems, *Applied Energy*, 86 (2009) 2047–2055
- [84] Vineet Veer Tyagi, D. Buddh, PCM thermal storage in buildings: A state of art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (2007) 1146-1166
- [85] Ruben Baetens, Bjorn Petter Jelle, Arild Gustavsen, Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review, *Energy and Buildings*, 42 (2010) 1361–1368


- [86] Frederic Kuznik, Damien David, Kevyn Johannes, Jean-Jacques Roux, A review on phase change materials integrated in building walls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011) 379 - 391
- [87] Beleen Zalba, JoseeM. Marin, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, 23 (2003) 251–283
- [88] S. Mondal, Phase change materials for smart textiles - An overview, *Applied Thermal Engineering*, 28 (2008) 1536–1550
- [89] 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*, 15 (2011) 112 - 130
- [90] Piia Lamberg, Approximate analytical model for two-phase solidification problem in a finned phase-change material storage, *Applied Energy*, 77 (2004) 131–152
- [91] Haitian Yang, Yiqian He, Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (2010) 385–392
- [92]. Gunther E, Hiebler S. Mehling H, Determination of the heat storage capacity of PCM and PCM – objects as a function of temperature, Bavarian Center for Applied Energy Research (ZAE Bayern), 25 Απριλίου 2011, <[http://intra.web.stockton.edu/eyos/energy\\_studies/content/docs/FINAL\\_PAPERS/11B-2.pdf](http://intra.web.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/FINAL_PAPERS/11B-2.pdf)>
- [93] F.L. Tan, S.C. Fok, Cooling of helmet with phase change material, *Applied Thermal Engineering*, 26 (2006) 2067–2072
- [94] M. Gumus, Reducing cold – start emission from internal combustion engines by means of thermal energy storage system, *Applied Thermal Engineering*, 29 (2009) 652 - 660
- [95] E.D. Kravvaritis, K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, Experimental determination of the effective thermal capacity function and other thermal properties for various phase change materials using the thermal delay method, *Applied Energy* 88 (2011) 4459–4469
- [96] Rubitherm, 25 Απριλίου 2011 <<http://www.rubitherm.com>>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Πίνακας 1.** Λίστα με τα κυριότερα ΥΑΦ [85]


Organic compounds	Paraffins	Inorganic compounds	(Inorganic) Eutectics
Polyglycol E 400	Paraffin C <sub>14</sub>	H <sub>2</sub> O	58.7% Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O + 41.3% MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
Polyglycol E 600	Paraffin C <sub>15</sub> -C <sub>16</sub>	LiClO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	
Polyglycol E 6000	Paraffin C <sub>16</sub> -C <sub>18</sub>	Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	66.6% CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O + 33.3% MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
Dodecanol	Paraffin C <sub>13</sub> -C <sub>24</sub>	LiNO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	
Tetradodocanol	Paraffin C <sub>16</sub> -C <sub>28</sub>	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	48% CaCl <sub>2</sub> + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3 H <sub>2</sub> O
Biphenyl	Paraffin C <sub>18</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O	
HDPE	Paraffin C <sub>20</sub> -C <sub>33</sub>	CaBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	47% Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O + 53% Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
Trans-1,4-polybutadiene	Paraffin C <sub>22</sub> -C <sub>45</sub>	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	
Propianide	Paraffin C <sub>23</sub> -C <sub>50</sub>	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	60% Na(CH <sub>2</sub> COO)·3H <sub>2</sub> O + 40% CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>
Naphtalene	Paraffin wax	Na(CH <sub>3</sub> COO)·3H <sub>2</sub> O	
Erythitol	Octadecane	Na <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O	66.6% Urea + 33.4% NH <sub>4</sub> Br
Dimethyl-sulfoxide		Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	
Capric acid		Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	
Capricinic acid		(NH <sub>4</sub> )Al(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	
Laurinic acid		MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	
Miristic acid		NaNO <sub>3</sub>	
Lakisol		KNO <sub>3</sub>	
Palmitic acid		KOH	
Stearic acid		MgCl <sub>2</sub>	
Acetamid		NaCl	
Propionamid		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	
		KF	
		K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	

