

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

‘ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ COMBI ΓΙΑ ΚΤΗΡΙΑ ΣΤΗ ΑΘΗΝΑ’
‘PARAMETRIC STUDY OF SOLAR HEATING COMBI
SYSTEMS FOR ATHENS BUILDINGS’

ΕΚΠΟΝΗΣΗ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΖΗΖΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΙΜΩΝΑΣ ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλλαν για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Παναγιώτη και Ευγενία για την υποστήριξη και βοήθεια τους όλα αυτά τα χρόνια.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Κίμωνα Αντωνόπουλο καθηγητή στο τομέα θερμότητας των μηχανολόγων μηχανικών για την καθοδήγηση και βοήθεια του όλους αυτούς τους μήνες για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την συμπαράστασή τους.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας και η σταδιακή μείωση των συμβατικών καυσίμων έχουν κάνει επιτακτική την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εναλλακτικών συστημάτων διαχείρισής της. Ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας ενέργειας που χρησιμοποιείται αφορά την θέρμανση των σπιτιών και την παροχή ζεστού νερού χρήσης (ZNX). Τα συστήματα combi εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια μειώνουν σημαντικά την απαιτούμενη ενέργεια από ορυκτά καύσιμα για την κάλυψη των αναγκών αυτών. Στην παρούσα διπλωματική θα δούμε την λειτουργία των συστημάτων αυτών και στο τέλος θα υπολογίσουμε για τους μήνες Νοέμβριο μέχρι Απρίλιο την θερμοκρασία της δεξαμενής με αποθηκευτικό μέσο το νερό ή κάποιο υλικό αλλαγής φάσης.

Τα κεφάλαια 1,2 είναι εισαγωγικά πάνω στις έννοιες της μεταφοράς θερμότητας και στις μεθόδους αποθήκευσης της ενέργειας αντίστοιχα. Το πρώτο κεφάλαιο αναλύονται οι μηχανισμοί μεταφοράς της θερμότητας οι οποίοι είναι κυρίαρχοι σε θερμικά ηλιακά συστήματα. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι αποθήκευσης της ενέργειας με έμφαση την λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης που διέπει τα υλικά αλλαγής φάσης.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια γενική αναφορά στα υλικά αλλαγής φάσης. Εδώ πληροφορούμαστε για την ταυτότητα των pcm, τις κατηγορίες στις οποίες ανήκουν, τις ιδιότητες τους, των τρόπο συσκευασμού τους άλλα και τα προβλήματα που παρουσιάζουν.

Στο κεφάλαιο 4 αναφέρονται οι μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης και πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται η μέθοδος DSC, η μέθοδος DTA και η μέθοδος T-History.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα ενεργητικά και παθητικά θερμικά ηλιακά συστήματα και μια αναφορά στην ηλιακή ενέργεια για λόγους πληρότητας.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης. Αρχικά μια ιστορική αναδρομή και στην συνέχεια ενδεικτικές εφαρμογές σε ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα.

Στα κεφάλαια 7,8 αναφέρονται στα συστήματα combi και combi plus αντίστοιχα. Παρουσιάζονται οι τεχνολογίες τα γενικά τους χαρακτηριστικά τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές τους στην Ευρώπη και στην Ελλάδα.

Στο κεφάλαιο 9 με την βοήθεια του προγράμματος excel υπολογίζουμε την θερμοκρασία της δεξαμενής σε ηλιακό θερμοσίφωνα με φορτία ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης με αποθηκευτικό μέσο το νερό η κάποιο υλικό αλλαγής φάσης. Επίσης κάνουμε παραμετρική μελέτη για το πώς επηρεάζει την θερμοκρασία δεξαμενής η συλλεκτική επιφάνεια και ο όγκος της δεξαμενής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας.....	7
1.1.Μεταφορά θερμότητας με αγωγή.....	7
1.2.Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.....	11
1.3.Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:Μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας.....	16
2.1:Εισαγωγή.....	16
2.2:Μέθοδοι ενεργειακής αποθήκευσης.....	17
2.2.1:Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας.....	17
2.2.2:Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.....	17
2.2.3:Θερμική αποθήκευση της ενέργειας.....	17
2.2.3.1:Αισθητή Θερμότητα.....	18
2.2.3.2:Λανθάνουσα θερμότητα.....	18
2.2.4: Θερμοχημική Αποθήκευση Ενέργειας.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:Υλικά αλλαγής φάσης.....	21
3.1.Εισαγωγή.....	21
3.2.Χαρακτηριστικά των υλικών αλλαγής φάσης.....	22
3.2.1.θερμικά χαρακτηριστικά.....	22
3.2.2.Φυσικά χαρακτηριστικά.....	22
3.2.3.Κινητικές Ιδιότητες.....	22
3.2.4.Χημικές ιδιότητες.....	23
3.2.5.Οικονομικά κριτήρια.....	23
3.3:Προβλήματα των υλικών αλλαγής φάσης.....	23
3.3.1.Το φαινόμενο του supercooling.....	23
3.3.2.Το φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων.....	25
3.3.3.Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε εκτεταμένη κυκλική Φόρτιση.....	26
3.4.Συσκευασία PCM.....	26
3.4.1.Μαζική αποθήκευση.....	27
3.4.2.Μακροενθυλάκωση.....	27
3.4.3.Μικροενθυλάκωση.....	28
3.4.4.Συστήματα αποθήκευσης μη άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς θερμότητας.....	28
3.5.Κατηγοριοποίηση των P _{cm}	29

3.5.1.Οργανικά PCM.....	31
3.5.1.1.Παραφίνες.....	31
3.5.1.2.Μη παραφίνες.....	33
3.5.2.Ανόργανα υλικά.....	36
3.5.2.1.Ενυδρα άλατα.....	36
3.5.2.2.Μεταλλικά.....	39
3.5.2.3. Εύτηκτα.....	39
Κεφάλαιο:4 Μέθοδοι Μέτρησης των ΥΑΦ.....	41
4.1. Μέθοδος DSC.....	41
4.1.1 DSC με σταθερό ρυθμό ψύξης και θέρμανσης (δυναμική μέτρηση θερμοχωρητικότητας, dynamic DSC).....	42
4.1.2. DSC ισόθερμων βημάτων (isothermal steps mode).....	43
4.2. Μέθοδος διαφορικής θερμικής ανάλυσης (DTA).....	44
4.3. Η μέθοδος T-History.....	48
Κεφάλαιο 5: Ηλιακά θερμικά συστήματα.....	60
5.1.Ηλιακή ενέργεια.....	62
5.2. Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης.....	65
5.2.1.Εισαγωγή.....	65
5.2.2.Υλικά παθητικών ηλιακών συστημάτων.....	67
5.2.2.1.Υλικά συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας.....	68
5.2.2.2.Υλικά αποθήκευσης της θερμότητας.....	70
5.2.3.Κατηγορίες παθητικών ηλιακών συστημάτων θέρμανσης.....	71
5.2.3.1.Σύστημα άμεσου κέρδους.....	71
5.2.3.2.Τοίχος θερμικής αποθήκευσης ή τοίχος μάζας ή ηλιακός τοίχος.....	73
5.2.3.3.Θερμοκήπιο ή ηλιακός χώρος.....	75
5.2.3.4.Θερμοσιφωνικό πανέλο ή αεροσυλλέκτης.....	80
5.2.3.5. Τοιχοποιία με διαφανή μόνωση.....	82
5.3.Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα.....	83
5.3.1Εισαγωγή.....	83
5.3.2.Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης.....	87
Κεφάλαιο 6:Εφαρμογές Pcm.....	91
6.1.Ιστορική αναδρομή.....	91
6.2.Εφαρμογές pcm σε παθητικά συστήματα.....	98
6.2.1.Τοίχος trombe με pcm.....	98
6.2.2.Παραθυρόφυλλο με pcm.....	99
6.2.3.Τοίχος συλλογής ηλιακής θερμότητας για αερισμό του Κτιρίου.....	100
6.2.4.Γυψοσανίδα με ενσωματωμένο pcm.....	102
6.2.5.Μπλόκ τσιμέντου με ενσωματωμένο pcm.....	104
6.2.6.pcm ενσωματωμένο σε ξύλο-ελαφρύ τσιμέντο.....	105

6.2.7.Θερμικά αυξημένος σκελετός τοίχου με pcm.....	106
6.3.Ενεργητικά ηλιακά συστήματα με pcm.....	106
6.3.1.Εισαγωγή.....	106
6.3.2.Διαστρωμάτωση και pcm.....	107
6.3.3.Πειράματα με pcm σε ηλιακά θερμικά συστήματα.....	107
6.3.3.1.Πείραμα 1 ^ο στο Πανεπιστήμια Lleida της Ισπανίας.....	107
6.3.3.2.Πείραμα 2 ^ο στο Πανεπιστήμια Lleida της Ισπανίας.....	110
Κεφάλαιο 7:Συστήματα Combi.....	113
7.1. Γενικά χαρακτηριστικά.....	113
7.2.Περιγραφή αγοράς των συστημάτων combi στην Ευρώπη.....	114
7.3.Ενεργειακή απόδοση στον Ελλαδικό χώρο.....	115
7.3.1.Μεθοδολογία.....	115
7.3.2.Προσομοίωση με TSOL.....	117
7.4.Διαστασιολόγηση–Κρίσιμα τεχνικά θέματα.....	122
7.4.1.Διαστασιολόγηση.....	122
7.4.2.Κρίσιμα Τεχνικά Θέματα.....	123
7.5.Οικονομικές και άλλες παράμετροι- Προοπτικές ανάπτυξης.....	126
7.6.Σχόλια συμπεράσματα.....	127
7.7.Εφαρμογές συστημάτων combi στην Ευρώπη.....	131
Κεφάλαιο 8:Συστήματα solar combi plus.....	133
8.1.Περιγραφή του συστήματος.....	133
8.2.Οι πλέον υποσχόμενες κλιματικές περιοχές.....	134
8.3.Κατάλληλη τεχνολογία συλλεκτών.....	135
8.4.Τυποποιημένες διατάξεις συστήματος.....	139
8.5.Προτάσεις για το σχεδιασμό του συστήματος.....	140
ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ.....	144
Κεφάλαιο 9: Υπολογισμός της θερμοκρασίας δεξαμενής.....	146
9.1.Εισαγωγή.....	146
9.2.Ακτινοβολία GT.....	150
9.3.Θερμοκρασία περιβάλλοντος.....	156
9.4.Φορτίο Νερού.....	161
9.5. Φορτία Σπιτιού.....	165
9.6.Θερμοκρασία δεξαμενής μόνο με φορτίο νερού.....	177
9.6.1.Σταθερό φορτίο νερού.....	177
9.6.2.Μη σταθερό φορτίο νερού.....	183
9.7.Θερμοκρασία δεξαμαμενής με όλα τα φορτία.....	186
9.7.1.Παραμετρική ανάλυση.....	189
9.8.Θερμοκρασία δεξαμενής με pcm.....	210

ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1 : Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

Στην θερμοδυναμική , η θερμότητα ορίζεται ως η ενέργεια που διασχίζει τα όρια ενός συστήματος όταν αυτή η μεταφορά της ενέργειας συμβαίνει εξαιτίας μίας διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντός του. Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος δηλώνει ότι η θερμότητα ρέει πάντα προς το ψυχρότερο μέσο.

Ωστόσο η θερμοδυναμική δεν δείχνει , πως αυτή η μεταφερόμενη θερμότητα εξαρτάται από την διαφορά της θερμοκρασίας ή πόσο γρήγορη και έντονη αυτή η μη αναστρέψιμη διαδικασία είναι. Η επιστήμη της μεταφοράς θερμότητας διευκρινίζει τους νόμους που διέπουν αυτή την διαδικασία.

Υπάρχουν τρεις τρόποι για την μεταφορά θερμότητας :[11,12]

1. Αγωγή
2. Συναγωγή
3. Ακτινοβολία

1.1. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Αγωγή είναι η μεταφορά ενέργειας από τα πιο ενεργά σωματίδια μίας ουσίας προς τα γειτονικά λιγότερο ενεργά σωματίδια λόγω των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Η αγωγή μπορεί να συμβεί στα στερεά στα υγρά ή στα αέρια. Στα αέρια και στα υγρά , η αγωγή οφείλεται στις συγκρούσεις και στην διάχυση μεταξύ των μορίων κατά την τυχαία κίνησή τους. Στα στερεά , οφείλεται στο συνδυασμό των ταλαντώσεων των μορίων σε μία δομή πλέγματος και της μεταφοράς ενέργειας από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Εάν σε ένα μέσο υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας , η θερμότητα θα ρέει από την περιοχή υψηλότερης θερμοκρασίας στην περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας. Ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα δια αγωγής (q_k) είναι ανάλογος με την παράγωγο της θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο επί την επιφάνεια μέσα από την οποία μεταδίδεται η θερμότητα.[11,12]

$$q_k \propto A \frac{dT}{DX} \quad (1.1)$$

Στην παραπάνω σχέση το $T(x)$ είναι η τοπική θερμοκρασία και x είναι η απόσταση στην διεύθυνση που μεταδίδεται η θερμότητα. Ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδεται η θερμότητα εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα , που είναι μία φυσική ιδιότητα του μέσου.

Για αγωγή μέσο ενός ομογενούς μέσου , ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας

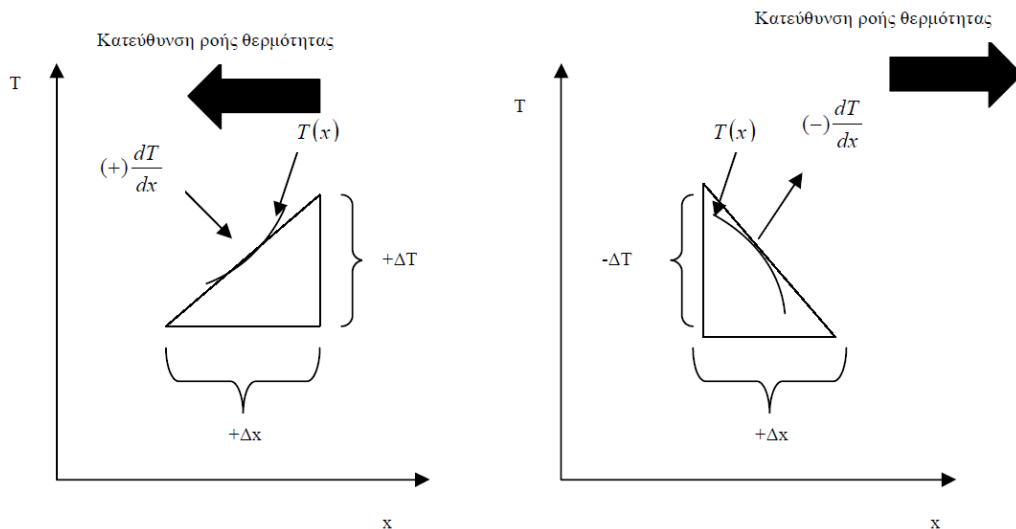
είναι:

$$q_k = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{DX} \quad (1.2)$$

Το σύμβολο « - » είναι συνέπεια του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, που απαιτεί η θερμότητα να ρέει από την υψηλότερη στην χαμηλότερη θερμοκρασία. Όπως φαίνεται παρακάτω (Σχ. 1.1,1.2) η παράγωγος της θερμοκρασίας θα είναι αρνητική αν η θερμοκρασία ελαττώνεται όταν η τιμές του x αυξάνονται. Έτσι πρέπει να βάλουμε « - » αν θερμότητα μεταφέρεται προς τα θετικά του x στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (1.2).

Η εξίσωση Εξ.1.1 ορίζει την θερμική αγωγιμότητα και είναι ο νόμος του Fourier για την αγωγή (1822). Η θερμική αγωγιμότητα (k) είναι μια ιδιότητα του υλικού που δείχνει την ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται στην μονάδα του χρόνου κατά μήκος της μονάδας επιφάνειας όταν η παράγωγος της θερμοκρασίας είναι συνεχής. Στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) ,η επιφάνεια μετράτε σε τετραγωνικά μέτρα (m^2), η θερμοκρασία σε Kelvin (K) , η απόσταση x σε μέτρα (m) και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας σε Watts(W). Έτσι οι μονάδες της θερμικής αγωγιμότητας είναι $\frac{W}{mK}$

Στο βρετανικό σύστημα το χρησιμοποιείται κυρίως στις Η.Π.Α η επιφάνεια μετράτε σε τετραγωνικά πόδια (ft^2) , η απόσταση σε πόδια (ft) , η θερμοκρασία σε βαθμούς Fahrenheit ($^{\circ}F$), και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας σε Btu/hr. Έτσι το k έχει μονάδες $\frac{Btu}{hr \cdot ft \cdot ^{\circ}F}$



ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΣΧΗΜΑ 1.1: Αυξανόμενη θερμοκρασία κινούμενοι προς τα δεξιά του x
ΔΕΞΙΑ ΣΧΗΜΑ 1.2: Μειούμενη θερμοκρασία κινούμενη προς τα δεξιά του x [11]

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1:
ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα στους 300K	
	$\frac{W}{m \cdot K}$	$\frac{Btu}{hr \cdot ft \cdot ^\circ F}$
Χαλκός	399	231
Αλουμίνιο	237	137
Ατσάλι, 1%C	43	25
Γυαλί	0.81	0.47
Πλαστικό	0.2-0.3	0.12-0.17
Νερό	0.6	0.35
Αιθυλική αλκοόλη	0.26	0.15
Λάδι μηχανής	0.15	0.09
Φρέον (υγρό)	0.07	0.04
Υδρογόνο	0.18	0.10
Αέρας	0.026	0.02

Ο νόμος του Fourier ορίζει την θερμική αγωγιμότητα με την σχέση:

$$K = \frac{q_k/A}{|dT/dx|} \quad (1.3)$$

Πάραυτα στους υπολογισμούς γενικά χρησιμοποιούμε πειραματικά μετρημένες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας, αν και για τα αέρια σε μέτριες θερμοκρασίες η θεωρία της κινητικής των αερίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των πειραματικών δεδομένων επαρκώς. Ο παραπάνω πίνακας παραθέτει μερικές τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας κάποιων υλικών. Από ότι φαίνεται οι ικανότεροι αγωγοί θερμότητας είναι τα μέταλλα και οι χαμηλότερες τιμές του k εμφανίζονται στα αέρια, ενώ στο ενδιάμεσο βρίσκονται τα κράματα μετάλλων και τα υγρά.

Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα Αέρια/Υγρά/Στερεά:

A) Αέρια

Ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα αέρια μπορεί να εξηγηθεί σε μοριακό επίπεδο, μέσω της κινητικής θεωρίας των αερίων. Η κινητική ενέργεια ενός μορίου σχετίζεται με την θερμοκρασία του. Τα μόρια σε μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας έχουν υψηλότερες ταχύτητες από αυτά που βρίσκονται σε μία περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Καθώς τα μόρια βρίσκονται σε συνεχή τυχαία κίνηση, συγκρούονται μεταξύ τους και ανταλλάσσουν ορμή και ενέργεια. Όταν ένα μόριο κινηθεί από μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας, σε μία περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας μεταφέρει κινητική ενέργεια. Καθώς συγκρούεται με τα μόρια χαμηλής

ταχύτητας , δίνει κάποιο μέρος της ενέργειάς του, αυξάνοντας έτσι την ενέργεια των μορίων χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου. Με αυτόν τον τρόπο θερμότητα μεταφέρεται από τις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας στις αντίστοιχες χαμηλής μέσο της μοριακής κίνησης. Σε συμφωνία με τα παραπάνω, όσο πιο μεγάλη ταχύτητα έχουν τα μόρια τόσο πιο γρήγορα θα γίνεται και η μεταφορά θερμότητας. Συνεπώς , η ιδιότητα που ονομάσαμε θερμική αγωγιμότητα πρέπει να εξαρτάτε από την θερμοκρασία του αερίου. Σε λογικές θερμοκρασίες η απόσταση μεταξύ των μορίων ενός αερίου είναι πολύ μεγάλη συγκρινόμενη με το μέγεθος των μορίων , επομένως η θερμική αγωγιμότητα των αερίων μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη της πίεσης.

B) Υγρά

Ο βασικός μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα υγρά είναι ποιοτικά παρόμοιος με τον αντίστοιχο των αερίων. Ωστόσο η μοριακή κατάσταση στα υγρά είναι πιο δύσκολο να εξηγηθεί. Για τα περισσότερα υγρά η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με αυξανόμενη την θερμοκρασία εν τούτοις το νερό είναι μια αξιοσημείωτη εξαίρεση. Ακόμη η θερμική αγωγιμότητα είναι ανεξάρτητη της πίεσης στα υγρά εκτός από τις περιοχές κοντά στο κρίσιμο σημείο. Τέλος σαν γενικός κανόνας , η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με αυξανόμενο το μοριακό βάρος των υγρών.

C) Στερεά

Σύμφωνα με τις υπάρχουσες θεωρίες , τα στερεά υλικά αποτελούνται από ελεύθερα ηλεκτρόνια και άτομα σε περιοδική κρυσταλλική δομή. Λόγω αυτού η μεταφορά θερμότητας μπορεί να γίνει με δύο μηχανισμούς:

- 1) Κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων
- 2) Ταλάντωση του κρυσταλλικού πλέγματος.

Αυτά τα δύο φαινόμενα είναι προσθετικά, γενικότερα όμως η μετάδοση θερμότητας μέσω των ηλεκτρονίων είναι πιο αποτελεσματική. Εφόσον τα ηλεκτρόνια μεταφέρουν ηλεκτρικό φορτίο με ένα τρόπο παρόμοιο με αυτόν με τον οποίο μεταφέρουν θερμότητα από περιοχές υψηλής θερμοκρασίας σε περιοχές χαμηλής θερμοκρασίας , οι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού είναι συνήθως και καλοί αγωγοί θερμότητας ενώ οι μονωτές του ηλεκτρικού ρεύματος είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας. Στα μη μεταλλικά στερεά υπάρχει πολύ μικρή ως και καθόλου μεταφορά ηλεκτρονίων και συνεπώς η αγωγιμότητα καθορίζεται από την ταλάντωση του κρυσταλλικού πλέγματος, σαν συνέπεια αυτά τα υλικά έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα μέταλλα.

1.2. Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Συναγωγή είναι ο τρόπος μεταφοράς της ενέργειας μεταξύ μίας στερεάς επιφάνειας και του γειτονικού υγρού ή αέριου που βρίσκεται σε κίνηση, και περιλαμβάνει τη συνδυασμένη επίδραση της αγωγής και της κίνησης του ρευστού. Όσο πιο γρήγορη είναι η κίνηση του ρευστού, τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.

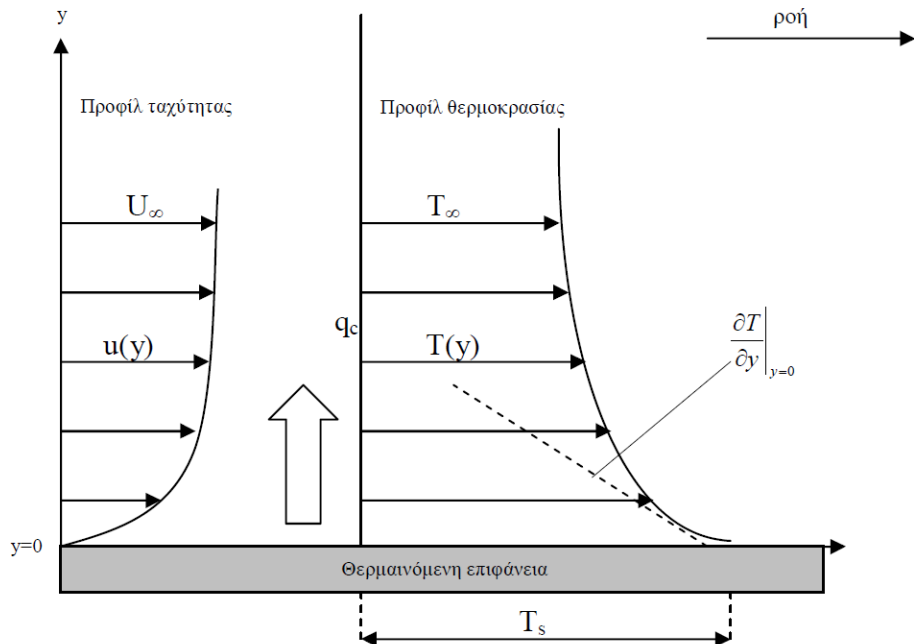
Όταν δεν υπάρχει μεγάλη κίνηση ρευστού, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του γειτονικού ρευστού γίνεται αποκλειστικά με αγωγή. Όταν υπάρχει μεγάλη κίνηση ρευστού, ενισχύεται η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του γειτονικού ρευστού, αλλά κάνει και πιο πολύπλοκο τον προσδιορισμό των ρυθμών μεταφοράς θερμότητας. Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή αποτελείται οπότε από δύο μηχανισμούς που εκτελούνται ταυτόχρονα:

- 1) μεταφορά ενέργειας εξαιτίας της μοριακής κίνησης (αγωγή).
- 2) μεταφορά ενέργειας λόγω των μακροσκοπικών κινήσεων των μορίων του ρευστού.

Η κίνηση του ρευστού είναι αποτέλεσμα ομάδων μορίων του ρευστού που κινούνται λόγω μίας εξωτερικής δύναμης. Αυτή η δύναμη είτε υπάρχει λόγω διαφοράς πυκνότητας όπως συμβαίνει στην ελεύθερη συναγωγή, είτε λόγω διαφοράς πίεσης που δημιουργείται από μία αντλία ή έναν ανεμιστήρα, είτε από συνδυασμό των δύο παραπάνω.

Το παρακάτω σχήμα (Σχ 1.3) δείχνει μία πλάκα με θερμοκρασία T_s στην επιφάνειά της και ρευστό θερμοκρασίας T_∞ που ρέει παράλληλα στην πλάκα. Η ταχύτητα του ρευστού στην επιφάνεια είναι μηδέν λόγω τυρβωδών δυνάμεων και αυξάνει προς τα πάνω ως U_∞ . Αφού το ρευστό είναι ακίνητο στην επιφάνεια σε εκείνο το σημείο η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο με αγωγή. Εάν γνωρίζαμε την διάφορα της θερμοκρασίας και την θερμική αγωγιμότητα σε εκείνο το σημείο θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε την θερμοροή από την εξίσωση 1.2[11,12]

$$q_c = -k_{\text{fluid}} \cdot A \cdot \left. \frac{dT}{dx} \right|_{y=0} \quad (1.4)$$



ΣΧΗΜΑ 1.3: Προφίλ ταχύτητας και θερμοκρασίας για μεταφορά θερμότητας με συναγωγή σε πλάκα με ροή ρευστού στην επιφάνειά της.[10]

Εν τούτοις η θερμοκρασιακή διαφορά στην επιφάνεια εξαρτάται από τον ρυθμό με τον οποίο οι μακροσκοπικές και η μικροσκοπικές κινήσεις των μορίων του ρευστού μεταφέρουν θερμότητα μακριά από την επιφάνεια. Συνεπώς η θερμοκρασιακή διαφορά στην επιφάνεια της πλάκας εξαρτάται από την ροή του ρευστού, και συγκεκριμένα από την ταχύτητα U_∞ . Ο μηχανισμός είναι παρόμοιος και για την ελεύθερη συναγωγή. Η ειδοποιός διαφορά βρίσκεται στην ταχύτητα. Στην εξαναγκασμένη συναγωγή μακριά από την επιφάνεια συναλλαγής η ταχύτητα πλησιάζει την ταχύτητα της ελεύθερης ροής U_∞ , ενώ στην ελεύθερη συναγωγή η ταχύτητα στην αρχή αυξάνει με αυξανόμενη την απόσταση από την επιφάνεια συναλλαγής και μετά από κάποια τιμή αρχίζει και μειώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι το ιξώδες μειώνεται πολύ γρήγορα αυξάνοντας την απόσταση από την επιφάνεια, ενώ η πυκνότητα πολύ πιο αργά. Τελικά όμως και η δύναμη της άνωσης μειώνεται καθώς η πυκνότητα του ρευστού πλησιάζει αυτή του ρευστού που δεν έχει θερμανθεί.

Αυτή η αλληλεπίδραση των δυνάμεων οδηγεί την ταχύτητα του ρευστού σε ένα μέγιστο σημείο και μετά στο μηδέν, μακριά από την θερμαινόμενη πλάκα. Τα προφίλ της θερμοκρασίας και στις δύο περιπτώσεις είναι παρεμφερή και η μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια γίνεται με αγωγή. Τα παραπάνω δείχνουν πως η συναγωγή εξαρτάται από την πυκνότητα, το ιξώδες και την ταχύτητα του ρευστού. καθώς και από της θερμικές του ιδιότητες (θερμική αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα) Αν και στην εξαναγκασμένη συναγωγή η ταχύτητα προσδίδεται στο σύστημα από μία αντλία ή έναν ανεμιστήρα και μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα, στην ελεύθερη

συναγωγή η ταχύτητα εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην επιφάνεια και στο ρευστό, τον συντελεστή θερμικής διαστολής του ρευστού (που καθορίζει την μεταβολή της πυκνότητας ανά μονάδα θερμοκρασιακής διαφοράς) και την δύναμη κίνησης (για συστήματα στην Γη η δύναμη της βαρύτητας). Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μεταξύ μίας επιφάνειας και ενός ρευστού που ρέει παράλληλα προς την επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$q_c = \bar{h}_c \cdot A \cdot \Delta T \quad (1.5)$$

Όπου:

q_c : Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, Watt (ή Btu/hr)

A : Η επιφάνεια συναλλαγής, m^2 (ή ft^2)

ΔT : Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας της πλάκας θερμοκρασίας T_s και του ρευστού θερμοκρασίας T_∞ (μακριά από την επιφάνεια), K (ή $^\circ F$)

\bar{h}_c : Ο μέσος συντελεστής συναγωγής στην επιφάνεια A, W/m^2K

Η σχέση 1.5 προτάθηκε αρχικά από τον Βρετανό επιστήμονα Isaac Newton το 1701. Οι μηχανικοί χρησιμοποιούσαν αυτή την έκφραση για πολλά χρόνια, αν και περισσότερο είναι ορισμός του h παρά νόμος της συναγωγής. Η εκτίμηση του συντελεστή συναγωγής είναι δύσκολη γιατί η συναγωγή είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο. Η τιμή του μέσου συντελεστή συναγωγής σε ένα σύστημα εξαρτάται από την γεωμετρία της επιφάνειας, την ταχύτητα και της θερμικές ιδιότητες του ρευστού και συχνά ακόμα και από την θερμοκρασιακή διαφορά ΔT . Δεδομένου ότι αυτές οι τιμές δεν παραμένουν σταθερές κατά μήκος μίας επιφάνειας, ο συντελεστής συναγωγής μπορεί και αυτός να διαφέρει από σημείο σε σημείο. Για αυτό τον λόγο διαχωρίζουμε τον συντελεστή συναγωγής στον τοπικό συντελεστή και τον μέσο συντελεστή. Έτσι έχουμε για τον τοπικό συντελεστή h_c :

$$dq_c = h_c \cdot dA(T_s - T_\infty) \quad (1.6)$$

Ενώ για τον μέσο συντελεστή \bar{h}_c :

$$\bar{h}_c = \frac{1}{A} \iint_A h_c dA \quad (1.7)$$

Στις περισσότερες εφαρμογές ενδιαφερόμαστε για μέσες τιμές. Στον παρακάτω πίνακα(1.2) παρατίθενται τυπικές τιμές του συντελεστή συναγωγής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ

Πίνακας 7 :Συντελεστής συναγωγής^[4]		
Ρευστό	$\frac{W}{m^2 K}$	$\frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$
Αέρας ,ελεύθερη συναγωγή	6-30	1-5
Υπέρθερμος ατμός ή αέρας , εξαναγκασμένη συναγωγή	30-300	5-50
Λάδι ,εξαναγκασμένη συναγωγή	60-1,800	10-300
Νερό , εξαναγκασμένη συναγωγή	300-18,000	50-3,000
Νερό , βρασμός	3,000-60,000	500-10,000
Νερό , συμπύκνωση	6,000-120,000	1,000-20,000

1.3.Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Ακτινοβολία είναι η ενέργεια που εκπέμπει η ύλη με την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ή φωτονίων) λόγω των μεταβολών στην ηλεκτρονική διαμόρφωση των ατόμων ή των μορίων. Σε αντίθεση με την αγωγή και την συναγωγή, η μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη υλικού μέσου. Στην πραγματικότητα , η μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία είναι γρηγορότερη (ίση με την ταχύτητα του φωτός) και δεν υφίσταται απώλειες στο κενό.

Στη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας ενδιαφέρει η θερμική ακτινοβολία ,η οποία αποτελεί τη μορφή ενέργειας που εκπέμπουν τα σώματα λόγω της θερμοκρασίας τους. Διαφέρει από τις άλλες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπως ακτίνες-Χ , οι ακτίνες-γ , τα μικροκύματα , τα ραδιοκύματα και τα τηλεοπτικά κύματα , τα οποία δεν σχετίζονται με την θερμοκρασία. Όλα τα σώματα σε θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία είναι ένα ογκομετρικό φαινόμενο και όλα τα στερεά , τα υγρά και τα αέρια εκπέμπουν, απορροφούν, ή μεταδίδουν ακτινοβολία σε διαφορετικό βαθμό. Ωστόσο, η ακτινοβολία θεωρείται συνήθως ως επιφανειακό φαινόμενο για τα στερεά που είναι αδιαφανή στη θερμική ακτινοβολία όπως τα μέταλλα, το ξύλο και τα πετρώματα, αφού η ακτινοβολία που εκπέμπουν οι εσωτερικές περιοχές αυτών των υλικών δεν φτάνει ποτέ στην επιφάνεια, και η προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω σε τέτοια σώματα απορροφάται συνήθως σε λίγα μόνο μικρά από την επιφάνεια.[10,11]

Η ποσότητα της ενέργειας που διαφεύγει από μία επιφάνεια σαν

ακτινοβολία εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία και την φύση της επιφάνειας. Ένας ιδανικός εκπομπός ακτινοβολίας , εκπέμπει θερμότητα από την επιφάνεια του με ρυθμό q_r που δίνεται από την παρακάτω σχέση:[11,12]

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (1.8)$$

Όπου:

$\dot{Q}_{emit,max}$: Ο ρυθμός που εκπέμπεται θερμότητα σε Watt

A: Η επιφάνεια σε m^2

T: Θερμοκρασία στην επιφάνεια σε K

Η ιδανική επιφάνεια που εκπέμπει ακτινοβολία με το μέγιστο αυτό ρυθμό ονομάζεται μέλαν (μαύρο) σώμα , και η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα τέτοιο σώμα ονομάζεται ακτινοβολία του μέλανος σώματος. Η ακτινοβολία που εκπέμπουν όλες οι πραγματικές επιφάνειες είναι μικρότερη από εκείνη του μέλανος σώματος στην ίδια θερμοκρασία , και εκφράζεται ως:

$$\dot{Q}_{emit,max} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (1.9)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας

1.1. Εισαγωγή

Η συνεχής αύξηση στο επίπεδο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η αύξηση των τιμών των καυσίμων αποτελούν τις κύριες κινητήριες δυνάμεις πίσω από τις προσπάθειες να χρησιμοποιηθούν επιστήμονες ανά τον κόσμο είναι στη αναζήτηση νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Μία εξίσου σημαντική επιλογή είναι η ανάπτυξη ενεργειακών συσκευών αποθήκευσης. Η ενεργειακή αποθήκευση διαδραματίζει σημαντικούς ρόλους στη συντήρηση της διαθέσιμης ενέργειας και τη βελτίωση της χρησιμοποίησής της, δεδομένου ότι πολλές πηγές ενέργειας είναι πεπερασμένης φύσης. Η βραχυπρόθεσμη αποθήκευσή της μόνο μερικών ωρών είναι ουσιαστική στις περισσότερες εφαρμογές, εντούτοις, μακροπρόθεσμη αποθήκευση, για παράδειγμα, μερικών μηνών μπορεί να απαιτηθεί σε μερικές εφαρμογές.

Η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, και ως εκ τούτου, η αξιοποίηση της απαιτεί μια αποδοτική θερμική ενεργειακή αποθήκευση έτσι ώστε η επιπλέον θερμότητα που συλλέγεται κατά τη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας να μπορεί να αποθηκευτεί για την χρήση της κατά τη διάρκεια της νύχτας. Παρόμοια προβλήματα προκύπτουν στα συστήματα διατήρησης σταθερής θερμοκρασίας όπου οι περίοδοι διαθεσιμότητας της θερμότητας και οι αντίστοιχες ανάγκες χρησιμοποίησής της είναι διαφορετικές, απαιτώντας κάποιου είδους ενεργειακή αποθήκευση. Επίσης, η ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας ποικίλλει σημαντικά κατά τη διάρκεια της μέρας και της νύχτας, ειδικά στις εξαιρετικά κρύες και ζεστές χώρες όπου το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης οφείλεται στην θέρμανση και τον κλιματισμό των σπιτιών. Αυτή η διαφοροποίηση οδηγεί σε μια περίοδο χαμηλής ενεργειακής ζήτησης, συνήθως μετά από τα μεσάνυχτα μέχρι τα ξημερώματα και σε μια περίοδο αιχμής με υψηλή ζήτηση. Συνεπώς, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος πρέπει να σχεδιαστούν κατάλληλα προκειμένου να μπορούν να καλύψουν το μέγιστο φορτίο που απαιτείται. Καλύτερη σχεδίαση ηλεκτρικής παραγωγής μπορεί να επιτευχθεί εάν κάποιο από το μέγιστο φορτίο μπορούσε να μετατοπιστεί εκτός των ωρών αιχμής το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί από τη θερμική αποθήκευση της θερμότητας ή της ψύξης. Ως εκ τούτου, η επιτυχής εφαρμογή της μετατόπισης των φορτίων και της ηλιακής ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο ενεργειακής αποθήκευσης.[2]

1.2. Μέθοδοι ενεργειακής αποθήκευσης

Η σωστότερη διαχείριση της ενέργειας με τη χρήση της θερμικής αποθήκευσης, οδηγεί σε πιο αποδοτική εκμετάλλευση της ενέργειας από τις εγκαταστάσεις. Οι διαφορετικοί τύποι ενέργειας που μπορούν να αποθηκευτούν είναι οι εξής:[2]

1.2.1. Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας

Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν την αποθήκευση της βαρυντικής ενέργειας ,την υδροηλεκτρική αποθήκευση αντλίας ,την αποθήκευση ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage,CAES). Στη βαρυντική νερό με αντλία μεταφέρεται σε κάποιο ύψος και αφήνεται να πέσει, οδηγούμενο σε στρόβιλο. Στη συμπιεσμένου αέρα, αέρας συμπιέζεται και αποθηκεύεται υπογείως ώστε όταν χρειαστεί, να τροφοδοτηθεί σε στρόβιλο. Άλλη μέθοδος είναι η αποθήκευση της ενέργειας σε έναν περιστρεφόμενο ρότορα σε μορφή κινητικής ενέργειας(flywheels energy storage systems).[2]

1.2.2. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

Αποθήκευση μέσω μπαταριών είναι μια επιλογή για την ηλεκτρική ενέργεια. Οι μπαταρίες φορτίζονται με την σύνδεση τους με μια πηγή και κατά την αποφόρτιση τους η αποθηκευμένη χημική ενέργεια μετατρέπεται και πάλι σε ηλεκτρική. Δυνατές εφαρμογές των μπαταριών είναι για την εκμετάλλευση της ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταικές εγκαταστάσεις κυρίως σε χρονικά διαστήματα μικρής ζήτησης.Ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος τύπος μπαταρίας είναι οξεία του μολύβδου επίσης Ni-Cd.[2]

1.2.3. Θερμική αποθήκευση ενέργειας

Θερμική αποθήκευση της θερμότητας επιτυγχάνεται με αύξηση της εσωτερικής ενέργειας ενός υλικού σε μορφή λανθάνουσας ,αισθητής θερμότητας ή σε θερμοχημικό συνδυασμό και των δύο. Στο σχήμα 2.1 παρακάτω φαίνονται οι διάφορες τεχνικές αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας.[2]

1.2.3.1. Αισθητή θερμότητα

Όταν θερμαίνεται ένα αντικείμενο, η θερμοκρασία του ανεβαίνει καθώς προστίθεται θερμότητα. Η αύξηση της θερμοκρασίας ονομάζεται αισθητή θερμότητα. Ομοίως, όταν θερμότητα αφαιρείται από ένα αντικείμενο η θερμοκρασία του μειώνεται. Συνεπώς, η θερμότητα που προκαλεί αλλαγές στη θερμοκρασία ενός αντικειμένου ονομάζεται αισθητή θερμότητα. Η ποσότητα που αποθηκεύεται εξαρτάται από την ειδική θερμότητα του μέσου από την μάζα του υλικού την τωρινή του θερμοκρασία και την διαφορά θερμοκρασίας.

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p DT \quad (2.1)$$

$$Q = m C_{ap} (T_f - T_i) \quad (2.2)$$

Όπου:

Q η ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας σε Joule

m η μάζα του αντικειμένου σε Kg

T_i η αρχική θερμοκρασία σε K

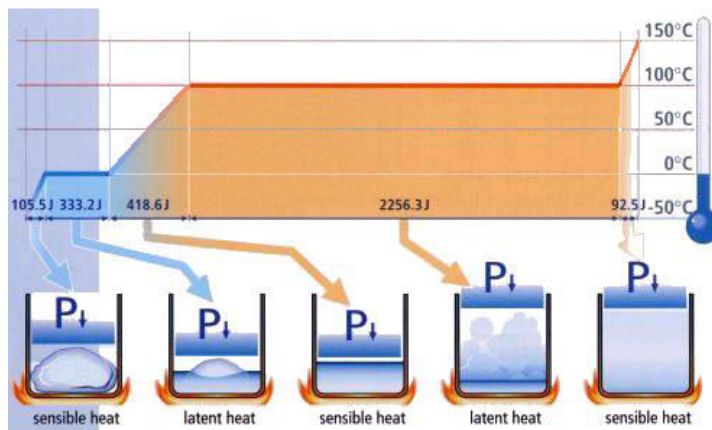
T_f η τελική θερμοκρασία σε K

C_p η θερμοχωρητικότητα σε j/kg k

C_{pab} η μέση σταθερή θερμοχωρητικότητα ανάμεσα στην τελική και την αρχική θερμοκρασία.[2]

1.2.3.2. Λανθάνουσα θερμότητα

Λανθάνουσα θερμότητα είναι η ενέργεια που απορροφά η εκλύει το υλικό κατά της διάρκεια αλλαγής φάσης από στερεό σε υγρό και αντίστροφα.



Εικόνα 2.1 Λανθάνουσα Θερμότητα Νέρου

Η ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με μέσω ένα υλικό αλλαγής φάσης ορίζεται:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m C_p DT + m \alpha_m \Delta H_m + \int_{T_m}^{T_f} m C_p DT \quad (2.3)$$

$$Q = m [C_{sp}(T_m - T_i) + \alpha_m \Delta H_m + C_{lp}(T_f - T_m)] \quad (2.4)$$

Όπου:

Q: η ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας σε Joule

m: η μάζα του αντικειμένου σε Kg

T_i: η αρχική θερμοκρασία σε K

T_f: η τελική θερμοκρασία σε K

C_p: η θερμοχωρητικότητα σε j/kg k

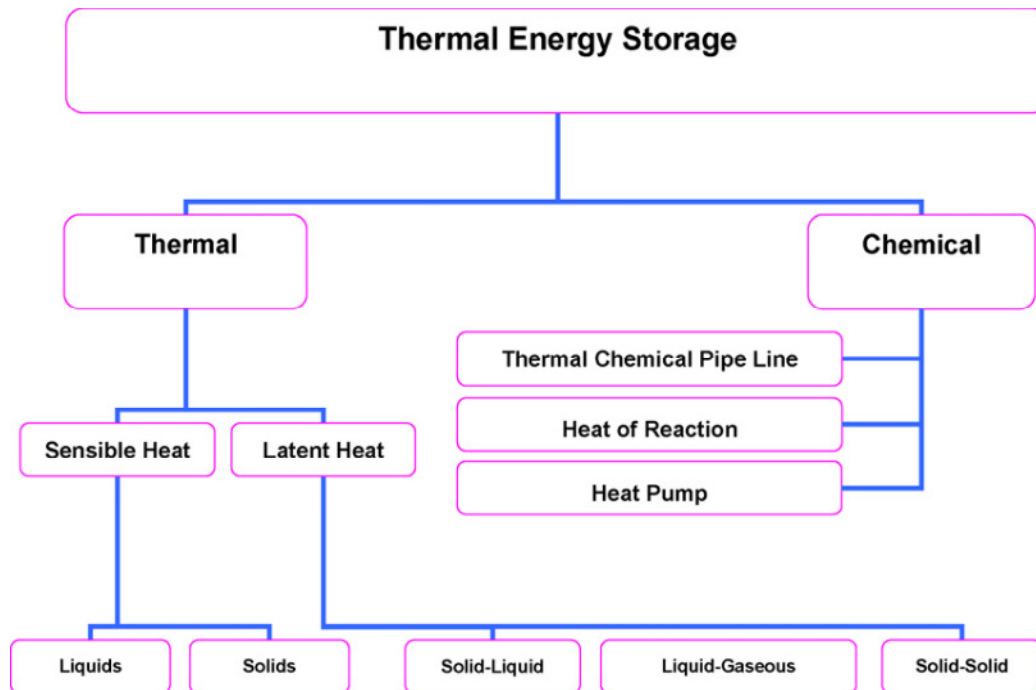
T_m: η θερμοκρασία τήξης

α_m: ποσοστό μάζας που έτηξε

ΔH_m: ενθαλπία τήξης ανά μονάδα βάρους.

C_{sp}: μέση ειδική θερμότητα μεταξύ των θερμοκρασιών T_i και T_m

C_{lp}: μέση ειδική θερμότητα μεταξύ των θερμοκρασιών T_f και T_m



Σχήμα 2.1 Αποθήκευση της θερμικής ενέργειας

1.2.4.Θερμοχημική αποθήκευση ενέργειας

Τα θερμοχημικά συστήματα στηρίζονται στην ενέργεια που απορροφάται και απελευθερώνεται από το σπάσιμο και τον ανασχηματισμό των μοριακών δεσμών σε μια απολύτως αντιστρέψιμη χημική αντίδραση. Σε αυτήν την περίπτωση, η θερμότητα που αποθηκεύεται εξαρτάται από το ποσό του υλικού αποθήκευσης, την ενδοθερμική θερμότητα της αντίδρασης, και την έκταση της μετατροπής.

$$Q = \alpha_r m \Delta h_r \quad (2.5)$$

Όπου:

Q: η ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας σε Joul

α_r : ποσοστό που αντιδρά

m: μάζα

Δh_r : ενδόθερμη θερμότητα αντίδρασης

Μεταξύ των παραπάνω τεχνικών αποθήκευσης θερμότητας, η μέθοδος της λανθάνουσας αποθήκευσης της θερμότητας είναι ιδιαίτερα ελκυστική χάρη στη δυνατότητά της να παρέχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα αποθήκευσης και στην χαρακτηριστική ιδιότητα των υλικών αλλαγής φάσης(PCM) να αποθηκεύουν θερμότητα σε σταθερή θερμοκρασία. [2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

3.1. Εισαγωγή

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

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

Για την πρώτη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά τους αποτελεί η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή όγκο, ενώ για τη δεύτερη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται για την αλλαγή φάσης[3].

Τα υλικά αλλαγής φάσης(ΥΑΦ) είναι υλικά λανθάνουσας αποθήκευσης της θερμότητας και η μεταφορά της θερμικής ενέργειας προκύπτει όταν ένα υλικό αλλάζει φάση. Η αλλαγή φάσης μπορεί να είναι μία από τις ακόλουθες μορφές: στερεό-στερεό, στερεό-υγρό, στερεό-αέριο, υγρό-αέριο και αντίστροφα. Αναλυτικότερα στην αλλαγή φάσης στερεό προς στερεό αλλάζει η κρυσταλλική δομή του υλικού . Αυτές οι αλλαγές στην δομή έχουν γενικά τη μικρότερη λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης αλλά επιπλέον μικρές αλλαγές όγκου που επιτρέπουν την ευκολότερη συσκευασία ΥΑΦ και μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό. Οι μεταβάσεις από στερεό σε αέριο και από υγρό σε αέριο έχουν μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης αλλά οι μεγάλες αλλαγές όγκου τους που συνδέονται με τα προβλήματα συγκράτησης αποκλείουν την πιθανή χρησιμότητά τους στα συστήματα θερμικής αποθήκευσης. Οι μεγάλες αλλαγές στον όγκο καθιστούν το σύστημα σύνθετο και μη πρακτικό. Μεταβάσεις από στερεό σε υγρό έχουν συγκριτικά μικρότερη λανθάνουσα θερμότητα εντούτοις έχουν μικρή αλλαγή στον όγκο της τάξεως του 10% που τα καθιστά ελκυστικά για πρακτικούς και οικονομικούς λόγους. Αντίθετα με τα συμβατικά υλικά(αισθητής θερμότητας) τα ΥΑΦ εκλύουν και απορροφούν θερμότητα σε σταθερό εύρος τιμών και επιπλέον μπορούν να αποθηκεύσουν 5-14 φορές παραπάνω θερμότητα ανά μονάδα όγκου.[2]

3.2. Χαρακτηριστικά των υλικών αλλαγής φάσης

Παρόλα αυτά η επιλογή του εκάστοτε ΥΑΦ πρέπει να καλύπτει κάποια θερμικά, χημικά ,κινητικά χαρακτηριστικά προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζουν και οικονομικά κριτήρια που αφορούν την διαθεσιμότητα του υλικού.[2]

3.2.1. Θερμικά χαρακτηριστικά

- A) Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης
- B) Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής
- Γ) Καλή θερμική αγωγιμότητα

Το ΥΑΦ που θα επιλέξουμε θα πρέπει να έχει το κατάλληλο εύρος θερμοκρασιών συμβατό με την εφαρμογή μας. Επιπλέον η λανθάνουσα θερμότητα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ανά μονάδα όγκου προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο φυσικός όγκος της εφαρμογής μας. Τέλος καλή θερμική αγωγιμότητα βοηθάει στην θερμική φόρτιση και αποφόρτιση του ΥΑΦ.

3.2.2. Φυσικά χαρακτηριστικά

- 1) Κατάλληλη ισορροπία φάσης
- 2) Υψηλή πυκνότητα
- 3) Μικρή αλλαγή όγκου
- 4) Χαμηλή πίεση ατμών

Σταθερότητα του ΥΑΦ κατά την διάρκεια της υγροποίησης και στερεοποίησης είναι επιθυμητή για την ομαλή λειτουργία της εφαρμογής μας. Επίσης υψηλή πυκνότητα μικρή αλλαγή όγκου και χαμηλή πίεση ατμών μειώνουν τα προβλήματα όγκου και αντοχής συσκευασμού των ΥΑΦ.

3.2.3. Κινητικές ιδιότητες

- 1) Όχι supercooling
- 2) Επαρκής ρυθμός κρυσταλλοποίησης

Ένα σοβαρό πρόβλημα που αφορά στο σύνολο των ανόργανων ΥΑΦ αλλά και σε μέρος των οργανικών είναι το φαινόμενο του supercooling (υπέρψυξη). Ο συνδυασμός του φαινομένου της αποσύνθεσης του ένυδρου άλατος καθώς επίσης και τα μειωμένα επίπεδα πυρηνοποίησης κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης του υλικού, οδηγούν στην εμφάνιση του φαινομένου.

3.2.4. Χημικές Ιδιότητες

- 1) Μεγάλης διάρκειας χημική σταθερότητα
- 2) Συμβατότητα με τα υλικά κατασκευής
- 3) Μη τοξικά
- 4) Μη εύφλεκτα

Τα ΥΑΦ υποβαθμίζονται, από την απώλεια νερού της ένυδρης ουσίας, από την χημική αποσύνθεση και την μη συμβατή λειτουργία με τα υλικά κατασκευής. Επιπλέον για λόγους ασφαλείας τα ΥΑΦ θα πρέπει να είναι μη τοξικά και μη εύφλεκτα.

3.2.5. Οικονομικά κριτήρια

- 1) Αφθονία υλικού
- 2) Διαθεσιμότητα υλικού
- 3) Καλή σχέση τιμής απόδοσης

Χαμηλό κόστος και μεγάλης κλίμακας διαθεσιμότητα είναι πολύ για την αξιοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης.[2]

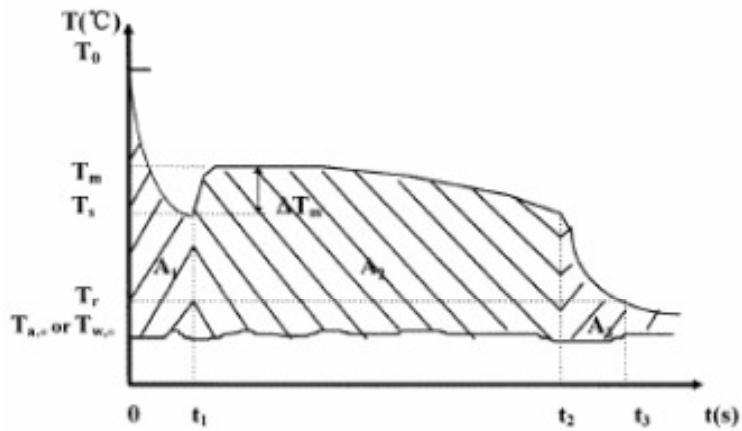
3.3. Προβλήματα των υλικών αλλαγής φάσης

3.3.1. Το φαινόμενο του supercooling

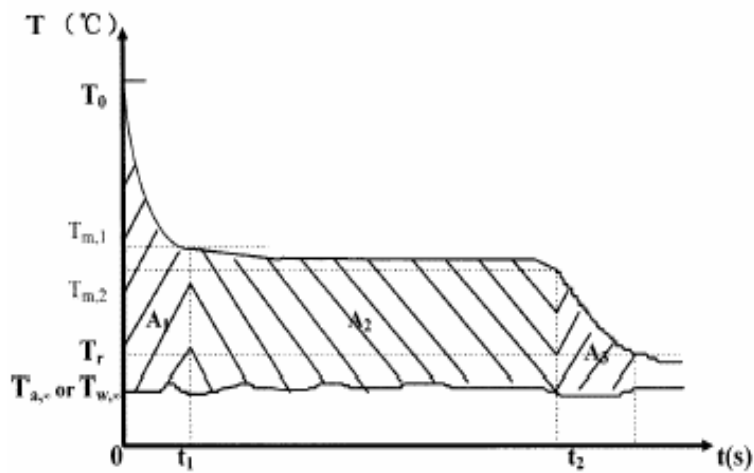
Ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα που αφορά το σύνολο των ανόργανων PCMs αλλά και μέρος των οργανικών είναι το φαινόμενο του supercooling. Το φαινόμενο του supercooling όσο εντείνεται τόσο μη αποδοτικότερη κάνει την αξιοποίηση της αποθηκευμένης θερμότητας. Το φαινόμενο είναι εμφανές αν παρατηρηθεί η καμπύλη θερμοκρασίας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

Η ύπαρξη supercooling οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης, συνεπώς η λανθάνουσα θερμότητα αποδίδεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή ή σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Βασική παρατήρηση είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ψύξης του δείγματος τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός του supercooling. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο βαθμός του supercooling δεν είναι φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή αλλά μεταβάλλεται από διάφορες

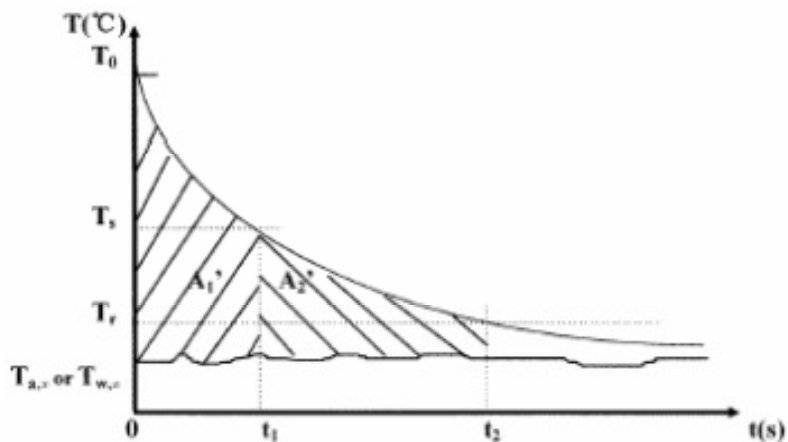
παραμέτρους όπως ο όγκος του δείγματος, η “καθαρότητα” του υλικού, ο ρυθμός ψύξης, η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης. Παρακάτω ακολουθούν διαγράμματα καμπυλών ψύξης με και χωρίς supercooling.[3,4]



Διάγραμμα 3.1:Τυπική καμπύλη ψύξης υλικού με supercooling[3]



Διάγραμμα 3.2:Τυπική καμπύλη ψύξης υλικού χωρίς supercooling[3]



Διάγραμμα 3.3:Καμπύλη ψύξης νερού[3]

Το φαινόμενο μπορεί να περιοριστεί με μία από τις παρακάτω διαδικασίες, οι οποίες επιτυγχάνουν την διαδικασία δημιουργίας πυρήνων:

- 1) Με προσθήκη μικρής ποσότητας παραγόντων πυρήνωσης.
- 2) Με μηχανικά μέσα, όπως η χρήση δοχείου με ανώμαλη επιφάνεια τοιχωμάτων ή ενναλάκτη θερμότητας με τραχεία επιφάνεια.
- 3) Με διατήρηση μέσα στο PCM μιας περιοχής σε χαμηλή θερμοκρασία όταν το υπόλοιπο υλικό τήκεται με θέρμανση.[2,3]

3.3.2. Το φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων

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

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

Το πρόβλημα του διαχωρισμού των φάσεων κατά ένα βαθμό με κάποιον από του παρακάτω τρόπους:

- 1) Χρήση πρόσθετων που προκαλούν πύκνωση και παρεμποδίζουν την καθίζηση άνυδρου άλατος ή ένυδρου με λιγότερα μόρια νερού, διατηρώντας τα σε αιώρηση.
- 2) Με μηχανικά μέσα όπως ανάδευση.
- 3) Με προσθήκη επιπλέον ποσότητας νερού, έτσι ώστε όλο το άνυδρο άλας να μπορεί να διαλυθεί στο νερό στο σημείο τήξης και να μην δημιουργείται υπερκορεσμός.
- 4) Με τοποθέτηση του ΥΑΦ σε κάψουλες για να μειωθεί ο διαχωρισμός.
- 5) Με μετατροπή της χημικής σύστασης του συστήματος μετατρέποντας το incongruent υλικό σε congruent.[2,3,4]

3.3.3. Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση

Το σοβαρότερο κριτήριο για την αξιοποίηση των PCMs σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών (χωρίς εκφυλισμό των ιδιοτήτων), ο οποίος μετριέται καλύτερα σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού παρά σε πραγματικό χρόνο.

Η ανεπάρκεια σταθερότητας των υλικών οφείλεται σε δύο λόγους :

1. Σε μικρής σταθερότητας χημική σύνθεση του υλικού ή των υλικών που αποτελούν το PCM
2. Στο φαινόμενο της διάβρωσης που πιθανόν να λάβει χώρα μεταξύ του PCM και των υλικών που έρχεται σε επαφή.

Το μεγαλύτερο μέρος των ερευνών που ως αντικείμενο αναφοράς έχουν την διατήρηση των ιδιοτήτων των PCMs κατά την περιοδική φόρτιση και αποφόρτισή τους ή τη διαβρωτική τους ικανότητα αφορούν τα ένυδρα άλατα. Για τις παραφίνες και τα παράγωγα υλικά τους έχει βρεθεί ότι έχουν άριστη σταθερότητα στις θερμικές τους ιδιότητες καθώς επίσης και καμία επίδραση όταν έρχονται σε επαφή με τα περισσότερα υλικά (μέταλλα αλλά και δομικά υλικά). Αντιθέτως τα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν διαβρωτικές τάσεις όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τα περισσότερα διαδεδομένα μέταλλα (χαλκός, σίδηρος κλπ).[3,4]

3.4. Συσσκευασία PCM

Η χρήση των PCMs στις περισσότερες εφαρμογές απαιτεί την προστασία του υλικού σε κάποιο από τα είδη διαθέσιμης συσκευασίας (τοποθέτηση μέσα σε κάψουλες ή σακούλες, ενσωμάτωση στο πορώδες άλλων υλικών, εναλλάκτες θερμότητας ενισχυμένοι με PCMs) ώστε να προφυλαχθεί το υλικό από την επίδραση των συνθηκών του περιβάλλοντος ή και να διευκολύνει τη μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης των PCMs σε κάψουλες ή σε μικροκάψουλες (σφαίρες διαμέτρου μικρότερης του 1mm) είναι ότι εξασφαλίζεται μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, ελαχιστοποιείται η αλληλεπίδραση του περιβάλλοντος και των υλικών των δοχείων αποθήκευσης με τα PCMs, καθώς και γίνεται πλήρης έλεγχος της αλλαγής όγκου κατά την αλλαγή φάσης. Το υλικό που συνήθως χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του προστατευτικού κελύφους είναι πλαστικό ή συνθετικές ρητίνες.

Η ενσωμάτωση του υλικού στο πορώδες άλλου υλικού που αποτελεί και τη "βασή" του σύνθετου τελικού προϊόντος. Σε αυτή την περίπτωση σημαντικό κριτήριο για την επιτυχημένη ενσωμάτωση είναι η μη αλληλεπίδραση του

PCM με το υλικό και η περιορισμένη έως μηδενική “μετανάστευση” του από το πορώδες όταν βρίσκεται στην υγρή φάση.[3]

Η συσκευασία του ΥΑΦ πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1) Πρέπει να καλύπτει τις απαιτήσεις αντοχής, ευελιξίας, αντίστασης στην διάβρωση και θερμική σταθερότητα.
- 2) Πρέπει να λειτουργεί σαν εμπόδιο στην αλληλεπίδραση του ΥΑΦ με το περιβάλλον.
- 3) Πρέπει να είναι εύκολο στον χειρισμό και να παρέχει δομική σταθερότητα.[5]

Οι τύποι ενσωμάτωσης που έχουν μελετηθεί είναι η μαζική αποθήκευση σε δεξαμενές εναλλαγής θερμότητας, μικροενθυλάκωση , και μακροενθυλάκωση. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει διάφορες αναπαραστάσεις τοποθέτησης της συσκευασίας σε συστήματα λανθάνουσας αποθήκευσης της θερμότητας.



Εικόνα 3.1

3.4.1.Μαζική αποθήκευση

Η μαζική αποθήκευση για τα ΥΑΦ είναι οι δεξαμενές εναλλαγής της θερμότητας οι οποίες έχουν παρόμοιο σχεδιασμό με τις ήδη υπάρχουσες δεξαμενές αποθήκευσης της ενέργειας. Η βασική διαφορά μεταξύ τους είναι ότι η ανάγκη για μεγαλύτερη αγωγή της θερμότητας των δεξαμενών με ΥΑΦ λόγω υψηλής θερμικής τους πυκνότητας. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μεταλλικές κατασκευές, υψηλής αγωγιμότητας σωματίδια και πτερύγια.[5]

3.4.2. Μακροενθυλάκωση

Η πιο συνηθισμένη μορφή εγκιβωτισμού είναι η μακροενθυλάκωση όπου μία ποσότητα ΥΑΦ ενσωματώνεται σε μία ξεχωριστή κάψουλα. Η ποσότητα αυτή από μερικά γραμμάρια μέχρι κιλά. Πλεονέκτημα της μακροενθυλάκωσης είναι η χρησιμοποίησή της σε εφαρμογές όπου υγρό η

αέριο χρησιμοποιούνται ως μέσα μεταφοράς της θερμότητας. Επιπλέον είναι εύκολα στην μεταφορά και στον χειρισμό. Το σχήμα της κάψουλας μπορεί να είναι πολυεδρικό σφαιρικό η ακόμα σε σακουλάκια με ακανόνιστο σχήμα. Για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα είναι σημαντικό να έχει προηγηθεί μελέτη στο σχεδιασμό των καψουλών που να ταιριάζει στην εκάστοτε εφαρμογή.

Με την μακροενθυλάκωση των ΥΑΦ:

- 1) Αποφεύγεται ο διαχωρισμός των φάσεων
- 2) Αυξάνεται ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας
- 3) Παρέχει μια προστατευτική δομή για το ΥΑΦ

Οι πιο οικονομικές λύσεις είναι πλαστικά μπουκάλια και μεταλλικά δοχεία. Βέβαια θέλουν προσοχή τα φαινόμενα διάβρωσης καθώς μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφικά αποτελέσματα.[5]

3.4.3. Μικροενθυλάκωση

Η μικροενθυλάκωση είναι μια τεχνική όπου ένας μεγάλος αριθμός σωματιδίων ΥΑΦ περιέχονται σε μια συνεχή σφραγισμένη μήτρα. Η μήτρα που ενθυλακώνει τα ΥΑΦ πρέπει να έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα αλλιώς το σύστημα πάσχει από ρυθμούς θερμικής αγωγιμότητας. Η ακαμψία της μήτρας αποτρέπει τις δυνάμεις να μεταφερθούν και αναγκάζει όλη την μεταφορά θερμότητας να γίνει με αγωγή γεγονός που μπορεί να μειώσει σημαντικά τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας ειδικά στην περίοδο φόρτισης του υλικού. Αυτή την στιγμή το κόστος της μικροενθυλάκωσης είναι υψηλό σε σχέση με τις άλλες μορφές αποθήκευσης και χρησιμοποιείται μόνο σε εφαρμογές θερμικού ελέγχου. Η μακροενθυλάκωση είναι η κυρίαρχη μορφή εγκιβωτισμού των ΥΑΦ και με σωστή επιλογή της γεωμετρίας και του υλικού της κάψουλας μπορεί να εφαρμοστεί σε πληθώρα εφαρμογών ενεργειακής αποθήκευσης.[5]

3.4.4. Συστήματα αποθήκευσης μη άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς θερμότητας

Εκτενείς προσπάθειες έχουν γίνει και γίνονται στο τμήμα των εφαρμογών των PCM με συστήματα αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας όπου η απαιτούμενη θερμότητα αποθηκεύεται την ημέρα για να χρησιμοποιηθεί τη διάρκεια της νύχτας ή σε ώρες μη ηλιοφάνειας. Η χαμηλή τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας δεν βοηθάει την ταχεία απορρόφηση της προσφερόμενης θερμότητας και για αυ τό το λόγο εφαρμόζονται πλήθος τεχνικών ενίσχυσης της :

Οι εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως οι εξής :

1. Το PCM τοποθετείται μεταξύ παραλλήλων πλακών σε λεπτά και διαδοχικά στρώματα αφήνοντας μεταξύ τους ικανό κενό για τη ροή του μέσου (συνήθως αέρας, νερό, διάλυμα νερού γλυκόλης, λάδι κλπ).

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

3.5. Κατηγοριοποίηση των Pcm

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

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

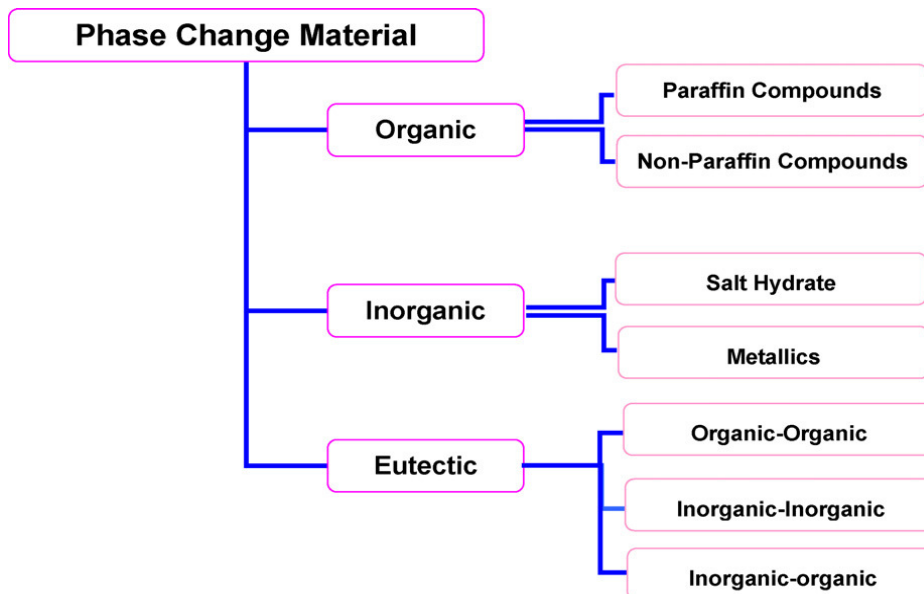
Για την πρώτη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά τους αποτελεί η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση

ή όγκο, ενώ για τη δεύτερη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται για την αλλαγή φάσης. Βασική παρατήρηση για τις τιμές των δύο μεγεθών είναι ότι η τιμή της λανθάνουσας θερμότητας είναι πολλαπλάσια της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση ή όγκο. Στον παρακάτω πίνακα 3.1 δίνονται η θερμοχωρητικότητα και η πυκνότητα διαφόρων υλικών.

Πίνακας 3.1
Ιδιότητες ενδεικτικών υλικών αποθήκευσης[2]

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

Τα υλικά αλλαγής φάσης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, τα οργανικά τα ανόργανα και τα εϋτηκτα.



Σχήμα 3.1: Κατηγοριοποίησης υλικών αλλαγής φάσης[2]

3.5.1. Οργανικά PCM

Τα οργανικά υλικά περιγράφονται ως παραφινούχα και μη παραφινούχα. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν σταθερούς κύκλους θερμικής φόρτισης και αποφόρτισης χωρίς το πρόβλημα του διαχωρισμού των φάσεων. Επιπλέον δεν εμφανίζουν supercooling και είναι συνήθως μη διαβρωτικά.[2]

3.5.1.1. Παραφίνες

Τα παραφινούχα υλικά αποτελούνται κυρίως από αλυσίδες N-αλκανίων $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)-\text{CH}_3$. Η κρυσταλοποίηση της CH_3 αλυσίδας απελευθερώνει μεγάλα ποσά λανθάνουσας θερμότητας.

Το σημείο υγροποίησης και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης αυξάνουν καθώς μεγαλώνει το μήκος της αλυσίδας. Ανάλογα με τον βαθμό διύλισης τα παραφινούχα προϊόντα χωρίζονται σε τεχνικού, ημι-διυλισμένου και διυλισμένου βαθμού. Για οικονομικούς λόγους όμως βιώσιμα είναι μόνο οι τεχνικές παραφίνες. Οι παραφίνες είναι ασφαλής, αξιόπιστες, προβλέψιμες, οικονομικές και μη διαβρωτικές. Παρουσιάζουν σταθερότητα για θερμοκρασίες χαμηλότερες από $500\text{ }^\circ\text{C}$, είναι χημικά αδρανής και έχουν χαμηλή πίεση ατμών. Χάρης σε αυτές τις ιδιότητες τα συστήματα που χρησιμοποιούν παραφίνες έχουν μεγάλους κύκλους ψύξης και τήξης. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας 1 με τις θερμικές ιδιότητες μιγμάτων παραφινών. Εκτός από τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν όπως σταθερό σημείο τήξης και καλό νουκλεικό σχηματισμό έχουν και ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά όπως:

- 1) Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα
- 2) Είναι μη συμβατά με πλαστικές συσκευασίες
- 3) Είναι σχετικά εύφλεκτα υλικά

Παρόλα αυτά οι ανεπιθύμητες αυτές ιδιότητες μπορούν να εξαλείφουν με μικρές τροποποιήσεις στο κερί ή στην συσκευασία. Το σημείο τήξης των αλκανίων αυξάνει καθώς μεγαλώνει ο αριθμός των ατόμων του άνθρακα. Στον πίνακα 3.2 βλέπουμε το σημείο τήξης και την λανθάνουσα θερμότητα κάποιων παραφινών και στον πίνακα 2.3 τις ίδιες ιδιότητες καθώς αυξάνει ο αριθμός των ατόμων του άνθρακα.[2,6]

Τα pcm κατηγοριοποιούνται σε τρεις ομάδες:

Ομάδα I: Πολλά υποσχόμενη

Ομάδα II: Υποσχόμενη

Ομάδα III: Αδιάφορη

Πίνακας 3.2
Φυσικές ιδιότητες κάποιων παραφινών[2]

Parafin	Freezing point/ range (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Group
6106	42–44	189	I
P116	45–48	210	I
5838	48–50	189	I
6035	58–60	189	I
6403	62–64	189	I
6499	66–68	189	I

Πίνακας 3.3
Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης: Παραφίνες[2]

No. of carbon Atoms	Melting Point(°C)	Latent heat of fusion (kJ/kg)	Group
14	5.5	228	I
15	10	205	II
16	16.7	237.1	I
17	21.7	213	II
18	28	244	I
19	32	222	II
20	36.7	246	I
21	40.2	200	II
22	44.0	249	II
23	47.5	232	II
24	50.6	255	II
25	49.4	238	II
26	56.3	256	II
27	58.8	236	II
28	61.6	253	II
29	63.4	240	II
30	65.4	251	II
31	68.0	242	II
32	69.5	170	II
33	73.9	268	II
34	75.9	269	II

3.5.1.2. Μη παραφίνες

Οι μη παραφίνες αποτελούν την πλειονότητα των εφαρμογών των ΥΑΦ με μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών σε αντίθεση με τις παραφίνες που έχουν ομοιότητες στα χαρακτηριστικά τους[1]. Στις μελέτες Buddhi D, Sawhney RL.In: Proceedings on thermal energy storage and energy conversion 1994 και Abhat A, et al., Development of a modular heat exchanger with an integrated latent heat storage. 1981 έχει γίνει εκτενής έρευνα για ανόργανα υλικά όπου προσδιορίστηκαν ένας αριθμός εστέρων λιπαρών οξέων αλκοολών και γλυκολών κατάλληλα για ενεργειακή αποθήκευση όπως φαίνεται στον πίνακα 3.4. Κάποια από αυτά τα υλικά ανήκουν στην υποκατηγορία λιπαρά οξέα.

Τα λιπαρά οξέα έχουν υψηλά σημεία τήξης σε σχέση με τα άλλα παραφινούχα υλικά και δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο του supercooling. Η γενική φόρμουλα των λιπαρών οξέων είναι: $CH_3(CH_2)_nCOOH$ και γενικά είναι κατάλληλα για ΥΑΦ. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι κοστίζουν 2-2,5 φορές παραπάνω από τις παραφίνες τεχνητού βαθμού και είναι σχετικά διαβρωτικοί. Στον πίνακα 3.5 φαίνονται κάποια λιπαρά οξέα για εφαρμογές χαμηλής λανθάνουσας θερμότητας.

Κάποια χαρακτηριστικά γνωρίσματα των οργανικών ΥΑΦ είναι τα εξής:

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

Πίνακας 3.4

Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης: Μη παραφίνες[2]

Material	Melting Point(°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group
Formic acid	7.8	247	III
Caprilic acid	16.3	149	-
Glycerin	17.9	198.7	III
D-Lactic acid	26	184	I
Methyl palmitate	29	205	II
Camphenilone	39	205	II

Docasyl bromide	40	201	II
Caprylone	40	259	II
Phenol	41	120	III
Heptadecanone	41	201	II
1-Cyclohexyloctadecane	41	218	II
4-Heptadecanone	41	197	II
p-Joluidine	43.3	167	-
Cyanamide	44	209	II
Methyl eicosanate	45	230	II
3-Heptadecanone	48	218	II
2-Heptadecanone	48	218	II
Hydrocinnamic acid	48.0	118	-
Cetyl alcohol	49.3	141	-
a-Nepthylamine	50.0	93	-
Camphene	50	238	III
O-Nitroaniline	50.0	93	-
9-Heptadecanone	51	213	II
Thymol	51.5	115	-
Methyl behenate	52	234	-
Diphenyl amine	52.9	107	-
p-Dichlorobenzene	53.1	121	-
Oxolate	54.3	178	-
Hypophosphoric acid	55	213	II
O-Xylene dichloride	55.0	121	-
b-Chloroacetic acid	56.0	147	II
Chloroacetic acid	56	130	III

Nitro naphthalene	56.7	103	-
Trimyristin	31-57	201-213	I
Heptaudecanoic acid	60.6	189	II
a-Chloroacetic acid	61.2	13	-
Bee wax	61.88	177	II
Bees wax	61.8	177	II
Glyolic acid	63.0	109	-
Glycolic acid	63	109	-
p-Bromophenol	63.5	86	-
Azobenzene	67.1	121	-
Acrylic acid	68.0	115	-
Dinto toluent (2,4)	70.0	111	-
Phenylacetic acid	76.7	102	-
Thiosinamine	77.0	140	-
Bromcamphor	77	144	-
Durene	79.3	156	-
Benzylamine	78.0	174	-
Methyl brombrenzoate	81	126	-
Alpha naphthol	96	163	-
Glautaric acid	97.5	156	-
p-Xylene dichloride	100	138.7	-
Catechol	104.3	207	III
Quinone	115	171	II
Acetanilide	118.8	222	II
Succinic anhydride	119	204	II
Benzoic acid	121.7	142.8	III

Stibene	124	167	-
Benzamide	127.2	169.4	III

Πίνακας 3.5

Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης: Λιπαρά οξέα[2]

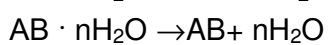
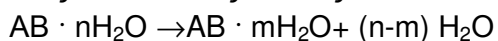
Material	Formula	Melting Point(°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group
Acetic acid	CH₃COOH	16.7	184	I
Polyethylene glycol 600	H(OC₂H₂)_nOH	20–25	146	I
Capric acid	CH₃(CH₂)₈COOH	36	152	–
Eladic acid	C₈H₇C₉H₁₆COOH	47	218	I
Lauric acid	CH₃(CH₂)₁₀COOH	49	178	II
Pentadecanoic acid	CH₃(CH₂)₁₃COOH	52.5	178	–
Tristearin	(C₁₇H₃₅COO)₃C₃H₅	56	191	I
Myristic acid	CH₃(CH₂)₁₂COOH	58	199	I
Palmatic acid	CH₃(CH₂)₁₄COOH	55	163	I
Stearic acid	CH₃(CH₂)₁₆COOH	69.4	199	I
Acetamide	CH₃CONH₂	81	241	I
Methyl fumarate	(CHCO₂NH₃)₂	102	242	I

3.5.2. Ανόργανα υλικά

Τα ανόργανα υλικά χωρίζονται επιπλέον σε ένυδρα άλατα και στα μεταλλικά. Αυτά τα ΥΑΦ δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο του supercooling και αλλάζουν θερμοκρασία τήξης με την πάροδο των κύκλων.

3.5.2.1. Ένυδρα άλατα

Τα ένυδρα άλατα είναι στην ουσία κράματα ανόργανων αλάτων και νερού, με χημικό τύπο AB·nH₂O. Η αλλαγή φάσης στερεού-υγρού διέπεται από την αφυδάτωση του άλατος, διεργασία η οποία είναι όμοια θερμοδυναμικά της τήξης. Το ένυδρο άλας τήκεται είτε σε ένυδρο άλας με λιγότερα μόρια νερού είτε σε άνυδρο άλας, όπως άλλωστε φαίνεται και από τους ακόλουθους τύπους :



Ένα βασικό πρόβλημα των ένυδρων αλάτων είναι το γεγονός πως η διαδικασία της τήξης δεν διέπεται από ισορροπία και σταθερότητα. Το νερό που αποβάλλεται δεν είναι ικανό να διαλύσει όλο το στερεό, με αποτέλεσμα, εξαιτίας της διαφοράς πυκνότητας, ποσοστό του ένυδρου άλατος με τα λιγότερα μόρια νερού ή του άνυδρου να επικάθεται στο δοχείο και να μην είναι διαθέσιμο κατά την αντίστροφη διαδικασία για επανασύνδεση με το νερό. Αποτέλεσμα αυτού αποτελεί η υποβάθμιση του υλικού με κάθε κύκλο τήξης-πήξης. Προκειμένου να λυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα έχουν προταθεί οι εξής λύσεις :

- 1) χρήση του Υ.Α.Φ. σε κάψουλες για να μειωθεί ο διαχωρισμός
- 2) μηχανικό ανακάτεμα
- 3) χρήση περίσσειας νερού
- 4) χρήση πηκτοματογόνων

Τα ένυδρα άλατα είναι από τις πιο σημαντικές ομάδες των ΥΑΦ και έχουν μελετηθεί εκτενώς για εφαρμογές λανθάνουσας αποθήκευσης της θερμότητας. Τα πιο ελκυστικά χαρακτηριστικά των ένυδρων αλάτων είναι τα εξής:

- 1) Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου
- 2) Σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (σχεδόν διπλάσια σε σχέση
- 3) Μικρή αλλαγή όγκου στο στάδιο της τήξης, δεν είναι διαβρωτικά, και είναι συμβατά με πλαστική συσκευασία.

Όμως τα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν έντονα το φαινόμενο του supercooling, εξαιτίας του γεγονότος ότι στη θερμοκρασία της τήξης ο ρυθμός πυρηνοποίησης είναι πολύ χαμηλός. Η ενέργεια λοιπόν αναγκαστικά αποβάλλεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτήν του σημείου τήξης ώστε να επιτευχθεί πλήρης πυρηνοποίηση.

Τέλος, ακριβώς επειδή η διαδικασία της τήξης δεν διέπεται από ισορροπία, δεν είναι εφικτό ούτε η αντίστροφη διαδικασία να παρουσιάζει σταθερότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ποσοστό του ένυδρου άλατος με τα λιγότερα μόρια νερού ή του άνυδρου που επικάθεται στο δοχείο τείνει να κρυσταλλοποιηθεί γρηγορότερα.

Στο πίνακα 3.6 ακολουθεί μια λίστα με ένυδρα άλατα.

Πίνακας 3.6

Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης: Ένυδρα άλατα[2]

material	Melting Point(°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group
K₂HPO₄·6H₂O	14.0	109	II
FeBr₃·6H₂O	21.0	105	II
Mn(NO₃)₂·6H₂O	25.5	148	II
FeBr₃·6H₂O	27.0	105	II
CaCl₂·12H₂O	29.8	174	I

LiNO₃·2H₂O	30.0	296	I
LiNO₃·3H₂O	30	189	I
Na₂CO₃·10H₂O	32.0	267	II
Na₂SO₄·10H₂O	32.4	241	II
KFe(SO₄)₂·12H₂O	33	173	I
CaBr₂·6H₂O	34	138	II
LiBr₂·2H₂O	34	124	I
Zn(NO₃)₂·6H₂O	36.1	134	III
FeCl₃·6H₂O	37.0	223	I
Mn(NO₃)₂·4H₂O	37.1	115	II
Na₂HPO₄·12H₂O	40.0	279	II
CoSO₄·7H₂O	40.7	170	I
KF·2H₂O	42	162	III
MgI₂·8H₂O	42	133	III
CaI₂·6H₂O	42	162	III
K₂HPO₄·7H₂O	45.0	145	II
Zn(NO₃)₂·4H₂O	45	110	III
Mg(NO₃)₂·4H₂O	47.0	142	II
Ca(NO₃)₂·4H₂O	47.0	153	I
Fe(NO₃)₃·9H₂O	47	155	I
Na₂SiO₃·4H₂O	48	168	II
K₂HPO₄·3H₂O	48	99	II
Na₂S₂O₃·5H₂O	48.5	210	II
MgSO₄·7H₂O	48.5	202	II
Ca(NO₃)₂·3H₂O	51	104	I
Zn(NO₃)₂·2H₂O	55	68	III
FeCl₃·2H₂O	56	90	I
Ni(NO₃)₂·6H₂O	57.0	169	II
MnCl₂·4H₂O	58.0	151	II
MgCl₂·4H₂O	58.0	178	II
CH₃COONa·3H₂O	58.0	265	II
Fe(NO₃)₂·6H₂O	60.5	126	–
NaAl(SO₄)₂·10H₂O	61.0	181	I
NaOH·H₂O	64.3	273	I
Na₃PO₄·12H₂O	65.0	190	–
LiCH₃COO·2H₂O	70	150	II

Al(NO₃)₂·9H₂O	72	155	I
Ba(OH)₂·8H₂O	78	265	II
Mg(NO₃)₂·6H₂O	89.9	167	II
KAl (SO₄)₂·12H₂O	91	184	II
MgCl₂·6H₂O	117	167	I

3.5.2.2. Μεταλλικά

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα μέταλλα χαμηλού σημείου τήξης και τα εύτηκτα μέταλλα. Τα υλικά αυτά δεν έχουν πολλές εφαρμογές ως ΥΑΦ λόγω του μεγάλου βάρους τους. Στον πίνακα 3.7 παρατίθενται μεταλλικά υλικά. Τα βασικά χαρακτηριστικά για τα μεταλλικά είναι:

- 1) Χαμηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα βάρους
- 2) Υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου
- 3) Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- 4) Χαμηλή ειδική θερμότητα
- 5) Σχετικά χαμηλή πίεση των ατμών

Πίνακας 3.7

Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης: Μεταλλικά[2]

Υλικό	Σημείο τήξης °C	Λανθάνουσα θερμότητα kJ/kg
Gallium-gallium antimony eutectic	29.8	–
Gallium	30.0	80.3
Cerrolow eutectic	58	90.9
Bi–Cd–In eutectic	61	25
Cerrobend eutectic	70	32.6
Bi–Pb–In eutectic	70	29
Bi–In eutectic	72	25
Bi–Pb–tin eutectic	96	–
Bi–Pb eutectic	125	–

3.5.2.3. Εύτηκτα

Πρόκειται για υλικό ελάχιστης-τήξης, αποτελούμενο από δύο ή περισσότερες ουσίες, καθεμία από τις οποίες τήκεται και πήζει με πλήρη ισορροπία και σταθερότητα, σχηματίζοντας π.χ. κατά την στερεοποίηση το κρυσταλλικό μείγμα. Τα εύτηκτα ολοκληρώνουν τον κύκλο χωρίς να υποστούν υποβάθμιση, καθώς το κρυσταλλικό μείγμα, όπως και το τηκόμενο είναι ομοιογενή, μην αφήνοντας περιθώρια στα συστατικά να διαχωριστούν. Ακολουθεί πίνακας οργανικών και ανόργανων εύτηκτων.[2]

Πίνακας 3.8
Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης: Εύτικτα[2]

Υλικό	Σύνθεση (κ.β.%)	Σημείο τήξης (°C)	Λανθάνουσα θερμότητα (kJ/kg)
CaCl ₂ ·6H ₂ O + CaBr ₂ ·6H ₂ O	45 + 55	14.7	140
Triethylolethane + water + urea	38.5 + 31.5 + 30	13.4	160
C ₁₄ H ₂₈ O ₂ + C ₁₀ H ₂₀ O ₂	34 + 66	24	147.7
CaCl ₂ + MgCl ₂ ·6H ₂ O	50 + 50	25	95
CH ₃ CONH ₂ + NH ₂ CONH ₂	50 + 50	27	163
Triethylolethane + urea	62.5 + 37.5	29.8	218
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	47 + 53	30	136
CH ₃ COONa·3H ₂ O + NH ₂ CONH ₂	40 + 60	30	200.5
NH ₂ CONH ₂ + NH ₄ NO ₃	53 + 47	46	95
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + NH ₄ NO ₃	61.5 + 38.5	52	125.5
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgCl ₂ ·6H ₂ O	58.7 + 41.3	59	132.2
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgCl ₂ ·6H ₂ O	50 + 50	59.1	144
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + Al(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	53 + 47	61	148
CH ₃ CONH ₂ + C ₁₇ H ₃₅ COOH	50 + 50	65	218
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgBr ₂ ·6H ₂ O	59 + 41	66	168
Napthalene + benzoic acid	67.1 + 32.9	67	123.4
NH ₂ CONH ₂ + NH ₄ Br	66.6 + 33.4	76	151
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NaNO ₃	25 + 65 + 10	80.5	113
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + KNO ₃	26.4 + 58.7 + 14.9	81.5	116
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NH ₄ Cl	27 + 68 + 5	81.6	108

Κεφάλαιο 4: Μέθοδοι μέτρησης των ΥΑΦ

Η πυκνότητα αποθήκευσης και οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης είναι πολύ σημαντικές παράμετροι, καθώς βάση αυτών καθορίζεται η ικανότητα αποθήκευσης, το μέγεθος και το εύρος λειτουργίας του συστήματος λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας. Αν οι τιμές αυτών των παραμέτρων παρουσιάζουν απόκλιση από τις πραγματικές, η αποθηκευτική ικανότητα θα είναι μικρότερη από την αναμενόμενη, με αποτέλεσμα το σύστημα να μην ικανοποιεί τις προδιαγραφές του. Η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που μπορούμε να αποθηκεύσουμε εξαρτάται από την ενθαλπική διακύμανση στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας. Πρέπει, συνεπώς, να είναι γνωστή και η ενθαλπική συνάρτηση ή η θερμοχωρητικότητα του Υ.Α.Φ., ώστε να είναι ακριβή τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου. Προκειμένου να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, πρέπει να ληφθεί υπόψη το θερμοκρασιακό εύρος, βάση του οποίου λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

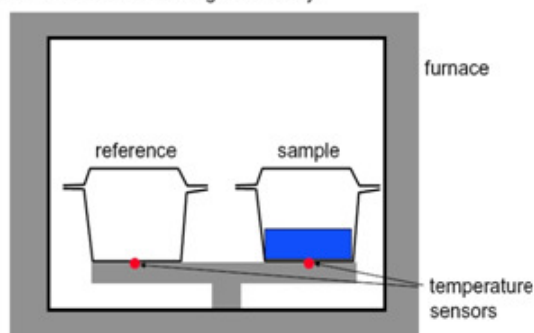
Οι μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων των ΥΑΦ είναι οι εξής:

- Με συμβατικές μεθόδους καλοριμέτρων (conventional calorimetry methods)
- Με διαφορική θερμική ανάλυση (differential thermal analysis DTA)
- Με καλορίμετρα διαφορικής σαρώσεως (differential scanning calorimetry DSC)
- Με την μέθοδο T-history

4.1. Μέθοδος DSC

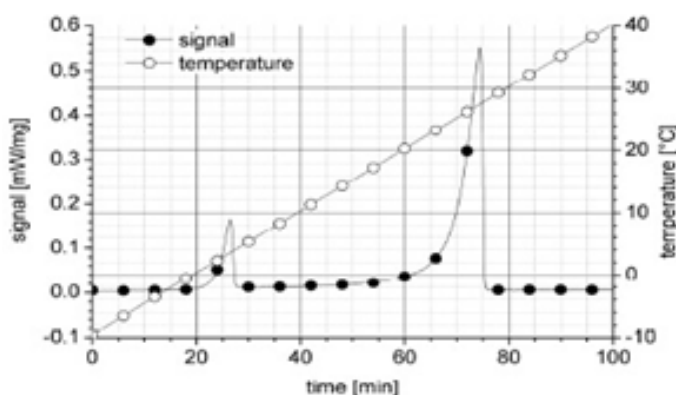
Είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος θερμικής ανάλυσης. Σε ένα θερμοκρασιακό πρόγραμμα μετράται η διαφορά στην θερμική απόκριση του δείγματος και του υλικού αναφοράς. Υπάρχουν δύο μέθοδοι θερμοκρασιακού προγράμματος.

