



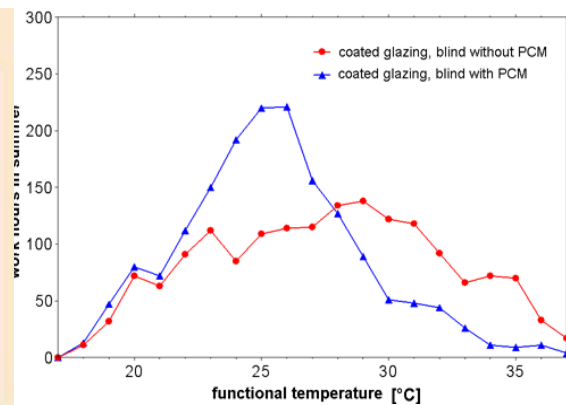
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ :
ΦΛΩΡΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗΣ
ΧΑΡΟΥΛΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :
ΚΙΜΩΝ Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ



"ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΔΟΔΑΠΕΔΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΧΩΡΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ"



**"Χρήση υλικών αλλαγής φάσης για ηλιακή ενδοδαπέδια θέρμανση χώρου
στην περιοχή της Αθήνας"**

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2011

Ολοκληρώνοντας αυτήν την εργασία νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα μου κύριο Κ.Α. Αντωνόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια του, καθώς και για την κατανόηση και συμπαράσταση του. Ακόμη,οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που με στήριξε όλο αυτό το διάστημα και ιδιαίτερα στις αδερφές μου που συνέβαλαν με τις γνώσεις τους στην ολοκλήρωση της εργασίας.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει ένα θεωρητικό και ένα πειραματικό μέρος . Στο θεωρητικό μέρος που προηγείται , έχει πραγματοποιηθεί μία ενδελεχής έρευνα γύρω από τα υλικά αλλαγής φάσης και τα χαρακτηριστικά τους , καθώς επίσης έχουν παρατεθεί διάφορες μελέτες που πραγματεύονται την τοποθέτηση τους σε κτίρια και όλες τις εφαρμογές τους σε αυτά. Από την άλλη, στο πειραματικό μέρος θα εξετασθεί η θέρμανση χώρου με εμβαδό δαπέδου $10 \times 10 = 100\text{m}^2$, ύψος 3m και συνολική επιφάνεια υαλοπινάκων 30m^2 στον νότιο και δυτικό τοίχο. Το κτίριο είναι μία τράπεζα που βρίσκεται στην περιοχή της Αθήνας με γεωγραφικό πλάτος $\varphi = \beta = 38^\circ$ και νότιο προσανατολισμό $\gamma = 0^\circ$. Στην οροφή του συγκεκριμένου κτιρίου είναι τοποθετημένοι ηλιακοί συλλέκτες συνολικού εμβαδού 30m^2 και κλίσης 60° με στόχο την θέρμανση νερού, το οποίο ρέει κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας σε σωλήνες εγκατεστημένους μέσα σε ενδοδαπέδιο στρώμα pcm. Συνεπώς το στρώμα αυτό απορροφά θερμότητα και μεταπίπτει στην υγρή φάση. Κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας διακόπτεται η παροχή του νερού με αποτέλεσμα την στερεοποίηση του pcm λόγω απόδοσης θερμότητας στον προς θέρμανση χώρο. Προκειμένου να μην υπάρξει πρόβλημα στην τοποθέτηση των ηλιακών συλλεκτων, δεδομένου ότι επιθυμούμε να μην αλληλοεπισκιάζονται, τοποθετείται στην οροφή του κτιρίου μία προσθήκη(υπόστεγο). Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι με αυτήν την εφαρμογή δεν πραγματοποιείται 100% κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου, αλλά ένα μεγάλο ποσοστό. Για τον λόγο αυτό παράλληλα χρησιμοποιούνται και άλλα συμπληρωματικά μέσα, όπως καλοριφέρ και κλιματιστικά. Προφανές είναι ότι η μελέτη θα πραγματοποιηθεί την 21^η ημέρα για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Θερμική ενέργεια και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

1.1	Θερμική Ενέργεια.....	15
1.2	Εφαρμογές θερμικής ενέργειας.....	15
1.3	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	16

Κεφάλαιο 2: Αρχές Θερμοδυναμικής

2.1	Αποθήκευση θερμότητας ως αισθητή θερμότητα.....	23
2.2	Αποθήκευση θερμότητας ως λανθάνουσα θερμότητα.....	23

Κεφάλαιο 3: Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

3.1	Μεταφορά θερμότητας με αγωγή.....	25
3.1.1	Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα αέρια.....	25
3.1.2	Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή υγρά.....	27
3.1.3	Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα στερεά.....	27
3.2	Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.....	27
3.3	Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	29

Κεφάλαιο 4 :Ηλιακή ακτινοβολία

4.1	Ηλιακή ακτινοβολία.....	31
4.2	Γωνία πρόσπτωσης.....	35
4.3	Ακτινοβολία οριζόντιας και κεκλιμένης επιφάνειας.....	36
4.4	Ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας.....	36
4.5	Εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.....	37

Κεφάλαιο 5:Υλικά αλλαγής φάσης

5.1	Εισαγωγή στα υλικά αλλαγής φάσης.....	39
5.2	Κατηγοριοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης.....	40
5.3	Ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης.....	46
5.4	Δυσκολίες κατά την χρήση των υλικών αλλαγής φάσης.....	47
5.4.1	Διαχωρισμός φάσεων.....	47

5.4.2	Μικρή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας	49
5.4.3	Υπόψυξη - Υπέρψυξη (Subcooling – Supercooling)	50
5.4.4	Διάβρωση.....	52
5.5	Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης-μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα των μεθόδων μέτρησης ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάση.....	52
5.5.1	Ψηφιακό θερμοδόμετρο.....	53
5.5.1.1	DSC με σταθερό ρυθμό ψύξης και θέρμανσης (δυναμική μέτρηση θερμοχωρητικότητας).....	54
5.5.1.2	DSC ισόθερων βημάτων (isothermal steps mode)	54
5.5.2	Ανάλυση αντικειμένων από PCM (analysis of PCM-objects).....	56
5.5.3	Μέθοδος T-history.....	57
5.5.4	Μέθοδος ‘double cell’.....	62
5.6	Συμβατότητα των υλικών αλλαγής φάσης με άλλα υλικά.....	62
5.7	Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης.....	63
5.8	Μορφές ενσωμάτωσης.....	63
5.8.1	Μικρο-Μακρο ενσωμάτωση.....	64
5.8.2	Μαζική αποθήκευση.....	66
5.8.3	Άμεση ενσωμάτωση	66
5.8.4	Εμβάπτιση.....	66
5.8.5	Σανίδα με ελάσματα.....	67
5.8.6	Εμβάπτιση σε τούβλο.....	67
5.8.7	Ενσωμάτωση PCM σε τούβλο σε κυλινδρικές τρύπες-πειράματα στο Κουβέιτ.....	68
5.8.7.1	Τύπος PCM.....	69
5.8.7.2	Ποσότητα PCM.....	69
5.8.7.3	Η θέση που τοποθετείται το PCM στο τούβλο.....	70
5.9	Εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης.....	71
5.9.1	Συστήματα αποθήκευσης μη άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς..	71
5.9.2	Συστήματα αποθήκευσης άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς.....	73
5.9.3	Φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	73
5.9.4	Συστήματα κλιματισμού.....	74

5.9.5	Ηλιακά συστήματα.....	75
5.9.6	Ηλεκτρονικά εξαρτήματα.....	76
5.9.6.1	Χρήση σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές.....	76
5.9.6.2	Μονάδα επείγουσας ψύξης.....	77
5.9.6.3	Τηλεπικοινωνίες.....	78
5.9.7	Οχήματα.....	79
5.9.8	Μεταφορές αγαθών.....	80
5.9.9	Θερμική Ένδυση.....	82
5.9.9.1	Εφαρμογές σε υποδήματα και πάτους υποδηματα.....	84
5.9.9.2	Εφαρμογές σε γιλέκα.....	85
5.9.9.3	Εφαρμογές σε κράνη.....	85
5.9.10	Εφαρμογές για τον ύπνο.....	86
5.9.11	Εφαρμογές σε έπιπλα.....	86
5.9.12	Εφαρμογες σε κτίρια.....	86
5.9.12.1	Εισαγωγή-Ενεργητικά και παθητικά συστήματα.....	86
5.9.12.2	Δομικά υλικά.....	88
5.9.12.3	Τοιχοποιία.....	90
5.9.12.4	Συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με υλικό αλλαγής φάσης.....	95
5.9.13	Εφαρμογές σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις	
5.9.13.1	Κλιμαστικές εγκαταστάσεις.....	98
5.9.13.2	Συστήματα βελτίωσης απόδοσης επίγειων	
	Στροβιλομηχανών.....	100

Κεφάλαιο 6 : Υπολογιστικές μέθοδοι στα υλικά αλλαγής φάσης

6.1	Εισαγωγή.....	103
6.2	Αναλυτικά μοντέλα μετάδοσης θερμότητας σε pcm	
6.2.1	Αναλυτικό μοντέλο για την θέρμανση και ψύξη ημιάπειρης επιφάνειας pcm (1-D).....	103
6.2.2	Αναλυτικό μοντέλο για αποθήκευση θερμότητας με pcm (2-D και 3-D).....	105

6.3	Υπολογιστικά μοντέλα μετάδοσης θερμότητας σε pcm	
6.3.1	Εισαγωγή	107
6.3.2	Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών σε pcm.....	108
6.3.3	Μέθοδος ενθαλπίας σε pcm.....	109

Κεφάλαιο 7: Εξοικονόμηση ενέργειας από την εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης σε κτιριακές εγκαταστάσεις

7.1	Ενεργειακή αποδοτικότητα των τοίχων δωματίου που περιέχουν PCM, κάτω από απόλυτα ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες.....	115
7.1.1	Εισαγωγή.....	115
7.1.2	Διεξαγωγή του πειράματος.....	115
7.1.3	Μετρήσεις σε δύο διαφορετικά ύψη.....	116
7.1.4	Θερμοκρασιακές μεταβολές στο εσωτερικό μέρος των τοίχων.....	116
7.1.5	Πυκνότητα της ροής θερμότητας.....	118
7.1.6	Μελέτη της ενέργειας που αποθηκεύεται και αποδεσμεύεται.....	119
7.1.7	Επίλογος.....	119
7.2	Εφαρμογή ενός επικυρωμένου αριθμητικού μοντέλου για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας από την χρήση υλικών αλλαγής φάσης στα κατασκευαστικά υλικά του κτιρίου.....	120
7.2.1	Παραμετρική ανάλυση.....	120

Κεφάλαιο 8: Εφαρμογές ενεργητικών συστημάτων pcm σε κτίρια125

Κεφάλαιο 9: Εφαρμογές παθητικών συστημάτων pcm σε κτίρια

9.1	Εισαγωγή.....	133
9.2	Τοίχος trombe με PCM.....	133
9.3	Παραθυρόφυλλο με PCM.....	134
9.4	Τοίχος συλλογής ηλιακής θερμότητας για αερισμό του κτιρίου.....	134
9.5	Γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM.....	135
9.6	Μπλόκ τσιμέντου με ενσωματωμένο PCM.....	137

9.7	PCM ενσωματωμένο σε ξύλο-ελαφύ τσιμέντο.....	138
9.8	Θερμικά αυξημένος σκελετός τοίχου με PCM.....	139

Κεφάλαιο 10: Χρήση υλικών αλλαγής φάσης για ηλιακή ενδοδαπέδια θέρμανση χώρου

10.1	Εισαγωγή.....	141
10.2	Επιλογή υλικού αλλαγής φάσης.....	141
10.3	Καθορισμός της διαστρωμάτωσης του δαπέδου, των τοίχων και της οροφής	
10.3.1	Διαστρωμάτωση δαπέδου.....	142
10.3.2	Διαστρωμάτωση τοίχων.....	142
10.3.3	Διαστρωμάτωση οροφής.....	142
10.3.4	Φυσικά χαρακτηριστικά υλικών.....	143
10.4	Μαθηματικό μοντέλο.....	143
10.5	Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους υαλοπίνακες.....	146
10.6	Θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος.....	166
10.7	Συνάρτηση μεταφοράς στα ελληνικά κτήρια.....	172
10.8	Ισοδύναμη θερμοκρασία 35 ελληνικών πόλεων.....	173
10.9	Απλοποίηση της διαδικασίας υπολογισμού θερμικής ροής δομικών στοιχείων (ατοίχου και οροφής).....	173
10.10	Υπολογισμός ψυκτικού φορτίου που προκύπτει από το θερμικό κέρδος δι' αγωγής και ηλιακής ακτινοβολίας μέσω υαλοπινάκων.....	182
10.10.1	Θερμικό κέρδος υαλοπίνακος δι'αγωγής και αντίστοιχο ψυκτικό φορτίο.....	183
10.10.2	Ηλιακό θερμικό κέρδος υαλοπίνακος και αντίστοιχο ψυκτικό φορτίο.....	184
10.10.3	Συνολικό ψυκτικό φορτίο υαλοπίνακος.....	185
10.11	Υπολογισμός ψυκτικού φορτίου λόγω φωτισμού.....	186
10.12	Υπολογισμός ψυκτικού φορτίου από ανθρώπους.....	188
10.13	Υπολογισμός ψυκτικού φορτίου λόγω ανανέωσης και διεύδυσης αέρος	
10.13.1	Ανανέωση και διεύδυση αέρος.....	190
10.13.2	Υπολογισμός θερμικού κέρδους και ψυκτικού φορτίου.....	190

Κεφάλαιο 11:	
11.1 Εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου στην περίπτωση χρήσης pcm.....	199
11.2 Εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου στην περίπτωση χρήσης μπετον.....	213
11.3 Παραλλαγή της εφαρμογής 11.1 -Μείωση της έκτασης ηλιακών συλλεκτών.....	226
11.4 Παραλλαγή της εφαρμογής 11.1- Αύξηση της έκτασης ηλιακών συλλεκτών.....	237
11.5 Παραλλαγή της εφαρμογής 11.1- Αλλαγή των συντελεστών F_r και U_L	249
11.6 Συνδυασμός της εφαρμογής 11.4 και 11.5.....	261
11.7 Συνέχεια της εφαρμογής 11.1-Χρήση της θερμότητας που έχει αποθηκευτεί στο pcm την επόμενη μέρα, μηδενικής ηλιακής ακτινοβολίας.....	273
Κεφάλαιο 12: Γενικά σχόλια και συμπεράσματα.....	283
Βιβλιογραφία	287

Κεφάλαιο 1

Θερμική ενέργεια και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

1.1 Θερμική ενέργεια

Στην σημερινή εποχή η αποθήκευση ενέργειας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιτυχία οποιασδήποτε εγκατάστασης παραγωγής που προσπαθεί να καλύψει την ενεργειακή ζήτηση. Για παράδειγμα η ανάγκη αποθήκευσης στις εφαρμογές ηλιακής ενέργειας είναι επιτακτική , ειδικά όταν η διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας είναι στο κατώτατο σημείο , κυρίως τον χειμώνα.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να συνεισφέρουν τα μέγιστα ώστε να ικανοποιηθεί αποτελεσματικά η ανάγκη της κοινωνίας για πιο αποδοτικά και , φιλικότερα προς το περιβάλλον συστήματα παραγωγής ή διαχείρισης ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην θέρμανση και την ψύξη κτιρίων , στην αεροναυτική και σε πρακτικές εφαρμογές. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συχνά οδηγούν σε σημαντικά οφέλη όπως:

- Μειωμένο κόστος ενέργειας
- Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας
- Εσωτερικός αέρας καλύτερης ποιότητας
- Αυξημένη ευκαμψία λειτουργίας
- Μειωμένα αρχικά έξοδα
- Μειωμένα έξοδα συντήρησης
- Μειωμένος όγκος εξοπλισμού
- Αποδοτικότερη και πιο αποτελεσματική χρήση του εξοπλισμού
- Διατήρηση των φυσικών καυσίμων (διευκολύνοντας και κάνοντας πιο αποδοτική την χρήση της ενέργειας ή την αντικατάσταση των καυσίμων)
- Μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (CO₂) καθώς και αερίων που επηρεάζουν αρνητικά το περιβάλλον (CFCs)

1.2 Εφαρμογές θερμικής ενέργειας

Η ανάγκη αποθήκευσης θερμότητας γίνεται επιτακτική σε αρκετούς τομείς στην καθημερινότητα μας.[1] Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας στην βιομηχανία. Ακόμα πολύ σημαντική αποδεικνύεται η αποθήκευση από την πλευρά της ενεργειακής κατανάλωσης σε κατοικίες και εμπορικά κτίρια για την μείωση των φορτίων αιχμής που επιβάλλονται από τα συμβατικά ηλεκτρικά φορτία. Στον τομέα των μεταφορών που τώρα κυριαρχούν τα βενζινοκίνητα οχήματα , επαρκή συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρισμού μπορεί να ενθαρρύνουν την χρήση ενός μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών αυτοκινήτων μειώνοντας έτσι την ζήτηση στο πετρέλαιο. Ήδη σήμερα τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα έχουν κάνει την εμφάνισή τους, είτε κινούμενα εξολοκλήρου από ηλεκτρικούς κινητήρες είτε κινούμενα υποβοηθούμενα από ηλεκτρικούς κινητήρες. Η σκέψη της αποθήκευσης ενέργειας σε τροχούς δεν είναι καινούργια. Η ικανότητα των τροχών να μεταφέρουν ομαλά διακοπτόμενη ισχύς βρέθηκε λίγο μετά την ανακάλυψη των παλινδρομικών μηχανών τον 18ο αιώνα. Ειδικά αυτοκινούμενα

οχήματα χρησιμοποιήθηκαν τροφοδοτούμενα από εξωτερικά αποθηκευμένη ενέργεια που προσδίδεται από ατμό για πάνω από εκατό χρόνια. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι η συνέχεια αυτών των μηχανών.

Οι καταγεγραμμένες αυξήσεις στις τιμές των καυσίμων τα τελευταία χρόνια, η ολοένα αυξανόμενη δυσκολία στην απόκτηση κεφαλαίου για την επέκταση των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας σε συνδυασμό με την πρόσφατη ανάπτυξη της τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας οδηγεί στην δημιουργία ενδιαφέροντος για τις προοπτικές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

Για τον πάροχο της ενέργειας, η ενέργεια είναι ένα αγαθό του οποίου η αξία προσδιορίζεται από το κόστος παραγωγής του και την ζήτηση της κοινωνίας. Για τον καταναλωτή της ενέργειας, η αξία της εξαρτάται από την συνεισφορά της στην παραγωγή προϊόντων και υπηρεσιών ή από τον βαθμό της άνεσης και ανακούφισης που προσφέρει.

1.3 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Η ανάγκη αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στις μέρες μας είναι απαραίτητη εξαιτίας των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν διαφορετικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη, η μόλυνση του αέρα, η καταστροφή του όζοντος, η αποψίλωση των δασών και οι εκπομπές ραδιενεργών ουσιών είναι μερικά από τα σημαντικότερα προβλήματα που μας προβληματίζουν και απαιτούν την άμεση αντιμετώπισή τους. Τα σοβαρά αυτά περιβαλλοντικά προβλήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη αν η ανθρωπότητα θέλει να αναπτυχθεί στο μέλλον και να διατηρεί ταυτόχρονα ένα καθαρό περιβάλλον. Αν οι άνθρωποι και οι κοινωνίες συνεχίσουν να υποβαθμίζουν το περιβάλλον το μέλλον προβλέπεται δυσοίωνα.

Κατά την διάρκεια των προηγούμενων δεκαετιών οι κίνδυνοι και η πραγματικότητα της περιβαλλοντικής υποβάθμισης έγιναν πιο φανεροί. Η επίδραση στο περιβάλλον εξαιτίας των ανθρώπινων δραστηριοτήτων ήταν και είναι μεγάλη. Αυτό οφείλεται στον συνδυασμό πολλών παραγόντων όπως η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, η κατανάλωση ενέργειας, η βιομηχανική δραστηριότητα κλπ. Κατά την δεκαετία του '70 οι περισσότερες περιβαλλοντικές έρευνες και τα μετρητικά τους όργανα εστίαζαν στους συμβατικούς ρυπαντές όπως το διοξείδιο του θείου (SO₂), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Σήμερα το περιβαλλοντικό ενδιαφέρον εξαπλώθηκε στον έλεγχο σε ρυπαντές όπως οι τοξικές χημικές ουσίες που είναι βλαβερές ακόμη και σε πολύ μικρές ποσότητες καθώς και στα αέρια του θερμοκηπίου όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Παρόλη την ανάπτυξη της τεχνολογίας, η εξάπλωση της βιομηχανίας και των κτιριακών εγκαταστάσεων έχουν οδηγήσει σε καινούργια περιβαλλοντικά προβλήματα.

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα αποτελούνται από ένα ολόένα και αυξανόμενο αριθμό ρυπαντών και καταστροφών.[2],[3],[4] Τα σοβαρότερα από αυτά είναι:

- **Όξινη βροχή**

Η όξινη βροχή είναι η συνέπεια της παραγωγής ρυπαντών από την καύση ορυκτών καυσίμων. Η παραγωγή των ρυπαντών γίνεται σε σταθερές μονάδες όπως χυτήρια για μη σιδηρούχα ορυκτά καθώς και σε βιομηχανικούς καυστήρες και σε μεταφορικά οχήματα. Οι ουσίες αυτές μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις διαμέσου της ατμόσφαιρας όπου και αντιδρούν με αυτή σχηματίζοντας οξέα τα οποία καταλήγουν στο έδαφος από την βροχή (όξινη). Τα οξέα αυτά εναποθέτονται στα

διάφορα οικοσυστήματα τα οποία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε υψηλές οξύτητες. Η όξινη βροχή αποδίδεται κυρίως στις εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO₂) και διοξειδίων του αζώτου (NO_x). Τα αέρια αυτά αντιδρούν στην ατμόσφαιρα με τα μόρια του νερού και του οξυγόνου και δημιουργούν θειικό και νιτρικό οξύ.

Στο παρελθόν αυτοί οι ρυπαντές δημιουργούσαν προβλήματα μόνο κατά τόπους. Σήμερα γνωρίζοντας την συμβολή τους στη δημιουργία όξινης βροχής έχουμε εστιάσει την προσοχή μας σε αυτά ελέγχοντας τις εκπομπές τους καθώς και τις εκπομπές άλλων ρυπαντών με βάση το χλώριο ή το όζον. Τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα που μπορεί να προκαλέσει η όξινη βροχή είναι τα εξής:

- Αύξηση της οξύτητας σε λίμνες, ποτάμια, ρυάκια και υπόγεια νερά
- Καταστροφές σε δάση, σε αγροτικές καλλιέργειες και σε φυτά λόγω της τοξικότητας από την μεγάλη συγκέντρωση οξέων.
- Καταστροφές στα ψάρια και γενικότερα στην θαλάσσια ζωή
- Διάβρωση των υλικών των κτιρίων, των μεταλλικών κατασκευών, των αρχαιοτήτων και των μνημείων
- Μεταβολές στις φυσικές και οπτικές ιδιότητες των νεφών εξαιτίας της επίδρασης των στερεών αλάτων που δημιουργούνται από τις αντιδράσεις στα στρώματα της ατμόσφαιρας.

• **Καταστροφή του όζοντος**

Είναι γνωστό ότι το όζον που βρίσκεται στην στρατόσφαιρα, στα ύψη μεταξύ 12 και 25 χιλιομέτρων, έχει τον ρόλο μίας «ομπρέλας» προστασίας για την γη, απορροφώντας την υπεριώδη ακτινοβολία (ultraviolet UV) μήκους κύματος 240-320 nm καθώς και την υπέρυθη ακτινοβολία. Ένα παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα είναι η τοπική ελάττωση του στρώματος του όζοντος που βρίσκεται στην στρατόσφαιρα που δημιουργείται από την εκπομπή των χλωροφθορανθράκων (CFCs) και των οξειδίων του αζώτου (NO_x). Η συρρίκνωση ή η καταστροφή αυτού του στρώματος επιτρέπει στην βλαβερή υπεριώδη ακτινοβολία να φτάσει στην επιφάνεια της γης, αυξάνοντας τις καρκινογόνες παθήσεις του δέρματος, προκαλώντας ζημιά στην όραση μας καθώς και βλάβες στους μικρότερους ζωντανούς οργανισμούς.

Εδώ και αρκετά χρόνια γίνονται επιστημονικές συζητήσεις και υπάρχουν διαμάχες για την καταστροφή του όζοντος. Το 1987 υπογράφηκε το πρώτο διεθνές πρωτόκολλο στο Μόντρεαλ του Καναδά για την μείωση της παραγωγής των χλωροφθορανθράκων (CFCs).

Ozone Depletion Over Antarctica, Mean
October Values at Halley Bay



Εικόνα 1.3.1: Μείωση του στρώματος του όζοντος στην Ανταρκτική σε μονάδες Dobson από το 1950 ως το 2004

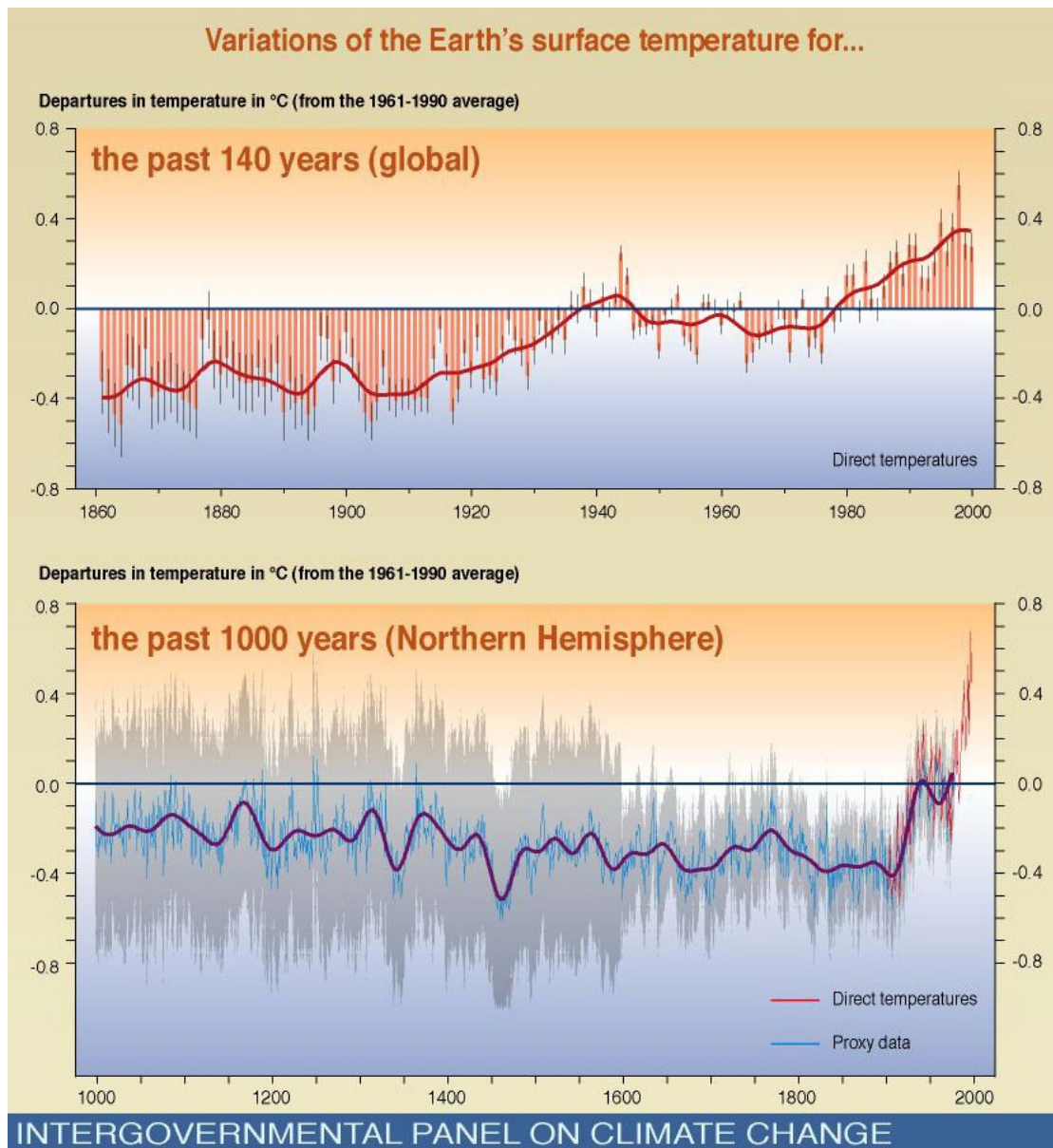
- **Παγκόσμια κλιματική αλλαγή (φαινόμενο του θερμοκηπίου):**

Αν και ο όρος φαινόμενο του θερμοκηπίου χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν για να αναφερθούμε στον ρόλο της ατμόσφαιρας στην διατήρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης σήμερα συνδέεται με την συμβολή του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην αύξηση της. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι υπεύθυνο περίπου για το 50% του ανθρωπογενούς φαινομένου του θερμοκηπίου. Άλλα αέρια που παράγονται από τις βιομηχανίες όπως το μεθάνιο, οι χλωροφθοράνθρακες, το διοξείδιο του αζώτου, το όζον, τα νιτρικά οξέα συμβάλλουν και αυτά στην έξαρση του φαινομένου του θερμοκηπίου που οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας της γης. Το διοξείδιο του άνθρακα και αυτά τα αέρια ονομάζονται αέρια του θερμοκηπίου.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι το πιο μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα που σχετίζεται με την χρήση και την παραγωγή ενέργειας. Συνδέεται με την συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, που παγιδεύουν την θερμότητα που ακτινοβολεί η επιφάνεια της γης ως εκ τούτου αυξάνεται η θερμοκρασία της επιφάνειας. Τον τελευταίο αιώνα η θερμοκρασία της γης έχει αυξηθεί κατά 0.6°C με αποτέλεσμα η στάθμη της θάλασσας να έχει ανέβει 20 cm. Τέτοιου είδους αλλαγές μπορεί να έχουν τεράστιες επιπτώσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες ανά τον κόσμο.

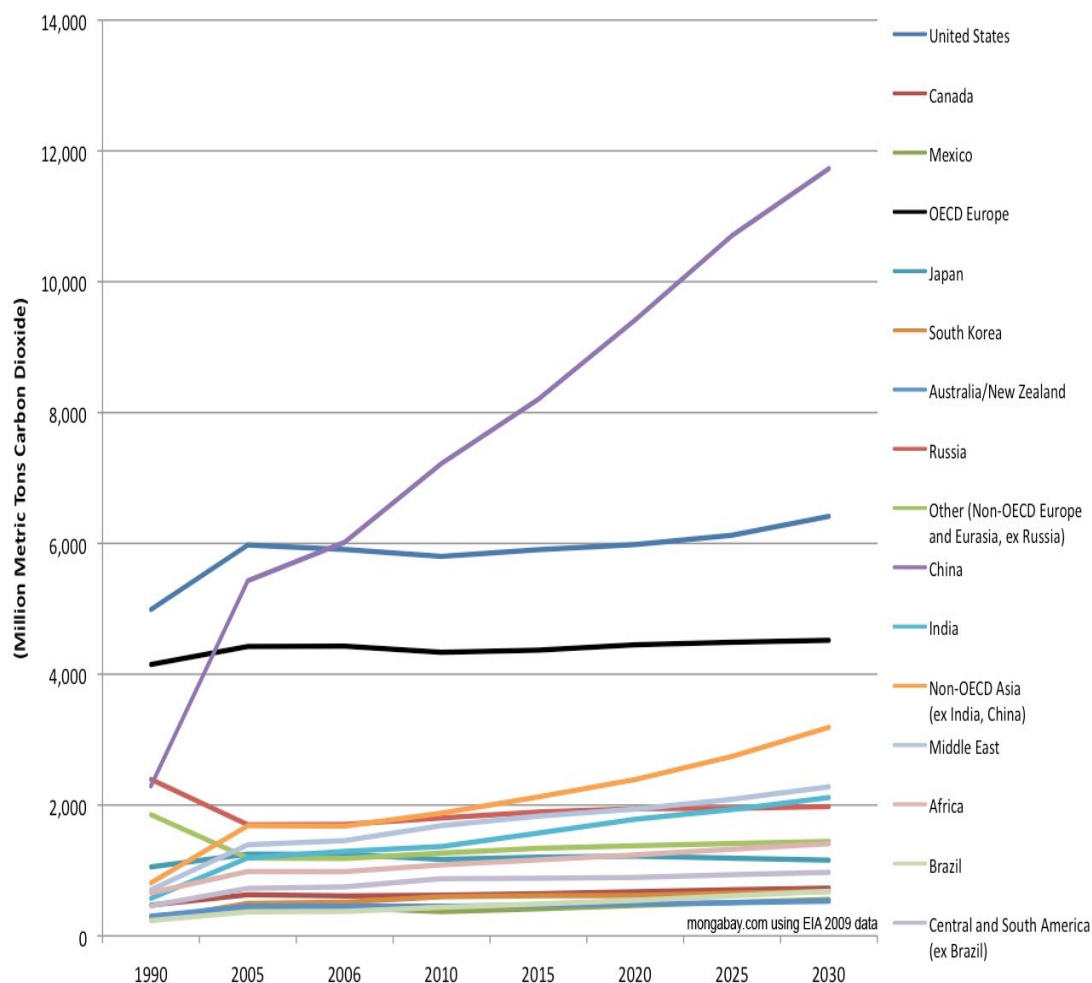
Η ανθρωπότητα με πολλούς τρόπους συμβάλει σημαντικά στην επιδείνωση του φαινομένου αυτού. Για παράδειγμα το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται από την καύση των ορυκτών καυσίμων, το μεθάνιο που απελευθερώνεται από την αυξημένη ανθρώπινη δραστηριότητα, οι χλωροφθοράνθρακες και η αποψίλωση των δασών, όλα συμβάλουν στην επιδείνωση του φαινομένου. Πολλοί επιστήμονες υποστηρίζουν ότι αν συνεχίσει να αυξάνεται η

συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα των αερίων του θερμοκηπίου η θερμοκρασία της γης μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 2°C μέσα στα επόμενα 50 χρόνια σύμφωνα με τις πιο αισιόδοξες έρευνες. Αν αυτό συμβεί, η στάθμη της θάλασσας θα ανέβει τόσο ώστε πολλές σημερινές περιοχές όπως τα νησιά Φίτζι θα εξαφανιστούν και θα είναι μια υποθαλάσσια, πολλές γεωργικές περιοχές θα εκτοπιστούν σε μεγαλύτερα υψόμετρα και η πρόσβαση σε πόσιμο νερό θα γίνει πολύ δύσκολη για ένα μεγάλο μέρος του πληθυσμού. Τέτοιες συνέπειες μπορεί να απειλήσουν την επιβίωση ολόκληρων λαών.



Εικόνα 1.3.2: Μεταβολές στην θερμοκρασία της Γης τα τελευταία 140 χρόνια και τα τελευταία 1000 χρόνια

World Carbon Dioxide Emissions by Region, Reference Case, 1990-2030



Εικόνα 1.3.3 : Παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε εκατομμύρια μετρικούς τόνους ανά περιοχή-κράτος, με πρόβλεψη ως το 2030

- **Επικίνδυνοι ρυπαντές του ατμοσφαιρικού αέρα**
- **Κακή ποιότητα του περιβάλλοντα αέρα**
- **Μόλυνση του νερού και της θαλάσσιας ζωής**
- **Προβλήματα στην καλλιεργήσιμη γη**
- **Καθιζήσεις εδάφους**
- **Ραδιενέργεια και ακτινοβολία**
- **Απαλλαγή των στερεών αποβλήτων**

Τα σημαντικότερα από τα παραπάνω είναι η παγκόσμια κλιματική αλλαγή, η όξινη βροχή και η καταστροφή του όζοντος.

Γίνεται αντιληπτό δηλαδή ότι η ενέργεια, το περιβάλλον και η συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας συνδέονται μεταξύ τους. Μία κοινωνία για να διατηρήσει την ανάπτυξή της πρέπει να χρησιμοποιεί ενέργεια που δεν έχει επιπτώσεις στο

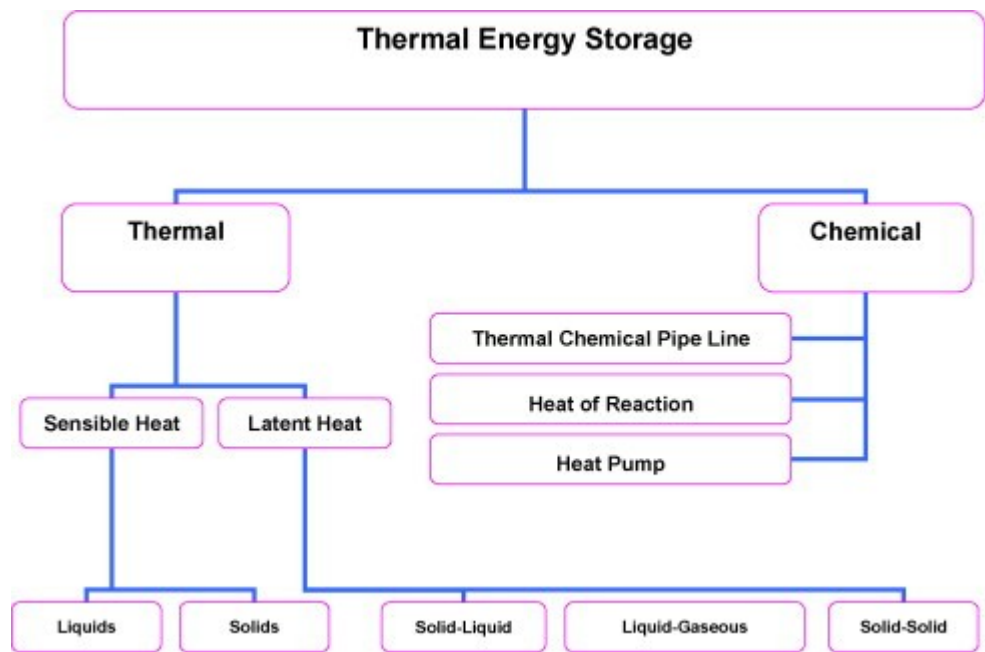
περιβάλλον (παρ. καθόλου εκπομπές ή εκπομπές που δεν επηρεάζουν αρνητικά το περιβάλλον). Παρολαυτά αφού όλες οι ενεργειακές πηγές οδηγούν σε κάποιες επιπτώσεις για το περιβάλλον, είναι εύλογο να υποθέτουμε ότι κάποια από τα προβλήματα (όχι όλα) που παρουσιάζονται μπορούν να ξεπεραστούν αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσης της παραγωγής ενέργειας. Ένας ισχυρός δεσμός υπάρχει μεταξύ του βαθμού απόδοσης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αφού , για τις ίδιες υπηρεσίες ή προϊόντα , γίνεται χρήση λιγότερων ενεργειακών πόρων και επομένως έχουμε λιγότερες εκπομπές.

Η ενέργεια είναι με πολλούς τρόπους το «καύσιμο» της οικονομίας. Χωρίς τις ενεργειακές πηγές , οι κοινωνίες μας δεν θα μπορούσαν να λειτουργήσουν και θα κατέρρεαν. Η επίδραση που έχει η διακοπή ρεύματος σε μία πόλη μόνο για ένα εικοσιτετράωρο δείχνει πόσο πολύ είμαστε εξαρτημένοι από την ενέργεια. Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές οι ανελκυστήρες παύουν να λειτουργούν , τα νοσοκομεία προσφέρουν μόνο την βασική φροντίδα και τα φώτα σβήνουν.

Ο μέσος όρος αύξησης του πληθυσμού ανά τον κόσμο είναι 2% . Καθώς ο πληθυσμός αυξάνεται η ανάγκη για όλο και περισσότερη ενέργεια είναι αναπόφευκτη. Ακόμη και η άνοδος του βιοτικού επιπέδου συμβαδίζει με την ανάγκη για περισσότερη ενέργεια. Σήμερα υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά ανάμεσα στους πληθυσμούς των χωρών όσον αφορά τον πλούτο και την χρήση ενέργειας. Οι πλούσιες βιομηχανοποιημένες χώρες που εκπροσωπούν το 25% του παγκόσμιου πληθυσμού , καταναλώνουν περίπου το 75% της συνολικής διαθέσιμης ενέργειας.

Ο πληθυσμός της γης αναμένεται να διπλασιαστεί στα μέσα του 21^{ου} αιώνα και η οικονομική ανάπτυξη σίγουρα θα συνεχίσει να μεγαλώνει. Η παγκόσμια ζήτηση για ενεργειακές υπηρεσίες αναμένεται να αυξηθεί κατά μία τάξη μεγέθους μέχρι το 2050 , ενώ η ενεργειακή ζήτηση αναμένεται να αυξηθεί 1,5-3 φορές. Ταυτόχρονα ο προβληματισμός για τις επιπτώσεις της ενέργειας στο περιβάλλον θα συνεχίσει να αυξάνεται εξαιτίας των παγκόσμιων κλιματολογικών αλλαγών.

Ο περιβαλλοντικός προβληματισμός έχει κατακλίσει την κοινωνία και τις βιομηχανίες τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Μια προτεινόμενη λύση στο πρόβλημα της έλλειψης των ενεργειακών αποθεμάτων είναι η χρήση τεχνολογιών θερμικής αποθήκευσης ενέργειας.



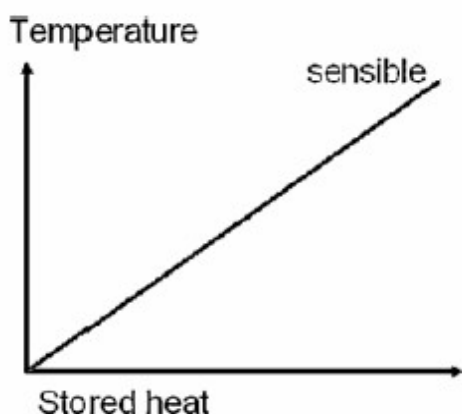
Εικόνα 1.3.4: Διαφορετικά είδη θερμικής αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας [62]

Κεφάλαιο 2

Αρχές θερμοδυναμικής

2.1 Αποθήκευση θερμότητας ως αισθητή θερμότητα

Βασικό κριτήριο ταξινόμησης των υλικών αποτελεί ο μηχανισμός αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο υλικό. Υπάρχουν τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή αισθητής θερμότητας σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης τους.[5] Κύριο χαρακτηριστικό για την θερμική συμπεριφορά τους είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή όγκο. Στην περίπτωση αυτή αποθήκευση θερμότητας συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.1.1 : Αποθήκευση θερμότητας ως Αισθητή θερμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Η αύξηση θερμοκρασίας μπορεί να ανιχνευθεί από έναν αισθητήρα και η θερμότητα που αποθηκεύεται ονομάζεται αισθητή θερμότητα. Η αποθήκευση θερμότητας υπό μορφή αισθητής θερμότητας γίνεται κατά κύριο λόγο σε στερεά δομικά στοιχεία, όπως τούβλο, πέτρα κλπ καθώς επίσης και σε υγρά, όπως το νερό. Τα αέρια λόγω της χαμηλής θερμοχωρητικότητάς τους δεν χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αισθητής θερμότητας.

2.2 Αποθήκευση θερμότητας ως λανθάνουσα θερμότητα

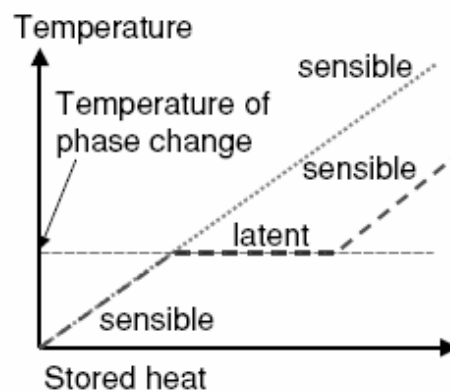
Κάποια υλικά αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας σε ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης τους ενώ στο υπόλοιπο τμήμα συναλλάσσουν θερμότητα με τη μορφή αισθητής θερμότητας.[5] Χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται για την αλλαγή φάσης. Στην περίπτωση αυτή διακρίνουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

1) Εξάτμιση του υλικού που αποθηκεύεται η θερμότητα. Η εξάτμιση είναι μια αλλαγή φάσης με μεγάλη μεταβολή του ενθαλπικού περιεχομένου του υπό εξάτμιση υλικού, ωστόσο η διαδικασία της εξάτμισης είναι αναγκαίο να γίνεται σε καθορισμένες συνθήκες, οι οποίες είναι :

- *Σταθερός όγκος* : η εξάτμιση συνοδεύεται από αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης στον όγκο που εξατμίζεται, κάτι που τεχνικά δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί.
- *Σταθερή πίεση σε κλειστά Θ/Δ συστήματα* : που προκαλεί αύξηση του όγκου, γεγονός που επίσης δεν είναι τεχνολογικά επιτεύξιμο.
- *Σταθερή πίεση σε ανοιχτά Θ/Δ συστήματα* : καθώς το υλικό φορτίζεται θερμικά προκειμένου να εξατμιστεί, εξατμίζεται και διαφεύγει στο περιβάλλον. Ο μόνος τρόπος για να αποφορτιστεί το υλικό είναι να επανασυλλεγεί από το περιβάλλον. Το μόνο υλικό που είναι δυνατόν να συλλεγεί από το περιβάλλον είναι το νερό.

2) Αλλαγές φάσης μεταξύ στερεού και υγρού (τήξη). Η τήξη είναι επίσης μια αλλαγή φάσης με μεγάλη μεταβολή του ενθαλπικού περιεχομένου του υπό τήξη υλικού. Η τήξη χαρακτηρίζεται από μικρή αλλαγή του όγκου του υλικού, που συνήθως υπολογίζεται στο 10 % του αρχικού όγκου. Αν το υλικό το οποίο τήκεται τοποθετηθεί σε ένα χώρο, τότε λόγω της τήξης η αλλαγή της πίεσης του υγρού δεν αλλάζει σημαντικά. Έτσι η στερεοποίηση και η τήξη γίνονται υπό σταθερή θερμοκρασία. Οι αλλαγές φάσεων μεταξύ υγρού και στερεού έχουν πολλές τεχνικές εφαρμογές.

3) Αλλαγές φάσης μεταξύ στερεού και στερεού. Οι αλλαγές φάσης στερεού – στερεού παρουσιάζουν ομοιότητες σε σχέση με αυτές των στερεών και υγρών, αλλά συνήθως δεν συνοδεύονται από αλλαγές της ενθαλπίας του υλικού. Κατά τη διάρκεια της τήξης, θερμότητα μεταφέρεται στο υλικό και η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στη θερμοκρασία τήξης. Αν η ενθαλπία τήξης έχει μεταφερθεί στο υλικό, τότε η τήξη έχει ολοκληρωθεί και περαιτέρω πρόσδοση θερμότητας εκλαμβάνεται πλέον σαν ποσό αισθητής θερμότητας. Το ποσό της θερμότητας που απορροφάται κατά την τήξη δεν είναι δυνατόν να ανιχνευθεί μέσω της θερμοκρασίας και η θερμότητα που αποθηκεύεται λέγεται λανθάνουσα θερμότητα. Τα υλικά τα οποία αλλάζουν φάση στερεού – υγρού και χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ζέστης ή κρύου, λέγονται Υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ή P.C.M..



Εικόνα 2.2.1 : Αποθήκευση θερμότητας ως Λανθάνουσα θερμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας

Κεφάλαιο 3

Μηχανισμοί Μετάδοσης Θερμότητας [101]

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 :

- ◆ Αγωγή
- ◆ Συναγωγή
- ◆ Ακτινοβολία

3.1 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.

$$q_k \approx A * dT/dx \quad (3.1.1)$$

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 θερμοκή αγωγιμότητα, που είναι μία φυσική ιδιότητα του μέσου.

Για αγωγή μέσω ενός ομογενούς μέσου, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι:

$$q_k = -k * A * dT/dx \quad (3.1.2)$$

Το σύμβολο « - » είναι συνέπεια του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, που απαιτεί η θερμότητα να ρέει από την υψηλότερη στην χαμηλότερη θερμοκρασία.

Δηλαδή η παράγωγος της θερμοκρασίας θα είναι αρνητική αν η θερμοκρασία ελαττώνεται όταν οι τιμές του x αυξάνονται. Έτσι πρέπει να βάλουμε « - » αν

θερμότητα μεταφέρεται προς τα θετικά του x στο δεξιό μέλος της εξίσωσης. Η παραπάνω εξίσωση ορίζει την θερμική αγωγιμότητα και είναι ο νόμος του Fourier για την αγωγή.

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 μετράται σε τετραγωνικά μέτρα (m^2), η θερμοκρασία σε Kelvin (K) , η απόσταση x σε μέτρα (m) και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας σε Watt(W). Έτσι οι μονάδες της θερμικής αγωγιμότητας είναι w/mK . Στο Βρετανικό σύστημα το οποίο 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 $Btu/(hr \cdot ft \cdot ^{\circ}F)$.

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

$$K \equiv (q_k/A) / |dT/dx| \quad (3.1.3)$$

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.

Προκύπτει ότι 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.

3.1.1 Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα 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 μέσω 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 εξαρτάται 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.

3.1.2 Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα 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.

3.1.3 Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα 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:

- ◆ Κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων
- ◆ 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.

3.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Συναγωγή είναι ο τρόπος μεταφοράς της ενέργειας μεταξύ μίας στερεάς επιφάνειας και του γειτονικού υγρού ή αερίου 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 :

- μεταφορά ενέργειας εξαιτίας της μοριακής κίνησης (αγωγή)
- 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.

Υποθέτουμε ότι έχουμε 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 (3.1.2).

Εν τούτοις η θερμοκρασιακή διαφορά στην επιφάνεια εξαρτάται από τον ρυθμό με τον οποίο οι μακροσκοπικές και οι 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 τις 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 :

$$q_c = h_c * A * \Delta T \quad (3.2.1)$$

όπου:

q_c = Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, Watt (ή Btu/hr)

A = Επιφάνεια συναλλαγής, m^2 (ή ft^2)

$\Delta T =$ Θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας της πλάκας θερμοκρασίας T_s και του ρευστού θερμοκρασίας T_∞ (μακριά από την επιφάνεια) , K (ή °F)

$h_c =$ Μέσος συντελεστής συναγωγής στην επιφάνεια A , W/m²K

Η σχέση (3.2.1) 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_c 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 τις 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 :

$$dq_c = h_c * dA * (T_s - T_\infty) \quad (3.2.2)$$

Ενώ για τον μέσο συντελεστή h_c :

$$h_c = (1/A) \iint h_c * dA \quad (3.2.3)$$

3.3 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-X , 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.

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_f που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{emit,max} = \sigma * A_1 * T_1^4 \quad (3.3.1)$$

$Q_{emit,max}$ = ρυθμός που εκπέμπεται σε Watt

A = επιφάνεια σε m^2

T_1^4 = Θερμοκρασία στην επιφάνεια σε K

σ = σταθερά «Stefan-Boltzman», με τιμή $5,67 * 10^{-8} \text{ W}/(\text{M}^2 * \text{K}^4)$

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:

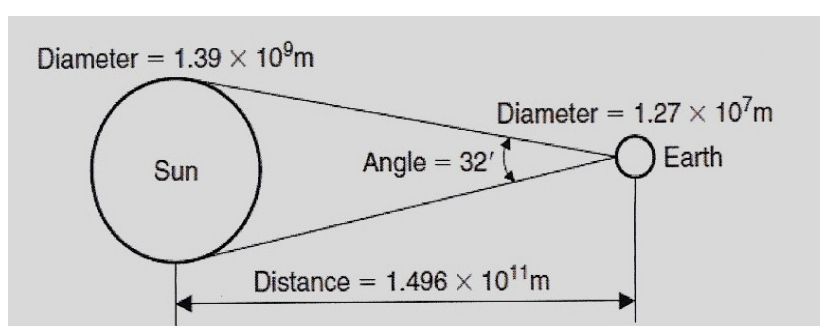
$$Q_{emit,max} = \varepsilon * \sigma * A_1 * T_1^4 \quad (3.3.2)$$

Κεφάλαιο 4

Ηλιακή ακτινοβολία

4.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Η τροχιά της γης περί τον ήλιο είναι τέτοια ώστε η μεταξύ τους απόσταση να μεταβάλλεται κατά $\pm 1,7\%$ περί τη μέση απόσταση ηλίου-γης η οποία είναι $1,495 \cdot 10^{11} \text{m}$.[104] Ηλιακή σταθερά είναι η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο η μονάδα επιφάνειας κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας ,όταν η απόσταση γης-ηλίου λαμβάνει τη μέση τιμή της. Η τιμή της ηλιακής σταθεράς είναι $G_{sc}=1353 \text{ W/m}^2$.



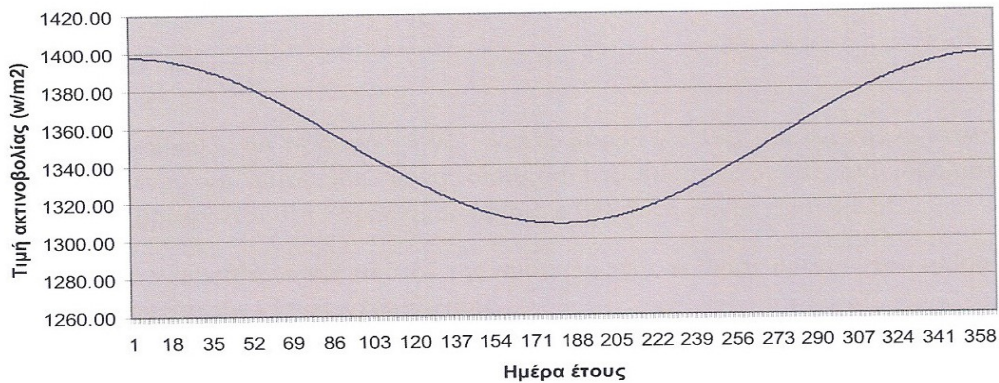
Εικόνα 4.1.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γης-ήλιου

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

$$G_{on} = G_{sc} [1 + 0,033 \cos(360n/365)] \quad (4.1.1)$$

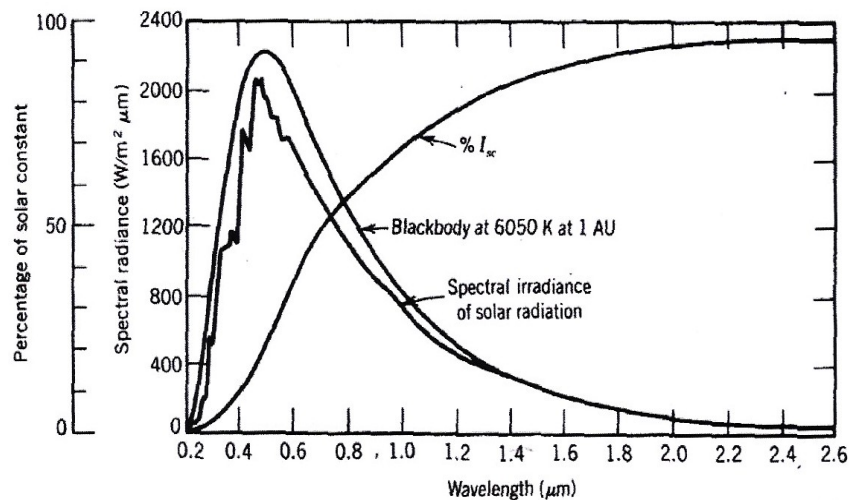
όπου $n=1 \div 365$ είναι η ημέρα του έτους. Η παραπάνω σχέση δίνεται και σε μορφή διαγράμματος για ένα ολόκληρο έτος.

Ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας



Εικόνα 4.1.2: Μεταβολή της ακτινοβολίας εκτος ατμόσφαιρας συναρτήσεϊ των ημερών του έτους

Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας κατα τη μέση απόσταση γης-ηλίου. Η υπεριώδης, η ορατή και η υπέρυθη ακτινοβολία αντιστοιχούν στις περιοχές μηκών 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 95W/m^2 , 640W/m^2 και 618W/m^2 .



Εικόνα 4.1.3: Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας.

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

Ηλιακό ύψος $90^\circ - \theta_z$ είναι η γωνία που σχηματίζεται 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 τη νότια κατευθυνση. Είναι

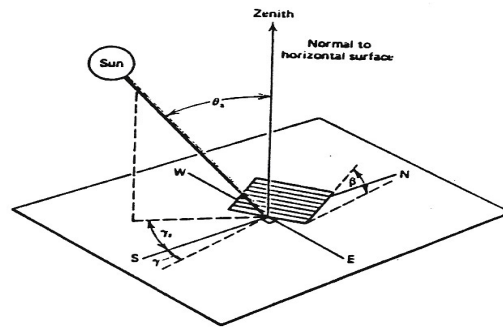
$-180^{\circ} \leq \gamma \leq 180^{\circ}$ με $\gamma=0$ στο νότο, $\gamma=90^{\circ}$ στη δύση, $\gamma=180^{\circ}$ στο βορρα, $\gamma=-90^{\circ}$ στην ανατολή.

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 $0^{\circ} \leq \beta \leq 180^{\circ}$. Για το οριζόντιο επίπεδο είναι $\beta=0^{\circ}$. Για $\beta > 90^{\circ}$ το επίπεδο βλέπει προς τα κάτω. Προκειμένου να επιτευχθεί μεγιστοποίηση της ετήσιας προσπίπτουσας ακτινοβολίας θα πρέπει $\beta = \varphi$. Για μεγιστοποίηση της χειμερινής προσπίπτουσας ακτινοβολίας απαιτείται κλίση $\beta = \varphi + 15^{\circ}$ ενώ για μεγιστοποίηση της θερινής $\beta = \varphi - 15^{\circ}$.

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

$$\text{ηλιακός χρόνος} = t_{\text{ρολ}} \pm 4 (L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E \quad (4.1.2)$$



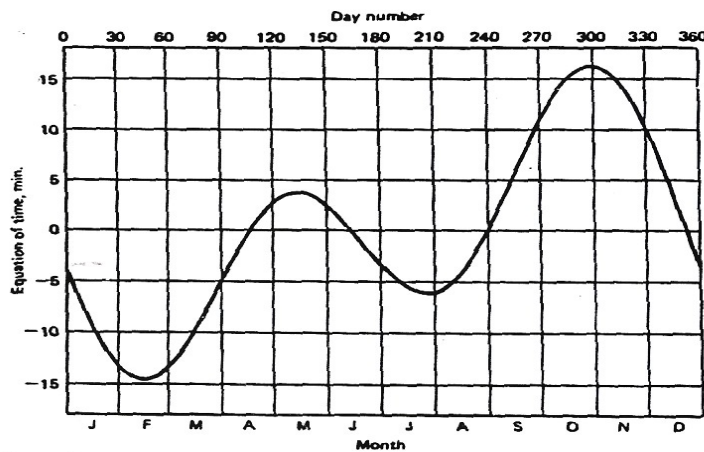
Εικόνα 4.1.4: Γωνία ζενίθ, ηλιακό ύψος, αζιμούθιο επιφάνειας, αζιμούθιο ηλίου και κλίση επιπέδου

Όπου:

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

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (4.1.3)$$

$$B = 360(n-81)/364 \quad (4.1.4)$$



Εικόνα 4.1.5: Η εξίσωση του χρόνου, E, συναρτήσει της ημέρας του έτους

Ωριαία γωνία είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γής περί τον άξονα της με ρυθμό $15^\circ/h$ ή διαφορετικά $0,25^\circ/min$. Μετά μεσημβρίας λαμβάνεται $\omega > 0$ ενώ προ μεσημβρίας λαμβάνεται $\omega < 0$. Ισχύει λοιπόν η παρακάτω σχέση:

$$\omega = 0,25 * (\text{min από ηλιακό μεσημέρι}) \quad (4.1.5)$$

Ηλιακή απόκλιση δ είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του Ισημερινού. Η σχέση που περιγράφει την ηλιακή απόκλιση είναι η ακόλουθη:

$$\delta = 23.45 \sin[360(284+n)/365] \quad (4.1.6)$$

όπου όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω n είναι η μέρα του έτους.

Άμεσος ακτινοβολία είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη κατ'ευθείαν από τον ήλιο χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Η στιγμιαία τιμή (σε W/m^2) της άμεσου ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με G_b ενώ η στιγμιαία τιμή (σε W/m^2) της άμεσου ακτινοβολίας που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο με G_{bt} . Για χρονική περίοδο μιας ώρας ή μιας ημέρας αντί του συμβόλου G χρησιμοποιείται το I και H αντιστοίχως (π.χ. I_b, I_{bt}, H_b, H_{bt} σε J/m^2)

Διάχυτος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγές κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα. Ο συμβολισμός είναι ίδιος όπως και στην άμεσο ακτινοβολία αλλά με δείκτη d αντί για b .

Τέλος, ολική ακτινοβολία είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συμπεριλαμβανομένης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από παρακείμενες επιφάνειες.

Ακτινοβολία καθέτου επιπέδου ή κάθετος ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που δέχεται ένα επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες. Δηλώνεται με τον δείκτη n . Για παράδειγμα G_{bn} είναι η άμεσος ακτινοβολία καθέτου επιπέδου και G_{on} είναι η

ακτινοβολία καθέτου επιπέδου εκτός ατμόσφαιρας .Ο δείκτης δ δηλώνει ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας.

4.2 Γωνία πρόσπτωσης

Γωνία πρόσπτωσης θ της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτίνων και της καθέτου στην επιφάνεια. Η γωνία πρόσπτωσης θ υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \quad (4.2.1)$$

όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος ($-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$) του τόπου (π.χ. για την Αθήνα $\varphi=37.97^\circ$ C).

Για κατακόρυφες επιφάνειες η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\cos\theta = -\sin\delta \cos\varphi \cos\gamma + \cos\delta \sin\varphi \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\gamma \sin\omega \quad (4.2.2)$$

ενώ για οριζόντιες επιφάνειες ($\beta=0^\circ$) η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με τη γωνία ζενίθ, οπότε είναι:

$$\cos\theta_z = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega \quad (4.2.3)$$

Για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο και είναι εστραμμένες προς νότο ($\gamma=0^\circ$) ισχύει ότι:

$$\cos\theta = \sin\delta \sin(\varphi-\beta) - \cos\delta \cos(\varphi-\beta) \cos\omega \quad (4.2.4)$$

Για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο νότιο ημισφαίριο και είναι εστραμμένες προς βορρά ($\gamma=180^\circ$) ισχύει ότι:

$$\cos\theta = \sin\delta \sin(\varphi+\beta) - \cos\delta \cos(\varphi+\beta) \cos\omega \quad (4.2.5)$$

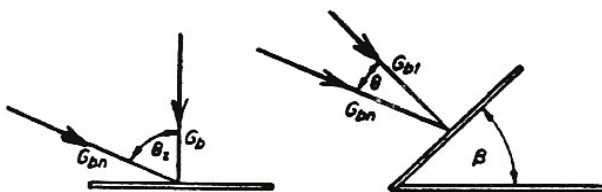
Η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου, ω_s , υπολογίζεται για $\theta_z=90^\circ$ σύμφωνα με τον τύπο που ακολουθεί:

$$\cos \omega_s = -\sin\varphi \sin\delta / \cos\varphi \cos\delta = -\tan\varphi \tan\delta \quad (4.2.6)$$

και στην συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η διάρκεια της ημέρας σε ώρες σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$N = (2/15) * \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (4.2.7)$$

4.3 Ακτινοβολία οριζόντιας και κεκλιμένης επιφάνειας



Εικόνα 4.3.1-Άμεσος ακτινοβολία οριζόντιας και κεκλιμένης επιφάνειας

Όπως φαίνεται και στο σχήμα ισχύει:

$$G_b = G_{bn} \cos \theta_z \quad (4.3.1)$$

$$G_{bt} = G_{bn} \cos \theta \quad (4.3.2)$$

όπου G_b , G_{bt} και G_{bn} είναι η άμεσος ακτινοβολία που δέχεται το οριζόντιο, το κεκλιμένο και το κάθετο επίπεδο στις ηλιακές ακτίνες αντιστοίχως. Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ο λόγος R_b , της άμεσος ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο οριζοντίου επιπέδου:

$$R_b = G_{bt} / G_b = \cos \theta / \cos \theta_z \quad (4.3.3)$$

Για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο και είναι στραμμένες προς νότο ($\gamma = 0^\circ$) ισχύει ότι:

$$R_b = [\sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega] / [\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega] \quad (4.3.4)$$

Η τιμή του λόγου R_b απαιτείται για τον υπολογισμό της άμεσος ακτινοβολίας κεκλιμένης επιφάνειας G_{bt} , όταν είναι γνωστή η άμεσος ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας G_b .

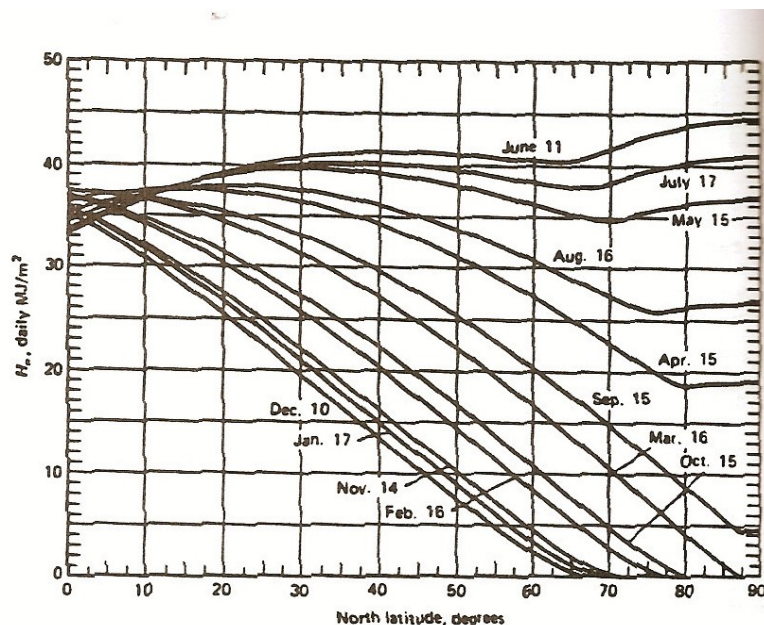
4.4 Ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας

Η ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$G_o = G_{sc} [1 + 0.033 \cos(360 n/365)] * [\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega] \quad (4.4.1)$$

Ολοκλήρωση αυτής της σχέσης για χρονική περίοδο μίας ώρας, δίνει την ωριαία ενέργεια, I_o που δέχεται οριζόντια επιφάνεια εκτός ατμόσφαιρας. Αντίστοιχα μπορεί να υπολογιστεί και η ημερήσια ενέργεια που δέχεται οριζόντια επιφάνεια εκτός ατμόσφαιρας, H_o , αν αλλάξουν τα όρια ολοκλήρωσης από μία ώρα στις ωριαίες γωνίες ανατολής και δύσης του ηλίου (δηλαδή από $-\omega_s$ σε ω_s). Η μηνιαίως μέση τιμή ημέρας H_o είναι ένα χρήσιμο μέγεθος για διάφορες εκτιμήσεις και υπολογίζεται

θέτοντας στην εξίσωση της ημερήσιας ενέργειας τα n και δ της ημέρας του αντίστοιχου μήνα.



Εικόνα 4.4.1-Ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας κατά τη μέση ημέρα καθε μην, συναρτήσεσι του γεωγραφικού πλάτους για το Βορειο ημισφαίριο

4.5 Εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

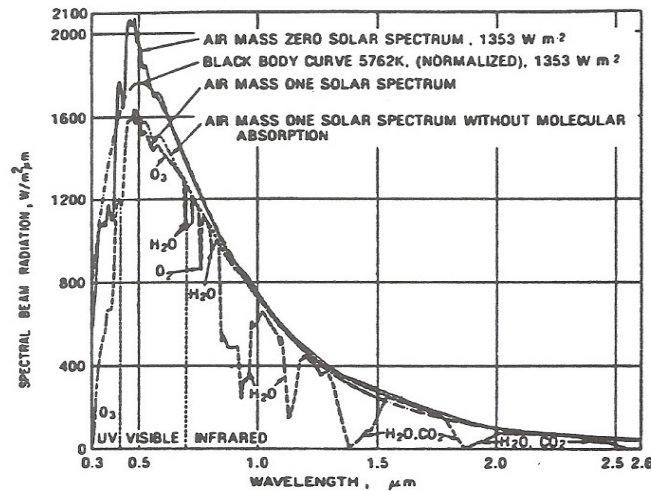
Η ηλιακή ακτινοβολία κατά την διέλευσή της στην ατμόσφαιρα υπόκειται σε εξασθένηση αφ' ενός λόγω διασκορπισμού από τα μόρια του αέρα, των υδρατμών και της σκόνης και αφ'ετέρου λόγω της απορρόφησης από το όζον (O_3), το νερό (H_2O) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Από το διασκορπισμό αυτό προκύπτει η διάχυτη ακτινοβολία. Η απορρόφηση δε γίνεται ομοιόμορφα αλλά εκλεκτικά κατά ζώνες του φάσματος.

Οι ακτίνες χ και άλλες πολύ μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίες απορροφώνται στην ιονόσφαιρα από το άζωτο (N_2), το οξυγόνο και τα άλλα ατμοσφαιρικά συστατικά.

Η απορρόφηση από το όζον (O_3) συμβαίνει στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος ως εξής: Γίνεται σχεδόν ολική απορρόφηση για μήκη κύματος $\lambda < 0.29 \mu m$ στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Αυξανόμενου του μήκους κύματος από $0.29 \mu m$ μέχρι $0.35 \mu m$ η απορρόφηση ελαττώνεται και για $\lambda > 0.35 \mu m$ δεν υπάρχει απορρόφηση από το όζον πλην μιας ζώνης περί το μήκος κύματος $\lambda = 0.6 \mu m$. Η απορρόφηση από το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα συμβαίνει στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος κατά ζώνες. Ισχυρή απορρόφηση από το νερό γίνεται στις ζώνες περί τα μήκη κύματος $\lambda = 1.0 \mu m$, $1.4 \mu m$ και $1.8 \mu m$. Για $\lambda > 2.3 \mu m$ λόγω απορρόφησης από το H_2O και το CO_2 , η ακτινοβολία που φθάνει τελικά στο έδαφος είναι ελάχιστη.

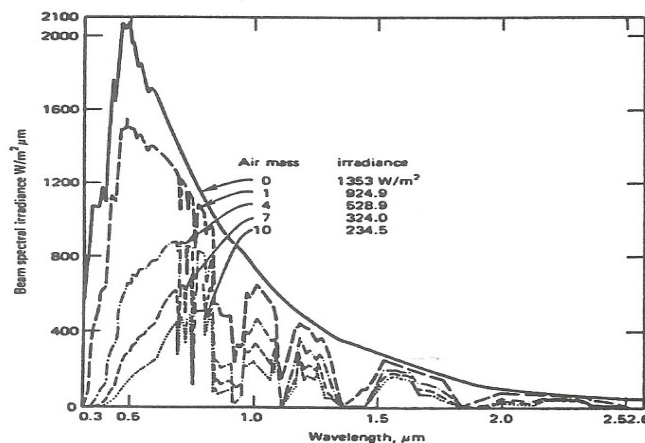
Η ηλιακή ακτινοβολία εξασθενεί σημαντικά όσο αυξάνεται η διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα. Είναι χαρακτηριστικό ότι ενώ εκτός ατμόσφαιρας είναι G_{sc}

$=1353\text{W/m}^2$ η άμεσος ακτινοβολία στο έδαφος μπορεί να φτάσει ακόμα και 234.5W/m^2 (για αέριο μάζα $m=10$). Η φασματική κατανομή της ολικής ακτινοβολίας εξαρτάται και από τη φασματική κατανομή της διάχυτης ακτινοβολίας. Μετρήσεις στην υπεριώδη και ορατή περιοχή του φάσματος δείχνουν ότι για $0.35 < \lambda < 0.8\mu\text{m}$ η κατανομή της διάχυτης ακτινοβολίας είναι παρόμοια με της ολικής αλλά με μικρή αύξηση στην περιοχή των μικρότερων μηκών κύματος. Αυτό συμβαίνει διότι περισσότερος διασκορπισμός λαμβάνει χώρα στα μικρά μήκη κύματος.



Εικόνα 4.5.1: Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκρίνονται οι καμπύλες στις εξής τριπτώσεις:

- α) Ηλιακό φάσμα εκτός ατμόσφαιρας (αέριος μάζα $m=0$), $G_{sc}=1353\text{W/m}^2$
- β) Καμπύλη μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5762K , ολ. Ισχύος 1353W/m^2
- γ) Ηλιακό φάσμα σε $m=1$ (δηλ. Στην επιφάνεια της θάλασσας με τον ήλιο στο ζενίθ)
- δ) Ηλιακό φάσμα σε $m=1$ χωρίς απορρόφηση.



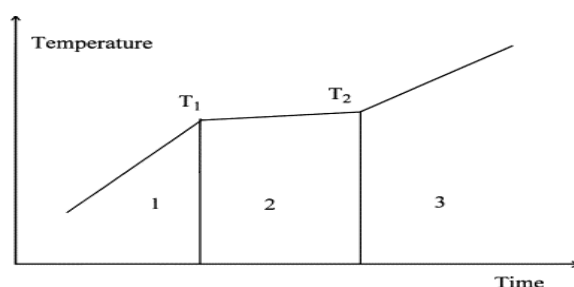
Εικόνα 4.5.2-Φασματική κατανομή της άμεσου ακτινοβολίας για διάφορες τιμές αερίου μάζας σε πολύ καθαρή ατμόσφαιρα με 20mm υδρατμών και 3.4mm O_3

Κεφάλαιο 5

Υλικά αλλαγής φάσης

5.1 Εισαγωγή στα υλικά αλλαγής φάσης

Ένα υλικό αλλαγής φάσης (PCM) είναι μια ουσία με υψηλή θερμοκρασία τήξης, που λειώνει και σταθεροποιείται σε μια ορισμένη θερμοκρασία και είναι σε θέση να αποθηκεύσει και να ελευθερώσει μεγάλα ποσά ενέργειας. Η θερμότητα απορροφάται ή απελευθερώνεται όταν αλλάζει το υλικό από στερεό σε υγρό και αντίστροφα. Τα PCMs είναι ταξινομημένα ως λανθάνουσες μονάδες αποθήκευσης θερμότητας (LHS).[6]



Εικόνα 5.1.1 : Τυπικό διάγραμμα αλλαγής φάσης ενός pcm (1- υγρή φάση , 2- διαδικασία αλλαγής φάσης , 3- υγρή φάση)

Κατά αυτόν τον τρόπο ένα υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αποθήκη θερμότητας όταν το περίσσειμα της θερμικής ενέργειας διοχετευθεί σε αυτό έτσι ώστε να τήξει και το τήγμα να διατηρηθεί χωρίς απώλειες. Όταν απαιτηθεί αυτή η θερμότητα, θα ανακτηθεί από το τήγμα σε ποσότητα ίση με τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης, οπότε το τήγμα θα πήξει. Αυτό είναι δυνατό να επαναλαμβάνεται συνέχεια.

Για παράδειγμα, η αποθηκευμένη θερμότητα ενός υλικού που μεταβαίνει από μία θερμοκρασία T_1 σε μια υψηλότερη θερμοκρασία T_2 , αν συμβαίνει και αλλαγή φάσης αυτού σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία T^* είναι το άθροισμα της αισθητής θερμότητας για τη μετάβαση της στερεάς φάσης του υλικού από τη θερμοκρασία T_1 στη θερμοκρασία T^* και της λανθάνουσας θερμότητας στη θερμοκρασία τήξης T^* και της αισθητής θερμότητας για τη μετάβαση της υγρής φάσης από θερμοκρασία T^* σε T_2 :

$$Q_s = m[(T^* - T_1) \cdot C_s + f_s + (T_2 - T^*) \cdot C_l] \quad (5.1.1)$$

όπου m , η μάζα του υλικού, C_s , C_l , είναι οι ειδικές θερμοχωρητικότητες της στερεάς και της υγρής φάσης αυτού αντίστοιχα και, f_s , είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του υλικού.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με υλικά που αλλάζουν φάση είναι η υψηλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας ανά μονάδα μάζας σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης με αισθητή θερμότητα και το μικρό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του συστήματος, αφού η διεργασία αλλαγής

φάσης γίνεται σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία.[8] Επίσης, δεν υπάρχει βαθμιαία μείωση στην θερμοκρασία καθώς το υλικό αποφορτίζεται.

Γενικά είναι δυνατές οι ακόλουθες μετατροπές στην κατάσταση ενός υλικού, κατά φθίνουσα σειρά εμπλεκόμενου ποσού λανθάνουσας θερμότητας:

- Από στερεό σε αέριο
- Από υγρό σε αέριο
- Από στερεό σε υγρό

Οι πρώτες δύο μορφές αλλαγής φάσης δε χρησιμοποιούνται καθώς το βασικό τους πρόβλημα είναι ο σχηματισμός αερίου και κατά συνέπεια η σημαντική μεταβολή όγκου η οποία κάνει περισσότερο πολύπλοκη τη λειτουργία του συστήματος (δοχεία υπό πίεση κλπ.) Για αυτό η πιο συνηθισμένη διεργασία είναι η τήξη και η πήξη του μέσου αποθήκευσης.

Τα PCM's διατίθενται σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και θερμοτήτων αλλαγής φάσης. Σε πραγματικά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας η αλλαγή της φάσης του υλικού δε γίνεται σε απόλυτα σταθερή θερμοκρασία αφού τα συστήματα αυτά δε βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα εκτός από τη λανθάνουσα θερμότητα να αποθηκεύεται στο υλικό ακόμη ένα ποσό ενέργειας με τη μορφή της αισθητής θερμότητας.

Για να χρησιμοποιηθεί ένα υλικό PCM, σαν αποθήκη ενέργειας, θα πρέπει, σε μια πρώτη προσέγγιση, να ικανοποιεί αυτό και ο χώρος στον οποίο θα γίνει η αποθήκευση, τα παρακάτω κριτήρια:

- Ικανότητα για πλήρη αντιστροφή της διαδικασίας
- Ικανή θερμοκρασία μετάβασης από τη μια φάση στην άλλη
- υψηλή ενθαλπία μετάβασης ανά μονάδα μάζας
- χημική ισορροπία και σταθερότητα με τον αποθηκευτικό χώρο
- ελάχιστη αλλαγή όγκου με την αλλαγή φάσης
- μη τοξικότητα
- χαμηλό κόστος

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή αυτής της μεθόδου αποθήκευσης είναι η μετατροπή του νερού σε πάγο. Έτσι, τα συστήματα ψύξης που εμπεριέχουν την παραγωγή και αποθήκευση πάγου έχουν ένα εξαιρετικό πλεονέκτημα όσον αφορά τις διαστάσεις των μονάδων των ψυκτικών μηχανημάτων. Αυτό είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αποθήκευσης ενέργειας, ο μικρότερος όγκος του ενεργειακού συστήματος σε σχέση με τις άλλες μεθόδους αποθήκευσης.

Αυτά τα συστήματα προσφέρουν μεγαλύτερη χωρητικότητα θερμότητας από την αποθήκευση σε υλικά με απλή άνοδο της θερμοκρασίας. Με τα συστήματα αυτά, επίσης, έχουμε τη δυνατότητα να τροφοδοτούμε θερμότητα με σταθερή θερμοκρασία. Στην αποθήκευση με τήξη χρησιμοποιούμε χημικές ενώσεις με μεγάλη θερμότητα τήξης.

5.2 Κατηγοριοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης[7],[8]

Τα υλικά αλλαγής φάσης και ειδικότερα αυτά που μεταπίπτουν από την στερεά στην υγρή φάση μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με την σύστασή τους ως εξής: σε οργανικά υλικά, ανόργανα υλικά και ευτηκτικά μίγματα. Η κατηγορία των οργανικών υλικών αντιπροσωπεύεται κυρίως από τις παραφίνες και από τα μικροκρυσταλλικά κεριά (μίγματα παραφινών με αριθμό άνθρακα από 19 έως

και 25), καθώς και από τα λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή μίγματα αυτών, ενώ των ανόργανων υλικών κυρίως από τα διαλύματα ένυδρων αλάτων. Τα ευτηκτικά μίγματα αποτελούνται από την σύνθεση δύο ή και περισσότερων συστατικών που λιώνουν και στερεοποιούνται ταυτόχρονα. Τα μίγματα αυτά μπορούν να είναι συνδυασμός οργανικού PCM- οργανικού PCM, οργανικού PCM- ανόργανου PCM και ανόργανου PCM- ανόργανου PCM.

Πλεονεκτήματα οργανικών PCMs:

- μη διαβρωτικά με τα περισσότερα υλικά
- μικρός κίνδυνος ρύπανσης του νερού
- μικρής τάξης ή καθόλου εμφάνιση του φαινομένου supercooling
- χημική και θερμική σταθερότητα
- χαμηλό κόστος αγοράς σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες PCM
- παραγωγή των υλικών σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές (σκόνη, κόκκοι, πλάκες)

Μειονεκτήματα οργανικών PCMs :

- λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης χαμηλότερη από τα μη οργανικά
- συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας χαμηλότερο από τα μη οργανικά
- αναφλέξιμα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (περίπου 200° C)
- πυκνότητα χαμηλότερη από τα μη οργανικά

Πίνακας 5.2.1 : Οργανικές ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως pcm

Compound	Melting point (° C)	Heat of fusion(kJ/kg)
Butyl stearate	19	140
Paraffin C16-C18	20-22	152
Capric – Lauric acid	21	143
Dimethyl sabacate	21	120
Polyglycol E600	22	127.2
Paraffin C13- C24	22-24	189
(34% mistiric acid+66% capric acid)	24	147.7
l- Dodecanol	26	200
Paraffin C18 (45 – 55%)	28	244
Vinyl stearate	27-29	122
Capric acid	32	152.7

Πλεονεκτήματα ανόργανων PCMs:

- Μεγαλύτερη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης
- Μη αναφλέξιμα
- Πυκνότητα υψηλότερη από τα οργανικά

Μειονεκτήματα ανόργανων PCMs:

- Διαβρωτικά(απαραίτητη αποθήκευση των υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία)
- Εμφάνιση supercooling
- Διαχωρισμός των φάσεων (μεταβλητή τιμή της διαλυτότητας με την θερμοκρασία) και δυνατή η δημιουργία ιζήματος
- Αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση
- Αρκετα μεγαλύτερο κόστος αγοράς από τα οργανικά
- Υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου αν μείνουν εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υγρασία

Πίνακας 5.2.2 : Ανόργανες ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM

Compound	Melting point(°C)	Heat of fusion (kJ/kg)
KF·4H ₂ O	18.5	231
Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25.8	125.9
CaCl ₂ ·6H ₂ O	29	190.8
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	296
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32	251

Πίνακας 5.2.3 : Σύγκριση οργανικών και ανόργανων PCM

Οργανικά PCM	Ανόργανα PCM
Πλεονεκτήματα	
Μη διαβρωτικά	Μεγαλύτερη ενθαλπία αλλαγής Φάσης
Ελάχιστη ή καθόλου υπόψυξη	
Χημική και θερμική σταθερότητα	
Μειονεκτήματα	
Χαμηλότερη ενθαλπία αλλαγής Φάσης	Υπόψυξη
Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα	Διάβρωση
Εύφλεκτα	Διαχωρισμός φάσεων
	Απομόνωση φάσεων, έλλειψη θερμικής σταθερότητας

Από τα οργανικά μίγματα οι αλκάνες θεωρούνται πολλά υποσχόμενοι υποψήφιοι για χρήση ως PCM αφού μπορούν να ενσωματωθούν σε συνήθη κατασκευαστικά υλικά αν και οι καθαρές αλκάνες δεν διατίθενται σε λογική τιμή.

Τα ένυδρα άλατα, που όπως έχει ήδη αναφερθεί ανήκουν στα ανόργανα PCM, αποτελούν πολύ ελκυστικά υλικά για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας λόγω της υψηλής ογκομετρικής πυκνότητας, χρήσιμα για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας με σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα και σε λογική τιμή συγκρινόμενα με τις παραφίνες . Συνηθισμένο ένυδρο άλας είναι το άλας του Glauber $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ το οποίο περιέχει 44% Na_2SO_4 και 56% H_2O με θερμοότητα τήξης $32,4^\circ \text{C}$ και λανθάνουσα θερμότητα 254 KJ/Kg . Η επιλογή ενός τέτοιου υλικού για pcm σε συγκεκριμένη εφαρμογή θα έπρεπε να βασίζεται στις θερμοδυναμικές , κινητικές και χημικές του ιδιότητες . Για εφαρμογές σε χαμηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 0°C έως 99°C , τα ένυδρα άλατα θα ήταν η καλύτερη επιλογή λόγω της διαθεσιμότητας τους σε μικρότερα θερμοκρασιακά εύρη με λογική ειδική θερμική ικανότητα της τάξης των $133,4 \text{ cal/deg mol}$, θερμική αγωγιμότητα $0,987 \text{ W/m K}$, πυκνότητα 1552 kg/m^3 στην στερεή κατάσταση και θερμοκρασία αλλαγής φάσης κυμαινόμενη από 35°C έως 39°C .

Οι παραφίνες είναι μίγματα, που σε θερμοκρασία δωματίου έχουν την μορφή κεριού. Χημικά είναι υδρογονάνθρακες με αλκάνες: $\text{C}_n \text{H}_{2n+2}$. Το σημείο τήξης τους αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των ατόμων του C και μάλιστα για θερμοκρασίες τήξης που κυμαίνονται από 18 έως 90°C , ο αριθμός των ατόμων ποικίλει από 16 έως 50 .

Η πλειοψηφία των οργανικών pcm που όμως δεν είναι παραφίνες είναι οξείδια. Χαρακτηρίζονται από τον χημικό τύπο $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ και το σημείο τήξης τους είναι κοντά σε αυτό των παραφινών. Το μειονέκτημά τους είναι ότι είναι τοξικά και πιο ακριβά από τις παραφίνες.

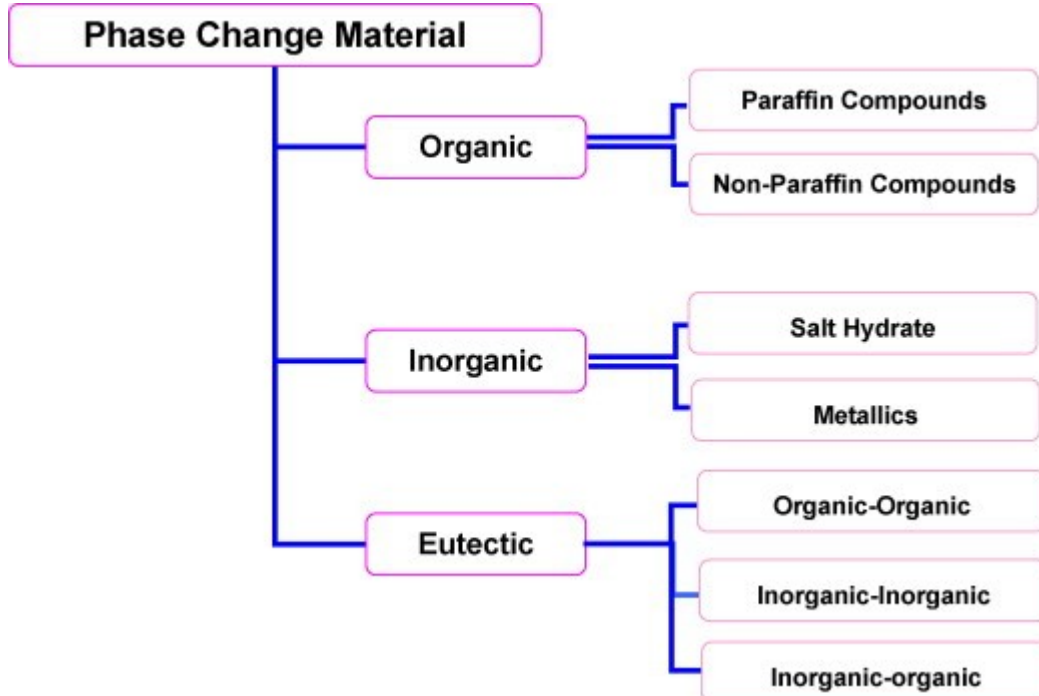
Πίνακας 5.2.4 : Ανόργανες εύτηκτες ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM

Compound	Melting temperature	Heat of fusion
66.6% $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 33.3\% \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25	127
48% $\text{CaCl}_2 + 4.3\% \text{NaCl} + 0.4\% \text{KCl} + 47.3\% \text{H}_2\text{O}$	26.8	188
47% $\text{Ca}(\text{N}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 53\% \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	136
60% $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 40\% \text{CO}(\text{NH}_2)_2$	30	200.5

Πίνακας 5.2.5 : Υλικά που έχουν μελετηθεί για τη χρήση τους σαν PCM και κάποιες από τις βασικές ιδιότητές τους.

Μίγμα	Σημείο τηξεως (C)	Θερμοτητα τηξεως (Kj/Kg)	Θερμικη αγωγιμότητα (W/mK)	Πυκνότητα (Kg/m ³)
ΑΝΟΡΓΑΝΑ				
H ₂ O	0	333	0,612 (υγρό,20 C)	998 (υγρό,20 C) 917 (στερεό ,0 C)
MgCl ₂ ·6H ₂ O	117	168.6	0.570 (υγρό,120 C) 0.694 (στερεό,90C)	1450 (υγρό,120 C) 1569 (στερεό,20C)
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	89	162.8	0.490 (υγρό,95 C) 0.611 (στερεό,37C)	1550 (υγρό,94 C) 1636 (στερεό,25C)
Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	36	146.9	0.464 (υγρό,39.9 C)	1828 (υγρό,36 C) 1937 (στερεό,24C)
CaCl ₂ ·6H ₂ O	27	190.8	0.540 (υγρό,38.7 C) 1.088 (στερεό,23C)	1562 (υγρό,32 C) 1802 (στερεό,24C)
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32	254	0.544	1485 (στερεο)
ΟΡΓΑΝΙΚΑ				
Παραφίνη	64	173,6	0,164 (υγρό,63,5C) 0,346 (στερεό,33,6C)	790 (υγρό,65 C) 916 (στερεό,24C)
Πολυγλυκόλη E400	8	99,6	0,187 (υγρό,38,6C) -	1125 (υγρό,25C) 1228 (στερεό,3C)
Πολυγλυκόλη E600	22	127.2	0.189 (υγρό,38.6C) -	1126 (υγρό,25C) 1232 (στερεό,4C)
Παραφίνη C ₁₈	28	244	0.148 (υγρό,40C) 0.358 (στερεό,25C)	0.774 (υγρό,70C) 0.814 (στερεό,20C)

ΛΙΠΑΡΑ ΟΞΕΑ				
Στεαρικό οξύ	69	202,5	0,172 (υγρό,70C)	848 (υγρό,70C) 965 (στερεό,24C)
Παλμεατικό οξύ	64	185,4	0,162 (υγρό,68,4C)	850 (υγρό,65C) 989 (στερεό,24C)
Capric acid	32	152,7	0,153 (υγρό,38,5C)	850 (υγρό,65C) 989 (στερεό,24C)
Caprylic acid	16	148,5	0,149 (υγρό,38,6C)	901 (υγρό,30C) 981 (στερεό,13C)
ΑΡΩΜΑΤΙΚΑ				
Ναφθαλίνη	80	147.7	0.132 (υγρό,83.3C) 0.341 (στερεό,49.9C)	976 (υγρό,84C) 1145 (στερεό,20C)



Εικόνα 5.2.1 : Κατηγοριοποίηση των pcm

5.3 Ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης

Η κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και η μεγάλη ενθαλπία τήξης είναι οι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να καλυφτούν από ένα P.C.M. . Εντούτοις, υπάρχουν απαιτήσεις που πρέπει να καλυφθούν για τις περισσότερες, αλλά όχι όλες τις εφαρμογές.[9] Οι βασικότερες από αυτές είναι οι ακόλουθες :

Φυσικές ιδιότητες :

- Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, ώστε να εξασφαλισθεί η αποθήκευση και στη συνέχεια η απελευθέρωση της θερμότητας σε μια εφαρμογή, με σταθερό θερμοκρασιακό εύρος.
- Μεγάλο ποσό ενθαλπίας αλλαγής φάσης (ΔH), για να επιτευχθεί υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας σε σχέση με την αποθήκευση που θα γινόταν αν είχαμε αποθήκευση ενέργειας με αισθητή θερμότητα.
- Μεγάλη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή της αποθηκευμένης θέρμανσης ή ψύξης με ικανοποιητικό ποσό θερμοροής.
- Δυνατότητα αναστρεψιμότητας των αλλαγών φάσεων, ώστε το υλικό να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές. Η σταθερότητα των κύκλων φόρτισης του υλικού στη διεθνή βιβλιογραφία καλούνται « *cycling stability* ».
- Μικρό ποσό υπόψυξης (*subcooling*), ώστε να βεβαιωθούμε ότι το υλικό τήκεται και στερεοποιείται στις ίδιες θερμοκρασίες.

Κινητικές ιδιότητες :

- Υψηλή εμπύρινη αναλογία (nucleation rate) ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο της υπόψυξης της υγρής φάσης.
- Υψηλή ταχύτητα ανάπτυξης των κρυστάλλων, ώστε το σύστημα να μπορεί να καλύπτει την ζήτηση ανακτώντας θερμότητα από το σύστημα αποθήκευσης.

Χημικές ιδιότητες:

- Χημική σταθερότητα
- Πλήρως αναστρέψιμη διαδικασία τήξης/πήξης
- Μη εμφάνιση χημικής αποσύνθεσης
- Συμβατότητα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση
- Μη δηλητηριώδη
- Μη τοξικά
- Μη αναφλέξιμα και μη εκρηκτικά

Τεχνικές ιδιότητες :

- Μικρή τιμή της πίεσης ατμών, για να μειωθούν απαιτήσεις μηχανικής αντοχής στο δοχείο που θα βρίσκεται το υλικό αλλαγής φάσης.

- Μικρή μεταβολή του όγκου κατά την αλλαγή φάσης, επίσης για να μειωθούν οι απαιτήσεις μηχανικής αντοχής στο δοχείο που θα φέρει το εν λόγω υλικό.
- Φυσική και χημική σταθερότητα του υλικού για να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Συμβατότητα με άλλα υλικά, ώστε να εξασφαλίζεται η μακροχρόνια διάρκεια ζωής του στο δοχείο, χωρίς να επηρεάζεται η δομή και η σύστασή του από τα υλικά των τοιχωμάτων του δοχείου.

Οικονομικές ιδιότητες :

- Χαμηλή τιμή πώλησης, ώστε να είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλα προϊόντα τα οποία προσφέρουν αποθήκευση θερμότητας για θέρμανση και ψύξη.
- Διαθέσιμα σε μεγάλες ποσότητες
- Ανακυκλώσιμα, επίσης για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους.

Συνήθως η επιλογή της χρήσης ενός υλικού αλλαγής φάσης γίνεται με κριτήριο την θερμοκρασία αλλαγής φάσης, την ενθαλπία και την δυνατότητα αναστρεψιμότητας του κύκλου ψύξης – τήξης. Όμως στην πλειονότητα των περιπτώσεων ένα υλικό δεν είναι δυνατόν να καλύψει όλες τις παραπάνω απαιτήσεις, διότι για παράδειγμα όταν η θερμική αγωγιμότητα είναι μικρή, τότε απαιτείται η τοποθέτηση του υλικού σε κάψουλες (encapsulation), ώστε να διευκολυνθεί η μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας. Επομένως έχουν αναπτυχθεί στρατηγικές και προσεγγίσεις οι οποίες έχουν στόχο να αντιμετωπίσουν αυτά τα προβλήματα.

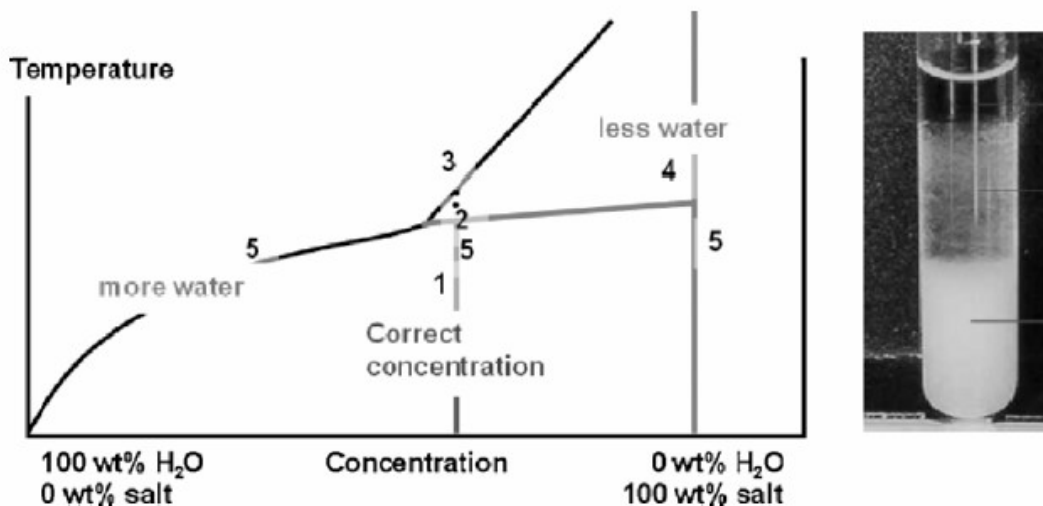
5.4 Δυσκολίες κατά την χρήση των υλικών αλλαγής φάσης

Συνήθως, κατά την επιλογή ενός υλικού, για να χρησιμοποιηθεί ως Υλικό Αλλαγής Φάσης, δεν πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις για την ενδεχόμενη χρήση του. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορες στρατηγικές προκειμένου να επιλυθούν τέτοιου είδους προβλήματα. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα από τα βασικότερα προβλήματα που εμφανίζονται σε αυτού του είδους τα υλικά.

5.4.1 Διαχωρισμός φάσεων[7],[8]

Το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσης, στη διεθνή βιβλιογραφία καλείται « phase separation » ή « semi congruent melting ». Είναι ένα από τα βασικότερα προβλήματα που εμφανίζονται στα P.C.M., ιδιαίτερα μάλιστα σε αυτά που αποτελούνται από παραπάνω από δύο συστατικά. Το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσης οφείλεται στην μεγάλη θερμοαποθηκευτική ικανότητα των ένυδρων αλάτων που είναι δύσκολο να διατηρηθεί καθώς μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης του υλικού. Κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός άνυδρων αλάτων με δημιουργία 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 εξασθένιση των ιδιοτήτων τους.

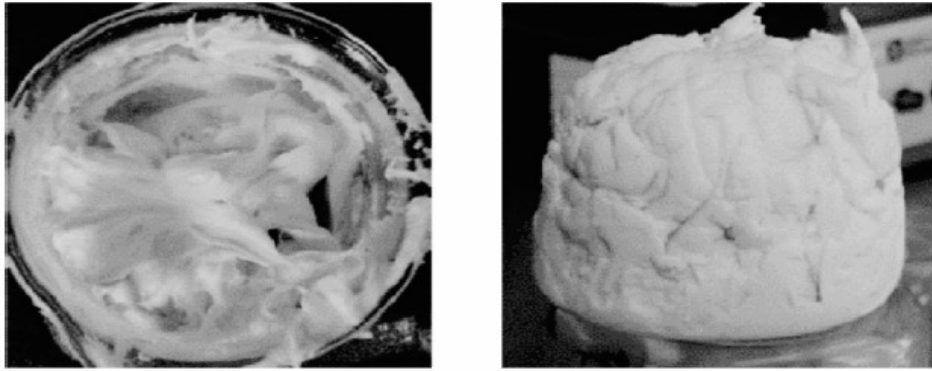
Ο ακριβής μηχανισμός του φαινομένου περιγράφεται παρακάτω με ένα παράδειγμα. Έστω ότι έχουμε ένα ένυδρο άλας αποτελούμενο από δύο συστατικά ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του ένυδρου άλατος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα .



Εικόνα 5.4.1.1 : Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων ένυδρου άλατος

Το μονοφασικό μίγμα κατάστασης 1 (στερεό) θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία στο σημείο 2. Από το σημείο 3 και πάνω, έχουμε τμήσει την *liquidus* οπότε οτιδήποτε βρίσκεται πάνω από αυτή την ευθεία είναι σε υγρή κατάσταση. Κατά τη θέρμανση ή ψύξη μεταξύ των σημείων 2 και 3, σχηματίζονται δύο φάσεις, μία υγρή και μια άλλη φάση με κάποιο μικρό ποσοστό νερού (σημείο 4). Αν αυτές οι δύο φάσεις διαφέρουν σε πυκνότητα, τότε υπάρχει περίπτωση να έχουμε μακροσκοπικό διαχωρισμό των φάσεων και συνεπώς οι δύο φάσεις θα έχουν διαφορετικές συγκεντρώσεις στη δομή του P.C.M. (σημείο 5).

Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων διαχωρισμού φάσεων χρησιμοποιούνται κολλοειδή προσθετικά (*gelling additives*), τα οποία δημιουργούν μια δομή γύρω από τις φάσεις των συστατικών του υλικού και δεν επιτρέπουν τη διέλευση φάσεων με διαφορετικές πυκνότητες διαμέσου της δομής τους. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η χρήση κολλοειδών προσθετικών σε ένυδρο άλας χλωριούχου ασβεστίου. Εναλλακτικά αν δεν χρησιμοποιηθούν προσθετικά, είναι δυνατόν να αναθερμάνουμε το μίγμα και με μοριακή διάχυση να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση.



Εικόνα 5.4.1.2 :Φαινόμενο διαχωρισμού φάσεων

5.4.2 Μικρή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας[8]

Η χαμηλή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του P.C.M. είναι μια εγγενής ιδιότητα των μη μεταλλικών υγρών. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι το P.C.M., αποθηκεύει ένα μεγάλο ποσό θερμότητας σε μικρό όγκο και αυτή η θερμότητα πρέπει να μεταφερθεί μέσω της επιφάνειας αυτού του όγκου στο εξωτερικό περιβάλλον ώστε να χρησιμοποιηθεί από το σύστημα.

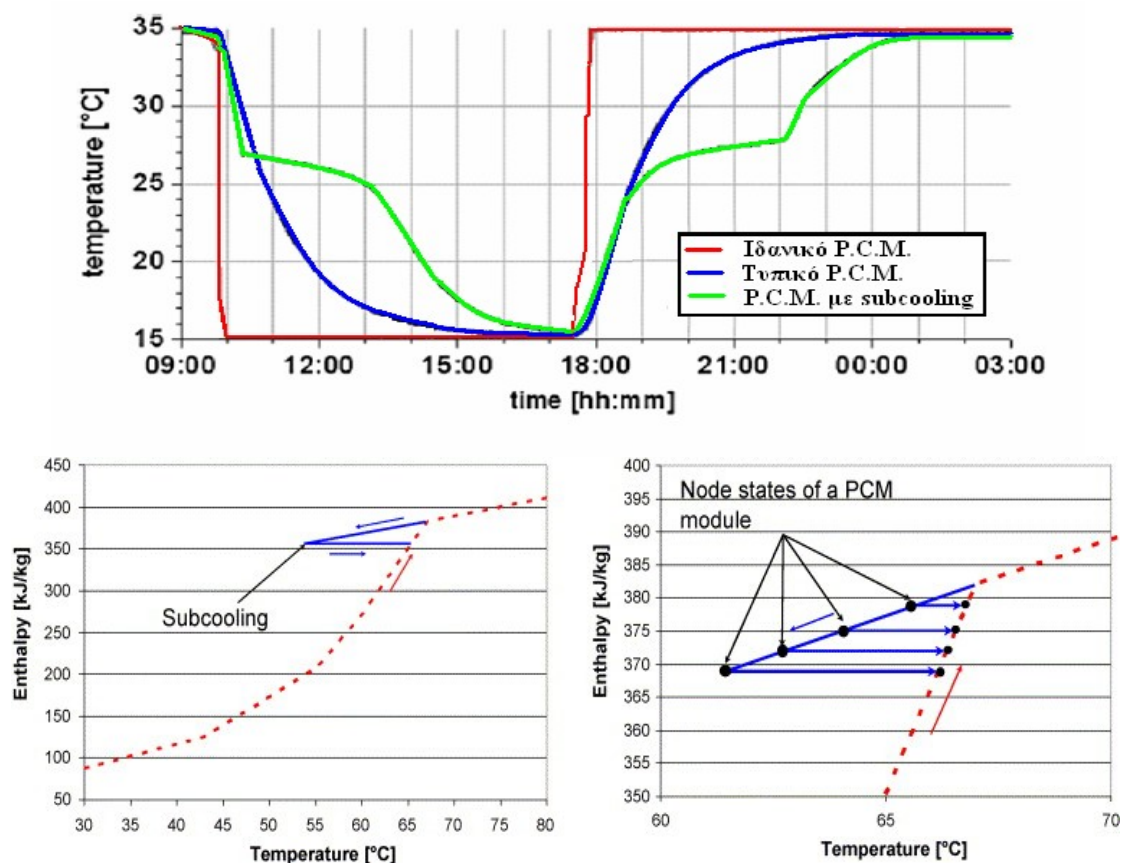
Τρόποι βελτίωσης της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού είναι οι ακόλουθοι :

- Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιώντας μεταφορά μάζας. Ο μηχανισμός της μεταφοράς εμφανίζεται μόνο κατά την υγρή φάση και επομένως ενεργεί μόνο όταν θερμότητα μεταφέρεται στο P.C.M.. Όταν η θερμότητα εξάγεται, οι στερεές μορφές σχηματίζονται στις συναλλασσόμενες με θερμότητα επιφάνειες.
- Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη των αντικειμένων με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα στο P.C.M..

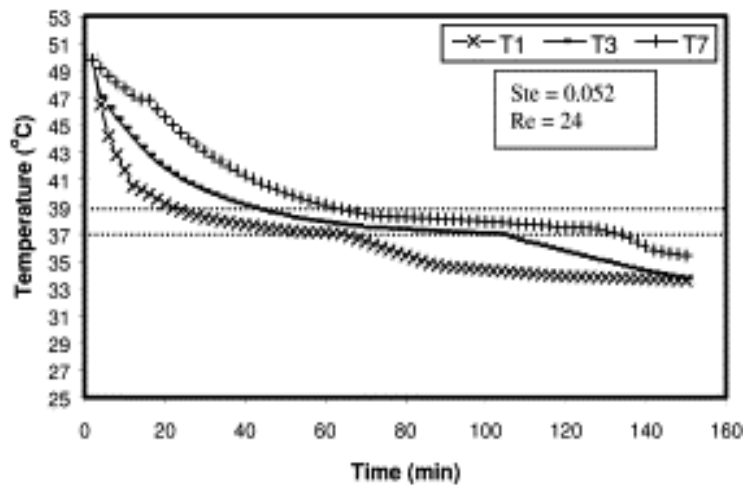
5.4.3 Υπόψυξη - Υπέρψυξη (Subcooling – Supercooling) [8]

Ένα βασικό πρόβλημα που εμφανίζεται κυρίως στα ανόργανα ένυδρα άλατα είναι το φαινόμενο της υπέρψυξης ή υπόψυξης (*supercooling or subcooling*). Ένα ιδανικό υλικό αλλαγής φάσης θα έπρεπε να στερεοποιείται και να τήκεται στην ίδια θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα . Κάποια υλικά δεν στερεοποιούνται αμέσως, εάν η θερμοκρασία του υλικού είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης, το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υπόψυξη ή υπέρψυξη. Κατά τη διάρκεια της υπόψυξης το υλικό βρίσκεται σε μια μετασταθή κατάσταση. Το φαινόμενο είναι δυνατόν να περιορισθεί με χρήση ενός πυρήνα (*nucleator*), ο οποίος προστίθεται στο P.C.M. για να εξασφαλίσει ότι η στερεή φάση θα σχηματισθεί με μηδαμινή ή ακόμα και καθόλου υπόψυξη.

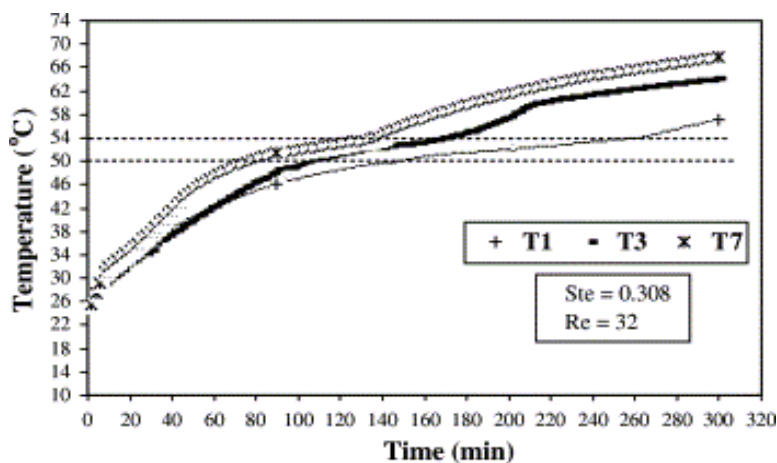
Εικόνα 5.4.3.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου στερεοποίησης και τήξης ιδανικού και τυπικού P.C.M., φαινόμενο subcooling



Εικόνα 5.4.3.2: Φαινόμενο subcooling



Εικόνα 5.4.3.3: Θερμοκρασιακές διαφοροποιήσεις κατά την διαδικασία της στερεοποίησης (Radial distance: 20mm; $T = 33^{\circ}\text{C}$).



Εικόνα 5.4.3.4: Θερμοκρασιακές διαφοροποιήσεις κατά την διαδικασία της τήξης (radial distance from HTF pipe: 17.5 mm, $T = 80^{\circ}\text{C}$)

Τα είδη των πυρήνων που μπορούν να προστεθούν είναι τα ακόλουθα :

- «Εγγενής» Πυρήνες (*Intrinsic nucleators*) : πρόκειται για ίδια συστατικά του P.C.M. , πρέπει να φυλάσσονται ξεχωριστά από το P.C.M., διότι αλλιώς υπάρχει κίνδυνος να τήξουν μαζί με αυτό και κατόπιν να είναι ανενεργά.
- «Συμβατοί» Πυρήνες (*Extrinsic nucleators*) : πρόκειται για χημικά τα οποία παρουσιάζουν όμοια δομή με αυτή των P.C.M., αυτό σημαίνει ότι έχουν παρόμοιες θερμοκρασίες τήξης με το P.C.M. που χρησιμοποιούμε. Επίσης θα πρέπει να φυλάσσονται ξεχωριστά από το P.C.M., διότι αλλιώς υπάρχει κίνδυνος να τήξουν μαζί με αυτό και κατόπιν να είναι ανενεργά

Για την αντιμετώπιση της υπόψυξης προτείνονται οι παρακάτω λύσεις, που έχουν στόχο να προωθήσουν τη διεργασία της δημιουργίας πυρήνων:

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

5.4.4 Διάβρωση[8]

Πολύ σημαντικός παράγοντας στη λειτουργία ενός ΥΑΦ είναι να μην είναι διαβρωτικό, κυρίως απέναντι σε μεταλλικά υλικά. ,δυστυχώς τα ανόργανα υλικά στην πλειοψηφία τους είναι διαβρωτικά, οι παραφίνες όμως όχι. Η διαβρωτικότητα ενός ΥΑΦ μπορεί σε συνδυασμό με τις συνεχείς εναλλαγές θερμοκρασίας και φάσης, σε βάθος χρόνου (όχι υποχρεωτικά μεγάλο) να καταστρέψει τη συσκευασία του ΥΑΦ και κατ' επέκταση το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας.

Σε πολλές θερμικές εφαρμογές με ΥΑΦ ο γραφίτης χρησιμοποιείται για την βελτίωση του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας. Παρ' όλ' αυτά ενισχύει και το φαινόμενο της οξειδωσης, όπου και όταν αυτό εμφανίζεται.

5.5 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης-μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα των μεθόδων μέτρησης ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης [9]

Ο υπολογισμός των ιδιοτήτων ενός ΥΑΦ είναι εξαιρετικής σημασίας ζήτημα για την επιλογή του κατάλληλου υλικού για κάθε εφαρμογή. Οι κυριότερες ιδιότητες του υλικού που πρέπει να εξετάζονται είναι:

- Σημείο τήξης
- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
- Λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης-στερεοποίησης
- Βαθμός supercooling
- Βαθμός διαχωρισμού των φάσεων
- Βαθμός διάβρωσης σε διάφορα «κοινά» υλικά

Οι ιδιότητες των ΥΑΦ εξετάζονται με δύο μεθόδους:

- Με μεθόδους με τις οποίες εξετάζονται οι ιδιότητες σε περιορισμένο χρονικό διάστημα και για ένα μόνο κύκλο φόρτισης του υλικού.
- Με μεθόδους με τις οποίες εξετάζονται οι ιδιότητες σε μεγάλο χρονικό διάστημα και για πολλούς κύκλους φόρτισης του υλικού.