**Πίνακας 2.** Κύριες ιδιότητες παραφίνης με την εμπορική ονομασία RT21  
(πηγή: rubitherm.com)

Data Sheet			
<b><u>RUBITHERM® RT 21</u></b> (before: RT 20)		<b>Typical Values</b>	
Melting area	°C	18 - 23 typical being: 21°C	
Congealing area	°C	22 - 19 typical being: 22°C	
Heat storage capacity temperature range 15°C to 30°C	kJ/kg	134	
Density solid at 15°C	kg/l	0.88	
Density liquid at 25°C	kg/l	0.77	
Volume expansion In phase change range	%	14	
Heat conductivity	W/(m·K)	0.2	
Kin. Viscosity at 50°C	mm <sup>2</sup> /s	25.71	
Flash point (PCM)	°C	154	
corrosion		chemically inert with respect to most materials	
water hazard		Water hazard class ( WGK ) 1	


Version: 20.08.2009

**Πίνακας 3.** Κύριες ιδιότητες παραφίνης με την εμπορική ονομασία RT27  
(πηγή: rubitherm.com)

Data Sheet			
<b><u>RUBITHERM<sup>®</sup> RT 27</u></b>		<b>Typical Values</b>	
Melting area	°C	25 - 28	typical being: 27°C
Congealing area	°C	28 - 25	typical being: 27°C
Heat storage capacity temperature range °C to °C	kJ/kg	184	
Density solid at 15°C	kg/l	0.88	
Density liquid at 40°C	kg/l	0.76	
Volume expansion In phase change range	%	16	
Heat conductivity	W/(m*K)	0.2	
Kin. Viscosity at 50°C	mm <sup>2</sup> /s	26.32	
Flash point (PCM)	°C	164	
corrosion		chemically inert with respect to most materials	
water hazard		Water hazard class ( WGK ) 1	


Version: 20.08.2009

**Πίνακας 4.** Κύριες ιδιότητες παραφίνης με την εμπορική ονομασία RT58  
(πηγή: rubitherm.com)

Data Sheet			
<b><u>RUBITHERM<sup>®</sup> RT 58</u></b>		<b>Typical Values</b>	
Melting area	°C	55 - 59 Typical being: 58 °C	
Congeaing area	°C	59 - 55 Typical being: 58 °C	
Heat storage capacity Temperature range 50 °C to 65 °C	kJ/kg	178	
Density solid at 15 °C	kg/l	0.88	
Density liquid at 80 °C	kg/l	0.77	
Volume expansion In phase change range	%	14	
Heat conductivity	W/(m*K)	0.2	
Kin. Viscosity at 90 °C	mm <sup>2</sup> /s	32.49	
Flash point (PCM)	°C	> 100	
corrosion		chemically inert with respect to most materials	
water hazard		Water hazard class ( WGK ) 1	

Version: 20.08.2009

**Πίνακας 5.** Κύριες ιδιότητες μίγματος με την εμπορική ονομασία SP25A8  
(πηγή: rubitherm.com)

Data Sheet			
<b>RUBITHERM® SP 25 A8</b>		<b>Typical Values</b>	
Melting Point	°C	26	
Congealing Point	°C	25	
Heat storage capacity <i>Temperature range 15°C to 30°C</i>	kJ/(kg)	180	
Density at -15°C	kg/l	1,38	
Volume expansion $\gamma$	1/K	0,001	
Specific heat capacity	kJ/(kg·K)	2,5	
Heat conductivity	W/(m·K)	0,6	
Viscosity		Shear thinning	

**Πίνακας 6.** Υπολογισμός αύξοντος αριθμού ημέρας του έτους n και τιμές της ηλιακής απόκλισης δ για ορισμένες ημερομηνίες του έτους.