DSC – differential scanning calorimetry



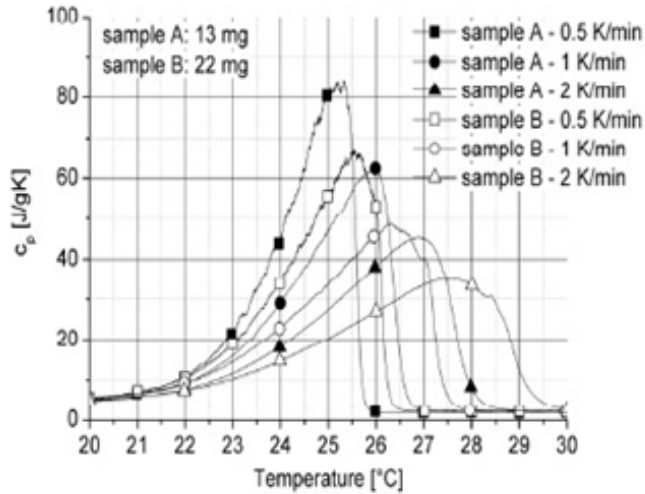
**Σχήμα 4.1: Διάταξη μετρήσεως με καλορίμετρα σαρώσεως DSC[7]
4.1.1 DSC με σταθερό ρυθμό ψύξης και θέρμανσης (δυναμική μέτρηση
θερμοχωρητικότητας, dynamic DSC)**

Γίνεται εφαρμογή θερμοκρασιακού προγράμματος σταθερού ρυθμού ψύξης ή θέρμανσης για τον υπολογισμό της ειδικής θερμοχωρητικότητας C_p . Για τις συνήθεις εφαρμογές, οι τυπικές τιμές του ρυθμού ψύξεως ή θέρμανσεως κυμαίνονται στο διάστημα 2 έως 10 K/min . Το σήμα που λαμβάνεται, κατά την μέτρηση, είναι ανάλογο προς την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ μετρούμενου δείγματος και δείγματος αναφοράς. Έτσι, με την βοήθεια ενός δείγματος αναφοράς, του οποίου είναι επ'ακριβώς γνωστή η καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας σε σχέση με την θερμοκρασία, υπολογίζεται η αντίστοιχη $C_p(T)$ για το μετρούμενο δείγμα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα παράδειγμα του σήματος που λαμβάνουμε κατά την διεξαγωγή μιας μέτρησης με εφαρμογή προγράμματος σταθερής θέρμανσης[7]



Σχήμα 4.2: Τυπικό διάγραμμα ροής θερμότητας και θερμοκρασίας σε μετρητή DSC με σταθερό ρυθμό θέρμανσης[7]

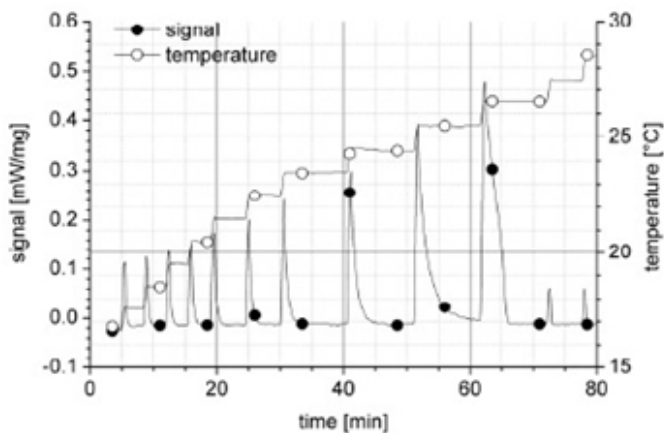
Η εφαρμογή της μεθόδου DSC σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης δεν ενδείκνυται για την μέτρηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας των PCM, γιατί κατά την αλλαγή φάσης, το δείγμα δεν βρίσκεται σε θερμική ισορροπία και έχουμε σημαντική κατανομή της θερμοκρασίας, μέσα σε αυτό. Για αυτό τον λόγο οδηγούμαστε σε εσφαλμένα αποτελέσματα, των οποίων η απόκλιση εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος, από τον ρυθμό θέρμανσης, από το μέγεθος της θερμοχωρητικότητας και από την θερμική αγωγιμότητα. Επειδή οι θερμοφυσικές ιδιότητες των μετρούμενων υλικών συνήθως δεν είναι γνωστές με την επιθυμητή ακρίβεια, η απόκλιση αυτή δεν μπορεί μαθηματικώς να ελαχιστοποιηθεί.[7]



Σχήμα 4.3: Επίδραση της μεταβολής της μάζας του δείγματος και του ρυθμού θέρμανσης σε μετρήσεις της θερμοχωρητικότητας $C_p(T)$ με την μέθοδο DSC[7]

4.1.2. DSC ισόθερμων βημάτων (isothermal steps mode)

Στην περίπτωση αυτή το δείγμα θερμαίνεται βηματικά ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το δείγμα ακολουθεί τα βήματα με κάποια χρονική υστέρηση και έτσι παράγεται το σήμα εξόδου. Όταν θα φτάσει το δείγμα σε θερμική ισορροπία, το σήμα μηδενίζεται και ακολουθεί το επόμενο ισόθερμο βήμα. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη του σήματος είναι ανάλογο της, εκ του δείγματος, απορροφημένης θερμότητας, στο συγκεκριμένο ισόθερμο βήμα. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.4: Τυπικό διάγραμμα ροής θερμότητας και θερμοκρασίας σε μέτρηση DSC με ισόθερμα βήματα[7]

4. 2. Μέθοδος διαφορικής θερμικής ανάλυσης (DTA)

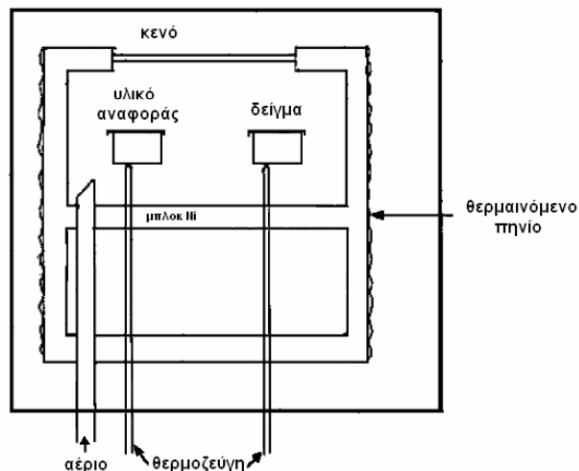
Η διαφορική θερμική ανάλυση ορίζεται επισήμως ως μια τεχνική καταγραφής των θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ μιας ουσίας και ενός υλικού αναφοράς συναρτήσει είτε του χρόνου είτε της θερμοκρασίας, ενόσω τα δύο μείγματα υπόκεινται σε πανομοιότυπο θερμοκρασιακό καθεστώς, εντός περιβάλλοντος ελεγχόμενης θέρμανσης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

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

Σε γενικές γραμμές, η καμπύλη DTA μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποτύπωμα για λόγους ταυτοποίησης υλικών, για παράδειγμα κατά την μελέτη του πυλού, όπου η δομική ομοιότητα των διαφορετικών ειδών του μπορεί να προκαλέσει δυσκολίες στην ερμηνεία των πειραμάτων διάθλασης. Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτών των διαγραμμάτων είναι ότι η περιοχή που εκτείνεται κάτω από το ακρότατο της καμπύλης είναι ενδεικτική της εωθαλπικής μεταβολής και δεν επηρεάζεται από τη θερμοχωρητικότητα του δείγματος.[8]

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

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



Σχήμα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση κελιού DTA[8]

Η επιλογή της κατάλληλης εστίας βασίζεται στην δυνατότητά της να εξασφαλίζει εσωτερικά μία εκτενή και ομοιόμορφη ζώνη θερμότητας ενώ πού σημαντική είναι η άμεση απόκριση της στις εντολές του θερμοκρασιακού προγραμματιστή. Ο τελευταίος, με τη σειρά του, είναι απαραίτητος στη μετρητική διαδικασία, καθώς διατηρεί σταθερούς τους ρυθμούς θέρμανσης. Ως προς το καταγραφικό σύστημα, αυτό θα πρέπει να εμφανίζει μικρή αδράνεια για να αναπαράγει αξιόπιστα τις αποκλίσεις της πειραματικής διάταξης.

Η συσκευή συγκράτησης δείγματος αποτελείται από δύο θερμοζεύγη, ένα για το μελετώμενο δείγμα και ένα για το δείγμα αναφοράς, και περιβάλλεται από μια κατασκευή (block) που εξασφαλίζει τη ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας. Το δείγμα περιέχεται σε μικρό σκεύος, κοίλο στην βάση του, σχεδιασμός που ενισχύει την ορθότερη εφαρμογή του πάνω στα θερμοστοιχεία. Το υλικό κατασκευής του σκεύους μπορεί να είναι πυρέξ, χαλαζίας, νικέλιο ή λευκόχρυσος, ανάλογα με την θερμοκρασία και την φύση των διεξαγόμενων μετρήσεων. Τα θερμοζεύγη δεν τοποθετούνται σε άμεση επαφή με τα δείγματα προ αποφυγής νοθεύσεων και άλλων εκφυλισμών παρόλο που κάτι τέτοιο θα αύξανε αρκετά την ευαισθησία της μέτρησης. Οι κατασκευές που περιστοιχίζουν τις συσκευές συγκράτησης μειγμάτων, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι μεταλλικές ή κεραμικές. Οι μεταλλικές είναι λιγότερο επιρρεπείς στις αποκλίσεις σε σχέση με τις κεραμικές που είναι πορώδεις. Παρόλα αυτά, η υψηλή θερμική αγωγιμότητά τους οδηγεί σε μικρότερα DTA ακρότατα, πράγμα που σημαίνει μικρότερες μεταβολές στην ενθαλπία. Ολόκληρη η διάταξη συγκράτησης του δείγματος είναι ηλεκτρικά μονωμένη από τις καλωδιώσεις της εστίας με την βοήθεια γειωμένου καλύμματος, φτιαγμένου συνήθως από κεραμικό υλικό επικαλυμμένο με λευκόχρυσο. Το ίδιο κάλυμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε να απομονώνει την περιοχή του δείγματος μέσα σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα ή κενό.

Κατά την διεξαγωγή πειραμάτων σε θερμοκρασιακό εύρος -200°C έως 500°C εμφανίζονται προβλήματα ομοιόμορφης απομάκρυνσης της θερμότητας από τα δείγματα. Η χρήση θερμοστοιχείων σε μορφή επίπεδων δίσκων μπορεί να τα περιορίσει, επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη θερμική επαφή με το δοχείο του δείγματος, που σε αυτήν της περίπτωση είναι επίπεδης βάσης, κατασκευασμένης από φύλλο λευκόχρυσου ή αλουμινίου. Σε κάθε περίπτωση, η αναπαραγωγή της μεθόδου εξασφαλίζεται διαβεβαιώνοντας ότι το θερμοστοιχείο και το δοχείο βρίσκονται σε συνεχή επαφή μεταξύ τους.

Κατά την επιλογή των πειραματικών παραμέτρων χρειάζεται αρκετή προσοχή. Για παράδειγμα το περιβάλλον, η σύνθεση και το μέγεθος των δειγμάτων επηρεάζουν σημαντικά τις χημικές αντιδράσεις διάσπασης υλικών σε σκόνη ενώ αντίθετα δεν επιδρούν στις αλλαγές φάσης των στερεών. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την πειραματική διαδικασία της DTA, παρουσιάζονται παρακάτω:

- 1) Τα περισσότερα πειράματα πραγματοποιούνται σε δείγματα υλικών σε σκόνη και ως εκ τούτου τα αποτελέσματά τους μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικά για μεγαλύτερα δείγματα.
- 2) Η συσκευασία στη οποία περιέχονται τα δείγματα, παίζει σημαντικό ρόλο στις χημικές αντιδράσεις διάσπασης και μπορεί να προκαλέσει υψηλές αποκλίσεις μεταξύ φαινομενικά ίδιων δειγμάτων.
- 3) Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας μπορεί να αυξηθεί τόσο, ώστε να προκαλέσει κορεσμό της αποκριτικής ικανότητας της μετρητικής διάταξης. Ενδεικνύεται η αραίωση του μελετώμενου δείγματος με κάποιο αδρανές υλικό.
- 4) Για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών αλλαγής φάσης, θα πρέπει η ακραία θερμοκρασία που θα εμφανιστεί κατά τη μετρητική διαδικασία, να είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του δείγματος.
- 5) Το σχήμα του ακρότατου που προκύπτει τελικά, εξαρτάται από το βάρος του δείγματος και το ρυθμό θέρμανσης που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία. Μάλιστα η μείωση του ενός αντιστοιχεί, ως ένα βαθμό, με τη μείωση του άλλου οδηγώντας και στις δύο περιπτώσεις, σε πιο απότομα ακρότατα βελτιωμένης ανάλυσης. Η επίδραση του ρυθμού θέρμανσης στο σχήμα και τη διάταξη του ακρότατου μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς όφελος της μελέτης των χημικών διασπάσεων, όμως για την ανάλυση της κινηματικής σημαντικό ρόλο παίζει η ελαχιστοποίηση των θερμικών μεταβολών, μειώνοντας είτε το μέγεθος των δειγμάτων είτε τον ρυθμό θέρμανσης τους.[8]

Όπως ήδη αναφέρθηκε τα αποτελέσματα των μετρήσεων της μεθόδου DTA αναπαριστώνται γραφικά σε διαγράμματα θερμοκρασιακών διαφορών – χρόνου ή θερμοκρασίας σχηματίζοντας μια καμπύλη. Η καμπύλη αυτή αποτελείται από μετατοπισμένα γραμμικά τμήματα, αφού οι θερμοχωρητικότητες και θερμικές αγωγιμότητες των δειγμάτων είναι διαφορετικές και από περιοχές αιχμών αντίστοιχες των φάσεων

απορρόφησης ή απελευθέρωσης θερμότητας , που χαρακτηρίζουν τις φυσικές ή χημικές μεταβολές του μετρούμενου δείγματος.

Η μέτρηση των θερμοκρασιών αλλαγής φάσης με χρήση καμπυλών DTA εμφανίζει αρκετές δυσκολίες. Αρχικά, αν και το ξεκίνημα της αιχμής του διαγράμματος υποδηλώνει τη θερμοκρασία εκκίνησης, προβλήματα δημιουργεί η πιθανή εμφάνιση θερμοκρασιακών υστερήσεων, που οφείλονται στην σχετική θέση του θερμοστοιχείου ως προς κάποιο από τα δείγματα ή την περιβάλλουσα κατασκευή.(block). Η ορθή χρήση της μετρητικής διάταξης καθιστά απαραίτητη τη βαθμονόμησής της με την βοήθεια υλικών με γνωστά σημεία τήξης. Η περιοχή της αιχμής του διαγράμματος (A) είναι αυτή που περιέχεται μεταξύ του ακρότατου και της παρεμβαλλόμενης βασικής γραμμής του, σχετίζεται δε άμεσα με τις μεταβολές ενθαλπίας του δείγματος που μελετάται. Όταν τα θερμοζεύγη βρίσκονται σε θερμική αλλά όχι φυσική επαφή τόσο με το μετρούμενο όσο και με το δείγμα αναφοράς, αποδεικνύεται ότι η περιοχή (A) δίνεται από την σχέση:

$$A = \frac{m \cdot q}{g \cdot k} \quad (4.1)$$

Όπου m η μάζα του δείγματος , q η ενθαλπική μεταβολή ανά μονάδα μάζας , g ένας μετρούμενος παράγοντας του σχήματος και k η θερμική αγωγιμότητα του δείγματος. Στην περίπτωση που το υπό μελέτη υλικό είναι πορώδες, συμπιεσμένο ή απλώς συσσωρευμένο, η αέρια φάση που γεμίζει του πόρους του μπορεί να μεταβάλει την θερμική αγωγιμότητα της ατμόσφαιρας που περιβάλλει την DTA διάταξη δημιουργώντας μεγάλα σφάλματα υπολογισμών στην περιοχή αιχμής. Τα πράγματα γίνονται ακόμη χειρότερα , όταν η αέρια φάση απελευθερώνεται από το ίδιο το μείγμα , διαφοροποιώντας την θερμική αγωγιμότητα του περιβάλλοντος του κελιού DTA από εκείνη που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα βαθμονόμησης .

Η βαθμονόμηση της μετρητικής διάταξης DTA ως προς την ενθαλπία, γίνεται μετρώντας τις περιοχές αιχμών καθορισμένων δειγμάτων με ήδη γνωστά και συγκεκριμένα θερμοκρασιακά εύρη. Η διαδικασία αυτή θα πρέπει να στηρίζει την εγκυρότητάς της σε τουλάχιστον δύο διαφορετικά δείγματα τόσο σε πειράματα θέρμανσης όσο και σε πειράματα ψύξης.

Η χρήση της μεθόδου DTA εξασφαλίζει τον υπολογισμό της θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση C_p , βάσει της σχέσης :

$$C_p = k \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{m \cdot H} \quad (4.2)$$

Όπου T_1 και T_2 οι διαφορετικές θερμοκρασίες που εμφανίζονται, όταν η διάταξη χρησιμοποιείται για πρώτη φορά χωρίς την χρήση οποιουδήποτε δείγματος και στην συνέχεια με το μετρούμενο δείγμα

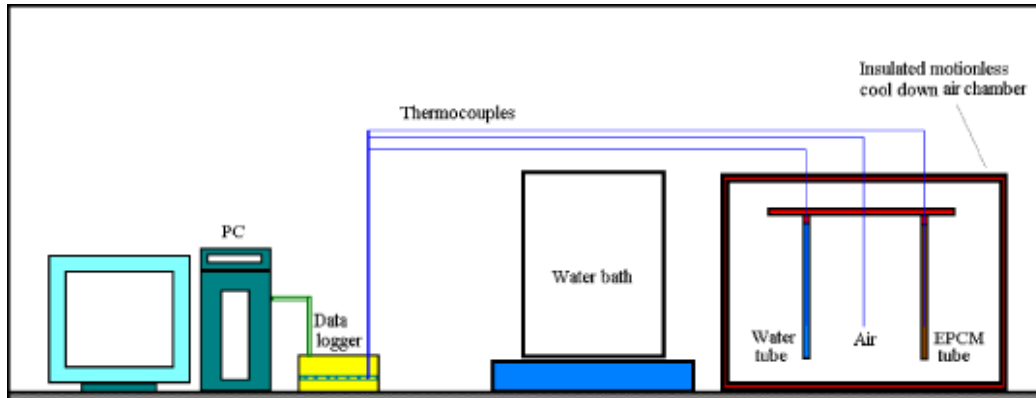
αντίστοιχα. Η,ο ρυθμός θέρμανσης και k η σταθερά υπολογισμένη μέσω βαθμονόμησης.[8]

4.3. Η μέθοδος T-History

Οι μέθοδοι που περιγράφηκαν παραπάνω απαιτούν δείγμα υλικού, γεγονός που επιβάλλει την πολύ προσεκτική δειγματοληψία, ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι αντιπροσωπευτικά των ιδιοτήτων του Υ.Α.Φ.. Στην περίπτωση δε που το υλικό έχει προκύψει ως σύνθεση άλλων, είναι τεχνικές πλήρως εξαρτώμενες από το δείγμα που λαμβάνουμε. Η λεγόμενη T-history, είναι μία εναλλακτική μέθοδος, η οποία είναι ιδανική για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων των Υ.Α.Φ., τα οποία παρουσιάζουν ετερογένεια. Πρόκειται για μία τεχνική εύκολη, γρήγορη, κατά την οποία το υλικό τοποθετείται σε σφραγισμένο σωλήνα και επαναλαμβάνονται οι κύκλοι τήξης-πτήξης, χωρίς να απαιτείται δειγματοληψία. Η αρχική T-history μέθοδος που προτάθηκε παρουσιάζει ατέλειες σε ότι αφορά τις θερμοφυσικές ιδότητες, εξαιτίας ορισμένων μη έγκυρων φυσικών υποθέσεων που λαμβάνει υπ'όψη. Η έρευνα λοιπόν σήμερα οδηγείται στην κατεύθυνση των βελτιώσεων της T-history μεθόδου.[10]

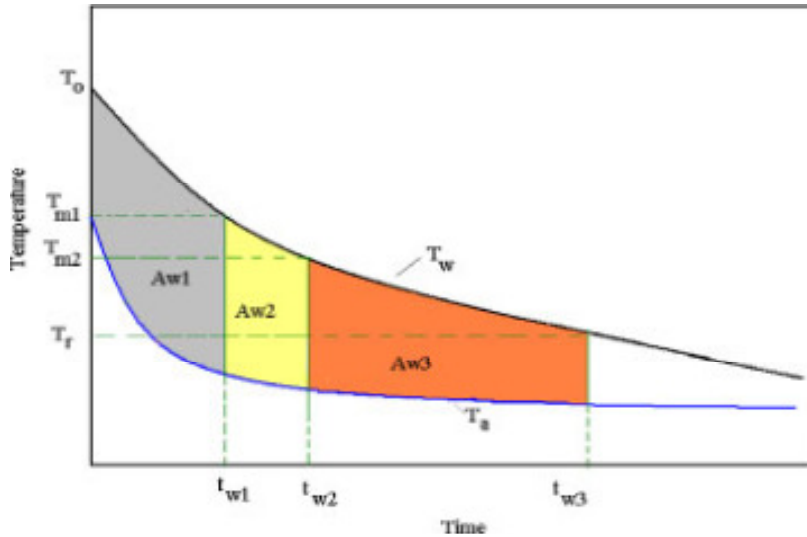
Ακολουθεί μελέτη, η οποία χρησιμοποιεί δύο ετερογενή υλικά αλλαγής φάσης, προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της T-history. Πρόκειται για τα RUBITHERM GR27 και GR41, με σύνθεση κόκκου 65% κεραμικό και 35% παραφίνη. Τα υλικά αυτά επιλέχτηκαν καθώς παρουσιάζουν ορισμένα ελκυστικά χαρακτηριστικά, που τα καθιστούν ιδανικά για χρήση σε συστήματα λανθάνουσας αποθήκευσης. Αυτά είναι : α) η μεγάλη ποσότητα ενέργειας που δύναται να αποθηκευτεί σε μικρή μάζα, β) υψηλός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, λόγω της μικρής διαμέτρου του σωματιδίου και γ) ευελιξία εφαρμογής. Η ακρίβεια της T-history περιορίζεται εξαιτίας της υπόθεσης σταθερής θερμοκρασίας αλλαγής φάσης, κάτι το οποίο δεν ισχύει στην περίπτωση μας. Εισάγονται λοιπόν ορισμένες βελτιώσεις, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την ενθαλπία και πιο συγκεκριμένα τη συνάρτησή της με τη θερμοκρασία. Στη T-history μέθοδο άνευ βελτιώσεων, το Υ.Α.Φ. κι ένα υλικό γνωστών θερμικών ιδιοτήτων, αποσταγμένο νερό στην περίπτωση μας, με την ίδια αρχική θερμοκρασία T_0 , υποβάλλονται σε θερμοκρασία δωματίου T_a , εξαρτώμενη από το χρόνο. Στη συνέχεια, καταγράφεται το ιστορικό των θερμοκρασιών τους κατά τη διάρκεια της ψύξης. Η σύγκριση των δύο καμπυλών, με χρήση μαθηματικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας, οδηγεί στον προσδιορισμό της θερμοχωρητικότητας των δύο φάσεων, στερεάς και υγρής (c_{ps}, c_{pl}), καθώς και της λανθάνουσας θερμότητας (h_{ls}) του Υ.Α.Φ., βάση της γνωστής θερμοχωρητικότητας του υλικού αναφοράς (c_{pw}). Στη βελτιωμένη T-history μέθοδο, το πειραματικό σύστημα αποτελείται από σωλήνες ύαλος, εσωτερικής διαμέτρου 8mm, πάχους 1mm και ύψους 150mm. Χρησιμοποιήθηκε υδατόλουτρο για τη θέρμανση του Υ.Α.Φ και του υλικού αναφοράς στην αρχική τους θερμοκρασία, καθώς και ένας μονωμένος

θάλαμος για τη διαδικασία της ψύξης. Τοποθετήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου T, διαμέτρου 0,1mm, για να μετρήσουν τη θερμοκρασία του Υ.Α.Φ, του νερού και του αέρα δωματίου, καθώς και μία συσκευή της HP συγκέντρωσης δεδομένων, η οποία συνδέθηκε σε υπολογιστή. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν δύο πανομοιότυποι κάθετοι σωλήνες για την τοποθέτηση του Υ.Α.Φ. και του αποσταγμένου νερού. Ακολουθεί σχεδιάγραμμα του πειράματος.

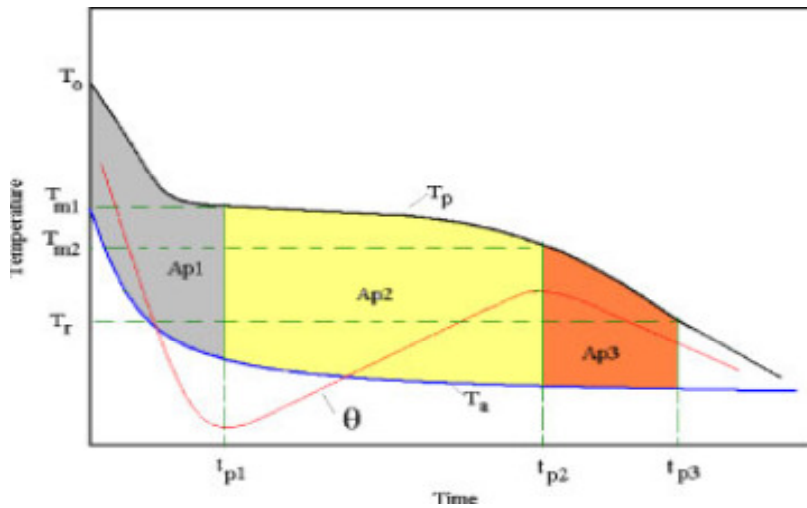


Σχήμα 4.6: Διάταξη του πειράματος[10]

Ο αριθμός Biot ($Bi=hR/2k$, όπου R η ακτίνα του σωλήνα, k η θερμική αγωγιμότητα του Υ.Α.Φ., h ο συντελεστής φυσικής συναγωγιμότητας του αέρα εξωτερικά του σωλήνα) είναι μικρότερος του 0,1, η κατανομή της θερμοκρασίας μπορεί να θεωρηθεί ενιαία, ενώ δύναται να κάνουμε χρήση του ομαδοποιημένου μοντέλου θερμοχωρητικότητας. Εκτός αυτών, εφόσον ο λόγος μήκους προς διάμετρο του σωλήνα είναι μεγαλύτερος του 10, μπορούμε να υποθέσουμε πως η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα σε μία διάσταση, αμελώντας την αξονική αγωγή θερμότητας. Η μετρούμενη θερμοκρασιακή διαφορά κατά το ύψος των σωλήνων είναι αμελητέα. Σε ότι αφορά τα υλικά που επιλέχτηκαν, GR27 και GR41, η ανάλυση οθόνης έδειξε πως αποτελούνται κατά 0,1% από σωματίδια, διαμέτρου $>4\text{mm}$, 7,5% με διάμετρο 3-4mm, 89,5% με διάμετρο 1-3mm, 2,3% με διάμετρο 0,5-1mm και 0,6% με διάμετρο $<0,5\text{mm}$. Η σύνθεση είναι 65% κεραμικό και 35% παραφίνη, ενώ η διαδικασία της ενθυλάκωσης εξασφαλίζει από τυχόν διαρροές όταν το Υ.Α.Φ είναι σε υγρή μορφή. Στην άνευ βελτιώσεων T-history μέθοδο, θεωρείται πως η αλλαγή φάσης συμβαίνει σε συγκεκριμένη θερμοκρασία T_m , ενώ υπολογίζεται κι ένας βαθμός υπέρψυξης (T_m-T_{ms}) κατά τη στερεοποίηση, ο οποίος είναι ενδεικτικός του ότι η αλλαγή φάσης έλαβε τέλος. Στη βελτιωμένη T-history, πρέπει να ληφθεί υπ'όψη το θερμοκρασιακό εύρος ($T_{m1}-T_{m2}$). Ακολουθούν χαρακτηριστικές καμπύλες σχημα 4.7 και 4.8 θερμοκρασίας – χρόνου του Υ.Α.Φ. και του υλικού αναφοράς.



Σχήμα 4.7: Καμπύλη T-history για αποσταγμένο νερό[10]



Σχήμα 4.8: Καμπύλη T-history για ΥΑΦ [10]

Το πρώτο βήμα είναι να βρεθούν οι χαρακτηριστικές θερμοκρασίες (T_{m1} , T_{m2} , T_f) και να προσδιοριστούν οι αντίστοιχες χρονικές περιόδους που απαιτούνται ώστε το Υ.Α.Φ. (t_{p1} , t_{p2} , t_{p3}) και το υλικό αναφοράς (t_{w1} , t_{w2} , t_{w3}) να αποκτήσουν αυτές τις θερμοκρασίες. Τα εμβαδά (A_{p1} , A_{p2} , A_{p3}) και (A_{w1} , A_{w2} , A_{w3}) είναι τα εμβαδά που περικλείονται μεταξύ της θερμοκρασίας του υλικού T_o και της θερμοκρασίας του αέρα T_a , με όρια τις χρονικές περιόδους. Οι εξισώσεις διατήρησης ενέργειας των σωλήνων του Υ.Α.Φ. και του νερού από την αρχή του πειράματος T_o μέχρι τη στιγμή που ξεκινάει η αλλαγή φάσης T_{m1} γράφονται :

$$(m_t c_{pt} + m_p c_{pl})(T_0 - T_{m1}) = hA_t \int_0^{t_{p1}} (T - T_a) dt = hA_t A_{p1} \quad (4.3)$$

$$(\mathbf{m}_t \mathbf{c}_{pt} + \mathbf{m}_w \mathbf{c}_w)(\mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_{m1}) = \mathbf{hA}_t \int_0^{tw1} (\mathbf{T} - \mathbf{T}_a) \mathbf{dt} = \mathbf{hA}_t \mathbf{A}_{w2} \quad (4.4)$$

Υποθέτοντας σταθερή θερμοκρασία, ανεξάρτητη από τις τιμές των ειδικών θερμότητων, η C_{pl} μπορεί να προκύψει από τις εξισώσεις (4.3) και (4.4) και δίνεται από την :

$$C_{pl} = \left[\frac{A_{p1}}{A_{w1}} (\mathbf{m}_t \mathbf{c}_{pt} + \mathbf{m}_w \mathbf{c}_{pw}) / \mathbf{m}_p \right] - (\mathbf{m}_t \mathbf{c}_{pt} / \mathbf{m}_p) \quad (4.5)$$

Οι εξισώσεις διατήρησης ενέργειας των σωλήνων του Υ.Α.Φ. και του υλικού αναφοράς από τη στιγμή που αρχίζει η αλλαγή φάσης T_{m1} μέχρι τη στιγμή που τελειώνει T_{m2} γράφονται :

$$(\mathbf{m}_t \mathbf{c}_{pt} + \mathbf{m}_p \mathbf{c}_{pm})(\mathbf{T}_{m1} - \mathbf{T}_{m2}) + \mathbf{m}_p \mathbf{H}_{ls} = \mathbf{hA}_t \int_{tp1}^{tp2} (\mathbf{T} - \mathbf{T}_a) \mathbf{dt} = \mathbf{hA}_t \mathbf{A}_{p2} \quad (4.6)$$

$$(\mathbf{m}_t \mathbf{c}_{pt} + \mathbf{m}_w \mathbf{c}_{pw})(\mathbf{T}_{m1} - \mathbf{T}_{m2}) = \mathbf{hA}_t \int_{tw1}^{tw2} (\mathbf{T} - \mathbf{T}_a) \mathbf{dt} = \mathbf{hA}_t \mathbf{A}_{w2} \quad (4.7)$$

Από αυτές τις εξισώσεις προκύπτει η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, η οποία δίνεται από την :

$$\mathbf{H}_{ls} = \left[\frac{A_{p2}}{A_{w2}} (\mathbf{m}_t \mathbf{c}_{pt} + \mathbf{m}_w \mathbf{c}_{pw})(\mathbf{T}_{m1} - \mathbf{T}_{m2}) / \mathbf{m}_p \right] - \frac{(\mathbf{m}_t \mathbf{c}_{pt})(\mathbf{T}_{m1} - \mathbf{T}_{m2})}{\mathbf{m}_p} - \mathbf{c}_{pm}(\mathbf{T}_{m1} - \mathbf{T}_{m2}) \quad (4.8)$$

Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης 4.8 αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά της αισθητής θερμότητας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης.

Οι εξισώσεις διατήρησης ενέργειας από το τέλος της αλλαγής φάσης T_{m2} μέχρι τη στιγμή που το Υ.Α.Φ. και το αποσταγμένο νερό αποκτούν την ίδια θερμοκρασία T_r είναι :

$$(\mathbf{m}_t \mathbf{c}_{pt} + \mathbf{m}_p \mathbf{c}_{ps})(\mathbf{T}_{m2} - \mathbf{T}_{m1}) = \mathbf{hA}_t \int_{tp2}^{tp3} (\mathbf{T} - \mathbf{T}_a) \mathbf{dt} = \mathbf{hA}_t \mathbf{A}_{p3} \quad (4.9)$$

$$(\mathbf{m}_t \mathbf{c}_{pt} + \mathbf{m}_w \mathbf{c}_{pw})(\mathbf{T}_{m2} - \mathbf{T}_{m1}) = \mathbf{hA}_t \int_{tw2}^{tw3} (\mathbf{T} - \mathbf{T}_a) \mathbf{dt} = \mathbf{hA}_t \mathbf{A}_{w3} \quad (4.10)$$

Από τις εξισώσεις αυτές προκύπτει η c_{ps} , η οποία δίνεται από την :

$$C_{ps} = \left[\frac{A_{p3}}{A_{w3}} (m_t c_{pt} + m_w c_{pw}) / m_p \right] - (m_t c_{pt} / m_p) \quad (4.11)$$

Πρέπει να σημειωθεί πως ο προσδιορισμός της c_{pm} , η οποία χρησιμοποιείται στην εξίσωση (4.8) παρουσιάζει μεγάλη ανακρίβεια. Αυτό οφείλεται στη διακύμανση της ειδικής θερμότητας με τη θερμοκρασία. Η χρήση της μέσης τιμής της c_{ps} στη θερμοκρασία T_{m1} και της μέσης τιμής της c_{pl} στη θερμοκρασία T_{m2} για τον υπολογισμό της c_{pm} μπορεί να είναι μία πρώτη προσέγγιση. Η συγκεκριμένη όμως προσέγγιση είναι ιδιαίτερος ευαίσθητη στον ακριβή προσδιορισμό της αρχής και του τέλους της αλλαγής φάσης, γεγονός που μπορεί να αποφέρει λάθη στον υπολογισμό της h_{fs} .

Λόγω του ότι τα συγκεκριμένα Υ.Α.Φ. δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο της υπέρψυξης, όπως τα ένυδρα άλατα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη μεθοδολογία προκειμένου να προσδιοριστούν η αρχή και το τέλος της αλλαγής φάσης. Προτείνεται λοιπόν μία μεθοδολογία που βασίζεται στο ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας του PCM βάση του χρόνου. Θεωρώντας πως ο σωλήνας του Υ.Α.Φ. παρουσιάζει ομαδοποιημένο μοντέλο χωρητικότητας, με ισοδύναμη χωρητικότητα c_{peq} , η μεταβολή της θερμοκρασίας με το χρόνο δίνεται από την εξίσωση :

$$m_p c_{peq} \frac{dT}{dt} = h A_t (T - T_a) \quad (4.12)$$

Ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή διαφορά $(T - T_a)$, από το συντελεστή φυσική συναγωγής και από την ισοδύναμη θερμοχωρητικότητα c_{peq} . Εφόσον ο συντελεστής φυσικής συναγωγής είναι ανάλογος της ποσότητας, $(T - T_a)^{1/4}$, μετατρέπουμε την προηγούμενη εξίσωση ως εξής :

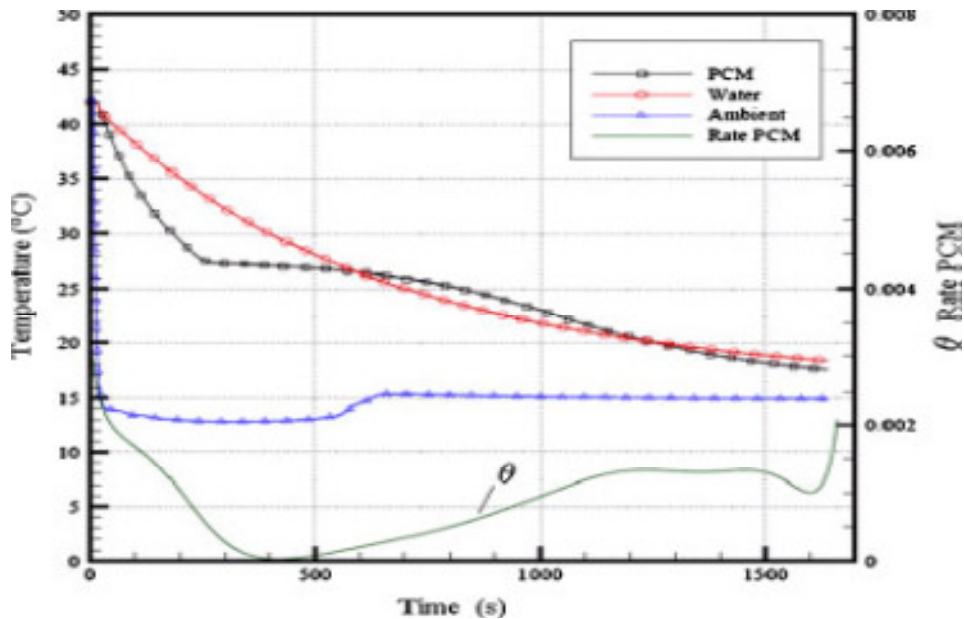
$$\theta = \frac{dT}{dt} / (T - T_a)^{5/4} \approx \frac{A_t}{M_p c_{peq}} \quad (3.13)$$

Η καμπύλη μεταβολής του θ συναρτήσει του χρόνου θα περιλαμβάνει δύο σημεία καμπής, ως αποτέλεσμα της σημαντικής μεταβολής του c_{peq} στην αρχή και στο τέλος του θερμοκρασιακού εύρους της αλλαγής φάσης. Το πρώτο σημείο καμπής αντιπροσωπεύει την αρχή και το δεύτερο το τέλος της στερεοποίησης.

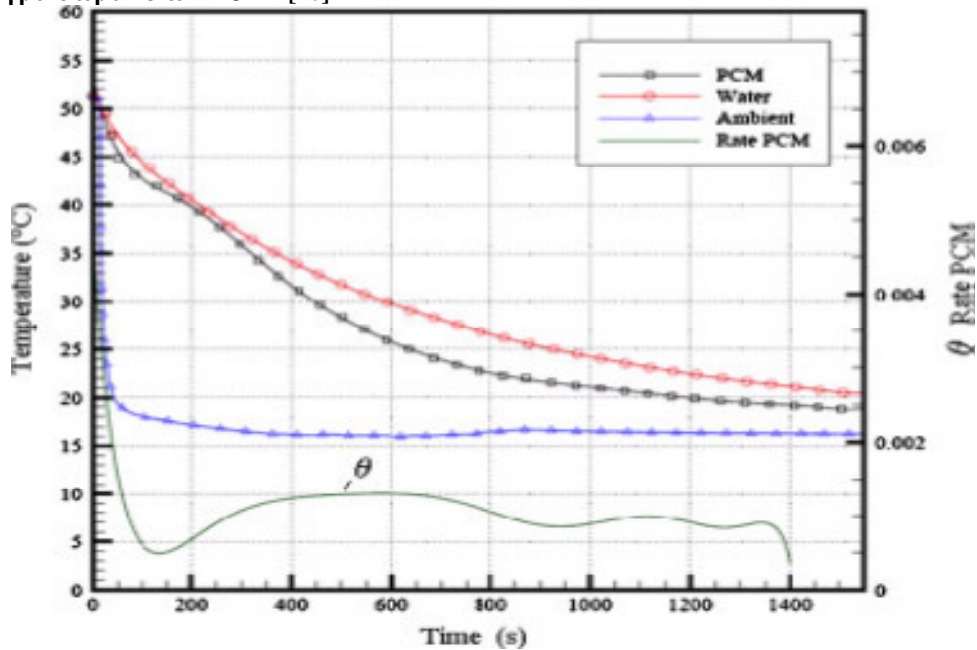
Προκειμένου να βρεθούν τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των υλικών RUBITHERM GR27 και GR41 έγινε συλλογή των δεδομένων και επεξεργασία αυτών με προγράμματα υπολογιστικά, τα οποία βασίζονται στις εξισώσεις που προαναφέρθηκαν.

Αρχικά, καθορίστηκε η μεταβολή του θ συναρτήσει του χρόνου, ώστε προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές θερμοκρασίες (T_{m1} , T_{m2} , T_{m3}) και οι αντίστοιχοι χρόνοι του Υ.Α.Φ (t_{p1} , t_{p2} , t_{p3}) και του υλικού αναφοράς (t_{w1} , t_{w2} , t_{w3}). Με χρήση ολοκληρωμάτων υπολογίστηκαν τα εμβαδά (A_{p1} , A_{p2} , A_{p3}) και (A_{w1} ,

A_{w2} , A_{w3}), ενώ στη συνέχεια βάση των εξισώσεων (4.5), (4.8) και (4.11) υπολογίστηκαν τα μεγέθη c_{ps} , c_{pl} και h_{ls} . Εξαιτίας της ανακρίβειας καθορισμού της συνεισφοράς της αισθητής θερμότητας, δεν έχει συμπεριληφθεί στον υπολογισμό της h_{ls} . Τα πειράματα επαναλήφθηκαν αρκετές φορές, χρησιμοποιώντας διαφορετικό δείγμα του υλικού. Ακολουθούν οι πειραματικές καμπύλες των GR27 και GR41. [10]



Σχήμα 4.9: Temperature-history καμπύλη διαδικασίας ψύξης του υλικού GR27, με δείγμα σωματιδίων 1-3mm[10]



Σχήμα 3.10: Temperature-history καμπύλη διαδικασίας ψύξης του υλικού GR41, με δείγμα σωματιδίων 1-3mm[10]

Σε ότι αφορά το GR27, φαίνεται ξεκάθαρα πως η μείωση της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου γίνεται με γρήγορο ρυθμό στην αρχή του πειράματος. Η μετάβαση από την υγρή στη στερεά φάση, η οποία υποδεικνύεται από την αλλαγή κλίσης στο διάγραμμα, εντοπίζεται στους 27°C. Το τέλος της αλλαγής φάσης δεν παρουσιάζει κάποια αξιόλογη συμπεριφορά διαγραμματικά. Σε ότι αφορά το GR41, δεν παρατηρούνται ξεκάθαρες αλλαγές στην κλίση στην αρχή και κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Η μείωση της μεταβλητής θ συναρτήσει του χρόνου δείχνει ένα ελάχιστο σημείο καμπής, το οποίο σηματοδοτεί την αρχή του φαινομένου. Στο τέλος της αλλαγής φάσης τόσο του υλικού GR27, όσο και του GR41 η κλίση του διαγράμματος τείνει να μηδενιστεί. Παρατηρούμε συνεπώς πως ενώ είναι εύκολο να προσδιοριστεί το σημείο αρχής της αλλαγής φάσης, είναι αρκετά δύσκολο να προσδιορίσουμε το σημείο της πλήρους στερεοποίησης. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.1

Αποτελέσματα των GR27 και GR41 με χρήση της μεθόδου T-history[10]

Υλικό	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	c_{ps} (J/kgK)	c_{pl} (J/kgK)	$H_{ls=Hf}$ (kJ/kg)
GR27	26.95	20.63	2225	2087	49.306
GR41	41.73	31.64	3150	4242	46.084

Η προηγούμενη ανάλυση περιορίζεται από την υπόθεση σταθερής θερμοκρασίας, ανεξάρτητης των ειδικών θερμοτήτων, καθώς και από τη δυσκολία προσδιορισμού των ορίων αλλαγής φάσης. Είναι λοιπόν προτιμότερο να κάνουμε χρήση της ενθαλπίας και πιο συγκεκριμένα της συνάρτησης που διέπει τη σχέση της με τη θερμοκρασία. Οι εξισώσεις διατήρησης ενέργειας με όρους ενθαλπίας γράφονται :

$$m_t c_{pt}(T_t - T_{t+1}) + m_p \Delta H_{\pi}(T_t) = hA_t \int_{t_p}^{t_p + \Delta t_p} (T - T_{\alpha}) dt = hA_t A_{pt} \quad (4.15)$$

$$(m_t c_{pt} + m_w c_{pw})(T_i - T_{i+1}) = hA_t \int_{t_w}^{t_w + \Delta t_w} (T - T_{\alpha}) dt = hA_t A_{wi} \quad (4.16)$$

Από τις εξισώσεις αυτές προκύπτει η διαφορά ενθαλπίας του χρονικού διαστήματος ΔT_i και δίνεται από τη σχέση :

$$\Delta H_p(T_i) = \left[\frac{A_{pl}}{A_{wi}} \Delta T_i (m_t c_{pt} + m_w c_{pw}) / m_p \right] - m_t c_{pt} \Delta T_i / m_p \quad (4.17)$$

Όπου T_i είναι η μέση θερμοκρασία του χρονικού διαστήματος ΔT_i . Η παράσταση των τιμών της $\Delta H_p(T_i)$ συναρτήσει του χρόνου οδηγεί σε μία

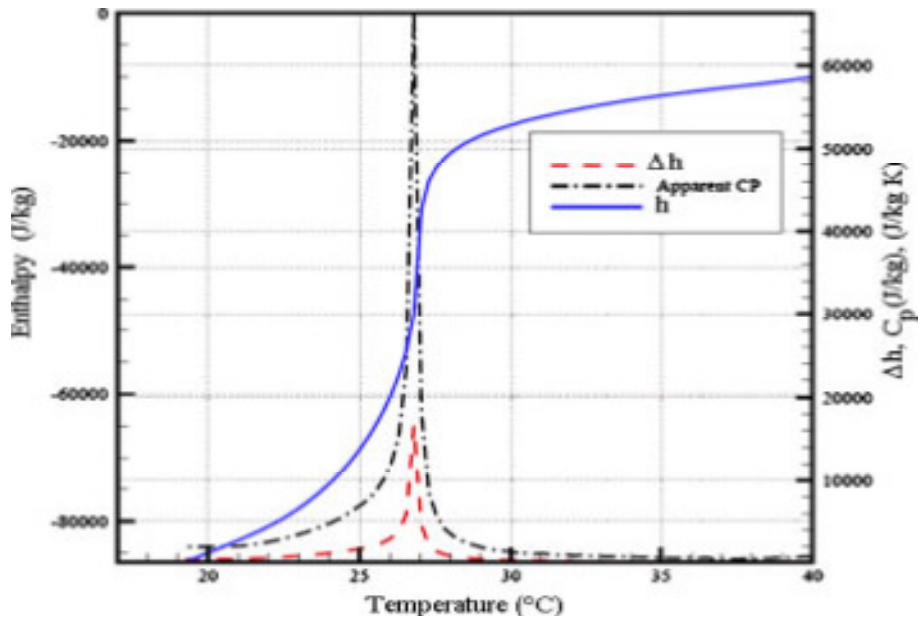
καμπύλη παρόμοια με αυτήν που προκύπτει με χρήση της μεθόδου DSC. Επίσης, θεωρώντας μία σταθερή τιμή ενθαλπίας H_{p0} , ως τιμή αναφοράς, το διάγραμμα ενθαλπίας-θερμοκρασίας μπορεί να καθοριστεί ως το άθροισμα των διαστημάτων :

$$H_p(T) = H_{p0} + \sum_{i=1}^N \Delta H_p(T_i) \quad (4.18)$$

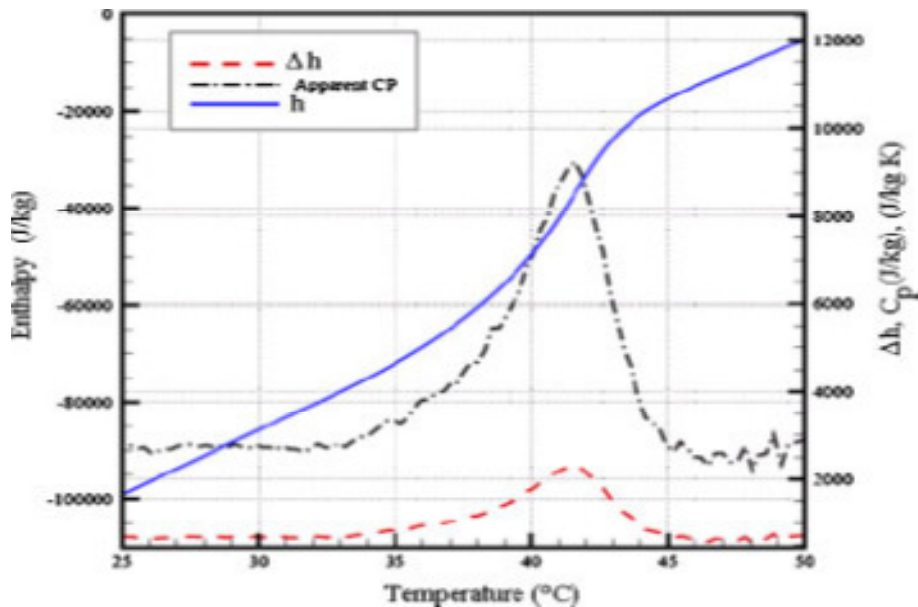
Οι τιμές των θερμοχωρητικοτήτων μπορούν να προκύψουν από την κλίση της καμπύλης, με χρήση μερικών παραγώγων :

$$C_p = \frac{\partial H_p}{\partial T} \quad (4.19)$$

Κάνοντας χρήση των εξισώσεων που αναλύθηκαν, διατυπωμένων με όρους ενθαλπίας, προκύπτουν τα διαγράμματα ενθαλπίας-θερμοκρασίας για τα δύο υλικά.



Σχήμα 4.11: Temperature-history curve during cooling for GR27[10]



Σχήμα 4.12: Temperature-history curve during cooling for GR41[10]

Η αρχή και το τέλος της αλλαγής φάσης μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα με χρήση της καμπύλης θερμοχωρητικότητας. Τα σημεία διαχωρισμού της καμπύλης θερμοχωρητικότητας από την βασική καμπύλη στις περιοχές στερεάς και υγρής φάσης εντοπίζονται άμεσα. Ακολουθεί πίνακας των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 4.2:

Αποτελέσματα των GR27 και GR41 με χρήση της μεθόδου T-history[10]

Υλικό	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	C_{ps} J/kgK	C_{pl} J/kgK	$H_{ls}=\Delta H_{pc}$ kJ/kg
GR27	29	21	2044	1921	64.850
GR41	45	31	2784	2745	65.895

Εξετάζοντας τις εξισώσεις (4.5), (4.8), (4.11) και (4.17), μπορεί να διαπιστωθεί πως τα σφάλματα οφείλονται σε ανακρίβεια στις μετρήσεις της μάζας του σωλήνα, του υλικού, του αποσταγμένου νερού, καθώς και της θερμοκρασίας. Στο πείραμα που εκπονήθηκε, υιοθετήθηκε συσκευή μέτρησης με ακρίβεια 0,001g, οπότε το σφάλμα στον υπολογισμό των μαζών είναι μικρότερο του 0,05%. Συνεπώς, μπορούμε τελικά να αποδώσουμε τα σφάλματα στη μέτρηση της θερμοκρασίας. Εφαρμόζοντας τη θεωρία σφαλμάτων στις εξισώσεις (3.8) και (3.17) λαμβάνουμε τη σχέση :

$$\frac{\sigma H_{ls}}{H_{ls}} = \left[2 \left(\frac{\sigma T}{T_{m1} - T_{m2}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.20)$$

Όπου σH_{is} και σT αντιστοιχούν στα σφάλματα των H_{is} και T . Η ακρίβεια των θερμοστοιχείων είναι $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Προκύπτει λοιπόν σφάλμα για την H_{is} $\pm 1,76$, ενώ για τη θερμοκρασία σφάλμα τάξεως 1,01%.

Χάρην συγκρίσεως της T-history μεθόδου με την τεχνική DSC, ακολουθεί πίνακας αποτελεσμάτων του GR27 με τη DSC μέθοδο, κατά την οποία εφαρμόστηκε ρυθμός θέρμανσης/ψύξης $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Σημειώνεται πως ο ρυθμός θέρμανσης/ψύξης αφήνει ανεπηρέαστα τα αποτελέσματα της μεθόδου.

Πίνακας 4.3

Χαρακτηριστικά του GR27 με χρήση της μεθόδου DSC[10]

Ρυθμός	ΔH_f (kJ /kg)	T_{m1} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{m2} ($^{\circ}\text{C}$)
(-0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	41.17	27.50	19.16
(+0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	43.16	28.33	20.55

Τέλος, παρατίθεται ο πίνακας των χαρακτηριστικών των δύο υλικών από τον κατασκευαστή προκειμένου να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα που δίνει τόσο η T-history, όσο και η DSC.

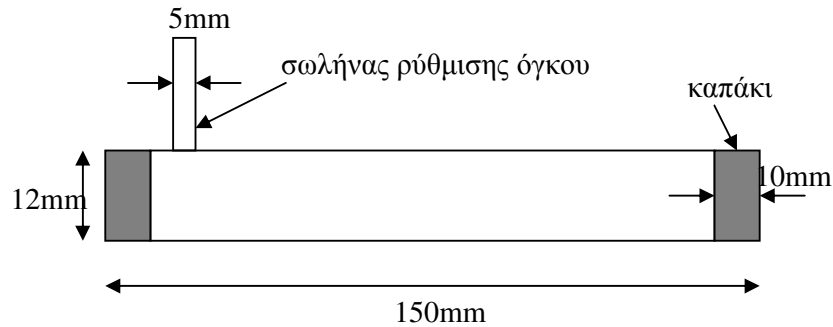
Πίνακας 4.4

Χαρακτηριστικά GR27, GR41 από τον κατασκευαστή[10]

Υλικό	Θερμοχωρητικότητα	Θερμοκρασιακό	Μέγιστη T
	ΔH_{pc} (kJ /kg $^{-1}$)	εύρος ($^{\circ}\text{C}$)	λειτουργίας ($^{\circ}\text{C}$)
GR27	72	19–34	50
GR41	64	33–48	70

Στα ίδια πλαίσια, εκτελέστηκε πείραμα αξιολόγησης της T-history μεθόδου για την εύρεση των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών Υ.Α.Φ. χαμηλού σημείου τήξης. Όπως και στο προηγούμενο πείραμα, χρησιμοποιήθηκε βελτιωμένη T-history μέθοδος, αφού η αρχική εμφανίζει ορισμένα μειονεκτήματα. Τα δύο βασικότερα προβλήματα της αρχικής μεθόδου είναι η οριοθέτηση των κύκλων τήξης-πήξης βάση της υπέρψυξης και το γεγονός ότι δε συνυπολογίζεται η αισθητή θερμότητα στην αλλαγή φάσης. Η λύση στο πρώτο έγκειται στην οριοθέτηση μέσω των σημείων καμπής της παραγώγου της θερμοκρασίας, ενώ στο δεύτερο στην εισαγωγή εξισώσεων κατά την ανάλυση για την αισθητή θερμότητα. Οι ερευνητές αρχικά χρησιμοποίησαν έναν κάθετο σωλήνα προκειμένου να εφαρμόσουν τη βελτιωμένη μέθοδο. Παρατηρήθηκε όμως ότι εξαιτίας της φυσικής συναγωγής, η τήξη του Υ.Α.Φ. ξεκίνησε από την εξωτερική επιφάνεια του υλικού και συνεχίστηκε προς την εσωτερική. Εκτός αυτού, υπήρξε διαφορά στην

ταχύτητα τήξης μεταξύ των άνω και κάτω τμημάτων. Προτάθηκε λοιπόν η χρήση οριζόντιου σωλήνα σε συνδυασμό με ένα συμπληρωματικό σωλήνα, ο οποίος λειτουργεί ως ρυθμιστής της αλλαγής όγκου. Αρχικά, ο συμπληρωματικός σωλήνας εισήχθει κάθετα στο σωλήνα που φέρει το υλικό, αλλά παρόλο που η ακρίβεια της μεθόδου βελτιώθηκε, αυξήθηκε η πολυπλοκότητα. Ακολουθεί σχήμα της κατασκευής.



Σχήμα 4.13

Επιλέχθηκε τελικά ο ρυθμιστής της αλλαγής όγκου να τοποθετηθεί στο καπάκι του σωλήνα που φέρει το υλικό και πιο συγκεκριμένα υιοθετήθηκε μια θύρα έγχυσης. Ως Υ.Α.Φ. χρησιμοποιήθηκε αποσταγμένο νερό (σημείο τήξης $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), παραφίνη ($\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ -σημείο τήξης $5,9^{\circ}\text{C}$) και πολυαιθυλενογλυκόλη (PEG-σημείο τήξης $8\text{ }^{\circ}\text{C}$), μοριακού βάρους 400. Εσωτερικά του σωλήνα τοποθετήθηκε άλλος σωλήνας ανοξειδωτού χάλυβα, διαμέτρου 1,4mm, ο οποίος φέρει το υλικό αναφοράς. Ως υλικό αναφοράς χρησιμοποιήθηκε υδατική αιθυλενογλυκόλη, σημείου τήξης $-23,8^{\circ}\text{C}$. Το Υ.Α.Φ. και το υλικό αναφοράς ψύχθηκαν στους -10°C και στη συνέχεια εκτέθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ακολουθούν πίνακες αποτελεσμάτων για το αποσταγμένο νερό και την παραφίνη, όπου T_m η θερμοκρασία σημείου τήξης και T_i η θερμοκρασία σημείου καμψής. [10]

Πίνακας 4.5

Αποσταγμένο νερό[10]

Λανθάνουσα θερμότητα για τον πάγο (καθαρό νερό)		
Αριθμός πειράματος	Λανθάνουσα(kJ/kg)	
	Με χρήση T_m	Με χρήση T_i
1	324	333
2	329	329
3	323	319
4	325	336
5	324	321
6	321	331
7	316	323

8	320	335
9	319	325
Μέση τιμή ±		
διάστημα εμπιστοσύνης	322 ±2,9	328 ±4,8
Τιμή αναφοράς	335	

Πίνακας 4.6
Παραφίνη[10]

Λανθάνουσα θερμότητα παραφίνης		
Αριθμός πειράματος	Λανθάνουσα θερμότητα	
	Με χρήση Tm	Με χρήση Ti
1	183	221
2	183	225
3	219	237
4	185	220
5	183	210
6	175	212
7	189	219
8	172	214
9	171	220
Μέση τιμή ±		
διάστημα εμπιστοσύνης	184 ±11	220 ±6,1
Τιμή αναφοράς	229	

Τα συμπεράσματα ήταν τα εξής :

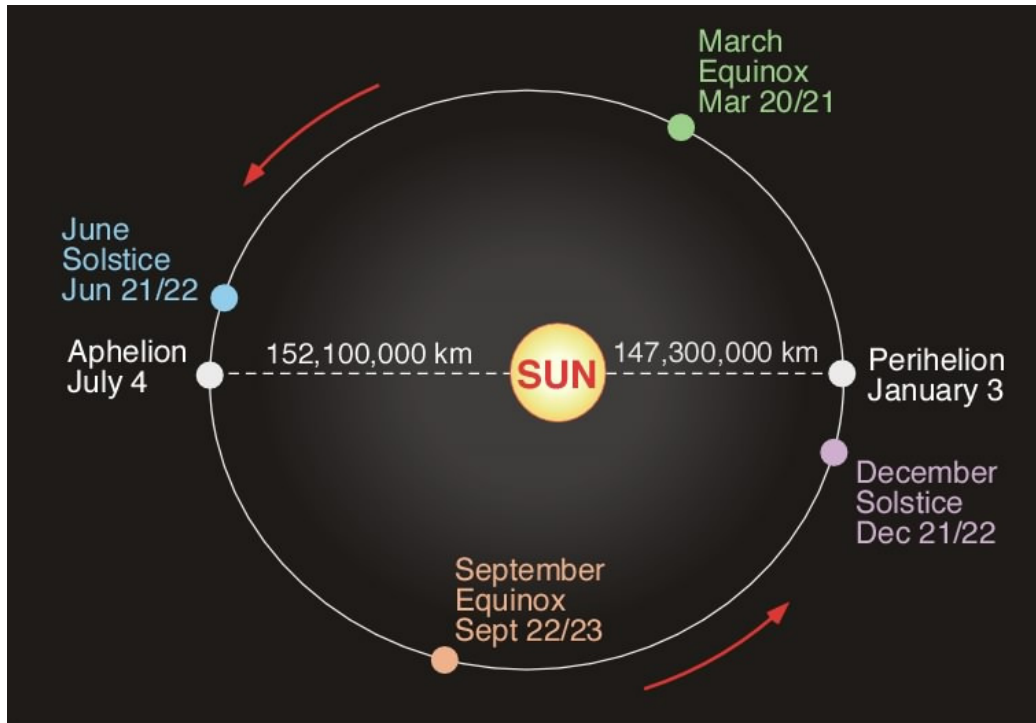
1. Η λανθάνουσα θερμότητα, που υπολογίστηκε με τη βελτιωμένη μέθοδο, έχει πολύ μικρή απόκλιση από την τιμή αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, σε σχέση με δημοσιευμένες τιμές, το λάθος είναι της τάξεως του 2,1% για το αποσταγμένο νερό και του 3,9% για την παραφίνη.
2. Το διάστημα εμπιστοσύνης 95% μειώθηκε στο μισό συγκρινόμενο με τη χρήση κάθετου σωλήνα, ενώ τα αποτελέσματα σε σχέση με τον οριζόντιο σωλήνα, αλλά με το ρυθμιστή διαφοράς όγκου κάθετα σε αυτόν ήταν βελτιωμένα.
3. Η ακρίβεια της υπολογιζόμενης ειδικής θερμότητας με τη μέθοδο T-history είναι πολύ χαμηλή. Λόγω αυτού, είναι σκόπιμο για την εύρεση της λανθάνουσας θερμότητας να χρησιμοποιηθούν γνωστές τιμές της ειδικής θερμότητας και όχι οι υπολογισμένες.
4. Σε ότι αφορά την πολυαιθυνελογλυκόλη, εξαιτίας του μοριακού βάρους, η μέθοδος δεν μπορεί να δώσει σαφή αποτελέσματα για την ειδική θερμότητα της στερεάς φάσης και να διακρίνει μεταξύ αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας.

Κεφάλαιο 5: Ηλιακά θερμικά συστήματα

5.1. Ηλιακή ενέργεια

Ηλιακή σταθερά G_{sc} .

Η τροχιά της γης περί τον ήλιο είναι τέτοια ώστε η απόσταση μεταξύ τους μεταβάλλεται κατά $\pm 1.7\%$ περί τη μέση απόσταση γης-ηλίου η οποία είναι 1.494×10^{11} . Η ηλιακή σταθερά, G_{sc} , είναι η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο η μονάδα επιφανείας κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, όταν η απόσταση γης-ηλίου λαμβάνει την μέση τιμή της. Η τιμή της ηλιακής σταθεράς είναι $G_{sc}=1353 \text{ w/m}^2$. [13]



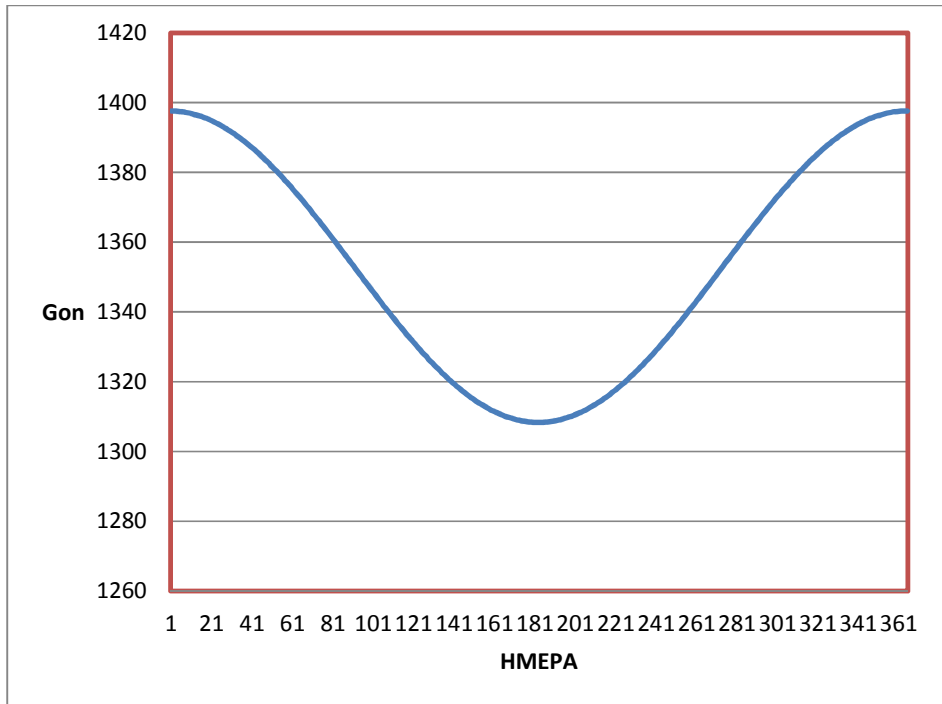
Σχήμα 5.1: Τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο.

Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας.

Η μεταβολή της απόστασης γης-ηλίου προκαλεί μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας κατά $\pm 3\%$ γύρω από την μέση τιμή της. Η ακτινοβολία, G_{on} , που δέχεται επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας, κάθετο στις ακτίνες, δίνεται από την σχέση

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cdot \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (5.1)$$

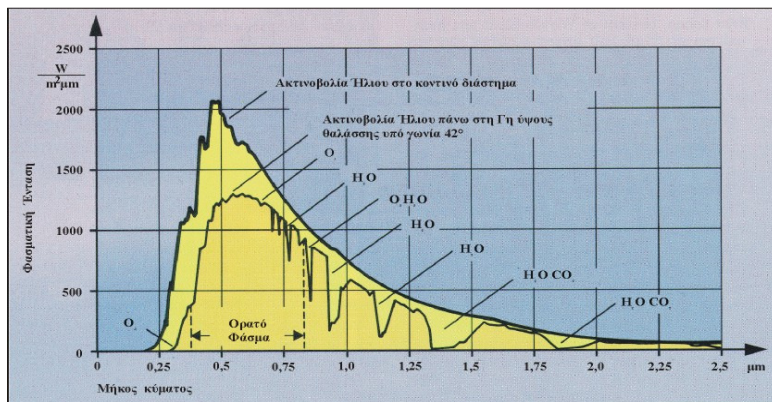
Όπου $n=1-365$ είναι η ημέρα του έτους. Η παραπάνω σχέση δίνεται υπό μορφή διαγράμματος:



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα G_{on}

Φασματική κατανομή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας.

Στο σχήμα 5.2 δίδεται η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας κατά την μέση απόσταση γης-ηλίου. Η υπεριώδης, η ορατή, και η υπέρυθρος ακτινοβολία αντιστοιχούν στις περιοχές μηλών κύματος $\lambda < 0.38 \mu\text{m}$, $0.38 \mu\text{m} < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ και $\lambda > 0.78 \mu\text{m}$ με αντίστοιχη ενέργεια σε κάθε περιοχή 95 w/m^2 , 640 w/m^2 και 618 w/m^2 ($95+640+618=1353 \text{ w/m}^2 = G_{sc}$).



Σχήμα 5.3: Φασματική κατανομή ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας.

Γωνία ζενίθ, θ_z , είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ηλίου.

Ηλιακό ύψος, $90^\circ - \theta_z$, είναι η γωνία από την ευθεία όρασης του ήλιου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.

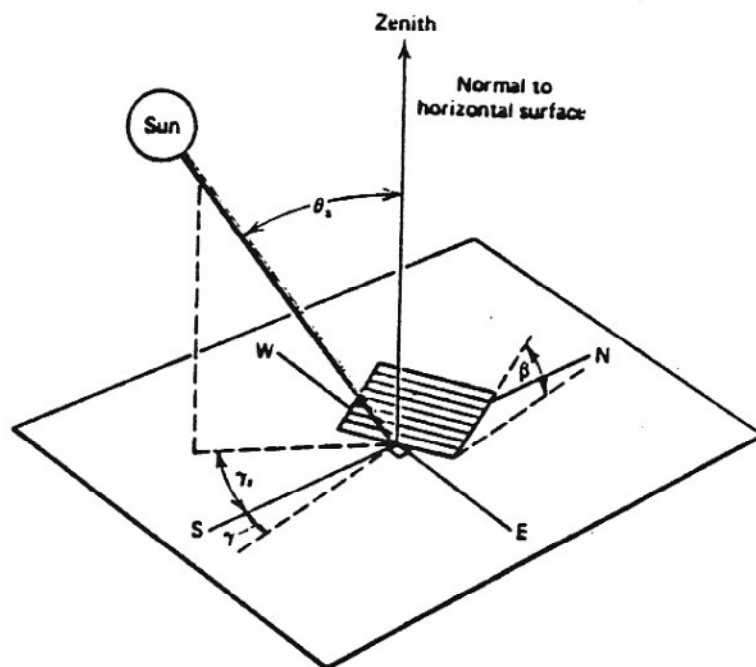
Αζιμούθιο επιφάνειας, γ , είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και την νότια κατεύθυνση. Είναι $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ με:

- $\gamma = 0^\circ$ νότος
- $\gamma = 90^\circ$ δύση
- $\gamma = 180^\circ$ βορράς
- $\gamma = -90^\circ$ ανατολή

Αζιμούθιο ηλίου γ_s , είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.

Κλίση επιπέδου, β , είναι η γωνία που σχηματίζει μία επίπεδος επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Είναι $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ με:

- $\beta = 0^\circ$ οριζόντιο επίπεδο
- $\beta = 90^\circ$ κατακόρυφο επίπεδο
- $\beta > 90^\circ$ το επίπεδο βλέπει προς τα κάτω



Σχήμα 5.4: Ηλιακό αζιμούθιο[13]

Ηλιακός χρόνος

Είναι ο χρόνος που μετράει με βάση τη φαινόμενη κίνηση του ηλίου στον ουρανό. Έτσι, ηλιακό μεσημέρι είναι η χρονική στιγμή που ο ήλιος τέμνει τον μεσημβρινό του παρατηρητή. Ο ηλιακός χρόνος δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο, $t_{\text{ρολ}}$, που δείχνει το ρολόι. Η παρακάτω σχέση συνδέει τους δύο χρόνους:

$$\text{Ηλιακός χρόνος} = t_{\text{ρολ}} + 4(L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E \text{ για δυτικά μήκη} \quad (5.2)$$

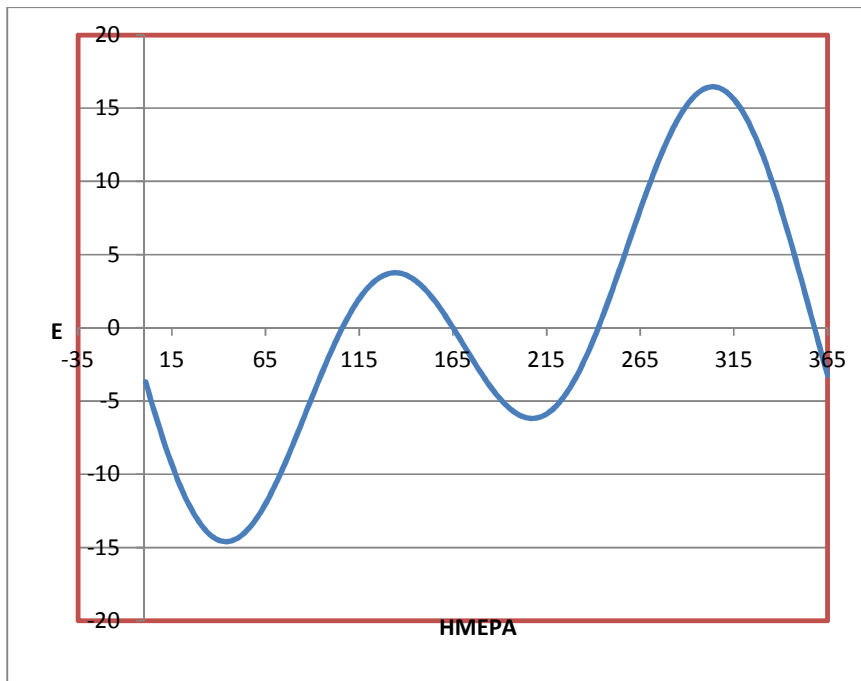
$$\text{Ηλιακός χρόνος} = t_{\text{ρολ}} - 4(L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E \text{ για ανατολικά μήκη} \quad (5.3)$$

όπου L_{st} είναι το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού στο οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος (π.χ. για την Ελλάδα $L_{\text{st}}=30^\circ$) και L_{loc} είναι το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή. Ο συντελεστής 4 εκφράζεται σε min/μοίρα. Τέλος $E(\text{min})$ είναι η εξίσωση του χρόνου που λαμβάνεται κάθε ημέρα του έτους από την παρακάτω σχέση:

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (5.4)$$

$$B = \frac{360(n-81)}{364} \quad (5.5)$$

$$n = \text{ημέρα του έτους} = 1 - 365 \quad (5.6)$$



Σχήμα 5.5: Η εξίσωση του χρόνου E

Ωριαία γωνία, ω

Είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό $15^\circ/h=0.25^\circ/\text{min}$

$$\omega=0.25 \times (\text{min από ηλιακό μεσημέρι}) \quad (5.7)$$

$\omega > 0$ για μμ.

$\omega < 0$ για πμ.

Ηλιακή απόκλιση, δ

Είναι η γωνιακή θέση του ηλίου μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει $-23.45 \leq \delta \leq 23.45$ με θετικές τιμές προς το βορά. Υπολογίζεται από την σχέση:

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \quad (5.8)$$

Άμεσος ακτινοβολία

Είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη κατευθείαν από τον ήλιο χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός. Η στιγμιαία τιμή (W/m^2) της άμεσου ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με G_b ενώ για το κεκλιμένο επίπεδο με G_{bT} . Για χρονική περίοδο μιας ώρας ή μιας ημέρας χρησιμοποιούμε τα σύμβολα $I(\text{J}/\text{m}^2)$ και $H(\text{J}/\text{m}^2)$ αντίστοιχα.

Διάχυτος ακτινοβολία

Είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά την διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα. Συμβολίζεται με τον δείκτη d .

Ολική ακτινοβολία

Είναι το άθροισμα της άμεσου και της διάχυτου ηλιακής ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από παρακείμενες επιφάνειες.

Ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου

Είναι η ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες συμβολίζεται με τον δείκτη n

Ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου

Είναι η ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο κεκλιμένο στις ηλιακές ακτίνες.

Γωνία πρόσπτωσης

Γωνία πρόσπτωσης, θ , της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των προσπίπτουσών ηλιακών ακτινών και της καθέτου την επιφάνεια

$$\cos \theta = \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (5.9)$$

Ωριαία γωνία δύσης ηλίου, ω_s

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta \quad (5.10)$$

και N η διάρκεια της ημέρας σε ώρες.

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (5.11)$$

5.2. Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης

5.2.1. Εισαγωγή

Για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση και την ψύξη των κτηρίων έχουν αναπτυχθεί τρεις κατηγορίες τεχνικών συστημάτων, ανάλογα με το αν παρεμβάλλονται ή όχι μηχανολογικά συστήματα: τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα παθητικά ηλιακά συστήματα, ενώ μία τρίτη κατηγορία είναι τα υβριδικά συστήματα.

1) Παθητικά ηλιακά συστήματα είναι εκείνα που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία για θέρμανση ή ψύξη και δεν κάνουν χρήση μηχανικών μέσων για τη μεταφορά της θερμότητας προς το χώρο. Βασίζονται στη φυσική ροή της θερμικής ενέργειας, εκμεταλλεύονται τις φυσικές ιδιότητες των υλικών του κτηρίου και χρησιμοποιούν, για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας και την αποθήκευση της θερμότητας, τα δομικά στοιχεία του κελύφους (τοίχους, δάπεδα, οροφές, δώμα).

2) Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα απαιτούν τη χρησιμοποίηση μηχανικών μέσων – απλών μέχρι υψηλής τεχνολογίας (αντλίες θερμότητας, εναλλάκτες θερμότητας, κλπ)- και προϋποθέτουν σύνθετους μηχανισμούς συλλογής, μεταφοράς και αποθήκευσης της θερμότητας που έχει προέλθει από την ηλιακή ακτινοβολία που δεσμεύτηκε. Ηλιακοί συλλέκτες που θερμαίνουν νερό ή αέρα, το οποίο στη συνέχεια διοχετεύεται στο σύστημα διανομής της θερμότητας στο χώρο με τη μεσολάβηση εναλλάκτη θερμότητας αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα.

3) Τα υβριδικά είναι συστήματα που συνδυάζουν τη φυσική και τη μηχανική ροή θερμότητας. Βασίζονται στην παθητική εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, παρεμβάλλοντας συγχρόνως μηχανικά συστήματα χαμηλής κατανάλωσης και απλής κατασκευής. Για παράδειγμα, η προσθήκη ενός ανεμιστήρα σε ένα παθητικό σύστημα, για να υποβοηθήσει τη μεταφορά θερμότητας στους πίσω χώρους του κτηρίου ή ενός θερμοστάτη για να υπάρχει έλεγχος της θερμότητας που αποδίδεται, μετατρέπουν ένα παθητικό ηλιακό σύστημα σε υβριδικό.

Βασικές αρχές λειτουργίας των παθητικών ηλιακών συστημάτων

Η εφαρμογή των παθητικών ηλιακών συστημάτων προϋποθέτει ένα κτήριο σχεδιασμένο σύμφωνα με τις αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού. Η λειτουργία των παθητικών ηλιακών συστημάτων βασίζεται στο «φαινόμενο του θερμοκηπίου» για τη δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη μετατροπή της σε θερμότητα, στη θερμοχωρητικότητα των υλικών για την αποθήκευση της θερμότητας και στους βασικούς νόμους της θερμοδυναμικής για τη μεταφορά της θερμότητας από το χώρο της συλλογής στην αποθήκη θερμότητας ή και στο χώρο που θα θερμανθεί. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου αναφέρεται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας που διέρχεται από τον υαλοπίνακα σε θερμική ακτινοβολία και στη δέσμευσή της ως θερμότητα στον εσωτερικό χώρο.

Με την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας (άμεσης και διάχυτης) επάνω στον υαλοπίνακα λαμβάνουν χώρα τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί μετάδοσής της:

- ένα ποσοστό ανακλάται προς το εξωτερικό περιβάλλον
- ένα ποσοστό, που είναι το τμήμα που αντιστοιχεί στο ορατό τμήμα του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας -φωτεινή ακτινοβολία- διαπερνά τον υαλοπίνακα, και
- ένα ποσοστό της ακτινοβολίας απορροφάται από τον υαλοπίνακα, από το οποίο ένα μέρος επανακτινοβολείται προς το εξωτερικό περιβάλλον, ένα μέρος προς τον εσωτερικό χώρο και ένα μέρος μετατρέπεται σε θερμική ακτινοβολία.

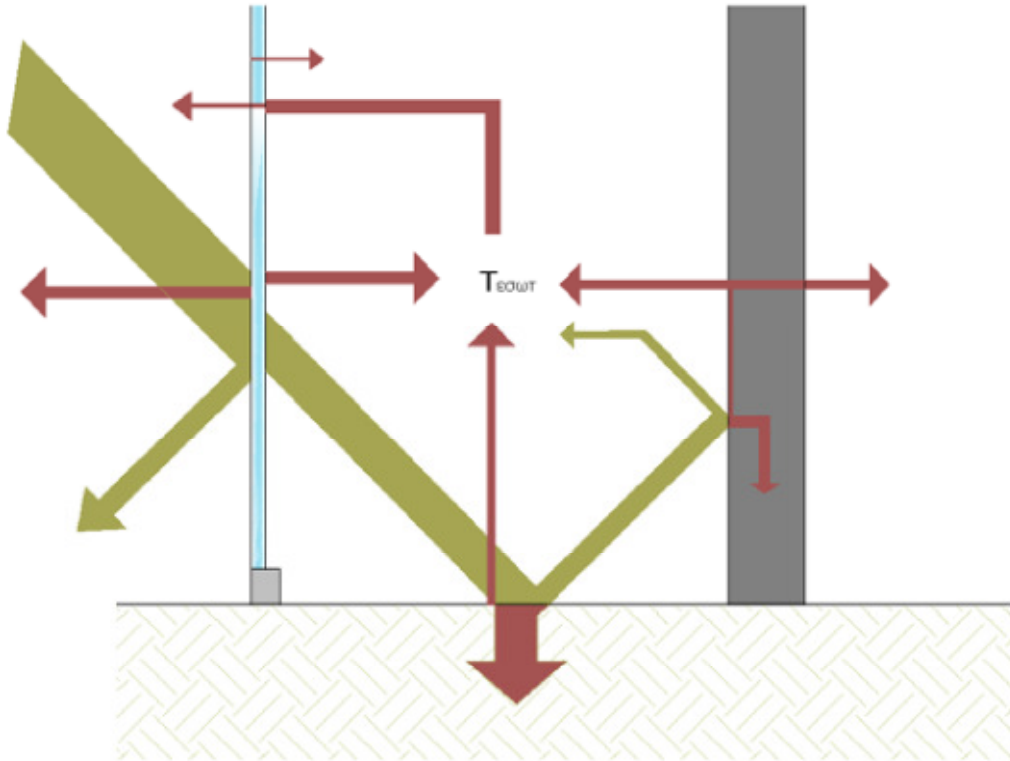
Το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά, ανακλάται ή απορροφάται από τον υαλοπίνακα εξαρτάται από τα φωτομετρικά χαρακτηριστικά του:

$$g + \rho + \alpha = 1 \quad (5.12)$$

Όπου: g: διαπερατότητα, ρ: ανακλαστικότητα, και α: απορροφητικότητα
Το ορατό τμήμα του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, που ανάλογα με τη διαπερατότητα του υαλοπίνακα, διέρχεται στον εσωτερικό χώρο είναι μικρό

μήκους κύματος (0.4-0.8 μm). Η ακτινοβολία προσπίπτει στα δομικά στοιχεία και τα αντικείμενα που βρίσκονται στον εσωτερικό χώρο και, αλλάζοντας μήκος κύματος, μετατρέπεται σε θερμική ακτινοβολία (ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος). Ο υαλοπίνακας και τα διαφανή εν γένει υλικά είναι αδιαπέραστα στη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα σώματα.

Η με αυτό τον τρόπο προερχόμενη θερμότητα, δεν μπορεί να διαπεράσει ως θερμική ακτινοβολία τον υαλοπίνακα, εγκλωβίζεται στον εσωτερικό χώρο, απορροφάται από τα δομικά στοιχεία ή από ειδικά διαμορφωμένη «αποθήκη θερμότητας» και πλέον μεταδίδεται στο χώρο με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία, συμβάλλοντας στη διαμόρφωση του θερμικού ισοζυγίου του χώρου (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6: Συμμετοχή της ηλιακής ακτινοβολίας στο θερμικό ισοζύγιο του κτηρίου

5.2.2. Υλικά παθητικών ηλιακών συστημάτων

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα παθητικά ηλιακά συστήματα, διακρίνονται σε υλικά συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας και σε υλικά αποθήκευσης της θερμότητας.

5.2.2.1 Υλικά συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας

Τα υλικά συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι **διαφανή υλικά** (διαπερατά από την ηλιακή ακτινοβολία). Τα κριτήρια για την επιλογή των διαφανών υλικών που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα παθητικό σύστημα είναι: Οι θερμοφυσικές ιδιότητες (διαπερατότητα, απορροφητικότητα και ανακλαστικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία, ικανότητα εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας, θερμοπερατότητα).

- Η αισθητική , που είναι καθοριστικός παράγοντας για τη διαμόρφωση των όψεων του κτηρίου και η οποία συνδέεται και με τις θερμοφυσικές ιδιότητες του διαφανούς υλικού, (π.χ. συντελεστής ηλιακής ανακλαστικότητας, απορροφητικότητας).
- Η αντοχή, που πρέπει να είναι ικανή να παραλαμβάνει τις μηχανικές καταπονήσεις από θερμοκρασιακές μεταβολές και ανεμοπιέσεις.
- Το βάρος που μπορεί να φέρει το στοιχείο στο οποίο εφαρμόζεται το διαφανές υλικό.
- Το κόστος αγοράς, τοποθέτησης και συντήρησης που πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο για να μην επιβαρύνεται η κατασκευή. Τα συνηθέστερα διαφανή υλικά που χρησιμοποιούνται σε κτιριακές κατασκευές είναι:
- Οι υαλοπίνακες
- Τα σκληρά πλαστικά (ακρυλικά, πολυεστερικά και πολυκαρβονικά)
- Η διαφανής θερμομόνωση

Οι υαλοπίνακες είναι άκαμπτοι, εμφανίζουν αντοχή στις καιρικές μεταβολές, στο φως και στις χημικές αντιδράσεις. Μειονέκτημα είναι το βάρος και η μικρή αντοχή τους σε μηχανική κρούση, εκτός εάν έχουν υποστεί ανάλογη επεξεργασία (π.χ. υαλοπίνακες ασφαλείας - τύπου "securit"). Το κοινό γυαλί έχει διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία από 0,78 - 0,91, ανάλογα με την ποιότητα και το πάχος του. Εάν χρησιμοποιηθούν πολλαπλοί υαλοπίνακες, μειώνεται η διαπερατότητα του συστήματος, αλλά βελτιώνεται σημαντικά ο συντελεστής θερμοπερατότητας. Ανακλαστικοί και απορροφητικοί υαλοπίνακες με υψηλό συντελεστή ανακλαστικότητας και απορροφητικότητας αντίστοιχα, πρέπει να χρησιμοποιούνται με σύνεση στα παθητικά ηλιακά συστήματα, γιατί μειώνουν το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο χώρο. Αντίθετα, ενδείκνυνται υαλοπίνακες χαμηλής εκπνεψιμότητας (low emissivity ή low-e), κατάλληλα τοποθετημένοι, οι οποίοι περιορίζουν τη διαφυγή της θερμικής ενέργειας με ακτινοβολία προς το εξωτερικό περιβάλλον. Η επιλογή του κατάλληλου υαλοπίνακα εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής και ειδικότερα τις θερμικές και ψυκτικές απαιτήσεις του κάθε κτηρίου, καθώς και από τις απαιτήσεις του κτηρίου σε φυσικό φως.

Τα σκληρά πλαστικά ανήκουν στα θερμοπλαστικά πολυμερή. Ανάλογα με την επεξεργασία και τη χημική σύσταση διακρίνονται σε ακρυλικά, σε πολυεστερικά, σε πολυκαρβονικά και σε προϊόντα πολυαιθυλενίου. Εμφανίζουν μεγάλη αντοχή σε μηχανική κρούση και έχουν μικρότερο βάρος από το κοινό γυαλί. Μειονέκτημά τους είναι ότι έχουν, συγκριτικά με το κοινό γυαλί, μικρότερο συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους και μικρότερη αντίσταση στη φωτιά.

Τα πολυκαρβονικά (polycarbonate-PC) είναι σκληρά και διαφανή, με αντίσταση στη φωτιά και χαρακτηρίζονται από ευκολία στη διεργασία τους για να σχηματίζουν καμπύλες μορφές. Ο συντελεστής της θερμικής τους αγωγιμότητας κυμαίνεται από 0,190 έως 0,220 W/mK και η διαπερατότητά τους στο ορατό φως κυμαίνεται από 0,40 έως 0,80, αναλόγως με το χρωματισμό τους. Είναι σχετικά ελαφρά υλικά (με πυκνότητα τάξης μεγέθους των 1200 kg/m³). Χαρακτηρίζονται από χαμηλή αντοχή σε ρηγμάτωση -η οποία μπορεί να συμβεί λόγω μηχανικών καταπονήσεων, έκθεση σε οργανικά υγρά και σε περιβαλλοντικούς παράγοντες- που μπορεί όμως να περιορισθεί με την κατάλληλη διεργασία. Όταν δέχονται αρκετά αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία αλλοιώνεται η χρωματική τους εμφάνιση και η ρητίνη τους μπορεί να διαβρωθεί, σε βάθος 25μm από την εκτιθέμενη επιφάνεια (Legrand & Bendler, 2000).