Οι συνηθέστερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του σημείου τήξης, της λανθάνουσας θερμότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας, είναι:

- Συμβατική θερμιδομετρική μέθοδος (Conventional Calorimetry Method)
- Ψηφιακό Θερμιδόμετρο (Differential Scanning Calorimetry - DSC)

- Διαφορική θερμική ανάλυση (Differential Thermal Analysis - DTA)
- Μέθοδος T-history

Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι η ακρίβεια των μετρούμενων μεγεθών, ενώ τα μειονεκτήματα συνοψίζονται στα εξής:

- Το δείγμα που χρησιμοποιείται είναι πολύ μικρό, γεγονός που είναι αντίθετο με τη γνώση ότι ορισμένες ιδιότητες των ΥΑΦ επηρεάζονται από το μέγεθος του δείγματος ή από το αν το ΥΑΦ είναι συσκευασμένο ή όχι. Επιπλέον αν το υλικό είναι μη ομογενές είναι δύσκολη έως αδύνατη η επιλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος .
- Σε μία μέτρηση δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα πολλά δείγματα αλλά θα πρέπει να επαναλαμβάνεται το πείραμα για κάθε καινούριο δείγμα.
- Ο εξοπλισμός που απαιτείται για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και των μετρήσεων είναι πολύπλοκος και πολυδάπανος.

5.5.1 Ψηφιακό θερμιδόμετρο

Το Θερμιδόμετρο Διαφορικής Ανάλυσης (DSC) είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών των ΥΑΦ. [11]

Μπορεί να αποδώσει γραφήματα θερμορροής-θερμοκρασίας, με την παρακάτω διαδικασία: Γνωστή ποσότητα μάζας ΥΑΦ τοποθετείται σε κλειστό δοχείο με γνωστό όγκο. Αυτό το δοχείο, όπως και άλλο ένα ίδιο, άδειο, τοποθετούνται μέσα στο DSC. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται με γνωστό και σταθερό ρυθμό, μετράται πόσο περισσότερη θερμότητα απαιτεί το υπό μελέτη δοχείο ώστε να διατηρεί τη θερμοκρασία του σταθερή και ίδια με του άδειου δοχείου. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει συνεχώς, σε κάποιο σημείο θα φτάσει τη θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ. Η μετάβαση στην υγρή φάση είναι μία ενδόθερμη διαδικασία, δηλαδή απαιτείται απορρόφηση θερμότητας από το ΥΑΦ, και στο προαναφερθέν γράφημα εμφανίζεται ως τοπικό ακρότατο, δείχνοντας ότι απαιτείται πρόσθετη θερμότητα για την τήξη του υλικού, σε σύγκριση πάντα με το άδειο δοχείο.

Η στερεοποίηση του ΥΑΦ συμβαίνει όταν το υλικό ψύχεται με σταθερό ρυθμό, και εμφανίζεται επίσης σαν τοπικό ακρότατο στο παραπάνω διάγραμμα. Η στερεοποίηση είναι εξώθερμη διαδικασία.

Οι λανθάνουσες θερμότητες τήξης και στερεοποίησης προσδιορίζονται ποσοτικά από το εμβαδό του γραφήματος στα δύο ακρότατα αντίστοιχα, και το αποτέλεσμα δίνεται από τη διαίρεση του εμβαδού αυτού δια του γινομένου του ρυθμού θέρμανσης (ψύξης) επί τη μάζα του δείγματος. Η διαφορά της θερμοκρασίας στο ακρότατο με την αντίστοιχη θεωρητική θερμοκρασία αλλαγής φάσης, δίνει το βαθμό της υπέρψυξης.

Παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τις μετρήσεις της μεθόδου, είναι :

- Λανθασμένη τοποθέτηση του δείγματος στην πλατφόρμα του DSC
- Μη καθαρότητα και μη ικανή ποσότητα μάζας υλικού.

- Ρυθμός θέρμανσης. Ένας γρήγορος ρυθμός θέρμανσης μπορεί να ελαχιστοποιήσει τα λαμβανόμενα αποτελέσματα και να έχει σαν αποτέλεσμα να μην αποδοθούν σωστά οι ιδιότητες του μελετούμενου υλικού.

Ο πρωταρχικός σχεδιασμός της συσκευής αυτής δεν αναφερόταν στα ΥΑΦ. Η χρήση του ψηφιακού θερμιδομέτρου για τη θερμική ανάλυση των ΥΑΦ τίθεται υπό αμφισβήτηση γιατί κυρίως αδυνατεί να παρέξει χρήσιμες πληροφορίες για το φαινόμενο της υπέρψυξης. Η λανθάνουσα θερμότητα και το σημείο τήξης προσδιορίζονται καλύτερα με τη μέθοδο της θερμικής ανάλυσης. Με βάση την επιτυχημένη εφαρμογή των ένυδρων αλάτων σαν ΥΑΦ σε εμπορικές εφαρμογές, η αποτυχία στην επίτευξη σταθερότητας στις μετρήσεις με ψηφιακό θερμιδόμετρο, κατέστησε ύποπτη την ίδια τη μέθοδο. Στη μέθοδο του ψηφιακού θερμιδομέτρου οι θερμοκρασιακές αλλαγές είναι πολύ γρήγορες και το δείγμα πολύ μικρό, για να μπορεί να συσχετιστεί καλά με τις συνθήκες που επικρατούν στην πράξη. Επίσης, η θέση του αισθητήρα θερμοκρασίας στο ψηφιακό θερμιδόμετρο είναι επίσης θέμα προς εξέταση.

5.5.1.1 DSC με σταθερό ρυθμό ψύξης και θέρμανσης (δυναμική μέτρηση θερμοχωρητικότητας)

Γίνεται εφαρμογή θερμοκρασιακού προγράμματος σταθερού ρυθμού ψύξης ή θέρμανσης για τον υπολογισμό της ειδικής θερμοχωρητικότητας C_p . Για τις συνήθειες εφαρμογές, οι τυπικές τιμές του ρυθμού ψύξεως ή θερμάνσεως κυμαίνονται στο διάστημα 2 έως 10 $K \text{ min}^{-1}$. 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.

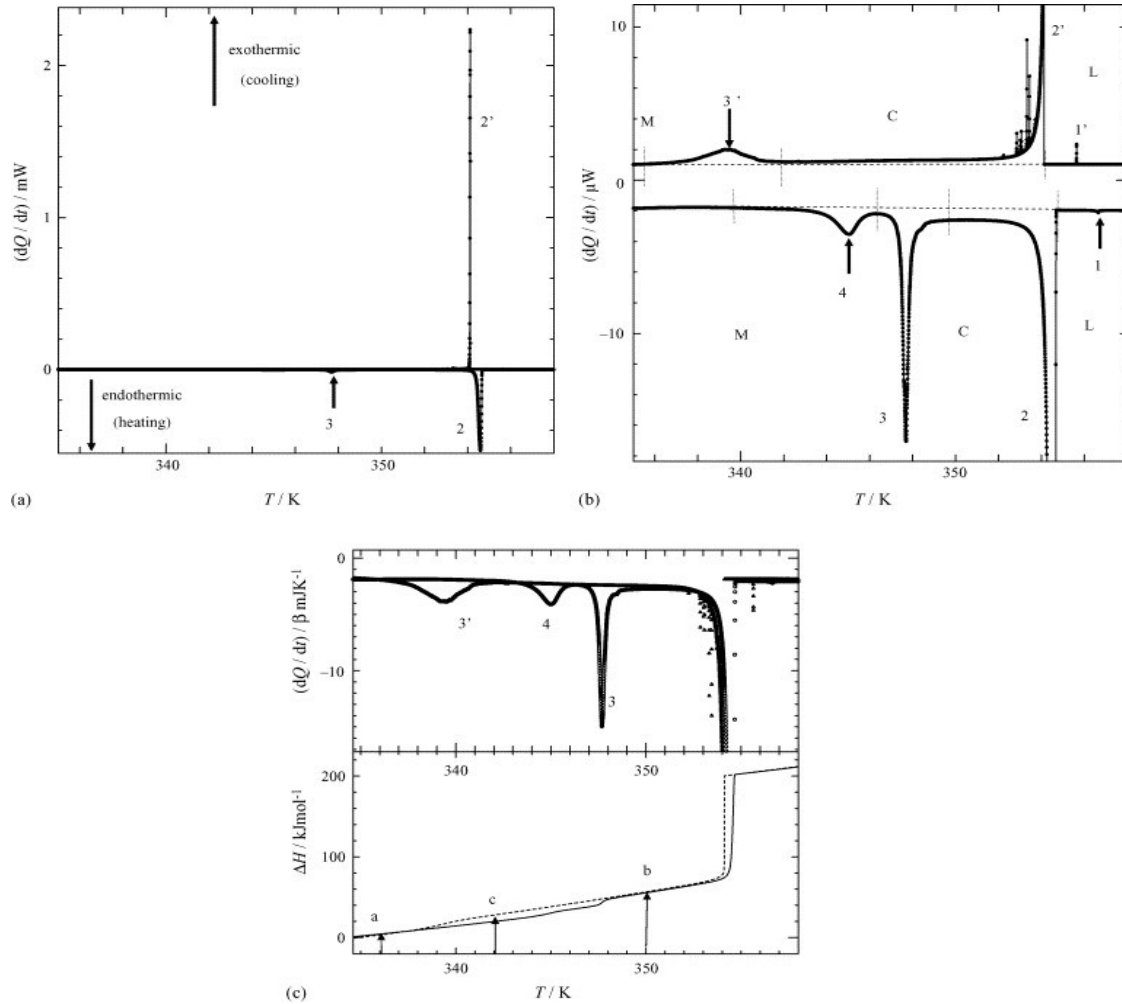
Η εφαρμογή της μεθόδου DSC σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης δεν ενδείκνυται για την μέτρηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας των PCM, γιατί κατά την αλλαγή φάσης, το δείγμα δεν βρίσκεται σε θερμική ισορροπία και έχουμε σημαντική κατανομή της θερμοκρασίας, μέσα σε αυτό. Για αυτό τον λόγο οδηγούμαστε 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.

5.5.1.2 DSC ισόθερων βημάτων (isothermal steps mode)

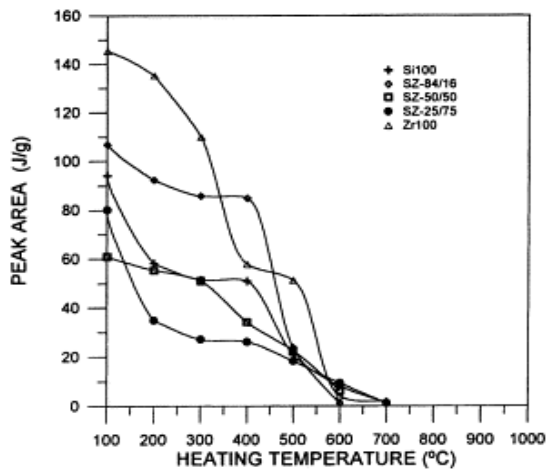
Στην περίπτωση αυτή το δείγμα θερμαίνεται βηματικά ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το δείγμα ακολουθεί τα βήματα με κάποια χρονική υστέρηση και έτσι παράγεται το σήμα εξόδου. Όταν θα φτάσει το δείγμα σε θερμική ισορροπία, το σήμα μηδενίζεται και ακολουθεί το επόμενο ισόθερμο βήμα. Το εμβαδόν κάτω από την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

Η εφαρμογή της DSC ισόθερων βημάτων είναι πιο χρονοβόρα και πιο περίπλοκη κατά την επεξεργασία απ'ότι η δυναμική μέτρηση θερμοχωρητικότητας. Το μεγάλο πλεονέκτημα, σε σύγκριση με την δυναμική μέτρηση, είναι ότι η απόκλιση

στην μέτρηση της θερμοκρασίας του δείγματος είναι επ'ακριβώς γνωστή αφού σχετίζεται με το μέγεθος του ισόθερμου βήματος. Έτσι με ελάττωση του μεγέθους του βήματος επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια.



Εικόνα 5.5.1.1: καμπύλη DSC του CH σε θερμοκρασία θέρμανσης 1mKs και ψύξης 0.5mKs

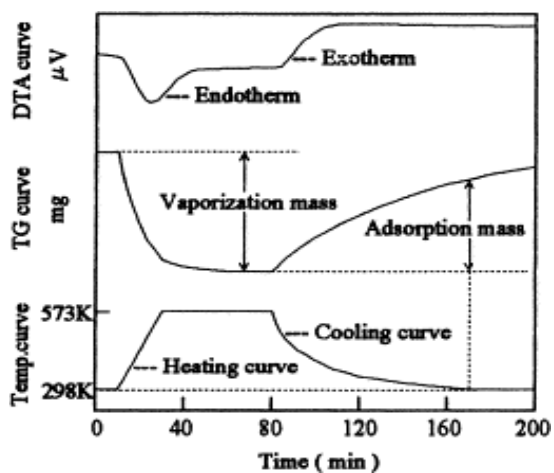


Εικόνα 5.5.1.2: Διαφοροποιήσεις του ανώτατου σημείου στην καμπύλη της DSC σε συνάρτησι της θερμοκρασίας θέρμανσης.

5.5.2 Ανάλυση αντικειμένων από PCM (analysis of PCM objects)

Στην περίπτωση που έχουμε εγκατάσταση θερμικής αποθήκευσης για θέρμανση και ψύξη με εγκλεισμένο σε κέλυφος PCM (encapsulated), είναι δύσκολη η ακριβής μαθηματική ανάλυση της μεταφερόμενης θερμότητας. Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαίο να γίνει και μακροσκοπική ανάλυση με μια μετρητική εγκατάσταση.

Βασικό τμήμα της πειραματικής διάταξης είναι ο θάλαμος όπου τοποθετείται το PCM.[12] Στον θάλαμο αυτό εισέρχεται αέρας με γνωστή θερμοκρασία και παροχή ώστε να είναι δυνατή η διερεύνηση της μεταφοράς θερμότητας και άλλων παραγόντων που επηρεάζουν την μεταφερόμενη ισχύ, όπως η επίδραση της υπόψυξης και η επίδραση διαφόρων υλικών κελύφων.



Εικόνα 5.5.2.1: Σχηματικό διάγραμμα του TG-DTA πειράματος.

5.5.3 Μέθοδος T-history

Μία μέθοδος μετρήσεων που χρησιμοποιείται επιτυχώς είναι η μέθοδος t-history, η οποία προτάθηκε από τους Zhang Yinping και Jiang Li.[10] Για την εφαρμογή της μεθόδου, αναμένονται θετικά αποτελέσματα, μόνο στις περιπτώσεις όπου ο αριθμός Biot είναι μικρότερος του 0.1, περιορισμός που τίθεται εξ αιτίας της υπόθεσης μιας ομοιόμορφης θερμοκρασίας του ΥΑΦ σε έναν σωλήνα δοκιμής κατά την αποφόρτιση.

Οι σωλήνες δοκιμής γεμίζονται αντίστοιχα με το ΥΑΦ και με το υλικό αναφοράς (συνήθως χρησιμοποιείται καθαρό νερό) του οποίου οι θερμοκρασίες παραμένουν αρχικά ίδιες και μεγαλύτερες από τη χαμηλή θερμοκρασία του ΥΑΦ. Το πείραμα της μεθόδου t-history είναι πολύ απλό. Οι σωλήνες δοκιμής παραμένουν αρχικά κάθετα σε ένα λουτρό σταθερής θερμοκρασίας, και ξαφνικά εκτίθενται στην ατμόσφαιρα. Οι θερμοκρασίες στους σωλήνες δοκιμής και την ατμόσφαιρα αρχίζουν ταυτόχρονα να μετρώνται. Οι δύο καμπύλες t-history, που εμφανίζουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας, λαμβάνονται για το ΥΑΦ και για το υλικό αναφοράς. Οι θερμικές ιδιότητες όπως η θερμότητα τήξης και η ειδική θερμοχωρητικότητα, μπορούν να υπολογιστούν από τα μετρημένα πειραματικά δεδομένα και τις καμπύλες αυτές.

Εάν ο αριθμός Biot είναι μικρότερος του 0.1, τότε η θερμοκρασιακή κατανομή του δείγματος μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη, οπότε δύναται να εφαρμοστεί η μέθοδος των ομοιόμορφων ιδιοτήτων (lumped capacitance):

$$Bi = (h * L_s) / K_s = (h * R) / 2 * K_s \quad (5.5.3.1)$$

όπου

R είναι η ακτίνα της κυλινδρικής ράβδου

ks θερμική αγωγιμότητα του PCM

h συντελεστής φυσικής συναγωγής μεταξύ εξωτερικής επιφάνειας και αέρα

Ls το χαρακτηριστικό μήκος, $L_s = V/A$

Από τον ισολογισμό ενέργειας προκύπτει ότι το ρεύμα θερμότητας που μεταφέρεται από το στερεό σώμα όγκου V στο περιβάλλον από την εξωτερική του επιφάνεια A, ισούται με την μείωση της εσωτερικής του ενέργειας:

$$m * C_p * dT(t)/dt = h * A * (T(t) - T_{\infty}) \Rightarrow$$

$$m * C_p * (T_1 - T_2) = h * A * \int (T(t) - T_{\infty}) dt \quad (5.5.3.2)$$

Θέτοντας τις κατάλληλες αρχικές συνθήκες για το διάστημα υπολογισμού, όπου T1 η αρχή και T2 το πέρας, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο συντελεστής συναγωγιμότητας h του PCM είναι ο ίδιος με αυτόν του νερού. Οπότε λύνοντας τις εξισώσεις μπορούμε να υπολογίσουμε την ειδική θερμοχωρητικότητα του PCM.

Επίσης με την μέθοδο T-history μπορεί να προσδιοριστεί η θερμική αγωγιμότητα ενός PCM. Για την μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας PCM, παίρνουμε μια κυλινδρική ράβδο με λιωμένο PCM, του οποίου η θερμοκρασιακή κατανομή είναι ομοιόμορφη και ίση με T₀, και την ψύχουμε απότομα σε ένα λουτρό κρύου νερού θερμοκρασίας T_∞, w. Εάν ο λόγος μήκους προς την διάμετρο του κυλίνδρου είναι μεγαλύτερος του 15, μπορούμε προσεγγιστικά να θεωρήσουμε ότι η

μεταφορά θερμότητας είναι μονοδιάστατη. Έτσι η θερμική αγωγιμότητα K_s υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$K_s = \frac{(1 + (C_p * (T_m - T_{\infty,w}) / H_m))}{4 * ((t_f * (T_m - T_{\infty,w}) / (\rho_p * R^2 * H_m)) - 1 / (R * h_w))} \quad (5.5.3.3)$$

Όπου

C_p =_Ειδική θερμοχωρητικότητα

T_m = η θερμοκρασία τήξης

$T_{\infty,w}$ = θερμοκρασία νερού

H_m = η λανθάνουσα θερμότητα.

t_f = ο χρόνος ολικής στερεοποίησης του PCM

ρ_p = η πυκνότητα του PCM

R = εξωτερική ακτίνα

h_w = συντελεστής συναγωγής μεταξύ εξωτερικής επιφάνειας και νερού.

Για $\Delta T < 0.1$ έχουμε την επιθυμητή ακρίβεια για μέτρηση θερμοφυσικών ιδιοτήτων. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε από τους Zhang Yinping, Jiang Yi και Jiang Yi οι οποίοι πρωτοπαρουσίασαν την μέθοδο T-history, αποτελείται από 8 γυάλινους σωλήνες διαμέτρου 10.4 mm και μήκους 180.6 mm.

Το πρώτο κρίσιμο πρόβλημα στη μέθοδο t-history, είναι στην αντιμετώπιση του φαινομένου supercooling. Πρέπει αρχικά να οριστεί το σημείο απελευθέρωσης του supercooling ως το ένα άκρο της περιόδου αλλαγής φάσης. Ο βαθμός εμφάνισης του supercooling ποικίλλει και σχετίζεται με όρους όπως η ταχύτητα, η καθαρότητα και είναι απολύτως ανεξάρτητος από το τέλος της αλλαγής φάσης. Η τροποποιημένη μέθοδος t-history, χρησιμοποιεί ένα σημείο καμψής ως όριο μεταξύ των περιόδων αλλαγής φάσης και μεταφοράς αισθητής θερμότητας, το σημείο όπου η πρώτη παράγωγος της καμπύλης t-history για το ΥΑΦ γίνεται ελάχιστη. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, ή μειώνεται βαθμιαία κατά τη λανθάνουσα απελευθέρωση θερμότητας, ενώ μειώνεται εκθετικά στη διαδικασία ψύξης που συνοδεύει την αισθητή θερμότητα μόνο. Βέβαια, το σημείο καμψής που χρησιμοποιήθηκε ως όριο μεταξύ των περιόδων λανθάνουσας και στερεάς κατάστασης αισθητής θερμότητας, δεν είναι πάντα εύκολο να επιλεγεί.

Άσχετα από τον βαθμό εμφάνισης του φαινομένου του supercooling, η θερμότητα τήξης που λαμβάνεται με την τροποποιημένη μέθοδο t-history συμφωνεί με αυτήν από DSC, όπως έχει διαπιστωθεί σε πολλές πειραματικές διαφορές. Στη μέθοδο αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μετρηθεί επακριβώς η λανθάνουσα θερμότητα που απορροφά ο δοκιμαστικός σωλήνας με το ΥΑΦ.

Άλλα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η απλότητα και το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού, το –συγκριτικά με προηγούμενες μεθόδους- μεγάλο μέγεθος του δείγματος, η ταυτόχρονη μέτρηση πολλών δειγμάτων σε ένα πείραμα καθώς και η οπτική παρατήρηση του φαινομένου. Το μειονέκτημά της είναι ότι το σφάλμα των μετρήσεων επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την προσεκτική κατασκευή της διάταξης και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, καθώς και από τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.

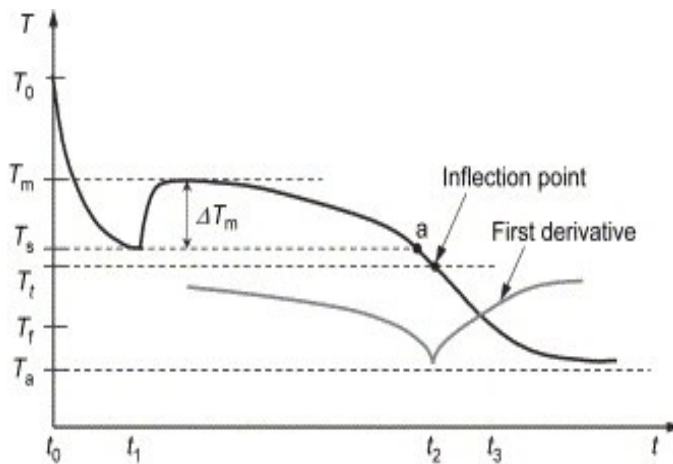
Οι εξισώσεις που προτείνονται από τους Hiki Hong , Sun Kuk Kim και Yong-Shik Kim για την αποφυγή των προβλημάτων είναι:

$$C_{p,l} = \frac{mt,w * C_{p,t} + mw * C_{p,w} * \frac{Ac}{Ac'} * \frac{A1}{A1'} - \frac{mt,p}{mp} * C_{p,t}}{mp} \quad (5.5.3.4)$$

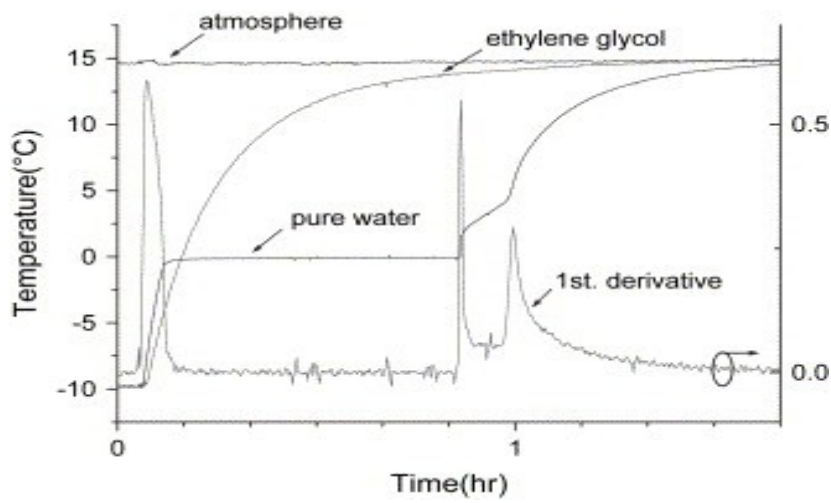
$$C_{p,s} = \frac{mt,w * C_{p,t} + mw * C_{p,w} * \frac{Ac}{Ac'} * \frac{A3}{A3'} - \frac{mt,p}{mp} * C_{p,t}}{mp} \quad (5.5.3.5)$$

$$H_m = - \left(\frac{mt,p}{mp} * C_{p,t} + \frac{C_{p,l} + C_{p,s}}{2} \right) * (T_m - T_i) + \frac{mt,w * C_{p,t} + mw * C_{p,w} * \frac{Ac}{Ac'} * \frac{A2}{A2'}}{mp} * (T_m - T_i) \quad (5.5.3.6)$$

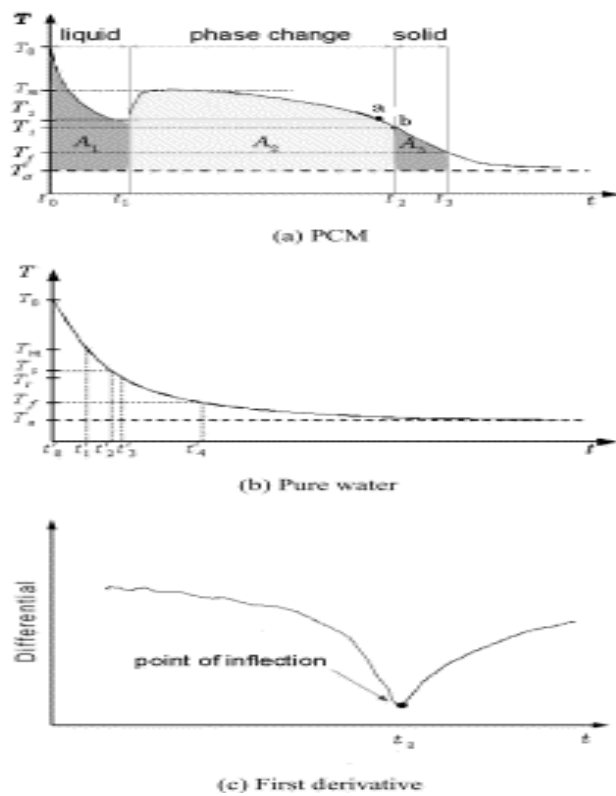
Άλλος τρόπος εφαρμογής της T-history γίνεται στο ZAE-Bayern όπου χρησιμοποιούνται μονωμένα δοχεία για την μέτρηση, ώστε η μόνωση να αποτελεί την κύρια αιτία θερμικής αντίστασης και να μπορεί να θεωρηθεί ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ίσος από το περιβάλλον προς το δείγμα και από το περιβάλλον προς το δείγμα αναφοράς. Έτσι η θερμική διαπερατότητα του δείγματος μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα πράγμα που είναι θετικό μιας και συνήθως δεν είναι γνωστή.



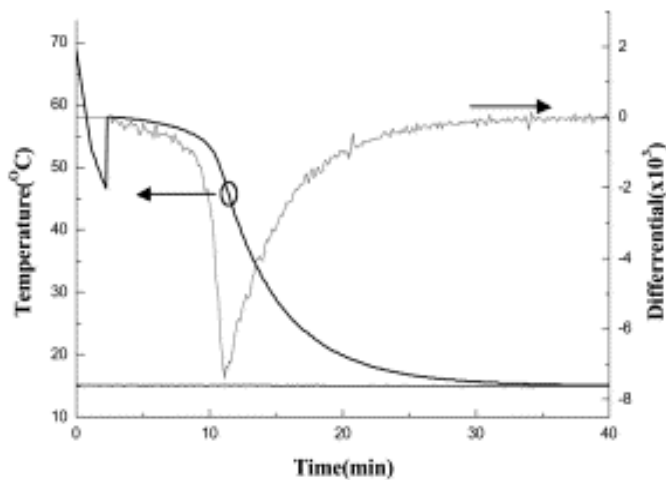
Εικόνα 5.5.3.1: Τυπική καμπύλη T-history υλικού αλλαγής φάσης κατά την διαδικασία ψύξης.



Εικόνα 5.5.3.2: Καμπύλη T-history για τον πάγο



Εικόνα 5.5.3.3: Καμπύλη T-history



Εικόνα 5.5.3.4: Καμπύλη T-history για το νιτρικό οξύ

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι οι DTA & DSC χρησιμοποιούν πολύ μικρά δείγματα (1-10 mg)(40~50 μ l) με διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες από τις μεγάλες ποσότητες που χρησιμοποιούνται στις τεχνικές εφαρμογές. Π.χ. σε μια μικρή ποσότητα ένυδρου άλατος, ο βαθμός υπόψυξης του PCM αυξάνεται ενώ ο διαχωρισμός των φάσεων μειώνεται. Είναι πολύπλοκες και πολυδάπανες,εαν μπορούν να μετρήσουν ταυτόχρονα λανθάνουσα θερμότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα πολλών δειγμάτων PCM. Επίσης είναι δύσκολη η ακριβής μέτρηση κατά την αλλαγή φάσης με τις συμβατικές μεθόδους. Οι ιδιότητες υλικών που περιέχουν διάφορα πρόσθετα, όπως πηκτικά και πυρηνοποιητές, πρέπει να μετρώνται με μεγάλη επιφύλαξη με τις μεθόδους DTA και DSC, διότι σε μία πολύ μικρή ποσότητα δείγματος οι ιδιότητες μπορεί να είναι διαφορετικές απ'ότι στις μεγάλες, λόγω της ανομοιογενούς κατανομής των ετερογενών προσθέτων. Υπάρχει πρόβλημα ακριβείας στην περίπτωση που το μετρούμενο PCM παρουσιάζει υπόψυξη (sub cooling).

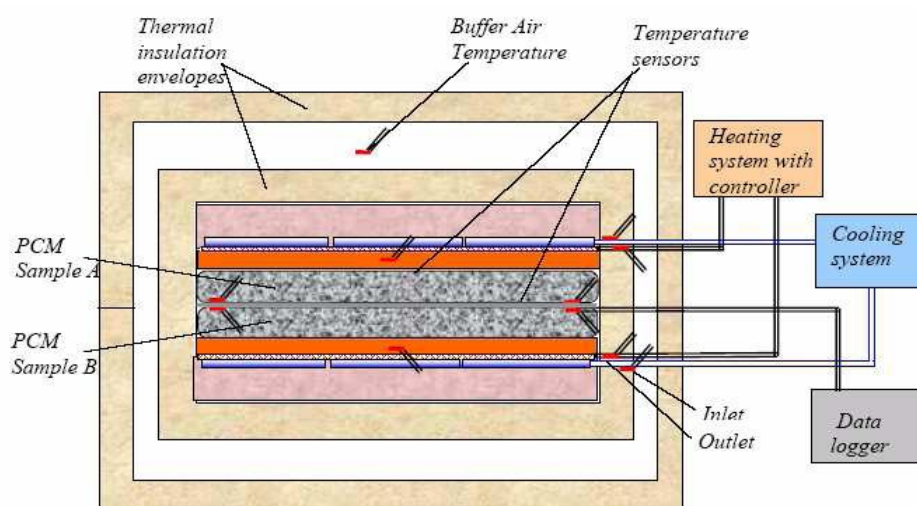
Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για την επιλογή ενός PCM είναι να μην εκφυλίζεται το υλικό με την πάροδο του χρόνου και αλλάζουν οι θερμοφυσικές ιδιότητες του. Για την μελέτη της συμπεριφοράς αυτής είναι σημαντικό η μέθοδος μέτρησης να είναι όσο το δυνατόν πιο απλή και εύχρηστη, ώστε να γίνονται εύκολα μετρήσεις και να εξάγονται σε σύντομο χρονικό διάστημα τα όποια συμπεράσματα.

Επίσης η αναφορά σε λανθάνουσα θερμότητα, όπως συνήθως γίνεται στην βιβλιογραφία, είναι άστοχη αφού η πλειονότητα των PCM είναι ανισότροπα υλικά, ως προς την σύσταση και η αλλαγή φάσης γίνεται σε ένα θερμοκρασιακό εύρος. Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαίο να είναι γνωστή η καμπύλη της ειδικής θερμοχωρητικότητας ή της ενθαλπίας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία, ώστε να μπορούν να γίνουν ακριβείς υπολογισμοί για τις τεχνικές εφαρμογές. Για να ληφθούν υπ'όψιν παράγοντες όπως η υπόψυξη και η υστέρηση θα πρέπει να γίνονται και οι δύο μετρήσεις και η ψύξη και η θέρμανση.

5.5.4 Μέθοδος “double cell”

Μία ακόμα μέθοδος που έχει αναπτυχθεί για την μελέτη της μακροχρόνιας συμπεριφοράς των PCM που εφαρμόζονται για αποθήκευση θερμότητας, ονομάζεται “double cell”.

Η τελευταία έχει δημιουργηθεί για μακροχρόνιες δοκιμές των PCM, είναι μία μέθοδος θερμιδικού τύπου που επιτρέπει την μέτρηση και σύγκριση της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας σε πολλούς κύκλους.[59] Η στρατηγική των δοκιμών βασίζεται στην εναλλακτική συμμετρική θέρμανση και ψύξη κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες ενός σχετικά μεγάλου δείγματος PCM (1-2kg) που βρίσκεται τοποθετημένο στο εσωτερικό ενός πολύ καλά μονωμένου καλύμματος. Αν και δεν θεωρείται τόσο ακριβής σαν μέθοδος καθορισμού της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας των μικρών δειγμάτων, πιστεύεται ότι παρέχουν καλές πληροφορίες για τους ερευνητές και τους κατασκευαστές εμπορικών ή και μεγαλύτερης κλίμακας προϊόντων που επιθυμούν να εξετάσουν την συνολική συμπεριφορά της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας των δειγμάτων μεγάλων διαστάσεων σε ένα μεγάλο αριθμό κύκλων.



Εικόνα 3.5.4.1: Μέθοδος “double-cell”

5.6 Συμβατότητα των υλικών αλλαγής φάσης με άλλα υλικά

Η συμβατότητα των P.C.M. με άλλα υλικά είναι σημαντική τόσο για τη διάρκεια ζωής του δοχείου ή της κάψουλας που φέρει το P.C.M., όσο και για μία πιθανή διαρροή του τήγματος προς τον περιβάλλοντα χώρο όπου μπορεί να προξενήσει προβλήματα.[13] Τα πιο συνηθισμένα προβλήματα αναφορικά με τη συμβατότητα των υλικών και τα P.C.M. είναι τα ακόλουθα :

- Διάβρωση των μετάλλων όταν έρθουν σε επαφή με ανόργανα P.C.M..
- Απώλεια σταθερότητας δομής των πλαστικών όταν έρχονται σε επαφή με οργανικά P.C.M..
- Μετακίνηση υγρών ή αερίων διαμέσου πλαστικών δοχείων, τα οποία επηρεάζουν τη δομή του περιεχόμενου ανόργανου ή οργανικού P.C.M..

5.7 Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης

Το σοβαρότερο κριτήριο για την αξιοποίηση των P.C.M. σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών, χωρίς εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους, ο οποίος μετριέται καλύτερα σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού παρά σε πραγματικό χρόνο.[13] Η ανεπάρκεια σταθερότητας των υλικών οφείλεται σε δύο λόγους:

- Σε μικρής σταθερότητας χημική σύνθεση του υλικού ή των υλικών που αποτελούν το P.C.M..
- Στο φαινόμενο της διάβρωσης που πιθανόν να λάβει χώρα μεταξύ του P.C.M. και των υλικών που έρχεται σε επαφή.

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

5.8 Μορφές ενσωμάτωσης

Η καινοτομία σε ότι αφορά στην εφαρμογή των pcm στα κτίρια επιτεύχθηκε όταν σκέφτηκαν να ενσωματώσουν τα υλικά αλλαγής φάσης στα παραδοσιακά κατασκευαστικά υλικά. [14]Τα προηγούμενα 20 χρόνια πολλές μορφές ενσωμάτωσης μεγάλων ποσοτήτων pcm σε κάψουλες έκαναν την εμφάνιση τους στην αγορά απευθυνόμενα τόσο σε ενεργητικά όσο και σε παθητικά συστήματα αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας. Όμως, η συνολική επιφάνεια των περισσότερων καψουλών που περιέχουν pcm δεν ήταν επαρκής ώστε να μεταδοθεί η θερμότητα στο κτίριο ύστερα από την διαδικασία τήξης του pcm. Από την άλλη , οι τοίχοι και το ταβάνι αποτελούν μεγάλες επιφάνειες που είναι επαρκείς για την μεταφορά παθητικής μορφής θερμότητας σχεδόν σε όλες τις ζώνες ενός κτιρίου. Έτσι γεννήθηκε η ιδέα του εμποτισμού γύψινων πάνελ ή και άλλων κατασκευαστικών υλικών με υλικά αλλαγής φάσης.

Το pcm πρέπει να ενσωματωθεί σε κάψουλες ούτως ώστε να μην επηρεάζει την σωστή λειτουργία των παραδοσιακών υλικών κατασκευής. Παλιότερα πειράματα που χρησιμοποιούνταν μεγάλος όγκος υλικού pcm ή μικροενσωμάτωση σε κάψουλες κρίθηκαν αποτυχημένα εξαιτίας της χαμηλής αγωγιμότητας που παρουσίαζε το υλικό αλλαγής φάσης. Αυτό γιατί την ώρα της ανάκτησης της θερμότητας από την υγρή φάση το pcm στερεοποιούνταν γύρω από τις άκρες εμποδίζοντας την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας.

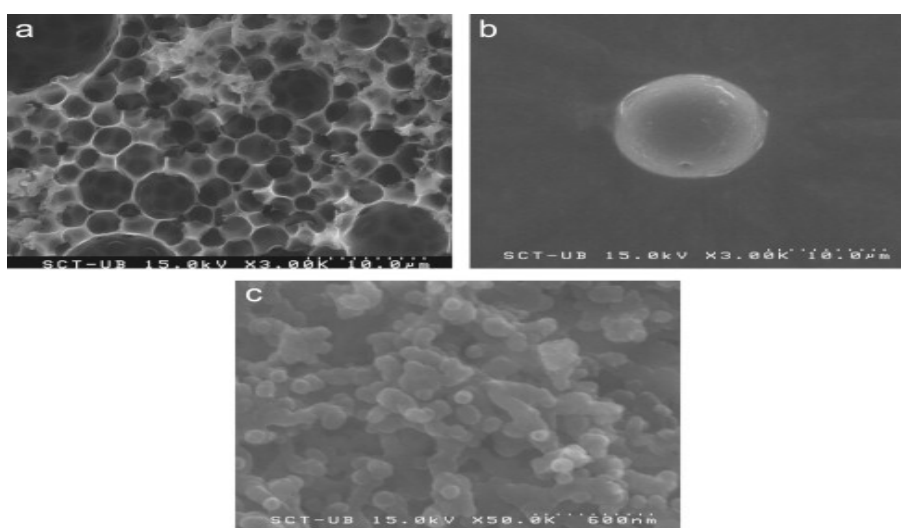
Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να παρατεθούν τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση των PCMs. Εφόσον έχει επιλεγεί ένα συγκεκριμένο pcm με βάση το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής, οι επόμενοι πολύ σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να λάβουμε υπόψη είναι:

- Η γεωμετρία του καλύμματος του pcm
- Οι θερμικές και γεωμετρικές παράμετροι του καλύμματος για δεδομένη ποσότητα pcm

Κάθε ένας από αυτούς τους παράγοντες έχει άμεση επίδραση στα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας από το pcm και επηρεάζει εξ'ολοκλήρου τον χρόνο τήξης και την απόδοση του υλικού αλλαγής φάσης. Προκειμένου να διασφαλιστεί η μακροχρόνια απόδοση κάθε συστήματος που περιέχει pcm, το μέγεθος και το σχήμα του καλύμματος του pcm θα πρέπει να ανταποκρίνεται στο χρόνο τήξης του pcm καθώς και στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην περιοχή που πρόκειται να τοποθετηθεί το υλικό αλλαγής φάσης. Συνήθως, τα pcm τοποθετούνται σε μακρύς και λεπτούς σωλήνες, σε κυλινδρικά ή και παραλληλόγραμμα καλύμματα.

5.8.1 Μικρο-Μακρο ενσωμάτωση [14],[15],[16]

Με την μικροενσωμάτωση σε κάψουλες οι διαστάσεις είναι τόσο μικρές ώστε τα φαινόμενα να αποφεύγονται. Η μικροενσωμάτωση αναφέρεται σε ένα μεγάλο αριθμό μικρών τεμαχίων pcm που περιέχονται σε ένα σφραγισμένο και συνεχές πλέγμα. Η ακαμψία αυτού του πλέγματος αναγκάζει ολόκληρη την μεταφορά θερμότητας να γίνεται με αγωγή. Αυτό μπορεί να μειώνει σημαντικά τον βαθμό στον οποίο γίνεται μεταφορά θερμότητας, κυρίως κατά την διαδικασία φόρτισης του pcm. Άλλα προτερήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι εμποδίζεται η διαρροή του υλικού, όπως επίσης το ότι ο συνδυασμός των μεγάλων επιφανειών του τοίχου με του μικρού όγκου καψουλών οδηγεί σε ταχύτερη απορρόφηση και απομάκρυνση της θερμότητας. Συγκεκριμένα, η διάμετρος της μικροκάψουλας είναι περίπου 5μm, πάχος μικρότερο από το μισό πάχος της ανθρώπινης τρίχας.

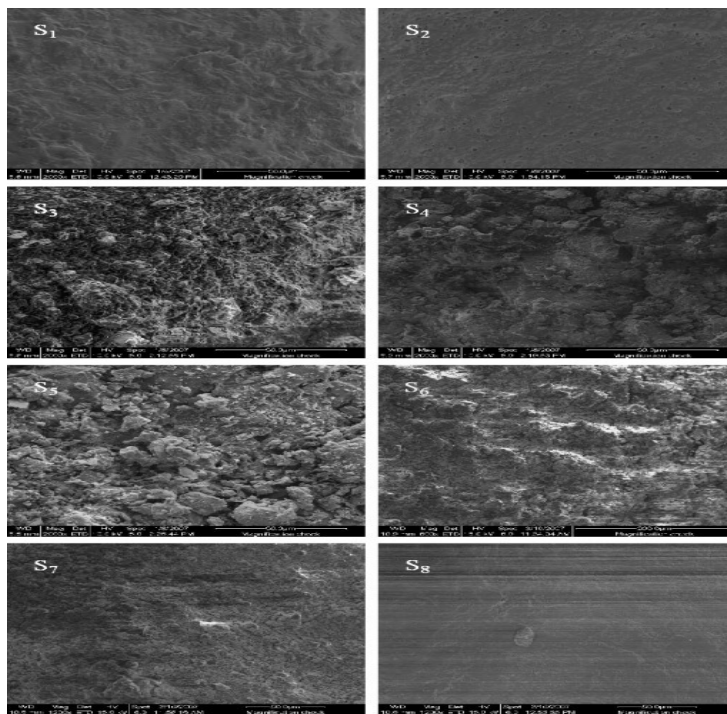


Εικόνα 5.8.1.1: Μικροκάψουλες



Εικόνα 5.8.1.2: Παράδειγμα μικροενσωμάτωσης

Στην μακροενσωμάτωση το pcm τοποθετείται σε κάψουλες, κυλινδρικής ή σφαιρικής μορφής, οι οποίες με την σειρά τους ενσωματώνονται στην αποθηκευτική δεξαμενή. Προκειμένου να εξασφαλίσουμε ικανοποιητική ανταλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο περιβάλλοντα χώρο του μέσου μεταφοράς θερμότητας και του pcm, οι κάψουλες θα πρέπει να έχουν υψηλή αναλογία επιφάνειας και όγκου, δηλαδή να μεταφέρονται μεγάλα ποσό θερμότητας σε μία περιοχή ανά μονάδα όγκου. Βέβαια, αυτό σημαίνει ότι οι κάψουλες θα πρέπει να είναι κατά κανόνα όσο το δυνατόν μικρότερες σε μέγεθος, το οποίο όμως επηρεάζει σημαντικά το κόστος τους. Τα προτερήματα της χρήσης μίας τέτοιας μεθόδου είναι η σχετικά απλή διαδικασία ενσωμάτωσης του pcm σε μία υπάρχουσα δεξαμενή αποθήκευσης καθώς επίσης και η δυνατότητα χρήσης pcm με διαφορετικά σημεία τήξης σε μία μόνο δεξαμενή.



Εικόνα 5.8.1.3: Μακρο-κάψουλες

Και οι δύο μέθοδοι ενσωμάτωσης pcm με μορφή κάψουλας στο τσιμέντο, μικροενσωμάτωση και μακροενσωμάτωση έχουν τα μειονεκτήματά τους. Η ενσωμάτωση σε κάψουλες πλαστικές ή μεταλλικές είναι ακριβής αλλά ασφαλής, καθώς το pcm θεωρείται ως ένα από τα συστατικά του μίγματος που απαρτίζει το τσιμέντο, μην επεμβαίνοντας έτσι στις ιδιότητες που είχε πριν αναμιχθεί με το pcm. Η μικροενσωμάτωση μέσω του εμποτισμού του pcm σε φρέσκο τσιμέντο αν και είναι πολύ αποτελεσματική μπορεί να επηρεάσει την μηχανική αντοχή του τσιμέντου. Η παραπάνω εφαρμογή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον κυρίως για τις ελαφριές κατασκευές, αφού μία στρώση από σκυρόδεμα το οποίο περιέχει pcm, πάχους 1,5 παρουσιάζει την ίδια θερμική συμπεριφορά με τοίχο κατασκευασμένο από τσιμέντο ή από τούβλα. Αυτό σημαίνει ότι θα μπορεί να γίνει πλέον εκμετάλλευση των προτερημάτων των ελαφρών κατασκευών ενώ παράλληλα να αποθηκεύεται η θερμότητα.

5.8.2 Μαζική αποθήκευση

Η μαζική αποθήκευση για pcm είναι μία δεξαμενή ανταλλαγής θερμότητας που μοιάζει σε κατασκευή με τις ήδη υπάρχουσες κατασκευές που χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή αποθήκευση, αλλά με κάποιες ουσιαστικές διαφορές. Το μοναδικό χαρακτηριστικό αυτών των μεγάλων συστημάτων αποθήκευσης pcm είναι η ανάγκη για πιο έντονη μεταφορά θερμότητας συγκριτικά με αυτή των συστημάτων χωρίς pcm, εξαιτίας του γεγονότος ότι η πυκνότητα θερμικής αποθήκευσης του pcm είναι υψηλότερη σε σχέση με άλλα μέσα. Η περιοχή όπου συντελείται η μεταφορά θερμότητας αν και μικρή απαιτεί ένα μεγάλο ρυθμό θερμικού κέρδους ή απόδοσης.

5.8.3 Άμεση ενσωμάτωση[17]

Αυτή πρέπει να είναι η πιο οικονομική μέθοδος ενσωμάτωσης που υπάρχει μιας και χρησιμοποιείται πολύς λίγος εξοπλισμός επιπλέον. Υγρό pcm ή pcm σε πούδρα προστίθενται και ανακατεύονται με τα κατασκευαστικά υλικά, όπως είναι ο γύψος και το τσιμέντο, κατά την παραγωγή. Ένα παράδειγμα της μεθόδου αυτής είναι μία πειραματική γυψοσανίδα κατασκευασμένη με άμεση ενσωμάτωση 21-22% εμπορικού grade butyl stearate (BS) κατά το στάδιο ανάμιξης στην παραγωγή παραδοσιακού γύψου.

5.8.4 Εμβάπτιση[18]

Σε αυτή την μέθοδο, το πορώδες κατασκευαστικό υλικό, δηλαδή η γυψοσανίδα, το τούβλο ή το μπλοκ τσιμέντου, βυθίζεται σε ζεστό και λιωμένο pcm, το οποίο απορροφάται από τους πόρους μέσω της τριχοειδούς δράσης. Στην συνέχεια, το πορώδες υλικό απομακρύνεται από το υγρό pcm, αφήνεται να κρυώσει και το pcm παραμένει στους πόρους του κατασκευαστικού υλικού. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι καθιστά εύκολη την μετατροπή ενός απλού πάνελ, σε πάνελ με pcm, όπως ζητείται εφόσον η εμβάπτιση μπορεί να πραγματοποιηθεί πρακτικά οποιαδήποτε ώρα και σε οποιοδήποτε σημείο. Οι Hawes και Feldman εξέτασαν τους μηχανισμούς απορρόφησης και καθιέρωσαν ένα μέσο ανάπτυξης και χρησιμοποιώντας σταθεροποιητές απορρόφησης του pcm στο τσιμέντο πέτυχαν την διάχυση της επιθυμητής ποσότητας pcm.

5.8.5 Σανίδα με ελάσματα[19]

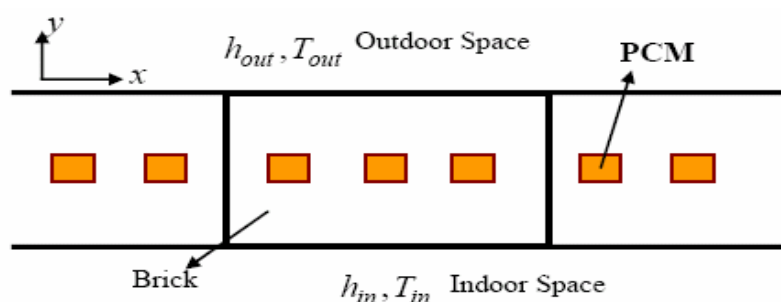
Το pcm μπορεί επίσης να παραχθεί σε έλασμα, σε μία μοναδική στρώση και να χρησιμοποιηθεί ως στοιχείο του <<φακέλου>> του κτιρίου. Οι Darkwa Kim πραγματοποίησαν πειραματικές και αριθμητικές μελέτες πάνω στην συμπεριφορά βιομηχανικών δειγμάτων με ελάσματα και με πάνελ που περιείχαν αναμεμιγμένο με τυχαίο τρόπο pcm και κατέληξαν στα ακόλουθα:

- Το σύστημα με τα ελάσματα πέτυχε μείωση 17% στον χρόνο που απαιτείται για την αποβολή της θερμότητας
- Παρατηρήθηκε αύξηση 20-50% στη ροή θερμότητας από το σύστημα με τα ελάσματα
- Μία αύξηση 7-18% παρατηρήθηκε και στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και πάλι από το σύστημα με τα ελάσματα.

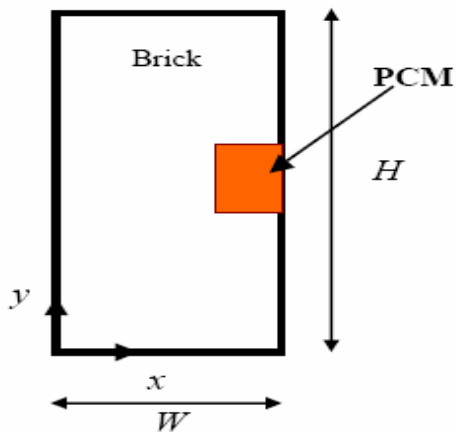
Συνολικά, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πάνελ με τα ελάσματα pcm παρουσιάζει καλύτερη θερμική συμπεριφορά.

5.8.6 Εμβάπτιση σε τούβλο [20]

Μία άλλη ιδέα για ενσωμάτωση θα ήταν η ενσωμάτωση υλικού αλλαγής φάσης μέσα σε τούβλα. Σε σχετικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην Τεχεράνη και συγκεκριμένα από την Samira και από τον Hadi Pasdarshahri, προέκυψε ύστερα από σύγκριση του κλασικού τούβλου με ένα που περιέχει ενσωματωμένο pcm, ότι η μέγιστη εισροή θερμότητας μπορεί να περιοριστεί σε ένα ποσοστό 32,8% ανάλογα πάντα και με την ποιότητα του pcm. Ένας ακόμη παράγοντας που επιδρά στην θερμική αποδοτικότητα του τούβλου με ενσωματωμένο pcm είναι η θέση που τοποθετείται το τελευταίο. Από την έρευνα προέκυψε ότι το pcm παρουσιάζει μεγαλύτερη αποδοτικότητα όταν είναι τοποθετημένο στην εξωτερική πλευρά του τοίχου.



Εικόνα 5.8.6.1 : Σχηματική αναπαράσταση τούβλου με PCM

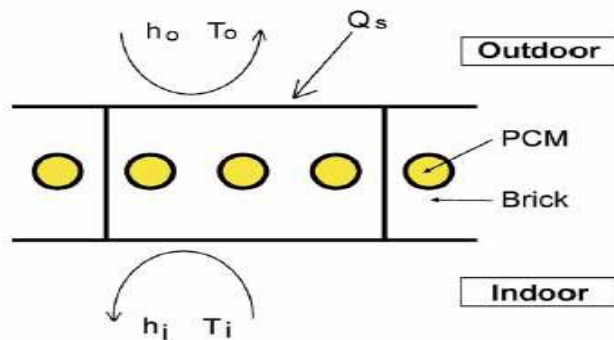


Εικόνα 5.8.6.1 : Θέση του PCM μέσα στο τούβλο

5.8.7 Ενσωμάτωση PCM σε τούβλο σε κυλινδρικές τρύπες-πειράματα στο Κουβέιτ

Υπάρχουν πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Κουβέιτ, τα οποία αφορούν την θερμική ανάλυση των τούβλων που χρησιμοποιούνται σε οικοδομές και περιέχουν υλικό αλλαγής φάσης, σε κυλινδρικές τρύπες στο εσωτερικό τους.

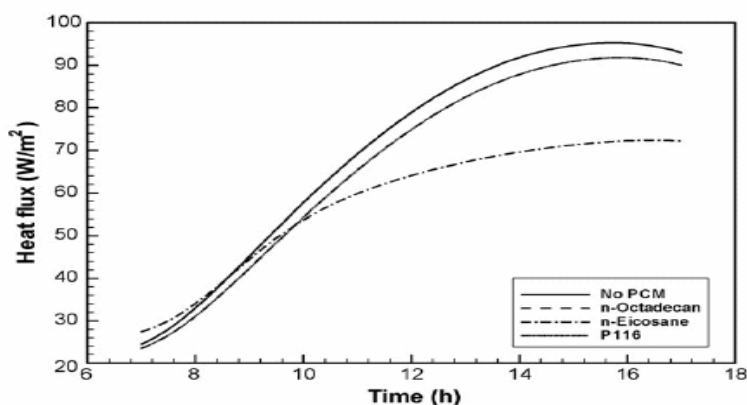
Οι τοίχοι που μελετήθηκαν αποτελούνταν από οριζόντια τούβλα διαστάσεων 0.25 m X 0.15 m X 0.15 m, με κυλινδρικές τρύπες στο εσωτερικό τους διαμέτρου 0.03 m. Τέσσερις διαφορετικές υποθέσεις είναι αυτές που εξετάζονται, τούβλα με ένα, δύο και τρεις κυλίνδρους με PCM καθώς και τούβλα χωρίς PCM. Η εξωτερική επιφάνεια των τοίχων υπόκειται σε ηλιακή ακτινοβολία για καθορισμένο χρονικό διάστημα και σε επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες συναγωγής, ενώ η εσωτερική επιφάνεια υπόκειται σε ανεξάρτητες από τον χρόνο οριακές συνθήκες συναγωγής. Ακόμα, τρεις διαφορετικοί τύποι παραφινών εξετάζονται ως υποψήφια PCM : n-octadecane, n-eicosane και P-116, των οποίων η θερμοκρασία τήξης κυμαίνεται μέσα στα όρια λειτουργίας του συστήματος του τοίχου με τούβλα- PCM.[60]



Εικόνα 5.8.7.1: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος τούβλου-PCM.

5.8.7.1 Τύπος PCM

Σε ότι αφορά στα αποτελέσματα για τον καλύτερο τύπο PCM, το οποίο αναφέρεται ότι τοποθετήθηκε στο κέντρο του τούβλου, παρατηρήθηκε από τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο τοίχο με τούβλα χωρίς PCM, ότι η θερμοκρασία των τούβλων κυμαινόταν ανάμεσα στους 25.7 και στους 55.6, σύμφωνα και με το σχήμα που δίδεται. Από την άλλη, η θερμοκρασία τήξης του n-octadecane είναι πολύ κοντά στο κατώτατο όριο της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος, η αντίστοιχη θερμοκρασία του P-116 πλησιάζει το ανώτατο όριο, ενώ του n-eicosane είναι περίπου στο μέσο του θερμοκρασιακού ορίου.



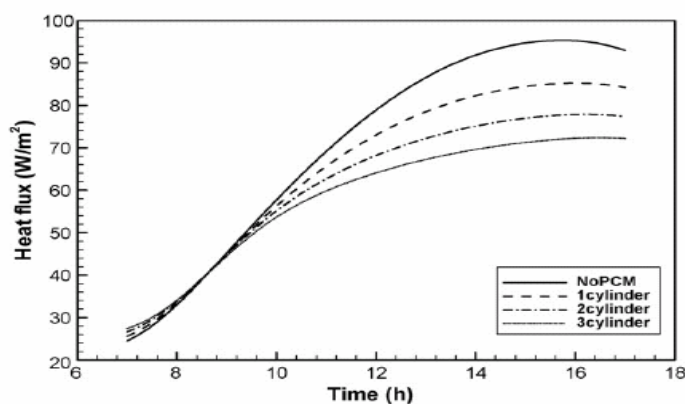
Εικόνα 5.8.7.1.1 : Ροή θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου για τους διάφορους τύπους PCM.

Το διάγραμμα δείχνει ότι τα P-116 και n-octadecane είναι αναποτελεσματικά στην μείωση της ροής θερμότητας στο εσωτερικό του χώρου γιατί, η υψηλή θερμοκρασία τήξης του πρώτου το αναγκάζει να βρίσκεται στην στερεή μορφή του όλη την ώρα ενώ η χαμηλή θερμοκρασία τήξης του δεύτερου το αναγκάζει να βρίσκεται στην υγρή του φάση όλη την ώρα. Έτσι, το τούβλο αδυνατεί να εκμεταλλευτεί την υψηλή τιμή της λανθάνουσας θερμότητάς τους για να μειώσει την ροή θερμότητας στον εσωτερικό χώρο. Από την άλλη πλευρά, με την χρήση της n-octadecane ο ρυθμός αλλαγής της ροής θερμότητας μειώνεται ουσιαστικά από τις 10 το πρωί ως τις 5 το απόγευμα, με το μέγιστο ποσοστό της μείωσης αυτής να φτάνει το 24,2%. Επιπλέον, αναφέρεται ότι η διαφορά ανάμεσα στα διάφορα είδη PCM είναι αμελητέα κατά τη χρονική περίοδο 7-10 το πρωί, καθώς η θερμοκρασία των τούβλων παραμένει κάτω από την θερμοκρασία τήξης του PCM.

5.8.7.2 Ποσότητα PCM

Όπως είναι αναμεινόμενο, η επιθυμητή ποσότητα PCM είναι η μικρότερη δυνατή, όχι μόνο από οικονομικής άποψης αλλά και για να διατηρηθούν, κατά το δυνατόν, αμετάβλητες οι ιδιότητες του τούβλου. Εξετάζονται και πάλι οι περιπτώσεις τούβλων με ένα, δύο και τρεις κυλίνδρους, οι οποίοι τοποθετούνται στην κεντρική γραμμή του τούβλου καθώς και η περίπτωση του τούβλου χωρίς PCM.

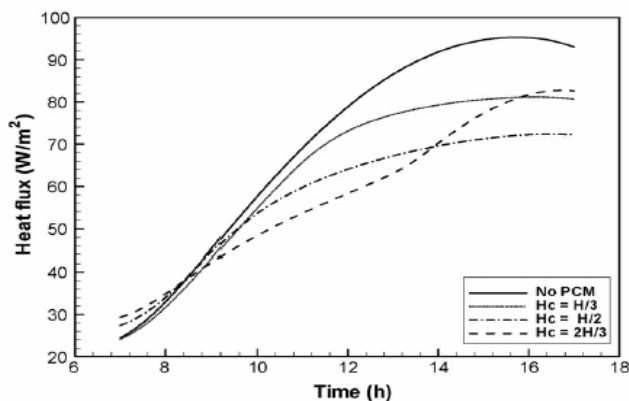
Το παρακάτω διάγραμμα, το οποίο παρουσιάζει την ροή θερμότητας για τις 4 παραπάνω περιπτώσεις, δείχνει ότι με χρήση ενός κυλίνδρου η ροή θερμότητας μειώνεται κατά περίπου 11.5%, με δυο κατά 17,9% ενώ με τρεις κατά 24.2%.



Εικόνα 5.8.7.2.1: Η ροή θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια για τον διαφορετικό αριθμό κυλίνδρων.

5.8.7.3 Η θέση που τοποθετείται το PCM στο τούβλο

Το PCM μετακινείται από την κεντρική γραμμή του τούβλου, για τις ανάγκες του πειράματος, σε θέσεις κοντά στο εσωτερικό και στο εξωτερικό της επιφάνειας του τοίχου, σε απόσταση 1/3 και 2/3. Η εσωτερική και η εξωτερική επιφάνεια δεν προτιμώνται για την τοποθέτηση των κυλίνδρων που θα περιέχουν το PCM καθώς, αυτό θα μπορούσε να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες του τούβλου. Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι η θερμική απόδοση της περίπτωσης με την κεντρική γραμμή είναι καλύτερη συγκριτικά με αυτή που πλησιάζει την εσωτερική επιφάνεια. Αντίθετα, η περίπτωση που πλησιάζει την εξωτερική επιφάνεια παρουσιάζει αρχικά καλύτερη απόδοση από την περίπτωση της κεντρικής γραμμής ως τις 2 το μεσημέρι. Μετά από αυτή την ώρα, η ροή θερμότητας αυξάνεται πολύ γρήγορα. Όταν βρίσκεται κοντά στην εξωτερική επιφάνεια, το PCM υπόκειται σε μεγαλύτερη ροή θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον, συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις, οδηγώντας έτσι σε ένα πολύ γρήγορο ρυθμό τήξης. Η απότομη αλλαγή στην ροή θερμότητας στις 2 το μεσημέρι σημαίνει ότι το PCM έχει λιώσει τελείως. Εντέλει, η συνολική μείωση της ροής θερμότητας για την περίπτωση κοντά στην εξωτερική και στην εσωτερική επιφάνεια αντίστοιχα είναι 17.49% και 10.16%, ενώ για την περίπτωση της κεντρικής γραμμής είναι 17.55%. Όμως, η τοποθέτηση του PCM κατά μήκος της κεντρικής γραμμής έχει την καλύτερη απόδοση τόσο από πλευράς αποτελεσματικότητας όσο και από την πλευρά της διατήρησης των μηχανικών ιδιοτήτων των τούβλων.



Εικόνα 5.8.7.3.1 : Η ροή θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια για τις διαφορετικές θέσεις των κυλίνδρων με PCM.

5.9 Εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης

Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε λανθάνουσα μορφή είναι αρκετά εκτεταμένες εφόσον η αποθήκευση θερμότητας είναι ένα πολύ σημαντικό μέσο εξοικονόμησης ενέργειας, βελτιώνοντας την αξιοποίηση της ήδη υπάρχουσας ενέργειας. Παρακάτω θα δούμε τις σημαντικότερες εφαρμογές που χρησιμοποιούν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, εκμεταλλευόμενα τις ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης.

5.9.1 Συστήματα αποθήκευσης μη άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς [21], [22]

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των υλικών αλλαγής φάσης είναι η μεγάλη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας με μικρότερη διακύμανση κατά την ανάκτησή της με μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά από την πηγή θερμότητας (μέχρι και ισοθερμοκρασιακά). Οι πρακτικές δυσκολίες που ανακύπτουν οφείλονται στη χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, στη μεταβολή της πυκνότητας, στην αξιοπιστία-σταθερότητα των ιδιοτήτων σε μακρόχρονη χρήση καθώς και στο διαχωρισμό των φάσεων με ενδεχόμενη αλλαγή χημικής σύστασης των υλικών και εμφάνιση φαινομένου υπέρψυξης.

Η ελευθερία που δίνει το εύρος θερμοκρασιών που παράγονται τα υλικά δίνει την ευχέρεια εφαρμογής των υλικών αλλαγής φάσης σε πλήθος περιπτώσεων έμμεσης ή άμεσης αποθήκευσης θερμότητας όπου έχουν ως σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας όπου η απαιτούμενη θερμότητα αποθηκεύεται την ημέρα για να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε ώρες μη ηλιοφάνειας.

Όπως προαναφέρθηκε η χαμηλή τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας δεν βοηθάει την ταχεία απορρόφηση της προσφερόμενης θερμότητας και γι' αυτό το λόγο εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές ενίσχυσής της. Οι εναλλάκτες που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι :

- Το υλικό αλλαγής φάσης 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)
- Το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετείται εντός σωλήνων μικρής διαμέτρου σχηματίζοντας δέσμες σωλήνων και το ρευστό κινείται κάθετα ή παράλληλα στη δέσμη. Οι σωλήνες είναι πολλές φορές και πτερυγιοφόροι.



Εικόνα 5.9.1.1: Αλουμινίου σωλήνες με pcm

- Το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετείται στο κέντρο ενός δοχείου αποθήκευσης διπλού κελύφους και το ρευστό κυκλοφορεί περιφερειακά.
- 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.
- Το υλικό αλλαγής φάσης 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 τα κενά μεταξύ των πτερυγίων. Τέτοια διάταξη είναι αποδοτική μόνο αν το ρευστό που περνά από τους σωλήνες είναι υγρό και όχι αέριο.
- Το υλικό αλλαγής φάσης 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 σωληνώσεων εισαγωγής και εξαγωγής αεραγωγών εάν πρόκειται για αέριο. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη πτώση πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου. Επιπλέον με την χρήση σφαιριδίων ενισχυμένων με υλικό αλλαγής φάσης παρακάμπτεται και το πρόβλημα της αλλαγής όγκου των υλικών αλλαγής φάσης(περίπου 10% είναι μια τυπική τιμή) όπου δεν δημιουργεί προβλήματα μόνο κατά την τήξη του υλικού (αύξηση του όγκου) αλλά και κατά τη στερεοποίηση (μείωση του όγκου) διότι υπάρχει περίπτωση να σχηματιστούν κοιλότητες στο υλικό ή ακόμα και μερική αποκόλληση του υλικού από την επιφάνεια συναλλαγής, φαινόμενο που θα μειώσει δραματικά το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.



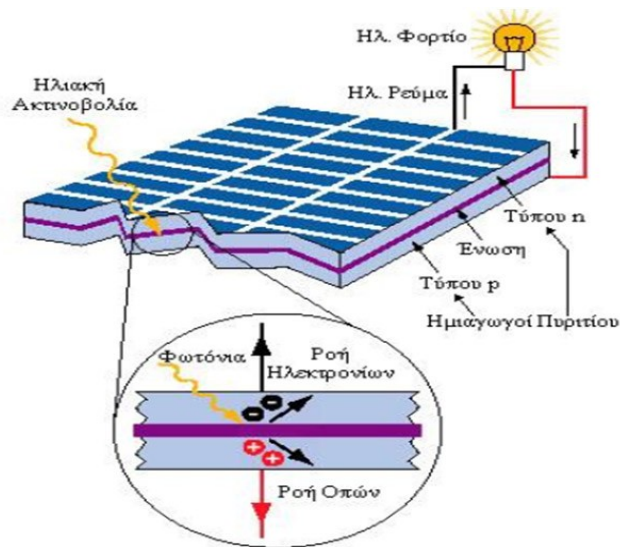
Εικόνα 5.9.1.1 : PCM εγκατεστημένο στο καταφύγιο Telecom για τους AC-Back-up σε 29C

5.9.2 Συστήματα αποθήκευσης άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς

Η ιδέα έχει πραγματοποιηθεί μόνο σε ερευνητικό επίπεδο χρησιμοποιώντας ένυδρο άλας για υλικό αλλαγής φάσης και λάδι για μέσο μεταφοράς θερμότητας από την πηγή στο σύστημα αποθήκευσης.[21],[22] Στην πειραματική διάταξη φυσαλίδες λαδιού διαπερνούν το υλικό αλλαγής φάσης μεταφέροντας την απαιτούμενη θερμότητα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι αναταράξεις που προκαλούν οι φυσαλίδες στη ροή τους μειώνουν το φαινόμενο του supercooling καθώς και αυτό του διαχωρισμού των φάσεων.

5.9.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών σε κτίρια, όπου γίνεται χρήση φωτοβολταϊκών, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με αρκετές απώλειες.[23],[24] Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει σχεδιαστεί για να εργάζεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Μια χαρακτηριστική τιμή θερμοκρασίας είναι οι 25°C. Όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στοιχείου ξεπεράσει αυτή την τιμή, η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μειώνεται κατά 0.5%K⁻¹. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης σε φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετημένο σε αδιαβατικό προς το περιβάλλον πλαίσιο, απορροφά την εξέχουσα θερμότητα, διατηρώντας το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε σταθερή θερμοκρασία, εξασφαλίζοντας την αποδοτική λειτουργία του.



Εικόνα 5.9.3.1 : Φωτοβολταϊκό σύστημα

5.9.4 Συστήματα κλιματισμού

Τα παραδοσιακά συστήματα κλιματισμού λειτουργούν σπάνια στο μέγιστο φορτίο, γεγονός που αναδεικνύει την υπερδιαστασιολόγηση των συστημάτων αυτών, καθώς έχουν επιλεχθεί για να καλύψουν το μέγιστο φορτίο.[25],[26] Με άλλα λόγια, η λειτουργία τους περιορίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας για να καλύψουν τις μέγιστες απαιτήσεις, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας παραμένουν απενεργοποιημένα.

Επιπρόσθετα, οι βιομηχανικές ψυκτικές διατάξεις διαστασιολογούνται για να ικανοποιήσουν τη μέγιστη στιγμιαία ζήτηση ψύξης, η οποία εμφανίζεται σε λίγες μόνο μέρες το χρόνο. Τα βιομηχανικά συστήματα ψύξης, παρέχουν την ψύξη για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, εκ των οποίων αρκετές απαιτούν μεγάλα ψυκτικά φορτία σε μικρό χρονικό διάστημα.

Ένα σύστημα αποθήκευσης ψύξης, είναι ικανό να μειώσει το μέγιστο φορτίο (το φορτίο για το οποίο διαστασιολογείται η εγκατάσταση) μέχρι και 70%. Αν ληφθεί υπ' όψη και το χαμηλό κοστολόγιο του ηλεκτροπαραγωγού κατά τις νυχτερινές ώρες, γίνεται αντιληπτό το ότι τα συστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα φιλικά προς τους οικονομικούς επενδυτές.



Εικόνα 5.9.4.1 : Κλιματισμός με pcm

5.9.5 Ηλιακά συστήματα [27],[28],[29]

Αν ληφθεί υπ' όψη η περιοδικότητα που εμφανίζουν οι πηγές ενέργειας στη φύση, τότε πρέπει να γίνει πρόβλεψη για την αποθήκευση της ενέργειας που δεν χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ιδιαίτερα τις ώρες με έντονη ηλιοφάνεια, κατά τις οποίες η ενέργεια που απορροφάται είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για κατανάλωση. Συνεπώς θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης της πλεονάζουσας ενέργειας και η αντίστοιχη δυνατότητα ανάκτησής της προς ικανοποίηση των θερμικών αναγκών του συστήματος.

Η λειτουργία του συστήματος που περιλαμβάνει τα υλικά αλλαγής φάσης, διαφέρει από τις συνήθεις ηλιακές εφαρμογές, μόνο στο δοχείο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

Στις ηλιακές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται σήμερα περισσότερο τα ένυδρα άλατα. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος, στηρίζεται στη θέρμανση του εργαζόμενου μέσου (το οποίο μπορεί να είναι υγρή σιλικόνη ή ορυκτέλαιο) από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που παίρνει ο συλλέκτης. Το εργαζόμενο μέσο, αφού θερμανθεί, οδηγείται στο δοχείο θερμικής αποθήκευσης, όπου βρίσκεται και το υλικό αλλαγής φάσης. Η θερμότητα που μεταφέρει το εργαζόμενο μέσο, διαβιβάζεται στο ένυδρο άλας και απελευθερώνει το κρυσταλλικό νερό. Με τη διαδικασία αυτή, σχηματίζεται κορεσμένο υδατικό διάλυμα του άλατος, στερεό υπόλειμμα του αδιάλυτου άλατος και επίπλευση του εργαζόμενου μέσου σε αυτό. Το εργαζόμενο μέσο οδηγείται κατά ένα μέρος στο συλλέκτη και κατά ένα άλλο μέρος στο δοχείο ανάδευσης, όπου αναδεύεται με το υπόλοιπο μέσο και παραλαμβάνει θερμότητα από μια ηλεκτρική αντίσταση, αν κριθεί σκόπιμο.

Για την ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας, το εργαζόμενο μέσο οδηγείται στον εναλλάκτη, όπου μεταφέρει θερμότητα σε ένα άλλο μέσο (συνήθως νερό), για τη χρήση της αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας. Αφού το εργαζόμενο μέσο ψυχθεί στον εναλλάκτη, διαβιβάζεται στο κορεσμένο διάλυμα για να προσλάβει θερμότητα. Καθώς το κορεσμένο διάλυμα ψύχεται, επανακρυσταλλώνεται και αποδίδει την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται οργανικό υλικό αλλαγής φάσης, η λειτουργία του συστήματος είναι πανομοιότυπη, με μοναδική διαφορά εκείνη της λειτουργίας των οργανικών υλικών αλλαγής φάσης, καθώς αυτά όταν φορτίζονται λειώνουν και μεταβαίνουν από τη στερεή στην υγρή φάση και όταν αποφορτίζονται το αντίστροφο. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί η αποδοτική χρήση αυτών των συστημάτων, σε εφαρμογές με μικρές θερμοκρασιακές διαφορές, αλλά και μικρό αποθηκευτικό όγκο.

Η ηλιακή ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη κάθε στιγμή, οπότε οι ηλιακές εγκαταστάσεις απαιτούν μία ενδιάμεση αποθηκευτική μονάδα για την παρεχόμενη από τον Ήλιο ενέργεια, ρόλο τον οποίο συνήθως παίζει το νερό σε συστήματα θέρμανσης. Ένα σύστημα βασισμένο σε υλικό αλλαγής φάσης προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα. Μικρότερο όγκο σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα νερού και μεγαλύτερη αποδοτικότητα χάρη στην μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης της ενέργειας. Συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορούν επίσης να συνδυαστούν με συμβατικά συστήματα θέρμανσης. Ένα «ενισχυμένο» με υλικό αλλαγής φάσης σύστημα ζεστού νερού, παρέχει καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας του νερού.

5.9.6 Ηλεκτρονικά εξαρτήματα

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι ιδιαίτερος ευαίσθητα στη υπερθέρμανση, επηρεάζοντας αρνητικά τόσο τη διάρκεια ζωής, όσο και την αξιοπιστία του εξαρτήματος. Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις που συναντά το ρεύμα καθώς διαπερνά τα καλώδια, τα επίπεδα πυριτίου, τα transistor των επιμέρους ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, αυξάνουν τη θερμοκρασία τους με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος φθοράς ή και καταστροφής.[30] Σκοπός είναι να διατηρηθεί η θερμοκρασία των εξαρτημάτων αυτών εντός ορίων ασφαλούς λειτουργίας της εκάστοτε συσκευής, χωρίς να χρειαστεί να αυξηθεί το συνολικό της μέγεθος.[31] Σήμερα, μεταλλικά πτερύγια χρησιμοποιούνται για την απαγωγή θερμότητας από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ενισχύοντας τα συστήματα ψύξης με ανεμιστήρες καταλλήλου μεγέθους. Η χρησιμοποίηση υλικών αλλαγής φάσης σε αυτά τα συστήματα για την απομάκρυνση των σημείων αιχμής που παρουσιάζει η χρονική κατανομή της θερμοκρασίας του εξαρτήματος, είναι απολύτως αξιόπιστη, καθώς το υλικό αλλαγής φάσης ανανεώνεται από μόνο του και επανέρχεται στην αρχική κατάσταση, μεταξύ δυο διαδοχικών σημείων αιχμής της θερμοκρασίας και δεν είναι απαραίτητος κανενός είδους κινητήρας ή διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας. Όπως είναι γνωστό τα υλικά αλλαγής φάσης δρουν σε τρεις φάσεις. Κατά την πρώτη φάση η θερμοκρασία του στερεού υλικού αλλαγής φάσης αυξάνεται μέχρι το σημείο τήξης του, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντός του. Κατά τη δεύτερη φάση, η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης παραμένει σταθερή καθώς το υλικό αλλαγής φάσης λιώνει. Κατά τη τρίτη φάση η θερμοκρασία υγρού υλικού αλλαγής φάσης συνεχίζει να αυξάνεται. Για να εισαχθούν τα υλικά αλλαγής φάσης επιτυχώς στις ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει θεωρητικά να μην βρεθούν στην τρίτη φάση, αλλά να παραμείνουν στη δεύτερη, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση. Πλέον, από πολλές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο ανάπτυξης και εμπορίας υλικών αλλαγής φάσης, διατίθενται στο εμπόριο προϊόντα ειδικά σχεδιασμένα για τοποθέτηση σε ηλεκτρονικές διατάξεις, ιδιαίτερος αποδοτικά. Τα περισσότερα από αυτά τα προϊόντα, που θυμίζουν δεσμίδες με μικρά αυτοκόλλητα χαρτιά, έρχονται σε άμεση επαφή με το εξάρτημα για το οποίο προορίζονται.

5.9.6.1 Χρήση σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές

Οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στην ψύξη των επεξεργαστών των ηλεκτρονικών υπολογιστών, περιλαμβάνουν προϊόντα όπως τα παραπάνω, αν και πλέον έχουν αναπτυχθεί προϊόντα τα οποία αντικαθιστούν πλήρως τα μεταλλικά πτερύγια ψύξης του επεξεργαστή.[32] Αν και το κόστος τους είναι αρκετά αυξημένο, λόγω κυρίως του μικρού μεγέθους τους, η λειτουργία τους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και συμφέρουσα από οικονομικής άποψης, ιδίως όσο αυξάνεται ο αριθμός των επεξεργαστών και η αντίστοιχη επεξεργαστική ισχύς, οπότε και η αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα.[33] Αρκετά πρωτότυπη και έξυπνη είναι η ιδέα ανάπτυξης μίας εύκαμπτης επιφάνειας πάχους 8-10mm, η οποία περιέχει υλικά αλλαγής φάσης στο εσωτερικό της και προορίζεται για χρήση σε φορητούς υπολογιστές. Η λειτουργία της είναι πολύ απλή, απλώς τοποθετείται ο φορητός υπολογιστής επάνω της και το προϊόν αναλαμβάνει να απορροφήσει μεγάλο μέρος των θερμικών φορτίων που αναπτύσσονται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας του Η/Υ. Πρόσθετο πλεονέκτημα του προϊόντος σε περίπτωση εκτός γραφείου χρήσης (όπου συνήθως ο υπολογιστής εναποτίθεται στους μηρούς του

χρήστη), είναι ότι προστατεύει τη βουβωνική χώρα του χρήστη από έκθεση σε αυξημένες θερμοκρασίες, που σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, είναι επικίνδυνο τόσο για τη σεξουαλική υγεία όσο και για την αναπαραγωγική δυνατότητα του τελευταίου.

Στο σύνολό τους αυτά τα προϊόντα είναι αποτελεσματικά και συντελούν σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά τους:

- Αύξηση του χρονικού διαστήματος πρώτης εκκίνησης του ανεμιστήρα από τα 20 λεπτά στις τέσσερις ώρες, οπότε επιτυγχάνονται καλύτερες συνθήκες εργασίας στον υπολογιστή (π.χ. αθόρυβη λειτουργία) .
- Μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του υπολογιστή κατά 25 %.
- Αύξηση της ζωής του επεξεργαστή.
- Αύξηση των επιδόσεων του επεξεργαστή, λόγω της ελάττωσης της μέσης θερμοκρασία λειτουργίας του.

5.9.6.2 Μονάδα επείγουσας ψύξης

Μια ιδιαίτερα επιτυχής εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης , είναι η μονάδα επείγουσας ψύξης (cooling emergency unit). Η μονάδα αυτή, αποτελείται από ένα εξωτερικό μεταλλικό πλαίσιο, στο εσωτερικό του οποίου υπάρχουν συσκευασίες με υλικά αλλαγής φάσης και σωληνώσεις που συνδέουν τη μονάδα με το κεντρικό σύστημα κλιματισμού μιας αίθουσας. [32]Τα υλικά αλλαγής φάσης , βρίσκονται μέσα σε σακούλες τοποθετημένες πάνω σε πλάκες αλουμινίου. Η ανάγκη μιας τέτοιας μονάδας, είναι επιθυμητή για χώρους που στεγάζονται ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες στο χώρο μπορούν να αποβούν καταστροφικές για έναν αρκετά δαπανηρό εξοπλισμό. Η εμφάνιση των μεγάλων θερμοκρασιών, οφείλεται κυρίως στις υψηλές θερμοκρασίες του εξωτερικού περιβάλλοντος και στη μεγάλη αποβολή θερμότητας των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

Τα υλικά αλλαγής φάσης που υπάρχουν στη μονάδα, βρίσκονται αρχικά στη στερεή φάση, είναι δηλαδή θερμικά αφόρτιστα. Μόλις η θερμοκρασία του χώρου αυξηθεί πέραν του φυσιολογικού και ο κλιματισμός της αίθουσας δεν είναι αρκετός για να διατηρήσει τη θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα για τη λειτουργία των ηλεκτρονικών συσκευών, μπαίνει σε λειτουργία η μονάδα επείγουσας ψύξης. Το ψυκτικό υγρό περνά μέσα από τη μονάδα και φορτίζει θερμικά το υλικό αλλαγής φάσης , το οποίο μπορεί να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες θερμότητας και να τις αποθηκεύσει. Μόλις μπει σε λειτουργία η μονάδα, αυξάνεται κατά ένα μεγάλο βαθμό η απόδοση του συστήματος κλιματισμού. Πρέπει βέβαια να προβλέπεται πάντα στο τέλος της λειτουργίας της μονάδας, να αποφορτίζονται τα υλικά αλλαγής φάσης , για να είναι πάντα διαθέσιμη η μονάδα. Η αποφόρτιση της μονάδας μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, με πιο αποδοτικό την απευθείας ψύξη των υλικών αλλαγής φάσης μέσω του συστήματος κλιματισμού, σε λειτουργία όπου αποκόπτεται ο κλιματισμός της αίθουσας, κυρίως σε περιόδους ύφεσης της επεξεργαστικής δραστηριότητας, ή κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Εικόνα 5.9.6.2.1 :Μονάδα επείγουσας ψύξης

5.9.6.3 Τηλεπικοινωνίες

Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός λειτουργεί γενικώς καλύτερα μεταξύ συγκεκριμένων θερμοκρασιακών ορίων και μειώνεται ο χρόνος ζωής του ή αστοχεί σε πολύ υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες.[34] Για παράδειγμα οι εταιρίες τηλεφωνίας χρησιμοποιούν μπαταρίες για να τροφοδοτήσουν με ενέργεια εξοπλισμό, και επειδή πολλές φορές ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός πρέπει να βρίσκεται και να χρησιμοποιείται υπαίθρια, υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται από $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα.[35] Η μπαταρίες έχουν πολύ μεγάλη ενεργειακή απώλεια όταν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή ή αστοχούν όταν είναι πολύ υψηλή και επιπλέον η διάρκεια ζωής μίας μπαταρίας εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται.

Η χρήση υλικών αλλαγής φάσης οδηγεί σε μία πιο σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας των μπαταριών απορροφώντας τα μεγάλα φορτία κατά τις ώρες αιχμής και απορρίπτοντάς τα αργότερα όταν οι συνθήκες του περιβάλλοντος το επιτρέπουν. Ένα παράδειγμα χρήσης των PCM στις μπαταρίες είναι ένα ειδικό περίβλημα που έχει αναπτυχθεί από τις εταιρίες «TEAP», «Power Conversion Products» και «MJM-Engineering». Το περίβλημα αυτό έχει σακούλες γεμισμένες με PCM και τυλίγεται γύρω από την μπαταρία.

Επομένως τα συστήματα των τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, περιέχουν μηχανήματα και ηλεκτρονικά εξαρτήματα τα οποία είναι υπεύθυνα για την εύρυθμη λειτουργία του αντίστοιχου δικτύου. Τέτοια εξαρτήματα περιέχουν εξεζητημένα ηλεκτρονικά κυκλώματα, ιδιαίτερα ακριβά και καταναλωτικά από άποψης ενέργειας, όπως επίσης και πολύ ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες. Πολλά από αυτά δε, είναι διασκορπισμένα ανά την επικράτεια για την κατά τόπους ενίσχυση και σωστή διανομή του σήματος του δικτύου. Το καλύτερο δυνατό σημείο τοποθέτησης των κουβουκλίων που περιέχουν τέτοια μηχανήματα είναι σε ανοιχτούς χώρους (κοιλάδες) και κατά το δυνατόν υψηλότερα (υψώματα, βουνά, κλπ). Ως εκ τούτου, είναι συνήθως τοποθετημένα σε προσβάσιμες μεν περιοχές, αλλά μακριά από κατοικημένους χώρους, οπότε είναι δύσκολη η συνεχής επιτήρηση της θερμοκρασιακής κατάστασής τους. Τα ΥΑΦ έχουν βρει εφαρμογή και σε αυτά τα συστήματα και παραδειγματικά περιγράφεται παρακάτω μία τέτοια εφαρμογή.

Τα τηλεπικοινωνιακά κουβούκλια είναι μονωμένα, και κλιματιζόμενα φυλάκια, τα οποία προστατεύουν την καρδιά της κινητής τηλεφωνίας, τον Πομποδέκτη Βάσης (Base Station Subsystem (BSS)). Είναι το κομμάτι εκείνο ενός κλασσικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας το οποίο διαχειρίζεται την κίνηση και το σήμα του δικτύου. Εκτελεί, μάλιστα, διάφορες εργασίες σχετικά κυρίως με το δίκτυο, όπως την αποκωδικοποίηση της συνομιλίας, το διαχωρισμό των καναλιών του δικτύου από άλλα δίκτυα (ραδιοφωνικά, αεροπορικά, τηλεοπτικά, κλπ) και τη διαχείριση του σήματος για εξυπηρέτηση όλης της περιοχής κάλυψης.

Ο πομποδέκτης βάσης, καθώς επίσης και η αντίστοιχη μπαταρία είναι ιδιαιτέρως θερμοευαίσθητα και ο περιβάλλον χώρος τους πρέπει να διατηρείται διαρκώς κάτω από τους 35°C. Σε υποανάπτυκτες και υπό ανάπτυξη χώρες, εμφανίζεται συχνά το φαινόμενο της διακοπής του ρεύματος, καθώς και μονοφασικού ρεύματος, αναγκάζοντας τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας να εφοδιάζουν τα καταλύματα αυτά με ντιζελογεννήτριες για να υποστηρίξουν το σύστημα κλιματισμού του κουβουκλίου στην περίπτωση διακοπής ή μονοφασικού ρεύματος. Τα ΥΑΦ που εγκαθίστανται σε αυτά τα κουβούκλια απορροφούν θερμότητα από το εσωτερικό(θερμότητα η οποία παράγεται από τη λειτουργία του BSS) ελαχιστοποιώντας ή ακόμα και εξαλείφοντας την ανάγκη χρήσης της γεννήτριας για κλιματισμό, επομένως έχοντας οικονομικό όφελος λόγω της μικρότερης ποσότητας καυσίμου που καταναλώνει η γεννήτρια. Το ΥΑΦ θα επαναφορτιστεί όποτε είναι διαθέσιμη η πηγή ενέργειας, οπότε θα δουλεύει το κανονικό σύστημα κλιματισμού, άρα και θα αποβάλλει την αποθηκευμένη θερμότητα.

5.9.7 Οχήματα

Πολύ ενδιαφέροντα στοιχεία προκύπτουν από την αυτοκινητοβιομηχανία, στα πλαίσια της οποίας έχουν δοκιμαστεί ΥΑΦ σε πληθώρα εφαρμογών.[36],[37] Δύο από τα πλέον ενδιαφέροντα και επιτυχημένα παραδείγματα περιγράφονται παρακάτω.

Τα ΥΑΦ χρησιμοποιούνται ήδη σήμερα σε μία μπαταρία λανθάνουσας θερμότητας, την οποία προσφέρει η BMW σαν προαιρετικό εξοπλισμό στα μοντέλα της σειράς 5. Η αρχή λειτουργίας είναι αρκετά απλή. Το υλικό αποθήκευσης ενέργειας είναι συνδεδεμένο με το ψυγείο του αυτοκινήτου και αποθηκεύει την πλεονάζουσα θερμότητα όταν ο κινητήρας λειτουργεί στα θερμοκρασιακά όρια σχεδίασης. Αυτή η θερμότητα είναι μετά διαθέσιμη στο επόμενο ξεκίνημα του οχήματος με κρύο κινητήρα, ώστε να θερμανθεί ο κινητήρας γρηγορότερα, οπότε βελτιώνει το συνολικό συντελεστή κατανάλωσης καυσίμου (km/lit καυσίμου), όπως επίσης και για τη θέρμανση της καμπίνας του οχήματος (οδηγική άνεση-θερμική άνεση). Χάρη στην εξαιρετική μόνωση της μπαταρίας λανθάνουσας θερμότητας, μπορεί να διατηρήσει την αποθηκευμένη ενέργεια με το όχημα σταματημένο σε περιβάλλον -20°C για τουλάχιστον δύο εικοσιτετράωρα.[38],[39]

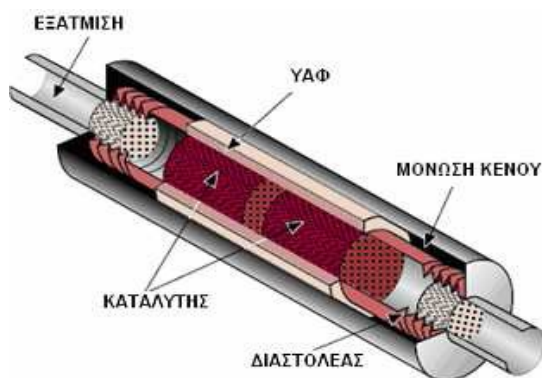
Μία ακόμη εφαρμογή των ΥΑΦ είναι στο σύστημα εξαγωγής του οχήματος. Με χρήση ΥΑΦ διατηρείται ο καταλύτης στη θερμοκρασία σχεδιασμού, ελαττώνοντας τις –αναγκαστικά – αυξημένες εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων κατά το ξεκίνημα του κρύου κινητήρα.

Ο καταλύτης (καταλυτικός μετατροπέας) που πλέον είναι αναφαίρετο εξάρτημα όλων των σύγχρονων αυτοκινήτων, μετατρέπει μέσω οξείδωσης στα ευγενή μέταλλα που περιέχει (Ρόδιο, Παλλάδιο, Λευκόχρυσος) τα μονοξειδία αζώτου

και άνθρακα από την καύση του καυσίμου στον κύλινδρο, σε λιγότερο βλαβερά και σίγουρα όχι δηλητηριώδη διοξείδια. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει η θερμοκρασία του καταλύτη να είναι πολύ υψηλή, καθώς για την εν λόγω χημική διαδικασία η μεγάλη θερμοκρασία είναι απαραίτητος παράγοντας. Αυτή όμως η θερμοκρασία δεν αναπτύσσεται άμεσα κατά την εκκίνηση του αυτοκινήτου, αλλά μετά από λίγα λεπτά. Έχει παρατηρηθεί ότι κατά την περίοδο της «κρύας εκκίνησης» εκλύεται το 60%-80% των τοξικών καυσαερίων.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού σχεδιάστηκε ένας τριοδικός καταλύτης ενισχυμένος με ΥΑΦ, με σκοπό να αποθηκεύουν θερμότητα κατά την κίνηση του αυτοκινήτου και να την απελευθερώνουν στην επόμενη εκκίνησή του.

Σε οχήματα που εφαρμόστηκε το εν λόγω σύστημα τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά. Οι κινητήρες τέθηκαν σε λειτουργία μετά 24 ώρες από την προηγούμενη εκκίνησή τους και μετρήθηκαν οι εκπομπές των καυσαερίων τους. Διαπιστώθηκε ότι οι εκπομπές υδρογονανθράκων και μονοξειδίου του άνθρακα ήταν μειωμένες κατά 84% και 91% αντίστοιχα, συγκρινόμενες με τις εκπομπές κινητήρων με συμβατικό καταλύτη.



Εικόνα 5.9.7.1 :Υλικά αλλαγής φάσης σε καταλύτη αυτοκινήτου

5.9.8 Μεταφορές αγαθών

Ο τομέας των μεταφορών σε πολλές περιπτώσεις περιλαμβάνει τη μεταφορά προϊόντων τα οποία είναι ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και απαιτούν πολύ συγκεκριμένα και στενά θερμοκρασιακά πλαίσια κατά τη μεταφορά τους.[40]

Είτε τα μεταφερόμενα αγαθά απαιτούν χαμηλές είτε υψηλές θερμοκρασίες, στο συνολικό κόστος μεταφοράς, προστίθεται ένα ιδιαίτερα αυξημένο κόστος το οποίο έχει να κάνει με τη διατήρηση της θερμοκρασίας, είτε πρόκειται για όχημα-ψυγείο, είτε για όχημα με κάποια θερμαντική διάταξη.[41],[42]

Η μεταφορά ευαίσθητων ναπών τροφίμων, ευαίσθητων στις θερμοκρασιακές αλλαγές φαρμακευτικών ειδών, διάφορων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, χημικών, εκρηκτικών, απαιτεί κλιματιζόμενα οχήματα. Τέτοια οχήματα καθιστούν απαγορευτική από πλευράς κόστους τη λειτουργία τους, καθώς χρησιμοποιούν σαν καύσιμο ντίζελ.[43] Το κόστος της ενέργειας η οποία παράγεται από ντίζελ είναι 6 φορές μεγαλύτερη από το αντίστοιχο κόστος της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το τεράστιο πλεονέκτημα των ΥΑΦ είναι ότι μπορούν να απορροφήσουν ή να αποδώσουν σεβαστά ποσά θερμότητας σχεδόν ισοθερμοκρασιακά.[47],[48] Είναι

προφανές ότι ανάλογα με τις θερμοκρασιακές απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής επιλέγεται και υλικό με αντίστοιχο σημείο τήξης.



Εικόνα 5.9.8.1: Κιβώτιο διατήρησης θερμοκρασίας

Σε γενικές γραμμές, πριν από τη μεταφορά φορτίζονται τα υλικά αλλαγής φάσης είτε σε ψυγείο, είτε σε φούρνο, ώστε να είναι έτοιμα για χρήση. Το πολύ θετικό εδώ είναι ότι το υλικό αλλαγής φάσης παρέχει τη δυνατότητα φόρτισής του καταναλώνοντας ηλεκτρική ενέργεια μη αιχμής, που ως γνωστό, είναι φθηνότερη.

Η μεταφορά ζεστών γευμάτων για παράδειγμα, απαιτεί μία πηγή θερμότητας, διαφορετικά δεν θα ικανοποιήσει τους πελάτες-καταναλωτές. Μία ηλεκτρική θερμαντική μονάδα δεν μπορεί να είναι διαθέσιμη κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες, και σε αυτές τις περιπτώσεις τα υλικά αλλαγής φάσης προσφέρουν ιδανική λύση, αφού επιτρέπουν την κατασκευή ενός αυτό-θερμαινόμενου σκεύους μεταφοράς.

Η κατασκευή των δοχείων μεταφοράς προβλέπει την προθέρμανση των πλακών που περιέχουν τα υλικά αλλαγής φάσης σε ένα κοινό φούρνο ή μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων. Μόλις οι πλάκες με το υλικό αλλαγής φάσης φορτιστούν, αποθηκεύοντας ένα μεγάλο ποσό λανθάνουσας θερμότητας τοποθετούνται στα θερμικά μονωμένα δοχεία σαν εσωτερική επένδυση.

Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί, ότι ένα μεγάλο πλεονέκτημα των υλικών αλλαγής φάσης στην εφαρμογή αυτή είναι η αποφόρτιση του υλικού αλλαγής φάσης σε σταθερή θερμοκρασία, χωρίς να υπερθερμαίνει το εσωτερικό περιβάλλον του δοχείου.

Πλέον οι εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο, έχουν αναπτύξει πλήθος τυποποιημένων προϊόντων μεταφοράς, τα οποία είναι εφοδιασμένα με εγκοπές. Αυτές οι εγκοπές πέραν της ευελιξίας και ευκολίας στον τομέα της συναρμολόγησης του κιβωτίου μεταφοράς, εμφανίζουν το πρόσθετο πλεονέκτημα της αεροστεγούς κατά το δυνατόν μεταφοράς των αγαθών, γεγονός το οποίο ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες. Πέρα όμως από αυτές τις συσκευασίες προσφέρονται και έτοιμα κιβώτια ενισχυμένα με υλικά αλλαγής φάσης για τη μεταφορά οσοδήποτε μεγάλου όγκου προϊόντων, ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες οποιουδήποτε πελάτη ή επιχείρησης .

Επίσης η αποθήκευση και η μεταφορά ιατροφαρμακευτικών προϊόντων είναι μία κατάλληλη εφαρμογή για τα PCM. Ο λόγος είναι ότι πολλά από αυτά τα προϊόντα είναι πολύ ακριβά και η ποιότητά τους εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες θερμοκρασίας κατά την μεταφορά και την αποθήκευση. Οι θερμοκρασίες που διατηρούνται τέτοιου είδους προϊόντα είναι από 20°C έως 24°C, από 2°C έως 6°C και άλλα από -30°C έως -26°C. Είναι δυνατό πάραυτα τα οχήματα που μεταφέρουν τα προϊόντα να έχουν κάποιο σύστημα ψύξης όμως το πρόβλημα είναι στη μεταφορά

ανάμεσα στο νοσοκομείο και το όχημα και μετά ανάμεσα στο όχημα και τον τελευταίο προορισμό. Για παράδειγμα το αίμα απαγορεύεται να παγώσει όπως και να ανέβει πάνω από κάποιο όριο η θερμοκρασία του διότι μετά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

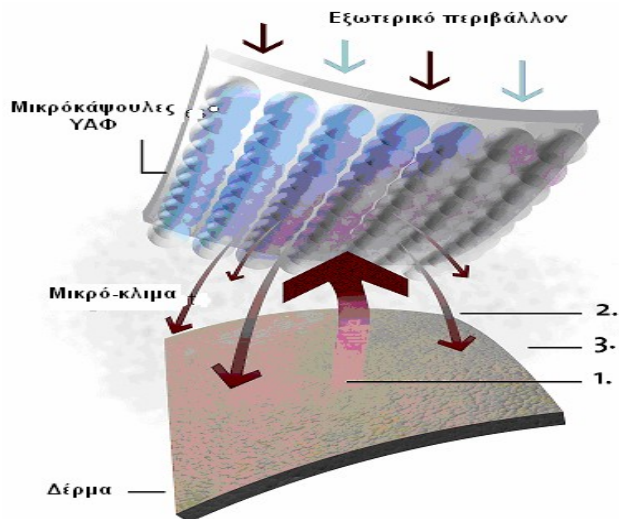
Η παραδοσιακή μέθοδος διατήρησης της θερμοκρασίας σε κάποια προκαθορισμένα όρια είναι η χρήση πολύπλοκων και ακριβών συστημάτων ψύξης. Παρακάτω βλέπουμε ειδικές συσκευασίες για την μεταφορά αίματος που διατηρούν την θερμοκρασία μεταξύ 2°C και 10°C έως και για 12 ώρες χωρίς περαιτέρω τεχνικό εξοπλισμό κλίνοντας έτσι τα κενά στην αλυσίδα των μεταφορών.

5.9.9 Θερμική Ένδυση

Η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα έχει ως στόχο να παρέχουν θερμική άνεση, ομοιόμορφα κατανεμημένη θερμοκρασία και λιγότερο ιδρώτα. Η εισαγωγή των ΥΑΦ σε ρούχα ξεκίνησε από διαστημικές εφαρμογές, στις στολές των αστροναυτών, για τη προστασία τους από τις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές. [44] Σήμερα οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα και γενικότερα στα υφάσματα έχουν επεκταθεί.[45] Χρησιμοποιούνται σε στολές που εκτίθενται σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα σε πυροσβεστικές, ορειβατικές και αγωνιστικές (F1) στολές. Η χρήση τους όμως έχει επεκταθεί και σε καθημερινά ρούχα και άλλα υφάσματα, όπως κουβέρτες, κάλτσες, παπούτσια κλπ.

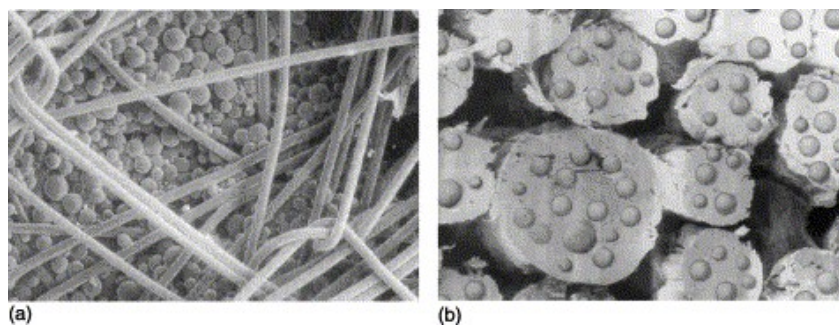


Εικόνα 5.9.9.1: Ενδύματα ενισχυμένα με υλικά αλλαγής φάσης



Εικόνα 5.9.9.2 : Αρχή λειτουργίας των ενισχυμένων με ΥΑΦ ενδυμάτων.

Στα ενδύματα χρησιμοποιούνται κυρίως οργανικά ΥΑΦ σε μικροκάψουλες, για να μην εμφανίζονται διαρροές κατά τη μετάβαση στην υγρή φάση.[46] Τα μικρο-ΥΑΦ αυτά όταν προστίθενται στις υφασμάτινες ίνες ή ανάμεσα στα στρώματα των ενδυμάτων, μπορούν να ελαττώσουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και μπορούν να αυξήσουν τη θερμοχωρητικότητα (του ενδύματος) περίπου 10 φορές. Αυτά τα ανεπτυγμένα θερμικά χαρακτηριστικά μπορούν να εμφανιστούν στα σύγχρονα ρούχα με εμβαπτισμό των ινών του υφάσματος σε διάλυμα που περιέχει μικροσκοπικές μονάδες ΥΑΦ (μικρο-ΥΑΦ) ή με την προσθήκη των μικρο-ΥΑΦ σε πολυμερή, τα οποία μετά οδηγούνται σε εξολκείς για σχηματισμό πολυμερών ινών. Συνήθως (προφανώς είναι η πλέον οικονομική μέθοδος) οι μικροκάψουλες με τα ΥΑΦ, τοποθετούνται κατά στρώματα και σε σχετικά πειράματα έχει αποδειχθεί η αποδοτικότερη χρήση δύο στρώματων με ΥΑΦ. Επειδή τα ΥΑΦ παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη πυκνότητα από τα συνήθη υλικά των ενδυμάτων, αλλά και λόγω του υψηλού κόστους των ΥΑΦ, χρησιμοποιείται ΥΑΦ κατά 20-35% επί του ολικού βάρους του ενδύματος.



Εικόνα 5.9.9.3: PCM στα ενδύματα

Προφανώς για θερμοκρασίες χαμηλότερες από το σημείο τήξης των ΥΑΦ, το υλικό βρίσκεται εξ ολοκλήρου στη στερεή του φάση, αν και επειδή το ανθρώπινο σώμα βρίσκεται σε συνήθεις συνθήκες στους 36°C, προσφέρει συνήθως ένα ποσό θερμότητας στο ΥΑΦ, το οποίο μπορεί να επανακτήσει στην περίπτωση που η θερμοκρασία του ελαττωθεί. Αν η θερμοκρασία τείνει να αυξηθεί, τότε το ΥΑΦ απορροφά θερμότητα για να μην υπερθερμανθεί το ανθρώπινο σώμα.

Με αυτή τη μέθοδο προσθήκης μικρο-ΥΑΦ στα ρούχα, είναι δυνατός ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των λεγόμενων έξυπνων ενδυμάτων. Στις εφαρμογές που αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι πολλές, από βαριά ένδυση, μπουφάν, αδιάβροχα, κουβέρτες, προστατευτικά φωτιάς για πυροσβέστες, στολές κατάδυσης και πολλά άλλα. Η χρήση των ΥΑΦ έχει πλέον εδραιωθεί στον τομέα της ένδυσης, με πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα και για τον πιο απαιτητικό χρήστη. Προϊόντα όπως στολές για σκι, κυνηγετικά γιλέκα και θερμικά εσώρουχα, είναι μία θερμομονωτική μέθοδος πολύ διαφορετική με ό,τι έχει επικρατήσει μέχρι σήμερα, μεθόδους δηλαδή που βασίζονται στην αποθήκευση αέρα μεταξύ των ινών ή στρωμάτων υλικού. Χάρη στα μικρο-ΥΑΦ, η θερμότητα που απορροφάται οδηγεί το υλικό να αλλάξει φάση (από στερεό σε υγρό) σε μοριακό επίπεδο, αποθηκεύοντας ή απελευθερώνοντας ενέργεια, ανάλογα με τη θερμοκρασία του δέρματος. Η θερμότητα αυτή διατηρείται στο ΥΑΦ και όταν έρθει η ώρα ελευθερώνεται ομοιόμορφα και σταδιακά, δημιουργώντας ένα πολύ πιο αποτελεσματικό θερμομονωτικό στρώμα σταθερής θερμοκρασίας μεταξύ του δέρματος και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Αυτό σταδιακά θα οδηγήσει στην εξαφάνιση των δύσχρηστων και καθόλου πρακτικών θερμομονωτικών ρούχων που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα.

Η χρήση των ΥΑΦ σε εσώρουχα αποδεικνύεται αποτελεσματική στον τομέα της θερμικής μόνωσης και μάλιστα πολύ πιο αποτελεσματική από τα λεγόμενα «ισοθερμικά» εσώρουχα. Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης τέτοιων εσωρούχων είναι ότι διατηρούν το σώμα σε καλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η χρήση ενός ογκώδους, άβολου στην κίνηση και αντιαισθητικού εξωτερικού ενδύματος.

Τα γάντια και οι σκούφοι όπως και τα καπέλα είναι ομάδες ενδυμάτων που έγιναν και πάλι επίκαιρα, λόγω της χρησιμότητας και της αποτελεσματικότητας που τους προσέφερε ο συνδυασμός τους με ΥΑΦ. Ειδικότερα τα γάντια που σε συγκεκριμένες εφαρμογές είναι απαραίτητα πλέον γίνονται περισσότερο χρηστικά, μικρότερα σε όγκο και περισσότερο αποτελεσματικά.

5.9.9.1 Εφαρμογές σε υποδήματα και πάτους υποδημάτων

Αξιοσημείωτη είναι η χρήση των ΥΑΦ σε υποδήματα και πάτους υποδημάτων προσφέροντας στο χρήστη, ένα άνετο περιβάλλον για τα πόδια του. Με την εξομαλυσμένη θερμοκρασία εντός του υποδήματος, επιτυγχάνεται πέραν της θερμικής άνεσης, λιγότερη κόπωση, και λιγότερο ιδρώτα, ο συνδυασμός του οποίου με υψηλές θερμοκρασίες οδηγεί σε μυκητιάσεις και άλλες δερματοπάθειες.[58] Τα τελευταία είναι ιδιαιτέρως σημαντικά σε περιπτώσεις όπως των αθλητών ή άλλων επαγγελματιών που είναι υποχρεωμένοι να φορούν συγκεκριμένα υποδήματα.

5.9.9.2 Εφαρμογές σε γιλέκα

Ένα από τα πρώτα και πλέον επιτυχημένα προϊόντα ένδυσης με ΥΑΦ είναι ένα γιλέκο ενισχυμένο με σακούλες γεμάτες με κατάλληλο υλικό.[58] Το γιλέκο φοριέται πάνω από μία μόνο φανέλα ή και κατάσαρκα και έχει σαν σκοπό να απομακρύνει την εξέχουσα θερμότητα σε περιπτώσεις αυξημένης δραστηριότητας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τετοιου είδους γιλέκα χρησιμοποιούνται και από αθλητές μετά από αγώνες καθώς επίσης και από ασθενείς με καρκίνο του μαστού ύστερα από ακτινοθεραπείες για λόγους ανακούφισης.



Εικόνα 5.9.9.2.1: PCM σε γιλέκο

Θεωρήθηκε σωστό να αναλυθεί ξεχωριστά γιατί γνώρισε μεγάλη απήχηση από πολλούς φορείς, όπως αστυνομικά και πυροσβεστικά σώματα, ένοπλες δυνάμεις και από πολλές ιδιωτικές επιχειρήσεις. Το σημαντικό γεγονός είναι ότι είναι ένα ένδυμα μικρό σε όγκο και μπορεί να συνδυαστεί με σχεδόν όλες τις στολές, ή με οποιοδήποτε συνδυασμό ρούχων.

5.9.9.3 Εφαρμογές σε κράνη

Επιπρόσθετα, πρόσφατες έρευνες δείχνουν την καταλληλότητα των ΥΑΦ σε κράνη, με σκοπό την ψύξη του κομιστή.[58] Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, το ΥΑΦ απορροφά τη θερμότητα που εκλύεται από το κεφάλι του κομιστή, αλλά και την ανεπιθύμητη θερμότητα που προέρχεται από το περιβάλλον. Γίνεται κατανοητό, ότι η θερμότητα αποθηκεύεται στο κράνος χωρίς να γίνεται δυσάρεστη στον κομιστή για ένα χρονικό διάστημα που μέχρι σήμερα φτάνει τις δυο ώρες, αλλά αναμένεται με την εξέλιξη των ΥΑΦ να αυξηθεί ικανοποιητικά. Βέβαια, αυτή η θερμότητα δεν αποβάλλεται προς το περιβάλλον, συνεπώς θα πρέπει πριν ξαναχρησιμοποιηθεί το κράνος να αποφορτισθεί, μη φορώντας το, ή καλύτερα βυθίζοντάς το σε κρύο νερό για σύντομο χρονικό διάστημα.

Τα ΥΑΦ που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για τα κράνη είναι τόσο τα οργανικά, αλλά και κάποια ανόργανα άλατα. Στα ανόργανα άλατα δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην συσκευασία, τα οποία πολύ οξειδωτικά.

5.9.10 Εφαρμογές για τον ύπνο

Τα ΥΑΦ χρησιμοποιούνται ακόμα και για να βελτιώσουν τις συνθήκες του μικροκλίματος που περιβάλλει τον άνθρωπο κατά τη διάρκεια του ύπνου, με τη χρήση των ΥΑΦ σε σεντόνια, παπλώματα και μαξιλάρια, αλλά και στρώματα. [58] Η θερμική συμπεριφορά των ΥΑΦ εξασφαλίζει τις κατάλληλες συνθήκες ύπνου με τη θερμοκρασία να κυμαίνεται απόλυτα στα όρια της θερμικής άνεσης, χωρίς ζέστη αλλά και χωρίς κρύο.

5.9.11 Εφαρμογές σε έπιπλα

Σήμερα υλικά αλλαγής φάσης τοποθετούνται και σε έπιπλα αλλά και σε γραφεία με σκοπό να κρατήσει το γραφείο δροσερό και να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της εργασίας. Ομοίως υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται και σε παιχνίδια.

5.9.12 Εφαρμογές σε κτίρια

5.9.12.1 Εισαγωγή-Ενεργητικά και Παθητικά Συστήματα [61]

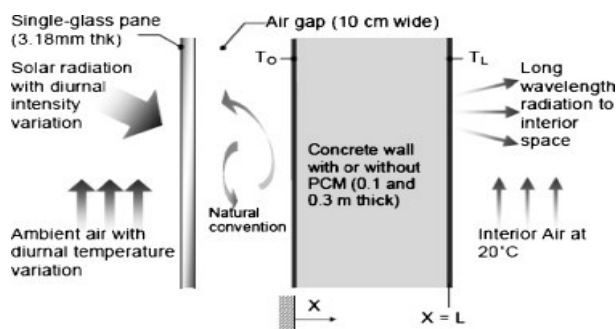
Στην παρούσα εργασία το αντικείμενο μελέτης είναι η εφαρμογή των pcm στα κτίρια ως ενεργητικά συστήματα για την θέρμανση τους χειμερινούς μήνες. Εδώ κρίνεται απαραίτητο να γίνει ο διαχωρισμός ανάμεσα στα ενεργητικά και στα παθητικά συστήματα.