μήνας	υπολογισμός αύξοντος αριθμού ημέρας έτους n	ημερομηνία	n ημέρα του έτους	ηλιακή απόκλιση δ
Ιανουάριος	i	17	17	-20.9
Φεβρουάριος	31+i	16	47	-13.0
Μάρτιος	59+i	16	75	-2.4
Απρίλιος	90+i	15	105	9.4
Μάιος	120+i	15	135	18.8
Ιούνιος	151+i	11	162	23.1
Ιούλιος	181+i	17	198	21.2
Αύγουστος	212+i	16	228	13.5
Σεπτέμβριος	243+i	15	258	2.2
Οκτώβριος	273+i	15	288	-9.6
Νοέμβριος	304+i	14	318	-18.9
Δεκέμβριος	334+i	10	344	-23.0

**Πίνακας 7.** Υπολογισμένοι συντελεστές  $M_t$ ,  $A_t$ ,  $P_t$ ,  $m_t$ ,  $a_t$ ,  $p_t$  των σχέσεων (3) και (4) [13].

Time t hrs LST	$M_t$ kW/m <sup>2</sup>	$A_t$ kW/m <sup>2</sup>	$P_t$ degrees	$m_t$ kW/m <sup>2</sup>	$a_t$ kW/m <sup>2</sup>	$p_t$ degrees
07.00	0.007	0.046	86.18	0.048	0.111	81.23
08.00	0.057	0.068	87.31	0.134	0.127	82.45
09.00	0.119	0.104	87.94	0.208	0.133	83.94
10.00	0.191	0.129	88.31	0.261	0.129	85.60
11.00	0.258	0.153	89.35	0.283	0.117	86.05
12.00	0.319	-0.181	-88.88	0.271	0.095	82.71
13.00	0.342	-0.194	-89.18	0.243	0.081	81.95
14.00	0.325	0.183	87.21	0.210	0.083	87.23
15.00	0.269	0.166	86.22	0.176	0.087	89.53
16.00	0.183	0.147	82.10	0.141	-0.085	-88.19
17.00	0.078	0.131	79.85	0.104	-0.079	-88.97
18.00	-0.025	0.114	77.36	0.051	0.091	86.79



Πίνακας 8. Συντελεστές της σχέσης (5) για την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα του έτους [14].

DAY	M	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
21 JAN	9.384	-1.6730	0.7110	0.0085	-1.7230	0.5240	-0.2410
21 FEB	10.984	-2.1500	0.7850	-0.1070	-1.7500	0.5780	-0.0724
21 MAR	11.955	-1.8580	0.6510	-0.0097	-1.0840	0.2550	-0.0093
21 APR	15.072	-2.6680	0.7270	0.2690	-1.7630	0.2430	0.2120
21 MAY	20.724	-2.7950	0.7590	0.0926	-1.3440	0.1190	0.3080
21 JUN	26.192	-3.2930	1.1150	0.1560	-2.1960	-0.1390	0.1570
21 JUL	28.080	-3.2590	0.8110	0.2720	-2.0770	0.1340	0.1400
21 AUG	27.880	-3.1130	0.8640	0.0670	-1.9780	0.4860	0.3610
21 SEP	23.236	-3.2100	1.0350	-0.0495	-1.6960	0.4770	0.2210
21 OCT	18.144	-2.6300	1.0850	-0.1440	-1.4270	0.6040	0.1380
21 NOV	11.968	-1.3000	0.6160	-0.2520	-0.3170	0.6290	-0.0490
21 DEC	5.264	-1.1100	0.5210	-0.1520	-0.8810	0.3230	0.0080

Πίνακας 9. Πρότυπο ΕΛΟΤ 1291 για τις τυπικές τιμές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας νερού του δικτύου σε διάφορες πόλεις