Τα πολυακρυλικά PMMA (γνωστά ως πλεξιγκλάς) ανήκουν επίσης στα θερμοπλαστικά πολυμερή. Πρόκειται για σκληρά, διαφανή και αρκετά ελαφριά υλικά (πυκνότητα της τάξης μεγέθους των 1150-1190 kg/m³). Η διαπερατότητά τους στο ορατό φως είναι της τάξης του 0.92 και η θερμική τους αγωγιμότητα της τάξης των 0,200 W/mK. Έχουν μεγαλύτερη σταθερότητα στους περιβαλλοντικούς παράγοντες, σε σχέση με τα πολυκαρβονικά, και μικρή αντίσταση σε διαλύτες και σε αρκετές χημικές ενώσεις.

Τα πολυεστερικά χαρακτηρίζονται από την ανθεκτικότητά τους στις κλιματικές μεταβολές και στη γήρανση. Εμφανίζουν καλή συμπεριφορά στην υπεριώδη ακτινοβολία και δεν επηρεάζονται σε θερμοκρασιακό εύρος από -40°C έως +100°C. Όταν ενισχύονται με υαλοϊνες (fiber glass) αυξάνεται η αντοχή τους, αλλά μειώνεται η διαύγειά τους.

Η διαφανής μόνωση (TIM – Transparent Insulation Material) είναι ημιδιαφανές θερμομονωτικό υλικό, κυψελωτής δομής, κυρίως πολυκαρβονικής προέλευσης. Λόγω της δομής του επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία και το φυσικό φως να εισέλθει στο εσωτερικό του χώρου, παράλληλα όμως μειώνει τις θερμικές απώλειες. Αναλόγως με τη δομή του θερμομονωτικού, την τοποθέτηση των κυψελών σε σχέση με τη διατομή του τοίχου, η διαπερατότητα του TIM στο ορατό φως κυμαίνεται από 0,73 έως 0,82, με αντίστοιχες τιμές συντελεστή θερμοπερατότητας από 0,800 έως 1,100W/m²K (Platzer & Goetzberger, 1996; Kerschberger & Binder, 2006).

5.2.2.2 Υλικά αποθήκευσης της θερμότητας

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της θερμότητας είναι υλικά με μεγάλη θερμοχωρητικότητα. Συνήθως είναι οικοδομικά υλικά του φέροντα οργανισμού και του κελύφους γενικότερα ή των εσωτερικών διαχωριστικών τοιχοποιιών, καθώς και υλικά επενδύσεων τοιχοποιιών και δαπέδων. Τα πιο ικανά υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση της θερμότητας στα ηλιακά παθητικά συστήματα είναι:

- **το σκυρόδεμα:** εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι είναι συγχρόνως υλικό με μεγάλη θερμοχωρητικότητα και στοιχείο του φέροντα οργανισμού.
- **η πέτρα, οι ωμόπλινθοι, οι οπτόπλινθοι (συμπαγείς και διάτρητοι) και τα κεραμικά πλακίδια** είναι τα υλικά που κυρίως χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της θερμότητας. Είναι υλικά φερόντων δομικών στοιχείων ή στοιχείων πληρώσεως ή υλικά επενδύσεως τοίχων και δαπέδων.
- **το νερό** είναι το υλικό με τη μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα, αλλά υπάρχουν κατασκευαστικές δυσκολίες για τη χρησιμοποίησή του σε δομικά στοιχεία. Μπορεί να τοποθετηθεί σε δεξαμενές νερού που ενσωματώνονται στα δομικά στοιχεία (π.χ. σε τμήμα της εξωτερικής τοιχοποιίας), ή σε μεμονωμένα στοιχεία-δοχεία.
- **τα υλικά αλλαγής φάσης** (π.χ. τα εύτηκτα άλατα, όπως το άλας του Glauber), είναι σχετικά νέα υλικά που χρησιμοποιούνται σε επιλεγμένες θέσεις μέσα σε ειδικές δεξαμενές για την αποθήκευση της θερμότητας. Τα υλικά αυτά αλλάζουν φάση (Phase Change Materials - PCM), δηλαδή αλλάζοντας φυσική κατάσταση (για παράδειγμα, από τη στερεά στην υγρή κατάσταση), αποθηκεύουν θερμότητα, την οποία αποδίδουν για να επιστρέψουν στην αρχική φυσική τους κατάσταση.

Σημειώνεται ότι τα θερμομονωτικά υλικά διαθέτουν ελάχιστη θερμοχωρητικότητα και η τοποθέτησή τους στην εσωτερική παρειά των δομικών στοιχείων σχεδόν μηδενίζει τη συνεισφορά της θερμικής μάζας του δομικού στοιχείου. Γι' αυτό η εφαρμογή εσωτερικής θερμομόνωσης στα κτήρια που αξιοποιούν παθητικά ηλιακά συστήματα πρέπει να γίνεται με περίσκεψη και στην περίπτωση που πραγματοποιείται να μην αφορά το σύνολο του κελύφους που περικλείει τον θερμαινόμενο χώρο, εκτός αν διατίθεται για την αποθήκευση της θερμότητας συγκεντρωμένη θερμική μάζα στον κατοικήσιμο χώρο, π.χ. ένας εσωτερικός τοίχος ή δάπεδο μεγάλου πάχους από υλικά με μεγάλη θερμοχωρητικότητα. Η θερμοχωρητικότητα προκύπτει ως το γινόμενο του φαινόμενου ειδικού βάρους (ρ : kg/m³) με την ειδική θερμοχωρητικότητα (C_p : J/(kg K)). Υλικά με μεγάλη ικανότητα θερμικής αποθήκευσης είναι αυτά που διαθέτουν ικανή θερμική μάζα, της τάξης των 1.2MJ/m³K και άνω.[23]

Επισημαίνεται ότι σε κτήρια με εξωτερική τοιχοποιία από εμφανή λιθοδομή, η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη θερμοχωρητικότητα, η

θερμομόνωση, για αισθητικούς λόγους τοποθετείται εσωτερικά, ακυρώνοντας τη θερμοχωρητικότητα του υλικού. Στην περίπτωση αυτή πρέπει είτε να προστίθενται στοιχεία μεγάλης θερμοχωρητικότητας στο εσωτερικό του κτηρίου (εσωτερικές τοιχοποιίες, δάπεδα κοκ με υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας), είτε η λιθοδομή να μετατραπεί σε τοιχοποιία με πυρήνα. Το υλικό της εσωτερικής τοιχοποιίας πρέπει να έχει επίσης ικανή θερμοχωρητικότητα (π.χ. οπτόπλινθοι), ενώ στο διάκενο τοποθετείται η θερμομόνωση.[23]

5.2.3. Κατηγορίες παθητικών ηλιακών συστημάτων θέρμανσης

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης πρέπει να έχουν νότιο προσανατολισμό, με απόκλιση έως 30ο προς την ανατολή ή τη δύση και ο χειμερινός ηλιασμός τους να είναι ανεμπόδιστος από πλευρικά εμπόδια και σταθερά εξωτερικά σκιάστρα. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης διακρίνονται σε συστήματα άμεσου ή έμμεσου ηλιακού κέρδους.

Τα συνηθέστερα παθητικά συστήματα είναι:

- Σύστημα άμεσου κέρδους – νότιο υαλοστάσιο
- Τοίχος θερμικής αποθήκευσης ή τοίχος μάζας ή ηλιακός τοίχος
- Θερμοκήπιο ή ηλιακός χώρος
- Θερμοσιφωνικό πανέλο ή αεροσυλλέκτης
- Τοιχοποιία με διαφανή μόνωση.

5.2.3.1. Σύστημα άμεσου κέρδους

Σύστημα άμεσου κέρδους

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας για τη θέρμανση των κτηρίων είναι η δέσμευσή της μέσα από τα γυάλινα ανοίγματα του κτηρίου. Στην περίπτωση αυτή το κτήριο λειτουργεί ως συλλέκτης, αποθήκη και διανομέας της θερμότητας (Σχήμα 3.2).

Όλα τα ανοίγματα του κτηρίου συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία (άμεση και διάχυτη) που στη συνέχεια μετατρέπεται σε θερμότητα και αποθηκεύεται ως θερμική ενέργεια στα δομικά στοιχεία του χώρου, ιδιαίτερα σε εκείνα που δέχονται άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία.

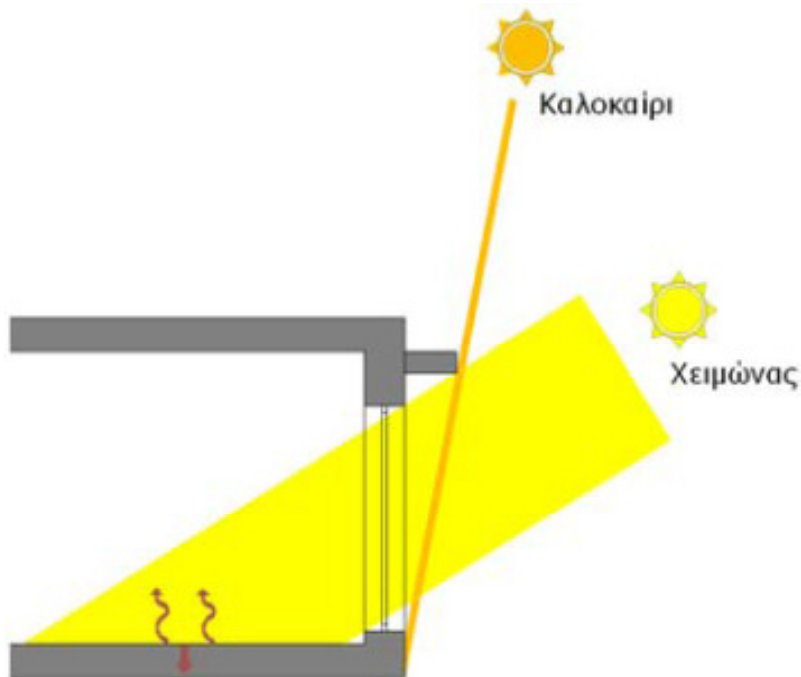
Η θερμότητα που αποθηκεύεται, αποδίδεται με χρονική υστέρηση, αναλόγως των χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων, καθ'όλη τη διάρκεια του 24ωρου. Είναι σημαντικό, ιδιαίτερα τα δομικά υλικά στο εσωτερικό του κτηρίου που δέχονται άμεση ηλιακή ακτινοβολία, να έχουν ικανή απορροφητικότητα και θερμική μάζα, ώστε αφενός να μεγιστοποιείται η απολαβή των ηλιακών κερδών, αφετέρου να αποθηκεύεται η θερμότητα. Έτσι ομαλοποιούνται οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στον εσωτερικό χώρο - καθώς η θερμότητα από τα αυξημένα ηλιακά κέρδη που έχει αποθηκευτεί απελευθερώνεται σταδιακά

στο εσωτερικό του κτηρίου- αποφεύγεται η υπερθέρμανση κατά τις περιόδους με μεγάλη ηλιοφάνεια και η θερμότητα αποδίδεται στο χώρο όταν δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία (απογευματινές και νυχτερινές ώρες).

Στη θερινή περίοδο, με το άνοιγμα των παραθύρων το βράδυ και τη δημιουργία νυχτερινού αερισμού, πραγματοποιείται η θερμική αποφόρτιση των δομικών στοιχείων, ώστε αυτά να είναι διαθέσιμα την επόμενη μέρα για νέα αποθήκευση της πλεονάζουσας θερμότητας.

Η διαφορά ενός κτηρίου σχεδιασμένου να θερμαίνεται με το παθητικό σύστημα του «άμεσου κέρδους» από ένα κτήριο με συμβατικό σχεδιασμό, εντοπίζεται στη θερμική απόδοση των ανοιγμάτων του και στα δομικά στοιχεία που είναι κατασκευασμένα από υλικά με ικανή θερμοχωρητικότητα.

Ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής, το σχεδιασμό του κελύφους του κτηρίου, τον προσανατολισμό, το μέγεθος και τη θέση των ανοιγμάτων, τις θερμοφυσικές ιδιότητες του διαφανούς υλικού καθώς και τη θέση, το μέγεθος και το υλικό της θερμικής αποθήκης, η εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση μπορεί να κυμαίνεται από 30% έως και 100%. Γενικά, όσο μεγαλύτερα είναι τα ανοίγματα στο νότιο προσανατολισμό και ικανοποιητική σε μέγεθος η επιφάνεια αποθήκευσης, τόσο μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση.[23]



Σχήμα 5.7: Αρχή λειτουργίας ηλιακού παθητικού συστήματος άμεσου κέρδους[23]

5.2.3.2. Τοίχος θερμικής αποθήκευσης ή τοίχος μάζας ή ηλιακός τοίχος

Ο τοίχος θερμικής αποθήκευσης είναι η συνδυασμένη κατασκευή τοίχου και υαλοπίνακα (ή άλλου διαφανούς στοιχείου με υψηλό συντελεστή διαπερατότητας της ηλιακής ακτινοβολίας), η οποία αποτελεί τμήμα του κτιριακού περιβλήματος (Σχήματα 5.8 και 5.9). Αναλόγως της κατασκευής του διακρίνεται σε:

- Ηλιακό τοίχο μη θερμοσιφωνικής ροής (τοίχος μάζας και ηλιακός τοίχος νερού)
- Ηλιακό τοίχο θερμοσιφωνικής ροής (τοίχος Trombe-Michelle)

Η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται από το διαφανές στοιχείο μετατρέπεται σε θερμότητα στο χώρο μεταξύ του υαλοστασίου και του τοίχου και αποθηκεύεται ως θερμική ενέργεια στον τοίχο. Από εκεί μεταδίδεται με αγωγιμότητα, με ακτινοβολία ή και με μεταφορά, ανάλογα με την κατασκευή του συστήματος, στο χώρο. Ταυτόχρονα το διαφανές υλικό και, σε ορισμένες περιπτώσεις επιπρόσθετα και το ακίνητο στρώμα αέρα μεταξύ τοίχου και υαλοστασίου λειτουργεί ως μονωτικό στρώμα για τη μείωση των θερμικών απωλειών από το θερμό τοίχο προς το εξωτερικό ψυχρό περιβάλλον.

Όσο μεγαλύτερη απορροφητικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία εμφανίζει η εξωτερική παρειά του τοίχου (βαφή με σκούρο χρώμα και αδρή επιφάνεια) τόσο αυξάνεται η απόδοση του συστήματος. Σε τοίχο με σκουρόχρωμη επιφάνεια αναπτύσσεται επιφανειακή θερμοκρασία μέχρι και 65°C.

Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους, οι τοίχοι θερμικής αποθήκευσης διακρίνονται σε:

- τοίχους που είναι κατασκευασμένοι από υλικά τοιχοποιίας, δηλαδή χυτό σκυρόδεμα, τσιμεντόλιθους, οπτόπλινθους (πλήρεις ή με οπές), πέτρα και ωμοπλίνθους και
- τοίχους που αποτελούνται από δοχεία μεταλλικά, πλαστικά ή από μπετόν και περιέχουν νερό.

Για την καλή λειτουργία του τοίχου, το βάθος του θερμαινόμενου χώρου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 4,5 με 6,0 μέτρα, που είναι η μέγιστη απόσταση για να είναι αποτελεσματική η θέρμανση του χώρου με την ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον θερμό τοίχο.

Μια παραλλαγή του συστήματος είναι ο τοίχος Trombe-Michelle. Είναι ένας τοίχος θερμικής αποθήκευσης κατασκευασμένος από υλικά τοιχοποιίας, με θυρίδες στο επάνω και κάτω τμήμα του συμπαγούς τμήματος, οπότε η μετάδοση της θερμότητας προς την πλευρά του εσωτερικού χώρου γίνεται - εκτός από την αγωγιμότητα- και με φυσικό θερμοσιφονισμό.

Ο αέρας, που βρίσκεται μεταξύ του υαλοστασίου και του τοίχου, θερμαίνεται καθώς εφάπτεται στο θερμό τοίχο κι από τις θυρίδες που βρίσκονται στο επάνω μέρος του τοίχου εισέρχεται στον κατοικήσιμο χώρο, ενώ συγχρόνως εισέρχεται από την κάτω θυρίδα στο διάκενο ψυχρός αέρας από το εσωτερικό του κτηρίου, ο οποίος και θερμαίνεται. Με αυτόν τον τρόπο αποδίδεται πρόσθετη θερμότητα στο χώρο στις περιόδους της ηλιοφάνειας και η

θέρμανση του χώρου αρχίζει αμέσως με τη θέρμανση του τοίχου και συνεχίζεται έως 2 με 3 ώρες μετά το σκιασμό του.

Κατά τις νυχτερινές ώρες της χειμερινής περιόδου οι θυρίδες πρέπει να κλείνουν (αρκεί μόνον το κλείσιμο των επάνω θυρίδων), ώστε να μην προκαλείται αντίστροφη κυκλοφορία του αέρα. Οι θυρίδες μπορεί να κλείνουν χειροκίνητα ή με αυτοματισμό, με χρονομετρητή ή με θερμική ή οπτική διέγερση (όταν μειωθεί η εξωτερική θερμοκρασία ή το επίπεδο φωτισμού).

Οι θυρίδες τοποθετούνται κατά μήκος όλου του τοίχου και όσο το δυνατόν πιο κοντά στην οροφή και στο δάπεδο. Η απόσταση μεταξύ των επάνω και κάτω θυρίδων δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 2.0m και η συνολική επιφάνεια των θυρίδων να μην υπολείπεται του 2% της συνολικής επιφάνειας του τοίχου.

Το πάχος του τοίχου, ιδίως αυτού που λειτουργεί χωρίς θυρίδες, είναι καθοριστικό. Το βέλτιστο πάχος ενός τοίχου με υλικά τοιχοποιίας αυξάνεται καθώς αυξάνεται και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των υλικών. Η χρησιμοποίηση των θυρίδων γίνεται απαραίτητη όσο αυξάνει το πάχος του τοίχου, γιατί τότε η κυκλοφορία του θερμού αέρα παίζει μεγαλύτερο ρόλο στη γρήγορη θέρμανση του εσωτερικού χώρου, παρά η μετάδοση θερμότητας με αγωγιμότητα από την εξωτερική στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου.

Το πάχος του τοίχου επηρεάζει και τη διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα στο θερμαινόμενο χώρο. Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του τοίχου τόσο μεγαλύτερη είναι η χρονική υστέρηση στη μετάδοση της θερμότητας και μικρότερες οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας της εσωτερικής παρειάς του τοίχου και κατά συνέπεια και του αέρα στο εσωτερικό του κτηρίου.

Σε σχέση με τις θερμικές απώλειες που εμφανίζονται, η χρησιμοποίηση διπλού υαλοπίνακα κρίνεται ικανοποιητική. Η νυχτερινή κινητή μόνωση είναι απαραίτητη στις ψυχρότερες περιοχές. Επίσης για να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος, ο τοίχος πρέπει να μονωθεί από όλα τα δομικά στοιχεία με τα οποία εφάπτεται, για να περιοριστούν οι θερμογέφυρες.

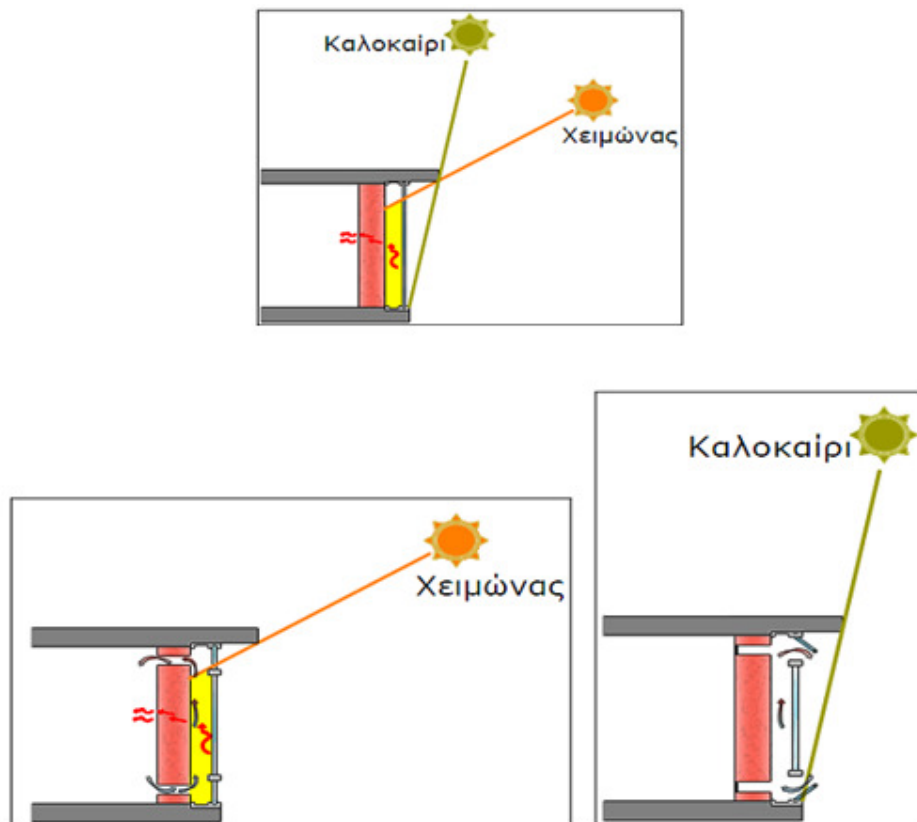
Για το καλοκαίρι, θα πρέπει να προβλεφθεί ηλιοπροστασία και να ανοίγουν τμήματα του υαλοστασίου (φεγγίτες ή θυρίδες στο επάνω και κάτω τμήμα του υαλοστασίου) για να επιτρέπεται η διαφυγή του θερμού αέρα, που υπάρχει στο χώρο μεταξύ υαλοστασίου και τοίχου προς το εξωτερικό περιβάλλον και να εξασφαλίζεται αποφόρτιση της θερμότητας και δροσισμός του τοίχου.

Όταν πρόκειται για τοίχο Trombe, πέραν της εξωτερικής σκίασης, πρέπει να κλείνουν οι εσωτερικές θυρίδες προς το χώρο, ώστε να μη λειτουργεί το σύστημα και μεταφέρει θερμό αέρα στο εσωτερικό του κτηρίου.

Στον τοίχο Trombe υπάρχει επίσης η δυνατότητα, με την ύπαρξη αντιδιαμετρικών ανοιγμάτων στο χώρο, σε συνδυασμό με τις θυρίδες του τοίχου και ανοιγμάτων (φεγγιτών) στα υαλοστάσια να δημιουργείται διαμπερής αερισμός που θα συμβάλλει στο δροσισμό του χώρου. Συγκεκριμένα, μπορεί να ανοίγει ένας φεγγίτης στο επάνω μέρος του

υαλοστασίου και σε συνδυασμό με άνοιγμα της βόρειας όψης του κτηρίου, διατηρώντας κλειστή την επάνω θυρίδα αερισμού του τοίχου και ανοιχτή την κάτω, να δημιουργείται κίνηση αέρα στο χώρο (με το φαινόμενο της καμινάδας). Ο δροσισμός του χώρου επιτυγχάνεται με το δροσερό αέρα που μπαίνει από το βορινό άνοιγμα και την κίνηση του αέρα στο χώρο.

Σε κάθε περίπτωση, για τον καθαρισμό του συστήματος θα πρέπει να προβλέπεται κινητό υαλοστάσιο ή υαλοστάσιο που μπορεί εύκολα να αποσυναρμολογηθεί, ιδιαίτερα στην περίπτωση του τοίχου με θυρίδες.[23]



Σχήμα 5.8: Χειμερινή και θερινή λειτουργία τοίχου θερμικής αποθήκευσης με θυρίδες (τοίχος Trombe-Michelle)[23]

5.2.3.3. Θερμοκήπιο ή ηλιακός χώρος

Ο ηλιακός χώρος ή θερμοκήπιο είναι ο συνδυασμός παθητικού συστήματος άμεσου κέρδους και τοίχου θερμικής αποθήκευσης. Το κτήριο, δηλαδή, αποτελείται από δύο θερμικές ζώνες: τον ηλιακό χώρο που προσαρτάται στο κτήριο, όπου γίνεται συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας, και τον έμμεσα θερμαινόμενο από τον ηλιακό χώρο, κύριο κατοικήσιμο χώρο. Οι δύο ζώνες χωρίζονται μεταξύ τους με συμπαγή τοίχο με θερμική μάζα (με ή χωρίς θερμομόνωση) και με ή χωρίς υαλοστάσια. Αντί για υαλοστάσια ο

ενδιάμεσος τοίχος μπορεί να διαθέτει θυρίδες για τη μεταφορά του θερμού αέρα από το θερμοκήπιο στον κύριο χώρο (Σχήμα 5.9.)

Ανάλογα με την αρχιτεκτονική λύση, ο ηλιακός χώρος συνδέεται με έναν κοινό τοίχο με το κτήριο ή ενσωματώνεται σ' αυτό και συνδέεται με το κτήριο με περισσότερους κοινούς τοίχους, συμπαγείς ή με συνδυασμό τοιχοποιίας και υαλοστασίου.

Ευνόητο είναι ότι οι γυάλινες όψεις του θερμοκηπίου πρέπει να έχουν τον κατάλληλο προσανατολισμό για τη μεγιστοποίηση της συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας. Η επιστέγαση του ηλιακού χώρου μπορεί να είναι συμπαγής ή διαφανής. Επίσης, το θερμοκήπιο μπορεί να ενσωματωθεί στο κτήριο, ώστε να έχει τρεις κοινούς τοίχους και έναν υάλινο τοίχο προς το Νότο. Θερμοκήπια θεωρούνται και τα αίθρια στον πυρήνα των κτηρίων, σκεπασμένα με γυάλινη επιστέγαση, που είναι ανεξάρτητοι μη θερμαινόμενοι χώροι.

Ο ηλιακός χώρος συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην εξασφάλιση συνθηκών άνεσης, βοηθά στην ανάπτυξη των φυτών, διευκολύνει την παραγωγή αγροτικών προϊόντων για οικιακή χρήση και προσφέρει χρηστικό χώρο στους ενοίκους.

Για να χαρακτηριστεί ένας χώρος ως θερμοκήπιο, πρέπει να μην είναι θερμαινόμενος, να προσαρτάται στο κτήριο και να διαθέτει μεγάλα υαλοστάσια με ευνοϊκό προσανατολισμό (προς το Νότο, με απόκλιση έως $\pm 30^\circ$), διανεμημένα στις εξωτερικές του επιφάνειες για τη δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ο χώρος του θερμοκηπίου θερμαίνεται απευθείας από την ηλιακή ακτινοβολία και λειτουργεί όπως το παθητικό σύστημα του «άμεσου κέρδους». Συγχρόνως η ηλιακή ενέργεια απορροφάται από τον πίσω συμπαγή τοίχο του θερμοκηπίου ή/και το δάπεδο, μετατρέπεται σε θερμότητα και ένα ποσοστό μεταφέρεται στο κτήριο. Από αυτή την άποψη, το προσαρτημένο θερμοκήπιο είναι ένα εκτεταμένο σύστημα τοίχου θερμικής αποθήκευσης, με τη μόνη διαφορά ότι το υαλοστάσιο είναι τοποθετημένο σε αρκετή απόσταση από τον τοίχο, ώστε να δημιουργείται κατοικήσιμος χώρος για την ημέρα ή ένας χώρος όπου καλλιεργούνται φυτά.

Το θερμοκήπιο χαρακτηρίζεται από έντονη θερμική διαστρωμάτωση, με τις πιο θερμές μάζες του αέρα να ανυψώνονται προς την ανώτατη στάθμη του. Έτσι, τοποθέτηση θυρίδων στα υψηλότερα σημεία του στοιχείου που συνδέει το θερμοκήπιο με το κτήριο είναι ικανές να προσάγουν θερμό αέρα στους θερμαινόμενους χώρους του κτηρίου.

Το θερμοκήπιο-ηλιακός χώρος, επίσης, λειτουργεί ως φράγμα θερμικών απωλειών του κτηρίου προς το εξωτερικό περιβάλλον (χώρος θερμικής ανάσχεσης, *tampon espace*, *buffer zone*). Σχεδόν όλες τις ώρες της ημέρας ο ηλιακός χώρος έχει υψηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κι έτσι συμβάλλει στη μείωση των θερμικών απωλειών

από το κτήριο. Σε ψυχρά όμως κλίματα, κατά τις νυχτερινές ώρες, μπορεί να συμβάλλει σε αύξηση θερμικών απωλειών, όταν ο ενδιάμεσος τοίχος δεν είναι επαρκώς μονωμένος. Σε ημέρες χωρίς ηλιοφάνεια, η εσωτερική θερμοκρασία σ' ένα θερμοκήπιο με διπλό υαλοστάσιο φθάνει τουλάχιστον στους 10°C όταν η εξωτερική είναι 0°C.

Η θερμική συνεισφορά του ηλιακού χώρου εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα και τον τρόπο σύνδεσής του με το κτήριο. Η απόδοσή του είναι συγκρίσιμη και πολλές φορές καλύτερη από την απόδοση ενός τοίχου θερμικής αποθήκευσης, που έχει την ίδια επιφάνεια υαλοστασίου. Οι επιπλέον θερμικές απώλειες μέσω της οροφής και των τοίχων που περιβάλλουν έναν ηλιακό χώρο αντισταθμίζονται από το γεγονός ότι το υαλοστάσιο έχει τη βέλτιστη κλίση. Υπολογίζεται ότι κατά τους χειμερινούς μήνες 10% έως 30% από την θερμότητα που προέρχεται από τη δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας από έναν ηλιακό χώρο μεταφέρεται στους παρακείμενους χώρους του κτηρίου.

Υπάρχουν πέντε βασικές μέθοδοι μεταφοράς θερμότητας από τον ηλιακό χώρο στους εσωτερικούς χώρους του κτηρίου:

- Με απευθείας είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του κτηρίου (στην

περίπτωση που υπάρχουν διαφανή στοιχεία στον ενδιάμεσο τοίχο).

- Με μεταφορά του θερμού αέρα από το θερμοκήπιο στο χώρο με θερμοσιφωνισμό (στην περίπτωση που υπάρχουν ανοίγματα ή θυρίδες στον ενδιάμεσο τοίχο) ή με βεβιασμένη μεταφορά (θυρίδες ενισχυμένες με ανεμιστήρες).
- Με αγωγιμότητα μέσω των διαχωριστικών τοίχων θερμοκηπίου-κτηρίου (σε αυτή την περίπτωση ο ενδιάμεσος τοίχος δε διαθέτει θερμομόνωση κατά τη διάρκεια της ημέρας).
- Με τη χρήση απλών μηχανικών μέσων (π.χ. ανεμιστήρας) και αποθήκευση της θερμότητας στον εσωτερικό χώρο απ' όπου και μεταδίδεται με ακτινοβολία ή μεταφορά. Σ' αυτή την περίπτωση, η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί και σε χώρους που δεν δέχονται απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία.
- Με συνδυασμό των ανωτέρω.

Ανάλογα με τη θερμική σύνδεση και τον επιθυμητό τρόπο μεταφοράς, αποθήκευσης και διανομής της θερμότητας, ο διαχωριστικός τοίχος και το διαχωριστικό υαλοστάσιο μεταξύ θερμοκηπίου και κατοικήσιμου χώρου, θερμομονώνεται ή όχι και εφαρμόζεται νυχτερινή μόνωση (η οποία εφαρμόζεται και τη θερινή περίοδο).

Στη μέθοδο της απευθείας εισόδου της ηλιακής ακτινοβολίας στο κτήριο, τμήμα του κοινού τοίχου μεταξύ του θερμοκηπίου και του κτηρίου αποτελείται από υαλοστάσιο. Ένα σημαντικό ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο υαλοστάσιο του θερμοκηπίου εισέρχεται στο κτήριο

απευθείας μέσα από ενδιάμεσα ανοίγματα, ενώ το υπόλοιπο παραμένει στο θερμοκήπιο και το θερμαίνει. Σ' αυτήν την περίπτωση το σύστημα λειτουργεί όπως το παθητικό σύστημα του «άμεσου κέρδους». Το πλεονέκτημα σε σχέση με το σύστημα του άμεσου κέρδους είναι ότι μειώνονται οι θερμικές απώλειες από το υαλοστάσιο του θερμαινόμενου χώρου, επειδή μεσολαβεί το θερμοκήπιο, όπου αναπτύσσεται υψηλότερη θερμοκρασία από το εξωτερικό περιβάλλον.

Η μεταφορά του θερμού αέρα από το θερμοκήπιο στον εσωτερικό χώρο (είτε ο διαχωριστικός τοίχος διαθέτει ανοίγματα είτε όχι) βασίζεται στο φυσικό θερμοσιφωνισμό ή υποστηρίζεται από ανεμιστήρες.

Για τη φυσική μεταφορά της θερμότητας απαιτούνται ανοίγματα (παράθυρα ή πόρτες ή θυρίδες) στον κοινό τοίχο θερμοκηπίου – κτηρίου, που ανοίγουν αυτόματα ή χειροκίνητα και έτσι δημιουργείται φυσική κυκλοφορία του θερμού αέρα. Όσο υψηλότερα είναι τοποθετημένα τα ανοίγματα στο διαχωριστικό τοίχο και όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία στο θερμοκήπιο, τόσο μεγαλύτερη είναι η ροή της θερμότητας από το θερμοκήπιο στον κυρίως χώρο. Η θερμότητα που αποδίδεται στον εσωτερικό χώρο μπορεί, στη συνέχεια, να αποταμιευθεί στα εσωτερικά δομικά στοιχεία όπως και στην περίπτωση του άμεσου κέρδους.

Αν χρησιμοποιηθούν ανεμιστήρες, με χειροκίνητη ή αυτόματη λειτουργία, η θερμοκρασία μπορεί να διοχετευθεί και στους βορινούς χώρους, που δεν δέχονται ηλιακή ακτινοβολία, και να αποταμιευθεί σε ειδικά στοιχεία αποθήκευσης, ή στα δομικά τους στοιχεία.

Η μετάδοση της θερμότητας με αγωγιμότητα μέσα από τους κοινούς τοίχους θερμοκηπίου – κτηρίου είναι ο πιο συνηθισμένος και αποτελεσματικός τρόπος για τη θερμική σύνδεση του κτηρίου με το θερμοκήπιο. Σ' αυτή την περίπτωση ο διαχωριστικός τοίχος δεν έχει θερμική μόνωση και ουσιαστικά λειτουργεί όπως το παθητικό σύστημα του τοίχου θερμικής αποθήκευσης.

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες όπως και στο σύστημα του τοίχου θερμικής αποθήκευσης: από το μέγεθος του υαλοστασίου, τον προσανατολισμό, την κλίση και τις ιδιότητες του υαλοστασίου του ηλιακού χώρου κι από την επιφάνεια, το πάχος, το υλικό κατασκευής και το χρώμα του διαχωριστικού τοίχου.

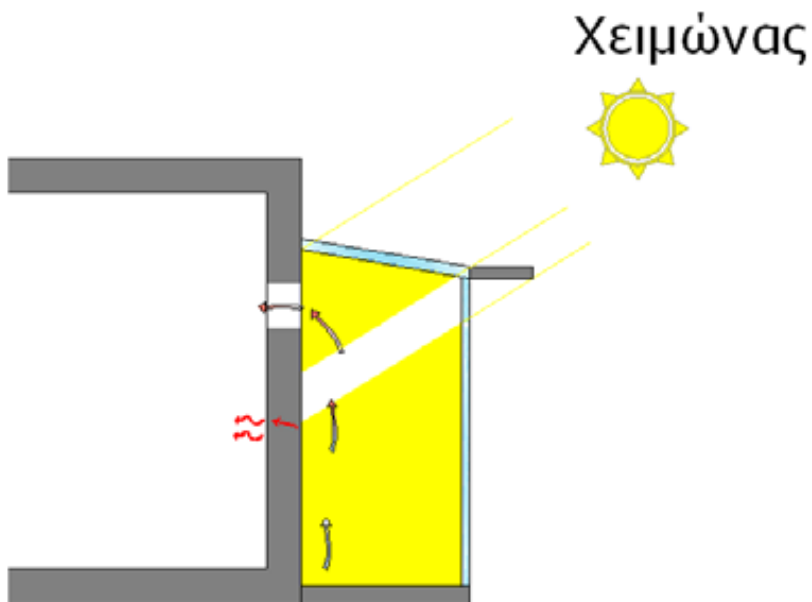
Το πάχος του μη θερμομονωμένου διαχωριστικού τοίχου (από σκυρόδεμα ή συμπαγή πλινθοδομή) κυμαίνεται από 20-35 εκ. Όταν υπάρχει υδάτινος τοίχος μεταξύ του θερμοκηπίου και του κτηρίου, ο όγκος του νερού προσδιορίζει τη διακύμανση της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο και στους παρακείμενους κατοικήσιμους χώρους. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του νερού τόσο μικρότερες είναι οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

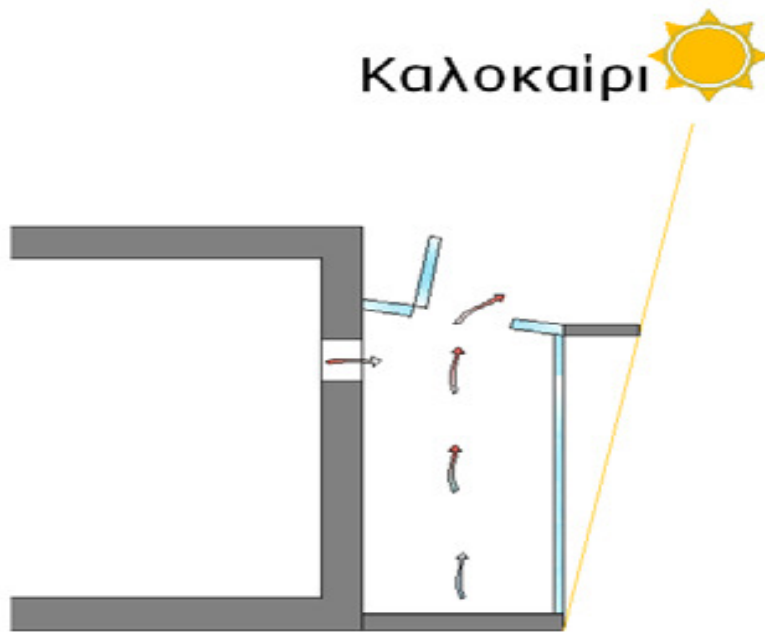
Στην περίπτωση που η κατασκευή του θερμοκηπίου γίνεται σε περιοχή που χαρακτηρίζεται από χαμηλές θερμοκρασίες το βράδυ, επιβάλλεται η κινητή νυχτερινή θερμομόνωση του διαχωριστικού τοίχου, τόσο του διαφανούς όσο και του αδιαφανούς τμήματος όταν δεν είναι θερμομονωμένο.

Η μετάδοση της θερμότητας με τη χρήση απλών μηχανικών μέσων (π.χ. ανεμιστήρας) μπορεί να συνδυαστεί και με σύστημα σωληνώσεων που οδηγεί τον θερμό αέρα σε χώρο με θραυστό υλικό (rock bed, lit de pierres), όπου και αποθηκεύεται η θερμότητα και αποδίδεται στον εσωτερικό χώρο με ακτινοβολία ή μεταφορά. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε εύκρατα κλίματα, όπου την ημέρα συλλέγεται πολύ περισσότερη θερμότητα από όση είναι αναγκαία για τη θέρμανση του χώρου.

Για την αποδοτική λειτουργία του θερμοκηπίου, ανεξάρτητα από τον τρόπο θερμικής του σύνδεσης με το κτήριο, πρέπει να αποφεύγεται η υπερθέρμανση, η οποία εύκολα μπορεί να προκύψει ακόμη και το χειμώνα, λόγω της μεγάλης επιφάνειας των υαλοστασίων. Για την αποφυγή της υπερθέρμανσης απαιτείται ηλιοπροστασία το καλοκαίρι και συνιστάται να προβλέπονται αποσπώμενες γυάλινες επιφάνειες.

Η ηλιοπροστασία του θερμοκηπίου είναι απαραίτητη και μπορεί να συνδυαστεί και με τα συστήματα νυχτερινής μόνωσης. Επίσης είναι απαραίτητος ο αερισμός του θερμοκηπίου, ο οποίος λειτουργεί και ως μέσο ελέγχου της υπερθέρμανσης και της υγρασίας αλλά και για την απομάκρυνση του CO₂ που παράγεται το βράδυ, στην περίπτωση που ο ηλιακός χώρος χρησιμοποιείται και για την καλλιέργεια των φυτών. Για να δημιουργηθεί ρεύμα αέρα πρέπει να τοποθετηθούν περίπου ίδιου μεγέθους ανοίγματα στους απέναντι τοίχους, ή ανοιγόμενες θυρίδες στο άνω τμήμα του θερμοκηπίου.[23]





Σχήμα 5.9 Χειμερινή και θερινή λειτουργία θερμοκηπίου, με ανοιγόμενα υαλοστάσια[23]

5.2.3.4. Θερμοσιφωνικό πάνελο ή αεροσυλλέκτης

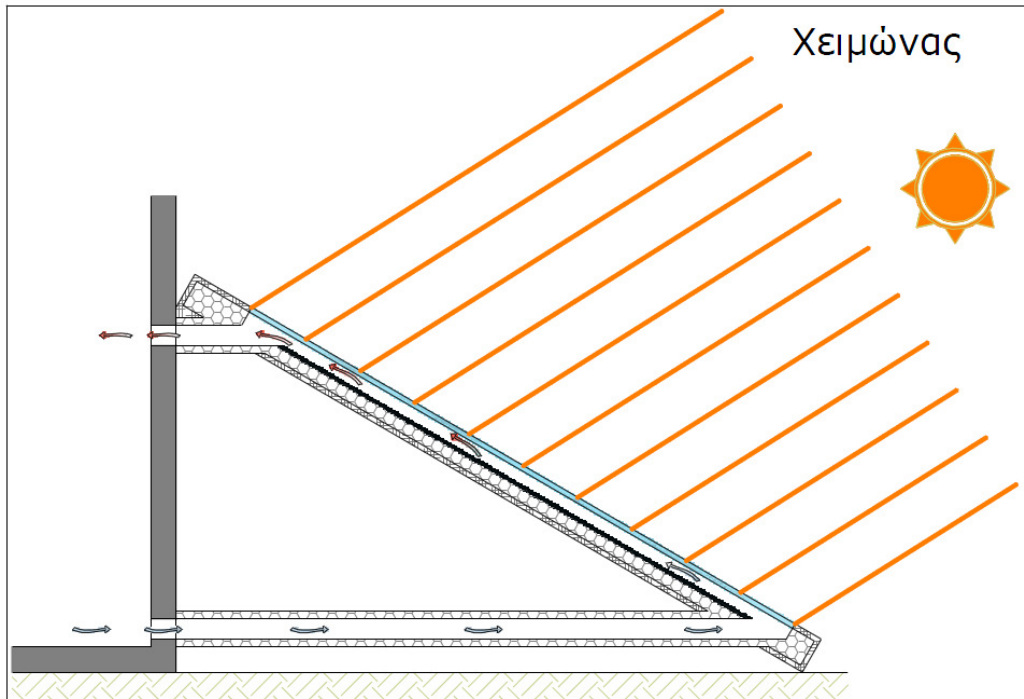
Το θερμοσιφωνικό πάνελο είναι συλλέκτης της ηλιακής ακτινοβολίας, ο οποίος δεν διαθέτει θερμική μάζα και είναι προσαρτημένος στο κτιριακό κέλυφος ή τοποθετείται ανεξάρτητα από αυτό. Επειδή απομονώνεται θερμικά από το κτήριο, ανήκει στην κατηγορία των παθητικών ηλιακών συστημάτων του «απομονωμένου κέρδους». Η θερμότητα που συλλέγεται από αυτό αποθηκεύεται είτε στα δομικά στοιχεία του κτηρίου είτε σε υποδαπέδια αποθήκη θερμότητας.

Έχει νότιο προσανατολισμό, με απόκλιση έως 30ο από το νότο και κλίση είτε κατακόρυφη, είτε υπό γωνία, με βέλτιστη κλίση τις 30-40ο για τον ελλαδικό χώρο. Χαρακτηριστικό είναι ότι επειδή απομονώνεται εύκολα από το κτήριο δεν απαιτούνται στοιχεία ηλιοπροστασίας και επίσης μπορεί να αξιοποιηθεί η βέλτιστη κλίση για τη χειμερινή δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς επιπτώσεις υπερθέρμανσης. Αποτελείται από υαλοπίνακα, τοποθετημένο σε μικρή απόσταση (2-5cm) μπροστά από μεταλλική επιφάνεια, σκούρου χρώματος (μαύρου) και το όλο σύστημα θερμομονώνεται. Συνδέεται με το κτήριο με θυρίδες εισροής και εκροής του αέρα του εσωτερικού χώρου προς και από το πάνελο. Οι θυρίδες αυτές τοποθετούνται καθ'όλο το πλάτος του πανέλου, με διάμετρο 20-30cm. Ο χώρος θερμαίνεται μέσω του φαινομένου του θερμοσιφωνισμού. Ο ψυχρός αέρας από το εσωτερικό του κτηρίου εισέρχεται στο κατώτερο μέρος του θερμοσιφωνικού πανέλου από την κατώτατη θυρίδα του όπου θερμαίνεται, ανέρχεται ως ελαφρότερος και εξέρχεται στον εσωτερικό χώρο από την ανώτατη θυρίδα του. Σχηματική παράσταση της λειτουργίας του θερμοσιφωνικού πανέλου φαίνεται στο Σχήμα 5.10

Η απόδοση του θερμοσιφωνικού πανέλου αυξάνεται με τη χρήση διπλών υαλοπινάκων στο συλλέκτη, σε σχέση με απλούς υαλοπίνακες, ιδιαίτερα για τα πιο ψυχρά κλίματα. Το βέλτιστο μήκος του συλλέκτη έχει εκτιμηθεί στα 3m (Norton & Probert, 1984).

Το θερμοσιφωνικό πανέλο ενδείκνυται για χώρους που χρειάζονται άμεση απόδοση θερμότητας από τα ηλιακά κέρδη, όπως χώρους γραφείων, σχολικές αίθουσες κοκ. Το πλεονέκτημά του, σε σχέση με το άμεσο κέρδος που, επίσης, αποδίδει άμεσα θερμότητα στο χώρο, είναι ότι αποφεύγεται η θάμβωση από μεγάλους υαλοπίνακες, η υπερθέρμανση τη θερινή περίοδο, καθώς κι οι αυξημένες απώλειες θερμότητας τη νύχτα. Εκτός αυτού, τη θερινή περίοδο, μπορεί να αποκόπτεται θερμικώς από το κτήριο (κλείσιμο των θυρίδων, σκίαση του πανέλου, άνοιγμα του υαλοπίνακα στο ανώτατο και κατώτερο μέρος του), αποφεύγοντας έτσι την υπερθέρμανση του χώρου.

Το κλείσιμο των θυρίδων είναι επίσης πολύ σημαντικό τη νυχτερινή περίοδο, προς αποφυγή θερμικών απωλειών. Κάτι τέτοιο καθιστά την εφαρμογή συστήματος αυτοματισμών σχεδόν επιτακτική, προς αποφυγή δυσλειτουργίας του συστήματος από αμέλεια των χρηστών. Σε περίπτωση που τοποθετείται κεκλιμένα, το θερμοσιφωνικό πανέλο έχει καλύτερη απόδοση αλλά χρειάζεται περισσότερο ελεύθερο χώρο. Προσαρτημένο κατακόρυφα στον τοίχο μπορεί να εναρμονισθεί αισθητικά με το κτήριο πιο εύκολα.[23]



Σχήμα 5.10. Αρχή λειτουργίας θερμοσιφωνικού πανέλου[23]

5.2.3.5. Τοιχοποιία με διαφανή μόνωση

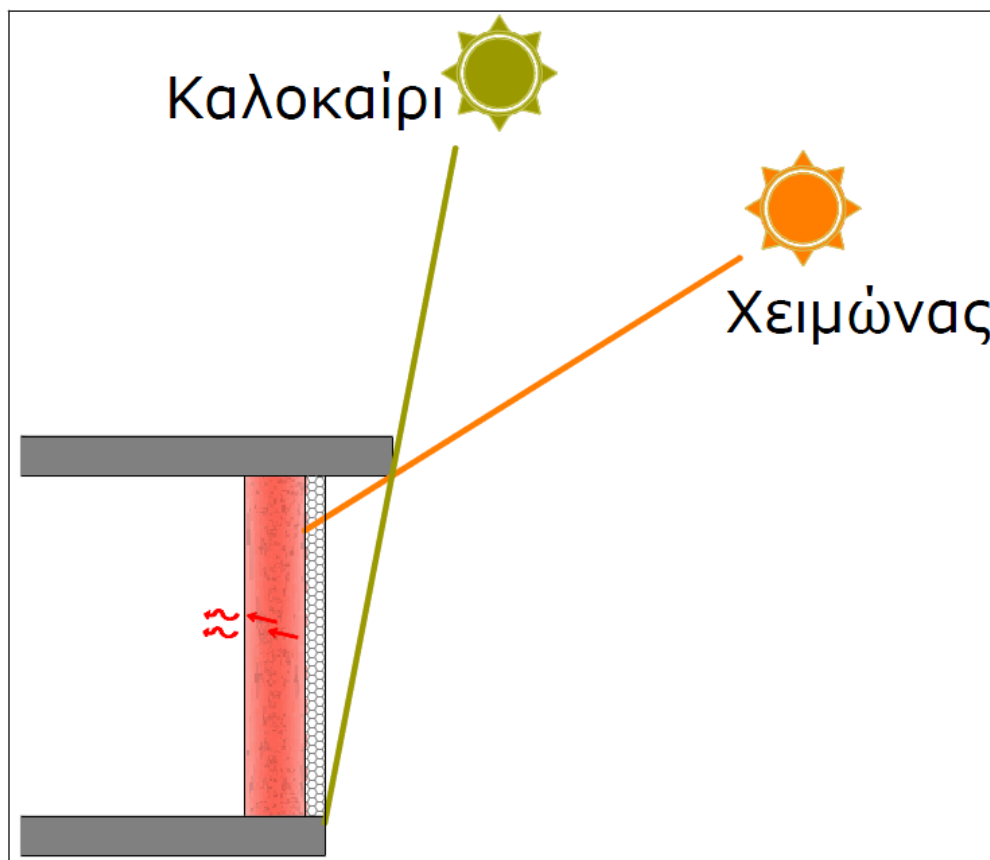
Πρόκειται για τοίχο νότιου προσανατολισμού με απόκλιση έως 30ο, με υλικό μεγάλης θερμοχωρητικότητας (συνήθως τούβλο), εξωτερικά του οποίου τοποθετείται διαφανής μόνωση χωρίς επίχρισμα (Σχήμα 5.11). Η εξωτερική παρειά του τοίχου βάφεται με σκούρο χρώμα. Ουσιαστικά πρόκειται για τοίχο μάζας, ο οποίος όμως θερμομονώνεται. Με αυτό τον τρόπο, μειώνεται μεν ο συντελεστής θερμικών ηλιακών απολαβών του διαφανούς θερμομονωτικού υλικού (μικρότερος σε σχέση με εκείνον του καθαρού γυαλιού), αλλά καθώς ο τοίχος είναι πλέον θερμομονωμένος, αυξάνουν τα καθαρά κέρδη, σε σχέση με τον τοίχο μάζας.

Η διαφανής μόνωση είναι θερμομονωτικό υλικό, κυψελωτής δομής. Λόγω της δομής της, επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία να διαπεράσει τη μάζα της, παράλληλα όμως μειώνει τις θερμικές απώλειες. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνονται ηλιακά κέρδη, μικρότερα σε σχέση με τα ηλιακά κέρδη καθαρού τζαμιού, με πολύ μικρότερες όμως θερμικές απώλειες. Έχει μεγάλη απόδοση, ιδιαίτερα κατά τους ψυχρότερους μήνες και δεν απαιτεί αυτοματισμούς ή τη συμμετοχή του χρήστη για την ορθή θερμική λειτουργία του συστήματος.

Τη θερινή περίοδο πρέπει οπωσδήποτε να σκιάζεται εξωτερικά είτε με προεξοχές είτε με κατακόρυφα, εξωτερικά σκίαστρα, προκειμένου να αποφεύγεται η υπερθέρμανση του χώρου.[23]

Ως προς τη χειμερινή του λειτουργία, δε χρειάζεται νυχτερινή θερμική προστασία. Η ενέργεια που αποδίδεται από το αδιαφανές στοιχείο με διαφανή μόνωση στο εσωτερικό του κτηρίου εξαρτάται από τα εξής:

- Τον προσανατολισμό και τη σκίαση του τοίχου από τον περιβάλλοντα χώρο, προεξοχές του κτηρίου ή/και εξωτερικά σκίαστρα
- Το διαφανές υλικό και τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά του (συντελεστής θερμικής διαπερατότητας, συντελεστής θερμικών ηλιακών απολαβών)
- Το εμβαδόν της συλλεκτικής επιφάνειας του τοίχου, την απορροφητικότητα και την θερμοπερατότητα.



Σχήμα 5.11. Αρχή λειτουργίας αδιαφανούς στοιχείου με διαφανή μόνωση[23]

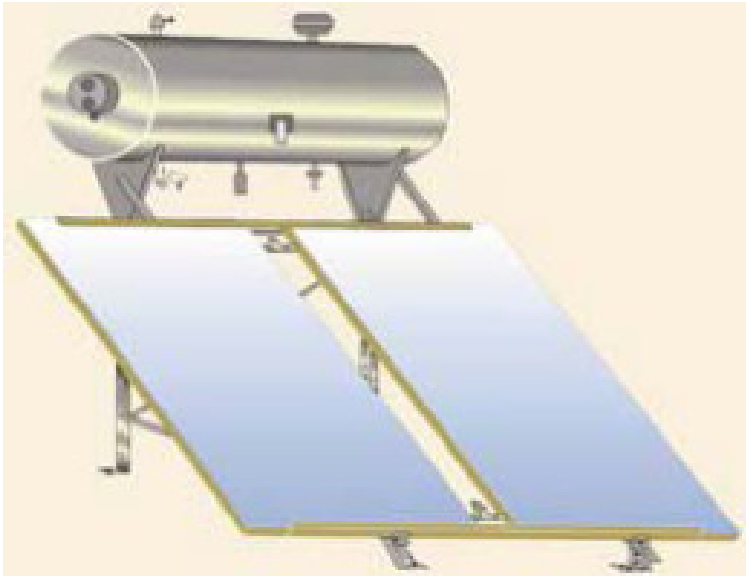
5.3. Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα

5.3.1 Εισαγωγή

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα. Τα ενεργειακά ηλιακά συστήματα λειτουργούν χρησιμοποιώντας τους συλλέκτες και τη δεξαμενή αποθήκευσης ως χωριστές συνιστώσες και η μεταφορά ενέργειας επιτυγχάνεται με τη βοήθεια κάποιας αντλίας που διαθέτει το εκάστοτε σύστημα που χρησιμοποιείται. Τα θερμικά ηλιακά συστήματα συλλέγουν, αποθηκεύουν και διανέμουν την ηλιακή ενέργεια μέσω κάποιου αέριου ή υγρού ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας των συλλεκτών ενώ τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση του νερού οικιακής χρήσης, την ψύξη και θέρμανση των χώρων του σπιτιού καθώς και σε άλλες διεργασίες της βιομηχανίας, του αγροτικού τομέα κλπ.

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν, το μέγεθός τους, την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, το κλίμα της περιοχής κ.α. Τα συστήματα αυτά διαθέτουν μεγάλη ποικιλία στις διατάξεις τους λόγω των διαφορετικών τρόπων που αυτά τα συστήματα προστατεύονται από τον παγετό. Τα ενεργητικά ηλιακά

συστήματα χωρίζονται σε δύο τύπους: στα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας και στα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας.



Σχήμα 5.12: Ηλιακός θερμοσίφοντας

Τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας,

Λειτουργούν χρησιμοποιώντας βαλβίδες, ηλεκτρικές αντλίες και συστήματα ελέγχου ώστε να μπορούν να κυκλοφορούν το νερό και τα άλλα ρευστά μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται μέσα στους συλλέκτες. Τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: τα συστήματα ανοιχτού βρόγχου και τα συστήματα κλειστού βρόγχου. Τα συστήματα ανοιχτού βρόγχου, χρησιμοποιούν αντλίες για να κυκλοφορεί το νερό χρήσης στους συλλέκτες, ενώ τα συστήματα κλειστού βρόγχου, αντλούν το ρευστό μεταφοράς θερμότητας μέσα στους συλλέκτες, και η θερμότητα που μεταφέρεται μέσω εναλλακτών θερμότητας από το ρευστό νερό αποθηκεύεται στις δεξαμενές.

Τα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας ,

Κατηγοριοποιούνται ως εξής: στα θερμοσιφωνικά συστήματα και στους συμπαγείς θερμοαντλίες. Τα θερμοσιφωνικά συστήματα στηρίζονται στη φυσική κυκλοφορία του νερού στους συλλέκτες και τη δεξαμενή, η οποία είναι τοποθετημένη πάνω από το συλλέκτη. Το νερό θερμαίνεται στον ηλιακό συλλέκτη, γίνεται ελαφρύτερο και ανέρχεται φυσικά προς τη δεξαμενή αποθήκευσης. Το ψυχρότερο νερό της δεξαμενής, ρέει με τη βοήθεια σωληνώσεων στο κατώτερο σημείο του συλλέκτη προκαλώντας σε όλο το σύστημα κυκλοφορία. Οι συμπαγείς θερμοαντλίες οι οποίοι αποτελούν τα ολοκληρωμένα συστήματα συλλέκτη-αποθήκευσης, αποτελούνται από μία ή

περισσότερες δεξαμενές αποθήκευσης και τοποθετούνται σε ένα μονωμένο περίβλημα με τη διαφανή πλευρά να είναι προσανατολισμένη προς τον ήλιο. Τα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας είναι καλύτερα και προτιμότερα από τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας διότι έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, συντηρούνται εύκολα και οικονομικά και θεωρούνται πιο αξιόπιστα.

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούνται όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την παραγωγή θερμού νερού για οικιακή χρήση, για τη θέρμανση και την ψύξη των χώρων αλλά και για άλλες δραστηριότητες όπως η θέρμανση της πισίνας.

Για την παραγωγή ζεστού νερού, χρησιμοποιούνται ηλιακοί θερμαντήρες διαφόρων τύπων οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να καλύπτουν τις ανάγκες των νοικοκυριών για ζεστό νερό σε μεγάλο βαθμό, συμβάλλοντας παράλληλα στην εξοικονόμηση ενέργειας. Ο τύπος και το μέγεθος του συστήματος, το κλίμα και η ποιότητα της περιοχής όσον αφορά την ηλιοφάνεια καθορίζουν την ποσότητα ζεστού νερού που θα αποδοθεί από την ηλιακή ενέργεια.

Ιδιαίτερα αποδοτικά είναι τα ηλιακά συστήματα που εφαρμόζονται στα οικιστικά σύνολα, διότι διαθέτουν ένα κεντρικό σύστημα συλλεκτών και μια κεντρική δεξαμενή, που παρέχουν ζεστό νερό στα διαμερίσματα μέσω δικτύου αγωγών. Με αυτό τον τρόπο η διάθεση του νερού είναι ομοιόμορφα κατανομημένη κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, μειώνοντας τις θερμικές απώλειες του αποθηκευμένου νερού για την κάλυψη των αναγκών του οικιστικού συνόλου.

Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής ζεστού νερού αποτελείται από ηλιακούς συλλέκτες, δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού καθώς και τις απαραίτητες σωληνώσεις και το σύστημα ελέγχου. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από το συλλέκτη και η θερμότητα που συλλέγεται αντλείται φυσικά ή τεχνητά από τη δεξαμενή. Το ζεστό νερό που παράχθηκε, αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές μέχρι να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των οικιακών αναγκών.

Οι τιμές στα θερμικά ηλιακά συστήματα ποικίλλουν ανάλογα τον εξοπλισμό που διαθέτουν διότι υπάρχουν φθηνά απλά χωρίς να διαθέτουν επιπρόσθετο μηχανολογικό εξοπλισμό και υπάρχουν και αυτά που διαθέτουν αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας αισθητήρες και συστήματα ελέγχου τα οποία είναι πιο αποτελεσματικά και περίπλοκα και συνάμα πιο ακριβά.

Η θέρμανση και ο δροσισμός των χώρων με εφαρμογή θερμικών ηλιακών συστημάτων, αποτελεί μια αρκετά μεγάλη αγορά, όμως η εφαρμογή αυτών των συστημάτων σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και σε ήδη υφιστάμενα κτίρια είναι δύσκολη έως ανέφικτη. Αυτό συμβαίνει διότι τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης βασίζονται σε εξαρτήματα όπως οι συλλέκτες στέγης για τη συλλογή και τη διανομή θερμότητας, τα οποία λειτουργούν χρησιμοποιώντας αέρα ή κάποιο υγρό που θερμαίνεται στους ηλιακούς συλλέκτες και μέσω ανεμιστήρων ή αντλιών μεταφέρεται καταναλώνοντας μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλιακά συστήματα αέρος διαθέτουν

συλλέκτες, ανεμιστήρες, αεραγωγούς, και συστήματα ελέγχου που θερμαίνουν τον αέρα της κατοικίας χωρίς να χρειάζονται εναλλάκτες θερμότητας και μέσα θερμικής αποθήκευσης. Η θερμική αποθήκευση χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγάλα συστήματα αέρος. Τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης υγρών, από την άλλη, περιλαμβάνουν ηλιακούς συλλέκτες, δεξαμενές αποθήκευσης, αντλίες, σωληνώσεις, εναλλάκτες θερμότητας και συστήματα ελέγχου.

Τις θερινές περιόδους παρατηρείται αυξημένη ζήτηση για δροσισμό όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στα μέγιστα επίπεδά της, γι' αυτό και ο ηλιακός δροσισμός θα αποτελέσει ελπιδοφόρα κατασκευή και αρκετά κερδοφόρα, γι' αυτό και η τεχνολογία βαδίζει προς την ανάπτυξη αυτών των τεχνικών και μεθόδων. Είναι γεγονός ότι η ψύξη κύκλου απορρόφησης αποτελεί την παλαιότερη μέθοδο κλιματισμού. Τα κλιματιστικά κύκλου απορρόφησης, χρησιμοποιούν μια πηγή θερμότητας όπως ένας ηλιακός συλλέκτης για να εξατμιστεί το υπό πίεση ψυκτικό ρευστό από ένα μίγμα ψυκτικού μέσου, αντί να χρησιμοποιεί ηλεκτρικό συμπιεστή για να διατηρήσει μηχανικά, το υπό πίεση ψυκτικό μέσο.

Οι απαιτήσεις των ενεργητικών ηλιακών συστημάτων για την εφαρμογή τους, είναι η ύπαρξη ωφέλιμου χώρου για τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, τις αντλίες, τους εναλλάκτες θερμότητας και τις δεξαμενές αποθήκευσης. Ο χώρος αυτός πρέπει να είναι προστατευμένος από τις καιρικές συνθήκες και θα πρέπει να τοποθετείται σε λεβητοστάσιο ή άλλους κλειστούς χώρους. Η ύπαρξη υδραυλικών συνδέσεων, που συνδέουν τους συλλέκτες, την παροχή κρύου νερού, το δίκτυο ζεστού νερού και τις δεξαμενές αποθήκευσης, θα πρέπει να είναι προσβάσιμες σε περίπτωση επιδιόρθωσης κάποιας βλάβης. Επίσης θα πρέπει το κτίριο να διαθέτει ωφέλιμο χώρο για την εγκατάσταση συλλεκτών ο οποίος θα πρέπει να είναι τοποθετημένος σε περιοχή που τη βλέπει ο ήλιος κατά τη διάρκεια της ημέρας, δηλαδή στην οροφή του κτιρίου που θα πρέπει να μην σκιάζεται από γειτονικά κτίρια ή άλλους ανοιχτούς χώρους που διαθέτει η κατοικία. Τέλος, η ύπαρξη ηλεκτρικών συνδέσεων είναι απαραίτητη για να μπορεί ο πίνακας να αντέχει πρόσθετα φορτία που στην περίπτωση των ηλιακών συστημάτων αυτά είναι μικρά.

Τα ενεργειακά ηλιακά συστήματα είναι καλό να ελέγχονται μια φορά το τρίμηνο, ώστε να βεβαιωθεί η ύπαρξη διαρροών από τα ρεκόρ των σωληνώσεων στους ηλιακούς συλλέκτες, να ελεγχθεί η ύπαρξη ραγισμάτων στους υαλοπίνακες, βλάβες στις αυτόματες ανακουφιστικές βαλβίδες, γήρανση των πλαστικών υλικών, και συμπλήρωση του υγρού μεταφοράς θερμότητας αν απαιτείται. Επιπλέον πρέπει να ελέγχεται το υδραυλικό κύκλωμα ως προς τη λειτουργία της αντλίας του πρωτεύοντος κυκλώματος και ως προς το διαφορικό θερμοστάτη. Θα πρέπει να επιθεωρούνται τα ανόδια, της δεξαμενής αποθήκευσης, και όταν φθείρονται να αντικαθίστανται. Τέλος αν υπάρχει αντίσταση θα πρέπει και αυτή να ελέγχεται τακτικά. Οι επιδιορθώσεις των βλαβών θα πρέπει να γίνονται από εξειδικευμένα άτομα.

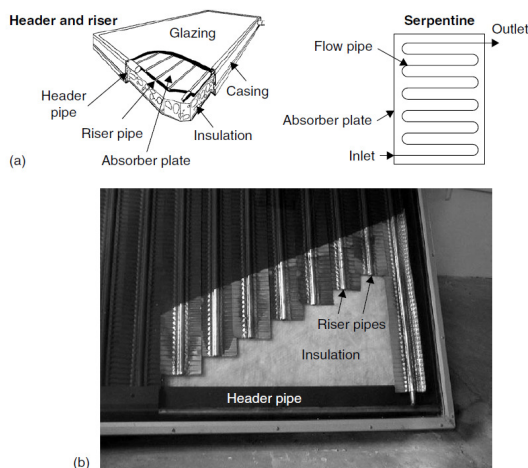
Τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση των ενεργητικών ηλιακών συστημάτων είναι η εξοικονόμηση καυσίμων που ισοδυναμεί με 50-70kg πετρελαίου ανά τετραγωνικό μέτρο ηλιακού συλλέκτη ανά έτος, η μείωση εκπομπών άνω των 750kg ανά τετραγωνικό μέτρο ηλιακού συλλέκτη ανά έτος όταν υποκαθίσταται το ηλεκτρικό ρεύμα και πάνω από 250kg ανά τετραγωνικό μέτρο ηλιακού συλλέκτη ανά έτος όταν υποκαθίσταται το πετρέλαιο.

5.3.1. Επίπεδος 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. Αντίθετα, στους συμβατικούς εναλλάκτες, η μεταφορά γίνεται από ρευστό σε ρευστό και ο ρόλος της ακτινοβολίας δεν είναι σημαντικός. Τα ιδιαίτερα προβλήματα που συναντώνται κατά την ανάλυση των ηλιακών συλλεκτών σχετίζονται με τις χαμηλές και συνεχώς μεταβαλλόμενες τιμές της προσπίπτουσας ενέργειας και την σχετικά μεγάλη σημασία της μετάδοσης θερμότητας δια ακτινοβολίας.

Μερικά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών σε σχέση με τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες μπό'ρουν να συνοψισθούν ως εξής:

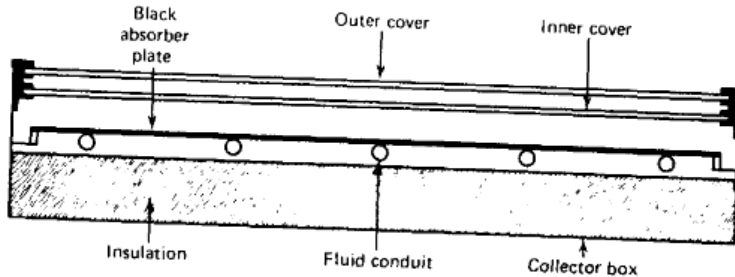
- Χρησιμοποίηση σε εφαρμογές που απαιτούν απόδοση ενέργειας σε μέσες θερμοκρασίες μέχρι περίπου 100 °C πάνω από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
- Εκμετάλλευση και της άμεσου και της διάχυτου ακτινοβολίας.
- Δεν απαιτούν μηχανισμό κίνησης για την παρακολούθηση του ηλίου και συνεπώς είναι μηχανικά απλούστεροι των συγκεντρωτικών συλλεκτών και απαιτούν μικρή συντήρηση .
- Κύριες εφαρμογές είναι η θέρμανση νερού χρήσης και η θέρμανση κτηρίων ενώ στις δυνατές εφαρμογές συμπεριλαμβάνεται ο κλιματισμός και η παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση.



Σχήμα 5.13: Τυπικός Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης[17]

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα τα κύρια μέρη ενός επίπεδου συλλέκτη είναι:

- Ο απορροφητήρας, ή πλάκα απορρόφησης, δηλ. η μαύρη επιφάνεια που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. Ο απορροφητήρας είναι εφοδιασμένος με σύστημα μεταφοράς της ενέργειας σε ρευστό, π.χ. σωλήνες αν πρόκειται για συλλέκτη θέρμανσης υγρού ή αεραγωγούς αν πρόκειται για θερμαντήρα αέρος.
- Ένα ή περισσότερα διαφανή καλύμματα πάνω από τον απορροφητήρα ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες διά συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον.
- Μόνωση της πίσω και των παράπλευρων επιφανειών ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες.
- Πλαίσιο που περιβάλλει τον συλλέκτη



Στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η συμπεριφορά του συλλέκτη περιγράφεται από την παρακάτω σχέση ισολογισμού ενέργειας:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{p,m} - T_a)] \quad (5.13)$$

Όπου:

$Q_u \rightarrow$ Ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύς (W)

$A_c \rightarrow$ Επιφάνεια του συλλέκτη (επιφάνεια καλύματος) (m^2)

$S \rightarrow$ Απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και των οπτικών απωλειών (W/m^2)

$U_L \rightarrow$ Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, που εκφράζει τις θερμικές απώλειες από το συλλέκτη στο περιβάλλον δια αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

$T_{p,m} \rightarrow$ Μέση θερμοκρασία του απορροφητήρα ($^\circ C$)

$T_a \rightarrow$ Θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^\circ C$)

Συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη U_L

Ο U_L αποτελείται από τρεις επί μέρους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας:

- I. U_T , συντελεστής θερμικών απωλειών κορυφής
- II. U_b , συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένος
- III. U_e , συντελεστής θερμικών απωλειών πλευρών

$$U_L = U_T + U_b + U_e \quad (5.14)$$

I) Συντελεστής θερμικών απωλειών κορυφής

Το συντελεστή U_T τον υπολογίζουμε από τον εμπειρικό τύπο[17]

$$U_t = \frac{1}{\frac{N_g}{\frac{C \left[\frac{T_p - T_a}{N_g + f} \right]^{0.33}}{T_p} + \frac{1}{h_w}} + \frac{\sigma(T_p^2 + T_a^2)(T_p + T_a)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0.05N_g(1 - \varepsilon_p)} + \frac{2N_g + f - 1}{\varepsilon_g} - N_g}}$$

$$f = (1 - 0.04h_w + 0.0005h_w^2)(1 + 0.091N_g)$$

$$C = 365.9(1 - 0.00883\beta + 0.0001298\beta^2)$$

$$h_w = \frac{8.6V^{0.6}}{L^{0.4}} \quad (5.15)$$

Όπου

N_g → πλήθος καλυμμάτων

C → concentration ratio

T_p → Μέση θερμοκρασία του απορροφητήρα (°C)

T_a → Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)

h_w → wind heat transfer coefficient = h_{c-a}

ε_p → συντελεστής εκπομπής απορροφητήρα

ε_g → συντελεστής εκπομπής γυαλιού

V → Ταχύτητα ανέμου

L → ημιαπόσταση ανάμεσα σε δύο σωλήνες $(W-D)/2$

II) Συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένος

$$U_b = \frac{k}{L} \quad \text{όπου:}$$

k → θερμική αγωγιμότητα μόνωσης

L → πάχος μόνωσης

III) Συντελεστής πλευρικών θερμικών απωλειών:

$$U_e = \frac{k A_e}{L_e A_c} \quad (5.16)$$

Ο παράγων απόδοσης του συλλέκτη \dot{F}

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left\{ \frac{1}{U_L[D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right\}} \quad (5.17)$$

$$C_b = \frac{k_b b}{\gamma}$$

$$F' = \frac{U_o}{U_L} \quad (5.18)$$

Κεφάλαιο 6: Εφαρμογές Pcm

6.1. Ιστορική αναδρομή[12]

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

Η βιομηχανία τροφίμων πέρα από τον πάγο μετέπειτα χρησιμοποίησε και άλλες μεθόδους για τη διατήρηση των τροφίμων σε επιθυμητή θερμοκρασία. Για παράδειγμα, κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση τροφίμων, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά δοχεία μεγάλου πλάτους και μικρού αντίστοιχα πάχους, γεμάτα με στερεοποιημένα μίγματα αλάτων, τα οποία άλλαζαν φάση κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση του τροφίμου, απορροφώντας θερμότητα και διατηρώντας το εσωτερικό στην επιθυμητή θερμοκρασία.

Τα ίδια υλικά χρησιμοποιήθηκαν και στη βιομηχανία φαρμάκων, σε πλαστικά δοχεία, ώστε να διατηρούν τα θερμοκρασιακά επίπεδα χημικών και φαρμάκων, κατά τη μεταφορά ή την αποθήκευσή τους. Το βασικό ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε σε τέτοιες εφαρμογές, ήταν κάποιο μίγμα ανόργανων αλάτων, όπως Θειικό Νάτριο, Θειικό Μαγνήσιο, Θειικό Κάλιο, Θειικό Αμμώνιο, Θειικό Ασβέστιο και κάποια χλωρίδια του Μαγνησίου.

Από τη στιγμή που η επιστημονική κοινότητα κατάλαβε τις προοπτικές των ΥΑΦ, ξεκίνησε να διεξάγει μελέτες και πειράματα για την εύρεση και ανάπτυξη όλο και καλύτερων ΥΑΦ, με διάφορα σημεία τήξης και υψηλές θερμότητες υγροποίησης.

Σε πρώτη φάση το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στους μεμονωμένους χρήστες των συστημάτων αυτών και όχι σε τεχνολογικώς ανεπτυγμένα θερμικά συστήματα. Μερικά δείγματα δουλειάς, ήταν κάποια συστήματα, τα οποία προορίζονταν για εστιατορες και ξενοδόχους και ήταν σχεδιασμένα να διατηρούν τα ζεστά πιάτα σε ικανοποιητική θερμοκρασία όση ώρα διαρκούσε το σερβίρισμα.

Άλλες εφαρμογές ήταν προϊόντα για τη διατήρηση ζεστών ροφημάτων, αλλά η εφεύρεση του "Θερμός" ήταν πολύ αποτελεσματική, οπότε αυτό το προϊόν δεν έτυχε απήχησης, και διάφορα προϊόντα σε ρούχα διαβίωσης (ρούχα για ακραίες συνθήκες).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 διατέθηκε στην αγορά ένα φαρμακευτικό προϊόν, μία θερμαντική ζώνη που προοριζόταν για θεραπευτικούς σκοπούς, το οποίο βασιζόταν στη θερμική συμπεριφορά του Βορικού Θείου. Το πρώτο προϊόν το οποίο αναπτύχθηκε για θεραπευτικό σκοπό ήταν μία συσκευασία παροχής ψύξης, ονομαζόταν γενικά "cool pack"

και αναπτύχθηκε από αθλίατρος σε συνεργασία με νοσοκομειακές μονάδες και η κύρια χρήση του ήταν περιορίζει το μωλώπισμα σε περίπτωση τραυματισμού. Το προϊόν αποτελείται από μία σακούλα που λειτουργεί σαν εξωτερική συσκευασία, η οποία είναι εσωτερικά χωρισμένη σε δύο τμήματα. Το ένα και μεγαλύτερο περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο έχει σταθεροποιηθεί σε υπέρψυκτη κατάσταση. Το άλλο τμήμα περιέχει έναν παράγοντα πυρηνοποίησης, κάποιου είδους πηκτικό δηλαδή. Μια απότομη κίνηση καταστρέφει το διαχωριστικό εντός της συσκευασίας και επιτρέπει την ανάμιξη των δύο υλικών, με αποτέλεσμα το ΥΑΦ να σταθεροποιείται, απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη θερμότητα.

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

ΗΠΑ-NASA

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

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

ΥΑΦ για ψύξη-θέρμανση κτιρίων

Παρ' όλο που η πρόοδος στη μελέτη και εφαρμογή των υλικών αυτών ήταν σε προχωρημένα στάδια, είχαν γίνει ελάχιστα βήματα για τη χρήση αυτών των υλικών σε σπίτια και στην ουσιαστική συμβολή τους στη θερμική συμπεριφορά των τελευταίων. Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν μόλις από τη δεκαετία του 1920, ενώ κάποιες πειραματικές κατασκευές σπιτιών για πειράματα μεγάλης κλίμακας παρατηρήθηκαν από το 1940 έως το 1970. Παρ' ότι τα συστήματα αυτά θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν επιτυχημένα, δεν υπήρξε περαιτέρω εξέλιξη ή μελέτη, αφού δεν υπήρξε σημαντική χρηματοδότηση, λόγω κυρίως έλλειψης πίστης στην επιτυχία του

όλου εγχειρήματος. Ακολουθεί ιστορική ανασκόπηση των σημαντικότερων πρώιμων εφαρμογών των ΥΑΦ, σαν ένα δείγμα της εξελικτικής πορείας των συστημάτων.

Maria Telkes

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



Σχήμα 6.1: Κάτοψη σπιτιού Telkes

Τα δοχεία χρησιμοποιούσαν σαν ΥΑΦ το άλας του Glauber. Συνολικά περιλαμβάνονταν 21 τόνοι ΥΑΦ, συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας 11MJ και σημείου τήξης 32 βαθμών Κελσίου. Με τα οικονομικά δεδομένα της εποχής ήταν μία ακριβή κατασκευή, κοστίζοντας 20000 δολάρια, από τις οποίες οι 3000 δολάρια αναφέρονταν στο θερμαντικό σύστημα (συνολικό ποσοστό κόστους 15%). Τα πρώτα δύο έτη λειτουργίας το σύστημα θέρμανσης αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό ακόμα και σε περιόδους με επτά ημέρες συνεχόμενης συννεφιάς. Το σύστημα λειτούργησε με επιτυχία παρέχοντας ένα άνετο περιβάλλον γύρω στους 21οC, χωρίς να χρειαστεί οποιοδήποτε βοηθητικό σύστημα θέρμανσης. Τον τρίτο χρόνο όμως, το σύστημα άρχισε να εμφανίζει σοβαρά προβλήματα, καθώς το άλας του Glauber είχε διαχωριστεί σε διάλυμα και άνυδρο άλας (Na₂SO₄), χάνοντας έτσι την αποθηκευτική του ιδιότητα. Παρατηρήθηκε επίσης ότι τα δοχεία αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται δραματικά οι απώλειες του συστήματος.

Lawrence Gardshire

Το 1953 ο Lawrence Gardshire κατασκεύασε ένα ηλιακό σπίτι με ΥΑΦ στη περιοχή του New Mexico. Το κτίριο ήταν διώροφο και κάθε όροφος είχε επιφάνεια 102 m^2 . Και ο Gardshire, όπως η Telkes χρησιμοποίησε «δοχεία» αποθήκευσης με ΥΑΦ χωρητικότητας 1.9 m^3 , μόνο που αντί να τα εγκαταστήσει ανάμεσα στα δωμάτια όπως η Telkes, τα εγκατέστησε στη στέγη δίπλα στους ηλιακούς συλλέκτες. Η καινοτομία ήταν ότι πρόσθεσε διφθορικό νάτριο στο άλας του Glauber σαν πηκτικό παράγοντα, ώστε να βοηθά στην στερεοποίηση του αλάτος και να αποφύγει- κατά το δυνατόν-το διαχωρισμό. Δυστυχώς και αυτή η κατασκευή αντιμετώπισε τα ίδια προβλήματα με την κατασκευή της Telkes, πιο καθυστερημένα βέβαια, λόγω αύξησης του χρόνου ζωής του ΥΑΦ, λόγω της προσθήκης του πηκτικού παράγοντα.

J.W.Hodgins και T.W.Hoffman

Την επόμενη προσπάθεια για ένα ηλιακό σπίτι με ΥΑΦ την έκαναν το 1959 οι J.Hodgins και T.Hoffman στον Καναδά. Το κτίριο ήταν δύο ορόφων, επιφάνειας 111 m^2 . Το σχεδιασμό της αποθήκευσης ενέργειας τον ανέλαβε η M.Telkes λόγω της προηγούμενης εμπειρίας της. Και σε αυτή τη περίπτωση η Telkes χρησιμοποίησε ως υλικό αλλαγής φάσης το άλας του Glauber (ένυδρο άλας, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, σημείο τήξης τους 32°C).



Σχήμα 6.2: Το σπίτι που σχεδίασε η Telkes για τους Hodgins και Hoffman

Για να ξεπεραστούν τα προηγούμενα προβλήματα, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας εκτός από 12 τόνους ΥΑΦ που περιελάμβανε, ήταν εμπλουτισμένο με πυριτικό άλας νατρίου και χρώμιο, ουσία που εμποδίζει τη διάβρωση. Τα ΥΑΦ ήταν ενσωματωμένα σε κυλινδρικά δοχεία χάλυβα, διαμέτρου 0.1 m και ύψους 0.6 m , τα οποία ήταν τοποθετημένα κάθετα στους τοίχους. Παρόλο που τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, οι προσπάθειες δεν συνεχίστηκαν από αυτή την ομάδα επιστημόνων.

Ερευνητική δραστηριότητα

Το πρώτο μεγάλο ερευνητικό πρόγραμμα έλαβε χώρα στο πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνια το 1971. Σε αυτό συμμετείχαν οι S.Freedman, M.Telkes, M.Altman. Ο ερευνητικός σκοπός ήταν να ανακαλυφθεί αριθμός ΥΑΦ κατάλληλων για ψυκτικές και θερμαντικές εφαρμογές, με ενδεδειγμένη ανάλυση παράπλευρων παραγόντων, όπως τα διάφορα κόστη (κτήσης, εγκατάστασης, συντήρησης), οικονομική ανάλυση επένδυσης και αποθηκευτική ικανότητα υλικού.

Η έρευνα βασίστηκε στις βασικές ομάδες ΥΑΦ:

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

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το $K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$ (ανόργανο ΥΑΦ) και ορισμένα μίγματα παραφίνης (οργανικό ΥΑΦ) είναι κατάλληλα για εφαρμογές κλιματισμού , ενώ για θέρμανση χώρου τα πιο ελπιδοφόρα ΥΑΦ είναι τα: $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ και $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$.

Η δεκαετία του 1970 ήταν ορόσημο για τα ΥΑΦ και γενικότερα για τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Συγκεκριμένα το 1973 με τον αραβικό αποκλεισμό πετρελαίου εμφανίζεται η πρώτη πετρελαϊκή κρίση. Αυτό ώθησε τις κυβερνήσεις διάφορων χωρών να αναζητήσουν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας. Το πεδίο μεγάλου ενδιαφέροντος ήταν οι τομείς της ηλιακής ενέργειας και της αποδοτικής αποθήκευσης θερμότητας.

Από το σημείο αυτό και μετά η μέθοδο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έγιναν σημαντικό κομμάτι του προγράμματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και άρχισαν να επενδύονται σημαντικά κονδύλια στην έρευνα και ανάπτυξη των συστημάτων αυτών. Από το 1973 και μετά ξεκινά η κυβερνητική χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων πάνω στα ΥΑΦ σε χώρες όπως οι Η.Π.Α., η Αγγλία, η Γερμανία και η Γαλλία.

Αποτέλεσμα της ανάγκης για εύρεση ΥΑΦ, στα τέλη της δεκαετίας του 1970, κυβερνητικοί επιστημονικοί οργανισμοί των ΗΠΑ διεξήγαγαν πειράματα ελέγχοντας 20000 διαφορετικά υλικά ως προς τις προοπτικές που έδιναν για χρήση ως ΥΑΦ. Μόλις το 1% θεωρήθηκε υποψήφιο υλικό και συγκεκριμένα κάποια ένυδρα άλατα με την ιδιότητα της ομογενούς τήξης και συγκεκριμένες κατηγορίες οργανικών υλικών. Η μετέπειτα ερευνητική δραστηριότητα παγκοσμίως απέδειξε ότι όντως αυτά τα υλικά είναι τα πλέον κατάλληλα για τέτοιου είδους εφαρμογές.

Άλας Glauber

Η M.Telkes συνέχισε τις έρευνές τις πάνω στα ΥΑΦ και συγκεκριμένα γύρω από το άλας του Glauber και τρόπους επιμήκυνσης του χρόνου ζωής

του υλικού. Ένα από τα προβλήματα που εμφάνιζε το υλικό ήταν η ιδιότητα του να διαχωρίζει το άνυδρο θειικό νάτριο, κάτι το οποίο ελάττωνε τη θερμική αποθηκευτική ικανότητα του υλικού, ύστερα από κάποιο αριθμό κύκλων.

Σε δοκιμές που διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας διάφορους πηκτικούς παράγοντες για τη βοήθεια της τήξης του ΥΑΦ, παρατηρήθηκε ότι η διάρκεια ζωής του υλικού όντως αυξήθηκε εντυπωσιακά, παρέμεινε όμως η ελάττωση της αποθηκευτικής ικανότητας ύστερα από κάποιους (περίπου 1000) κύκλους φόρτισης. Ο S.Marks με τη σειρά του διεξήγαγε σειρές πειραμάτων στο ίδιο αντικείμενο. Χρησιμοποιώντας ένα είδος πηλού για πηκτικό παράγοντα, είχε τα ίδια αποτελέσματα με την Telkes, αύξηση δηλαδή της διάρκειας ζωής του ΥΑΦ, αλλά παρατηρούμενη ελάττωση των θερμικών ιδιοτήτων. Πειράματά του με άλλους πηκτικούς παράγοντες, όπως με ένα πολυμερές του πολυκαρβοξυλικού οξέος, οδήγησαν στην αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας, αλλά επίσης σε ελάττωση του χρόνου ζωής.

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

Παραφίνες

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

Υπόλοιπος κόσμος

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

(Δυτική) Γερμανία

Η ερευνητική δραστηριότητα στη Γερμανία απέφερε καρπούς, καθώς οι επιστήμονες συνέταξαν αναλυτικά γραφήματα και πίνακες φυσικών και θερμικών ιδιοτήτων των ΥΑΦ, καθώς και πληροφορίες για ΥΑΦ για τους τομείς της κατασκευής και της μόνωσης. Τα κύρια υλικά που εξετάστηκαν ήταν οι παραφίνες, τα ένυδρα άλατα και κάποια εύτηκτα μίγματα για εφαρμογές κάτω των 100οC. Οι δοκιμές περιλάμβαναν τη χρήση των υλικών σε σωλήνες με πτερύγια. Μεγάλη επίσης έρευνα εξετάζε τη διαφορετική θερμική συμπεριφορά των ΥΑΦ σε ηλιακό σπίτι, το οποίο θερμαίνεται από μια αντλία θερμότητας με αποθηκευτικό μέσο το νερό. Οι ερευνητές αντικατέστησαν το νερό πρώτα με πάγο και μετά με παραφίνη (σημείο τήξης 18 με 25 οC), για τρία έτη. Αποδείχθηκε ότι η παραφίνη έχει την καλύτερη συμπεριφορά καθώς επίσης ότι αυξάνει το συντελεστή συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας από 2,6 σε 3,3, καθώς επίσης ότι η παραφίνη χρειάζεται το μισό όγκο από αυτόν του νερού γεγονός που δίνει μικρότερο κόστος εγκατάστασης.

Γαλλία

Η Γαλλία είναι μία από τις χώρες που έδειξαν γρήγορα μεγάλο ενδιαφέρον για τις θερμικές προοπτικές των ΥΑΦ και κατασκεύασαν για ερευνητικούς σκοπούς αρκετά κτίρια με ΥΑΦ. Συγκεκριμένα το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην εισαγωγή των ΥΑΦ και κυρίως παραφινών στην τοιχοποιία.

Ηνωμένο Βασίλειο

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

Ιαπωνία

Η Ιαπωνία κατέχει σημαντικό ρόλο στην έρευνα και ανάπτυξη του τομέα των ΥΑΦ, με σειρά ετών ερευνητικής δραστηριότητας και σημαντική κρατική βοήθεια. Η συνισταμένη της έρευνας των Ιαπώνων επιστημόνων είναι η χρήση ΥΑΦ σε συστήματα θέρμανσης και έχουν στο παρελθόν αναπτυχθεί πολλά συστήματα χρησιμοποιώντας υλικά όπως ένυδρα άλατα νιτριδίων, άλατα φθορίου, φωσφορικά άλατα και θειικό ασβέστιο, τα οποία πέρασαν μετέπειτα επιτυχώς στο εμπόριο. Η ερευνητική δραστηριότητα μέχρι τη δεκαετία του 1970 περιοριζόταν στις εφαρμογές θέρμανσης, ενώ από το σημείο αυτό και μετά αναγνωρίστηκαν και οι προοπτικές σε εφαρμογές ψύξης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 έγιναν εκτεταμένες πειραματικές έρευνες

γύρω από την ενσωμάτωση του άλατος του Glauber σε γύψο και άλλα δομικά υλικά.