Για την θέρμανση και την ψύξη ενός χώρου με την χρήση της ηλιακής ενέργειας, η τελευταία χρειάζεται να συλλεχθεί, να αποθηκευτεί και να διανεμηθεί κατάλληλα στο χώρο. Στα ενεργητικά συστήματα θέρμανσης- ψύξης, η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται χρησιμοποιώντας κάποιου είδους συλλέκτες, για παράδειγμα δεξαμενές νερού. Νερό αποθηκευμένο σε πλαστικό, σε fiberglass, το οποίο χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικό, είναι κατασκευασμένο από άμμο και ανόργανα συστατικά και συνήθως υποκαθιστά με ασφάλεια τον ασβέστη, ή σε ατσάλινες δεξαμενές που είναι ' glass-lined' αποτελεί το τυπικό μέσο θερμικής αποθήκευσης σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού, το οποίο διαχωρίζεται από το υπόλοιπο κτίριο με μόνωση. Η ηλιακή ενέργεια που αποθηκεύεται στην μονάδα αποθήκευσης μπορεί να βρίσκεται σε μορφή αισθητής ή και λανθάνουσας θερμότητας και η ενέργεια διανέμεται στο χώρο χρησιμοποιώντας ηλεκτρικές βάνες, ανεμιστήρες ή άλλα μέσα.

Από την άλλη στα παθητικά συστήματα θέρμανσης- ψύξης, η συλλογή, αποθήκευση και διανομή της ενέργειας γίνεται με φυσικά μέσα και γενικότερα, δεν χρησιμοποιείται καθόλου μηχανική ή ηλεκτρική ισχύς ή ηλεκτρονικός έλεγχος. Σε αυτά τα συστήματα, στοιχεία του κτιρίου όπως οι τοίχοι, η οροφή, τα παράθυρα επιλέγονται και τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμμετέχουν στην συλλογή, αποθήκευση, μεταφορά και διανομή της θερμικής ενέργειας. Τόσο τα στοιχεία του κτιρίου, όπως είναι τα κατασκευαστικά του υλικά (πέτρες, τούβλα τσιμέντο, νερό, μόνωση και άλλα) και οι διάφορες θερμικές διεργασίες όπως η θερμική ακτινοβολία, η φυσικά και η εξαναγκασμένη συναγωγή, η αγωγή, η εξάτμιση και άλλα, συνδυάζονται ποικιλοτρόπως ανάλογα με τις ιδιαίτερες ανάγκες του κάθε κτιρίου, οι οποίες εξαρτώνται και πάλι από το κλίμα της περιοχής και το σκοπό κατασκευής του. Τα κατασκευαστικά υλικά, δηλαδή τα τούβλα, οι πέτρες, το τσιμέντο, το pcm και άλλα, βοηθούν στην αποθήκευση σεβαστών ποσοτήτων ενέργειας και στην χρονική

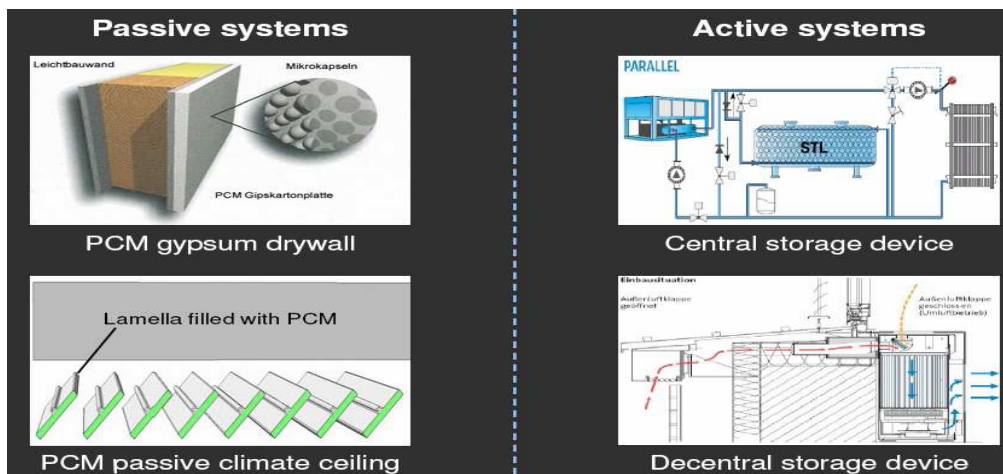
καθυστερήση και μείωση της έντασης του κύματος θερμότητας. Κατά την διάρκεια της ημέρας, η θερμότητα αποθηκεύεται σε αυτά τα υλικά και αποδίδεται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν είναι πιο απαραίτητη.

Τα συστήματα αποθήκευσης για παθητικής μορφής θερμότητα περιλαμβάνουν το άμεσο και το έμμεσο κέρδος. Στο άμεσο κέρδος, η θερμότητα λαμβάνεται μέσω ενός παραθύρου, ενός τοίχου ή ενός γυαλιού με νότιο προσανατολισμό, μέσω του πατώματος ή και μέσω αντικειμένων λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, η περιοχή του κτιρίου που θερμαίνεται τείνει να υπερθερμανθεί. Επιπλέον οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι συνήθως υψηλότερες από αυτές που δίνουν την αίσθηση της θερμικής άνεσης στον άνθρωπο. Μία αποτελεσματική μέθοδος για την μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων είναι η εισαγωγή ενός τοίχου αποθήκευσης θερμότητας ανάμεσα στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία και στο κτίριο. Αυτό αποτελεί το έμμεσο κέρδος. Παθητικά συστήματα έμμεσου κέρδους είναι για παράδειγμα ο τοίχος Trombe και ο τοίχος νερού.



Εικόνα 5.9.12.1.1:Τοίχος Trombe [62]

Γενικότερα, η εφαρμογή των pcm σε παθητικά συστήματα υπερέχει των συστημάτων που χρησιμοποιούν αισθητή θερμότητα κυρίως λόγω της μικρότερης μάζας και όγκου του απαιτούμενου συστήματος, της ποσότητας ενέργειας που αποθηκεύεται σε μία σχετικά σταθερή θερμοκρασία και των μικρότερων απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον συγκριτικά με τα συνηθισμένα συστήματα.



Εικόνα 5.9.12.1.2: Παραδείγματα ενεργητικών και παθητικών συστημάτων

5.9.12.2 Δομικά υλικά

Η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας στην πέτρα είχε παρατηρηθεί από τους αρχαίους χρόνους και είχε αξιοποιηθεί στην κατασκευή κατοικιών.[39] Η χρήση όμως υλικών που αποθηκεύουν ενέργεια με τη μορφή αισθητής θερμότητας, παρουσιάζει συγκεκριμένα προβλήματα όπως για παράδειγμα την υπερβολική ποσότητα υλικού που απαιτείται, καθώς επίσης και τις μεγάλες διακυμάνσεις στο θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο κυμαίνεται η θερμοκρασία του υλικού αποθήκευσης.[40]

Πίνακας 5.9.12.2.1: Ιδιότητες υλικών

Ιδιότητα	Πέτρα	Νερό	Οργανικό ΥΑΦ	Ανόργανο ΥΑΦ
Πυκνότητα (kg/m ³)	2240	1000	800	1600
Ειδική Θερμοχωρητικότητα (kJ/kg)	1.0	4.2	2.0	2.0
Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/kg)	---	333	190	230
Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/m ³)	---	33	152	368
Μάζα Υλικού για 1MJ (kg)	67000	16000	5300	4350
Όγκος Υλικού για 1MJ (m ³)	30	16	6.6	2.7
Σχετική Μάζα Υλικού	15	4	1.25	1.0
Σχετικός Όγκος Υλικού	11	6	2.5	1.0

Τα δομικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα στα κτίρια παραμένουν στη στερεή κατάσταση σε ολόκληρο το εύρος θερμοκρασιών χρήσης τους.[41] Ομοίως συμπεριφέρονται και τα κλασσικά δομικά υλικά τα οποία ως χαρακτηριστικό έχουν την αντίσταση που προβάλλουν στη διαμέσου τους ροή της θερμότητας. Αντίθετα με αυτή την προσέγγιση μόνωσης των κτιρίων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν υλικά που αποθηκεύουν τη θερμότητα που εισέρχεται στο κτίριο από το κέλυφος του κατά την περίοδο του θέρους, ώστε να μην αυξηθεί η θερμοκρασία των χώρων, ή να αποθηκεύουν τη θερμότητα που προσπίπτει στο κτίριο υπό τη μορφή ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας κατά το χειμώνα.[42]

Για χρήση στις κατασκευές τα ΥΑΦ πρέπει να έχουν σημείο τήξης λίγο μεγαλύτερο της θερμοκρασίας δωματίου, ώστε σε συνήθεις συνθήκες δωματίου να είναι στερεό. Κάθε αλλαγή θερμοκρασίας προκαλεί τήξη του υλικού, οπότε και απορρόφηση θερμότητας από το περιβάλλον. Πτώση της θερμοκρασίας θα έχει ως αποτέλεσμα απελευθέρωση ενέργειας ξανά προς τον περιβάλλοντα αέρα.

Η βασική ιδέα των συστημάτων αποθήκευσης ως μέσα εξοικονόμησης ενέργειας είναι η μετατόπιση των μέγιστων της ενεργειακής ζήτησης της

εγκατάστασης σε ώρες μη αιχμής, ή η εξομάλυνση της καμπύλης ενεργειακής ζήτησης της εγκατάστασης ώστε να μην παρουσιάζονται σημεία αιχμής κατά την 24ωρη λειτουργία της, άρα μικρότερα θερμικά και ψυκτικά φορτία.

Έρευνες και εφαρμογές που έχουν γίνει και γίνονται αποδεικνύουν ότι δομικά υλικά τα οποία έχουν εμπλουτιστεί με ΥΑΦ καθώς και εγκαταστάσεις που περικλείουν ΥΑΦ μπορούν να αποθηκεύσουν 5-14 φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου από τα συμβατικά δομικά υλικά.

Η εφαρμογή των ΥΑΦ στην τοιχοποιία μπορεί να γίνει είτε με χρήση των ΥΑΦ αυτούσιων (σαν στρώμα υλικού μέσα στα υλικά του τοίχου), ή σαν συστατικό σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ή το γύψο (γυψοσανίδες ή σοβάς με ΥΑΦ). Η χρήση των ΥΑΦ σε γυψοσανίδα συνήθως γίνεται σε αναλογία 20-30% κατά βάρος. Ειδικά για τη χρησιμοποίηση οργανικών ΥΑΦ η χρήση τους σε συνδυασμό με μη αναφλέξιμα και πυρασφαλή υλικά εξασφαλίζει εν μέρει την μη αναφλεξιμότητα του τελικού προϊόντος. Η ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε τσιμέντο ή γύψο εξασφαλίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τη συγκράτηση του υλικού ακόμη και μετά την πλήρη υγροποίησή του, καθώς και την μη πρόσληψη υγρασίας από τον αέρα του περιβάλλοντος. Σε πολλές περιπτώσεις πριν την ενσωμάτωση του ΥΑΦ (πχ λιπαρά οξέα, ένυδρα άλατα) σε κάποιο δομικό υλικό είναι απαραίτητη η προσθήκη κάποιου καλύμματος στο ΥΑΦ. Για την κατηγορία των παραφινών πειραματικές μελέτες απέδειξαν τη συμβατότητά τους με το τσιμέντο ή το γύψο και γι' αυτό το λόγο έχουν χρησιμοποιηθεί δομικά υλικά εμποτισμένα με παραφίνες.

Το πλέον προσιτό δείγμα χρήσης των ΥΑΦ ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία τους είναι στην τοιχοποιία. Κατά τη θερινή περίοδο η θερμότητα από το περιβάλλον εισέρχεται στο κέλυφος του κτιρίου διαπερνώντας τα στρώματα των δομικών υλικών και αντιμετωπίζει τη θερμική αντίσταση της μόνωσης. Σε κοινή κατασκευή τοιχοποιίας όση θερμότητα διαπεράσει το στρώμα της μόνωσης θα εισέλθει στον εσωτερικό χώρο. Στην περίπτωση τοιχοποιίας με ΥΑΦ αυτή η θερμότητα δεν θα εισέλθει στο χώρο, καθώς θα αποθηκευτεί στο στρώμα του ΥΑΦ.

Στην χειμερινή περίοδο, ο αέρας του εσωτερικού χώρου έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από το εξωτερικό περιβάλλον. Αντίστοιχα λοιπόν, η στρώση ΥΑΦ αποθηκεύει όση θερμότητα έχει διαφύγει από τα στρώματα του τούβλου, του σοβά και της μόνωσης.

Η εμπορική περιοχή των υλικών αλλαγής φάσης είναι γεμάτη από παραδείγματα εταιριών και οργανισμών οι οποίοι αποφάσισαν να ασχοληθούν με τα ΥΑΦ, ανέπτυξαν κάποια προϊόντα, τα διέθεσαν στο εμπόριο και για κάποιους λόγους τελικά οδηγήθηκαν στην οικονομική καταστροφή. Οι λόγοι είναι αρκετοί, άλλοι περισσότερο και άλλοι λιγότερο προφανείς, το ίδιο όμως σημαντικοί, όπως τελικά αποδείχθηκε, για τη βιωσιμότητα της επιχείρησης που τα αναπτύσσει. Αυτό σκιαγραφεί το πόσο λεπτομερή σχεδίαση και μελέτη προϋποθέτει ένα θερμικό σύστημα με ΥΑΦ.

Οι βασικότεροι λόγοι εμπορικής αποτυχίας προϊόντων ΥΑΦ :

- Κακή επιλογή υλικού, συχνά περιλαμβάνοντας χημικά τα οποία δεν εμφάνιζαν ομοιόμορφη τήξη εξ ορισμού, οπότε εμφανίζονταν μεγάλη απώλεια αποθηκευτικής ικανότητας ύστερα από συγκεκριμένο αριθμό κύκλων λειτουργίας, οδηγώντας σε αποσύνθεση του υλικού.
- Κακή επιλογή μεθόδου ή και υλικού συσκευασίας του ΥΑΦ, οδηγώντας σε διαβρωτικά φαινόμενα και μειωμένα επίπεδα στεγανότητας.

- Κακός σχεδιασμός, γεγονός που οδηγούσε στην κατασκευή προϊόντων τα οποία ήταν ασύμβατα με τα δομικά υλικά ή με το όποιο σύστημα για το οποίο το αρχικό προϊόν προοριζόταν.

Κατά τα τελευταία 30 χρόνια, η τεχνολογία επέτρεψε τη δημιουργία και την ανάπτυξη μικροσυσκευασμένων ΥΑΦ σε κάψουλες, μορφή η οποία είναι ιδανική για τη χρήση σε συνεργασία με δομικά υλικά οποιασδήποτε μορφής. Πλέον η χρήση τέτοιων υλικών θεωρείται δεδομένη σε κτίρια τα οποία σχεδιάζονται να είναι υψηλής ενεργειακής απόδοσης και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.

Παρ' ότι η έρευνα γύρω από τα πλεονεκτήματα κάθε μορφής ακόμα συνεχίζεται, φαίνεται πως τα ένυδρα άλατα έχουν μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα μαζί με μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Οι παραφίνες είναι επίσης εύφλεκτες, ενώ τα ένυδρα άλατα όχι. Κατά την τοποθέτησή τους σε τοίχους κτιρίων, δεν έχει παρατηρηθεί ότι τα ΥΑΦ εκλύουν βλαβερά αέρια, αλλά οι παραφίνες είναι σημαντικά τοξικότερες από τα ένυδρα άλατα. Οι πειραματικές ενδείξεις ύστερα από ενδελεχή εξέταση τείνουν να καταδείξουν την υπεροχή των ένυδρων αλάτων σε βάρος των παραφινών όσον αφορά στη χρηστικότητά τους ως υλικά αλλαγής φάσης.

5.9.12.3 Τοιχοποιία

Παρότι έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες γύρω από πειράματα με χρήση διαφόρων ΥΑΦ σε διαφορετικούς τύπους τοίχων, δεν έχει έως τώρα κανείς καταλήξει σε μία οικουμενική μέθοδο χρήσης των ΥΑΦ σε τοίχους, η οποία να παρέχει γενικές κατευθύνσεις χρήσης και εγκατάστασης, καθώς και τεχνικά-θερμικά μεγέθη και γενικές οδηγίες για την τελική επιλογή του είδους, της ποσότητας και του τρόπου εφαρμογής του ΥΑΦ σε τοίχο, με βάση τις εκάστοτε κλιματολογικές συνθήκες.[43], [44]

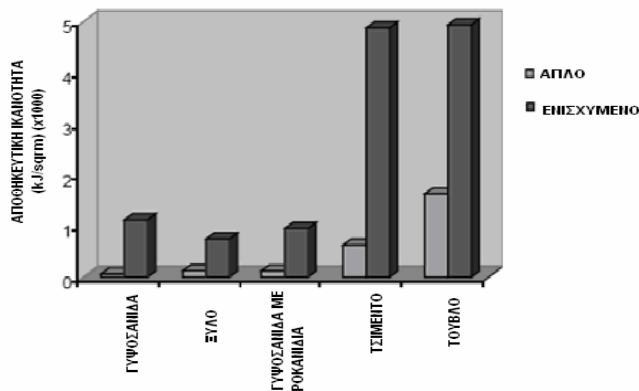
Είναι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι η θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ καθορίζει τη βέλτιστη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας του τοίχου, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας.[45] Σύμφωνα με ερευνητικά αποτελέσματα αποδεικνύεται πως ο αποδοτικότερος τρόπος ρύθμισης του τοίχου, επιτυγχάνεται με επιλογή ΥΑΦ του οποίου η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ κοντά με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία του τοίχου και όχι του περιβάλλοντος.[46]

Εξισώνοντας τη θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ με τη μέση ημερήσια του τοίχου μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το μεγαλύτερο μέρος της αποθηκευτικής ικανότητας του ΥΑΦ, καθώς και να πετύχουμε την εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στον εσωτερικό χώρο.[47] Αφού λοιπόν δύναται να υιοθετηθεί μία μόνο θερμοκρασία αλλαγής φάσης (χρήση ενός μόνο ΥΑΦ) αποδεικνύεται πως αυτή η θερμοκρασία θα πρέπει να κυμαίνεται γύρω από τη συνολική μέση θερμοκρασία του τοίχου, δηλαδή τη μέση τιμή της ημερήσιας θερμοκρασίας και την μέση τιμή της συνάρτησης της θερμοκρασίας του τοίχου σε σχέση με το πάχος του.

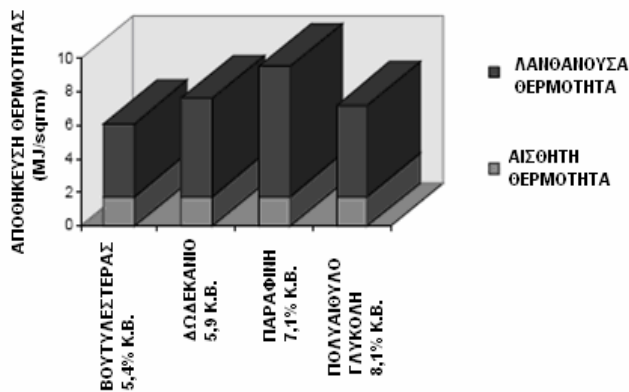
Για παράδειγμα ο αποδοτικός σχεδιασμός ενός νότιου εξωτερικού τοίχου ο οποίος χρησιμοποιείται για απορρόφηση ενέργειας ώστε να δύναται να παρέχει μία καθυστέρηση στο φαινόμενο μεταφοράς της θερμότητας της τάξης των 10 ωρών, απαιτεί παχύ στρώμα τσιμέντου 12-16in (31-41cm).[48],[49] Αυτός ο όγκος περιορίζει την ευελιξία του κατασκευαστή σε θέματα κάτοψης και γενικότερου σχεδιασμού εσωτερικού ή εξωτερικού και δεν συμβαδίζει με την ελαφρού τύπου κατασκευή που υιοθετείται στις κατοικίες τα τελευταία χρόνια. Επίσης, αφού η

θερμότητα σε τέτοιες εφαρμογές αποθηκεύεται υπό μορφή αισθητής, βάσει της θερμοχωρητικότητας των υλικών του τοίχου, μπορεί πολύ εύκολα να παρατηρηθεί το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του χώρου, φαινόμενο το οποίο αντιτίθεται στη λεγόμενη ανθρώπινη θερμική άνεση και ως εκ τούτου ελαττώνει δραματικά τη χρηστικότητα του μελετούμενου χώρου.[50]

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα αυτά που προκύπτουν από τις κλασσικές εγκαταστάσεις των παθητικών ηλιακών συστημάτων. Σε συστήματα λανθάνουσα θερμότητας, χρησιμοποιείται ένα ΥΑΦ για να απορροφά ή να αποβάλλει αντίστοιχα, σημαντικό ποσό θερμότητας κατά τις μεταβάσεις φάσεων στις οποίες αυτό υποβάλλεται, ενώ η θερμοκρασία του παραμένει πρακτικά σταθερή. Η αποθηκευτική ικανότητα των κλασσικών οργανικών ΥΑΦ (παραφίνες, λιπαρά οξέα) είναι συνήθως μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ικανότητα των παραδοσιακών δομικών υλικών (τσιμέντο, πέτρα, τούβλο, ξύλο, κλπ), αναφορικά πάντα με την ίδια ποσότητα μάζας. Επομένως η ίδια αποθηκευτική ικανότητα επιτυγχάνεται με πολύ λιγότερη μάζα. [51],[52]



Εικόνα 5.9.12.3.1: Σύγκριση της αποθηκευτικής ικανότητας απλής και ενισχυμένης εκδοχής κλασσικών δομικών υλικών.



Εικόνα 5.9.12.3.2: Αποθηκευτική ικανότητα τυπικού σκυροδέματος ενισχυμένου με διαφορετικό ΥΑΦ ανά περίπτωση

Όπως αποδεικνύεται, είναι δυνατή η σημαντική μείωση του πάχους του τοίχου, με συγκριτικά παρόμοιες θερμικές ιδιότητες, με τη χρήση παραφίνης σε τυπικό τοίχο Trombe. Αυτό ανοίγει νέους ορίζοντες στη χρήση ΥΑΦ σε ελαφρές κατασκευές με παθητικά ηλιακά συστήματα. Η χρήση ΥΑΦ με κατάλληλο σημείο τήξης εξομαλύνει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο εσωτερικό του χώρου, ελαττώνει την πιθανότητα εμφάνισης υπερθέρμανσης στον εσωτερικό χώρο και γενικότερα ενισχύει την αίσθηση θερμικής άνεσης στο εσωτερικό.

Ακόμα, η πρακτικά σταθερή θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο εσωτερικό του κτιρίου, ελαττώνει την πιθανότητα εμφάνισης υψηλού θερμικού φορτίου θέρμανσης ή ψύξης, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη χρήση μικρότερων θερμαντικών και κλιματιστικών σωμάτων, που ως γνωστό λειτουργούν με καλύτερο βαθμό απόδοσης συγκριτικά με τις μεγαλύτερες μονάδες.

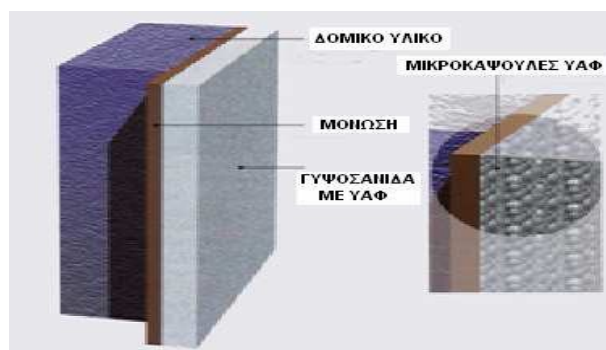
Τις τελευταίες δεκαετίες υπήρξαν αρκετές μελέτες που κατέδειξαν τα οφέλη από τη χρήση ΥΑΦ σε κτίρια. Οι μελέτες αυτές περιλαμβάνουν παραδείγματα ενσωμάτωσης τέτοιων υλικών στα παραδοσιακά δομικά υλικά, όπως γυψοσανίδες και μπλοκ τσιμέντου (τσιμεντόλιθοι), για εξοικονόμηση ενέργειας και ενίσχυση της αίσθησης θερμικής άνεσης. Εξετάστηκαν υλικά όπως λιπαρά οξέα, οκταδεκάνιο και συγκεκριμένοι τύποι παραφίνης με σημεία τήξης κοντά στη θερμοκρασία δωματίου.

Η χρήση ΥΑΦ σε γυψοσανίδες μπορεί να καταλήξει σε απόσβεση επένδυσης λόγω οικονομίας στην κατανάλωση ενέργειας μέσα σε τρία με πέντε χρόνια. Ακόμα και αν υπάρχουν αρκετές επιβεβαιωμένες επιτυχίες προσπάθειες, υπάρχει ακόμα ανάγκη κατάληξης σε ένα οικουμενικό μοντέλο μελέτης και εφαρμογής ΥΑΦ στα δομικά υλικά ικανό να εφαρμοστεί και να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα-συμπεράσματα σε πραγματικές μικρότερης ή μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές.

Η αποτελεσματικότητα μιας τέτοιας προσπάθειας εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής, από τα χαρακτηριστικά του φορτίου του εξεταζόμενου χώρου και τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του επιλεγμένου ΥΑΦ. Αριθμός μελετών ασχολήθηκε με διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες και κατέληξαν στο συμπέρασμα πως για κάθε δεδομένη εφαρμογή με γνωστά κλιματολογικά μεγέθη καθώς και γνωστές πληροφορίες γύρω από το προφίλ του φορτίου, η επιτυχία του συστήματος βασίζεται στο μεγαλύτερο βαθμό της στην επιλογή του σημείου τήξης του ΥΑΦ.

Η εύρεση του κατάλληλου σημείου τήξης είναι μία πρόκληση για κάθε τέτοια εφαρμογή. Προτείνεται γενικά ότι η ημερήσια αποθηκευόμενη ενέργεια από ένα ΥΑΦ μεγιστοποιείται όταν το σημείο τήξης του είναι κοντά στη μέση ημερήσια θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο χώρο.

Διάφορα ΥΑΦ, συνήθως κάποια παραφίνη μπορούν να προστεθούν σε γυψοσανίδα ή σοβά ή κάποιο άλλο επενδυτικό υλικό τοιχοποιίας, δημιουργώντας ένα είδος δομικού υλικού που λειτουργεί σαν αποθηκευτικό υλικό. Το ΥΑΦ στερεοποιείται ελευθερώνοντας θερμότητα όταν είναι διαθέσιμες ψυκτικές πηγές, και υγροποιείται απορροφώντας θερμότητα όταν απαιτείται ψύξη. Τα ΥΑΦ προσφέρουν σημαντική αλλαγή στη θερμοχωρητικότητα μιας εγκατάστασης και για καθαρές ουσίες ελευθερώνουν την αποθηκευμένη θερμότητα με σχεδόν μηδενική αλλαγή στη θερμοκρασία τους.



Εικόνα 5.9.12.3.3: Εφαρμογή ενισχυμένης γυψοσανίδας σε τοίχο

Τα ΥΑΦ επιτρέπουν στην αποθήκευση θερμότητας να γίνει μέρος των κτιρίων, επιτρέποντας σημαντική αποθήκευση θερμότητας χωρίς αλλαγή θερμοκρασίας δωματίου. Ακριβώς επειδή η θερμότητα αποθηκεύεται μέσα στο κτίριο, εκεί όπου λαμβάνουν χώρα και υπολογίζονται τα φορτία, και όχι εξωτερικά, δεν απαιτείται επιπλέον μεταφορά ενέργειας.

Η αυξημένη αποθηκευτική ικανότητα της ενισχυμένης γυψοσανίδας, μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία δωματίου κοντά στο ανώτατο όριο ανθρώπινης θερμικής άνεσης, χωρίς μηχανικό σύστημα κλιματισμού. Σε περιοχές όπου λόγω κλίματος, κατά τη διάρκεια της ημέρας έχουμε μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα εξαερισμού κατά τη διάρκεια της νύχτας για να απομακρύνει την αποθηκευμένη θερμότητα από τη γυψοσανίδα.

Αναγνωρίστηκαν αμέσως οι προοπτικές εφαρμογής μιας τέτοιας μεθόδου καθώς επίσης και τα πιθανά οφέλη από κάτι τέτοιο, αφού πλέον στις ΗΠΑ μόνο κατασκευάζονται πάνω από 7 δισεκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα γυψοσανίδας ετησίως. Επίσης αναγνωρίστηκαν οι ικανότητες μιας τέτοιας εφαρμογής στο να ελαττώνει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εντός του χώρου και βέβαια να ενισχύει τη θερμική άνεση.

Ακολούθησαν άλλα ερευνητικά προγράμματα τα οποία πειραματίστηκαν με τη θερμοκρασία τήξης, το υλικό και τις μεθόδους μικροσυσκευασίας, καθώς και την επίδραση του υλικού στη γυψοσανίδα στους τομείς της δομικής αντοχής, εξωτερικής επιφάνειας, ασφάλειας και λειτουργικότητας.

Οι ερευνητές κατέληξαν σε δύο κύριους τρόπους συνδυασμού της κλασσικής γυψοσανίδας με ΥΑΦ:

- Η πρώτη μέθοδος, αποτελεσματική αν και κάπως πρωτόγονη, υπαγορεύει τη βύθιση της έτοιμης γυψοσανίδας σε λεκάνη με υγρό ΥΑΦ (συνήθως παραφίνη), ώστε το πορώδες υλικό της γυψοσανίδας να απορροφήσει το ΥΑΦ. Από πειράματα προέκυψε πως μία τυπική δομή γυψοσανίδας μπορεί να απορροφήσει περίπου 30% του βάρους της σε λιγότερο από 10 λεπτά.

- Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει τη μικροσυσκευασία του ΥΑΦ σε κάψουλες σφαιρικής μορφής διαμέτρου 3μm. Τα σφαιρίδια είναι από HDPE και έχουν σκοπό να συγκρατούν το ΥΑΦ όταν αυτό βρίσκεται στην υγρή φάση. Τα σφαιρίδια ανακατεύονται με την πρώτη ύλη της γυψοσανίδας κατά το στάδιο της κατασκευής και διαμόρφωσης της τελευταίας.

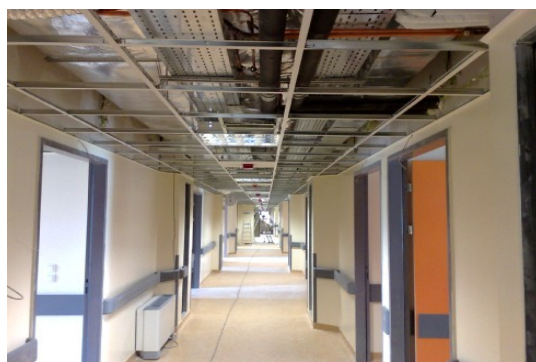
Μερίδα ερευνών επίσης επικεντρώθηκε στη μελέτη αναφλεξιμότητας του τελικού προϊόντος. ,δοκιμές απέδειξαν ότι ο περιορισμός του κατά βάρους ποσοστού του προστιθέμενου ΥΑΦ στο 15 με 20% καθώς επίσης και η επίστρωση της γυψοσανίδας με πυροπροστατευτικό υλικό, ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο ανάφλεξης της γυψοσανίδας, πράγμα ούτως ή άλλως ελάχιστα πιθανό, κυρίως λόγω της χαμηλής τάσης ατμών των παραφινούχων ουσιών.



Εικόνα 5.9.12.3.4 : Σύγχρονη ελαφρού τύπου κατασκευή, εφοδιασμένη με γυψοσανίδες με ΥΑΦ

Τα ΥΑΦ μπορούν να γίνουν ενεργό κομμάτι της οικοδομής όχι μόνο σε κατοικίες αλλά σε όλα τα κτίρια γενικότερα, με την ευρεία χρήση τους στα δομικά υλικά. Μπορούν να παρέξουν σταθερές εσωτερικές συνθήκες χωρίς μηχανική κλιματιστική υποβοήθηση σε πολλές περιπτώσεις κτιρίων με έντονη δραστηριότητα, αλλά κυρίως με έντονες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του χώρου:

- Αίθουσες διδασκαλίας, αμφιθέατρα, αίθουσες συνεδριάσεων
- Κέντρα διασκέδασης, εστιατόρια, αίθουσες χορού, αίθουσες κινηματογράφου
- Αθλητικές αίθουσες, κλειστά γήπεδα ή στάδια
- Γραφεία
- Η χρήση τους είναι τόσο αποτελεσματική, που με λίγο πιο προσεκτική μελέτη θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε χώρους όπου η διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική, όπως:
- Αποθήκες φαρμάκων ή άλλων χημικών
- Αποθήκες τροφίμων των οποίων η διατήρηση απαιτεί θερμοκρασίες σταθερά χαμηλότερες από ένα συγκεκριμένο όριο.
- Αίθουσες ηλεκτρονικών υπολογιστών ή άλλου ευαίσθητου (και συνήθως ακριβού) ηλεκτρονικού εξοπλισμού.
- Αίθουσες νοσοκομείων, χειρουργεία



Εικόνα 5.9.12.3.5 : Γυψοσανίδες σε νοσοκομείο

Οι τοίχοι με μόνωση που περιέχει ΥΑΦ έχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους και τα αντίστοιχα υλικά μόνωσης στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Επειδή η επιφάνεια που εκτίθεται είναι μεγάλη και το ΥΑΦ απορροφά θερμότητα σε ένα μικρό μόλις θερμοκρασιακό εύρος, πρέπει το τμήμα που περιέχει το ΥΑΦ να μην έρχεται σε άμεση επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία. Η μόνωση με ΥΑΦ έχει πολύ μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά είδη μόνωσης και προσφέρει εξαιρετική μετάδοση θερμότητας. ,ενέχει ιδιαιτερότητες ως προς την εγκατάστασή του, οπότε και το όποιο επιπλέον κόστος εγκατάστασης είναι πολύ μικρό.

Παρ' όλα αυτά υπάρχουν και μερικά μειονεκτήματα, όπως η ιδιαιτερότητα σχεδιασμού για κάθε ξεχωριστό κλίμα, ένα σημείο τήξης μπορεί να εξυπηρετεί άριστα ένα κλίμα, αλλά το πιθανότερο είναι ότι δεν εξυπηρετεί καθόλου όλα τα άλλα.

Όπως είναι εύκολα κατανοητό, η εύρεση της κατάλληλης θερμοκρασίας είναι διπλά (κυριολεκτικά) δύσκολο πρόβλημα όταν μιλάμε για κλίματα με ανάγκη και για ψυκτικές και για θερμαντικές συσκευές. Οι κατασκευαστές δεν είναι διατεθειμένοι να περιπλέξουν την παραγωγική τους διαδικασία, ώστε να λάβουν υπ' όψη τις κλιματολογικές ιδιαιτερότητες. Η διαδικασία κατά την οποία η εμφύσηση της γυψοσανίδας γίνεται στον τόπο τοποθέτησής της, ενδέχεται να χωλαίνει από πλευράς ελέγχου τελικής ποιότητας. Άλλα σημεία που ενδεχομένως χρίζουν μνείας ή προσοχής, είναι η εμφάνιση επιφανειακών ασταθών ατελειών (“bloomng”), βραδυφλεγία, διάβρωση μετάλλων, οσμή, και τα «παραδοσιακά» θέματα σε τέτοιου είδους εφαρμογές, όπως για παράδειγμα η ικανότητα της μπογιάς να συγκρατείται επί του τοίχου (της γυψοσανίδας).

Υπάρχουν σπουδαίες προοπτικές για την επικράτηση των γυψοσανίδων με ΥΑΦ. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν ακόμα αρκετές τεχνικές και διάφορα θέματα τα οποία πρέπει να τεθούν υπό εξέταση, προτού οι γυψοσανίδες με ΥΑΦ μπου σε γραμμή παραγωγής και γίνουν κοινώς αποδεκτές σαν προϊόν.

5.9.12.4 Συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ΥΑΦ

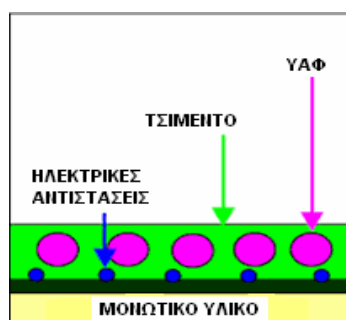
Σήμερα η ενδοδαπέδια θέρμανση παρουσιάζει το μεγάλο πλεονέκτημα της ομοιόμορφης θερμικής άνεσης σε ολόκληρο το χώρο που θερμαίνεται, για ένα φάσμα θερμοκρασιών περίπου 25-28°C.[53] Το περιβάλλον που διαμορφώνει η ενδοδαπέδια

θέρμανση είναι πολύ φιλικό προς τον άνθρωπο, το ίδιο το σύστημα δεν παρουσιάζει προβλήματα ή κινδύνους για τους χρήστες και επίσης δεν παρεμβαίνει στην αισθητική του χώρου, κάτι που καθιστά την εφαρμογή κατάλληλη για οποιοδήποτε είδους εσωτερικό χώρο.[54]

Η ενδοδαπέδια θέρμανση μπορεί να εφαρμοστεί με τα συστήματα ύδατος (θερμά-υγρά) και με τα ηλεκτρικά συστήματα (ξηρά). Στα συστήματα ύδατος, το νερό θερμαίνεται κυρίως με την καύση πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Συνεπώς η εφαρμογή των ΥΑΦ δεν προσφέρει κάποιο ιδιαίτερο πλεονέκτημα αν έχουμε σαν πρώτη ύλη συμβατικά καύσιμα. Αυτό δεν συμβαίνει και στην περίπτωση που η ενδοδαπέδια χρησιμοποιείται για να συνδυαστεί με κάποιο σύστημα που θα εκμεταλλεύεται κάποια διαφορετική πηγή ενέργειας, όπως η ηλιακή.[55]

Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση νερού. Αν για τη χρονική στιγμή που θερμαίνεται το νερό δεν υπάρχουν απαιτήσεις θέρμανσης του χώρου ή/και ζεστού νερού χρήσης, τότε η θερμική ενέργεια θα πρέπει να αποθηκευτεί. Η αποθήκευση αυτή μπορεί να γίνει στο ΥΑΦ που βρίσκεται στο δάπεδο, αφού προορίζεται για τη θέρμανση του χώρου. Η φόρτιση του ΥΑΦ εξασφαλίζει θερμότητα για μετέπειτα χρήση.

Από την άλλη πλευρά, τα ηλεκτρικά συστήματα, μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα ΥΑΦ, εκμεταλλευόμενα το χαμηλό κοστολόγιο του ηλεκτρισμού στις ώρες μη αιχμής. Στο σύστημα αυτό, χρησιμοποιούνται κυρίως σφαιρίδια ΥΑΦ που καλύπτουν τις ηλεκτρικές αντιστάσεις.



Εικόνα 5.9.12.3.1 : Διάταξη ξηρού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης

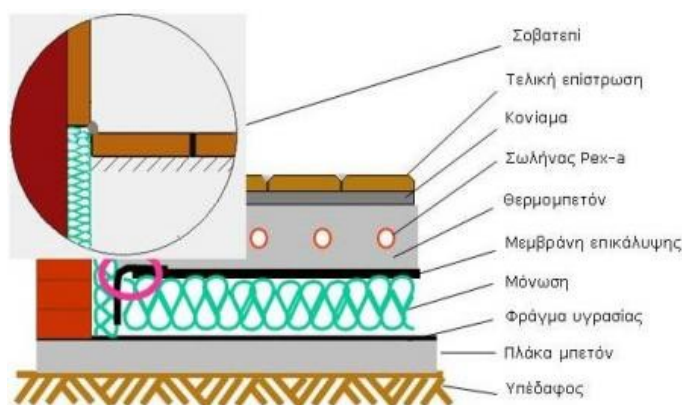
Η λειτουργία της εγκατάστασης, προορίζεται κυρίως για τις ώρες μη αιχμής, προσφέροντας θερμότητα από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Τη θερμότητα αυτή πρώτα θα απορροφήσουν οι κόκκοι του ΥΑΦ που περιβάλλουν τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Η θερμότητα αυτή, αρχικά θα αποθηκευτεί με τη μορφή της αισθητής θερμότητας στο ΥΑΦ, μέχρι να φτάσει το σημείο τήξης του. Μια αντιπροσωπευτική τιμή για το σημείο τήξης των ΥΑΦ για τις εν λόγω εφαρμογές είναι οι 28°C. Μόλις το ΥΑΦ φτάσει το σημείο τήξης του, τότε αρχίζει να λιώνει, αποθηκεύοντας θερμική ενέργεια υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Πρακτικά, ένα μικρό ποσοστό από την παραγόμενη στις αντιστάσεις θερμότητα διαφεύγει από το ΥΑΦ και κατευθύνεται προς τη βάση του πατώματος, πριν ακόμα το ΥΑΦ αποκτήσει την ονομαστική λανθάνουσα θερμότητα. Η ροή θερμότητας προς την αντίθετη κατεύθυνση συναντά τη μεγάλη θερμική αντίσταση της θερμομόνωσης και είναι ανεπιθύμητη.

Η λειτουργία του συστήματος συνεχίζει φορτίζοντας τους κόκκους με τα ΥΑΦ μέχρι να αποθηκευτεί η μέγιστη λανθάνουσα θερμότητα στο σύστημα. Από εκείνη τη στιγμή και μετά, όλη η θερμότητα που παράγεται στις ηλεκτρικές αντιστάσεις κατευθύνεται στο χώρο, αφού έχει πρώτα αποθηκευτεί στη βάση του δαπέδου της κατασκευής. Η διαδικασία που αναλύθηκε παραπάνω εμφανίζει ως χρονική καθυστέρηση το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που μπαίνει σε λειτουργία η εγκατάσταση θέρμανσης, μέχρι τη στιγμή που θα φορτιστεί πλήρως το ΥΑΦ. Αυτήν την χρονική καθυστέρηση πρέπει να εκμεταλλευτούμε για να επιτύχουμε μείωση του κόστους λειτουργίας της εγκατάστασης.

Όταν οι ηλεκτρικές αντιστάσεις σταματήσουν να λειτουργούν, το σύστημα συνεχίζει να λειτουργεί. Η θερμότητα που προσφέρεται στο χώρο από το σύστημα προέρχεται από την αποφόρτιση των κόκκων. Με άλλα λόγια το ΥΑΦ αρχίζει να αποφορτίζεται, προσφέροντας στο χώρο τη λανθάνουσα θερμότητα που είχε αποθηκεύσει από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Το χρονικό διάστημα που θα συνεχίσει να λειτουργεί το σύστημα μετά από τη διακοπή λειτουργίας των αντιστάσεων, είναι ο χρόνος αποφόρτισης του ΥΑΦ.

Σήμερα στην ενδοδαπέδια θέρμανση, χρησιμοποιείται ένα στρώμα από θερμομεπτόν που καλύπτει τις ηλεκτρικές αντιστάσεις του συστήματος. Η καινοτομία στον τομέα των κατασκευών, έχει να κάνει με την αντικατάσταση του θερμομεπτόν, από το στρώμα κόκκων του ΥΑΦ. Το κόστος των ΥΑΦ για την ενδοδαπέδια θέρμανση δεν είναι σημαντικό, καθώς τοποθετούνται παραφίνες (μικρό κόστος) χωρίς συσκευασία για να επιβαρύνει το κόστος.

Τα αποτελέσματα από τη χρήση των ΥΑΦ κρίνονται ιδιαίτερα θετικά και η χρήση των καινοτομικών συστημάτων που περιλαμβάνουν τα ΥΑΦ φαίνεται να κερδίζει έδαφος στον κτιριακό τομέα, ιδίως έπειτα από την πολύ επιτυχημένη εφαρμογή των ΥΑΦ τοιχοποιία.



Εικόνα 5.9.12.3.2 : Ενδοδαπέδια θέρμανση με PCM

Η εξέταση ενός υλικού όταν αυτό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σαν ΥΑΦ σε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, πρέπει να έχει τρεις βασικούς άξονες:

- Να είναι υλικό το οποίο να αλλάζει φάση από τη στερεή στην υγρή και αντίστροφα μέσα στα θερμοκρασιακά πλαίσια της εφαρμογής και να αποθηκεύει ικανοποιητική ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας.

- Κατάλληλο δοχείο για το υλικό αυτό.
- Μία κατάλληλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας για τη μεταφορά της θερμότητας από το σύστημα προς το δοχείο με το ΥΑΦ και αντίστροφα.

Υπάρχουν επίσης πολλοί άλλοι παράγοντες που θα έπρεπε να εξεταστούν κατά την ανάπτυξη τέτοιου συστήματος, όπως για παράδειγμα δεν είναι αρκετή η μελέτη και κατάληξη σε υλικό κατάλληλων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, αλλά το υλικό αυτό θα πρέπει να είναι συμβατό και με τα υλικά του συστήματος και κυρίως με τα υλικά του δοχείο στο οποίο αυτό συσκευάζεται.

Η εμπειρία από τον σχεδιασμό θερμικών συστημάτων αποθήκευσης, από τα πρώτα ανεπιτυχή, ή μη αποδοτικά συστήματα, μέχρι τα σύγχρονα, προκύπτει ότι υπάρχουν μερικοί βασικοί άξονες πάνω στους οποίους πρέπει να κινηθεί ο σχεδιαστής του συστήματος και συγκεκριμένα σημεία τα οποία χρίζουν προσοχής.

Ένα από τα σημαντικότερα σημεία τα οποία οι πρώτοι σχεδιαστές το παρέβλεπαν, ήταν η ανάλυση του υπονήφιου υλικού και η μελέτη της συμπεριφοράς του ύστερα από συγκεκριμένο αριθμό κύκλων.

Άλλο ένα σημείο το οποίο πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα είναι η δοκιμή αντοχής και διάβρωσης του δοχείου στο οποίο θα βρίσκεται το ΥΑΦ. Πολλές εφαρμογές απέτυχαν να αποδώσουν τα αναμενόμενα όταν κυκλοφόρησαν στο εμπόριο, γιατί τα προηγούμενα δεν είχαν προβλεφθεί, και το ΥΑΦ κατέστρεφε το δοχείο του πιο γρήγορα από τη διάρκεια ζωής του ΥΑΦ.

Από μελέτες και αρκετά επιτυχημένα, πλέον, εμπορικά συστήματα, φαίνεται πως ένα από τα πλέον κατάλληλα υλικά συσκευασίας είναι το υψηλής πυκνότητας πολυουρεθάνιο ([HDPE]-high density polyurethane).

5.9.13 Εφαρμογές σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις

5.9.13.1 Κλιμαστικές εγκαταστάσεις

Η πλέον διαδεδομένη εφαρμογή είναι αυτή της μεγάλης κλίμακας κλιματιστικών εφαρμογών (μεγάλα κτίρια ή ολόκληρα συγκροτήματα εγκαταστάσεων) ή στα συστήματα κρύου νερού. Οι κλιματιστικές εγκαταστάσεις τέτοιου είδους κτιρίων είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για το φορτίο αιχμής, ιδίως τις ζεστές καλοκαιρινές ημέρες, όπου ούτως ή άλλως οι κλιματιστικές εγκαταστάσεις εκ κατασκευής αποδίδουν σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Σε τέτοιες εγκαταστάσεις ένας σχετικά μικρός ψύκτης μπορεί να παράξει μία ποσότητα πάγου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας το νερό κυκλοφορεί διαμέσου του πάγου με αποτέλεσμα να υπάρχει κρύο νερό, το οποίο υπό άλλες συνθήκες θα ήταν το φορτίο που θα καλείτο να καλύψει η κλιματιστική εγκατάσταση.[56]

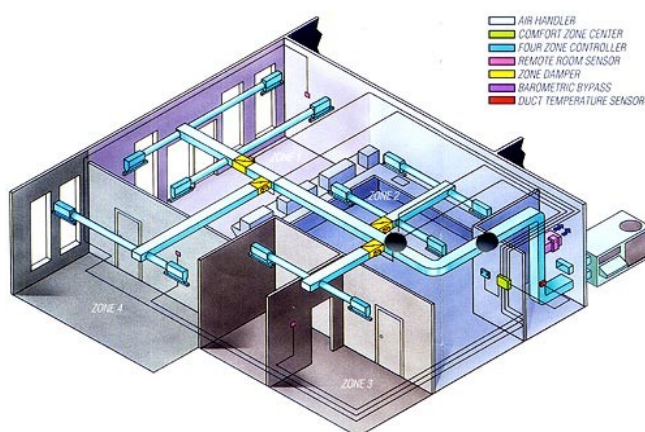
Ένα επιμέρους σύστημα αποθήκευσης ελαττώνει το κόστος της εγκατάστασης αν οι ψύκτες δουλεύουν επί 24ώρου βάσεως. Τη νύχτα παράγουν πάγο, ο οποίος κατά τη διάρκεια της ημέρας χρησιμοποιείται για να ψύξει το νερό ανακυκλοφορίας του κλιματιστικού συστήματος. Ένα τέτοιο σύστημα συνήθως λειτουργεί σε φάση δημιουργίας πάγου 16 με 18 ώρες την ημέρα και σε φάση ψύξης νερού περίπου 6. Το κόστος ελαττώνεται αφού πλέον οι ψύκτες χρειάζεται να έχουν το μισό μέγεθος από μία κλασική εγκατάσταση.

Η απόδοση ψυκτών κλιματισμού μετράτε από τον συντελεστή συμπεριφοράς τους (COP). Θεωρητικά, τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορούν να έχουν ακόμα πιο αποδοτικούς ψύκτες επειδή η θερμότητα απορρίπτεται στον

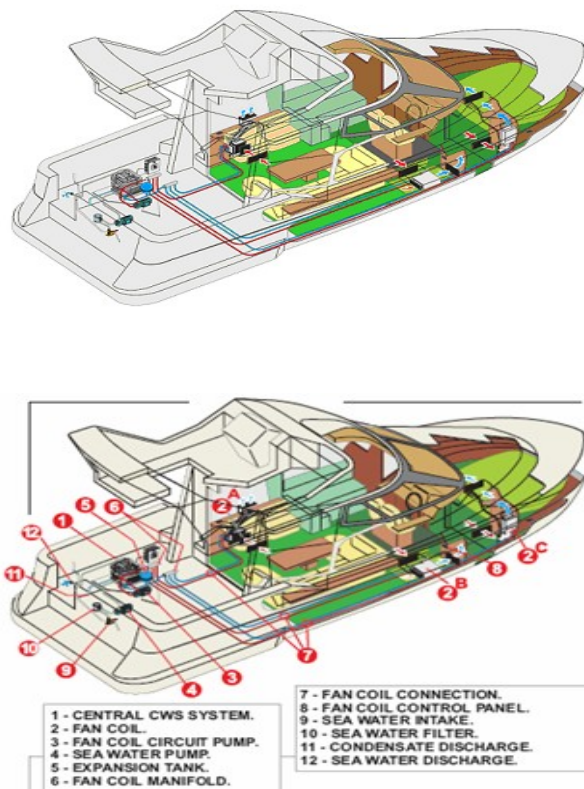
περισσότερο δροσερό νυχτερινό αέρα, παρά στον ζεστότερο ημερήσιο. Στην πράξη όμως αυτό το πλεονέκτημα αντισταθμίζεται από τις θερμικές απώλειες κατά τη διαδικασία σχηματισμού και τήξης του πάγου.[57]

Ακόμα μερικά πλεονεκτήματα αυτών των μεθόδων είναι ότι από τη στιγμή που υπάρχει εξοικονόμηση ενέργειας με τη χρήση αυτής της μεθόδου, εισάγεται λιγότερο καύσιμο από κάθε χώρα, καταναλώνεται λιγότερο καύσιμο γενικότερα και υπάρχουν σημαντικά ωφέλη ως προς την προστασία του περιβάλλοντος αφού όλα τα παραπάνω συνεπάγονται λιγότερη ρύπανση.

Μία νέα άποψη σε αυτές τις τεχνολογίες χρησιμοποιεί τον πάγο σαν συμπυκνωτικό για το ψυκτικό μέσο μιας διάταξης. Σε αυτή την περίπτωση, κλασσικό ψυκτικό μέσο εισάγεται σε σωλήνες όπου και χρησιμοποιείται. Αντί λοιπόν να υπάρχει χρήση μηχανικού συμπιεστή για την επαναφορά του ψυκτικού στην υγρή φάση, όπως συνηθίζεται, χρησιμοποιείται η χαμηλή θερμοκρασία του πάγου για να εκτελέσει αυτή τη διαδικασία. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει στα υπάρχοντα κλασσικά συστήματα κλιματισμού να μετατραπούν σε συστήματα αποθήκευσης, κάτι το οποίο ήταν δύσκολο να επιτευχθεί με την έως τώρα τεχνολογία συστημάτων κρύου νερού.



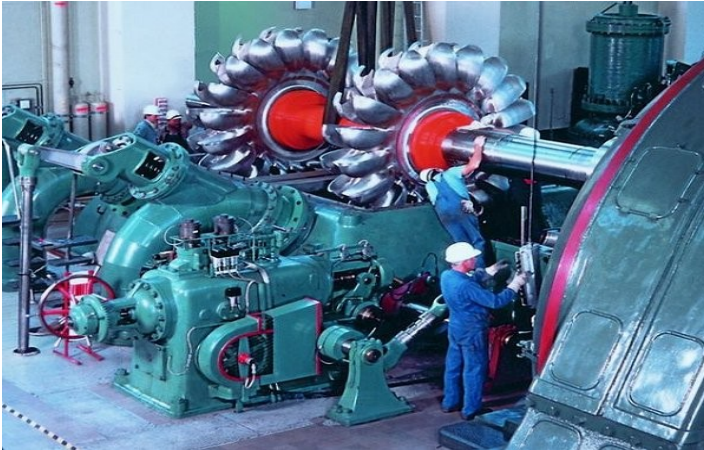
Εικόνα 5.9.13.1 : Εγκαταστάσεις κλιματιστικών μηχανημάτων με συστήματα αεραγωγών κλιματισμού και εξαερισμού σε κτίρια γραφείων, καταστήματα, χώρους συναθροίσεως κοινού, τράπεζες, γυμναστήρια, εστιατόρια κλπ.



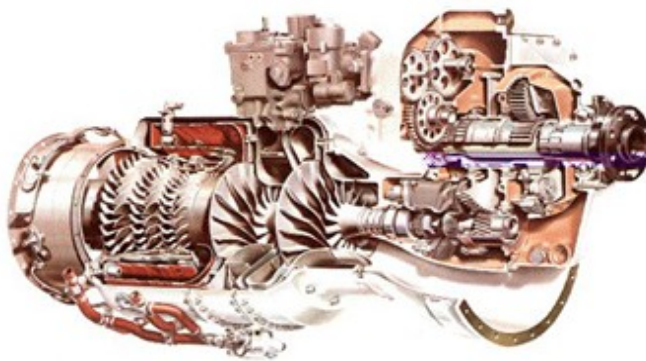
Εικόνα 5.9.13.2 : Σχέδια εγκατάστασης κεντρικής μονάδας CWS 251 RC 25.000BTU/h με τρία fan coils νερού και ατονομία στο σαλόνι και στις δύο καμπίνες

5.9.13.2 Συστήματα βελτίωσης απόδοσης επίγειων στροβιλομηχανών

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε εφαρμογές ψύξης του αέρα εισαγωγής σε στροβιλομηχανές. Αντί να αυξάνεται η ηλεκτρική ζήτηση τις νυχτερινές ώρες, αυτή η τεχνική αυξάνει την παραγωγική ικανότητα της εγκατάστασης.[56] Για την παραγωγή του πάγου κατά τις νυχτερινές ώρες, ο στρόβιλος είναι συχνά συνδεδεμένος με τον μηχανικό συμπιεστή ενός μεγάλου ψύκτη. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, νερό κυκλοφορεί διαμέσω του πάγου, ψύχεται και οδηγείται μέσω σωλήνων στην είσοδο της μηχανής σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Έτσι επιτυγχάνεται η ψύξη του αέρα εισαγωγής σε θερμοκρασίες κοντά στο σημείο στερεοποίησης του νερού, πράγμα που σημαίνει ότι η πυκνότητα του αέρα αυξάνει, άρα ο στρόβιλος απορροφά μεγαλύτερη ποσότητα εργαζόμενου μέσου, άρα επιτυγχάνεται περισσότερη παραγωγή ενέργειας και επομένως περισσότερο αποδοτική παραγωγή ενέργειας.[57]



Εικόνα 5.9.13.2.1 : Στροβιλομηχανή



Εικόνα 5.9.13.2.2: Φυγοκεντρικός Συμπιεστής δύο βαθμίδων - Δακτυλιοειδής Θάλαμος Καύσης - Αξονικός Στρόβιλος τριών βαθμίδων

Κεφάλαιο 6

Υπολογιστικές μέθοδοι στα υλικά αλλαγής φάσης

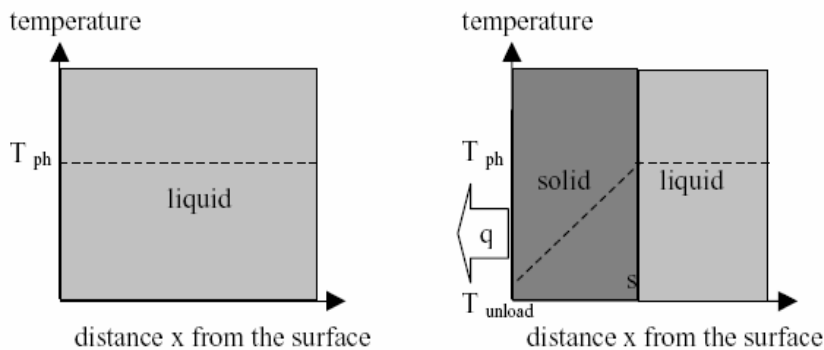
6.1 Εισαγωγή

Οι εφαρμογές των P.C.M. καλύπτουν πολλούς διαφορετικούς τομείς. Το πιο σημαντικό κριτήριο είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης, T_{ph} . Άμεσα συνδεδεμένη με την τήξη και τη στερεοποίηση είναι η διαδικασία της ροής της θερμότητας. Η ποσότητα της ροής θερμότητας στις διάφορες εφαρμογές καλύπτει ένα ευρύ ενεργειακό πεδίο από μερικά KW, για διαστημικές εφαρμογές θέρμανσης με νερό ή αέρα, δεξαμενές ζεστού νερού και σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, μέχρι μερικά W, για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας σε δοχεία.

6.2 Αναλυτικά μοντέλα μετάδοσης θερμότητας σε P.C.M.

6.2.1 Αναλυτικό μοντέλο για τη θέρμανση και ψύξη ημιάπειρης επιφάνειας P.C.M. (1-D)

Ο πιο απλός τρόπος για να εξετάσουμε τη μετάδοση της θερμότητας σε ένα P.C.M. είναι η μελέτη μιας μονοδιάστατης, ημιάπειρης πλάκας P.C.M. η οποία ψύχεται ή θερμαίνεται. Στο σχ. 2.1 φαίνεται το μοντέλο της πλάκας στην περίπτωση της ψύξης, αρχικά το P.C.M. είναι σε υγρή κατάσταση και κατόπιν ψύχεται και στερεοποιείται.



Εικόνα 6.2.2.1: Ψύξη ημιάπειρης επιφάνειας P.C.M. α. Αρχική κατάσταση, β. Κατάσταση μετά από χρονικό διάστημα Δt .

Αρχικά προτού ξεκινήσει η ανάλυση αναφέρουμε ορισμένες παραδοχές οι οποίες έγιναν :

- Θεωρούμε ότι η θερμοχωρητικότητα C_p είναι αμελητέα σε σχέση με την ενθαλπία αλλαγής φάσης (δηλ. $C_p \cdot \Delta T \ll \Delta H$), επομένως όλο το ποσό θερμότητας που συναλλάσσεται είναι υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας.
- Δεν υπάρχει αγωγή παρά μόνο μεταφορά θερμότητας
- Τη χρονική στιγμή $t = 0$, το P.C.M. είναι τελείως σε υγρή κατάσταση και έχει θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη από αυτή της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης $TPCM > T_{ph}$

- Μετά από χρονικό διάστημα Δt , θεωρούμε ότι στο σημείο $x = 0$ έχουμε τη θερμοκρασία στην οποία γίνεται η μεταφορά θερμότητας T_{unload} .

Λόγω της μικρής τιμής της θερμοχωρητικότητας, παρατηρούμε ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας είναι γραμμικές. Η θερμοροή στην διεπιφάνεια συναρτήσει της μετατόπισης θα είναι :

$$q(s) = \lambda * (T_{ph} - T_{unload}) / s \quad (6.2.1.1)$$

Η εξάρτηση της θερμοροής από τη μετατόπιση της διεπιφάνειας της αλλαγής φάσης, είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου η πλάκα P.C.M. έχει πεπερασμένες διαστάσεις. Αν η θερμότητα παράγεται ή απορροφάται από μια πλευρά, και αν η μεταβλητή s είναι ίση με το πάχος της πλάκας του P.C.M., τότε $q(s)$ είναι η ροή θερμότητας στο τέλος της αλλαγής φάσης και σε εκείνο το σημείο θα έχει την κατώτερη τιμή της. Η θερμοροή στη διεπιφάνεια θα είναι ίση με τη θερμότητα η οποία απελευθερώνεται καθώς η διεπιφάνεια αλλαγής φάσης κινείται, η θερμοροή αυτή θα είναι :

$$q(t) = \Delta H * ds/dt \quad (6.2.1.2)$$

Από τις εξισώσεις 6.2.2.1 και 6.2.2.2 θα έχουμε αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} q(t) &= q(s) \Rightarrow \\ \Delta H * ds/dt &= \lambda * (T_{ph} - T_{unload}) / s \end{aligned}$$

Ολοκληρώνοντας κατά μέλη τις δύο εξισώσεις συναρτήσει του χρόνου και της μετατόπισης θα έχουμε :

$$\begin{aligned} \int_{s(t=0)}^{s(t)} s \, ds &= \int_{t=0}^{t} (\lambda * (T_{ph} - T_{unload}) / \Delta H) \, dt \Leftrightarrow \\ 1/2 * s(t)^2 &= \lambda * (T_{ph} - T_{unload}) / \Delta H * t \Leftrightarrow \\ s(t) &= \sqrt{ (2 * \lambda * (T_{ph} - T_{unload}) / \Delta H * t) } \end{aligned} \quad (6.2.1.3)$$

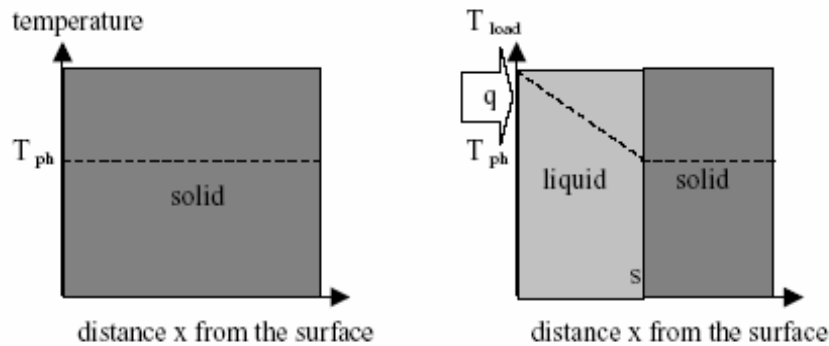
Από την εξίσωση 6.2.1.3 μπορούμε να βρούμε σε κάθε χρονική στιγμή τη θέση της διεπιφάνειας της αλλαγής φάσης. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 6.2.1.1 την εξίσωση 6.2.1.3 λαμβάνουμε την θερμοροή συναρτήσει του χρόνου, οπότε θα έχουμε :

$$\begin{aligned} q(s) &= \lambda * (T_{ph} - T_{unload}) / s \\ s(t) &= \sqrt{ (2 * \lambda * (T_{ph} - T_{unload}) / \Delta H * t) } \quad \} \\ q(t) &= \sqrt{ (\lambda * (T_{ph} - T_{unload}) \Delta H / 2 * t) } \end{aligned} \quad (6.2.1.4)$$

Από την εξισώσεις 6.2.2.3 & 6.2.2.4 παρατηρούμε ότι η θερμοροή εξαρτάται από την ενθαλπία αλλαγής φάσης, και μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η ενθαλπία αλλαγής φάσης τόσο πιο αργά κινείται το μέτωπο αλλαγής φάσης.

Στην περίπτωση όπου έχουμε θέρμανση αντί για ψύξη αντιστρέφονται οι όροι της διαφοράς θερμοκρασίας ΔT , δηλ. $\Delta T = T_{unload} - T_{ph}$. Στην εικόνα 6.2.2.2

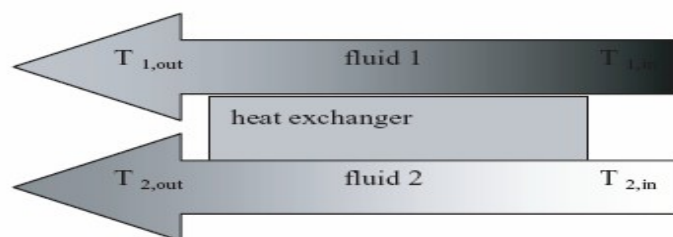
φαίνεται το μοντέλο της πλάκας στην περίπτωση της θέρμανσης, αρχικά το P.C.M. είναι σε στερεή κατάσταση και κατόπιν θερμαίνεται και υγροποιείται.



Εικόνα 6.2.2.2: Θέρμανση ημιάπειρης επιφάνειας P.C.M. α. Αρχική κατάσταση, β. Κατάσταση μετά από χρονικό διάστημα Δt .

6.2.2 Αναλυτικό μοντέλο για αποθήκευση θερμότητας με P.C.M. (2 - D & 3 - D)

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε η παρουσίαση ενός μοντέλου και οι παράμετροι μεταβάλλονταν σε 1 διάσταση. Στις περισσότερες των περιπτώσεων όμως τα μοντέλα που καλούμαστε να υπολογίσουμε είναι 2 και 3 διαστάσεων, οπότε θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας και τις λοιπές πιθανότητες διαφυγής της θερμοροής. Σε ένα απλό μοντέλο δύο ρευμάτων ομοροής με ένα εναλλάκτη θερμότητας πρέπει να έχουμε μετάδοση θερμότητας διαμέσου του εναλλάκτη θερμότητας. Στην εικόνα 6.2.2.1 που ακολουθεί φαίνεται το μοντέλο ενός εναλλάκτη ομοροής, ο οποίος χρησιμοποιείται για να θερμάνει το ρευστό 1 καθώς διέρχεται το θερμότερο ρευστό 2. Είναι προφανές ότι έχουμε μετάδοση θερμότητας από το ρευστό 2 στο ρευστό 1.



Εικόνα 6.2.2.1: Μοντέλο εναλλάκτη θερμότητας που συναλλάσσει θερμότητα το ρευστό 2 στο ρευστό 1 Σημείωση : Οι περιοχές οι οποίες φαίνονται πιο σκούρες στο σχήμα είναι σε χαμηλότερη θερμοκρασία έναντι των άλλων.

Το ολικό ποσό θερμότητας που μεταφέρεται από το ρευστό 2 στο ρευστό 1 είναι :

$$Q = k * A * \Delta T_{lm} \quad (6.2.2.1)$$

Όπου :

A : είναι η επιφάνεια συναλλαγής,

k : ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας

ΔT_{lm} : η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ρευστών 1 και 2, η οποία ορίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\Delta T_{lm} = \Delta T_{in} - \Delta T_{out} / \ln(\Delta t_{in}/\Delta T_{out})$$

Από την παραπάνω εξίσωση η εξίσωση 6.2.2.1 γίνεται:

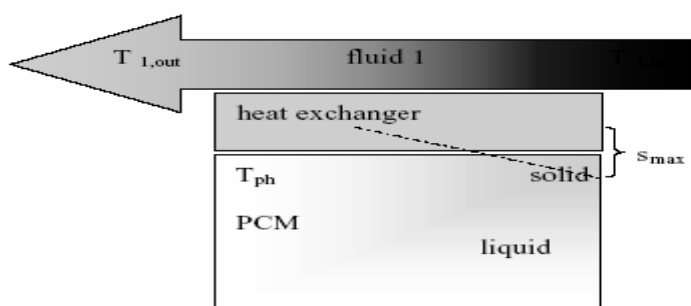
$$Q = k * A * (\Delta T_{in} - \Delta T_{out}) / \ln(\Delta T_{in}/\Delta T_{out}) \quad (6.2.2.2)$$

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

$$\begin{aligned} Q &= k * A * (\Delta T_{in} - \Delta T_{out}) / \ln(\Delta t_{in}/\Delta T_{out}) = \\ &= C_p * V * \Delta T = \\ &= C_p * dV / dt * (T_{1,out} - T_{1,in}) \end{aligned}$$

Όπου C_p είναι η θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο και dV/dt , η ογκοπαροχή του ρευστού 1.

Αν αντικαταστήσουμε το ρευστό 2 με ένα P.C.M., τότε ο εναλλάκτης θερμότητας χρησιμοποιείται για την αποθήκευση θερμότητας στο υλικό αλλαγής φάσης. Στο σχ. 2.4 που ακολουθεί φαίνεται το ρεύμα του ρευστού 1 και η αντικατάσταση του κατωρεύματος του ρευστού 2 από το P.C.M.



Σχήμα 6.2.2.2: Αντικατάσταση του κατωρεύματος του ρευστού 2 με P.C.M.

Για την απλοποίηση των υπολογισμών θα θεωρήσουμε αρχικά ότι το P.C.M. έχει τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Αντίστοιχα με παραπάνω η θερμότητα που μεταφέρεται στο P.C.M. θα είναι :

$$\begin{aligned}
Q &= C_p * dV / dt * (T_{out} - T_{in}) = A * k * \Delta T_{lm} \Leftrightarrow \\
Q &= k * A * (\Delta T_{in} - \Delta T_{out}) / \ln (\Delta t_{in} / \Delta T_{out}) \Leftrightarrow \\
Q &= C_p * dV / dt * (T_{out} - T_{in}) = \\
&= A * k * ((T_{ph} - T_{in}) - (T_{ph} - T_{out})) / \ln ((T_{ph} - T_{in}) / (T_{ph} - T_{out})) \Leftrightarrow
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q &= C_p * dV / dt * (T_{out} - T_{in}) = A * k * (T_{out} - T_{in}) / \ln ((T_{ph} - T_{in}) / (T_{ph} - T_{out})) \\
\Leftrightarrow \\
Q &= C_p * dV / dt = A * k * 1 / \ln ((T_{ph} - T_{in}) / (T_{ph} - T_{out}))
\end{aligned}$$

Αν επιλύσουμε την παραπάνω εξίσωση ως προς τη θερμοκρασία εξόδου T_{out} , τότε θα έχουμε :

$$\ln ((T_{ph} - T_{in}) / (T_{ph} - T_{out})) = A * k / C_p * (dV / dt) \Rightarrow$$

$$T_{out} - T_{in} = (T_{ph} - T_{in}) * (1 - \exp(- A * k / C_p * (dV / dt)))$$

Επομένως, η θερμική ισχύς που αποθηκεύεται θα είναι:

$$Q = C_p * dV / dt * (T_{ph} - T_{in}) * (1 - \exp(- A * k / C_p * (dV / dt))) \quad (6.2.2.3)$$

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

6.3 Υπολογιστικά μοντέλα μετάδοσης θερμότητας σε P.C.M.

6.3.1 Εισαγωγή

Τα αναλυτικά μοντέλα μας δίνουν αποτελέσματα με χρήση απλών σχέσεων για τον τρόπο της μετάδοσης της θερμότητας. Αυτές οι σχέσεις μας δείχνουν πως οι διάφορες μεταβλητές επηρεάζουν ή μια την άλλη και πως τελικά επιδρούν στα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Ωστόσο τίθενται αυστηροί περιορισμοί όσον αφορά τη γεωμετρία και τη συμβολή του λανθάνοντος ποσού θερμότητας που συναλλάσσεται. Συνεπώς η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων γίνεται στα αυστηρά όρια που προαναφέρθηκαν.

Για μια πιο ρεαλιστική ανάλυση των φαινομένων που αναλύονται είναι απαραίτητη προσέγγιση του φαινομένου από διάφορες οπτικές γωνίες, για αυτό λοιπόν χρησιμοποιούνται υπολογιστικές μέθοδοι οι οποίες απλοποιούν τις διαφορικές εξισώσεις που διέπουν το εξεταζόμενο φαινόμενο και είναι δυνατόν να επιλυθούν με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

6.3.2 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών σε P.C.M.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια από τις πιο ευρέως διαδεδομένες υπολογιστικές μεθόδους. Η παρουσίαση της μεθόδου θα γίνει με ένα παράδειγμα, μονοδιάστατης ανάλυσης μετάδοσης θερμότητας σε ράβδο.

Αρχικά θεωρούμε ένα τμήμα της ράβδου το οποίο έχουμε διακριτοποιήσει σε όγκους αναφοράς. Στην εικόνα 6.3.2.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται ο διακριτοποιημένος χώρος που έχουμε επιλέξει. Κάθε στοιχείο αντιπροσωπεύεται από ένα κόμβο και σε κάθε κόμβο αποθηκεύεται ενέργεια η οποία συναλλάσσεται με τα γειτονικά στοιχεία.



Εικόνα 6.3.2.1:Πεπερασμένα στοιχεία, οι θερμοκρασίες χαρακτηρίζονται από τη μεταβλητή i .

Οι θερμικές ιδιότητες του κάθε κόμβου όγκου ΔV , είναι η θερμοκρασία του T και η θερμοχωρητικότητα του C_p . Το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας από τον ένα κόμβο στο γειτονικό της, με αγωγή, δίνεται από τη σχέση :

$$q = A * \lambda * (\Delta T / \Delta X) \quad (6.3.2.1)$$

Όπου:

A : είναι η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας μεταξύ των κόμβων,

λ : θερμική αγωγιμότητα, ΔT : η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων και

Δx : η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων.

Η θερμότητα που παράγεται σε κάποιο χρονικό διάστημα t , από τον ένα κόμβο στον άλλο για χρονικό διάστημα Δt , δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q = q * \Delta t \Rightarrow$$

$$Q = \Delta t * A * \lambda * \Delta T / \Delta X \quad (6.3.2.2)$$

Από τη θερμότητα που συναλλάσσεται, την αρχική θερμοκρασία και τη θερμοχωρητικότητα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία κάθε επόμενου κόμβου από τον προηγούμενο. Αυτοί οι υπολογισμοί πρέπει να γίνουν μετέτριο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η επίλυση των συστημάτων με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αρχικά αριθμούμε τους κόμβους χρησιμοποιώντας δυο μεταβλητές :

- Η μεταβλητή i υποδηλώνει μετατόπιση κατά Δx
- Η μεταβλητή k υποδηλώνει χρονική μεταβολή κατά Δt

Η θερμότητα η οποία μεταφέρεται από ένα στοιχείο i στα γειτονικά του $i-1$ ή $i+1$, με χρονικό βήμα k , δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$Q_{i,k} = \Delta t * A * \lambda * ((T_{i+1,k} - T_{i,k}) / \Delta X) + ((T_{i-1,k} - T_{i,k}) / \Delta X) \quad (6.3.2.3)$$

Η θερμότητα που μεταφέρεται οδηγεί σε θερμοκρασιακή μεταβολή, η οποία είναι :

$$Q_{i,k} = \Delta V * C_p * (T_{i,k+1} - T_{i,k}) \quad (6.3.2.4)$$

Από τις δύο παρακάτω εξισώσεις:

$$\Delta V * C_p * (T_{i,k+1} - T_{i,k}) = \Delta t * A * \lambda * ((T_{i+1,k} - T_{i,k}) / \Delta X) + ((T_{i-1,k} - T_{i,k}) / \Delta X) \Rightarrow$$

$$\Delta V = A * \Delta X$$

προκύπτει:

$$T_{i,k+1} = T_{i,k} + ((\Delta t * A * \lambda) / C_p * \Delta X^2) * ((T_{i+1,k} - T_{i,k}) / \Delta X) + ((T_{i-1,k} - T_{i,k}) / \Delta X)$$

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

6.3.3 Μέθοδος ενθαλπίας σε P.C.M.

Η ανάλυση των φαινομένων μεταφοράς σε προβλήματα στερεοποίησης και τήξης είναι ιδιαίτερα σύνθετη λόγω του ότι το όριο στερεού – υγρού τήγματος κινείται ανάλογα με την ταχύτητα πρόσδοσης ή απορρόφησης λανθάνουσας θερμότητας και έτσι η θέση του μετώπου αλλαγής φάσης δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή.

Η μέθοδος ενθαλπίας χρησιμοποιείται στην ανάλυση φαινομένων αλλαγής φάσης σε μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις οριακές συνθήκες που ισχύουν στο κινούμενο μέτωπο αλλαγής φάσης, γεγονός που σημαίνει ότι μπορούμε να διακριτοποιήσουμε το χώρο εύκολα. Μια από τις πιο αξιόπιστες υπολογιστικές μεθόδους που εφαρμόζονται για να μας δώσουν αποτελέσματα με τη μέθοδο της ενθαλπίας είναι η μέθοδος «υπερπήδησης κόμβων» (*Node jumping*), κατά την οποία το πλέγμα όπως προαναφέρθηκε παραμένει σταθερό και το μέτωπο αλλαγής φάσης βρίσκεται πάντα πάνω σε ορισμένο κόμβο του πλέγματος. Επομένως η χρήση της μεθόδου της ενθαλπίας με τη βοήθεια της « *node jumping technique* » δίνουν αρκετά ακριβή αποτελέσματα.

Η εξίσωση της ενέργειας με όρους ενθαλπίας γράφεται ως εξής :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(K \cdot \nabla T) \quad (6.3.3.1)$$

Όπου:

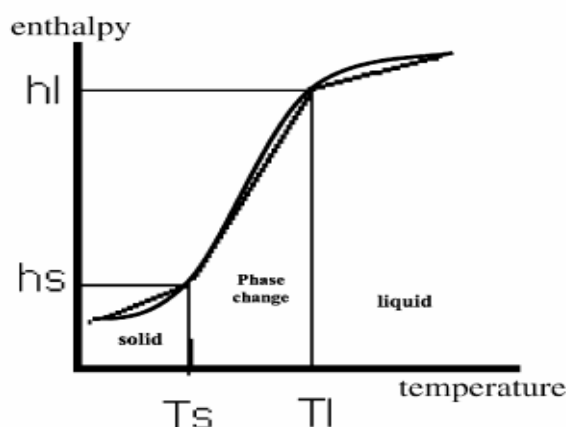
H : η ενθαλπία, η οποία εκφράζεται σαν σύνολο λανθάνοντος και αισθητού ποσού θερμότητας,

T : η θερμοκρασία,

κ : η θερμική αγωγιμότητα και

ρ : η πυκνότητα.

Η επίλυση αυτής της εξίσωσης απαιτεί τη γνώση της ενθαλπίας και της θερμοκρασίας στην έναρξη και τη λήξη της στερεοποίησης, όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί. Επομένως πρέπει να γνωρίζουμε τη διαφορά θερμοκρασίας και τη θερμοχωρητικότητα ώστε να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε την ενθαλπία



Εικόνα 6.3.3.1: Σχέση ενθαλπίας – θερμοκρασίας κατά την αλλαγή φάσης.

Τα κύρια προτερήματα από τη χρήση της παραπάνω εξίσωσης είναι τα ακόλουθα :

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

Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της ενθαλπίας εξαρτάται από τη φύση της αλλαγής φάσης. Έτσι αν εξετάζουμε ένα υλικό το οποίο υφίσταται τήξη – ψύξη, όλο το λανθάνον ποσό θερμότητας συναλλάσσεται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία την $T = T_{ph}$, οπότε θα έχουμε :

$$\begin{aligned} H &= C * T & T < T_{ph} \\ H &= C * T + L & T > T_{ph} \end{aligned} \quad (6.3.3.2)$$

Όπου:

C : είναι η αισθητή θερμότητα και

L : η λανθάνουσα θερμότητα.

Ένας εναλλακτικός τρόπος γραφής της εξίσωσης της ενέργειας (εξίσωση 6.2.2.12), με όρους λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας είναι ο ακόλουθος :

$$\rho * \partial h / \partial t = \nabla (k * \nabla h) + S \quad (6.3.3.3)$$

Όπου :

h : η αισθητή ενθαλπία, όπου $h = C * T$,

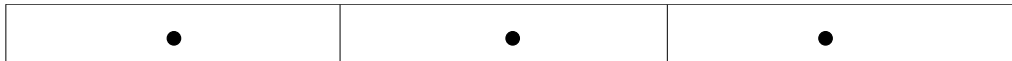
k : η διαχυσιμότητα, όπου $k = \kappa / C * \rho$ και

S : ο όρος της λανθάνουσας θερμότητας, όπου $S = \partial(\Delta H) / \partial t$

Ο όρος ΔH είναι το λανθάνον ποσό θερμότητας που συναλλάσσεται κατά την αλλαγή φάσης. Η συναρτησιακή σχέση του ΔH με τη θερμοκρασία εξαρτάται από τη φύση της αλλαγής φάσης, έτσι όμοια με την εξίσωση 6.2.2.13, θα έχουμε :

$$\begin{aligned} \Delta H &= 0 & T < T_{ph} \\ \Delta H &= 1 & T > T_{ph} \end{aligned} \quad (6.3.3.4)$$

Η επίλυση της εξίσωσης 6.2.2.13 γίνεται με υπολογιστικές μεθόδους. Για την καλύτερη παρουσίαση της μεθόδου θεωρούμε μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας και η επίλυση θα γίνει με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Αρχικά διακριτοποιούμε το χώρο σε κόμβους και στον κάθε κόμβο αντιστοιχεί ένας πεπερασμένος όγκος. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται 3 πεπερασμένοι όγκοι με έναν κεντρικό κόμβο (P) και δυο ομόρους (W & E), οι οποίοι έχουν σταθερό διάστημα μεταξύ τους δx .



Εικόνα 6.3.3.2: Πεπερασμένοι όγκοι

Η απόσταση μεταξύ των κουκίδων είναι δx . Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα, η εξίσωση 6.2.2.13 με χρήση των πεπερασμένων διαφορών γράφεται ως εξής :

$$h_p - h_p^* = (\delta t / \delta x^2) * (1 - \theta) * F_p^* + \delta t / \delta x^2 * \theta * F_p + S_p \quad (6.3.3.5)$$

όπου:

$F_p = \kappa_w * (h_w - h_p) - \kappa_e * (h_p - h_e)$ και

$S_p = \Delta T_p^* - \Delta H_p^*$

Οι τιμές οι οποίες είναι σημειωμένες με (*), δηλώνουν τις τιμές των μεγεθών την προηγούμενη χρονική στιγμή. Η παράμετρος θ , λαμβάνει τιμές, $\theta \in [0, 1]$ και όταν $\theta = 0$ τότε η μέθοδος είναι ρητή ενώ όταν $\theta = 1$ η μέθοδος είναι πεπλεγμένη. Η τιμή του

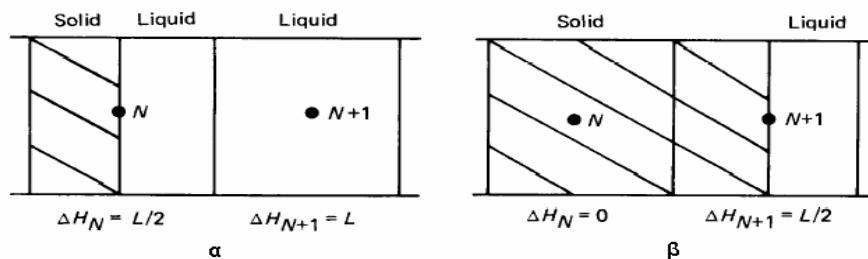
όρου S_p , δίνει την τιμή της κομβικής μεταβολής της λανθάνουσας θερμότητας ΔH_p σε κάθε χρονικό βήμα, και η τιμή αυτή είναι σχετική με το ποσό θερμότητας που συναλλάσσεται καθώς ο όγκος αναφοράς αλλάζει κατάσταση από τη μια χρονική στιγμή στην άλλη.

Ας θεωρήσουμε ότι σε μια χρονική στιγμή t , η διεπιφάνεια αλλαγής φάσης βρίσκεται στον κόμβο N . Για το συγκεκριμένο όγκο αναφοράς, κατά το ήμισυ θα είναι σε υγρή φάση και το υπόλοιπο θα είναι σε στερεά φάση. Στην περιοχή που είναι στερεό το ποσό λανθάνουσας θερμότητας θα είναι μηδενικό ενώ εκεί που έχουμε υγρή φάση το ποσό λανθάνουσας θερμότητας θα είναι L . Τα παραπάνω φαίνονται στο σχ. 2.8α που ακολουθεί. Επομένως το λανθάνον ποσό θερμότητας τη χρονική στιγμή t , θα είναι :

$$\Delta H_N^* = L/2 \quad (6.3.3.6)$$

Αν μετά από χρονικό διάστημα $t + \Delta t$, η διεπιφάνεια αλλαγής φάσης έχει μετακινηθεί κατά Δx , τότε στον κόμβο $N + 1$, (σχ. 2.8β) το λανθάνον ποσό θερμότητας θα είναι αντίστοιχα :

$$\Delta H_{N+1} = L/2 \quad (6.3.3.7)$$



Εικόνα 6.3.3.3: Διεργασία αλλαγής φάσης στους όγκους αναφοράς, α. τη χρονική στιγμή t , β. τη χρονική στιγμή $t + \Delta t$.

Άρα η τιμή της κομβικής ενθαλπική διαφοράς τις χρονικές στιγμές t και $t + \Delta t$, θα είναι αντίστοιχα :

$$S_N = \Delta H_N^* - \Delta H_N = L/2 \quad (6.3.3.8)$$

$$S_{N+1} = \Delta H_{N+1}^* - \Delta H_{N+1} = L/2 \quad (6.3.3.9)$$

Έτσι αν επιλέγουμε το χρονικό βήμα με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζουμε ότι η επιφάνεια αλλαγής φάσης σε χρονικό διάστημα Δt κινείται κατά Δx , δηλαδή από κόμβο σε κόμβο, τότε μπορούμε να γράψουμε ότι αν ο κόμβος N είναι στην αρχή ο κόμβος $N + 1$ θα είναι στο τέλος και συνεπώς για το συναλλασσόμενο λανθάνον ποσό θερμότητας θα έχουμε :

$$S_p = L/2 \quad P=N \ \& \ P =N+1 \ \text{αλλιώς} \quad (6.3.3.10)$$

$$S_p = 0 \quad (6.3.3.11)$$

Το γεγονός αυτό μας διευκολύνει στην επίλυση της εξίσωσης 2.16, με τον αλγόριθμο του τριδιαγώνιου πίνακα. Το μόνο άγνωστο στοιχείο είναι το χρονικό βήμα που πρέπει να προσδιορισθεί από κόμβο σε κόμβο. Το χρονικό βήμα μπορεί να προσεγγισθεί με επαναληπτική διαδικασία, από το ένα χρονικό βήμα στο επόμενο. Το σημείο σύγκλισης αυτής της διαδικασίας θα είναι όταν στον κόμβο $N+1$, έχουμε στερεοποίηση και τότε η τιμή της ενθαλπίας θα είναι :

$$h_{N+1} = C * T_p h \quad (6.3.3.12)$$

Συνοπτικά τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για την επίλυση του προβλήματος με τη μέθοδο « Node jumping », είναι τα ακόλουθα :

- Η διεπιφάνεια αλλαγής φάσης τη χρονική στιγμή t , βρίσκεται στον κόμβο N
- Θεωρούμε κάποιο χρονικό βήμα δt
- Ορίζουμε ότι, $S_N = L / 2$ και $S_{N+1} = L / 2$ αλλιώς $S_i = 0$
- Επιλύουμε την εξίσωση 2.16, ως προς την κομβική τιμή της ενθαλπίας
- Ελέγχουμε αν ισχύει το κριτήριο σύγκλισης που έχουμε θέσει ($h_{N+1} - C * T_p h \leq 0$), αν δεν ισχύει τότε αλλάζουμε το χρονικό βήμα και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία.

Κεφάλαιο 7

Εξοικονόμηση ενέργειας από την εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης σε κτιριακές εγκαταστάσεις

7.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα των τοίχων δωματίου που περιέχουν PCM, κάτω από απόλυτα ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες [102]

7.1.1 Εισαγωγή

Όπως είναι ήδη γνωστό, ένα βασικό μειονέκτημα των ελαφριάς κατασκευής κτιρίων είναι η χαμηλή θερμική τους μάζα. Προφανώς, υπόκεινται σε μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εξ' αιτίας των εξωτερικών θερμικών ή ψυκτικών φορτίων. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, υλικά αλλαγής φάσης σε τέτοιου είδους κτίρια είναι δυνατή η μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων που οφείλονται κυρίως στα φορτία της ηλιακής ακτινοβολίας.

Έτσι, τα υλικά PCM παρουσιάζουν ιδιαίτερη χρησιμότητα για τις ελαφριές κατασκευές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Προκειμένου να αξιολογηθούν αυτά τα προτερήματα, έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες πάνω στη θερμική συμπεριφορά των PCM χρησιμοποιώντας ένα ελεγχόμενο δωμάτιο δοκιμών, το οποίο προσομοιάζει τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών καθώς και την αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία.

7.1.2 Διεξαγωγή του πειράματος

Πιο συγκεκριμένα, το υλικό PCM που τίθεται υπό δοκιμή είναι της εταιρίας DuPont de Nemours Society και αποτελείται από 60% μικροενσωματωμένες κάψουλες PCM, με θερμοκρασία τήξης 22° C, ενώ η τελική του μορφή αποτελείται από ευέλικτα φύλλα πάχους 5mm, με πυκνότητα $\rho_{PCM}=1019 \text{ kg/m}^3$.

Η θερμική του ικανότητα μετρήθηκε με την μέθοδο DSC, και η αναλυτική της έκφραση είναι δίνεται από τις σχέσεις:

$$C = \begin{cases} 4250 + 10,750 e^{-((22.6-T)/4)^2} & \text{if } T \leq 22.6^\circ \text{C} \\ 4250 + 10,750 e^{-((22.6-T)/3)^2} & \text{if } T > 22.6^\circ \text{C} \end{cases}$$

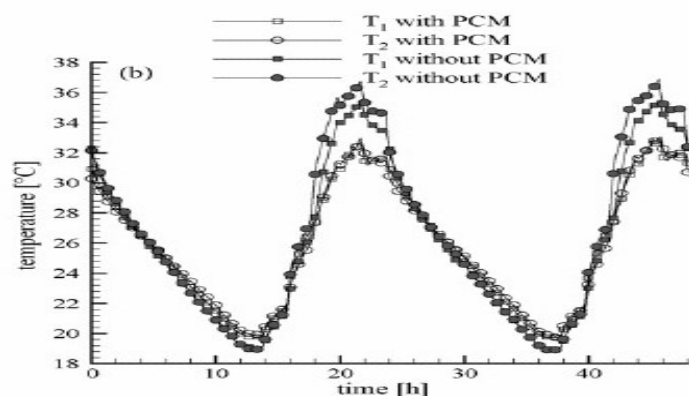
Σε ότι αφορά στην θερμική αγωγιμότητα του PCM, αυτή μετρήθηκε περίπου 0.22 W/m K και μειώνεται κατά την διάρκεια της θερμοκρασιαστήξης περίπου σε 0.18W/m K.

Το δωμάτιο δοκιμών απομονώνεται, μέσω της νότιας γυάλινης πρόσοψής του από ένα ειδικό δωμάτιο, το λεγόμενο 'climatic chamber', το οποίο έχει ελεγχόμενη θερμοκρασία που μπορεί να κυμανθεί από τους -10° C έως τους 40° C με τη βοήθεια ενός συστήματος αέρα. Επιπλέον, διατηρούνται οι θερμοκρασίες των υπόλοιπων εξωτερικών τοίχων στην σταθερή τιμή των 20,5°C, ενώ οι 12 λάμπες των 1000 W η καθεμία, προσομοιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία, που εισέρχεται στο υπό δοκιμή δωμάτιο μέσω του γυάλινου τοίχου. Έτσι, είναι δυνατός ο δυναμικός έλεγχος της θερμοκρασίας του 'climatic chamber' καθώς και του επιπέδου της εισροής της ακτινοβολίας μέσω του αριθμού των αναμένων λαμπτήρων. Τέλος, αναφέρεται μία

ακόμη φορά ότι η μελέτη γίνεται για τους καλοκαιρινούς μήνες, οπότε η θερμοκρασία του 'climatic chamber' κυμαίνεται μεταξύ 15 °C και 30 °C.

7.1.3 Μετρήσεις σε δύο διαφορετικά ύψη

Από τις μετρήσεις που προκύπτουν σε δύο διαφορετικά ύψη στο μέσο του δωματίου, όπως φαίνεται και από τα σχήματα που παρουσιάζονται παρακάτω, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα για την περίπτωση χωρίς PCM ποικίλλει από τους 36 οC στους 18.9 οC, ενώ για την περίπτωση με PCM ποικίλλει από τους 32,8 οC στους 19,8 οC. Προκύπτει, επομένως, ότι η εφαρμογή του PCM στους τοίχους μείωσε τη διακύμανση της θερμοκρασίας κατά 4.7 οC.



Εικόνα 7.1.3.1 : Η κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας σε δύο διαφορετικά ύψη του δωματίου T1 και T2 με και χωρίς PCM .

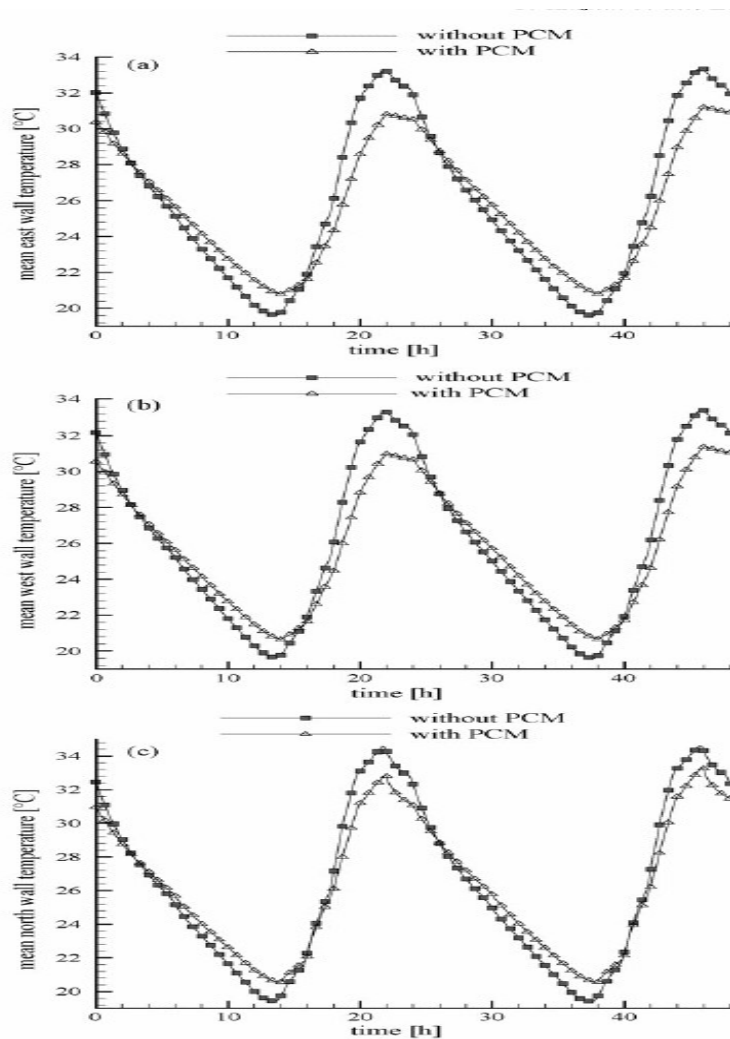
Επεξεργαζόμενοι το παραπάνω σχήμα, οδηγούμαστε σε μία εξαιρετικά ενδιαφέρουσα παρατήρηση , που αφορά στις θερμοκρασιακές διαφορές T1 και T2. Μία διαφορά της τάξης του 1οC εμφανίζεται ανάμεσα στα θερμοκρασιακά μέγιστα, στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται PCM, η οποία δεν εμφανίζεται καθόλου όταν το τελευταίο χρησιμοποιείται. Αυτό οφείλεται κυρίως στις επιπτώσεις της πιο έντονης κίνησης των αέριων μαζών εξ αιτίας της διαφοράς των θερμοκρασιών στους τοίχους με PCM. Το φαινόμενο αυτό, βελτιώνει την θερμική άνεση, αποφεύγοντας την θερμοκρασιακή κατανομή κατά ζώνες, και ήταν η πρώτη φορά που παρατηρήθηκε.

7.1.4 Θερμοκρασιακές μεταβολές στο εσωτερικό μέρος των τοίχων

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας στο εσωτερικό των επιφανειών των τοίχων, πλην του νότιου που είναι γυάλινος όπως έχει ήδη αναφερθεί, για την περίπτωση με και χωρίς PCM παρουσιάζονται παρακάτω. Όπως αναμαίνεται, οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι χαμηλότερες για την περίπτωση χρήσης τοίχου με PCM συγκριτικά με αυτές των συνιθισμένων τοίχων. Επιπλέον, σημαντική είναι η ομοιότητα στις θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στον ανατολικό και στον δυτικό τοίχο, ενώ έμφαση θα πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι οι καμπύλες με και χωρίς PCM παρουσιάζουν μια διαφορά φάσης της τάξης των 40 λεπτών. Θα μπορούσαμε να

υποστηρίζουμε ότι κατά κάποιο τρόπο τα υλικά αλλαγής φάσης προσθέτουν αδράνεια στον τοίχο.

Παρατηρώντας τις παραπάνω καμπύλες για τον ανατολικό και τον δυτικό τοίχο, το υλικό αλλαγής φάσης προκαλεί μία μείωση στις μεταβολές της θερμοκρασίας της τάξης των $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Για τον νότιο τοίχο, η μείωση της θερμοκρασίας είναι της τάξης των $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, τιμή πολύ χαμηλότερη συγκριτικά με τις προηγούμενες εξ' αιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι αυξημένη.



Εικόνα 7.1.4.1 : (a) Κατανομή των θερμοκρασιών στον ανατολικό τοίχο

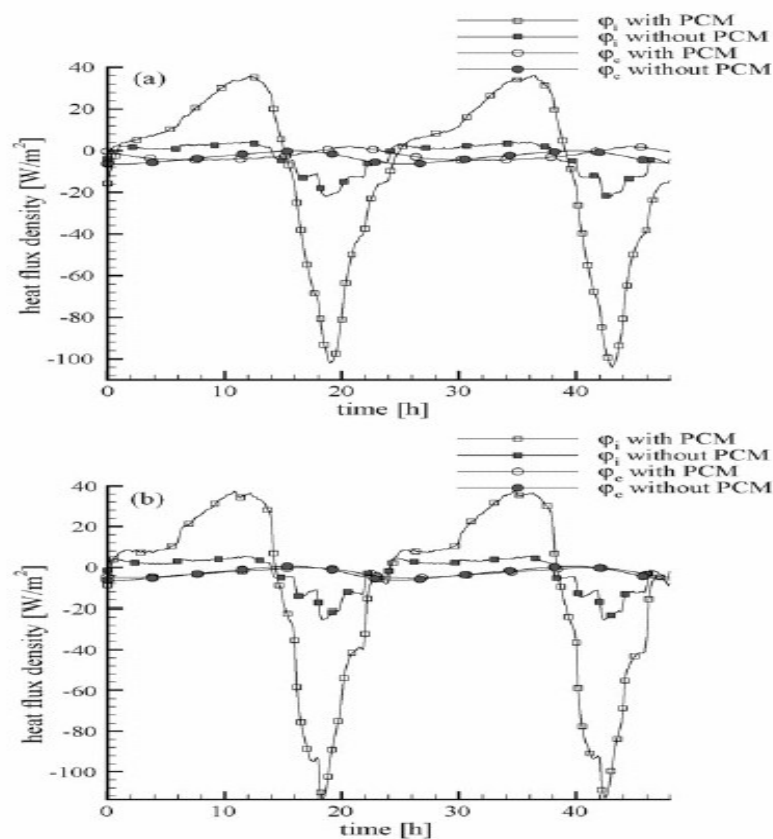
(b) Κατανομή των θερμοκρασιών στον δυτικό τοίχο

(c) Κατανομή των θερμοκρασιών στον βόρειο τοίχο

7.1.5 Πυκνότητα της ροής θερμότητας

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούμε εκτενέστερα στην ανάλυση της πυκνότητας της ροής θερμότητας ενός τοίχου, όπου με ϕ_e συμβολίζεται η εξωτερική ροή θερμότητας, που είναι θετική όταν διαπερνάει το πάνελ, και ϕ_i συμβολίζεται η εσωτερική ροή θερμότητας, η οποία είναι θετική όταν εγκαταλείπει το πάνελ από την εσωτερική του πλευρά.

Στα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω, δίδονται οι πυκνότητες της εσωτερικής και της εξωτερικής ροής θερμότητας τόσο για τον «ανατολικό-δυτικό» τοίχο, οι οποίοι αποτελούν μια κατηγορία λόγω των όμοιοτήτων στα αποτελέσματά τους, όσο και για τον νότιο τοίχο. Για τις περιπτώσεις με και χωρίς PCM, η μέγιστη διακύμανση για το ϕ_e είναι περίπου 6 W/m^2 χωρίς και 7 W/m^2 με PCM. Οι μικρότερες και οι μεγαλύτερες τιμές για την εξωτερική ροή θερμότητας, που λαμβάνουν τις τιμές -6.5 και -0.2 αντίστοιχα χωρίς PCM και 2.0 και -4.5 με PCM, είναι αρκετά χαμηλές λόγω του μονωτικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον, αναφέρεται ότι οι καμπύλες που αναφέρονται στην πυκνότητα της εξωτερικής ροής θερμότητας με και χωρίς PCM παρουσιάζουν μια διαφορά φάσης της τάξης των 6 ωρών.



Εικόνα 7.1.5.1 : Πυκνότητα ροής θερμότητας για α. για τον «ανατολικό-δυτικό» τοίχο και β. για τον νότιο τοίχο

Όμως, και το φαινόμενο της αποθήκευσης-αποδέσμευσης της θερμότητας από το PCM είναι εμφανές, εάν παρατηρήσουμε την μεταβολή του ϕ . Για την περίπτωση με PCM οι διακυμάνσεις κυμαίνονται ανάμεσα σε 36 W/m^2 και -103 W/m^2 , όταν στον παραδισιακό τοίχο οι τιμές αυτές είναι 4 W/m^2 και -22 W/m^2 . Η θερμότητα εισχωρεί στο πάνελ όταν η πυκνότητα της ροής ακτινοβολίας είναι η μέγιστη και απομακρύνεται από αυτήν όταν η θερμοκρασία λαμβάνει την μικρότερη τιμή της, δηλαδή όταν όλες οι λάμπες είναι κλειστές.

7.1.6 Μελέτη της ενέργειας που αποθηκεύεται και αποδεσμεύεται

Όπως φαίνεται και από τα σχήματα, η συμπεριφορά και των τριών τοίχων που μελετώνται (ανατολικός, δυτικός και νότιος) είναι όμοια, οπότε εδώ θα δωθούν κάποιες πληροφορίες μόνο για τον ανατολικό τοίχο.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η αποθήκευση-αποδέσμευση της πυκνότητας της ροής θερμότητας ϕ σε ολόκληρο τον τοίχο, η οποία παίρνει θετικές τιμές όταν η ενέργεια αποθηκεύεται. Θεωρώντας τ^+ το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ενέργεια αποθηκεύεται και τ^- το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ενέργεια αποδεσμεύεται, τότε το σύνολο της ενέργειας που αποθηκεύεται είναι:

$$E_{st} = \int_{\tau^+} \phi \, dt \quad (7.1.6.1)$$

και στο σύνολο της ενέργειας που αποβάλλεται :

$$E_{st} = \int_{\tau^-} \phi \, dt \quad (7.1.6.2)$$

Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7.1.6.1

Stocked–destocked energy analysis

	τ^+ (h)	τ^- (h)	E_{st} (kJ/m ²)	E_{des} (kJ/m ²)
Without PCM	8.3	15.7	313.9	-315.0
With PCM	9	15	663.5	-670.4

Από εδώ βλέπουμε ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται σε τοίχο με PCM είναι περίπου διπλάσια αυτής που αποθηκεύεται σε συνιθισμένο τοίχο. Το θερμικό κέρδος είναι περίπου 352 kJ/m^2 ανά τοίχο, που σημαίνει ότι η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια και από τους τρεις τοίχους είναι 8.2 MJ .

7.1.7 Επίλογος

Τελειώνοντας αυτό το κεφάλαιο, καταλήγουμε στο ότι η ενσωμάτωση PCM σε πάνελ μειώνει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις ενός δωματίου, ότι το φαινόμενο της υπερθέρμανσης είναι ηπιότερο με χρήση του υλικού αλλαγής φάσης και ότι η αρχικά αποθηκευμένη ενέργεια αποδεσμεύεται για να θερμάνει το δωμάτιο όταν η

θερμικρασία αυτού είναι η ελάχιστη. Επιπλέον, τα 5mm του PCM που χρησιμοποιήθηκαν στην ελαφριά κατασκευή, ενίσχυσαν την θερμική αδράνεια του δωματίου και πιο συγκεκριμένα, η διαθέσιμη προς αποθήκευση ενέργεια είναι σχεδόν η διπλάσια με το PCM, τιμή που θα αντιστοιχούσε σε στρώση τσιμέντου πάχους 8cm.

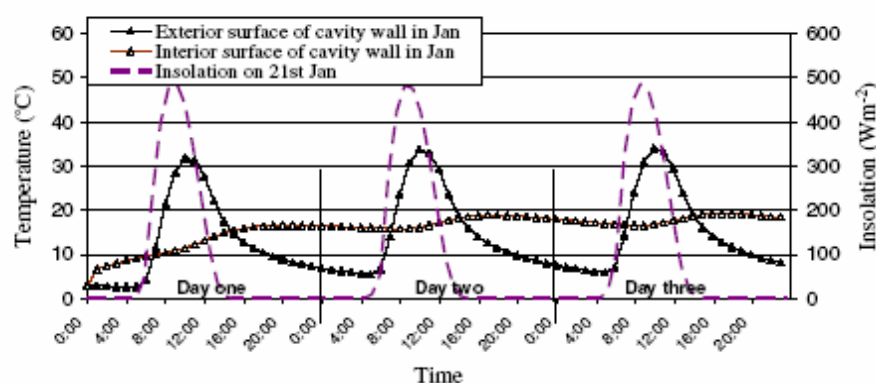
7.2 Εφαρμογή ενός επικυρωμένου αριθμητικού μοντέλου για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας από την χρήση υλικών αλλαγής φάσης στα κατασκευαστικά υλικά του κτιρίου [103]

Τα τρία πιο σημαντικά θερμικά χαρακτηριστικά ενός τοίχου είναι η θερμική του ικανότητα, η θερμική του αγωγιμότητα, η θέση της μόνωσης και οι στρώσεις των κατασκευαστικών υλικών στον τοίχο. Αυτά, μαζί με κάποια άλλα χαρακτηρίζουν το εκάστοτε κτίριο επηρεάζοντας τα θερμικά-ψυκτικά του φορτία καθώς και τις θερμοκρασίες των επιφανειών του. Στην μελέτη που θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο αυτό, στους τοίχους των κτιρίων προστίθενται δύο τύποι PCM που είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο σε διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης. Επιπλέον, εξετάζονται και οι διαφορετικές θέσεις στις οποίες τοποθετείται το PCM για ρεαλιστικά θερμοκρασιακά όρια τόσο το χειμώνα όσο και το καλοκαίρι, η μεταφορά θερμότητας καθώς και η διανομή της θερμοκρασίας.

7.2.1 Παραμετρική ανάλυση

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την συμπεριφορά ενός κτιρίου, έγιναν προβλέψεις για τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό ενός τοίχου που περιέχει ένα διάκενο, χωρίς PCM ώστε να το χρησιμοποιήσουμε ως βάση δεδομένων για περαιτέρω σύγκριση. Το πάχος του τοίχου είναι 0.250 m, με 0.110 m τούβλο, 0.100 m τσιμέντο, 0.010 m γύψο και 0.030 m διάκενο.

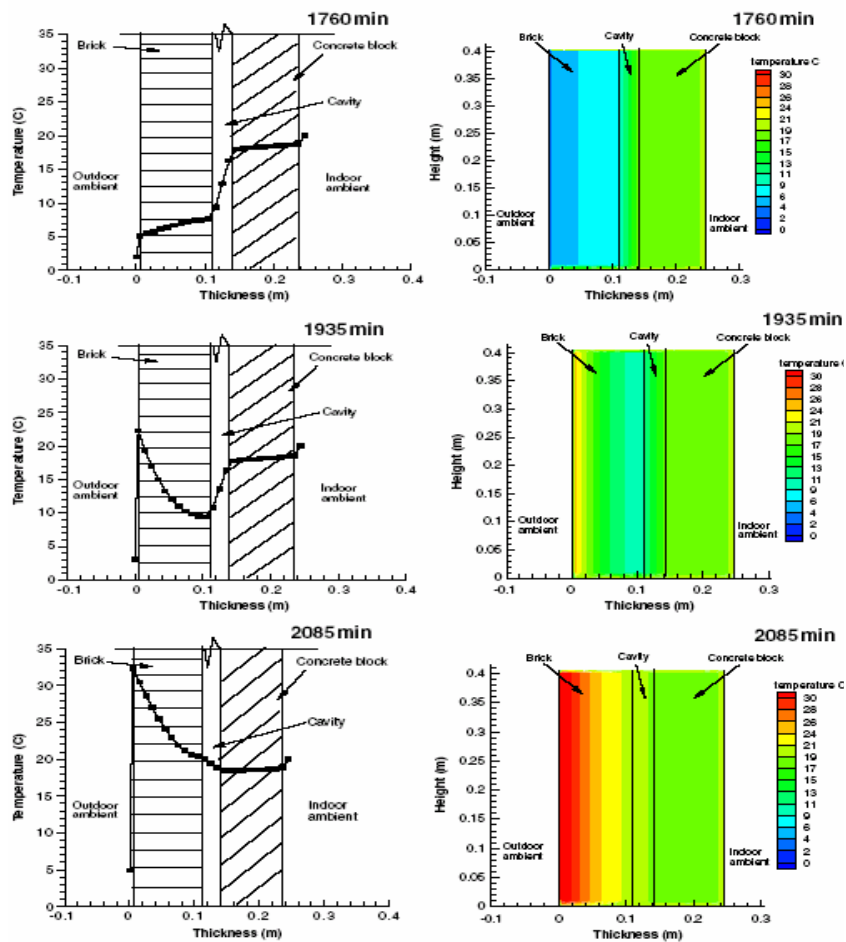
Στο διάγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω δίδονται οι προβλεπόμενες θερμοκρασίες για την εσωτερική και την εξωτερική επιφάνεια ενός τοίχου με διάκενο στην Βρετανία την 21 Ιανουαρίου, ύστερα από τριήμερη προσομοίωση.



Εικόνα 7.2.1.1 : Προβλεπόμενες θερμοκρασίες της εσωτερικής και της εξωτερικής επιφάνειας ενός τοίχου με διάκενο την 21 Ιανουαρίου στην Βρετανία, ύστερα από τριήμερη προσομοίωση.

Τα προβλεπόμενα αποτελέσματα δείχνουν ότι μετά την πρώτη μέρα, οι θερμοκρασίες επαναλαμβάνονται. Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφήθηκε από την μπροστινή πρόσοψη του τοίχου, ο οποίος περιείχε τούβλα, μεταδόθηκε με αγωγή μέσω αυτού του τοίχου και αύξησε την θερμοκρασία της εσωτερικής του επιφάνειας. Η απορροφώμενη ηλιακή ενέργεια παραμένει αποθηκευμένη στους τοίχους όσο η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι υψηλή και αποδίδεται σταδιακά κατά την διάρκεια της νύχτας. Το διάκενο αποτελεί μια πολύ καλή θερμική αντίσταση ανάμεσα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό κομμάτι του τοίχου. Η θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια του εσωτερικού τοίχου έχει μικρότερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις συγκριτικά με αυτές της εξωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου. Καθώς περνάει η ώρα, θερμότητα μεταφέρεται μέσω του διακένου στο τσιμεντένιο κομμάτι του τοίχου και στη συνέχεια μεταφέρεται στο δωμάτιο. Επιπλέον, είναι γεγονός ότι οι η εσωτερική και η εξωτερική θερμοκρασία του τοίχου επηρεάζονται πολύ περισσότερο από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας παρά από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, γι' αυτό και όταν πέφτει ο ήλιος η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του τοίχου μειώνεται με ταχύ ρυθμό. Η εξωτερική θερμοκρασία του τοίχου με διάκενο ακολουθεί την ίδια κατανομή με αυτή που προκαλεί η ηλιοφάνεια, με μια χρονική υστέρηση 20 λεπτών.