Περιοχή/μήνας	I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	Ο	N	Δ
Αθήνα	11,3	10,9	11,8	14,3	17,7	21,6	24,7	25,7	24,2	21,1	16,9	13,5
Αλιάρτος	10,2	9,9	10,8	13,9	17,6	21,7	25,1	25,8	24,2	21,0	16,5	13,0
Άραξος	12,8	12,3	12,9	14,8	17,6	21,5	24,4	25,6	25,0	22,3	18,2	15,0
Ηράκλειο	14,7	14,2	14,8	17,2	20,6	24,5	27,3	28,2	27,2	24,7	20,9	17,2
Θεσσαλονίκη	8,2	7,9	9,2	12,8	16,8	20,2	21,5	22,8	22,1	19,4	15,7	11,0
Ιεράπετρα	15,4	14,7	15,3	17,5	21,2	25,1	27,7	28,7	27,4	24,8	21,2	17,7
Ιωάννινα	6,2	6,4	8,0	10,9	14,1	18,0	21,5	23,2	21,6	17,9	13,1	8,9
Καλαμάτα	12,5	12,2	12,9	15,1	18,3	21,8	24,7	25,7	24,9	21,9	18,0	14,4
Κέρκυρα	11,3	11,1	12,0	14,2	17,7	20,5	22,6	23,6	22,7	20,3	16,9	13,3
Κόρινθος	13,1	12,7	13,4	15,8	19,1	23,0	26,0	27,0	26,0	22,9	18,9	15,5
Λαμία	11,3	11,0	11,5	14,0	16,5	19,3	21,8	22,8	22,0	20,0	16,5	13,4
Λάρισα	10,0	9,4	10,8	14,1	16,7	20,2	22,7	24,7	23,8	21,2	16,7	14,0
Λήμνος	10,3	9,2	10,0	13,6	17,7	22,7	25,9	26,2	24,8	21,4	16,6	13,0
Μυτιλήνη	13,2	12,7	13,1	15,0	18,3	22,0	24,6	25,4	24,4	21,9	18,4	15,3
Νάξος	12,5	12,2	12,9	15,1	18,3	21,8	24,7	25,7	24,9	21,9	18,0	14,4
Ρόδος	13,5	12,9	13,4	16,0	19,3	22,7	25,4	26,0	25,1	22,4	18,4	15,2
Σέρρες	8,3	8,4	9,7	12,8	16,6	20,4	22,8	23,8	22,6	19,7	15,3	11,0
Τυμπάκιο	14,7	14,2	14,8	17,2	20,6	24,5	27,3	28,2	27,2	24,7	20,9	17,2
Χανιά	14,2	13,4	13,7	15,4	17,8	20,9	23,0	24,1	23,6	21,7	19,0	16,1
Χίος	14,1	12,6	13,4	15,2	17,4	20,1	22,7	23,8	23,3	21,4	18,1	15,2

**Πίνακας 10.** Αποτελέσματα για το σενάριο 1

ώρα	ΣΕΝΑΡΙΟ 1							
	RT21	RT27	RT58	SP25A8	RT21	RT27	RT58	SP25A8
	Qu (W)				Tpcm (°C)			
1	0.00	0.00	0.00	0.00	22.5	26.3	16.8	26.4
2	0.00	0.00	0.00	0.00	22.3	26.1	15.9	26.2
3	0.00	0.00	0.00	0.00	22.1	26.0	15.2	26.0
4	0.00	0.00	0.00	0.00	21.9	25.8	14.6	25.8
5	0.00	0.00	0.00	0.00	21.7	25.7	14.1	25.6
6	0.00	0.00	0.00	0.00	21.5	25.6	13.6	25.4
7	0.00	0.00	0.00	0.00	21.3	25.4	13.3	25.1
8	0.00	0.00	0.00	0.00	21.2	25.2	13.0	24.9
9	73.78	0.00	227.07	4.84	21.1	25.1	15.8	24.6
10	429.44	355.70	529.29	364.08	21.5	25.3	22.2	25.0
11	696.23	626.51	683.51	631.89	22.4	25.7	29.8	25.7
12	864.98	802.10	727.36	802.35	23.6	26.3	36.7	26.6
13	884.88	835.19	641.44	830.37	25.4	26.8	41.4	27.3
14	800.66	774.78	503.20	766.12	29.0	27.3	43.4	27.9
15	521.54	554.17	252.67	542.82	32.3	27.6	41.8	28.3
16	123.98	211.04	0.00	197.93	31.0	27.6	37.0	28.3
17	0.00	0.00	0.00	0.00	28.7	27.4	33.0	28.0
18	0.00	0.00	0.00	0.00	26.6	27.3	29.5	27.8
19	0.00	0.00	0.00	0.00	24.8	27.1	26.7	27.6
20	0.00	0.00	0.00	0.00	24.2	26.9	24.2	27.4
21	0.00	0.00	0.00	0.00	23.7	26.8	22.2	27.2
22	0.00	0.00	0.00	0.00	23.4	26.7	20.5	27.0
23	0.00	0.00	0.00	0.00	23.1	26.5	19.0	26.8
24	0.00	0.00	0.00	0.00	22.8	26.4	17.8	26.6