6.2. Εφαρμογές pcm σε παθητικά συστήματα

Τρεις είναι οι κύριοι τρόποι για χρήση PCM στα κτίρια για θέρμανση-ψύξη:

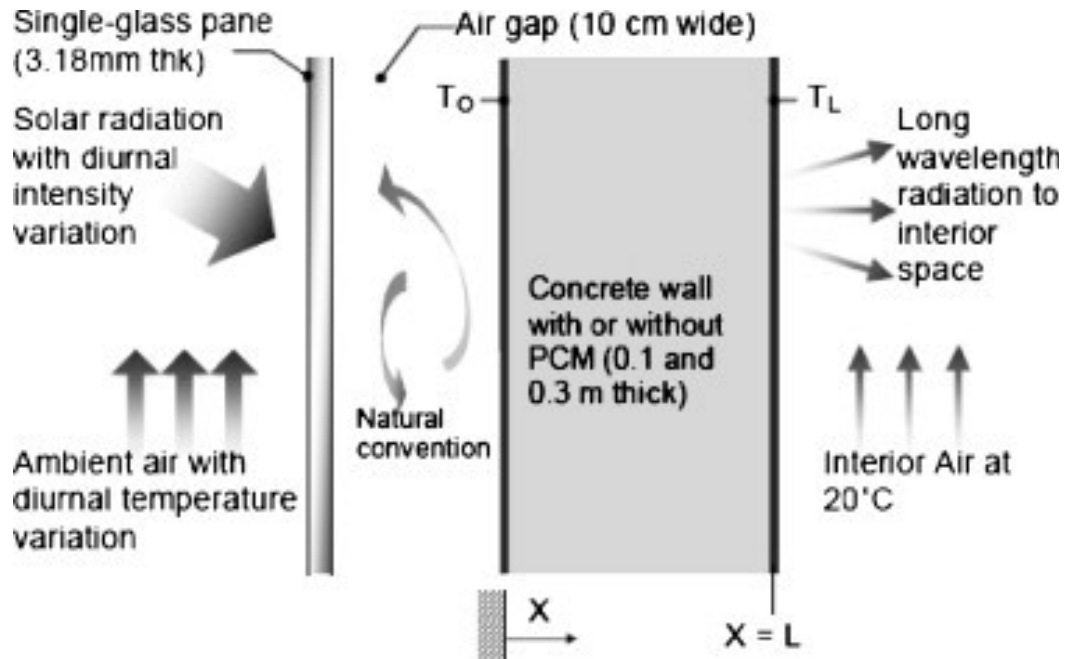
- 1) Τοποθέτηση των PCM στους τοίχους των κτιρίων.
- 2) Τοποθέτηση των PCM σε στοιχεία των κτιρίων διαφορετικά από τους τοίχους.
- 3) Τοποθέτηση των PCM σε θερμές και ψυχρές μονάδες αποθήκευσης.

Τα πρώτα δυο αναφέρονται σε παθητικά συστήματα, όπου η θέρμανση και η ψύξη που αποθηκεύονται αποδίδονται αυτόματα όταν η εσωτερική ή η εξωτερική θερμοκρασία αυξάνεται ή μειώνεται κάτω από το σημείο τήξης. Το τρίτο είναι ένα ενεργητικό σύστημα, όπου η αποθηκευμένη θερμότητα ή ψύξη βρίσκεται μέσα σε κάλυμμα, θερμικά μονωμένο από το κτίριο με μόνωση. Έτσι, η θερμότητα ή η ψύξη χρησιμοποιείται μόνο όταν αυτό απαιτείται και όχι αυτόματα.[14]

6.2.1. Τοίχος trombe με pcm

Ο τοίχος trombe αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα περίπτωσης με έμμεσο θερμικό κέρδος. Αποτελείται από ένα συνηθισμένο αλλά παχύ τοίχο στην νότια πλευρά του κτιρίου, με ένα γυάλινο ή πλαστικό κάλυμμα τοποθετημένο σε απόσταση περίπου τεσσάρων ιντσών από τον τοίχο. Θερμότητα από τον ήλιο αποθηκεύεται στον χώρο ανάμεσα στον τοίχο και στο κάλυμμα, ενώ η το μαύρο χρώμα της εξωτερικής επιφάνειας του τοίχου που απορροφά επίσης θερμότητα, την αποθηκεύει στην μάζα του τοίχου. Θερμότητα διανέμεται από τον τοίχο trombe στο κτίριο για αρκετές ώρες. Όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου πέσει κάτω από την θερμοκρασία του τοίχου, τότε θερμότητα αρχίζει να μεταδίδεται με ακτινοβολία στον χώρο και πιθανές απώλειες μπορούν να ελεγχθούν με την προσθήκη μιας μονωτικής κουρτίνας, η οποία θα είναι κλειστή το βράδυ, ανάμεσα στο κάλυμμα και στον τοίχο. Ο παραδοσιακός τοίχος trombe βασίζονταν στην αισθητής μορφής θερμότητα, αλλά προκειμένου να αυξήσουμε την αποθήκευσή της ανα μονάδα μάζας, ο τοίχος trombe με PCM αποτελεί μία ελκυστική ιδέα. Έτσι, ένας τοίχος που περιέχει PCM κατασκευάζεται στην νότια πλευρά του κτιρίου, ο οποίος θα θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάρκεια της ημέρας, τήκοντας το PCM, και αποδίδοντας την απορροφημένη θερμότητα το βράδυ προς θέρμανση του κτιρίου. Για δεδομένη ποσότητα θερμότητας που θέλουμε να αποθηκεύσουμε, οι μονάδες αλλαγής φάσης απαιτούν λιγότερο χώρο από τους τοίχους με νερό ή από τους παραδοσιακούς τοίχους trombe, και είναι και πολύ ελαφρύτεροι. Συνήθως, ως

PCM σε τοίχους trombe χρησιμοποιούνται ένυδρα άλατα και υδρογονάνθρακες. Ένα σχηματικό διάγραμμα τοίχου trombe, με PCM παρουσιάζεται παρακάτω:[15]



Σχήμα 6.3: Τοίχος Trombe[15]

Ο Bourdeau ερεύνησε δύο τοίχους παθητικής αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιούσαν calcium chloride hexahydrate, με σημείο τήξης 29oC Κατέληξε ότι ένας τοίχος πάχους 8.1 cm με PCM παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά από έναν κλασσικό τοίχο πάχους 40 cm. Οι Buddhi και Sharma [16] μέτρησαν το κατά πόσο μεταφέρεται ηλιακή ακτινοβολία μέσω ενός υλικού αλλαγής φάσης για διαφορετικές θερμοκρασίες και πάχη. Ως PCM επιλέχθηκε stearic acid, και κατέληξε στο ότι στο PCM η ηλιακή ακτινοβολία μεταφέρεται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με το γυαλί για το ίδιο πάχος και μάλιστα πρότεινε μια καινούρια εφαρμογή, την εισαγωγή τους σε τοίχους παράθυρα, ως διαφανές μονωτικό υλικό.

6.2.2. Παραθυρόφυλλο με PCM

Σε αυτή την εφαρμογή, παραθυρόφυλλο που περιέχει PCM τοποθετείται έξω από επιφάνειες παραθύρων. Κατά την διάρκεια της ημέρας είναι ανοιχτά προς το περιβάλλον, η εξωτερική του πλευρά εκτίθεται σε ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται θερμότητα και το PCM λιώνει. Την νύχτα, κλείνουμε το παραθυρόφυλλο, ανοίγουμε το παράθυρο και θέρμανση από το PCM εισέρχεται λόγω ακτινοβολίας στον χώρο. Οι Budhi et al., ερεύνησαν την θερμική συμπεριφορά ενός δοκιμαστικού δωματίου διαστάσεων 1 m x 1

m x 1m, με και χωρίς υλικό αλλαγής φάσης. Ως υλικό αποθήκευσης της λανθάνουσας μορφής θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το CG lauric acid, και βρέθηκε ότι η ικανότητα θερμικής αποθήκευσης του δωματίου αυξήθηκε κατά 4o C για 4-5 ώρες, όταν χρησιμοποιείται νύχτα, χάρη στην παρουσία του PCM.[15,16]

**vertical (right) and horizontal inner
blinds (below) with PCM**

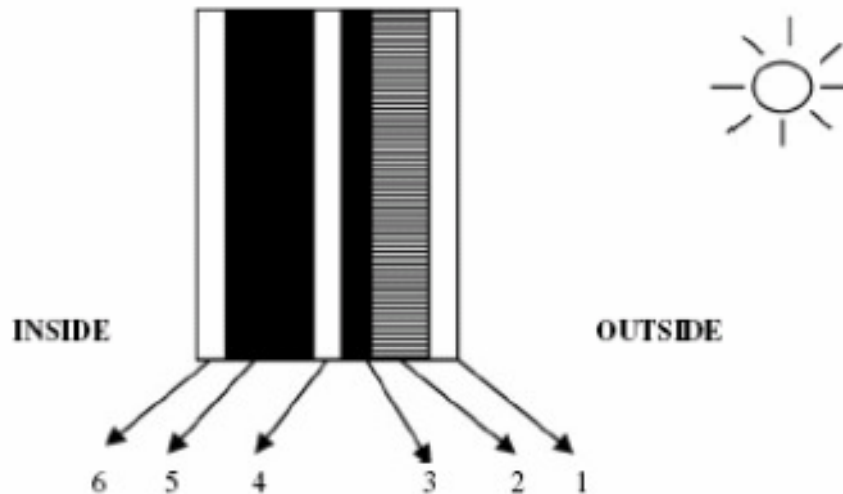


Σχήμα 6.4: Παραθυρόφυλλα με pcm [15]

6.2.3. Τοίχος συλλογής ηλιακής θερμότητας για αερισμό του κτιρίου

Όπως είναι γνωστό ένας τοίχος PCM έχει την δυνατότητα να αιχμαλωτίζει μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στους τοίχους και στην οροφή του κτιρίου. Εξ αιτίας της μεγάλης θερμικής τους μάζας μπορούν να ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις των διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου. Επιπλέον, είναι πολύ αποτελεσματικός στην μετατόπιση του φορτίου σε περιόδους μικρότερης ζήτησης. Οι Arkar και Medved[σχεδίασαν και εξέτασαν ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (LTHS) για τον αερισμό ενός κτιρίου. Οι σφαιρικές κάψουλες πολυαιθυλένης τοποθετήθηκαν σε ένα κανάλι του συστήματος αερισμού του κτιρίου και λειτούργησαν ως ένα πορώδες μέσο αποθήκευσης και απορρόφησης θερμότητα που απορροφήθηκε χρησιμοποιήθηκε για να προθερμάνει τον αέρα που εισέρχεται στο κτίριο.

Ο "ηλιακός τοίχος" είναι μία άλλη εφαρμογή για την θερμική αποθήκευση με PCM. Σε αυτή την περίπτωση η ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο απορροφάται από το PCM και "θάβεται" στον τοίχο. Οι Stritih και Novak κατασκεύασαν έναν πειραματικό τοίχο, ο οποίος περιείχε μαύρο κερί παραφίνης ως PCM. Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκε για την θέρμανση και τον αερισμό του κτιρίου και τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τους ερευνητές, ήταν πολλά υποσχόμενα. Ο τοίχος αποτελείται από έξι κυρίως μέρη.[14]



Σχήμα 6.3: Στοιχεία ηλιακού τοίχου με pcm[14]

Η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος περνάει μέσα από το τζάμι με το διαφανές μονωτικό υλικό(1,2), το οποίο εμποδίζει την συναγωγή και την μεταφορά την θερμότητας με ακτινοβολία. Στη συνέχεια το PCM (3), το οποίο βρίσκεται σε μία διαφανή πλαστική θήκη από polycarbonate, απορροφά και αποθηκεύει την ενέργεια, κυρίως ως λανθάνουσα θερμότητα. Ο αέρας για τον αερισμό του κτιρίου θερμαίνεται στο κανάλι (4) και οδηγείται στο δωμάτιο, ενώ η μόνωση και ο γύψος (5) και (6) αντίστοιχα αποτελούν δεδομένα στοιχεία.

Ο "ηλιακός τοίχος" παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα. Καταρχήν, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα με τόσο υψηλή αποδοτικότητα οφείλεται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατευθείαν από το PCM μέσω του διαφανούς πλαστικού τζαμιού, το οποίο ταυτόχρονα λειτουργεί και ως μονωτικό, εμποδίζοντας τις απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Επιπλέον, οι απώλειες λόγω της αγωγής στο δωμάτιο επίσης μειώνονται στην επιφάνεια του τοίχου.

6.2.4. Γυψοσανίδα με ενσωματωμένο pcm

Η γυψοσανίδα με PCM ή το πάνελ είναι ένας εξαιρετικά ενδιαφέρων τύπος υλικού, με ενσωματωμένο υλικό αποθήκευσης θερμότητας, για κατασκευή κτιρίου. Κατά την διάρκεια των περασμένων 20 έτων, πολλά είδη καψουλών μεγάλων διαστάσεων βγήκαν στο εμπόριο τόσο για ενεργητικά όσο και για παθητικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένου του άμεσου κέρδους. Παρόλα αυτά, η επιφάνεια των περισσότερων εμπορικών προϊόντων που είναι αποθηκευμένα σε μορφή κάψουλας, δεν ήταν ικανή να μεταδώσει την θερμότητα στο κτίριο ύστερα από την τήξη του PCM από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, γι αυτό και έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες. Γυψοσανίδες με PCM θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν στις παραδοσιακές γυψοσανίδες κατά την διάρκεια της κατασκευής ή και της ανακαίνισης ενός κτιρίου. Έτσι, θα παρέχουν στο κτίριο την θερμική αποθήκευση, η οποία θα διανέμεται σε όλη του την έκταση, ενισχύοντας το παθητικό σύστημα και περιορίζοντας τα απαιτούμενα μέγιστα ηλεκτρικά φορτία για θέρμανση-ψύξη.[14]

Οι Peirro et al. θεώρησαν μία γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM ως μέσο αποθήκευσης σε μία ελαφριά κατασκευή κατοικίας έκτασης 120 m² με καλή μόνωση και μία μεγάλη έκταση της νότιας επιφάνειας κατασκευασμένη από γυαλί, στο Madison, Wisconsin. Το κτίριο μπορούσε να εξοικονομήσει μέχρι 3 GJ το χρόνο ή αλλιώς το 15 % του ετήσιου ενεργειακού κόστους. Επιπλέον, κατέληξαν στο ότι η βέλτιστη αποθήκευση ενέργειας προκύπτει όταν το PCM έχει θερμοκρασία τήξης περίπου 1-3 ο C πάνω από την μέση θερμοκρασία του δωματίου.

Οι Stetiu και Feustel ερεύνησαν την χρήση διπλής γυψοσανίδας με PCM για την περεταίρω αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας ενός κτιρίου, ώστε οι θερμοκρασίες του δωματίου να διατηρηθούν πιο κοντά στα ανώτερα όρια θεμικής άνεσης, χωρίς τη χρήση μηχανικής ψύξης. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση μίας οικίας με υψηλά εσωτερικά φορτία και δεδομένες καιρικές συνθήκες για την περιοχή Sunnyvale, California έδειξαν σημαντική πτώση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα, όταν η θερμότητα αποθηκεύεται στο PCM των γυψοσανίδων. Αν και οι προσομοιώσεις έχουν δείξει τα πιθανά οφέλη από την χρήση των PCM στους τοίχους, οι ερευνητές κατέληξαν στο ότι ψύξη του "φακέλου" του κτιρίου μέσω της κίνησης του αέρα στον χώρο, αποτελεί έναν μη αποδοτικό τρόπο μεταφοράς της θερμότητας. Η κίνηση του αέρα κοντά στους τοίχους, η οποία καθορίζει και την ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται, είναι σχετικά μικρή. Κυρίως σε περιόδους όπου η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι σχετικά υψηλή και την νύχτα, θα ήταν αποδοτική η εξαναγκασμένη παροχή αέρα κατά μήκος των επιφανειών των τοίχων για να διευκολύνει την ανταλλαγή θερμότητας. Η μειωμένη ικανότητα απόρριψης του αέρα που χρησιμοποιείται για ψύξη το καλοκαίρι, απαιτεί είτε αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας είτε μείωση του ποσού της θερμότητας που

αποθηκεύεται.

Ο Neepfer έχει εξετάσει την δυναμική μιας γυψοσανίδας με ενσωματωμένα fatty acids και paraffin waxes ως PCM που υπόκεινται στην ημερήσια θερμοκρασιακή διακύμανση του δωματίου, χωρίς όμως να προσπίτει άμεσα σε αυτά ηλιακή ακτινοβολία. Η παρατήρηση που έγινε από τον συγγραφέα είναι ότι η μέγιστη τιμή της ημερήσιας αποθηκευμένης ενέργειας προκύπτει όταν η τιμή της θερμοκρασίας τήξης του PCM σε κάψουλες πλησιάζει την μέση τιμή της θερμοκρασίας που δημιουργεί την αίσθηση της άνεσης. Μάλιστα, η ημερήσια αποθηκευμένη ενέργεια μειώνεται όταν η αλλαγή φάσης πραγματοποιηθεί σε ένα εύρος θερμοκρασιών.

Οι προσομοιώσεις των "ενεργειακών" κτιρίων βοηθούν στην εκτίμηση των διάφορων εφαρμογών των PCM για λόγους αποθήκευσης θερμότητας στα κτίρια. Έτσι, το Fraunhofer Institute, Germany προσομοίωσε την θερμική συμπεριφορά των στοιχείων κτιρίου, προκειμένου να συγκρίνει την δυναμική απόδοση των διαφόρων ειδών τοίχων, που περιείχαν ποικίλα PCM. Η βάση τους είναι ένα μοντέλο, που εξετάζει την αλλαγή φάσης και είναι εμπειρικά επικυρωμένο από μετρήσεις σε δείγματα τοίχων, διαστάσεων $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$. Ερεύνησαν την επίδραση που έχουν τα PCM ως συνάρτηση του θερμοκρασιακού εύρους της αλλαγής φάσης, της ποσότητας του PCM και της κατασκευής και χρήσης του κτιρίου. Με την βοήθεια θερμογράφων, φάνηκε ποσοτικά η επίδραση του PCM στα κατασκευαστικά υλικά, δηλαδή σε τέσσερα δείγματα τοίχων με διαφορετική ποσότητα PCM ενσωματωμένη στο καθένα, τα οποία είχαν θερμανθεί σε ένα φούρνο και στη συνέχεια παρακολουθούσαν η ψύξη τους. Η ποικιλία στις τιμές της θερμοκρασίας με τον χρόνο αποδεικνύει την επίδραση των PCM. Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του PCM τόσο περισσότερο διαρκεί η αποβολή της θερμότητας που έχουν απορροφήσει. Επομένως, σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, η θερμική μάζα ενός στοιχείου του κτιρίου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά λόγω της διαδικασίας αλλαγής φάσης, ώστε η θερμική άνεση που συνδέεται με τις βαριές κατασκευές των κτιρίων να μπορεί να προσεγγισθεί και από κατασκευαστικά υλικά για πιο ελαφριές κατασκευές.

Οι Kisssock et al, έχουν παρουσιάσει τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης τους πάνω στην θερμική συμπεριφορά γυψοσανίδων, οι οποίες έχουν απορροφήσει 30% κατά βάρος εμπορική παραφίνη. Στις προσομοιώσεις που έκαναν, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του γύρω χώρου και οι εσωτερικές θερμοκρασίες στα κελιά των δοκιμών παρακολουθούσαν συνεχόμενα για 14 ημέρες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη θερμοκρασία κατά την διάρκεια αλλαγής φάσης στο δοκιμαστικό κελί με PCM ήταν σχεδόν 10 μικρότερη από την αντίστοιχη στο κελί αναφοράς τις θερμές ημέρες.

Όμως, οι γυψοσανίδες με PCM παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Η κατάλληλη μεταβατική θερμοκρασία διαφέρει ανάλογα με το κλίμα της εκάστοτε περιοχής, ενώ το να επιτύχεις την σωστή θερμοκρασία γίνεται διπλά δύσκολο σε περιοχές που έχουν ανάγκη τόσο από θέρμανση

όσο και από κλιματισμό. Άλλα ζητήματα που προκύπτουν είναι η διάβρωση, η αναφλεξιμότητά τους και άλλα παραδοσιακά θέματα που αφορούν στην εφαρμογή τους, όπως η δυνατότητα να βαφτεί ο τοίχος.[14]

6.2.5. Μπλόκ τσιμέντου με ενσωματωμένο pcm

Οι Hawes et al, παρουσίασαν την θερμική συμπεριφορά ποικίλων PCM σε διάφορους τύπους τσιμεντένιων τοίχων. Η παρουσίαση αυτή κάλυψε την επίδραση της αλκαλικότητας του τσιμέντου, της θερμοκρασίας, τον χρόνο εμβάπτισμού και την αποδυνάμωση της δυνατότητας απορρόφησης του PCM κατά την διαδικασία της ενσωμάτωσης. Εξέτασαν τους μηχανισμούς απορρόφησης και ίδρυσαν μία μέθοδο ανάπτυξης και χρήσης των σταθερών απορρόφησης του PCM στο τσιμέντο, για να επιτύχουν την διάχυση της ζητούμενης ποσότητας PCM και επομένως την απαιτούμενη θερμική ικανότητα αποθήκευσης. Οι επιπτώσεις της αλλαγής του τσιμέντου και των βελτιωμένων τεχνικών ενσωμάτωσης έχουν αυξήσει την θερμική αποθήκευση κατά 300% περίπου. Οι πιο πολλά υποσχόμενες τεχνικές κάλυψης των PCM έχουν μελετηθεί από τους Salyer et al., και εφαρμοσθεί σε solite ρηχά μπλόκ τσιμέντου.

Αυτές είναι, η εμβάπτιση των PCM σε πορώδη υλικά, η απορρόφηση του PCM από διαχωρισμένη και ειδική silica και ο διασκορπισμός PCM σε πολυμερικά κιβώτια. Οι συγγραφείς έχουν τονίσει ότι το PCM σε μορφή melt-mix, PCM/silica dry powder ή και PCM/HDPE(cross-linked pellets of high density polyethylene), όταν τοποθετούνται στο ρηχό-κεντρικό χώρο των μπλόκ τσιμέντου, μπορούν να φιλοξενήσουν μεγάλες ποσότητες PCM και αντίστοιχα πολύ μεγάλες ποσότητες θερμότητας προς αποθήκευση.

Ο Chahroudi, έχει ερευνήσει την πιθανή εφαρμογή των υλικών thermocrete. Το thermocrete είναι ένα αποθηκευτικό μέσο το οποίο συνδυάζει ένα κατάλληλο PCM με ένα πλέγμα τσιμέντου προκειμένου να επιτευχθεί μια σχεδόν ισοθερμική αποθήκευση. Τα μπλόκ από thermocrete έχουν αναλυθεί σε βάθος σε ότι αφορά τους τρόπους λειτουργίας, τις επιδόσεις και την εξοικονόμηση ενέργειας σε ποικίλες εφαρμογές. Τα υλικά αποθήκευσης ενέργειας με thermocrete κατασκευάζονται από τον συνδυασμό των PCM με τσιμέντο για την παραγωγή υλικών αποθήκευσης ενέργειας χαμηλού κόστους με δομικές και θερμοστατικές ιδιότητες.

Οι Lee et al μελέτησαν και παρουσίασαν τα αποτελέσματα μακροσκελών δοκιμών που συγκρίνουν την συμπεριφορά, σε ότι αφορά στην θερμική αποθήκευση, των συνηθισμένων μπλόκ τσιμέντου με αυτά που έχουν ενσωματωμένους δύο τύπους από PCM, το BS και την εμπορική παραφίνη – P.1.ύο τύποι μπλόκ μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν, το συνηθισμένο μπλόκ από τσιμέντο που παράγεται στο Portland, και το “autoclaved”μπλόκ, που αποτελείται από το ίδιο τσιμέντο αλλά έχει επιπλέον πυρίτιο. Η ενσωμάτωση επιτεύχθηκε με την εμβάπτιση του θερμού μπλόκ τσιμέντου σε λουτρό λιωμένου PCM ώσπου να απορροφηθεί η απαιτούμενη ποσότητα

PCM, περίπου 3.9- 8.6%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μπλόκ τσιμέντου είναι ικανά να αποθηκεύουν την λανθάνουσα και την αισθητή θερμότητα του ενσωματωμένου PCM καθώς και την αισθητή θερμότητα του τσιμέντου. Έτσι, επιτρέπεται η μετατόπιση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων από τις ώρες αιχμής.

Οι Hadjievna et al. έχουν εφαρμόσει την ίδια τεχνική ενσωμάτωσης για το τσιμέντο αλλά με sodium thiosulphate pentahydrate ($\text{Na}_2 \text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2 \text{O}$) ως PCM. Χρησιμοποίησαν πορώδες τσιμέντο και κατάφεραν να γεμίσουν τους περισσότερους πόρους του τσιμέντου σε ποσοστό περίπου 60%. Έτσι κατέληξαν στο ότι η μεγάλη περιοχή απορρόφησης του autoclaved πορώδους τσιμέντου λειτουργεί ως ένα πολύ καλό υποστηρικτικό πλέγμα για το $\text{Na}_2 \text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2 \text{O}$, που βελτιώνει την δομική του σταθερότητα κατά την διάρκεια των θερμικών φορτίσεων. Μία τέτοιου είδους μικροενσωμάτωση σε κάψουλες μπορεί να αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματική, αφού η ενσωμάτωση του PCM γίνεται με έναν σχετικά οικονομικό τρόπο και περιορίζονται τα προβλήματα που συνδέονται με την χρήση των ένυδρων αλάτων, όπως το φαινόμενο supercooling.[14,15]

6.2.6. PCM ενσωματωμένο σε ξύλο-ελαφρύ τσιμέντο

Το ξύλο-ελαφρύ τσιμέντο είναι ένα μίγμα από τσιμέντο, κομμάτια ξύλου ή σκόνη από πριόνι, το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνάει το 15% κατά βάρος, νερό και άλλες προσθήκες. Αυτό το μίγμα μπορεί να εφαρμοσθεί για την κατασκευή εσωτερικών και εξωτερικών τοίχων. Για ενσωμάτωση σε ξύλο-ελαφρύ τσιμέντο, δύο είδη PCM, το Rubihterm GR40, 1-3mm και το GR50, 0.2-0.6mm εξετάστηκαν από τους Mehling et al. Αποδείχτηκε ότι τα PCM μπορούν να συνδυαστούν με ξύλο-ελαφρύ τσιμέντο και ότι οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν φαίνεται να μεταβάλλονται σημαντικά. Μάλιστα, ανέφεραν τα εξής προτερήματα:

- Θερμική αγωγιμότητα : λ ανάμεσα 0.15 και 0.75 W/mK
- Ηχομόνωση
- Μηχανικές ιδιότητες: πυκνότητα ανάμεσα στα 600 και 1700 kg/m³
- 166
- Θερμική ικανότητα c_p ανάμεσα 0.39-0.48 kJ/kg K για $\rho=1300 \text{ kg/m}^3$
- Πυκνότητα 60-70% της τιμής του καθαρού τσιμέντου(0.67 kL/kg K για $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$)

Η ενσωμάτωση του PCM παρουσιάζει δύο βασικά προτερήματα, πρώτον αυξάνει την θερμική ικανότητα αποθήκευσης και δεύτερον ότι οδηγεί στην κατασκευή πιό ελαφριών και πιό λεπτών στοιχείων με βελτιωμένη θερμική συμπεριφορά.[14]

6.2.7. Θερμικά αυξημένος σκελετός τοίχου με pcm

Οι Meng Zhang et al, παρουσίασαν την ανάπτυξη ενός θερμικά αυξημένου σκελετού τοίχου, ο οποίος μειώνει τα μέγιστα της ζήτησης κλιματισμού σε κατοικίσιμα κτίρια. Ένας σκελετός τοίχου που περιέχει υψηλή κρυσταλλική παραφίνη ως PCM, μέσω μακροενσωμάτωσης σε κάψουλες είναι αυτός που αναπτύχθηκε, κατασκευάστηκε και αξιολογήθηκε. Αυτός ο πρώτοτυπος τοίχος ονομάστηκε phase change frame wall (PCFW), και τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι ο PCFW μειώνει τα μέγιστα φορτία θερμορροής από τον τοίχο κατά 38%. Σε κτιριακές εφαρμογές, αυτό θα μπορούσε να μεταφραστεί σε χαμηλότερα φορτία κλιματισμού που απαιτούνται από τους τοίχους και τα ταβάνια, σε μετατόπιση μέρους του θερμικού φορτίου σε άλλες ώρες της ημέρας και στην σχετικά σταθερή εσωτερική θερμοκρασία του χώρου. Το χειμώνα, θερμότητα από τον εξοπλισμό-πηγή μπορεί να αποθηκεύεται στο PCFW, η οποία αργότερα θα αποδίδεται προς θέρμανση του σπιτιού, μειώνοντας έτσι τις φορτίσεις του εξοπλισμού, και επομένως αυξάνοντας την αποδοτικότητά του και τον χρόνο ζωής του.[14]

6.3. Ενεργητικά ηλιακά συστήματα με pcm

6.3.1. Εισαγωγή

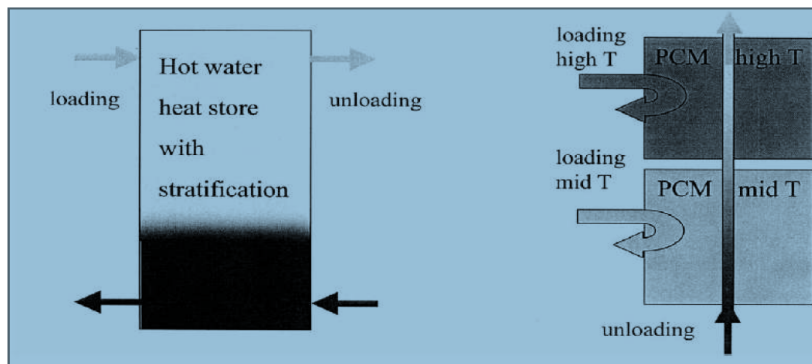
Η αποθήκευση θερμότητας αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα για την υψηλής κλίμακας και μακροπρόθεσμη ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση των οικιών και την ψύξη τους, σε οποιοδήποτε καιρικές συνθήκες. Τα περισσότερα συστήματα αποθήκευσης που είναι διαθέσιμα στην αγορά, χρησιμοποιούν το νερό ως μέσο αποθήκευσης. Στόσο, η βελτίωση της αποθηκευτικής ικανότητας είναι απαραίτητη, ώστε να βελτιωθεί η απόδοση των περισσότερων συστημάτων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί, είτε αυξάνοντας την πυκνότητα αποθήκευσης (με αύξηση του όγκου ώστε να μπορεί να αποθηκευτεί και να απελευθερωθεί περισσότερη ενέργεια), είτε μειώνοντας το κόστος της αποθήκευσης (μείωση απωλειών, χρήση άλλων υλικών, χρήση άλλων σχεδίων κατασκευής).

Παρόλο που το νερό είναι φθηνό και αποτελεσματικό μέσο για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας, την περίοδο αυτή, μελετώνται άλλα είδη. Ανάμεσα στις νέες τεχνολογίες που μελετώνται η χρήση λανθάνουσας θερμότητας και χημικής αποθήκευσης είναι οι πιο δημοφιλείς. Η ιδέα που απασχολεί την παρούσα εργασία είναι η προσθήκη ενός ΥΑΦ σε μια δεξαμενή ζεστού νερού.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές και πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί, καθώς και η σύγκριση της απόδοσης των δεξαμενών στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν τα ΥΑΦ, με τις συμβατικές δεξαμενές αποθήκευσης ενέργειας.

6.3.2. Διαστρωμάτωση και pcm

Συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας τα οποία διατηρούν το θερμό και το κρύο νερό χωριστά μέσω της διαστρωμάτωσης λόγω βαρύτητας, είναι δημοφιλή σε εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης σε χαμηλές και μεσαίες θερμοκρασίες. Οι κύριοι λόγοι είναι η απλότητά τους και το χαμηλό χρηματικό τους κόστος. Αυτό το είδος αποθήκευσης είναι γνωστό ως θερμική διαστρωμάτωση και έχει μελετηθεί διεξοδικά. Αυτό το σύστημα αποθηκεύει αισθητή θερμότητα στο νερό για εφαρμογές μικρού χρονικού διαστήματος.



Σχήμα 6.4: Αποθήκευση θερμότητας με επίπεδα διαφορετικών θερμοκρασιών: αριστερά με ρευστό θερμότητας το νερό, δεξιά με χρήση ΥΑΦ.

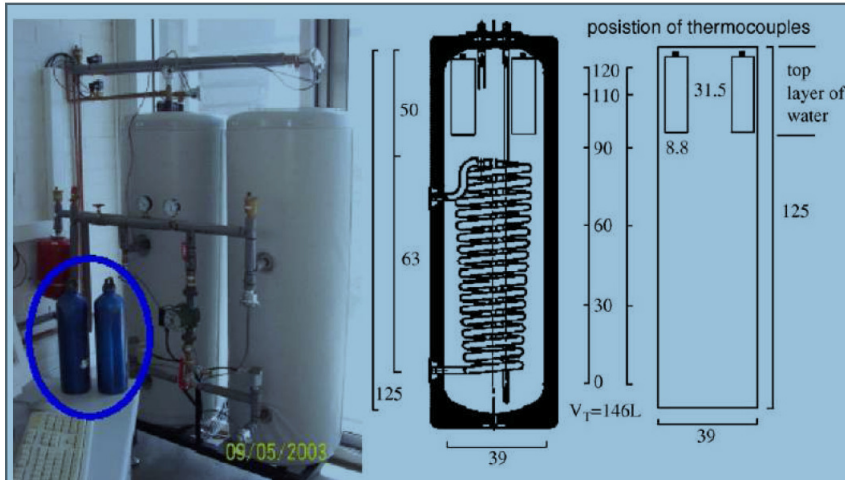
6.3.3. Πειράματα με pcm σε ηλιακά θερμικά συστήματα

Έχουν διεξαχθεί δοκιμές κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας σε ολοκληρωμένα ηλιακά θερμικά συστήματα. Κάποια από τα πειράματα αυτά είναι τα εξής:

6.3.3.1. Πείραμα 1^ο στο Πανεπιστήμιο Lleida της Ισπανίας

Περιγραφή της ηλιακής εγκατάστασης:

Προκειμένου να εξεταστεί η χρήση του ΥΑΦ σε ένα πραγματικό σύστημα, κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο της πόλης Lleida, στην Ισπανία, ένας πειραματικός ηλιακός σταθμός, ο οποίος παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Σχήμα 6.5: Δεξαμενή θερμού νερού χρήσης για οικία με ΥΑΦ για την εκτέλεση του πειράματος

Ο σταθμός είχε δυο θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες, δυο δεξαμενές ζεστού νερού των 146 L και έναν ηλεκτρικό θερμαντήρα έξω από τις δεξαμενές ο οποίος επέτρεπε να παραχθεί ηλεκτρική θέρμανση συγκεκριμένου μεγέθους όποτε χρειαζόταν. Οι δύο δεξαμενές νερού ήταν πανομοιότυπες, αλλά η μια ήταν τροποποιημένη για να εισαχθεί σε αυτήν το ΥΑΦ. Η μια δεξαμενή ήταν εξοπλισμένη με θερμοηλεκτρικά ζεύγη, όπως φαίνεται στην εικόνα, για να μετράται η θερμοκρασία μέσα στο νερό σε διάφορα επίπεδα. Αυτό επέτρεπε να ελέγχεται αν το νερό μέσα στη δεξαμενή ήταν διαχωρισμένο σε στρώματα. Τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη ήταν τοποθετημένα στον κατακόρυφο αγωγό που εκτινόταν στο μεγαλύτερο μέρος του εσωτερικού της δεξαμενής και δρούσε ως είσοδος του κρύου νερού.

Η εγκατάσταση των δοκιμών μπορούσε να λειτουργεί συνεχώς με το ηλιακό σύστημα, με την προϋπόθεση ότι η βασική αντλία λειτουργεί όταν η θερμοκρασία του νερού της δεξαμενής είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία των συλλεκτών. Από την άλλη πλευρά, το σύστημα μπορούσε να λειτουργήσει σποραδικά με τον θερμικό συλλέκτη.

Η ηλιακή εγκατάσταση είχε σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο που μπορούσε να προσομοιωθεί ένα πρωινό ντους ή ένα ζεστό βραδινό μπάνιο. Ένα πρόγραμμα στον υπολογιστή επέτρεπε τον έλεγχο του συστήματος ώστε να προσομοιώνονται συνήθεις διεργασίες ενός νοικοκυριού.

Γεωμετρία της μονάδας του ΥΑΦ:

Το πρώτο βήμα ήταν να αναλυθεί η σωστή γεωμετρία του ΥΑΦ και της επίδρασής του στην απόδοση της δεξαμενής νερού. Η διαδικασία παγώματος του νερού από τους 65 °C στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος είχε προσομοιωθεί. Το νερό αποκτούσε λόγω θερμικών απωλειών τη

θερμοκρασία του περιβάλλοντος με μόνωση 1,5 W/m²K. Επιπλέον, είχαν γίνει αριθμητικές προσομοιώσεις του συστήματος.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης η λύση που προέκυψε ήταν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι κύλινδροι στην κορυφή της δεξαμενής νερού, αντί για μόνο έναν. Για το λόγο αυτό διεξήχθησαν διάφορα πειράματα με δύο, τέσσερα και έξι μονάδες ΥΑΦ στην πραγματική εγκατάσταση.

Οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αλουμίνια μπουκάλια του εμπορίου γεμάτα με σχεδόν ίσες ποσότητες μίγματος ΥΑΦ- γραφίτη. Οι διαστάσεις των μονάδων των ΥΑΦ ήταν 8,8 cm διάμετρος και 31,5 cm ύψος, δίνοντας 1,5 L χωρητικότητα.

Είδος ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε:

Όπως σε κάθε άλλη εφαρμογή, η επιλογή του ΥΑΦ που θα χρησιμοποιούνταν ήταν ένα κρίσιμο ζήτημα. Η θερμοκρασία του νερού που αποθηκεύεται ως ζεστό νερό σε μια οικία είναι περίπου 60 °C. Για το λόγο αυτό θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ πρέπει να είναι γύρω στους 60 °C. Στην αγορά υπάρχουν διάφορα ΥΑΦ με αυτή τη θερμοκρασία τήξης. Διεξήχθησαν πειράματα με παραφίνες τριένυδρου οξικού νατρίου (sodium acetate trihydrate), και με λιπαρά οξέα και τελικά το τριένυδρο οξικό νάτριο, επιλέχθηκε για τις δοκιμές.

Για την εκτέλεση του πειράματος ήταν πολύ σημαντικό το μέγεθος της θερμικής συμπεριφοράς του ΥΑΦ. Πειράματα έχουν δείξει ότι υπάρχουν πολλοί τρόποι για τη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς στα ΥΑΦ. Παρ' ολ' αυτά, ο γραφίτης αποδείχθηκε η καλύτερη επιλογή σε αυτού του είδους τις εφαρμογές. Γι' αυτό επιλέχθηκε ένα μίγμα ΥΑΦ- γραφίτη σε κόκκους από περίπου 90 % κατ' όγκο νάτριο και 10 % κατ' όγκο γραφίτη ως ΥΑΦ. Επιλέχθηκε, επίσης, για το χαμηλό χρηματικό του κόστος και για τα θερμικά του δεδομένα τα οποία είναι τα εξής:

- πυκνότητα: 1.35- 1.4 kg/L
- σημείο τήξης: 58 °C
- θερμοχωρητικότητα: 2.5 kJ/kg K
- ενθαλπία: 180- 200 kJ/kg
- θερμική αγωγιμότητα: 2- 5 W/m K

Η συνολική ποσότητα ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε ήταν περίπου 2.1 kg, δηλαδή δυο μονάδες των 1.5 L, που αποτελούσαν το 2.05 % του συνολικού όγκου της δεξαμενής.

Δοκιμές που έγιναν στο σύστημα:

Οι δοκιμές που έγιναν στο σύστημα κατατάσσονται στη διαδικασία παγώματος, διαδικασία αναθέρμανσης και ηλιακή λειτουργία. Η διαδικασία παγώματος περιλάμβανε τη θέρμανση του νερού της δεξαμενής μέχρι τους 80 °C και στη συνέχεια το φυσικό πάγωμα μέσω του τοιχώματος της δεξαμενής. Η δοκιμή αυτή έγινε χωρίς τη χρήση των ηλιακών συλλεκτών.

Στη δοκιμή αναθέρμανσης η δεξαμενή νερού θερμάνθηκε μέχρι τους 80 °C για να διασφαλιστεί η τήξη του ΥΑΦ και στη συνέχεια η δεξαμενή άδειαζε και ξαναγέμιζε νερό από το δίκτυο. Μετά από κάποιο χρόνο, η θερμοκρασία του νερού στην κορυφή της δεξαμενής αυξήθηκε. Αυτό συνέβη επειδή το νερό αυτό αναθερμάνθηκε από τη μονάδα του ΥΑΦ.

Η τρίτη ομάδα δοκιμών εκτελέστηκε με το ηλιακό σύστημα. Η εγκατάσταση λειτουργούσε με τους ηλιακούς συλλέκτες, την αντλία και τις δεξαμενές. Όταν το σύστημα λειτουργούσε με τους συλλέκτες, προσομοιωνόταν ένα πρωινό ντους 5 λεπτών για να αδειάσει το σύστημα. Στη συνέχεια, κρύο νερό έρρεε στη δεξαμενή και η κορυφή της δεξαμενής αναθερμαινόταν από την ενέργεια που είχε αποθηκευτεί στις μονάδες του ΥΑΦ.

Αποτελέσματα του πειράματος:

Χρησιμοποιώντας δύο μονάδες, περίπου 2.1 kg ΥΑΦ, με όγκο 3 L, κάπου 2.05 % του όγκου της δεξαμενής, υπολογίζεται αύξηση της τάξης του 40 % στην πυκνότητα ενέργειας της δεξαμενής(που οριζόταν πριν με 1 K διαφορά θερμοκρασίας) και 6 % με 8 K διαφορά θερμοκρασίας. Συγκρίνοντας την αρχική θερμοκρασία αλλαγής φάσης σε στερεά κατάσταση στους 54 °C, είναι εμφανές ότι τα δυο στρώματα στην κορυφή, κρατούσαν τη θερμοκρασία κοντά στους 54 °C για μια χρονική περίοδο μεταξύ 10 και 12 ωρών.

Χρησιμοποιώντας τέσσερις μονάδες, περίπου 4.2 kg ΥΑΦ, με όγκο 6 L, κάπου 4.1 % του όγκου της δεξαμενής, η αύξηση της πυκνότητας ενέργειας με 1 K διαφορά θερμοκρασίας ήταν περίπου 57.2 % και με 8 K διαφορά θερμοκρασίας ήταν 12 %. Τα αποτελέσματα ήταν όμοια στην ηλιακή λειτουργία μεταξύ τεσσάρων και έξι μονάδων ΥΑΦ.

Χρησιμοποιώντας έξι μονάδες, 6.3 kg ΥΑΦ, με 9 L, κάπου 6.16 % του όγκου της δεξαμενής, η πυκνότητα ενέργειας αυξήθηκε 66.7 % με 1 K διαφορά θερμοκρασίας και 16.4 % με 8 K διαφορά θερμοκρασίας σε χρονικό διάστημα μεταξύ 10- 12 ωρών, όταν τα στρώματα 90, 110 και 120 cm ήταν κοντά στους 54 °C, αλλά με υψηλότερες θερμικές απώλειες και έναν επιπλέον χρόνο περίπου 45 λεπτών με ζεστό νερό(περίπου 36-38 °C) που θερμαινόταν από τις μονάδες των ΥΑΦ.

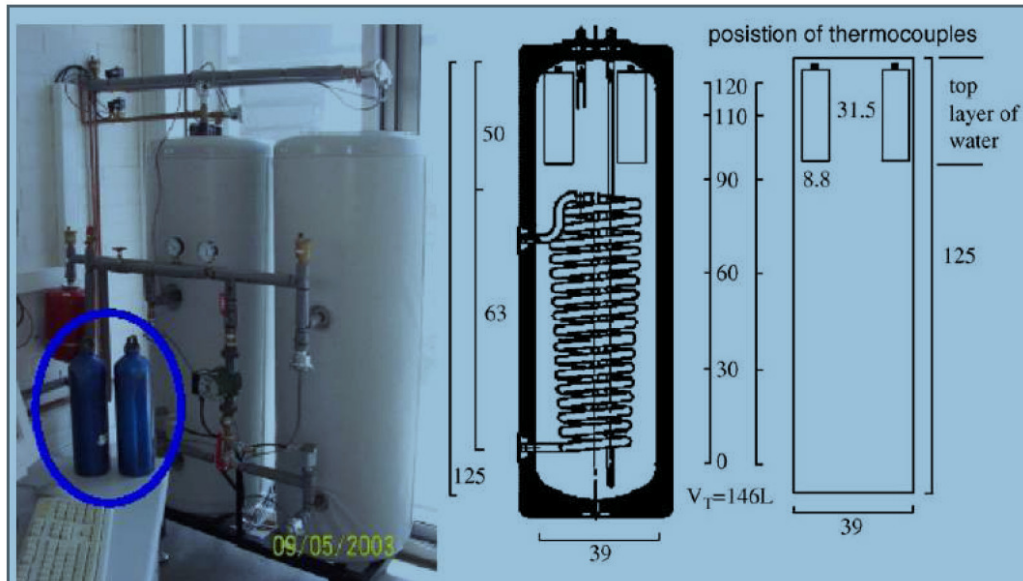
6.3.3.2. Πείραμα 2^ο στο Πανεπιστήμιο Lleida της Ισπανίας

Το πείραμα που παρουσιάζεται στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε επίσης στο Πανεπιστήμιο της πόλης Lleida στην Ισπανία, σε παρόμοια εγκατάσταση με το πρώτο πείραμα.

Περιγραφή της ηλιακής εγκατάστασης:

Η δεξαμενή που χρησιμοποιήθηκε είχε χωρητικότητα 150 L. Οι διαστάσεις της ήταν 0.125 m ύψος και 0.78 m διάμετρος. Στην εικόνα παρουσιάζεται η δεξαμενή, καθώς και η μονάδα του ΥΑΦ που

χρησιμοποιήθηκαν. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας έγιναν με θερμοηλεκτρικά ζεύγη τοποθετημένα στον πάτο της δεξαμενής νερού σε αποστάσεις 0.30, 0.60, 0.90, 1.10 και 1.20 m. Θερμοηλεκτρικά ζεύγη τοποθετήθηκαν επίσης μέσα στο κέντρο κάθε μονάδας ΥΑΦ. Η ακρίβεια που χρησιμοποιήθηκε ήταν ± 0.1 °C.



Σχήμα 6.6: Δεξαμενή θερμού νερού χρήσης για οικία με ΥΑΦ για την εκτέλεση του πειράματος.

Γεωμετρία της μονάδας του ΥΑΦ:

Χρησιμοποιήθηκαν τρεις μονάδες. Κάθε μονάδα ήταν κυλινδρικής γεωμετρίας με εξωτερική διάμετρο 0.176 m και ύψος 0.315 m. Το ΥΑΦ θερμάνθηκε 20 °C κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του, πριν τοποθετηθεί στις μονάδες, προκειμένου να αποφευχθούν τυχών προβλήματα που θα μπορούσαν να προκύψουν από τη διαστολή όγκου.

Η αναλογία όγκου των μονάδων του ΥΑΦ στην δεξαμενή αποθήκευσης ήταν 3 %, ενώ η αναλογία όγκου των μονάδων του ΥΑΦ στο ανώτερο επίπεδο της δεξαμενής αποθήκευσης υπολογίστηκε στο 17%.

Είδος Υ.Α.Φ. που χρησιμοποιήθηκε:

Χρησιμοποιήθηκαν τρία κιλά μίγματος παραφίνης και διάφορων λιπαρών οξέων (στεατικό οξύ (PS), παλμιτικό (PP), μυριστικό οξύ (SM)) με αναλογία βάρους 80:20. Προστέθηκε γραφίτης (10% κατά βάρος) στο μίγμα ΥΑΦ προκειμένου να αυξηθεί η μεταφορά θερμότητας στις μονάδες του ΥΑΦ. Τα ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονταν από την εταιρεία Rubitherm και ήταν paraffin RT54 και ranreac sintesis (λιπαρό οξύ). Οι θερμικές ιδιότητες του μίγματος των ΥΑΦ δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.1: Ιδιότητες του μείγματος ΥΑΦ

PCMs	Melting range (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Density (g/ml)		Volume expansion (%)
			Liquid	Solid	
Paraffin-stearic acid (80%-20%)	49-53	150	0.803 (± 0.015) (70 °C)	0.913 (± 0.015) (40 °C)	12 (± 3.5)
Paraffin-palmitic acid (80%-20%)	48-52	150	0.796 (± 0.014) (70 °C)	0.902 (± 0.02) (40 °C)	12 (± 3.7)
Stearic-myristic acid (80%-20%)	61-65	190.87	0.873 (± 0.02) (70 °C)	0.944 (± 0.02) (40 °C)	10 (± 3.02)

Δοκιμές που έγιναν στο σύστημα:

Τα πειράματα παγώματος ξεκίνησαν αρχικά με τη θέρμανση του νερού μέσα στη δεξαμενή σε μια θερμοκρασία που προσέγγιζε τους 70 °C. Μετά η δεξαμενή αφέθηκε να κρυώσει μέχρι η θερμοκρασία να φθάσει κάτω από το σημείο τήξης του ΥΑΦ. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας έγιναν σε διαστήματα των 10 λεπτών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Τα πειράματα επαναλήφθηκαν με και χωρίς τις μονάδες των ΥΑΦ. Για τα πειράματα αναθέρμανσης η ηλιακή δεξαμενή οικιακού θερμού νερού θερμάνθηκε κατά προσέγγιση μέχρι τους 70 °C ξανά και το νερό από το ανώτερο επίπεδο με την υψηλότερη θερμοκρασία εξήχθη για 5 με 10 λεπτά, προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση του ΥΑΦ στη θερμική απόδοση της δεξαμενής. Καθώς το ζεστό νερό εξαγόταν, γίνονταν ταυτόχρονα τροφοδοσία κρύου νερού στο σύστημα από τον πάτο της δεξαμενής. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας έγιναν σε διαστήματα των 10 δευτερολέπτων κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Αποτελέσματα του πειράματος:

Στα πειράματα παγώματος, ο μέσος όρος της θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής έπεσε κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ μέσα σε 6 με 12 ώρες. Η μεγαλύτερη πτώση ήταν για το μίγμα PS και η χαμηλότερη ήταν για το μίγμα SM. Παρατηρήθηκε ότι οι θερμοκρασίες γύρω από το σημείο τήξης ήταν 2.5- 3.5 °C υψηλότερες με τη χρήση ΥΑΦ.

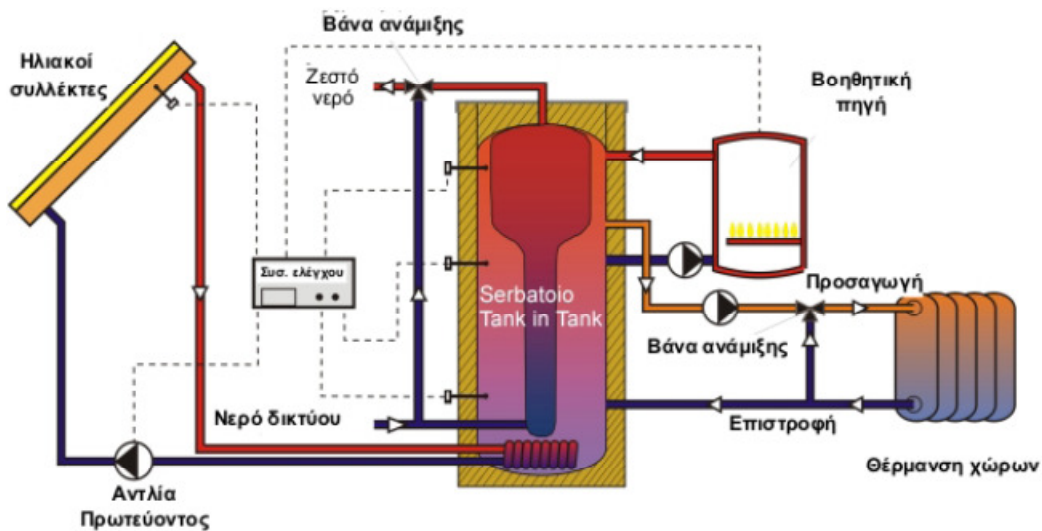
Στα πειράματα αναθέρμανσης παρατηρήθηκε ότι 3 kg ΥΑΦ μπορούσαν να αυξήσουν τη θερμοκρασία 14 με 36 L νερού στο ανώτερο επίπεδο της δεξαμενής κατά 3 με 4 °C. Αυτή η επίδραση στη θερμοκρασία πραγματοποιήθηκε μέσα σε 10 με 15 λεπτά. Η αύξηση της θερμοκρασίας στα πειράματα αναθέρμανσης με το μίγμα PP ήταν μεγαλύτερη απ' ό,τι με το μίγμα PS, με παρόμοιο σημείο τήξης. Παρόλα αυτά, η ικανότητα επανόρθωσης του PS ήταν μεγαλύτερη από αυτή του PP.

Το τελικό συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε το πείραμα ήταν ότι το μίγμα PS έδωσε το καλύτερο αποτέλεσμα για τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης της ηλιακής δεξαμενής θέρμανσης οικιακού νερού χρήσης.

Κεφάλαιο 7: Συστήματα Combi

7.1. Γενικά χαρακτηριστικά

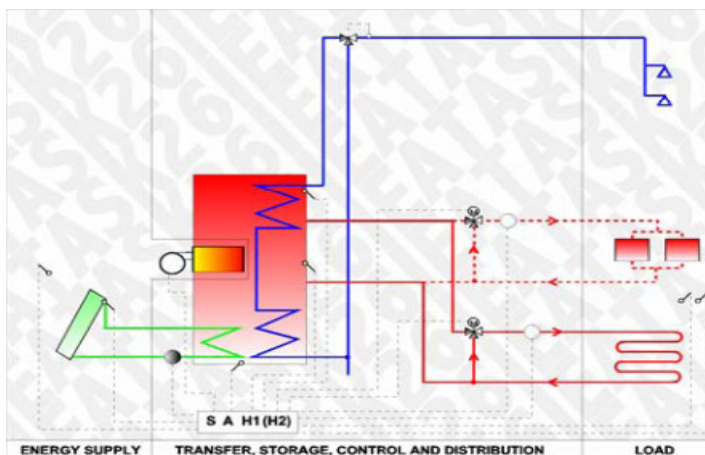
Τα ηλιακά συστήματα που υποβοηθούν τη θέρμανση χώρων (για τα οποία έχει επικρατήσει ο όρος “solar combi-systems” ή απλά “combi”), παρότι δεν είναι ακόμη ιδιαίτερα γνωστά στη χώρα μας, αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες όπως η Αυστρία και η Γερμανία. Αυτό το σύστημα προέρχεται από ένα τυποποιημένο ηλιακό σύστημα ζεστού νερού χρήσης (ZNX), με την διαφορά ότι επιφάνεια των συλλεκτών είναι μεγαλύτερη με σκοπό να δώσει ενέργεια σε ένα υπάρχον σύστημα θέρμανσης χώρων. Η σύνδεση μεταξύ του ηλιακού και του υπάρχοντος συστήματος γίνεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας που περιλαμβάνεται στον σωλήνα επιστροφής του βρόγχου θέρμανσης χώρων. Η αποθήκευση αφορά στην προετοιμασία του ZNX όπου υπάρχουν βυθισμένοι δύο εναλλάκτες θερμότητας. Στον πάτο της δεξαμενής βρίσκεται ο εναλλάκτης για τον ηλιακό συλλέκτη και στον κορυφή ο βοηθητικός. Μία τριπλή βαλβίδα κατευθύνει το αντιψυκτικό υγρό από τους συλλέκτες, είτε στον εναλλάκτη του ZNX είτε στον εναλλάκτη θέρμανσης χώρων. Το καλοκαίρι μια βυθισμένη ηλεκτρική θερμάστρα μπορεί να παρέχει την πρόσθετη θερμότητα στο ζεστό νερό που επιτρέπει στο λέβητα να κλείσει.[16,17]



Σχημα 7.1: Ενδεικτικό σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος combi[17]

7.2. Περιγραφή αγοράς των συστημάτων combi στην Ευρώπη

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, τα γενικά χαρακτηριστικά του είναι τα ίδια με αυτά ενός κοινού κεντρικού ηλιακού συστήματος. Στην συγκεκριμένη διάταξη, χρησιμοποιούνται δύο δοχεία αποθήκευσης· αυτό του ζεστού νερού χρήσης είναι εμβαπτισμένο στο μεγαλύτερο δοχείο (στο οποίο κυκλοφορεί το ίδιο υγρό –νερό- με αυτό του δικτύου θέρμανσης, δηλ. των καλοριφέρ). Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα συστήματα combi γνωρίζουν αξιόλογη εξάπλωση σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες. Συγκεκριμένα, το 2001 η συνολική επιφάνεια συλλεκτών που αφορούσε ηλιακά συστήματα combi σε οκτώ Ευρωπαϊκές χώρες (Γερμανία, Αυστρία, Γαλλία, Ολλανδία, Ελβετία, Σουηδία, Δανία και Νορβηγία) ήταν ίση με 340,000 m². Αν θεωρήσουμε την μέση επιφάνεια συλλεκτών ανά σύστημα ίση με 15 m², προκύπτει ότι ήδη από το 2001 υπήρχαν περίπου 22.600 εγκατεστημένα συστήματα combi στις χώρες που αναφέρθηκαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι, παράλληλα με την επέκταση της αγοράς, υπήρξε και δραστηριοποίηση της Διεθνούς Υπηρεσίας Ενέργειας (International Energy Agency -IEA) στον τομέα του Solar Heating & Cooling Programme στον οποίο δυστυχώς η χώρα μας δεν μετέχει. Στο πρόγραμμα που εκπονήθηκε (Task 26 –Solar Combisystems), έλαβαν μέρος 26 ειδικοί από 9 Ευρωπαϊκές χώρες και από τις ΗΠΑ, καθώς και 11 εταιρίες κατασκευής ηλιακών συστημάτων. Μεταξύ άλλων, έγινε ταξινόμηση, παρουσίαση και προσομοίωση των διαθέσιμων συστημάτων combi. Στο Task 26 (για το οποίο είναι διαθέσιμο αρκετά αξιόλογο υλικό από το site www.ieashc.org) αναδείχθηκε ότι υπάρχουν 10 βασικές τυπολογίες συστημάτων που παρουσιάζουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους. Για παράδειγμα, ορισμένα από τα συστήματα δεν διαθέτουν δοχείο αποθήκευσης για τη θέρμανση χώρων (αλλά χρησιμοποιούν το ίδιο το κτίριο ως «δοχείο»)· άλλα, όπως αυτό της εικόνας 2, παρουσιάζουν την ιδιαιτερότητα του ενσωματωμένου καυστήρα στο δοχείο αποθήκευσης.[17]



Εικόνα 2: Σύστημα combi με ενσωματωμένο καυστήρα στο δοχείο αποθήκευσης[17]

Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό ορισμένων Ευρωπαϊκών συστημάτων combi είναι ότι χρησιμοποιούν ηλιακές στέγες σε αυτή την περίπτωση δηλαδή το συλλεκτικό πεδίο αποτελεί και την στέγη του κτιρίου. Στην εικόνα 3, παρατηρούμε ένα τέτοιο σύστημα στο Gneis-Moos της Αυστρίας. Το γεγονός ότι το συγκεκριμένο σύστημα καλύπτει το 40% των συνολικών αναγκών για θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης αποτελεί μια καλή ένδειξη για τις δυνατότητες που έχουν τα συστήματα combi. Δεδομένου μάλιστα ότι το σύστημα έχει μετρηθεί αναλυτικά και ότι για την θέρμανση χώρων χρησιμοποιούνται κοινά σώματα καλοριφέρ.



Εικόνα 3: Ηλιακή στέγη σε Αυστριακό σύστημα combi [17]

7.3. Ενεργειακή απόδοση στον Ελλαδικό χώρο

Η απόδοση των συστημάτων combi εξετάστηκε σε διάφορες ελληνικές κλιματικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, έγιναν προσομοιώσεις για τις πόλεις της Σάμου, της Αθήνας και των Ιωαννίνων που ανήκουν στις κλιματικές ζώνες Α', Β' και Γ' αντίστοιχα α. Για κάθε πόλη, εξετάστηκε ένα φάσμα θερμικών αναγκών (από το κτίριο με ισχυρή μόνωση μέχρι και αυτό με ελλιπή μόνωση). Τέλος, για καθεμιά από τις παραπάνω περιπτώσεις εξετάστηκαν διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας του δικτύου θέρμανσης. Μετά από μια περιγραφή της μεθοδολογίας και του λογισμικού προσομοίωσης παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα.[17]

7.3.1. Μεθοδολογία

Προσομοιώθηκε κατοικία επιφάνειας 140 m² στην οποία κατοικούν 4 άτομα. Η κατοικία που επιλέχθηκε θα μπορούσε να είναι ένα διαμέρισμα σε μια πολυκατοικία ή μια μονοκατοικία. Οι τρεις χαρακτηριστικές τιμές του ειδικού θερμικού φορτίου χώρου (kWh/m²) που εξετάστηκαν, ανταποκρίνονται σε χαρακτηριστικές τιμές τριών ενεργειακών

κατηγοριών (Β, Γ και Δ) κτιρίων μεσαίου μεγέθους (π.χ. σε μια τριώροφη πολυκατοικία με δύο διαμερίσματα ανά όροφο). Για να γίνει σαφέστερη αυτή η επιλογή, στην παρακάτω λίστα παρουσιάζονται οι τιμές του ειδικού θερμικού φορτίου για την περίπτωση της Αθήνας και σχολιάζεται αυτό που η κάθε τιμή αντιπροσωπεύει στην πράξη:

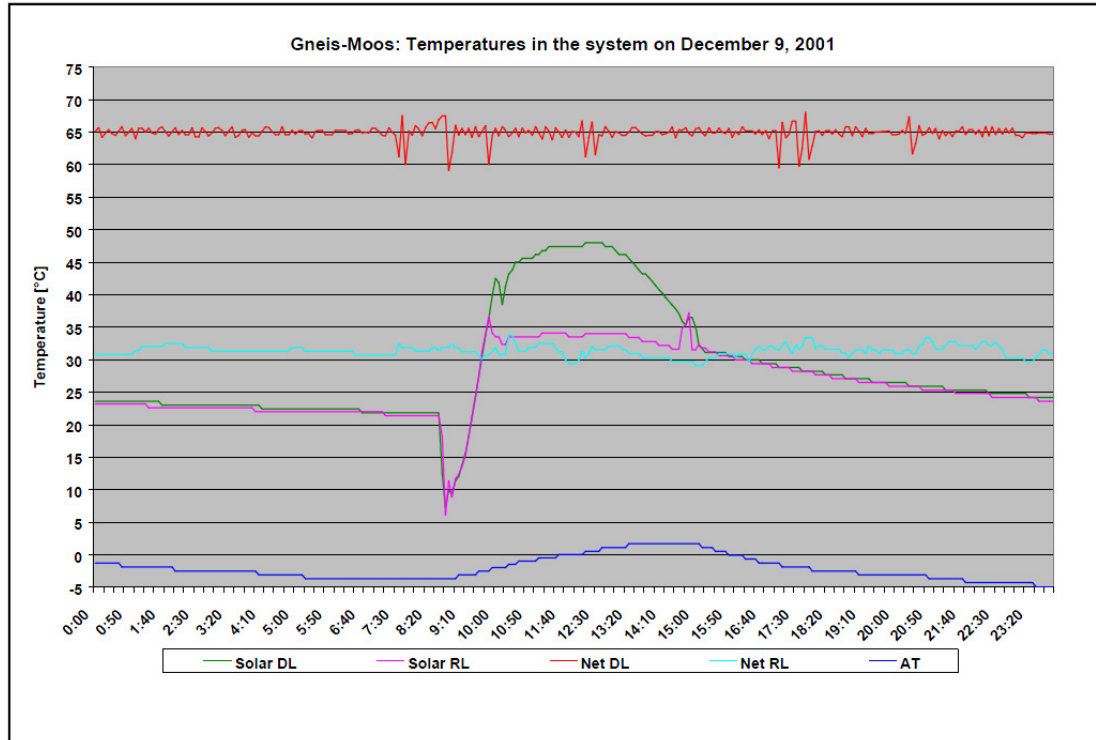
- Κτίριο με ετήσιες ανάγκες θέρμανσης 45 kWh/m² : κατατάσσεται ενεργειακά -κατά ΚΟΧΕΕ(3)- στην κατηγορία ενεργειακών απαιτήσεων θέρμανσης «Β». Στην πράξη πρόκειται για ένα ιδιαίτερα καλά μονωμένο κτίριο.
- Κτίριο με ετήσιες ανάγκες θέρμανσης 50 kWh/m² : κατατάσσεται στην κατηγορία ενεργειακών απαιτήσεων θέρμανσης «Γ». Στην πράξη πρόκειται για κτίριο στο οποίο έχει γίνει προσεκτική εφαρμογή του «ΓΟΚ». Πάντως, η κατηγορία «Γ» είναι η τελευταία εντός των αποδεκτών ορίων κατά «ΚΟΧΕΕ».
- Κτίριο με ετήσιες ανάγκες θέρμανσης 70 kWh/m²: κατατάσσεται στην κατηγορία ενεργειακών απαιτήσεων θέρμανσης «Δ». Στην πράξη πρόκειται για κτίριο το οποίο δεν είναι καλά μονωμένο (σε αυτή την κατηγορία ανήκουν συνήθως κτίρια στα οποία έχει γίνει εσφαλμένη προσπάθεια εφαρμογής του «ΓΟΚ»). Η κατηγορία «Δ» είναι εκτός των ορίων του «ΚΟΧΕΕ».

Όσον αφορά στο δίκτυο θέρμανσης, επιλέχθηκαν δύο διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας του πιο διαδεδομένου συστήματος θέρμανσης, δηλ. του υδραυλικού δικτύου των κλασικών θερμαντικών σωμάτων (καλοριφέρ). Οι δυο αυτοί τρόποι, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τις θερμοκρασίες προσαγωγής και επιστροφής, έχουν τα εξής χαρακτηριστικά.

- **Πρώτος τρόπος:** λειτουργία σε ψηλές θερμοκρασίες και χαμηλό ΔΤ. Επιλέχθηκαν οι ακόλουθες τιμές: 85° C προσαγωγή και 70° C επιστροφή. Στην πράξη πρόκειται για συνήθεις θερμοκρασίες σε παλιά δίκτυα θέρμανσης ή σε νεώτερα με μονοσωλήνιο σύστημα. Χαρακτηρίζονται από υψηλές ροές στα θερμαντικά σώματα.
- **Δεύτερος τρόπος:** λειτουργία που επιτρέπει σχετικά χαμηλή θερμοκρασία επιστροφής και υψηλό ΔΤ. Επιλέχθηκαν οι ακόλουθες τιμές: 70° C προσαγωγή και 40° C επιστροφή. Στην πράξη, δεν εφαρμόζεται συχνά

αυτός ο τρόπος λειτουργίας στην Ελλάδα μια και στο συμβατικό σύστημα θέρμανσης η χαμηλή θερμοκρασία επιστροφής δεν είναι πλεονέκτημα (μπορεί να είναι μάλιστα και μειονέκτημα για τον καυστήρα). Είναι όμως ένας εφικτός τρόπος λειτουργίας αρκεί να χρησιμοποιηθεί ένα εξισορροπημένο κύκλωμα σωμάτων θέρμανσης με παράλληλη σύνδεση και χαμηλές ροές. Μια τέτοια συνδεσμολογία είναι συμβατή με την τοποθέτηση θερμορυθμιστικών βαλβίδων οι οποίες μπορούν να εξασφαλίσουν αρκετή θερμική αυτονομία στο κάθε δωμάτιο της κατοικίας. Όσον αφορά τη θερμοκρασία επιστροφής (40°) που μπορεί να φανεί εκ πρώτης όψεως χαμηλή στους ειδικούς του κλάδου, ας

σημειωθεί ότι σε παρόμοια συστήματα (με κλασικά σώματα θέρμανσης) στην Αυστρία έχουν επιτευχθεί και ακόμη χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση του ηλιακού συστήματος στο Gneis-Moos (Αυστρία). Το διάγραμμα της εικόνας 4, προέκυψε από μετρήσεις που έγιναν την 9η Δεκεμβρίου 2001. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία προσαγωγής (Net DL) είναι πρακτικά ίση με 65° ενώ εκείνη της επιστροφής (Net RL) κυμαίνεται μεταξύ 29 και 33° C.[17]



Εικόνα 4: Θερμοκρασίες δικτύων στο ηλιακά υποβοηθούμενο σύστημα θέρμανσης του Gneis-Moos(2) (Αυστρία).[17]

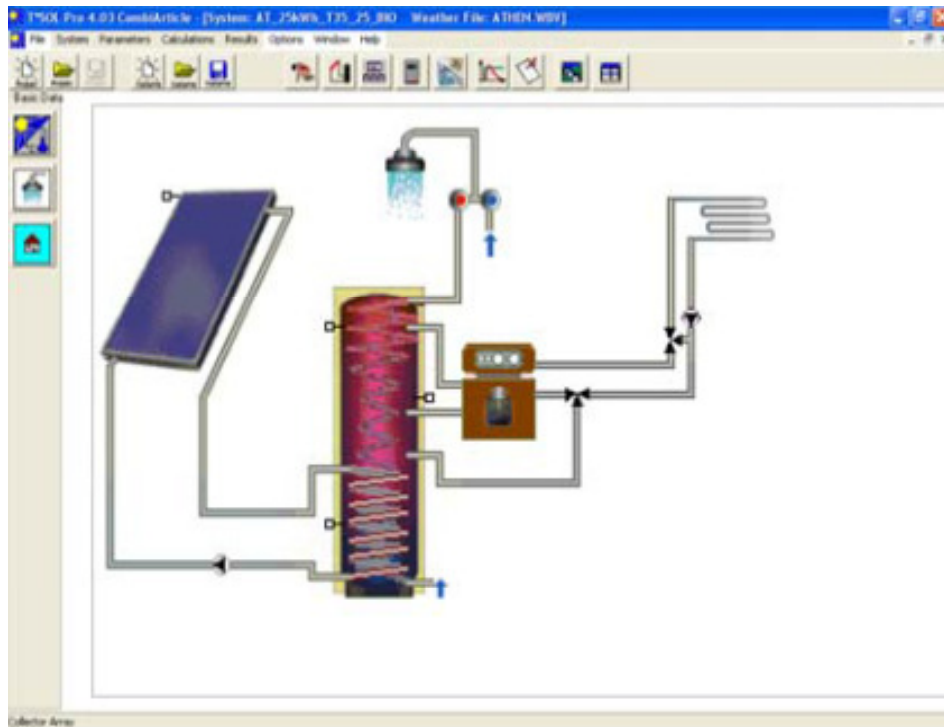
ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ

Solar DL: προσαγωγή ηλιακών προς δοχείο αποθήκευσης, **Solar RL:** επιστροφή ηλιακών **Net DL:** προσαγωγή δικτύου προς κατοικίες, **Net RL:** επιστροφή δικτύου **AT:** Θερμοκρασία περιβάλλοντος.

7.3.2. Προσομοίωση με TSOL

Για τις προσομοιώσεις επιλέχθηκε το πρόγραμμα TSOL(4). Η επιλογή του συγκεκριμένου προγράμματος έγινε με βάση το εξής κριτήριο: τον καλύτερο δυνατό συνδυασμό αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και φιλικότητας προς τον χρήστη. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο λεπτομερή και περίπλοκα λογισμικά (π.χ. TRNSYS). Με τον τρόπο αυτό γίνεται φανερό ότι υπάρχουν προσιτά εργαλεία για την

προσομοίωση αλλά και για τη διαστασιολόγηση των συστημάτων combi. Η εικόνα 5, δείχνει τη σχηματική παράσταση (έτσι όπως παρουσιάζεται στην οθόνη του υπολογιστή) της τυπολογίας του συστήματος combi που επιλέχθηκε από την «βιβλιοθήκη» του T-SOL. Ο κωδικός του είναι «A5» και η κύρια ιδιαιτερότητά του σε σχέση με τις άλλες διαθέσιμες τυπολογίες είναι ότι διαθέτει ένα και μόνο δοχείο αποθήκευσης στο οποίο το ζεστό νερό χρήσης θερμαίνεται καθώς περνάει μέσα από σπειροειδή εναλλάκτη εμβαπτισμένο στο πάνω μέρος του δοχείου.



Εικόνα 5: Σχηματική παράσταση του συστήματος combi A5 στην οθόνη του T-SOL[17].

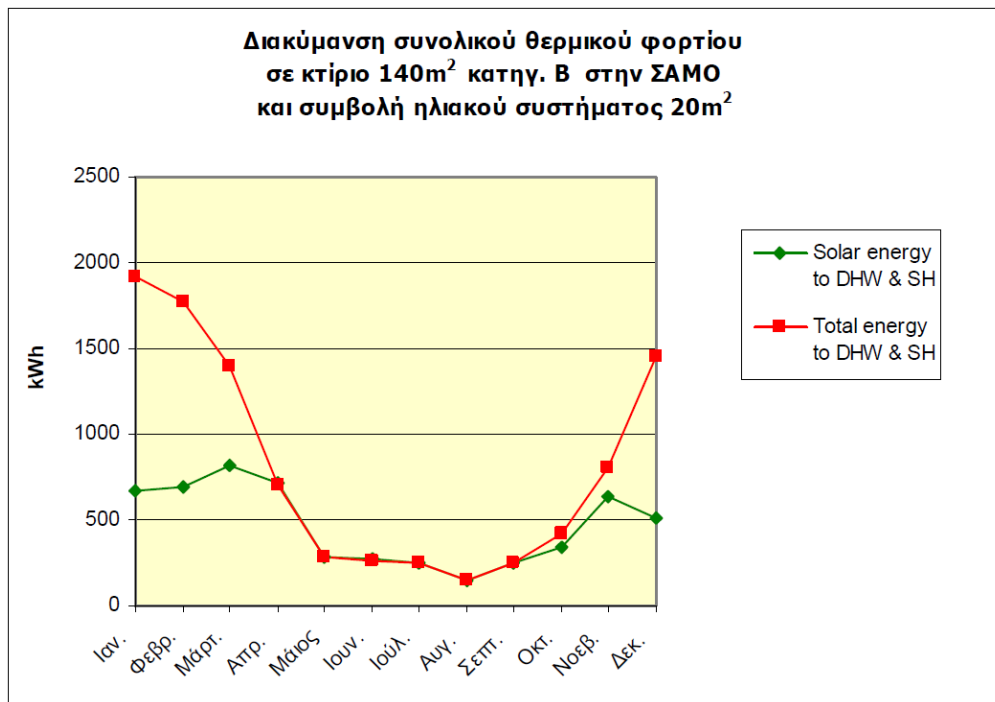
Στη συνέχεια παρατίθενται οι κυριότερες τιμές των παραμέτρων και οι αποδοχές που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις με το πρόγραμμα T-SOL:

- Τύπος συλλέκτη: επίπεδος με επιλεκτικό απορροφητή.
- Καμπύλη απόδοσης:
 $\eta = 0.78 - 3.8 * (T_m - T_a)/G - 0.03 * (T_m - T_a)^2/G$, όπου
 - η = στιγμιαία απόδοση του συλλέκτη (%)
 - T_m = μέση θερμοκρασία απορροφητή [$^{\circ}$ C]
 - T_a = θερμοκρασία περιβάλλοντος [$^{\circ}$ C] και
 - G = προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία [W/m^2] στο επίπεδο των συλλεκτών. Οι αριθμητικοί συντελεστές έχουν τις κατάλληλες μονάδες ώστε ο κάθε όρος της εξίσωσης να είναι αδιάστατος.
- Επιφάνεια συλλεκτών: 20 m²

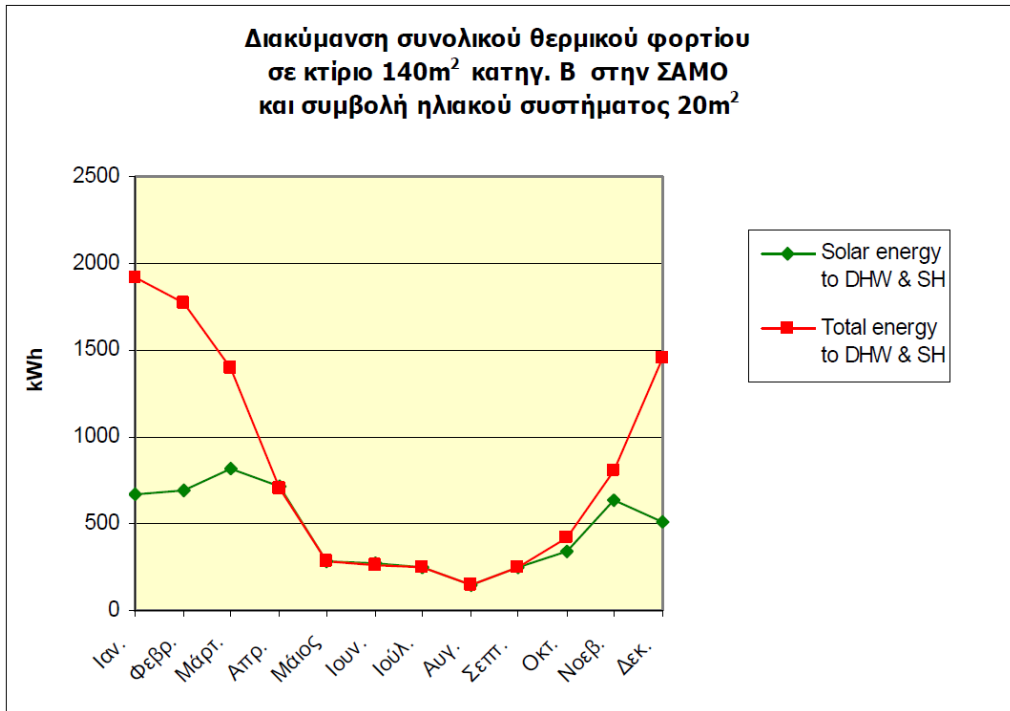
- Κλίση συλλεκτών ως προς το οριζόντιο επίπεδο: 55°.
- Προσανατολισμός: νότιος (αζιμούθιο ίσο με 0°) .
- Ποσοστό γλυκόλης στο πρωτεύον κύκλωμα: 30%.
- Δοχείο αποθήκευσης: 2 m³.
- Μέση ημερήσια κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης 160 λίτρα (ίση με 40 λίτρα ανά άτομο).
- Θερμοκρασία νερού δικτύου: 10° C τον Φεβρουάριο και 25° C τον Αύγουστο.
- Μηνιαίο προφίλ κατανάλωσης ζεστού νερού χρήσης: για όλους τους μήνες η κατανάλωση είναι ίδια εκτός από τον Αύγουστο όπου θεωρήθηκε μείωση κατά 70% (λόγω διακοπών).
- Επιθυμητή θερμοκρασία χώρου: 20° C.
- Περίοδος θέρμανσης: από 15 Οκτωβρίου ως τέλος Απριλίου.

Ενεργειακά Αποτελέσματα και Σχόλια

Στην εικόνα 6, φαίνονται οι μηνιαίες τιμές του συνολικού θερμικού φορτίου καθώς και της ωφέλιμης ενέργειας του ηλιακού συστήματος (σε kWh). Τα αποτελέσματα προκύπτουν από προσομοίωση που έγινε για την κατοικία των 140m² σε κτίριο κατηγορίας Β (ακολουθώντας τον δεύτερο τρόπο θέρμανσης με 70/40° C) στην Σάμο και επιφάνεια συλλεκτών του ηλιακού συστήματος ίση με 20 m².



Εικόνα 6: Διακύμανση συνολικού θερμικού φορτίου σε κατοικία 140m² κατηγορίας Β στην Σάμο και συμβολή ηλιακού συστήματος 20m².



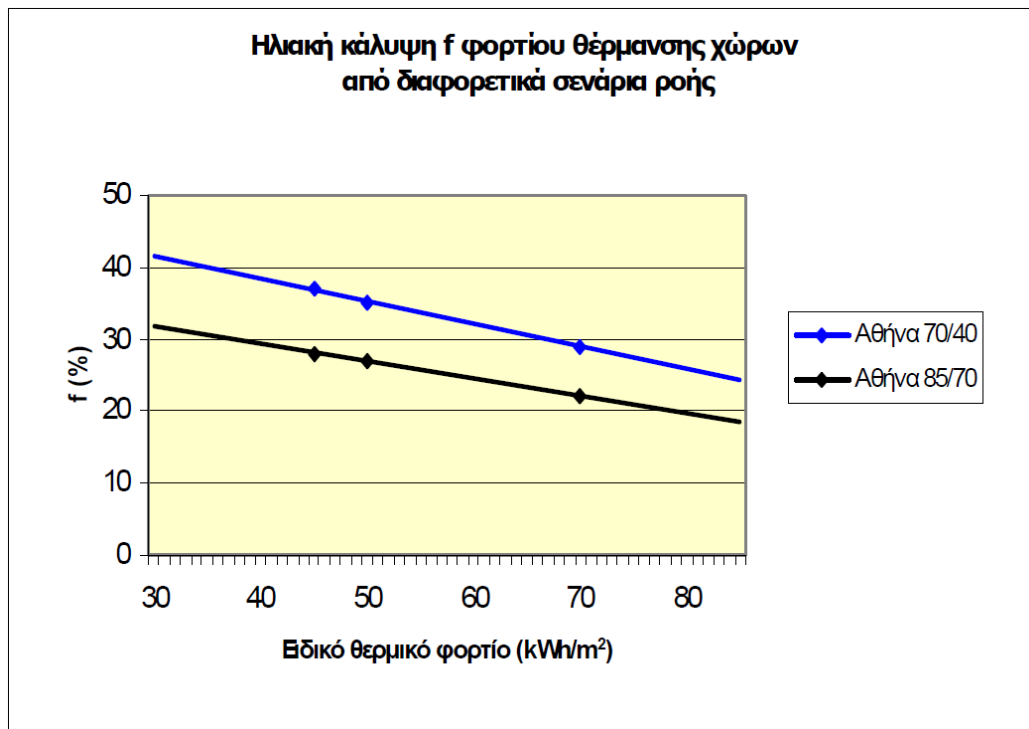
Εικ.7 Αποτελέσματα ηλιακής κάλυψης (f) φορτίου θέρμανσης χώρων, για τις κατηγορίες κτιρίων και τις πόλεις που εξετάστηκαν.

Στην εικόνα 7, παρουσιάζεται η κάλυψη «f» του φορτίου θέρμανσης από το ηλιακό σύστημα σαν συνάρτηση του ειδικού θερμικού φορτίου του χώρου· παρουσιάζονται δε οι τιμές και για τις τρεις πόλεις που εξετάστηκαν. Στην εικόνα 7 γίνεται φανερό ότι (όπως ήταν αναμενόμενο) το ποσοστό κάλυψης του φορτίου θέρμανσης χώρων από το ηλιακό σύστημα είναι τόσο μεγαλύτερο όσο πιο ευνοϊκή είναι η κλιματική ζώνη. Πέρα από αυτήν τη διαπίστωση, το διάγραμμα της εικόνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν οδηγός για την πρόβλεψη της ηλιακής κάλυψης (από ένα ηλιακό σύστημα 20 m² με τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν) σε ευρύ φάσμα περιοχών της Ελλάδας. Πιο συγκεκριμένα, για ένα άλλο νησί του κεντρικού Αιγαίου αναμένεται παρόμοια καμπύλη με αυτή της Σάμου, μια πόλη σαν την Πάτρα δίνει παρόμοια αποτελέσματα με την Αθήνα και τέλος η απόδοση του ηλιακού συστήματος στη Θεσσαλονίκη δεν θα διαφέρει πολύ από αυτήν των Ιωαννίνων. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το παραπάνω διάγραμμα αφορά στην κάλυψη της θέρμανσης χώρων και μόνο. Η κάλυψη του φορτίου για ζεστό νερό χρήσης είναι πολύ ψηλή σε όλα τα συστήματα combi· ειδικά δε για όσα εξετάστηκαν στο άρθρο, η τιμή αυτή κυμαίνεται γύρω στο 90%. Όσον αφορά στην ολική κάλυψη «fTOT» του φορτίου οι μέσες τιμές (των συνδυασμών κτιρίων και τρόπων θέρμανσης) που εξετάστηκαν είναι:

- Σάμος: fTOT = 56%
- Αθήνα: fTOT = 48%
- Ιωάννινα: fTOT = 37%

Το μέσο αποτέλεσμα για τα Ιωάννινα ($f_{TOT} = 37\%$), είναι παραπλήσιο με τις τιμές που παρουσιάζονται στο άρθρο Argiriou et al.(1) για παρόμοιες εγκαταστάσεις combi κοντά στην Κομοτηνή· η εγγύτητα των αποτελεσμάτων είναι αναμενόμενη δεδομένου ότι οι μετεωρολογικές συνθήκες για τις δυο περιοχές (Ιωαννίνων και Κομοτηνής) είναι παρόμοιες. Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση του τρόπου λειτουργίας του δικτύου θέρμανσης στην απόδοση του ηλιακού συστήματος. Η εικόνα 8 παρουσιάζει μόνο την περίπτωση της Αθήνας αλλά τα συγκριτικά αποτελέσματα είναι παρόμοια και για άλλες μετεωρολογικές συνθήκες.

Στην εικόνα 8, παρατηρείται με ευκρίνεια το προβάδισμα του συστήματος με ψηλό ΔT και χαμηλή θερμοκρασία επιστροφής ($70/40^\circ \text{C}$). Πράγματι, όπως έχει διαπιστωθεί γενικά(4), και όπως επιβεβαιώθηκε από τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, η κρίσιμη παράμετρος στο θέμα της ηλιακής υποβοήθησης της θέρμανσης είναι η θερμοκρασία επιστροφής του δικτύου (θέρμανσης).[17]



Εικ. 8. Συγκριτικά αποτελέσματα ηλιακής κάλυψης (f) σε διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας της θέρμανσης.

7.4. Διαστασιολόγηση – Κρίσιμα τεχνικά θέματα

7.4.1. Διαστασιολόγηση

Η συλλεκτική επιφάνεια: η πρωταρχική επιλογή στην διαστασιολόγηση ενός συστήματος combi αφορά στο μέγεθος της επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών. Για την επιλογή αυτή δεν υπάρχουν γενικοί κανόνες μια και εξαρτάται από τις προτεραιότητες του χρήστη (π.χ. από το αν θεωρεί πιο σπουδαία την ενεργειακή αυτονομία του σπιτιού και άρα το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας, την οικονομικότητα του συστήματος κλπ). Η εμπειρία στον τομέα έχει δείξει πως μια «λογική» αντιμετώπιση του θέματος (για τις συνθήκες της κεντρικής και νότιας Ευρώπης) καταλήγει σε συλλεκτική επιφάνεια που συνήθως δεν ξεπερνά το 20 με 25% της κατοικήσιμης επιφάνειας. Μεγαλύτερη επιφάνεια συλλεκτών αυξάνει την μη εκμεταλλεύσιμη ηλιακή ενέργεια στην περίοδο που δεν υπάρχουν ανάγκες θέρμανσης και συνεπώς επιβαρύνει τα οικονομικά μεγέθη του συστήματος. Στο παρόν άρθρο επιλέχθηκε μια τιμή συλλεκτικής επιφάνειας κοντά στο 15% των τετραγωνικών μέτρων της κατοικίας. Η επιλογή αυτή δεν είναι τυχαία αλλά έγινε κυρίως με βάση το εξής κριτήριο: αυτή η τιμή επιτρέπει, εν γένει, να εγκατασταθεί ένα ηλιακό σύστημα combi μέχρι και σε τριώροφη πολυκατοικία. Γενικά πάντως, υπάρχουν λύσεις και για περιοχές με ψηλότερα κτίρια. Ένα παράδειγμα είναι να εγκατασταθούν οι συλλέκτες και σε άλλους χώρους εκτός του δώματος, όπως π.χ. να αποτελέσουν στέγαστρο για ένα parking. Μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα λύση που ήδη διαδίδεται στην Αυστρία είναι οι συλλέκτες όψης κτιρίου» (façade collectors) όπως αυτοί που φαίνονται στην εικόνα 9.[17]



Εικόνα 9: Συλλέκτες τοποθετημένοι στη (νότια) όψη κτιρίου στην Αυστρία[17]

Προσανατολισμός των συλλεκτών

Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι, για το σύστημα που εξετάσαμε, η βέλτιστη κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο είναι περίπου 55° για όλες τις υπο-περιπτώσεις. Παρ' όλα, αυτά αποκλίσεις της τάξης των $\pm 10^\circ$ δεν έχουν παρά μικρή επίδραση στην απόδοση του συστήματος (λιγότερο από 5%). Όμοια μικρή είναι και η επίδραση της απόκλισης από νότιο προσανατολισμό κατά $\pm 25^\circ$. [17]

Δοχείο αποθήκευσης:

Το συνηθισμένο εύρος για τον όγκο του δοχείου είναι περίπου 50-100 lt/m^2 (λίτρα ανά m^2 συλλέκτη). Δοχεία με περισσότερα από 150 lt/m^2 (όπως και με λιγότερα από 50 lt/m^2) μπορεί να μειώσουν την απόδοση του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί εδώ η ιδιαίτερη σημασία του φαινομένου της στρωμάτωσης στο αποθηκευτικό δοχείο. Η θερμοκρασιακή στρωμάτωση εξασφαλίζει από τη μια τη λειτουργία των συλλεκτών σε όσο το δυνατόν χαμηλότερες θερμοκρασίες και από την άλλη την επίτευξη ψηλών θερμοκρασιακών επιπέδων στα ψηλότερα μέρη του δοχείου ώστε να περιορίζεται η λειτουργία του συμβατικού συστήματος θέρμανσης. Στην Ευρωπαϊκή αγορά υπάρχουν ειδικές διατάξεις στρωμάτωσης σε ορισμένα δοχεία αποθήκευσης Παρ' όλα αυτά, ικανοποιητικά αποτελέσματα στρωμάτωσης μπορούν να επιτευχθούν απλά και μόνο εφαρμόζοντας την αρχή της χαμηλής ροής στα κυκλώματα (και ιδιαίτερα σε αυτό των συλλεκτών) καθώς και τις γενικές αρχές συνδεσμολογίας (όπως π.χ. την τοποθέτηση του εναλλάκτη των συλλεκτών στο χαμηλότερο τμήμα του δοχείου ενώ του συμβατικού συστήματος στο ψηλότερο). [17]

7.4.2. Κρίσιμα Τεχνικά Θέματα

Δύο είναι τα σημαντικότερα τεχνικά σημεία για την εξασφάλιση της καλής λειτουργίας των κεντρικών ηλιακών συστημάτων και ιδιαίτερα των combi: η προστασία από τον παγετό και η αντιμετώπιση της στασιμότητας (stagnation).