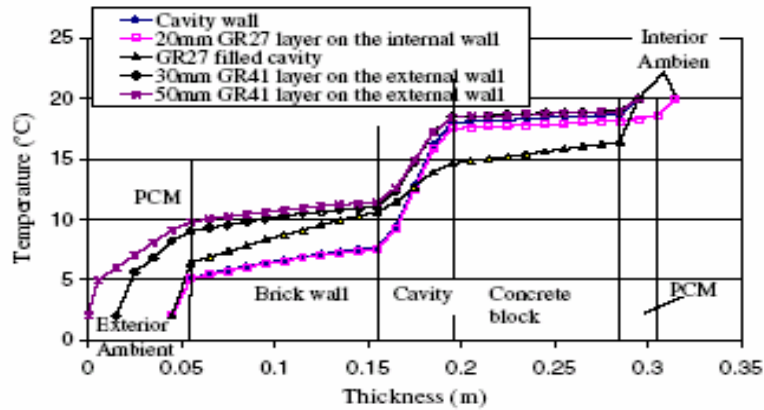
Οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας είναι αναμενόμενες λαμβάνοντας υπ όψη την θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του τοίχου με διάκενο, όμως και εδώ παρουσιάζεται χρονική υστέρηση 2 ωρών. Ακόμα, για θερμοκρασία δωματίου 20 °C και υγρασία 70%, εμφανίζεται η πιθανότητα υγροποίησης όταν η εσωτερική θερμοκρασία του τοίχου πέφτει κάτω από τους 14.5 °C, περίπτωση που δεν μας απασχολεί στην παρούσα έρευνα αφού, σύμφωνα με το διάγραμμα, η εσωτερική θερμοκρασία του τοίχου είναι μεγαλύτερη από 14.5°C.



Εικόνα 7.2.1.2 : Προβλεπόμενες κατανομές θερμοκρασίας σε ένα τοίχο με διάκενο

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την προβλεπόμενη κατανομή θερμοκρασίας ενός τοίχου με διάκενο όπως προέκυψε από προσομοίωση τριών ημερών με χρήση στοιχείων για τον καιρό της Βρετανίας για την 21 Ιανουαρίου σε 1760, 1985 και 2080 λεπτά, που αντιστοιχούν στην χαμηλότερη, σε μία μέτρια και στην υψηλότερη θερμοκρασία που αναπτύσσεται. Μπορούμε να δούμε ότι η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου με διάκενο ανταποκρίνεται έντονα στην έκθεση στον ήλιο και στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος και επομένως οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του εξωτερικού τοίχου είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου. Η ύπαρξη του διακένου μειώνει την μεταφορά της θερμότητας ανάμεσα στα δύο μέρη του τοίχου, ενώ οι επιφανειακές διαφορές θερμοκρασίας και η θερμοκρασιακή κλίση στο εσωτερικό του τοίχου είναι υπεύθυνες για την μεταφορά θερμότητας με αγωγή και για την αύξηση του ρυθμού της.

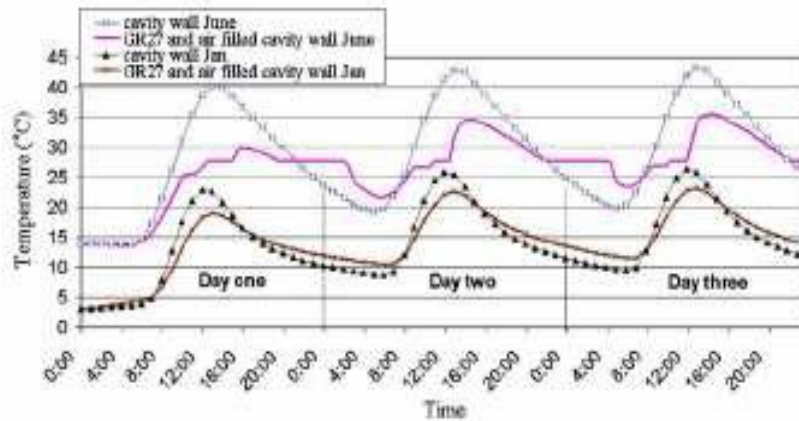
Προκειμένου να εξετάσουμε την επίδραση της θέσης και του τύπου του PCM στην μεταφορά της θερμότητας σε προσαυξημένο με PCM τοίχο, έχουν προσομοιωθεί τα προφίλ των θερμοκρασιών του τοίχου αυτού, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 7.2.1.3 : Θερμοκρασιακό προφίλ τοίχου με PCM μετά από 1760min.

Συγκεκριμένα, βλέπουμε μια σύγκριση ανάμεσα στα προβλεπόμενα θερμοκρασιακά προφίλ σε συνάρτηση με το πάχος τοίχου, όταν χρησιμοποιούνται δύο ειδών PCM, το GR27 και το GR41, τα οποία τοποθετούνται σε διάφορες θέσεις μέσα στον τοίχο για 1760min, οπότε η εξωτερική θερμοκρασία του τοίχου λαμβάνει την χαμηλότερη τιμή της. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία στις δύο επιφάνειες του διακένου, για την περίπτωση χωρίς PCM είναι 7.5 και 18, ενώ τα φαινόμενα της συναγωγής και της συμπύκνωσης είναι πιθανό να εμφανιστούν. Με την προσθήκη του PCM GR41 στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου, η θερμοκρασιακή διαφορά μέσα στο διάκενο μειώνεται. Η θερμοκρασία που χάθηκε από το εσωτερικό προς το εξωτερικό για την περίπτωση GR27 filled cavity είναι η μέγιστη, αυτό άλλωστε είναι εμφανές από την ελάχιστη προβλεπόμενη θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας και την μέγιστη θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας, επομένως η θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος του διακένου είναι η μικρότερη. Επιπλέον, μόνωση της εξωτερικής επιφάνειας του τοίχου με GR41 πάχους 30mm και 50mm μπορεί να περιορίσει αρκετά την μείωση της θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια της εξωτερικής πλευράς του διακένου. Ακόμα, δεν παρατηρείται μεταβολή στην θερμοκρασία κατά μήκος του τσιμέντου ή του τούβλου για καμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και η τοποθέτηση του PCM στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου αν και μπορεί να μειώσει την θερμότητα που χάνεται από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του δωματίου, δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη θερμοκρασία μέσα στο διάκενο.

Τελευταίο διάγραμμα της έρευνας αυτής αποτελεί το επόμενο, το οποίο παρουσιάζει τις προβλεπόμενες θερμοκρασίες για τοίχο προσυζητημένο με 20 mm GR27, για τις καιρικές συνθήκες της 21 Ιανουαρίου και 21 Ιουνίου στην Βρετανία.



Εικόνα 7.2.1.4 : Προβλεπόμενες θερμοκρασίες για τοίχο με 20 mm GR27, για τις καιρικές συνθήκες της 21 Ιανουαρίου και 21 Ιουνίου στην Βρετανία.

Όπως φαίνεται, το καλοκαίρι, η προσθήκη του PCM μειώνει σημαντικά τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες αλλαγής φάσης, ενώ και τον χειμώνα μειώνει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις πιο αποτελεσματικά από έναν απλό τοίχο με διάκενο χάρη στην αυξημένη θερμική μάζα. Παρ'όλα αυτά, η επίδραση του υλικού αλλαγής φάσης στον έλεγχο της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου μειώνεται κατά την διάρκεια της δεύτερης και της τρίτης ημέρας κυρίως λόγω της αλλαγής στο ποσό της αισθητής θερμότητας που αποθηκεύεται στο PCM. Στο τέλος της δεύτερης και της τρίτης ημέρας η θερμοκρασία πέφτει κάτω από την θερμοκρασία αλλαγής φάσης υποδηλώνοντας την αποβολή λανθάνουσας θερμότητας.

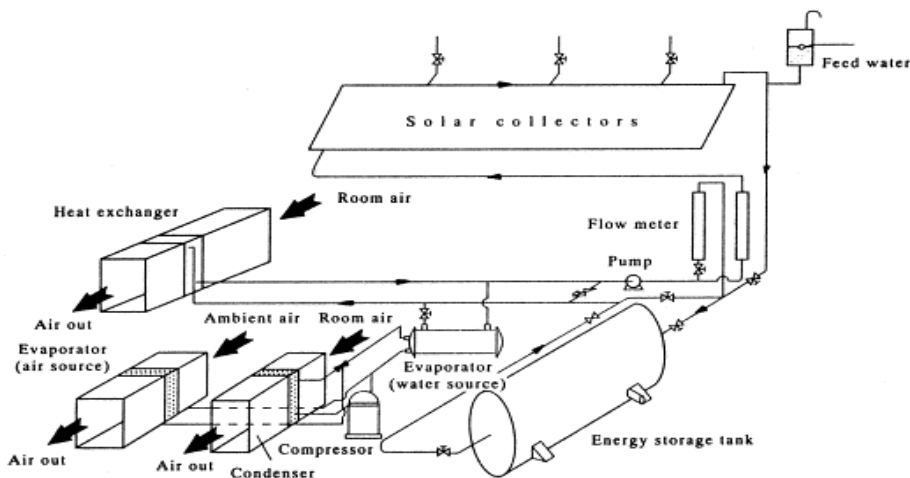
Τέλος, αναφέρεται γενικότερα ότι η συγκριτική ανάλυση των διαφόρων τύπων τοίχου με διάκενο αποδεικνύει τα προτερήματα της χρήσης λανθάνουσας μορφής θερμότητας και των χαμηλών θερμοκρασιών για τα παθητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας στα κτίρια.

Κεφάλαιο 8

Εφαρμογές ενεργητικών συστημάτων pcm σε κτίρια

Στις εφαρμογές σε κτίρια, τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να τοποθετηθούν σε άλλα συστήματα, όπως συστήματα ηλιακής θέρμανσης με χρήση αντλίας, συστήματα ανάκτησης θερμότητας, συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης κ.τ.λ., ως ενεργητικές εφαρμογές προκειμένου να εξυπηρετήσουν λειτουργικούς σκοπούς και να βελτιώσουν την ικανότητα μεταφοράς θερμότητας των pcm.

Η αποτελεσματικότητα του συνδυασμού συστημάτων ηλιακής θέρμανσης με χρήση αντλίας με το pcm (για παράδειγμα $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) για θέρμανση χώρου ερευνάται σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο σε πολλές μελέτες[63]-[67] Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μία σχηματική καθολική απεικόνιση του πειραματικού συστήματος θέρμανσης σε αυτές τις μελέτες.



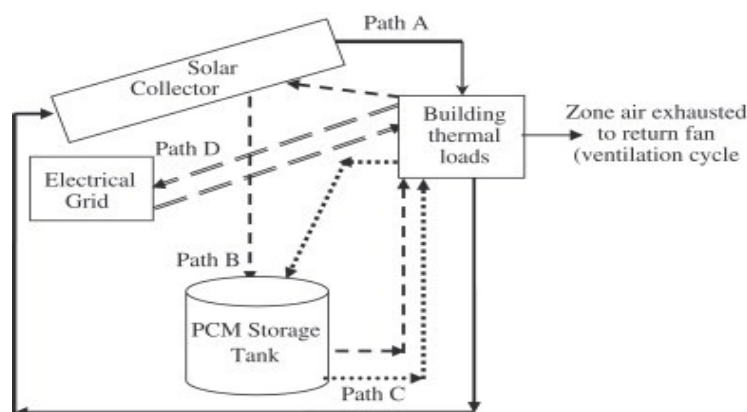
Εικόνα 8.1.1 : Σχηματική απεικόνιση του συστήματος θέρμανσης

Η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων του συστήματος στη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα του κτιρίου, η διακύμανση της θερμοκρασίας του pcm στη δεξαμενή αποθήκευση και οι θερμοκρασίες του υγρού που μεταφέρει τη θερμότητα, δηλαδή του νερού, στους ηλιακούς συλλέκτες και η δεξαμενή αποθήκευσης ενέργειας για σειριακά, παράλληλα και διπλά συστήματα ηλιακής θέρμανσης με χρήση αντλίας ερευνώνται στις αναφορές.[63]-[66] Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το διπλό σύστημα αποθήκευσε ενέργεια από το δίκτυο των 120kWh, ενώ το παράλληλο σύστημα αποθήκευσε 10120 kWh και το σειριακό σύστημα αποθήκευσε 9390 kWh ενέργεια δικτύου ανά περίοδο θέρμανσης για την περίπτωση που εξετάζεται σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα. Επίσης, αποδείχθηκε ότι το pcm είναι ένα σημαντικό συστατικό για συστήματα ηλιακής θέρμανσης με χρήση σωλήνων σε εύκρατες κλιματικές συνθήκες και το $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ είναι προτιμότερο σαν υλικό αποθήκευση σε τέτοιες κλιματικές συνθήκες, αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο οικονομικός παράγοντας. Αξίζει να σημειωθεί ότι μία αλλαγή στη θερμοκρασία συνηθίζεται προκειμένου να ελεγχθεί τα σειριακά συστήματα ηλιακής θέρμανσης στο να αλλάζουν από χρήση απευθείας ηλιακής θέρμανσης σε χρήση των σωλήνων ή και το αντίστροφο. Για να περιγραφεί η ημερήσια προσωρινή συμπεριφορά του pcm σε

διαδικασίες φόρτισης και αποφόρτισης αναπτύχθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο από τον Essen.[67] Μία σύγκριση ανάμεσα στα μαθηματικά αποτελέσματα του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα έδειξε αναμενόμενη ταύτιση. Επιπλέον, έδειξε ότι οι κύλινδροι του pcm με μικρότερα ραντί θα λιώσουν σε μικρότερο χρονικό διάστημα και μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ περισσότερη θερμότητα.

Ένα σύστημα αποθήκευσης υβριδικού pcm για διαχείριση ηλιακής και ηλεκτρικής ενέργειας προτάθηκε από τους Hammou και Lacroix[68]-[69]. Η ηλιακή ενέργεια αποθηκεύεται κατά την διάρκεια των ημερών με ηλιοφάνεια και απελευθερώνεται αργότερα την νύχτα ή τις μέρες με συννεφιά, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται τις περιόδους περιορισμένης ζήτησης που το ρεύμα είναι σε πιο οικονομική τιμή και χρησιμοποιείται στις περιόδους υψηλής ζήτησης. Ένα μοντέλο μεταφοράς θερμότητας του υβριδικού pcm αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε για να εξετάσει την επίδραση διάφορων υλικών αποθήκευσης και λειτουργικών συνθηκών στην θερμική συμπεριφορά του αποθηκευτικού μέσου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η οποία πραγματοποιήθηκε σε ένα δωμάτιο δοκιμής στην πόλη Μόντρεαλ του Καναδά, έδειξε ότι η ηλεκτρική κατανάλωση για θέρμανση χώρου μπορεί να μειωθεί κατά 32% και περισσότερο από 90% της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώθηκε κατά την διάρκεια ωρών χαμηλής ζήτησης.

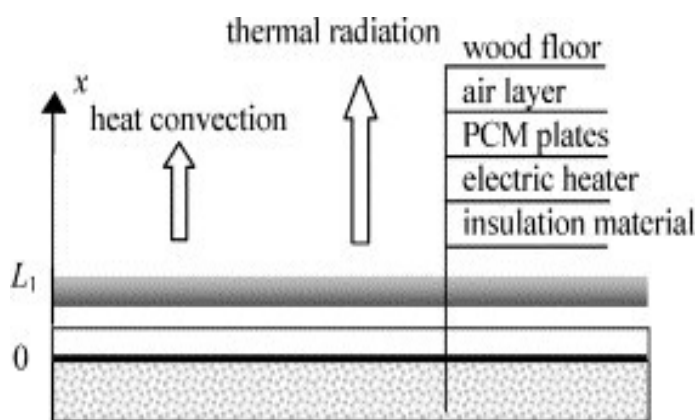
Το αποτέλεσμα της χρήσης ενός ηλιακού συλλέκτη σε σχήμα επίπεδου πιάτου και μίας δεξαμενής αποθήκευσης pcm για να προσφέρει ενέργεια σε κατοικημένες περιοχές ερευνήθηκε από τους Hassan και Beliveau.[70] Το σύστημα λειτουργούσε ελέγχοντας το σωλήνα κυκλοφορίας και τη διαδρομή του υγρού. Η διαδρομή του υγρού αλλάζει βασιζόμενη σε αλλαγές στο σύστημα ή στο επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας και της εξωτερικής θερμοκρασίας. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι εναλλακτικές διαδρομές παροχής ενέργειας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η οποία πραγματοποιήθηκε σε ένα επιλεγμένο κτίριο στο Blacksburg, έδειξε ότι το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να εξασφαλίσει το 88% των απαιτήσεων θέρμανσης χώρου και ζεστού νερού κατά την διάρκεια ενός χρόνου εξοικονομώντας περίπου το 61,5% του ετήσιου λογαριασμού θέρμανσης για τον ιδιοκτήτη του σπιτιού και μειώνοντας την ανάγκη για μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, οι συγγραφείς επεσήμαναν ότι η χρήση του pcm δεν ήταν οικονομική για τις δεδομένες συνθήκες που επικρατούσαν.



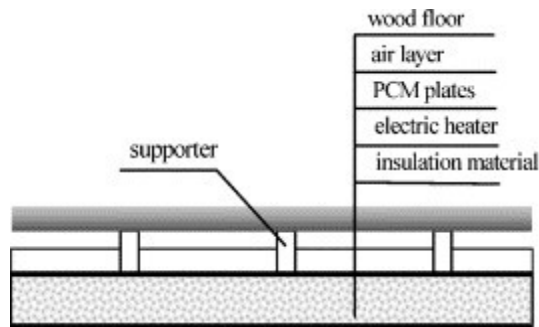
Εικόνα 8.1.2: Εναλλακτικές διαδρομές παροχής ενέργειας

Ένα σύστημα ηλιακής απορρόφησης για ψύξη με χρήση pcm σχεδιάστηκε στην αναφορά.[71] Κατά την λειτουργία της θέρμανσης το pcm εξισορροπεί την θερμότητα που παράγεται από το ηλιακό σύστημα και άλλες πηγές θερμότητας για να προσφέρει την κατάλληλη θερμότητα για τα κτίρια. Μία ανάλυση της θερμικής σχεδίασης των διαφορετικών συστατικών του συστήματος έδειξε ότι η εισαγωγή του pcm μπορεί να μειώσει το μέγεθος του συστήματος ηλιακού συλλέκτη από την εφαρμογή της ψύξης με ξηρό αέρα σε αντιπαράβολή με ένα συνηθισμένο σχεδιασμού με υγρή ψύξη. Επίσης, έδειξε ότι το pcm έχει θετική επίδραση στο ηλιακό κέρδος επιτρέποντας την λειτουργία σε χαμηλή θερμοκρασία στους ηλιακούς συλλέκτες.

Το σύστημα ενδοδαπέδιας ηλεκτρικής θέρμανσης με SSPCM μελετήθηκε πειραματικά και αριθμητικά στις αναφορές.[72]-[74] Το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να παίρνει θερμότητα χρησιμοποιώντας το ηλεκτρικό ρεύμα τις βραδινές ώρες που είναι πιο οικονομικό και να την αποδίδει την ημέρα που ουσιαστικά χρειάζεται. Η πειραματική μελέτη διεξάχθηκε σε ένα σπίτι, ενώ η αριθμητική στηρίχθηκε στο μοντέλο ενθαλπίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εσωτερική θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί αισθητά. Η θερμοκρασία του στρώματος pcm μπορεί να διατηρηθεί στην θερμοκρασία μετατροπής για μεγάλη χρονική περίοδο αφότου σταματήσει η παροχή θερμότητας. Ένα υβριδικό σύστημα θέρμανσης συνδυασμένο με θερμική αποθήκευση χρησιμοποιώντας στρώμα SSPCM ερευνήθηκε στις αναφορές [75]αριθμητικά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίδραση της θερμικής αποθήκευσης του στρώματος SSPCM μπορούν να βελτιώσουν το επίπεδο θερμικής άνεσης και να εξοικονομήσουν περίπου το 47% της χρήσης ενέργειας σε κανονικές και αυξημένης ζήτησης ώρες και το 21% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας τον χειμώνα στο Πεκίνο.



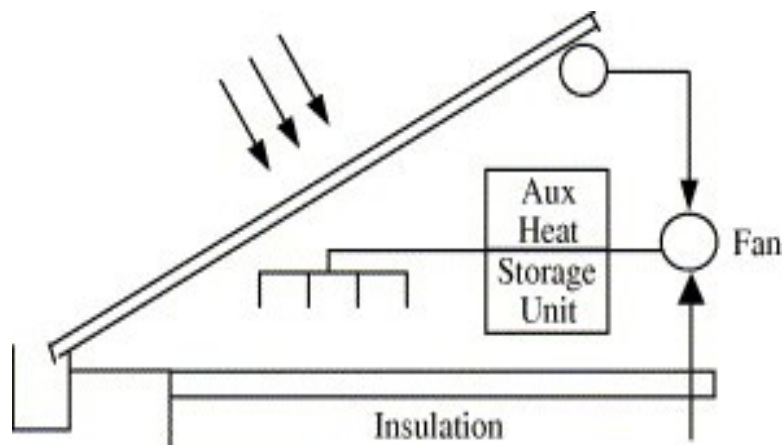
Εικόνα 8.1.3:Σχηματική απεικόνιση ενδοδαπέδιας θέρμανσης χώρου



Εικόνα 8.1.4: Σχηματική απεικόνιση ενδοδαπέδιας θέρμανσης χώρου

Οι δυνατότητες της χρήσης του pcm σε ενδοδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση επίσης ερευνάται στις αναφορές.[76]-[77] Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από την αναφορά έδειξαν ότι ένα στρώμα pcm με πάχος 30mm τοποθετημένο ανάμεσα στον θερμαντή και στα πλακάκια του δαπέδου με σημείο τήξης κοντά στους 40° C είναι ικανό να παρέχει την αναγκαία θερμότητα κατά την διάρκεια της ημέρας, όταν ο θερμαντής χρησιμοποιείται μόνο οκτώ ώρες κατά την διάρκεια της νύχτας, που επιτρέπει μία μεταφορά της τάξεως των 7.2MJ/m² ανά ημέρα ηλεκτρικής ενέργειας από τις περιόδους αυξημένης ζήτησης στις περιόδους περιορισμένης ζήτησης. Δύο πλάκες σκυροδέματος με διαστάσεις 0,5m x 0.5m x 0.095m κατασκευάστηκαν στην αναφορά[77] για να προσομοιώσουν τα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με και χωρίς pcm. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα με CaCl₂ 6H₂O σαν μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορεί να εξασφαλίσει ομοιόμορφη θέρμανση κατά την διάρκεια της ημέρας και να κρατήσει την επιφάνεια του δαπέδου κοντά στην επιθυμητή θερμοκρασία των 24° C εάν φυσικά το σύστημα είναι σχεδιασμένο κατάλληλα.

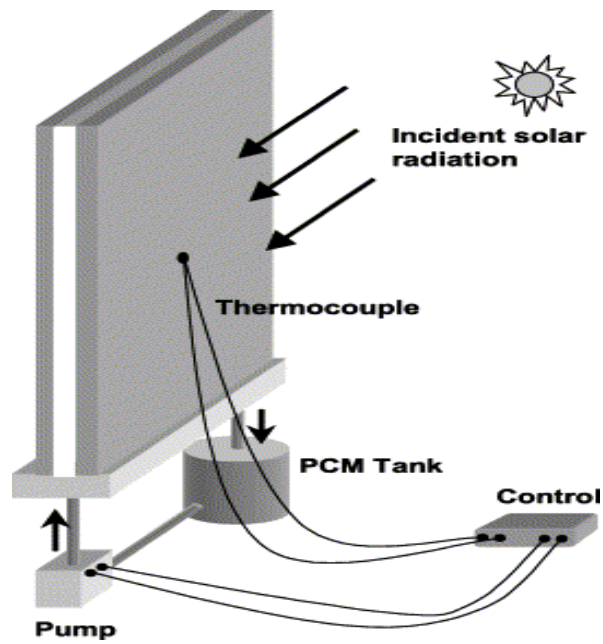
Ένα σύστημα ηλιακής θέρμανσης εγκατεστημένο στην οροφή με χρήση pcm μελετάται πειραματικά και αριθμητικά στις αναφορές[78]. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το προτεινόμενο σύστημα, το οποίο χρησιμοποιεί την ήδη υπάρχουσα οροφή σαν ένα ηλιακό συλλέκτη /απορροφητή και ενσωματώνει το pcm για να αποθηκεύσει θερμότητα κατά την διάρκεια της ημέρας και να την αποδώσει προκειμένου να θερμάνει τον χώρο όπου διαμένουν οι άνθρωποι κατά την διάρκεια της νύχτας ή στην περίπτωση που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Το σύστημα αυτό εφαρμόστηκε σε ένα σπίτι στην Adelaide, Australia. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίδραση της αισθητής θερμότητας γινόταν αντιληπτή στις αρχικές περιόδους της διαδικασίας της τήξης και της πήξης. Μία υψηλότερη τιμή για την θερμοκρασία εισόδου του αέρα και τον δείκτη ροής του αέρα μπορεί να αυξήσει τους δείκτες μεταφοράς θερμότητας και να μικρύνει την διάρκεια της τήξης, αλλά πρέπει να αναφερθεί ότι ένας υψηλότερος δείκτης ροής αέρα αυξάνει την θερμοκρασία εξόδου του αέρα.



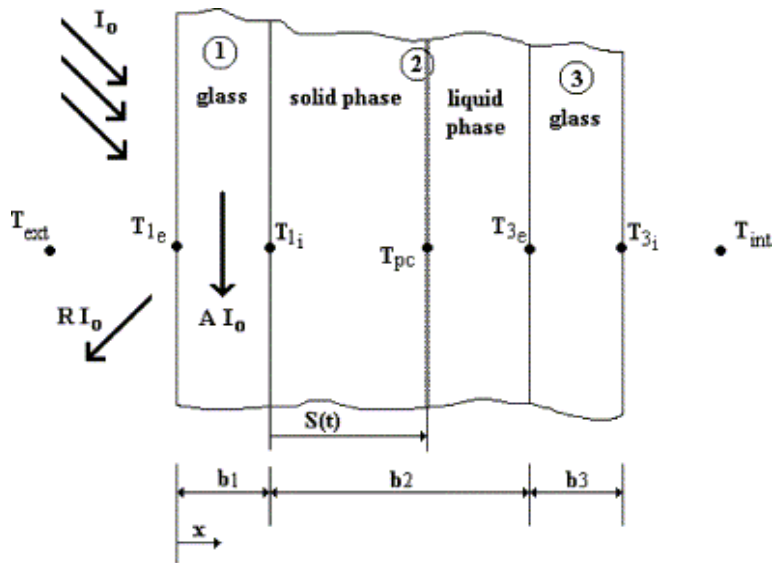
Εικόνα 8.1.5: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος ηλιακής θέρμανσης της οροφής

Ένα θερμικό ενεργητικό πάνελ οροφής με pcm, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, προτάθηκε στην αναφορά[79] για ελαφρές και ανακαινισμένες κατασκευές. Το pcm στα πάνελ οροφής λιώνει στην διάρκεια της ημέρας κατά την έκθεση στα θερμικά φορτία και παγώνει στην διάρκεια της νύχτας χρησιμοποιώντας ένα ενιαίο σύστημα σωλήνων νερού. Η προσομοίωση με χρήση TRNSYS και εργαστηριακές δοκιμές απέδειξε ότι ένα στρώμα pcm πάχους 5cm σε μικροκάψουλες (25% κατά βάρος) και γύψο είναι αρκετό για να διατηρήσει μία θερμοκρασία άνεσης στο δωμάτιο σε κτίρια με γραφεία.

Οι Ismail και Henriquez[80] πρότειναν την ιδέα ενός παραθύρου με μετακινούμενες κουρτίνες pcm. Το παράθυρο ήταν με διπλό τζάμι με ένα κενό ανάμεσα στα τζάμια και ένα άνοιγμα αέρα στην γωνία της κορυφής. Οι πλευρές και ο πάτος είναι σφραγισμένα με εξαίρεση τις δύο τρύπες στον πάτο, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με πλαστικούς σωλήνες με μία αντλία και μία δεξαμενή pcm. Όταν η θερμοκρασιακή διαφορά φτάνει μία προκαθορισμένη τιμή, η αντλία ξεκινάει να δουλεύει και το υγρό pcm αδειάζει με άντληση από τη δεξαμενή για να συμπληρώσει το κενό μεταξύ των δύο τζαμιών. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η προτεινόμενη ιδέα του συστήματος παραθύρου συμπληρωμένου με pcm είναι θερμικά αποτελεσματική, και το <<πράσινο>>, δηλαδή το οικολογικό και φιλικό προς το περιβάλλον, pcm είναι κατάλληλο για να μειώσει την ποσότητα της μη επιθυμητής θερμότητας που οφείλεται στην ακτινοβολία.



Εικόνα 8.1.6: Σχηματική απεικόνιση παραθύρου με μετακινούμενες κουρτίνες pcm



Εικόνα 8.1.7: Απεικόνιση παραθύρου με διπλό γυαλί pcm

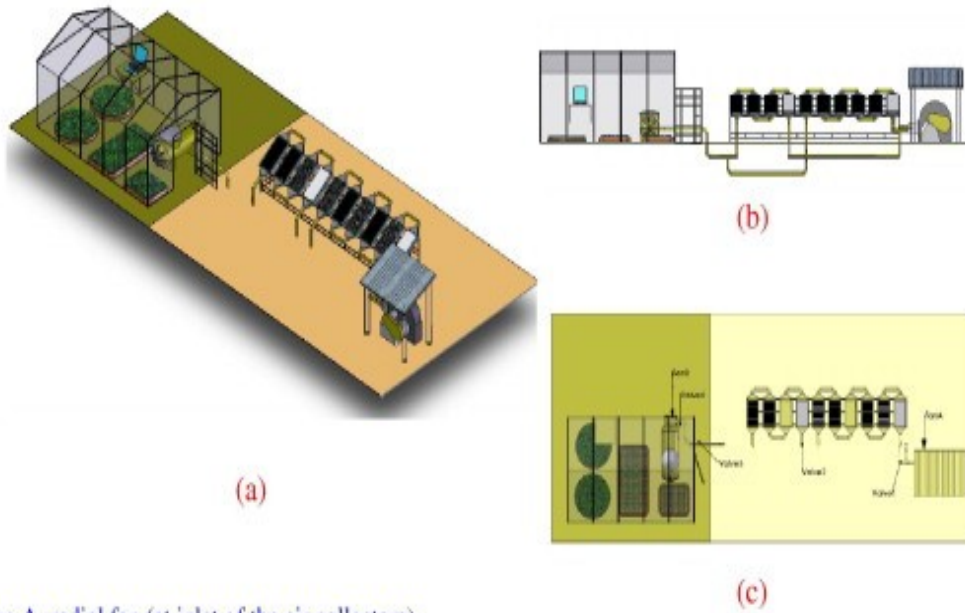
Η θερμική απόδοση της οροφής ενός κτιρίου, η οποία είναι ενσωματωμένη σε ένα ανόργανο ευτηκτικό pcm, για την διαχείριση της θερμότητας σε μία κατοικία στην Ινδία μελετήθηκε από τον Pasupathy και τους συνεργάτες τους. [81] Για να διαλυθεί το pcm, το οποίο δεν αλλάζει φάση για να μεταβεί στην στερεή κατάσταση τις νυχτερινές ώρες τους ζεστούς μήνες του καλοκαιριού, χρησιμοποιείται μία δεξαμενή νερού χωρητικότητας 200L για να κυκλοφορεί το νερό διαμέσου του πάνελ του pcm και να μεταφέρει θερμότητα από το στρώμα του pcm στο ταβάνι. Η πειραματική μελέτη με ένα μονό στρώμα pcm έδειξε ότι η ποσότητα του νερού που απαιτείται είναι υπερβολικά μεγάλη (περίπου 830 kg/m² για την περίπτωση που μελετάται) και δεν είναι εύκολο να είναι πάντα διαθέσιμη κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών.

Ένα σύστημα κλιματισμού χαμηλής ενέργειας, το οποίο συνδυάζει το ψυχρό ταβάνι, pcm σε μίγμα με ασβεστόγαλα σε μικροκάψουλες (MPCM) και τεχνολογίες ψύξης με εξάτμιση κάποιου υλικού προτάθηκε από τον Wang και τους συνεργάτες του. [82] Το βασικό χαρακτηριστικό του συστήματος ήταν ότι η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με χρήση MPCM και ασβεστόγαλα επιτρέπει στην ψύξη με εξάτμιση να αποθηκεύεται στο μίγμα σε εικοσιτετράωρη λειτουργία όποτε η θερμοκρασία υγρής σφαίρας φτάνει το προκαθορισμένο σημείο. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το καινούργιο σύστημα μπορεί να προσφέρει δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας της τάξης του 80% στην βορειοδυτική Κίνα και του 10% στην νοτιοανατολική Κίνα.

Ο Gu και οι συνεργάτες του πρότειναν ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιώντας pcm για να ανακτηθεί η χαμένη θερμότητα. Από τα συστήματα κλιματισμού και για να τροφοδοτηθεί το σπίτι με ζεστό νερό για οικιακή χρήση. [83] Το προτεινόμενο σύστημα ανάκτησης θερμικής ενέργειας αποτελείται από ένα συμβατικό σύστημα κλιματισμού, δύο ηλεκτρικούς συσσωρευτές ανάκτησης θερμότητας και ένα βοηθητικό ηλεκτρικό θερμαντή νερού. Ο θερμοδυναμικός υπολογισμός έδειξε ότι η αναλογία της αποτελεσματικότητας της ενέργειας του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί όταν ολόκληρη η απορριπτόμενη αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα από τα συστήματα κλιματισμού μπορεί να ανακτηθεί.

Ένα σύστημα αποθήκευσης υλικού αλλαγής φάσης, το οποίο αποτελείται από τμήματα διαφορετικών υλικών με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης προτάθηκε από τους Vakilaltojar και Saman [84] για εφαρμογές κλιματισμού, στις οποίες το pcm τοποθετείται σε λεπτά επίπεδα containers και υπάρχει αέρα, ο οποίος περνάει από τα κενά που δημιουργούνται ανάμεσα τους. Η προσομοίωση έδειξε ότι η κατανομή της ταχύτητας του αέρα στην είσοδο δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας και την θερμοκρασία εξόδου του αέρα αισθητά. Προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικρά κενά αέρα και λεπτότερες φέτες pcm.

Διαφορετικά ενεργητικά συστήματα που παρουσιάστηκαν στις παραπάνω μελέτες έχουν δείξει ότι είναι θερμικά αποτελεσματικά και τεχνικά εφικτά. Ωστόσο, τα οικονομικά οφέλη και οι περίοδοι αποπληρωμής εξαιτίας της χρήσης αυτών των ενεργητικών συστημάτων θα πρέπει να αναλυθούν προσεκτικά πριν εφαρμοστούν στην πράξη.



fan A: radial fan (at inlet of the air collectors)
 fan B: axial fan (at inlet of the PCM tank)
 valve 1: at inlet of the first group collectors
 valve 2: at inlet of the second group collectors
 valve 3: at inlet of the green house
 valve 4: at inlet of the PCM tank

Heating of greenhouse: valves 1, 2, 3 open-valve 4 closed-fan A on
 Charging of PCM: valves 1,2,4 open- valve 3 closed-fan A on
 Discharging of PCM: valve 4 open- valves 1,2,3 closed- fan B on- fan A off

Εικόνα 8.1.8: Εξοπλισμός θέρμανσης θερμοκηπίου

Κεφάλαιο 9

Εφαρμογες παθητικών συστημάτων pcm σε κτίρια

9.1 Εισαγωγή

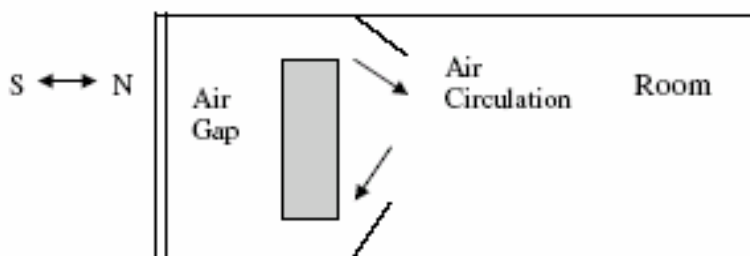
Τρεις είναι οι κύριοι τρόποι για χρήση PCM στα κτίρια για θέρμανση-ψύξη:

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.

9.2 Τοίχος trombe με PCM [61]

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 μίας μονωτικής κουρτίνας, η οποία θα είναι κλειστή το βράδυ, ανάμεσα στο κάλυμμα και στον τοίχο. Ο παραδοσιακός τοίχος trombe βασιζόταν στην αισθητή μορφή 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 απορροφώμενη 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:



Εικόνα 9.2.1 : Σχηματικό διάγραμμα τοίχου Trombe με PCM

Ο Bourdeau [86] ερεύνησε δύο τοίχους παθητικής αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιούσαν calcium chloride hexahydrate, με σημείο τήξης 29°C. Κατέληξε ότι ένας τοίχος πάχους 8.1 cm με PCM παρουσίαζε ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά από έναν κλασικό τοίχο πάχους 40 cm.

Οι Buddhi και Sharma [87] μέτρησαν το κατά πόσο μεταφέρεται ηλιακή ακτινοβολία μέσω ενός υλικού αλλαγής φάσης για διαφορετικές θερμοκρασίες και πάχη. Κς 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.

9.3 Παραθυρόφυλλο με PCM [61]

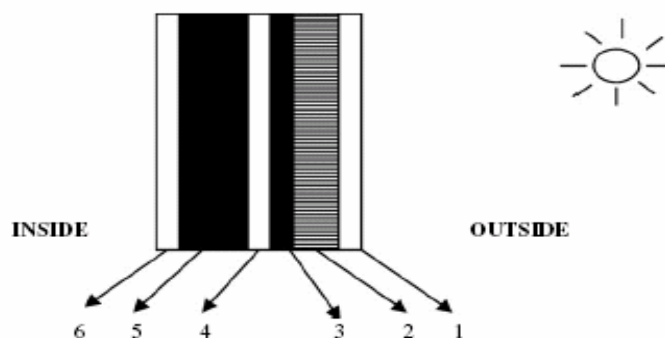
Σε αυτή την εφαρμογή, παραθυρόφυλλο που περιέχει PCM τοποθετείται έξω από επιφάνειες παραθύρων. Κατά την διάρκεια της ημέρας είναι ανοιχτά προς το περιβάλλον, η εξωτερική του πλευρά εκτίθεται σε ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται θερμότητα και το PCM λιώνει. Την νύχτα, κλείνουμε το παραθυρόφυλλο, ανοίγουμε το παράθυρο και θέρμανση από το PCM εισέρχεται λόγω ακτινοβολίας στον χώρο. Οι Budhi et al. [88], ερεύνησαν την θερμική συμπεριφορά ενός δοκιμαστικού δωματίου διαστάσεων 1 m x 1 m x 1m, με και χωρίς υλικό αλλαγής φάσης. Κς 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.

9.4 Τοίχος συλλογής ηλιακής θερμότητας για αερισμό του κτιρίου [85]

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 [89] 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. Η 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 [90] 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 όπως φαίνεται και στο σχήμα που δίδεται παρακάτω.



Εικόνα 9.4.1 :Στοιχεία του PCM «ηλιακου τοίχου».

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 της 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. Κατ'αρχήν, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα με τόσο υψηλή αποδοτικότητα οφείλεται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατ'ευθείαν 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.

9.5 Γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM [85]

Η γυψοσανίδα με PCM ή το πάνελ είναι ένας εξαιρετικά ενδιαφέρον 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. Παρ'όλα 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, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

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.

Οι Peippo et al.[100] 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 °C πάνω από την μέση θερμοκρασία του δωματίου.

Οι Stetiu και Feustel[91], ερεύνησαν την χρήση διπλής γυψοσανίδας με PCM για την περαιτέρω 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 κατάληξαν 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 Neeper [49] έχει εξετάσει την δυναμική μίας 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 0.5X 0.5 m². 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 εμσωματωμένη στο καθένα, τα οποία είχαν θερμανθεί σε ένα φούρνο και στη συνέχεια παρακολουθούνταν 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 πιά ελαφριές κατασκευές.

Οι Kissock et al [92], 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 παρακολουθούνταν 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.

9.6 Μπλόκ τσιμέντου με ενσωματωμένο PCM [85]

Οι Hawes et al [93], 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 εμβάπτισης 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 απρρόφησης 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. [94], και εφαρμοσθεί σε solite ρηγά 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 ρηδό-κεντρικό χώρο των μπλόκ τσιμέντου, μπορούν να φιλοξενήσουν μεγάλες

ποσότητες PCM και αντίστοιχα πολύ μεγάλες ποσότητες θερμότητας προς αποθήκευση.

Ο Chahroudi [95], 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. [96], 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.1ύο 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 Hadjieva et al. [97], 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 ενυδρών αλάτων, όπως το φαινόμενο “supercooling”.

9.7 PCM ενσωματωμένο σε ξύλο-ελαφύ τσιμέντο[85]

Το ξύλο-ελαφρύ τσιμέντο είναι ένα μίγμα από τσιμέντο, κομμάτια ξύλου ή σκόνη από πρίονι, 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 Rubiherm GR40, 1-3mm και το GR50, 0.2-0.6mm εξετάστηκαν από τους Mehling et al. [98]. 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
- Θερμική ικανότητα c_p ανάμεσα 0.39-0.48 kJ/kg K για $\rho=1300$ kg/m³
- Πυκνότητα 60-70% της τιμής του καθαρού τσιμέντου(0.67 kL/kg K για $\rho=2400$ kg/m³)

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

9.8 Θερμικά αυξημένος σκελετός τοίχου με PCM[85]

Οι Meng Zhang et al.[99], παρουσίασαν την ανάπτυξη ενός θερμικά αυξημένου σκελετού τοίχου, ο οποίος μειώνει τα μέγιστα της ζήτησης κλιματισμού σε κατοικίσια κτίρια. Ένας σκελετός τοίχου που περιέχει υψηλή κρυσταλλική παραφίνη ως PCM, μέσω μακροενσωμάτωσης σε κάψουλες είναι αυτός που αναπτύχθηκε, κατασκευάστηκε και αξιολογήθηκε. Αυτός ο πρότυπος 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.

Κεφάλαιο 10

Χρήση υλικών αλλαγής φάσης για ηλιακή ενδοδαπέδια θέρμανση χώρου

10.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα μελέτη θα εξετασθεί η θέρμανση χώρου με εμβαδό δαπέδου $10 \times 10 = 100 \text{m}^2$, ύψος 3m και συνολική επιφάνεια υαλοπινάκων 30m^2 στον νότιο και δυτικό τοίχο. Το κτίριο είναι μία τράπεζα που βρίσκεται στην περιοχή της Αθήνας με γεωγραφικό πλάτος $\varphi = \beta = 38^\circ$ και νότιο προσανατολισμό $\gamma = 0^\circ$. Στην οροφή του συγκεκριμένου κτιρίου είναι τοποθετημένοι ηλιακοί συλλέκτες συνολικού εμβαδού 30m^2 και κλίσης 60° με στόχο την θέρμανση νερού, το οποίο ρέει κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας σε σωλήνες εγκατεστημένους μέσα σε ενδοδαπέδιο στρώμα pcm. Συνεπώς το στρώμα αυτό απορροφά θερμότητα και μεταπίπτει στην υγρή φάση. Κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας διακόπτεται η παροχή του νερού με αποτέλεσμα την στερεοποίηση του pcm λόγω απόδοσης θερμότητας στον προς θέρμανση χώρο. Προκειμένου να μην υπάρξει πρόβλημα στην τοποθέτηση των ηλιακών συλλεκτών, δεδομένου ότι επιθυμούμε να μην αλληλοεπισκιάζονται, τοποθετείται στην οροφή του κτιρίου μία προσθήκη(υπόστεγο). Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι με αυτήν την εφαρμογή δεν πραγματοποιείται 100% κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου, αλλά ένα μεγάλο ποσοστό. Για τον λόγο αυτό παράλληλα χρησιμοποιούνται και άλλα συμπληρωματικά μέσα, όπως καλοριφέρ και κλιματιστικά. Προφανές είναι ότι η μελέτη θα πραγματοποιηθεί την 21^η ημέρα για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο.

10.2 Επιλογή υλικού αλλαγής φάσης

Το υλικό αλλαγής φάσης που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ένα υποθετικό υλικό, του οποίου η κατασκευή απαιτεί περαιτέρω εργαστηριακή έρευνα. Τα χαρακτηριστικά του είναι:

- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης $20\text{-}26^\circ\text{C}$
- Λανθάνουσα Θερμότητα $H = 150 \text{kJ/kg}$
- Πυκνότητα $\rho = 1019 \text{kg/m}^3$
- Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα $k = 0.6 \text{W/m}^\circ\text{C}$
- Ειδική θερμοχωρητικότητα στερεής φάσης = Ειδική θερμοχωρητικότητα υγρής φάσης: $C_{p,s} = C_{p,l} = 5000 \text{J/kg}^\circ\text{C}$

Για την προσομοίωση της αλλαγής φάσης κατά τις αριθμητικές επιλύσεις χρησιμοποιείται η μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας, όπου η θερμοχωρητικότητα του pcm δίνεται από μία συνάρτηση της θερμοκρασίας γνωστή ως "συνάρτηση ενεργού θερμοχωρητικότητας" $C_{p,\text{eff}}(T)$. Το μοντέλο αυτό επιλέχθηκε, επειδή η αλλαγή φάσης ενδιαφέρει μόνο σαν μακροσκοπικό φαινόμενο χωρίς να υπάρχει ανάγκη υπολογισμού περαιτέρω λεπτομερειών στη διφασική περιοχή.

Κατόπιν μετρήσεων εκτιμάται ότι οι συναρτήσεις $C_{p,\text{eff}}(\text{J/kg}^\circ\text{C})$ συναρτήσει της θερμοκρασίας T είναι οι εξής:

$$C_p = 4 * (H - b * C_{ps}) * \frac{(T - T_s)}{b^2} + C_{ps} \quad \text{για } T_s \leq T \leq T_c \quad (10.2.1)$$

$$C_p = 4 * (b * C_{p,l} - H) * \frac{(T - T_s - b/2)}{b^2} + \frac{2 * H - C_{p,l}}{b} \quad \text{για } T_c \leq T \leq T_l \quad (10.2.2)$$

Στην περίπτωση μας όπως έχουμε ήδη αναφέρει $T_s = 20^\circ\text{C}$ και $T_l = 26^\circ\text{C}$. Το b είναι το θερμοκρασιακό εύρος ($T_s - T_l$) με T_s και T_l τις θερμοκρασίες στην αρχή και το πέρας της στερεοποίησης, $b = 6$.

Με αντικατάσταση των τιμών των μεταβλητών οι εξισώσεις γίνονται:

$$C_p = (480000/36) * (T - 20) + 50000 \quad \text{για } T_s \leq T \leq T_c \quad (10.2.3)$$

$$C_p = (-480000/36) * (T - 23) + 45000 \quad \text{για } T_c \leq T \leq T_l \quad (10.2.4)$$

10.3 Καθορισμός της διαστρωμάτωσης του δαπέδου, των τοίχων και της οροφής

10.3.1 Δια στρωμάτωση δαπέδου

Η διαστρωμάτωση παρουσιάζεται από κάτω προς τα πάνω:

Μόνωση: πλάκες εξηλασμένης πολυστερίνης 100mm

Πλάκα σκυροδέματος 100mm

pcm 50mm

επίστρωση δαπέδου 30mm

10.3.2 Διαστρωμάτωση τοίχων

Η διαστρωμάτωση είναι κοινή για όλους τους τοίχους:

επίχρισμα: 2cm

δρομικός : 9cm

μόνωση : 4cm

δρομικός : 9cm

επίχρισμα: 2cm

10.3.3 Διαστρωμάτωση οροφής

Η διαστρωμάτωση παρουσιάζεται από κάτω προς τα πάνω:

στεγανοποίηση : 1cm

κισσηρόδεμα : 10cm

οπλ. Σκυρόδεμα : 14cm

επίχρισμα : 1,5cm

10.3.4 Φυσικά χαρακτηριστικά υλικών

Υλικά	Πυκνότητα(kg/m ³)	Θερμική αγωγιμότητα k(W/m °C)	Ειδική Θερμοχωρητικότητα Cp(J/kg°C)
Μάρμαρο	2680	2,8	830
Σκυρόδεμα	2300	2,2	880
Μόνωση τοίχου	35	0,04	1210
Μόνωση οροφής	27	0,019	1210
Μόνωση δαπέδου	27	0,019	1210
Σοβάς	1860	1,2	835
Τούβλο	1690	0,65	900

Η τιμή του συντελεστή συναγωγής ανάμεσα στον τοίχο και στο περιβάλλον επιλέγεται ίση προς $h_{out} = 16 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, η οποία αποτελεί τυπική τιμή που χρησιμοποιείται συχνά στις εφαρμογές. Η ASHRAE προτείνει τιμή του συντελεστή συναγωγής ανάμεσα στο δάπεδο και τον εσωτερικό χώρο $h_{in} = 8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

10.4 Μαθηματικό Μοντέλο

Παρακάτω περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο που ακολουθείται κατά την υπολογιστική διαδικασία:

1) Αρχικά υπολογίζεται η άμεση, διάχυτη και ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στους υαλοπίνακες για κάθε ώρα της ηλιοφάνειας (07:00-18:00) από τις εξισώσεις που δίνονται (επειδή το χρονικό βήμα στην μελέτη μας είναι $dt = 10 \text{ min}$, θεωρούμε ότι οι τιμές που υπολογίστηκαν ισοκατανέμονται στο διάστημα μίας ώρας) για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο.

$$G_b = M_t + A_t \times \sin((360/365) \times D - P_t) \quad (10.4.1)$$

$$G_d = m_t + a_t \times \sin((360/365) \times D - P_t) \quad (10.4.2)$$

τις οποίες αντικαθιστούμε στην ακόλουθη σχέση:

$$G_t = G_b \times R_b + G_d \times ((1 + \cos\beta)/2) + (G_b + G_d) \times \rho \times ((1 - \cos\beta)/2) \quad (10.4.3)$$

όπου,

- ρ είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους, η οποία για συνηθισμένο έδαφος έχει τιμή $\rho = 0,2$
- $\beta = 38^\circ$ είναι η κλίση των ηλιακών συλλεκτών
- $\varphi = \beta = 38^\circ = 0,663 \text{ rad}$ για μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας)
- $R_b = \cos\theta / \cos\theta_z$
- για νότιο προσανατολισμό $\gamma = 0^\circ$ με

$$\cos\theta = \sin\delta \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cos(\varphi - \beta) \cos\omega \quad (10.4.4)$$

$$\cos\theta_z = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega \quad (10.4.5)$$

2) Υπολογίζεται η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο από τον τύπο:

$$t_o = M + \sum C_i \cdot \cos [i \cdot (360 / 24) \cdot (H - 0,5) + \sum S_i \cdot \sin [i \cdot (360 / 24) \cdot (H - 0,5)] \quad (10.4.6)$$

3) Υπολογίζονται τα ψυκτικά φορτία δομικών υλικών (τοίχων και οροφών), τα ψυκτικά φορτία υαλοπινάκων, τα ψυκτικά φορτία ανθρώπων, φωτισμού και ανανέωσης αέρα για τον μήνα Ιανουάριο. Υπολογίζεται το άθροισμά τους και επειδή το χρονικό βήμα στην μελέτη μας είναι $dt=10\text{min}$, θεωρούμε ότι οι τιμές που υπολογίστηκαν ισοκατανέμονται στο διάστημα μίας ώρας.

4) Γίνεται υπόθεση μίας ενδεικτικής τιμής για την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου (T_{in}) προκειμένου να γίνουν οι ακόλουθοι υπολογισμοί. Θεωρούμε $T_{in}=20^\circ\text{C}$

5) Στην συνέχεια υπολογίζεται η θερμότητα που προσδίδει στο δωμάτιο το pcm από τον τύπο:

$$q_r = \left(\frac{1}{(1/h) + (d/k)} \right) \cdot (T_1 - 20) \quad (10.4.7)$$

όπου $h=8\text{W/m}^2$

$d=0,03\text{m}$

$k=0,6\text{W/m}^\circ\text{C}$

6) Με βάση τους παρακάτω τύπους υπολογίζεται κάθε φορά για την αντίστοιχη θερμοκρασία το $C_{p\text{eff}}$.

$C_p=5000\text{J/Kg}^\circ\text{C}$

$C_p = (480000/36) \cdot (T-20) + 50000$

$C_p = (-480000/36) \cdot (T-23) + 45000$

$C_p=5000\text{J/Kg}^\circ\text{C}$

για $T \leq 20^\circ\text{C}$

για $20^\circ\text{C} \leq T \leq 23^\circ\text{C}$

για $23^\circ\text{C} \leq T \leq 26^\circ\text{C}$

για $T \geq 26^\circ\text{C}$

(10.4.8)

7) Υπολογίζουμε την θερμότητα που απορροφά το pcm:

$$q_s = \frac{Q_u}{A_{\delta\alpha\pi}} = \frac{Q_u}{10 \cdot 10} = \frac{A_R \cdot F_R (G_s \cdot \tau_a - U_L (T_2 - T_1))}{10 \cdot 10} \quad (10.4.9)$$

Παρατηρούμε όμως ότι ο τύπος περιλαμβάνει το T_2 το οποίο δεν γνωρίζουμε. Έτσι γνωρίζοντας τον τύπο :

$$A*(q_s - q_r) = m_{pcm} * C_{p_{eff}}(T) * (T_2 - T_1) / \Delta t \quad (10.4.10)$$

Αντικαθιστούμε τους τύπους του q_s και του q_r στην παραπάνω σχέση και λύνουμε ως προς την θερμοκρασία T_2 . Οπότε προκύπτει:

$$T_2 = \left(\frac{(A_c/A_{\delta_{\alpha\pi}}) * F_R * G\tau * \tau_{\alpha} + (A_c/A_{\delta_{\alpha\pi}}) * F_R * U_L * T_a + ((m_{pcm} * C_{p_{eff}} + (A_c/A_{\delta_{\alpha\pi}}) * F_R * U_L) / (\Delta t * A))}{((m_{pcm} * C_{p_{eff}} + (A_c/A_{\delta_{\alpha\pi}}) * F_R * U_L) / (\Delta t * A))} + \frac{(m_{pcm} * C_{p_{eff}} * T_1 / \Delta t * A) - q_r}{((m_{pcm} * C_{p_{eff}} + (A_c/A_{\delta_{\alpha\pi}}) * F_R * U_L) / (\Delta t * A))} \right) \quad (10.4.11)$$

όπου $A_c = 30m^2$
 $A_{\delta_{\alpha\pi}} = 100m^2$
 $F_R = 0,85$
 $\tau_{\alpha} = 0,85$
 $\rho = 1019kg/m^3$
 $m = 10 * 10 * 0,03 * 1019 = 3057kg$
 $\Delta t = 600sec$

Στο excel που φτιάξαμε υπολογίζονται ξεχωριστά οι όροι που βρίσκονται στον αριθμητή $(A_c/A_{\delta_{\alpha\pi}}) * F_R * G\tau * \tau_{\alpha}$, $(A_c/A_{\delta_{\alpha\pi}}) * F_R * U_L * T_a$, $(m_{pcm} * C_{p_{eff}} * T_1 / \Delta t * A)$ και q_r και ξεχωριστά οι όροι στον παρονομαστή $(m_{pcm} * C_{p_{eff}} / (\Delta t * A))$ και $(A_c/A_{\delta_{\alpha\pi}}) * F_R * U_L / (\Delta t * A)$. Αφού υπολογιστεί η θερμοκρασία T_2 , πλέον μπορεί να υπολογιστεί το Q_u και εν συνεχεία το q_s . Αυτήν την φορά όμως το Q_u υπολογίζεται από τον τύπο :

$$Q_u = m * C_p * (T_{\text{εξόδου}} - T_{\text{εισόδου}}) \quad (10.4.12)$$

όπου λαμβάνουμε ως $m = 0,02kg/s$ και $C_p = 835J/Kg * ^\circ C$

και το q_s από τον τύπο:

$$q_s = Q_u / A \quad (10.4.13)$$

8) Εφόσον έχει υπολογιστεί το q_s και το q_r πλέον μπορεί να υπολογιστεί η θερμότητα που απομένει στο pcm ως διαφορά αυτών. Δηλαδή:

$$q_{pcm} = q_s - q_r \quad (10.4.14)$$

9) Συγκρίνοντας τις τιμές του q που υπολογίσαμε στην αρχή της διαδικασίας, που είναι στην πραγματικότητα οι απώλειες του δωματίου και τις τιμές του q_r που είναι η θερμότητα που προσδίδει το pcm στο δωμάτιο, προσδιορίζουμε το

συμπληρωμα που πρέπει να δίνουμε ώστε η θερμοκρασία του δωματίου να μην πέσει κάτω από 20 °C.

10)Ακόμα γίνεται έλεγχος αν η θερμοκρασία T_2 που προέκυψε παραπάνω είναι μεγαλύτερη απο την T_1 που είχαμε υποθέσει αρχικά. Στην περίπτωση που είναι μικρότερη τότε ο κυκλοφορητής διακόπτεται και το q_s το λαμβάνουμε ίσο με το μηδέν.

11)Την διαδικασία αυτήν την επαναλαμβάνουμε θεωρώντας πια σαν αρχική θερμοκρασία T_1 , την θερμοκρασία που προκύπτει καθε φορά απο την προηγούμενη διαδικασία.

12)Τέλος κάνουμε το διάγραμμα της χρονικής εξέλιξης του q_{pcm} , του $q_{απωλειών}$ και του $q_{σμπληρώματος}$.

Την διαδικασία που αναφέραμε, ακολουθούμε αρχικά στην περίπτωση που θα τοποθετήσουμε το pcm. Στην δεύτερη περίπτωση τοποθετούμε στην θέση του pcm μας μετό και μπορούμε πλέον να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα και να καταλήξουμε σε σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τα οφέλη της χρήσης του pcm. Στην τρίτη περίπτωση τοποθετούμε το pcm μας αλλά σε αυτήν την περίπτωση τοποθετούμε μικρότερη έκταση ηλιακών συλλεκτών και στην τέταρτη περίπτωση τοποθετούμε μεγαλύτερη έκταση ηλιακών συλλεκτών. Στην πεμπτη περίπτωση τοποθετείται το pcm αλλά αλλάζουμε τους συντελεστές $F_r=0,85$ και $U_L=0,85$ σε $F_r=0,95$ και $U_L=0,95$. Τέλος στην έκτη περίπτωση τοποθετούμε το pcm και κάνουμε συνδυασμό αύξησης ηλιακών συλλεκτών και αλλαγής συντελεστών F_r και U_L .

10.5 Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους υαλοπίνακες

Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας $G(W)$ που προσπίπτει στους ηλιακούς συλλέκτες χρησιμοποιούνται οι σχέσεις της μέσης στιγμιαίας άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου:

$$G_b = M_t + A_t \times \sin((360/365) \times D - P_t) \quad (10.5.1)$$

$$G_d = m_t + a_t \times \sin((360/365) \times D - P_t) \quad (10.5.2)$$

τις οποίες αντικαθιστούμε στην ακόλουθη σχέση:

$$G_t = G_b \times R_b + G_d \times ((1+\cos\beta)/2) + (G_b + G_d) \times \rho \times ((1-\cos\beta)/2) \quad (10.5.3)$$

όπου,

- ρ είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους, η οποία για συνηθισμένο έδαφος έχει τιμή $\rho= 0,2$
- $\beta=38^\circ$ είναι η κλίση των ηλιακών συλλεκτών
- $\varphi=\beta=38^\circ=0,663\text{rad}$ για μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας)
- $R_b= \cos\theta/\cos\theta_z$

- για νότιο προσανατολισμό $\gamma=0^\circ$ με

$$\cos\theta = \sin\delta \sin(\varphi-\beta) + \cos\delta \cos(\varphi-\beta) \cos\omega \quad (10.5.4)$$

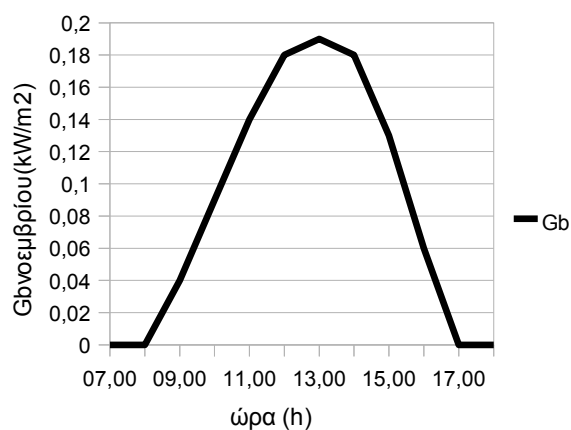
$$\cos\theta_z = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega \quad (10.5.5)$$

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες που έγιναν στο excel και τα διαγράμματα που προέκυψαν σχετικά με το Gb.

Νοέμβριος:

Πίνακας 10.5.1: Τιμές της άμεσης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_b , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Νοέμβριο. Δίνονται οι τιμές των συντελεστών M_t , A_t , P_t

time	M_t	A_t	$P_t(o)$	$G_b(\nu\sigma\mu=325)$
07,00	0,007	0,046	86,18	0
08,00	0,057	0,068	87,31	0
09,00	0,119	0,104	87,94	0,04
10,00	0,191	0,129	88,31	0,09
11,00	0,258	0,153	89,35	0,14
12,00	0,319	-0,181	-88,88	0,18
13,00	0,342	-0,194	-89,18	0,19
14,00	0,325	0,183	87,21	0,18
15,00	0,269	0,166	86,22	0,13
16,00	0,183	0,147	82,1	0,06
17,00	0,078	0,131	79,85	0
18,00	-0,025	0,114	77,36	0

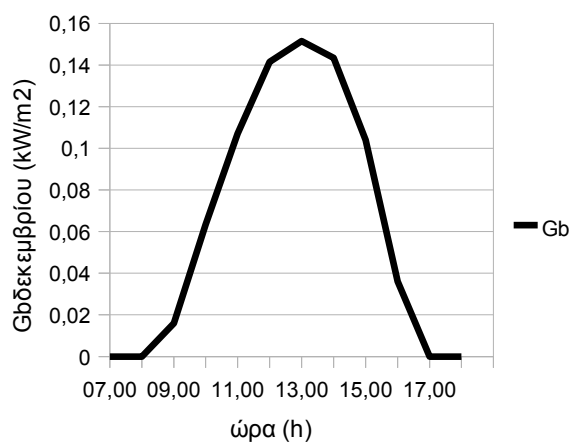


Εικόνα 10.5.1 : Άμεση ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_b) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Νοέμβριο

Δεκέμβριος:

Πίνακας 10.5.2: Τιμές της άμεσης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_b , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Δεκέμβριο. Δίνονται οι τιμές των συντελεστών M_t , A_t , P_t

time	M_t	A_t	$P_t(o)$	$G_b(\delta\epsilon\kappa\epsilon\mu=355)$
07,00	0,007	0,046	86,18	0
08,00	0,057	0,068	87,31	0
09,00	0,119	0,104	87,94	0,02
10,00	0,191	0,129	88,31	0,06
11,00	0,258	0,153	89,35	0,11
12,00	0,319	-0,181	-88,88	0,14
13,00	0,342	-0,194	-89,18	0,15
14,00	0,325	0,183	87,21	0,14
15,00	0,269	0,166	86,22	0,1
16,00	0,183	0,147	82,1	0,04
17,00	0,078	0,131	79,85	0
18,00	-0,025	0,114	77,36	0

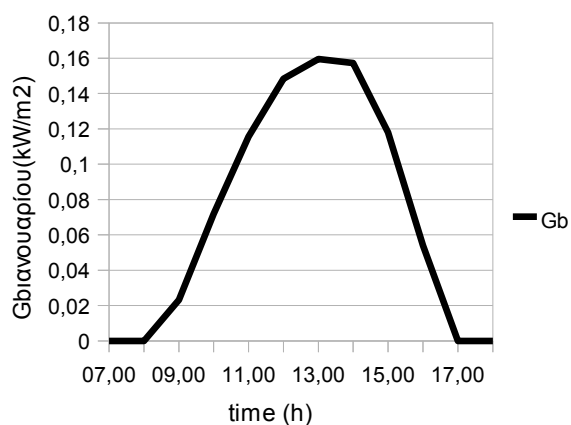


Εικόνα 10.5.2 : Άμεση ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_b) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Δεκέμβριο

Ιανουάριος:

Πίνακας 10.5.3: Τιμές της άμεσης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, Gb, συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Ιανουάριο. Δίνονται οι τιμες των συντελεστών Mt , At, Pt.

time	Mt	At	Pt(o)	Gb(ιαν=21)
07,00	0,007	0,046	86,18	0
08,00	0,057	0,068	87,31	0
09,00	0,119	0,104	87,94	0,02
10,00	0,191	0,129	88,31	0,07
11,00	0,258	0,153	89,35	0,12
12,00	0,319	-0,181	-88,88	0,15
13,00	0,342	-0,194	-89,18	0,16
14,00	0,325	0,183	87,21	0,16
15,00	0,269	0,166	86,22	0,12
16,00	0,183	0,147	82,1	0,05
17,00	0,078	0,131	79,85	0
18,00	-0,025	0,114	77,36	0

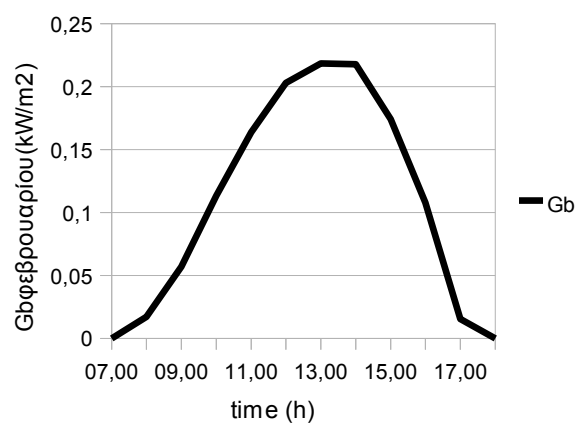


Εικόνα 10.5.3 : Άμεση ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (Gb) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Ιανουάριο

Φεβρουάριος:

Πίνακας 10.5.4: Τιμές της άμεσης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_b , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Φεβρουάριο. Δίνονται οι τιμές των συντελεστών M_t , A_t , P_t .

time	M_t	A_t	$P_t(o)$	$G_b(\varphi_{\text{εβρ}}=52)$
07,00	0,007	0,046	86,18	0
08,00	0,057	0,068	87,31	0,02
09,00	0,119	0,104	87,94	0,06
10,00	0,191	0,129	88,31	0,11
11,00	0,258	0,153	89,35	0,16
12,00	0,319	-0,181	-88,88	0,2
13,00	0,342	-0,194	-89,18	0,22
14,00	0,325	0,183	87,21	0,22
15,00	0,269	0,166	86,22	0,17
16,00	0,183	0,147	82,1	0,11
17,00	0,078	0,131	79,85	0,02
18,00	-0,025	0,114	77,36	0

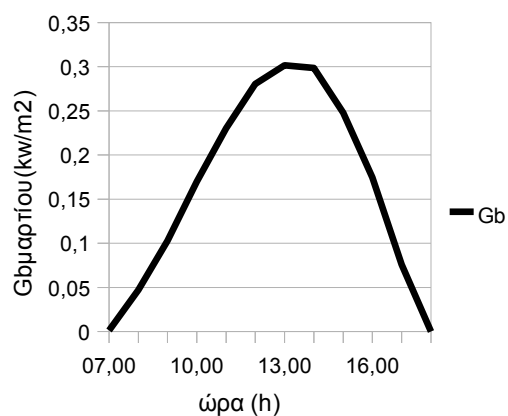


Εικόνα 10.5.4 : Άμεση ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_b) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Φεβρουάριο

Μάρτιος:

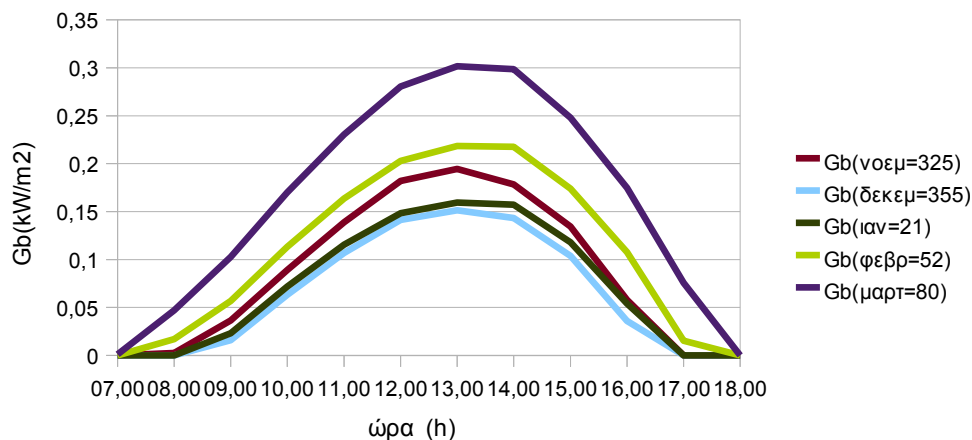
Πίνακας 10.5.5: Τιμές της άμεσης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_b , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Μάρτιο. Δίνονται οι τιμές των συντελεστών M_t , A_t , P_t .

time	M_t	A_t	$P_t(o)$	$G_b(\mu\alpha\rho\tau=80)$
07,00	0,007	0,046	86,18	0
08,00	0,057	0,068	87,31	0,05
09,00	0,119	0,104	87,94	0,1
10,00	0,191	0,129	88,31	0,17
11,00	0,258	0,153	89,35	0,23
12,00	0,319	-0,181	-88,88	0,28
13,00	0,342	-0,194	-89,18	0,3
14,00	0,325	0,183	87,21	0,3
15,00	0,269	0,166	86,22	0,25
16,00	0,183	0,147	82,1	0,17
17,00	0,078	0,131	79,85	0,08
18,00	-0,025	0,114	77,36	0



Εικόνα 10.5.5 : Άμεση ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_b) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Νοέμβριο

Ακολουθεί συγκριτικό διάγραμμα των Gb για τους πέντε μήνες που προαναφέρθηκαν (Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος).



Εικόνα 10.5.6 : Συγκριτικό διάγραμμα άμεσης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου (Gb) συναρτήσει της ώρας για τους μήνες του Νοέμβρη, Δεκέμβρη, Ιανουάρη, Φεβρουάρη και Μάρτη.

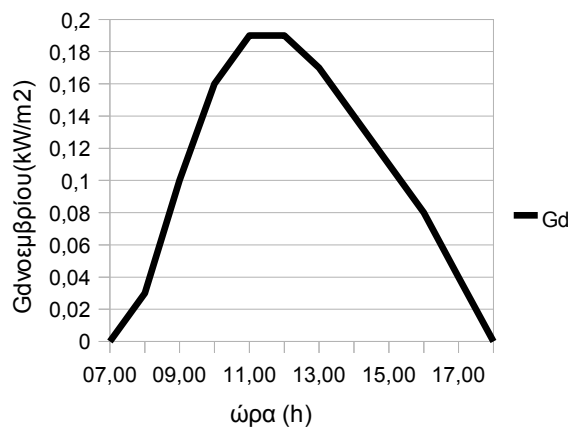
Παρατηρώντας το διάγραμμα είναι εμφανές ότι κατά το μήνα Μάρτιο εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές της άμεσης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στις υψηλότερες θερμοκρασίες του περιβάλλοντος καθώς και στην κλίση που έχει ο ήλιος σε σχέση με την γη αυτόν τον μήνα. Στην συνέχεια ακολουθεί ο Φεβρουάριος, ο Νοέμβριος ενώ ο Ιανουάριος και ο Δεκέμβριος σχεδόν ταυτίζονται και παρουσιάζουν αισθητά χαμηλότερες τιμές.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες που έγιναν στο excel και τα διαγράμματα που προέκυψαν σχετικά με το Gd.

Νοέμβριος:

Πίνακας 10.5.6: Τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, Gd, συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Νοέμβριο. Δίνονται οι τιμες των συντελεστών Mt , αt, Pt .

time	Mt	αt	Pt	Gd(νοεμ=325)
07,00	0,048	0,111	81,23	0
08,00	0,134	0,127	82,45	0,03
09,00	0,208	0,133	83,94	0,1
10,00	0,261	0,129	85,6	0,16
11,00	0,283	0,117	86,05	0,19
12,00	0,271	0,095	82,71	0,19
13,00	0,243	0,081	81,95	0,17
14,00	0,210	0,083	87,23	0,14
15,00	0,176	0,087	89,53	0,11
16,00	0,141	-0,085	-88,19	0,08
17,00	0,104	-0,079	-88,97	0,04
18,00	0,051	0,091	86,79	0

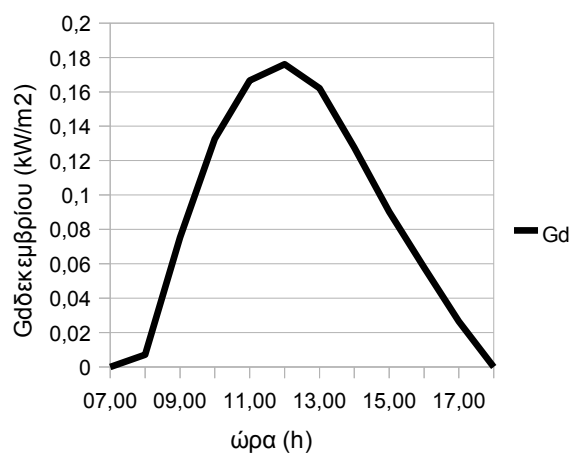


Εικόνα 10.5.7 : Διάχυτη ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (Gd) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Νοέμβριο

Δεκέμβριος:

Πίνακας 10.5.7: Τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, Gd, συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Δεκέμβριο. Δίνονται οι τιμές των συντελεστών mt, at, Pt.

time	Mt	at	Pt	Gd(δεκεμ=355)
07,00	0,048	0,111	81,23	0
08,00	0,134	0,127	82,45	0,01
09,00	0,208	0,133	83,94	0,08
10,00	0,261	0,129	85,6	0,13
11,00	0,283	0,117	86,05	0,17
12,00	0,271	0,095	82,71	0,18
13,00	0,243	0,081	81,95	0,16
14,00	0,210	0,083	87,23	0,13
15,00	0,176	0,087	89,53	0,09
16,00	0,141	-0,085	-88,19	0,06
17,00	0,104	-0,079	-88,97	0,03
18,00	0,051	0,091	86,79	0

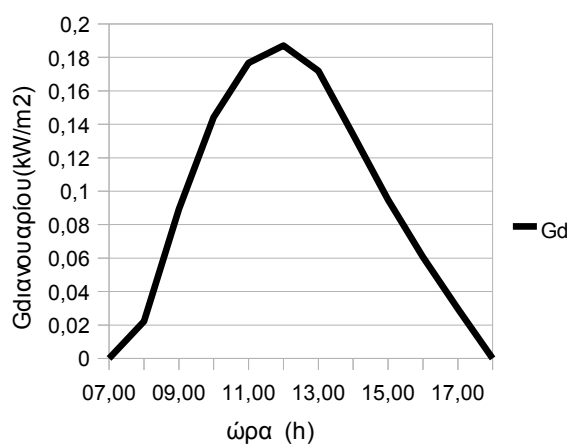


Εικόνα 10.5.8 : Διάχυτη ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (Gd) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Δεκέμβριο

Ιανουάριος:

Πίνακας 10.5.8: Τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_d , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Ιανουάριο. Δίνονται οι τιμές των συντελεστών m_t , a_t , P_t .

time	M_t	a_t	P_t	$G_d(\text{ιαν}=21)$
07,00	0,048	0,111	81,23	0
08,00	0,134	0,127	82,45	0,02
09,00	0,208	0,133	83,94	0,09
10,00	0,261	0,129	85,6	0,14
11,00	0,283	0,117	86,05	0,18
12,00	0,271	0,095	82,71	0,19
13,00	0,243	0,081	81,95	0,17
14,00	0,210	0,083	87,23	0,13
15,00	0,176	0,087	89,53	0,09
16,00	0,141	-0,085	-88,19	0,06
17,00	0,104	-0,079	-88,97	0,03
18,00	0,051	0,091	86,79	0

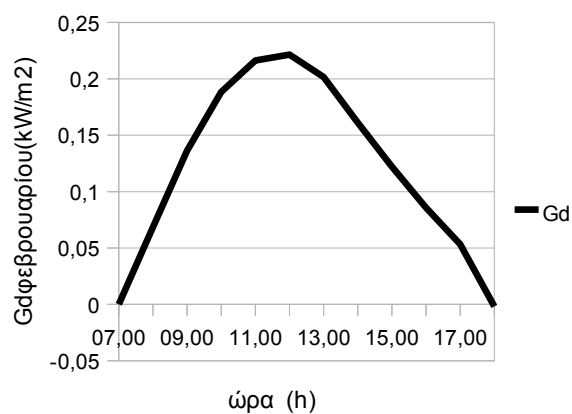


Εικόνα 10.5.9 : Διάχυτη ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_d) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Ιανουάριο

Φεβρουάριος:

Πίνακας 10.5.9: Τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_d , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Φεβρουάριο. Δίνονται οι τιμές των συντελεστών m_t , a_t , P_t .

time	M_t	a_t	P_t	$G_d(\varphi_{\text{εβρ}}=52)$
07,00	0,048	0,111	81,23	0
08,00	0,134	0,127	82,45	0,07
09,00	0,208	0,133	83,94	0,14
10,00	0,261	0,129	85,6	0,19
11,00	0,283	0,117	86,05	0,22
12,00	0,271	0,095	82,71	0,22
13,00	0,243	0,081	81,95	0,2
14,00	0,210	0,083	87,23	0,16
15,00	0,176	0,087	89,53	0,12
16,00	0,141	-0,085	-88,19	0,09
17,00	0,104	-0,079	-88,97	0,05
18,00	0,051	0,091	86,79	0

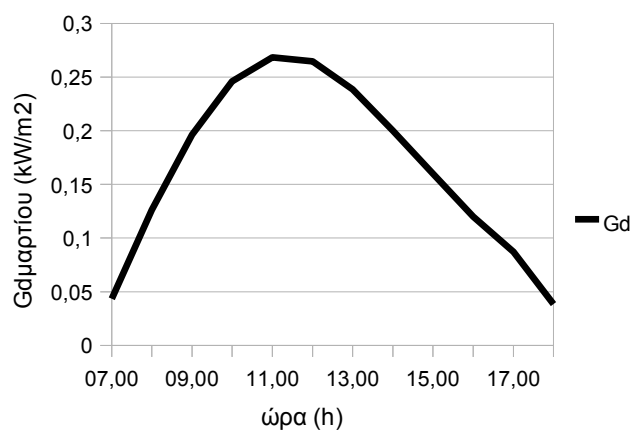


Εικόνα 10.5.10 : Διάχυτη ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_d) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Νοέμβριο

Μάρτιος:

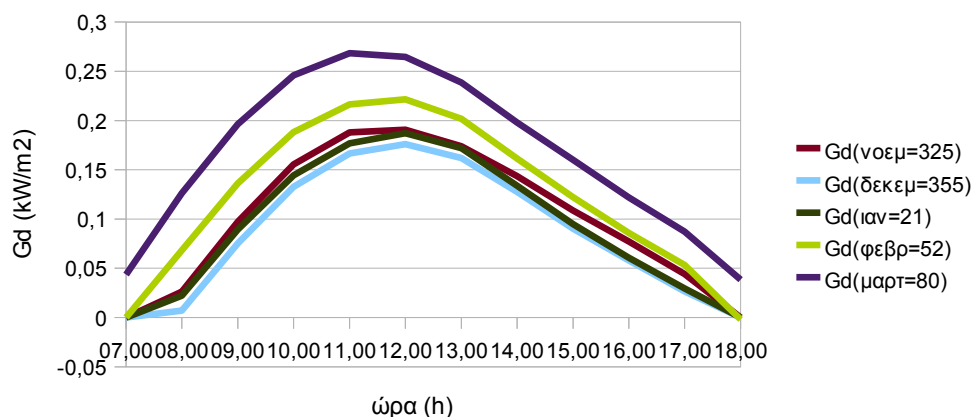
Πίνακας 10.5.10: Τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_d , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Μάρτιο. Δίνονται οι τιμές των συντελεστών m_t , a_t , P_t .

time	M_t	a_t	P_t	$G_d(\mu\alpha\rho\tau=80)$
07,00	0,048	0,111	81,23	0,04
08,00	0,134	0,127	82,45	0,13
09,00	0,208	0,133	83,94	0,2
10,00	0,261	0,129	85,6	0,25
11,00	0,283	0,117	86,05	0,27
12,00	0,271	0,095	82,71	0,26
13,00	0,243	0,081	81,95	0,24
14,00	0,210	0,083	87,23	0,2
15,00	0,176	0,087	89,53	0,16
16,00	0,141	-0,085	-88,19	0,12
17,00	0,104	-0,079	-88,97	0,09
18,00	0,051	0,091	86,79	0,04



Εικόνα 10.5.11 : Διάχυτη ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_d) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Μάρτιο

Ακολουθεί συγκριτικό διάγραμμα των Gd για τους πέντε μήνες που προαναφέρθηκαν (Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος).



Εικόνα 10.5.12 : Διάχυτη ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (Gd) συναρτήσεως της ώρας για τους μήνες του Νοέμβρη, Δεκέμβρη, Ιανουάρη, Φεβρουάρη και Μάρτη.

Παρατηρώντας το διάγραμμα είναι εμφανές ότι κατά το μήνα Μάρτιο εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στις υψηλότερες θερμοκρασίες του περιβάλλοντος καθώς και στην κλίση που έχει ο ήλιος σε σχέση με την γη αυτόν τον μήνα. Στην συνέχεια ακολουθεί ο Φεβρουάριος, ενώ ο Νοέμβριος, ο Ιανουάριος και ο Δεκέμβρης σχεδόν ταυτίζονται και παρουσιάζουν αισθητά χαμηλότερες τιμές.

Γνωρίζουμε τα παρακάτω δεδομένα:

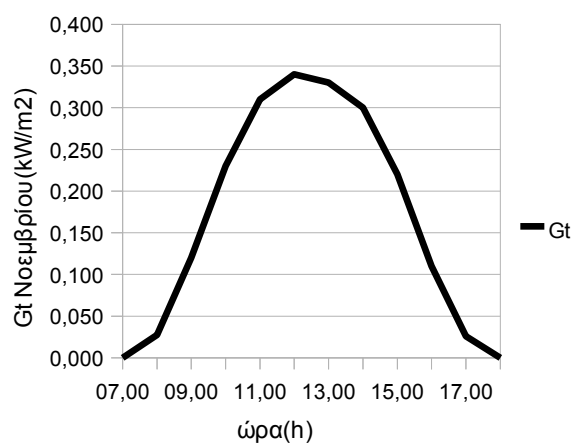
$\rho = 0,2$			
$\gamma = 0$			
$\beta = \varphi = 38^\circ$			
μηνας	n	δ(rad)	δ(ο)
νοεμ	325	-13,5	-20,38
δεκεμ	355	21,97	-23,45
ιαν	21	-16,34	-20,17
φεβρ	52	-23,43	-11,29
μαρτ	80	17,96	-0,48

Με βάσει τα παραπάνω προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα για την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, Gt.

Νοέμβριος:

Πίνακας 10.5.11: Τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_t , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Νοέμβριο.

time	Min(ηλ.μ.σ.)	$\omega(\sigma)$	n	δ	Gb	Gd	Gt
07,00	-300	-75	325	-20,38	0	0	0,000
08,00	-240	-60	325	-20,38	0	0,03	0,027
09,00	-180	-45	325	-20,38	0,04	0,1	0,120
10,00	-120	-30	325	-20,38	0,09	0,16	0,230
11,00	-60	-15	325	-20,38	0,14	0,19	0,310
12,00	0	0	325	-20,38	0,18	0,19	0,340
13,00	60	15	325	-20,38	0,19	0,17	0,330
14,00	120	30	325	-20,38	0,18	0,14	0,300
15,00	180	45	325	-20,38	0,13	0,11	0,220
16,00	240	60	325	-20,38	0,06	0,08	0,110
17,00	300	75	325	-20,38	0	0,04	0,026
18,00	360	90	325	-20,38	0	0	0,000

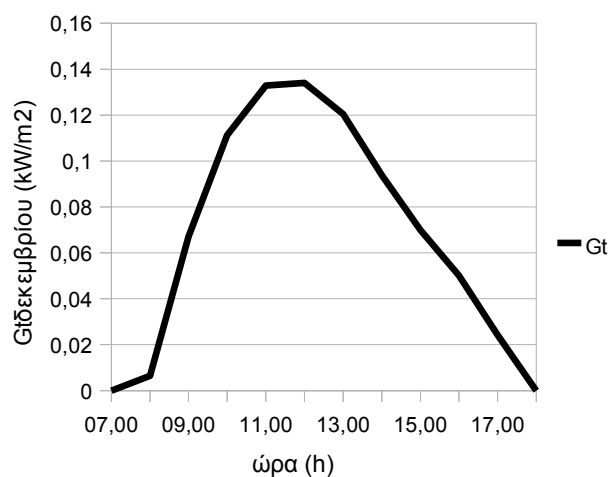


Εικόνα 10.5.13 : Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_t) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Νοέμβριο.

Δεκέμβριος:

Πίνακας 10.5.12: Τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_t , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Δεκέμβριο.

time	Min(ηλ.μ.εσ.)	$\omega(\circ)$	n	δ	Gb	Gd	Gt
07,00	-300	-75	355	-23,45	0	0	0
08,00	-240	-60	355	-23,45	0	0,01	0,01
09,00	-180	-45	355	-23,45	0,02	0,08	0,09
10,00	-120	-30	355	-23,45	0,06	0,13	0,18
11,00	-60	-15	355	-23,45	0,11	0,17	0,27
12,00	0	0	355	-23,45	0,14	0,18	0,31
13,00	60	15	355	-23,45	0,15	0,16	0,3
14,00	120	30	355	-23,45	0,14	0,13	0,26
15,00	180	45	355	-23,45	0,1	0,09	0,17
16,00	240	60	355	-23,45	0,04	0,06	0,08
17,00	300	75	355	-23,45	0	0,03	0,02
18,00	360	90	355	-23,45	0	0	0

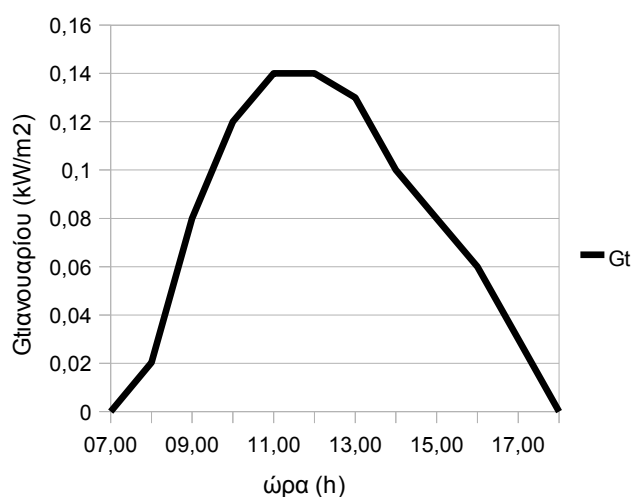


Εικόνα 10.5.14 : Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_t) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Δεκέμβριο

Ιανουάριος:

Πίνακας 10.5.13: Τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_t , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Ιανουάριο.

time	Min(ηλ.μεσ.)	$\omega(\sigma)$	n	δ	Gb	Gd	Gt
07,00	-300	-75	21	-16,34	0	0	0
08,00	-240	-60	21	-16,34	0	0,02	0,02
09,00	-180	-45	21	-16,34	0,02	0,09	0,11
10,00	-120	-30	21	-16,34	0,07	0,14	0,2
11,00	-60	-15	21	-16,34	0,12	0,18	0,26
12,00	0	0	21	-16,34	0,15	0,19	0,31
13,00	60	15	21	-16,34	0,16	0,17	0,3
14,00	120	30	21	-16,34	0,16	0,13	0,25
15,00	180	45	21	-16,34	0,12	0,09	0,19
16,00	240	60	21	-16,34	0,05	0,06	0,1
17,00	300	75	21	-16,34	0	0,03	0,01
18,00	360	90	21	-16,34	0	0	0

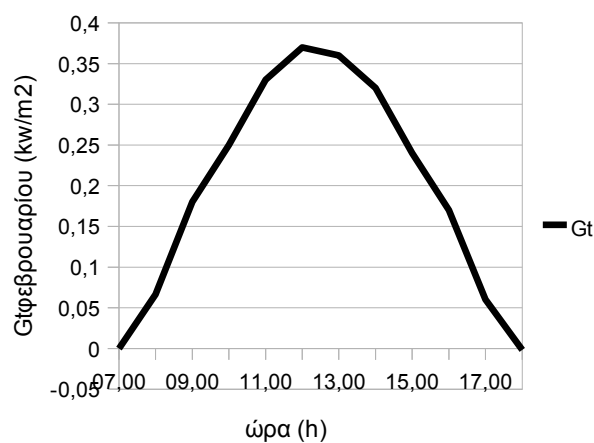


Εικόνα 10.5.15 : Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_t) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Ιανουάριο

Φεβρουάριος:

Πίνακας 10.5.14: Τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_t , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Φεβρουάριο.

time	Min(ηλ.μ.σ.)	$\omega(\sigma)$	n	δ	G_b	G_d	G_t
07,00	-300	-75	52	-11,29	0	0	0
08,00	-240	-60	52	-11,29	0,02	0,07	0,07
09,00	-180	-45	52	-11,29	0,06	0,14	0,18
10,00	-120	-30	52	-11,29	0,11	0,19	0,25
11,00	-60	-15	52	-11,29	0,16	0,22	0,33
12,00	0	0	52	-11,29	0,2	0,22	0,37
13,00	60	15	52	-11,29	0,22	0,2	0,36
14,00	120	30	52	-11,29	0,22	0,16	0,32
15,00	180	45	52	-11,29	0,17	0,12	0,24
16,00	240	60	52	-11,29	0,11	0,09	0,17
17,00	300	75	52	-11,29	0,02	0,05	0,06
18,00	360	90	52	-11,29	0	0	0

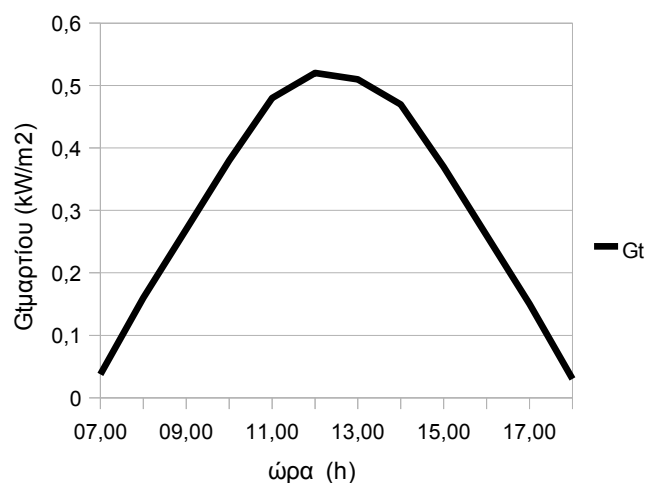


Εικόνα 10.5.16 : Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_t) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Φεβρουάριο

Μάρτιος:

Πίνακας 10.5.15: Τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_t , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Μάρτιο.

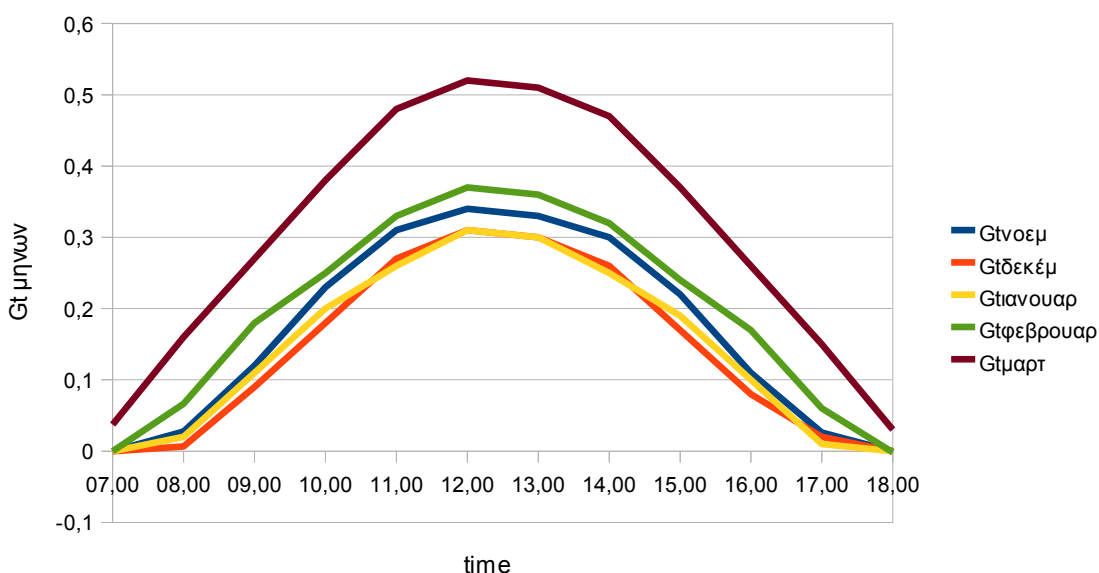
time	Min(ηλ.μεσ.)	$\omega(\sigma)$	n	δ	Gb	Gd	Gt
07,00	-300	-75	80	-0,48	0	0,04	0,04
08,00	-240	-60	80	-0,48	0,05	0,13	0,16
09,00	-180	-45	80	-0,48	0,1	0,2	0,27
10,00	-120	-30	80	-0,48	0,17	0,25	0,38
11,00	-60	-15	80	-0,48	0,23	0,27	0,48
12,00	0	0	80	-0,48	0,28	0,26	0,52
13,00	60	15	80	-0,48	0,3	0,24	0,51
14,00	120	30	80	-0,48	0,3	0,2	0,47
15,00	180	45	80	-0,48	0,25	0,16	0,37
16,00	240	60	80	-0,48	0,17	0,12	0,26
17,00	300	75	80	-0,48	0,08	0,09	0,15
18,00	360	90	80	-0,48	0	0,04	0,03



Εικόνα 10.5.17 : Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_t) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Μάρτιο.

Πίνακας 10.5.16: Τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, G_t , συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο.

time	Γτνοεμ	Γτδεκέμ	Γτιανουαρ	Γτφεβρουαρ	Γτμαρτ
07,00	0,00	0	0	0	0,04
08,00	0,03	0,01	0,02	0,07	0,16
09,00	0,12	0,09	0,11	0,18	0,27
10,00	0,23	0,18	0,2	0,25	0,38
11,00	0,31	0,27	0,26	0,33	0,48
12,00	0,34	0,31	0,31	0,37	0,52
13,00	0,33	0,3	0,3	0,36	0,51
14,00	0,30	0,26	0,25	0,32	0,47
15,00	0,22	0,17	0,19	0,24	0,37
16,00	0,11	0,08	0,1	0,17	0,26
17,00	0,03	0,02	0,01	0,06	0,15
18,00	0,00	0	0	0	0,03



Εικόνα 10.5.18 : Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου (G_t) συναρτήσει της ώρας για τον μήνα Νοέμβριο, Ιανουάριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο.

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανές ότι κατά το μήνα Μάρτιο εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές της ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στις υψηλότερες θερμοκρασίες του περιβάλλοντος καθώς και στην κλίση που έχει ο ήλιος σε σχέση με την γη αυτόν τον μήνα. Στην συνέχεια ακολουθεί ο Φεβρουάριος, ο Νοέμβριος ενώ ο Ιανουάριος και ο Δεκέμβριος σχεδόν ταυτίζονται και παρουσιάζουν αισθητά χαμηλότερες τιμές.

10.6 Θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος

Η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος, t_o , για μία περιοχή μπορεί να εκτιμηθεί σύμφωνα με μοντέλο που προτείνει η ASHRAE, αν είναι γνωστή η μέγιστη θερμοκρασία ημέρας και η ημερήσια θερμοκρασιακή διακύμανση. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η θερμοκρασία κάθε ώρας της ημέρας υπολογίζεται αφαιρώντας από τη μέγιστη θερμοκρασία ημέρας το ποσοστό της ημερήσιας διακύμανσης.

Η ημερήσια μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας ξηρής σφαιρας, t_o δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

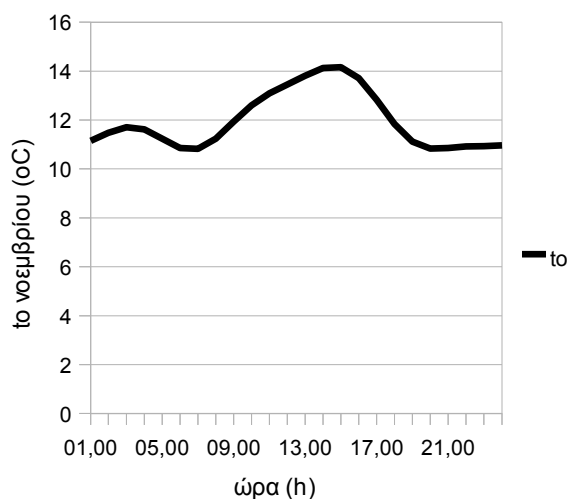
$$t_o = M + \sum C_i \cdot \cos [i \cdot (360 / 24) \cdot (H - 0,5)] + \sum S_i \cdot \sin [i \cdot (360 / 24) \cdot (H - 0,5)] \quad (10.6.1)$$

όπου $i=1,2,3$. Αντικαθιστώντας προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες και τα παρακάτω διαγράμματα για τους μήνες του Νοεμβρη, Δεκέμβρη, Ιανουαρίου Φεβρουαρίου και Μάρτη.

Νοέμβριος:

Πίνακας 10.6.1: Τιμές της εξωτερικής θερμοκρασίας.

time	M	C1*cosa	C2*cosb	C3*cosc	S1*sina	S2*sinb	S3*sinc	to
01,00	11,968	-1,29	0,6	-0,22	-0,04	0,16	-0,02	11,15
02,00	11,968	-1,2	0,44	0	-0,12	0,44	-0,05	11,48
03,00	11,968	-1,03	0,16	0,22	-0,19	0,61	-0,02	11,7
04,00	11,968	-0,79	-0,16	0,22	-0,25	0,61	0,02	11,62
05,00	11,968	-0,5	-0,44	0	-0,29	0,45	0,05	11,24
06,00	11,968	-0,17	-0,59	-0,22	-0,31	0,16	0,02	10,86
07,00	11,968	0,17	-0,6	-0,22	-0,31	-0,16	-0,02	10,82
08,00	11,968	0,5	-0,44	0	-0,29	-0,44	-0,05	11,24
09,00	11,968	0,79	-0,16	0,22	-0,25	-0,61	-0,02	11,93
10,00	11,968	1,03	0,16	0,22	-0,19	-0,61	0,02	12,6
11,00	11,968	1,2	0,43	0	-0,12	-0,45	0,05	13,09
12,00	11,968	1,29	0,59	-0,22	-0,04	-0,16	0,02	13,45
13,00	11,968	1,29	0,6	-0,22	0,04	0,16	-0,02	13,81
14,00	11,968	1,2	0,44	0	0,12	0,44	-0,05	14,12
15,00	11,968	1,03	0,16	0,22	0,19	0,61	-0,02	14,15
16,00	11,968	0,79	-0,16	0,22	0,25	0,61	0,02	13,71
17,00	11,968	0,5	-0,43	0	0,29	0,45	0,05	12,82
18,00	11,968	0,17	-0,59	-0,22	0,31	0,17	0,02	11,83
19,00	11,968	-0,17	-0,6	-0,22	0,31	-0,16	-0,02	11,12
20,00	11,968	-0,49	-0,44	0	0,29	-0,44	-0,05	10,83
21,00	11,968	-0,79	-0,16	0,22	0,25	-0,61	-0,02	10,85
22,00	11,968	-1,03	0,16	0,22	0,19	-0,61	0,02	10,92
23,00	11,968	-1,2	0,43	0	0,12	-0,45	0,05	10,93
24,00	11,968	-1,29	0,59	-0,22	0,04	-0,17	0,03	10,96

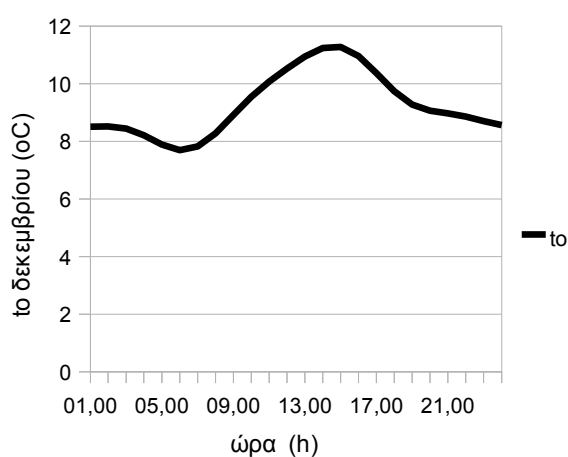


Εικόνα 10.6.1: Κατανομή της εξωτερικής θερμοκρασίας

Δεκέμβριος:

Πίνακας 10.6.2: Τιμές της εξωτερικής θερμοκρασίας.

time	M	C1*cosa	C2*cosb	C3*cosc	S1*sina	S2*sinb	S3*sinc	to
01,00	9,264	-1,1	0,5	-0,13	-0,11	0,09	0	8,51
02,00	9,264	-1,03	0,37	0	-0,34	0,24	0,01	8,51
03,00	9,264	-0,88	0,14	0,13	-0,54	0,32	0	8,44
04,00	9,264	-0,68	-0,13	0,13	-0,7	0,32	0	8,2
05,00	9,264	-0,43	-0,37	0	-0,81	0,24	-0,01	7,89
06,00	9,264	-0,15	-0,5	-0,13	-0,87	0,09	0	7,69
07,00	9,264	0,14	-0,5	-0,13	-0,87	-0,09	0	7,82
08,00	9,264	0,42	-0,37	0	-0,81	-0,24	0,01	8,28
09,00	9,264	0,67	-0,14	0,13	-0,7	-0,32	0	8,92
10,00	9,264	0,88	0,13	0,13	-0,54	-0,32	0	9,55
11,00	9,264	1,02	0,37	0	-0,34	-0,24	-0,01	10,07
12,00	9,264	1,1	0,5	-0,13	-0,12	-0,09	0	10,53
13,00	9,264	1,1	0,5	-0,13	0,11	0,09	0	10,94
14,00	9,264	1,03	0,37	0	0,34	0,23	0,01	11,24
15,00	9,264	0,88	0,14	0,13	0,53	0,32	0	11,27
16,00	9,264	0,68	-0,13	0,13	0,7	0,32	0	10,96
17,00	9,264	0,43	-0,37	0	0,81	0,24	-0,01	10,37
18,00	9,264	0,15	-0,5	-0,13	0,87	0,09	0	9,73
19,00	9,264	-0,14	-0,5	-0,13	0,87	-0,08	0	9,28
20,00	9,264	-0,42	-0,37	0	0,81	-0,23	0,01	9,06
21,00	9,264	-0,67	-0,14	0,13	0,7	-0,32	0	8,97
22,00	9,264	-0,88	0,13	0,13	0,54	-0,32	0	8,86
23,00	9,264	-1,02	0,37	0	0,34	-0,24	-0,01	8,7
24,00	9,264	-1,1	0,5	-0,13	0,12	-0,09	0	8,56

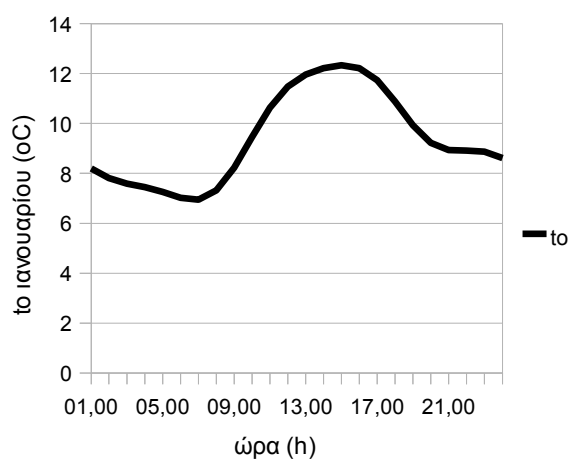


Εικόνα 10.6.2: Κατανομή της εξωτερικής θερμοκρασίας

Ιανουάριος:

Πίνακας 10.6.3: Τιμές της εξωτερικής θερμοκρασίας.

time	M	C1*cosa	C2*cosb	C3*cosc	S1*sina	S2*sinb	S3*sinc	to
01,00	9,384	-1,66	0,69	-0,01	-0,22	0,14	-0,12	8,2
02,00	9,384	-1,55	0,5	0	-0,66	0,37	-0,24	7,81
03,00	9,384	-1,33	0,18	0,01	-1,05	0,51	-0,12	7,59
04,00	9,384	-1,02	-0,18	0,01	-1,37	0,51	0,12	7,45
05,00	9,384	-0,64	-0,5	0	-1,59	0,37	0,24	7,26
06,00	9,384	-0,22	-0,69	-0,01	-1,71	0,14	0,12	7,02
07,00	9,384	0,22	-0,69	-0,01	-1,71	-0,13	-0,12	6,94
08,00	9,384	0,64	-0,5	0	-1,59	-0,37	-0,24	7,32
09,00	9,384	1,02	-0,19	0,01	-1,37	-0,51	-0,12	8,23
10,00	9,384	1,33	0,18	0,01	-1,05	-0,51	0,12	9,46
11,00	9,384	1,54	0,5	0	-0,66	-0,37	0,24	10,64
12,00	9,384	1,66	0,69	-0,01	-0,23	-0,14	0,12	11,48
13,00	9,384	1,66	0,69	-0,01	0,22	0,13	-0,12	11,96
14,00	9,384	1,55	0,5	0	0,66	0,37	-0,24	12,22
15,00	9,384	1,33	0,19	0,01	1,05	0,51	-0,12	12,34
16,00	9,384	1,02	-0,18	0,01	1,36	0,51	0,12	12,22
17,00	9,384	0,64	-0,5	0	1,59	0,37	0,24	11,73
18,00	9,384	0,22	-0,69	-0,01	1,71	0,14	0,12	10,88
19,00	9,384	-0,21	-0,69	-0,01	1,71	-0,13	-0,12	9,93
20,00	9,384	-0,64	-0,51	0	1,59	-0,37	-0,24	9,23
21,00	9,384	-1,01	-0,19	0,01	1,37	-0,51	-0,12	8,93
22,00	9,384	-1,32	0,18	0,01	1,05	-0,51	0,12	8,91
23,00	9,384	-1,54	0,5	0	0,66	-0,37	0,24	8,87
24,00	9,384	-1,66	0,69	-0,01	0,23	-0,14	0,12	8,62

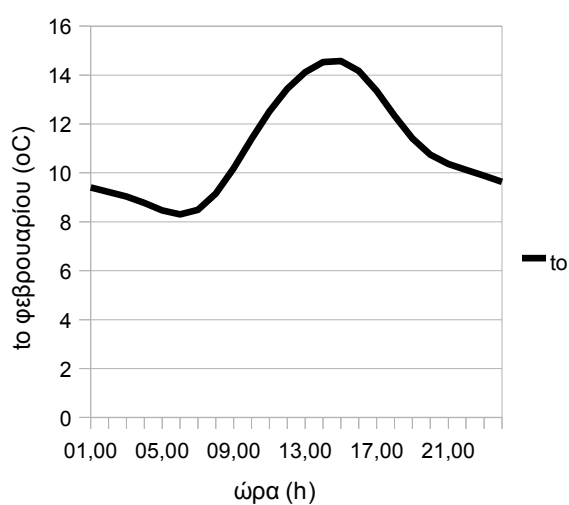


Εικόνα 10.6.3: Κατανομή της εξωτερικής θερμοκρασίας

Φεβρουάριος:

Πίνακας 10.6.4: Τιμές της εξωτερικής θερμοκρασίας.

time	M	C1*cosa	C2*cosb	C3*cosc	S1*sina	S2*sinb	S3*sinc	to
01,00	10,984	-2,13	0,76	-0,09	-0,23	0,15	-0,04	9,4
02,00	10,984	-1,99	0,56	0	-0,67	0,41	-0,07	9,22
03,00	10,984	-1,71	0,2	0,09	-1,06	0,56	-0,04	9,03
04,00	10,984	-1,31	-0,2	0,09	-1,39	0,56	0,04	8,77
05,00	10,984	-0,82	-0,55	0	-1,62	0,41	0,07	8,47
06,00	10,984	-0,28	-0,76	-0,09	-1,73	0,15	0,04	8,3
07,00	10,984	0,28	-0,76	-0,09	-1,74	-0,15	-0,04	8,49
08,00	10,984	0,82	-0,56	0	-1,62	-0,41	-0,07	9,15
09,00	10,984	1,31	-0,2	0,09	-1,39	-0,56	-0,04	10,2
10,00	10,984	1,7	0,2	0,09	-1,07	-0,56	0,04	11,39
11,00	10,984	1,99	0,55	0	-0,67	-0,41	0,07	12,52
12,00	10,984	2,13	0,76	-0,09	-0,23	-0,15	0,04	13,44
13,00	10,984	2,13	0,76	-0,09	0,23	0,15	-0,04	14,12
14,00	10,984	1,99	0,56	0	0,67	0,41	-0,07	14,53
15,00	10,984	1,71	0,21	0,09	1,06	0,56	-0,04	14,57
16,00	10,984	1,31	-0,2	0,09	1,39	0,56	0,04	14,17
17,00	10,984	0,83	-0,55	0	1,62	0,41	0,07	13,36
18,00	10,984	0,29	-0,76	-0,09	1,73	0,15	0,04	12,34
19,00	10,984	-0,28	-0,76	-0,09	1,74	-0,15	-0,04	11,41
20,00	10,984	-0,82	-0,56	0	1,62	-0,41	-0,07	10,75
21,00	10,984	-1,3	-0,21	0,09	1,39	-0,56	-0,04	10,36
22,00	10,984	-1,7	0,2	0,09	1,07	-0,56	0,04	10,12
23,00	10,984	-1,98	0,55	0	0,67	-0,41	0,07	9,89
24,00	10,984	-2,13	0,76	-0,09	0,23	-0,15	0,04	9,64

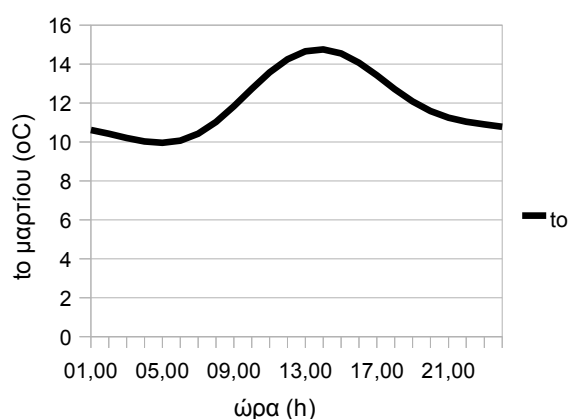


Εικόνα 10.6.4: Κατανομή της εξωτερικής θερμοκρασίας

Μάρτιος:

Πίνακας 10.6.5: Τιμές της εξωτερικής θερμοκρασίας.

time	M	C1*cosa	C2*cosb	C3*cosc	S1*sina	S2*sinb	S3*sinc	to
01,00	11,955	-1,88	0,63	-0,01	-0,14	0,07	0	10,61
02,00	11,955	-1,75	0,46	0	-0,41	0,18	-0,01	10,42
03,00	11,955	-1,51	0,17	0,01	-0,66	0,25	0	10,21
04,00	11,955	-1,16	-0,17	0,01	-0,86	0,25	0	10,03
05,00	11,955	-0,73	-0,46	0	-1	0,18	0,01	9,96
06,00	11,955	-0,25	-0,63	-0,01	-1,07	0,07	0	10,07
07,00	11,955	0,25	-0,63	-0,01	-1,07	-0,07	0	10,42
08,00	11,955	0,72	-0,46	0	-1	-0,18	-0,01	11,03
09,00	11,955	1,15	-0,17	0,01	-0,86	-0,25	0	11,84
10,00	11,955	1,5	0,17	0,01	-0,66	-0,25	0	12,73
11,00	11,955	1,75	0,46	0	-0,42	-0,18	0,01	13,58
12,00	11,955	1,88	0,63	-0,01	-0,14	-0,07	0	14,25
13,00	11,955	1,88	0,63	-0,01	0,14	0,07	0	14,66
14,00	11,955	1,75	0,46	0	0,41	0,18	-0,01	14,76
15,00	11,955	1,51	0,17	0,01	0,66	0,25	0	14,54
16,00	11,955	1,16	-0,17	0,01	0,86	0,25	0	14,07
17,00	11,955	0,73	-0,46	0	1	0,18	0,01	13,42
18,00	11,955	0,25	-0,63	-0,01	1,07	0,07	0	12,72
19,00	11,955	-0,24	-0,63	-0,01	1,08	-0,06	0	12,08
20,00	11,955	-0,72	-0,46	0	1	-0,18	-0,01	11,58
21,00	11,955	-1,15	-0,17	0,01	0,86	-0,25	0	11,25
22,00	11,955	-1,5	0,16	0,01	0,66	-0,25	0	11,05
23,00	11,955	-1,75	0,46	0	0,42	-0,18	0,01	10,91
24,00	11,955	-1,88	0,63	-0,01	0,14	-0,07	0	10,78



Εικόνα 10.6.5: Κατανομή της εξωτερικής θερμοκρασίας

10.7 Συνάρτηση μεταφοράς στα ελληνικά κτήρια

Η ASHREA παρέχει τιμές των συντελεστών μεταφοράς για 40 είδη οροφών, 103 είδη εξωτερικών τοίχων και 47 είδη εσωτερικών χωρισμάτων. Η συνάρτηση μεταφοράς χρησιμοποιείται υπό την μορφή:

$$q_t = \sum b_n T_{e,t-n\Delta} - \sum d_n q_{t-n\Delta} - T_{in} * \sum c_n \quad (10.7.1)$$

όπου:

q_t = ροή θερμότητας διά της εσωτερικής επαφαιάς τοίχου ή οροφής κατά την ώρα t , W/m^2

t = χρόνος, hr

Δ = χρονικό βήμα, hr (συνήθως μία ώρα)

n = δείκτης άθροισης(κάθε άθροισμα έχει τόσους όρους όσο το πλήθος των μη μηδενικών συντελεστών

$T_{e,t-n\Delta}$ = ισοδύναμη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα κατά την ώρα $t-n\Delta$, °C

T_{in} = σταθερή θερμοκρασία εσωτερικού αέρα, °C

b_n, c_n, d_n = συντελεστές συνάρτησης μεταφοράς, b_n και c_n σε $W/m^2 \text{ } ^\circ C$, d_n αδιάστατος.