**Πίνακας 11.** Αποτελέσματα για το σενάριο 2

ώρα	ΣΕΝΑΡΙΟ 2							
	RT21	RT27	RT58	SP25A8	RT21	RT27	RT58	SP25A8
	Qu (W)				Tpcm (°C)			
1	0.00	0.00	0.00	0.00	22.2	25.7	15.6	26.0
2	0.00	0.00	0.00	0.00	22.1	25.6	15.5	26.0
3	0.00	0.00	0.00	0.00	22.1	25.6	15.5	26.0
4	0.00	0.00	0.00	0.00	22.1	25.6	15.4	26.0
5	0.00	0.00	0.00	0.00	22.1	25.6	15.4	26.0
6	0.00	0.00	0.00	0.00	22.1	25.6	15.4	26.0
7	0.00	0.00	0.00	0.00	22.0	25.5	15.1	25.9
8	0.00	0.00	0.00	0.00	21.7	25.3	14.1	25.5
9	64.72	0.00	206.27	0.00	21.4	25.0	16.1	25.1
10	423.46	357.39	523.36	355.35	21.7	25.0	21.5	25.1
11	693.81	631.91	697.14	629.98	22.4	25.4	28.2	25.6
12	864.63	808.84	756.93	804.04	23.6	25.9	34.7	26.4
13	886.13	841.90	679.00	833.34	25.2	26.5	39.4	27.1
14	803.89	781.10	540.39	769.37	28.3	26.9	41.4	27.7
15	535.19	561.39	291.36	547.04	31.9	27.2	40.9	28.1
16	130.42	0.00	0.00	202.04	31.2	27.1	37.1	28.1
17	0.00	0.00	0.00	0.00	29.1	26.9	33.4	27.9
18	0.00	0.00	0.00	0.00	27.0	26.8	30.0	27.7
19	0.00	0.00	0.00	0.00	24.5	26.6	26.2	27.4
20	0.00	0.00	0.00	0.00	23.6	26.4	22.0	27.0
21	0.00	0.00	0.00	0.00	23.1	26.2	19.4	26.7
22	0.00	0.00	0.00	0.00	22.7	26.0	17.7	26.5
23	0.00	0.00	0.00	0.00	22.4	25.8	16.6	26.3
24	0.00	0.00	0.00	0.00	22.2	25.7	15.8	26.1