Η προστασία από τον παγετό

Για την προστασία του κυκλώματος των συλλεκτών (πρωτεύοντος) από τον παγετό, είναι αναγκαίο αυτό να πληρωθεί με διάλυμα νερού και προπυλενικής γλυκόλης. Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της γλυκόλης στο διάλυμα καθορίζεται κατ' αρχήν η ελάχιστη θερμοκρασία προστασίας από τον παρακάτω τύπο: $T_{\text{προστασίας}} = T_{\text{ΦΕΚ}} - \Delta T_{\text{ασφαλείας}}$, όπου $T_{\text{ΦΕΚ}}$ είναι η «ελάχιστη» θερμοκρασία του χειμώνα για την περιοχή στην οποία βρίσκεται το ηλιακό σύστημα κατά ΦΕΚ 362 Δ/79 (κανονισμός θερμομόνωσης που χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό των εγκαταστάσεων θέρμανσης) και το $\Delta T_{\text{ασφαλείας}}$ διευρύνει το όριο ασφαλείας μειώνοντας την ελάχιστη θερμοκρασία κατά 10 ακόμη βαθμούς (έτσι ώστε να μπορούν να αντιμετωπιστούν ακόμη και απρόβλεπτα ακραία φαινόμενα παγετού).

Αφού υπολογιστεί η Τπροστασίας, μπορεί να προσδιοριστεί η απαιτούμενη συγκέντρωση γλυκόλης από τους πίνακες των κατασκευαστών γλυκόλης. Συχνά προτείνεται ως εναλλακτική λύση η πλήρωση του πρωτεύοντος μόνο με νερό του δικτύου και ένας αυτοματισμός που να ενεργοποιεί την αντλία σε περίπτωση παγετού. Αυτή η εναλλακτική μέθοδος, που έχει εφαρμοστεί στο παρελθόν και στην Ελλάδα, δεν θεωρείται αξιόπιστη για τους παρακάτω λόγους:

- Υπάρχει αβεβαιότητα σε σχέση με την αποτελεσματικότητά της μεθόδου. Για να μειωθεί αυτή η αβεβαιότητα απαιτείται η ύπαρξη μιας δεύτερης αντλίας (για την περίπτωση βλάβης της πρώτης) η οποία μάλιστα πρέπει να είναι συνδεδεμένη με μια γεννήτρια τροφοδοσίας ώστε να αντιμετωπιστεί τυχόν διακοπή ρεύματος. Επίσης, απαιτείται η εγκατάσταση περισσοτέρων του ενός αισθητήρων θερμοκρασίας στο πεδίο των συλλεκτών για να αντιμετωπιστεί τυχόν βλάβη του αισθητήρα. Όμως, και πάλι, δεν εξασφαλίζεται 100% προστασία.
- Στην περίπτωση που η μέθοδος αποτύχει έστω και μία φορά, η βλάβη μπορεί να είναι πολύ εκτεταμένη (πολλαπλές θραύσεις σωληνίων στο πρωτεύον κύκλωμα των συλλεκτών).

Τέλος υπάρχει και μία ακόμη μέθοδος που είναι αυτή της χρήσης καθαρού νερού στο πρωτεύον το οποίο αδειάζει (και συγκεντρώνεται σε δοχείο) κάθε φορά που διακόπτεται η λειτουργία της αντλίας. Αυτή η μέθοδος (drain-back), είναι μεν αποτελεσματική, προϋποθέτει όμως μεγάλη εξειδίκευση του συνεργείου εγκατάστασης και παρουσιάζει (εκτός άλλων προβλημάτων) πρακτικές δυσκολίες στην τοποθέτηση των συλλεκτών (όσον αφορά την ακριβή τοποθέτηση του κάθε συλλέκτη ώστε να μπορεί να αδειάζει τελείως). Συνεπώς και αυτή η μέθοδος δεν προτείνεται. Ένα σημαντικό θέμα που πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα είναι ότι σε καμιά περίπτωση δεν θα πρέπει να υπάρχει στο πρωτεύον κύκλωμα του ηλιακού συστήματος αυτόματος πλήρωσης συνδεδεμένος με το νερό του δικτύου. Κάτι τέτοιο μπορεί (για διάφορους λόγους όπως π.χ. για μια μικρή διαρροή) να επιφέρει την απώλεια της γλυκόλης και την πλήρωση του πρωτεύοντος με νερό χωρίς μάλιστα το φαινόμενο να γίνει αντιληπτό (αφού η πίεση θα παραμείνει σταθερή). Οι συνέπειες μπορεί να είναι καταστροφικές για το σύστημα, δηλαδή να προκύψουν πολλαπλές θραύσεις των σωληνώσεων σε περίπτωση παγετού.[17]

Μέτρα για την αντιμετώπιση της στασιμότητας (stagnation)

Με τον όρο στασιμότητα (stagnation) εννοούμε την κατάσταση όπου, ενώ η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι αρκετή για να λειτουργήσει το ηλιακό σύστημα, το υγρό δεν κυκλοφορεί στο κύκλωμα των συλλεκτών (λόγω βλάβης, διακοπής ρεύματος, έλλειψης κατανάλωσης κλπ) με συνέπεια να αυξάνεται ιδιαίτερα η θερμοκρασία του) και, τελικά, να ατμοποιείται. Η θερμοκρασία του απορροφητή σε επίπεδους επιλεκτικούς συλλέκτες μπορεί

να φτάσει τους 2000 C σε συνθήκες στασιμότητας με δυνατή ακτινοβολία (800 W/m² και πάνω).

Το θέμα της διαστασιολόγησης του δοχείου διαστολής και της προστασίας του συστήματος από τη στασιμότητα είναι ένα από τα πιο κρίσιμα σημεία για την καλή λειτουργία του ηλιακού συστήματος. Το φυσικό φαινόμενο, που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα αν δεν αντιμετωπιστεί σωστά, είναι ότι στην φάση της στασιμότητας το υγρό των συλλεκτών ατμοποιείται με πιθανή συνέπεια να γεμίσει με ατμό όλο το κύκλωμα των σωληνώσεων του πεδίου των συλλεκτών. Από τους τρόπους που χρησιμοποιούνται στην πράξη για την αντιμετώπιση του φαινομένου, ο ορθότερος για τα ηλιακά συστήματα combi με επιφάνεια συλλεκτών μέχρι και περίπου 200 m² είναι ο ακόλουθος: το δοχείο διαστολής διαστασιοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να απορροφήσει όχι μόνο τις θερμικές διαστολές του αντιψυκτικού υγρού αλλά και ολόκληρο τον όγκο του υγρού που περιέχεται μέσα στους απορροφητές των συλλεκτών (διότι, όπως αναφέρθηκε, ο ατμός που δημιουργείται εκτοπίζει το υγρό από τους συλλέκτες).

Πρακτικά, για να προσδιοριστεί ο απαραίτητος όγκος του δοχείου διαστολής γίνονται οι παρακάτω υπολογισμοί:

Κατ' αρχήν υπολογίζεται ο όγκος διαστολής του υγρού ΔV από τον τύπο:

- $\Delta V = e \cdot V_{fl}$

όπου e είναι ο συντελεστής διαστολής (που για μίγμα νερού- γλυκόλης θεωρείται ίσος με 0,07) και V_{fl} (V fluid) ολόκληρος ο όγκος του υγρού στο πρωτεύον. Ο «χρήσιμος» (useful) όγκος του δοχείου (V_u), για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω, θα πρέπει να περιλαμβάνει επιπλέον και ολόκληρο τον όγκο του υγρού που περιέχεται στους συλλέκτες. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση τον τύπο,

- $V_u = \Delta V + V_c$

όπου V_c (V collector) είναι ολόκληρος ο όγκος που περιέχεται μέσα στους απορροφητές των συλλεκτών. Τέλος, υπολογίζουμε τον απαιτούμενο «ονομαστικό» (nominal) όγκο του δοχείου διαστολής V_N από τον τύπο (που συνήθως αναγράφεται και στα φυλλάδια των δοχείων διαστολής),

- $V_N = V_u \cdot (PF + 1) / (PF - PI)$

όπου PI (P Initial) είναι η αρχική πίεση πλήρωσης του πρωτεύοντος και PF (P Final) η τελική (μέγιστη) πίεση που επιτρέπουμε στο πρωτεύον κύκλωμα. Αυτό που πρέπει να εξασφαλίζεται (πέρα από το θέμα της αντοχής των υλικών) κατά την επιλογή της PF και των βαλβίδων ασφαλείας, είναι να έχουν οι τελευταίες ονομαστική πίεση (πίεση στην οποία ανοίγουν) κατά τι μεγαλύτερη της PF (π.χ. Ασφαλείας = $PF + 0,5$ bar).

Ένα πολύ σημαντικό θέμα που πρέπει να τονιστεί είναι ότι, όποια και αν είναι η μέθοδος που ακολουθείται, στο πρωτεύον κύκλωμα δεν πρέπει σε καμιά περίπτωση να υπάρχουν συνδεδεμένα αυτόματα εξαιρεστικά ή βάνες

ασφαλείας που να ανοίγουν σε πίεση μικρότερη της PF. Αν κάτι τέτοιο συμβεί, τότε στις συνθήκες στασιμότητας θα υπάρξει διαρροή αντιψυκτικού μίγματος.[17]

7.5. Οικονομικές και άλλες παράμετροι- Προοπτικές ανάπτυξης

Υποθέτοντας ότι η αγορά των συστημάτων combi θα αναπτυχθεί στην Ελλάδα, θεωρήθηκε εφικτό να υπολογίσουμε την τιμή του (συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης και όλων των άλλων εξόδων) ίση περίπου με 300 € ανά τετραγωνικό μέτρο συλλεκτικής επιφάνειας. Από την άλλη, για την περίπτωση της Αθήνας (λαμβάνοντας υπ' όψη τη θέρμανση κλασικών θερμαντικών σωμάτων με θερμοκρασίες προσαγωγής και επιστροφής 70 και 40° C αντίστοιχα) η εξοικονόμηση συμβατικής ενέργειας είναι περίπου 470 kWh/m² ανά έτος. Θεωρήθηκε επίσης ότι τα συστήματα combi, όντας πρωτοποριακά, θα τύχουν ισχυρής υποστήριξης από την πολιτεία. Πιο συγκεκριμένα, θεωρήσαμε ότι μπορεί να εφαρμοστεί επιδότηση της τάξης του 40%. Με αυτά τα δεδομένα, και αν θεωρήσουμε σαν συμβατικό καύσιμο το πετρέλαιο θέρμανσης με κόστος 0,042 €/kWh, τότε ο απλός χρόνος αποπληρωμής που προκύπτει είναι ίσος με περίπου 9 χρόνια. Είναι λοιπόν προφανές ότι με τις παραπάνω ευνοϊκές συνθήκες τα συστήματα combi παρουσιάζουν και οικονομικό ενδιαφέρον, δεδομένου ότι ο χρόνος ζωής τους είναι πάνω από 20 χρόνια.

Από την άλλη, γίνεται σαφές ότι για να είναι οικονομικά ελκυστικά τα συστήματα αυτά στους απλούς χρήστες των κατοικιών θα πρέπει η πολιτεία να στηρίξει οικονομικά την προώθησή τους με γενναίες επιχορηγήσεις. Αξίζει πάντως να σημειωθεί εδώ ότι η το οικονομικό όφελος είναι μόνο μια παράμετρος και μάλιστα όχι πάντα η κρισιμότερη στην διάδοση μιας νέας τεχνολογίας. Μεταξύ άλλων παραμέτρων για τον συγκεκριμένο τομέα συγκαταλέγονται οι εξής: το έμπρακτο ενδιαφέρον των πολιτών για την εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος, η απόκτηση μεγαλύτερης ενεργειακής αυτονομίας και ασφάλειας, η ευχάριστη αίσθηση του ενδιαφερόμενου ότι εκτός από χρήστης γίνεται και παραγωγός ενέργειας κ.ά. Είναι προφανές ότι τέτοιες παράμετροι έπαιξαν σπουδαίο λόγο στην πολύ μεγάλη διάδοση των ηλιακών συστημάτων στην Αυστρία όπου το ποσοστό των combi στο σύνολο των ηλιακών συστημάτων είναι περίπου 40%.

Στη χώρα μας, το πλήθος των εγκατεστημένων θερμοσιφωνικών συστημάτων (που παράγουν αποκλειστικά ζεστό νερό χρήσης και αποτελούν την συντριπτική πλειοψηφία του συνόλου των ηλιακών συστημάτων) είναι της τάξης του ενός εκατομμυρίου. Αν υποθέσουμε ότι στο εύρος μιας εικοσαετίας (στην οποία τα συστήματα αυτά θα έχουν στην πλειονότητά τους αντικατασταθεί), η διείσδυση των combi θα είναι ανάλογη με αυτή της Αυστρίας (40%), το αποτέλεσμα θα είναι έξι (6) εκατομμύρια συλλέκτες μόνο για τα ελληνικά συστήματα combi.

Κάτι τέτοιο μοιάζει ασύλληπτο, είναι όμως ένα υπάρχον δυναμικό αν μάλιστα σκεφτεί κανείς τη ραγδαία εξέλιξη των συστημάτων ηλιακού κλιματισμού. Στο (μάλλον ρεαλιστικό) σενάριο της διείσδυσης στην αγορά συστημάτων ηλιακού κλιματισμού, ο όρος combi αυτόματα θα περικλείει τον κλιματισμό των χώρων· είναι δε προφανές ότι σε μια τέτοια περίπτωση η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας το καλοκαίρι θα βελτιώσει άρδην τις οικονομικές παραμέτρους των συστημάτων combi.[17]

7.6. Σχόλια - Συμπεράσματα

Αναλύθηκε η κατηγορία των ηλιακών συστημάτων combi που συνεισφέρουν στην παραγωγή όχι μόνο ζεστού νερού χρήσης αλλά και στην θέρμανση χώρων. Δόθηκε έμφαση σε δύο βασικά σημεία:

- Τα συστήματα combi είναι ήδη διαδεδομένα στην Ευρώπη και διατίθενται σε ευρύ φάσμα τυπολογιών.
- Οι προσομοιώσεις για τον Ελληνικό χώρο έδειξαν ότι τα συστήματα combi μπορούν να συνδυαστούν με συμβατικά συστήματα θέρμανσης, δίνοντας αξιόλογα ενεργειακά αποτελέσματα και καλύψεις του συνολικού θερμικού φορτίου που φτάνουν το 40 με 50%.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ενεργειακά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν βασίζονται σε ρεαλιστικές και μάλλον συντηρητικές υποθέσεις. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένης της μικρής (προς το παρόν) διάδοσής τους, δεν εξετάστηκαν οι παρακάτω ευνοϊκές παράμετροι/ συνθήκες:

- Δεν έχει ληφθεί υπ' όψη το γεγονός της ενεργής συμμετοχής του χρήστη στην εξοικονόμηση καυσίμου (μετατοπίζοντας, όσο είναι δυνατό, το φορτίο του ζεστού νερού στις ημέρες ηλιοφάνειας).
- Δεν έχει ληφθεί υπ' όψη η δυνατότητα σύνδεσης των πλυντηρίων ρούχων και πιάτων στο δίκτυο ζεστού νερού κάτι τέτοιο όχι μόνο θα μεγάλωνε την απόδοση του ηλιακού συστήματος αλλά θα εξοικονομούσε ενέργεια τριπλάσιου κόστους (ηλεκτρική).
- Δεν εξετάστηκε η περίπτωση των βιοκλιματικών κτιρίων ούτε της ενδοδαπέδιας θέρμανσης . Ενδεικτικά αναφέρεται πως στην περίπτωση ενός βιοκλιματικού κτιρίου με ενδοδαπέδια θέρμανση στην Αθήνα η κάλυψη των συνολικών θερμικών αναγκών (από ένα ηλιακό σύστημα σαν αυτό που εξετάστηκε στο άρθρο) ξεπερνά το 75%.
- Οι θερμοκρασιακές τιμές του δικτύου θέρμανσης (70/40) είναι συντηρητικές αφού στη Αυστρία εφαρμόστηκαν στην πράξη μικρότερες (65/33) και μάλιστα σε δυσμενείς συνθήκες (μέση εξωτερική θερμοκρασία κάτω από 0° C).

Όλα τα παραπάνω δείχνουν ότι οι προοπτικές εξέλιξης των συστημάτων combi στη χώρα μας (σε συνδυασμό με την εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια) είναι υπαρκτές και αξιόλογες.[17]

7.7 Εφαρμογές συστημάτων combi στην Ευρώπη

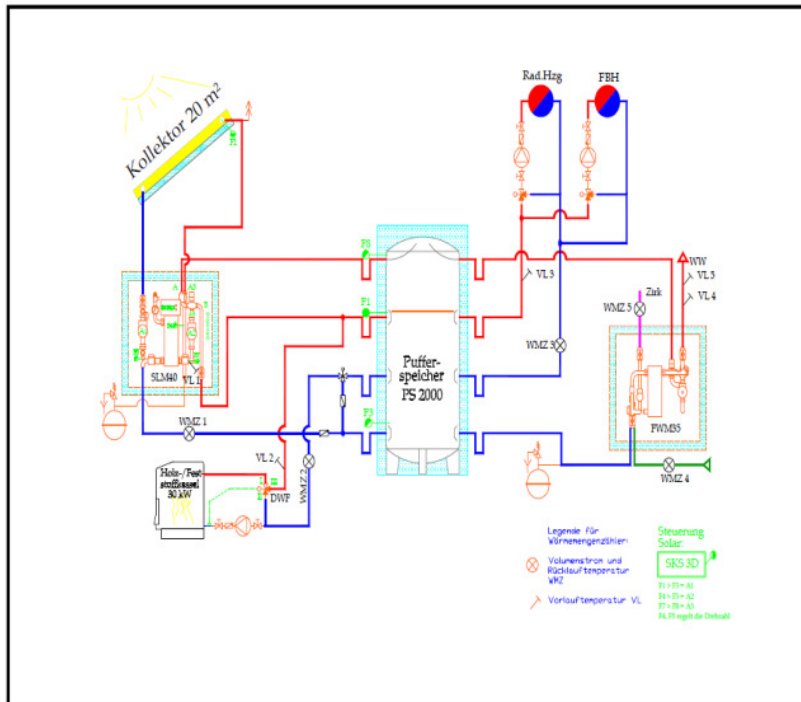
Αυστρία



Εικόνα 7.10: Σύστημα combi στην Αυστρία

Πίνακας 7.1

Βασικά δεδομένα του κτηρίου	
Αριθμός κατοίκων	5
Συνολική επιφάνεια θέρμανσης	214 m ²
Εξωτερική θερμοκρασία σχεδιασμού	-12 °C
Βαθμομέρες θέρμανσης(20/12)	3700 Kd
Ετήσιο φορτίο θέρμανσης	12.500 kWh/a
Ετήσιο φορτίο ZNX	1.400 kWh/a
Συνολικό ετήσιο φορτίο	13.900 kWh/a
Γεωγραφικό πλάτος	48 °
Πόλη	Sappi



Εικόνα 7.11: Σύστημα combi στην Αυστρία

Πίνακας 7.2

Κύρια ενεργειακά στοιχεία του συστήματος combi	
Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας	7,624 kWh/a
Εξοικονόμηση ενέργειας/m ²	381.2 kWh/m ² a
Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας	37%
Ειδικό φορτίο θέρμανσης/m ²	682 kWh/m ² a
FSC	0.595
Ειδικό φορτίο ZNX/m ²	1.400 kWh/a
Ηλιακός παράγοντας μετατροπής	13.900 kWh/a
Απόδοση συστήματος(με boiler)	-
Απόδοση συστήματος(χωρίς boiler)	78%

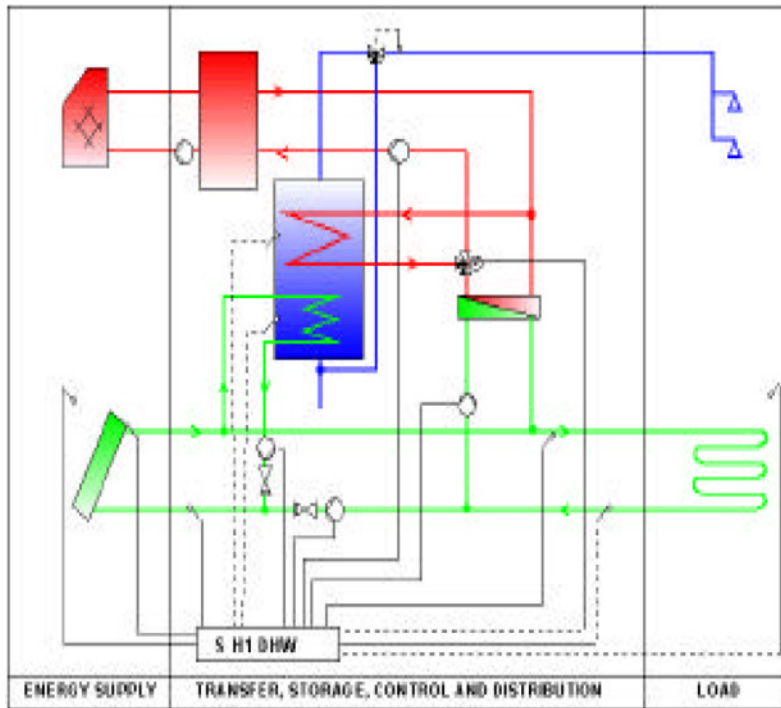
Γαλλία



Εικόνα 7.12: Σύστημα combi στην Γαλλία

Πίνακας 7.3

Βασικά δεδομένα του κτηρίου	
Αριθμός κατοίκων	2
Συνολική επιφάνεια θέρμανσης	200 m ²
Εξωτερική θερμοκρασία σχεδιασμού	-13 °C
Βαθμομέρες θέρμανσης(20/12)	3571 Kd
Ετήσιο φορτίο θέρμανσης	25836 kWh/a
Ετήσιο φορτίο ZNX	1664 kWh/a
Συνολικό ετήσιο φορτίο	27500 kWh/a
Γεωγραφικό πλάτος	45,4°
Πόλη	Thorens



Εικόνα 7.13: Σύστημα combi στην Γαλλία

Πίνακας 7.4

Κύρια ενεργειακά στοιχεία του συστήματος combi	
Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας	7,624 kWh/a
Εξοικονόμηση ενέργειας/m ²	381.2 kWh/m ² a
Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας	37%
Ειδικό φορτίο θέρμανσης/m ²	682 kWh/m ² a
FSC	0.595
Ειδικό φορτίο ZNX/m ²	1.400 kWh/a
Ηλιακός παράγοντας μετατροπής	13.900 kWh/a
Απόδοση συστήματος(με boiler)	-
Απόδοση συστήματος(χωρίς boiler)	78%



Εικόνα 7.14: Σύστημα combi στην Γαλλία

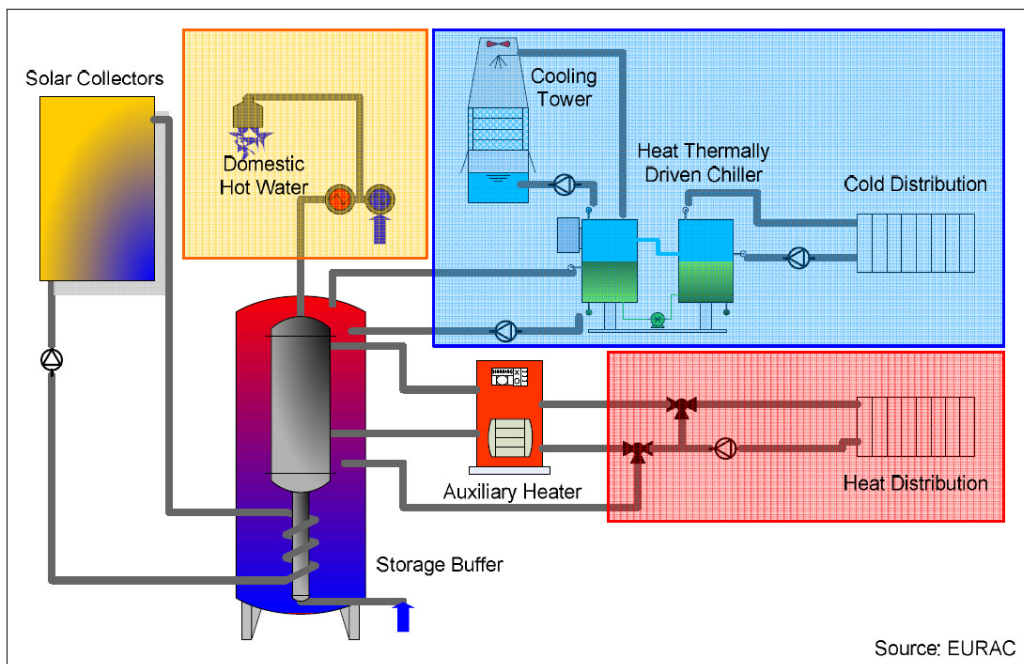
Πίνακας 7.5

Κύρια ενεργειακά στοιχεία του συστήματος combi	
Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας	7,624 kWh/a
Εξοικονόμηση ενέργειας/m ²	381.2 kWh/m ² a
Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας	37%
Ειδικό φορτίο θέρμανσης/m ²	682 kWh/m ² a
FSC	0.595
Ειδικό φορτίο ZNX/m ²	1.400 kWh/a
Ηλιακός παράγοντας μετατροπής	13.900 kWh/a
Απόδοση συστήματος(με bioler)	-
Απόδοση συστήματος(χωρίς bioler)	78%

Κεφάλαιο 8: Συστήματα solar combi plus[18]

8.1. Περιγραφή του συστήματος

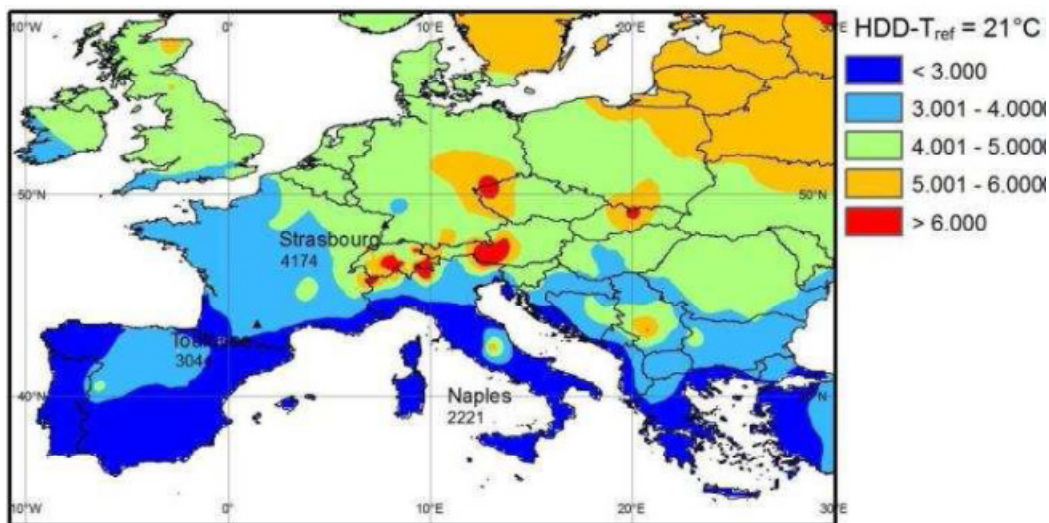
Τα συστήματα Solar combi plus χρησιμοποιούν τη θερμότητα από τους ηλιακούς συλλέκτες προκειμένου να παράγουν θέρμανση το χειμώνα, ψύξη το καλοκαίρι και ζεστό νερό χρήσης (ZNX) κατά τη διάρκεια όλου του έτους. Τα κύρια λειτουργικά μέρη που αποτελούν ένα τυπικό σύστημα, όπως απεικονίζονται και παρακάτω, είναι: (i) οι ηλιακοί συλλέκτες, οι οποίοι παράγουν θερμότητα με την υποστήριξη μιας εφεδρικής πηγής, (ii) το δοχείο αποθήκευσης το οποίο εγκαθίσταται είτε στη θερμή πλευρά, όπως στο σχήμα, είτε στη ψυχρή πλευρά, είτε και στις δύο, (iii) η μονάδα προετοιμασίας ζεστού νερού χρήσης, (iv) ο ψύκτης ρόφησης, ο οποίος τροφοδοτείται με ζεστό νερό (70-100°C), (v) η απόρριψη θερμότητας σε μέση θερμοκρασία (30-40°C) σε έναν πύργο ψύξης (υγρού ή ξηρού τύπου) ή κάποιο άλλο θερμοδοχείο (π.χ. κολυμβητική δεξαμενή), (vi) το σύστημα διανομής ψύξης (π.χ. ενδοταβάνιο σύστημα, fan-coils ή κεντρική κλιματιστική μονάδα) και (vii) το σύστημα διανομής θερμότητας (το οποίο κατά προτίμηση είναι χαμηλής θερμοκρασίας).



Εικόνα 8.1: Τυπική διάταξη ενός συστήματος solar combi plus

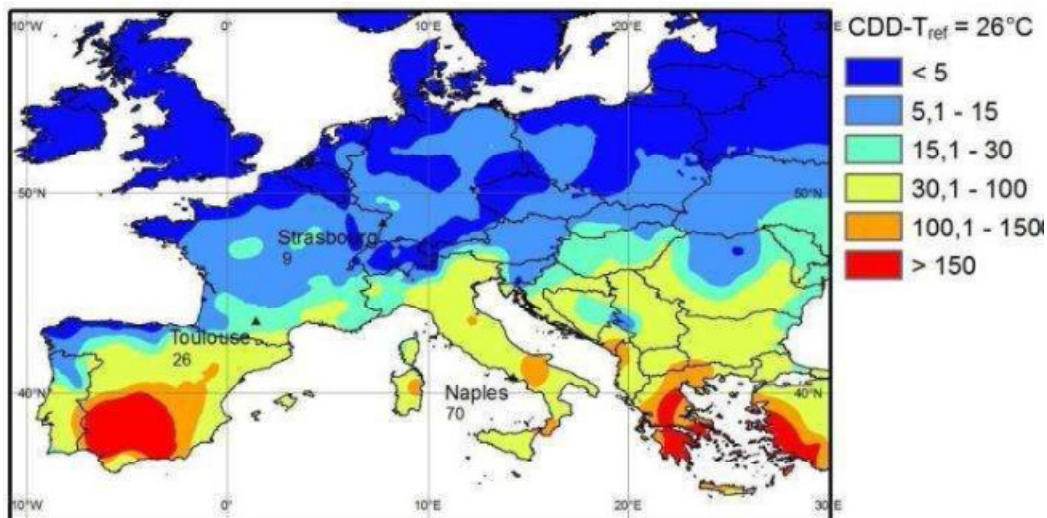
8.2. Οι πλέον υποσχόμενες κλιματικές περιοχές

Τα solar combi plus συστήματα είναι κυρίως κατάλληλα για κτήρια που έχουν τόσο θερμικές όσο και ψυκτικές ανάγκες, γεγονός που εξαρτάται πρωτίστως από τις κλιματικές συνθήκες. Η εικόνα 2 παρουσιάζει ένα χάρτη με την κατανομή των βαθμομερών θέρμανσης στην Ευρώπη. Οι βαθμομέρες θέρμανσης (HDD) υπολογίζονται από το άθροισμα των διαφορών της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας του εσωτερικού του κτηρίου και του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτηρίου θεωρείται ίση με 21 °C. Ο χάρτης χωρίζεται σε πέντε διαφορετικές περιοχές: Οι δύο περιοχές με HDD πάνω από 5000 Kd θεωρούνται μη κατάλληλες για συστήματα solar combi plus εφόσον δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες ανάγκες ψύξης. Αντίστοιχα, οι περιοχές με HDD κάτω από 3000 Kd θα μπορούσαν επίσης να απορριφθούν λόγω ιδιαίτερα χαμηλών απαιτήσεων σε θέρμανση. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα παραπάνω αξιολογούνται λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο μόνωσης του κτηρίου.



Εικόνα 8.2: Βαθμομέρες ψύξης στην Ευρώπη

Παρόλο που η παράμετρος για τη χειμερινή περίοδο (HDD) αποτελεί αξιόπιστο μέγεθος για τις θερμικές ανάγκες του κτηρίου, η παράμετρος για τη θερινή περίοδο (CDD) μπορεί μόνο να χρησιμοποιηθεί ως μια πρώτη εκτίμηση, γιατί δε λαμβάνει υπόψη την υγρασία (λανθάνουσα θερμότητα), καθώς και τα ηλιακά και εσωτερικά κέρδη, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις επιβαρύνουν σημαντικά το ψυκτικό φορτίο ενός κτηρίου. Οι βαθμομέρες ψύξης υπολογίζονται κατά αντίστοιχο τρόπο με τις αλλά με θερμοκρασία αναφοράς του εσωτερικού του κτηρίου ίση με 26 °C.



Εικόνα 8.3: Βαθμοημέρες ψύξης στην Ευρώπη

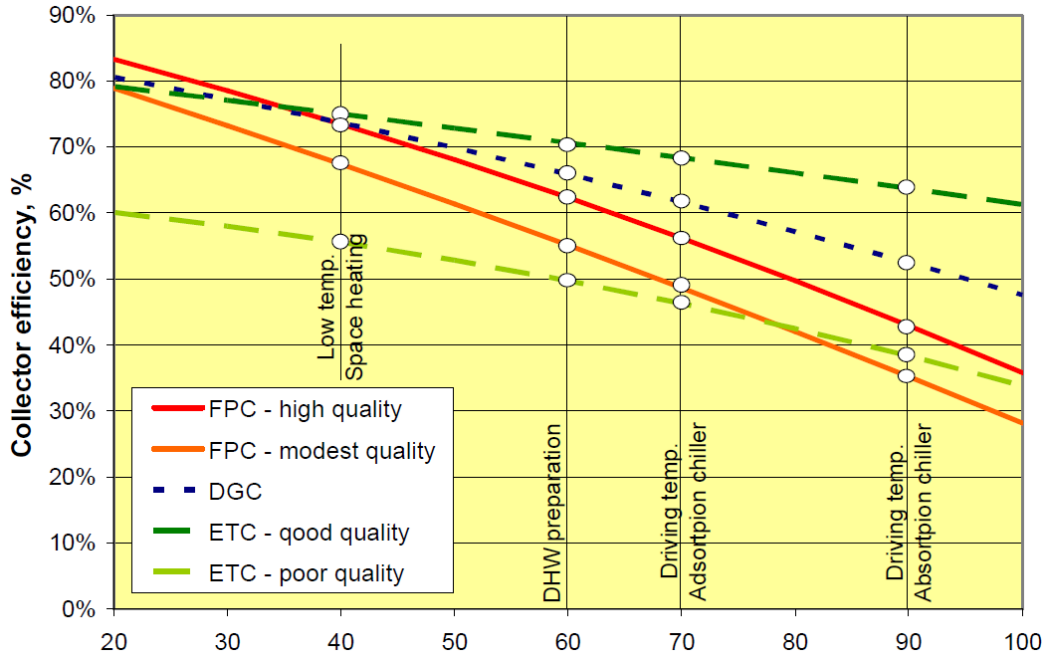
Ο χάρτης της εικόνας 3 παρουσιάζει και πάλι τις διαφορετικές κλιματικές ζώνες της Ευρώπης. Στις χρωματισμένες μπλε ζώνες δεν υπάρχουν υψηλές ψυκτικές ανάγκες, ενώ στις κατοικίες αυτές οι ανάγκες μπορούν να καλυφθούν από τεχνολογίες παθητικής ψύξης. Ωστόσο, ακόμα και σε αυτές τις περιοχές της κεντρικής Ευρώπης, τα συστήματα solar combi plus μπορεί να αποδειχτούν κατάλληλα για κτήρια με υψηλά εσωτερικά κέρδη (π.χ. κτήρια γραφείων) ή υφιστάμενα κτήρια με υψηλά ηλιακά κέρδη, στα οποία δε μπορούν να εφαρμοστούν παθητικά μέτρα. Όπως αναμενόταν, οι χώρες της νότιας Ευρώπης είναι καταλληλότερες για την χρήση συστημάτων ηλιακής ψύξης σε σχέση με τις περιοχές της κεντρικής Ευρώπης, λόγω υψηλότερων ψυκτικών αναγκών και μεγαλύτερη διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά, μόνο περιοχές που έχουν και σημαντικές θερμικές ανάγκες είναι ιδανικές για τα εν λόγω συστήματα, εφόσον οι ηλιακοί συλλέκτες παράγουν ζεστό νερό καθ' όλη τη διάρκεια του έτους τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη.

8.3. Κατάλληλη τεχνολογία συλλεκτών

Στην αγορά διατίθενται διαφορετικές τεχνολογίες ηλιακών συλλεκτών. Η απόφαση για το ποιά τεχνολογία είναι καταλληλότερη για συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από την απαιτούμενη θερμοκρασία λειτουργίας. Στα συστήματα solar combi plus αντιστοιχούν 4 διαφορετικά θερμοκρασιακά επίπεδα:

- 40 °C για χαμηλής θερμοκρασίας σύστημα θέρμανσης
- 60 °C για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης
- 70 °C τυπική θερμοκρασία λειτουργίας για ψύκτες προσρόφησης
- 90 °C τυπική θερμοκρασία λειτουργίας για ψύκτες απορρόφησης

Οι καμπύλες απόδοσης διαφορετικών τύπων ηλιακών συλλεκτών θα πρέπει να συγκριθούν στο υψηλότερο απαιτούμενο θερμοκρασιακό επίπεδο. Η εικόνα 4 παρουσιάζει τις καμπύλες απόδοσης για τρεις τεχνολογίες συλλεκτών.



Εικόνα 8.4: Τυπικές καμπύλες απόδοσης συλλεκτών βασιζόμενες στην επιφάνεια παραθύρου διαφόρων συλλεκτών (FPC – Επίπεδοι συλλέκτες, DGC – Επίπεδοι συλλέκτες διπλού υαλοπίνακα, ETC – Συλλέκτες κενού). Υποθέσεις: 800 W/m² ολική ακτινοβολία με κάθετη πρόσπτωση και θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως στην αγορά διατίθενται συλλέκτες με πολύ διαφορετικές ποιότητες. Η κόκκινη καμπύλη αναφέρεται σε μια τυπικά καλή ποιότητα επίπεδων συλλεκτών ενώ η πορτοκαλί καμπύλη σε μια μέτρια ποιότητα. Για συλλέκτες κενού το εύρος ποιότητας είναι ακόμα μεγαλύτερο. Μεταξύ των δύο τεχνολογιών βρίσκονται οι επίπεδοι συλλέκτες με διπλό υαλοπίνακα, οι οποίοι εισήχθησαν πρόσφατα στην αγορά. Αυτοί είναι, ουσιαστικά, επίπεδοι συλλέκτες με ένα επιπρόσθετο κάλυμμα από γυαλί ή φύλλο Teflon για τη μείωση των θερμικών απωλειών.



Εικόνα 8.5 - Επίπεδοι συλλέκτες

Σε χαμηλές θερμοκρασίες (απαιτούνται στα συστήματα θέρμανσης χαμηλών θερμοκρασιών), οι διαφορές στην απόδοση μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών συλλεκτών είναι σχετικά μικρές (εξαιρουμένων των συλλεκτών κενού χαμηλής ποιότητας, οι οποίοι είναι ακατάλληλοι για αυτή την εφαρμογή). Ωστόσο, όσο αυξάνει η θερμοκρασία λειτουργίας, τόσο πιο σημαντική είναι η επιλογή καλής ποιότητας συλλέκτη. Οι συλλέκτες κενού συνήθως έχουν χαμηλές θερμικές απώλειες και για το λόγο αυτό είναι καταλληλότεροι για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Παρόλα αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η ποιότητα του συλλέκτη, ακόμα και όταν πρόκειται μόνο για συλλέκτες κενού. Από την άλλη, οι καλής ποιότητας επίπεδοι συλλέκτες με μονό ή διπλό υαλοπίνακα μπορούν σε πολλές περιπτώσεις να ανταγωνιστούν τους συλλέκτες κενού. Σε ορισμένες περιπτώσεις αποδεικνύεται περισσότερο συμφέρουσα η λύση, της εγκατάστασης λίγο μεγαλύτερης επιφάνειας επίπεδων συλλεκτών, μονού ή διπλού υαλοπίνακα, σε σχέση με την επένδυση σε πιθανότατα πολύ ακριβότερους συλλέκτες κενού καλής ποιότητας. Για κάθε εφαρμογή, συνίσταται η διεξαγωγή ετήσιων προσομοιώσεων, με ωριαίο βήμα, προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη τεχνολογία συλλεκτών για το απαιτούμενο θερμοκρασιακό επίπεδο και τη διαθέσιμη ακτινοβολία.



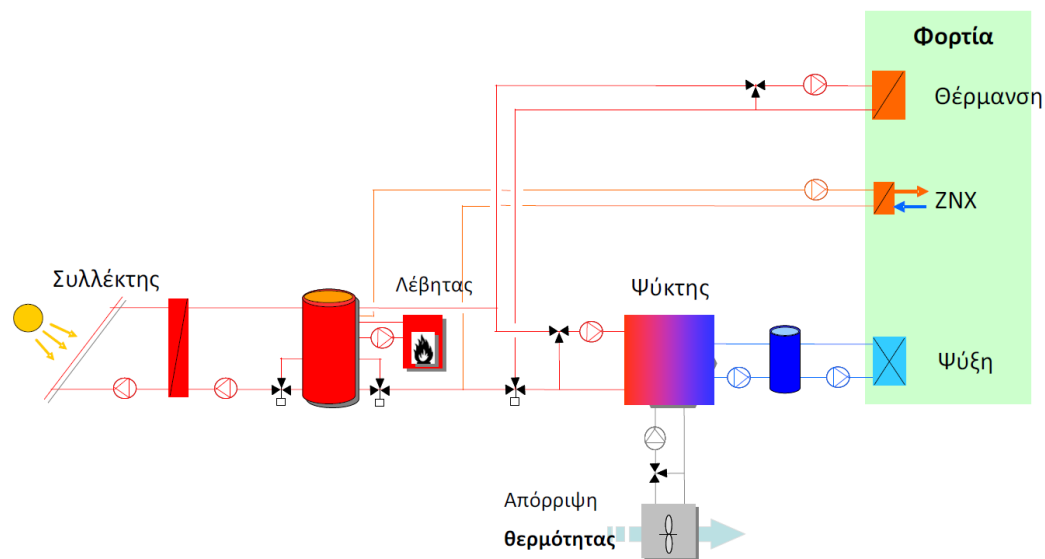
Εικόνα 8.6: Συλλέκτες κενού στη Μαρίνα της Βενετίας



Εικόνα 8.7: Επίπεδοι συλλέκτες στο Δημαρχείο του Gleisdorf, στην Αυστρία

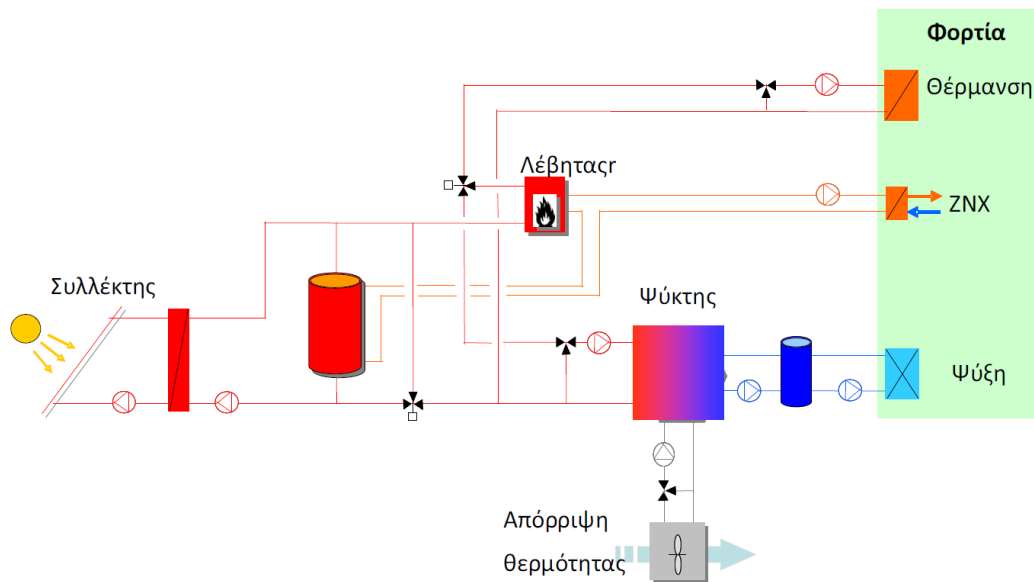
8.4. Τυποποιημένες Διατάξεις Συστήματος

Οι ακόλουθες εικόνες παρουσιάζουν δύο τυπικές διατάξεις για μικρής κλίμακας συστήματα συνδυασμένης θέρμανσης, ψύξης και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης. Η πρώτη διάταξη της εικόνας 8 αποτελείται από ένα κεντρικό δοχείο αποθήκευσης με διαφορετικές θερμοκρασιακές βαθμίδες για θέρμανση χώρων, παραγωγή ZNX και θερμότητας για τη λειτουργία του ψύκτη. Αυτό το δοχείο θερμαίνεται τόσο από τους ηλιακούς συλλέκτες όσο και από το εφεδρικό σύστημα θέρμανσης. Για τη θέρμανση του αποθηκευμένου νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες, υπάρχει μια τρίοδη βάννα μέσω της οποίας επιλέγεται η επιστροφή του νερού προς τους συλλέκτες να γίνεται από το μέσο, ή το κάτω μέρος του δοχείου. Αυτό επιτρέπει την ταχύτερη επίτευξη του απαιτούμενου θερμοκρασιακού επιπέδου στο δοχείο αποθήκευσης για τη λειτουργία του ψύκτη.



Εικόνα 8.8: Τυπικές διατάξεις συστήματος με τον εφεδρικό λέβητα να φορτίζει το δοχείο αποθήκευσης θερμού νερού

Αντίστοιχα, η επιστρεφόμενη από το ψύκτη ή το κύκλο θέρμανσης ροή οδηγείται στο δοχείο σε διαφορετικά ύψη, ανάλογα με το θερμοκρασιακό του επίπεδο. Τη θερινή περίοδο, ο ψύκτης τροφοδοτείται με ενέργεια από το δοχείο. Για την παραγωγή ZNX χρησιμοποιείται ένας εξωτερικός πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας. Τη χειμερινή περίοδο η ενέργεια στη δεξαμενή χρησιμοποιείται τόσο για τη θέρμανση χώρων όσο και για παραγωγή ZNX. Η διάταξη της εικόνας 9 είναι προσαρμοσμένη στην Ισπανική αγορά, όπου ο εφεδρικός λέβητας δεν επιτρέπεται να τροφοδοτεί το δοχείο αποθήκευσης του ηλιακού κυκλώματος. Για το λόγο αυτό, ο εφεδρικός λέβητας συνδέεται σε σειρά με το δοχείο αποθήκευσης.



Εικόνα 8.9: Τυπική διάταξη συστήματος με τον εφεδρικό λέβητα συνδεδεμένο σε σειρά με το δοχείο αποθήκευσης θερμού νερού

8.5. Προτάσεις για το σχεδιασμό του συστήματος

Οι ακόλουθες προτάσεις, που στοχεύουν στον αρτιότερο σχεδιασμό ενός solar combi + συστήματος, συντάχθηκαν βάση των αποτελεσμάτων μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν, για διάφορες περιοχές και διατάξεις συστημάτων, στο πλαίσιο του έργου.

Τα μεγάλα συλλεκτικά πεδία αποδίδουν καλύτερα

Τα σωστά διαστασιολογημένα συστήματα περιλαμβάνουν συλλεκτικό πεδίο μεταξύ 3,5 και 5 m^2/kW ψυκτικής ισχύος και όγκο αποθήκευσης θερμού νερού μεταξύ 50 και 75 l/m^2 επιφάνειας παραθύρου. Χρησιμοποιώντας το παραπάνω εύρος τιμών επιτυγχάνονται υψηλά ποσοστά ηλιακής κάλυψης, ενώ το σύστημα πλησιάζει τη βέλτιστη λειτουργία, σε όρους εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας και κόστους αυτής.



Εικόνα 8.10: Ψύκτης προσρόφησης 7.5 kW

Εφαρμογή βελτιστοποιημένου αλγορίθμου ελέγχου

Η στρατηγική ελέγχου του συστήματος που θα υιοθετηθεί, επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή του, τόσο σε επίπεδο ποσοστού ηλιακής κάλυψης όσο και σε σχέση με την πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι η ενσωμάτωση του συστήματος ελέγχου στον ψύκτη προσφέρει μεγάλη δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης, καθώς λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως η τοποθεσία, το είδος της εφαρμογής και οι ρυθμίσεις λειτουργίας. Ειδικότερα θα πρέπει να μελετάται ο έλεγχος των αντλιών και του συστήματος απόρριψης θερμότητας.

Χρήση ενδοταβάνιου συστήματος διανομής ψύξης

Το ενδοταβάνιο σύστημα υπερτερεί έναντι των συστημάτων fan coil όσον αφορά στην απόδοση του ψύκτη, λόγω του υψηλότερου θερμοκρασιακού επιπέδου στο κύκλωμα ψυχρού νερού. Ωστόσο το κόστος αυτού του συστήματος είναι υψηλότερο έναντι των υπολοίπων, ενώ κρίσιμη χαρακτηρίζεται και η λειτουργία του, στα κτήρια γραφείων και κατοικίες, την περίοδο της θέρμανσης.



Εικόνα 8.11: Στοιχεία του επιταβάνιου συστήματος σε σχολείο του Butzbach, στη Γερμανία



Εικόνα 8.12: Σύστημα ηλιακού κλιματισμού σε δημοτικό κτήριο στη Βιέννη, Αυστρία

Θεωρώντας το σύστημα Αυτόνομο Ηλιακό για τη λειτουργία ψύξης

Έχοντας ως στόχο τη μέγιστη εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας, ο σχεδιασμός του συστήματος θα πρέπει να βασίζεται στη μη χρήση βοηθητικού συστήματος κατά τη λειτουργία της ψύξης τη θερινή περίοδο. Το ποσοστό ηλιακής κάλυψης ενδέχεται να φτάσει στο 90% αποφεύγοντας τη χρήση του βοηθητικού συστήματος, αν ο σχεδιασμός είναι κατάλληλος.



Εικόνα 8.13: Σύστημα ηλιακού κλιματισμού εγκατεστημένο σε στέγη στη Γρανάδα της Ισπανίας

Αποφεύγοντας τη χρήση ορυκτών καυσίμων στο εφεδρικό σύστημα ψύξης.

Επιπρόσθετη μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων είναι δυνατόν να επιτευχθεί αν εγκατασταθεί καυστήρας βιομάζας ή χρησιμοποιώντας την απορριπτόμενη θερμότητα ως εφεδρική πηγή θερμότητας. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ηλεκτρικός ψύκτης ως εφεδρικό σύστημα ψύξης. Όλες οι παραπάνω λύσεις θα αυξήσουν αφενός την εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας αφετέρου όμως θα αυξηθεί και το κόστος της επένδυσης.



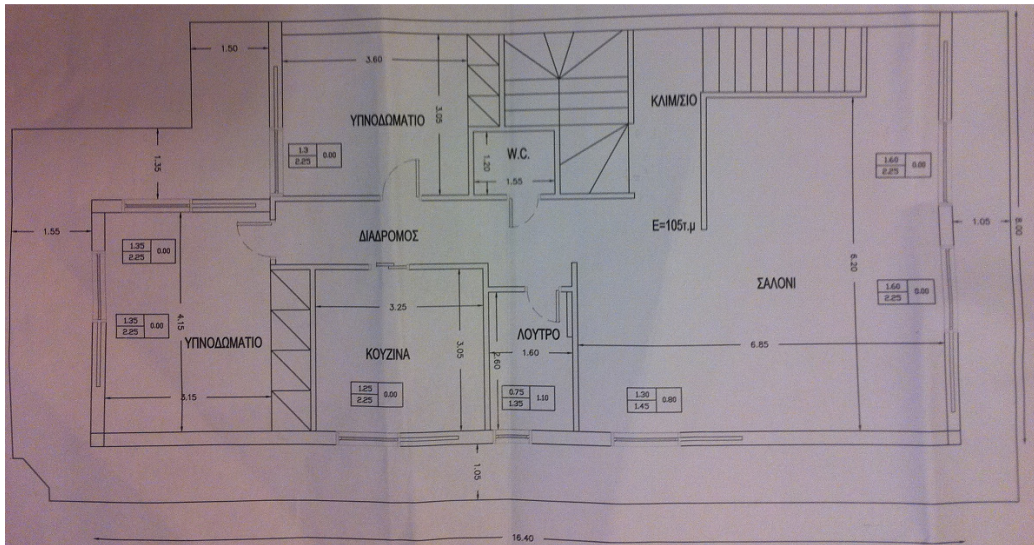
Εικόνα 8.14: Αεροφωτογραφία του συστήματος ηλιακού κλιματισμού στη Γρανάδα της

Μέρος 2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Υπολογισμός της θερμοκρασίας δεξαμενής

9.1. Εισαγωγή

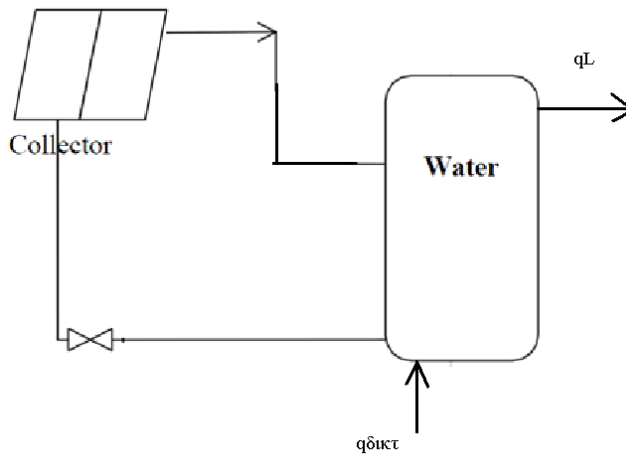
Στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης χώρων και ζεστού νερού χρήσης και θα συγκριθεί με ένα αντίστοιχο σύστημα το οποίο περιλαμβάνει ένα υλικό αλλαγής φάσης. Η σύγκριση των δύο συστημάτων θα είναι μεταξύ των μηνών από Νοέμβριο μέχρι Απρίλιο. Η εφαρμογή θα γίνει σε τυπικό σπίτι 105 m² στην περιοχή της Αθήνας 4 ατόμων του οποίου η κάτοψη φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 9.1: Κάτοψη του υπό εξέταση σπιτιού

Αρχικά θα υπολογίσουμε τις συνθήκες περιβάλλοντος ανά ώρα την ηλιακή ακτινοβολία την θερμοκρασία περιβάλλοντος και την θερμοκρασία νερού του δικτύου. Με αυτά τα δεδομένα υπολογίζουμε το φορτίο θέρμανσης και το φορτίου ΖΝΧ για τους μήνες Νοέμβριο μέχρι Απρίλιο. Με μέσω αποθήκευσης το νερό υπολογίζουμε την θερμοκρασία δεξαμενής ανά ώρα πρώτα με μοναδικό φορτίο του ζεστού νερού χρήσης και στην συνέχεια μαζί με το φορτίο θέρμανσης. Στην συνέχεια κάνουμε παραμετρική ανάλυση για το πώς επηρεάζεται η θερμοκρασία δεξαμενής από την συλλεκτική επιφάνεια και από τον όγκο του δοχείου αποθήκευσης.

Υπολογισμός της θερμοκρασίας δεξαμενής μόνο με φορτίο νερού



Σχήμα 9.2:

Στο παραπάνω σχήμα 9.2 έχουμε το ενεργειακό ισοζύγιο της δεξαμενής με μοναδικό φορτίο του νερού. Παίρνουμε τις εξισώσεις:

$$q_{\Sigma} = (G_T F_R (\tau \alpha)_e - F_R U_L (T_{fi} - T_{\alpha})) A_c \quad (9.1)$$

Όπου

$q_{\Sigma}(w)$, Η ενέργεια του συλλέκτη, A_c η επιφάνειά του

$$q_L(w) = \dot{m} \left(\frac{kg}{s} \right) \cdot C_p \left(\frac{j}{kgk} \right) \cdot \left(\frac{T_{\Delta\pi\rho\nu} + T_{\Delta\mu\epsilon\tau\alpha}}{2} \right) \quad (9.2)$$

$$q_{\delta\iota\kappa\tau}(w) = \dot{m} \left(\frac{kg}{s} \right) \cdot C_p \left(\frac{j}{kgk} \right) \cdot T_{\delta\iota\kappa\tau}(K) \quad (9.3)$$

Όπου

q_L , Το φορτίο νερού που φεύγει από την δεξαμενή για κατανάλωση

$q_{\delta\iota\kappa\tau}$, Το φορτίο νερού που έρχεται στην δεξαμενή από το δίκτυο

Ισοζύγιο δεξαμενής:

$$\Delta_{q\delta\epsilon\chi} = \Delta_{q\phi\omicron\rho\rho\tau\iota\omicron} + q_{\Sigma} \quad (9.4)$$

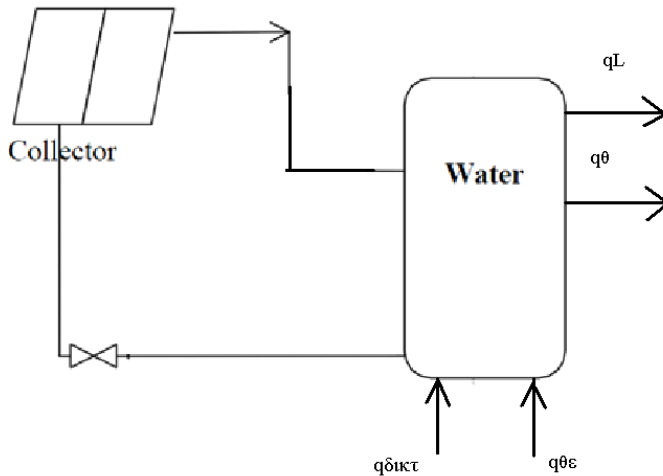
$$\Delta_{q\delta\epsilon\chi} = q_{\delta\iota\kappa\tau} - q_L + q_{\Sigma} \quad (9.5)$$

$$\Delta_{q\delta\epsilon\chi}(w) = m_{H_2O}(kg) \cdot C_{pH_2O} \left(\frac{j}{kgk} \right) \cdot (T_{\Delta\mu\epsilon\tau\alpha} - T_{\Delta\pi\rho\nu}) \cdot \frac{1}{3600s} \quad (9.6)$$

Οπότε σύμφωνα με τα παραπάνω υπολογίζουμε την θερμοκρασία της δεξαμενής:

$$T_{\Delta\mu\epsilon\tau\alpha} = \frac{\Delta q_{\delta\epsilon\xi(w)} \cdot 3600s}{m_{H_2O(kg)} \cdot C_{pH_2O} \left(\frac{j}{kgk}\right)} + T_{\Delta\pi\rho\nu} \quad (9.7)$$

Υπολογισμός της θερμοκρασίας δεξαμενής με φορτίο νερού χρήσης και θέρμανσης



Σχήμα 9.3

Μαζί το με το φορτίο θέρμανσης από το σχήμα 9.3 το ισοζύγιο της δεξαμενής είναι:

$$\Delta q_{\delta\epsilon\xi} = q_{\delta\iota\kappa\tau} - q_L + q_{\Sigma} + q_{\theta\epsilon\pi} - q_{\theta} \quad (8.8)$$

$$q_{\theta}(w) = \dot{m}_{\theta} \left(\frac{kg}{s}\right) \cdot C_p \left(\frac{j}{kgk}\right) \cdot \left(\frac{T_{\Delta\pi\rho\nu} + T_{\Delta\mu\epsilon\tau\alpha}}{2}\right) \quad (9.9)$$

$$q_{\theta\epsilon}(w) = \dot{m}_{\theta\epsilon} \left(\frac{kg}{s}\right) \cdot C_p \left(\frac{j}{kgk}\right) \cdot T_{\epsilon\pi\iota\sigma\tau\rho\phi}(K) \quad (9.10)$$

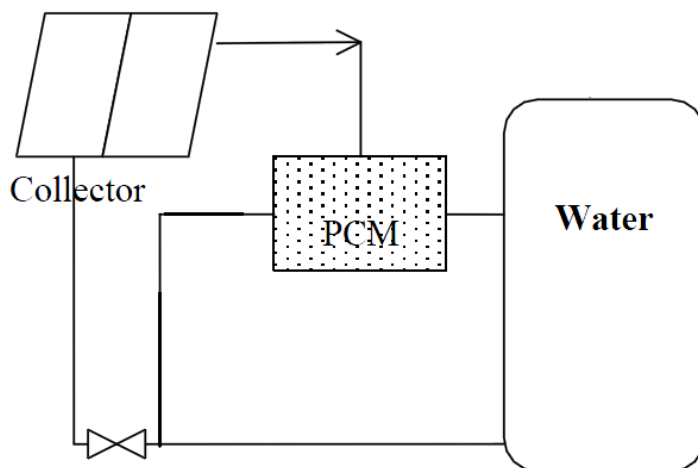
Όπου:

q_{θ} , Το φορτίο νερού για την θέρμανση των χώρων που φεύγει από την δεξαμενή

$q_{\theta\epsilon}$, Το φορτίο νερού που επιστρέφει στη δεξαμενή μετά την θέρμανση των χώρων

Υπολογισμός της θερμοκρασίας δεξαμενής με φορτίο νερού χρήσης και θέρμανσης με μέσο αποθήκευσης υλικό αλλαγής φάσης

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την θερμοκρασία του νερού για όλα τα φορτία με pcm.



Σχήμα 9.3 Ηλιακό σύστημα θέρμανσης με PCM[22]

Το νερό από περνάει από την δεξαμενή με το PCM και παίρνει την αποθηκευμένη θερμότητα. Στην συνέχεια το νερό πηγαίνει είτε προς κατανάλωση είτε στο boiler και μετά για θέρμανση του σπιτιού. Υποθέτουμε πως το pcm δεν αναμιγνύεται με το νερό έχουν πάντα την ίδια θερμοκρασία και δεν υπάρχουν απώλειες στις μεταξύ τους συναλλαγές θερμότητας. Ισχύουν όλες η παραπάνω εκτός από την 9.6 η οποία γίνεται:

$$\Delta_{q\delta\epsilon\chi}(w) = m_{H_2O}(kg) \cdot C_{ppcm} \left(\frac{j}{kgk} \right) \cdot (T_{\Delta\mu\epsilon\tau\alpha} - T_{\Delta\pi\rho\nu}) \cdot \frac{1}{3600s} \quad (9.11)$$

PCM που χρησιμοποιήθηκαν:

- Υποθετικό Pcm no1 με ιδιότητες: $C_{ps}=2 \text{ kj/kgk}$ $C_{pl}=3 \text{ kj/kgk}$ $T_s=26,5$ °C $T_l=36,5$ °C $H=190 \text{ kj/kg}$
- Υποθετικό Pcm no2 με ιδιότητες: $C_{ps}=2,2 \text{ kj/kgk}$ $C_{pl}=3,2 \text{ kj/kgk}$ $T_s=30$ °C $T_l=40$ °C $H=190 \text{ kj/kg}$
- RT 27 με ιδιότητες όπως εξετάστηκαν στο ΕΜΠ:
 $C_{ps}=1900 \text{ kj/kgk}$
 $C_{pl}=2500 \text{ kj/kgk}$
 $T_s=22$ °C
 $T_l=31$ °C

$$C_p = -329,5000062 + 106,3162953T - 13,35423683T^2 + 0,8223480772T^3 - 0,02488671396T^4 + 0,0002972388922T^5 \quad (9.12)$$

Για $22 \leq T \leq 25$

$$C_p = 9542,790195 - 774,7503271T + 15,74031481T^2 \quad (9.13)$$

Για $25,1 < T \leq 26,8$

$$C_p = 41611,7679 - 3023,692869T + 54,96396748T^2 \quad (9.14)$$

Για $26,8 < T \leq 27,5$

$$C_p = 31155,44075 - 3820,483549T + 175,767883T^2 - 3,594806096T^3 + 0,02757236338T^4 \quad (9.15)$$

Για $27,5 < T \leq 31$

➤ Ελληνική παραφίνη με ιδιότητες όπως εξετάστηκαν στο ΕΜΠ:

$C_{ps} = 2700 \text{ kJ/kgK}$

$C_{pl} = 4400 \text{ kJ/kgK}$

$T_s = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

$T_l = 58 \text{ }^\circ\text{C}$

$$C_p = 238826,7515 + 25234,88721T - 1066,214192T^2 + 22,51889622T^3 - 0,2377544057T^4 + 0,001003917218T^5 \quad (9.16)$$

Για $50 \leq T \leq 54,5$

$$C_p = 474815,4706 - 17443,30321T + 160,2106051T^2 \quad (9.17)$$

Για $54,5 < T \leq 55,1$

$$C_p = 428651,7876 - 15408,60663T + 138,4803961T^2$$

Για $55,1 < T \leq 55,7$

$$C_p = 613200,0901 - 40671,49665T + 1011,420754T^2 - 11,17652292T^3 + 0,046304730774T^4 \quad (9.18)$$

Για $55,7 < T \leq 58$

Για τα υποθετικά pcm χρησιμοποιούμε την τριγωνική κατανομή.

Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο, η διαδικασία αλλαγής φάσης των Υ.Α.Φ. εξετάζεται μόνο ως ένα μακροσκοπικό φαινόμενο, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη περεταίρω λεπτομέρειες. Το περιεχόμενο δηλαδή της δεξαμενής, όπου υπάρχει νερό και Υ.Α.Φ., αντιμετωπίζεται ως μια μάζα η οποία έχει την ίδια θερμοκρασία, θεωρώντας ότι δεν υπάρχει στρωμάτωση. Η μοναδική δυσκολία έγκειται στο γεγονός πως πρέπει να είναι γνωστό το μέγεθος της θερμοχωρητικότητας $C_{p,eff}(T)$, του Υ.Α.Φ. που χρησιμοποιείται, ανάλογα με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται. Η θερμοχωρητικότητα, συναρτήσει της θερμοκρασίας, εκφράζεται γενικά με την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{p,eff}(T) = 4(H-bC_{ps})(T-T_s) / b^2 + C_{ps}, \text{ για } T_s \leq T \leq T_c \quad (9.19)$$

$$C_{p,eff}(T) = 4(bC_{pl}-H)(T-T_s-b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl}, \text{ για } T_c \leq T \leq T_l \quad (9.20)$$

όπου:

H: η λανθάνουσα θερμότητα

C_{ps}: η θερμοχωρητικότητα του στερεού

C_{pl}: η θερμοχωρητικότητα του υγρού

T_s: η θερμοκρασία του Υ.Α.Φ. λίγο πριν την αρχή αλλαγής φάσης από στερεό σε

υγρό

T_l: η θερμοκρασία του Υ.Α.Φ. όταν έχει γίνει πλήρως υγρό

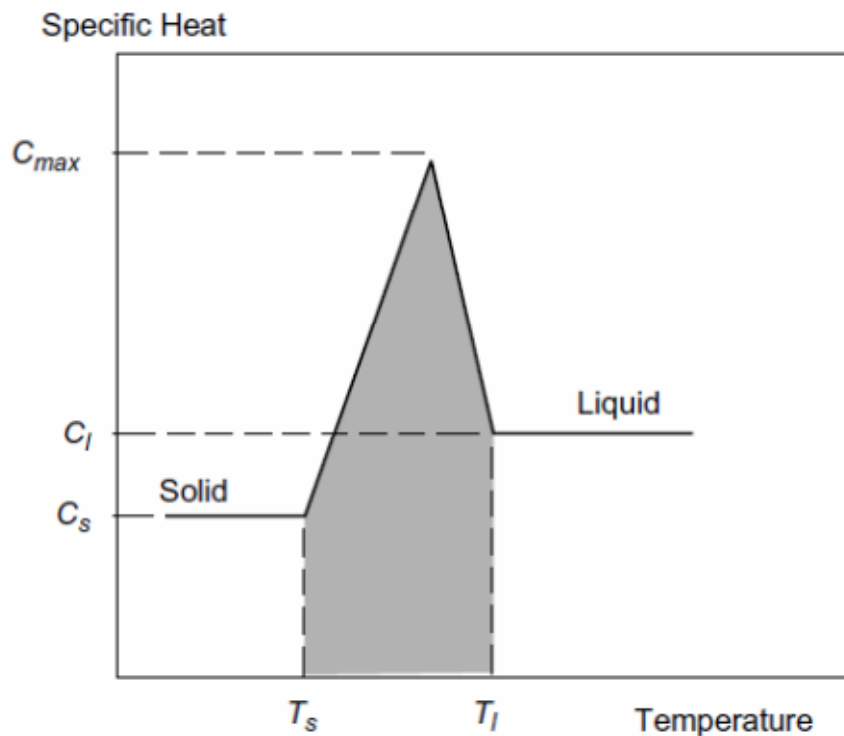
T_c: η θερμοκρασία στη μέση της αλλαγής φάσης του Υ.Α.Φ. η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_c = (T_l + T_s)/2$$

και τέλος

$$b = T_l - T_s$$

Όλα τα παραπάνω φαίνονται σχηματικά στο διάγραμμα του τριγώνου που ακολουθεί:



Σχήμα 9.4: Τριγωνική κατανομή ειδικής θερμοχωρητικότητας

Για την επίλυση του προβλήματος έχουμε τις παρακάτω παραδοχές.

- Θεωρείται ότι οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος κάθε ώρα της ημέρας για κάθε μήνα ισούται με τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος την 21^η του εκάστοτε μήνα.
- Εσωτερική θερμοκρασία του σπιτιού 20 °C .
- Θερμοκρασία επιστροφής του νερού θέρμανσης στο δοχείο αποθήκευσης σταθερά στους 25 °C.
- Cp του νερού στο εύρος τιμών της εφαρμογής 4190 j/kgk
- Η κλίση του συλλέκτη είναι στις 52° για μέγιστη απόδοση τον χειμώνα.
- Η χωρητικότητα της δεξαμενής είναι 750 L
- Θεωρείται ότι δεν υπάρχουν απώλειες στις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας.
- Συλλεκτική επιφάνεια Ac=10m²
- Ιδιότητες συλλέκτη: F_R(τα)_e=0,7, F_RU_L=5,8
- Νερό περάνει από τον συλλέκτη μόνο όταν α_Σ>0
- Το σπίτι είναι 105m² και έχει 4 άτομα
- Στην θερμοκρασία δεξαμενής με ρ_{cm} θα χρησιμοποιήσουμε ίδια μάζα με την αντίστοιχη του νερού.

9.2. Ακτινοβολία G_T

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

$$G_T = G_b R_b + G_d \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + (G_b + G_d) \rho \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad (9.21)$$

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

$$R_b = \frac{\sin\delta \sin(\varphi-\beta) + \cos\delta \cos(\varphi-\beta) \cos\omega}{\sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega} \quad (9.22)$$

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

Η μέση στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου ισούται με:

$$G_b = M_t + A_t \sin\left(\frac{360}{365}D - P_t\right) \quad (9.23)$$

Η διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, προκύπτει από τη σχέση:

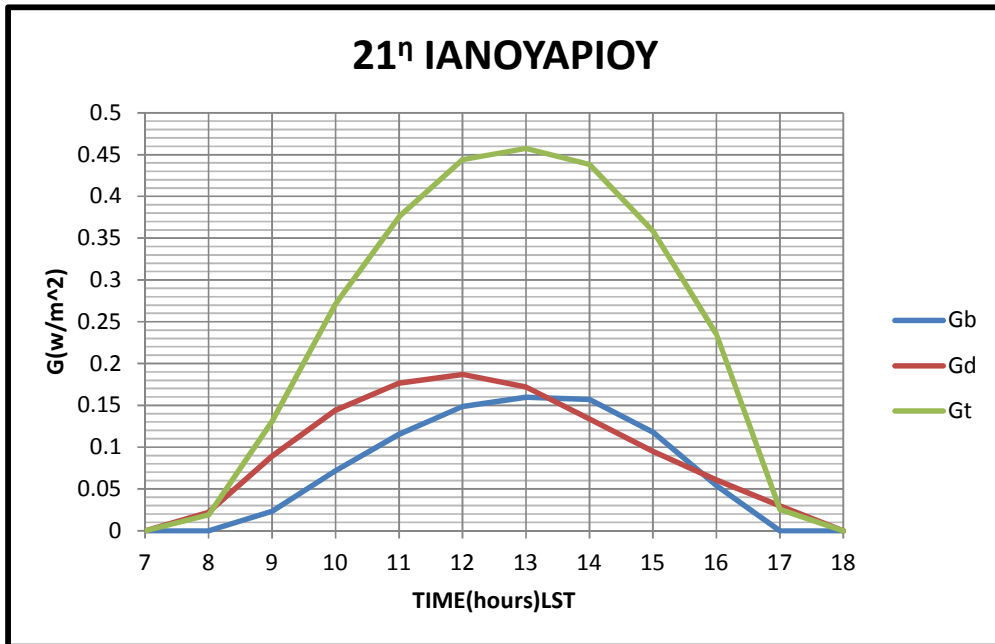
$$G_d = m_t + a_t \sin\left(\frac{360}{365}D - P_t\right) \quad (9.24)$$

Οι τιμές των συντελεστών των εξισώσεων 9.14 και 9.15 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

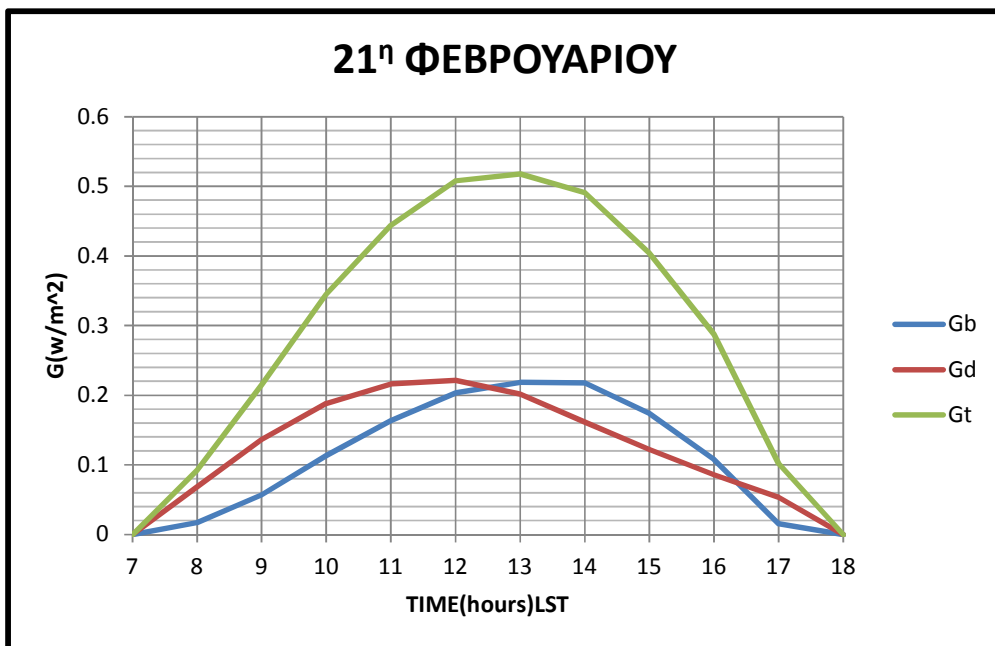
Πίνακας 9.1: Τιμές συντελεστών

Time(hours) LST	Mt(kw/m ²)	At(kw/m ²)	Pt(degrees)	mt(kw/m ²)	at(kw/m ²)	Pt(degrees)	DAY
7:00	0,007	0,046	86,18	0,048	0,111	81,23	21
8:00	0,057	0,068	87,31	0,134	0,127	82,45	21
9:00	0,119	0,104	87,94	0,208	0,133	83,94	21
10:00	0,191	0,129	88,31	0,261	0,129	85,6	21
11:00	0,258	0,153	89,35	0,283	0,117	86,05	21
12:00	0,319	-0,181	-88,88	0,271	0,095	82,71	21
13:00	0,342	-0,194	-89,18	0,243	0,081	81,95	21
14:00	0,325	0,183	87,21	0,21	0,083	87,23	21
15:00	0,269	0,166	86,22	0,176	0,087	89,53	21
16:00	0,183	0,147	82,1	0,141	-0,085	-88,19	21
17:00	0,078	0,131	79,85	0,104	-0,079	-88,97	21
18:00	-0,025	0,114	77,36	0,051	0,091	86,79	21

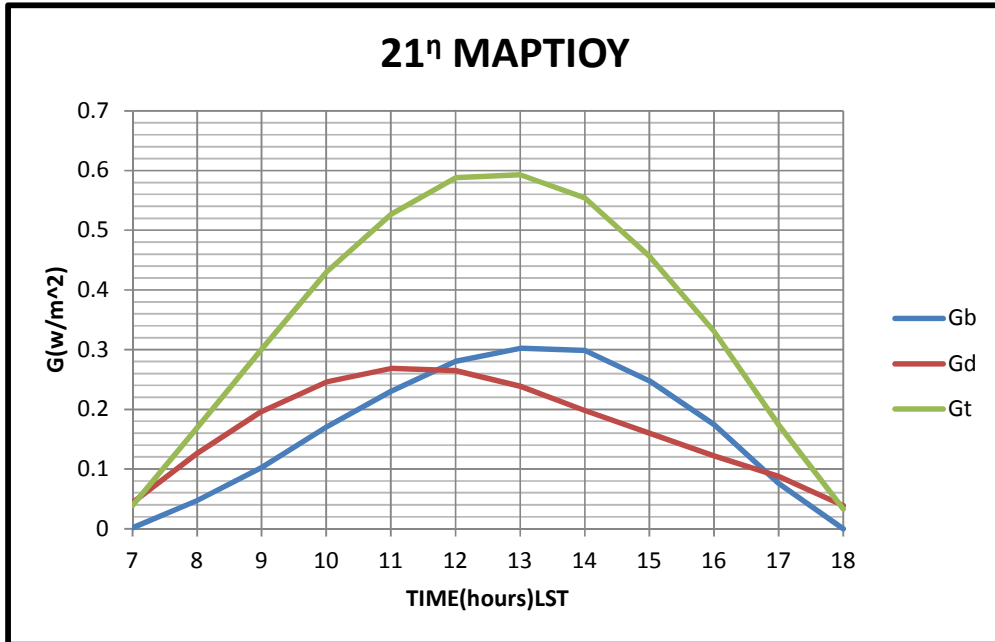
Με βάση τα παραπάνω στα σχήματα παρατίθεται η άμεσος, η διάχυτη και η ολική ακτινοβολία αντίστοιχα για τους μήνες από Νοέμβριο μέχρι Απρίλιο.