Οι τιμές των συντελεστών b_n , c_n , d_n για τις συνηθέστερες ελληνικές κατασκευές τοίχων και οροφών υπολογίστηκαν με το πρόγραμμα H/Y των Mitalas και Arseneault. Εκτός από τους 18 ελληνικούς τύπους εξωτερικών τοίχων G1, G2...G18, συμπεριλαμβάνονται και 11 χαρακτηριστικές κατασκευές τοίχων από τον κατάλογο ASHRAE. Οι τιμές προκύπτουν με εσωτερικό συντελεστή συναγωγιμότητας $h_o = 17 W/m^2 \text{ } ^\circ C$ και $h_i = 8.3 W/m^2 \text{ } ^\circ C$.

Προσεγγιστικές τιμές των συντελεστών για νέες κατασκευές, μπορούν να ευρεθούν πολλαπλασιάζοντας τους συντελεστές b_n και c_n μιας παρόμοιας κατασκευής που διαθέτουμε στους πίνακες του βιβλίου "Κλιματισμός" του κ. Αντωνόπουλου επί τον λόγο της ολικής θερμικής διαπερατότητας k της νέας κατασκευής διά της τιμής του k της παρόμοιας κατασκευής που περιέχεται στους πίνακες.

Η ισοδύναμη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα T_e (sol-air-temperature), η οποία περιέχεται στην συνάρτηση μεταφοράς έχει λογιστική τιμή, η οποία προκύπτει από την υπέρθεση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην εξωτερική επιφάνεια τοίχου, της συναλλαγής θερμότητας δι' ακτινοβολίας με τον ουρανό και τα πέριξ και της συναλλαγής διά συναγωγής μεταξύ της επιφαιίας και του εξωτερικού αέρος. Στους πίνακες του βιβλίου "Κλιματισμός" του κ. Αντωνόπουλου δίδονται οι τιμές της ισοδύναμης θερμοκρασίας εξωτερικού αέρος T_e κατά την 21η ημέρα κάθε μήνα στην περιοχή της Αθήνας. Ο υπολογισμός έγινε σύμφωνα με την εξίσωση:

$$T_e = T_o + (a/h_o) * I_t - (\epsilon * \Delta R)/h_o \quad (10.7.2)$$

Ο λόγος της ηλιακής απορροφητικότητας προς την συναγωγιμότητα a/h_o , ελήφθη ίσος προς $0,026 m^2 \text{ } ^\circ C/W$ για ανοιχτόχρωμες επιφάνειες και $0,052 m^2 \text{ } ^\circ C/W$ για σκούρες. Ο διορθωτικός όρος $\epsilon * \Delta R/h_o$ ελήφθη ίσος προς $1x(63W/m^2)/1603W/m^2 \text{ } ^\circ C = 3,9^\circ C$ για οριζόντιες επιφάνειες (οροφές) και 0 για κατακόρυφες (τοίχους). Οι τιμές της θερμοκρασίας εξωτερικού αέρος T_o και της προσπίπτουσας στην επιφάνεια ολικής ηλιακής ακτινοβολίας I_t στην περιοχή της Αθήνας υπολογίστηκαν για κάθε ώρα της ημέρας.

Από την συνάρτηση της μεταφοράς φαίνεται ότι για τον υπολογισμό της ροής θερμότητας q κατά μία χρονική στιγμή t , πρέπει να είναι γνωστή η ισοδύναμη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα κατά την ίδια αλλά και κατά τις προηγούμενες χρονικές στιγμές καθώς επίσης και η τιμή της ροής θερμότητας κατά τις προηγούμενες χρονικές στιγμές. Δηλαδή, απαιτείται γνώση της θερμικής ιστορίας του τοίχου. Κατά την έναρξη των υπολογισμών, οι άγνωστες τιμές της θερμικής ροής κατά τις προηγούμενες χρονικές στιγμές λαμβάνονται ίσες προς το μηδές. Η επίδραση της υπόθεσης αυτής εξαλείφεται ύστερα από μερικούς 24ωρους διαδοχικούς κύκλους υπολογισμών (συνήθως 3 έως 4 κύκλοι είναι αρκετοί), οπότε επιτυγχάνεται σύγκλιση.

10.8 Ισοδύναμη θερμοκρασία 35 ελληνικών πόλεων

Η ισοδύναμη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα για την Αθήνα δίνονται στους πίνακες του βιβλίου "Κλιματισμός" του κ.Αντωνόπουλου στο τέλος του κεφαλαίου Δ. Για άλλες περιοχές της Ελλάδος, η ισοδύναμη θερμοκρασία μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση από την σχέση:

$$T_e' \approx T_e^{A\Theta} + T_o' - T_o^{A\Theta} \quad (10.8.1)$$

όπου:

$T_e^{A\Theta}$ = ισοδύναμη θερμοκρασία Αθηνών, °C

T_e' = ισοδύναμη θερμοκρασία άλλης περιοχής, °C

$T_o^{A\Theta}$ = μέση θερμοκρασία 24ώρου εξωτερικού αέρος Αθηνών, °C

T_o' = μέση θερμοκρασία 24ώρου εξωτερικού αέρος άλλης περιοχής, °C

Η παραπάνω εξίσωση προέκυψε υποθέτοντας ίδιο τρόπο ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας εξωτερικού αέρος και ίδιες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ της Αθήνας και των άλλων Ελληνικών περιοχών.

Η μέση θερμοκρασία 24ώρου εξωτερικού αέρος, T_o , σε 35 ελληνικές πόλεις έχει υπολογιστεί στον τομέα θερμότητας Ε.Μ.Π. με στατιστική επεξεργασία πολυετών μετρήσεων της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Τα αποτελέσματα δίνονται με την παρακάτω αλγεβρική έκφραση, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των T_o' και $T_o^{A\Theta}$ της εξίσωσης:

$$T_o = a + b * \sin [360 D / 365 - f] \quad (10.8.2)$$

όπου $D(= 1-365)$ είναι η ημέρα του έτους και a, b, f είναι συντελεστές οι οποίοι δίνονται για κάθε μία από τις 35 ελληνικές πόλεις

10.9 Απλοποίηση της διαδικασίας υπολογισμού θερμικής ροής δομικών στοιχείων (qτοίχου και qροφής)

Ο υπολογισμός της ροής θερμότητας με τη μέθοδο της συνάρτησης μεταφοράς είναι πρακτικά αδύνατος χωρίς χρήση υπολογιστού, αλλά ακόμα και με τον υπολογιστή η διαδικασία είναι χρονοβόρος. Απλοποίηση της διαδικασίας αυτής και μείωση του χρόνου υπολογισμού επιτυγχάνεται με διαγράμματα, τα οποία

αναπτύχθηκαν στον τομέα θερμότητας του Τμήματος Μηχανολόγων Ε.Μ.Π., όπως περιγράφεται παρακάτω.

Για τις 29 κατασκευές εξωτερικών τοίχων που περιέχονται στους πίνακες του βιβλίου "Κλιματισμός" υπολογίστηκε η ροή θερμότητας για ανοικτόχρωμες ($h_o/a=38\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$) και σκούρες ($h_o/a = 19\text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$) επιφάνειες 6 προσανατολισμών(N,E,SE,S,SW,W) κατά την 21η ημέρα κάθε μήνα στην Αθήνα, με θερμοκρασία εσωτερικού αέρα $T_{in}= 26\text{ }^\circ\text{C}$. Δηλαδή έγινε εφαρμογή της μεθόδου συνάρτησης μεταφοράς $29 \times 2 \times 6 \times 12 = 4176$ φορές και σχεδιάστηκαν ισάριθμες καμπύλες που παριστούν, υπό τις αντίστοιχες συνθήκες, την ροή θερμότητας συναρτήσεως της ώρας του 24ώρου. Τα διαγράμματα που προέκυψαν περιέχονται σε εκδοθέν βιβλίο υπό τον τίτλο "Θερμική ροή δομικών στοιχείων για φορτία κλιματισμού στην Ελλάδα" (1991). Τα διαγράμματα που περιέχονται στο βιβλίο για τοίχο τύπου G1 ανοικτού και σκούρου χρώματος χαρακτηρίζονται από τον κωδικό και τον προσανατολισμό του τοίχου (π.χ. G1/N) και περιέχει 12 καμπύλες (μία για κάθε μήνα) κατανεμημένες σε δύο διαγράμματα.

Αντίστοιχοι υπολογισμοί έγιναν και για τα 10 είδη οροφών, δηλαδή εφαρμόστηκε η μέθοδος της συνάρτησης μεταφοράς για 10 οροφές ανοικτού και σκούρου χρώματος κατά την 21η ημέρα κάθε μήνα στην Αθήνα. Έτσι προέκυψαν $10 \times 2 \times 2 \times 12 = 240$ καμπύλες που παριστούν το θερμικό κέρδος στις αντίστοιχες περιπτώσεις, συναρτήσεως της ώρας της ημέρας. Όσον αφορά τα διαγράμματα για οροφές ανοικτού χρώματος χαρακτηρίζονται από τον κωδικό της οροφής και περιέχει 12 καμπύλες (μία για κάθε μήνα) κατανεμημένες σε δύο διαγράμματα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στα διαγράμματα μπορούν άμεσα να διαβαστούν οι τιμές της ροής θερμότητας των αντιστοιχών δομικών στοιχείων για οποιαδήποτε ώρα του 24ώρου και οποιονδήποτε μήνα του έτους, με θερμοκρασία εσωτερικού αέρα 26°C . Για άλλες θερμοκρασίες εσωτερικού αέρα, αρκεί να προστεθεί στις τιμές των διαγραμμάτων η ποσότητα $K(26-T_{in})$, όπου k (σε $\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$) είναι η ολική θερμική διαπερατότητα του τοίχου ή της οροφής και T_{in} (σε $^\circ\text{C}$) η επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού αέρα.

Για να είναι δυνατή η χρήση των διαγραμμάτων ως βάσεις δεδομένων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, οι καμπύλες προσεγγίστηκαν με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων από την παρακάτω αλγεβρική έκφραση:

$$q_t = k (26 - T_{in}) + M + \Sigma [A_j \cos [(2\pi j (t-1)) / 25] + B_j \sin[(2\pi j(t-1))/25]] \quad (10.9.1)$$

όπου k είναι η ολική θερμική διαπερατότητα του τοίχου ή της οροφής σε $\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, T_{in} η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα σε $^\circ\text{C}$ και M, A_j, B_j είναι συντελεστές σε W/m^2 , οι οποίοι δίνονται στα σχήματα του βιβλίου "Κλιματισμός" κάτω από τα διαγράμματα. Η παραπάνω εξίσωση προσεγγίζει άριστα τις τιμές που δίδει η μέθοδος της συνάρτησης μεταφοράς.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες στο excel που έγιναν και τα διαγράμματα που προέκυψαν για τον υπολογισμό των ροών και του φορτίου.

ατοιχου-βόρειου

Θεωρούμε ότι έχουμε βόρειο τοίχο σκούρου χρώματος με $T_{in}= 20^{\circ}\text{C}$. Χρησιμοποιούμε τοίχο G1, δηλαδή τοίχο διπλό δρομικό με μόνωση 4cm. Ο τοίχος ακολουθεί την παρακάτω περιγραφή:

επίχρισμα: 2cm

δρομικός : 9cm

μόνωση : 4cm

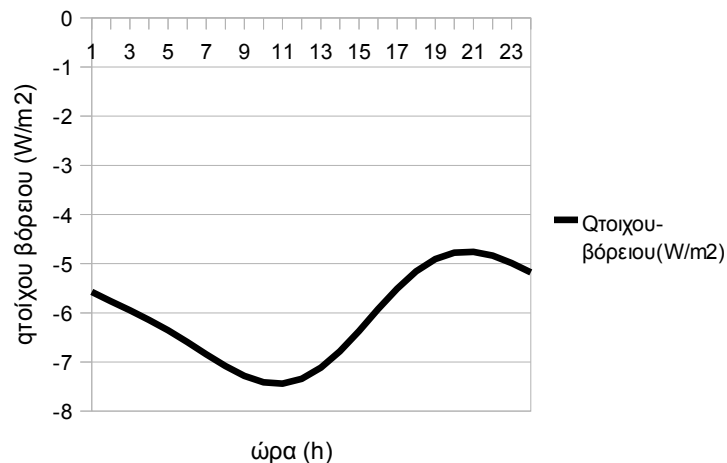
δρομικός : 9cm

επίχρισμα: 2cm

Για τον τοίχο αυτό ισχύει : $A=30\text{m}^2$, $A1= 0,693\text{W/m}^2$, $A2= -0,208\text{W/m}^2$. $B1=-1,054\text{W/m}^2$, $B2=0,145\text{W/m}^2$, $M= -9,959\text{W/m}^2$.

Πίνακας 10.9.1: Τιμές της θερμικής ροής του βόρειου τοίχου καθώς και των συντελεστών που συνιστούν την συνάρτηση μεταφοράς.

time	$A1\cos[2\pi(t-1)/25]$	$A2\cos[4\pi(t-1)/25]$	$B1\sin[2\pi(t-1)/25]$	$B2\sin[4\pi(t-1)/25]$	M	$K(26-T_{in})$	Qτοιχου-βόρειου(W/m^2)
1	0,69	-0,21	0	0	-9,959	3,9	-5,57
2	0,67	-0,18	-0,26	0,07	-9,959	3,9	-5,76
3	0,61	-0,11	-0,51	0,12	-9,959	3,9	-5,95
4	0,51	-0,01	-0,72	0,14	-9,959	3,9	-6,14
5	0,37	0,09	-0,89	0,13	-9,959	3,9	-6,36
6	0,21	0,17	-1	0,09	-9,959	3,9	-6,59
7	0,04	0,21	-1,05	0,02	-9,959	3,9	-6,84
8	-0,13	0,19	-1,04	-0,05	-9,959	3,9	-7,08
9	-0,29	0,13	-0,95	-0,11	-9,959	3,9	-7,29
10	-0,44	0,04	-0,81	-0,14	-9,959	3,9	-7,42
11	-0,56	-0,06	-0,62	-0,14	-9,959	3,9	-7,44
12	-0,64	-0,15	-0,39	-0,1	-9,959	3,9	-7,34
13	-0,69	-0,2	-0,13	-0,04	-9,959	3,9	-7,12
14	-0,69	-0,2	0,13	0,04	-9,959	3,9	-6,78
15	-0,64	-0,15	0,39	0,1	-9,959	3,9	-6,37
16	-0,56	-0,07	0,62	0,14	-9,959	3,9	-5,93
17	-0,44	0,04	0,81	0,14	-9,959	3,9	-5,51
18	-0,3	0,13	0,95	0,11	-9,959	3,9	-5,16
19	-0,13	0,19	1,03	0,05	-9,959	3,9	-4,91
20	0,04	0,21	1,05	-0,02	-9,959	3,9	-4,78
21	0,21	0,17	1	-0,08	-9,959	3,9	-4,76
22	0,37	0,09	0,89	-0,13	-9,959	3,9	-4,84
23	0,5	-0,01	0,72	-0,14	-9,959	3,9	-4,99
24	0,61	-0,11	0,51	-0,12	-9,959	3,9	-5,18



Εικόνα 10.9.1: Κατανομή της θερμικής ροής του βόρειου τοίχου κατά την διάρκεια μίας μέρας.

qτοιχου-ανατολικού

Θεωρούμε ότι έχουμε ανατολικό τοίχο σκούρου χρώματος με $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$. Χρησιμοποιούμε τοίχο G1, δηλαδή τοίχο διπλό δρομικό με μόνωση 4cm. Ο τοίχος ακολουθεί την παρακάτω περιγραφή:

επίχρισμα: 2cm

δρομικός : 9cm

μόνωση : 4cm

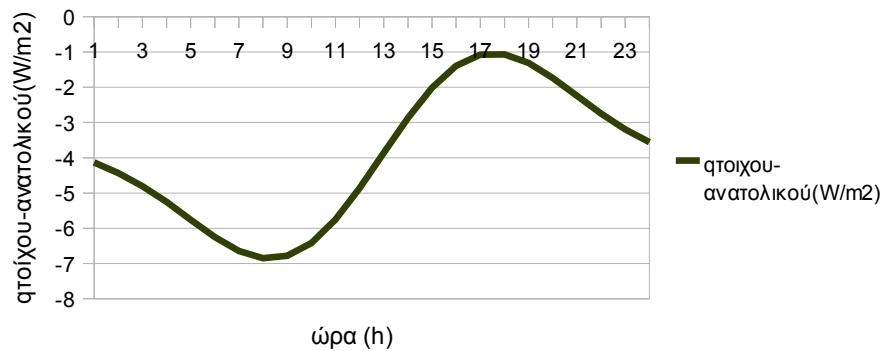
δρομικός : 9cm

επίχρισμα: 2cm

Για τον τοίχο αυτό ισχύει : $A=30\text{m}^2$, $A_1 = -0,392\text{W/m}^2$, $A_2 = 0,214\text{W/m}^2$. $B_1 = -2,547\text{W/m}^2$, $B_2 = 0,717\text{W/m}^2$, $M = -7,856\text{W/m}^2$.

Πίνακας 10.9.2: Τιμές της θερμικής ροής του ανατολικού τοίχου καθώς και των συντελεστών που συνιστούν την συνάρτηση μεταφοράς.

time	$A1\cos[2\pi(t-1)/25]$	$A2\cos[4\pi(t-1)/25]$	$B1\sin[2\pi(t-1)/25]$	$B2\sin[4\pi(t-1)/25]$	M	K(26-Tin)	Qτοιχου-ανατολ.(W/m ²)
1	-0,39	0,21	0	0	-7,856	3,9	-4,13
2	-0,38	0,19	-0,63	0,35	-7,856	3,9	-4,44
3	-0,34	0,11	-1,23	0,61	-7,856	3,9	-4,81
4	-0,29	0,01	-1,74	0,72	-7,856	3,9	-5,26
5	-0,21	-0,09	-2,15	0,65	-7,856	3,9	-5,76
6	-0,12	-0,17	-2,42	0,42	-7,856	3,9	-6,25
7	-0,02	-0,21	-2,54	0,09	-7,856	3,9	-6,64
8	0,07	-0,2	-2,5	-0,26	-7,856	3,9	-6,85
9	0,17	-0,14	-2,31	-0,55	-7,856	3,9	-6,78
10	0,25	-0,04	-1,96	-0,7	-7,856	3,9	-6,42
11	0,32	0,07	-1,5	-0,68	-7,856	3,9	-5,76
12	0,36	0,16	-0,94	-0,49	-7,856	3,9	-4,87
13	0,39	0,21	-0,32	-0,18	-7,856	3,9	-3,86
14	0,39	0,21	0,32	0,18	-7,856	3,9	-2,87
15	0,36	0,16	0,93	0,49	-7,856	3,9	-2,01
16	0,32	0,07	1,49	0,68	-7,856	3,9	-1,4
17	0,25	-0,04	1,96	0,7	-7,856	3,9	-1,08
18	0,17	-0,14	2,3	0,55	-7,856	3,9	-1,07
19	0,07	-0,2	2,5	0,27	-7,856	3,9	-1,31
20	-0,02	-0,21	2,54	-0,09	-7,856	3,9	-1,74
21	-0,12	-0,17	2,42	-0,42	-7,856	3,9	-2,24
22	-0,21	-0,09	2,15	-0,65	-7,856	3,9	-2,75
23	-0,29	0,01	1,75	-0,72	-7,856	3,9	-3,2
24	-0,34	0,11	1,23	-0,61	-7,856	3,9	-3,56



Εικόνα 10.9.2: Κατανομή της θερμικής ροής του ανατολικού τοίχου κατά την διάρκεια μίας μέρας.

qτοιχου-νότιου

Θεωρούμε ότι έχουμε νότιο τοίχο σκούρου χρώματος με $T_{in}= 20^{\circ}\text{C}$. Χρησιμοποιούμε τοίχο G1, δηλαδή τοίχο διπλό δρομικό με μόνωση 4cm. Ο τοίχος ακολουθεί την παρακάτω περιγραφή:

επίχρισμα: 2cm

δρομικός : 9cm

μόνωση : 4cm

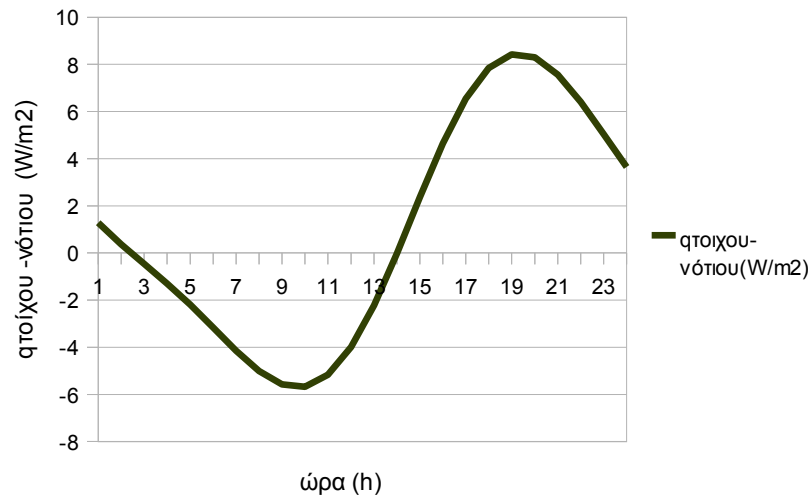
δρομικός : 9cm

επίχρισμα: 2cm

Για τον τοίχο αυτό ισχύει : $A=15\text{m}^2$, $A1= 1,219\text{W/m}^2$, $A2= -0,968\text{W/m}^2$. $B1=-6,387\text{W/m}^2$, $B2=1,216\text{W/m}^2$, $M= -2,864\text{W/m}^2$.

Πίνακας 10.9.3: Τιμές της θερμικής ροής του νότιου τοίχου καθώς και των συντελεστών που συνιστούν την συνάρτηση μεταφοράς.

time	$A1\cos[2\pi(t-1)/25]$	$A2\cos[4\pi(t-1)/25]$	$B1\sin[2\pi(t-1)/25]$	$B2\sin[4\pi(t-1)/25]$	M	$K(26-T_{in})$	Qτοιχου-νότ(W/m ²)
1	1,22	-0,97	0	0	-2,864	3,9	1,29
2	1,18	-0,85	-1,59	0,59	-2,864	3,9	0,37
3	1,07	-0,52	-3,08	1,03	-2,864	3,9	-0,46
4	0,89	-0,06	-4,37	1,21	-2,864	3,9	-1,29
5	0,65	0,41	-5,39	1,1	-2,864	3,9	-2,19
6	0,38	0,78	-6,07	0,72	-2,864	3,9	-3,16
7	0,08	0,96	-6,37	0,15	-2,864	3,9	-4,15
8	-0,23	0,9	-6,27	-0,45	-2,864	3,9	-5,01
9	-0,52	0,62	-5,78	-0,94	-2,864	3,9	-5,58
10	-0,78	0,18	-4,93	-1,19	-2,864	3,9	-5,68
11	-0,99	-0,3	-3,76	-1,16	-2,864	3,9	-5,16
12	-1,13	-0,7	-2,36	-0,83	-2,864	3,9	-3,99
13	-1,21	-0,94	-0,81	-0,31	-2,864	3,9	-2,23
14	-1,21	-0,94	0,79	0,3	-2,864	3,9	-0,02
15	-1,13	-0,71	2,34	0,83	-2,864	3,9	2,36
16	-0,99	-0,3	3,74	1,16	-2,864	3,9	4,65
17	-0,78	0,18	4,91	1,2	-2,864	3,9	6,54
18	-0,52	0,61	5,77	0,94	-2,864	3,9	7,84
19	-0,23	0,9	6,27	0,45	-2,864	3,9	8,43
20	0,07	0,96	6,38	-0,15	-2,864	3,9	8,3
21	0,37	0,79	6,08	-0,71	-2,864	3,9	7,57
22	0,65	0,42	5,4	-1,1	-2,864	3,9	6,41
23	0,89	-0,06	4,39	-1,21	-2,864	3,9	5,04
24	1,07	-0,51	3,09	-1,03	-2,864	3,9	3,65



Εικόνα 10.9.3: Κατανομή της θερμικής ροής του νότιου τοίχου κατά την διάρκεια μίας μέρας.

qτοιχου-δυτικού

Θεωρούμε ότι έχουμε δυτικό τοίχο σκούρου χρώματος με $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$. Χρησιμοποιούμε τοίχο G1, δηλαδή τοίχο διπλό δρομικό με μόνωση 4cm. Ο τοίχος ακολουθεί την παρακάτω περιγραφή:

επίχρισμα: 2cm

δρομικός : 9cm

μόνωση : 4cm

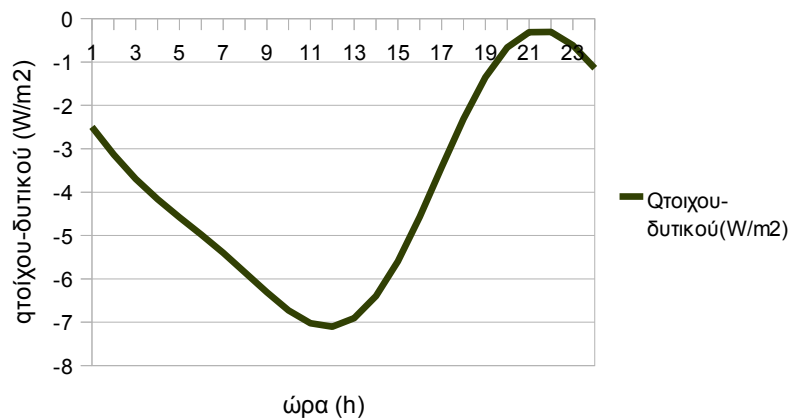
δρομικός : 9cm

επίχρισμα: 2cm

Για τον τοίχο αυτό ισχύει : $A=15\text{m}^2$, $A_1= 2,095\text{W/m}^2$, $A_2= -0,718\text{W/m}^2$. $B_1=-2,356\text{W/m}^2$, $B_2=-0,162\text{W/m}^2$, $M= -7,773\text{W/m}^2$.

Πίνακας 10.9.4: Τιμές της θερμικής ροής του δυτικού τοίχου καθώς και των συντελεστών που συνιστούν την συνάρτηση μεταφοράς.

time	$A1\cos[2\pi(t-1)/25]$	$A2\cos[4\pi(t-1)/25]$	$B1\sin[2\pi(t-1)/25]$	$B2\sin[4\pi(t-1)/25]$	M	$K(26-T_{in})$	Qτοιχου-δυτ(W/m ²)
1	2,1	-0,72	0	0	-7,773	3,9	-2,5
2	2,03	-0,63	-0,59	-0,08	-7,773	3,9	-3,14
3	1,84	-0,39	-1,13	-0,14	-7,773	3,9	-3,69
4	1,53	-0,05	-1,61	-0,16	-7,773	3,9	-4,16
5	1,12	0,31	-1,99	-0,15	-7,773	3,9	-4,58
6	0,65	0,58	-2,24	-0,1	-7,773	3,9	-4,98
7	0,13	0,71	-2,35	-0,02	-7,773	3,9	-5,4
8	-0,39	0,67	-2,31	0,06	-7,773	3,9	-5,85
9	-0,89	0,46	-2,13	0,12	-7,773	3,9	-6,31
10	-1,33	0,14	-1,82	0,16	-7,773	3,9	-6,73
11	-1,69	-0,22	-1,39	0,15	-7,773	3,9	-7,02
12	-1,95	-0,52	-0,87	0,11	-7,773	3,9	-7,1
13	-2,08	-0,69	-0,3	0,04	-7,773	3,9	-6,9
14	-2,08	-0,7	0,29	-0,04	-7,773	3,9	-6,4
15	-1,95	-0,53	0,86	-0,11	-7,773	3,9	-5,59
16	-1,7	-0,22	1,38	-0,15	-7,773	3,9	-4,57
17	-1,34	0,13	1,81	-0,16	-7,773	3,9	-3,43
18	-0,9	0,46	2,13	-0,13	-7,773	3,9	-2,31
19	-0,4	0,67	2,31	-0,06	-7,773	3,9	-1,35
20	0,13	0,71	2,35	0,02	-7,773	3,9	-0,66
21	0,64	0,58	2,24	0,09	-7,773	3,9	-0,31
22	1,12	0,31	1,99	0,15	-7,773	3,9	-0,31
23	1,52	-0,04	1,62	0,16	-7,773	3,9	-0,61
24	1,83	-0,38	1,14	0,14	-7,773	3,9	-1,14



Πίνακας 10.9.4: Κατανομή της θερμικής ροής του δυτικού τοίχου

οροφής

Θεωρούμε ότι έχουμε την οροφή 1, δηλαδή ταράτσα με μόνωση 6cm και γαρμπιλόδεμα. Η οροφή αυτή ακολουθεί την παρακάτω περιγραφή:

στεγανοποίηση : 1cm

κισσηρόδεμα : 10cm

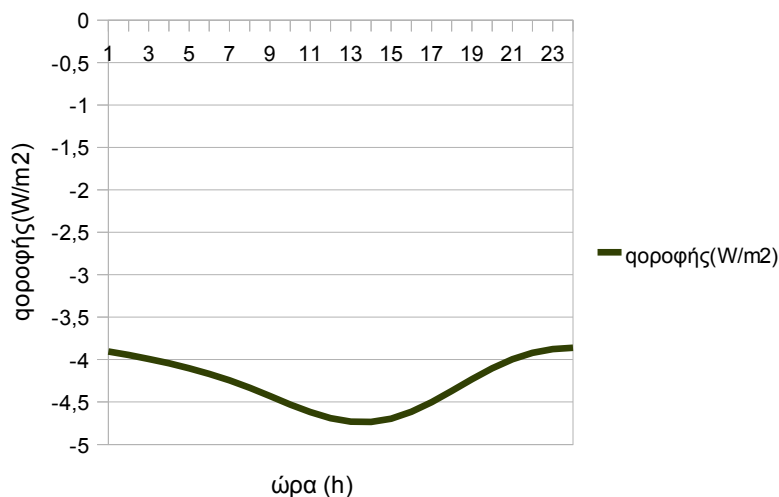
οπλ. Σκυρόδεμα : 14cm

επίχρισμα : 1,5cm

Για την οροφή αυτή ισχύει ότι: $A=100\text{m}^2$, $A1=0,418\text{W/m}^2$, $A2=-0,061\text{W/m}^2$, $B1=-0,067\text{W/m}^2$, $B2=-0,039\text{W/m}^2$, $M=-6,937\text{W/m}^2$ και $k=0,446\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$.

Πίνακας 10.9.5: Τιμές της θερμικής ροής της οροφής καθώς και των συντελεστών που συνιστούν την συνάρτηση μεταφοράς.

time	$A1\cos[2\pi(t-1)/25]$	$A2\cos[4\pi(t-1)/25]$	$B1\sin[2\pi(t-1)/25]$	$B2\sin[4\pi(t-1)/25]$	M	K(26-Tin)	Qοροφ.(W/m ²)
1	0,42	-0,06	0	0	-6,937	2,68	-3,9
2	0,4	-0,05	-0,02	-0,02	-6,937	2,68	-3,95
3	0,37	-0,03	-0,03	-0,03	-6,937	2,68	-3,99
4	0,3	0	-0,05	-0,04	-6,937	2,68	-4,04
5	0,22	0,03	-0,06	-0,04	-6,937	2,68	-4,1
6	0,13	0,05	-0,06	-0,02	-6,937	2,68	-4,17
7	0,03	0,06	-0,07	0	-6,937	2,68	-4,25
8	-0,08	0,06	-0,07	0,01	-6,937	2,68	-4,33
9	-0,18	0,04	-0,06	0,03	-6,937	2,68	-4,43
10	-0,27	0,01	-0,05	0,04	-6,937	2,68	-4,53
11	-0,34	-0,02	-0,04	0,04	-6,937	2,68	-4,62
12	-0,39	-0,04	-0,02	0,03	-6,937	2,68	-4,69
13	-0,41	-0,06	-0,01	0,01	-6,937	2,68	-4,73
14	-0,41	-0,06	0,01	-0,01	-6,937	2,68	-4,74
15	-0,39	-0,04	0,02	-0,03	-6,937	2,68	-4,7
16	-0,34	-0,02	0,04	-0,04	-6,937	2,68	-4,62
17	-0,27	0,01	0,05	-0,04	-6,937	2,68	-4,5
18	-0,18	0,04	0,06	-0,03	-6,937	2,68	-4,37
19	-0,08	0,06	0,07	-0,01	-6,937	2,68	-4,23
20	0,03	0,06	0,07	0	-6,937	2,68	-4,1
21	0,13	0,05	0,06	0,02	-6,937	2,68	-4
22	0,22	0,03	0,06	0,04	-6,937	2,68	-3,92
23	0,3	0	0,05	0,04	-6,937	2,68	-3,88
24	0,37	-0,03	0,03	0,03	-6,937	2,68	-3,86



Πίνακας 10.9.5: Τιμές της θερμικής ροής της οροφής καθώς και των συντελεστών που συνιστούν την συνάρτηση μεταφοράς.

10.10 Υπολογισμός ψυκτικού φορτίου που προκύπτει από το θερμικό κέρδος δι' αγωγής και ηλιακής ακτινοβολίας μέσω υαλοπινάκων

Η στιγμιαία τιμή του συνολικού θερμικού κέρδους μέσω υαλοπίνακος μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\begin{array}{l}
 \text{Συνολικό} \\
 \text{θερμικό} \\
 \text{κέρδος}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 \text{Ροή} \\
 \text{θερμότητας} \\
 \text{λόγω διαφοράς} \\
 \text{εξωτερικής-} \\
 \text{εσωτερικής} \\
 \text{θερμοκρασίας}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{l}
 \text{Ακτινοβολία} \\
 \text{διερχόμενη} \\
 \text{μέσω του} \\
 \text{υαλοπίνακος}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{l}
 \text{Ροή} \\
 \text{απορρόφηθείσης} \\
 \text{ηλ. Ακτινοβολίας} \\
 \text{προς τον} \\
 \text{εσωτερικό χώρο}
 \end{array}$$

Οι δύο τελευταίοι όροι του δεύτερου μέλους υφίστανται μόνον όταν ο υαλοπίνακας δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, ενώ ο πρώτος, ο οποίος εκφράζει την δι'αγωγής μετάδοση θερμότητας, υφίσταται ανεξάρτητα από την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$\begin{array}{l}
 \text{Συνολικό} \\
 \text{θερμικό} \\
 \text{κέρδος}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 \text{Θερμικό} \\
 \text{κέρδος δι'} \\
 \text{αγωγής}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{l}
 \text{Ηλιακό} \\
 \text{θερμικό} \\
 \text{κέρδος}
 \end{array}$$

δηλαδή το θερμικό κέρδος μέσω υαλοπίνακος αναλύεται στις παραπάνω δύο συνιστώσες.

10.10.1 Θερμικό κέρδος υαλοπίνακος δι'αγωγής και αντίστοιχο ψυκτικό φορτίο

Το θερμικό κέρδος υαλοπίνακος δι'αγωγής, HG σε W, υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$HG = U * A * (t_o - t_i) \quad (10.10.1.1)$$

όπου U= ολική θερμική διαπερατότης υαλοπίνακος, W/m²°C

A= επιφάνεια υαλοπίνακος, m²

(t_o-t_i)= εξωτερική και εσωτερική θερμοκρασία αντιστοίχως, °C

Εφαρμόζοντας την μέθοδο θερμοκρασιακής διαφοράς ψυκτικού φορτίου, το ψυκτικό φορτίο που αντιστοιχεί στο θερμικό κέρδος δι'αγωγής, HG, υπολογίζεται από την σχέση:

$$q = U * A * (CLTD)_{corr} \quad (10.10.1.2)$$

όπου q=ψυκτικό φορτίο, W

CLTD_{corr}= θερμοκρασιακή διαφορά ψυκτικού φορτίου °C

Οι τιμές της CLTD δίνονται από τον πίνακα που ακολουθεί για κάθε ώρα του 24ωρου. Οι τιμές αυτές έχουν υπολογιστεί για εσωτερική θερμοκρασία 25,5 °C και μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία 35°C με ημερήσια διακύμανση 11,6°C. Ο πίνακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια για εξωτερικές θερμοκρασίες 34-39 °C, και ημερήσιες διακυμάνσεις 9-19 °C , υπό τον όρο ότι η μέση ημερήσια θερμοκρασία παραμένει περίπου ίση προς 29,4°C. Εάν η εσωτερική θερμοκρασία είναι διάφορος των 25,5 °C και/ή η εξωτερική μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι διάφορος των 29,4°C, τότε γίνεται χρήση της διορθωτικής εξίσωσης:

$$(CLTD)_{corr} = CLTD + (25,5 - TR) + (T_o - 29,4) \quad (10.6.1.3)$$

όπου (CLTD)_{corr}= η ορθή τιμή, °C

CLTD= η τιμή του πίνακα, °C

TR=εσωτερική θερμοκρασία, °C

T_o= εξωτερική μέση ημερήσια θερμοκρασία, °C

Πίνακας 10.10.1.1: Θερμοκρασιακές διαφορές ψυκτικού φορτίου για θερμική αγωγή μέσω υαλοπινάκων

Solar - time,	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
CLTD °C	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	2	4	5	7	7	8	8	7	7	6	4	3	2	2	1

10.10.2 Ηλιακό θερμικό κέρδος υαλοπίνακος και αντίστοιχο ψυκτικό φορτίο

Το ηλιακό θερμικό κέρδος υαλοπίνακος οφείλεται στην διερχόμενη και την απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια και συνεχώς λαμβάνεται υπ'όψιν στους υπολογισμούς εφόσον ο υαλοπίνακας δέχεται ηλιακή ακτινοβολία.

Η ASHRAE ανέπτυξε μία μέθοδο υπολογισμού του SHG, η οποία κάνει χρήση ενός υαλοπίνακος πάχους 3mm με καθορισμένες ιδιότητες. Το SHG του υαλοπίνακος αυτού ονομάζεται παράγων ηλιακού θερμικού κέρδους. Η μέγιστη τιμή του SHGF για κάθε μήνα δίνεται στους παρακάτω πίνακες συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους και του προσανατολισμού του υαλοπίνακος.

Για να ληφθούν υπ'όψιν οι διάφοροι τύποι υαλοπινάκων με τις αντίστοιχες συσκευές σκίασης, ορίσθει ο συντελεστής σκίασης ως εξής:

SC= ηλιακό θερμικό κέρδος υαλοπίνακος / ηλιακό θερμικό κέρδος υαλοπίνακος αναφοράς=>

$$\text{SH} = \text{SHG} / \text{SHGF} \quad (10.10.2.1)$$

έτσι ώστε όταν είναι γνωστή η τιμή του SC, το SHG υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση.

Για τον υπολογισμό του ψυκτικού φορτίου υαλοπίνακος που οφείλεται στο SHG γίνεται χρήση του παράγοντος ψυκτικού φορτίου, ο οποίος λαμβάνει υπ'όψιν την συσσώρευση της θερμότητας στα δομικά υλικά και την επίπλωση του δωματίου. Η μέθοδος υπολογισμού των CLF, οι οποίοι δίνονται στους παρακάτω πίνακες, θα περιγραφεί αργότερα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το ψυκτικό φορτίο που αντιστοιχεί στην ηλιακή ακτινοβολία μέσω υαλοπίνακος υπολογίζεται από την σχέση:

$$q = A * (SC) * (\text{SHGF})_{\text{max}} * (CLF) \quad (10.10.2.2)$$

όπου q= ψυκτικό φορτίο, W

A= καθαρή επιφάνεια υαλοπίνακος, m²

SC= συντελεστής σκίασης που αντιστοιχεί στον συνδυασμό τύπου υαλοπίνακος με τον τύπο σκίασης

(SHGF)_{max}=μέγιστος παράγων ηλιακού θερμικού κέρδους για τον προσανατολισμό του υαλοπίνακος, τον μήνα και το γεωγραφικό πλάτος. Εάν ο υαλοπίνακας σκιάζεται εξωτερικά, τότε για γεωγραφ. Πλάτη 0°-24° γίνεται χρήση απο αντίστοιχο πίνακα, ενώ για γεωγρ.πλάτη μεγαλύτερα των 24° λαμβάνονται οι τιμές βορείου προσανατολισμού αντίστοιχου πίνακα. Για οριζόντιο υαλοπίνακα υπό σκιά, λαμβάνονται οι τιμές πίνακα, ανεξαρτήτων γεωγραφικού πλάτους.

CLF= παράγων ψυκτικού φορτίου. Για υαλοπίνακα χωρίς εσωτερική σκίαση, οι τιμές του CLF δίνονται σε πίνακα, ο οποίος λαμβάνει υπ'όψιν και τον τύπο της εσωτερικής κατασκευής του χώρου (L= ελαφρά κατασκευή, M= μέση, H= βαρεία). Για υαλοπίνακα με εσωτερική σκίαση ο CLF λαμβάνεται από τον αντίστοιχο πίνακα.

Οι πίνακες που αναφέρονται βρίσκονται στο βιβλίο του "Κλιματισμού" του κ. Αντωνόπουλου.

10.10.3 Συνολικό ψυκτικό φορτίο υαλοπίνακος

Το συνολικό ψυκτικό φορτίο υαλοπίνακος, $q_{\text{υαλ}}$ σε W, είναι το άθροισμα του ψυκτικού φορτίου λόγω θερμικού κέρδους διάγωγής και του ψυκτικού φορτίου λόγω ηλιακού θερμικού κέρδους, δηλαδή:

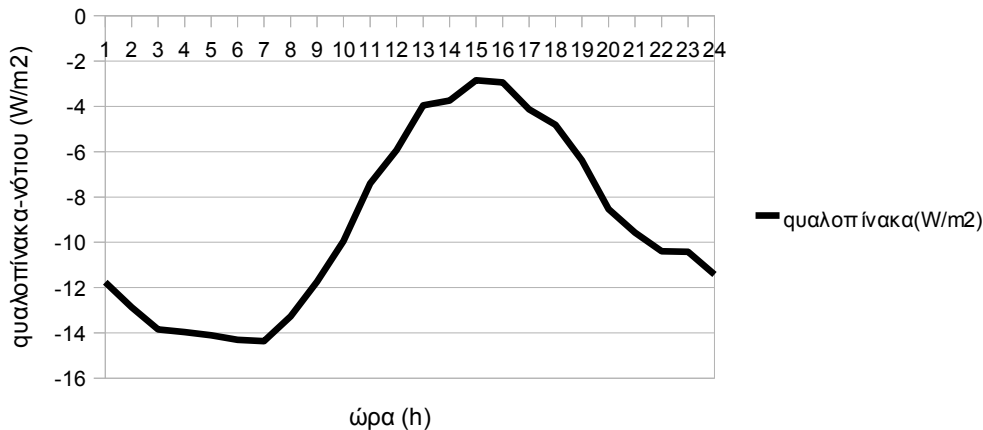
$$q_{\text{υαλ}} = U \cdot A \cdot (\text{CLTD}) + A \cdot (\text{SC}) \cdot (\text{SHGF})_{\text{max}} \cdot (\text{CLF}) \quad (10.10.3.1)$$

υαλοπίνακα-νότιου

Θεωρούμε νότιο υαλοπίνακα εμβαδού 15m^2 , $\Phi=38^\circ$, $(\text{SHGF})_{\text{max}}=(795+801)/2=798\text{W/m}^2$, $\text{SC}=0,2$ και $U=0,8\text{W/m}^2\text{C}$

Πίνακας 10.10.3.1: Τιμές της θερμικής ροής του υαλοπίνακα καθώς και των συντελεστών που συνιστούν την εξίσωση της.

time	CLTD	$q_{\text{θ.κ.}}=U \cdot A \cdot \text{CLTD}_{\text{CORR}}$	SHGFmax	SC	CLF	ηηλ.ακτιν.	Καλοπ.-νότιου(W)	Καλοπ.(W/m ²)
1	1	-176,46	798	0,2	0,04	0	-176,46	-11,76
2	0	-193,06	798	0,2	0,04	0	-193,06	-12,87
3	-1	-207,78	798	0,2	0,03	0	-207,78	-13,85
4	-1	-209,41	798	0,2	0,03	0	-209,41	-13,96
5	-1	-211,67	798	0,2	0,03	0	-211,67	-14,11
6	-1	-214,56	798	0,2	0,09	0	-214,56	-14,3
7	-1	-215,48	798	0,2	0,16	0	-215,48	-14,37
8	0	-199,01	798	0,2	0,23	0	-199,01	-13,27
9	1	-176,07	798	0,2	0,38	0	-176,07	-11,74
10	2	-149,26	798	0,2	0,58	0	-149,26	-9,95
11	4	-111,14	798	0,2	0,75	0	-111,14	-7,41
12	5	-89,06	798	0,2	0,83	0	-89,06	-5,94
13	7	-59,28	798	0,2	0,8	0	-59,28	-3,95
14	7	-56,16	798	0,2	0,68	0	-56,16	-3,74
15	8	-42,76	798	0,2	0,5	0	-42,76	-2,85
16	8	-44,14	798	0,2	0,35	0	-44,14	-2,94
17	7	-62,03	798	0,2	0,27	0	-62,03	-4,14
18	7	-72,23	798	0,2	0,19	0	-72,23	-4,82
19	6	-95,62	798	0,2	0,11	0	-95,62	-6,37
20	4	-128,08	798	0,2	0,09	0	-128,08	-8,54
21	3	-143,64	798	0,2	0,08	0	-143,64	-9,58
22	2	-155,87	798	0,2	0,07	0	-155,87	-10,39
23	2	-156,33	798	0,2	0,06	0	-156,33	-10,42
24	1	-171,37	798	0,2	0,05	0	-171,37	-11,42



Εικόνα 10.10.3.1:Κατανομή της θερμικής ροής του αααααααα κατά την διάρκεια μίας μέρας.

10.11 Υπολογισμός ψυκτικού φορτίου λόγω φωτισμού

Η ακτινοβολία που προέρχεται από τον ηλεκτροφωτισμό ενός χώρου απορροφάται από τους τοίχους, το δάπεδο και την επίπλωση με αποτέλεσμα την θέρμανση αυτών. Όταν η θερμοκρασία των γίνεται μεγαλύτερη από την θερμοκρασία αέρος του χώρου, τότε μέρος της θερμότητας αυτών μεταφέρεται διά συναγωγής στον αέρα. Συνεπώς η απορροφηθείσα ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται στα δομικά στοιχεία, επιδρά στο ψυκτικό φορτίο αφού περάσει κάποιο χρονικό διάστημα και μάλιστα η επίδραση αυτή υφίσταται και μετά την διακοπή του φωτισμού.

Το στιγμιαίο θερμικό κέρδος, HG σε W, λόγω ηλεκτροφωτισμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$HG = P * fu * fs \quad (10.11.1)$$

όπου P= ηλεκτρική ισχύς όλων των εγκατεστημένων φωτιστικών στον χώρο, W

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

fs= ειδικός συντελεστής, ο οποίος έχει εισαχθεί για τους λαμπτήρες φθορισμού και για ειδικούς τύπους φωτιστικών που απαιτούν περισσότερη ενέργεια από την ονομαστική. Συνήθεις τιμές: fs=1 για λαμπτήρες πυρακτώσεως και fs=1,2 για λαμπτήρες φθορισμού.

Ύστερα από πειραματική και αναλυτική μελέτη της επίδρασης επί του ψυκτικού φορτίου των διαφόρων παραμέτρων (π.χ. Του είδους και θέσης φωτιστικού, του αερισμού του χώρου, του είδους επίπλωσης και των θερμικών χαρακτηριστικών των υλικών του χώρου) εισήχθει ο Παράγων ψυκτικού φορτίου. Έτσι το ψυκτικό φορτίο υπολογίζεται από την σχέση:

$$q=(HG)* (CLF) \quad (10.11.2)$$

όπου q = ψυκτικό φορτίο λόγω ηλεκτροφωτισμού, W

HG= θερμικό κέρδος λόγω ηλεκτροφωτισμού, W

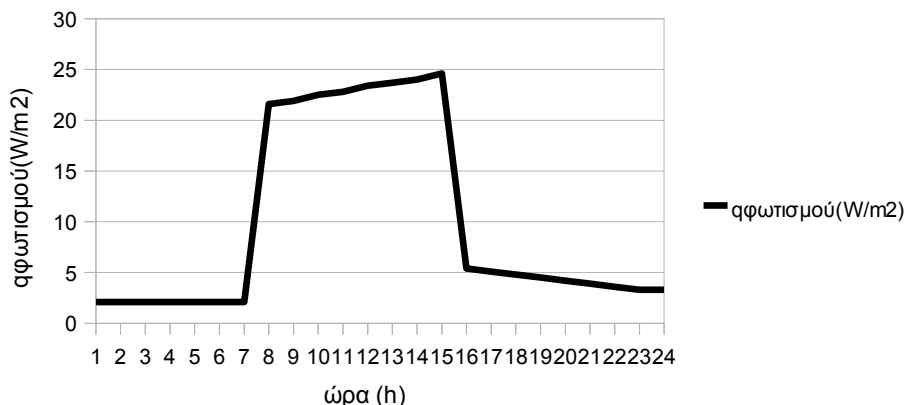
CLF= παράγων ψυκτικού φορτίου. Λαμβάνεται από πίνακα αφού πρώτα καθορισθούν οι τιμές των παραμέτρων a και b από τους αντίστοιχους πίνακες. Αν η κλιματιστική εγκατάσταση λειτουργεί μόνο κατά τις ώρες λειτουργίας του κτηρίου, πρέπει να ληφθεί CLF=1. Αν ο φωτισμός λειτουργεί επί 24ώρου βάσης, τότε CLF=1.

αφωτισμού

Θεωρούμε ότι η ηλεκτρική ισχύς όλων των εγκατεστημένων φωτιστικών στον χώρο είναι $P=2500W$, $f_u=1$, $f_s=1,2$ (έχουμε λάμπες φθορισμού), $a=0,65$, $b=C$ και τέλος θεωρούμε ότι ο φωτισμός λειτουργεί για 8 ώρες από τις 07:00 έως τις 15:00

Πίνακας 10.11.1: Τιμές του ψυκτικού φορτίου φωτισμού καθώς τιμές των συντελεστών της εξίσωσης του.

time	HG=P*f _u *f _s	CLF	αφωτισμού(W)	αφωτισμού(W/m ²)
1	3000	0,07	210	2,1
2	3000	0,07	210	2,1
3	3000	0,07	210	2,1
4	3000	0,07	210	2,1
5	3000	0,07	210	2,1
6	3000	0,07	210	2,1
7	3000	0,07	210	2,1
8	3000	0,72	2160	21,6
9	3000	0,73	2190	21,9
10	3000	0,75	2250	22,5
11	3000	0,76	2280	22,8
12	3000	0,78	2340	23,4
13	3000	0,79	2370	23,7
14	3000	0,8	2400	24
15	3000	0,82	2460	24,6
16	3000	0,18	540	5,4
17	3000	0,17	510	5,1
18	3000	0,16	480	4,8
19	3000	0,15	450	4,5
20	3000	0,14	420	4,2
21	3000	0,13	390	3,9
22	3000	0,12	360	3,6
23	3000	0,11	330	3,3
24	3000	0,11	330	3,3



Εικόνα 10.11.1: Κατανομή του ψυκτικού φορτίου φωτισμού κατά την διάρκεια μίας μέρας.

10.12 Υπολογισμός ψυκτικού φορτίου από ανθρώπους

Ο ρυθμός με τον οποίο το ανθρώπινο σώμα αποδίδει θερμότητα και υγρασία, εξαρτάται από τον βαθμό δραστηριότητας (είδος εργασίας), το είδος της ενδυμασίας και τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται το αισθητό και το λανθάνον θερμικό κέρδος ανά άτομο, για διάφορες συνήθειες περιπτώσεις.

Το λανθάνον θερμικό κέρδος θεωρείται ως στιγμιαίο ψυκτικό φορτίο. Αντίθετα το αισθητό θερμικό κέρδος δεν μετατρέπεται ολόκληρο, αμέσως σε ψυκτικό φορτίο διότι το μεγαλύτερο μέρος αυτού (σχεδόν το 70%) που αποδίδεται υπό μορφή ακτινοβολίας, απορροφάται πρώτα από το περίβλημα του χώρου και μεταφέρεται διά συναγωγής στον χώρο ύστερα από κάποιο χρονικό διάστημα. Συνεπώς για την μετατροπή του αισθητού θερμικού κέρδους σε ψυκτικό φορτίο, γίνεται χρήση του παράγοντος ψυκτικού φορτίου, όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το λανθάνον και το αισθητό ψυκτικό φορτίο υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$q_l = N * (HG)l \quad (10.12.1)$$

$$q_s = N * (HG)s * (CLF) \quad (10.12.2)$$

όπου q_l , q_s = λανθάνον και αισθητό ψυκτικό φορτίο, αντιστοίχως, W
 $(HG)l$, $(HG)s$ = λανθάνον και αισθητό θερμικό κέρδος, αντιστοίχως, ανά άτομο, W. Λαμβάνεται από πίνακες ανάλογα με τον βαθμό δραστηριότητας.

N = πλήθος ατόμων στον χώρο

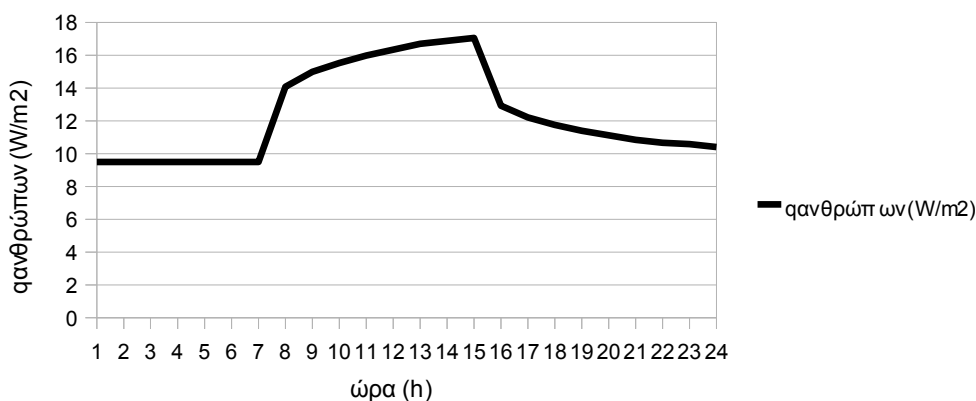
CLF = παράγων ψυκτικού φορτίου. Αν η ψυκτική εγκατάσταση δεν λειτουργεί επί 24ώρου βάσης (π.χ. Νυχτερινή διακοπή), τότε λαμβάνεται $CLF = 1$ σε περιπτώσεις χώρων με μεγάλη πυκνότητα ατόμων (π.χ. Θέατρα).

qανθρώπων

Θεωρούμε ότι μέσα στην τράπεζα βρίσκονται 10 άτομα. Για τις τιμές (HG)l , (HG)s λαμβάνουμε ότι τα άτομα "standing ,light work or walking slowly".

Πίνακας 10.12.1: Τιμές του ψυκτικού φορτίου από τους ανθρώπους. Δίνονται ακόμα οι τιμές των συντελεστών της εξίσωσης του ψυκτικού αυτού φορτίου.

time	ώρες από είσ.	Ανθρώπ.	CLF	(HG)l	(HG)s	qi=N*(HG)l	qs=N*(HG)s*(CLF)	qtotal=qs+qi	Qανθρώπ.(W/m2)
1	0	0	0	95	90	950	0	950	9,5
2	0	0	0	95	90	950	0	950	9,5
3	0	0	0	95	90	950	0	950	9,5
4	0	0	0	95	90	950	0	950	9,5
5	0	0	0	95	90	950	0	950	9,5
6	0	0	0	95	90	950	0	950	9,5
7	0	0	0	95	90	950	0	950	9,5
8	1	0,51	95	90	950	459	1409	14,09	
9	2	0,61	95	90	950	549	1499	14,99	
10	3	0,67	95	90	950	603	1553	15,53	
11	4	0,72	95	90	950	648	1598	15,98	
12	5	0,76	95	90	950	684	1634	16,34	
13	6	0,8	95	90	950	720	1670	16,7	
14	7	0,82	95	90	950	738	1688	16,88	
15	8	0,84	95	90	950	756	1706	17,06	
16	9	0,38	95	90	950	342	1292	12,92	
17	10	0,3	95	90	950	270	1220	12,2	
18	11	0,25	95	90	950	225	1175	11,75	
19	12	0,21	95	90	950	189	1139	11,39	
20	13	0,18	95	90	950	162	1112	11,12	
21	14	0,15	95	90	950	135	1085	10,85	
22	15	0,13	95	90	950	117	1067	10,67	
23	16	0,12	95	90	950	108	1058	10,58	
24	17	0,1	95	90	950	90	1040	10,4	



Εικόνα 10.12.1: Κατανομή του ψυκτικού φορτίου από ανθρώπους κατα την διάρκεια μίας μέρας

10.13 Υπολογισμός ψυκτικού φορτίου λόγω ανανέωσης και διείδυσης αέρος.

10.13.1 Ανανέωση και διείδυση αέρος

Ανανέωση του αέρος χώρου είναι η ηθελημένη προσαγωγή αέρος εξωτερικού περιβάλλοντος στον κλιματιζόμενο χώρο, αμέσως ή μέσω της κλιματιστικής συσκευής, ενώ διείδυση είναι η είσοδος του εξωτερικού αέρα από τα διάκενα θυρών και παραθύρων ή κατά το άνοιγμα των θυρών. Εάν η επικρατούσα υπερπίεση στον κλιματιζόμενο χώρο είναι επαρκής ώστε να αντισταθμίσει την πίεση του εξωτερικού ανέμου στα διάκενα των κουφωμάτων, τότε η διείδυση αέρος μηδενίζεται.

Μέθοδος υπολογισμού της ποσότητας αέρος ποικίλουν, ανάλογα με την περίπτωση. Συνήθεις τιμές ανά άτομο είναι:

2,5 – 3,5 (L/s)/άτομο, για χώρους χωρίς κάπνισμα

12-20(L/s)/άτομο, για χώρους με κάπνισμα

ενώ ακραίες τιμές που συναντώνται σε ειδικές περιπτώσεις είναι:

0,5(L/s)/άτομο, π.χ. Σε υποβρύχιο

6-20 αλλαγές αέρος ανά ώρα, π.χ. Σε αίθουσα χειρουργείου

10.13.2 Υπολογισμός θερμικού κέρδους και ψυκτικού φορτίου

Κατά την πρόσδοση θερμότητας σε ένα χώρο λόγω ανανέωσης ή διείδυσης αέρος, το ψυκτικό φορτίο ταυτίζεται με το θερμικό κέρδος διότι η προσδιδόμενη θερμότης παραλαμβάνεται αμέσως από τον αέρα του χώρου.

Για υπολογισμούς υπό συνήθεις συνθήκες και κανονική ατμοσφαιρική πίεση (101,325kPa, υψόμετρο 0) γίνεται χρήση των παρακάτω προσεγγιστικών σχέσεων:

$$q_s = 1,23 * Q * (\Delta t) \quad (10.13.2.1)$$

$$q_l = 3010 * Q * (\Delta W) \quad (10.13.2.2)$$

όπου q_s , q_l = αισθητό, λανθάνον ψυκτικό φορτίο, W

Q = παροχή εξωτερικού αέρος, L/s

Δt = διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισερχόμενου και εξερχόμενου αέρος, °C

ΔW = διαφορά λόγου υγρασίας μεταξύ του εισερχόμενου και του εξερχόμενου αέρος, kg υγρασίας / kg ξ.α.

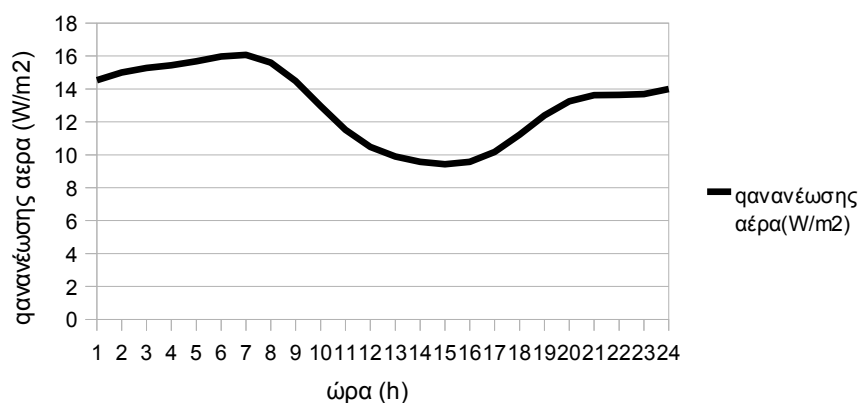
Οι παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ψυκτικού φορτίου λόγω διείδυσης εξωτερικού αέρος καθώς επίσης και λόγω ανανέωσης, υπό τον όρο ότι ο εξωτερικός αέρας προσάγεται κατ'ευθείαν στον χώρο. Αν η προσαγωγή γίνεται μέσω της κλιματιστικής συσκευής, τότε το φορτίο λαμβάνεται υπόψη σαν φορτίο ψυκτικού στοιχείου.

qανανέωσης αέρα

Θεωρούμε ότι στην τράπεζα βρίσκονται 10 άτομα. Η παροχή του εξωτερικού αέρα είναι $Q = 10 \text{lt/s} \cdot \text{άτομα} = 10 \cdot 10 = 100 \text{lt/s}$. Τέλος η επικρατούσα θερμοκρασία στην τράπεζα είναι $T_{in} = 20^\circ\text{C}$.

Πίνακας 10.13.2.1: Τιμές του ψυκτικού φορτίου από ανανέωση αέρα. Δίνονται οι τιμές των συντελεστών που συνιστούν την εξίσωση του ψυκτικού αυτού φορτίου.

time	To	$\Delta T = T_i - T_o$	$q_s = 1,23 \cdot Q \cdot \Delta T$	$q_l = 3010 \cdot Q \cdot \Delta W$	$q_{total} = q_s + q_l$ (W)	qαναν. αέρα(W/m2)	qαναν. αέρα(W/m2)
1	8,20	11,805	1452,01	0	1452,01	14,52	-14,52
2	7,81	12,189	1499,19	0	1499,19	14,99	-14,99
3	7,59	12,415	1527,04	0	1527,04	15,27	-15,27
4	7,45	12,551	1543,79	0	1543,79	15,44	-15,44
5	7,26	12,739	1566,87	0	1566,87	15,67	-15,67
6	7,02	12,980	1596,55	0	1596,55	15,97	-15,97
7	6,94	13,057	1605,95	0	1605,95	16,06	-16,06
8	7,32	12,684	1560,18	0	1560,18	15,6	-15,6
9	8,23	11,773	1448,04	0	1448,04	14,48	-14,48
10	9,46	10,538	1296,17	0	1296,17	12,96	-12,96
11	10,64	9,362	1151,52	0	1151,52	11,52	-11,52
12	11,48	8,522	1048,17	0	1048,17	10,48	-10,48
13	11,96	8,040	988,93	0	988,93	9,89	-9,89
14	12,22	7,780	956,94	0	956,94	9,57	-9,57
15	12,34	7,663	942,55	0	942,55	9,43	-9,43
16	12,22	7,778	956,74	0	956,74	9,57	-9,57
17	11,73	8,269	1017,13	0	1017,13	10,17	-10,17
18	10,88	9,119	1121,62	0	1121,62	11,22	-11,22
19	9,93	10,068	1238,38	0	1238,38	12,38	-12,38
20	9,23	10,774	1325,17	0	1325,17	13,25	-13,25
21	8,93	11,070	1361,57	0	1361,57	13,62	-13,62
22	8,91	11,089	1363,93	0	1363,93	13,64	-13,64
23	8,87	11,128	1368,69	0	1368,69	13,69	-13,69
24	8,62	11,381	1399,88	0	1399,88	14	-14

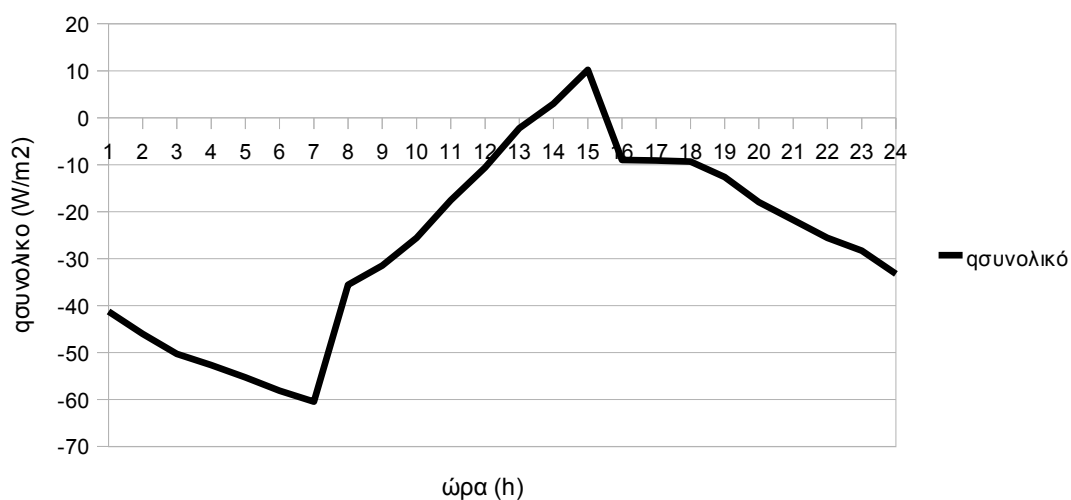


Εικόνα 10.13.2.1: Κατανομή του ψυκτικού φορτίου από ανανέωση αέρα κατά την διάρκεια μίας μέρας.

Τέλος αθροίζοντας όλα τα ψυκτικά φορτία που αναφέρθηκαν προκύπτει η συνολική τιμή του ψυκτικού φορτίου καθώς και το αντίστοιχο διάγραμμα.

Πίνακας 10.13.2.2: Συνοπτικός πίνακας ψυκτικών φορτίων κτιρίου (σε W) κατά την διάρκεια μίας μέρας.

Qτοιχ-βόρ	qροοφ.	qαλοπ.	qφωτισμ.	qαναν.	αέρ. qανθρώπ.	Qτοιχ.-ανατ.	qτοιχ.-νότ.	Qτοιχ.-δυτ.	Qαλοπ.-δυτ.	qσυνολικό
-5,57	-3,9	-11,76	2,1	-14,52	9,5	-4,13	1,29	-2,5	-11,76	-41,27
-5,76	-3,95	-12,87	2,1	-14,99	9,5	-4,44	0,37	-3,14	-12,87	-46,05
-5,95	-3,99	-13,85	2,1	-15,27	9,5	-4,81	-0,46	-3,69	-13,85	-50,28
-6,14	-4,04	-13,96	2,1	-15,44	9,5	-5,26	-1,29	-4,16	-13,96	-52,66
-6,36	-4,1	-14,11	2,1	-15,67	9,5	-5,76	-2,19	-4,58	-14,11	-55,28
-6,59	-4,17	-14,3	2,1	-15,97	9,5	-6,25	-3,16	-4,98	-14,3	-58,13
-6,84	-4,25	-14,37	2,1	-16,06	9,5	-6,64	-4,15	-5,4	-14,37	-60,47
-7,08	-4,33	-13,27	21,6	-15,6	14,09	-6,85	-5,01	-5,85	-13,27	-35,57
-7,29	-4,43	-11,74	21,9	-14,48	14,99	-6,78	-5,58	-6,31	-11,74	-31,46
-7,42	-4,53	-9,95	22,5	-12,96	15,53	-6,42	-5,68	-6,73	-9,95	-25,6
-7,44	-4,62	-7,41	22,8	-11,52	15,98	-5,76	-5,16	-7,02	-7,41	-17,56
-7,34	-4,69	-5,94	23,4	-10,48	16,34	-4,87	-3,99	-7,1	-5,94	-10,62
-7,12	-4,73	-3,95	23,7	-9,89	16,7	-3,86	-2,23	-6,9	-3,95	-2,24
-6,78	-4,74	-3,74	24	-9,57	16,88	-2,87	-0,02	-6,4	-3,74	3,02
-6,37	-4,7	-2,85	24,6	-9,43	17,06	-2,01	2,36	-5,59	-2,85	10,22
-5,93	-4,62	-2,94	5,4	-9,57	12,92	-1,4	4,65	-4,57	-2,94	-9
-5,51	-4,5	-4,14	5,1	-10,17	12,2	-1,08	6,54	-3,43	-4,14	-9,12
-5,16	-4,37	-4,82	4,8	-11,22	11,75	-1,07	7,84	-2,31	-4,82	-9,36
-4,91	-4,23	-6,37	4,5	-12,38	11,39	-1,31	8,43	-1,35	-6,37	-12,62
-4,78	-4,1	-8,54	4,2	-13,25	11,12	-1,74	8,3	-0,66	-8,54	-17,99
-4,76	-4	-9,58	3,9	-13,62	10,85	-2,24	7,57	-0,31	-9,58	-21,76
-4,84	-3,92	-10,39	3,6	-13,64	10,67	-2,75	6,41	-0,31	-10,39	-25,56
-4,99	-3,88	-10,42	3,3	-13,69	10,58	-3,2	5,04	-0,61	-10,42	-28,28
-5,18	-3,86	-11,42	3,3	-14	10,4	-3,56	3,65	-1,14	-11,42	-33,24



Εικόνα 10.13.2.2: Κατανομή του συνολικού ψυκτικού φορτίου κατά την διάρκεια μίας μέρας.

Από τα παραπάνω συνοψίζουμε τα εξής δεδομένα τα οποία θα μας χρειαστούν παρακάτω:

Πίνακας 10.13.2.3

time	qσυνολικό	Gt	to
1	-41,27	0	8,2
2	-46,05	0	7,81
3	-50,28	0	7,59
4	-52,66	0	7,45
5	-55,28	0	7,26
6	-58,13	0	7,02
7	-60,47	0	6,94
8	-35,57	0,02	7,32
9	-31,46	0,11	8,23
10	-25,6	0,2	9,46
11	-17,56	0,26	10,64
12	-10,62	0,31	11,48
13	-2,24	0,3	11,96
14	3,02	0,25	12,22
15	10,22	0,19	12,34
16	-9	0,1	12,22
17	-9,12	0,01	11,73
18	-9,36	0	10,88
19	-12,62	0	9,93
20	-17,99	0	9,23
21	-21,76	0	8,93
22	-25,56	0	8,91
23	-28,28	0	8,87
24	-33,24	0	8,62

Επιπλέον για να είναι η διαδικασία πιο ακριβής θεωρούμε οτι το ρσυνολικό, το Gt και το to ισοκατανέμονται στην διάρκεια μιας ώρας. Με βάση αυτήν την παραδοχή προκύπτουν τα παρακάτω δεδομένα ανα 10λεπτο:

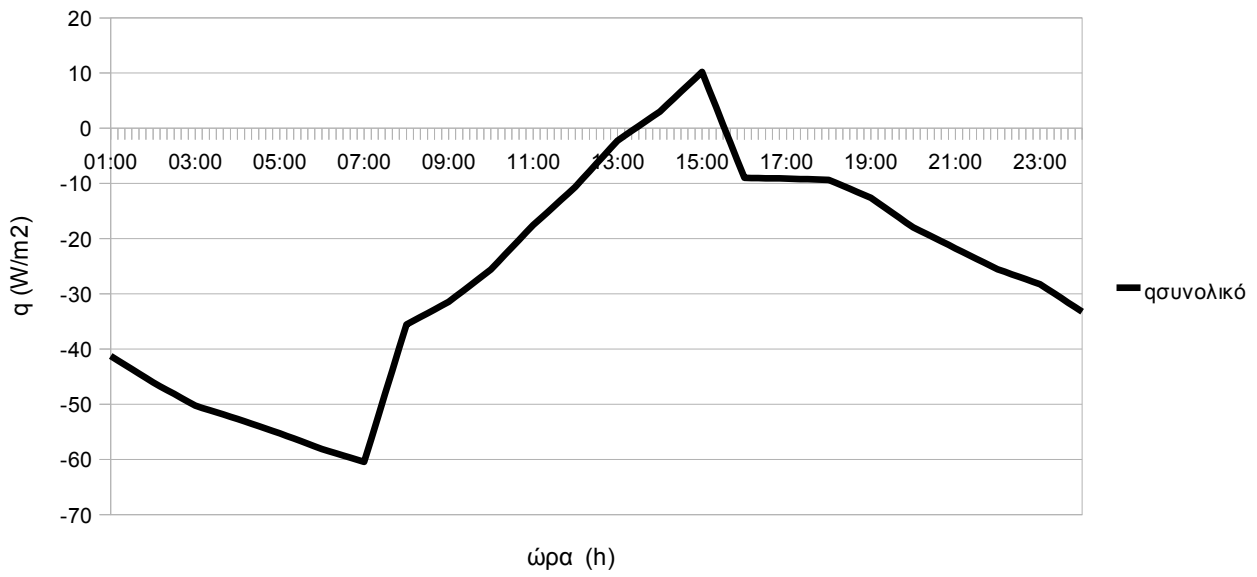
Πίνακας 10.13.2.4

time	ρσυνολικό	Gt	to
01:00:00	-41,27	0	8,2
01:10:00	-42,07	0	8,14
01:20:00	-42,86	0	8,07
01:30:00	-43,66	0	8,01
01:40:00	-44,45	0	7,94
01:50:00	-45,25	0	7,88
02:00:00	-46,05	0	7,81
02:10:00	-46,75	0	7,77
02:20:00	-47,46	0	7,74
02:30:00	-48,16	0	7,7
02:40:00	-48,87	0	7,66
02:50:00	-49,57	0	7,63
03:00:00	-50,28	0	7,59
03:10:00	-50,68	0	7,57
03:20:00	-51,07	0	7,54
03:30:00	-51,47	0	7,52
03:40:00	-51,86	0	7,5
03:50:00	-52,26	0	7,47
04:00:00	-52,66	0	7,45
04:10:00	-53,1	0	7,42
04:20:00	-53,53	0	7,39
04:30:00	-53,97	0	7,36
04:40:00	-54,4	0	7,32
04:50:00	-54,84	0	7,29
05:00:00	-55,28	0	7,26
05:10:00	-55,76	0	7,22
05:20:00	-56,23	0	7,18
05:30:00	-56,71	0	7,14
05:40:00	-57,18	0	7,1
05:50:00	-57,66	0	7,06
06:00:00	-58,13	0	7,02
06:10:00	-58,52	0	7,01
06:20:00	-58,91	0	6,99
06:30:00	-59,3	0	6,98
06:40:00	-59,69	0	6,97
06:50:00	-60,08	0	6,95
07:00:00	-60,47	0,020	6,94
07:10:00	-56,32	0,035	7
07:20:00	-52,17	0,050	7,07
07:30:00	-48,02	0,065	7,13
07:40:00	-43,87	0,080	7,19
07:50:00	-39,72	0,095	7,26
08:00:00	-35,57	0,110	7,32
08:10:00	-34,89	0,125	7,47
08:20:00	-34,2	0,140	7,62
08:30:00	-33,52	0,155	7,77
08:40:00	-32,83	0,170	7,93
08:50:00	-32,15	0,185	8,08

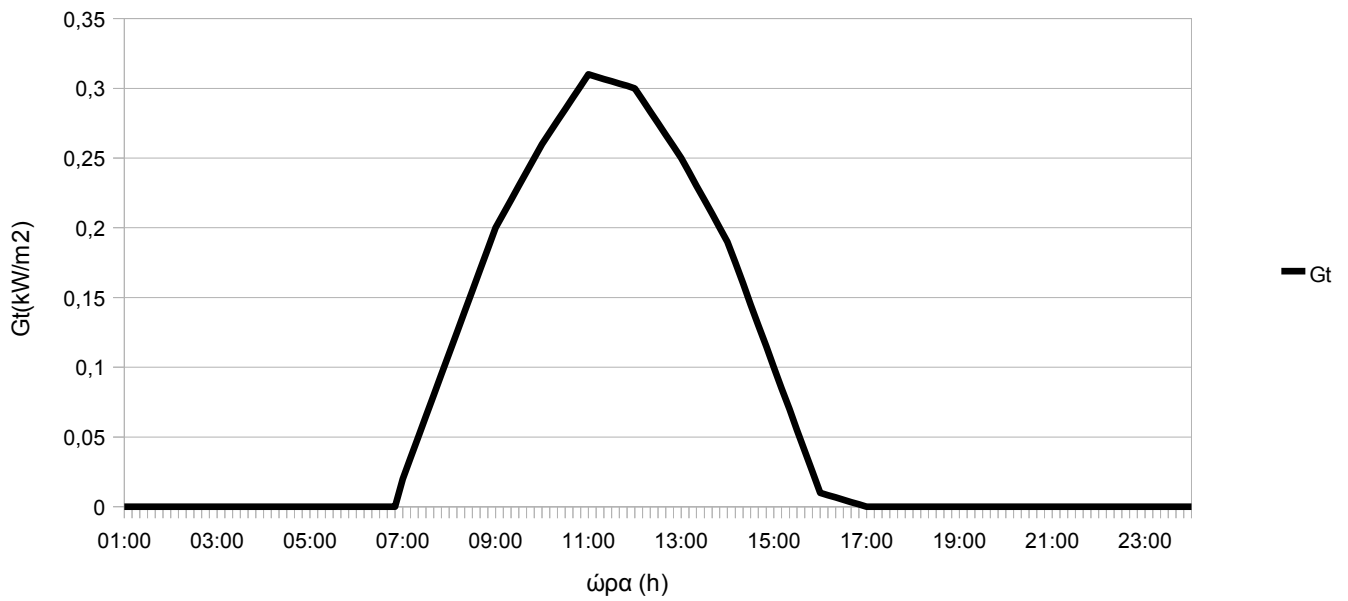
09:00:00	-31,46	0,200	8,23
09:10:00	-30,48	0,210	8,44
09:20:00	-29,51	0,220	8,64
09:30:00	-28,53	0,230	8,85
09:40:00	-27,56	0,240	9,05
09:50:00	-26,58	0,250	9,26
10:00:00	-25,6	0,260	9,46
10:10:00	-24,26	0,268	9,66
10:20:00	-22,92	0,277	9,85
10:30:00	-21,58	0,285	10,05
10:40:00	-20,24	0,293	10,25
10:50:00	-18,9	0,302	10,44
11:00:00	-17,56	0,310	10,64
11:10:00	-16,4	0,308	10,78
11:20:00	-15,25	0,307	10,92
11:30:00	-14,09	0,305	11,06
11:40:00	-12,94	0,303	11,2
11:50:00	-11,78	0,302	11,34
12:00:00	-10,62	0,300	11,48
12:10:00	-9,22	0,292	11,56
12:20:00	-7,83	0,283	11,64
12:30:00	-6,43	0,275	11,72
12:40:00	-5,04	0,267	11,8
12:50:00	-3,64	0,258	11,88
13:00:00	-2,24	0,250	11,96
13:10:00	-1,36	0,240	12
13:20:00	-0,49	0,230	12,05
13:30:00	0,39	0,220	12,09
13:40:00	1,26	0,210	12,13
13:50:00	2,14	0,200	12,18
14:00:00	3,02	0,190	12,22
14:10:00	4,22	0,175	12,24
14:20:00	5,42	0,160	12,26
14:30:00	6,62	0,145	12,28
14:40:00	7,82	0,130	12,3
14:50:00	9,02	0,115	12,32
15:00:00	10,22	0,100	12,34
15:10:00	7,02	0,085	12,32
15:20:00	3,81	0,070	12,3
15:30:00	0,61	0,055	12,28
15:40:00	-2,59	0,040	12,26
15:50:00	-5,8	0,025	12,24
16:00:00	-9	0,010	12,22
16:10:00	-9,02	0,008	12,14
16:20:00	-9,04	0,007	12,06
16:30:00	-9,06	0,005	11,98
16:40:00	-9,08	0,003	11,89
16:50:00	-9,1	0,002	11,81

17:00:00	-9,12	0	11,73
17:10:00	-9,16	0	11,59
17:20:00	-9,2	0	11,45
17:30:00	-9,24	0	11,31
17:40:00	-9,28	0	11,16
17:50:00	-9,32	0	11,02
18:00:00	-9,36	0	10,88
18:10:00	-9,9	0	10,72
18:20:00	-10,45	0	10,56
18:30:00	-10,99	0	10,41
18:40:00	-11,53	0	10,25
18:50:00	-12,08	0	10,09
19:00:00	-12,62	0	9,93
19:10:00	-13,52	0	9,81
19:20:00	-14,41	0	9,7
19:30:00	-15,31	0	9,58
19:40:00	-16,2	0	9,46
19:50:00	-17,1	0	9,35
20:00:00	-17,99	0	9,23
20:10:00	-18,62	0	9,18
20:20:00	-19,25	0	9,13
20:30:00	-19,87	0	9,08
20:40:00	-20,5	0	9,03
20:50:00	-21,13	0	8,98
21:00:00	-21,76	0	8,93
21:10:00	-22,39	0	8,93
21:20:00	-23,03	0	8,92
21:30:00	-23,66	0	8,92
21:40:00	-24,29	0	8,92
21:50:00	-24,93	0	8,91
22:00:00	-25,56	0	8,91
22:10:00	-26,01	0	8,9
22:20:00	-26,47	0	8,9
22:30:00	-26,92	0	8,89
22:40:00	-27,37	0	8,88
22:50:00	-27,83	0	8,88
23:00:00	-28,28	0	8,87
23:10:00	-29,11	0	8,83
23:20:00	-29,93	0	8,79
23:30:00	-30,76	0	8,75
23:40:00	-31,59	0	8,7
23:50:00	-32,41	0	8,66
24:00:00	-33,24	0	8,62

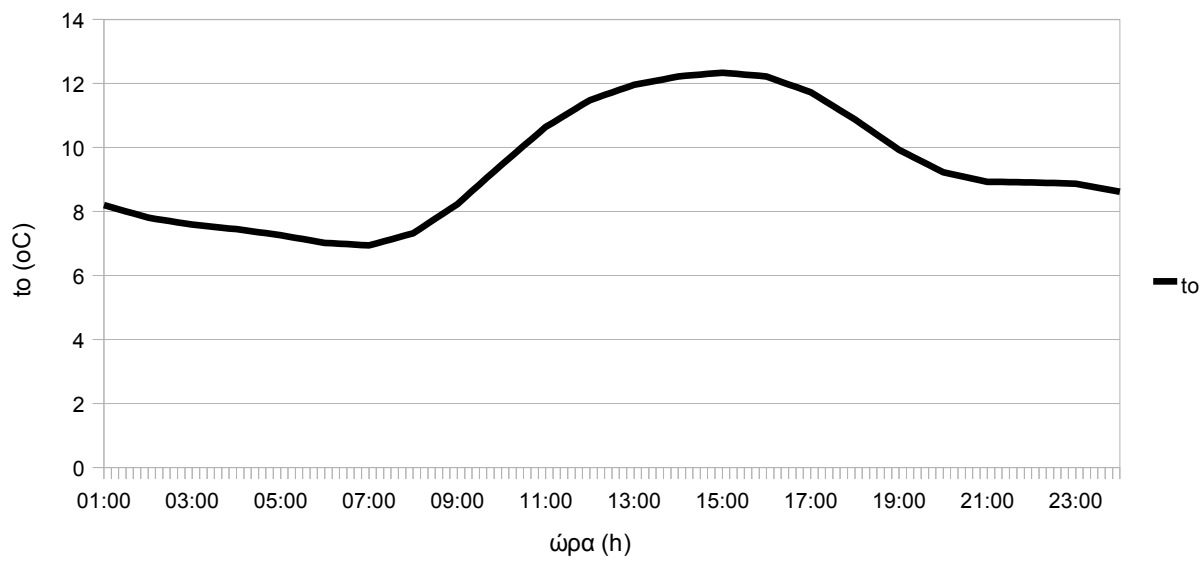
Τα διαγράμματα που προκύπτουν από τους παραπάνω πίνακες είναι:



Εικόνα 10.13.2.1: Κατανομή του συνολικού ψυκτικού φορτίου ανα ώρα



Εικόνα 10.13.2.2: Κατανομή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανα ώρα



Εικόνα 10.13.2.3: Κατανομή της εξωτερικής θερμοκρασίας ανα ώρα

Κεφάλαιο 11

11.1 Εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου στην περίπτωση χρήσης pcm

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως θεωρούμε ότι βρισκόμαστε σε μία τράπεζα δαπέδου $10 \times 10 = 100 \text{m}^2$, ύψος 3m και συνολική επιφάνεια υαλοπινάκων 30m^2 στον νότιο και δυτικό τοίχο. Το κτίριο βρίσκεται στην περιοχή της Αθήνας με γεωγραφικό πλάτος $\varphi = \beta = 38^\circ$ και νότιο προσανατολισμό $\gamma = 0^\circ$. Στην οροφή του συγκεκριμένου κτιρίου είναι τοποθετημένοι ηλιακοί συλλέκτες συνολικού εμβαδού 30m^2 και κλίσης 60° με στόχο την θέρμανση νερού, το οποίο ρέει κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας σε σωλήνες εγκατεστημένους μέσα σε ενδοδαπέδιο στρώμα pcm. Συνεπώς το στρώμα αυτό απορροφά θερμότητα και μεταπίπτει στην υγρή φάση. Κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας διακόπτεται η παροχή του νερού με αποτέλεσμα την στερεοποίηση του pcm λόγω απόδοσης θερμότητας στον προς θέρμανση χώρο. Προκειμένου να μην υπάρξει πρόβλημα στην τοποθέτηση των ηλιακών συλλεκτων, δεδομένου ότι επιθυμούμε να μην αλληλοεπισκιάζονται, τοποθετείται στην οροφή του κτιρίου μία προσθήκη(υπόστεγο). Με αυτήν την εφαρμογή δεν πραγματοποιείται 100% κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου, αλλά ένα μεγάλο ποσοστό. Για τον λόγο αυτό παράλληλα χρησιμοποιούνται και άλλα συμπληρωματικά μέσα, όπως καλοριφέρ και κλιματιστικά. Η μελέτη θα πραγματοποιηθεί την 21^η ημέρα για τον μήνα Ιανουάριο.

Στο πρώτο excel υπολογίζουμε την θερμοκρασία T1 θεωρώντας αρχική τιμή $T = 20^\circ\text{C}$. Υπολογίζουμε τη θερμότητα που προσδίδει στο δωμάτιο το pcm σε (W/m^2) από τον τύπο:

$$q_r = \left(\frac{1}{(1/h) + (d/k)} \right) * (T_1 - 20) \quad (11.1.1)$$

όπου $h = 8 \text{W}/\text{m}^2$

$d = 0,03 \text{m}$

$k = 0,6 \text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$

Έπειτα με βάση τους παρακάτω τύπους υπολογίζεται κάθε φορά για την αντίστοιχη θερμοκρασία το C_{peff}.

$C_p = 5000 \text{J}/\text{Kg}^\circ\text{C}$

$C_p = (480000/36) * (T - 20) + 50000$

$C_p = (-480000/36) * (T - 23) + 45000$

$C_p = 5000 \text{J}/\text{Kg}^\circ\text{C}$

για $T \leq 20^\circ\text{C}$

για $20^\circ\text{C} \leq T \leq 23^\circ\text{C}$

για $23^\circ\text{C} \leq T \leq 26^\circ\text{C}$

για $T \geq 26^\circ\text{C}$

(11.1.2)

Τέλος υπολογίζονται ξεχωριστά οι όροι $(A_c/A_{\delta\alpha\pi}) * F_R * G_\tau * \tau_a$, q_r , $(m_{\text{pcm}} * C_{p\text{eff}} / (\Delta t * A))$ και $(A_c/A_{\delta\alpha\pi}) * F_R * U_L / (\Delta t * A)$. Όλοι οι υπολογισμοί γίνονται συναρτήσει της ώρας. Ακόμα παρατιθενται οι τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας G_t.

Πίνακας 11.1.1

time	αρχική Τ	$q_R=(1/(1/h+0,02/k))*(t-20)$	Gt(W/m2)	Cpeff	$(Ac/A\delta a\pi)*Fr*Gt*\tau a-q_R$	$(m\pi cm*Cpeff)/(\Delta t*A)+(Ac/A\delta a\pi)*Fr*U_L$
01:00:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
01:10:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
01:20:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
01:30:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
01:40:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
01:50:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
02:00:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
02:10:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
02:20:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
02:30:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
02:40:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
02:50:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
03:00:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
03:10:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
03:20:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
03:30:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
03:40:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
03:50:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
04:00:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
04:10:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
04:20:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
04:30:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
04:40:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
04:50:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
05:00:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
05:10:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
05:20:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
05:30:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
05:40:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
05:50:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
06:00:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
06:10:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
06:20:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
06:30:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
06:40:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
06:50:00	20	0	0	5000	0,000	254,88
07:00:00	20	0	20,000	5000	4,335	254,88
07:10:00	20,01	0,07	35,000	5139,67	7,512	261,99
07:20:00	20,03	0,23	50,000	5437,58	10,606	277,17
07:30:00	20,07	0,46	65,000	5868,25	13,629	299,11
07:40:00	20,11	0,74	80,000	6402,26	16,598	326,32
07:50:00	20,15	1,07	95,000	7013,16	19,525	357,45
08:00:00	20,2	1,42	110,000	7680,17	22,424	391,43
08:10:00	20,25	1,79	125,000	8388,04	25,300	427,5
08:20:00	20,31	2,18	140,000	9126,3	28,160	465,11
08:30:00	20,37	2,59	155,000	9887,2	31,009	503,88
08:40:00	20,42	3	170,000	10665,26	33,848	543,52
08:50:00	20,48	3,42	185,000	11456,51	36,681	583,84

09:00:00	20,54	3,84	200,000	12258,08	39,507	624,68
09:10:00	20,61	4,27	210,000	13067,83	41,246	665,93
09:20:00	20,66	4,69	220,000	13862,59	42,993	706,43
09:30:00	20,72	5,11	230,000	14645,12	44,746	746,3
09:40:00	20,78	5,52	240,000	15417,5	46,505	785,65
09:50:00	20,84	5,92	250,000	16181,35	48,268	824,57
10:00:00	20,9	6,32	260,000	16937,97	50,035	863,12
10:10:00	20,95	6,72	268,000	17688,38	51,372	901,35
10:20:00	21,01	7,11	277,000	18427	52,931	938,98
10:30:00	21,06	7,5	285,000	19158,42	54,278	976,25
10:40:00	21,12	7,88	293,000	19880,56	55,630	1013,04
10:50:00	21,17	8,26	302,000	20594,5	57,203	1049,42
11:00:00	21,22	8,63	310,000	21303,91	58,561	1085,56
11:10:00	21,28	9	308,000	22006,61	57,756	1121,36
11:20:00	21,33	9,36	307,000	22677,42	57,184	1155,54
11:30:00	21,37	9,7	305,000	23321,93	56,409	1188,38
11:40:00	21,42	10,03	303,000	23940,07	55,648	1219,87
11:50:00	21,47	10,34	302,000	24534,07	55,117	1250,14
12:00:00	21,51	10,65	300,000	25108,15	54,380	1279,39
12:10:00	21,55	10,94	292,000	25661,55	52,353	1307,58
12:20:00	21,59	11,21	283,000	26182,4	50,126	1334,12
12:30:00	21,63	11,47	275,000	26670,68	48,134	1359
12:40:00	21,66	11,72	267,000	27130,54	46,156	1382,43
12:50:00	21,69	11,95	258,000	27563,58	43,976	1404,49
13:00:00	21,72	12,16	250,000	27969,19	42,027	1425,16
13:10:00	21,75	12,36	240,000	28350,73	39,658	1444,6
13:20:00	21,78	12,55	230,000	28705,3	37,303	1462,66
13:30:00	21,8	12,72	220,000	29034,03	34,961	1479,41
13:40:00	21,83	12,88	210,000	29337,96	32,633	1494,9
13:50:00	21,85	13,03	200,000	29618	30,317	1509,16
14:00:00	21,87	13,17	190,000	29874,95	28,013	1522,26
14:10:00	21,88	13,29	175,000	30109,55	24,638	1534,21
14:20:00	21,9	13,4	160,000	30312,98	21,279	1544,57
14:30:00	21,91	13,49	145,000	30486,06	17,936	1553,39
14:40:00	21,92	13,57	130,000	30629,47	14,609	1560,7
14:50:00	21,93	13,63	115,000	30743,8	11,297	1566,52
15:00:00	21,94	13,67	100,000	30829,53	8,001	1570,89
15:10:00	21,94	13,7	85,000	30887,05	4,719	1573,82
15:20:00	21,94	13,72	70,000	30916,63	1,452	1575,33
15:30:00	21,94	13,72	55,000	30918,51	-1,800	1575,43
15:40:00	21,94	13,71	40,000	30892,85	-5,038	1574,12
15:50:00	21,94	13,68	25,000	30839,72	-8,261	1571,41
16:00:00	21,93	13,64	10,000	30759,13	-11,470	1567,31
16:10:00	21,92	13,58	8,000	30651,02	-11,846	1561,8
16:20:00	21,92	13,52	7,000	30539,24	-12,004	1556,1
16:30:00	21,91	13,46	5,000	30425,62	-12,377	1550,31
16:40:00	21,9	13,4	3,000	30308,28	-12,748	1544,33
16:50:00	21,89	13,33	2,000	30187,2	-12,901	1538,17

17:00:00	21,88	13,27	0	30064,24	-13,269	1531,9
17:10:00	21,87	13,2	0	29937,48	-13,202	1525,44
17:20:00	21,86	13,14	0	29810,63	-13,135	1518,98
17:30:00	21,85	13,07	0	29683,67	-13,068	1512,51
17:40:00	21,84	13	0	29556,62	-13,001	1506,04
17:50:00	21,83	12,93	0	29429,47	-12,933	1499,56
18:00:00	21,82	12,87	0	29302,22	-12,866	1493,08
18:10:00	21,81	12,8	0	29174,87	-12,798	1486,59
18:20:00	21,8	12,73	0	29047,39	-12,731	1480,09
18:30:00	21,79	12,66	0	28919,8	-12,663	1473,59
18:40:00	21,78	12,6	0	28792,08	-12,596	1467,08
18:50:00	21,77	12,53	0	28664,23	-12,528	1460,57
19:00:00	21,77	12,46	0	28536,26	-12,460	1454,05
19:10:00	21,76	12,39	0	28408,17	-12,393	1447,52
19:20:00	21,75	12,32	0	28279,99	-12,325	1440,99
19:30:00	21,74	12,26	0	28151,74	-12,257	1434,46
19:40:00	21,73	12,19	0	28023,4	-12,189	1427,92
19:50:00	21,72	12,12	0	27894,99	-12,121	1421,38
20:00:00	21,71	12,05	0	27766,49	-12,053	1414,83
20:10:00	21,7	11,98	0	27637,92	-11,985	1408,28
20:20:00	21,69	11,92	0	27509,33	-11,917	1401,73
20:30:00	21,68	11,85	0	27380,75	-11,849	1395,18
20:40:00	21,67	11,78	0	27252,17	-11,781	1388,63
20:50:00	21,66	11,71	0	27123,58	-11,712	1382,07
21:00:00	21,65	11,64	0	26994,99	-11,644	1375,52
21:10:00	21,64	11,58	0	26866,4	-11,576	1368,97
21:20:00	21,63	11,51	0	26737,86	-11,508	1362,42
21:30:00	21,62	11,44	0	26609,38	-11,440	1355,88
21:40:00	21,61	11,37	0	26480,95	-11,372	1349,33
21:50:00	21,6	11,3	0	26352,58	-11,304	1342,79
22:00:00	21,59	11,24	0	26224,27	-11,236	1336,25
22:10:00	21,58	11,17	0	26096,02	-11,168	1329,72
22:20:00	21,57	11,1	0	25967,82	-11,101	1323,19
22:30:00	21,56	11,03	0	25839,68	-11,033	1316,66
22:40:00	21,55	10,96	0	25711,59	-10,965	1310,13
22:50:00	21,54	10,9	0	25583,56	-10,897	1303,61
23:00:00	21,53	10,83	0	25455,59	-10,829	1297,09
23:10:00	21,52	10,76	0	25327,67	-10,762	1290,57
23:20:00	21,51	10,69	0	25199,76	-10,694	1284,06
23:30:00	21,51	10,63	0	25071,87	-10,626	1277,54
23:40:00	21,5	10,56	0	24943,98	-10,559	1271,02
23:50:00	21,49	10,49	0	24816,11	-10,491	1264,51
24:00:00	21,48	10,42	0	24688,25	-10,423	1257,99

Στο δεύτερο excel υπολογίζονται οι όροι $(A_c/A_{\delta\alpha\pi}) \cdot F_R \cdot U_L \cdot T_a$,
 και $(m_{pcm} \cdot C_{peff} \cdot T_1 / \Delta t \cdot A)$. Από τον παρακάτω τύπο υπολογίζεται η T_2 :

$$T_2 = \left(\frac{(A_c/A_{\delta\alpha\pi}) \cdot F_R \cdot G\tau \cdot \tau\alpha + (A_c/A_{\delta\alpha\pi}) \cdot F_R \cdot U_L \cdot T_a +}{((m_{pcm} \cdot C_{peff} + (A_c/A_{\delta\alpha\pi}) \cdot F_R \cdot U_L) / (\Delta t \cdot A))} + \frac{(m_{pcm} \cdot C_{peff} \cdot T_1 / \Delta t \cdot A) - q_r}{((m_{pcm} \cdot C_{peff} + (A_c/A_{\delta\alpha\pi}) \cdot F_R \cdot U_L) / (\Delta t \cdot A))} \right) \quad (11.1.3)$$

όπου $A_c = 30m^2$
 $A_{\delta\alpha\pi} = 100m^2$
 $F_R = 0,85$
 $\tau\alpha = 0,85$
 $\rho = 1019kg/m^3$
 $m = 10 \cdot 10 \cdot 0,03 \cdot 1019 = 3057kg$
 $\Delta t = 600sec$

Ο όρος b είναι το άθροισμα των όρων του αριθμητή. Δηλαδή:

$$b = (A_c/A_{\delta\alpha\pi}) \cdot F_R \cdot G\tau \cdot \tau\alpha + (A_c/A_{\delta\alpha\pi}) \cdot F_R \cdot U_L \cdot T_a + (m_{pcm} \cdot C_{peff} \cdot T_1 / \Delta t \cdot A) - q_r \quad (11.1.4)$$

Επειτα υπολογίζεται το Q_u (W) και εν συνεχεία το q_s (W/m²) και το q_{pcm} (W/m²) από τους τύπους :

$$Q_u = m \cdot C_p \cdot (T_{εξόδου} - T_{εισόδου}) \quad (11.1.5)$$

$$q_s = Q_u / A \quad (11.1.6)$$

$$q_{pcm} = q_s - q_r \quad (11.1.7)$$

όπου λαμβάνουμε ως $m = 0,02kg/s$ και
 $C_p = 835J/Kg \cdot ^\circ C$

Συγκρίνοντας τις τιμές του q που υπολογίσαμε στην αρχή της διαδικασίας, που είναι στην πραγματικότητα οι απώλειες του δωματίου και τις τιμές του q_r που είναι η θερμότητα που προσδίδει το pcm στο δωμάτιο , προσδιορίζουμε το συμπληρωμα που πρέπει να δίνουμε ώστε η θερμοκρασία του δωματίου να μην πέσει κάτω από 20 °C.

Ακόμα γίνεται έλεγχος αν η θερμοκρασία T_2 που προέκυψε παραπάνω είναι μεγαλύτερη από την T_1 που είχαμε υποθέσει αρχικά. Στην περίπτωση που είναι μικρότερη τότε ο κυκλοφορητής διακόπτεται και το q_s το λαμβάνουμε ίσο με το μηδέν.

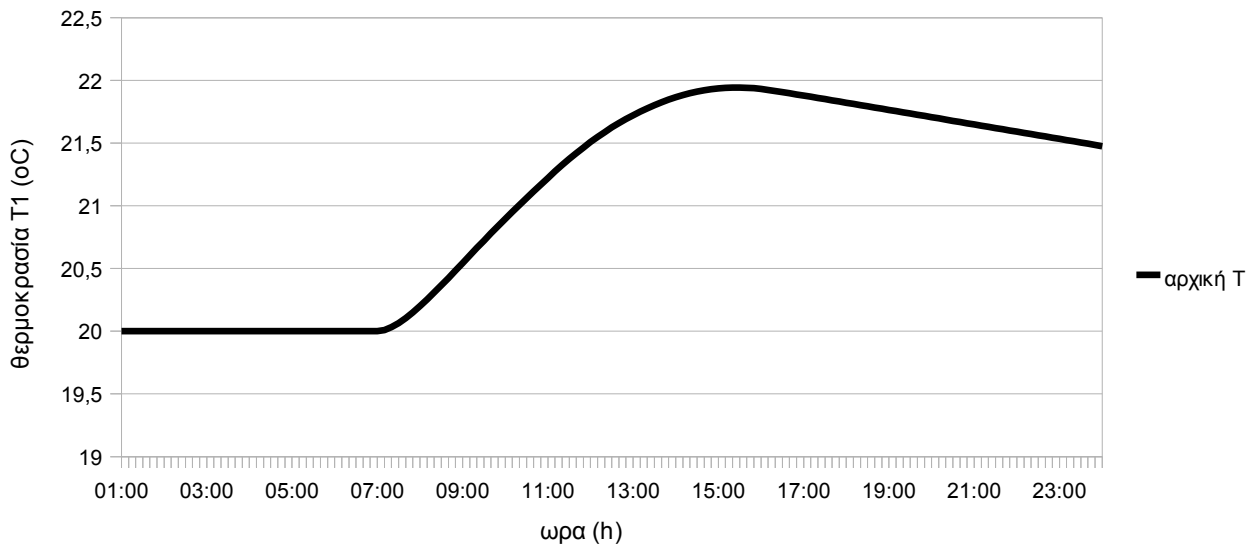
Πίνακας 11.1.2

time	(Ac/Aδaπ)*Fr*UL*Ta	to	(mpcm*Cpeff*T1)/(Δt*A)	b	T2	Qu	qs	qrcm	qαπώλ	συμπλ
01:00:00	1,05	8,2	5095	5096,05	20	0	0	0	-41,27	41,27
01:10:00	1,04	8,14	5095	5096,04	20	0	0	0	-42,07	42,07
01:20:00	1,03	8,07	5095	5096,03	20	0	0	0	-42,86	42,86
01:30:00	1,02	8,01	5095	5096,02	20	0	0	0	-43,66	43,66
01:40:00	1,01	7,94	5095	5096,01	20	0	0	0	-44,45	44,45
01:50:00	1	7,88	5095	5096	20	0	0	0	-45,25	45,25
02:00:00	1	7,81	5095	5096	20	0	0	0	-46,05	46,05
02:10:00	0,99	7,77	5095	5095,99	20	0	0	0	-46,75	46,75
02:20:00	0,99	7,74	5095	5095,99	20	0	0	0	-47,46	47,46
02:30:00	0,98	7,7	5095	5095,98	20	0	0	0	-48,16	48,16
02:40:00	0,98	7,66	5095	5095,98	20	0	0	0	-48,87	48,87
02:50:00	0,97	7,63	5095	5095,97	20	0	0	0	-49,57	49,57
03:00:00	0,97	7,59	5095	5095,97	20	0	0	0	-50,28	50,28
03:10:00	0,96	7,57	5095	5095,96	20	0	0	0	-50,68	50,68
03:20:00	0,96	7,54	5095	5095,96	20	0	0	0	-51,07	51,07
03:30:00	0,96	7,52	5095	5095,96	20	0	0	0	-51,47	51,47
03:40:00	0,96	7,5	5095	5095,96	20	0	0	0	-51,86	51,86
03:50:00	0,95	7,47	5095	5095,95	20	0	0	0	-52,26	52,26
04:00:00	0,95	7,45	5095	5095,95	20	0	0	0	-52,66	52,66
04:10:00	0,95	7,42	5095	5095,95	20	0	0	0	-53,1	53,1
04:20:00	0,94	7,39	5095	5095,94	20	0	0	0	-53,53	53,53
04:30:00	0,94	7,36	5095	5095,94	20	0	0	0	-53,97	53,97
04:40:00	0,93	7,32	5095	5095,93	20	0	0	0	-54,4	54,4
04:50:00	0,93	7,29	5095	5095,93	20	0	0	0	-54,84	54,84
05:00:00	0,93	7,26	5095	5095,93	20	0	0	0	-55,28	55,28
05:10:00	0,92	7,22	5095	5095,92	20	0	0	0	-55,76	55,76
05:20:00	0,92	7,18	5095	5095,92	20	0	0	0	-56,23	56,23
05:30:00	0,91	7,14	5095	5095,91	20	0	0	0	-56,71	56,71
05:40:00	0,91	7,1	5095	5095,91	20	0	0	0	-57,18	57,18
05:50:00	0,9	7,06	5095	5095,9	20	0	0	0	-57,66	57,66
06:00:00	0,9	7,02	5095	5095,9	20	0	0	0	-58,13	58,13
06:10:00	0,89	7,01	5095	5095,89	20	0	0	0	-58,52	58,52
06:20:00	0,89	6,99	5095	5095,89	20	0	0	0	-58,91	58,91
06:30:00	0,89	6,98	5095	5095,89	20	0	0	0	-59,3	59,3
06:40:00	0,89	6,97	5095	5095,89	20	0	0	0	-59,69	59,69
06:50:00	0,89	6,95	5095	5095,89	20	0	0	0	-60,08	60,08
07:00:00	0,88	6,94	5095	5100,22	20,01	0,17	0	0	-60,47	60,47
07:10:00	0,89	7	5240,06	5248,47	20,03	0,37	0	0,07	-56,32	56,25
07:20:00	0,9	7,07	5549,99	5561,5	20,07	0,54	0,01	0,23	-52,17	51,94
07:30:00	0,91	7,13	5999,21	6013,75	20,11	0,67	0,01	0,45	-48,02	47,56
07:40:00	0,92	7,19	6558,21	6575,73	20,15	0,77	0,01	0,73	-43,87	43,13
07:50:00	0,93	7,26	7200,37	7220,82	20,2	0,84	0,01	1,06	-39,72	38,65
08:00:00	0,93	7,32	7904,75	7928,1	20,25	0,89	0,01	1,41	-35,57	34,15
08:10:00	0,95	7,47	8656,01	8682,26	20,31	0,92	0,01	1,78	-34,89	33,09
08:20:00	0,97	7,62	9443,6	9472,73	20,37	0,95	0,01	2,17	-34,2	32,02
08:30:00	0,99	7,77	10259,71	10291,71	20,42	0,97	0,01	2,58	-33,52	30,93
08:40:00	1,01	7,93	11098,78	11133,64	20,48	0,99	0,01	2,99	-32,83	29,83
08:50:00	1,03	8,08	11956,84	11994,55	20,54	1	0,01	3,41	-32,15	28,73

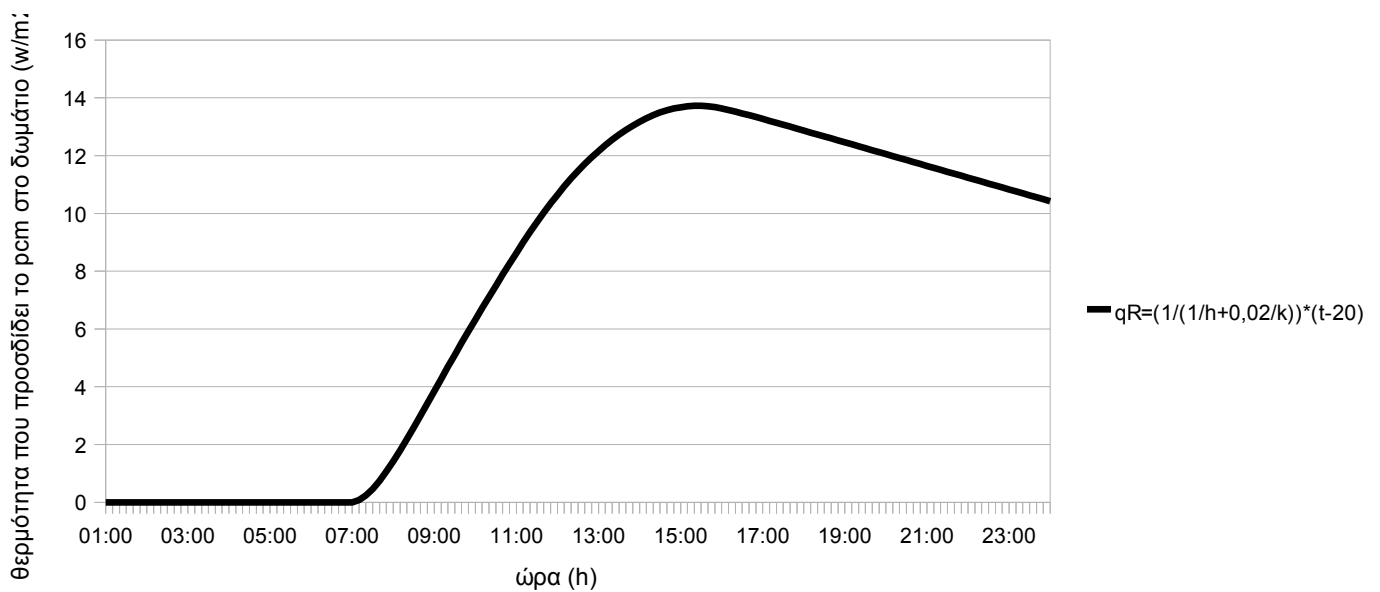
09:00:00	1,05	8,23	12830,96	12871,51	20,61	1,01	0,01	3,83	-31,46	27,62
09:10:00	1,08	8,44	13718,99	13761,31	20,66	1	0,01	4,26	-30,48	26,21
09:20:00	1,1	8,64	14595,46	14639,55	20,72	0,98	0,01	4,68	-29,51	24,82
09:30:00	1,13	8,85	15463,15	15509,02	20,78	0,97	0,01	5,1	-28,53	23,43
09:40:00	1,15	9,05	16324,17	16371,83	20,84	0,96	0,01	5,51	-27,56	22,04
09:50:00	1,18	9,26	17180,18	17229,63	20,9	0,95	0,01	5,91	-26,58	20,66
10:00:00	1,21	9,46	18032,47	18083,71	20,95	0,94	0,01	6,31	-25,6	19,28
10:10:00	1,23	9,66	18882,09	18934,69	21,01	0,93	0,01	6,71	-24,26	17,54
10:20:00	1,26	9,85	19722,56	19776,75	21,06	0,92	0,01	7,1	-22,92	15,81
10:30:00	1,28	10,05	20558,95	20614,51	21,12	0,9	0,01	7,49	-21,58	14,08
10:40:00	1,31	10,25	21388,74	21445,68	21,17	0,89	0,01	7,87	-20,24	12,36
10:50:00	1,33	10,44	22213,03	22271,56	21,22	0,89	0,01	8,25	-18,9	10,64
11:00:00	1,36	10,64	23035,94	23095,86	21,28	0,88	0,01	8,62	-17,56	8,93
11:10:00	1,37	10,78	23854,86	23913,99	21,33	0,84	0,01	9	-16,4	7,4
11:20:00	1,39	10,92	24640,15	24698,73	21,37	0,81	0,01	9,35	-15,25	5,89
11:30:00	1,41	11,06	25397,88	25455,7	21,42	0,77	0,01	9,69	-14,09	4,39
11:40:00	1,43	11,2	26127,59	26184,67	21,47	0,74	0,01	10,02	-12,94	2,91
11:50:00	1,45	11,34	26831,55	26888,11	21,51	0,72	0,01	10,33	-11,78	1,44
12:00:00	1,46	11,48	27514,47	27570,31	21,55	0,69	0,01	10,64	-10,62	-0,03
12:10:00	1,47	11,56	28175,17	28229	21,59	0,65	0,01	10,93	-9,22	-1,71
12:20:00	1,48	11,64	28799,15	28850,76	21,63	0,61	0,01	11,21	-7,83	-3,39
12:30:00	1,49	11,72	29386	29435,63	21,66	0,58	0,01	11,47	-6,43	-5,04
12:40:00	1,5	11,8	29940,35	29988,01	21,69	0,54	0,01	11,71	-5,04	-6,68
12:50:00	1,51	11,88	30463,85	30509,34	21,72	0,51	0,01	11,94	-3,64	-8,31
13:00:00	1,52	11,96	30955,48	30999,04	21,75	0,48	0	12,16	-2,24	-9,92
13:10:00	1,53	12	31419,11	31460,29	21,78	0,44	0	12,36	-1,36	-11
13:20:00	1,54	12,05	31850,93	31889,77	21,8	0,41	0	12,55	-0,49	-12,06
13:30:00	1,54	12,09	32252,16	32288,67	21,83	0,38	0	12,72	0,39	-13,11
13:40:00	1,55	12,13	32623,85	32658,03	21,85	0,35	0	12,88	1,26	-14,15
13:50:00	1,55	12,18	32966,95	32998,82	21,87	0,32	0	13,03	2,14	-15,17
14:00:00	1,56	12,22	33282,29	33311,86	21,88	0,29	0	13,17	3,02	-16,19
14:10:00	1,56	12,24	33570,63	33596,83	21,9	0,25	0	13,29	4,22	-17,51
14:20:00	1,56	12,26	33821,02	33843,86	21,91	0,22	0	13,4	5,42	-18,82
14:30:00	1,57	12,28	34034,29	34053,79	21,92	0,18	0	13,49	6,62	-20,11
14:40:00	1,57	12,3	34211,18	34227,36	21,93	0,14	0	13,57	7,82	-21,39
14:50:00	1,57	12,32	34352,31	34365,18	21,94	0,11	0	13,63	9,02	-22,65
15:00:00	1,57	12,34	34458,19	34467,77	21,94	0,07	0	13,67	10,22	-23,89
15:10:00	1,57	12,32	34529,27	34535,56	21,94	0,04	0	13,7	7,02	-20,72
15:20:00	1,57	12,3	34565,84	34568,86	21,94	0	0	13,72	3,81	-17,53
15:30:00	1,57	12,28	34568,17	34567,93	21,94	0	0	13,72	0,61	-14,33
15:40:00	1,56	12,26	34536,44	34532,97	21,94	0	0	13,71	-2,59	-11,12
15:50:00	1,56	12,24	34470,79	34464,09	21,93	0	0	13,68	-5,8	-7,88
16:00:00	1,56	12,22	34371,24	34361,33	21,92	0	0	13,64	-9	-4,64
16:10:00	1,55	12,14	34237,77	34227,48	21,92	0	0	13,58	-9,02	-4,56
16:20:00	1,54	12,06	34099,87	34089,4	21,91	0	0	13,52	-9,04	-4,48
16:30:00	1,53	11,98	33959,79	33948,94	21,9	0	0	13,46	-9,06	-4,4
16:40:00	1,52	11,89	33815,23	33804	21,89	0	0	13,4	-9,08	-4,32
16:50:00	1,51	11,81	33666,18	33654,78	21,88	0	0	13,33	-9,1	-4,23

17:00:00	1,5	11,73	33514,91	33503,14	21,87	0	0	13,27	-9,12	-4,15
17:10:00	1,48	11,59	33359,1	33347,38	21,86	0	0	13,2	-9,16	-4,04
17:20:00	1,46	11,45	33203,3	33191,63	21,85	0	0	13,14	-9,2	-3,94
17:30:00	1,44	11,31	33047,5	33035,88	21,84	0	0	13,07	-9,24	-3,83
17:40:00	1,42	11,16	32891,7	32880,13	21,83	0	0	13	-9,28	-3,72
17:50:00	1,41	11,02	32735,91	32724,38	21,82	0	0	12,93	-9,32	-3,61
18:00:00	1,39	10,88	32580,11	32568,63	21,81	0	0	12,87	-9,36	-3,51
18:10:00	1,37	10,72	32424,31	32412,88	21,8	0	0	12,8	-9,9	-2,9
18:20:00	1,35	10,56	32268,49	32257,11	21,79	0	0	12,73	-10,45	-2,28
18:30:00	1,33	10,41	32112,64	32101,31	21,78	0	0	12,66	-10,99	-1,67
18:40:00	1,31	10,25	31956,77	31945,48	21,77	0	0	12,6	-11,53	-1,06
18:50:00	1,29	10,09	31800,87	31789,63	21,77	0	0	12,53	-12,08	-0,45
19:00:00	1,27	9,93	31644,94	31633,75	21,76	0	0	12,46	-12,62	0,16
19:10:00	1,25	9,81	31488,99	31477,85	21,75	0	0	12,39	-13,52	1,12
19:20:00	1,24	9,7	31333,06	31321,97	21,74	0	0	12,32	-14,41	2,09
19:30:00	1,22	9,58	31177,16	31166,13	21,73	0	0	12,26	-15,31	3,05
19:40:00	1,21	9,46	31021,3	31010,31	21,72	0	0	12,19	-16,2	4,01
19:50:00	1,19	9,35	30865,46	30854,53	21,71	0	0	12,12	-17,1	4,97
20:00:00	1,18	9,23	30709,64	30698,77	21,7	0	0	12,05	-17,99	5,94
20:10:00	1,17	9,18	30553,86	30543,04	21,69	0	0	11,98	-18,62	6,63
20:20:00	1,16	9,13	30398,19	30387,44	21,68	0	0	11,92	-19,25	7,33
20:30:00	1,16	9,08	30242,66	30231,96	21,67	0	0	11,85	-19,87	8,03
20:40:00	1,15	9,03	30087,24	30076,61	21,66	0	0	11,78	-20,5	8,72
20:50:00	1,14	8,98	29931,95	29921,38	21,65	0	0	11,71	-21,13	9,42
21:00:00	1,14	8,93	29776,78	29766,27	21,64	0	0	11,64	-21,76	10,12
21:10:00	1,14	8,93	29621,73	29611,29	21,63	0	0	11,58	-22,39	10,82
21:20:00	1,14	8,92	29466,88	29456,51	21,62	0	0	11,51	-23,03	11,52
21:30:00	1,14	8,92	29312,22	29301,92	21,61	0	0	11,44	-23,66	12,22
21:40:00	1,14	8,92	29157,76	29147,52	21,6	0	0	11,37	-24,29	12,92
21:50:00	1,14	8,91	29003,49	28993,32	21,59	0	0	11,3	-24,93	13,62
22:00:00	1,14	8,91	28849,41	28839,31	21,58	0	0	11,24	-25,56	14,32
22:10:00	1,14	8,9	28695,53	28685,5	21,57	0	0	11,17	-26,01	14,84
22:20:00	1,13	8,9	28541,84	28531,87	21,56	0	0	11,1	-26,47	15,37
22:30:00	1,13	8,89	28388,34	28378,44	21,55	0	0	11,03	-26,92	15,89
22:40:00	1,13	8,88	28235,04	28225,21	21,54	0	0	10,96	-27,37	16,41
22:50:00	1,13	8,88	28081,92	28072,16	21,53	0	0	10,9	-27,83	16,93
23:00:00	1,13	8,87	27929	27919,3	21,52	0	0	10,83	-28,28	17,45
23:10:00	1,13	8,83	27776,27	27766,64	21,51	0	0	10,76	-29,11	18,34
23:20:00	1,12	8,79	27623,69	27614,11	21,51	0	0	10,69	-29,93	19,24
23:30:00	1,11	8,75	27471,24	27461,72	21,5	0	0	10,63	-30,76	20,13
23:40:00	1,11	8,7	27318,92	27309,47	21,49	0	0	10,56	-31,59	21,03
23:50:00	1,1	8,66	27166,75	27157,36	21,48	0	0	10,49	-32,41	21,92
24:00:00	1,1	8,62	27014,72	27005,39	21,47	0	0	10,42	-33,24	22,82

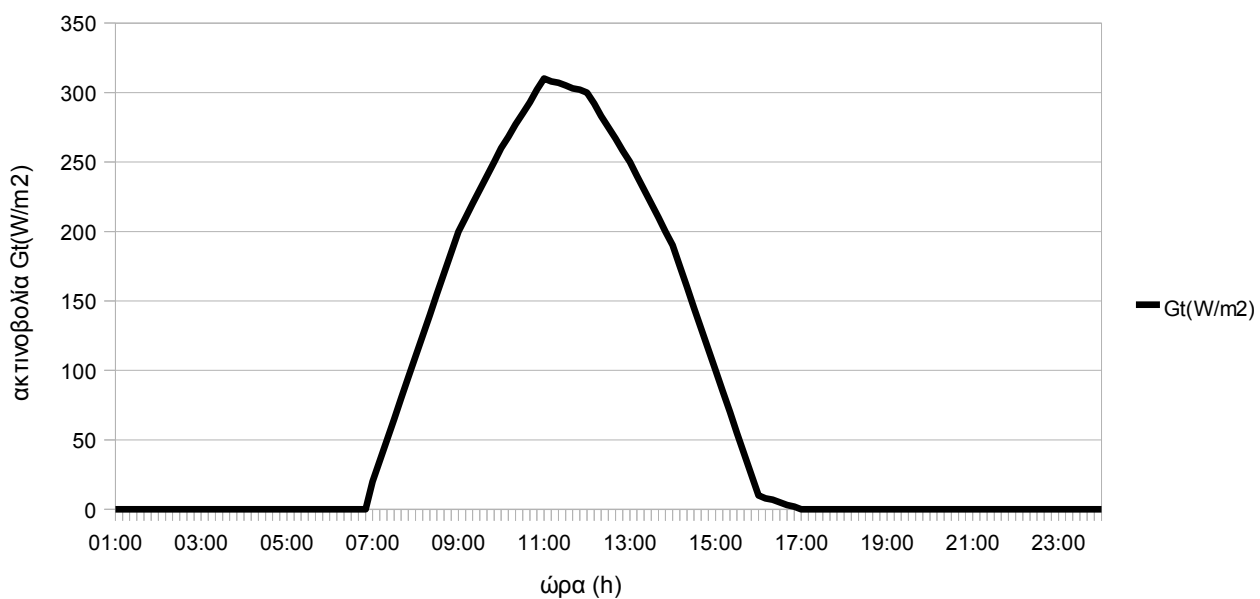
Ακολουθούν τα διαγράμματα που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία.