**Πίνακας 12.** Αποτελέσματα για το σενάριο 3

ώρα	ΣΕΝΑΡΙΟ 3							
	RT21	RT27	RT58	SP25A8	RT21	RT27	RT58	SP25A8
	Qu (W)				T <sub>pcm</sub> (°C)			
1	0.00	0.00	0.00	0.00	22.7	27.2	16.4	27.3
2	0.00	0.00	0.00	0.00	22.6	27.2	16.3	27.3
3	0.00	0.00	0.00	0.00	22.6	27.2	16.3	27.3
4	0.00	0.00	0.00	0.00	22.6	27.2	16.2	27.3
5	0.00	0.00	0.00	0.00	22.6	27.2	16.2	27.3
6	0.00	0.00	0.00	0.00	22.6	27.1	16.2	27.3
7	0.00	0.00	0.00	0.00	22.5	27.1	15.8	27.2
8	0.00	0.00	0.00	0.00	22.1	26.8	14.6	26.9
9	94.41	0.00	254.89	0.00	21.9	26.6	17.1	26.5
10	537.87	437.24	639.76	437.72	22.3	26.6	23.8	26.6
11	864.55	771.95	832.96	772.09	23.4	26.9	31.7	27.1
12	1069.96	992.91	891.79	989.82	25.3	27.5	39.2	27.8
13	1091.79	1043.33	792.63	1037.05	29.9	28.3	44.6	28.8
14	955.28	989.79	640.23	979.57	37.1	29.2	46.9	29.9
15	574.73	743.67	362.50	729.21	40.1	30.1	46.7	31.0
16	142.95	357.99	2.43	339.87	38.7	30.6	42.1	31.5
17	0.00	0.00	0.00	0.00	35.8	29.6	37.7	30.4
18	0.00	0.00	0.00	0.00	32.9	29.1	33.6	29.8
19	0.00	0.00	0.00	0.00	29.5	28.7	29.0	29.3
20	0.00	0.00	0.00	0.00	25.7	28.2	24.1	28.6
21	0.00	0.00	0.00	0.00	23.8	27.9	20.9	28.2
22	0.00	0.00	0.00	0.00	23.3	27.6	18.9	27.9
23	0.00	0.00	0.00	0.00	23.0	27.4	17.7	27.6
24	0.00	0.00	0.00	0.00	22.7	27.2	16.7	27.4

**Πίνακας 13.** Αποτελέσματα για το σενάριο 4

ώρα	ΣΕΝΑΡΙΟ 4							
	RT21	RT27	RT58	SP25A8	RT21	RT27	RT58	SP25A8
	Qu (W)				Tpcm (°C)			
1	0.00	0.00	0.00	0.00	21.4	26.5	13.8	26.7
2	0.00	0.00	0.00	0.00	21.3	26.5	13.7	26.7
3	0.00	0.00	0.00	0.00	21.3	26.5	13.7	26.7
4	0.00	0.00	0.00	0.00	21.3	26.4	13.6	26.7
5	0.00	0.00	0.00	0.00	21.3	26.4	13.6	26.7
6	0.00	0.00	0.00	0.00	21.3	26.4	13.6	26.7
7	0.00	0.00	0.00	0.00	21.2	26.4	13.4	26.6
8	0.00	0.00	0.00	0.00	20.9	26.0	12.6	26.1
9	120.82	9.18	297.37	7.83	20.7	25.7	17.5	25.6
10	562.64	455.06	631.83	457.05	21.2	25.8	26.0	25.8
11	886.71	788.40	784.40	789.16	22.5	26.4	34.9	26.6
12	1088.55	1005.15	823.01	999.48	24.6	27.1	42.8	27.7
13	1106.23	1052.81	716.68	1039.81	28.9	28.0	47.6	28.9
14	976.42	995.71	574.73	976.12	38.9	29.1	48.8	30.4
15	534.42	745.08	322.06	716.88	42.2	30.1	47.4	32.2
16	98.49	358.24	0.00	312.71	39.5	30.8	41.1	33.6
17	0.00	0.00	0.00	0.00	35.4	28.9	35.4	30.6
18	0.00	0.00	0.00	0.00	31.6	28.5	30.4	29.8
19	0.00	0.00	0.00	0.00	27.4	28.1	25.2	29.0
20	0.00	0.00	0.00	0.00	22.9	27.6	20.1	28.3
21	0.00	0.00	0.00	0.00	22.3	27.2	17.2	27.7
22	0.00	0.00	0.00	0.00	21.9	26.9	15.5	27.3
23	0.00	0.00	0.00	0.00	21.7	26.7	14.6	27.1
24	0.00	0.00	0.00	0.00	21.4	26.5	13.9	26.8