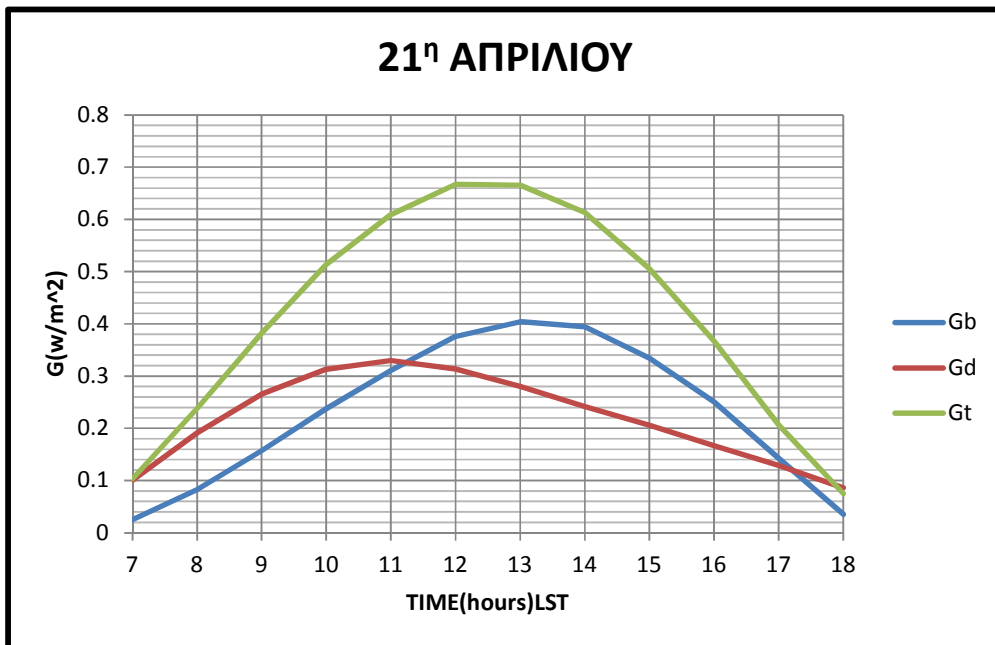
Διάγραμμα 9.1: Ακτινοβολία Ιανουαρίου



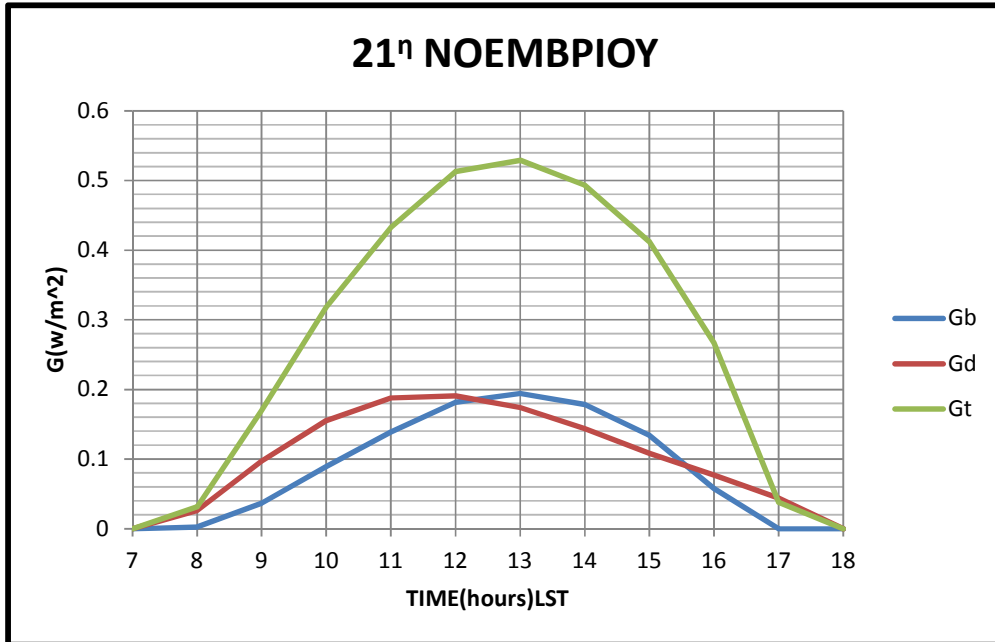
Διάγραμμα 9.2: Ακτινοβολία Φεβρουαρίου



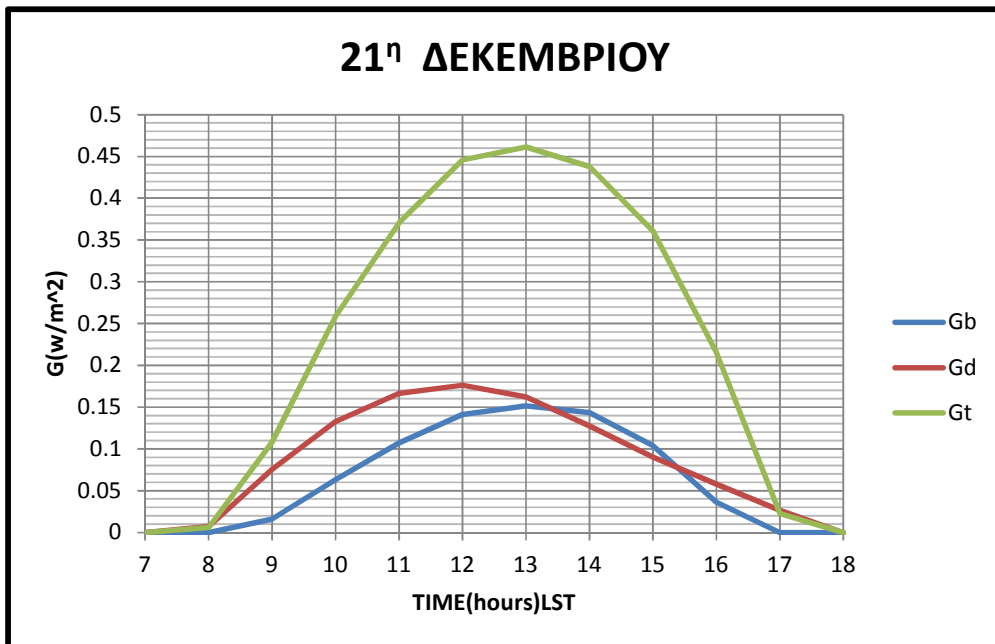
Διάγραμμα 9.3: Ακτινοβολία Μαρτίου



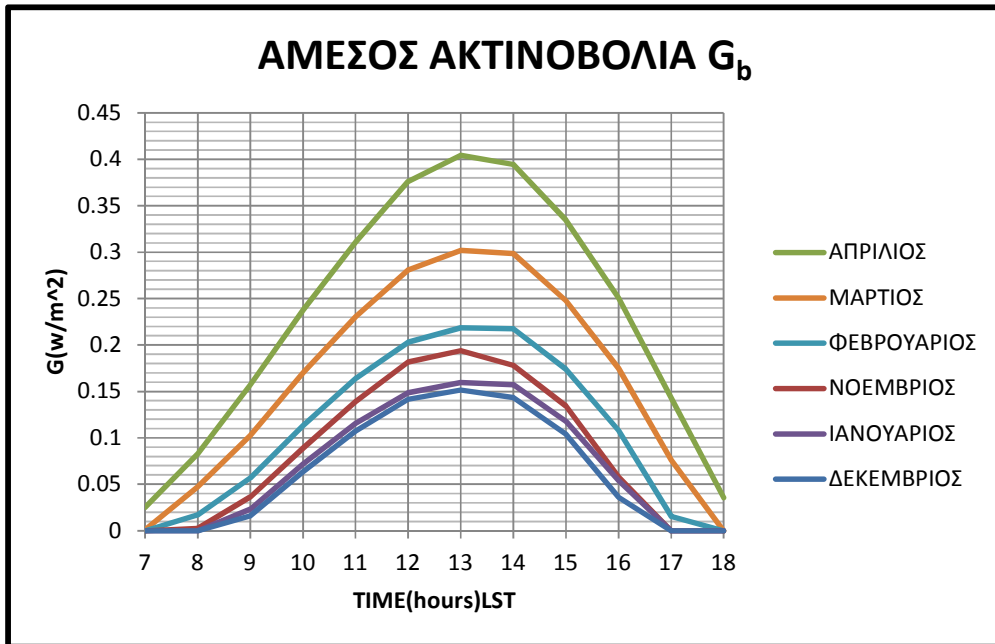
Διάγραμμα 9.4: Ακτινοβολία Απριλίου



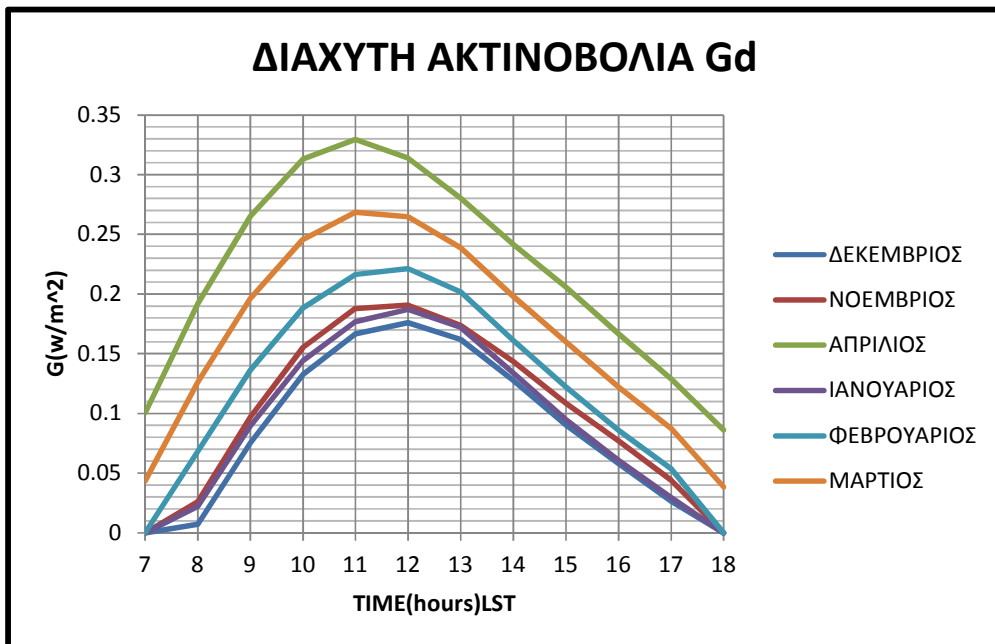
Διάγραμμα 9.5: Ακτινοβολία Νοεμβρίου



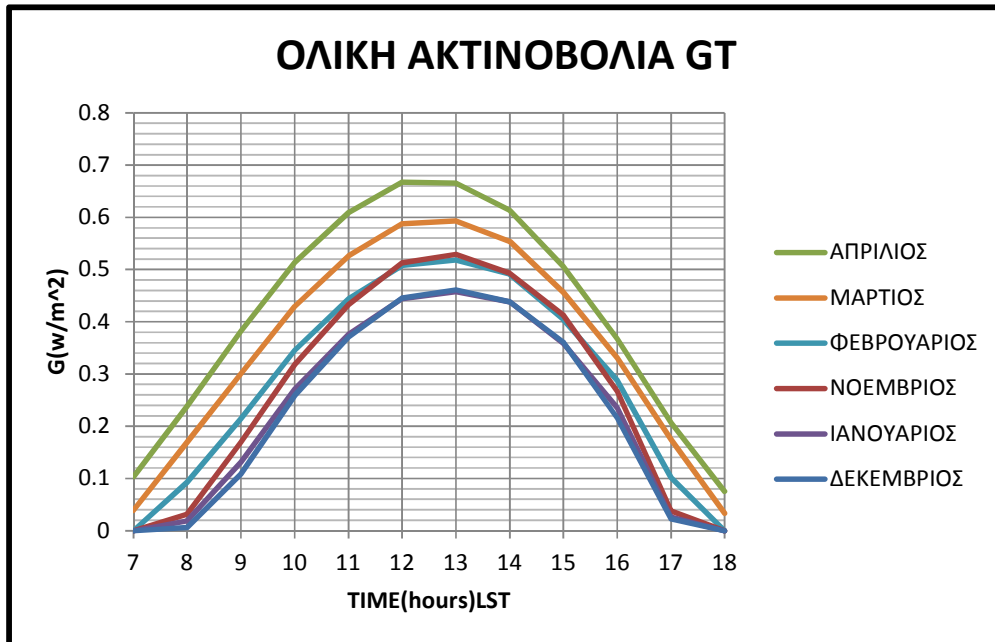
Διάγραμμα 9.6: Ακτινοβολία Δεκεμβρίου



Διάγραμμα 9.7: Άμεσος ακτινοβολία την 21^η κάθε μήνα



Διάγραμμα 9.8: Διάχυτη ακτινοβολία την 21^η κάθε μήνα



Διάγραμμα 9.9: Ολική ακτινοβολία την 21^η κάθε μήνα

9.3: Υπολογισμός της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_a

Η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά την 21^η κάθε μήνα στην περιοχή της Αθήνας προέκυψε με στατιστική επεξεργασία σχετικών μετρήσεων της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, στο τομέα θερμότητας ΕΜΠ. Οι μέσες συναρτήσεις των ωρών h(1-24) της ημέρας προσεγγίζονται από την παρακάτω σχέση

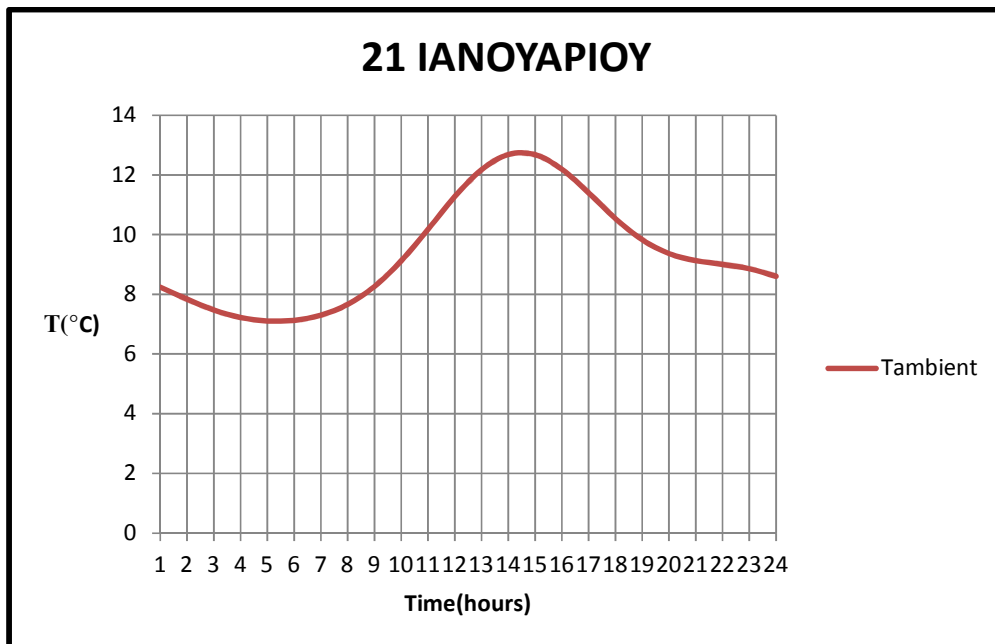
$$T_a(H) = M + \sum_1^3 C_i \cos \left[i \frac{360}{24} (H - 0,5) \right] + \sum_1^3 S_i \sin \left[i \frac{360}{24} (H - 0,5) \right] \quad (9.25)$$

Παρακάτω δίνεται στον πίνακα 9.2 οι συντελεστές της εξίσωσης 9.16

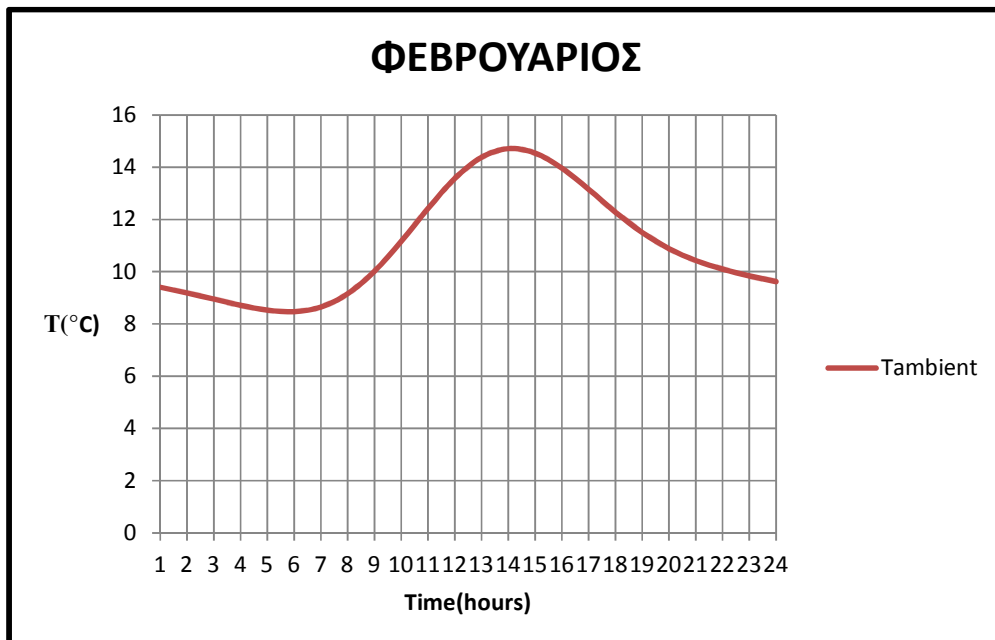
Πίνακας 9.2: Συντελεστές της εξίσωσης θερμοκρασίας περιβάλλοντος

DAY	M	C1	C2	C3	S1	S2	S3
21 JAN	9,384	-1,673	0,711	0,0085	-1,723	0,524	-0,241
21 Feb	10,984	-2,15	0,785	-0,107	-1,75	0,578	-0,0724
21 MAR	11,955	-1,858	0,651	0,0097	-1,084	0,255	-0,0093
21 APR	15,072	-2,668	0,727	0,269	-1,763	0,243	0,212
21 MAY	20,724	-2,796	0,759	0,0926	-1,344	0,119	0,308
21 JUN	26,192	-3,393	1,115	0,156	-2,196	-0,139	0,157
21 JUL	28,08	-3,359	0,811	0,272	-2,077	0,134	0,14
21 AUG	27,88	-3,113	0,864	0,067	-1,978	0,486	0,361
21 SEP	23,236	-3,31	1,035	-0,0495	-1,696	0,477	0,221
21 OCT	18,144	-2,63	1,085	-0,144	-1,427	0,604	0,138
21 NOV	11,968	-1,3	0,616	-0,252	-0,317	0,629	-0,049
21 DEC	9,264	-1,11	0,521	-0,152	-0,881	0,333	0,008

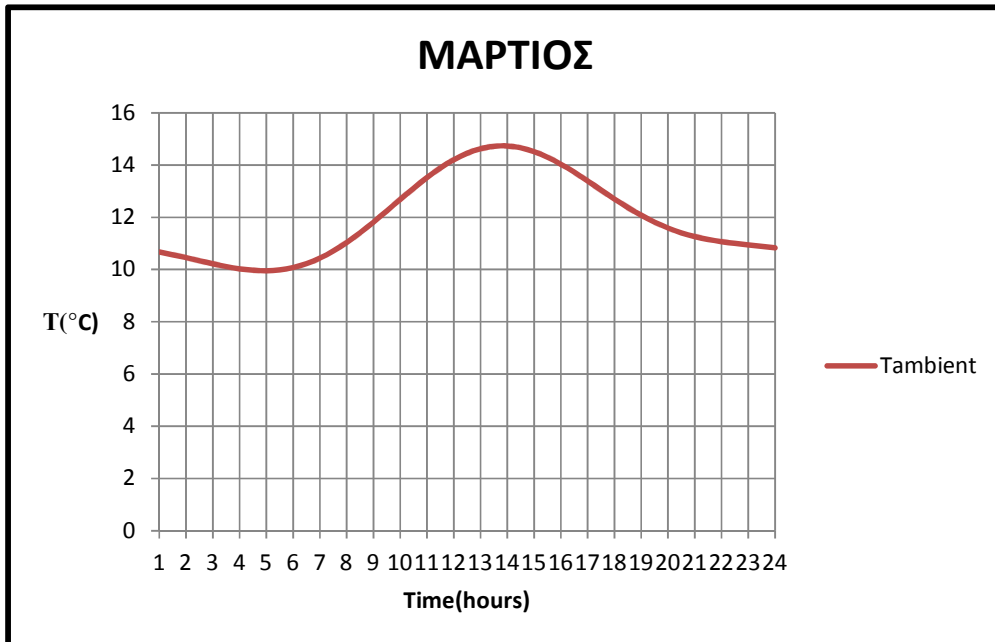
Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα των θερμοκρασιών



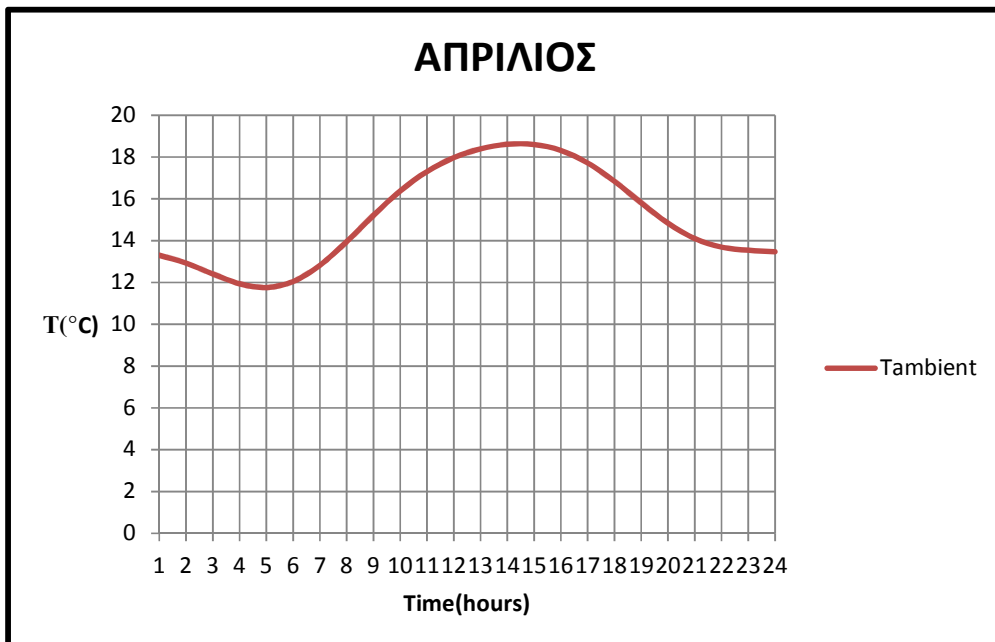
Διάγραμμα 9.10: Θερμοκρασία περιβάλλοντος Ιανουαρίου



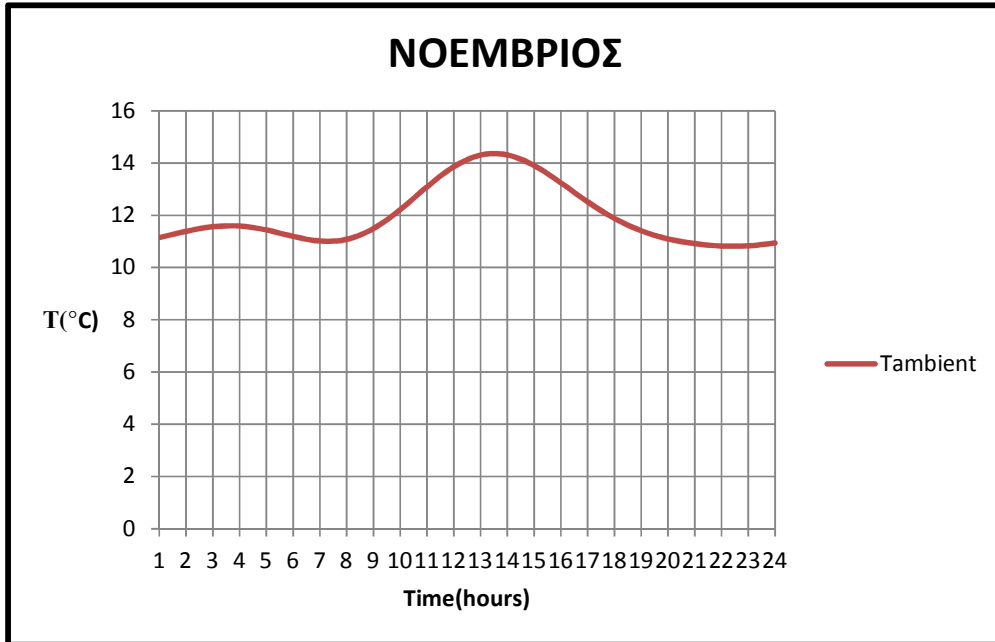
Διάγραμμα 9.11: Θερμοκρασία περιβάλλοντος Φεβρουαρίου



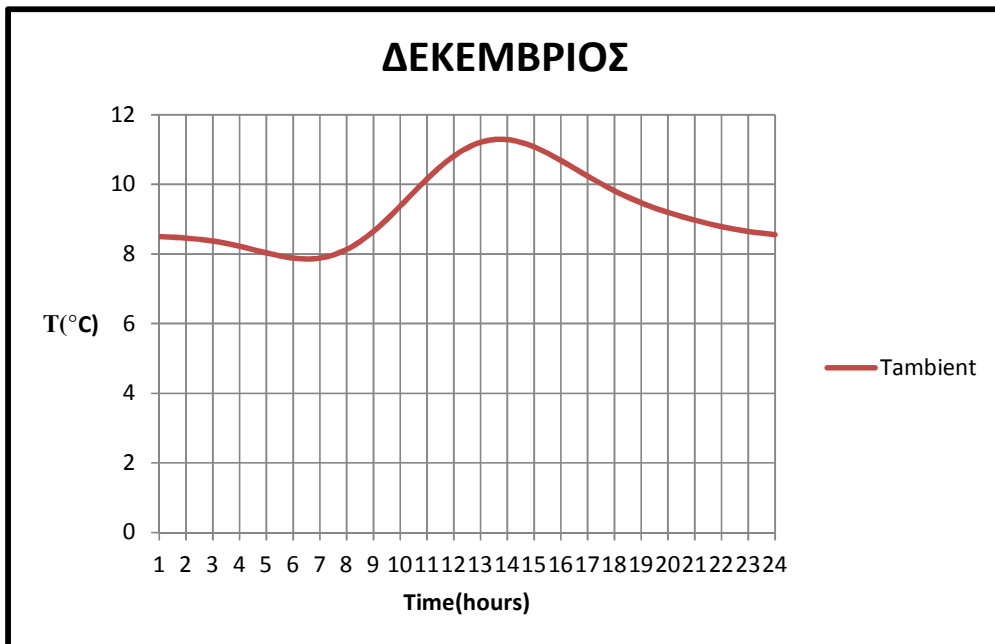
Διάγραμμα 9.12: Θερμοκρασία περιβάλλοντος Μαρτίου



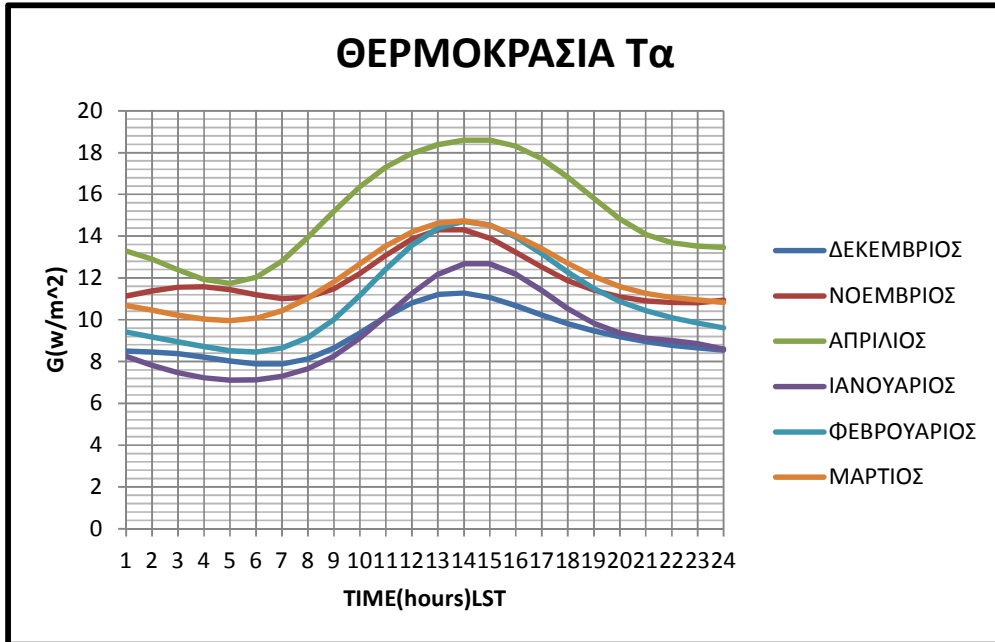
Διάγραμμα 9.13: Θερμοκρασία περιβάλλοντος Απριλίου



Διάγραμμα 9.14: Θερμοκρασία περιβάλλοντος Νοεμβρίου



Διάγραμμα 9.15: Θερμοκρασία περιβάλλοντος Δεκεμβρίου



Διάγραμμα 9.16: Θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a

9.4.Φορτίο νερού

Σύμφωνα με τις οδηγίες του TOTEE παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας 9.3 από όπου μπορούμε να πάρουμε την μέση κατανάλωση νερού ανάλογα την εφαρμογή.

Πίνακας 9.3: Τυπική κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης ανά χρήση κτηρίου για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας.[19]

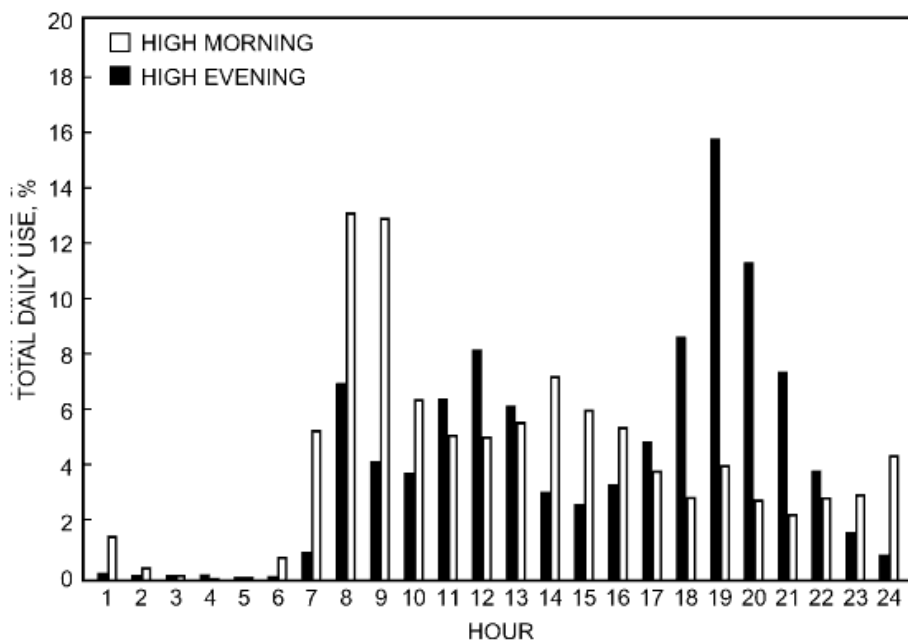
Χρήσεις κτηρίων ή θερμικών ζωνών	Κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης [ℓ/άτομο/ημέρα]	Ημερήσια κατανάλωση ανά δομημ. επιφάνεια [ℓ/m ² /ημέρα]	Ετήσια κατανάλωση ανά δομημ. επιφάνεια [m ³ /m ² /έτος]
Μονοκατοικία, πολυκατοικία (περισσότερα του ενός διαμερίσματα)	50	2,50	0,91
Ξενοδοχείο ετήσιας λειτουργίας	80	9,00	3,28
θερινής λειτουργίας	50	7,50	1,59
χειμερινής λειτουργίας	80	9,00	2,18
Ξενώνας ετήσιας λειτουργίας	80	9,00	3,28
θερινής λειτουργίας	50	7,50	1,59
χειμερινής λειτουργίας	80	9,00	2,18
Οικοτροφείο και κοιτώνας	50	5,00	1,82
Υπνοδωμάτιο ξενοδοχείου, οικοτροφείου κ.ά.	45	3,60	1,31
Κοινόχρηστος χώρος ξενοδοχείου, οικοτροφείου κ.ά	5	1,50	0,55
Εστιατόριο	8	6,40	2,33
Ζαχαροπλαστέιο, καφενείο	2	1,60	0,58
Νυχτερινό κέντρο διασκέδασης, μουσική σκηνή	3	3,00	0,82
Θέατρο, κινηματογράφος	2	2,00	0,73
Χώρος συναυλιών	2	2,00	0,73
Χώρος εκθέσεων, μουσείο	2	1,60	0,58
Χώρος συνεδρίων, αμφιθέατρο, αίθουσα δικαστηρίων	5	5,50	1,43
Τράπεζα	5	2,00	0,52
Αίθουσα πολλαπλών χρήσεων	5	3,75	0,59
Κλειστό γυμναστήριο, κλειστό κολυμβητήριο	40	30,00	10,92
Λουτρό (κοινόχρηστο)	40	4,00	1,46
Νηπιαγωγείο	5	2,50	0,43
Πρωτοβάθμια εκπαίδευση, δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης	7	3,50	0,68
Τριτοβάθμια εκπαίδευση, αίθουσα διδασκαλίας	7	3,50	0,76
Φροντιστήριο, ωδείο	5	2,75	0,54
Νοσοκομείο, κλινική	60	18,00	6,55
Αίθουσα ασθενών (δωμάτιο)	30	6,60	2,40

Χρήσεις κτηρίων ή θερμικών ζωνών	Κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης [ℓ/άτομο/ημέρα]	Ημερήσια κατανάλωση ανά δομημ. επιφάνεια [ℓ/m ² /ημέρα]	Ετήσια κατανάλωση ανά δομημ. επιφάνεια [m ³ /m ² /έτος]
Χειρουργείο (τακτικό)	70	0,00	0,00
Εξωτερικών Ιατρείων	5	0,50	0,13
Αγροτικό ιατρείο, υγειονομικός σταθμός, κέντρο υγείας, ιατρείο	10	1,50	0,39
Ψυχιατρείο, ίδρυμα ατόμων με ειδικές ανάγκες, ίδρυμα χρονίως πασχόντων, οίκος ευγηρίας, βρεφοκομεία	50	2,50	0,91
Βρεφικός σταθμός, παιδικός σταθμός	10	2,50	0,60
Κρατητήριο, αναμορφωτήριο, φυλακή	45	9,00	3,28
Αστυνομική διεύθυνση	5	0,50	0,18
Εμπορικό κέντρο, αγορά και υπεραγορά	1	0,14	0,04
Κατάστημα, φαρμακείο,	1	0,14	0,04
Ινστιτούτο γυμναστικής, κουρείο, κομμωτήριο	40	6,00	1,87
Γραφείο	5	0,50	0,13
Βιβλιοθήκη	2	0,44	0,11
Συνεργείο συντήρησης και επισκευής αυτοκινήτων, βαφείο, ξυλουργείο	10	1,00	0,31
Παρασκευαστήριο τροφίμων	10	1,20	0,37
Καθαριστήριο, σιδερωτήριο, οργανωμένο πλυντήριο ενδυμάτων	10	1,20	0,37
Αυτοτελές κέντρο μηχανογράφησης	2	0,30	0,11
Γενική αποθήκη, αποθήκη καταστήματος, αποθήκη μουσείου	2	0,10	0,04
Χώρος στάθμευσης, πρατήριο υγρών καυσίμων, πλυντήριο αυτοκινήτων	10	0,30	0,09

Επιπλέον ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην εφαρμογές ZNX είναι η διαφοροποίηση του φορτίου κατά την διάρκεια της ημέρας. Η ASHRAE όπως φαίνεται στο σχήμα 9.4 προτείνει δύο μοντέλα για την κατανάλωση νερού στα σπίτια:

- 1) Υψηλής ζήτησης το πρωί
- 2) Υψηλής ζήτησης το απόγευμα

Στους παρακάτω υπολογισμούς θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο 'High evening' και στον πίνακα 9.4 δίνεται το ποσοστό χρήσης ανά ώρα.

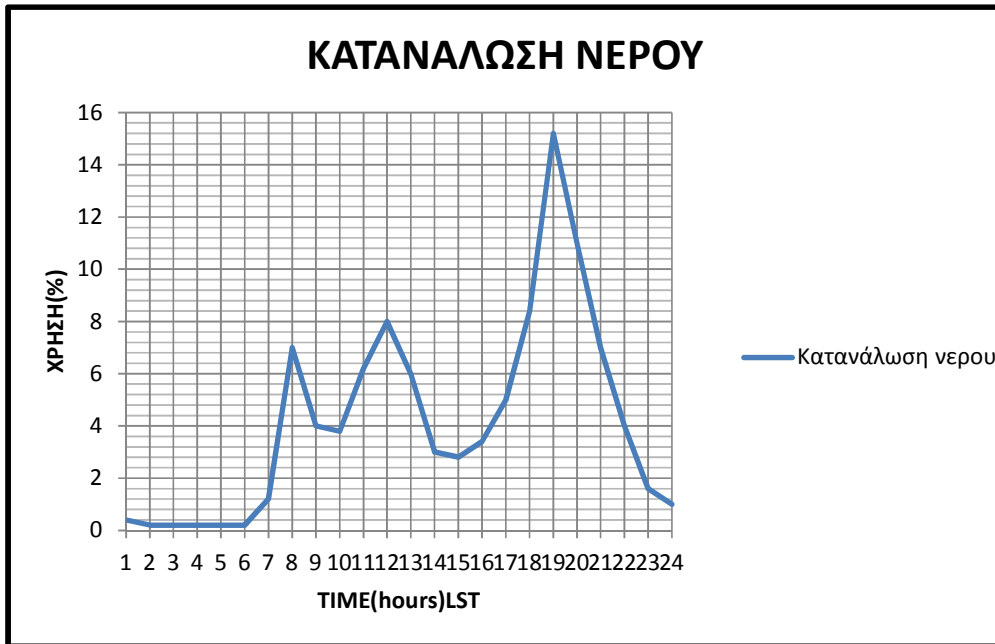


Σχήμα 9.4: Μοντέλα κατανάλωσης νερού [20]

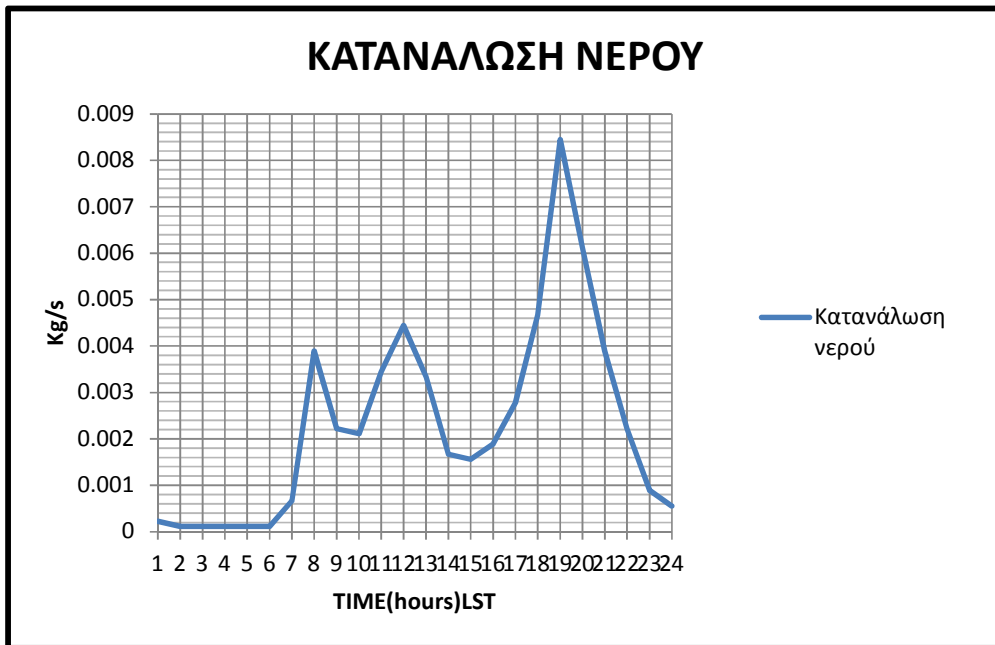
Πίνακας 9.4: Ποσοστιαία κατανάλωση νερού

ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΝΕΡΟΥ(%)	
HOURL	ΧΡΗΣΗ
1	0,4
2	0,2
3	0,2
4	0,2
5	0,2
6	0,2
7	1,2
8	7
9	4
10	3,8
11	6,2
12	8
13	6
14	3
15	2,8
16	3,4
17	5
18	8,4
19	15,2
20	11
21	7
22	4
23	1,6
24	1

Στο διάγραμμα 9.17 βλέπουμε την ποσοστιαία χρήση ανά ώρα του νερού και στο διάγραμμα 9.18 την κατανάλωση ανά ώρα.



Διάγραμμα 9.17: Ποσοστιαία χρήση νερού ανά ώρα



Διάγραμμα 9.18: Κατανάλωση νερού ανά ώρα

Επιπλέον είναι σημαντικό για τους υπολογισμούς η θερμοκρασία του νερού δικτύου Τα στοιχεία αυτά θα τα αντλήσουμε από την τεχνική οδηγία τεχνικού επιμελητηρίου Ελλάδας Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-3/2010 όπως φαίνεται στον πίνακα 9.5

Πίνακας 9.5: Μέση θερμοκρασία δικτύου νερού (°C) σύμφωνα με ΕΛΟΤ 1291[21]

Περιοχή/μήνας	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	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
Αραξος	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

9.5. Φορτία Σπιτιού

Το φορτίο θέρμανσης δεν είναι σταθερό κατά της διάρκεια της ημέρας καθώς παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο η εξωτερική θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία. Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε τα φορτία του σπιτιού ανά μία ώρα αναλυτικά για κάθε χώρο του σπιτιού ξεχωριστά.

Για τον υπολογισμό του συνολικού φορτίου θέρμανσης υπολογίζουμε τα εξής επιμέρους φορτία:

1) Φορτίο οροφής

$$\dot{q} = UA(CLTD) \quad (9.26)$$

$$(CLTD)_{corr} = [(CLTD + LM)K + (25.5 - T_R) + (T_o - 29.4)]f \quad (9.27)$$

Οι τιμές της θερμοκρασιακής διαφοράς ψυκτικού φορτίου CLTD έχουν υπολογιστεί για:

- Σκούρα (ως προς την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας) και επίπεδη επιφάνεια οροφής.
- Εσωτερική θερμοκρασία 25,5 °C

- Μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία 35 °C με μέση τιμή 29,4 και ημερήσια διακύμανση 11.6 °C
- Τυπική ηλιακή ακτινοβολία για την 21 Ιουλίου σε Βόρειο Γεωγραφικό πλάτος 40°
- Εξωτερική θερμική αντίσταση επιφανείας $R_o=0.059 \text{ m}^2\text{°C/w}$
- Εσωτερική θερμική αντίσταση επιφανείας $R_i=0.121 \text{ m}^2\text{°C/w}$

Για διαφορετικές συνθήκες , λαμβάνεται η ορθή τιμή $(CLTD)_{corr}$. Ο τύπος της οροφής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής :
101,6mm h.w. concrete with 25.4mm insulation με θερμική αντίσταση $U=1.136 \text{ w/ m}^2\text{°C}$

2) Φορτίο εξωτερικών τοίχων

$$\dot{q} = UA(CLTD)$$

$$(CLTD)_{corr} = [(CLTD + LM)K + (25.5 - T_R) + (T_o - 29.4)] \quad (9.28)$$

Όπου:

LM= διόρθωση για γεωγραφικό πλάτος και μήνα

K= 1 για τοίχο σκούρου χρώματος, 0,83 για μονίμως μέσου χρώματος, 0,65 για τοίχους μονίμου ανοικτού χρώματος

Ο τύπος εξωτερικού τοίχου που χρησιμοποιούμε είναι 101.6mm concrete +25.4mm insulation και $U=1.136 \text{ w/ m}^2\text{°C}$

3) Φορτίο υαλοπινάκων

A)θερμικό κέρδος δια αγωγής

$$\dot{q} = UA(CLTD)$$

$$(CLTD)_{corr} = [CLTD + (25.5 - T_R) + (T_o - 29.4)] \quad (9.29)$$

B)Ηλιακό θερμικό κέρδος.

$$\dot{q} = A(SC)(SHGF)_{max}(CLF) \quad (9.30)$$

Όπου:

A= καθαρή επιφάνεια υαλοπίνακος.

Sc= συντελεστής σκίασης, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 0,7.

$(SHGF)_{max}$ =Μέγιστος παράγων ηλιακού θερμικού κέρδους (W/m^2) για τον προσανατολισμό του υαλοπίνακα ,τον μήνα και το γεωγραφικό πλάτος.

CLF= παράγων ψυκτικού φορτίου.

4) Φορτίο από φωτισμό

$$HG = Pf_u f_s \quad (9.31)$$

$$\dot{q} = (HG)(CLF) \quad (9.32)$$

Όπου:

HG= θερμικό κέρδος λόγω ηλεκτροφωτισμού.

P= ηλεκτρική ισχύς όλων των εγκατεστημένων φωτιστικών στον χώρο σε W.

f_u = συντελεστής χρήσης, δηλαδή το κλάσμα των εγκατεστημένων φωτιστικών που είναι εν λειτουργία υπό τις συνθήκες του υπολογισμού.

f_s = ειδικός συντελεστής, $f_s=1$ για λαμπτήρες πυρακτώσεως και $f_s=1.2$ για λαμπτήρες φθορισμού.

5) Φορτία από ανθρώπους

$$\dot{q}_l = N(HG)_l \quad (9.33)$$

$$\dot{q}_s = N(HG)_s(CLF) \quad (9.34)$$

Όπου:

q_l = λανθάνον φορτίο, W

q_s = αισθητό φορτίο, W

$(HG)_l$ = λανθάνον θερμικό κέρδος

$(HG)_s$ = αισθητό θερμικό κέρδος

N= πλήθος ατόμων, στην περίπτωση μας N=4

CLF= παράγων ψυκτικού φορτίου

6) Φορτίο από ανανέωση και διείσδυση αέρα

$$\dot{q}_s = 1.23Q(\Delta t) \quad (9.35)$$

$$\dot{q}_l = 3010Q(\Delta W) \quad (9.36)$$

$$\dot{q}_t = 1.2Q(\Delta h) \quad (9.37)$$

Όπου:

$\dot{q}_s, \dot{q}_l, \dot{q}_t$ = αισθητό, λανθάνον, και ολικό ψυκτικό φορτίο αντίστοιχα, W

Q= παροχή εξωτερικού αέρα, και λαμβάνεται Q=3,5 L/s

Δt = διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισερχόμενου και εξερχόμενου αέρα σε °C, και για τις εξωτερικές συνθήκες χρησιμοποιούμε την μέση τιμή θερμοκρασίας του εκάστοτε μήνα

ΔW = διαφορά υγρασίας μεταξύ εισερχόμενου και εξερχόμενου αέρα, kg υγρασίας/kg ξυρού αέρα

Δh = διαφορά ενθαλπίας μεταξύ εισερχόμενου και εξερχόμενου αέρα.

Για τον υπολογισμό της διαφοράς υγρασίας και ενθαλπίας πρέπει να βρούμε τα σημεία στο ψυχομετρικό χάρτη. Θεωρούμε πώς οι συνθήκες του σπιτιού είναι σταθερές:

Πίνακας : Συνθήκες σπιτιού

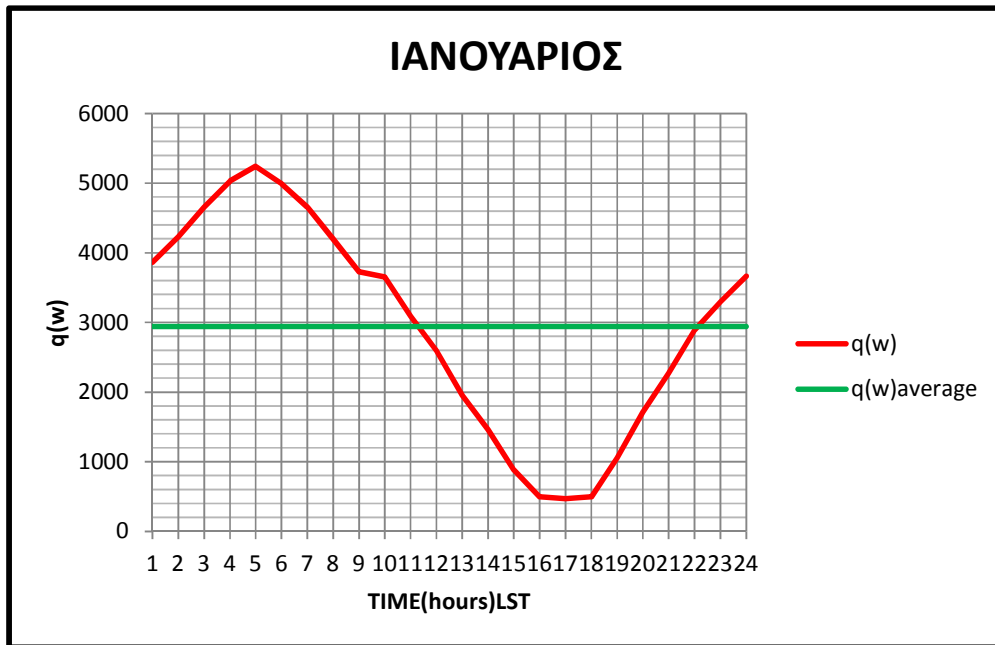
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΠΙΤΙΟΥ		
Tdb	20	°C
Twb	13,72496	°C
W	0,007262	Kg υγρασίας/Kg ξα
h	38,542	kJ/Kg

Για τις εξωτερικές συνθήκες χρησιμοποιούμε μέση θερμοκρασία του κάθε μήνα και από τον πίνακα 9.7 παρακάτω παίρνουμε την μέση μηνιαία σχετική υγρασία(%) οπότε υπολογίζουμε την ενθαλπία και την μέση ειδική υγρασία.

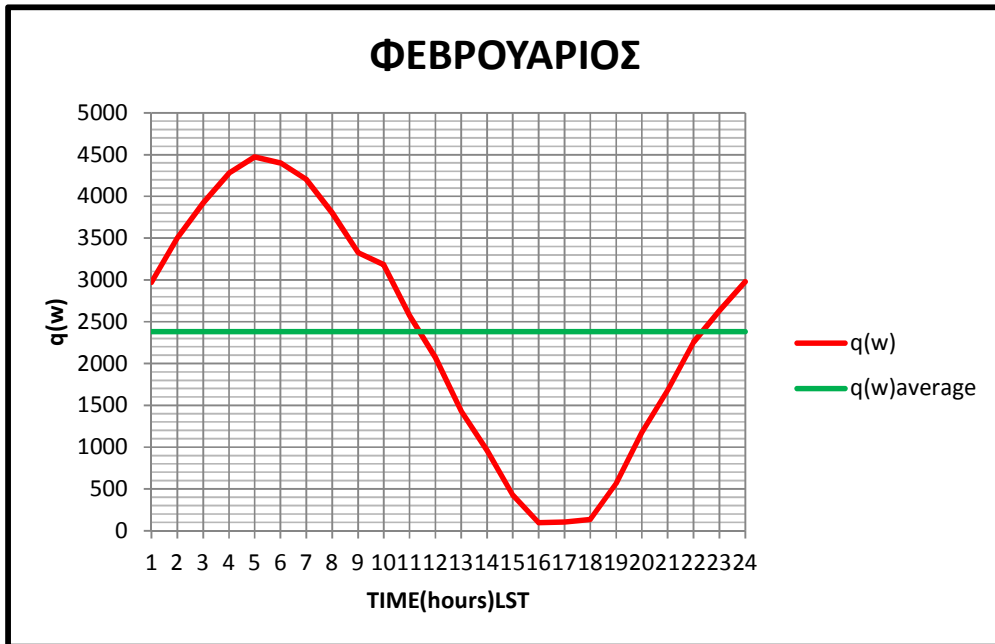
Πίνακας 9.6 Μέση μηνιαία σχετική υγρασία [%]

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	68,8	67,6	65,8	62,5	58,6	52,2	46,8	46,7	53,5	62,0	68,8	70,1
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	74,4	71,9	68,6	61,6	53,9	45,8	43,0	45,2	53,9	66,0	74,1	76,0
Αγρίνιο	75,5	73,2	70,2	68,1	63,0	57,2	55,2	56,1	63,6	69,9	77,8	78,6
Αγχιάλος	74,9	73,1	72,6	68,4	63,5	53,3	50,7	53,0	60,1	68,9	75,0	76,3
Αλεξανδρούπολη	75,5	73,6	72,6	71,1	68,3	60,5	54,0	54,0	60,0	68,2	75,5	76,9
Αλιartos	74,6	71,7	67,9	60,3	56,1	47,6	47,6	50,4	56,2	67,8	74,3	76,0
Ανδραβίδα	78,0	76,6	75,5	74,4	70,2	64,4	62,9	64,0	67,7	72,1	78,4	79,4
Αραξος	73,6	72,7	72,1	71,8	68,7	62,7	59,2	59,6	65,3	69,3	75,9	76,4
Άργος (Πυργέλα)	75,2	73,5	72,2	68,1	60,8	54,1	52,5	56,7	65,3	72,2	76,6	76,6
Αργασόλι	75,5	73,6	72,6	71,1	68,3	60,5	54,0	54,0	60,0	68,2	75,5	76,9
Άρτα	72,6	70,9	70,0	71,9	68,5	64,6	64,1	65,5	70,3	73,2	77,5	76,5
Δράμα	78,7	73,2	69,0	63,7	60,7	55,3	52,6	55,0	59,3	69,0	77,7	81,0
Έδεσσα	71,0	71,9	67,6	64,9	62,1	55,4	51,5	54,0	60,6	68,5	72,1	71,5
Ζάκυνθος	81,1	79,1	79,8	78,9	70,5	61,8	58,8	62,4	70,5	76,3	81,8	81,1
Ηράκλειο	68,0	66,0	65,7	61,8	60,6	56,1	56,5	58,3	61,2	65,4	67,3	67,9
Θεσσαλονίκη	76,0	72,6	71,6	67,5	63,6	55,4	52,8	55,1	61,9	70,1	76,4	77,8
Ιεράπετρα	74,0	73,7	72,2	68,4	64,1	56,8	49,4	52,5	59,6	69,1	73,3	74,3
Ιωάννινα	77,2	73,9	69,4	68,1	65,8	58,8	52,1	54,1	63,9	71,1	80,0	81,8
Καλαμάτα	72,9	72,1	71,3	70,4	66,5	58,6	57,9	61,4	65,4	69,4	75,1	75,3
Καρδίτσα	78,0	73,3	68,2	65,3	60,4	57,0	51,4	54,2	54,5	66,3	73,3	76,4
Καρπενήσι	68,0	70,5	73,9	60,6	61,8	55,6	52,2	53,8	59,1	66,2	73,8	73,5
Κάρυστος	71,1	70,2	70,8	68,0	67,1	62,6	56,0	57,6	61,4	68,1	73,4	72,7
Καστοριά	78,6	73,4	66,6	62,4	63,5	53,1	49,3	52,4	59,3	69,3	77,4	80,3
Κέρκυρα	75,9	74,3	73,2	72,7	69,5	63,4	59,8	62,1	70,4	74,8	77,6	77,4
Κοζάνη	74,2	70,1	67,5	63,0	62,0	54,8	49,8	50,4	57,0	66,7	74,7	75,7
Κομοτηνή	72,5	71,7	70,2	69,8	67,1	58,3	52,4	51,3	58,9	67,9	75,1	75,6
Κόνιτσα	69,7	66,4	62,3	63,0	62,9	57,3	51,5	51,9	58,2	65,7	74,2	74,5
Κόρινθος (Βέλο)	74,4	71,0	70,4	66,2	59,8	53,0	52,0	54,5	61,9	68,5	75,1	75,6
Κύθηρα	72,2	72,7	71,8	68,5	63,5	57,2	54,6	56,6	62,9	68,5	72,5	73,1
Κως	71,3	71,2	72,4	69,9	67,1	60,8	58,8	63,6	64,5	68,4	71,5	73,9
Λαμία	76,6	74,4	70,8	64,6	59,1	49,7	50,1	54,5	60,1	70,5	75,8	77,1
Λάρισα	79,8	75,0	72,6	68,1	61,3	48,8	46,3	49,9	58,7	69,8	79,2	82,0
Λευκάδα	71,9	70,6	68,0	69,0	70,8	69,3	69,4	74,4	73,7	72,2	73,4	73,5
Λήμνος	76,9	74,8	75,3	73,9	68,6	59,7	56,7	61,1	66,3	73,2	78,0	78,5

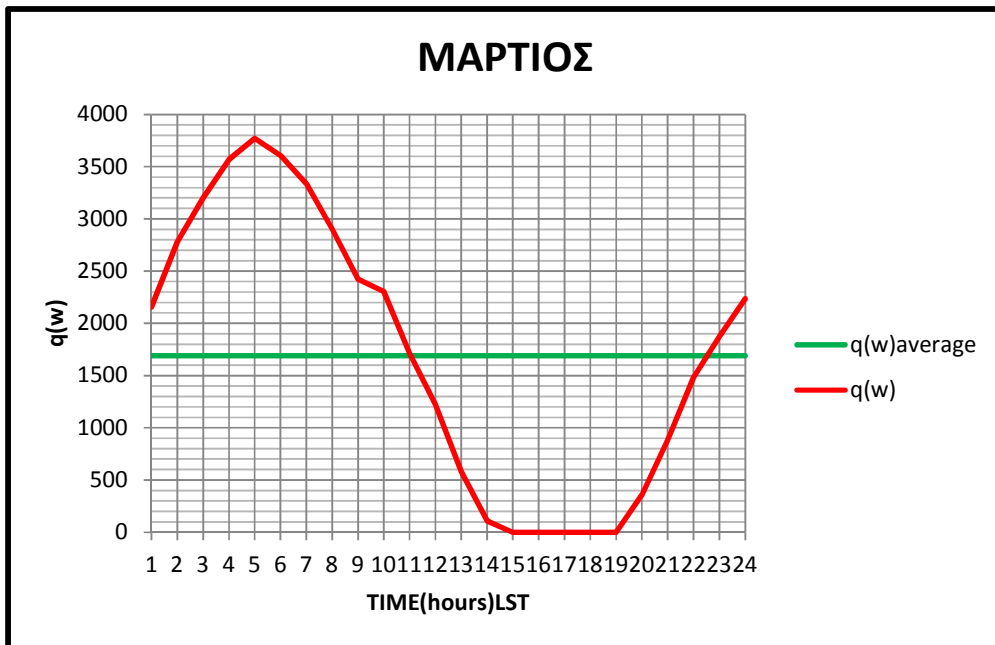
Σύμφωνα με τα παραπάνω παίρνουμε τα παρακάτω διαγράμματα των φορτίων θέρμανσης για τους μήνες από Νοέμβριο μέχρι Απρίλιο. Για τους μήνες Νοέμβριο, Μάρτιο, Απρίλιο τις ώρες όπου η ηλιακή ακτινοβολία υπερκαλύπτει την απαιτούμενη θερμότητα για εσωτερικές συνθήκες 20 °C και 50% υγρασία παίρνουμε φορτίο θέρμανσης $q=0$ W και οποιαδήποτε επιπλέον θερμότητα δεν αποθηκεύεται για τις επόμενες ώρες. Τέλος στο διάγραμμα βλέπουμε την διαφορά των φορτίων ανά μήνα.



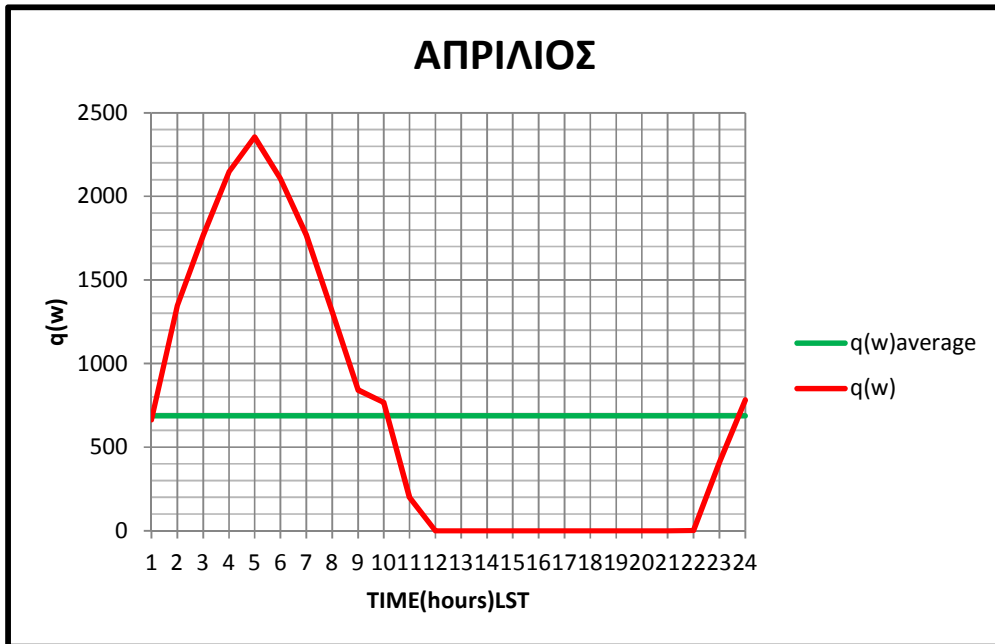
Διάγραμμα 9.19: Φορτία μήνα Ιανουαρίου



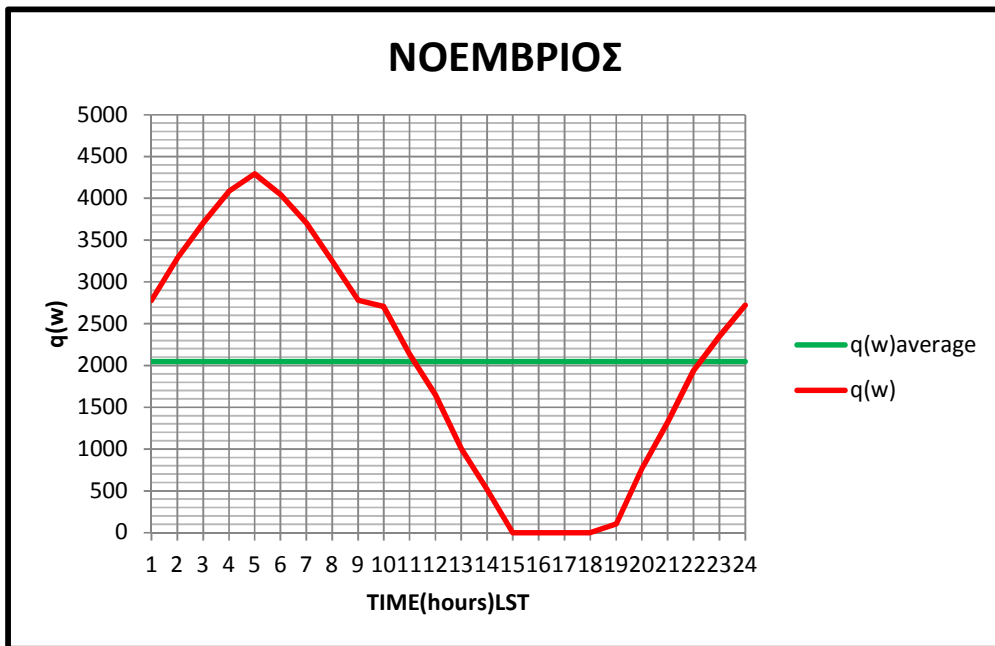
Διάγραμμα 9.20: Φορτία μήνα Φεβρουάριου



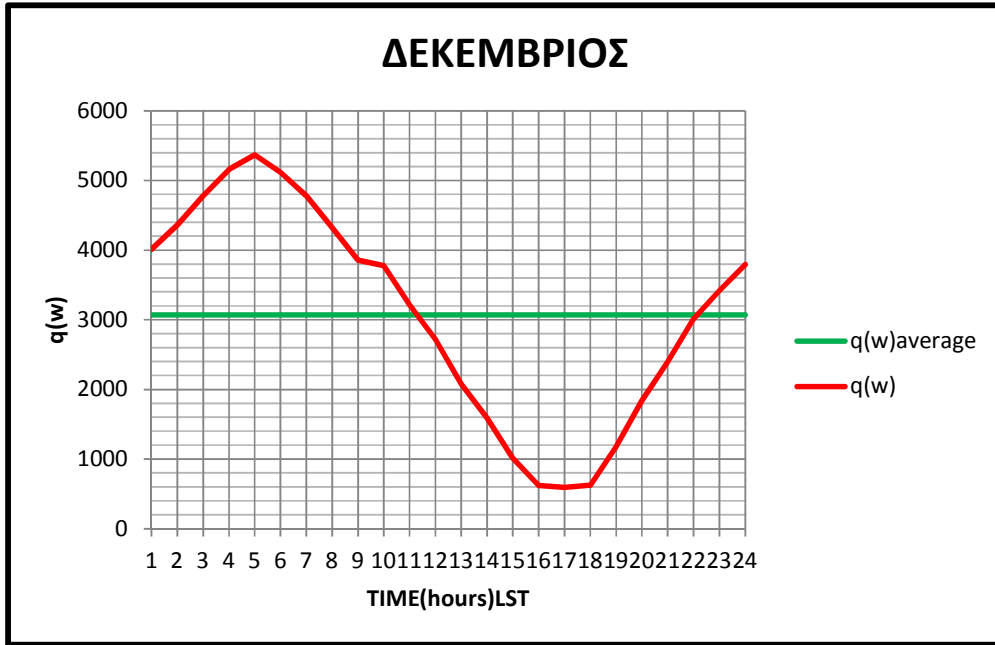
Διάγραμμα 9.21: Φορτία μήνα Μαρτίου



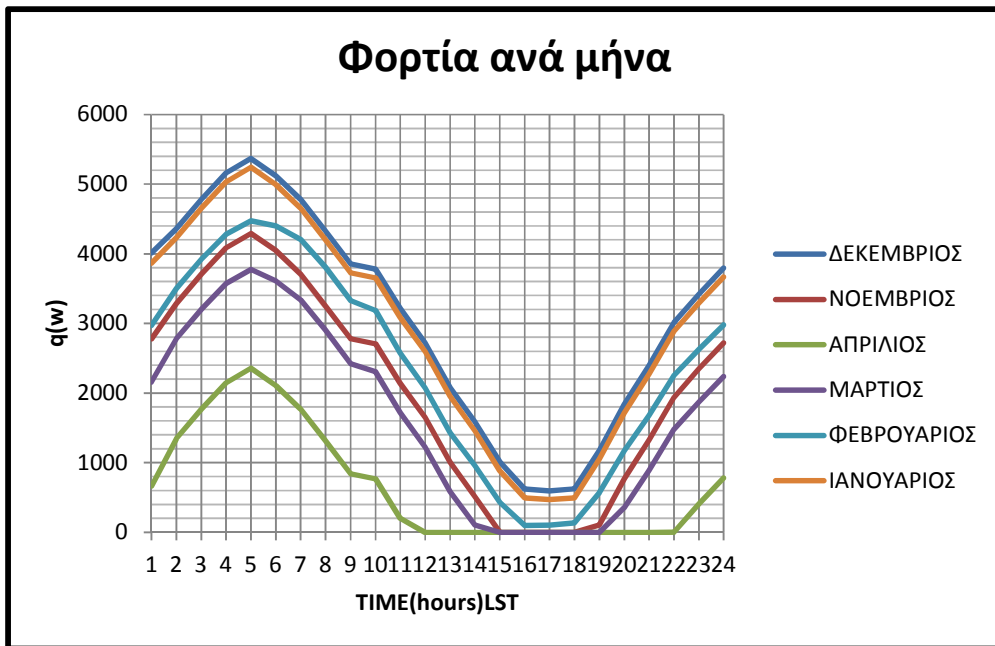
Διάγραμμα 9.22: Φορτία μήνα Απριλίου



Διάγραμμα 9.23: Φορτία μήνα Νοέμβρη



Διάγραμμα 9.24: Φορτία μήνα Δεκέμβρη



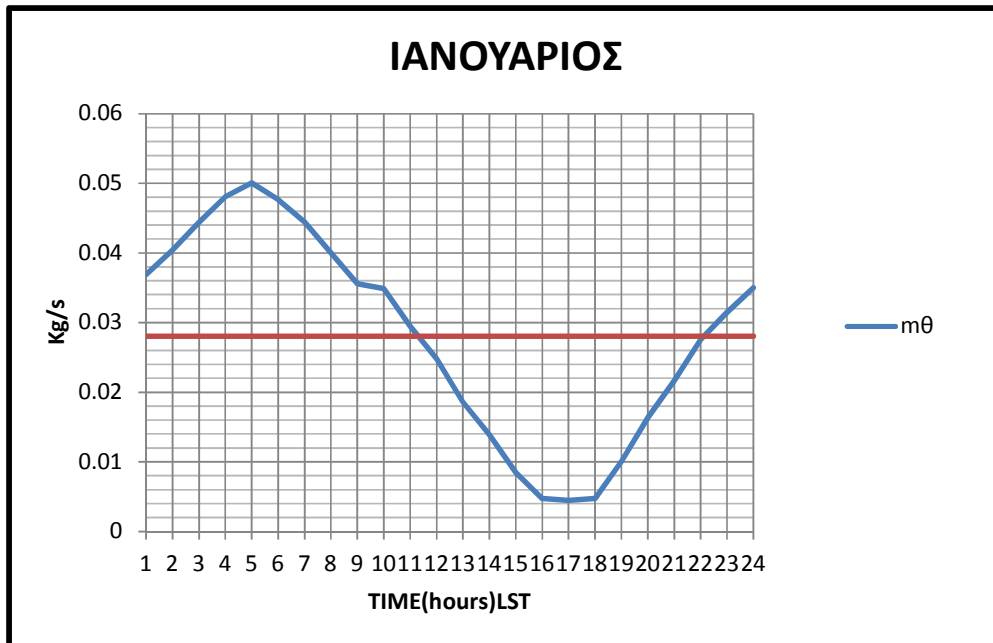
Διάγραμμα 9.25: Φορτία όλων των μηνών

Στην συνέχεια από τα φορτία κάθε μήνα και από τον τύπο:

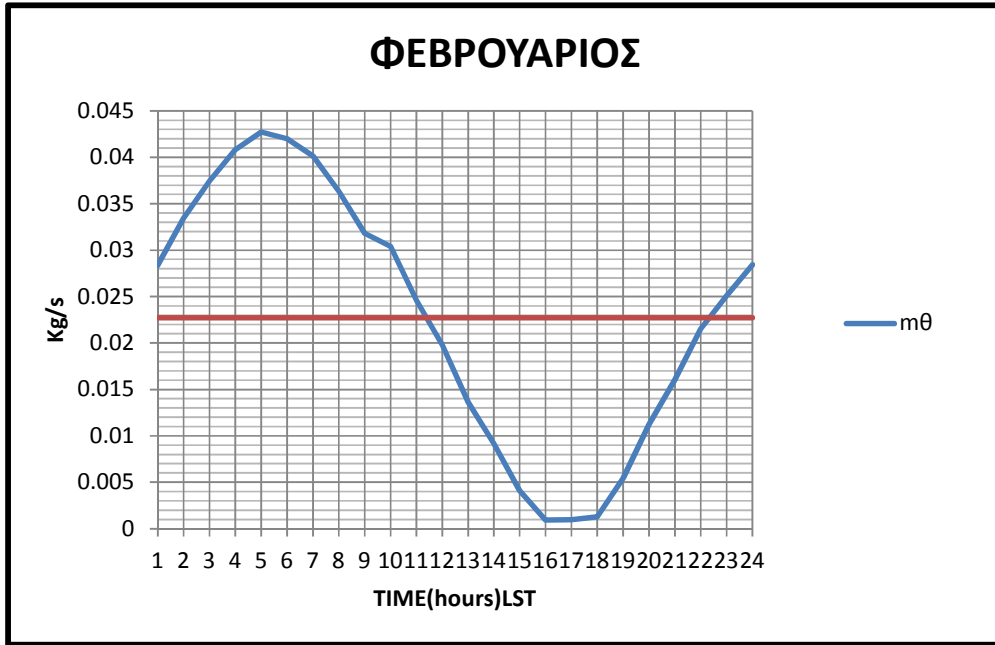
$$q(w) = \dot{m}_\theta \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \cdot C_p \left(\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right) \cdot (T_{\theta\epsilon\rho\mu} - T_{\epsilon\pi\iota\sigma\tau\rho\phi}) \quad (9.29)$$

Όπου $T_{\theta\epsilon\rho\mu}$ η θερμοκρασία νερού θέρμανσης θα υπολογίσουμε την απαιτούμενη παροχή \dot{m}_θ για την θέρμανση του σπιτιού για κάθε μήνα όπου

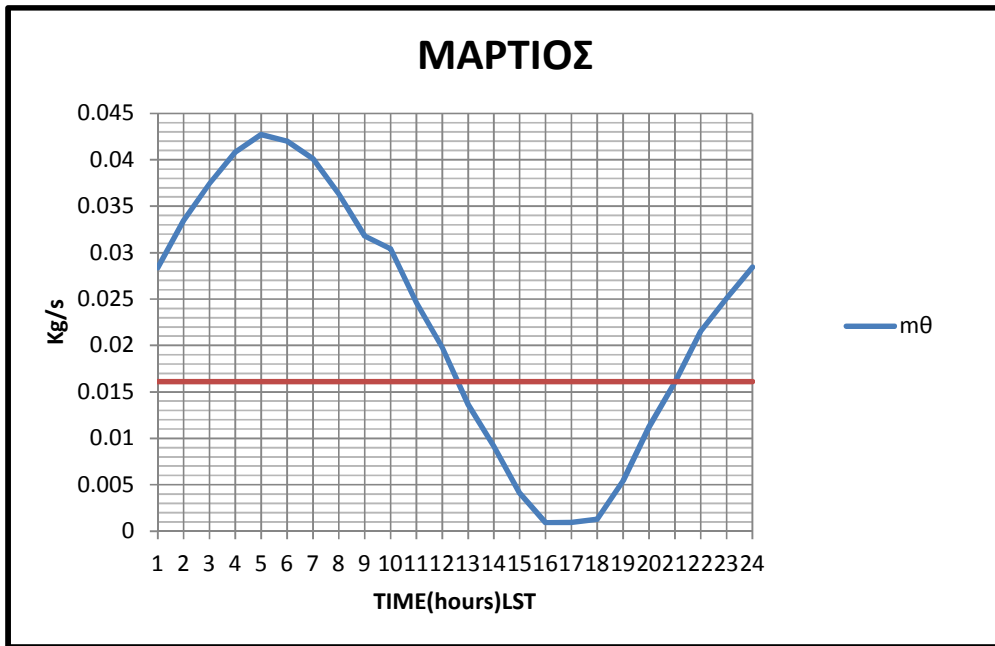
$$T_{\theta\epsilon\rho\mu} = 50^\circ\text{C} \text{ και } T_{\epsilon\pi\iota\sigma\tau\rho\phi} = 25^\circ\text{C}$$



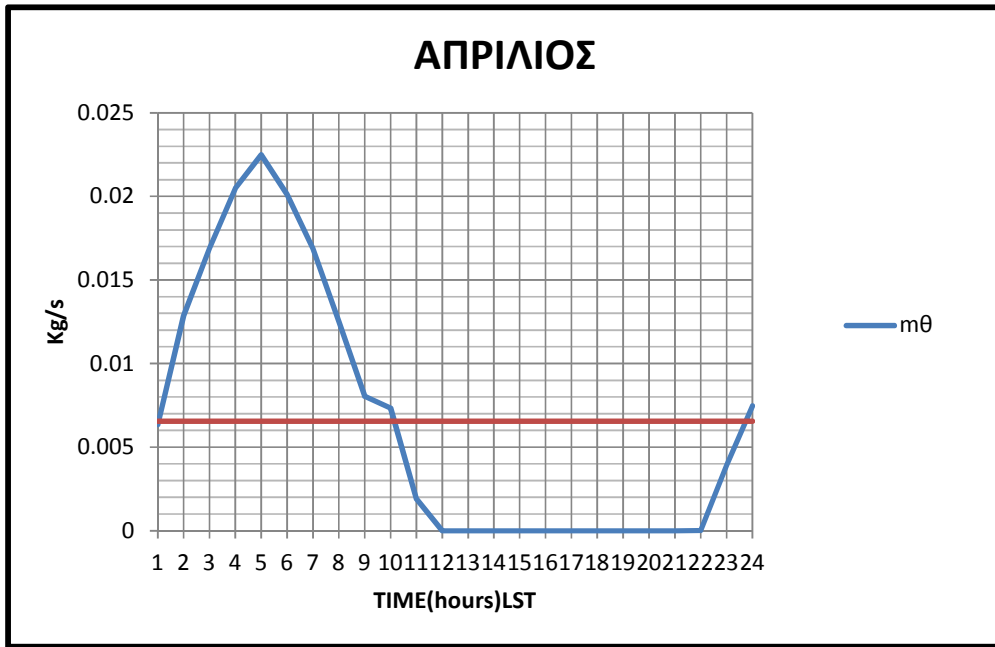
Διάγραμμα 9.26: Παροχή νερού θέρμανσης \dot{m}_θ για τον Ιανουάριο



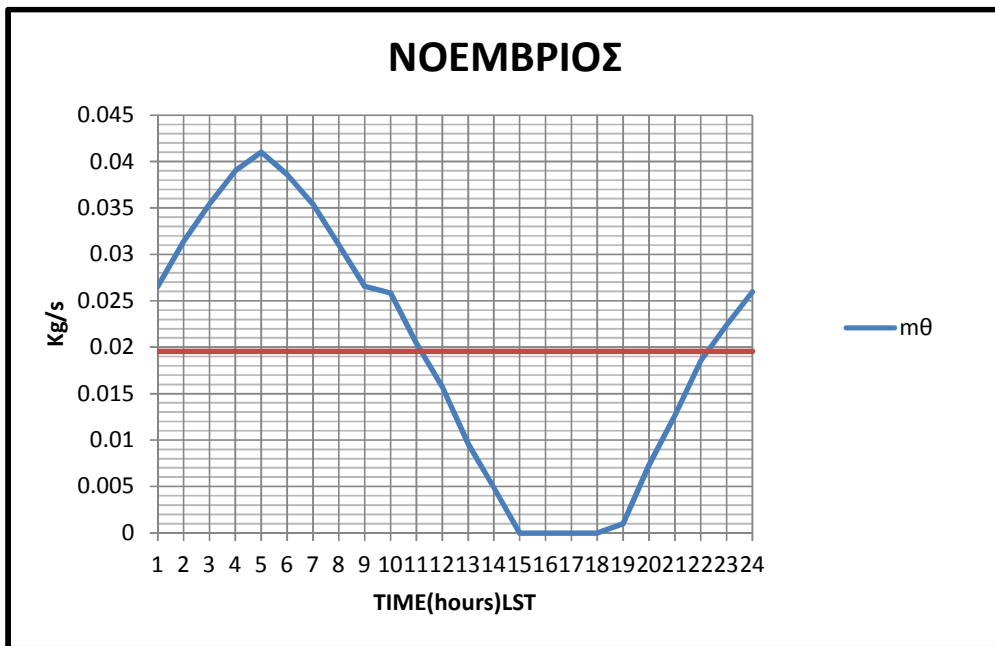
Διάγραμμα 9.27: Παροχή νερού θέρμανσης \dot{m}_θ για τον Φεβρουάριο



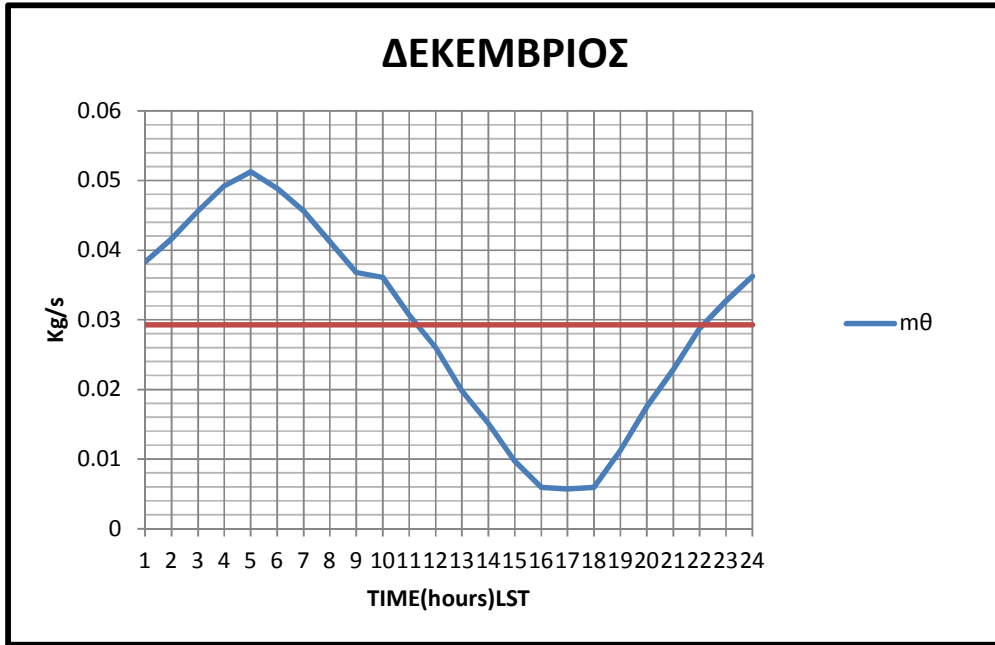
Διάγραμμα 9.28: Παροχή νερού θέρμανσης \dot{m}_θ για τον Μάρτιο



Διάγραμμα 9.29: Παροχή νερού θέρμανσης \dot{m}_θ για τον Απρίλιο



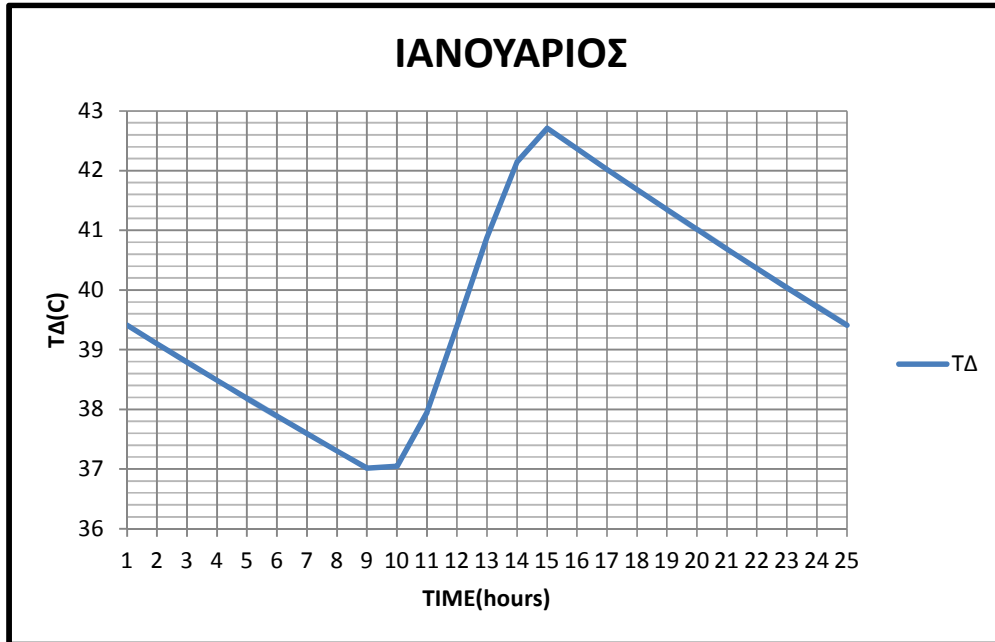
Διάγραμμα 9.30: Παροχή νερού θέρμανσης \dot{m}_θ για τον Νοέμβριο



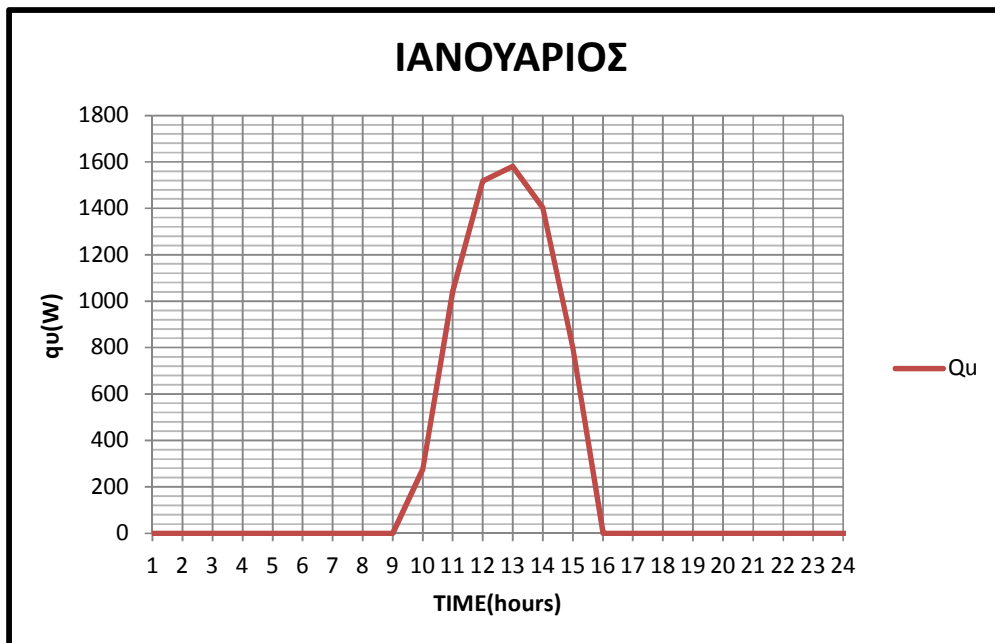
Διάγραμμα 9.31: Παροχή νερού θέρμανσης \dot{m}_θ για τον Δεκέμβριο

9.6. Θερμοκρασία δεξαμενής μόνο με κατανάλωση νερού

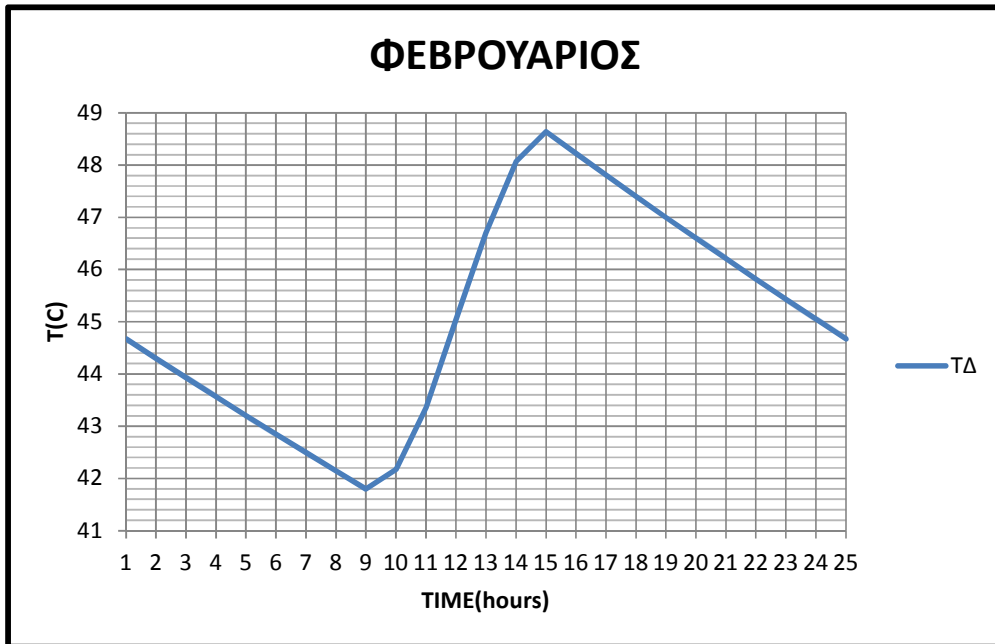
9.6.1. Θερμοκρασία δεξαμενής με σταθερή κατανάλωση νερού



Διάγραμμα 9.32: Θερμοκρασία δεξαμενής για σταθερή κατανάλωση νερού



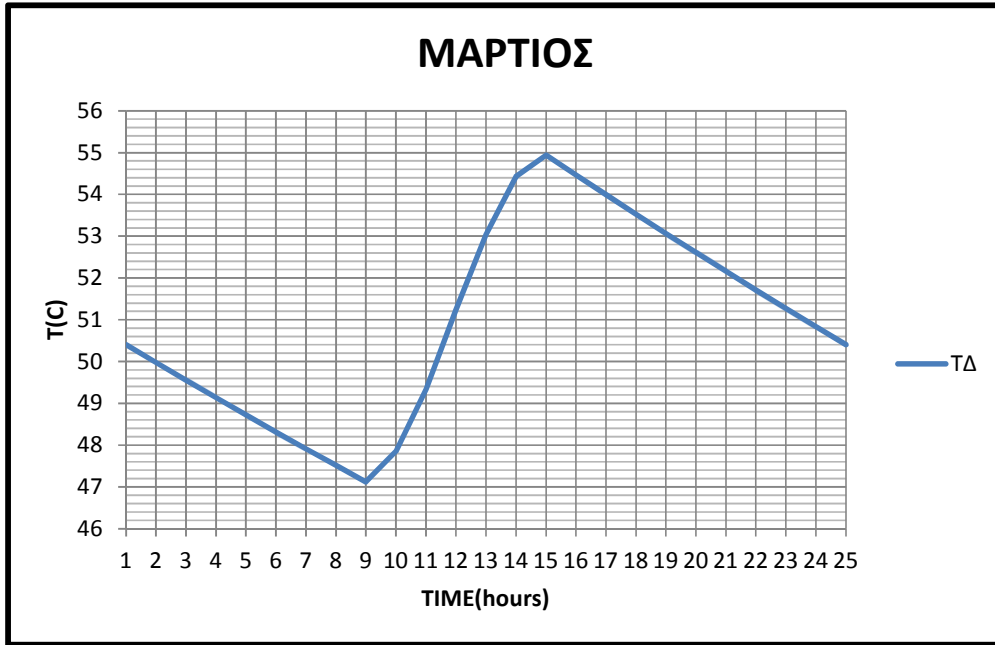
Διάγραμμα 9.33: Ενέργεια από συλλέκτη



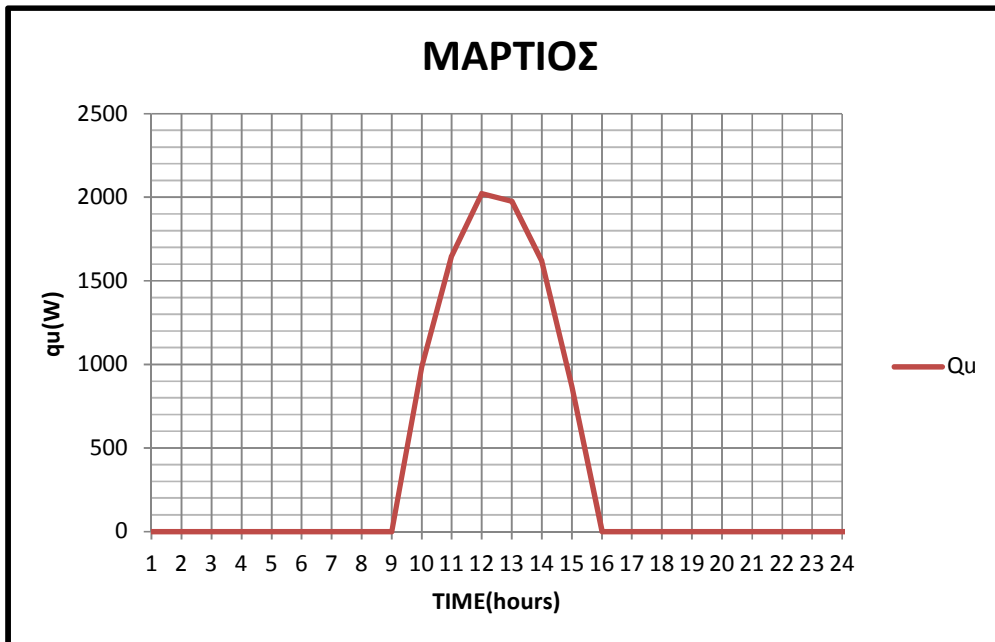
Διάγραμμα 9.34: Θερμοκρασία δεξαμενής για σταθερή κατανάλωση νερού



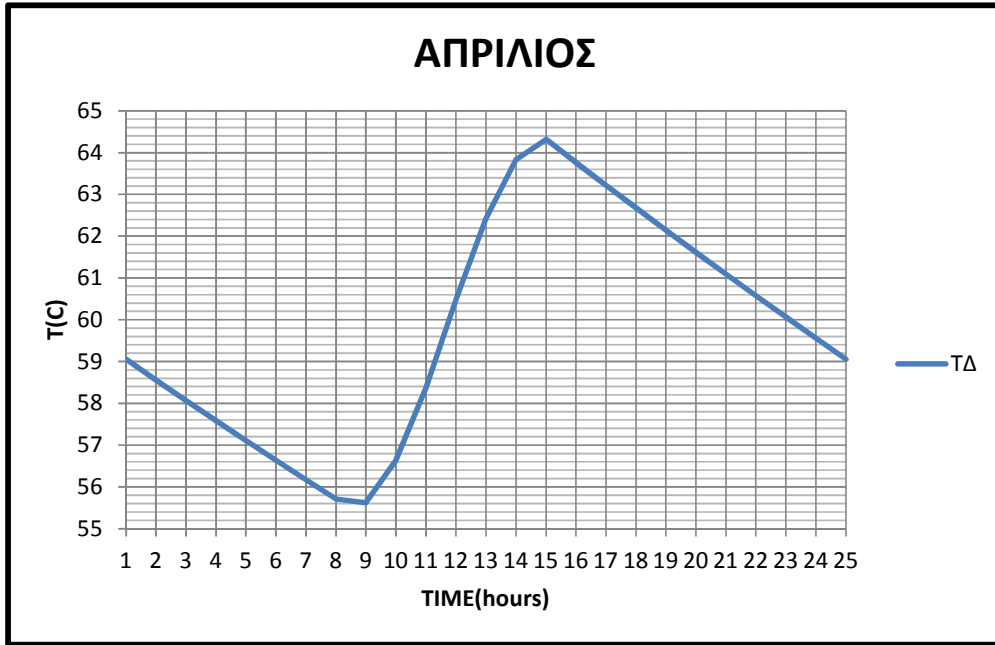
Διάγραμμα 9.35: Ενέργεια από συλλέκτη



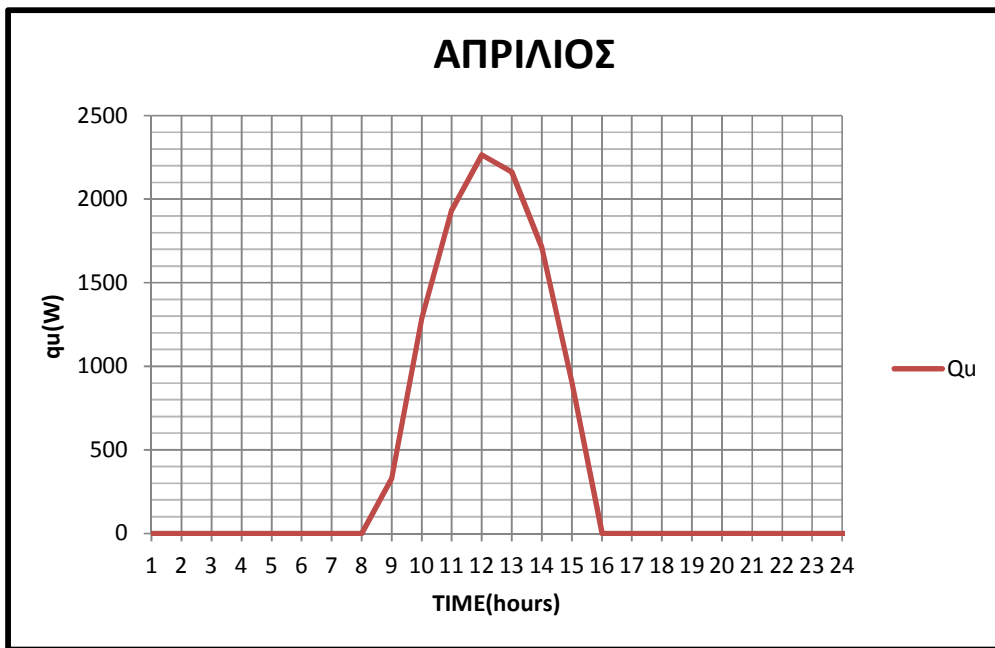
Διάγραμμα 9.36: Θερμοκρασία δεξαμενής για σταθερή κατανάλωση νερού



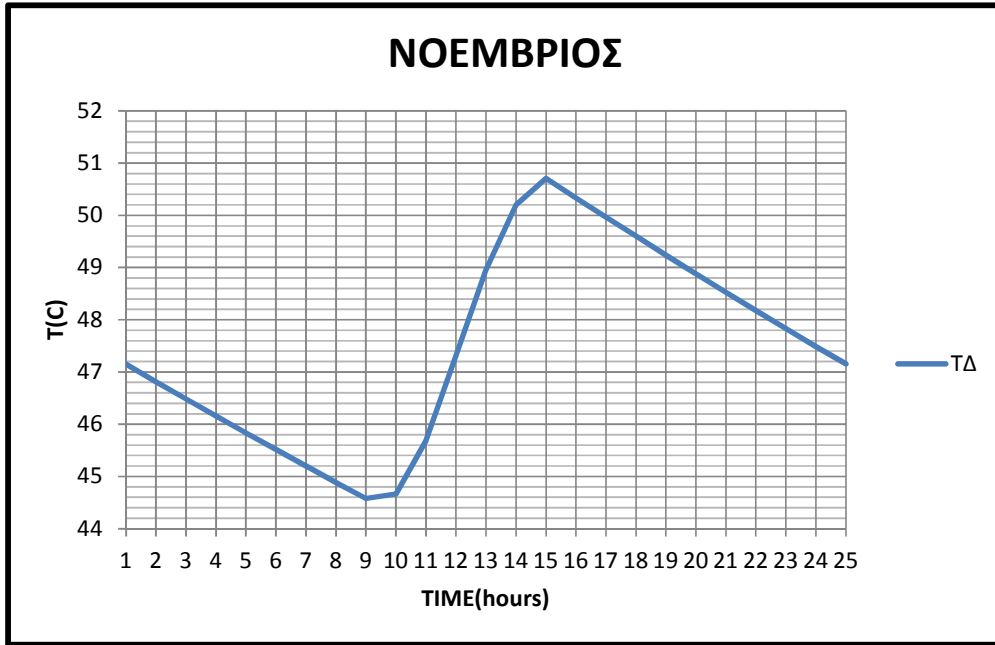
Διάγραμμα 9.37: Ενέργεια από συλλέκτη



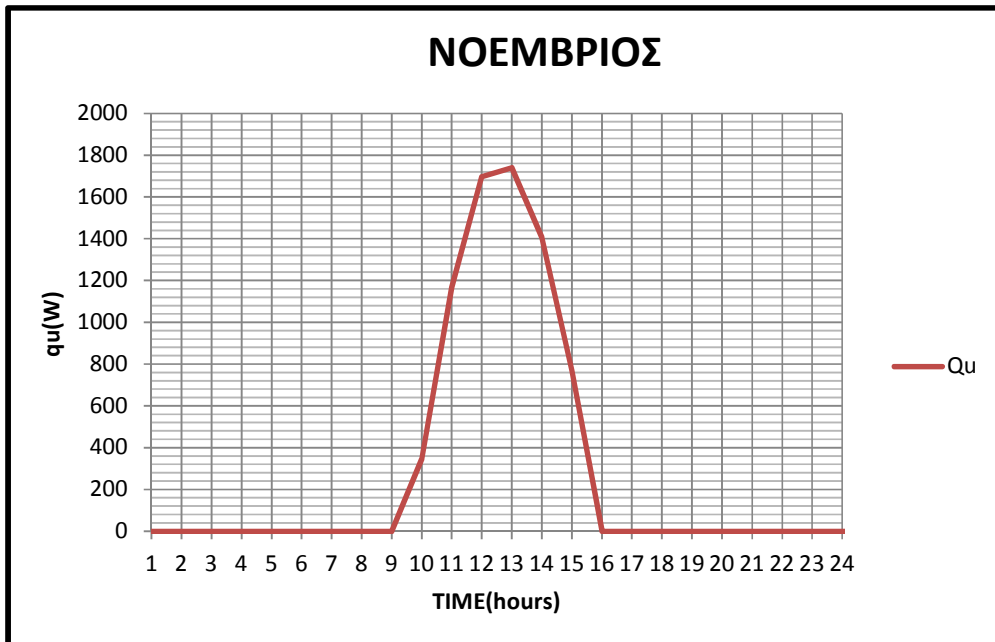
Διάγραμμα 9.38: Θερμοκρασία δεξαμενής για σταθερή κατανάλωση νερού



Διάγραμμα 9.39: Ενέργεια από συλλέκτη



Διάγραμμα 9.40: Θερμοκρασία δεξαμενής για σταθερή κατανάλωση νερού



Διάγραμμα 9.41: Ενέργεια από συλλέκτη



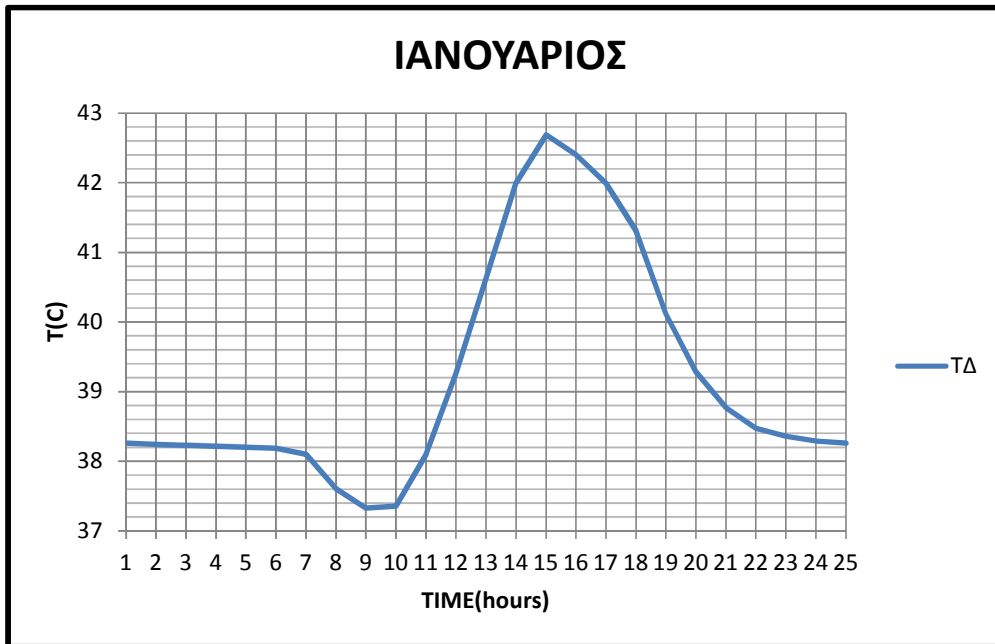
Διάγραμμα 9.42: Θερμοκρασία δεξαμενής για σταθερή κατανάλωση νερού



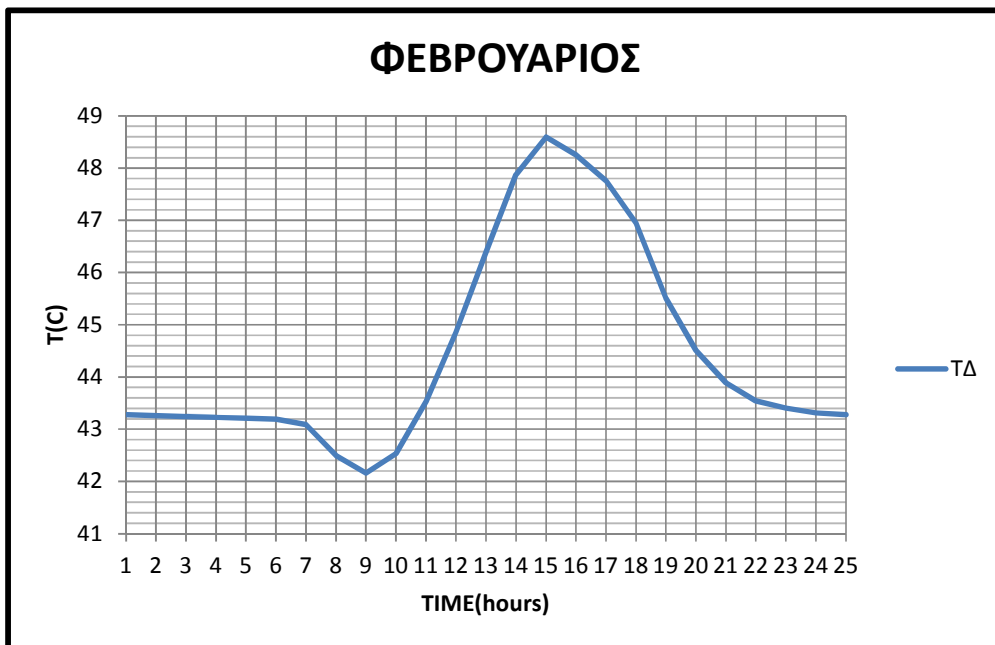
Διάγραμμα 9.43: Ενέργεια από συλλέκτη
Παρατηρήσεις:

Φαίνεται ξεκάθαρα στα παραπάνω διαγράμματα η μείωση της θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής της που έχουμε ηλιοφάνεια και η αύξηση της τις ώρες της ηλιοφάνειας.