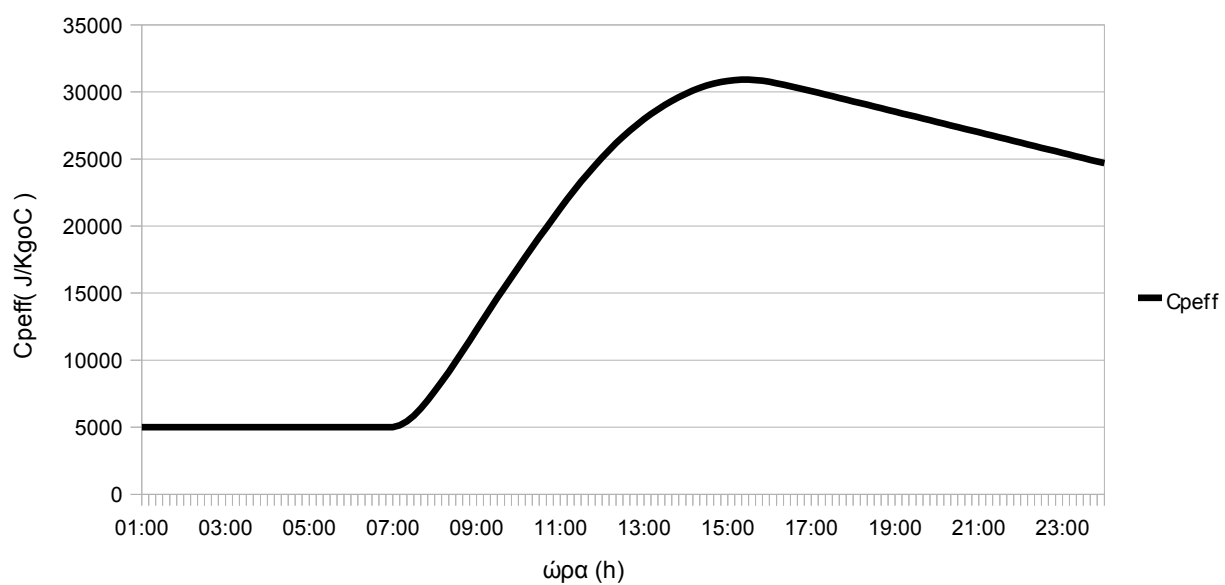
Εικόνα 11.1.1: Κατανομή της θερμοκρασίας T1 συναρτήσει της ώρας



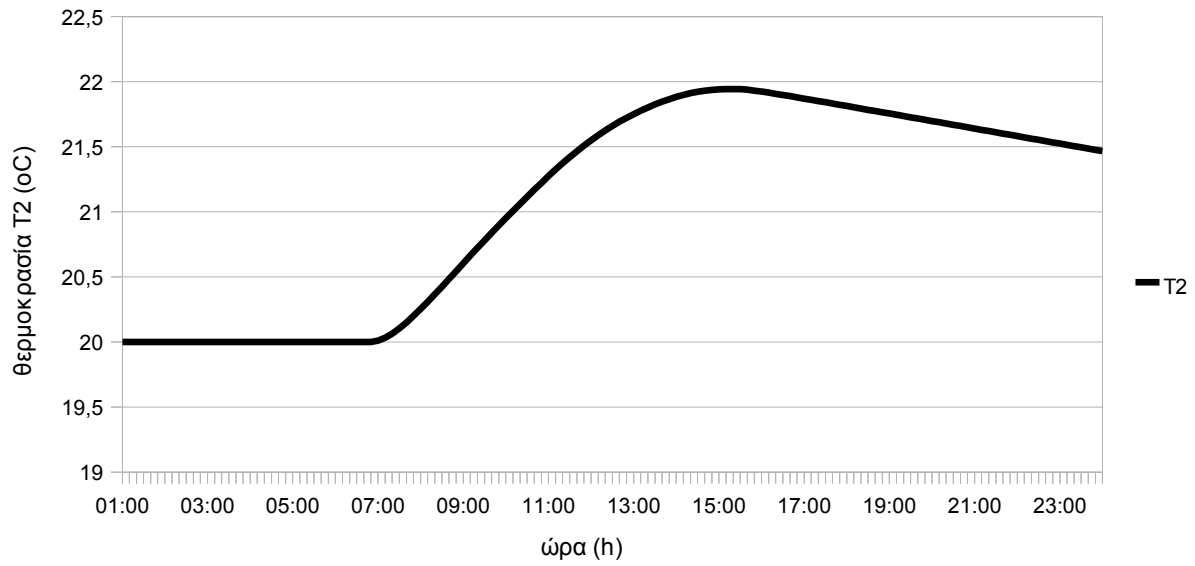
Εικόνα 11.1.2: Κατανομή της Θερμότητας που προσδίδει το ρscm στο δωμάτιο (W/m²)



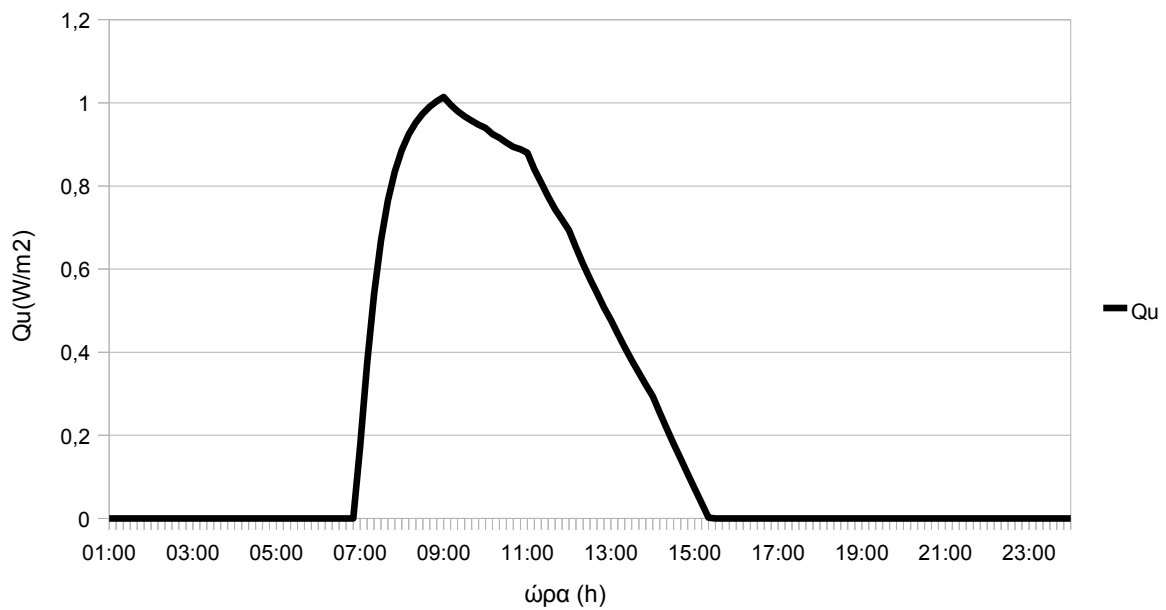
Εικόνα 11.1.3: Κατανομή της ακτινοβολίας Gt συναρτήσει της ώρας



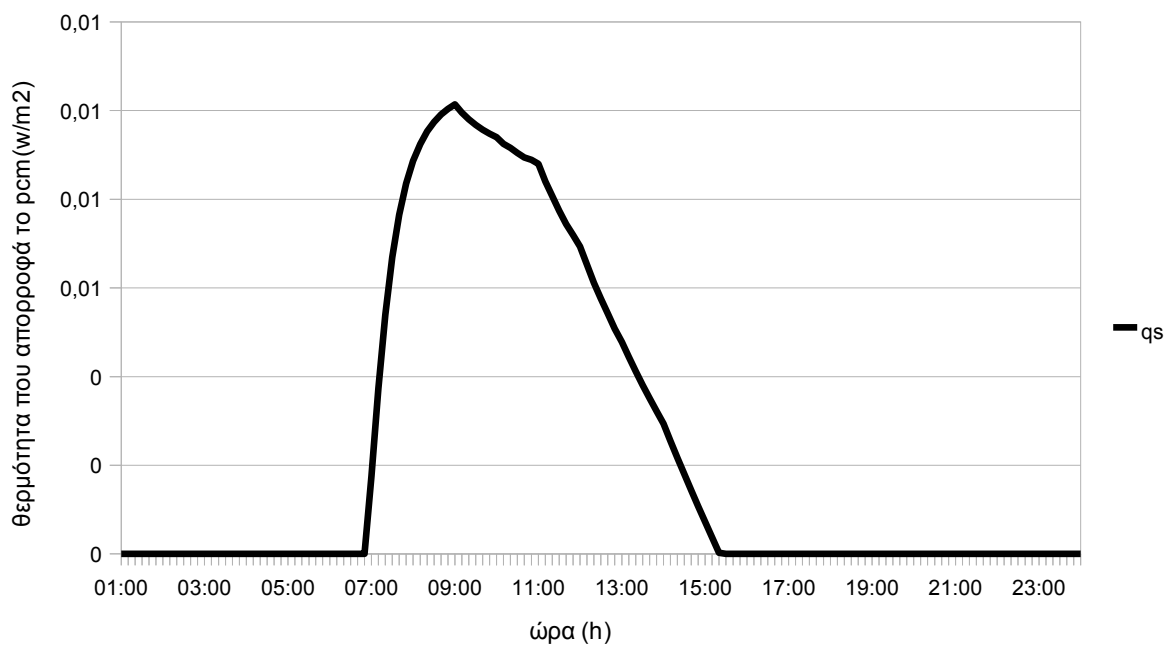
Εικόνα 11.1.4: Κατανομή του Cp_eff συναρτήσει της ώρας



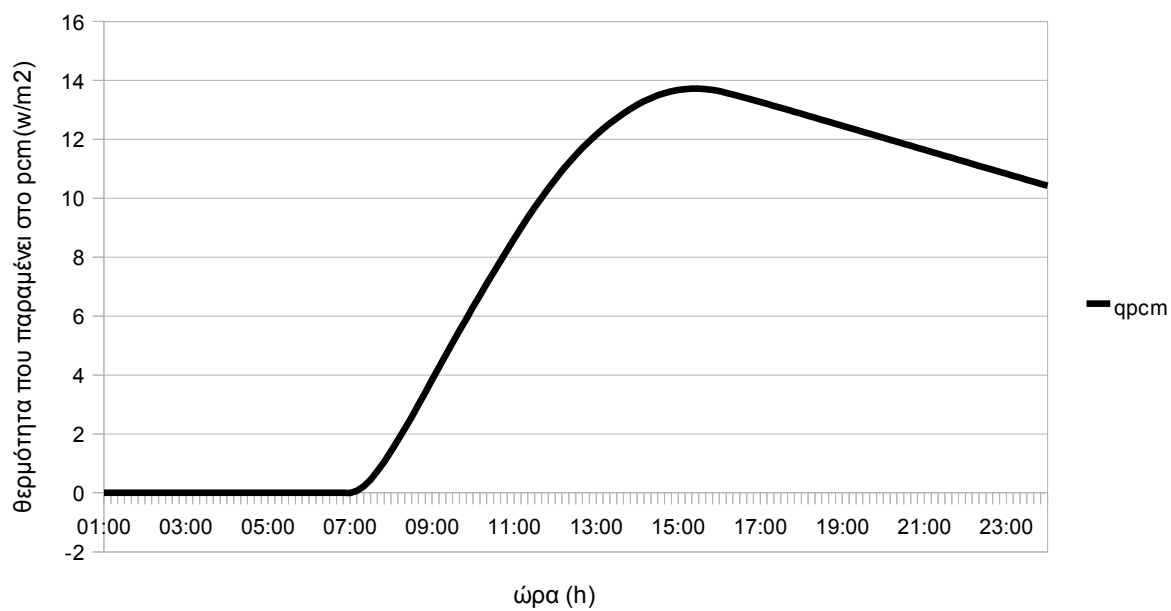
Εικόνα 11.1.5: Κατανομή της θερμοκρασίας T2 συνατήσει της ώρας



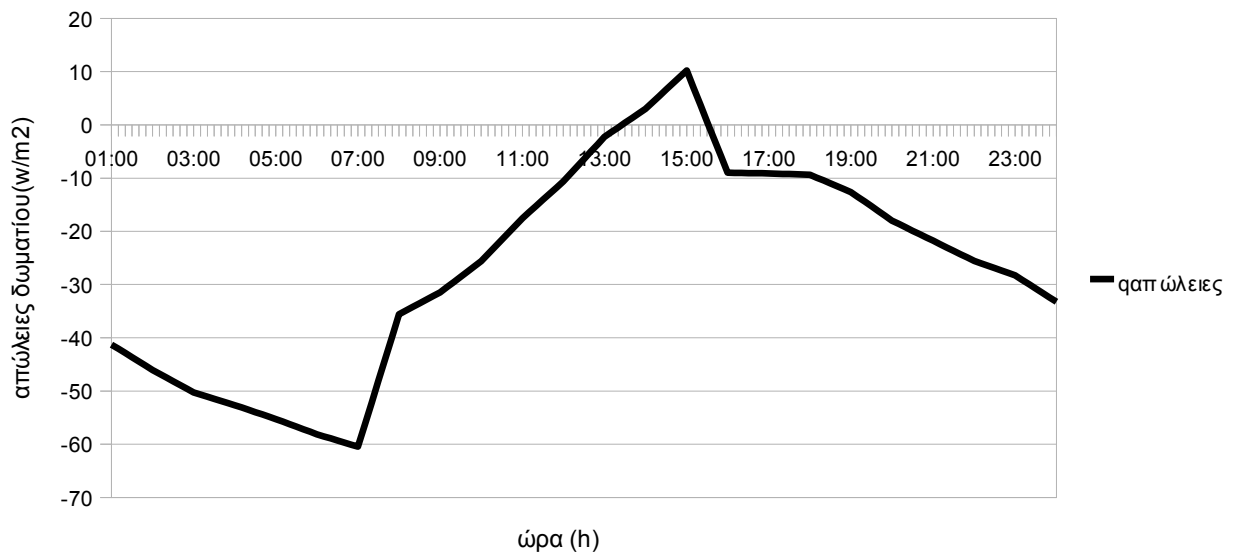
Εικόνα 11.1.6: Κατανομή της θερμότητας ηλιακών συλλεκτών Qu συναρτήσει της ώρας



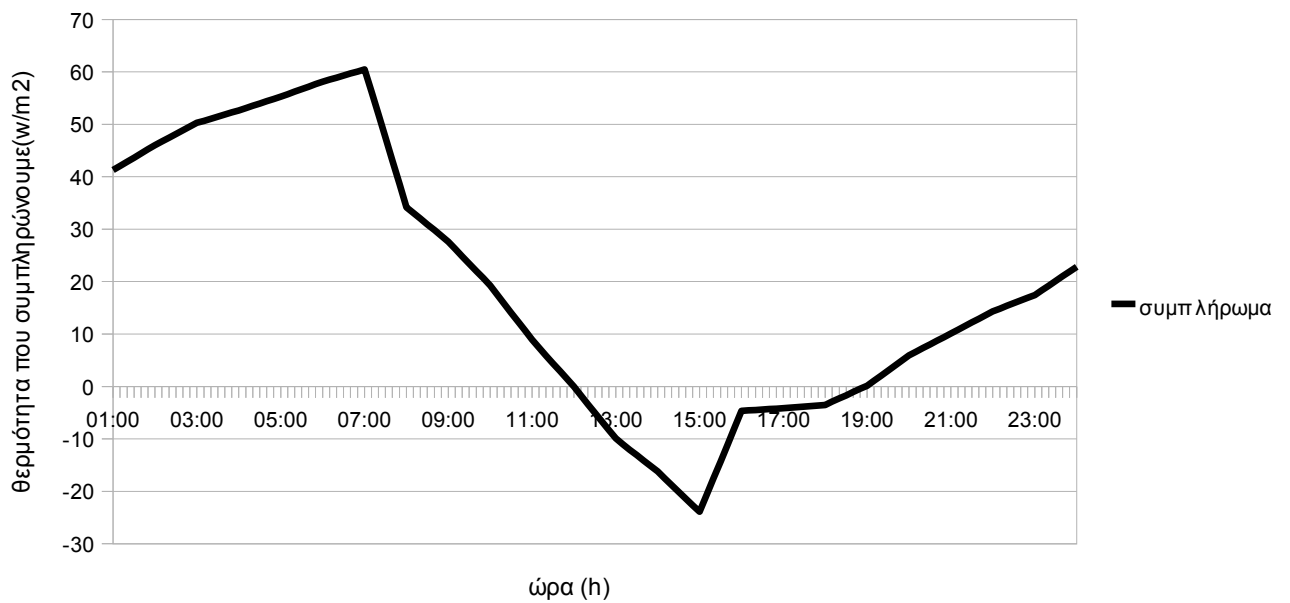
Εικόνα 11.1.7: Κατανομή της θερμότητας που απορροφά το pcm συναρτήσει της ώρας



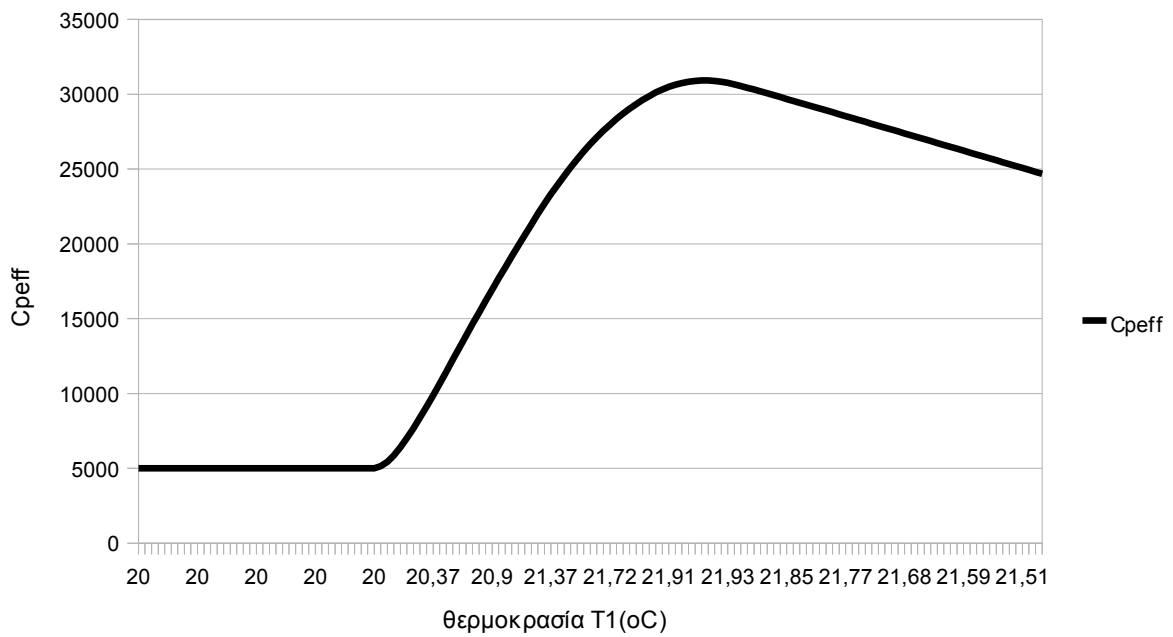
Εικόνα 11.1.8: Κατανομή της θερμότητας που παραμένει στο pcm συναρτήσει της ώρας



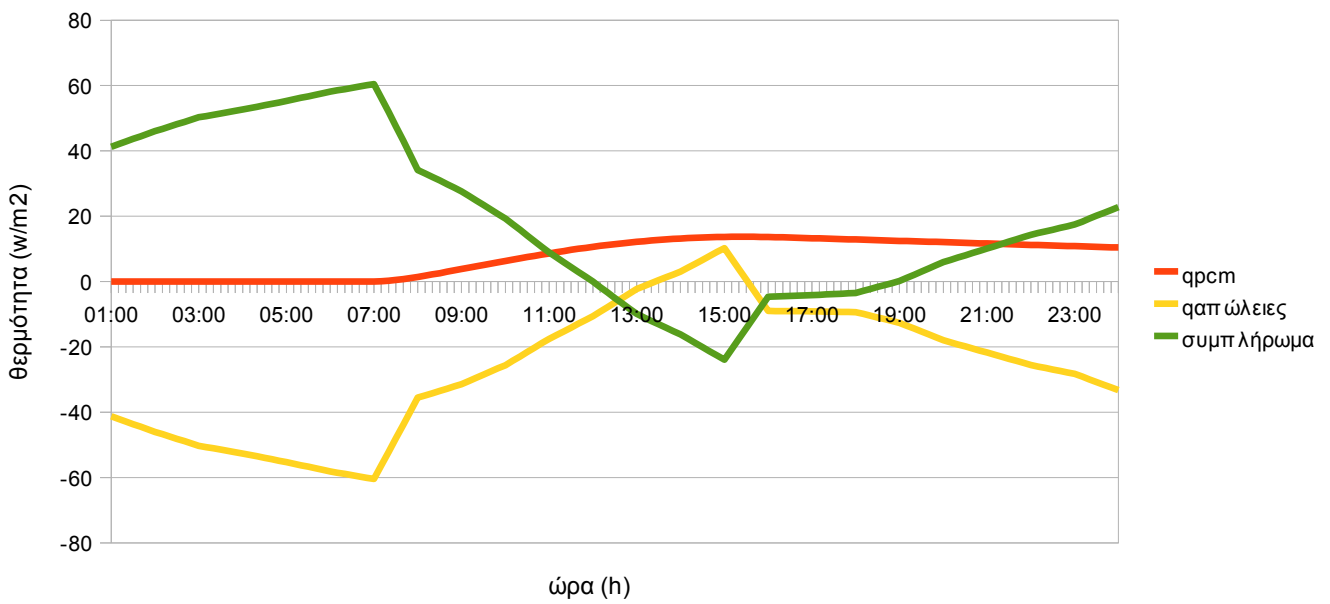
Εικόνα 11.1.9: Κατανομή των απωλειών δωματίου (W/m^2) συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.1.10: Κατανομή της θερμότητας που συμπληρώνουμε συναρτήσει της ώρας ώστε η θερμοκρασία του δωματίου να μένει σταθερή στους $20^{\circ}C$



Εικόνα 11.1.11: Κατανομή του C_{peff} συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.1.12: Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής των q_{rcm} , $q_{απωλειών}$ και $q_{συμπληρώματος}$ συναρτήσει της ώρας

11.2 Εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου στην περίπτωση χρήσης μετόν

Στην περίπτωση αυτή αντί να χρησιμοποιήσουμε το pcm που επιλέξαμε , χρησιμοποιούμε μπετό. Το C_{peff} έχει τώρα τιμή 800J/Kg°C και ρ=2300kg/m³. Επιλέγουμε ίδιες τις τιμές των υπόλοιπων συντελεστών και επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία.

Πίνακας 11.2.1

time	αρχική T	$q_R=(1/(1/h+0,02/k))*(t-20)$	Gt(W/m2)	C _{peff}	$(Ac/A\delta\alpha\pi)*Fr*Gt^*t\alpha-q_R(mpcm*C_{peff})/(\Delta t^*A)+(Ac/A\delta\alpha\pi)*Fr*U_L$	
01:00:00	20	0	0	880	0,000	101,33
01:10:00	20	0	0	880	0,000	101,33
01:20:00	20	0	0	880	0,000	101,33
01:30:00	20	0	0	880	0,000	101,33
01:40:00	20	0	0	880	0,000	101,33
01:50:00	20	0	0	880	0,000	101,33
02:00:00	20	0	0	880	0,000	101,33
02:10:00	20	0	0	880	0,000	101,33
02:20:00	20	0	0	880	0,000	101,33
02:30:00	20	0	0	880	0,000	101,33
02:40:00	20	0	0	880	0,000	101,33
02:50:00	20	0	0	880	0,000	101,33
03:00:00	20	0	0	880	0,000	101,33
03:10:00	20	0	0	880	0,000	101,33
03:20:00	20	0	0	880	0,000	101,33
03:30:00	20	0	0	880	0,000	101,33
03:40:00	20	0	0	880	0,000	101,33
03:50:00	20	0	0	880	0,000	101,33
04:00:00	20	0	0	880	0,000	101,33
04:10:00	20	0	0	880	0,000	101,33
04:20:00	20	0	0	880	0,000	101,33
04:30:00	20	0	0	880	0,000	101,33
04:40:00	20	0	0	880	0,000	101,33
04:50:00	20	0	0	880	0,000	101,33
05:00:00	20	0	0	880	0,000	101,33
05:10:00	20	0	0	880	0,000	101,33
05:20:00	20	0	0	880	0,000	101,33
05:30:00	20	0	0	880	0,000	101,33
05:40:00	20	0	0	880	0,000	101,33
05:50:00	20	0	0	880	0,000	101,33
06:00:00	20	0	0	880	0,000	101,33
06:10:00	20	0	0	880	0,000	101,33
06:20:00	20	0	0	880	0,000	101,33
06:30:00	20	0	0	880	0,000	101,33
06:40:00	20	0	0	880	0,000	101,33
06:50:00	20	0	0	880	0,000	101,33
07:00:00	20	0	20,000	880	4,335	101,33
07:10:00	20,03	0,19	35,000	880	7,400	101,33
07:20:00	20,08	0,59	50,000	880	10,252	101,33
07:30:00	20,17	1,18	65,000	880	12,904	101,33
07:40:00	20,28	1,97	80,000	880	15,372	101,33
07:50:00	20,41	2,92	95,000	880	17,669	101,33
08:00:00	20,57	4,04	110,000	880	19,806	101,33
08:10:00	20,75	5,3	125,000	880	21,795	101,33
08:20:00	20,95	6,7	140,000	880	23,646	101,33
08:30:00	21,17	8,23	155,000	880	25,369	101,33
08:40:00	21,4	9,88	170,000	880	26,972	101,33
08:50:00	21,65	11,64	185,000	880	28,464	101,33

09:00:00	21,91	13,5	200,000	880	29,852	101,33
09:10:00	22,19	15,46	210,000	880	30,062	101,33
09:20:00	22,47	17,43	220,000	880	30,257	101,33
09:30:00	22,75	19,41	230,000	880	30,440	101,33
09:40:00	23,03	21,41	240,000	880	30,610	101,33
09:50:00	23,32	23,42	250,000	880	30,770	101,33
10:00:00	23,6	25,44	260,000	880	30,918	101,33
10:10:00	23,89	27,46	268,000	880	30,624	101,33
10:20:00	24,18	29,47	277,000	880	30,568	101,33
10:30:00	24,46	31,47	285,000	880	30,300	101,33
10:40:00	24,74	33,46	293,000	880	30,051	101,33
10:50:00	25,02	35,42	302,000	880	30,037	101,33
11:00:00	25,3	37,38	310,000	880	29,808	101,33
11:10:00	25,57	39,33	308,000	880	27,428	101,33
11:20:00	25,82	41,11	307,000	880	25,432	101,33
11:30:00	26,06	42,75	305,000	880	23,359	101,33
11:40:00	26,27	44,24	303,000	880	21,432	101,33
11:50:00	26,46	45,6	302,000	880	19,856	101,33
12:00:00	26,64	46,85	300,000	880	18,173	101,33
12:10:00	26,8	47,98	292,000	880	15,308	101,33
12:20:00	26,93	48,91	283,000	880	12,426	101,33
12:30:00	27,03	49,64	275,000	880	9,962	101,33
12:40:00	27,11	50,2	267,000	880	7,670	101,33
12:50:00	27,17	50,6	258,000	880	5,321	101,33
13:00:00	27,2	50,84	250,000	880	3,352	101,33
13:10:00	27,22	50,93	240,000	880	1,087	101,33
13:20:00	27,21	50,87	230,000	880	-1,021	101,33
13:30:00	27,18	50,67	220,000	880	-2,983	101,33
13:40:00	27,13	50,33	210,000	880	-4,809	101,33
13:50:00	27,06	49,86	200,000	880	-6,508	101,33
14:00:00	26,98	49,27	190,000	880	-8,090	101,33
14:10:00	26,88	48,58	175,000	880	-10,647	101,33
14:20:00	26,76	47,71	160,000	880	-13,026	101,33
14:30:00	26,61	46,67	145,000	880	-15,241	101,33
14:40:00	26,44	45,48	130,000	880	-17,303	101,33
14:50:00	26,25	44,15	115,000	880	-19,224	101,33
15:00:00	26,05	42,69	100,000	880	-21,012	101,33
15:10:00	25,82	41,1	85,000	880	-22,678	101,33
15:20:00	25,58	39,4	70,000	880	-24,229	101,33
15:30:00	25,33	37,6	55,000	880	-25,675	101,33
15:40:00	25,06	35,69	40,000	880	-27,021	101,33
15:50:00	24,77	33,7	25,000	880	-28,277	101,33
16:00:00	24,48	31,61	10,000	880	-29,447	101,33
16:10:00	24,17	29,45	8,000	880	-27,720	101,33
16:20:00	23,88	27,42	7,000	880	-25,899	101,33
16:30:00	23,61	25,51	5,000	880	-24,423	101,33
16:40:00	23,36	23,7	3,000	880	-23,052	101,33
16:50:00	23,12	21,99	2,000	880	-21,561	101,33

17:00:00	22,89	20,39	0	880	-20,392	101,33
17:10:00	22,67	18,87	0	880	-18,872	101,33
17:20:00	22,47	17,46	0	880	-17,459	101,33
17:30:00	22,29	16,14	0	880	-16,145	101,33
17:40:00	22,11	14,92	0	880	-14,923	101,33
17:50:00	21,95	13,79	0	880	-13,786	101,33
18:00:00	21,8	12,73	0	880	-12,728	101,33
18:10:00	21,66	11,74	0	880	-11,745	101,33
18:20:00	21,53	10,83	0	880	-10,829	101,33
18:30:00	21,41	9,98	0	880	-9,977	101,33
18:40:00	21,3	9,18	0	880	-9,185	101,33
18:50:00	21,2	8,45	0	880	-8,447	101,33
19:00:00	21,1	7,76	0	880	-7,759	101,33
19:10:00	21,01	7,12	0	880	-7,120	101,33
19:20:00	20,92	6,52	0	880	-6,524	101,33
19:30:00	20,85	5,97	0	880	-5,970	101,33
19:40:00	20,77	5,45	0	880	-5,454	101,33
19:50:00	20,7	4,97	0	880	-4,974	101,33
20:00:00	20,64	4,53	0	880	-4,526	101,33
20:10:00	20,58	4,11	0	880	-4,110	101,33
20:20:00	20,53	3,72	0	880	-3,722	101,33
20:30:00	20,48	3,36	0	880	-3,362	101,33
20:40:00	20,43	3,03	0	880	-3,026	101,33
20:50:00	20,38	2,71	0	880	-2,714	101,33
21:00:00	20,34	2,42	0	880	-2,424	101,33
21:10:00	20,31	2,15	0	880	-2,154	101,33
21:20:00	20,27	1,9	0	880	-1,902	101,33
21:30:00	20,24	1,67	0	880	-1,669	101,33
21:40:00	20,21	1,45	0	880	-1,452	101,33
21:50:00	20,18	1,25	0	880	-1,251	101,33
22:00:00	20,15	1,06	0	880	-1,064	101,33
22:10:00	20,13	0,89	0	880	-0,890	101,33
22:20:00	20,1	0,73	0	880	-0,728	101,33
22:30:00	20,08	0,58	0	880	-0,578	101,33
22:40:00	20,06	0,44	0	880	-0,438	101,33
22:50:00	20,04	0,31	0	880	-0,308	101,33
23:00:00	20,03	0,19	0	880	-0,188	101,33
23:10:00	20,01	0,08	0	880	-0,076	101,33
23:20:00	20	-0,03	0	880	0,029	101,33
23:30:00	19,98	-0,13	0	880	0,127	101,33
23:40:00	19,97	-0,22	0	880	0,218	101,33
23:50:00	19,96	-0,3	0	880	0,302	101,33
24:00:00	19,95	-0,38	0	880	0,382	101,33

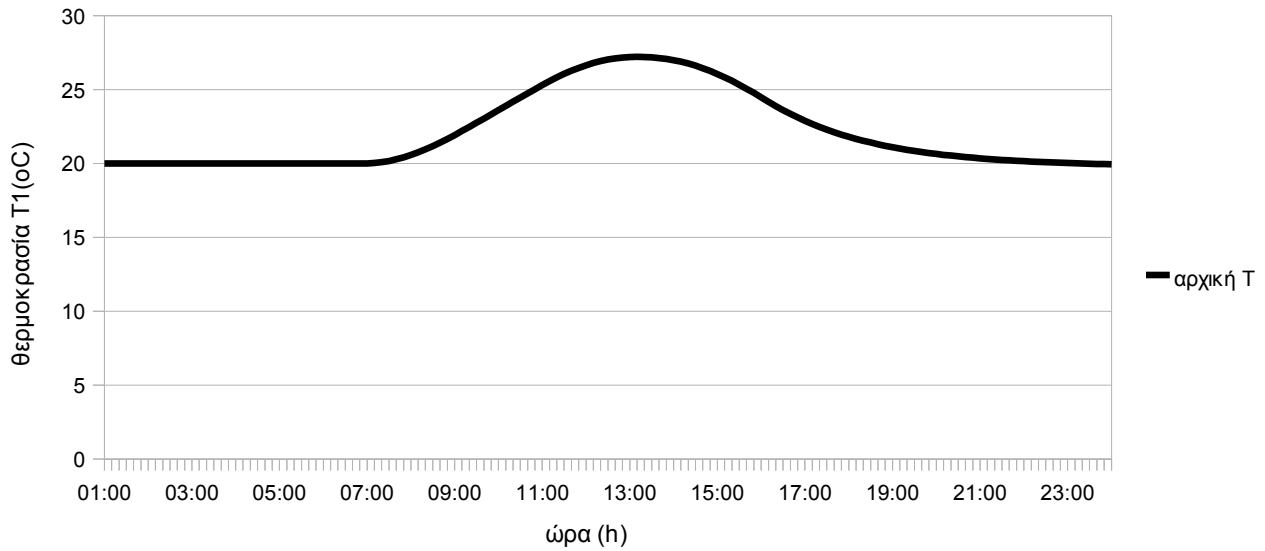
Πίνακας 11.2.2

time	$(Ac/A\delta a\pi)*Fr*UL*Ta$	to	$(m\pi cm*C\pi eff*T1)/(\Delta t*A)$	b	T2	Qu	qs	ημπετο	qαπώλ	συμπλ
01:00:00	1,05	8,2	2024	2025,05	20	0	0	0	-41,27	41,27
01:10:00	1,04	8,14	2024	2025,04	20	0	0	0	-42,07	42,07
01:20:00	1,03	8,07	2024	2025,03	20	0	0	0	-42,86	42,86
01:30:00	1,02	8,01	2024	2025,02	20	0	0	0	-43,66	43,66
01:40:00	1,01	7,94	2024	2025,01	20	0	0	0	-44,45	44,45
01:50:00	1	7,88	2024	2025	20	0	0	0	-45,25	45,25
02:00:00	1	7,81	2024	2025	20	0	0	0	-46,05	46,05
02:10:00	0,99	7,77	2024	2024,99	20	0	0	0	-46,75	46,75
02:20:00	0,99	7,74	2024	2024,99	20	0	0	0	-47,46	47,46
02:30:00	0,98	7,7	2024	2024,98	20	0	0	0	-48,16	48,16
02:40:00	0,98	7,66	2024	2024,98	20	0	0	0	-48,87	48,87
02:50:00	0,97	7,63	2024	2024,97	20	0	0	0	-49,57	49,57
03:00:00	0,97	7,59	2024	2024,97	20	0	0	0	-50,28	50,28
03:10:00	0,96	7,57	2024	2024,96	20	0	0	0	-50,68	50,68
03:20:00	0,96	7,54	2024	2024,96	20	0	0	0	-51,07	51,07
03:30:00	0,96	7,52	2024	2024,96	20	0	0	0	-51,47	51,47
03:40:00	0,96	7,5	2024	2024,96	20	0	0	0	-51,86	51,86
03:50:00	0,95	7,47	2024	2024,95	20	0	0	0	-52,26	52,26
04:00:00	0,95	7,45	2024	2024,95	20	0	0	0	-52,66	52,66
04:10:00	0,95	7,42	2024	2024,95	20	0	0	0	-53,1	53,1
04:20:00	0,94	7,39	2024	2024,94	20	0	0	0	-53,53	53,53
04:30:00	0,94	7,36	2024	2024,94	20	0	0	0	-53,97	53,97
04:40:00	0,93	7,32	2024	2024,93	20	0	0	0	-54,4	54,4
04:50:00	0,93	7,29	2024	2024,93	20	0	0	0	-54,84	54,84
05:00:00	0,93	7,26	2024	2024,93	20	0	0	0	-55,28	55,28
05:10:00	0,92	7,22	2024	2024,92	20	0	0	0	-55,76	55,76
05:20:00	0,92	7,18	2024	2024,92	20	0	0	0	-56,23	56,23
05:30:00	0,91	7,14	2024	2024,91	20	0	0	0	-56,71	56,71
05:40:00	0,91	7,1	2024	2024,91	20	0	0	0	-57,18	57,18
05:50:00	0,9	7,06	2024	2024,9	20	0	0	0	-57,66	57,66
06:00:00	0,9	7,02	2024	2024,9	20	0	0	0	-58,13	58,13
06:10:00	0,89	7,01	2024	2024,89	20	0	0	0	-58,52	58,52
06:20:00	0,89	6,99	2024	2024,89	20	0	0	0	-58,91	58,91
06:30:00	0,89	6,98	2024	2024,89	20	0	0	0	-59,3	59,3
06:40:00	0,89	6,97	2024	2024,89	20	0	0	0	-59,69	59,69
06:50:00	0,89	6,95	2024	2024,89	20	0	0	0	-60,08	60,08
07:00:00	0,88	6,94	2024	2029,22	20,03	0,44	0	0	-60,47	60,47
07:10:00	0,89	7	2026,67	2034,96	20,08	0,95	0,01	0,18	-56,32	56,13
07:20:00	0,9	7,07	2032,4	2043,55	20,17	1,42	0,01	0,57	-52,17	51,58
07:30:00	0,91	7,13	2040,98	2054,79	20,28	1,85	0,02	1,17	-48,02	46,84
07:40:00	0,92	7,19	2052,21	2068,5	20,41	2,26	0,02	1,94	-43,87	41,9
07:50:00	0,93	7,26	2065,9	2084,49	20,57	2,64	0,03	2,9	-39,72	36,8
08:00:00	0,93	7,32	2081,87	2102,61	20,75	2,99	0,03	4,01	-35,57	31,53
08:10:00	0,95	7,47	2099,96	2122,71	20,95	3,31	0,03	5,27	-34,89	29,59
08:20:00	0,97	7,62	2120,04	2144,66	21,17	3,62	0,04	6,66	-34,2	27,5
08:30:00	0,99	7,77	2141,96	2168,32	21,4	3,9	0,04	8,19	-33,52	25,29
08:40:00	1,01	7,93	2165,59	2193,57	21,65	4,16	0,04	9,83	-32,83	22,95
08:50:00	1,03	8,08	2190,81	2220,3	21,91	4,41	0,04	11,59	-32,15	20,51

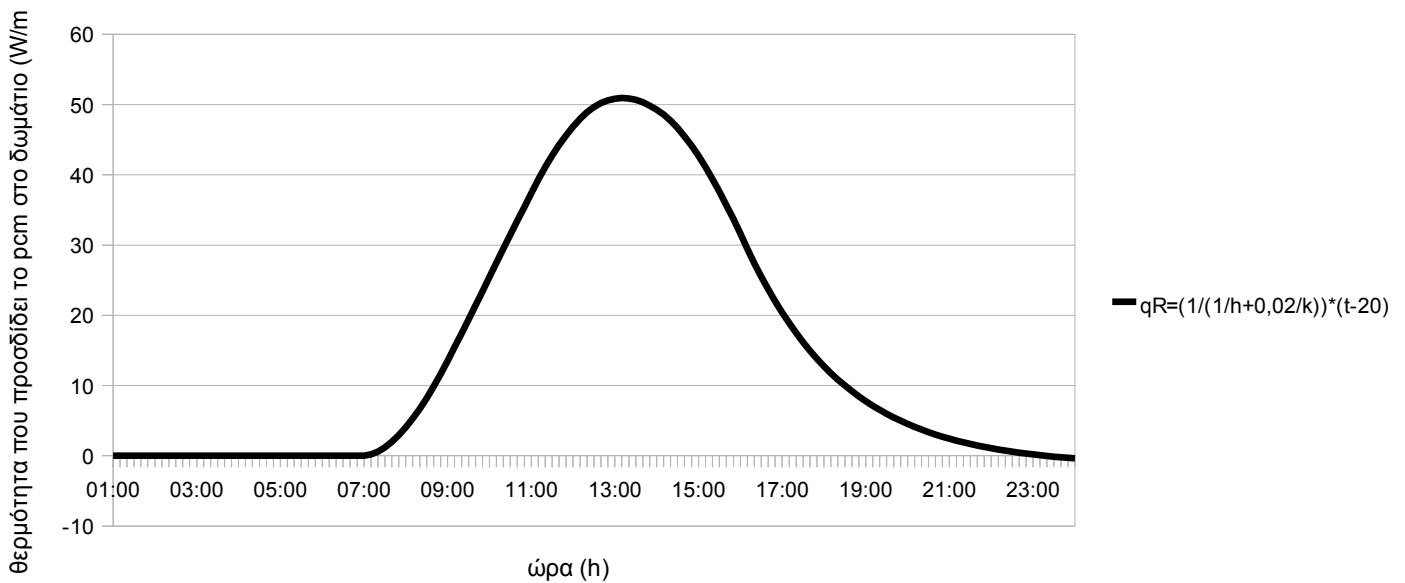
09:00:00	1,05	8,23	2217,51	2248,41	22,19	4,63	0,05	13,45	-31,46	17,96
09:10:00	1,08	8,44	2245,58	2276,72	22,47	4,67	0,05	15,41	-30,48	15,03
09:20:00	1,1	8,64	2273,86	2305,21	22,75	4,7	0,05	17,38	-29,51	12,08
09:30:00	1,13	8,85	2302,31	2333,88	23,03	4,72	0,05	19,37	-28,53	9,12
09:40:00	1,15	9,05	2330,94	2362,71	23,32	4,75	0,05	21,36	-27,56	6,15
09:50:00	1,18	9,26	2359,74	2391,69	23,6	4,78	0,05	23,37	-26,58	3,16
10:00:00	1,21	9,46	2388,68	2420,8	23,89	4,8	0,05	25,39	-25,6	0,16
10:10:00	1,23	9,66	2417,75	2449,61	24,18	4,75	0,05	27,42	-24,26	-3,2
10:20:00	1,26	9,85	2446,53	2478,35	24,46	4,74	0,05	29,42	-22,92	-6,55
10:30:00	1,28	10,05	2475,23	2506,81	24,74	4,69	0,05	31,43	-21,58	-9,89
10:40:00	1,31	10,25	2503,66	2535,02	25,02	4,65	0,05	33,41	-20,24	-13,22
10:50:00	1,33	10,44	2531,83	2563,2	25,3	4,64	0,05	35,38	-18,9	-16,52
11:00:00	1,36	10,64	2559,97	2591,13	25,57	4,6	0,05	37,34	-17,56	-19,82
11:10:00	1,37	10,78	2587,87	2616,68	25,82	4,21	0,04	39,29	-16,4	-22,93
11:20:00	1,39	10,92	2613,38	2640,21	26,06	3,88	0,04	41,07	-15,25	-25,86
11:30:00	1,41	11,06	2636,89	2661,66	26,27	3,53	0,04	42,71	-14,09	-28,66
11:40:00	1,43	11,2	2658,31	2681,17	26,46	3,22	0,03	44,21	-12,94	-31,31
11:50:00	1,45	11,34	2677,79	2699,09	26,64	2,95	0,03	45,57	-11,78	-33,82
12:00:00	1,46	11,48	2695,7	2715,33	26,8	2,68	0,03	46,82	-10,62	-36,23
12:10:00	1,47	11,56	2711,92	2728,7	26,93	2,2	0,02	47,96	-9,22	-38,76
12:20:00	1,48	11,64	2725,27	2739,18	27,03	1,73	0,02	48,9	-7,83	-41,09
12:30:00	1,49	11,72	2735,73	2747,19	27,11	1,32	0,01	49,63	-6,43	-43,21
12:40:00	1,5	11,8	2743,73	2752,9	27,17	0,94	0,01	50,19	-5,04	-45,17
12:50:00	1,51	11,88	2749,44	2756,28	27,2	0,56	0,01	50,59	-3,64	-46,96
13:00:00	1,52	11,96	2752,81	2757,69	27,22	0,23	0	50,83	-2,24	-48,6
13:10:00	1,53	12	2754,22	2756,83	27,21	0	0	50,93	-1,36	-49,57
13:20:00	1,54	12,05	2753,36	2753,88	27,18	0	0	50,87	-0,49	-50,39
13:30:00	1,54	12,09	2750,41	2748,97	27,13	0	0	50,67	0,39	-51,06
13:40:00	1,55	12,13	2745,51	2742,25	27,06	0	0	50,33	1,26	-51,59
13:50:00	1,55	12,18	2738,8	2733,84	26,98	0	0	49,86	2,14	-52
14:00:00	1,56	12,22	2730,4	2723,87	26,88	0	0	49,27	3,02	-52,29
14:10:00	1,56	12,24	2720,44	2711,36	26,76	0	0	48,58	4,22	-52,8
14:20:00	1,56	12,26	2707,95	2696,48	26,61	0	0	47,71	5,42	-53,13
14:30:00	1,57	12,28	2693,09	2679,42	26,44	0	0	46,67	6,62	-53,29
14:40:00	1,57	12,3	2676,04	2660,31	26,25	0	0	45,48	7,82	-53,3
14:50:00	1,57	12,32	2656,96	2639,31	26,05	0	0	44,15	9,02	-53,17
15:00:00	1,57	12,34	2635,99	2616,55	25,82	0	0	42,69	10,22	-52,91
15:10:00	1,57	12,32	2613,26	2592,15	25,58	0	0	41,1	7,02	-48,12
15:20:00	1,57	12,3	2588,89	2566,23	25,33	0	0	39,4	3,81	-43,22
15:30:00	1,57	12,28	2563	2538,89	25,06	0	0	37,6	0,61	-38,21
15:40:00	1,56	12,26	2535,69	2510,24	24,77	0	0	35,69	-2,59	-33,1
15:50:00	1,56	12,24	2507,08	2480,36	24,48	0	0	33,7	-5,8	-27,9
16:00:00	1,56	12,22	2477,24	2449,35	24,17	0	0	31,61	-9	-22,61
16:10:00	1,55	12,14	2446,27	2420,1	23,88	0	0	29,45	-9,02	-20,43
16:20:00	1,54	12,06	2417,05	2392,69	23,61	0	0	27,42	-9,04	-18,38
16:30:00	1,53	11,98	2389,68	2366,78	23,36	0	0	25,51	-9,06	-16,45

17:00:00	1,5	11,73	2316,35	2297,45	22,67	0	0	20,39	-9,12	-11,27
17:10:00	1,48	11,59	2294,56	2277,17	22,47	0	0	18,87	-9,16	-9,71
17:20:00	1,46	11,45	2274,3	2258,3	22,29	0	0	17,46	-9,2	-8,26
17:30:00	1,44	11,31	2255,46	2240,76	22,11	0	0	16,14	-9,24	-6,9
17:40:00	1,42	11,16	2237,94	2224,44	21,95	0	0	14,92	-9,28	-5,64
17:50:00	1,41	11,02	2221,64	2209,26	21,8	0	0	13,79	-9,32	-4,47
18:00:00	1,39	10,88	2206,48	2195,14	21,66	0	0	12,73	-9,36	-3,37
18:10:00	1,37	10,72	2192,38	2182	21,53	0	0	11,74	-9,9	-1,84
18:20:00	1,35	10,56	2179,25	2169,77	21,41	0	0	10,83	-10,45	-0,38
18:30:00	1,33	10,41	2167,04	2158,39	21,3	0	0	9,98	-10,99	1,01
18:40:00	1,31	10,25	2155,68	2147,8	21,2	0	0	9,18	-11,53	2,35
18:50:00	1,29	10,09	2145,09	2137,93	21,1	0	0	8,45	-12,08	3,63
19:00:00	1,27	9,93	2135,24	2128,75	21,01	0	0	7,76	-12,62	4,86
19:10:00	1,25	9,81	2126,07	2120,2	20,92	0	0	7,12	-13,52	6,4
19:20:00	1,24	9,7	2117,54	2112,25	20,85	0	0	6,52	-14,41	7,89
19:30:00	1,22	9,58	2109,59	2104,84	20,77	0	0	5,97	-15,31	9,33
19:40:00	1,21	9,46	2102,19	2097,95	20,7	0	0	5,45	-16,2	10,75
19:50:00	1,19	9,35	2095,31	2091,52	20,64	0	0	4,97	-17,1	12,12
20:00:00	1,18	9,23	2088,89	2085,54	20,58	0	0	4,53	-17,99	13,46
20:10:00	1,17	9,18	2082,92	2079,98	20,53	0	0	4,11	-18,62	14,51
20:20:00	1,16	9,13	2077,36	2074,8	20,48	0	0	3,72	-19,25	15,52
20:30:00	1,16	9,08	2072,19	2069,99	20,43	0	0	3,36	-19,87	16,51
20:40:00	1,15	9,03	2067,38	2065,51	20,38	0	0	3,03	-20,5	17,48
20:50:00	1,14	8,98	2062,91	2061,34	20,34	0	0	2,71	-21,13	18,42
21:00:00	1,14	8,93	2058,75	2057,46	20,31	0	0	2,42	-21,76	19,34
21:10:00	1,14	8,93	2054,87	2053,86	20,27	0	0	2,15	-22,39	20,24
21:20:00	1,14	8,92	2051,27	2050,51	20,24	0	0	1,9	-23,03	21,12
21:30:00	1,14	8,92	2047,93	2047,4	20,21	0	0	1,67	-23,66	21,99
21:40:00	1,14	8,92	2044,82	2044,51	20,18	0	0	1,45	-24,29	22,84
21:50:00	1,14	8,91	2041,93	2041,82	20,15	0	0	1,25	-24,93	23,67
22:00:00	1,14	8,91	2039,25	2039,32	20,13	0	0	1,06	-25,56	24,5
22:10:00	1,14	8,9	2036,76	2037	20,1	0	0	0,89	-26,01	25,12
22:20:00	1,13	8,9	2034,44	2034,84	20,08	0	0	0,73	-26,47	25,74
22:30:00	1,13	8,89	2032,28	2032,84	20,06	0	0	0,58	-26,92	26,34
22:40:00	1,13	8,88	2030,28	2030,98	20,04	0	0	0,44	-27,37	26,93
22:50:00	1,13	8,88	2028,42	2029,24	20,03	0	0	0,31	-27,83	27,52
23:00:00	1,13	8,87	2026,69	2027,63	20,01	0	0	0,19	-28,28	28,09
23:10:00	1,13	8,83	2025,08	2026,13	20	0	0	0,08	-29,11	29,03
23:20:00	1,12	8,79	2023,58	2024,73	19,98	0	0	-0,03	-29,93	29,96
23:30:00	1,11	8,75	2022,18	2023,43	19,97	0	0	-0,13	-30,76	30,89
23:40:00	1,11	8,7	2020,88	2022,21	19,96	0	0	-0,22	-31,59	31,8
23:50:00	1,1	8,66	2019,66	2021,07	19,95	0	0	-0,3	-32,41	32,72
24:00:00	1,1	8,62	2018,53	2020,01	19,94	0	0	-0,38	-33,24	33,62

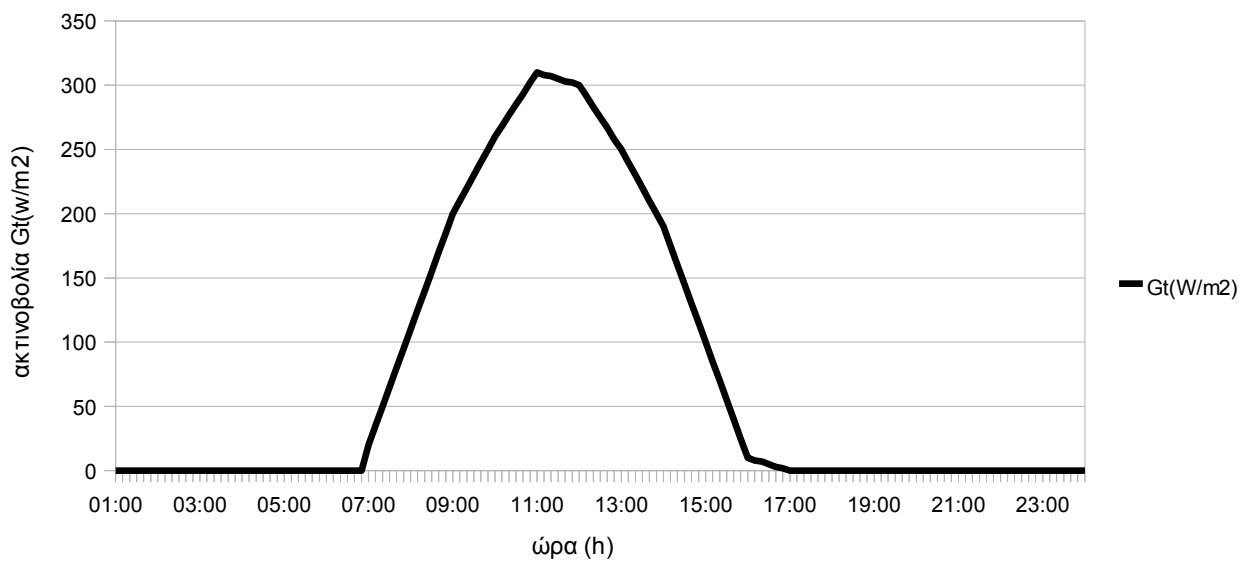
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τους παραπάνω πίνακες.



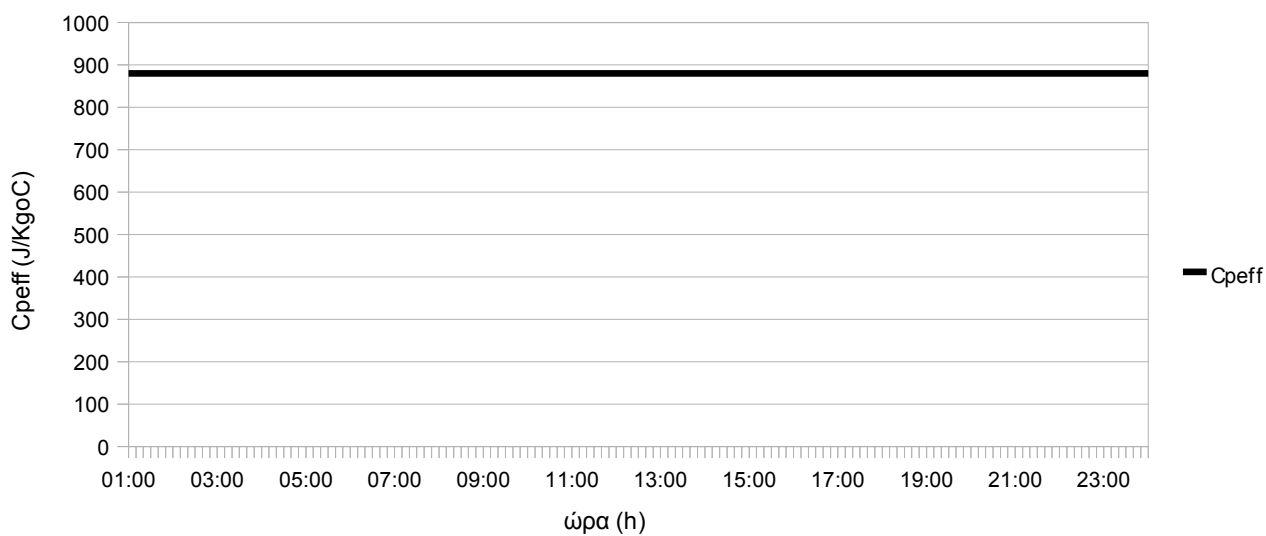
Εικόνα 11.2.1: Κατανομή της θερμοκρασίας T1 συναρτήσει της ώρας



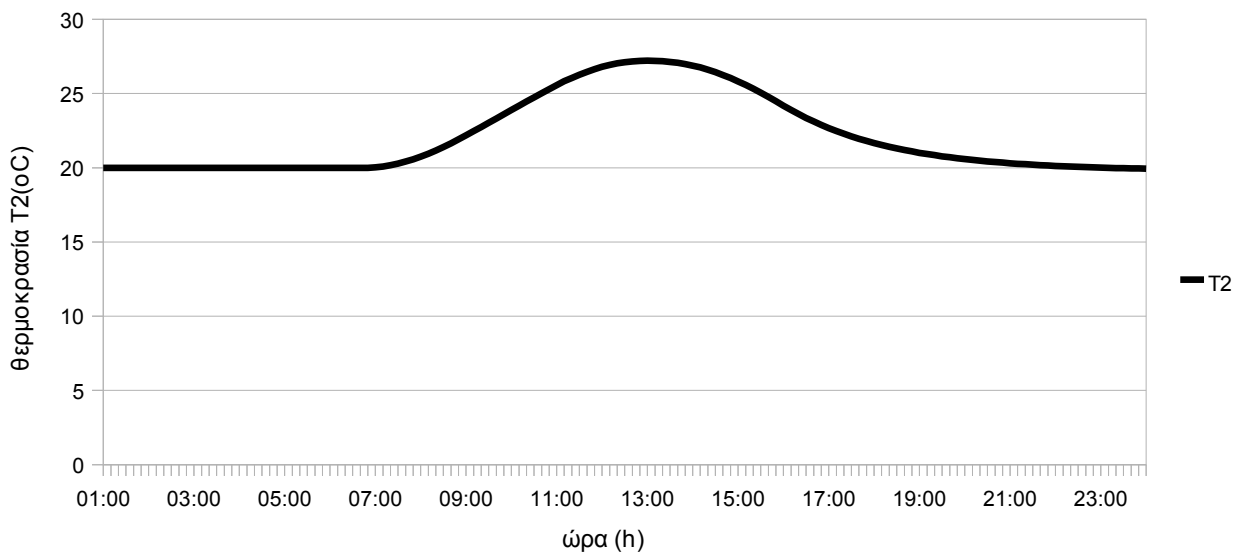
Εικόνα 11.2.2: Κατανομή της θερμότητας που προσδίδει το pcm στο δωμάτιο συναρτήσει της ώρας



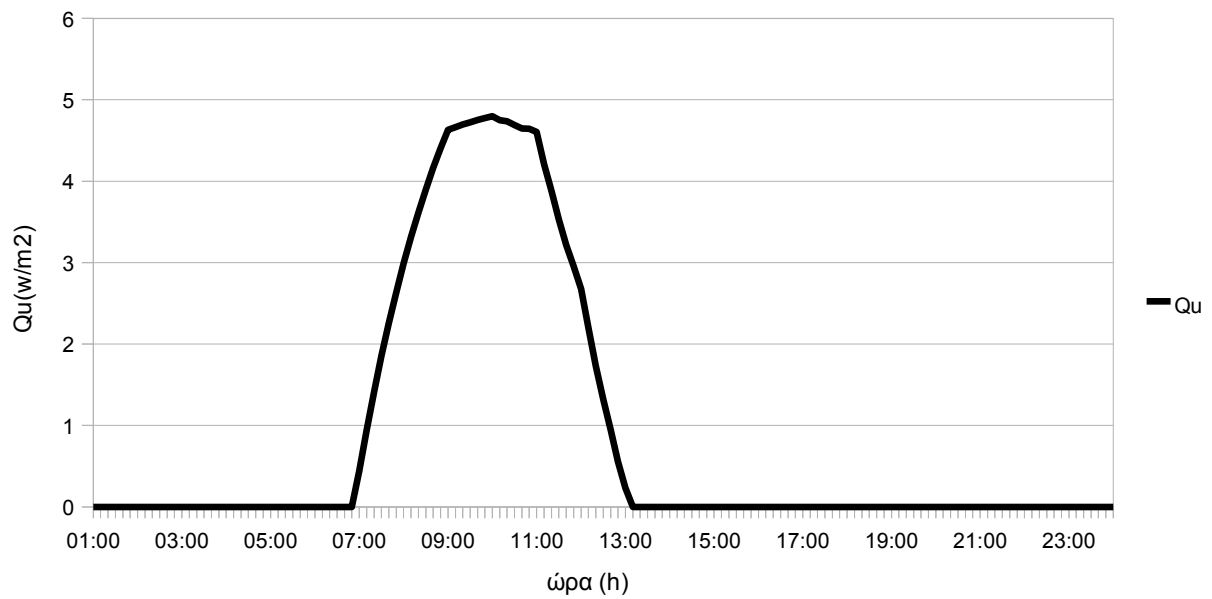
Εικόνα 11.2.3: Κατανομή της ακτινοβολίας Gt συναρτήσει της ώρας



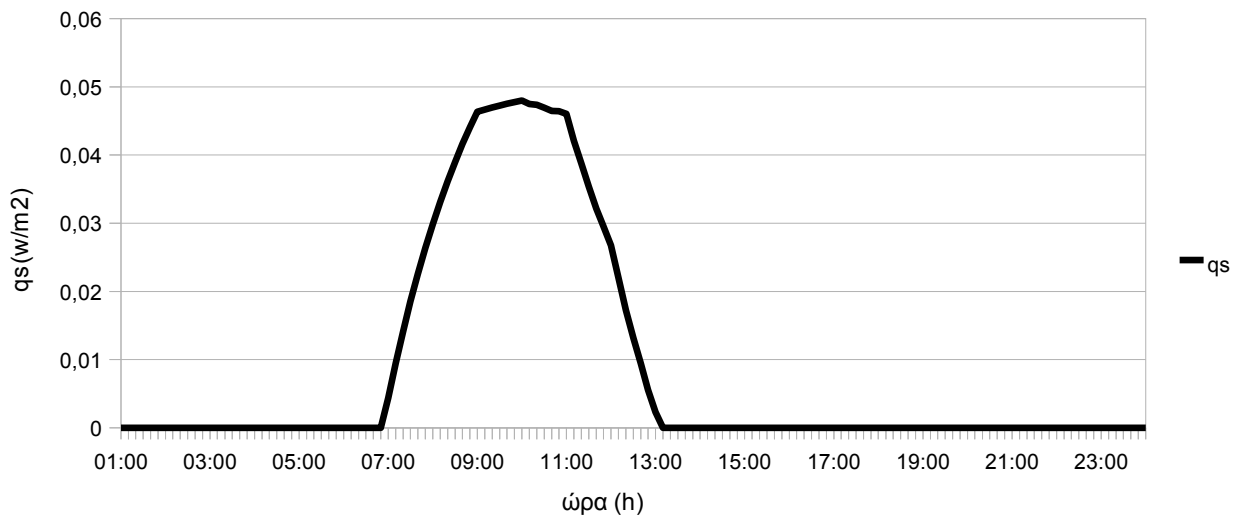
Εικόνα 11.2.4: Κατανομή του Cpeff συναρτήσει της ώρας



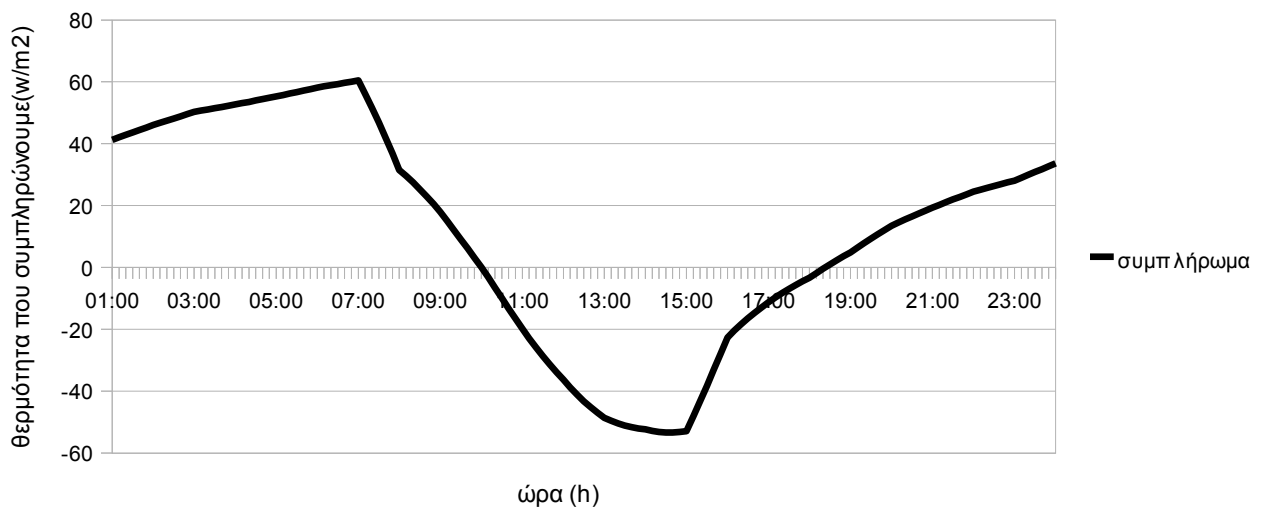
Εικόνα 11.2.5: Κατανομή της θερμοκρασίας T2 συναρτήσει της ώρας



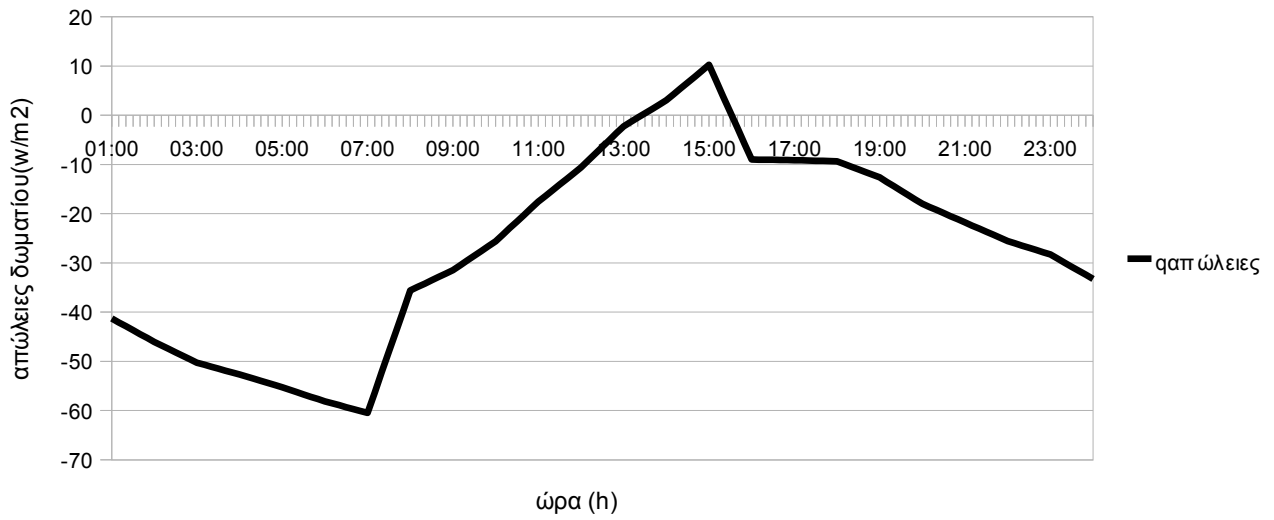
Εικόνα 11.2.6: Κατανομή της θερμότητας ηλιακών συλλεκτών, Qu συναρτήσει της ώρας



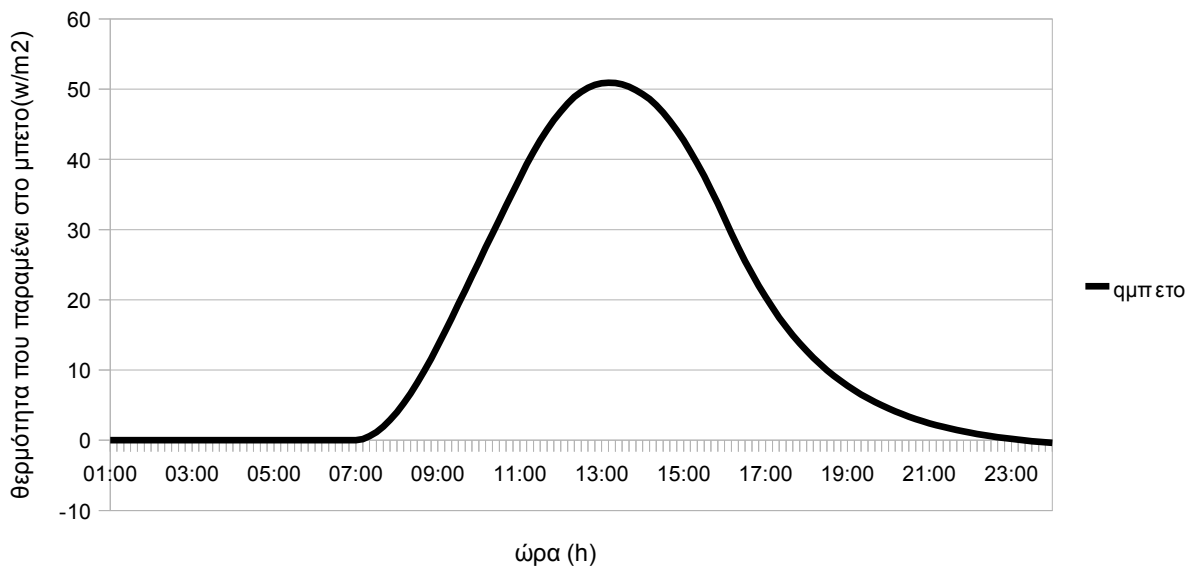
Εικόνα 11.2.7: Κατανομή της θερμότητας που απορροφά το pcm συναρτήσει της ώρας



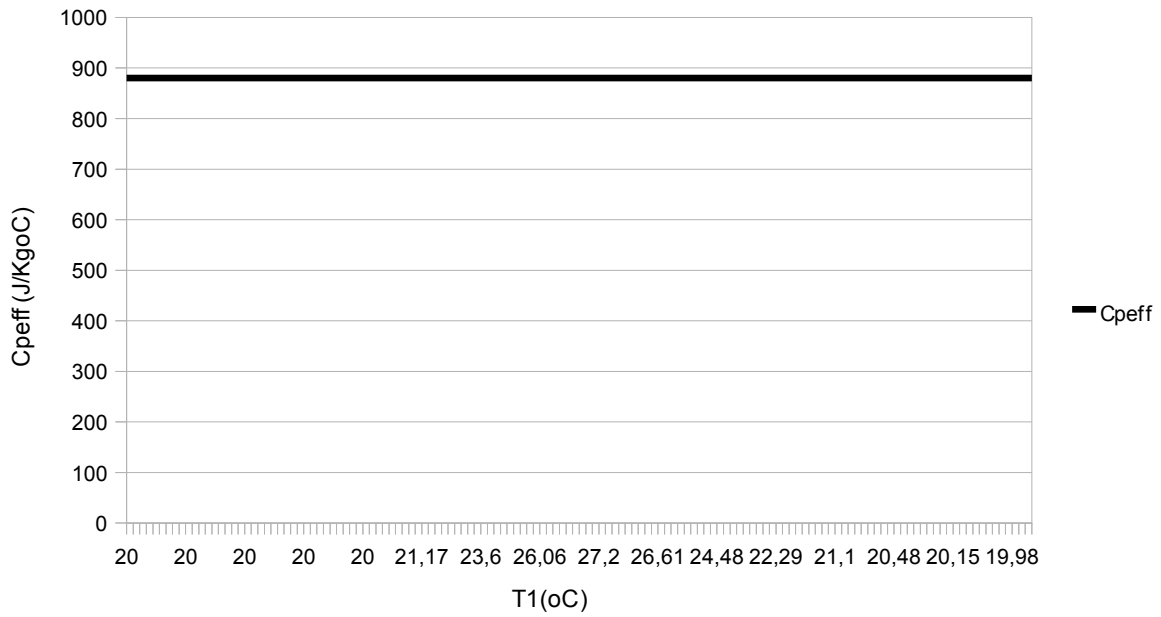
Εικόνα 11.2.8: Κατανομή της θερμότητας που συμπληρώνουμε ώστε η θερμοκρασία του δωματίου να παραμένει σταθερή 20 °C



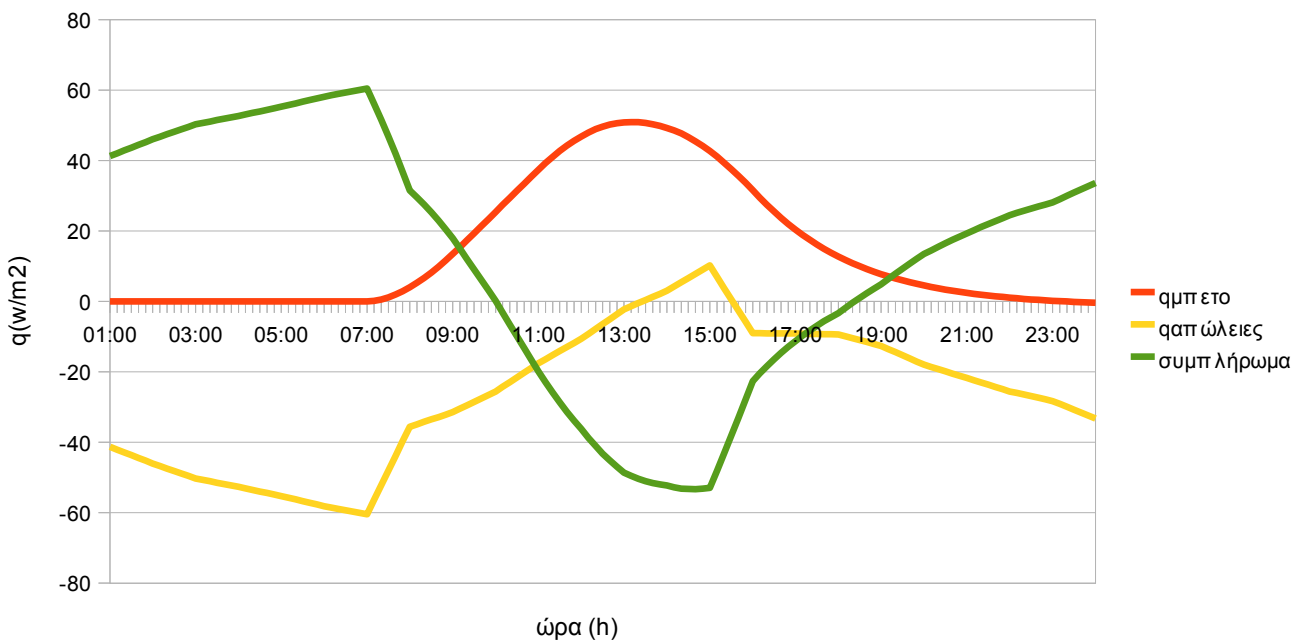
Εικόνα 11.2.9: Κατανομή των απωλειών δωματίου συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.2.10: Κατανομή της θερμότητας που παραμένει στο pcem συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.2.11: Κατανομή του Cpeff συναρτήσει της θερμοκρασίας T1



Εικόνα 11.2.13: Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής των qμπετό, qαπωλειών και του qσυμπληρώματος συναρτήσει της ώρας

11.3 Παραλλαγή της εφαρμογής 11.1 -Μείωση της έκτασης ηλιακών συλλεκτών

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε το rcm που επιλέξαμε αλλά μειώνουμε την έκταση των ηλιακών συλλεκτών που έχουμε τοποθετήσει στην ταράτσα. Αντί δηλαδή των 30m² που είχαμε τοποθετήσει στην πρώτη περίπτωση, τώρα μειώνουμε την έκταση στα 15m². Λαμβάνουμε τις τιμές των υπόλοιπων συντελεστών ίδιες με αυτές της πρώτης περίπτωσης και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία.

Πίνακας 11.3.1

time	αρχική	$T_{q_r} = (1/(1/h+0,02/k))*(t-20)$	Gt(W/m2)	Cpeff	$(Ac/A\delta\alpha\pi)*Fr*Gt*\tau\alpha-q_r$	$(mpcm*Cpeff)/(\Delta t*A)+(Ac/A\delta\alpha\pi)*Fr*U_L$
01:00:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
01:10:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
01:20:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
01:30:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
01:40:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
01:50:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
02:00:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
02:10:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
02:20:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
02:30:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
02:40:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
02:50:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
03:00:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
03:10:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
03:20:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
03:30:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
03:40:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
03:50:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
04:00:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
04:10:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
04:20:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
04:30:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
04:40:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
04:50:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
05:00:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
05:10:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
05:20:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
05:30:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
05:40:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
05:50:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
06:00:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
06:10:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
06:20:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
06:30:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
06:40:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
06:50:00	20	0	0	5000	0,000	254,81
07:00:00	20	0	20,000	5000	2,168	254,81
07:10:00	20,01	0,04	35,000	5069,85	3,756	258,37
07:20:00	20,02	0,12	50,000	5220,91	5,302	266,07
07:30:00	20,03	0,24	65,000	5445,23	6,809	277,5
07:40:00	20,05	0,39	80,000	5732,85	8,282	292,15
07:50:00	20,08	0,57	95,000	6073,4	9,727	309,5
08:00:00	20,11	0,77	110,000	6457,24	11,150	329,06
08:10:00	20,14	0,99	125,000	6875,98	12,554	350,4
08:20:00	20,17	1,23	140,000	7322,95	13,943	373,17
08:30:00	20,21	1,48	155,000	7792,53	15,320	397,09
08:40:00	20,25	1,74	170,000	8280,31	16,687	421,95
08:50:00	20,28	2	185,000	8782,8	18,047	447,55

09:00:00	20,32	2,28	200,000	9297,27	19,400	473,76
09:10:00	20,36	2,55	210,000	9821,56	20,206	500,47
09:20:00	20,4	2,83	220,000	10339,63	21,016	526,87
09:30:00	20,44	3,1	230,000	10852,49	21,828	553
09:40:00	20,48	3,37	240,000	11360,96	22,642	578,9
09:50:00	20,51	3,63	250,000	11865,68	23,459	604,62
10:00:00	20,55	3,9	260,000	12367,18	24,277	630,17
10:10:00	20,59	4,16	268,000	12865,88	24,880	655,58
10:20:00	20,63	4,42	277,000	13357,73	25,595	680,64
10:30:00	20,66	4,68	285,000	13845,67	26,204	705,5
10:40:00	20,7	4,94	293,000	14328,11	26,815	730,08
10:50:00	20,74	5,19	302,000	14805,67	27,538	754,41
11:00:00	20,77	5,44	310,000	15280,77	28,153	778,62
11:10:00	20,81	5,69	308,000	15751,82	27,687	802,62
11:20:00	20,84	5,93	307,000	16201,15	27,341	825,51
11:30:00	20,87	6,16	305,000	16632,54	26,896	847,49
11:40:00	20,9	6,38	303,000	17045,84	26,460	868,55
11:50:00	20,93	6,59	302,000	17442,55	26,142	888,76
12:00:00	20,96	6,79	300,000	17825,56	25,722	908,28
12:10:00	20,99	6,99	292,000	18194,29	24,660	927,06
12:20:00	21,02	7,17	283,000	18540,32	23,502	944,69
12:30:00	21,04	7,34	275,000	18863,58	22,464	961,16
12:40:00	21,06	7,5	267,000	19166,96	21,436	976,62
12:50:00	21,08	7,65	258,000	19451,55	20,310	991,12
13:00:00	21,1	7,79	250,000	19716,88	19,302	1004,64
13:10:00	21,12	7,92	240,000	19965,32	18,087	1017,3
13:20:00	21,14	8,04	230,000	20194,77	16,882	1028,99
13:30:00	21,16	8,16	220,000	20406,01	15,686	1039,75
13:40:00	21,17	8,26	210,000	20599,75	14,500	1049,62
13:50:00	21,18	8,35	200,000	20776,63	13,323	1058,63
14:00:00	21,2	8,44	190,000	20937,19	12,154	1066,81
14:10:00	21,21	8,51	175,000	21081,94	10,452	1074,19
14:20:00	21,22	8,58	160,000	21204,58	8,761	1080,44
14:30:00	21,22	8,63	145,000	21305,65	7,082	1085,59
14:40:00	21,23	8,67	130,000	21385,63	5,414	1089,66
14:50:00	21,23	8,71	115,000	21444,91	3,757	1092,68
15:00:00	21,24	8,73	100,000	21483,83	2,111	1094,66
15:10:00	21,24	8,74	85,000	21502,63	0,475	1095,62
15:20:00	21,24	8,74	70,000	21501,49	-1,150	1095,56
15:30:00	21,24	8,73	55,000	21480,56	-2,764	1094,5
15:40:00	21,23	8,7	40,000	21439,93	-4,368	1092,43
15:50:00	21,23	8,67	25,000	21379,63	-5,962	1089,36
16:00:00	21,22	8,63	10,000	21299,64	-7,545	1085,28
16:10:00	21,21	8,58	8,000	21199,89	-7,709	1080,2
16:20:00	21,21	8,52	7,000	21097,59	-7,764	1074,99
16:30:00	21,2	8,47	5,000	20994,06	-7,926	1069,71
16:40:00	21,19	8,41	3,000	20887,94	-8,086	1064,3
16:50:00	21,18	8,35	2,000	20779,21	-8,137	1058,76

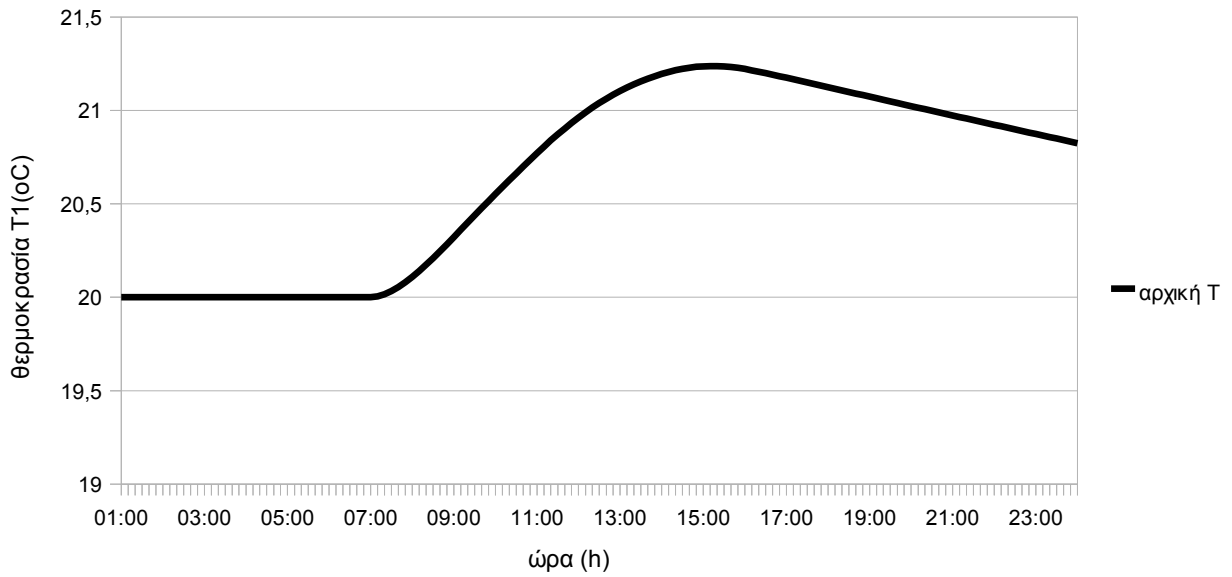
17:00:00	21,18	8,3	0	20669,22	-8,295	1053,16
17:10:00	21,17	8,24	0	20556,57	-8,236	1047,42
17:20:00	21,16	8,18	0	20443,96	-8,176	1041,68
17:30:00	21,15	8,12	0	20331,38	-8,117	1035,95
17:40:00	21,14	8,06	0	20218,84	-8,057	1030,21
17:50:00	21,13	8	0	20106,33	-7,997	1024,48
18:00:00	21,12	7,94	0	19993,86	-7,938	1018,75
18:10:00	21,12	7,88	0	19881,42	-7,878	1013,02
18:20:00	21,11	7,82	0	19769	-7,819	1007,29
18:30:00	21,1	7,76	0	19656,61	-7,759	1001,57
18:40:00	21,09	7,7	0	19544,23	-7,700	995,84
18:50:00	21,08	7,64	0	19431,88	-7,640	990,12
19:00:00	21,07	7,58	0	19319,56	-7,581	984,4
19:10:00	21,07	7,52	0	19207,25	-7,521	978,67
19:20:00	21,06	7,46	0	19095,01	-7,462	972,95
19:30:00	21,05	7,4	0	18982,82	-7,403	967,24
19:40:00	21,04	7,34	0	18870,7	-7,343	961,53
19:50:00	21,03	7,28	0	18758,64	-7,284	955,82
20:00:00	21,02	7,22	0	18646,64	-7,225	950,11
20:10:00	21,02	7,17	0	18534,7	-7,165	944,41
20:20:00	21,01	7,11	0	18422,88	-7,106	938,71
20:30:00	21	7,05	0	18311,19	-7,047	933,02
20:40:00	20,99	6,99	0	18199,63	-6,988	927,33
20:50:00	20,98	6,93	0	18088,19	-6,929	921,66
21:00:00	20,97	6,87	0	17976,88	-6,870	915,99
21:10:00	20,96	6,81	0	17865,7	-6,811	910,32
21:20:00	20,96	6,75	0	17754,7	-6,752	904,67
21:30:00	20,95	6,69	0	17643,87	-6,694	899,02
21:40:00	20,94	6,64	0	17533,22	-6,635	893,38
21:50:00	20,93	6,58	0	17422,76	-6,577	887,75
22:00:00	20,92	6,52	0	17312,47	-6,518	882,13
22:10:00	20,92	6,46	0	17202,37	-6,460	876,52
22:20:00	20,91	6,4	0	17092,45	-6,402	870,92
22:30:00	20,9	6,34	0	16982,72	-6,344	865,33
22:40:00	20,89	6,29	0	16873,18	-6,286	859,75
22:50:00	20,88	6,23	0	16763,83	-6,228	854,18
23:00:00	20,87	6,17	0	16654,67	-6,170	848,62
23:10:00	20,87	6,11	0	16545,7	-6,112	843,07
23:20:00	20,86	6,05	0	16436,89	-6,055	837,52
23:30:00	20,85	6	0	16328,25	-5,997	831,99
23:40:00	20,84	5,94	0	16219,77	-5,940	826,46
23:50:00	20,83	5,88	0	16111,46	-5,883	820,94
24:00:00	20,83	5,83	0	16003,31	-5,825	815,43

Πίνακας 11.3.2

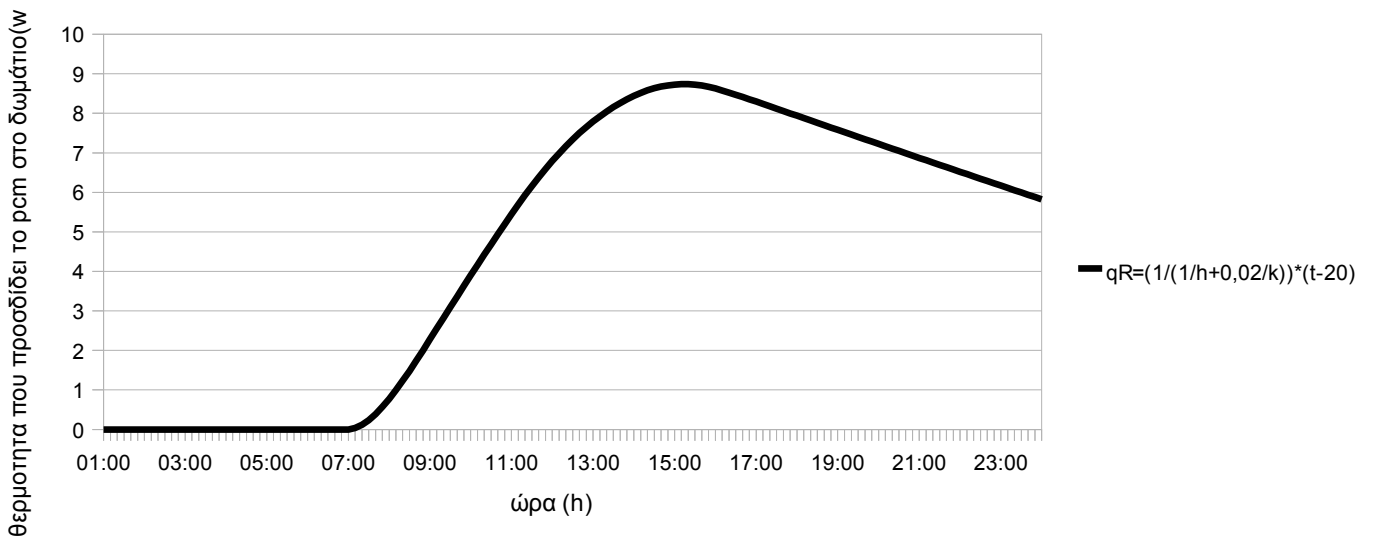
time	$(Ac/A\delta a\pi)*Fr*UL*Ta$	to	$(m\pi cm*C\pi eff*T1)/(\Delta t*A)$	b	T2	Qu	qs	qrcm	qαπώλ	συμπλ
01:00:00	0,52	8,2	5095	5095,52	20	0	0	0	-41,27	41,27
01:10:00	0,52	8,14	5095	5095,52	20	0	0	0	-42,07	42,07
01:20:00	0,51	8,07	5095	5095,51	20	0	0	0	-42,86	42,86
01:30:00	0,51	8,01	5095	5095,51	20	0	0	0	-43,66	43,66
01:40:00	0,51	7,94	5095	5095,51	20	0	0	0	-44,45	44,45
01:50:00	0,5	7,88	5095	5095,5	20	0	0	0	-45,25	45,25
02:00:00	0,5	7,81	5095	5095,5	20	0	0	0	-46,05	46,05
02:10:00	0,5	7,77	5095	5095,5	20	0	0	0	-46,75	46,75
02:20:00	0,49	7,74	5095	5095,49	20	0	0	0	-47,46	47,46
02:30:00	0,49	7,7	5095	5095,49	20	0	0	0	-48,16	48,16
02:40:00	0,49	7,66	5095	5095,49	20	0	0	0	-48,87	48,87
02:50:00	0,49	7,63	5095	5095,49	20	0	0	0	-49,57	49,57
03:00:00	0,48	7,59	5095	5095,48	20	0	0	0	-50,28	50,28
03:10:00	0,48	7,57	5095	5095,48	20	0	0	0	-50,68	50,68
03:20:00	0,48	7,54	5095	5095,48	20	0	0	0	-51,07	51,07
03:30:00	0,48	7,52	5095	5095,48	20	0	0	0	-51,47	51,47
03:40:00	0,48	7,5	5095	5095,48	20	0	0	0	-51,86	51,86
03:50:00	0,48	7,47	5095	5095,48	20	0	0	0	-52,26	52,26
04:00:00	0,47	7,45	5095	5095,47	20	0	0	0	-52,66	52,66
04:10:00	0,47	7,42	5095	5095,47	20	0	0	0	-53,1	53,1
04:20:00	0,47	7,39	5095	5095,47	20	0	0	0	-53,53	53,53
04:30:00	0,47	7,36	5095	5095,47	20	0	0	0	-53,97	53,97
04:40:00	0,47	7,32	5095	5095,47	20	0	0	0	-54,4	54,4
04:50:00	0,46	7,29	5095	5095,46	20	0	0	0	-54,84	54,84
05:00:00	0,46	7,26	5095	5095,46	20	0	0	0	-55,28	55,28
05:10:00	0,46	7,22	5095	5095,46	20	0	0	0	-55,76	55,76
05:20:00	0,46	7,18	5095	5095,46	20	0	0	0	-56,23	56,23
05:30:00	0,46	7,14	5095	5095,46	20	0	0	0	-56,71	56,71
05:40:00	0,45	7,1	5095	5095,45	20	0	0	0	-57,18	57,18
05:50:00	0,45	7,06	5095	5095,45	20	0	0	0	-57,66	57,66
06:00:00	0,45	7,02	5095	5095,45	20	0	0	0	-58,13	58,13
06:10:00	0,45	7,01	5095	5095,45	20	0	0	0	-58,52	58,52
06:20:00	0,45	6,99	5095	5095,45	20	0	0	0	-58,91	58,91
06:30:00	0,44	6,98	5095	5095,44	20	0	0	0	-59,3	59,3
06:40:00	0,44	6,97	5095	5095,44	20	0	0	0	-59,69	59,69
06:50:00	0,44	6,95	5095	5095,44	20	0	0	0	-60,08	60,08
07:00:00	0,44	6,94	5095	5097,61	20,01	0,09	0	0	-60,47	60,47
07:10:00	0,45	7	5167,53	5171,73	20,02	0,19	0	0,04	-56,32	56,28
07:20:00	0,45	7,07	5324,52	5330,27	20,03	0,28	0	0,11	-52,17	52,05
07:30:00	0,45	7,13	5557,95	5565,21	20,05	0,36	0	0,23	-48,02	47,78
07:40:00	0,46	7,19	5857,83	5866,57	20,08	0,43	0	0,38	-43,87	43,48
07:50:00	0,46	7,26	6213,71	6223,9	20,11	0,48	0	0,56	-39,72	39,15
08:00:00	0,47	7,32	6615,88	6627,5	20,14	0,52	0,01	0,77	-35,57	34,8
08:10:00	0,48	7,47	7055,92	7068,95	20,17	0,56	0,01	0,99	-34,89	33,89
08:20:00	0,49	7,62	7527,09	7541,52	20,21	0,59	0,01	1,22	-34,2	32,97
08:30:00	0,5	7,77	8023,75	8039,56	20,25	0,61	0,01	1,47	-33,52	32,04
08:40:00	0,51	7,93	8541,43	8558,62	20,28	0,63	0,01	1,73	-32,83	31,09
08:50:00	0,51	8,08	9076,63	9095,19	20,32	0,64	0,01	2	-32,15	30,14

09:00:00	0,52	8,23	9626,59	9646,51	20,36	0,66	0,01	2,27	-31,46	29,18
09:10:00	0,54	8,44	10189,13	10209,87	20,4	0,65	0,01	2,55	-30,48	27,93
09:20:00	0,55	8,64	10747,05	10768,62	20,44	0,64	0,01	2,82	-29,51	26,68
09:30:00	0,56	8,85	11301,39	11323,78	20,48	0,64	0,01	3,09	-28,53	25,43
09:40:00	0,58	9,05	11852,97	11876,19	20,51	0,63	0,01	3,36	-27,56	24,19
09:50:00	0,59	9,26	12402,44	12426,48	20,55	0,63	0,01	3,63	-26,58	22,95
10:00:00	0,6	9,46	12950,32	12975,2	20,59	0,62	0,01	3,89	-25,6	21,7
10:10:00	0,62	9,66	13497,05	13522,55	20,63	0,62	0,01	4,16	-24,26	20,1
10:20:00	0,63	9,85	14038,13	14064,35	20,66	0,61	0,01	4,42	-22,92	18,5
10:30:00	0,64	10,05	14576,74	14603,58	20,7	0,6	0,01	4,68	-21,58	16,9
10:40:00	0,65	10,25	15111,07	15138,54	20,74	0,6	0,01	4,93	-20,24	15,3
10:50:00	0,67	10,44	15641,74	15669,94	20,77	0,6	0,01	5,19	-18,9	13,71
11:00:00	0,68	10,64	16171,42	16200,25	20,81	0,59	0,01	5,44	-17,56	12,12
11:10:00	0,69	10,78	16698,27	16726,65	20,84	0,56	0,01	5,69	-16,4	10,71
11:20:00	0,7	10,92	17202,42	17230,46	20,87	0,54	0,01	5,92	-15,25	9,32
11:30:00	0,71	11,06	17687,89	17715,49	20,9	0,52	0,01	6,15	-14,09	7,93
11:40:00	0,71	11,2	18154,34	18181,51	20,93	0,5	0	6,37	-12,94	6,56
11:50:00	0,72	11,34	18603,28	18630,15	20,96	0,48	0	6,58	-11,78	5,19
12:00:00	0,73	11,48	19037,87	19064,33	20,99	0,46	0	6,79	-10,62	3,83
12:10:00	0,74	11,56	19457,31	19482,71	21,02	0,43	0	6,98	-9,22	2,24
12:20:00	0,74	11,64	19851,88	19876,12	21,04	0,4	0	7,16	-7,83	0,66
12:30:00	0,75	11,72	20221,31	20244,52	21,06	0,38	0	7,34	-6,43	-0,91
12:40:00	0,75	11,8	20568,74	20590,93	21,08	0,36	0	7,5	-5,04	-2,46
12:50:00	0,76	11,88	20895,3	20916,37	21,1	0,33	0	7,65	-3,64	-4,01
13:00:00	0,76	11,96	21200,32	21220,38	21,12	0,31	0	7,79	-2,24	-5,55
13:10:00	0,77	12	21486,41	21505,26	21,14	0,29	0	7,92	-1,36	-6,56
13:20:00	0,77	12,05	21751,04	21768,69	21,16	0,26	0	8,04	-0,49	-7,56
13:30:00	0,77	12,09	21995,03	22011,48	21,17	0,24	0	8,15	0,39	-8,54
13:40:00	0,77	12,13	22219,11	22234,38	21,18	0,22	0	8,26	1,26	-9,52
13:50:00	0,78	12,18	22423,93	22438,03	21,2	0,2	0	8,35	2,14	-10,49
14:00:00	0,78	12,22	22610,07	22623,01	21,21	0,18	0	8,44	3,02	-11,46
14:10:00	0,78	12,24	22778,05	22789,29	21,22	0,15	0	8,51	4,22	-12,73
14:20:00	0,78	12,26	22920,49	22930,04	21,22	0,13	0	8,58	5,42	-14
14:30:00	0,78	12,28	23037,97	23045,84	21,23	0,1	0	8,63	6,62	-15,25
14:40:00	0,78	12,3	23130,99	23137,19	21,23	0,07	0	8,67	7,82	-16,49
14:50:00	0,79	12,32	23199,97	23204,51	21,24	0,05	0	8,71	9,02	-17,73
15:00:00	0,79	12,34	23245,26	23248,16	21,24	0,02	0	8,73	10,22	-18,95
15:10:00	0,79	12,32	23267,15	23268,41	21,24	0	0	8,74	7,02	-15,75
15:20:00	0,78	12,3	23265,82	23265,46	21,24	0	0	8,74	3,81	-12,55
15:30:00	0,78	12,28	23241,46	23239,48	21,23	0	0	8,73	0,61	-9,34
15:40:00	0,78	12,26	23194,17	23190,58	21,23	0	0	8,7	-2,59	-6,11
15:50:00	0,78	12,24	23124,01	23118,83	21,22	0	0	8,67	-5,8	-2,88
16:00:00	0,78	12,22	23030,98	23024,22	21,21	0	0	8,63	-9	0,37
16:10:00	0,77	12,14	22915,04	22908,11	21,21	0	0	8,58	-9,02	0,44
16:20:00	0,77	12,06	22796,22	22789,22	21,2	0	0	8,52	-9,04	0,52
16:30:00	0,76	11,98	22676,05	22668,88	21,19	0	0	8,47	-9,06	0,59
16:40:00	0,76	11,89	22552,96	22545,63	21,18	0	0	8,41	-9,08	0,67
16:50:00	0,75	11,81	22426,93	22419,55	21,18	0	0	8,35	-9,1	0,75

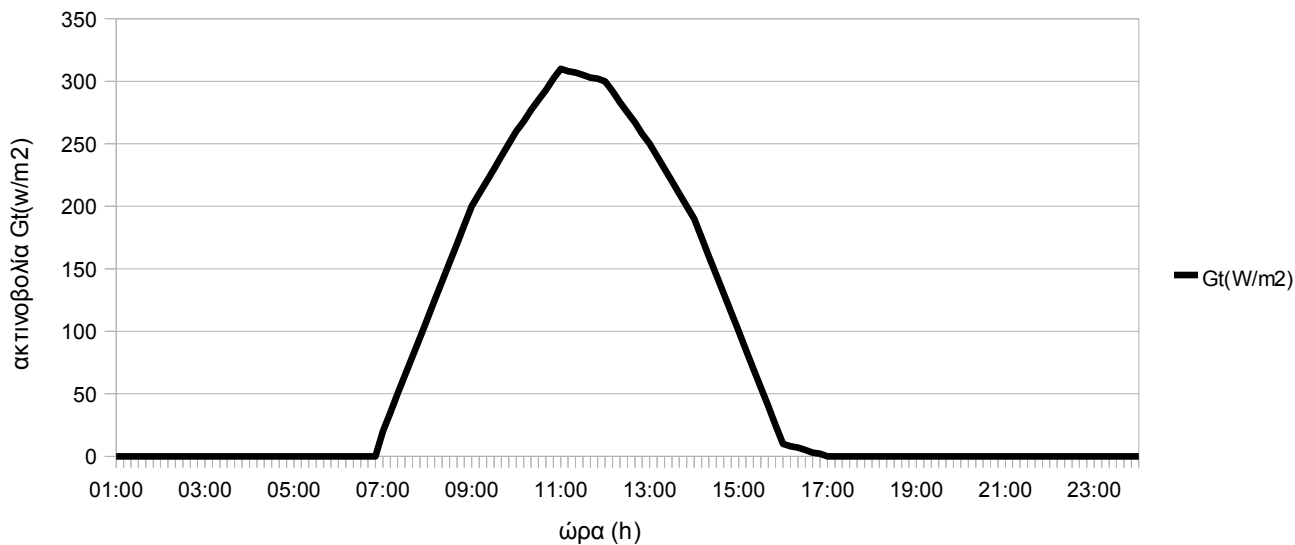
17:00:00	0,75	11,73	22299,53	22291,98	21,17	0	0	8,3	-9,12	0,82
17:10:00	0,74	11,59	22169,15	22161,65	21,16	0	0	8,24	-9,16	0,92
17:20:00	0,73	11,45	22038,9	22031,45	21,15	0	0	8,18	-9,2	1,02
17:30:00	0,72	11,31	21908,79	21901,4	21,14	0	0	8,12	-9,24	1,12
17:40:00	0,71	11,16	21778,82	21771,48	21,13	0	0	8,06	-9,28	1,22
17:50:00	0,7	11,02	21648,99	21641,69	21,12	0	0	8	-9,32	1,32
18:00:00	0,69	10,88	21519,29	21512,05	21,12	0	0	7,94	-9,36	1,42
18:10:00	0,68	10,72	21389,73	21382,54	21,11	0	0	7,88	-9,9	2,02
18:20:00	0,67	10,56	21260,3	21253,15	21,1	0	0	7,82	-10,45	2,63
18:30:00	0,66	10,41	21130,98	21123,88	21,09	0	0	7,76	-10,99	3,23
18:40:00	0,65	10,25	21001,79	20994,74	21,08	0	0	7,7	-11,53	3,83
18:50:00	0,64	10,09	20872,72	20865,72	21,07	0	0	7,64	-12,08	4,43
19:00:00	0,63	9,93	20743,77	20736,82	21,07	0	0	7,58	-12,62	5,04
19:10:00	0,63	9,81	20614,94	20608,05	21,06	0	0	7,52	-13,52	5,99
19:20:00	0,62	9,7	20486,28	20479,44	21,05	0	0	7,46	-14,41	6,95
19:30:00	0,61	9,58	20357,78	20350,99	21,04	0	0	7,4	-15,31	7,9
19:40:00	0,6	9,46	20229,45	20222,71	21,03	0	0	7,34	-16,2	8,86
19:50:00	0,6	9,35	20101,29	20094,6	21,02	0	0	7,28	-17,1	9,81
20:00:00	0,59	9,23	19973,29	19966,66	21,02	0	0	7,22	-17,99	10,77
20:10:00	0,59	9,18	19845,46	19838,88	21,01	0	0	7,17	-18,62	11,45
20:20:00	0,58	9,13	19717,87	19711,34	21	0	0	7,11	-19,25	12,14
20:30:00	0,58	9,08	19590,51	19584,04	20,99	0	0	7,05	-19,87	12,83
20:40:00	0,58	9,03	19463,39	19456,98	20,98	0	0	6,99	-20,5	13,52
20:50:00	0,57	8,98	19336,51	19330,16	20,97	0	0	6,93	-21,13	14,2
21:00:00	0,57	8,93	19209,88	19203,58	20,96	0	0	6,87	-21,76	14,89
21:10:00	0,57	8,93	19083,48	19077,24	20,96	0	0	6,81	-22,39	15,58
21:20:00	0,57	8,92	18957,38	18951,2	20,95	0	0	6,75	-23,03	16,27
21:30:00	0,57	8,92	18831,58	18825,45	20,94	0	0	6,69	-23,66	16,97
21:40:00	0,57	8,92	18706,07	18700	20,93	0	0	6,64	-24,29	17,66
21:50:00	0,57	8,91	18580,85	18574,85	20,92	0	0	6,58	-24,93	18,35
22:00:00	0,57	8,91	18455,94	18449,99	20,92	0	0	6,52	-25,56	19,04
22:10:00	0,57	8,9	18331,33	18325,44	20,91	0	0	6,46	-26,01	19,55
22:20:00	0,57	8,9	18207,02	18201,19	20,9	0	0	6,4	-26,47	20,06
22:30:00	0,57	8,89	18083,02	18077,24	20,89	0	0	6,34	-26,92	20,58
22:40:00	0,57	8,88	17959,31	17953,59	20,88	0	0	6,29	-27,37	21,09
22:50:00	0,57	8,88	17835,92	17830,25	20,87	0	0	6,23	-27,83	21,6
23:00:00	0,57	8,87	17712,83	17707,22	20,87	0	0	6,17	-28,28	22,11
23:10:00	0,56	8,83	17590,05	17584,5	20,86	0	0	6,11	-29,11	22,99
23:20:00	0,56	8,79	17467,54	17462,04	20,85	0	0	6,05	-29,93	23,88
23:30:00	0,56	8,75	17345,3	17339,86	20,84	0	0	6	-30,76	24,76
23:40:00	0,55	8,7	17223,34	17217,96	20,83	0	0	5,94	-31,59	25,65
23:50:00	0,55	8,66	17101,66	17096,33	20,83	0	0	5,88	-32,41	26,53
24:00:00	0,55	8,62	16980,26	16974,98	20,82	0	0	5,83	-33,24	27,41



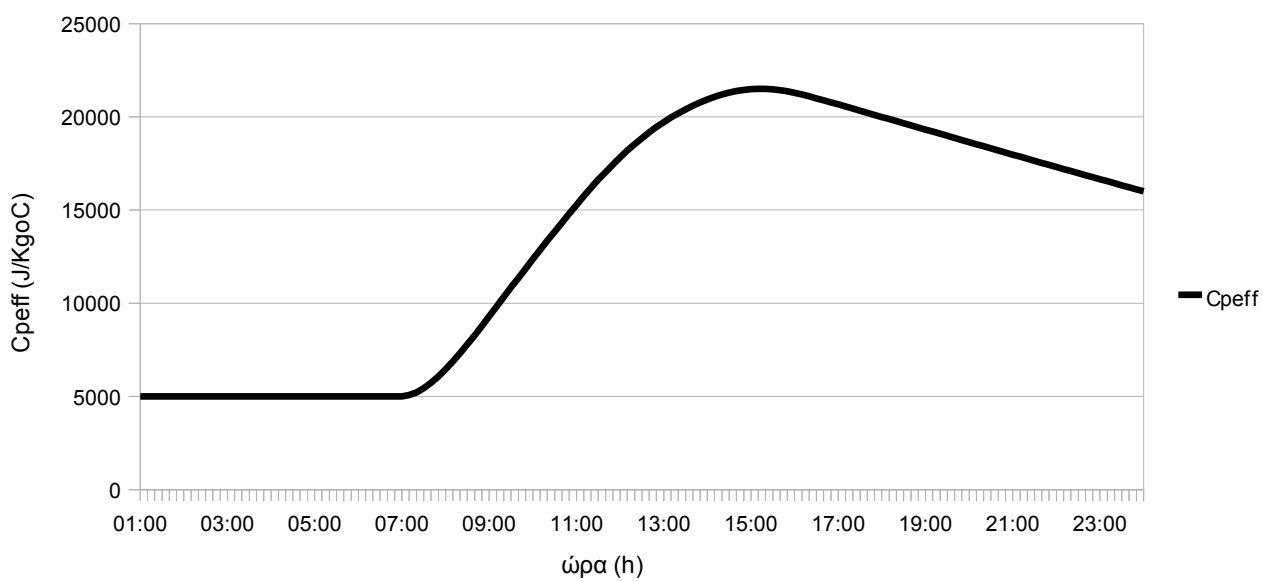
Εικόνα 11.3.1: Κατανομή της θερμοκρασίας T1 συναρτήσει της ώρας



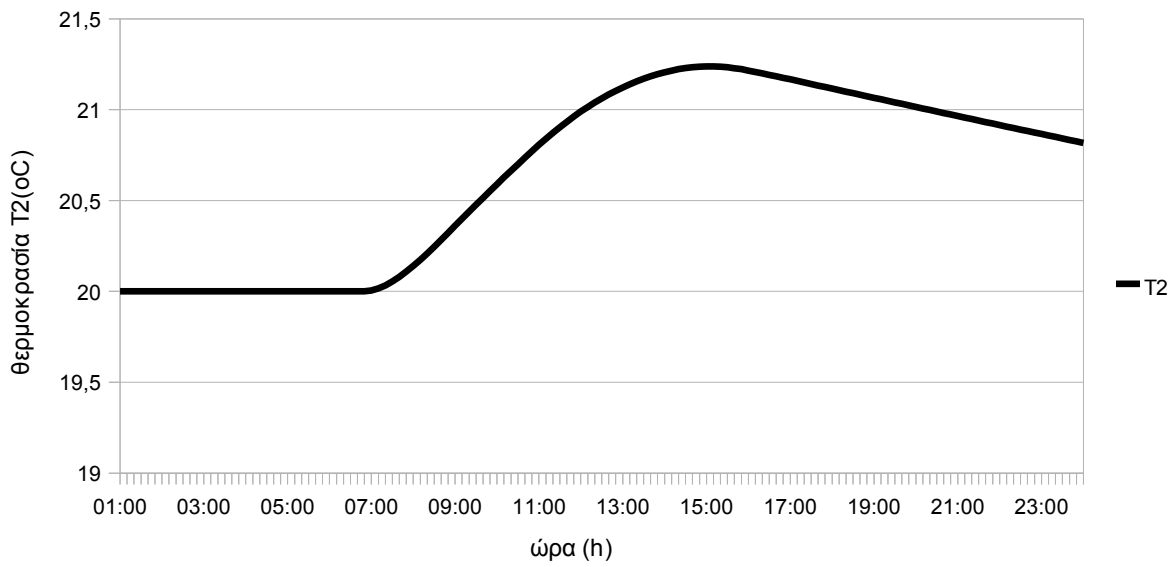
Εικόνα 11.3.2: Κατανομή της Θερμοτητας που προσδίδει το pcm στο δωμάτιο συναρτήσει της ώρας



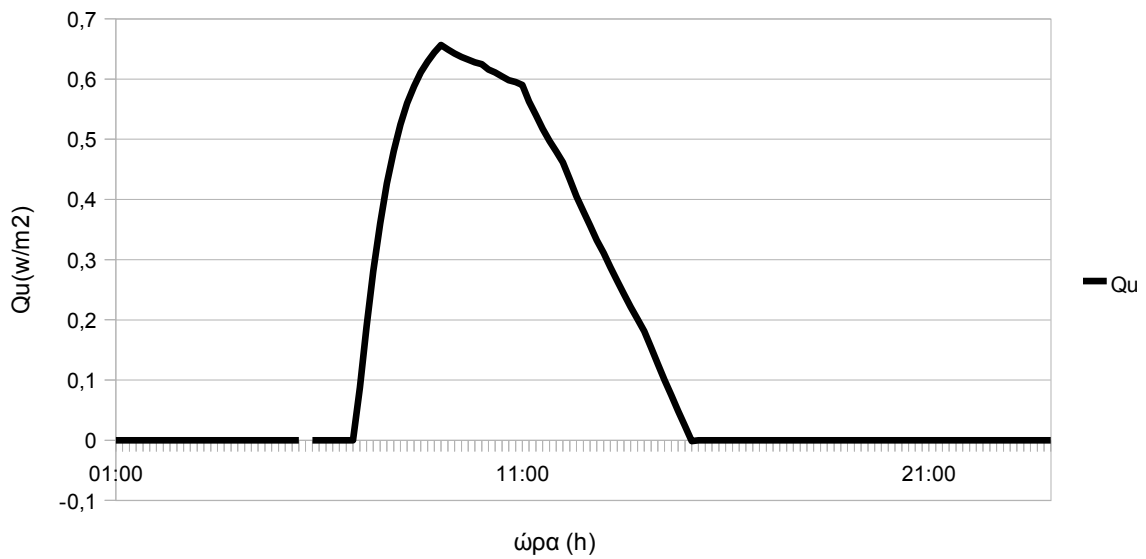
Εικόνα 11.3.3: Κατανομή της ακτινοβολίας Gt συναρτήσει της ώρας



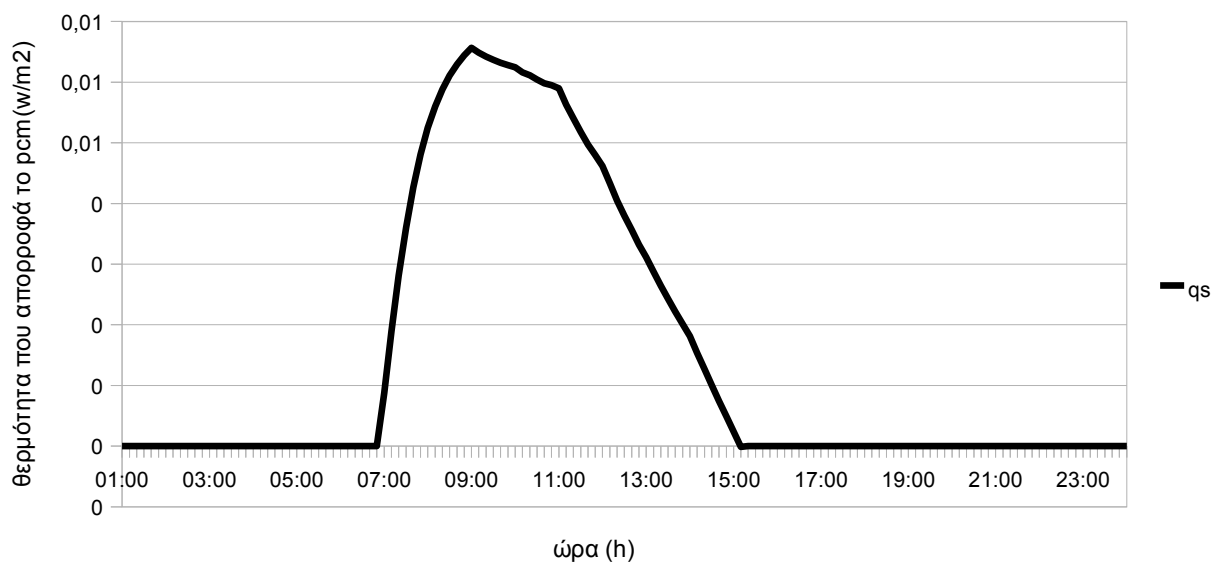
Εικόνα 11.3.4: Κατανομή του Cpeff συναρτήσει της ώρας



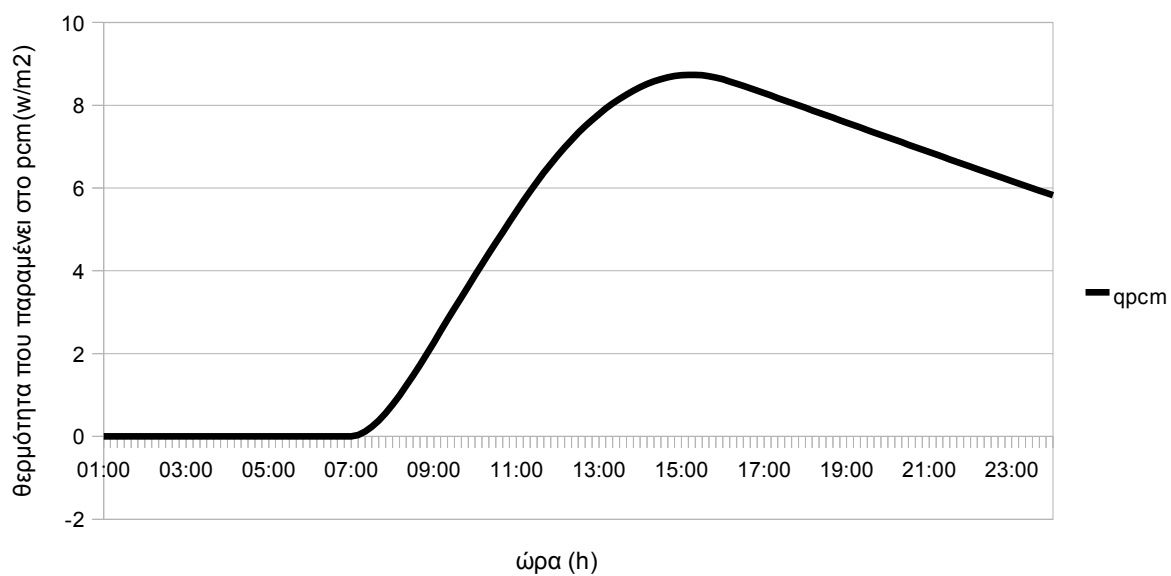
Εικόνα 11.3.5 : Κατανομή της θερμοκρασίας T_2 συναρτήσει της ώρας



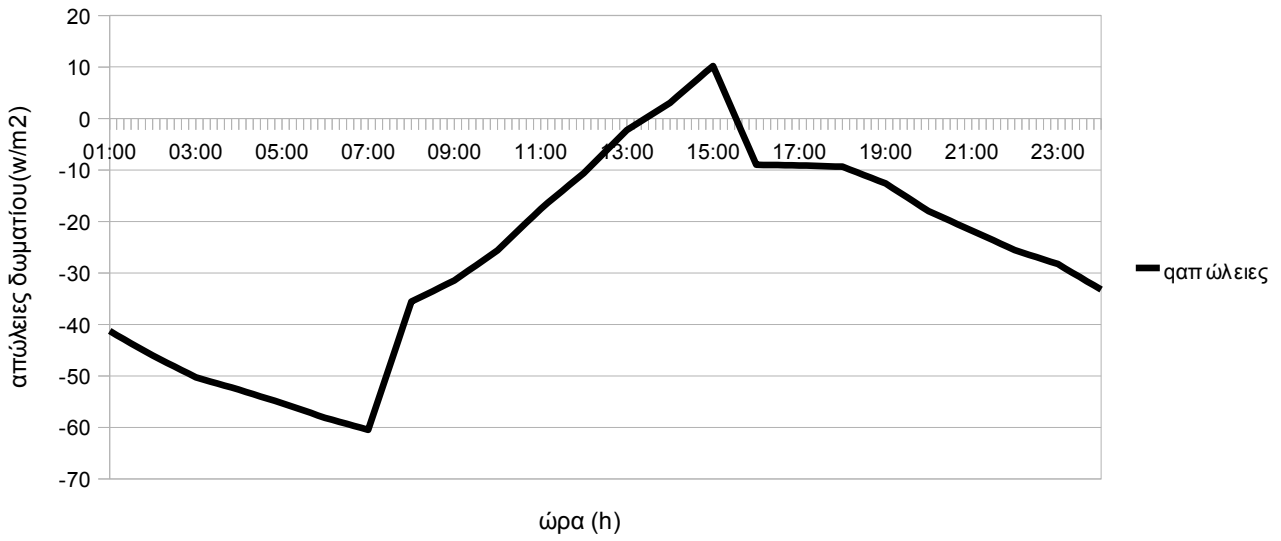
Εικόνα 11.3.6: Κατανομή της θερμότητας ηλιακών συλλεκτών, Q_u , συναρτήσει της ώρας



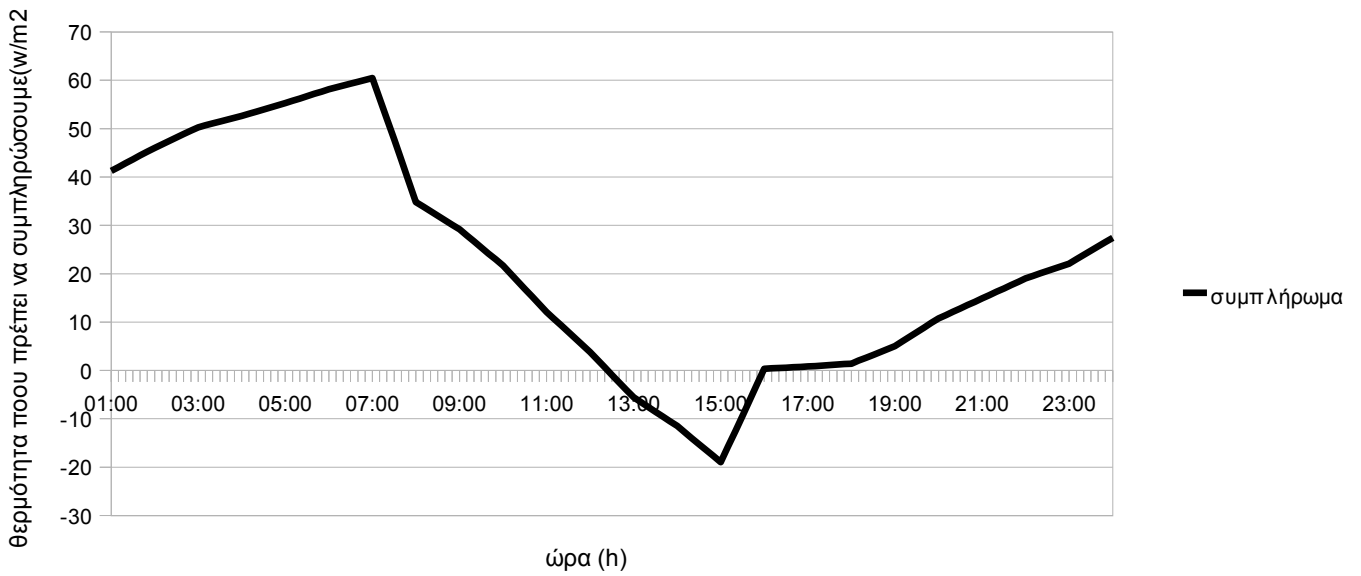
Εικόνα 11.3.7: Κατανομή της θερμότητας που απορροφά το pcm συναρτήσει της ώρας



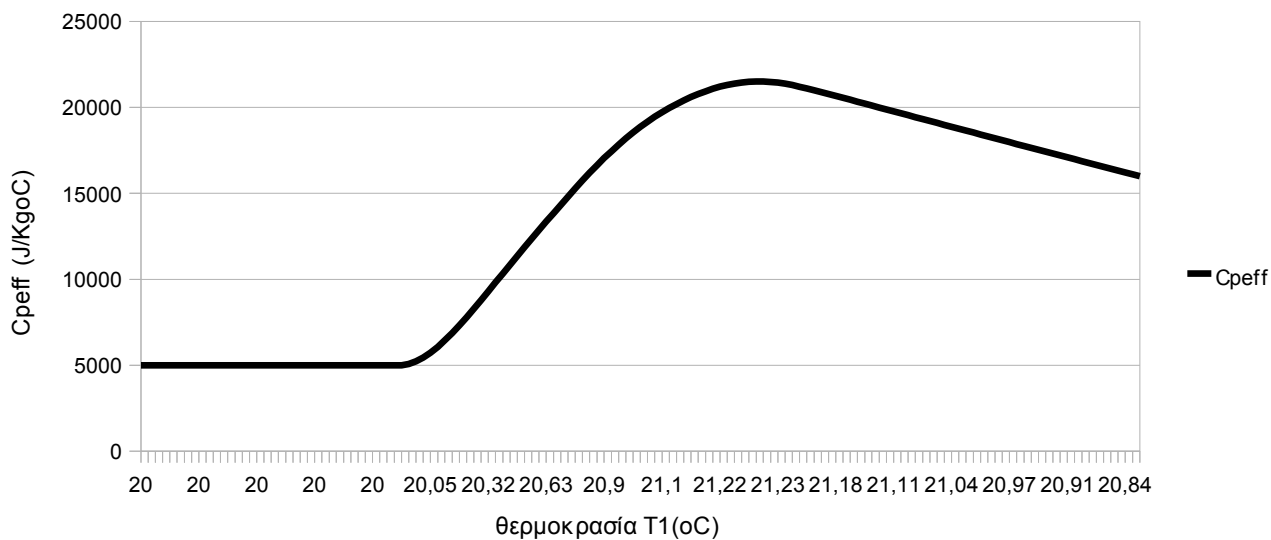
Εικόνα 11.3.8: Κατανομή της θερμότητας που παραμένει στο Pcm συναρτήσει της ώρας



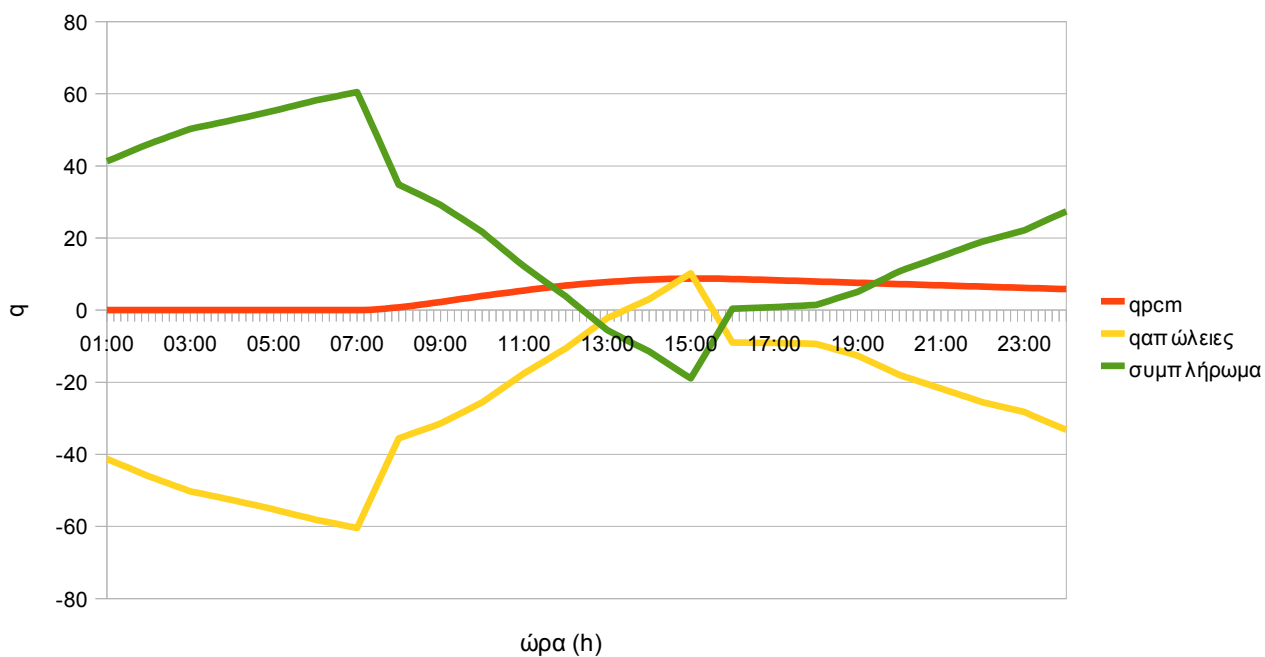
Εικόνα 11.3.9: Κατανομή των απωλειών δωματίου συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.3.10: Κατανομή της θερμότητας που πρέπει να συμπληρώσουμε ώστε η θερμοκρασία του δωματίου να μένει ίση με 20°C συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.3.11: Κατανομή του C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας



Εικόνα 11.3.12: Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής των q_{rcm}, q_{απ ωλεις} και συμπλήρωματος συναρτήσει της ώρας

11.4 Παραλλαγή της εφαρμογής 11.1- Αύξηση της έκτασης ηλιακών συλλεκτών

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε το pcm που επιλέξαμε αλλά αυξάνουμε την έκταση των ηλιακών συλλεκτών που έχουμε τοποθετήσει στην ταράτσα. Αντί δηλαδή των 30m² που είχαμε τοποθετήσει στην πρώτη περίπτωση, τώρα αυξάνουμε την έκταση στα 60m² και επαναλαμβάνουμε την αρχική διαδικασία.

Πίνακας 11.4.1

time	αρχική T	$q_R=(1/(1/h+0,02/k))*(t-20)$	Gt(W/m2)	Cpeff	$(Ac/A\delta\alpha\pi)*Fr*Gt*\tau_a-q_R$	$m\text{pcm}*Cpeff/(\Delta t*A)+(Ac/A\delta\alpha\pi)*Fr*U_i$
01:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
01:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
01:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
01:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
01:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
01:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
02:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
02:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
02:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
02:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
02:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
02:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
03:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
03:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
03:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
03:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
03:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
03:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
04:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
04:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
04:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
04:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
04:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
04:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
05:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
05:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
05:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
05:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
05:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
05:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
06:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
06:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
06:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
06:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
06:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
06:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
07:00:00	20	0	20,000	5000	8,670	255,01
07:10:00	20,02	0,15	35,000	5279,19	15,025	269,23
07:20:00	20,06	0,45	50,000	5858,88	21,220	298,77
07:30:00	20,12	0,88	65,000	6657,99	27,300	339,48
07:40:00	20,2	1,38	80,000	7600,06	33,303	387,48
07:50:00	20,27	1,92	95,000	8631,97	39,260	440,05
08:00:00	20,35	2,5	110,000	9720,94	45,186	495,54
08:10:00	20,44	3,1	125,000	10847,32	51,092	552,93
08:20:00	20,52	3,71	140,000	11999,62	56,984	611,64
08:30:00	20,61	4,33	155,000	13170,13	62,867	671,27
08:40:00	20,7	4,95	170,000	14353,82	68,743	731,58
08:50:00	20,79	5,58	185,000	15547,31	74,614	792,39

09:00:00	20,88	6,22	200,000	16748,27	80,480	853,58
09:10:00	20,97	6,86	210,000	17955,02	84,176	915,06
09:20:00	21,06	7,48	220,000	19134,97	87,887	975,18
09:30:00	21,15	8,1	230,000	20293,31	91,609	1034,2
09:40:00	21,23	8,7	240,000	21433,92	95,340	1092,31
09:50:00	21,32	9,3	250,000	22559,77	99,079	1149,68
10:00:00	21,4	9,89	260,000	23673,16	102,824	1206,4
10:10:00	21,48	10,47	268,000	24775,94	105,708	1262,59
10:20:00	21,56	11,04	277,000	25860,4	109,036	1317,84
10:30:00	21,65	11,61	285,000	26933,36	111,936	1372,51
10:40:00	21,72	12,17	293,000	27992,04	114,843	1426,45
10:50:00	21,8	12,73	302,000	29038,15	118,191	1479,75
11:00:00	21,88	13,28	310,000	30077,01	121,109	1532,68
11:10:00	21,96	13,82	308,000	31105,65	119,697	1585,09
11:20:00	22,03	14,34	307,000	32088,53	118,744	1635,17
11:30:00	22,1	14,84	305,000	33033,68	117,376	1683,32
11:40:00	22,17	15,32	303,000	33941,09	116,029	1729,55
11:50:00	22,24	15,78	302,000	34814,01	115,133	1774,03
12:00:00	22,3	16,23	300,000	35658,45	113,819	1817,05
12:10:00	22,36	16,66	292,000	36473,39	109,920	1858,57
12:20:00	22,42	17,07	283,000	37242,19	105,611	1897,74
12:30:00	22,47	17,45	275,000	37964,89	101,760	1934,57
12:40:00	22,52	17,81	267,000	38647,35	97,931	1969,34
12:50:00	22,57	18,15	258,000	39291,87	93,688	2002,18
13:00:00	22,62	18,48	250,000	39897,63	89,900	2033,04
13:10:00	22,66	18,78	240,000	40469,4	85,262	2062,17
13:20:00	22,7	19,06	230,000	41003,1	80,645	2089,36
13:30:00	22,74	19,32	220,000	41500,4	76,046	2114,7
13:40:00	22,77	19,57	210,000	41962,76	71,466	2138,26
13:50:00	22,8	19,8	200,000	42391,48	66,905	2160,1
14:00:00	22,83	20,01	190,000	42787,72	62,360	2180,29
14:10:00	22,86	20,2	175,000	43152,53	55,664	2198,88
14:20:00	22,89	20,37	160,000	43473,63	48,992	2215,24
14:30:00	22,91	20,52	145,000	43752,2	42,342	2229,43
14:40:00	22,92	20,64	130,000	43989,22	35,714	2241,51
14:50:00	22,94	20,75	115,000	44185,55	29,107	2251,51
15:00:00	22,95	20,83	100,000	44341,88	22,522	2259,47
15:10:00	22,96	20,89	85,000	44458,82	15,958	2265,43
15:20:00	22,97	20,93	70,000	44536,77	9,414	2269,4
15:30:00	22,97	20,95	55,000	44576,1	2,890	2271,41
15:40:00	22,97	20,95	40,000	44577,07	-3,613	2271,46
15:50:00	22,97	20,93	25,000	44539,84	-10,095	2269,56
16:00:00	22,96	20,89	10,000	44464,46	-16,558	2265,72
16:10:00	22,95	20,83	8,000	44350,9	-17,365	2259,93
16:20:00	22,94	20,77	7,000	44232,18	-17,735	2253,88
16:30:00	22,93	20,71	5,000	44110,84	-18,538	2247,7
16:40:00	22,92	20,64	3,000	43984,3	-19,338	2241,26
16:50:00	22,91	20,57	2,000	43852,52	-19,702	2234,54

17:00:00	22,9	20,5	0	43718,07	-20,498	2227,69
17:10:00	22,89	20,42	0	43578,33	-20,424	2220,57
17:20:00	22,88	20,35	0	43438,39	-20,350	2213,44
17:30:00	22,87	20,28	0	43298,24	-20,276	2206,3
17:40:00	22,86	20,2	0	43157,88	-20,201	2199,15
17:50:00	22,85	20,13	0	43017,31	-20,127	2191,99
18:00:00	22,84	20,05	0	42876,54	-20,052	2184,81
18:10:00	22,83	19,98	0	42735,55	-19,978	2177,63
18:20:00	22,82	19,9	0	42594,33	-19,903	2170,44
18:30:00	22,81	19,83	0	42452,86	-19,828	2163,23
18:40:00	22,8	19,75	0	42311,15	-19,753	2156,01
18:50:00	22,79	19,68	0	42169,2	-19,678	2148,78
19:00:00	22,78	19,6	0	42027	-19,603	2141,53
19:10:00	22,77	19,53	0	41884,56	-19,527	2134,27
19:20:00	22,76	19,45	0	41741,94	-19,452	2127,01
19:30:00	22,74	19,38	0	41599,13	-19,376	2119,73
19:40:00	22,73	19,3	0	41456,13	-19,300	2112,45
19:50:00	22,72	19,22	0	41312,96	-19,225	2105,15
20:00:00	22,71	19,15	0	41169,59	-19,149	2097,85
20:10:00	22,7	19,07	0	41026,03	-19,073	2090,53
20:20:00	22,69	19	0	40882,4	-18,997	2083,21
20:30:00	22,68	18,92	0	40738,68	-18,920	2075,89
20:40:00	22,67	18,84	0	40594,88	-18,844	2068,56
20:50:00	22,66	18,77	0	40451	-18,768	2061,23
21:00:00	22,65	18,69	0	40307,03	-18,692	2053,9
21:10:00	22,64	18,62	0	40162,98	-18,616	2046,56
21:20:00	22,63	18,54	0	40018,92	-18,539	2039,22
21:30:00	22,62	18,46	0	39874,85	-18,463	2031,88
21:40:00	22,6	18,39	0	39730,78	-18,387	2024,54
21:50:00	22,59	18,31	0	39586,7	-18,311	2017,2
22:00:00	22,58	18,23	0	39442,61	-18,234	2009,86
22:10:00	22,57	18,16	0	39298,51	-18,158	2002,51
22:20:00	22,56	18,08	0	39154,4	-18,082	1995,17
22:30:00	22,55	18,01	0	39010,28	-18,005	1987,83
22:40:00	22,54	17,93	0	38866,14	-17,929	1980,48
22:50:00	22,53	17,85	0	38721,99	-17,853	1973,14
23:00:00	22,52	17,78	0	38577,83	-17,776	1965,8
23:10:00	22,51	17,7	0	38433,65	-17,700	1958,45
23:20:00	22,5	17,62	0	38289,4	-17,624	1951,1
23:30:00	22,49	17,55	0	38145,07	-17,547	1943,75
23:40:00	22,48	17,47	0	38000,66	-17,471	1936,39
23:50:00	22,46	17,39	0	37856,18	-17,394	1929,03
24:00:00	22,45	17,32	0	37711,63	-17,318	1921,66

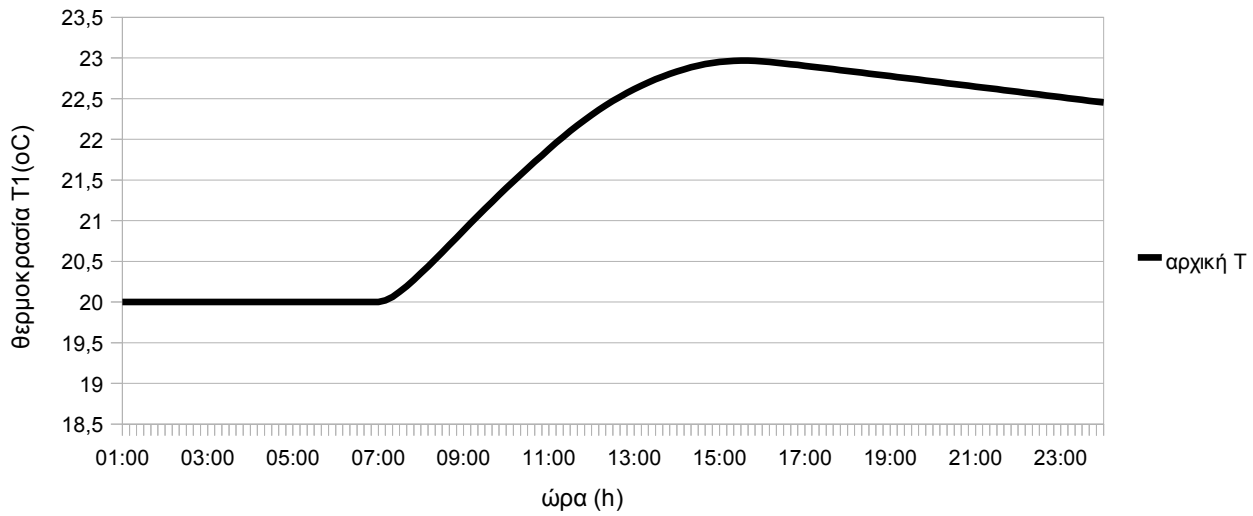
Πίνακας 11.4.2

time	(Ac/Aδaπ)*Fr*UL*Ta	to	(mpcm*Cpeff*T1)/(Δt*A)	b	T2	Qu	qs	qrcm	qαπώλ	συμπλ
01:00:00	2,09	8,2	5095	5097,09	20	0	0	0	-41,27	41,27
01:10:00	2,07	8,14	5095	5097,07	20	0	0	0	-42,07	42,07
01:20:00	2,06	8,07	5095	5097,06	20	0	0	0	-42,86	42,86
01:30:00	2,04	8,01	5095	5097,04	20	0	0	0	-43,66	43,66
01:40:00	2,02	7,94	5095	5097,02	20	0	0	0	-44,45	44,45
01:50:00	2,01	7,88	5095	5097,01	20	0	0	0	-45,25	45,25
02:00:00	1,99	7,81	5095	5096,99	20	0	0	0	-46,05	46,05
02:10:00	1,98	7,77	5095	5096,98	20	0	0	0	-46,75	46,75
02:20:00	1,97	7,74	5095	5096,97	20	0	0	0	-47,46	47,46
02:30:00	1,96	7,7	5095	5096,96	20	0	0	0	-48,16	48,16
02:40:00	1,95	7,66	5095	5096,95	20	0	0	0	-48,87	48,87
02:50:00	1,94	7,63	5095	5096,94	20	0	0	0	-49,57	49,57
03:00:00	1,94	7,59	5095	5096,94	20	0	0	0	-50,28	50,28
03:10:00	1,93	7,57	5095	5096,93	20	0	0	0	-50,68	50,68
03:20:00	1,92	7,54	5095	5096,92	20	0	0	0	-51,07	51,07
03:30:00	1,92	7,52	5095	5096,92	20	0	0	0	-51,47	51,47
03:40:00	1,91	7,5	5095	5096,91	20	0	0	0	-51,86	51,86
03:50:00	1,91	7,47	5095	5096,91	20	0	0	0	-52,26	52,26
04:00:00	1,9	7,45	5095	5096,9	20	0	0	0	-52,66	52,66
04:10:00	1,89	7,42	5095	5096,89	20	0	0	0	-53,1	53,1
04:20:00	1,88	7,39	5095	5096,88	20	0	0	0	-53,53	53,53
04:30:00	1,88	7,36	5095	5096,88	20	0	0	0	-53,97	53,97
04:40:00	1,87	7,32	5095	5096,87	20	0	0	0	-54,4	54,4
04:50:00	1,86	7,29	5095	5096,86	20	0	0	0	-54,84	54,84
05:00:00	1,85	7,26	5095	5096,85	20	0	0	0	-55,28	55,28
05:10:00	1,84	7,22	5095	5096,84	20	0	0	0	-55,76	55,76
05:20:00	1,83	7,18	5095	5096,83	20	0	0	0	-56,23	56,23
05:30:00	1,82	7,14	5095	5096,82	20	0	0	0	-56,71	56,71
05:40:00	1,81	7,1	5095	5096,81	20	0	0	0	-57,18	57,18
05:50:00	1,8	7,06	5095	5096,8	20	0	0	0	-57,66	57,66
06:00:00	1,79	7,02	5095	5096,79	20	0	0	0	-58,13	58,13
06:10:00	1,79	7,01	5095	5096,79	20	0	0	0	-58,52	58,52
06:20:00	1,78	6,99	5095	5096,78	20	0	0	0	-58,91	58,91
06:30:00	1,78	6,98	5095	5096,78	20	0	0	0	-59,3	59,3
06:40:00	1,78	6,97	5095	5096,78	20	0	0	0	-59,69	59,69
06:50:00	1,77	6,95	5095	5096,77	20	0	0	0	-60,08	60,08
07:00:00	1,77	6,94	5095	5105,44	20,02	0,35	0	0	-60,47	60,47
07:10:00	1,79	7	5385,13	5401,94	20,06	0,73	0,01	0,14	-56,32	56,17
07:20:00	1,8	7,07	5989,43	6012,45	20,12	1	0,01	0,44	-52,17	51,72
07:30:00	1,82	7,13	6826,67	6855,79	20,2	1,18	0,01	0,87	-48,02	47,14
07:40:00	1,83	7,19	7819,97	7855,11	20,27	1,29	0,01	1,36	-43,87	42,49
07:50:00	1,85	7,26	8915,78	8956,89	20,35	1,36	0,01	1,91	-39,72	37,8
08:00:00	1,87	7,32	10081,01	10128,06	20,44	1,41	0,01	2,49	-35,57	33,07
08:10:00	1,91	7,47	11295,79	11348,79	20,52	1,44	0,01	3,08	-34,89	31,79
08:20:00	1,94	7,62	12548,57	12607,5	20,61	1,47	0,01	3,69	-34,2	30,49
08:30:00	1,98	7,77	13831,53	13896,38	20,7	1,48	0,01	4,31	-33,52	29,19
08:40:00	2,02	7,93	15139,6	15210,36	20,79	1,49	0,01	4,94	-32,83	27,88
08:50:00	2,06	8,08	16469,33	16546	20,88	1,5	0,02	5,57	-32,15	26,56

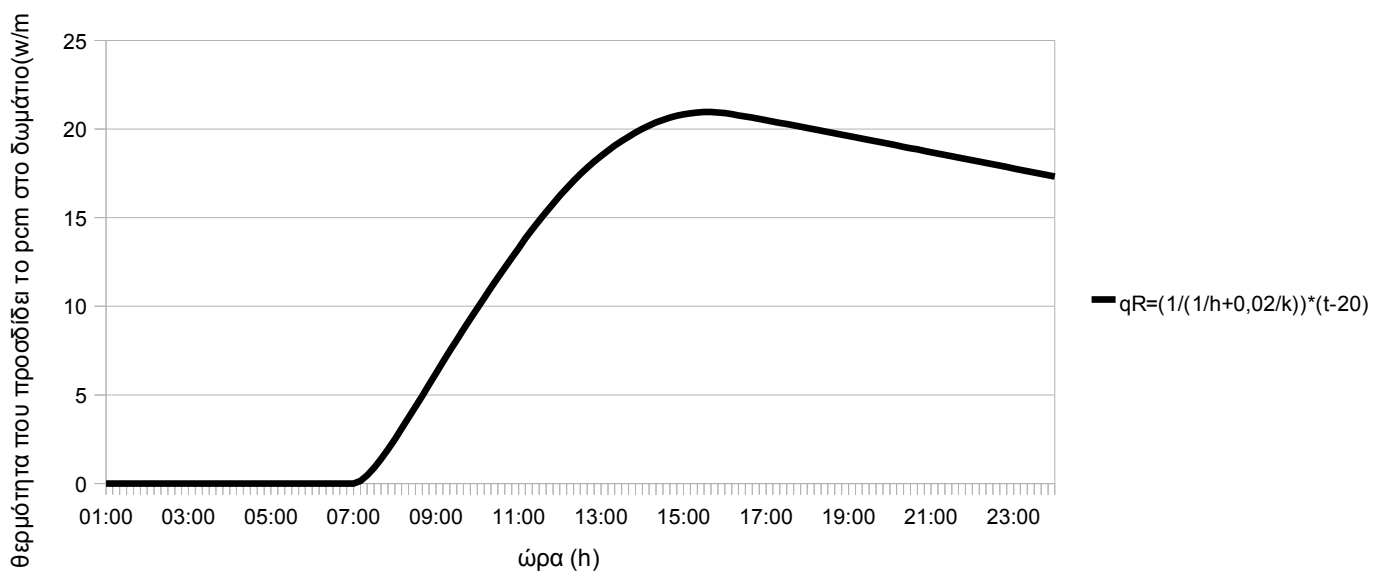
09:00:00	2,1	8,23	17818,37	17900,95	20,97	1,51	0,02	6,2	-31,46	25,24
09:10:00	2,15	8,44	19185,02	19271,34	21,06	1,48	0,01	6,84	-30,48	23,63
09:20:00	2,2	8,64	20532,07	20622,16	21,15	1,45	0,01	7,47	-29,51	22,02
09:30:00	2,26	8,85	21864,82	21958,68	21,23	1,43	0,01	8,08	-28,53	20,44
09:40:00	2,31	9,05	23187,18	23284,83	21,32	1,41	0,01	8,69	-27,56	18,86
09:50:00	2,36	9,26	24502,17	24603,61	21,4	1,39	0,01	9,28	-26,58	17,28
10:00:00	2,41	9,46	25812,14	25917,38	21,48	1,38	0,01	9,87	-25,6	15,71
10:10:00	2,46	9,66	27118,97	27227,14	21,56	1,36	0,01	10,46	-24,26	13,79
10:20:00	2,51	9,85	28413,15	28524,7	21,65	1,34	0,01	11,03	-22,92	11,88
10:30:00	2,56	10,05	29702,46	29816,96	21,72	1,33	0,01	11,6	-21,58	9,97
10:40:00	2,61	10,25	30983,23	31100,68	21,8	1,31	0,01	12,16	-20,24	8,07
10:50:00	2,66	10,44	32257,2	32378,05	21,88	1,3	0,01	12,71	-18,9	6,17
11:00:00	2,71	10,64	33530,62	33654,44	21,96	1,29	0,01	13,26	-17,56	4,28
11:10:00	2,75	10,78	34799,64	34922,08	22,03	1,23	0,01	13,81	-16,4	2,58
11:20:00	2,78	10,92	36019,77	36141,29	22,1	1,18	0,01	14,33	-15,25	0,91
11:30:00	2,82	11,06	37200,01	37320,2	22,17	1,14	0,01	14,83	-14,09	-0,75
11:40:00	2,86	11,2	38339,56	38458,44	22,24	1,09	0,01	15,31	-12,94	-2,39
11:50:00	2,89	11,34	39441,72	39559,74	22,3	1,06	0,01	15,77	-11,78	-4
12:00:00	2,93	11,48	40513,47	40630,22	22,36	1,02	0,01	16,22	-10,62	-5,61
12:10:00	2,95	11,56	41552,96	41665,83	22,42	0,96	0,01	16,65	-9,22	-7,44
12:20:00	2,97	11,64	42538,24	42646,82	22,47	0,91	0,01	17,06	-7,83	-9,24
12:30:00	2,99	11,72	43468,56	43573,3	22,52	0,85	0,01	17,44	-6,43	-11,02
12:40:00	3,01	11,8	44350,73	44451,67	22,57	0,81	0,01	17,81	-5,04	-12,78
12:50:00	3,03	11,88	45187,14	45283,86	22,62	0,76	0,01	18,15	-3,64	-14,51
13:00:00	3,05	11,96	45976,13	46069,08	22,66	0,72	0,01	18,47	-2,24	-16,24
13:10:00	3,06	12	46723,43	46811,76	22,7	0,67	0,01	18,77	-1,36	-17,41
13:20:00	3,07	12,05	47423,24	47506,96	22,74	0,62	0,01	19,05	-0,49	-18,57
13:30:00	3,08	12,09	48077,27	48156,4	22,77	0,58	0,01	19,32	0,39	-19,71
13:40:00	3,09	12,13	48687,04	48761,6	22,8	0,54	0,01	19,56	1,26	-20,83
13:50:00	3,11	12,18	49253,91	49323,92	22,83	0,5	0	19,79	2,14	-21,94
14:00:00	3,12	12,22	49779,08	49844,56	22,86	0,46	0	20	3,02	-23,03
14:10:00	3,12	12,24	50263,65	50322,43	22,89	0,4	0	20,19	4,22	-24,42
14:20:00	3,13	12,26	50691,01	50743,13	22,91	0,35	0	20,36	5,42	-25,79
14:30:00	3,13	12,28	51062,4	51107,87	22,92	0,3	0	20,51	6,62	-27,14
14:40:00	3,14	12,3	51378,87	51417,72	22,94	0,25	0	20,64	7,82	-28,46
14:50:00	3,14	12,32	51641,32	51673,57	22,95	0,2	0	20,74	9,02	-29,77
15:00:00	3,15	12,34	51850,52	51876,19	22,96	0,15	0	20,83	10,22	-31,05
15:10:00	3,14	12,32	52007,13	52026,23	22,97	0,1	0	20,89	7,02	-27,91
15:20:00	3,14	12,3	52111,58	52124,13	22,97	0,05	0	20,93	3,81	-24,75
15:30:00	3,13	12,28	52164,3	52170,32	22,97	0	0	20,95	0,61	-21,56
15:40:00	3,13	12,26	52165,6	52165,11	22,97	0	0	20,95	-2,59	-18,36
15:50:00	3,12	12,24	52115,69	52108,71	22,96	0	0	20,93	-5,8	-15,14
16:00:00	3,12	12,22	52014,68	52001,24	22,95	0	0	20,89	-9	-11,89
16:10:00	3,1	12,14	51862,6	51848,33	22,94	0	0	20,83	-9,02	-11,81
16:20:00	3,07	12,06	51703,71	51689,05	22,93	0	0	20,77	-9,04	-11,73
16:30:00	3,05	11,98	51541,42	51525,93	22,92	0	0	20,71	-9,06	-11,65
16:40:00	3,03	11,89	51372,29	51355,98	22,91	0	0	20,64	-9,08	-11,56
16:50:00	3,01	11,81	51196,29	51179,6	22,9	0	0	20,57	-9,1	-11,47

17:00:00	2,99	11,73	51016,86	50999,36	22,89	0	0	20,5	-9,12	-11,38
17:10:00	2,96	11,59	50830,53	50813,06	22,88	0	0	20,42	-9,16	-11,26
17:20:00	2,92	11,45	50644,06	50626,63	22,87	0	0	20,35	-9,2	-11,15
17:30:00	2,88	11,31	50457,48	50440,08	22,86	0	0	20,28	-9,24	-11,04
17:40:00	2,85	11,16	50270,77	50253,41	22,85	0	0	20,2	-9,28	-10,92
17:50:00	2,81	11,02	50083,93	50066,61	22,84	0	0	20,13	-9,32	-10,81
18:00:00	2,77	10,88	49896,96	49879,68	22,83	0	0	20,05	-9,36	-10,69
18:10:00	2,73	10,72	49709,87	49692,62	22,82	0	0	19,98	-9,9	-10,07
18:20:00	2,69	10,56	49522,61	49505,4	22,81	0	0	19,9	-10,45	-9,46
18:30:00	2,65	10,41	49335,18	49318,01	22,8	0	0	19,83	-10,99	-8,84
18:40:00	2,61	10,25	49147,59	49130,45	22,79	0	0	19,75	-11,53	-8,22
18:50:00	2,57	10,09	48959,83	48942,72	22,78	0	0	19,68	-12,08	-7,6
19:00:00	2,53	9,93	48771,9	48754,83	22,77	0	0	19,6	-12,62	-6,98
19:10:00	2,5	9,81	48583,79	48566,77	22,76	0	0	19,53	-13,52	-6,01
19:20:00	2,47	9,7	48395,61	48378,63	22,74	0	0	19,45	-14,41	-5,04
19:30:00	2,44	9,58	48207,33	48190,4	22,73	0	0	19,38	-15,31	-4,07
19:40:00	2,41	9,46	48018,97	48002,09	22,72	0	0	19,3	-16,2	-3,1
19:50:00	2,38	9,35	47830,52	47813,68	22,71	0	0	19,22	-17,1	-2,13
20:00:00	2,35	9,23	47641,99	47625,19	22,7	0	0	19,15	-17,99	-1,16
20:10:00	2,34	9,18	47453,36	47436,63	22,69	0	0	19,07	-18,62	-0,45
20:20:00	2,33	9,13	47264,78	47248,11	22,68	0	0	19	-19,25	0,25
20:30:00	2,32	9,08	47076,25	47059,65	22,67	0	0	18,92	-19,87	0,95
20:40:00	2,3	9,03	46887,77	46871,23	22,66	0	0	18,84	-20,5	1,66
20:50:00	2,29	8,98	46699,34	46682,87	22,65	0	0	18,77	-21,13	2,36
21:00:00	2,28	8,93	46510,96	46494,55	22,64	0	0	18,69	-21,76	3,07
21:10:00	2,28	8,93	46322,63	46306,29	22,63	0	0	18,62	-22,39	3,78
21:20:00	2,28	8,92	46134,45	46118,19	22,62	0	0	18,54	-23,03	4,49
21:30:00	2,27	8,92	45946,42	45930,23	22,6	0	0	18,46	-23,66	5,2
21:40:00	2,27	8,92	45758,53	45742,42	22,59	0	0	18,39	-24,29	5,91
21:50:00	2,27	8,91	45570,8	45554,76	22,58	0	0	18,31	-24,93	6,61
22:00:00	2,27	8,91	45383,21	45367,25	22,57	0	0	18,23	-25,56	7,33
22:10:00	2,27	8,9	45195,77	45179,88	22,56	0	0	18,16	-26,01	7,85
22:20:00	2,27	8,9	45008,47	44992,66	22,55	0	0	18,08	-26,47	8,38
22:30:00	2,27	8,89	44821,32	44805,58	22,54	0	0	18,01	-26,92	8,91
22:40:00	2,27	8,88	44634,3	44618,64	22,53	0	0	17,93	-27,37	9,44
22:50:00	2,26	8,88	44447,43	44431,84	22,52	0	0	17,85	-27,83	9,97
23:00:00	2,26	8,87	44260,7	44245,18	22,51	0	0	17,78	-28,28	10,5
23:10:00	2,25	8,83	44074,11	44058,66	22,5	0	0	17,7	-29,11	11,41
23:20:00	2,24	8,79	43887,58	43872,2	22,49	0	0	17,62	-29,93	12,31
23:30:00	2,23	8,75	43701,11	43685,79	22,48	0	0	17,55	-30,76	13,21
23:40:00	2,22	8,7	43514,71	43499,45	22,46	0	0	17,47	-31,59	14,12
23:50:00	2,21	8,66	43328,36	43313,17	22,45	0	0	17,39	-32,41	15,02
24:00:00	2,2	8,62	43142,08	43126,96	22,44	0	0	17,32	-33,24	15,92

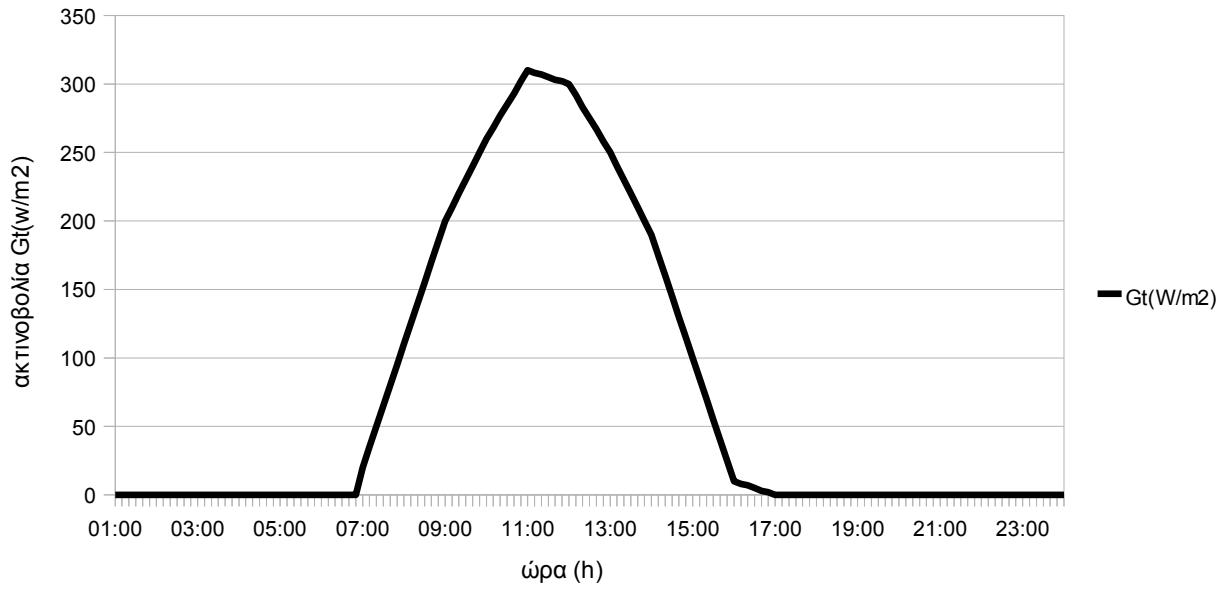
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τους παραπάνω πίνακες.



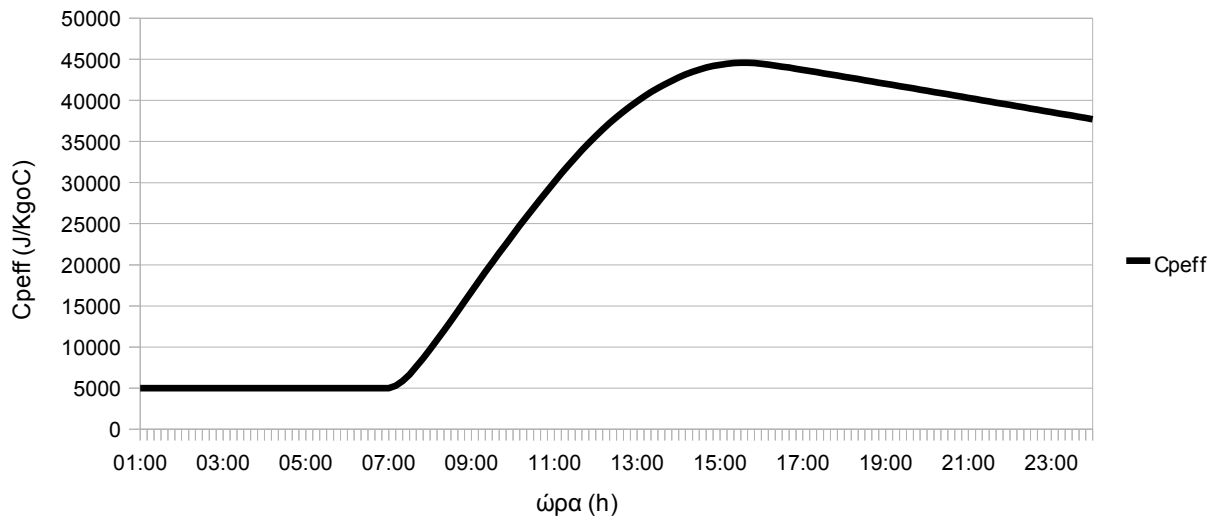
Εικόνα 11.4.1: Κατανομή της Θερμοκρασίας T1 συναρτήσει της ώρας



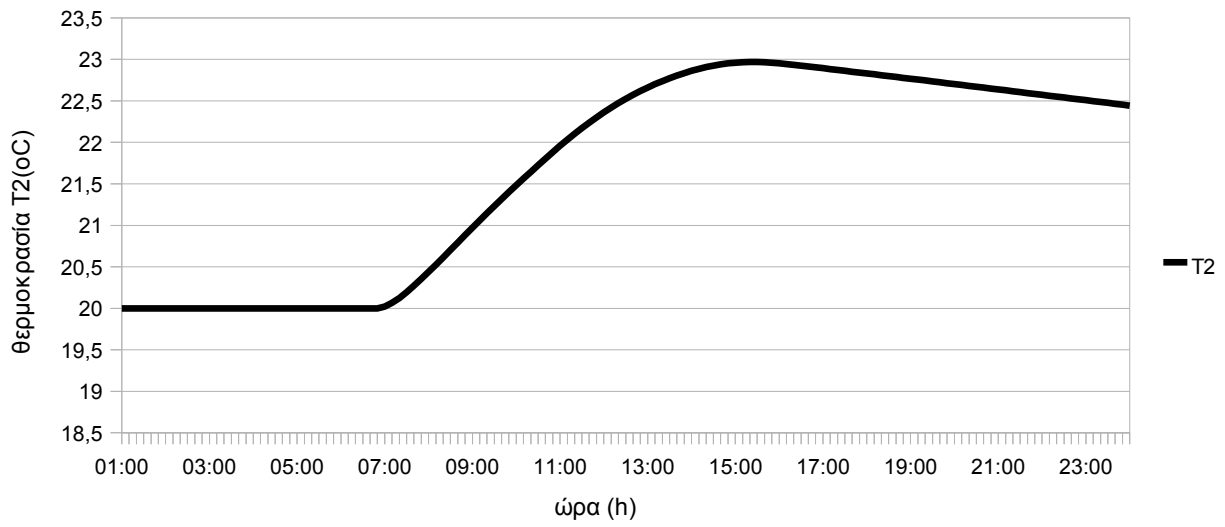
Εικόνα 11.4.2: Κατανομή της Θερμότητας που προσδίδει το pcm στο δωμάτιο



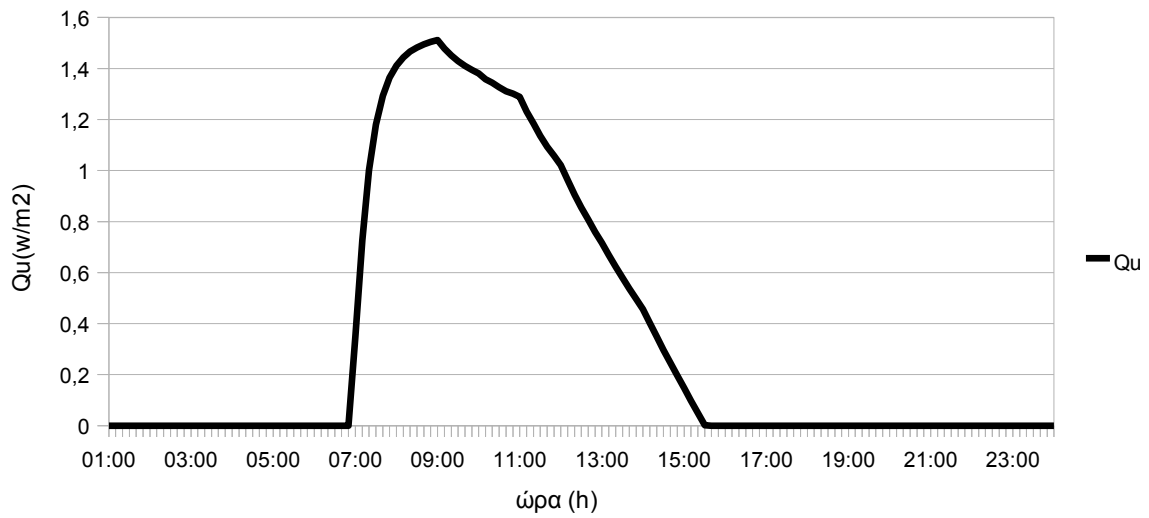
Εικόνα 11.4.3: Κατανομή της ακτινοβολίας Gt συναρτήσει της ώρας



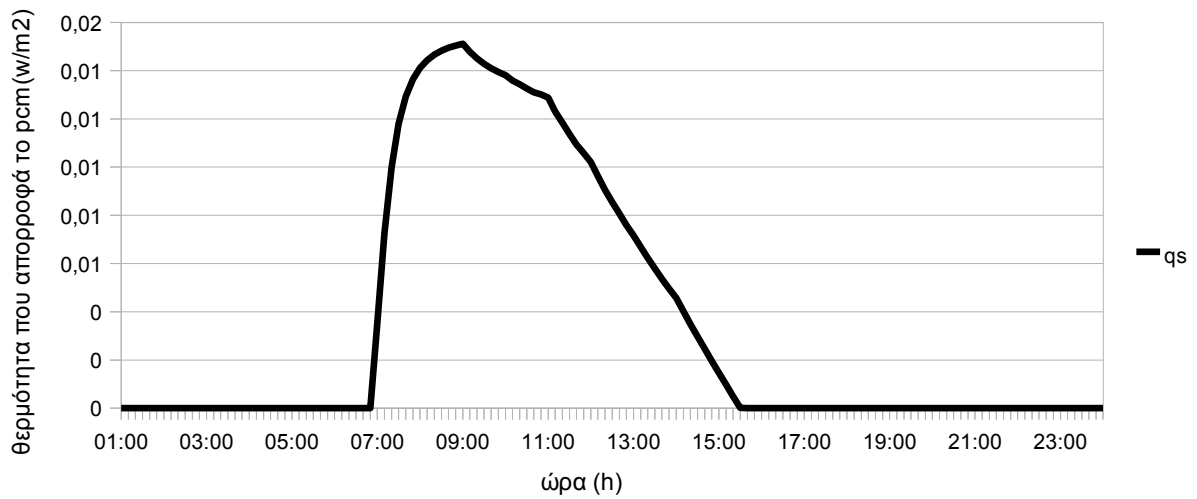
Εικόνα 11.4.4: Κατανομή του Cpeff συναρτήσει της ώρας



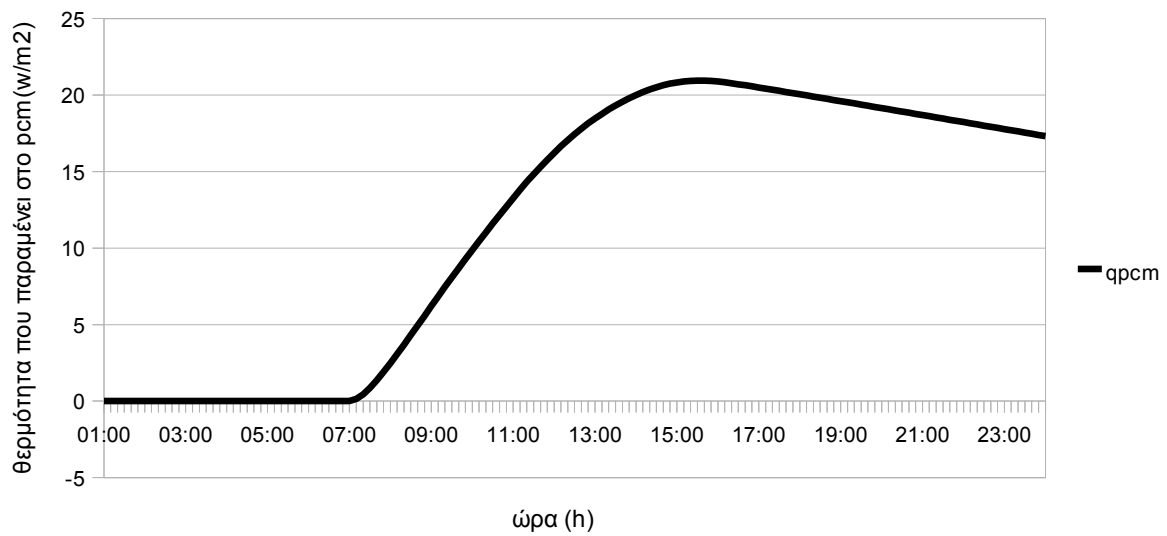
Εικόνα 11.4.5: Κατανομή της Θερμοκρασίας T_2 συναρτήσει της ώρας



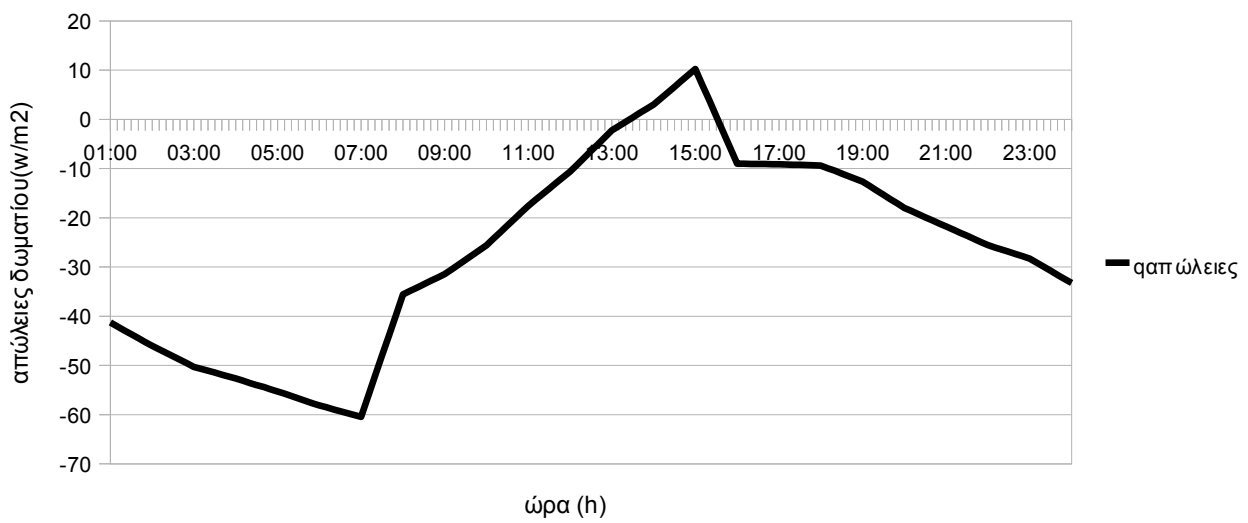
Εικόνα 11.4.6: Κατανομή της θερμότητας ηλιακών συλλεκτών, Q_u , συναρτήσει της ώρας



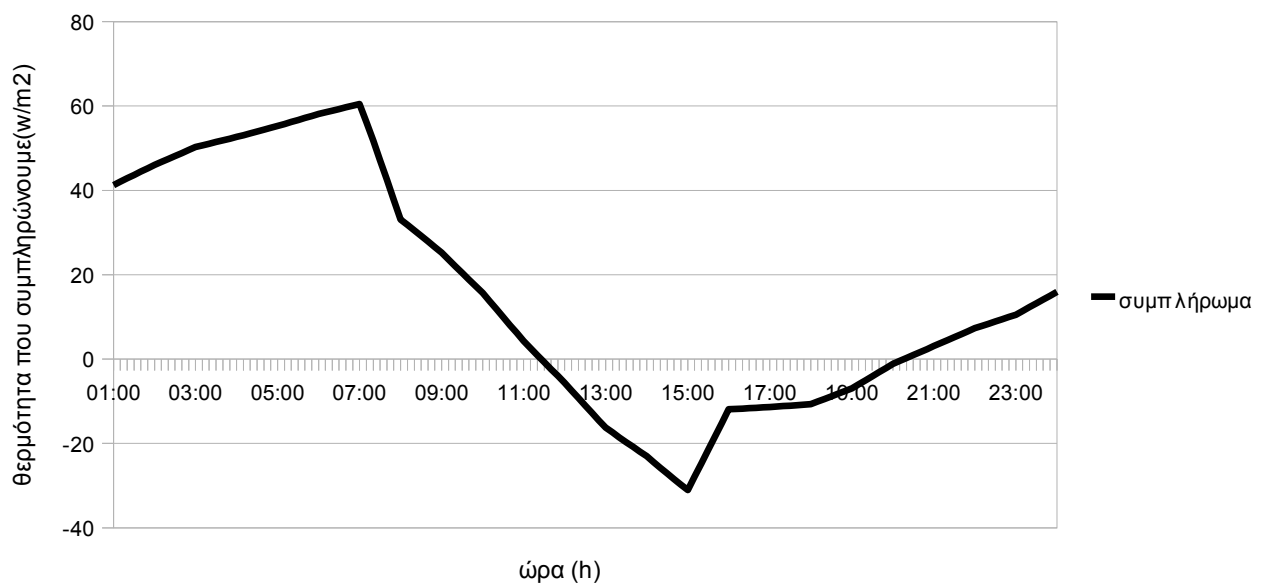
Εικόνα 11.4.7: Κατανομή της θερμότητας που απορροφά το pcm συναρτήσει της ώρας



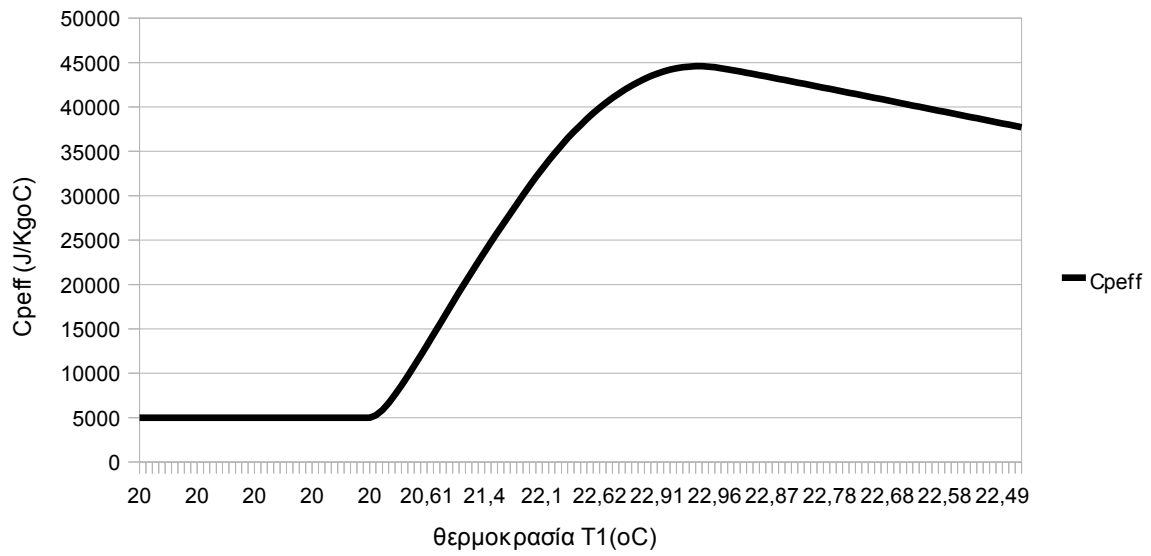
Εικόνα 11.4.8: Κατανομή της θερμότητας που παραμένει στο pcm συναρτήσει της ώρας



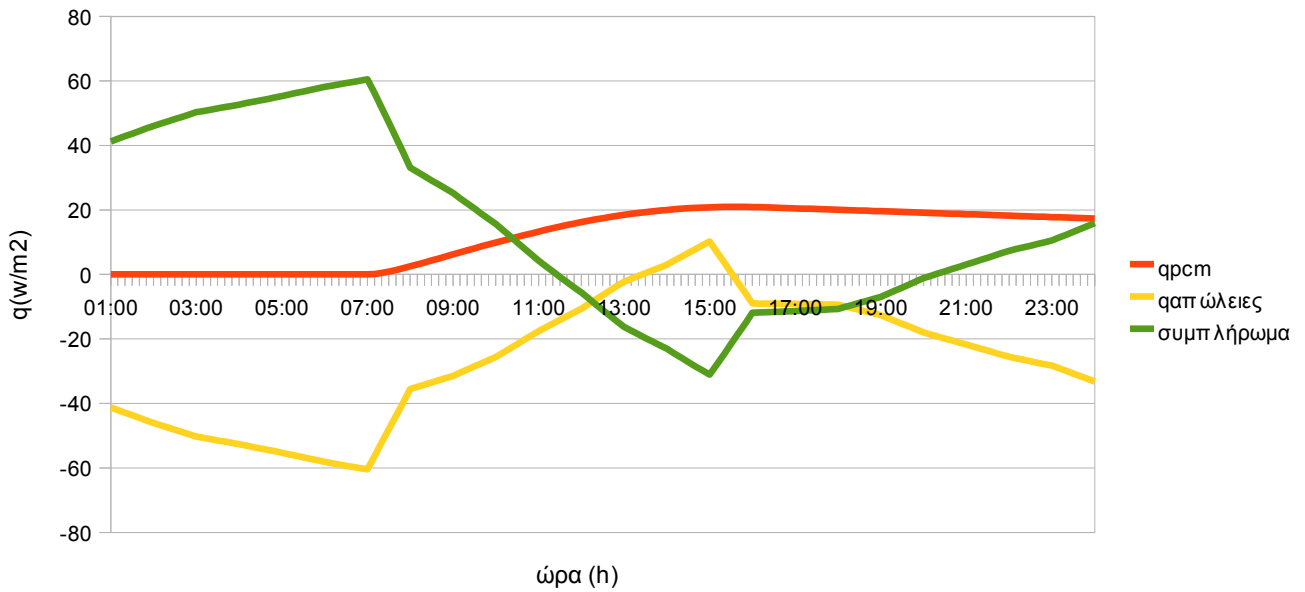
Εικόνα 11.4.9: Κατανομή των απωλειών δωματίου συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.4.10: Κατανομή της Θερμότητας που συμπληρώνουμε ώστε η θερμοκρασία στο δωμάτιο να μένει σταθερή ίση με 20°C συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.4.11: Κατανομή του Cpeff συναρτήσει της θερμοκρασίας T1



Εικόνα 11.4.12: Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής των qrcm, qαπωλειών και συμπλήρωματος συναρτήσει της ώρας

11.5 Παραλλαγή της εφαρμογής 11.1- Αλλαγή των συντελεστών Fr και UL

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε το pcm που επιλέξαμε αλλά αλλάζουμε τους συντελεστες Fr και UL. Αντί δηλαδή για Fr=0,85 και UL=0,85 που είχαμε στην πρώτη περίπτωση, έχουμε Fr=0,95 και UL=0,95. Επαναλαμβάνουμε την αρχική διαδικασία.

Πίνακας 11.5.1

time	αρχική T	$q_R=(1/(1/h+0,02/k))*(t-20)$	Gt(W/m2)	Cp _{eff}	$(Ac/A\delta\alpha\pi)*Fr*Gt*\tau\alpha-q_R$	$(m\text{pcm}*Cp\text{eff})/(\Delta t*A)+(Ac/A\delta\alpha\pi)*Fr*U_L$
01:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
01:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
01:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
01:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
01:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
01:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
02:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
02:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
02:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
02:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
02:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
02:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
03:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
03:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
03:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
03:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
03:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
03:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
04:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
04:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
04:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
04:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
04:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
04:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
05:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
05:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
05:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
05:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
05:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
05:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
06:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
06:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
06:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
06:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
06:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
06:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,01
07:00:00	20	0	20,000	5000	5,415	255,01
07:10:00	20,01	0,06	35,000	5107,98	9,419	260,51
07:20:00	20,03	0,22	50,000	5419,34	13,315	276,37
07:30:00	20,07	0,48	65,000	5901,3	17,122	300,93
07:40:00	20,11	0,8	80,000	6512,88	20,859	332,09
07:50:00	20,17	1,17	95,000	7217,31	24,547	367,98
08:00:00	20,22	1,58	110,000	7986,77	28,201	407,18
08:10:00	20,29	2,01	125,000	8801,85	31,831	448,71
08:20:00	20,35	2,46	140,000	9650,04	35,443	491,93
08:30:00	20,41	2,92	155,000	10522,23	39,043	536,36
08:40:00	20,48	3,39	170,000	11412,2	42,633	581,71
08:50:00	20,55	3,87	185,000	12315,57	46,216	627,73

09:00:00	20,62	4,36	200,000	13229,27	49,793	674,29
09:10:00	20,69	4,84	210,000	14151,06	52,013	721,25
09:20:00	20,75	5,32	220,000	15054,49	54,242	767,28
09:30:00	20,82	5,79	230,000	15943,08	56,479	812,56
09:40:00	20,89	6,26	240,000	16819,45	58,723	857,21
09:50:00	20,95	6,72	250,000	17685,62	60,972	901,34
10:00:00	21,02	7,17	260,000	18543,18	63,225	945,03
10:10:00	21,08	7,62	268,000	19393,39	64,941	988,35
10:20:00	21,14	8,06	277,000	20229,95	66,935	1030,97
10:30:00	21,2	8,5	285,000	21058,16	68,662	1073,17
10:40:00	21,27	8,93	293,000	21875,69	70,396	1114,82
10:50:00	21,33	9,36	302,000	22683,82	72,404	1156
11:00:00	21,39	9,79	310,000	23486,74	74,145	1196,91
11:10:00	21,45	10,21	308,000	24282	73,183	1237,42
11:20:00	21,5	10,61	307,000	25041,07	72,510	1276,1
11:30:00	21,56	11	305,000	25770,33	71,583	1313,25
11:40:00	21,61	11,37	303,000	26469,76	70,671	1348,89
11:50:00	21,66	11,72	302,000	27141,93	70,044	1383,14
12:00:00	21,71	12,07	300,000	27791,63	69,159	1416,24
12:10:00	21,76	12,4	292,000	28418,03	66,661	1448,16
12:20:00	21,8	12,71	283,000	29007,71	63,912	1478,2
12:30:00	21,84	13	275,000	29560,69	61,454	1506,37
12:40:00	21,88	13,28	267,000	30081,65	59,012	1532,92
12:50:00	21,92	13,54	258,000	30572,44	56,315	1557,92
13:00:00	21,95	13,78	250,000	31032,37	53,906	1581,36
13:10:00	21,98	14,01	240,000	31465,27	50,969	1603,41
13:20:00	22,02	14,22	230,000	31867,82	48,048	1623,92
13:30:00	22,04	14,42	220,000	32241,33	45,143	1642,95
13:40:00	22,07	14,6	210,000	32586,97	42,253	1660,56
13:50:00	22,09	14,77	200,000	32905,77	39,376	1676,81
14:00:00	22,11	14,93	190,000	33198,65	36,514	1691,73
14:10:00	22,13	15,07	175,000	33466,43	32,311	1705,37
14:20:00	22,15	15,19	160,000	33699,21	28,126	1717,23
14:30:00	22,17	15,3	145,000	33897,89	23,960	1727,35
14:40:00	22,18	15,39	130,000	34063,26	19,811	1735,78
14:50:00	22,19	15,46	115,000	34195,97	15,680	1742,54
15:00:00	22,2	15,51	100,000	34296,58	11,565	1747,67
15:10:00	22,2	15,55	85,000	34365,52	7,467	1751,18
15:20:00	22,21	15,57	70,000	34403,07	3,386	1753,09
15:30:00	22,21	15,57	55,000	34409,5	-0,678	1753,42
15:40:00	22,2	15,56	40,000	34384,99	-4,727	1752,17
15:50:00	22,2	15,53	25,000	34329,61	-8,759	1749,35
16:00:00	22,19	15,48	10,000	34243,38	-12,774	1744,96
16:10:00	22,18	15,42	8,000	34126,22	-13,254	1738,99
16:20:00	22,18	15,36	7,000	34004,84	-13,460	1732,8
16:30:00	22,17	15,29	5,000	33881,3	-13,936	1726,51
16:40:00	22,16	15,22	3,000	33753,49	-14,410	1720
16:50:00	22,15	15,15	2,000	33621,37	-14,611	1713,27

17:00:00	22,14	15,08	0	33487,03	-15,081	1706,42
17:10:00	22,13	15,01	0	33348,34	-15,008	1699,35
17:20:00	22,12	14,93	0	33209,38	-14,934	1692,27
17:30:00	22,11	14,86	0	33070,15	-14,861	1685,18
17:40:00	22,09	14,79	0	32930,65	-14,787	1678,07
17:50:00	22,08	14,71	0	32790,88	-14,713	1670,95
18:00:00	22,07	14,64	0	32650,84	-14,639	1663,82
18:10:00	22,06	14,56	0	32510,52	-14,564	1656,67
18:20:00	22,05	14,49	0	32369,89	-14,490	1649,5
18:30:00	22,04	14,42	0	32228,94	-14,415	1642,32
18:40:00	22,03	14,34	0	32087,67	-14,341	1635,12
18:50:00	22,02	14,27	0	31946,09	-14,266	1627,91
19:00:00	22,01	14,19	0	31804,18	-14,190	1620,68
19:10:00	22	14,12	0	31661,94	-14,115	1613,43
19:20:00	21,99	14,04	0	31519,46	-14,040	1606,17
19:30:00	21,98	13,96	0	31376,74	-13,964	1598,9
19:40:00	21,97	13,89	0	31233,77	-13,888	1591,62
19:50:00	21,96	13,81	0	31090,56	-13,813	1584,32
20:00:00	21,95	13,74	0	30947,09	-13,737	1577,01
20:10:00	21,94	13,66	0	30803,37	-13,661	1569,69
20:20:00	21,92	13,58	0	30659,55	-13,584	1562,36
20:30:00	21,91	13,51	0	30515,61	-13,508	1555,03
20:40:00	21,9	13,43	0	30371,56	-13,432	1547,69
20:50:00	21,89	13,36	0	30227,4	-13,356	1540,34
21:00:00	21,88	13,28	0	30083,12	-13,279	1532,99
21:10:00	21,87	13,2	0	29938,73	-13,203	1525,63
21:20:00	21,86	13,13	0	29794,33	-13,126	1518,28
21:30:00	21,85	13,05	0	29649,91	-13,050	1510,92
21:40:00	21,84	12,97	0	29505,49	-12,973	1503,56
21:50:00	21,83	12,9	0	29361,05	-12,897	1496,2
22:00:00	21,82	12,82	0	29216,6	-12,821	1488,84
22:10:00	21,81	12,74	0	29072,14	-12,744	1481,48
22:20:00	21,79	12,67	0	28927,66	-12,668	1474,12
22:30:00	21,78	12,59	0	28783,16	-12,591	1466,76
22:40:00	21,77	12,51	0	28638,64	-12,515	1459,39
22:50:00	21,76	12,44	0	28494,09	-12,438	1452,03
23:00:00	21,75	12,36	0	28349,53	-12,362	1444,67
23:10:00	21,74	12,28	0	28204,95	-12,285	1437,3
23:20:00	21,73	12,21	0	28060,26	-12,208	1429,93
23:30:00	21,72	12,13	0	27915,47	-12,132	1422,55
23:40:00	21,71	12,06	0	27770,57	-12,055	1415,17
23:50:00	21,7	11,98	0	27625,56	-11,978	1407,78
24:00:00	21,69	11,9	0	27480,45	-11,901	1400,39

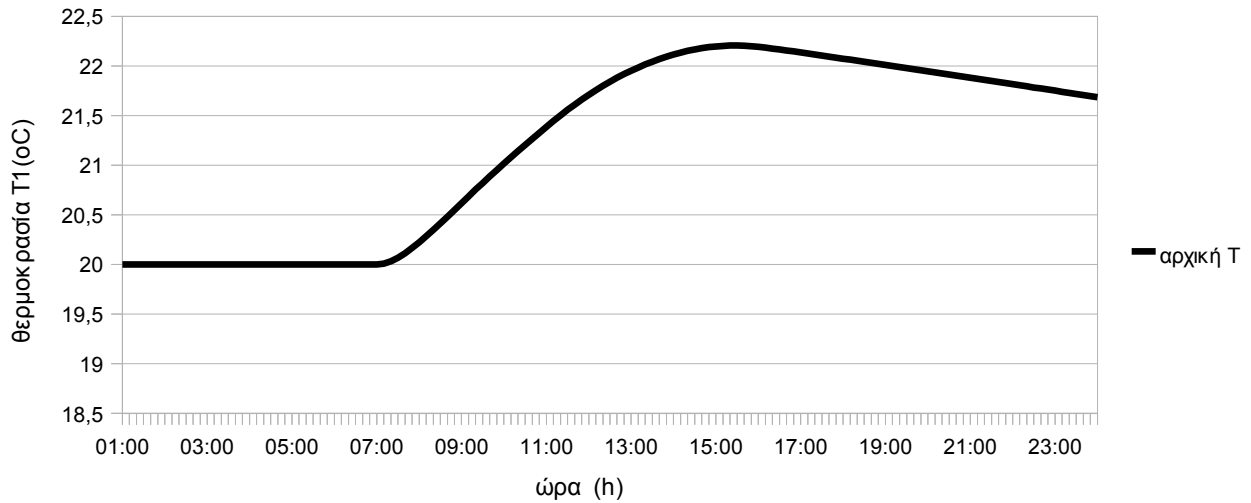
Πίνακας 11.5.2

time	(Ac/Αδαπ)*Fr*UL*Ta	to	(mpcm*Cpeff*T1)/(Δt*A)	b	T2	Qu	qs	qrcm	qαπώλ	συμπλ
01:00:00	2,1	8,2	5095	5097,1	20	0	0	0	-41,27	41,27
01:10:00	2,09	8,14	5095	5097,09	20	0	0	0	-42,07	42,07
01:20:00	2,07	8,07	5095	5097,07	20	0	0	0	-42,86	42,86
01:30:00	2,05	8,01	5095	5097,05	20	0	0	0	-43,66	43,66
01:40:00	2,04	7,94	5095	5097,04	20	0	0	0	-44,45	44,45
01:50:00	2,02	7,88	5095	5097,02	20	0	0	0	-45,25	45,25
02:00:00	2	7,81	5095	5097	20	0	0	0	-46,05	46,05
02:10:00	1,99	7,77	5095	5096,99	20	0	0	0	-46,75	46,75
02:20:00	1,98	7,74	5095	5096,98	20	0	0	0	-47,46	47,46
02:30:00	1,98	7,7	5095	5096,98	20	0	0	0	-48,16	48,16
02:40:00	1,97	7,66	5095	5096,97	20	0	0	0	-48,87	48,87
02:50:00	1,96	7,63	5095	5096,96	20	0	0	0	-49,57	49,57
03:00:00	1,95	7,59	5095	5096,95	20	0	0	0	-50,28	50,28
03:10:00	1,94	7,57	5095	5096,94	20	0	0	0	-50,68	50,68
03:20:00	1,93	7,54	5095	5096,93	20	0	0	0	-51,07	51,07
03:30:00	1,93	7,52	5095	5096,93	20	0	0	0	-51,47	51,47
03:40:00	1,92	7,5	5095	5096,92	20	0	0	0	-51,86	51,86
03:50:00	1,92	7,47	5095	5096,92	20	0	0	0	-52,26	52,26
04:00:00	1,91	7,45	5095	5096,91	20	0	0	0	-52,66	52,66
04:10:00	1,9	7,42	5095	5096,9	20	0	0	0	-53,1	53,1
04:20:00	1,89	7,39	5095	5096,89	20	0	0	0	-53,53	53,53
04:30:00	1,89	7,36	5095	5096,89	20	0	0	0	-53,97	53,97
04:40:00	1,88	7,32	5095	5096,88	20	0	0	0	-54,4	54,4
04:50:00	1,87	7,29	5095	5096,87	20	0	0	0	-54,84	54,84
05:00:00	1,86	7,26	5095	5096,86	20	0	0	0	-55,28	55,28
05:10:00	1,85	7,22	5095	5096,85	20	0	0	0	-55,76	55,76
05:20:00	1,84	7,18	5095	5096,84	20	0	0	0	-56,23	56,23
05:30:00	1,83	7,14	5095	5096,83	20	0	0	0	-56,71	56,71
05:40:00	1,82	7,1	5095	5096,82	20	0	0	0	-57,18	57,18
05:50:00	1,81	7,06	5095	5096,81	20	0	0	0	-57,66	57,66
06:00:00	1,8	7,02	5095	5096,8	20	0	0	0	-58,13	58,13
06:10:00	1,8	7,01	5095	5096,8	20	0	0	0	-58,52	58,52
06:20:00	1,79	6,99	5095	5096,79	20	0	0	0	-58,91	58,91
06:30:00	1,79	6,98	5095	5096,79	20	0	0	0	-59,3	59,3
06:40:00	1,79	6,97	5095	5096,79	20	0	0	0	-59,69	59,69
06:50:00	1,78	6,95	5095	5096,78	20	0	0	0	-60,08	60,08
07:00:00	1,78	6,94	5095	5102,2	20,01	0,14	0	0	-60,47	60,47
07:10:00	1,8	7	5207,14	5218,35	20,03	0,39	0	0,05	-56,32	56,26
07:20:00	1,81	7,07	5530,99	5546,11	20,07	0,6	0,01	0,22	-52,17	51,95
07:30:00	1,83	7,13	6033,75	6052,7	20,11	0,77	0,01	0,47	-48,02	47,54
07:40:00	1,85	7,19	6674,27	6696,98	20,17	0,88	0,01	0,79	-43,87	43,07
07:50:00	1,86	7,26	7415,59	7442	20,22	0,96	0,01	1,16	-39,72	38,55
08:00:00	1,88	7,32	8229,68	8259,76	20,29	1,02	0,01	1,57	-35,57	33,99
08:10:00	1,92	7,47	9096,96	9130,71	20,35	1,06	0,01	2	-34,89	32,87
08:20:00	1,96	7,62	10004,86	10042,26	20,41	1,09	0,01	2,45	-34,2	31,74
08:30:00	1,99	7,77	10944,2	10985,23	20,48	1,11	0,01	2,91	-33,52	30,59
08:40:00	2,03	7,93	11908,66	11953,32	20,55	1,13	0,01	3,38	-32,83	29,44
08:50:00	2,07	8,08	12893,85	12942,13	20,62	1,14	0,01	3,86	-32,15	28,27

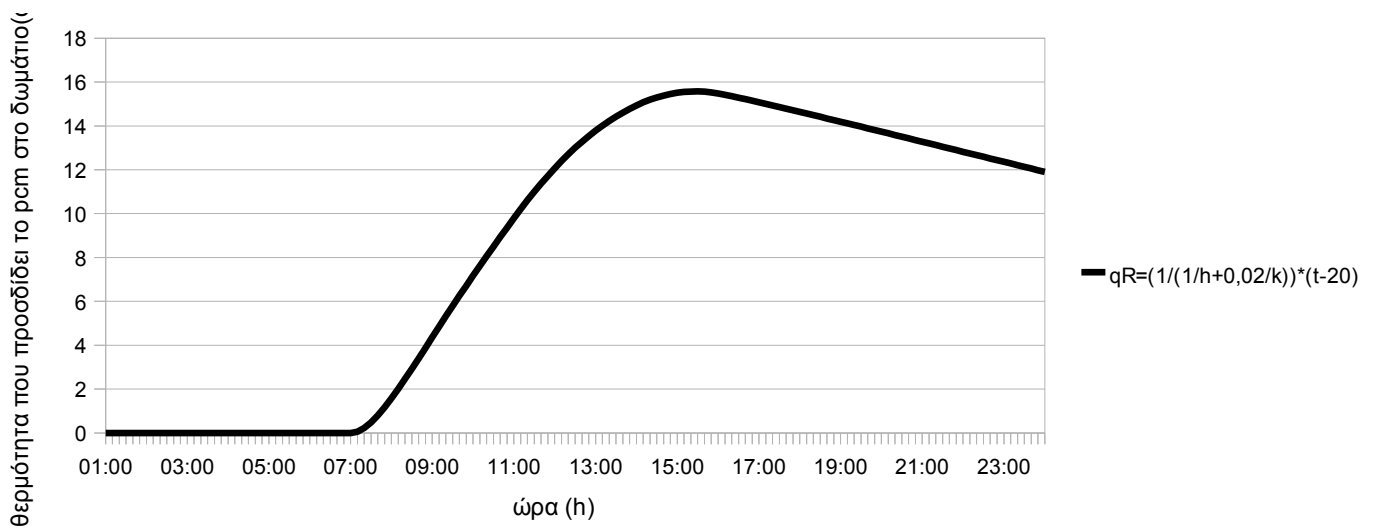
09:00:00	2,11	8,23	13896,64	13948,54	20,69	1,15	0,01	4,35	-31,46	27,1
09:10:00	2,16	8,44	14914,77	14968,94	20,75	1,13	0,01	4,83	-30,48	25,64
09:20:00	2,22	8,64	15918,93	15975,39	20,82	1,11	0,01	5,31	-29,51	24,19
09:30:00	2,27	8,85	16912,68	16971,42	20,89	1,1	0,01	5,78	-28,53	22,74
09:40:00	2,32	9,05	17898,67	17959,71	20,95	1,08	0,01	6,25	-27,56	21,3
09:50:00	2,37	9,26	18878,95	18942,3	21,02	1,07	0,01	6,71	-26,58	19,86
10:00:00	2,43	9,46	19855,14	19920,79	21,08	1,06	0,01	7,16	-25,6	18,43
10:10:00	2,48	9,66	20828,52	20895,94	21,14	1,05	0,01	7,61	-24,26	16,64
10:20:00	2,53	9,85	21791,65	21861,11	21,2	1,04	0,01	8,05	-22,92	14,86
10:30:00	2,58	10,05	22750,44	22821,68	21,27	1,02	0,01	8,49	-21,58	13,08
10:40:00	2,63	10,25	23702,01	23775,03	21,33	1,01	0,01	8,92	-20,24	11,31
10:50:00	2,68	10,44	24647,65	24722,74	21,39	1,01	0,01	9,35	-18,9	9,54
11:00:00	2,73	10,64	25592,14	25669,02	21,45	1	0,01	9,78	-17,56	7,77
11:10:00	2,77	10,78	26532,49	26608,43	21,5	0,95	0,01	10,2	-16,4	6,2
11:20:00	2,8	10,92	27434,54	27509,85	21,56	0,91	0,01	10,6	-15,25	4,64
11:30:00	2,84	11,06	28305,32	28379,74	21,61	0,88	0,01	10,99	-14,09	3,1
11:40:00	2,87	11,2	29144,3	29217,85	21,66	0,84	0,01	11,36	-12,94	1,57
11:50:00	2,91	11,34	29954,1	30027,05	21,71	0,81	0,01	11,71	-11,78	0,06
12:00:00	2,94	11,48	30740,11	30812,22	21,76	0,78	0,01	12,06	-10,62	-1,45
12:10:00	2,97	11,56	31500,99	31570,62	21,8	0,74	0,01	12,39	-9,22	-3,17
12:20:00	2,99	11,64	32220	32286,9	21,84	0,69	0,01	12,7	-7,83	-4,88
12:30:00	3,01	11,72	32896,69	32961,15	21,88	0,65	0,01	13	-6,43	-6,57
12:40:00	3,03	11,8	33536,32	33598,36	21,92	0,61	0,01	13,27	-5,04	-8,24
12:50:00	3,05	11,88	34140,82	34200,18	21,95	0,58	0,01	13,53	-3,64	-9,9
13:00:00	3,07	11,96	34708,97	34765,95	21,98	0,54	0,01	13,78	-2,24	-11,54
13:10:00	3,08	12	35245,21	35299,26	22,02	0,5	0,01	14,01	-1,36	-12,65
13:20:00	3,09	12,05	35745,14	35796,28	22,04	0,47	0	14,22	-0,49	-13,74
13:30:00	3,1	12,09	36210,11	36258,35	22,07	0,43	0	14,42	0,39	-14,81
13:40:00	3,11	12,13	36641,34	36686,7	22,09	0,4	0	14,6	1,26	-15,87
13:50:00	3,12	12,18	37039,89	37082,39	22,11	0,37	0	14,77	2,14	-16,91
14:00:00	3,13	12,22	37406,72	37446,37	22,13	0,34	0	14,93	3,02	-17,95
14:10:00	3,14	12,24	37742,68	37778,13	22,15	0,29	0	15,07	4,22	-19,29
14:20:00	3,14	12,26	38035,18	38066,45	22,17	0,25	0	15,19	5,42	-20,61
14:30:00	3,15	12,28	38285,16	38312,27	22,18	0,21	0	15,3	6,62	-21,92
14:40:00	3,15	12,3	38493,46	38516,42	22,19	0,17	0	15,38	7,82	-23,21
14:50:00	3,16	12,32	38660,77	38679,61	22,2	0,13	0	15,46	9,02	-24,48
15:00:00	3,17	12,34	38787,7	38802,43	22,2	0,09	0	15,51	10,22	-25,73
15:10:00	3,16	12,32	38874,72	38885,35	22,21	0,05	0	15,55	7,02	-22,56
15:20:00	3,15	12,3	38922,14	38928,68	22,21	0,01	0	15,57	3,81	-19,38
15:30:00	3,15	12,28	38930,26	38932,73	22,2	0	0	15,57	0,61	-16,18
15:40:00	3,14	12,26	38899,3	38897,72	22,2	0	0	15,56	-2,59	-12,96
15:50:00	3,14	12,24	38829,39	38823,77	22,19	0	0	15,53	-5,8	-9,73
16:00:00	3,13	12,22	38720,57	38710,93	22,18	0	0	15,48	-9	-6,48
16:10:00	3,11	12,14	38572,82	38562,68	22,18	0	0	15,42	-9,02	-6,4
16:20:00	3,09	12,06	38419,85	38409,49	22,17	0	0	15,36	-9,04	-6,32
16:30:00	3,07	11,98	38264,28	38253,41	22,16	0	0	15,29	-9,06	-6,23
16:40:00	3,05	11,89	38103,44	38092,08	22,15	0	0	15,22	-9,08	-6,14
16:50:00	3,03	11,81	37937,33	37925,75	22,14	0	0	15,15	-9,1	-6,05

17:00:00	3,01	11,73	37768,55	37756,48	22,13	0	0	15,08	-9,12	-5,96
17:10:00	2,97	11,59	37594,45	37582,41	22,12	0	0	15,01	-9,16	-5,85
17:20:00	2,94	11,45	37420,16	37408,16	22,11	0	0	14,93	-9,2	-5,73
17:30:00	2,9	11,31	37245,68	37233,72	22,09	0	0	14,86	-9,24	-5,62
17:40:00	2,86	11,16	37071,02	37059,1	22,08	0	0	14,79	-9,28	-5,51
17:50:00	2,83	11,02	36896,16	36884,28	22,07	0	0	14,71	-9,32	-5,39
18:00:00	2,79	10,88	36721,11	36709,27	22,06	0	0	14,64	-9,36	-5,28
18:10:00	2,75	10,72	36545,87	36534,06	22,05	0	0	14,56	-9,9	-4,66
18:20:00	2,71	10,56	36370,39	36358,61	22,04	0	0	14,49	-10,45	-4,04
18:30:00	2,67	10,41	36194,66	36182,92	22,03	0	0	14,42	-10,99	-3,43
18:40:00	2,63	10,25	36018,69	36006,98	22,02	0	0	14,34	-11,53	-2,81
18:50:00	2,59	10,09	35842,48	35830,8	22,01	0	0	14,27	-12,08	-2,19
19:00:00	2,55	9,93	35666,01	35654,37	22	0	0	14,19	-12,62	-1,57
19:10:00	2,52	9,81	35489,3	35477,7	21,99	0	0	14,12	-13,52	-0,6
19:20:00	2,49	9,7	35312,43	35300,88	21,98	0	0	14,04	-14,41	0,37
19:30:00	2,46	9,58	35135,43	35123,92	21,97	0	0	13,96	-15,31	1,34
19:40:00	2,43	9,46	34958,27	34946,81	21,96	0	0	13,89	-16,2	2,31
19:50:00	2,4	9,35	34780,96	34769,55	21,95	0	0	13,81	-17,1	3,28
20:00:00	2,37	9,23	34603,5	34592,13	21,94	0	0	13,74	-17,99	4,25
20:10:00	2,35	9,18	34425,89	34414,58	21,92	0	0	13,66	-18,62	4,96
20:20:00	2,34	9,13	34248,29	34237,05	21,91	0	0	13,58	-19,25	5,66
20:30:00	2,33	9,08	34070,72	34059,54	21,9	0	0	13,51	-19,87	6,37
20:40:00	2,32	9,03	33893,17	33882,06	21,89	0	0	13,43	-20,5	7,07
20:50:00	2,3	8,98	33715,64	33704,59	21,88	0	0	13,36	-21,13	7,78
21:00:00	2,29	8,93	33538,13	33527,14	21,87	0	0	13,28	-21,76	8,48
21:10:00	2,29	8,93	33360,64	33349,73	21,86	0	0	13,2	-22,39	9,19
21:20:00	2,29	8,92	33183,29	33172,45	21,85	0	0	13,13	-23,03	9,9
21:30:00	2,29	8,92	33006,09	32995,33	21,84	0	0	13,05	-23,66	10,61
21:40:00	2,29	8,92	32829,03	32818,35	21,83	0	0	12,97	-24,29	11,32
21:50:00	2,29	8,91	32652,12	32641,51	21,82	0	0	12,9	-24,93	12,03
22:00:00	2,29	8,91	32475,35	32464,82	21,81	0	0	12,82	-25,56	12,74
22:10:00	2,28	8,9	32298,73	32288,27	21,79	0	0	12,74	-26,01	13,27
22:20:00	2,28	8,9	32122,24	32111,86	21,78	0	0	12,67	-26,47	13,8
22:30:00	2,28	8,89	31945,89	31935,58	21,77	0	0	12,59	-26,92	14,33
22:40:00	2,28	8,88	31769,67	31759,44	21,76	0	0	12,51	-27,37	14,86
22:50:00	2,28	8,88	31593,59	31583,43	21,75	0	0	12,44	-27,83	15,39
23:00:00	2,28	8,87	31417,64	31407,56	21,74	0	0	12,36	-28,28	15,92
23:10:00	2,26	8,83	31241,83	31231,81	21,73	0	0	12,28	-29,11	16,82
23:20:00	2,25	8,79	31066,05	31056,1	21,72	0	0	12,21	-29,93	17,72
23:30:00	2,24	8,75	30890,3	30880,41	21,71	0	0	12,13	-30,76	18,63
23:40:00	2,23	8,7	30714,58	30704,76	21,7	0	0	12,06	-31,59	19,53
23:50:00	2,22	8,66	30538,9	30529,14	21,69	0	0	11,98	-32,41	20,43
24:00:00	2,21	8,62	30363,24	30353,55	21,68	0	0	11,9	-33,24	21,34

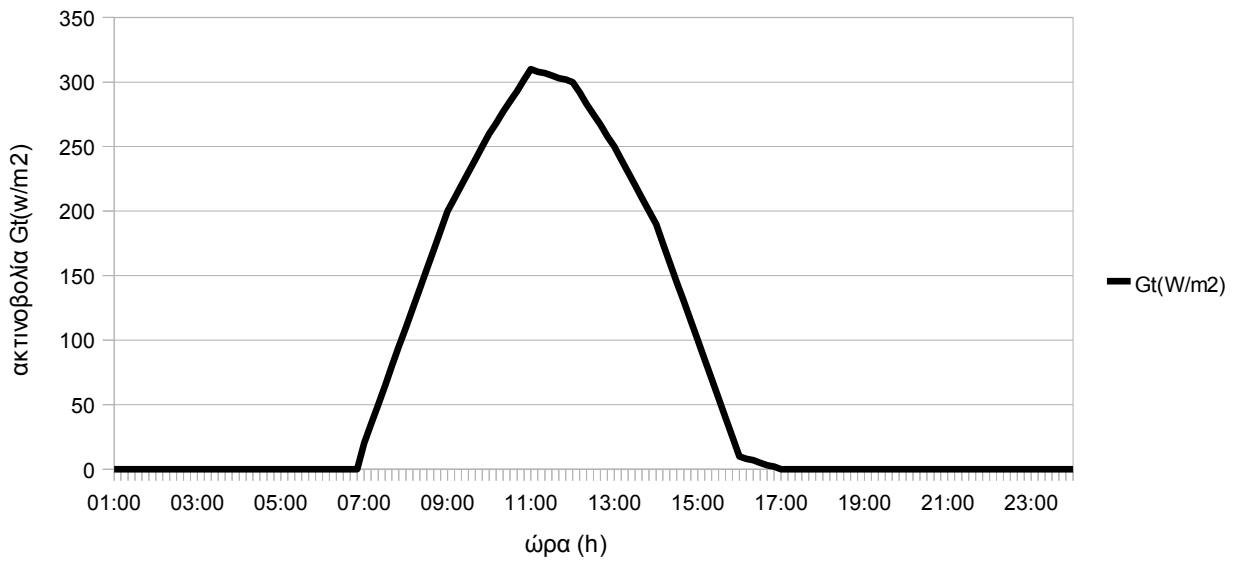
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τους παραπάνω πίνακες.