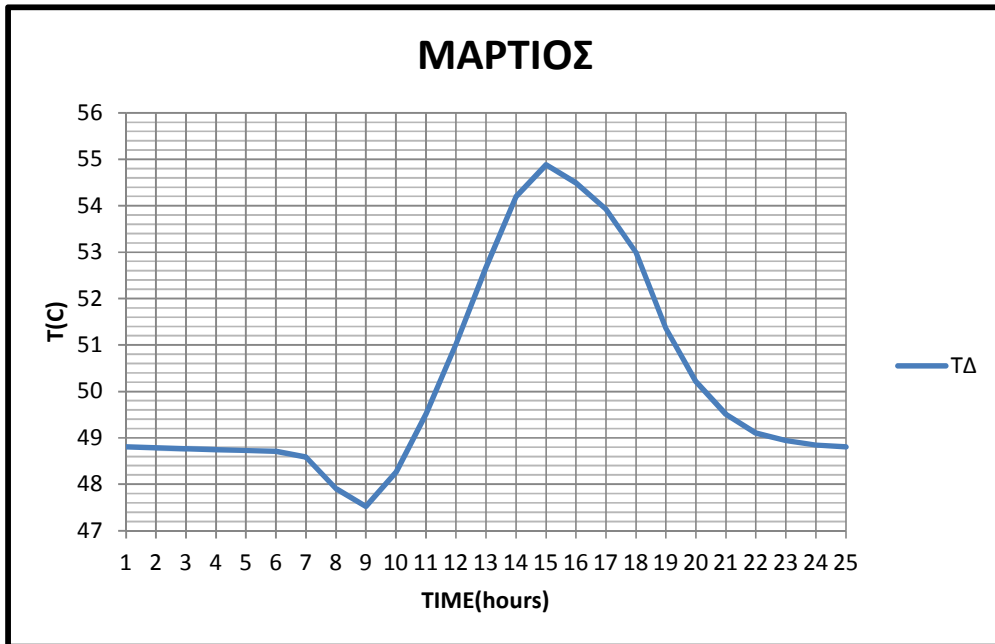
9.6.2. Μη σταθερό φορτίο νερού



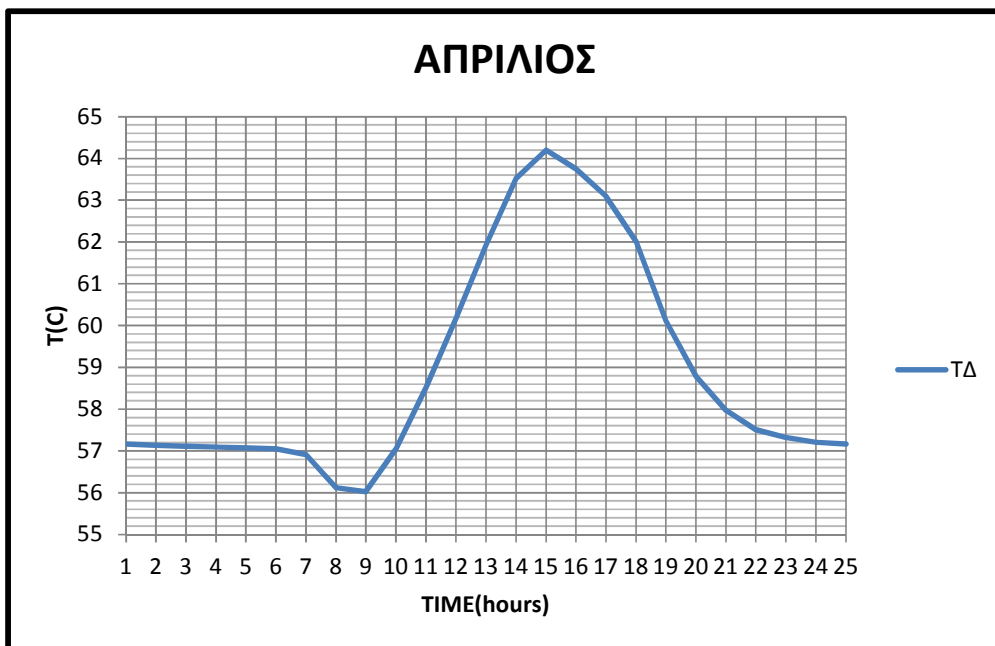
Διάγραμμα 9.44: Θερμοκρασία δεξαμενής για κυμαινόμενη κατανάλωση νερού



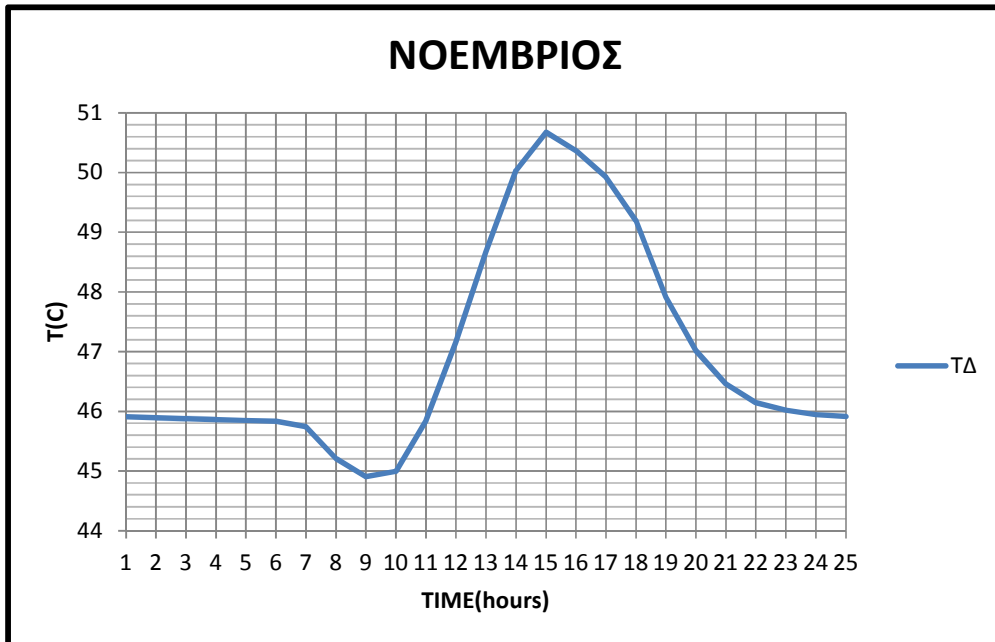
Διάγραμμα 9.45: Θερμοκρασία δεξαμενής για κυμαινόμενη κατανάλωση νερού



Διάγραμμα 9.46: Θερμοκρασία δεξαμενής για κυμαινόμενη κατανάλωση νερού



Διάγραμμα 9.47: Θερμοκρασία δεξαμενής για κυμαινόμενη κατανάλωση νερού



Διάγραμμα 9.48: Θερμοκρασία δεξαμενής για κυμαινόμενη κατανάλωση νερού



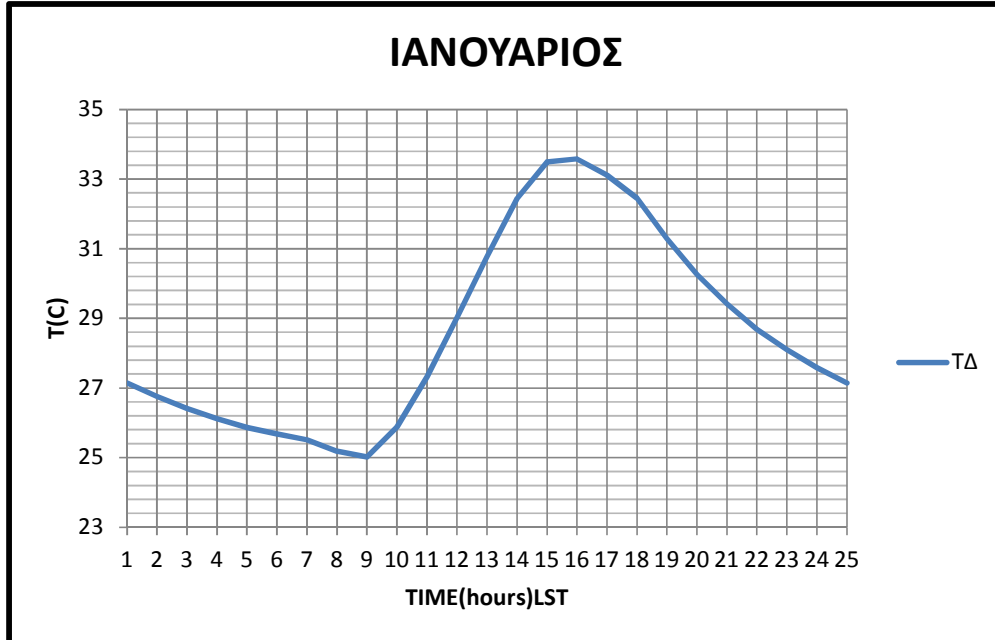
Διάγραμμα 9.49: Θερμοκρασία δεξαμενής για κυμαινόμενη κατανάλωση νερού

Παρατηρήσεις:

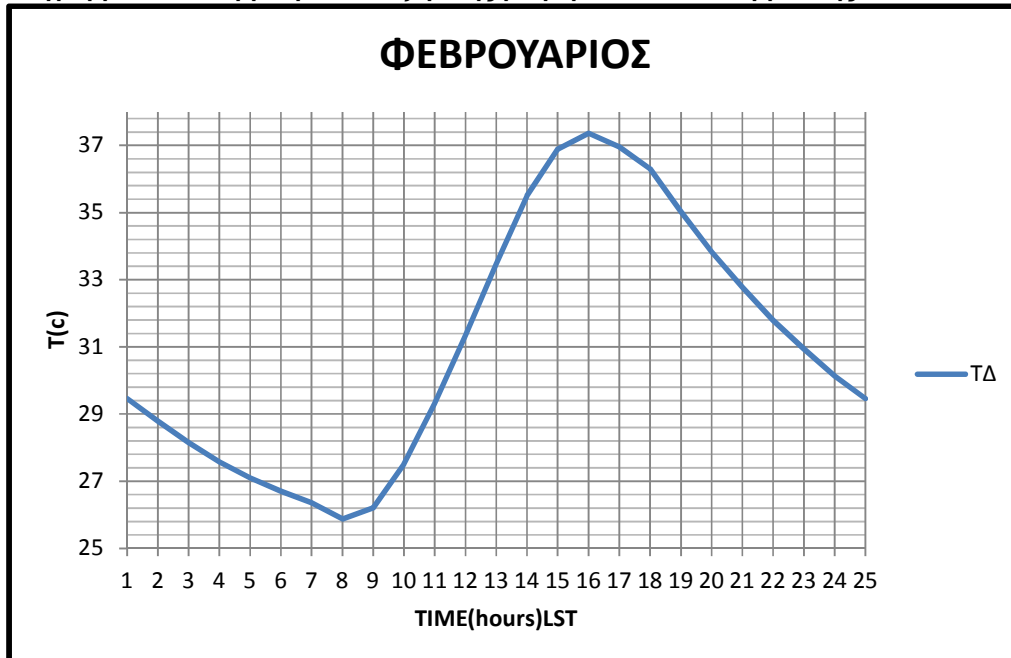
Βλέπουμε στα παραπάνω διαγράμματα μια συγκράτηση της θερμοκρασίας τις βραδινές ώρες και τις πρώτες πρωινές. Αυτό συμβαίνει γιατί το μοντέλο κατανάλωσης που χρησιμοποιούμε έχει πολύ μικρή κατανάλωση τις ώρες αυτές. Ομοίως για τις ώρες 7-10 έχουμε αυξημένη κατανάλωση και

μικρή ηλιοφάνεια έχουμε σημαντική πτώση της θερμοκρασίας. Για τις υπόλοιπες ώρες έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας.

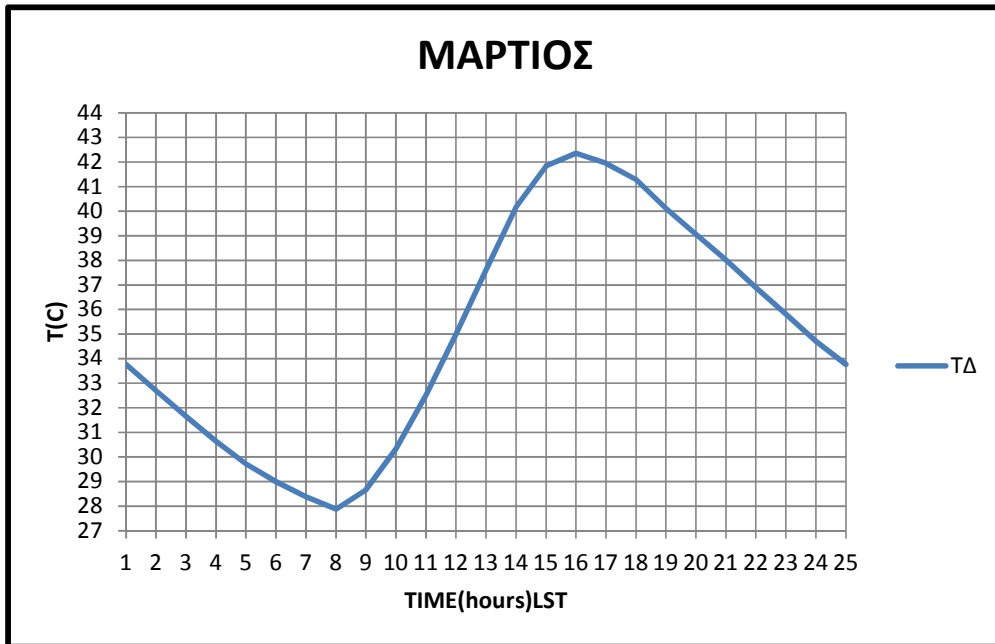
9.7. Θερμοκρασία δεξαμενής με όλα τα φορτία



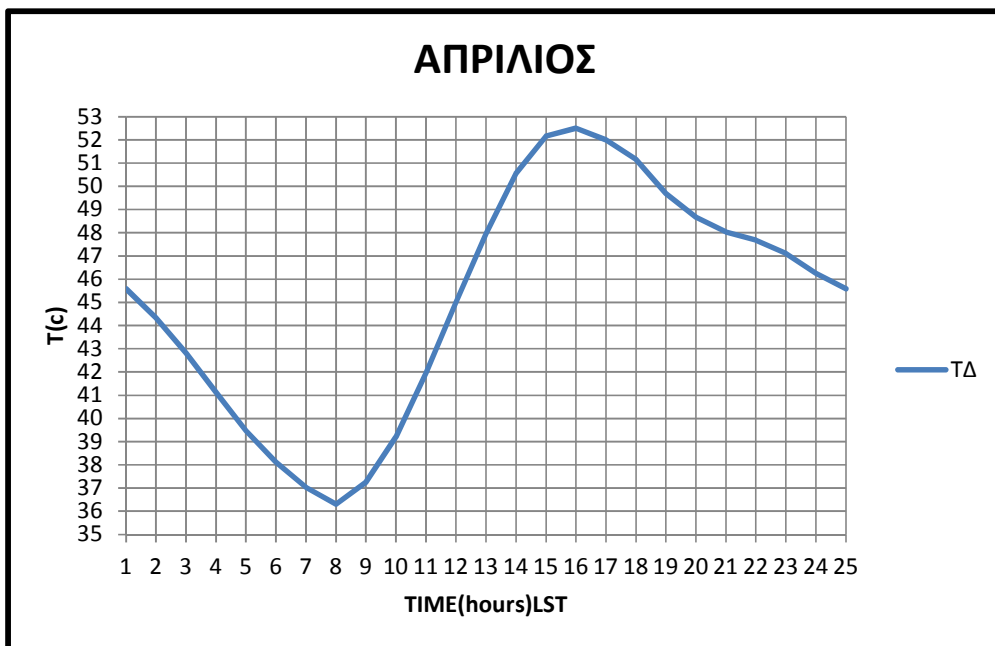
Διάγραμμα 9.50: Θερμοκρασία δεξαμενής με φορτία ZNX και θέρμανσης



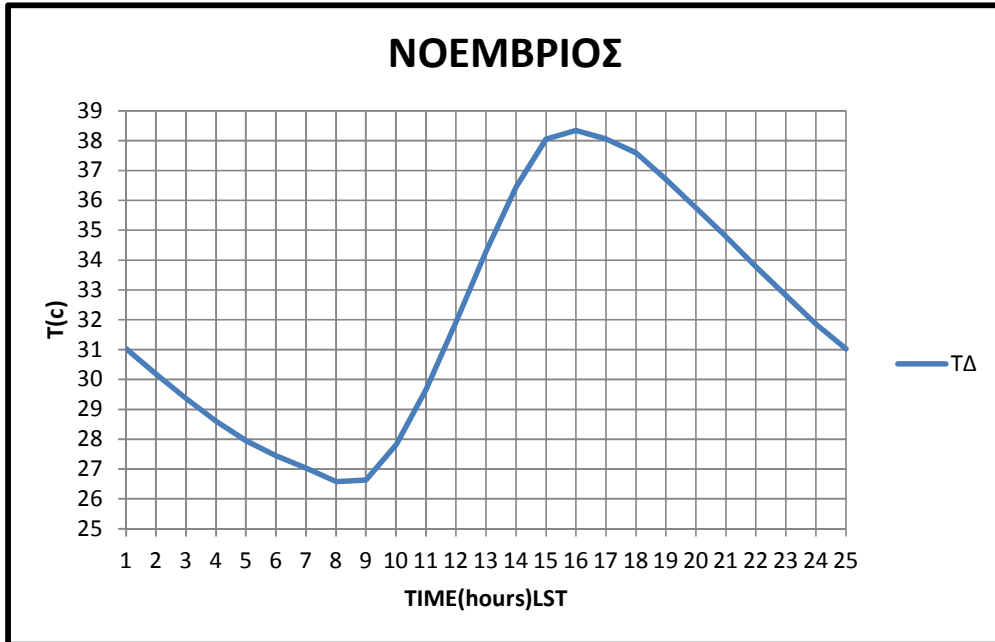
Διάγραμμα 9.51: Θερμοκρασία δεξαμενής με φορτία ZNX και θέρμανσης



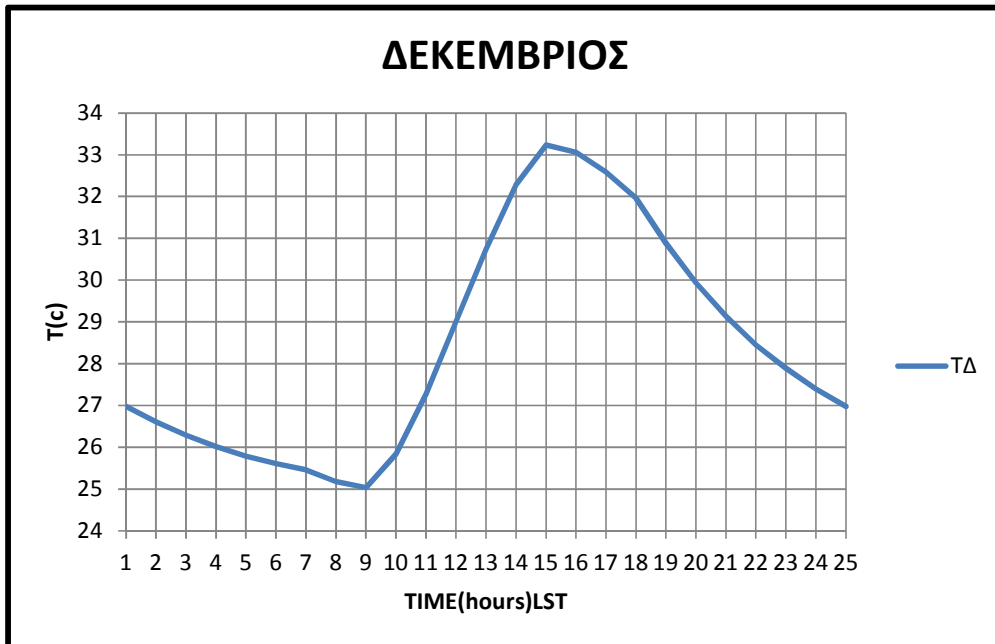
Διάγραμμα 9.52: Θερμοκρασία δεξαμενής με φορτία ZNX και θέρμανσης



Διάγραμμα 9.53: Θερμοκρασία δεξαμενής με φορτία ZNX και θέρμανσης



Διάγραμμα 9.54: Θερμοκρασία δεξαμενής με φορτία ZNX και θέρμανσης



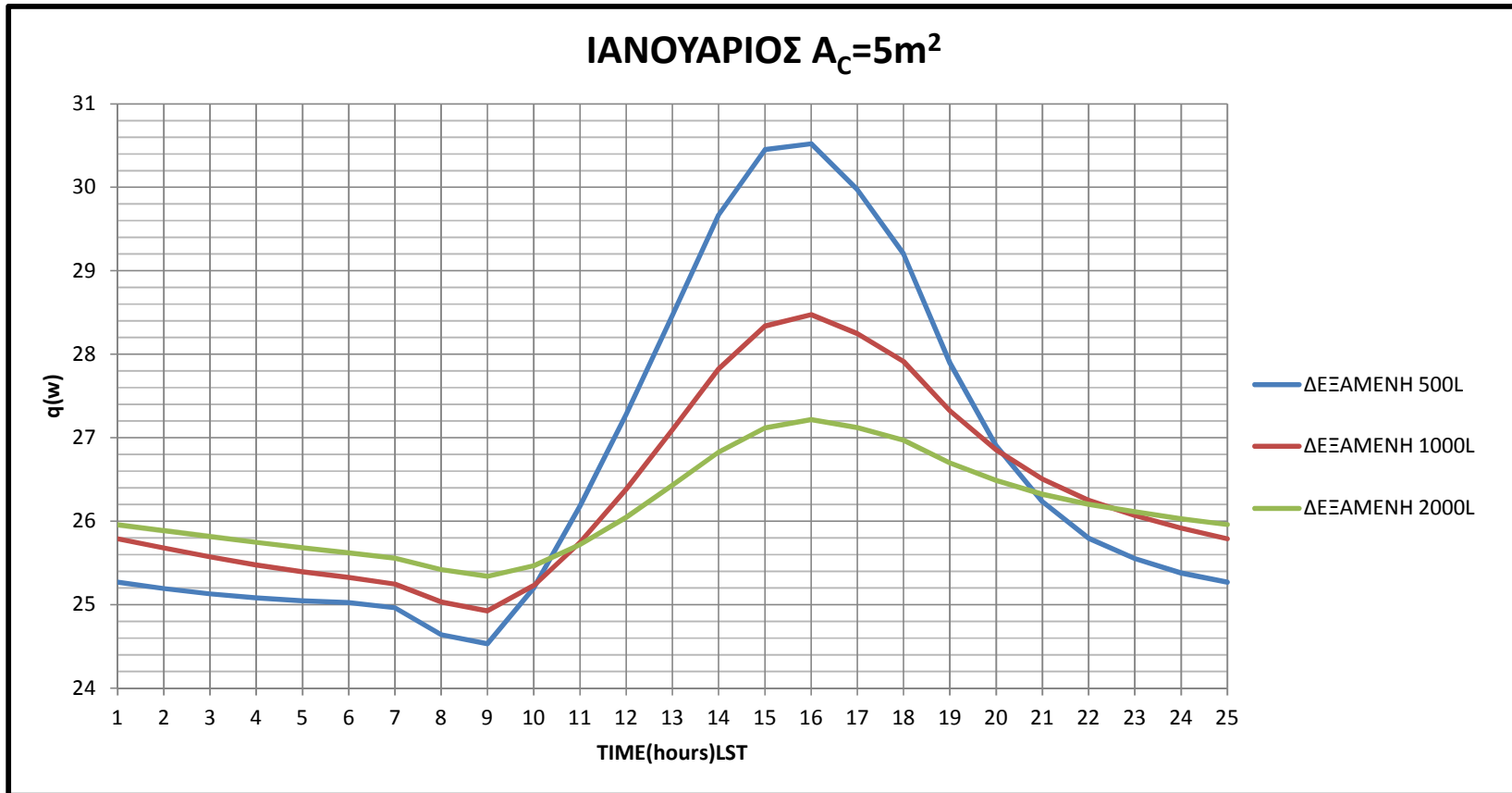
Διάγραμμα 9.55: Θερμοκρασία δεξαμενής με φορτία ZNX και θέρμανσης

Παρατηρήσεις:

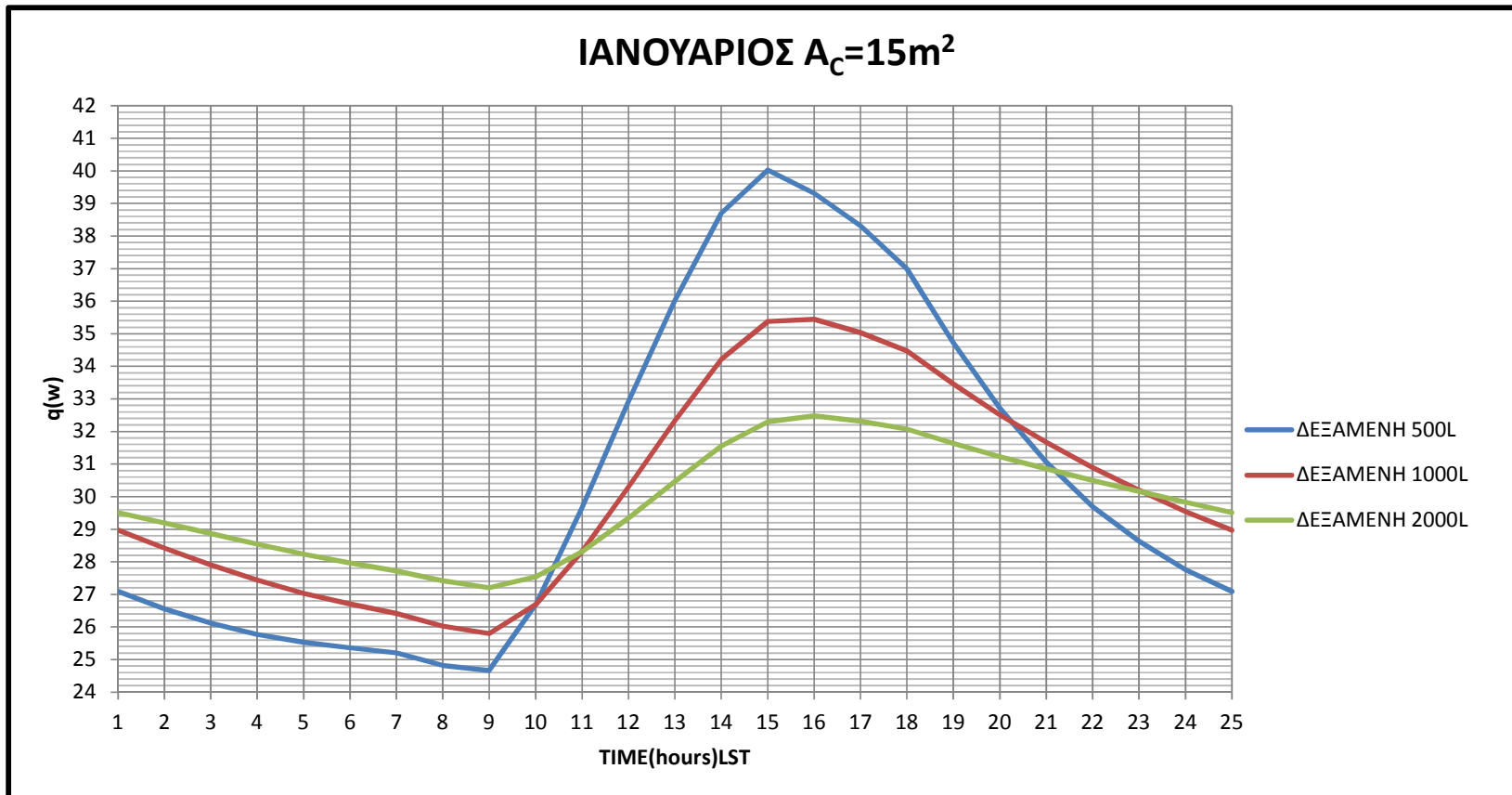
Βλέπουμε πως τα παραπάνω διαγράμματα έχουν την ίδια γενική μορφή με τα διαγράμματα θερμοκρασίας δεξαμενής μόνο με φορτία νερού αλλά με αισθητά πιο χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει γιατί τα φορτία θέρμανσης ρίχνουν επιπλέον την θερμοκρασία

9.7.1 Παραμετρική ανάλυση θερμοκρασίας δεξαμενής με φορτίο θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης.

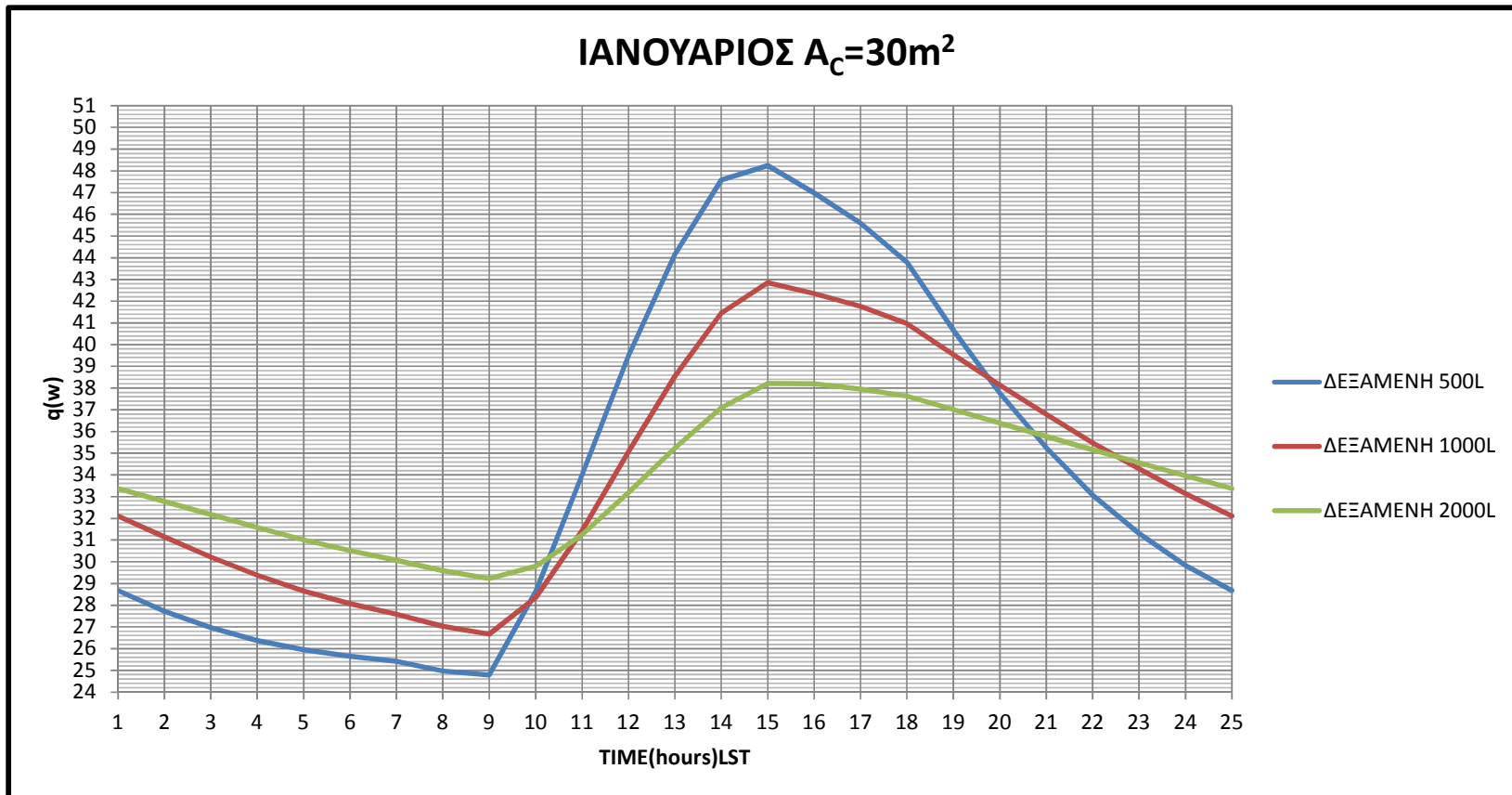
Στην συνέχεια βλέπουμε την επίδραση που έχει συλλεκτική επιφάνεια και ο όγκος της δεξαμενής στην θερμοκρασία της δεξαμενής. Στα παρακάτω διαγράμματα παίρνουμε $A_c=5,10,15 \text{ m}^2$ και Όγκος δεξαμενής= 500,1000,2000 L



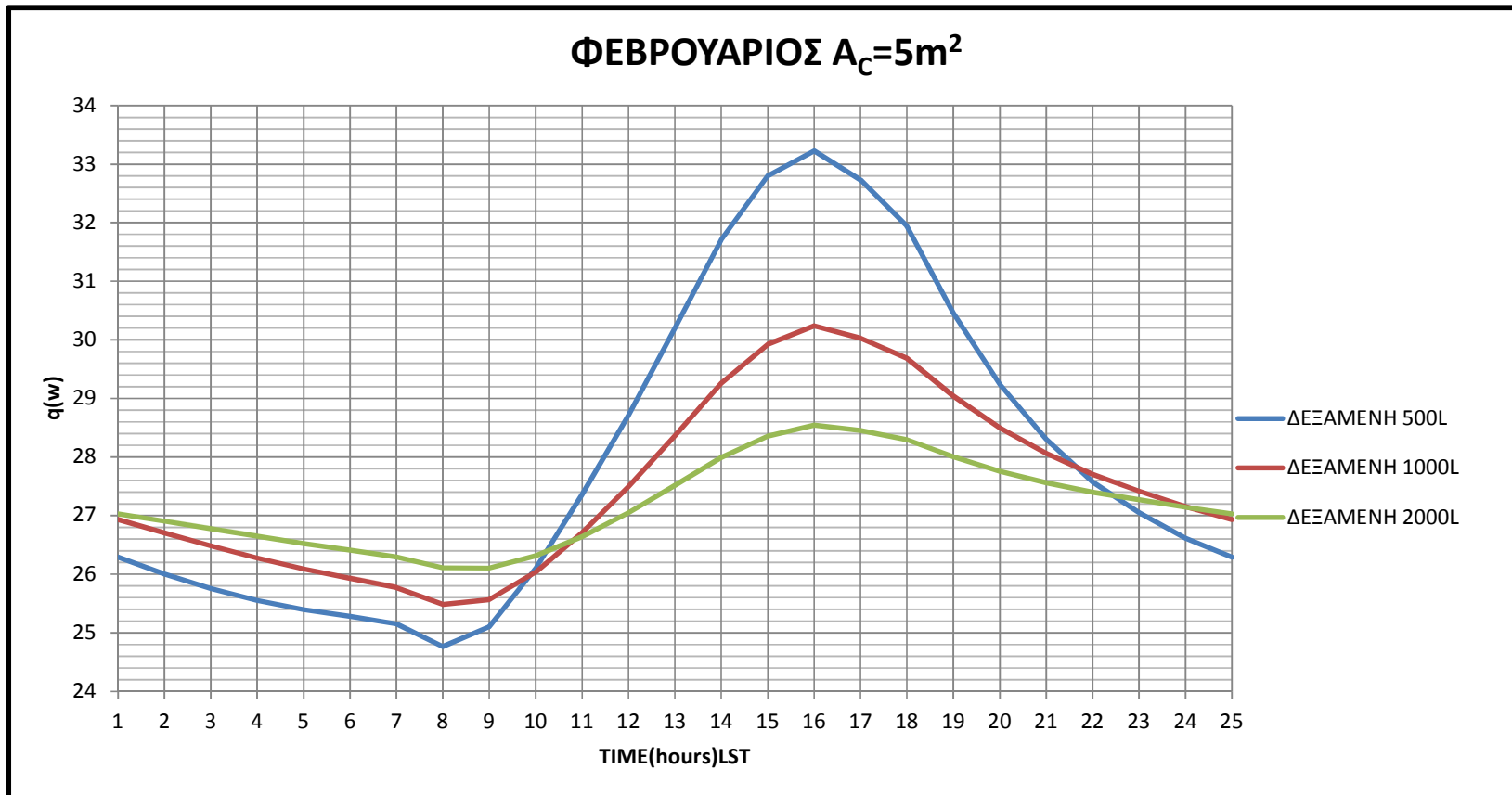
Διάγραμμα 9.56: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



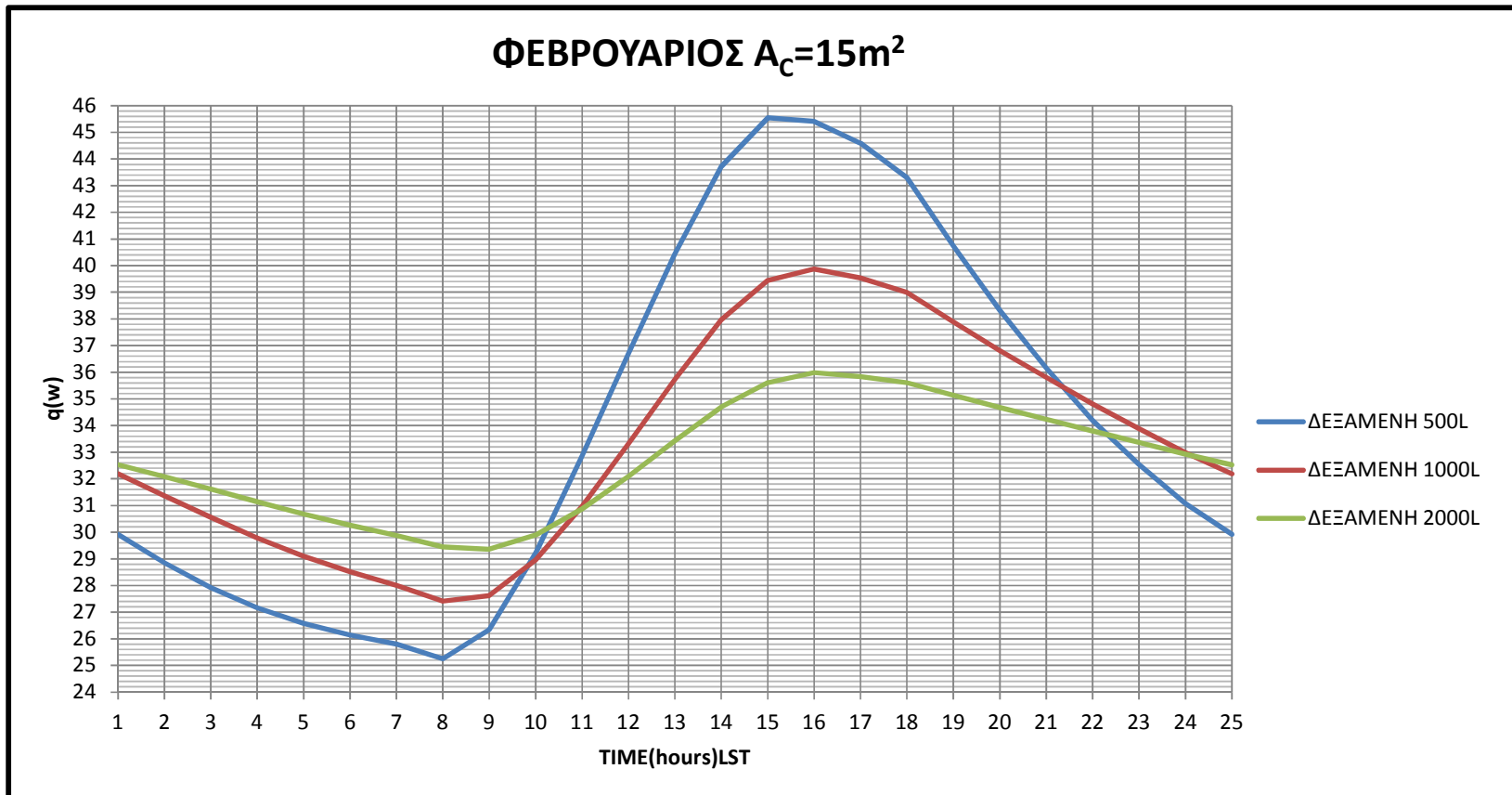
Διάγραμμα 9.57: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



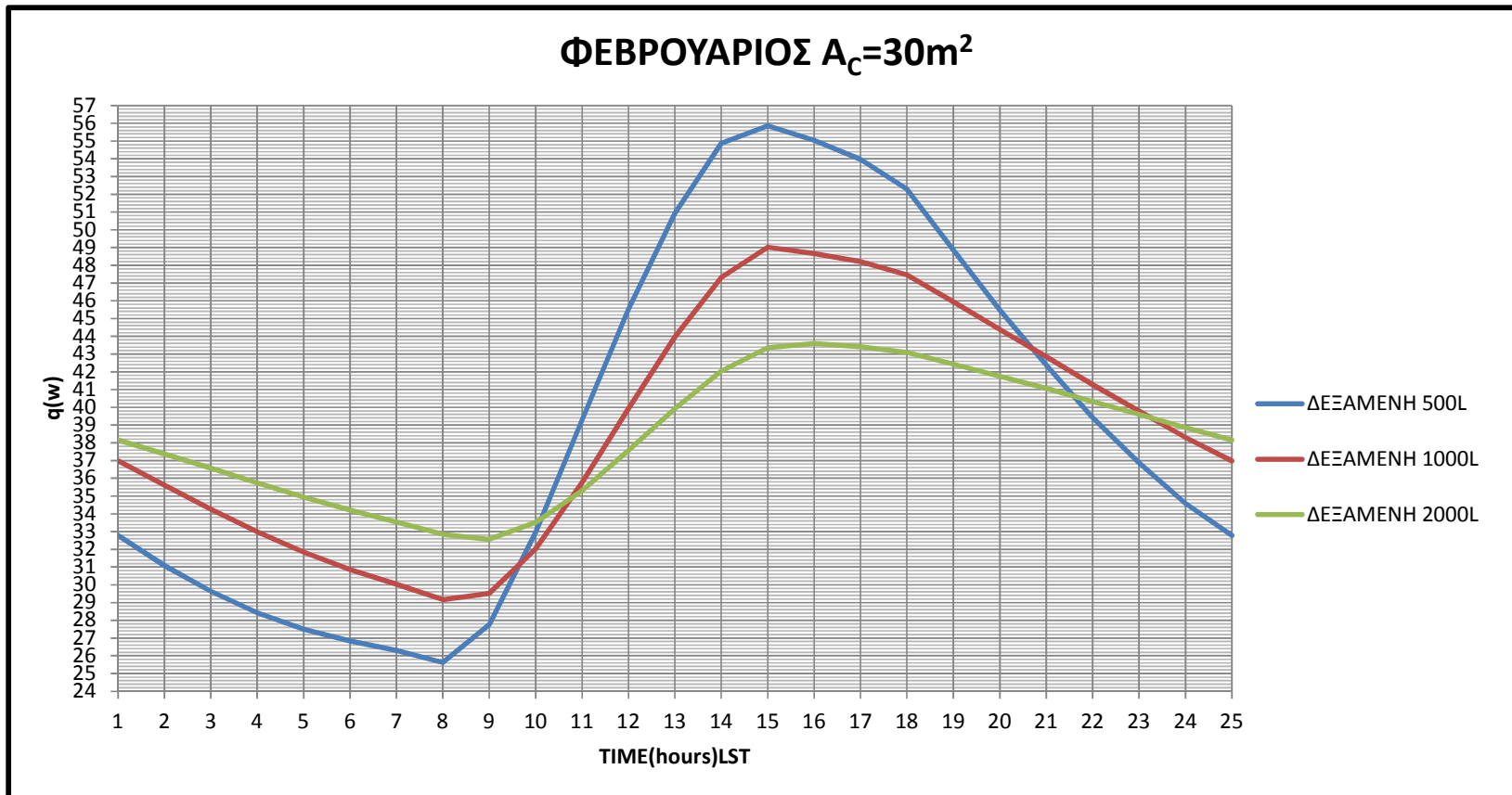
Διάγραμμα 9.58: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



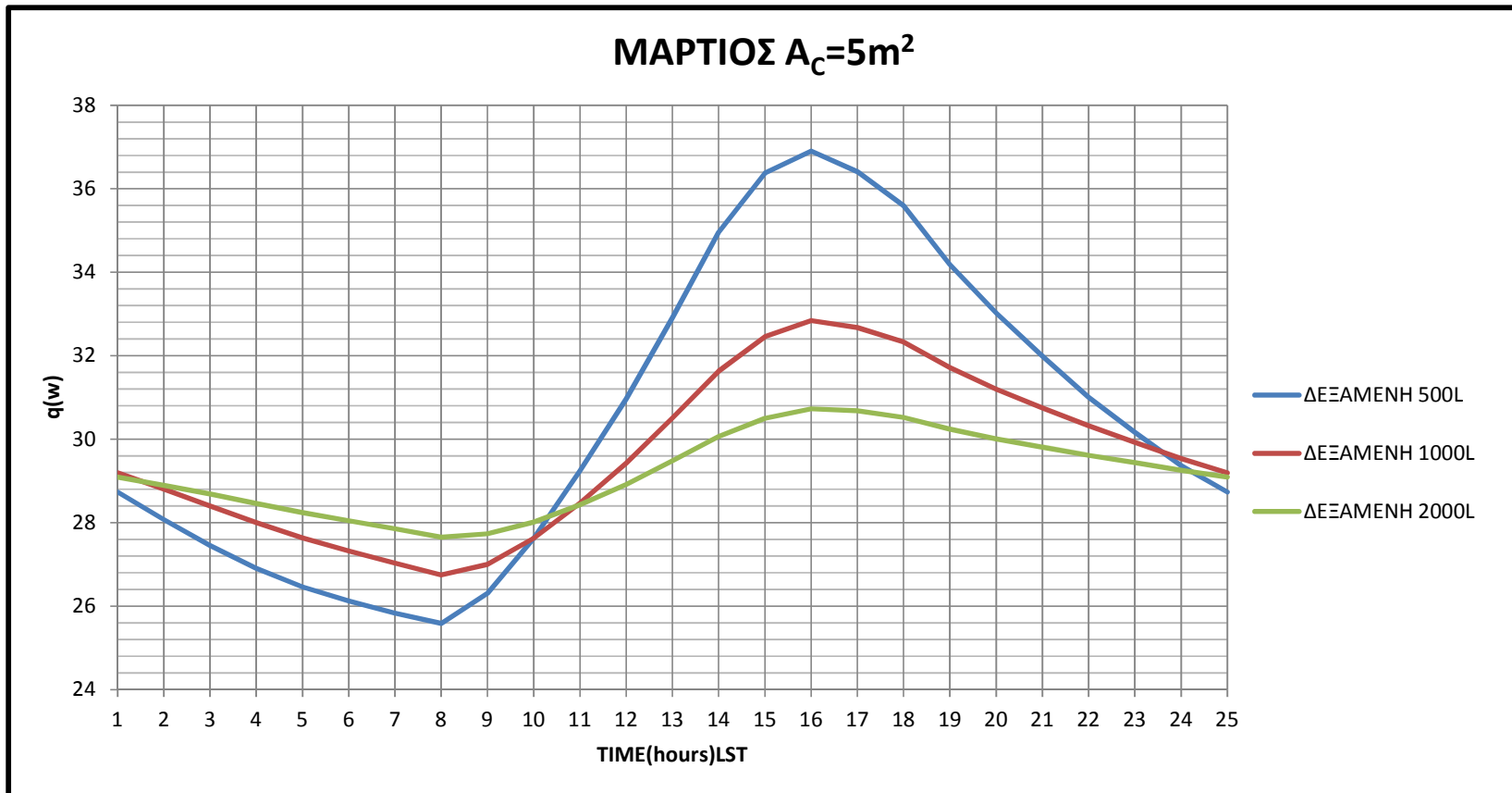
Διάγραμμα 9.59: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



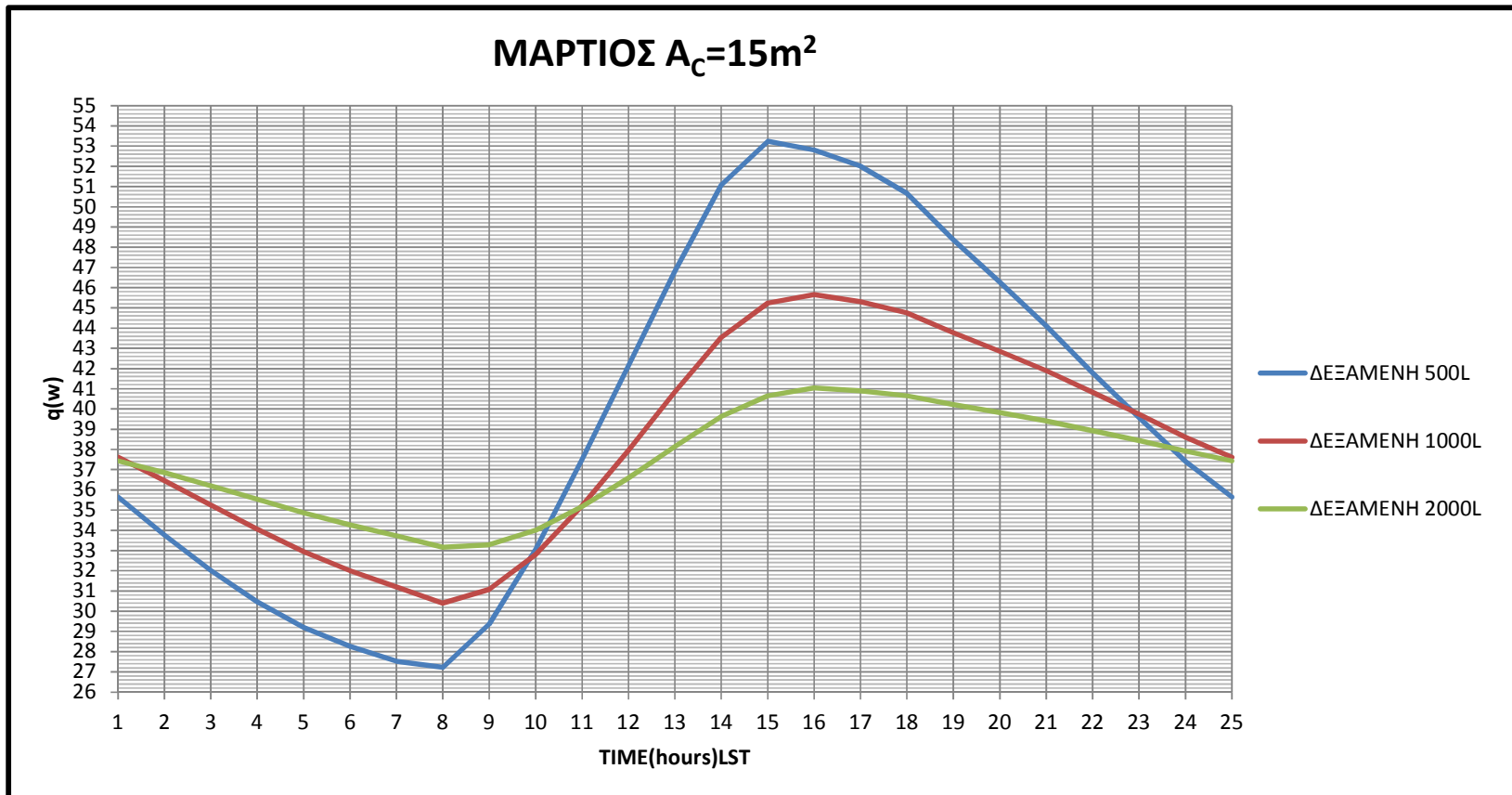
Διάγραμμα 9.60: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



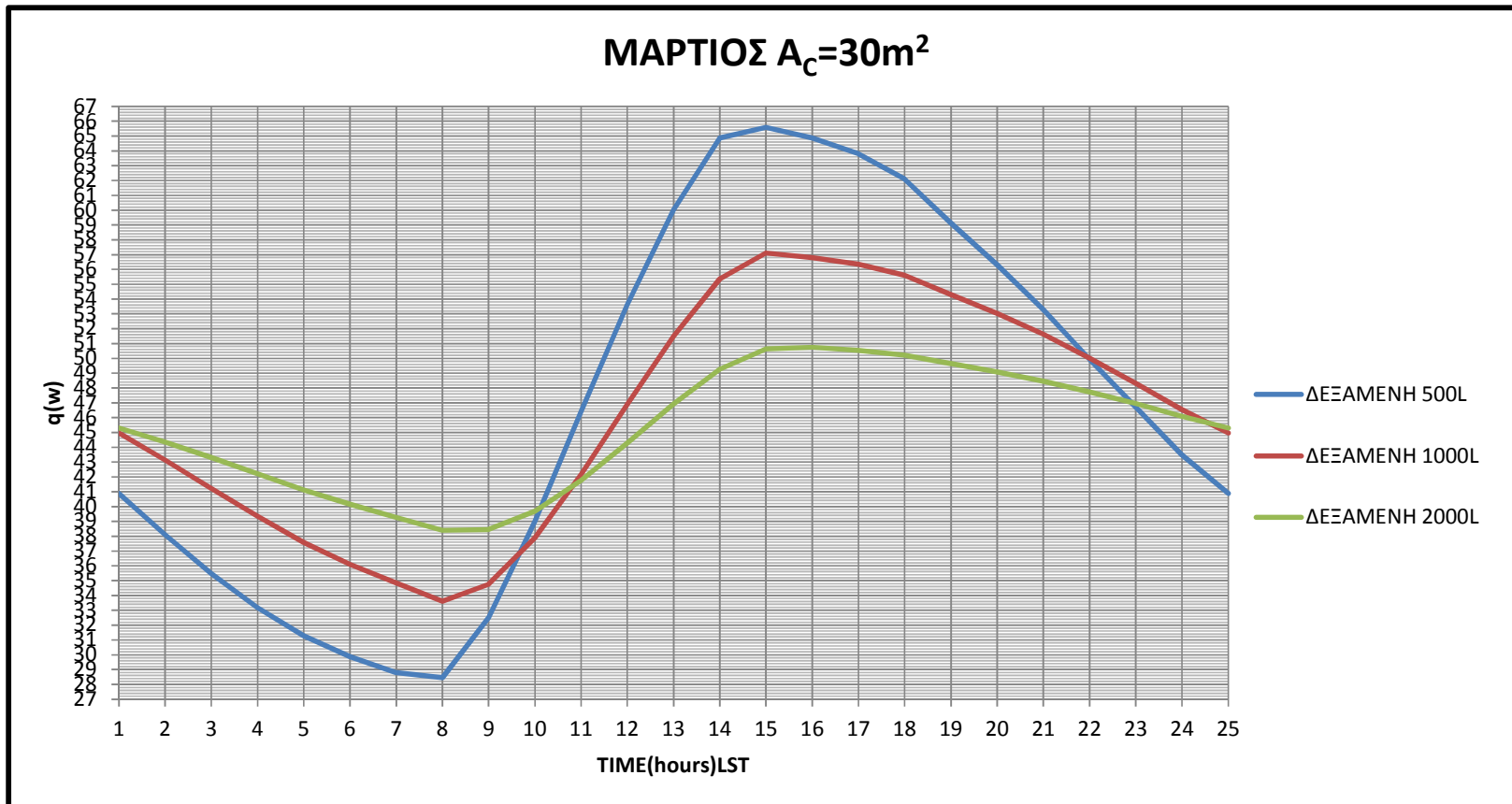
Διάγραμμα 9.61: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



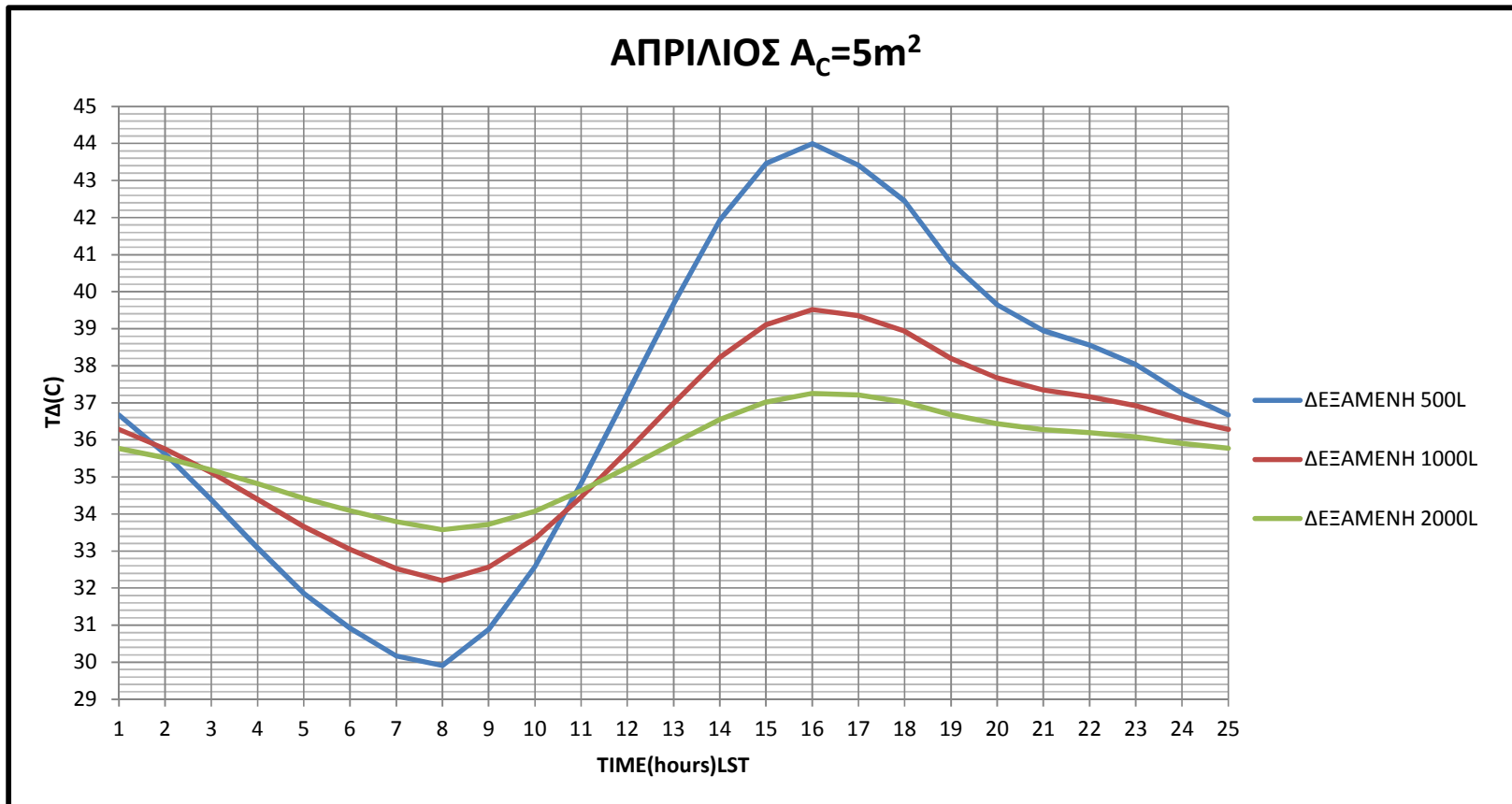
Διάγραμμα 9.62: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



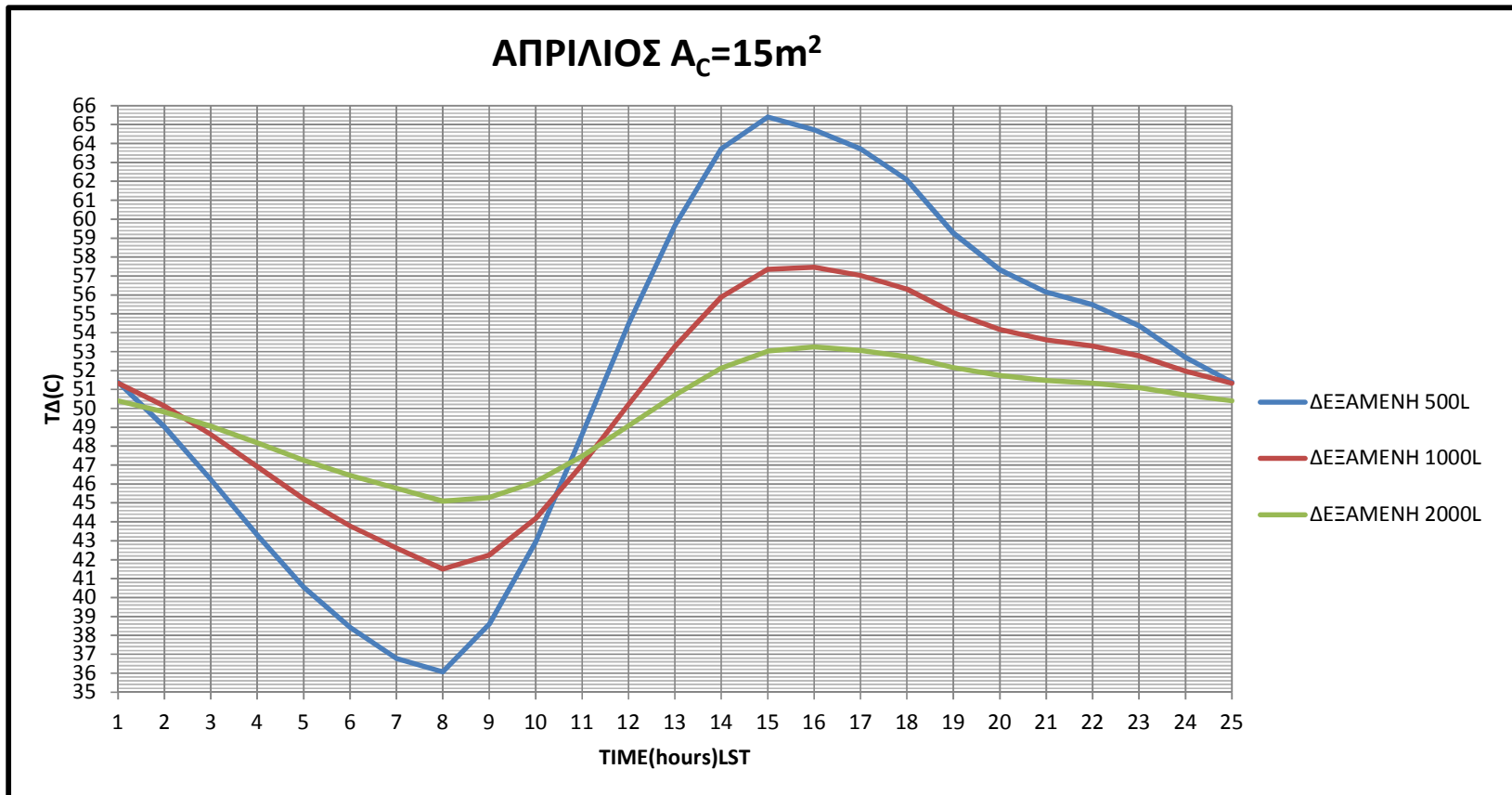
Διάγραμμα 9.63: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



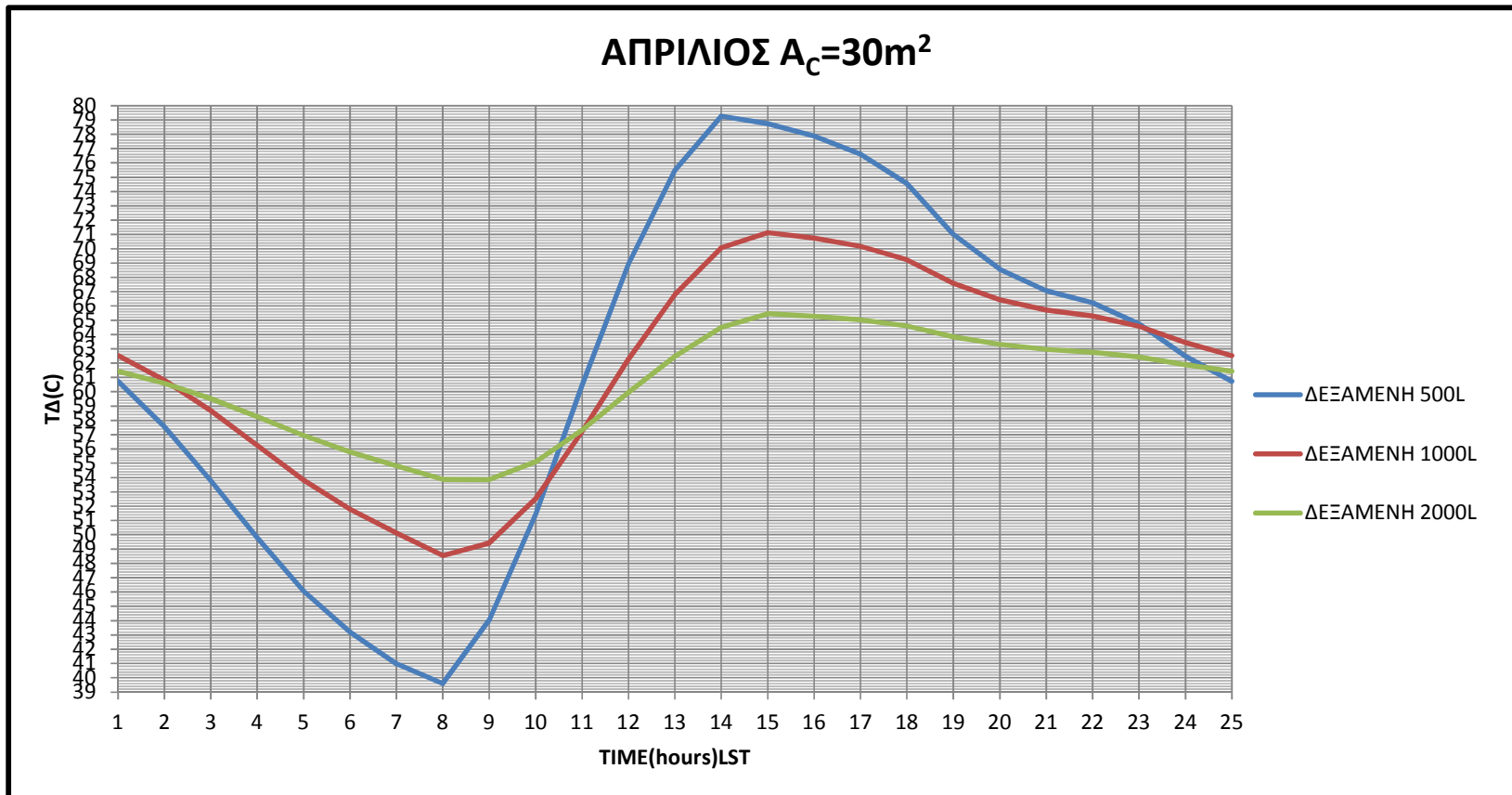
Διάγραμμα 9.64: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



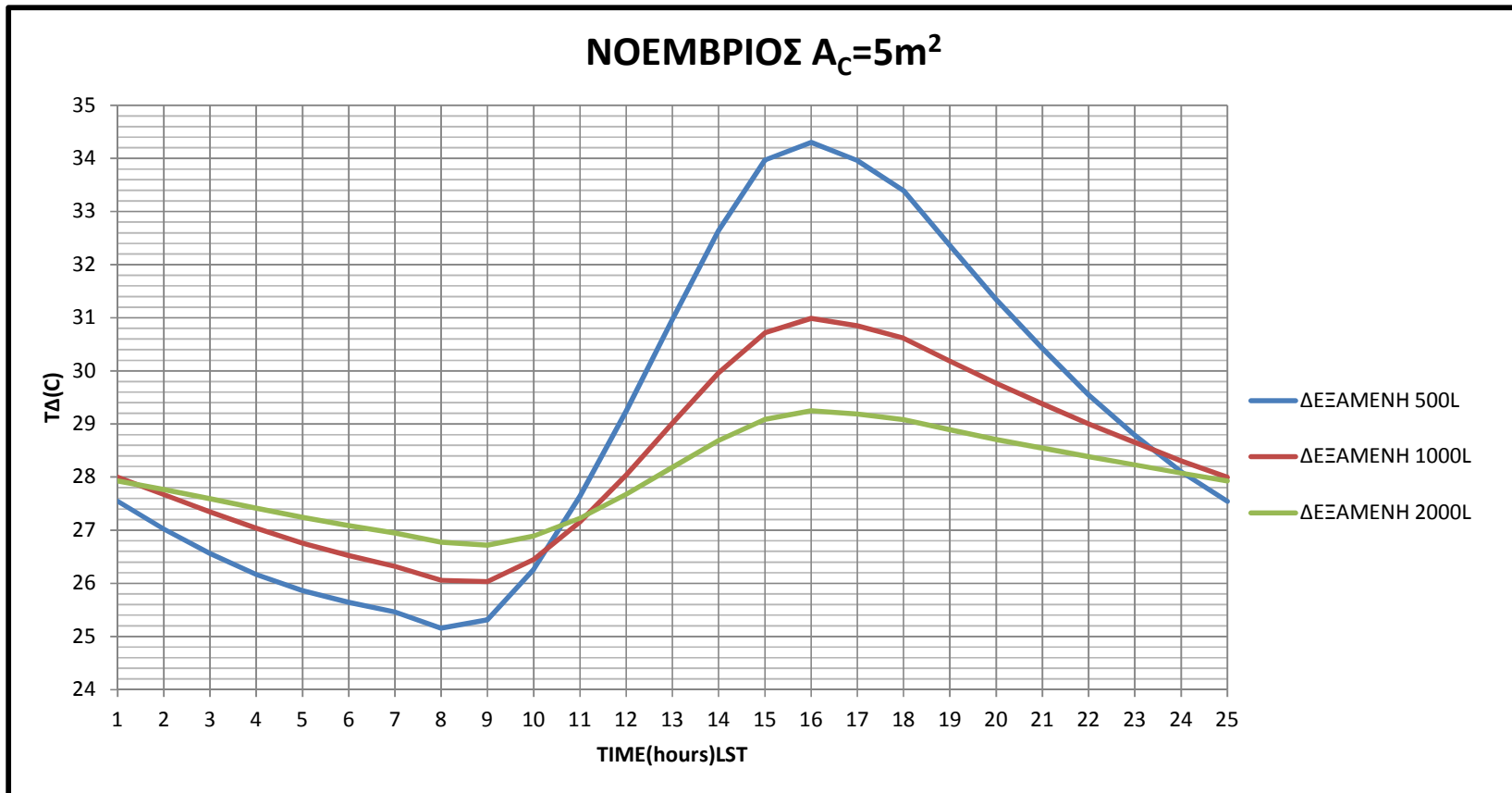
Διάγραμμα 9.65: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



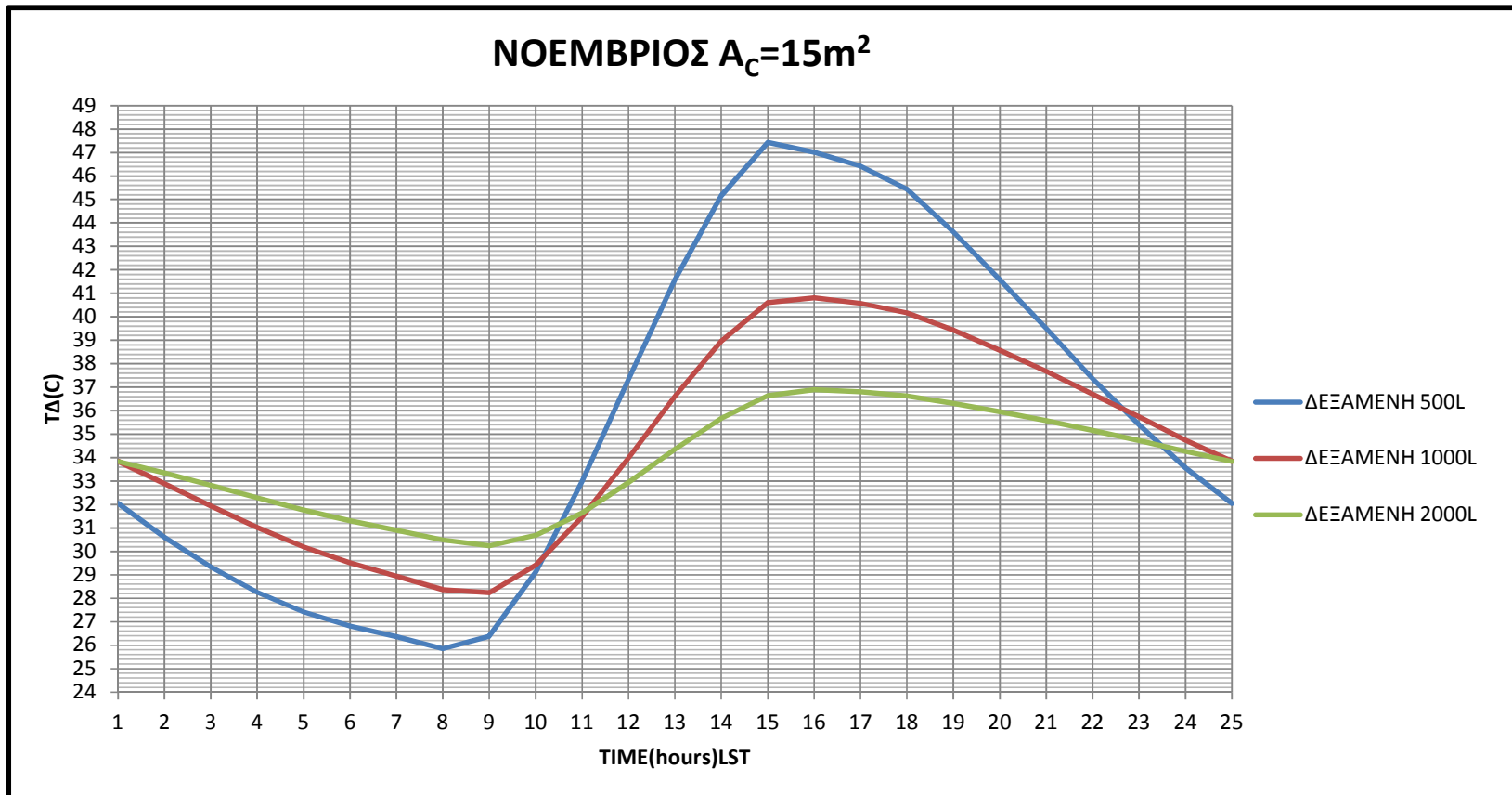
Διάγραμμα 9.66: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



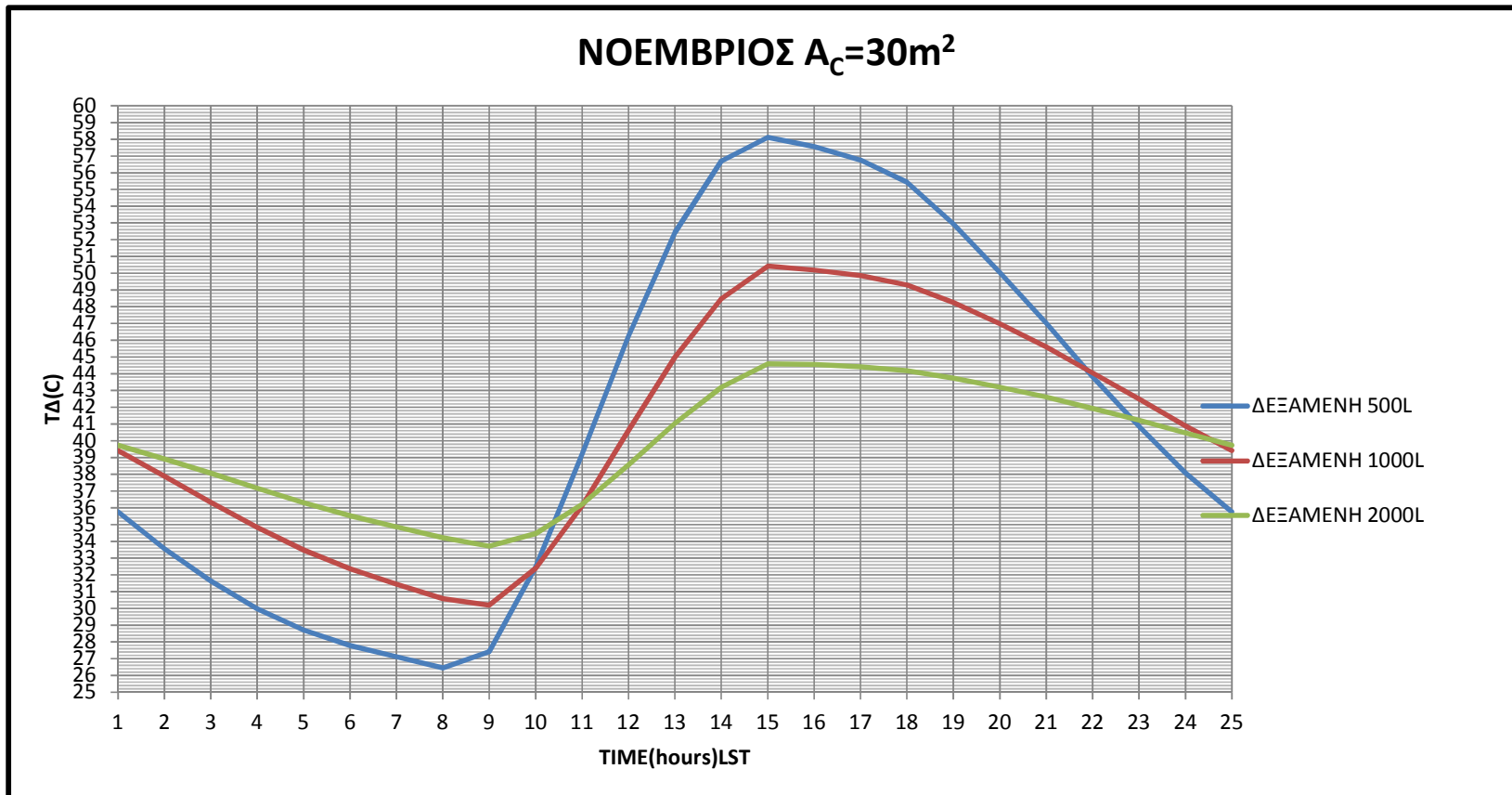
Διάγραμμα 9.67: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



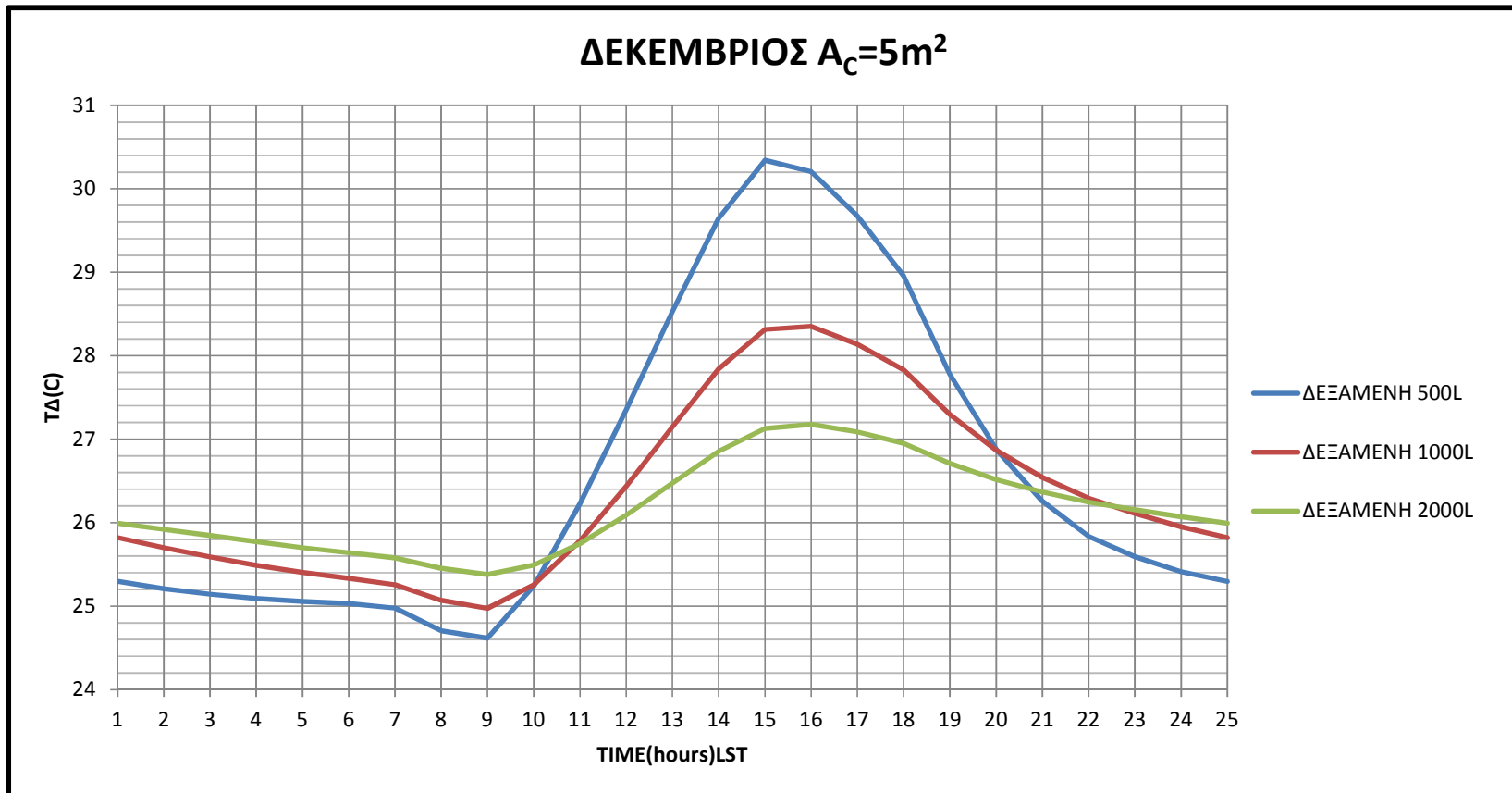
Διάγραμμα 9.68: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



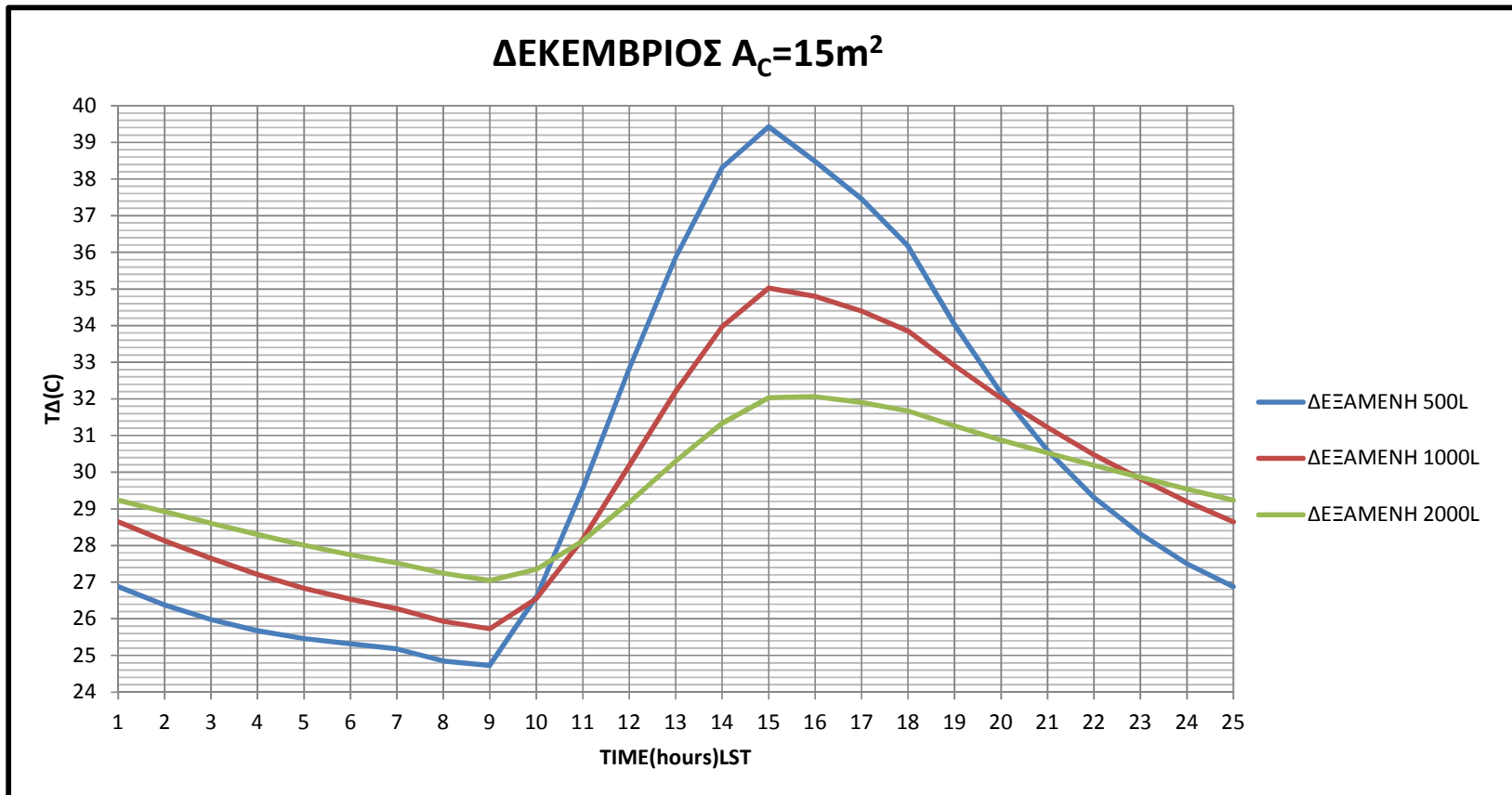
Διάγραμμα 9.69: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



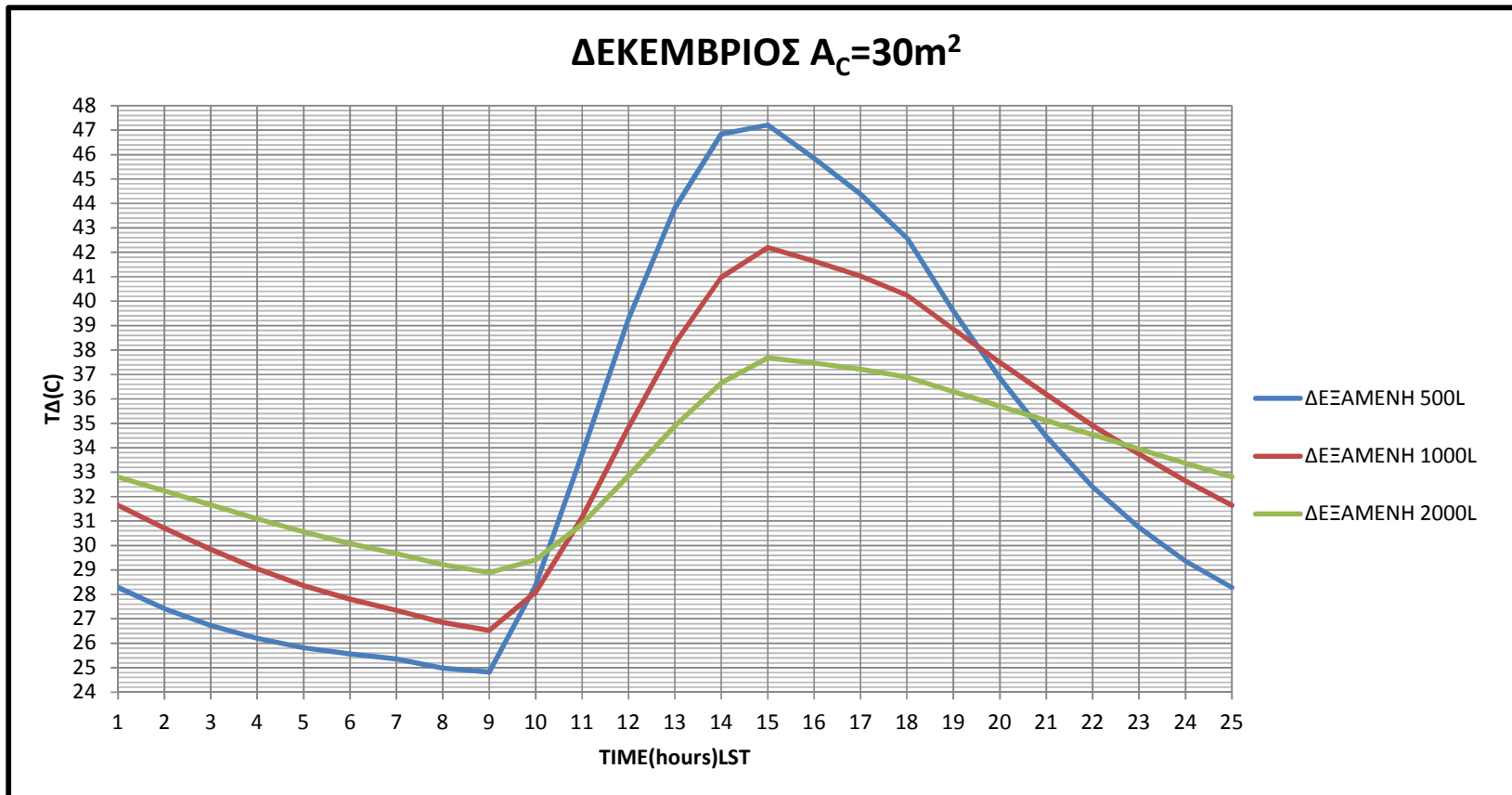
Διάγραμμα 9.70: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



Διάγραμμα 9.71: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



Διάγραμμα 9.72: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L



Διάγραμμα 9.73: Θερμοκρασία δεξαμενής για δεξαμενή 500,1000,2000L

Παρατηρήσεις:

Βλέπουμε από τα παραπάνω διαγράμματα ότι με την αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας αυξάνει και θερμοκρασία όπως στη ακραία περίπτωση του Απριλίου που η θερμοκρασία φτάνει μέχρι τους 80°C για δεξαμενή 500L. Από την άλλη με την αύξηση του όγκου της δεξαμενής έχουμε μείωση και της διακύμανσης της θερμοκρασίας

9.8.8. Θερμοκρασία δεξαμενής με pcm

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την θερμοκρασία της δεξαμενής και παρακάτω έχουμε τα διαγράμματα. Επίσης δίνουμε τα διαγράμματα Cr του 24ορου σε σχέση με το Cr του νερού. Για τους μήνες Νοέμβριο-Απρίλιο χρησιμοποιούμε τα εξής pcm

Ιανουάριος → RT27

Φεβρουάριος → Υποθετικό pcm no1

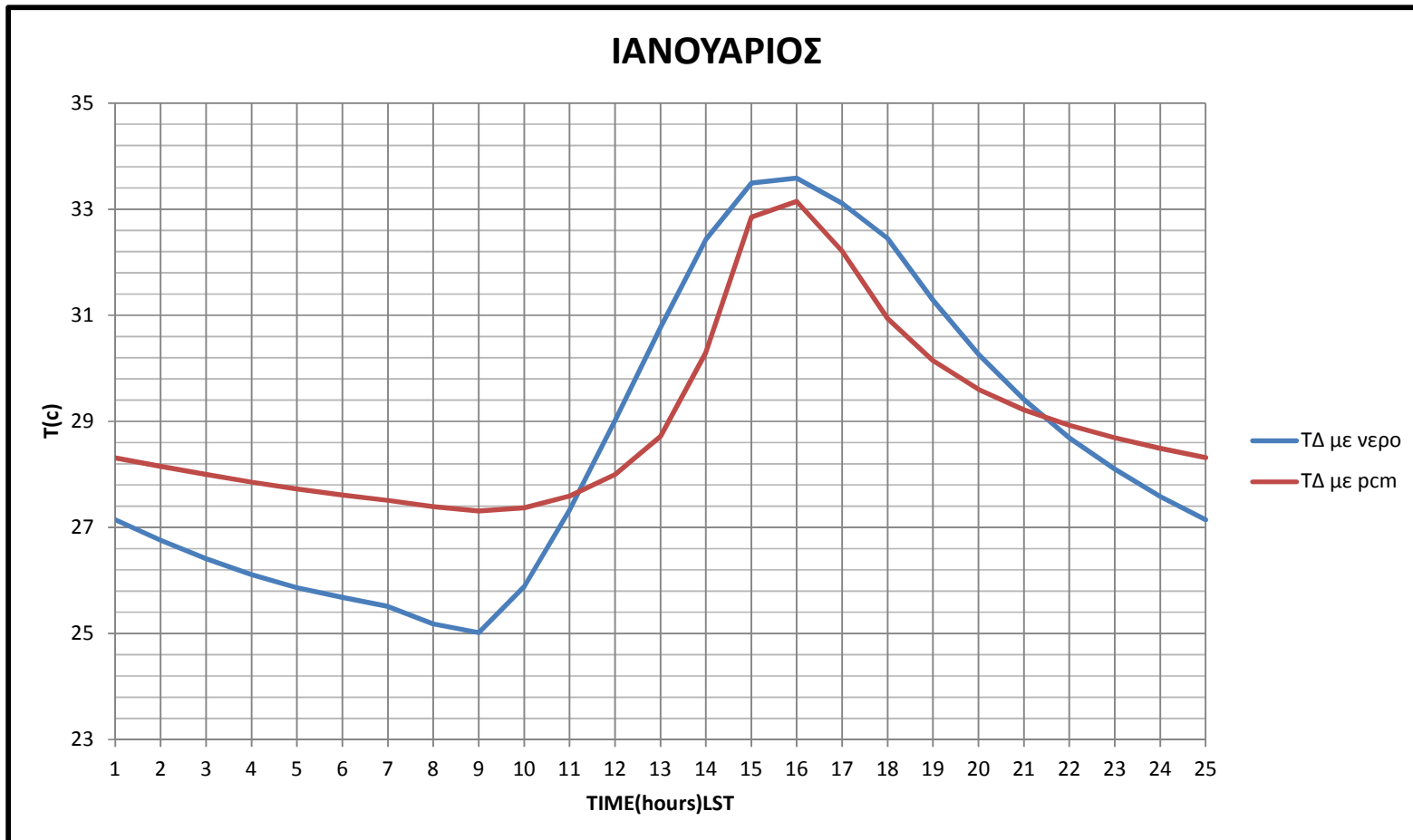
Μάρτιος → Υποθετικό pcm no2

Απρίλιος → Greek paraffin

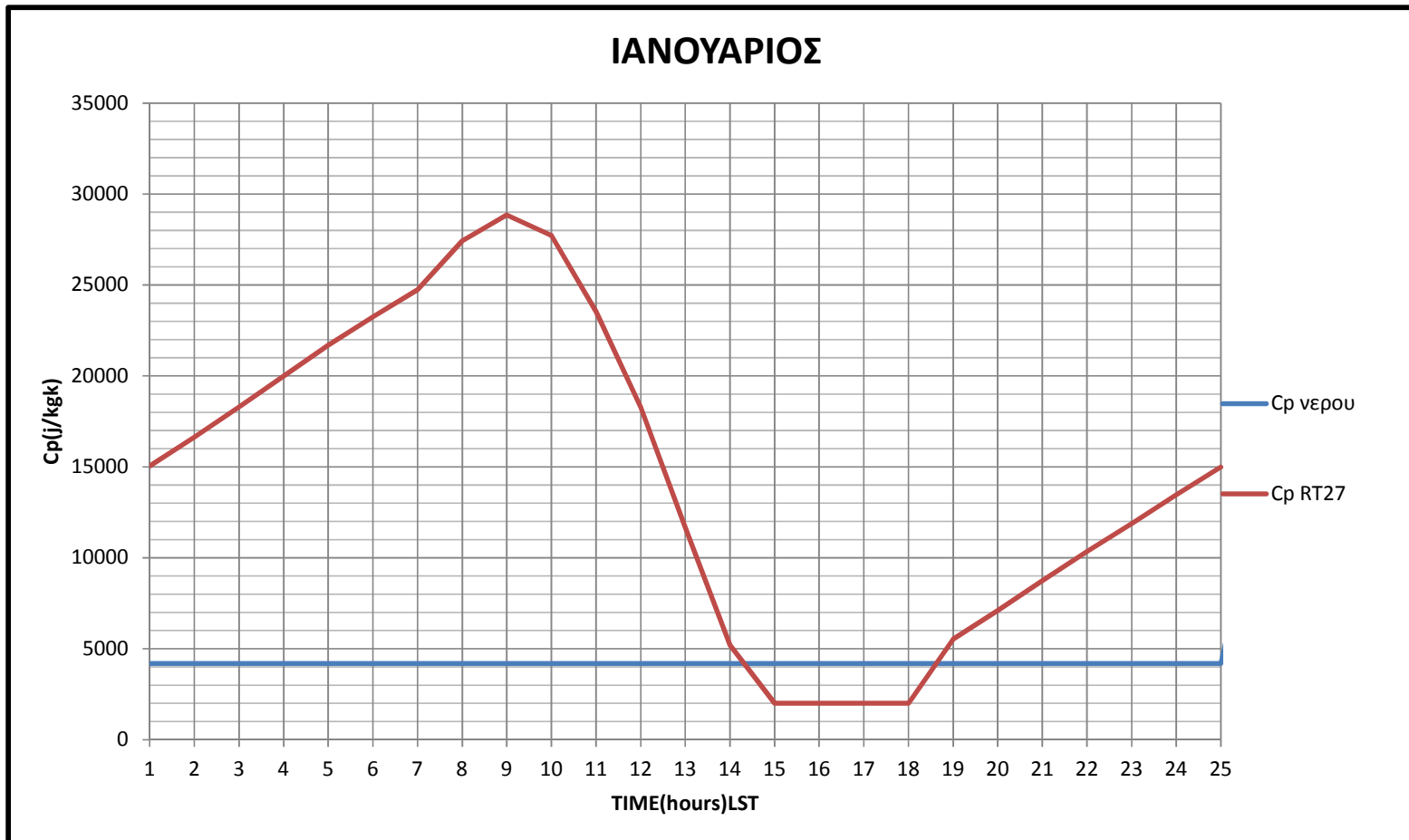
Νοέμβριος → Υποθετικό pcm no1

Δεκέμβριος → Υποθετικό pcm no1

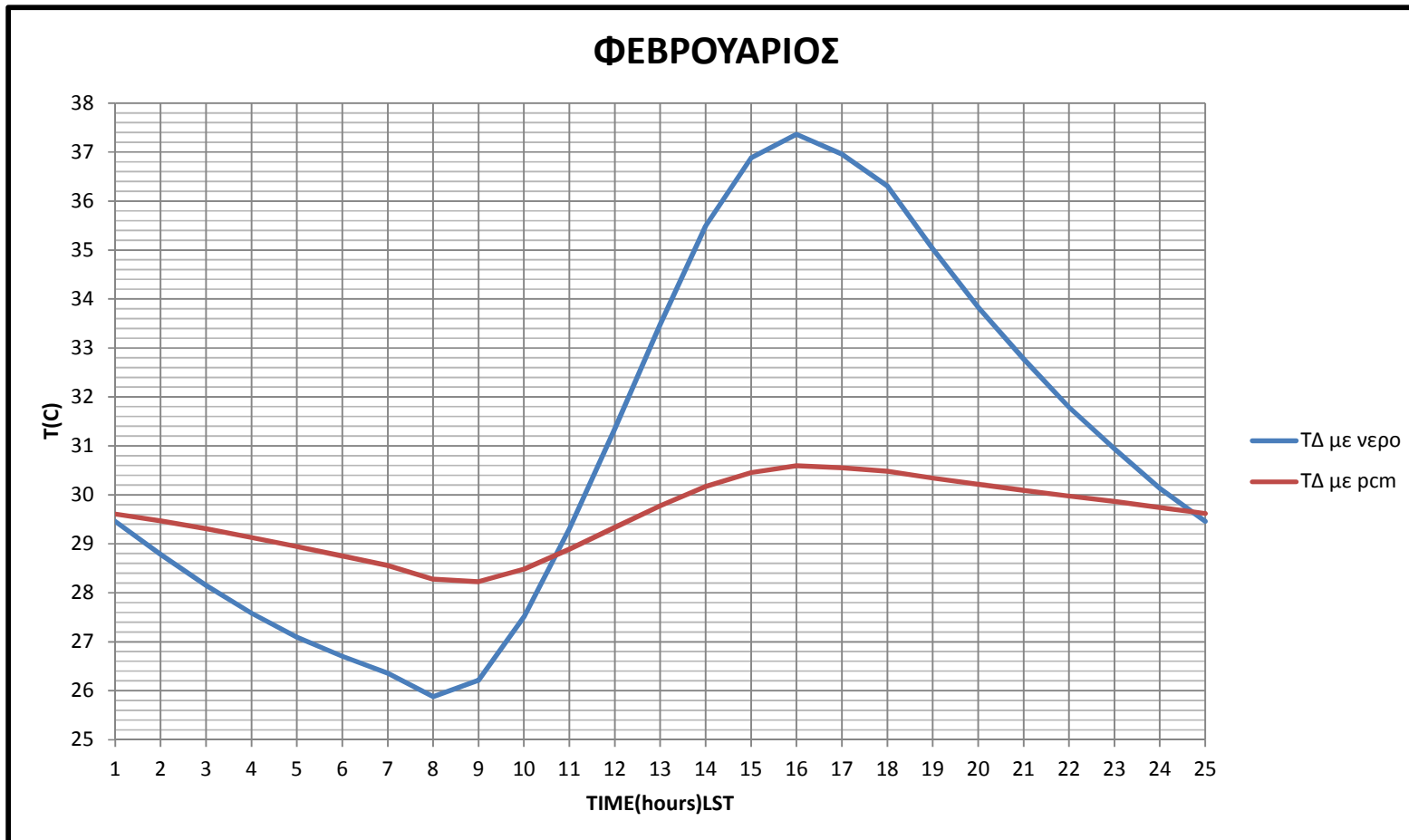
Ακολουθούν τα διαγράμματα



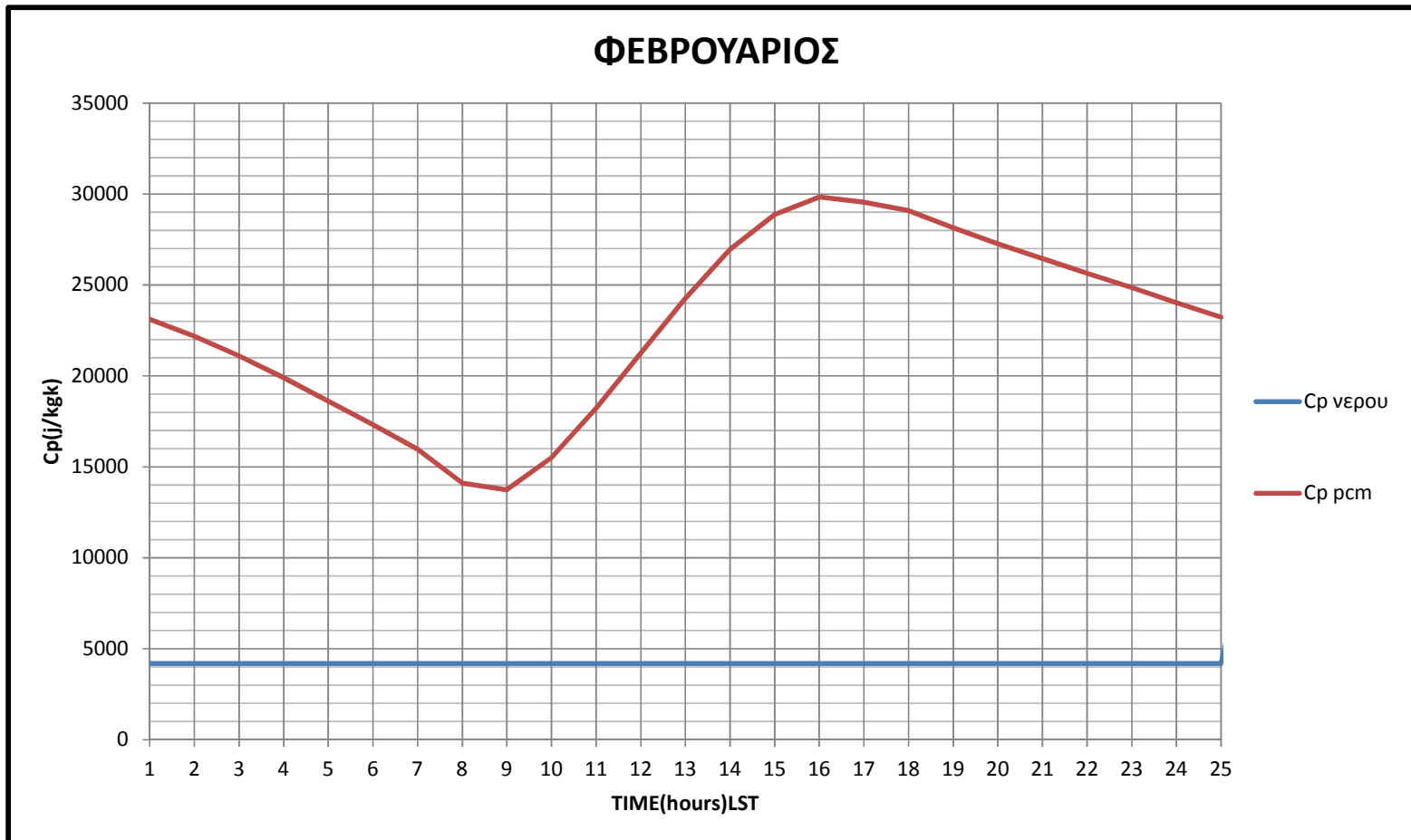
Διάγραμμα 9.74: Θερμοκρασία δεξαμενής με νερό και pcm



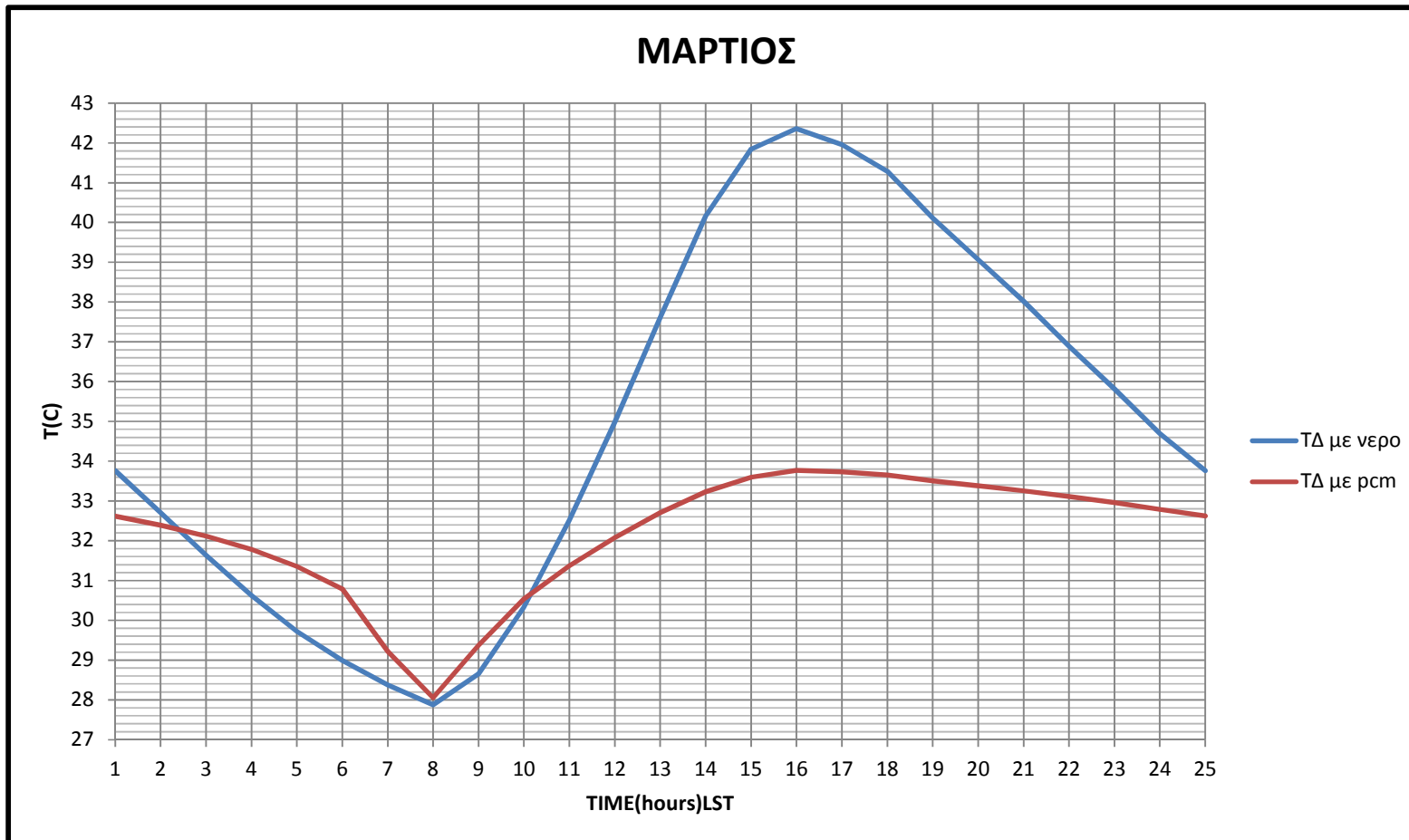
Διάγραμμα 9.75: Cp νερού και ρcm



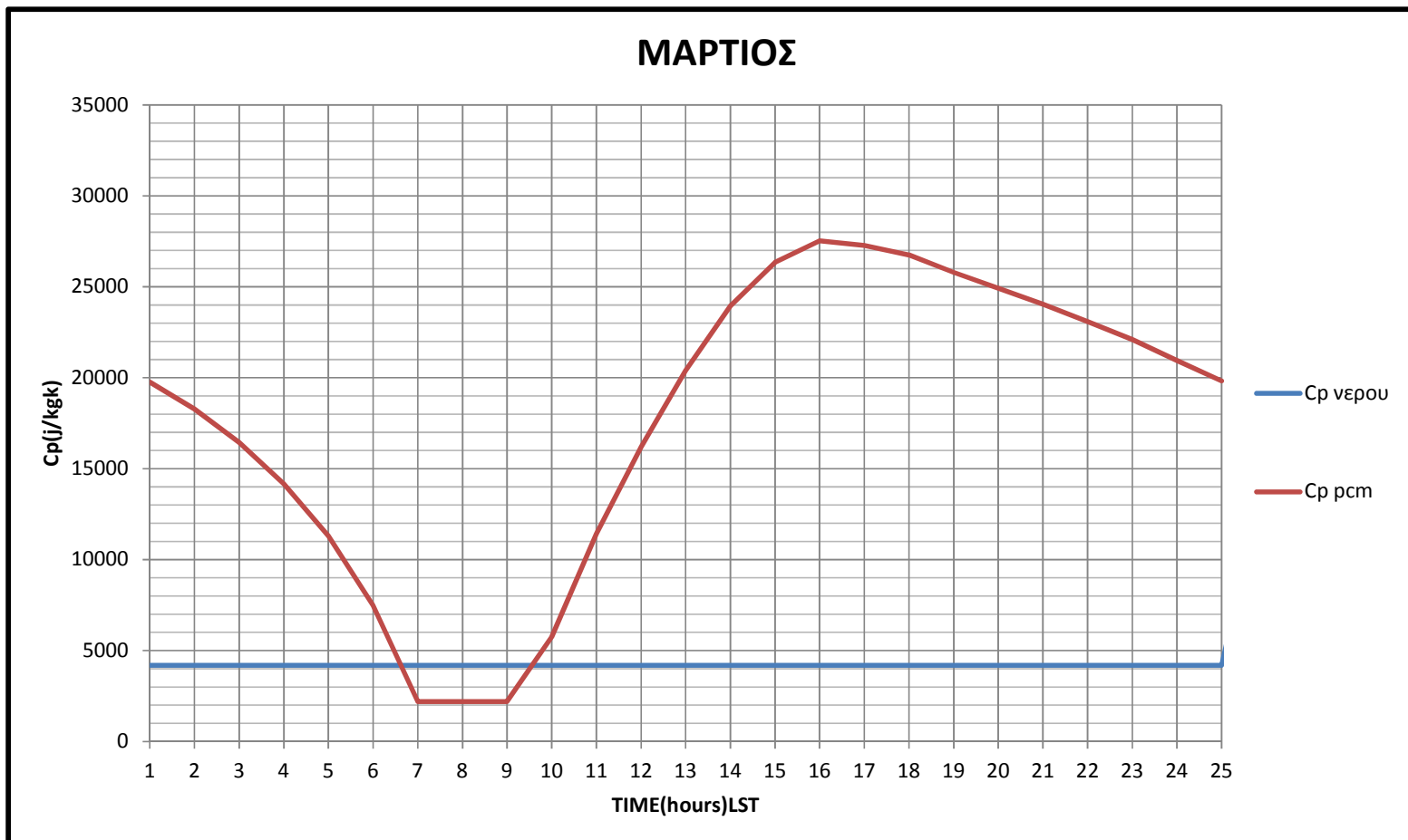
Διάγραμμα 9.76: Θερμοκρασία δεξαμενής με νερό και pcm



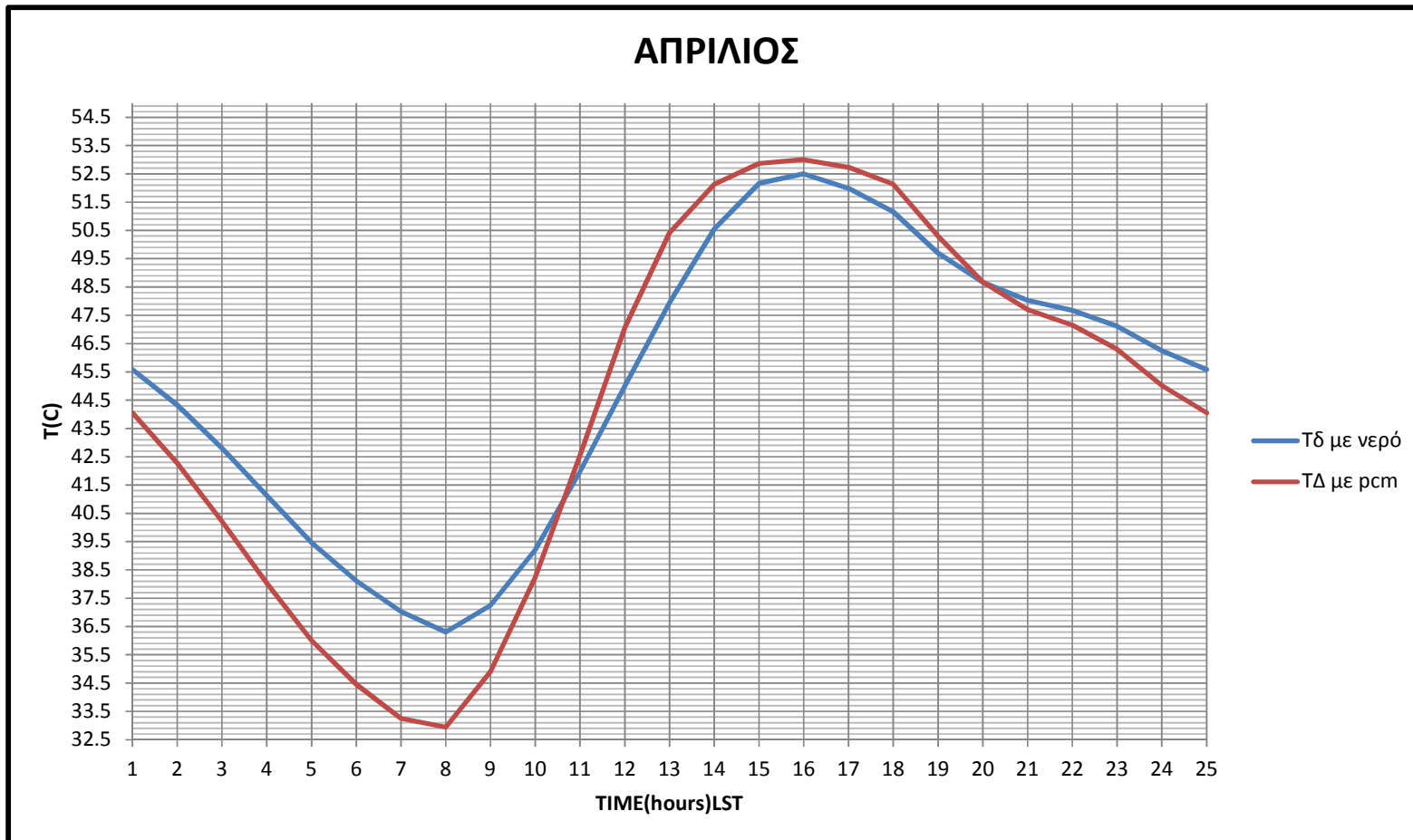
Διάγραμμα 9.77: Cp νερού και pcm



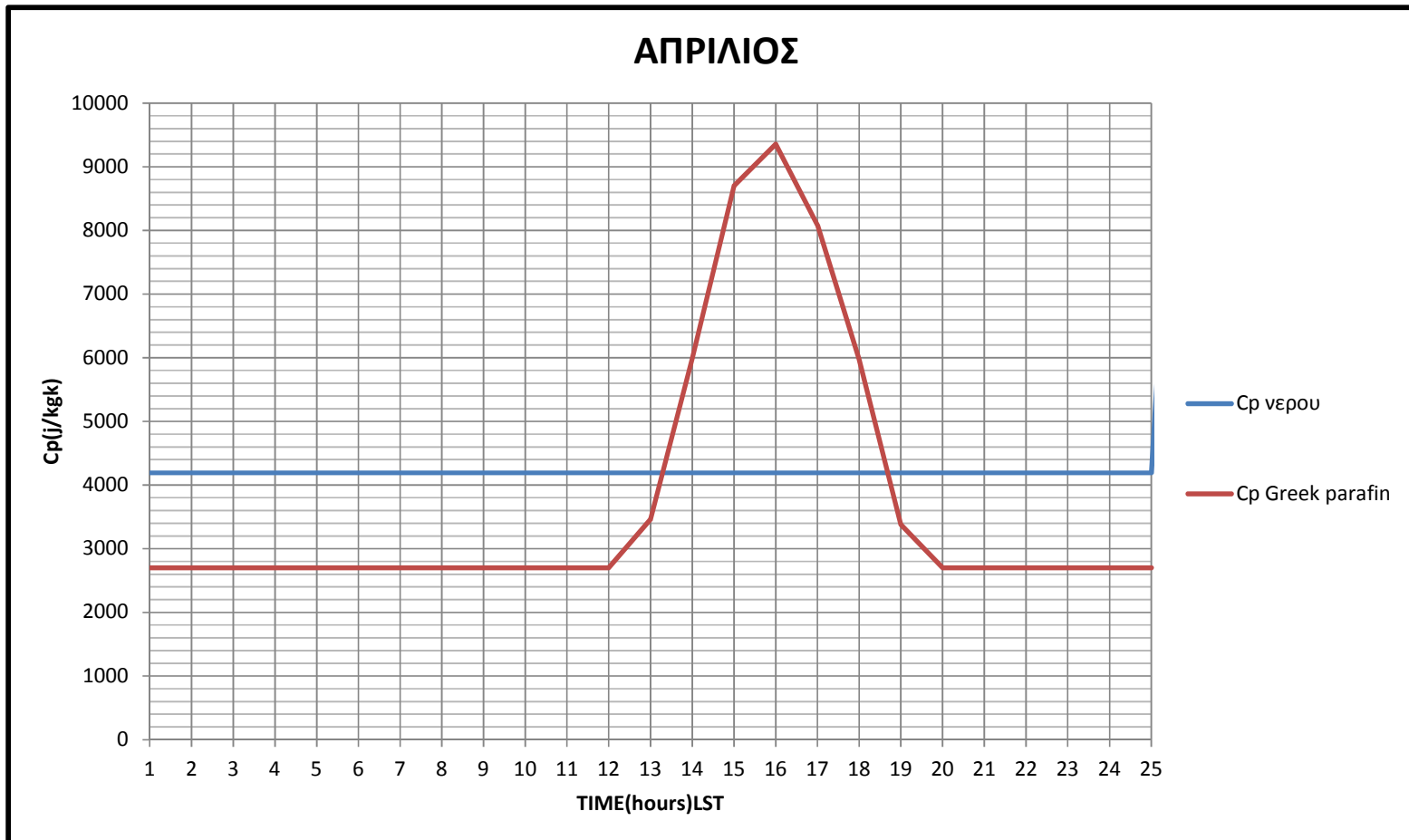
Διάγραμμα 9.78: Θερμοκρασία δεξαμενής με νερό και pcm



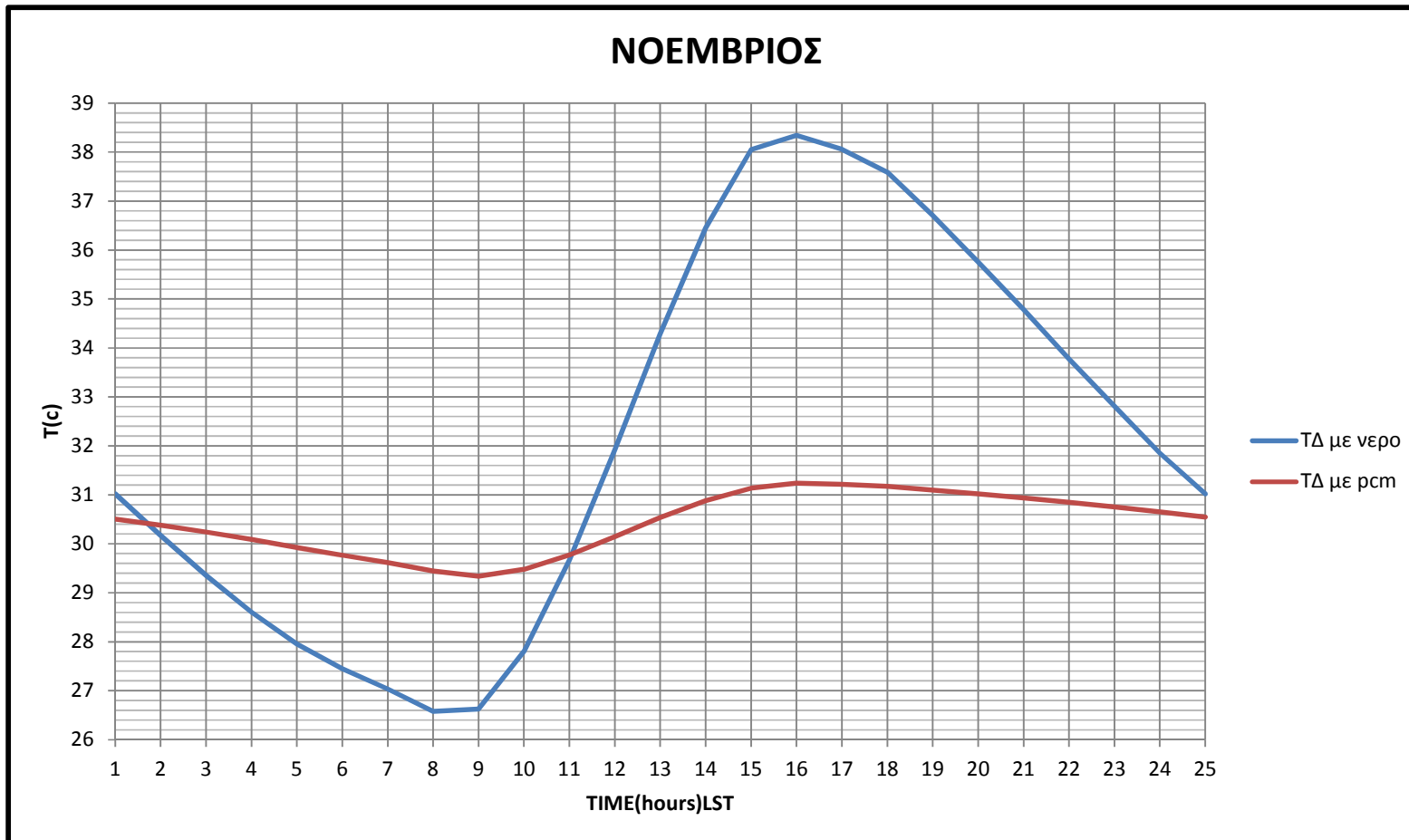
Διάγραμμα 9.79: Cp νερού και pcm



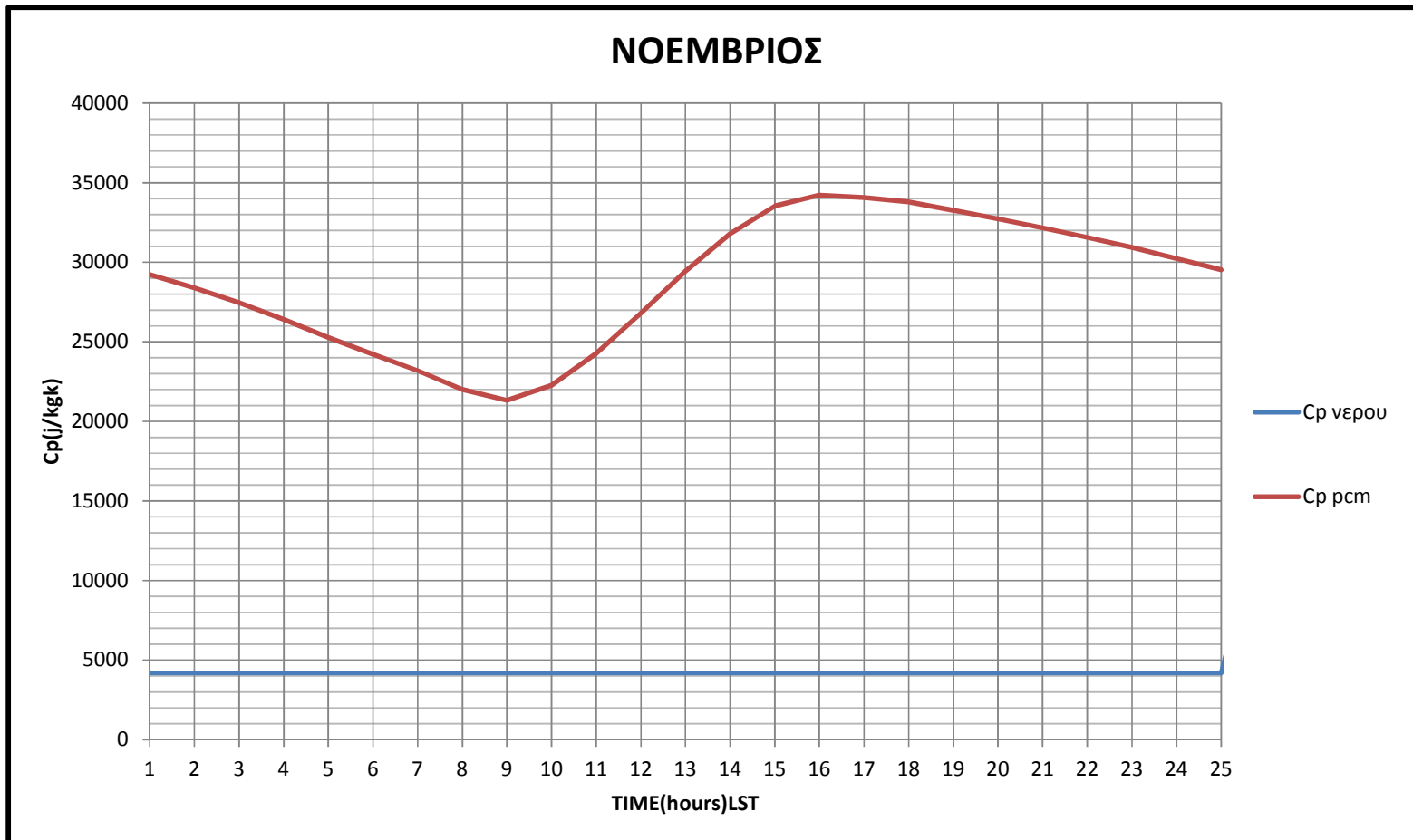
Διάγραμμα 9.80: Θερμοκρασία δεξαμενής με νερό και pcm



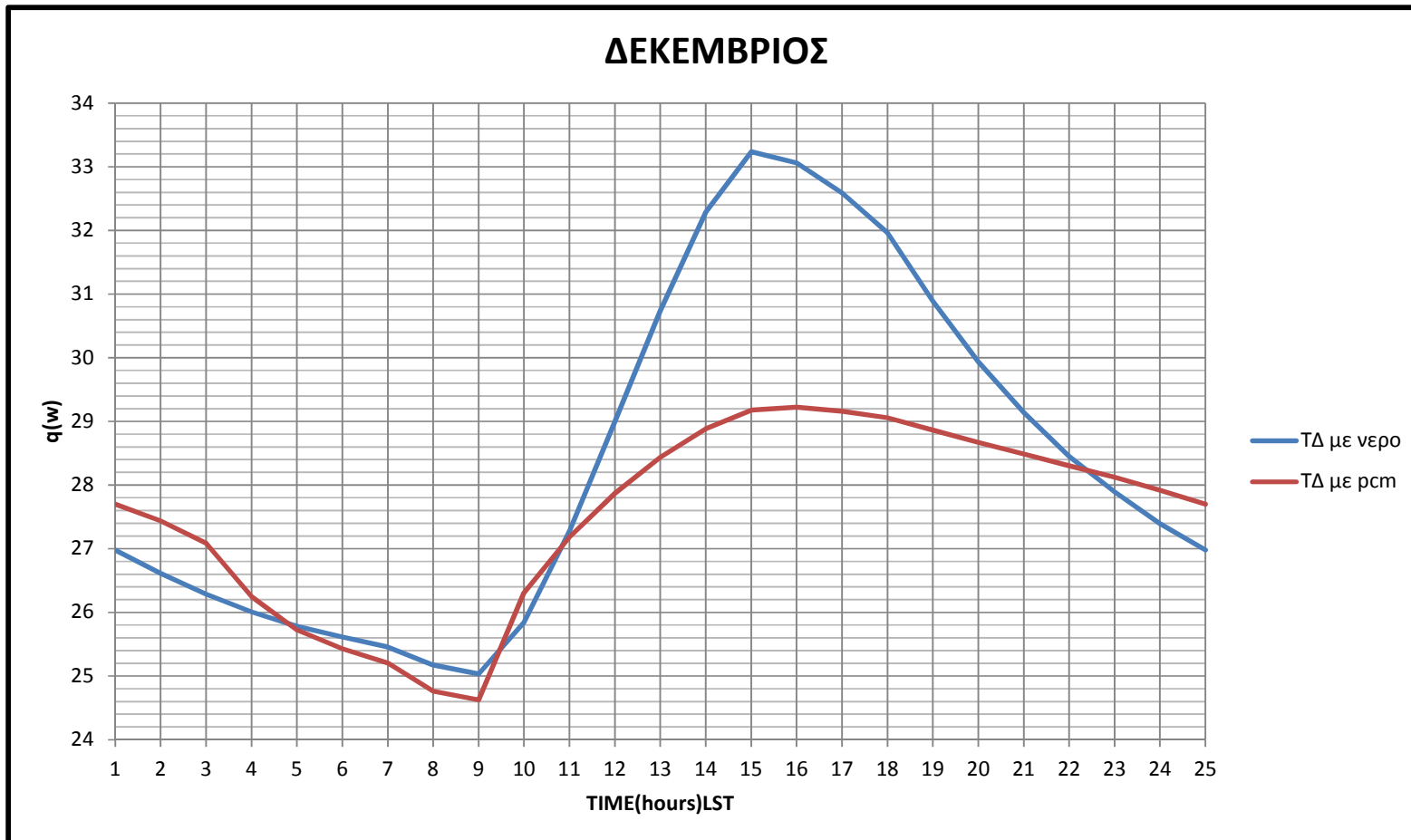
Διάγραμμα 9.81: Cp νερού και pcm



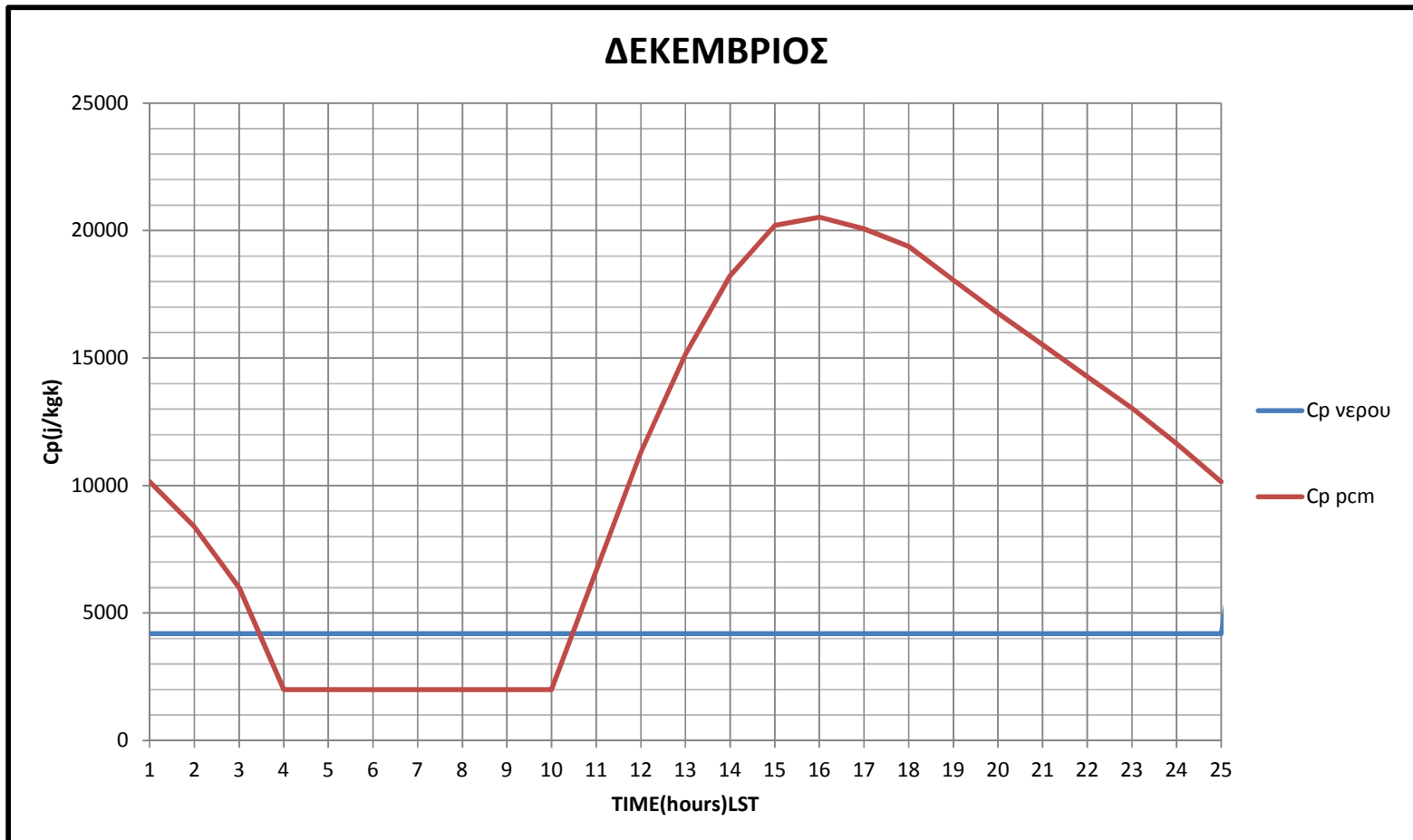
Διάγραμμα 9.82: Θερμοκρασία δεξαμενής με νερό και pcm



Διάγραμμα 9.83: Cp νερού και pcm



Διάγραμμα 9.84: Θερμοκρασία δεξαμενής με νερό και pcm



Διάγραμμα 9.85: Cp νερού και pcm

Παρατηρήσεις:

Για τον μήνα Ιανουάριο βλέπουμε πώς οριακά το RT27 βγαίνει έξω 'από τα όρια λειτουργίας' που 22-31 C. Τις ώρες 14-18 το Cr του είναι μικρότερο του νερού οπότε παρατηρείται μεγαλύτερη κλίση στη αύξηση και την μείωση της θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά την μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας έχει cr μικρότερο του νερού με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερη θερμοκρασιακή διακύμανση.

Για τους μήνες Φεβρουάριο Νοέμβριο Δεκέμβριο το Cr του pcm είναι πολύ μεγαλύτερο από του νερού με αποτέλεσμα όπως φαίνεται και στο διάγραμμα μικρό θερμοκρασιακό εύρος.

Για τον μήνα Μάρτιο βλέπουμε πως οι θερμοκρασίες τις ώρες 6-9 είναι κάτω από το θερμοκρασιακό εύρος της αλλαγής φάσης με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερο Cr από του νερού και εντονότερη μείωση της θερμοκρασίας

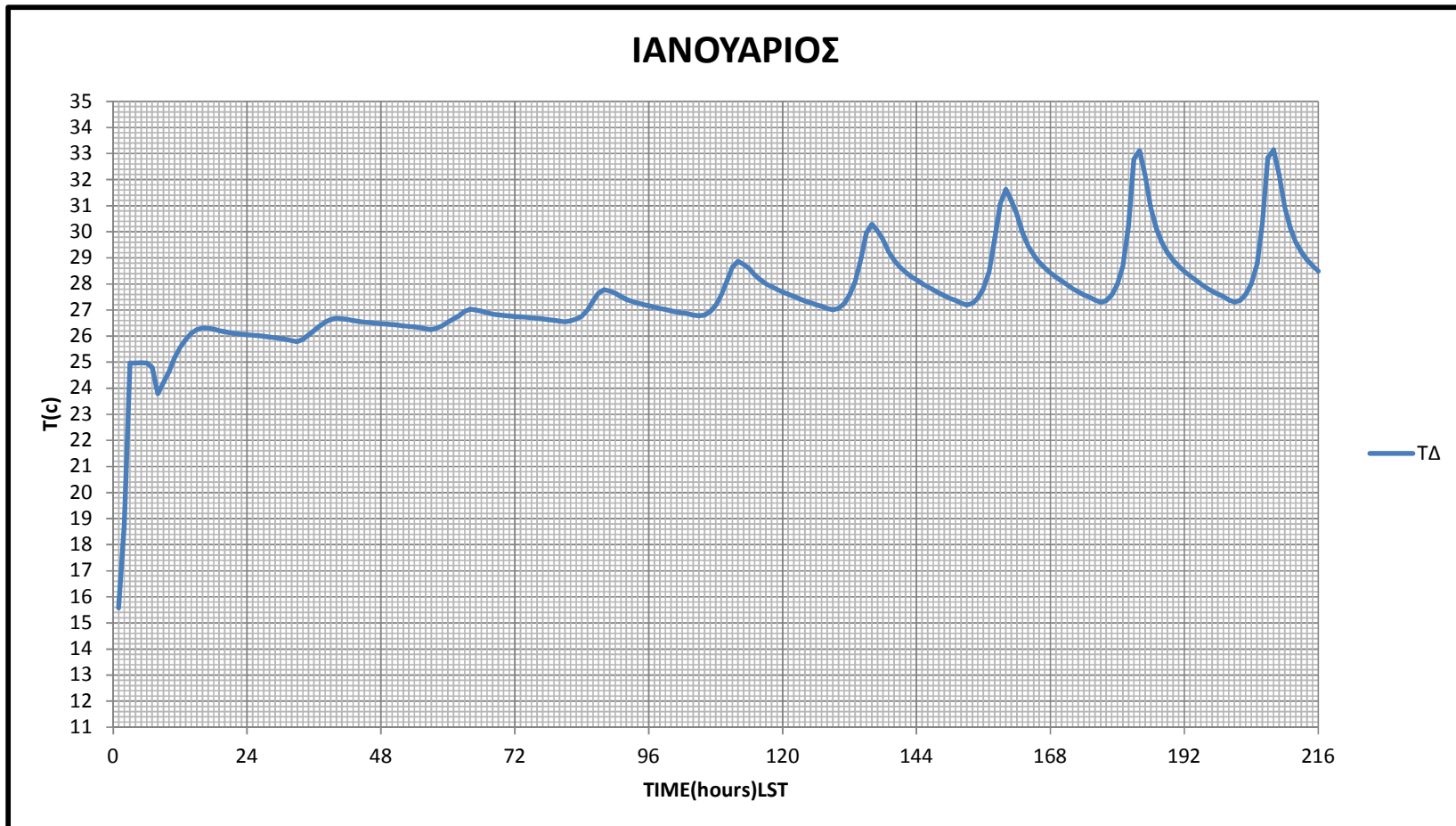
Οι θερμοκρασίες για τον μήνα Απρίλιο είναι κάτω από το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης με αποτέλεσμα το pcm να είναι χειρότερο μέσω αποθήκευσης από το νερό.

Για λόγους πληρότητας παραθέτουμε παρακάτω τα διαγράμματα 9.86-9.91 θερμοκρασίας της δεξαμενής με PCM από το πρώτο 24ωρο μέχρι το 24ωρο που σταθεροποιείται η λειτουργία. Παρατηρούμε πως για όλους τους μήνες τις πρώτες ώρες γίνεται ένα άλμα στην θερμοκρασία μέχρι τους 24C. Αυτό συμβαίνει διότι έχουμε θεωρήσει θερμοκρασία επιστροφής 25C

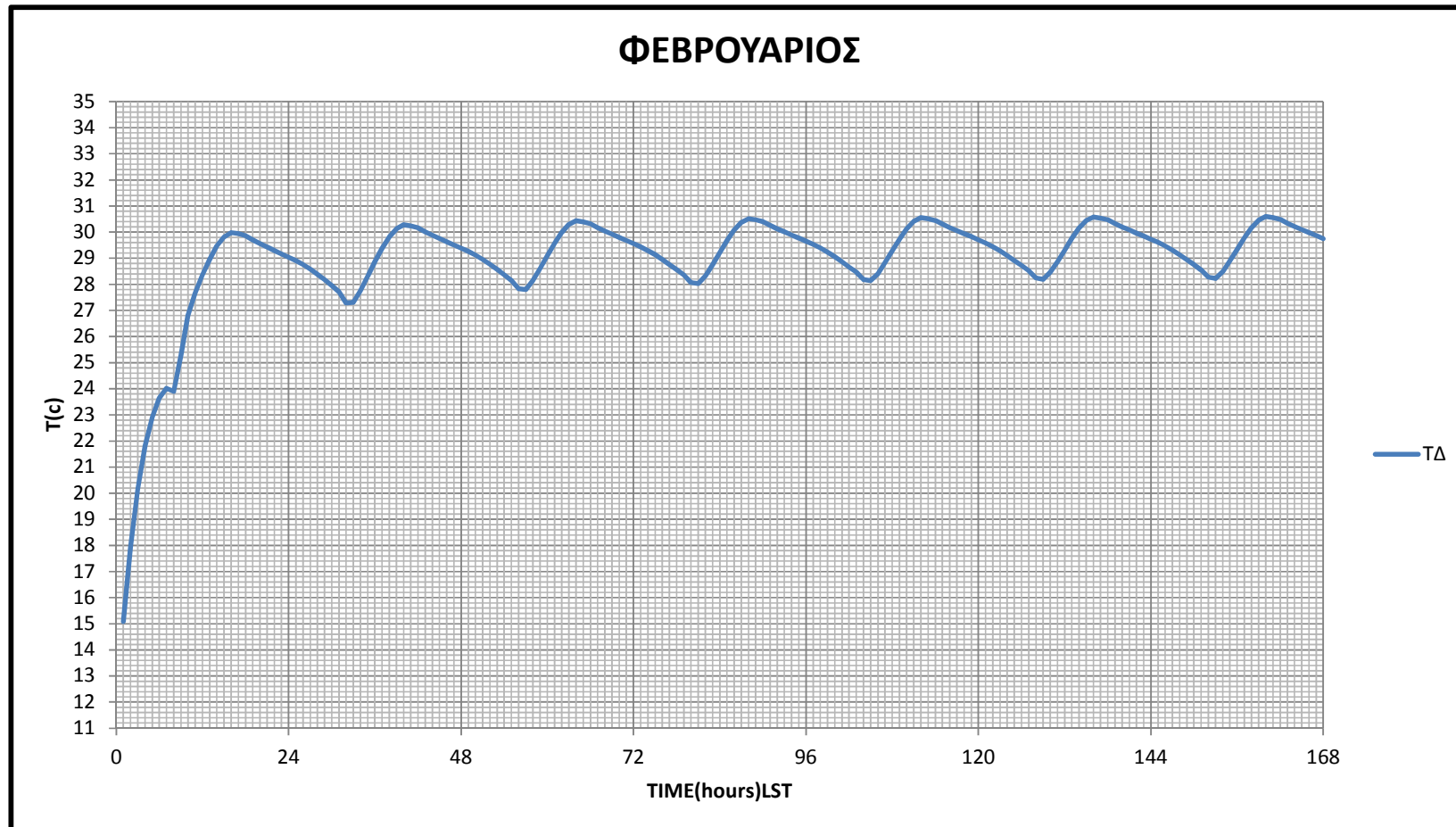
Τέλος για τους μήνες Νοέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο υποθέτουμε 50% νέφωση για 48 ώρες και συγκρίνουμε τις τιμές θερμοκρασίας της δεξαμενής για νερό και pcm. Παρατηρούμε πως με το pcm έχουμε μικρότερη πτώση της θερμοκρασίας λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας. Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα 9.92-9.94.

Συμπεράσματα.

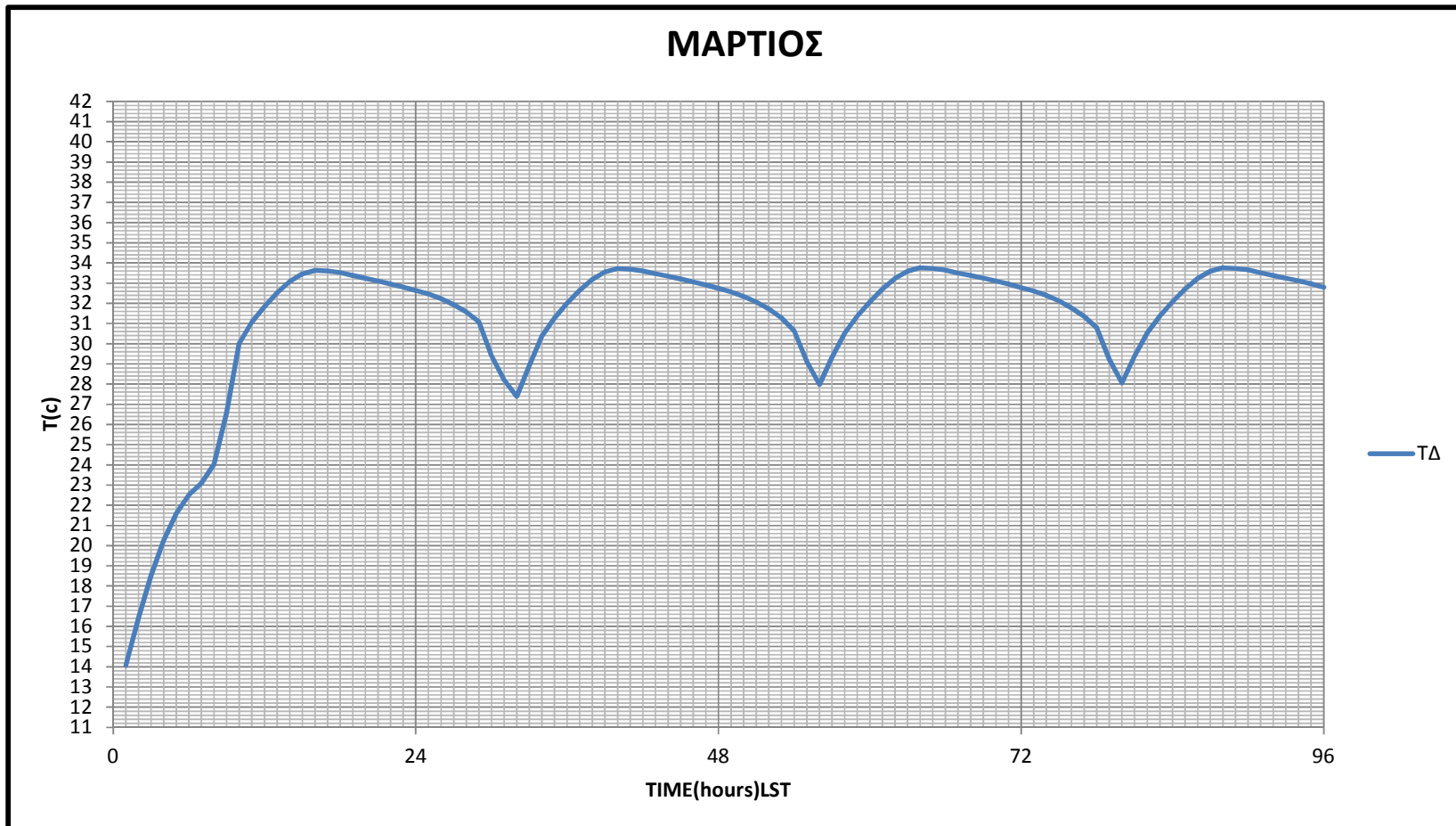
Από τα διαγράμματα είναι φανερό πως με την χρησιμοποίηση του κατάλληλου pcm είναι έχουμε ένα μέσο με καλύτερη θερμική αποθήκευση από ότι το νερό, μικρότερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, και μικρότερη πτώση της θερμοκρασίας σε περίπτωση αύξησης των φορτίων ή μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας.



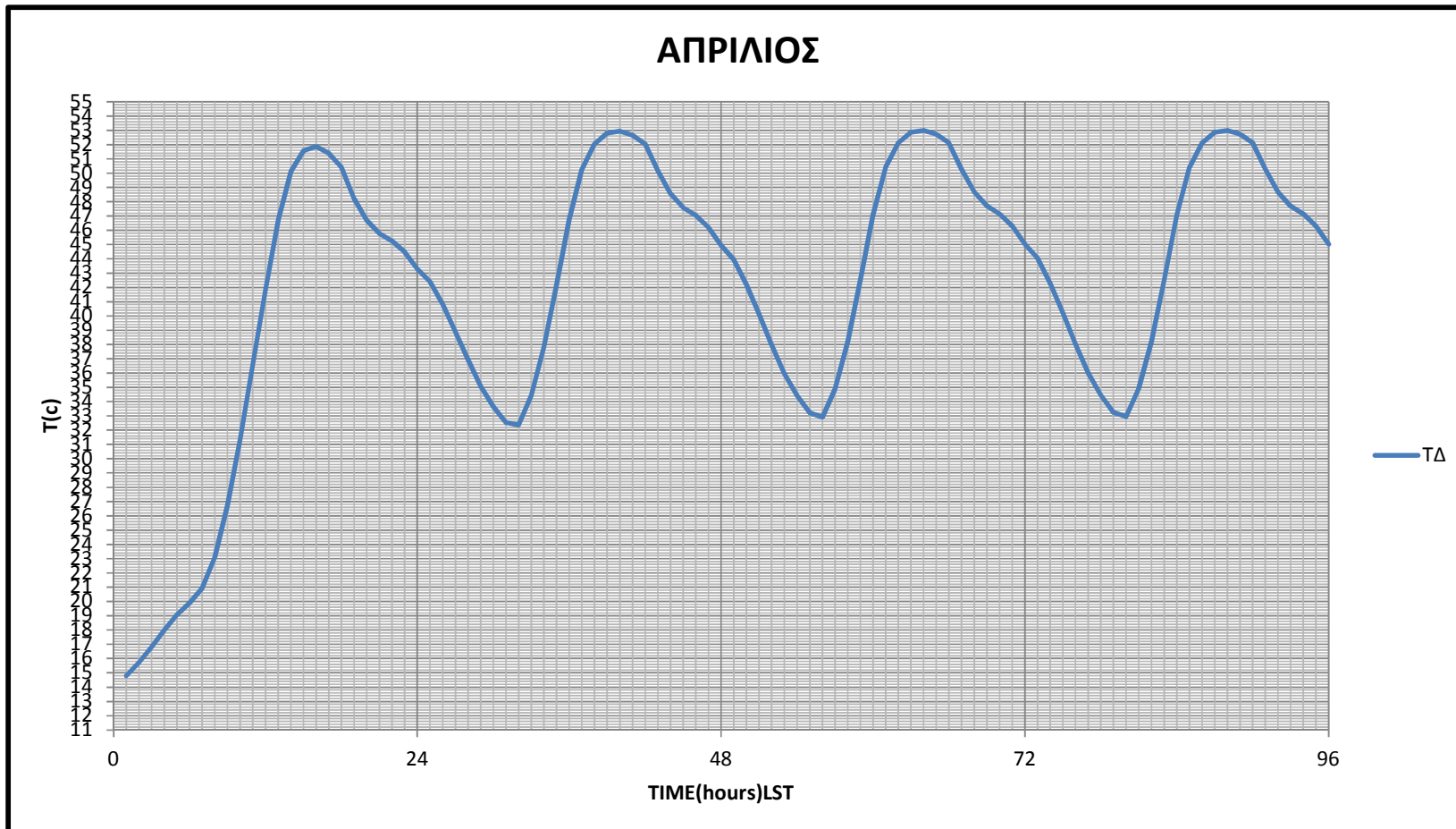
Διάγραμμα 9.86



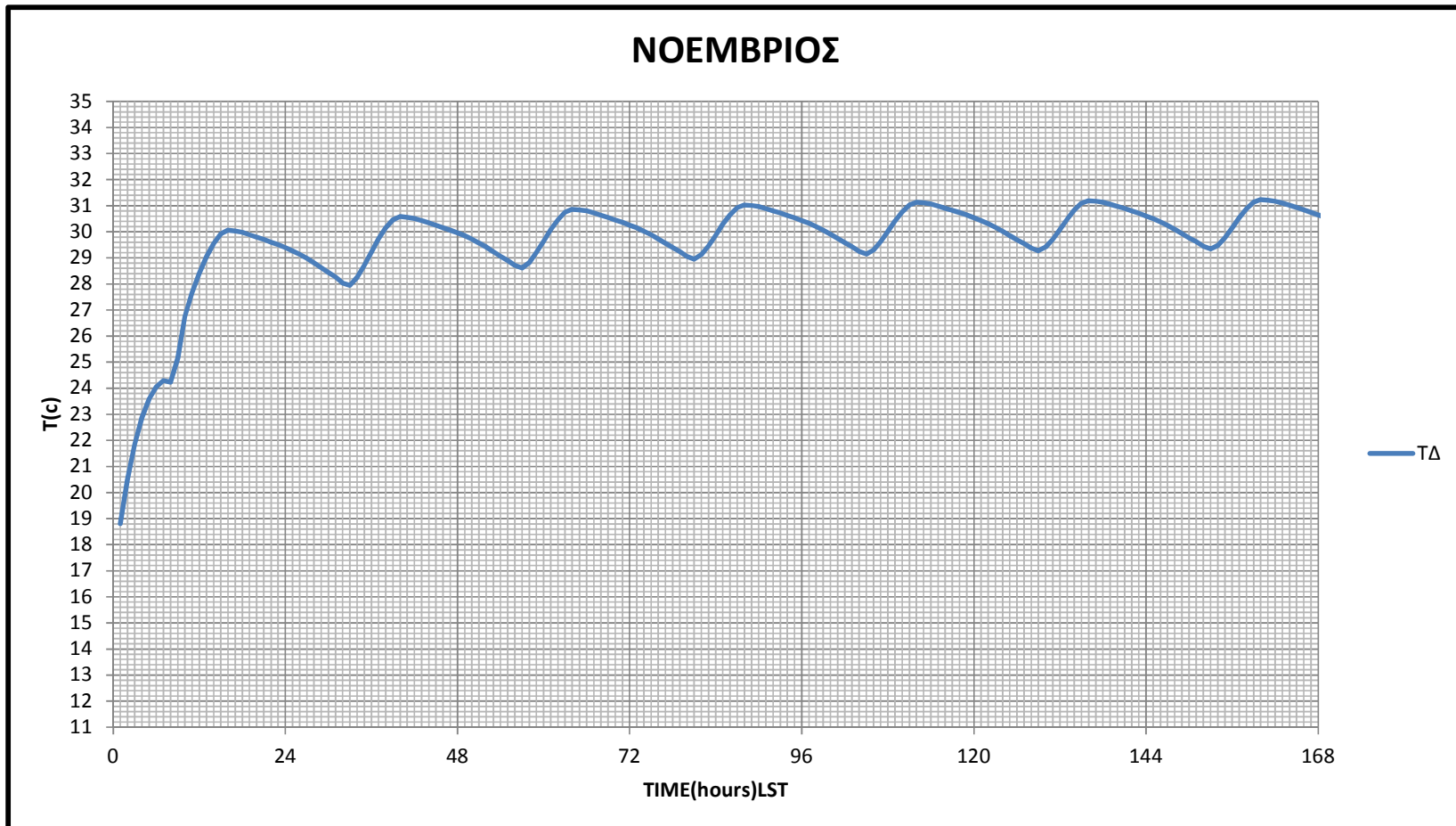
Διάγραμμα 9.87



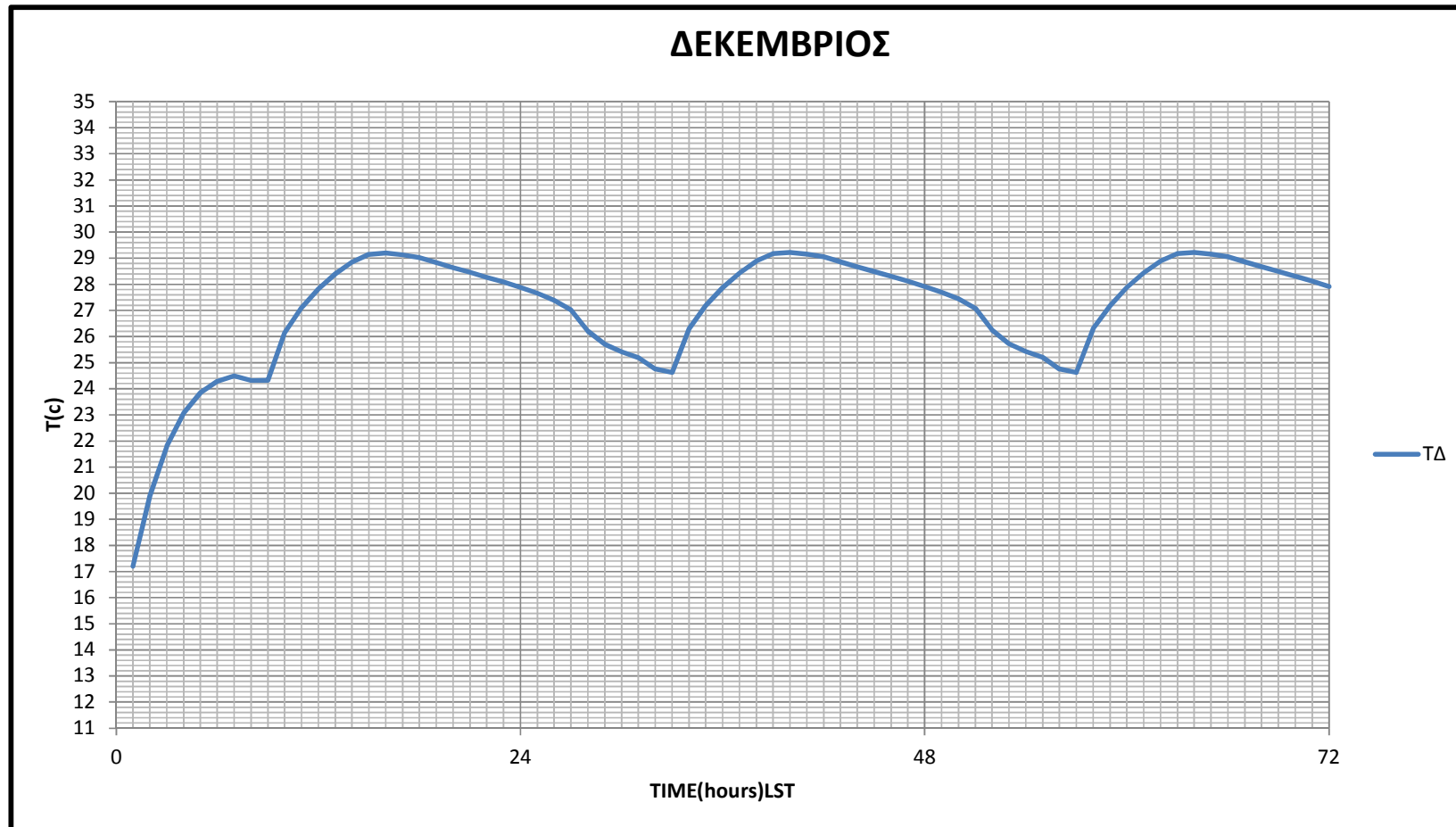
Διάγραμμα 9.88



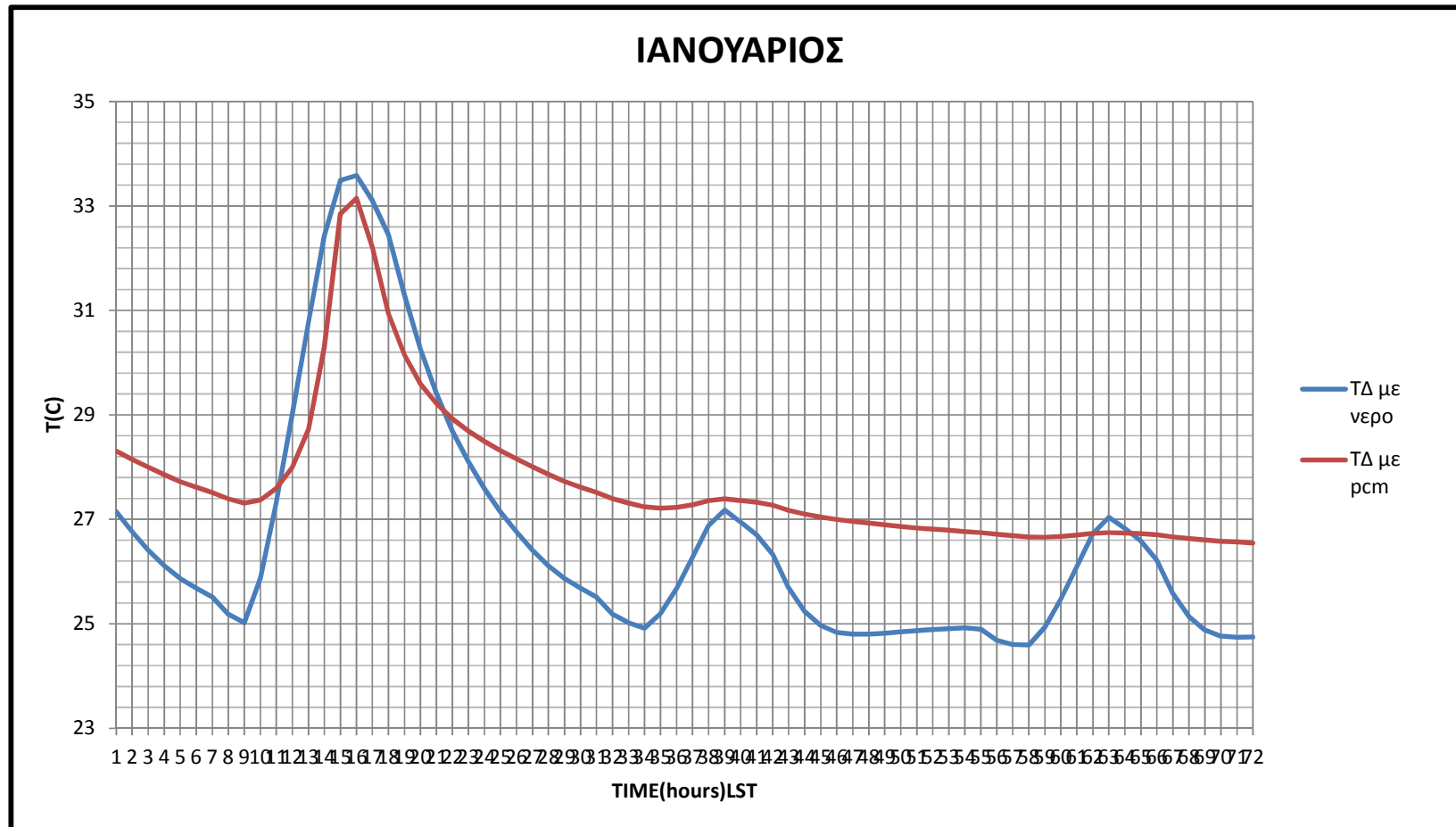
Διάγραμμα 9.89



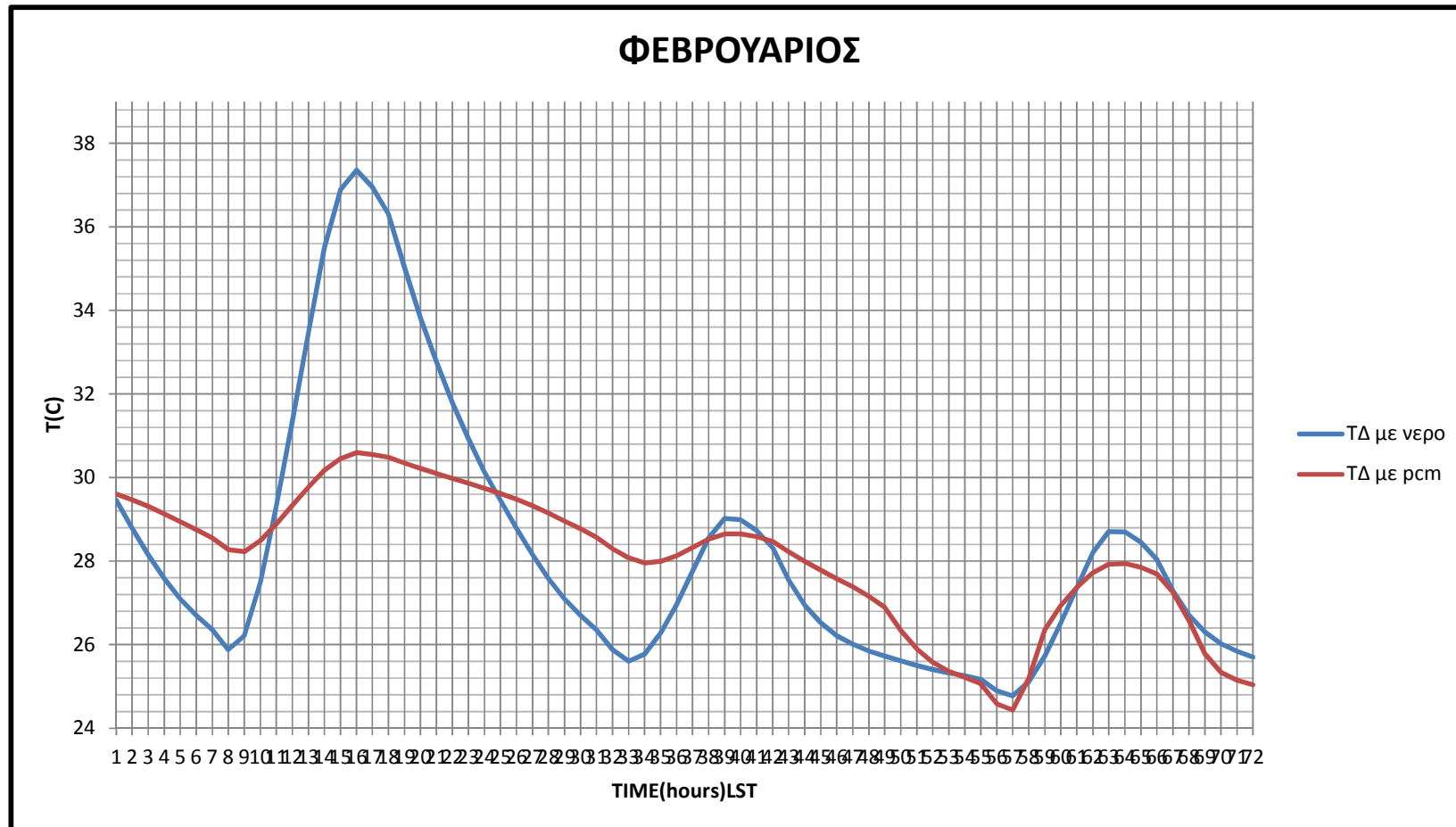
Διάγραμμα 9.90



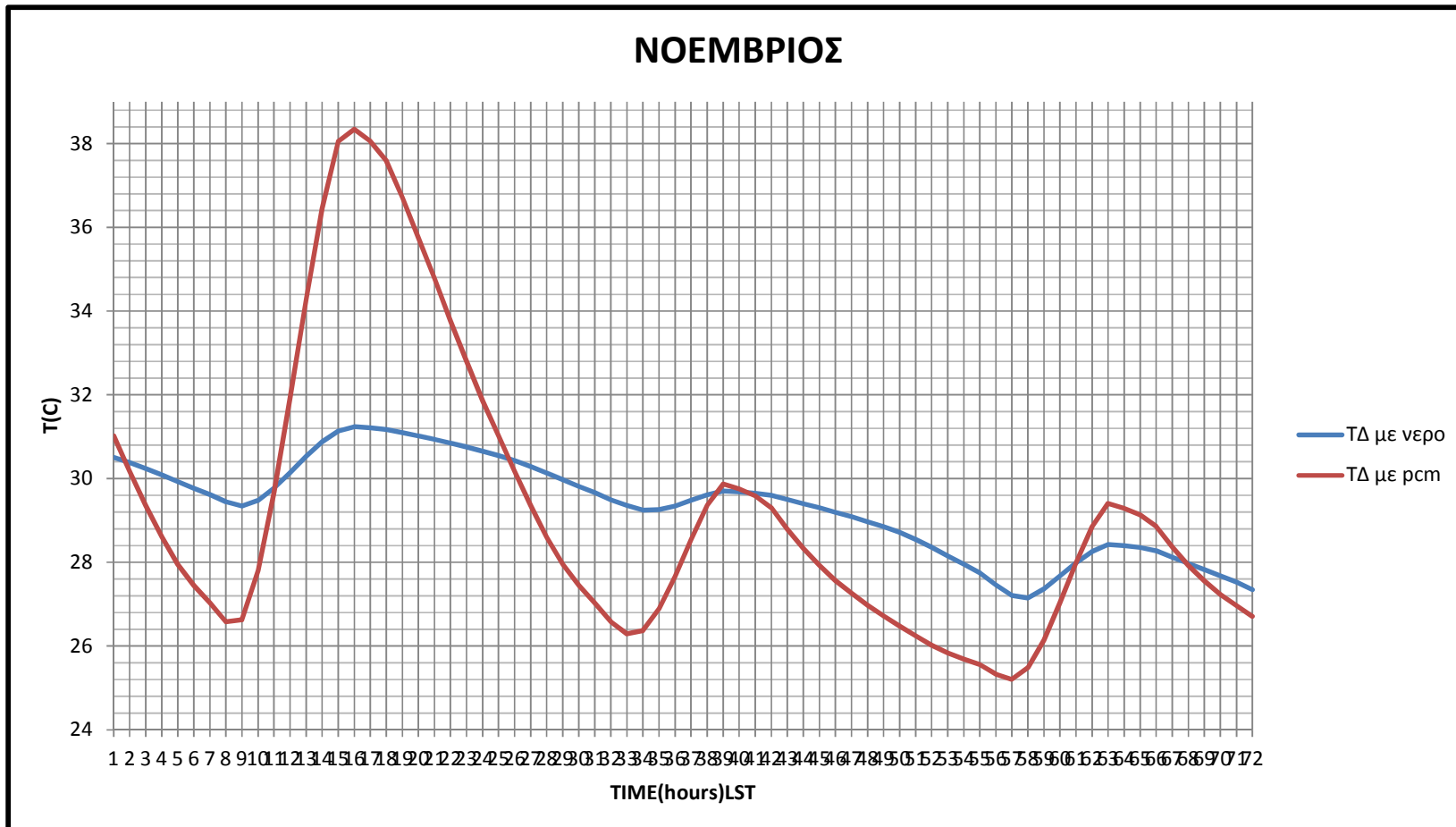
Διάγραμμα 9.91



Διάγραμμα 9.92



Διάγραμμα 9.93



Διάγραμμα 9.94

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] http://ec.europa.eu/energy/energy2020/index_en.htm, Ευρωπαϊκή στρατηγική για την ενέργεια μέχρι το 2020
- [2] Atul Sharma , V.V. Tyagi , C.R. Chen , D. Buddhi <<Review on thermal energy storage with phase change materials and applications>>
- [3]Θερμική Συμπεριφορά Κτηρίων ΕΜΠ <<pcm pdf>>
- [4]Mohammed M. Farid , Amar M. Khudhair , Siddique Ali K. Razack Said Al-Hallaj <<A review on phase change energy storage: materials and applications>>
- [5] A. Felix Regin , S.C. Solanki, J.S. Saini <<Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review>>
- [6] Freund, M. et. al. - <<Paraffin Products, Properties, Technologies, Applications>>
- [7] E. Gunther, S. Hiebler, H. Mehling <<Determination of the heat storage capacity of PCM and PCM-objects as a function of temperature>>,Bavarian Center for Applied Energy Research (ZAE Bayern), Ecostock, 2006
- [8] H.K.D.H. Bhadeshia, <<Thermal Analysis Techniques>>, University of Cambridge, Materials Science & Metallurgy.
- [9] <<A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method>>
Jong Hyeon Peck, Jae-Jun Kim, Chaedong Kangc, Hiki Hong
- [10]<< Characterization of granular phase changing composites for thermal energy storage using the T-history method>>M. A. Rady, Eric Arquis and Cedric Le Bot
- [11] ΞΕΝΟΦΩΝ ΚΑΚΑΤΣΙΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π, <<Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης>>, Εκδόσεις Σημειών Αθήνα 2006
- [12]<<Heat and Mass Transfer>>,Hans Dieter Baehr, Karl Stephan, Springer
- [13]<<Ηλιακή ενέργεια>> Κ. Αντωνόπουλος
- [14]<<Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments>>,A. Pasupathya, R. Velraja, R.V. Seenirajb

[15]<<PCM thermal storage in buildings: A state of art>>
Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi

[16]International energy agency,<< A Report of IEA SHC - Task 26
Solar Combisystems December 2002>>

[17] <<ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ «COMBI» ΓΙΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ
ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΧΩΡΩΝ ΚΑΙ ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ: ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ
ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΓΟΡΑ>> Αριστοτέλης Αηδόνης,
Βασιλική Δρόσου, Μιχάλης Καράγιωργας. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών
Ενέργειας

[18] Συστήματα για συνδυασμένη Ψύξη, Θέρμανση και Παραγωγή
Ζεστού Νερού Χρήσης, solar combi+, cres.

[19] ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ
Τ.Ο.Τ.Ε.Ε/2010

[20] ASHRAE, HVAC APPLICATIONS (2007)

[21] ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.
20701-3/2010, ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

[22] Solar Energy state of the art Simon Furbo Louise Jivan Sha Ulrike
Jordan, DTU

[23] ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ
ΑΛΛΑΓΗΣ – Υ.Π.Ε.Κ.Α., ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ
ΕΛΛΑΔΑΣ, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20702-5/2010, ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ
ΚΤΗΡΙΩΝ