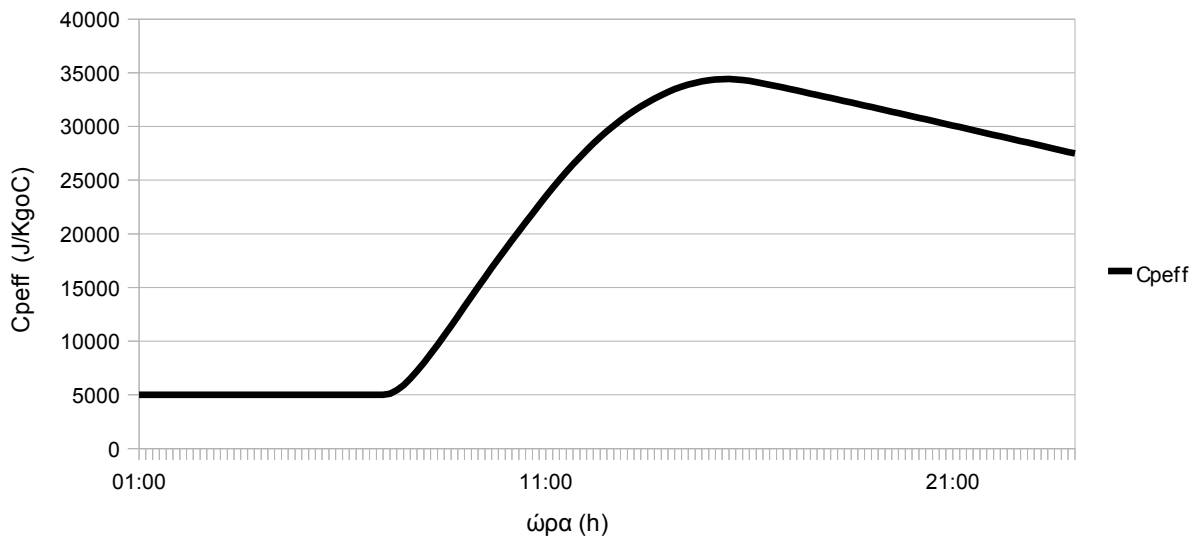
Εικόνα 11.5.1: Κατανομή της θερμοκρασίας T1 συναρτήσει της ώρας



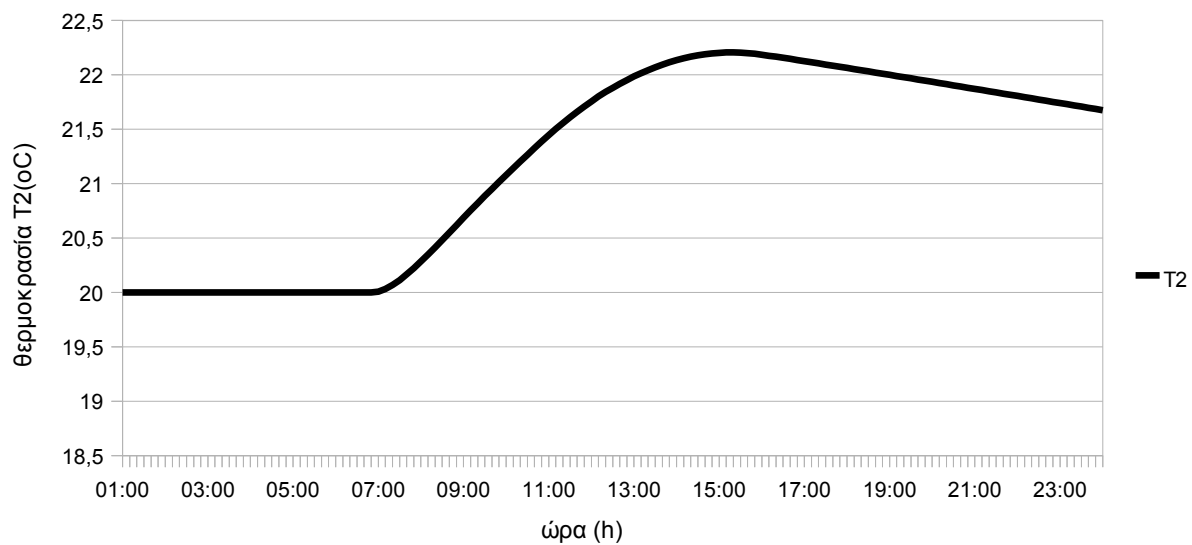
Εικόνα 11.5.2: Κατανομή της θερμότητας που προσδίδει το pcm στο δωμάτιο συναρτήσει της ώρας



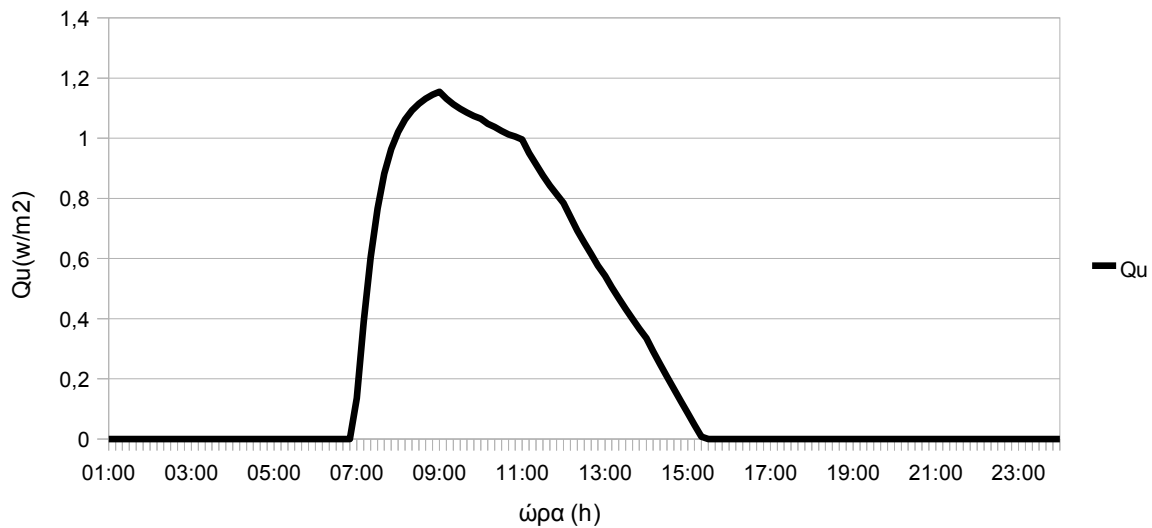
Εικόνα 11.5.3: Κατανομή της ακτινοβολίας Gt συναρτήσει της ώρας



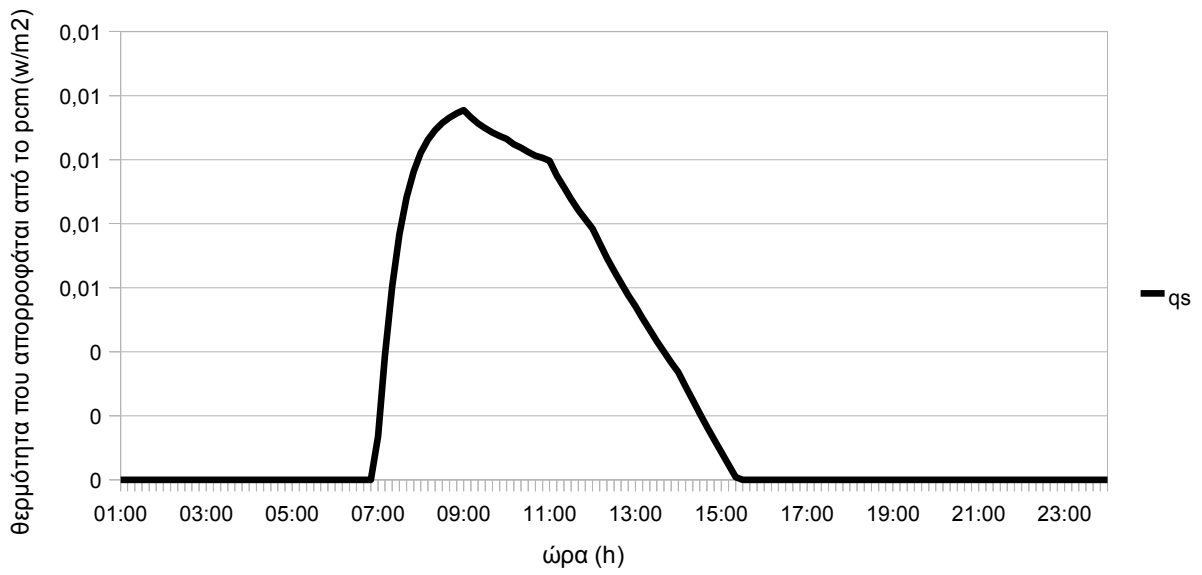
Εικόνα 11.5.4: Κατανομή του Cpeff συναρτήσει της ώρας



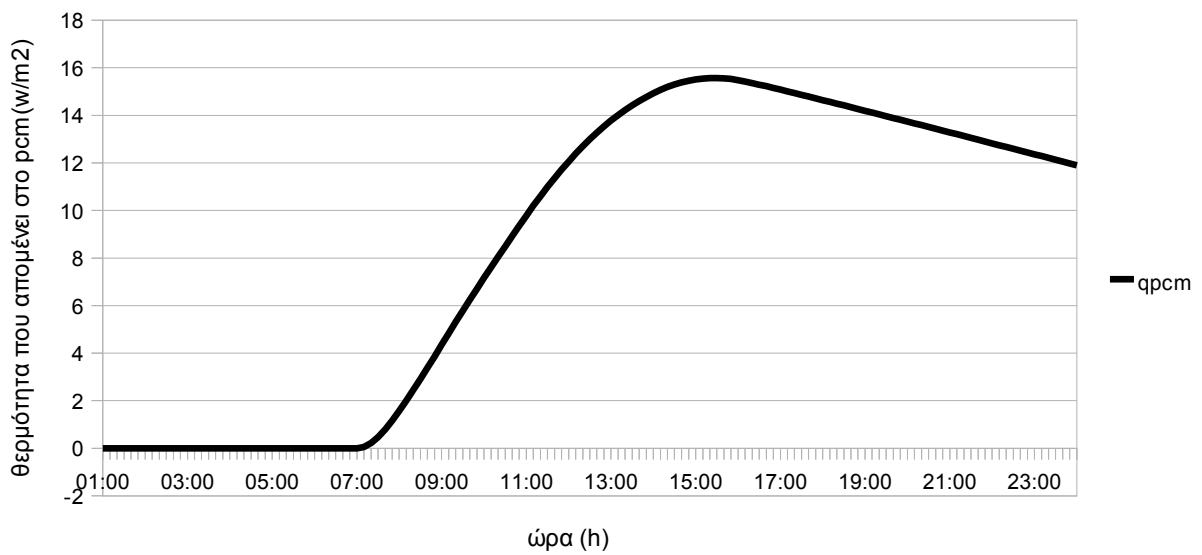
Εικόνα 11.5.5: Κατανομή της θερμοκρασίας T_2 συναρτήσει της ώρας



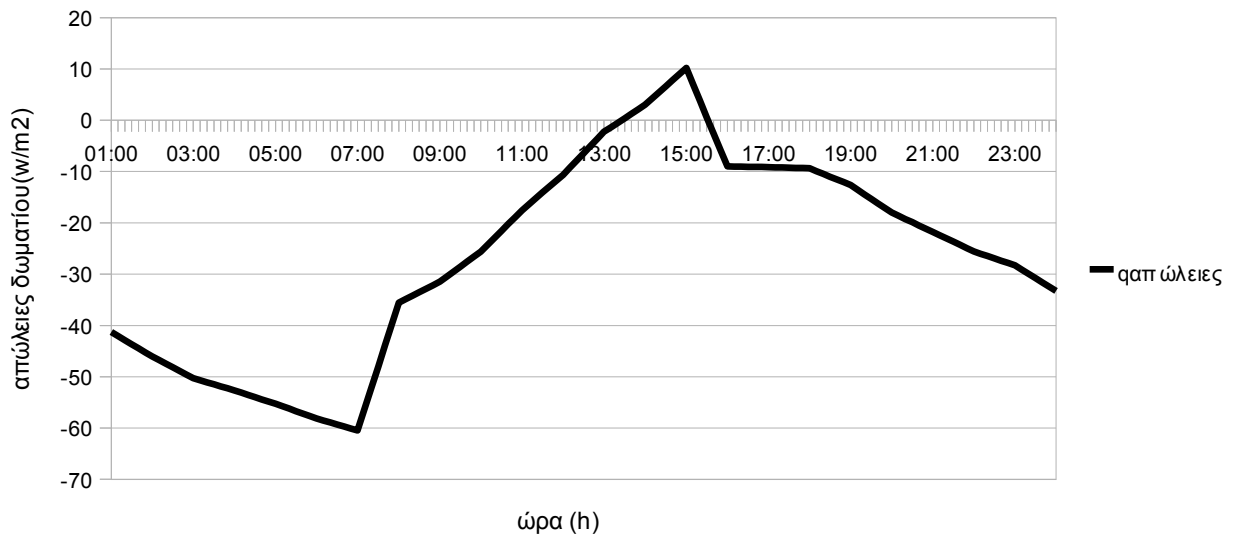
Εικόνα 11.5.6: Κατανομή της Θερμότητας ηλιακών συλλεκτών , Q_u , συναρτήσει της ώρας



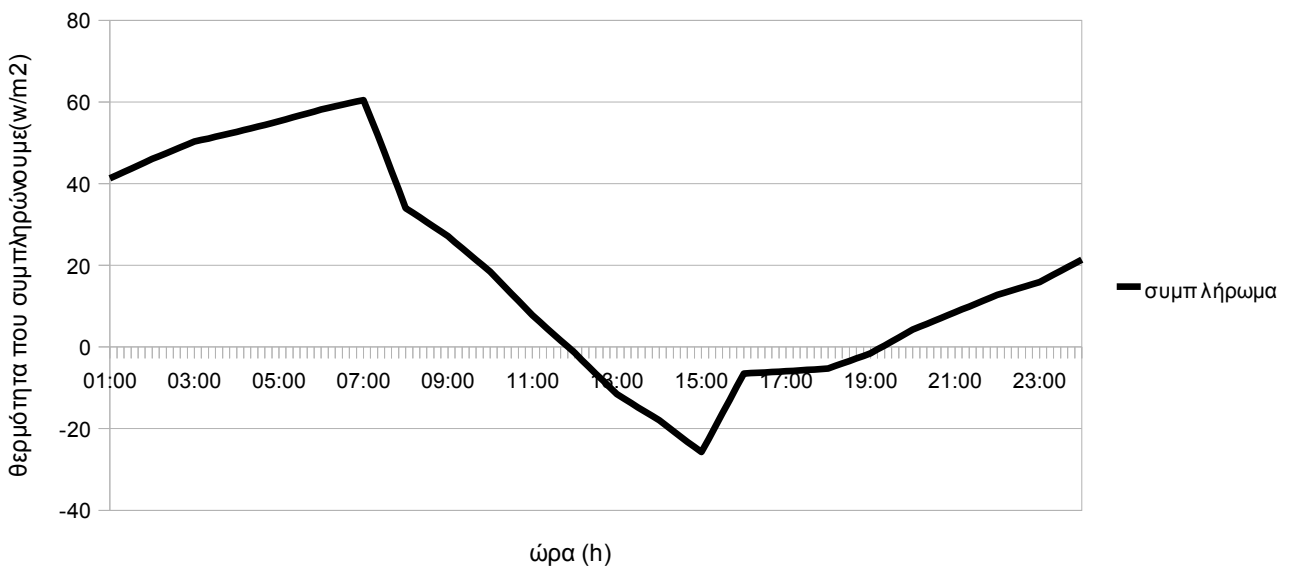
Εικόνα 11.5.7: Κατανομή της θερμότητας που απορροφάται από το pcm συναρτήσει της ώρας



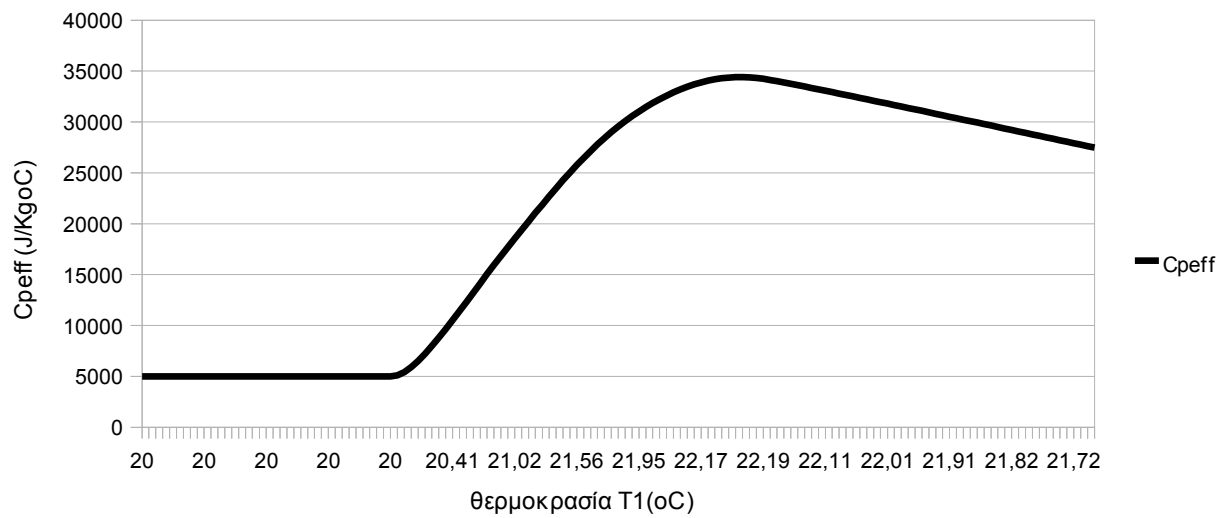
Εικόνα 11.5.8: Κατανομή της θερμότητας που παραμένει στο Pcm συναρτήσει της ώρας



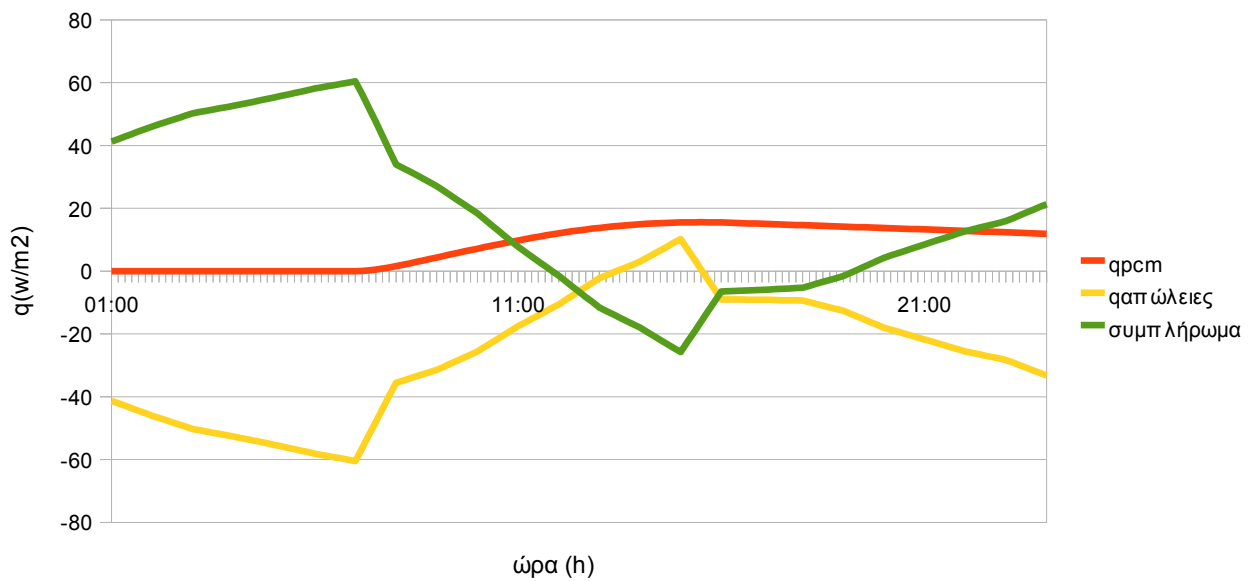
Εικόνα 11.5.9: Κατανομή των απωλειών δωματίου συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.5.10: Κατανομή της θερμότητας που συμπληρώνουμε ώστε η θερμοκρασία στο δωμάτιο να είναι ίση με 20 °C συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.5.11: Κατανομή του C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας T_1



Εικόνα 11.5.12: Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής των q_{rad} , $q_{απώλειες}$ και $q_{συμπληρώματος}$ συναρτήσει της ώρας

11.6 Συνδυασμός της εφαρμογής 11.4 και 11.5

Πίνακας 11.6.1

time	αρχική T	$q_R = (1/(1/h+0,02/k)) \cdot (t-20)$	Gt(W/m2)	Cpeff	$(Ac/A\delta\alpha\pi) \cdot Fr \cdot Gt \cdot \tau\alpha - q_R$	$(m\pi cm \cdot Cpeff) / (\Delta t \cdot A) + (Ac/A\delta\alpha\pi) \cdot Fr \cdot U_L$
01:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
01:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
01:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
01:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
01:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
01:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
02:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
02:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
02:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
02:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
02:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
02:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
03:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
03:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
03:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
03:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
03:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
03:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
04:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
04:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
04:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
04:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
04:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
04:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
05:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
05:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
05:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
05:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
05:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
05:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
06:00:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
06:10:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
06:20:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
06:30:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
06:40:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
06:50:00	20	0	0	5000	0,000	255,26
07:00:00	20	0	20,000	5000	10,830	255,26
07:10:00	20,02	0,11	35,000	5215,74	18,838	266,25
07:20:00	20,06	0,44	50,000	5824,81	26,638	297,29
07:30:00	20,13	0,91	65,000	6720,55	34,287	342,92
07:40:00	20,21	1,48	80,000	7794,37	41,841	397,64
07:50:00	20,3	2,1	95,000	8973,44	49,339	457,71
08:00:00	20,39	2,76	110,000	10215,82	56,804	521,01
08:10:00	20,49	3,44	125,000	11497,9	64,247	586,33
08:20:00	20,59	4,13	140,000	12807,07	71,677	653,03
08:30:00	20,69	4,84	155,000	14134,77	79,096	720,68
08:40:00	20,79	5,55	170,000	15475,6	86,509	788,99
08:50:00	20,89	6,26	185,000	16826,05	93,917	857,8

09:00:00	20,99	6,98	200,000	18183,73	101,320	926,97
09:10:00	21,09	7,7	210,000	19546,94	106,014	996,43
09:20:00	21,19	8,41	220,000	20878,65	110,724	1064,28
09:30:00	21,29	9,1	230,000	22185,13	115,447	1130,85
09:40:00	21,39	9,78	240,000	23471,05	120,181	1196,36
09:50:00	21,48	10,45	250,000	24739,93	124,924	1261,01
10:00:00	21,57	11,11	260,000	25994,51	129,675	1324,93
10:10:00	21,67	11,77	268,000	27236,94	133,350	1388,24
10:20:00	21,76	12,42	277,000	28458,52	137,576	1450,47
10:30:00	21,85	13,06	285,000	29667,03	141,268	1512,05
10:40:00	21,94	13,69	293,000	30859,36	144,969	1572,8
10:50:00	22,03	14,31	302,000	32037,48	149,219	1632,82
11:00:00	22,12	14,93	310,000	33207,45	152,932	1692,43
11:10:00	22,2	15,55	308,000	34365,9	151,235	1751,46
11:20:00	22,29	16,13	307,000	35472,6	150,108	1807,84
11:30:00	22,37	16,7	305,000	36536,69	148,462	1862,06
11:40:00	22,44	17,24	303,000	37558,22	146,838	1914,1
11:50:00	22,52	17,76	302,000	38540,9	145,776	1964,17
12:00:00	22,59	18,26	300,000	39491,55	144,190	2012,61
12:10:00	22,66	18,75	292,000	40409,04	139,372	2059,35
12:20:00	22,72	19,2	283,000	41274,56	134,040	2103,45
12:30:00	22,78	19,63	275,000	42088,18	129,278	2144,91
12:40:00	22,84	20,04	267,000	42856,53	124,539	2184,05
12:50:00	22,89	20,43	258,000	43582,25	119,281	2221,03
13:00:00	22,94	20,79	250,000	44264,4	114,588	2255,78
13:10:00	22,99	21,13	240,000	44908,39	108,832	2288,6
13:20:00	23,04	21,45	230,000	45509,6	103,099	2319,23
13:30:00	23,08	21,74	220,000	46069,9	97,387	2347,77
13:40:00	23,12	22,02	210,000	46590,96	91,696	2374,32
13:50:00	23,16	22,27	200,000	47074,24	86,025	2398,95
14:00:00	23,19	22,51	190,000	47521,07	80,374	2421,71
14:10:00	23,22	22,73	175,000	47932,6	72,033	2442,68
14:20:00	23,25	22,92	160,000	48295,05	63,719	2461,15
14:30:00	23,27	23,09	145,000	48609,72	55,430	2477,18
14:40:00	23,29	23,23	130,000	48877,72	47,166	2490,83
14:50:00	23,31	23,35	115,000	49100,01	38,925	2502,16
15:00:00	23,32	23,44	100,000	49277,4	30,709	2511,2
15:10:00	23,33	23,51	85,000	49410,54	22,516	2517,98
15:20:00	23,34	23,56	70,000	49499,86	14,346	2522,53
15:30:00	23,34	23,58	55,000	49545,76	6,199	2524,87
15:40:00	23,34	23,58	40,000	49548,53	-1,925	2525,01
15:50:00	23,34	23,56	25,000	49508,35	-10,026	2522,96
16:00:00	23,33	23,52	10,000	49425,28	-18,104	2518,73
16:10:00	23,32	23,45	8,000	49299,27	-19,121	2512,31
16:20:00	23,31	23,38	7,000	49167,34	-19,592	2505,59
16:30:00	23,3	23,31	5,000	49032,36	-20,604	2498,71
16:40:00	23,29	23,24	3,000	48891,4	-21,612	2491,53
16:50:00	23,28	23,16	2,000	48744,46	-22,076	2484,04

17:00:00	23,27	23,08	0	48594,38	-23,079	2476,4
17:10:00	23,26	23	0	48438,24	-22,997	2468,44
17:20:00	23,25	22,91	0	48281,69	-22,914	2460,47
17:30:00	23,23	22,83	0	48124,72	-22,831	2452,47
17:40:00	23,22	22,75	0	47967,32	-22,747	2444,45
17:50:00	23,21	22,66	0	47809,5	-22,664	2436,41
18:00:00	23,2	22,58	0	47651,25	-22,580	2428,34
18:10:00	23,19	22,5	0	47492,57	-22,496	2420,26
18:20:00	23,18	22,41	0	47333,41	-22,412	2412,15
18:30:00	23,16	22,33	0	47173,77	-22,327	2404,02
18:40:00	23,15	22,24	0	47013,64	-22,243	2395,86
18:50:00	23,14	22,16	0	46853,01	-22,157	2387,67
19:00:00	23,13	22,07	0	46691,89	-22,072	2379,46
19:10:00	23,11	21,99	0	46530,28	-21,987	2371,23
19:20:00	23,1	21,9	0	46368,28	-21,901	2362,98
19:30:00	23,09	21,81	0	46205,89	-21,815	2354,7
19:40:00	23,08	21,73	0	46043,12	-21,729	2346,41
19:50:00	23,07	21,64	0	45879,96	-21,642	2338,1
20:00:00	23,05	21,56	0	45716,41	-21,556	2329,76
20:10:00	23,04	21,47	0	45552,46	-21,469	2321,41
20:20:00	23,03	21,38	0	45388,31	-21,382	2313,05
20:30:00	23,02	21,3	0	45223,95	-21,295	2304,67
20:40:00	23	21,21	0	45059,39	-21,208	2296,29
20:50:00	22,99	21,12	0	44894,62	-21,121	2287,89
21:00:00	22,98	21,03	0	44729,64	-21,033	2279,49
21:10:00	22,97	20,95	0	44564,46	-20,946	2271,07
21:20:00	22,95	20,86	0	44399,2	-20,858	2262,65
21:30:00	22,94	20,77	0	44233,86	-20,771	2254,23
21:40:00	22,93	20,68	0	44068,46	-20,683	2245,8
21:50:00	22,92	20,6	0	43902,98	-20,596	2237,37
22:00:00	22,91	20,51	0	43737,43	-20,508	2228,94
22:10:00	22,89	20,42	0	43571,81	-20,420	2220,5
22:20:00	22,88	20,33	0	43406,1	-20,333	2212,05
22:30:00	22,87	20,24	0	43240,3	-20,245	2203,61
22:40:00	22,86	20,16	0	43074,42	-20,157	2195,15
22:50:00	22,84	20,07	0	42908,45	-20,069	2186,7
23:00:00	22,83	19,98	0	42742,39	-19,981	2178,24
23:10:00	22,82	19,89	0	42576,24	-19,893	2169,77
23:20:00	22,81	19,81	0	42409,89	-19,805	2161,3
23:30:00	22,79	19,72	0	42243,35	-19,717	2152,81
23:40:00	22,78	19,63	0	42076,59	-19,629	2144,32
23:50:00	22,77	19,54	0	41909,64	-19,540	2135,81
24:00:00	22,76	19,45	0	41742,48	-19,452	2127,29

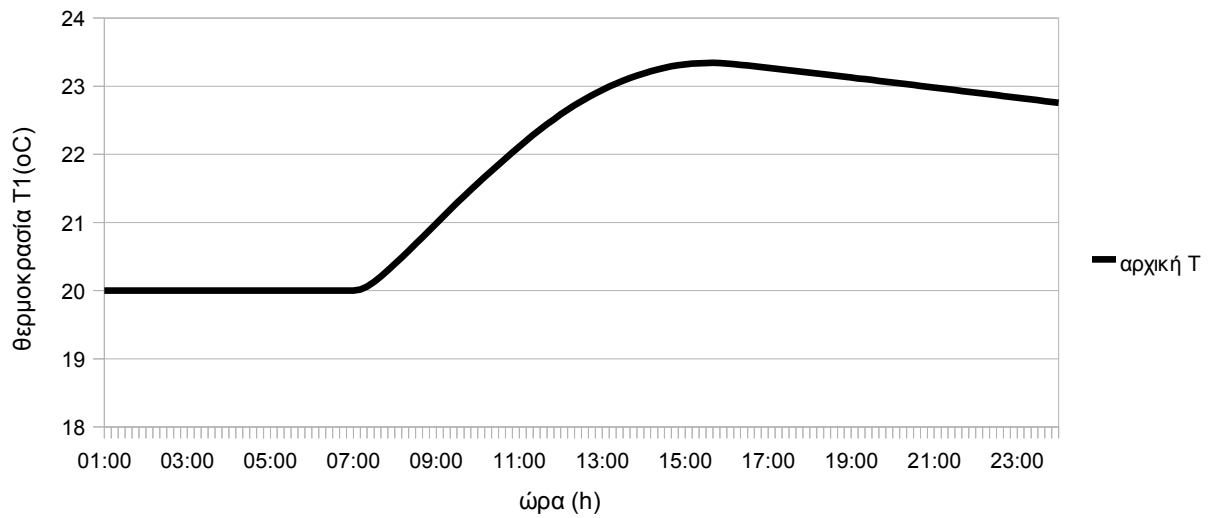
Πίνακας 11.6.2

time	(Ac/Aδσπ)*Fr*UL*Ta	to	(mpcm*Cpeff*T1)/(Δt*A)	b	T2	Qu	qs	qpcm	qαπώλ	συμπλ
01:00:00	4,21	8,2	5095	5099,21	20	0	0	0	-41,27	41,27
01:10:00	4,17	8,14	5095	5099,17	20	0	0	0	-42,07	42,07
01:20:00	4,14	8,07	5095	5099,14	20	0	0	0	-42,86	42,86
01:30:00	4,11	8,01	5095	5099,11	20	0	0	0	-43,66	43,66
01:40:00	4,07	7,94	5095	5099,07	20	0	0	0	-44,45	44,45
01:50:00	4,04	7,88	5095	5099,04	20	0	0	0	-45,25	45,25
02:00:00	4,01	7,81	5095	5099,01	20	0	0	0	-46,05	46,05
02:10:00	3,99	7,77	5095	5098,99	20	0	0	0	-46,75	46,75
02:20:00	3,97	7,74	5095	5098,97	20	0	0	0	-47,46	47,46
02:30:00	3,95	7,7	5095	5098,95	20	0	0	0	-48,16	48,16
02:40:00	3,93	7,66	5095	5098,93	20	0	0	0	-48,87	48,87
02:50:00	3,91	7,63	5095	5098,91	20	0	0	0	-49,57	49,57
03:00:00	3,89	7,59	5095	5098,89	20	0	0	0	-50,28	50,28
03:10:00	3,88	7,57	5095	5098,88	20	0	0	0	-50,68	50,68
03:20:00	3,87	7,54	5095	5098,87	20	0	0	0	-51,07	51,07
03:30:00	3,86	7,52	5095	5098,86	20	0	0	0	-51,47	51,47
03:40:00	3,85	7,5	5095	5098,85	20	0	0	0	-51,86	51,86
03:50:00	3,83	7,47	5095	5098,83	20	0	0	0	-52,26	52,26
04:00:00	3,82	7,45	5095	5098,82	20	0	0	0	-52,66	52,66
04:10:00	3,81	7,42	5095	5098,81	20	0	0	0	-53,1	53,1
04:20:00	3,79	7,39	5095	5098,79	20	0	0	0	-53,53	53,53
04:30:00	3,77	7,36	5095	5098,77	20	0	0	0	-53,97	53,97
04:40:00	3,76	7,32	5095	5098,76	20	0	0	0	-54,4	54,4
04:50:00	3,74	7,29	5095	5098,74	20	0	0	0	-54,84	54,84
05:00:00	3,72	7,26	5095	5098,72	20	0	0	0	-55,28	55,28
05:10:00	3,7	7,22	5095	5098,7	20	0	0	0	-55,76	55,76
05:20:00	3,68	7,18	5095	5098,68	20	0	0	0	-56,23	56,23
05:30:00	3,66	7,14	5095	5098,66	20	0	0	0	-56,71	56,71
05:40:00	3,64	7,1	5095	5098,64	20	0	0	0	-57,18	57,18
05:50:00	3,62	7,06	5095	5098,62	20	0	0	0	-57,66	57,66
06:00:00	3,6	7,02	5095	5098,6	20	0	0	0	-58,13	58,13
06:10:00	3,59	7,01	5095	5098,59	20	0	0	0	-58,52	58,52
06:20:00	3,59	6,99	5095	5098,59	20	0	0	0	-58,91	58,91
06:30:00	3,58	6,98	5095	5098,58	20	0	0	0	-59,3	59,3
06:40:00	3,57	6,97	5095	5098,57	20	0	0	0	-59,69	59,69
06:50:00	3,57	6,95	5095	5098,57	20	0	0	0	-60,08	60,08
07:00:00	3,56	6,94	5095	5109,39	20,02	0,27	0	0	-60,47	60,47
07:10:00	3,59	7	5319,14	5341,57	20,06	0,76	0,01	0,11	-56,32	56,21
07:20:00	3,63	7,07	5953,84	5984,11	20,13	1,12	0,01	0,43	-52,17	51,73
07:30:00	3,66	7,13	6892,42	6930,37	20,21	1,34	0,01	0,9	-48,02	47,11
07:40:00	3,69	7,19	8025,69	8071,22	20,3	1,48	0,01	1,46	-43,87	42,39
07:50:00	3,72	7,26	9280,19	9333,25	20,39	1,56	0,02	2,09	-39,72	37,62
08:00:00	3,76	7,32	10613,53	10674,09	20,49	1,61	0,02	2,75	-35,57	32,81
08:10:00	3,83	7,47	12001,86	12069,94	20,59	1,64	0,02	3,42	-34,89	31,44
08:20:00	3,91	7,62	13432,47	13508,06	20,69	1,66	0,02	4,12	-34,2	30,07
08:30:00	3,99	7,77	14896,72	14979,8	20,79	1,68	0,02	4,82	-33,52	28,68
08:40:00	4,07	7,93	16389,13	16479,7	20,89	1,69	0,02	5,53	-32,83	27,28
08:50:00	4,14	8,08	17906,12	18004,18	20,99	1,7	0,02	6,24	-32,15	25,88

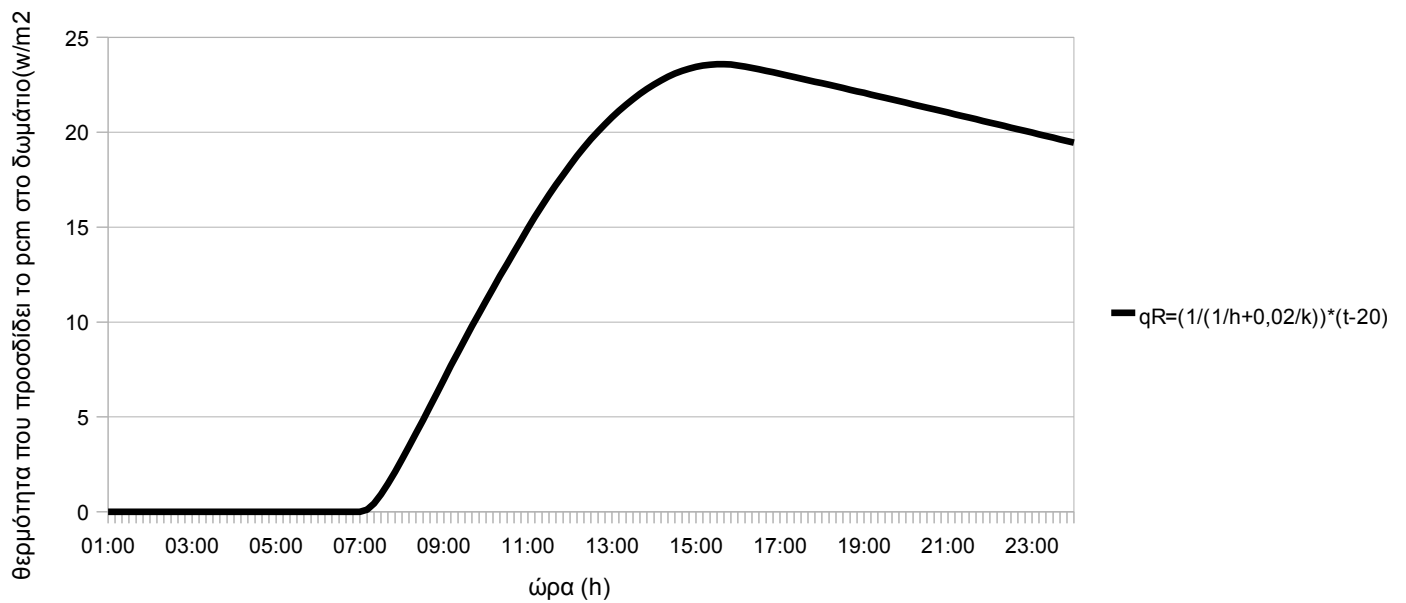
09:00:00	4,22	8,23	19445,28	19550,82	21,09	1,71	0,02	6,96	-31,46	24,48
09:10:00	4,33	8,44	21004,9	21115,24	21,19	1,67	0,02	7,68	-30,48	22,78
09:20:00	4,43	8,64	22542,18	22657,34	21,29	1,64	0,02	8,39	-29,51	21,1
09:30:00	4,54	8,85	24063,52	24183,5	21,39	1,61	0,02	9,08	-28,53	19,43
09:40:00	4,64	9,05	25573,65	25698,47	21,48	1,59	0,02	9,76	-27,56	17,78
09:50:00	4,75	9,26	27076,16	27205,83	21,57	1,57	0,02	10,43	-26,58	16,13
10:00:00	4,85	9,46	28573,82	28708,35	21,67	1,56	0,02	11,1	-25,6	14,49
10:10:00	4,95	9,66	30068,85	30207,15	21,76	1,53	0,02	11,76	-24,26	12,49
10:20:00	5,05	9,85	31550,28	31692,91	21,85	1,51	0,02	12,4	-22,92	10,5
10:30:00	5,16	10,05	33027,08	33173,51	21,94	1,49	0,01	13,04	-21,58	8,52
10:40:00	5,26	10,25	34495,06	34645,29	22,03	1,48	0,01	13,68	-20,24	6,55
10:50:00	5,36	10,44	35956,21	36110,79	22,12	1,47	0,01	14,3	-18,9	4,59
11:00:00	5,46	10,64	37417,75	37576,14	22,2	1,45	0,01	14,92	-17,56	2,63
11:10:00	5,53	10,78	38875,2	39031,96	22,29	1,39	0,01	15,53	-16,4	0,86
11:20:00	5,6	10,92	40277,13	40432,84	22,37	1,33	0,01	16,12	-15,25	-0,88
11:30:00	5,67	11,06	41633,9	41788,04	22,44	1,28	0,01	16,68	-14,09	-2,6
11:40:00	5,75	11,2	42944,57	43097,15	22,52	1,23	0,01	17,22	-12,94	-4,3
11:50:00	5,82	11,34	44212,89	44364,49	22,59	1,19	0,01	17,75	-11,78	-5,98
12:00:00	5,89	11,48	45446,91	45596,99	22,66	1,15	0,01	18,25	-10,62	-7,64
12:10:00	5,93	11,56	46644,44	46789,74	22,72	1,08	0,01	18,74	-9,22	-9,52
12:20:00	5,97	11,64	47780,01	47920,03	22,78	1,02	0,01	19,19	-7,83	-11,38
12:30:00	6,01	11,72	48852,73	48988,02	22,84	0,96	0,01	19,63	-6,43	-13,2
12:40:00	6,05	11,8	49870,4	50000,99	22,89	0,91	0,01	20,03	-5,04	-15,01
12:50:00	6,09	11,88	50835,75	50961,12	22,94	0,85	0,01	20,42	-3,64	-16,79
13:00:00	6,14	11,96	51746,82	51867,54	22,99	0,81	0,01	20,78	-2,24	-18,55
13:10:00	6,16	12	52610,18	52725,17	23,04	0,75	0,01	21,12	-1,36	-19,76
13:20:00	6,18	12,05	53419,05	53528,33	23,08	0,7	0,01	21,44	-0,49	-20,96
13:30:00	6,2	12,09	54175,37	54278,96	23,12	0,65	0,01	21,74	0,39	-22,13
13:40:00	6,22	12,13	54880,86	54978,78	23,16	0,61	0,01	22,01	1,26	-23,28
13:50:00	6,25	12,18	55537,07	55629,34	23,19	0,56	0,01	22,27	2,14	-24,41
14:00:00	6,27	12,22	56145,36	56232,01	23,22	0,52	0,01	22,51	3,02	-25,53
14:10:00	6,28	12,24	56706,97	56785,28	23,25	0,45	0	22,72	4,22	-26,95
14:20:00	6,29	12,26	57202,65	57272,66	23,27	0,39	0	22,92	5,42	-28,34
14:30:00	6,3	12,28	57633,8	57695,53	23,29	0,34	0	23,08	6,62	-29,71
14:40:00	6,31	12,3	58001,61	58055,09	23,31	0,28	0	23,23	7,82	-31,05
14:50:00	6,32	12,32	58307,11	58352,35	23,32	0,22	0	23,34	9,02	-32,37
15:00:00	6,33	12,34	58551,16	58588,2	23,33	0,17	0	23,44	10,22	-33,66
15:10:00	6,32	12,32	58734,5	58763,33	23,34	0,11	0	23,51	7,02	-30,53
15:20:00	6,31	12,3	58857,57	58878,22	23,34	0,06	0	23,56	3,81	-27,37
15:30:00	6,3	12,28	58920,83	58933,33	23,34	0	0	23,58	0,61	-24,19
15:40:00	6,29	12,26	58924,66	58929,02	23,34	0	0	23,58	-2,59	-20,99
15:50:00	6,28	12,24	58869,27	58865,53	23,33	0	0	23,56	-5,8	-17,77
16:00:00	6,27	12,22	58754,8	58742,97	23,32	0	0	23,52	-9	-14,52
16:10:00	6,23	12,14	58581,26	58568,37	23,31	0	0	23,45	-9,02	-14,43
16:20:00	6,19	12,06	58399,71	58386,31	23,3	0	0	23,38	-9,04	-14,34
16:30:00	6,14	11,98	58214,09	58199,63	23,29	0	0	23,31	-9,06	-14,25
16:40:00	6,1	11,89	58020,41	58004,9	23,28	0	0	23,24	-9,08	-14,16
16:50:00	6,06	11,81	57818,65	57802,63	23,27	0	0	23,16	-9,1	-14,06

17:00:00	6,02	11,73	57612,77	57595,71	23,26	0	0	23,08	-9,12	-13,96
17:10:00	5,94	11,59	57398,76	57381,71	23,25	0	0	23	-9,16	-13,84
17:20:00	5,87	11,45	57184,36	57167,32	23,23	0	0	22,91	-9,2	-13,71
17:30:00	5,8	11,31	56969,58	56952,54	23,22	0	0	22,83	-9,24	-13,59
17:40:00	5,73	11,16	56754,4	56737,38	23,21	0	0	22,75	-9,28	-13,47
17:50:00	5,65	11,02	56538,84	56521,83	23,2	0	0	22,66	-9,32	-13,34
18:00:00	5,58	10,88	56322,88	56305,88	23,19	0	0	22,58	-9,36	-13,22
18:10:00	5,5	10,72	56106,53	56089,53	23,18	0	0	22,5	-9,9	-12,59
18:20:00	5,42	10,56	55889,71	55872,72	23,16	0	0	22,41	-10,45	-11,97
18:30:00	5,34	10,41	55672,43	55655,44	23,15	0	0	22,33	-10,99	-11,34
18:40:00	5,26	10,25	55454,68	55437,7	23,14	0	0	22,24	-11,53	-10,71
18:50:00	5,18	10,09	55236,46	55219,48	23,13	0	0	22,16	-12,08	-10,08
19:00:00	5,09	9,93	55017,77	55000,79	23,11	0	0	22,07	-12,62	-9,45
19:10:00	5,03	9,81	54798,59	54781,64	23,1	0	0	21,99	-13,52	-8,47
19:20:00	4,97	9,7	54579,1	54562,18	23,09	0	0	21,9	-14,41	-7,49
19:30:00	4,91	9,58	54359,3	54342,4	23,08	0	0	21,81	-15,31	-6,51
19:40:00	4,85	9,46	54139,17	54122,29	23,07	0	0	21,73	-16,2	-5,53
19:50:00	4,8	9,35	53918,71	53901,86	23,05	0	0	21,64	-17,1	-4,55
20:00:00	4,73	9,23	53697,93	53681,11	23,04	0	0	21,56	-17,99	-3,57
20:10:00	4,71	9,18	53476,82	53460,06	23,03	0	0	21,47	-18,62	-2,85
20:20:00	4,68	9,13	53255,64	53238,94	23,02	0	0	21,38	-19,25	-2,14
20:30:00	4,66	9,08	53034,39	53017,75	23	0	0	21,3	-19,87	-1,42
20:40:00	4,63	9,03	52813,07	52796,5	22,99	0	0	21,21	-20,5	-0,7
20:50:00	4,61	8,98	52591,69	52575,17	22,98	0	0	21,12	-21,13	0,01
21:00:00	4,58	8,93	52370,22	52353,77	22,97	0	0	21,03	-21,76	0,73
21:10:00	4,58	8,93	52148,69	52132,32	22,95	0	0	20,95	-22,39	1,45
21:20:00	4,58	8,92	51927,27	51910,99	22,94	0	0	20,86	-23,03	2,17
21:30:00	4,58	8,92	51705,96	51689,76	22,93	0	0	20,77	-23,66	2,89
21:40:00	4,57	8,92	51484,76	51468,65	22,92	0	0	20,68	-24,29	3,61
21:50:00	4,57	8,91	51263,67	51247,65	22,91	0	0	20,6	-24,93	4,33
22:00:00	4,57	8,91	51042,69	51026,76	22,89	0	0	20,51	-25,56	5,05
22:10:00	4,57	8,9	50821,83	50805,98	22,88	0	0	20,42	-26,01	5,59
22:20:00	4,56	8,9	50601,06	50585,29	22,87	0	0	20,33	-26,47	6,13
22:30:00	4,56	8,89	50380,39	50364,7	22,86	0	0	20,24	-26,92	6,67
22:40:00	4,56	8,88	50159,81	50144,21	22,84	0	0	20,16	-27,37	7,21
22:50:00	4,55	8,88	49939,32	49923,81	22,83	0	0	20,07	-27,83	7,76
23:00:00	4,55	8,87	49718,93	49703,5	22,82	0	0	19,98	-28,28	8,3
23:10:00	4,53	8,83	49498,63	49483,27	22,81	0	0	19,89	-29,11	9,21
23:20:00	4,51	8,79	49278,28	49262,99	22,79	0	0	19,81	-29,93	10,13
23:30:00	4,49	8,75	49057,88	49042,65	22,78	0	0	19,72	-30,76	11,04
23:40:00	4,46	8,7	48837,42	48822,25	22,77	0	0	19,63	-31,59	11,96
23:50:00	4,44	8,66	48616,9	48601,8	22,76	0	0	19,54	-32,41	12,87
24:00:00	4,42	8,62	48396,32	48381,29	22,74	0	0	19,45	-33,24	13,79

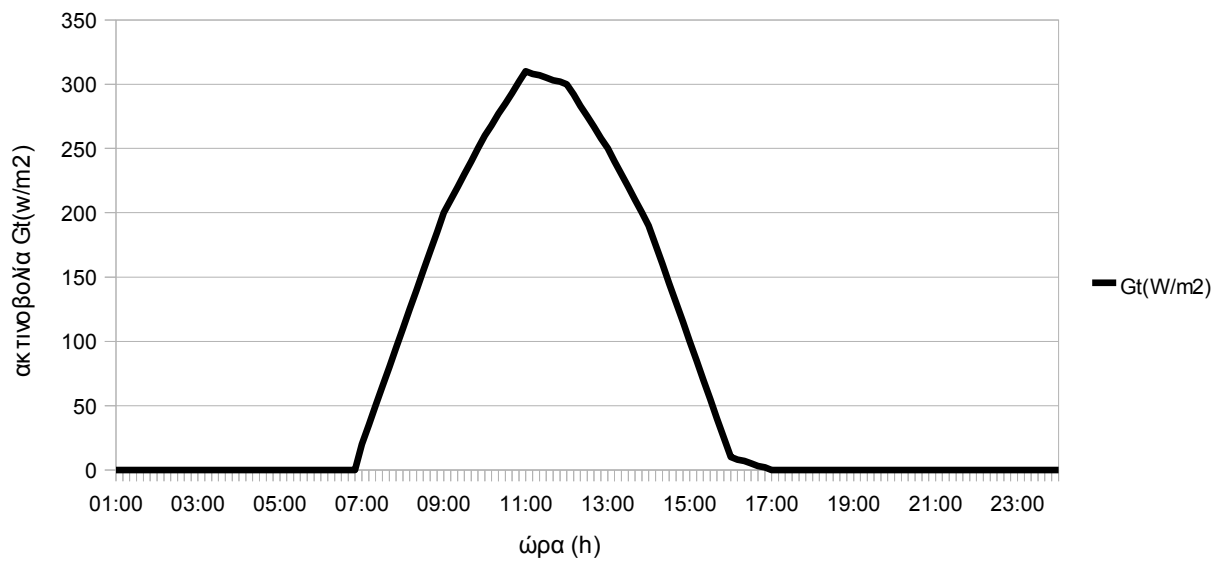
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τους παραπάνω πίνακες.



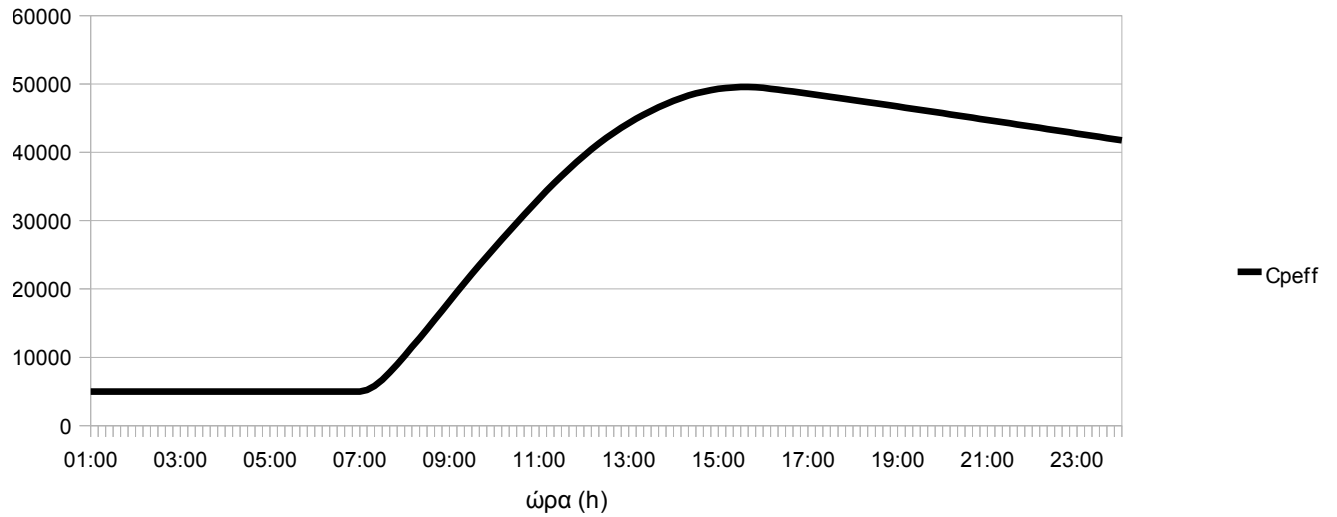
Εικόνα 11.6.1: Κατανομή της θερμοκρασίας T2 συναρτήσει της ώρας



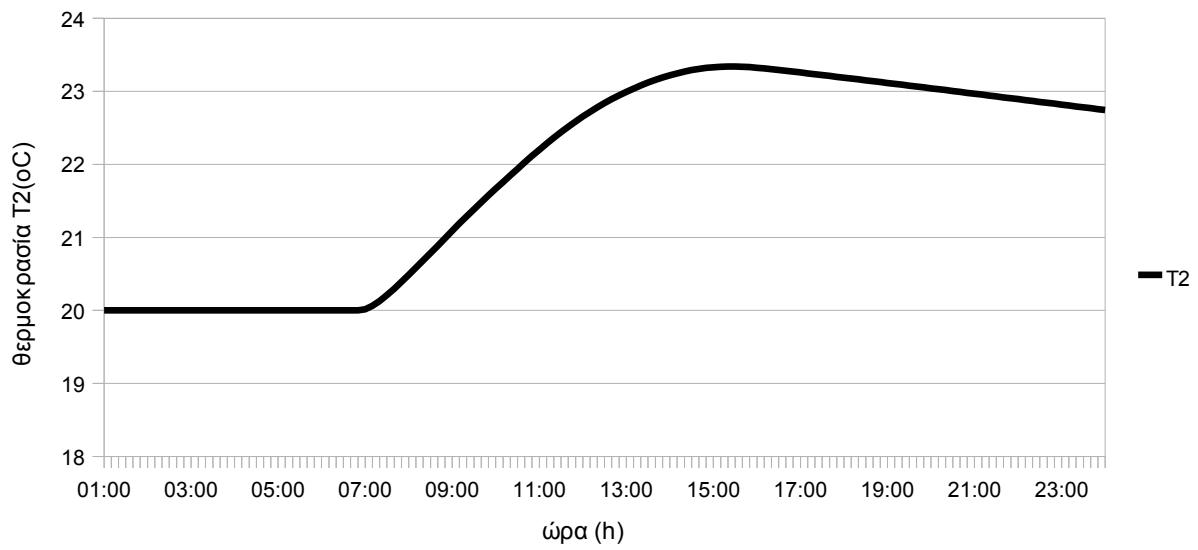
Εικόνα 11.6.2: Κατανομή της θερμότητας που προσδίδει το pcm στο δωμάτιο συναρτήσει της ώρας



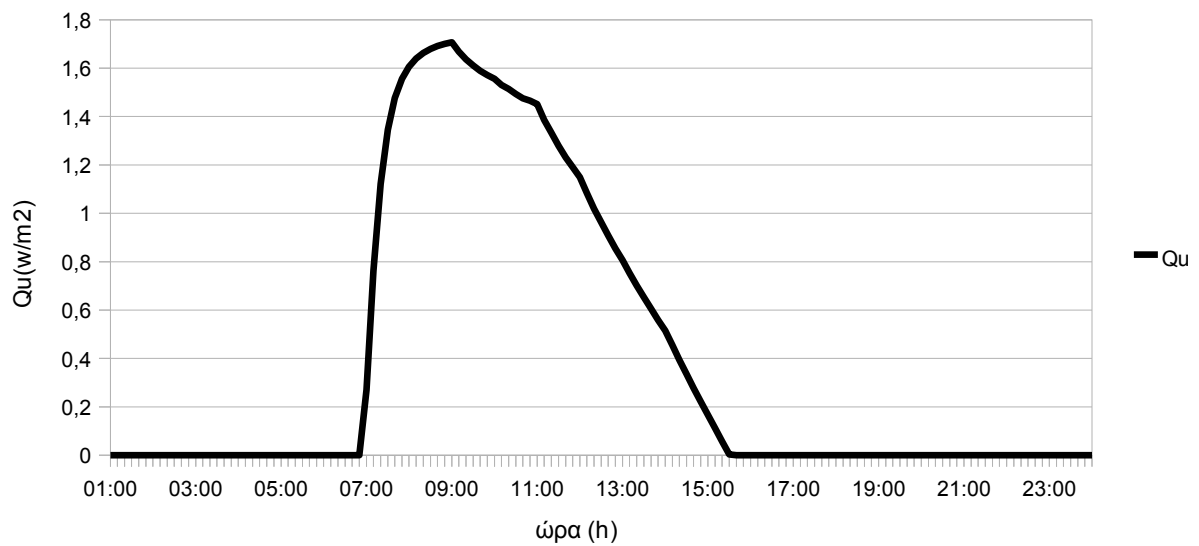
Εικόνα 11.6.3: Κατανομή της ακτινοβολίας G_t συναρτήσει της ώρας



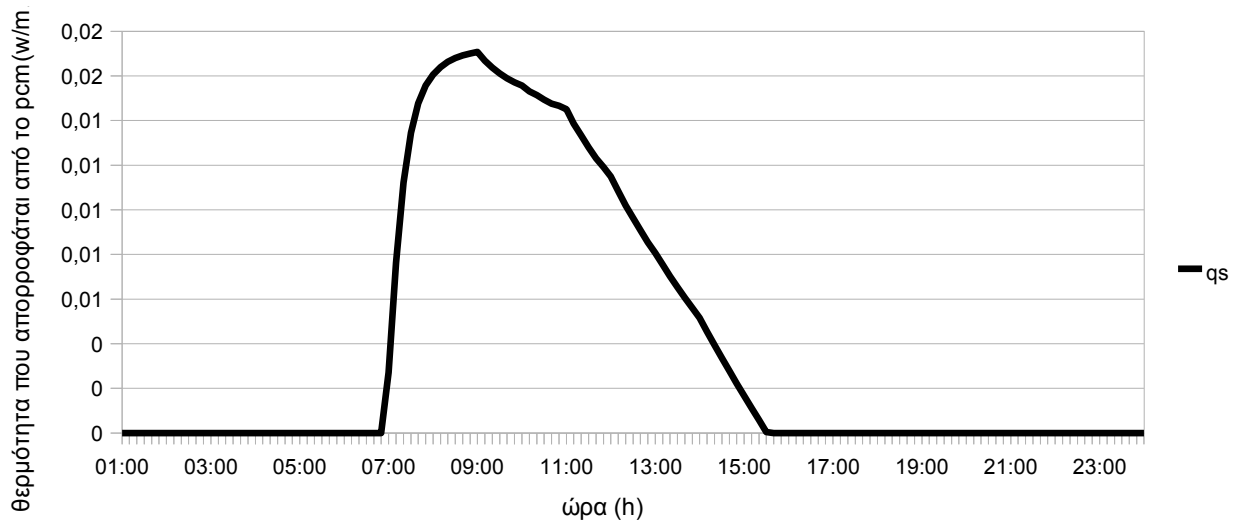
Εικόνα 11.6.4: Κατανομή του C_{peff} συναρτήσει της ώρας



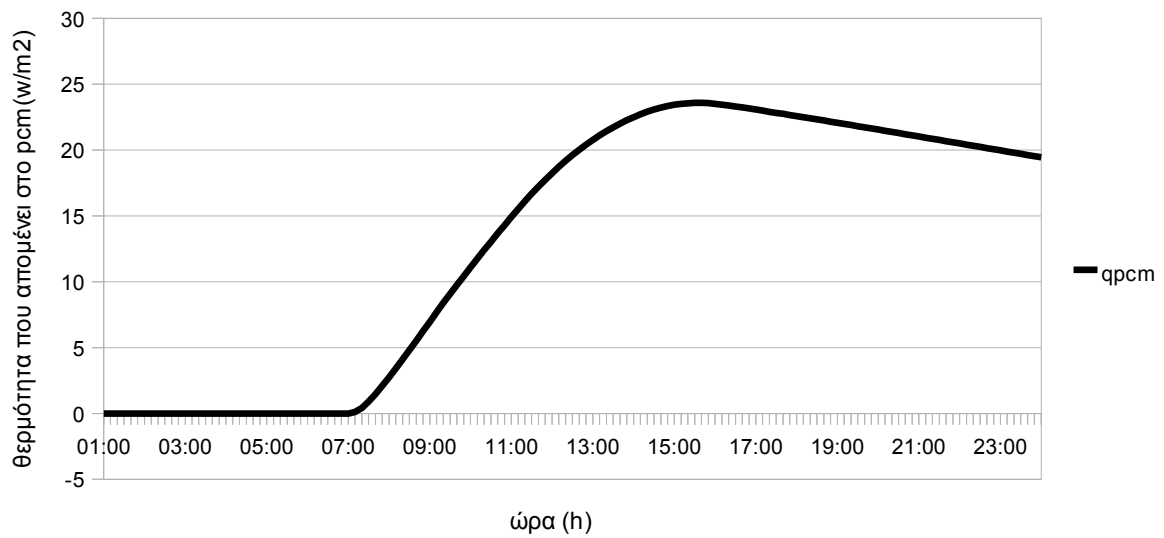
Εικόνα 11.6.5: Κατανομή της θερμοκρασίας T2 συναρτήσει της ώρας



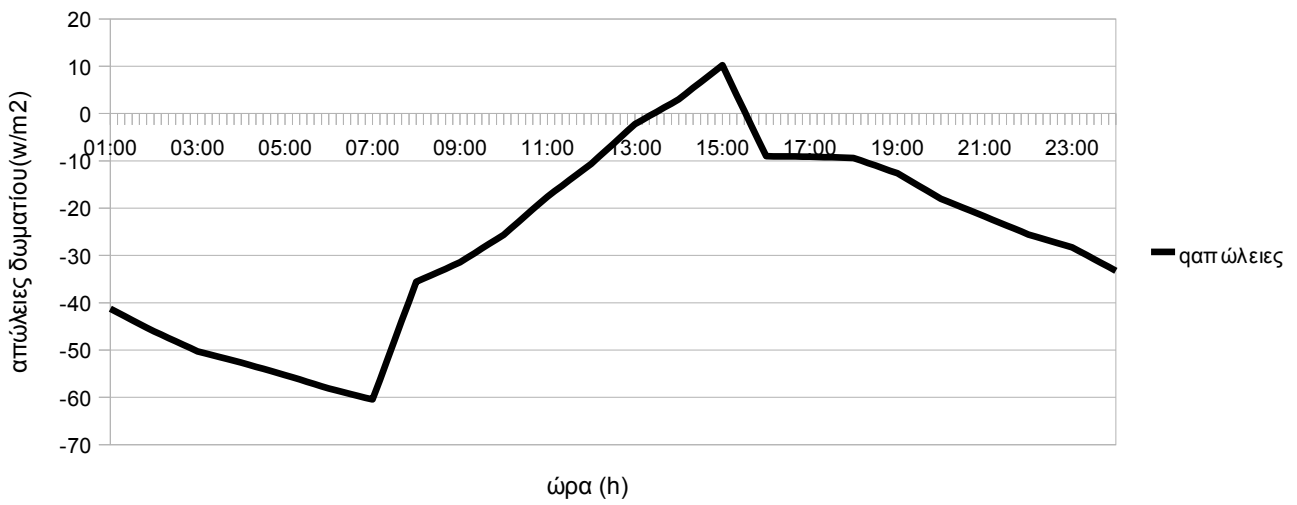
Εικόνα 11.6.6: Κατανομή της θερμότητας ηλιακών συλλεκτών, Qu, συναρτήσει της ώρας



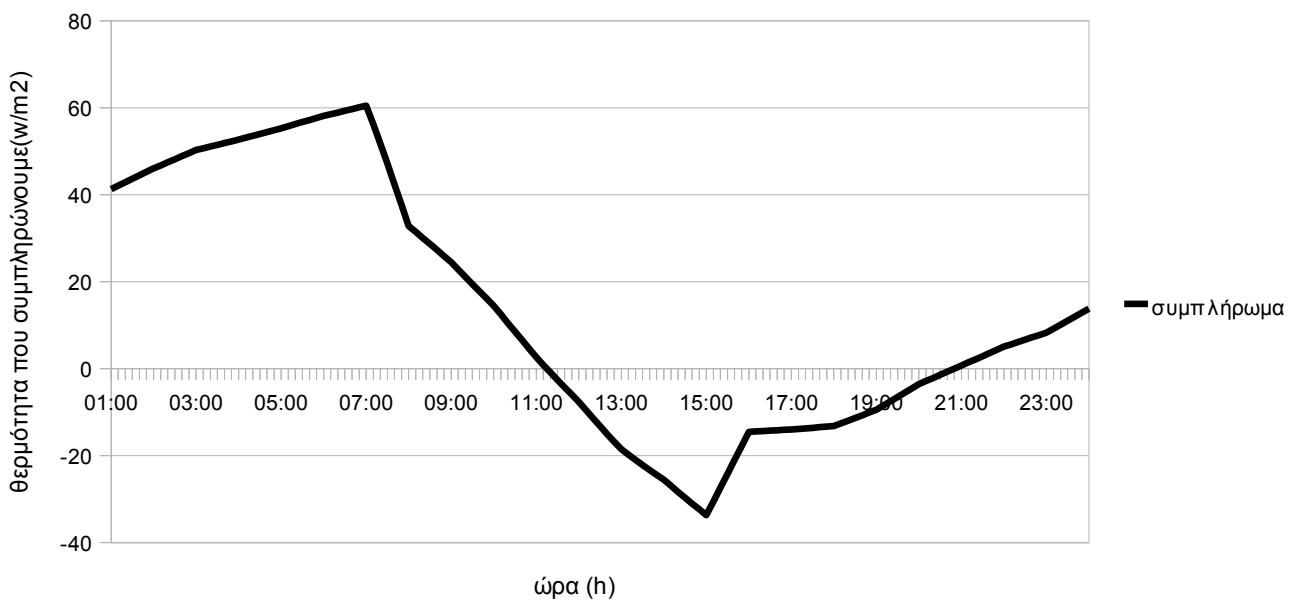
Εικόνα 11.6.7: Κατανομή της θερμότητας που απορροφάται από το pcm συναρτήσει της ώρας



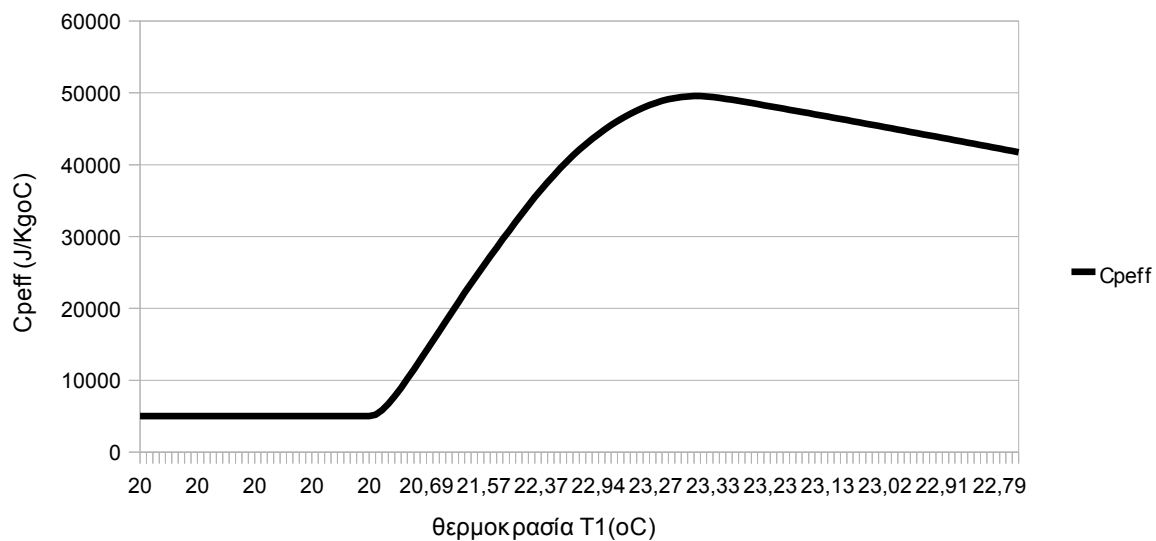
Εικόνα 11.6.8: Κατανομή της θερμότητας που απομένει στο pcm συναρτήσει της ώρας



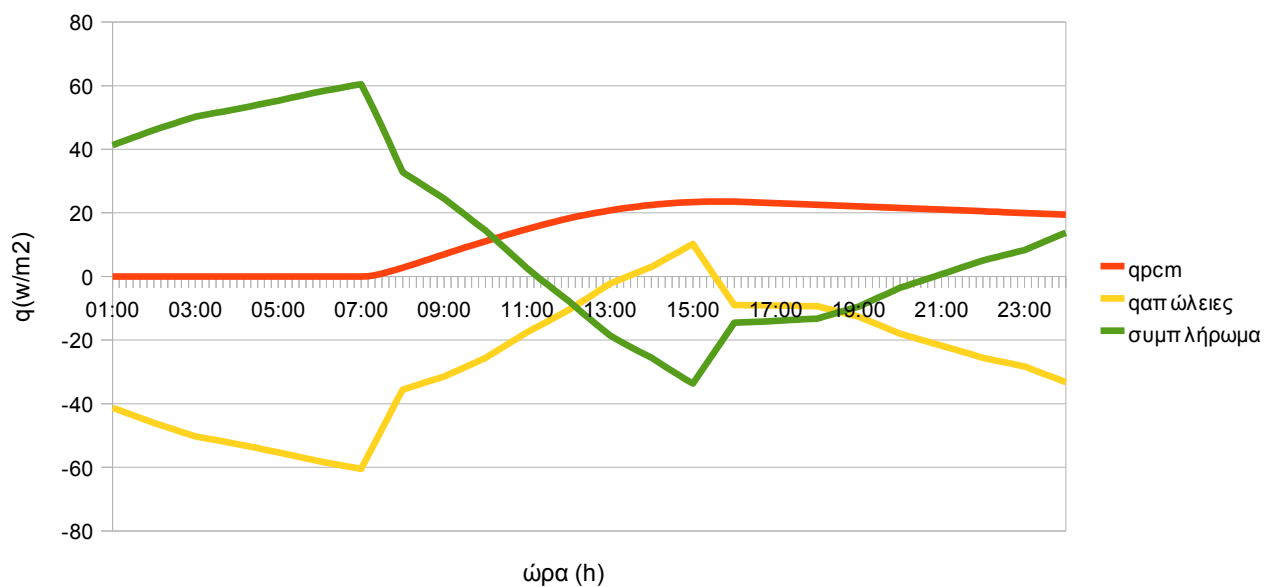
Εικόνα 11.6.9: Κατανομή των απωλειών του δωματίου συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.6.10: Κατανομή της θερμότητας που συμπληρώνουμε ώστε η θερμοκρασία στο δωμάτιο να είναι ίση με 20°C συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.6.11: Κατανομή του Cpeff συναρτήσει της θερμοκρασίας T1



Εικόνα 11.6.12: Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής των qrcm, qαπωλειών και qσυμπληρώματος συναρτήσει της ώρας

11.7 Συνέχεια της εφαρμογής 11.1-Χρήση της θερμότητας που έχει αποθηκευτεί στο pcm την επόμενη μέρα, μηδενικής ηλιακής ακτινοβολίας

Στην περίπτωση αυτή συνεχίζουμε την διαδικασία της εφαρμογής 11.1 μόνο που τώρα μηδενίζουμε την τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Από το διάγραμμα της θερμότητας που παραμένει στο pcm της εφαρμογής 11.1 γίνεται αντιληπτό ότι το pcm αποθηκεύει θερμότητα την οποία μπορούμε να αξιοποιήσουμε, πιθανόν την επόμενη μέρα μηδενικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Πίνακας 11.7.1

time	αρχική T	$q_R=(1/(1/h+0,02/k))*(t-20)$	Gt(W/m2)	C _{peff}	(Ac/Aδ _{απ})*Fr*Gt*τα-q _R	(mpcm*C _{peff})/(Δt*A)+(Ac/Aδ _{απ})*Fr*U _L
01:00:00	21,47	10,36	0	24560,4	-10,356	1251,48
01:10:00	21,46	10,29	0	24433,98	-10,289	1245,04
01:20:00	21,45	10,22	0	24309	-10,222	1238,67
01:30:00	21,44	10,16	0	24185,48	-10,157	1232,38
01:40:00	21,43	10,09	0	24063,42	-10,092	1226,16
01:50:00	21,42	10,03	0	23942,85	-10,029	1220,02
02:00:00	21,41	9,97	0	23823,77	-9,966	1213,95
02:10:00	21,4	9,9	0	23706,2	-9,903	1207,96
02:20:00	21,39	9,84	0	23590,16	-9,842	1202,05
02:30:00	21,39	9,78	0	23475,66	-9,781	1196,21
02:40:00	21,38	9,72	0	23362,7	-9,721	1190,46
02:50:00	21,37	9,66	0	23251,31	-9,662	1184,78
03:00:00	21,36	9,6	0	23141,5	-9,604	1179,19
03:10:00	21,35	9,55	0	23033,27	-9,547	1173,67
03:20:00	21,34	9,49	0	22926,65	-9,491	1168,24
03:30:00	21,34	9,43	0	22821,64	-9,435	1162,89
03:40:00	21,33	9,38	0	22718,27	-9,380	1157,62
03:50:00	21,32	9,33	0	22616,53	-9,326	1152,44
04:00:00	21,31	9,27	0	22516,44	-9,273	1147,34
04:10:00	21,31	9,22	0	22418,02	-9,221	1142,33
04:20:00	21,3	9,17	0	22321,27	-9,170	1137,4
04:30:00	21,29	9,12	0	22226,21	-9,120	1132,55
04:40:00	21,28	9,07	0	22132,84	-9,070	1127,8
04:50:00	21,28	9,02	0	22041,19	-9,022	1123,13
05:00:00	21,27	8,97	0	21951,25	-8,974	1118,54
05:10:00	21,26	8,93	0	21863,05	-8,927	1114,05
05:20:00	21,26	8,88	0	21776,58	-8,882	1109,64
05:30:00	21,25	8,84	0	21691,86	-8,837	1105,33
05:40:00	21,25	8,79	0	21608,9	-8,793	1101,1
05:50:00	21,24	8,75	0	21527,7	-8,750	1096,96
06:00:00	21,23	8,71	0	21448,29	-8,708	1092,92
06:10:00	21,23	8,67	0	21370,65	-8,667	1088,96
06:20:00	21,22	8,63	0	21294,81	-8,627	1085,1
06:30:00	21,22	8,59	0	21220,76	-8,587	1081,33
06:40:00	21,21	8,55	0	21148,52	-8,549	1077,64
06:50:00	21,21	8,51	0	21078,1	-8,512	1074,06

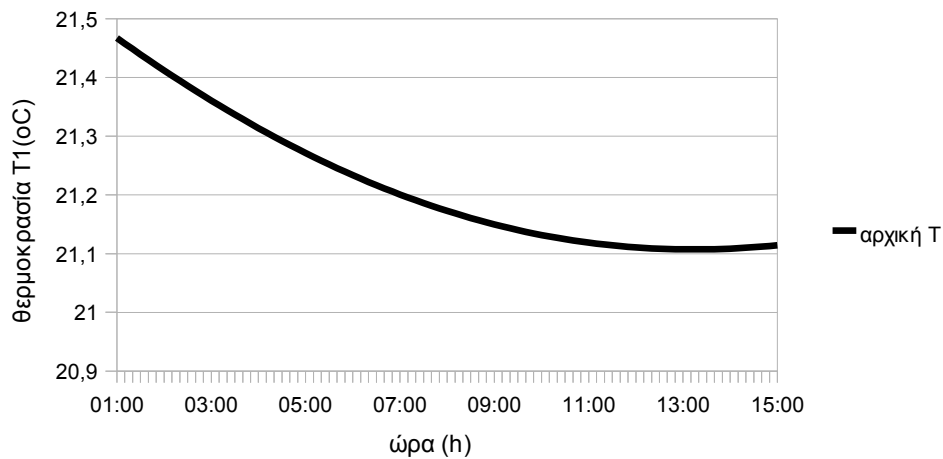
07:00:00	21,2	8,48	0	21009,49	-8,476	1070,56
07:10:00	21,2	8,44	0	20942,71	-8,440	1067,16
07:20:00	21,19	8,41	0	20877,75	-8,406	1063,85
07:30:00	21,19	8,37	0	20814,63	-8,372	1060,63
07:40:00	21,18	8,34	0	20753,36	-8,340	1057,51
07:50:00	21,18	8,31	0	20693,92	-8,309	1054,48
08:00:00	21,17	8,28	0	20636,33	-8,278	1051,55
08:10:00	21,17	8,25	0	20580,59	-8,249	1048,71
08:20:00	21,16	8,22	0	20526,7	-8,220	1045,96
08:30:00	21,16	8,19	0	20474,67	-8,192	1043,31
08:40:00	21,16	8,17	0	20424,49	-8,166	1040,76
08:50:00	21,15	8,14	0	20376,17	-8,140	1038,29
09:00:00	21,15	8,12	0	20329,7	-8,116	1035,93
09:10:00	21,15	8,09	0	20285,09	-8,092	1033,65
09:20:00	21,14	8,07	0	20242,34	-8,069	1031,47
09:30:00	21,14	8,05	0	20201,45	-8,048	1029,39
09:40:00	21,14	8,03	0	20162,41	-8,027	1027,4
09:50:00	21,13	8,01	0	20125,22	-8,007	1025,51
10:00:00	21,13	7,99	0	20089,88	-7,989	1023,71
10:10:00	21,13	7,97	0	20056,38	-7,971	1022
10:20:00	21,13	7,95	0	20024,73	-7,954	1020,39
10:30:00	21,12	7,94	0	19994,92	-7,938	1018,87
10:40:00	21,12	7,92	0	19966,95	-7,924	1017,44
10:50:00	21,12	7,91	0	19940,8	-7,910	1016,11
11:00:00	21,12	7,9	0	19916,48	-7,897	1014,87
11:10:00	21,12	7,89	0	19893,97	-7,885	1013,73
11:20:00	21,12	7,87	0	19873,28	-7,874	1012,67
11:30:00	21,11	7,86	0	19854,39	-7,864	1011,71
11:40:00	21,11	7,86	0	19837,29	-7,855	1010,84
11:50:00	21,11	7,85	0	19821,99	-7,847	1010,06
12:00:00	21,11	7,84	0	19808,46	-7,840	1009,37
12:10:00	21,11	7,83	0	19796,71	-7,834	1008,77
12:20:00	21,11	7,83	0	19786,71	-7,828	1008,26
12:30:00	21,11	7,82	0	19778,47	-7,824	1007,84
12:40:00	21,11	7,82	0	19771,98	-7,820	1007,51
12:50:00	21,11	7,82	0	19767,21	-7,818	1007,27
13:00:00	21,11	7,82	0	19764,16	-7,816	1007,11
13:10:00	21,11	7,82	0	19762,83	-7,816	1007,04
13:20:00	21,11	7,82	0	19763,19	-7,816	1007,06
13:30:00	21,11	7,82	0	19765,23	-7,817	1007,17
13:40:00	21,11	7,82	0	19768,95	-7,819	1007,36
13:50:00	21,11	7,82	0	19774,33	-7,822	1007,63
14:00:00	21,11	7,83	0	19781,36	-7,825	1007,99
14:10:00	21,11	7,83	0	19790,02	-7,830	1008,43
14:20:00	21,11	7,84	0	19800,3	-7,835	1008,95
14:30:00	21,11	7,84	0	19812,19	-7,842	1009,56
14:40:00	21,11	7,85	0	19825,67	-7,849	1010,25
14:50:00	21,11	7,86	0	19840,73	-7,857	1011,01
15:00:00	21,11	7,87	0	19857,35	-7,866	1011,86

Πίνακας 11.7.2

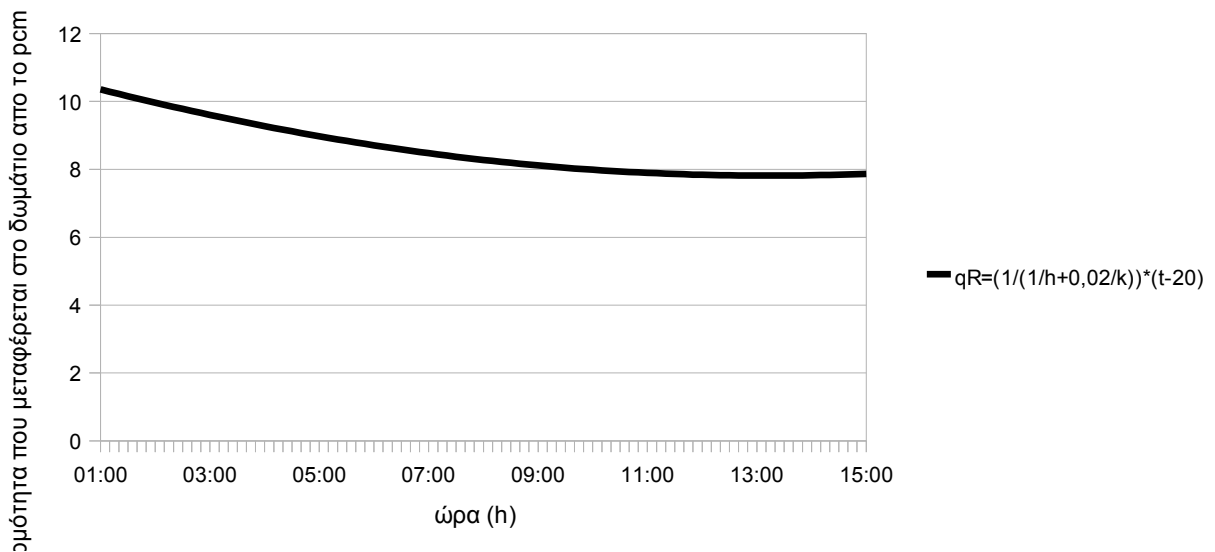
time	$(Ac/A\delta a\pi)*Fr*UL*Ta$	to	$(mpcm*Cp\text{eff}*T1)/(\Delta t*A)$	b	T2	Qu	qs	qrcm	qαπώλειες	συμπλήρωμα
01:00:00	1,23	9,62	26862,82	26853,69	21,46	0	0	10,36	-41,27	30,91
01:10:00	1,35	10,62	26712,75	26703,81	21,45	0	0	10,29	-42,07	31,78
01:20:00	1,48	11,62	26564,5	26555,76	21,44	0	0	10,22	-42,86	32,64
01:30:00	1,61	12,62	26418,1	26409,55	21,43	0	0	10,16	-43,66	33,5
01:40:00	1,74	13,62	26273,55	26265,2	21,42	0	0	10,09	-44,45	34,36
01:50:00	1,86	14,62	26130,87	26122,71	21,41	0	0	10,03	-45,25	35,22
02:00:00	1,99	15,62	25990,07	25982,1	21,4	0	0	9,97	-46,05	36,08
02:10:00	2,12	16,62	25851,17	25843,38	21,39	0	0	9,9	-46,75	36,85
02:20:00	2,25	17,62	25714,17	25706,57	21,39	0	0	9,84	-47,46	37,61
02:30:00	2,37	18,62	25579,08	25571,67	21,38	0	0	9,78	-48,16	38,38
02:40:00	2,5	19,62	25445,92	25438,7	21,37	0	0	9,72	-48,87	39,14
02:50:00	2,63	20,62	25314,7	25307,66	21,36	0	0	9,66	-49,57	39,91
03:00:00	2,76	21,62	25185,43	25178,58	21,35	0	0	9,6	-50,28	40,68
03:10:00	2,88	22,62	25058,12	25051,46	21,34	0	0	9,55	-50,68	41,13
03:20:00	3,01	23,62	24932,78	24926,3	21,34	0	0	9,49	-51,07	41,58
03:30:00	3,14	24,62	24809,43	24803,14	21,33	0	0	9,43	-51,47	42,03
03:40:00	3,27	25,62	24688,07	24681,96	21,32	0	0	9,38	-51,86	42,48
03:50:00	3,39	26,62	24568,72	24562,79	21,31	0	0	9,33	-52,26	42,93
04:00:00	3,52	27,62	24451,38	24445,63	21,31	0	0	9,27	-52,66	43,39
04:10:00	3,65	28,62	24336,07	24330,5	21,3	0	0	9,22	-53,1	43,87
04:20:00	3,78	29,62	24222,79	24217,4	21,29	0	0	9,17	-53,53	44,36
04:30:00	3,9	30,62	24111,56	24106,34	21,28	0	0	9,12	-53,97	44,85
04:40:00	4,03	31,62	24002,38	23997,34	21,28	0	0	9,07	-54,4	45,33
04:50:00	4,16	32,62	23895,26	23890,4	21,27	0	0	9,02	-54,84	45,82
05:00:00	4,29	33,62	23790,22	23785,53	21,26	0	0	8,97	-55,28	46,31
05:10:00	4,41	34,62	23687,25	23682,74	21,26	0	0	8,93	-55,76	46,83
05:20:00	4,54	35,62	23586,38	23582,04	21,25	0	0	8,88	-56,23	47,35
05:30:00	4,67	36,62	23487,59	23483,43	21,25	0	0	8,84	-56,71	47,87
05:40:00	4,8	37,62	23390,91	23386,92	21,24	0	0	8,79	-57,18	48,39
05:50:00	4,92	38,62	23296,35	23292,52	21,23	0	0	8,75	-57,66	48,91
06:00:00	5,05	39,62	23203,89	23200,24	21,23	0	0	8,71	-58,13	49,42
06:10:00	5,18	40,62	23113,56	23110,08	21,22	0	0	8,67	-58,52	49,85
06:20:00	5,31	41,62	23025,36	23022,04	21,22	0	0	8,63	-58,91	50,28
06:30:00	5,43	42,62	22939,3	22936,14	21,21	0	0	8,59	-59,3	50,71
06:40:00	5,56	43,62	22855,37	22852,38	21,21	0	0	8,55	-59,69	51,14

07:00:00	5,82	45,62	22693,95	22691,29	21,2	0	0	8,48	-60,47	51,99
07:10:00	5,94	46,62	22616,47	22613,97	21,19	0	0	8,44	-56,32	47,88
07:20:00	6,07	47,62	22541,14	22538,81	21,19	0	0	8,41	-52,17	43,76
07:30:00	6,2	48,62	22467,98	22465,8	21,18	0	0	8,37	-48,02	39,65
07:40:00	6,33	49,62	22396,97	22394,96	21,18	0	0	8,34	-43,87	35,53
07:50:00	6,45	50,62	22328,13	22326,27	21,17	0	0	8,31	-39,72	31,41
08:00:00	6,58	51,62	22261,45	22259,75	21,17	0	0	8,28	-35,57	27,29
08:10:00	6,71	52,62	22196,93	22195,39	21,16	0	0	8,25	-34,89	26,64
08:20:00	6,84	53,62	22134,59	22133,2	21,16	0	0	8,22	-34,2	25,98
08:30:00	6,96	54,62	22074,4	22073,18	21,16	0	0	8,19	-33,52	25,32
08:40:00	7,09	55,62	22016,39	22015,31	21,15	0	0	8,17	-32,83	24,66
08:50:00	7,22	56,62	21960,54	21959,62	21,15	0	0	8,14	-32,15	24
09:00:00	7,35	57,62	21906,85	21906,08	21,15	0	0	8,12	-31,46	23,34
09:10:00	7,47	58,62	21855,32	21854,71	21,14	0	0	8,09	-30,48	22,39
09:20:00	7,6	59,62	21805,96	21805,49	21,14	0	0	8,07	-29,51	21,44
09:30:00	7,73	60,62	21758,75	21758,43	21,14	0	0	8,05	-28,53	20,48
09:40:00	7,86	61,62	21713,69	21713,52	21,13	0	0	8,03	-27,56	19,53
09:50:00	7,98	62,62	21670,78	21670,75	21,13	0	0	8,01	-26,58	18,57
10:00:00	8,11	63,62	21630,01	21630,13	21,13	0	0	7,99	-25,6	17,61
10:10:00	8,24	64,62	21591,38	21591,65	21,13	0	0	7,97	-24,26	16,29
10:20:00	8,37	65,62	21554,89	21555,3	21,12	0	0	7,95	-22,92	14,97
10:30:00	8,49	66,62	21520,52	21521,08	21,12	0	0	7,94	-21,58	13,64
10:40:00	8,62	67,62	21488,28	21488,98	21,12	0	0	7,92	-20,24	12,32
10:50:00	8,75	68,62	21458,15	21458,99	21,12	0	0	7,91	-18,9	10,99
11:00:00	8,88	69,62	21430,12	21431,1	21,12	0	0	7,9	-17,56	9,66
11:10:00	9	70,62	21404,19	21405,31	21,12	0	0	7,89	-16,4	8,52
11:20:00	9,13	71,62	21380,36	21381,61	21,11	0	0	7,87	-15,25	7,37
11:30:00	9,26	72,62	21358,6	21359,99	21,11	0	0	7,86	-14,09	6,23
11:40:00	9,39	73,62	21338,91	21340,45	21,11	0	0	7,86	-12,94	5,08
11:50:00	9,51	74,62	21321,29	21322,96	21,11	0	0	7,85	-11,78	3,93
12:00:00	9,64	75,62	21305,72	21307,52	21,11	0	0	7,84	-10,62	2,78
12:10:00	9,77	76,62	21292,19	21294,12	21,11	0	0	7,83	-9,22	1,39
12:20:00	9,9	77,62	21280,68	21282,75	21,11	0	0	7,83	-7,83	0
12:30:00	10,02	78,62	21271,2	21273,4	21,11	0	0	7,82	-6,43	-1,39
12:40:00	10,15	79,62	21263,72	21266,05	21,11	0	0	7,82	-5,04	-2,78
12:50:00	10,28	80,62	21258,23	21260,69	21,11	0	0	7,82	-3,64	-4,18
13:00:00	10,41	81,62	21254,73	21257,32	21,11	0	0	7,82	-2,24	-5,58
13:10:00	10,53	82,62	21253,19	21255,91	21,11	0	0	7,82	-1,36	-6,45
13:20:00	10,66	83,62	21253,61	21256,45	21,11	0	0	7,82	-0,49	-7,33
13:30:00	10,79	84,62	21255,96	21258,93	21,11	0	0	7,82	0,39	-8,2
13:40:00	10,92	85,62	21260,24	21263,34	21,11	0,01	0	7,82	1,26	-9,08
13:50:00	11,04	86,62	21266,43	21269,66	21,11	0,01	0	7,82	2,14	-9,96
14:00:00	11,17	87,62	21274,52	21277,87	21,11	0,01	0	7,83	3,02	-10,85
14:10:00	11,3	88,62	21284,49	21287,96	21,11	0,01	0	7,83	4,22	-12,05
14:20:00	11,43	89,62	21296,33	21299,92	21,11	0,01	0	7,84	5,42	-13,26
14:30:00	11,55	90,62	21310,01	21313,73	21,11	0,02	0	7,84	6,62	-14,46
14:40:00	11,68	91,62	21325,53	21329,37	21,11	0,02	0	7,85	7,82	-15,67
14:50:00	11,81	92,62	21342,87	21346,83	21,11	0,02	0	7,86	9,02	-16,88

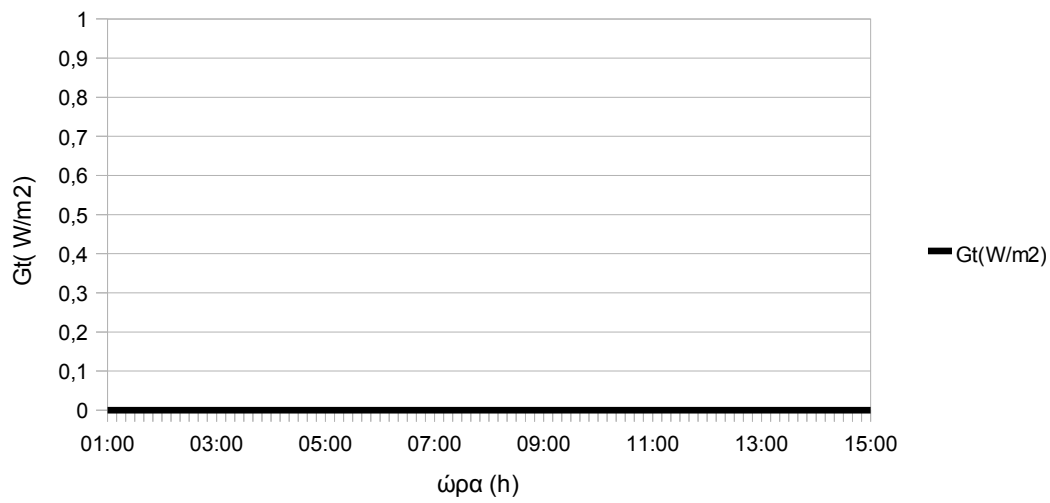
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τους παραπάνω πίνακες. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω διαδικασία σταματάει στις τρεις η ώρα εφοσον από εκείνη την ώρα και μετά η εξωτερική θερμοκρασία είναι μικρότερη από την εσωτερική στους ηλιακούς συλλέκτες, οπότε ο κυκλοφορητής διακόπτεται.



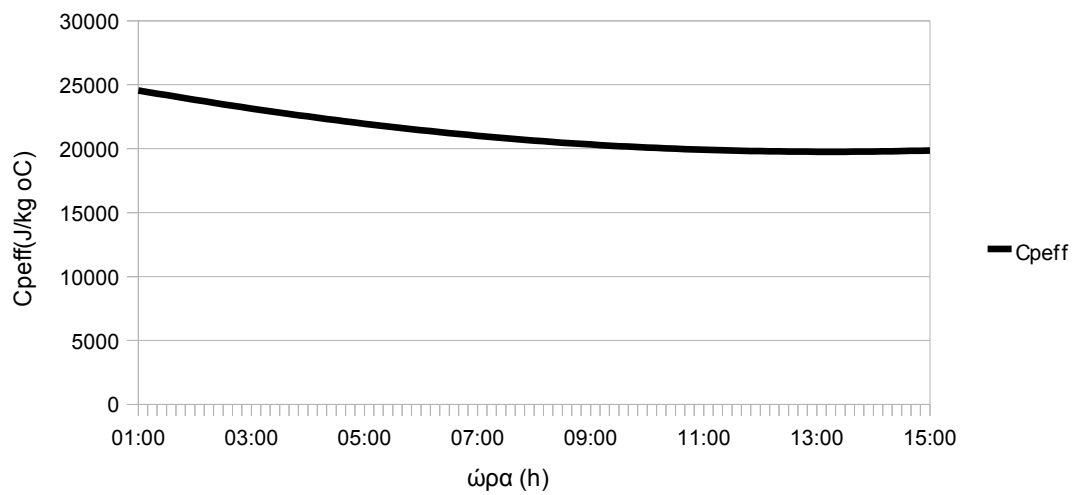
Εικόνα 11.7.1: Κατανομή θερμοκρασίας T1 συναρτήσει της ώρας



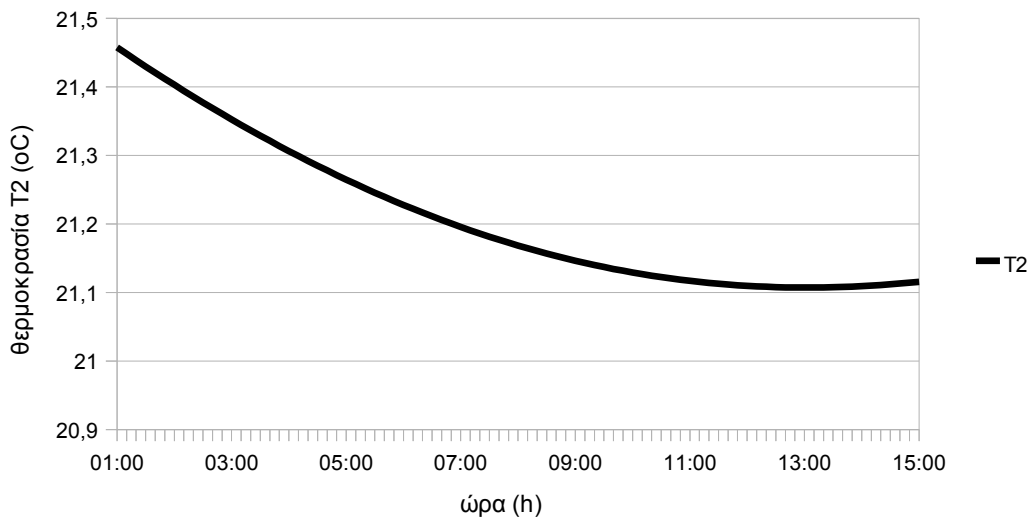
Εικόνα 11.7.2: Κατανομή θερμότητας που μεταφέρεται στο δωμάτιο από το pcm(W/m2) συναρτήσει της ώρας



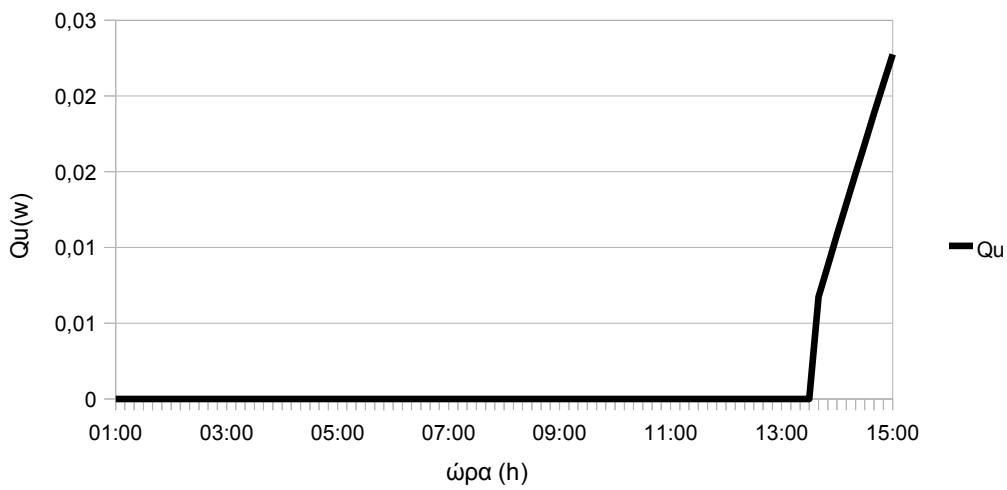
Εικόνα 11.7.3: Κατανομή προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, G_t , συναρτήσει της ώρας



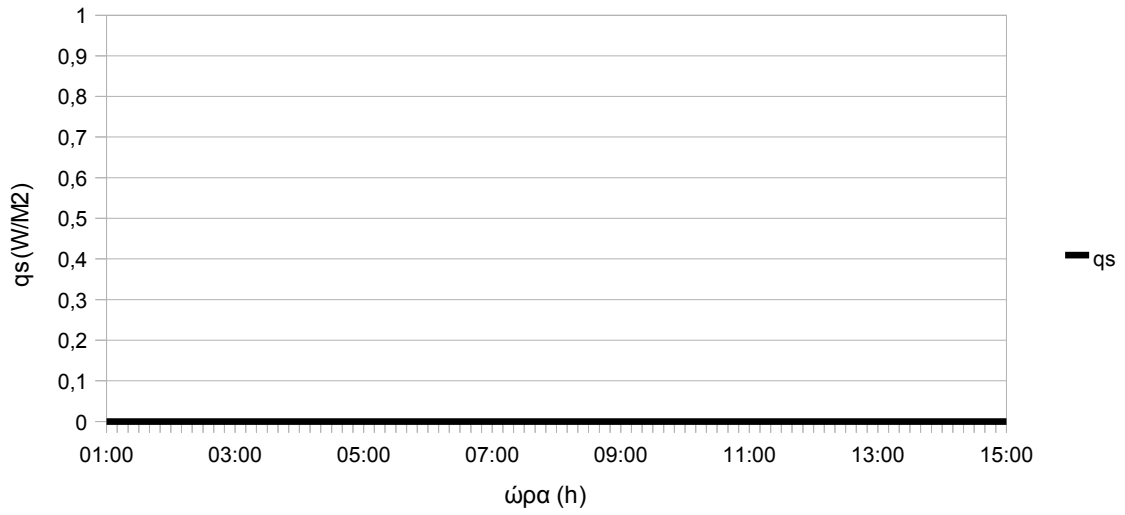
Εικόνα 11.7.4: Κατανομή $C_{p,eff}$ συναρτήσει της ώρας



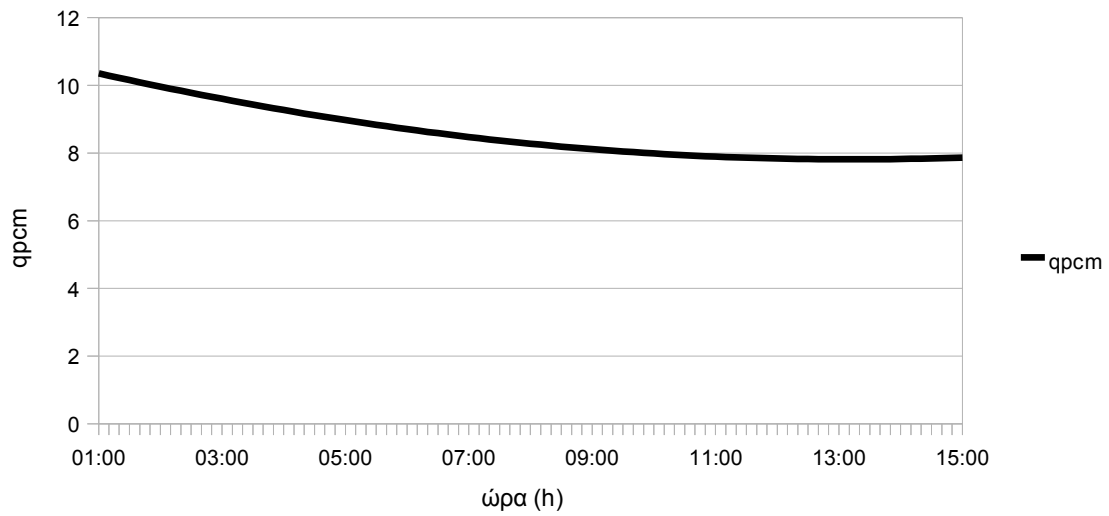
Εικόνα 11.7.5: Κατανομή θερμοκρασίας T2 συναρτήσει της ώρας



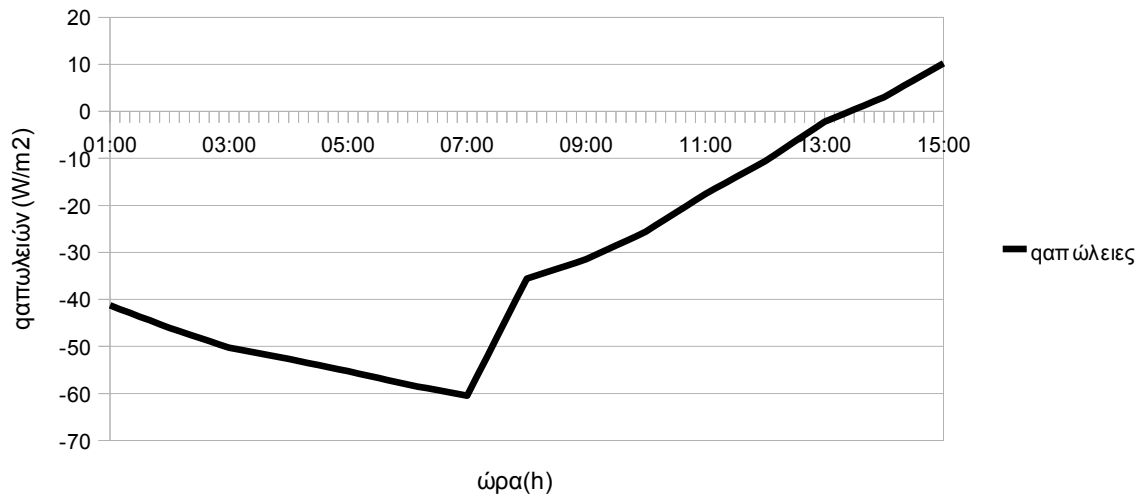
Εικόνα 11.7.6 : Κατανομή θερμότητας ηλιακών συλλεκτών συναρτήσει της ώρας



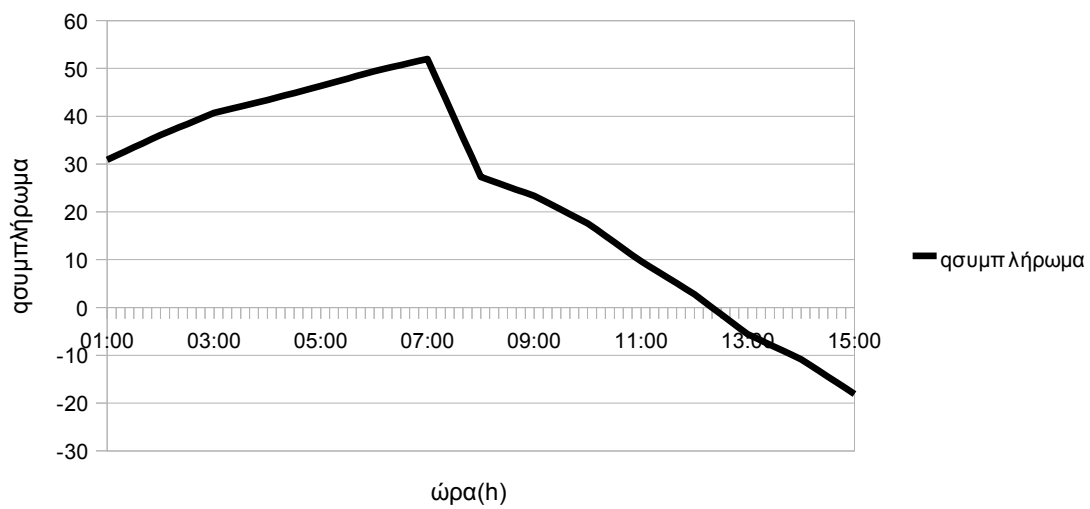
Εικόνα 11.7.7: Κατανομή θερμότητας q_s συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.7.8: Κατανομή θερμότητας που παραμένει στο pcm συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.7.9: Κατανομή απωλειών συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 11.7.10: Κατανομή θερμότητας που συμπληρώνουμε ώστε η θερμοκρασία στο δωμάτιο να είναι ίση με 20°C συναρτήσει της ώρας

Κεφάλαιο 12

Γενικά σχόλια και συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε η θέρμανση χώρου με εμβαδό δαπέδου $10 \times 10 = 100 \text{m}^2$, ύψος 3m και συνολική επιφάνεια υαλοπινάκων 30m^2 στον νότιο και δυτικό τοίχο. Το κτίριο είναι μία τράπεζα που βρίσκεται στην περιοχή της Αθήνας με γεωγραφικό πλάτος $\varphi = \beta = 38^\circ$ και νότιο προσανατολισμό $\gamma = 0^\circ$. Στην οροφή του συγκεκριμένου κτιρίου είναι τοποθετημένοι ηλιακοί συλλέκτες συνολικού εμβαδού 30m^2 και κλίσης 60° με στόχο την θέρμανση νερού, το οποίο ρέει κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας σε σωλήνες εγκατεστημένους μέσα σε ενδοδαπέδιο στρώμα pcm. Συνεπώς το στρώμα αυτό απορροφά θερμότητα και μεταπίπτει στην υγρή φάση. Κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας διακόπτεται η παροχή του νερού με αποτέλεσμα την στερεοποίηση του pcm λόγω απόδοσης θερμότητας στον προς θέρμανση χώρο. Προκειμένου να μην υπάρξει πρόβλημα στην τοποθέτηση των ηλιακών συλλεκτών, δεδομένου ότι επιθυμούμε να μην αλληλοεπισκιάζονται, τοποθετείται στην οροφή του κτιρίου μία προσθήκη(υπόστεγο). Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι με αυτήν την εφαρμογή δεν πραγματοποιείται 100% κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου, αλλά ένα μεγάλο ποσοστό. Για τον λόγο αυτό παράλληλα χρησιμοποιούνται και άλλα συμπληρωματικά μέσα, όπως καλοριφέρ και κλιματιστικά.

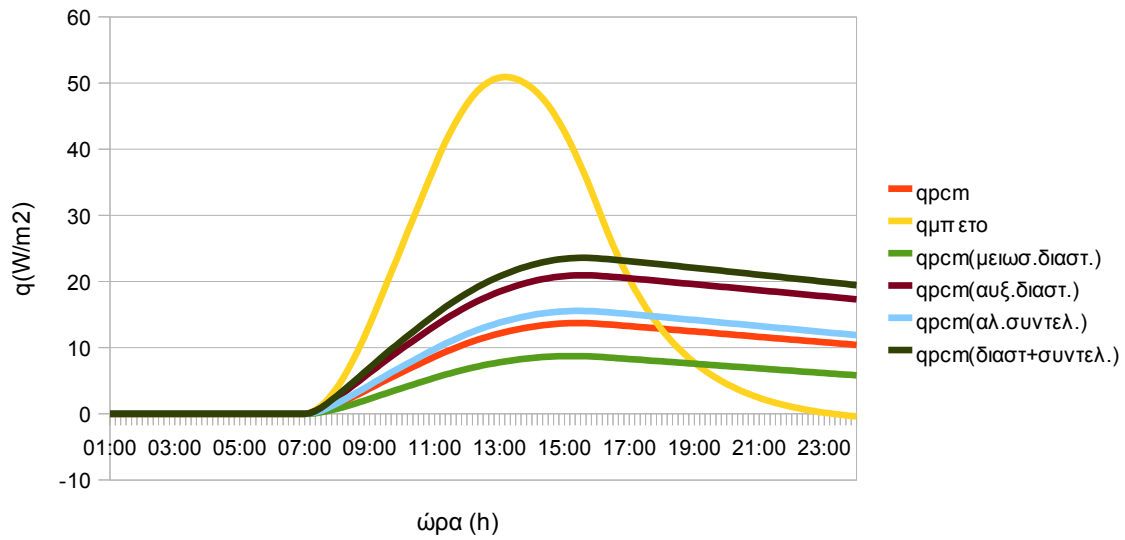
Μελετάμε για τους χειμερινούς μήνες (Νοεμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο) την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και την εξωτερική θερμοκρασία. Στην συνέχεια για τον μήνα Ιανουάριο βρίσκουμε τα ψυκτικά φορτία του δωματίου. Επίλεγουμε ένα υλικό αλλαγής φάσης και μελετάμε την θερμότητα που αποθηκεύεται σε αυτό κάθε 10λεπτο του 24ώρου. Έπειτα αντικαθιστούμε το υλικό αλλαγής φάσης με μπετό και επαναλάνουμε το μαθηματικό μοντέλο που έχουμε περιγράψει για να υπολογίσουμε την θερμότητα που αποθηκεύεται στο μπετό κάθε χρονική στιγμή. Την ίδια διαδικασία ακολουθούμε στην περίπτωση χρήσης του pcm αλλά μειώνουμε την πρώτη φορά την έκταση των ηλιακών συλλεκτών και έπειτα την αυξάνουμε. Μελετάμε ακόμα και την περίπτωση αύξησης των συντελεστών U_L και F_r καθώς και την περίπτωση χρήσης pcm όταν θα έχουμε αυξήσει την έκταση των ηλιακών συλλεκτών και θα έχουμε βελτιώσει τους συντελεστές U_L και F_r . Αξίζει να σημειωθεί ότι από τα διαγράμματα αποθηκευσης θερμότητας στο pcm, γίνεται αντιληπτό ότι το ποσό θερμότητας που αποθηκεύεται είναι αρκετό, γεγονός που μπορούμε να εκμεταλευτούμε για την χρήση της θερμότητας αυτής την επόμενη μέρα μηδενικής ηλιακής ακτινοβολίας.

Από τις παραπάνω μελέτες προκύπτει ότι το μπετό απορροφά απότομα την θερμότητα που προσπίπτει σε αυτό αλλά δεν έχει αποθηκευτική ικανότητα όπως το υλικό αλλαγής φάσης το οποίο ναι μεν δεν απορροφά όλη την θερμότητα που προσπίπτει σε αυτό αλλά έχει αποθηκευτική ικανότητα γεγονός που το καθιστά κατάλληλο τις μέρες που η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία δεν επαρκεί ώστε να διατηρήσει την θερμοκρασία του δωματίου σε ιδανικά όρια. Ακόμα αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση χρήσης Pcm όταν η έκταση ηλιακών συλλεκτών είναι 60m^2 και οι συντελεστές $F_r = 0,95$ και $U_L = 0,95$ έχει την μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα από ότι στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Ακολουθεί η περίπτωση που η έκταση ηλιακών συλλεκτών είναι 60m^2 και οι συντελεστες είναι ίσοι με $F_r = 0,85$ και $U_L = 0,85$. Έπειτα είναι η περίπτωση που η έκταση ηλιακών συλλεκτών είναι 30m^2 και $F_r = 0,95$ και $U_L = 0,95$ και μετα η περίπτωση που η έκταση ηλιακών συλλεκτών

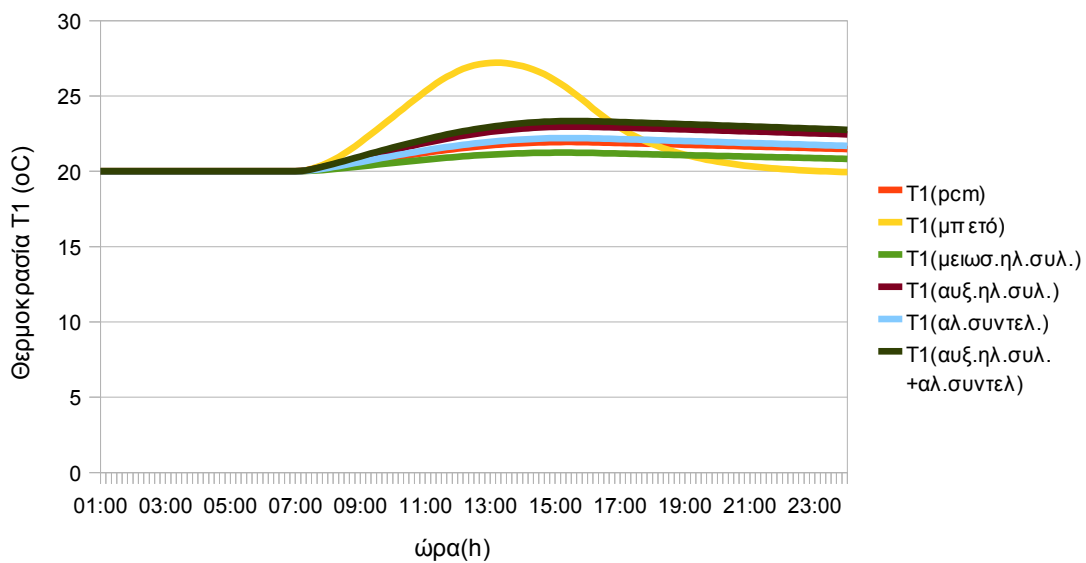
είναι 30m^2 και $F_r=0,85$ και $U_L=0,85$. Μικρότερη αποθηκευτική ικανότητα έχει εκείνο το υλικό αλλαγής φάσης που αντιστοιχεί στην περίπτωση που έχουμε μειώσει την έκταση των ηλιακών συλλεκτών σε 15m^2 . Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι οι περιπτώσεις αυτές μελετώνται ώστε να ελέγξουμε ποιος είναι ο καλύτερος τρόπος αξιοποίησης της αποθηκευτικής ικανότητας του υλικού αλλαγής φάσης. Παρ'όλα αυτά γίνεται αντιληπτό ότι σε όλες τις περιπτώσεις το P_{cm} βρίσκεται κατά κύριο λόγο στην διφασική περιοχή και ενίοτε στην πλήρως υγρή φάση. Το γεγονός ότι το p_{cm} δεν αξιοποιεί πλήρως τις ιδιότητες του αντιμετωπίζεται με πρόσδοση μεγαλύτερου ποσού θερμότητας από την πηγή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν δοκιμάσουμε να αυξήσουμε ακόμα περισσότερο την έκταση των ηλιακών συλλεκτών, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στο να μην αλληλοεπισκιαζονται οι ηλιακοί συλλέκτες ή ακόμα μεταβάλλοντας κάποιον συντελεστή. Όμοια κατανομή με αυτήν την θερμότητας που αποθηκεύεται στο υλικό μας κάθε φορά (είτε αυτό είναι το υλικό αλλαγής φάσης είτε είναι το μπετό) ακολουθεί η θερμοκρασία εξόδου από το δάπεδο(ή διαφορετικά η θερμοκρασία του υλικού μας). Παρακάτω παρατίθενται τα συγκριτικά διαγράμματα της κατανομής θερμότητας που αποθηκεύεται στο αντίστοιχο υλικό μας και το διάγραμμα κατανομής της θερμοκρασίας συναρτήσει της ώρας.

Στην περίπτωση αξιοποίησης της θερμότητας που αποθηκεύεται στο υλικό αλλαγής φάσης την επομένη που η προσπίτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι μηδενική, παρατηρούμε ότι η αξιοποίηση της θερμότητας γίνεται έως τις τρεις η ώρα. Από εκείνη την ώρα και μετά η θερμοκρασία εξόδου από τους ηλιακούς συλλέκτες είναι μικρότερη από την θερμοκρασία εισόδου. Στην περίπτωση αυτή ο κυκλοφορητής διακόπτεται και χρησιμοποιείται συμπληρωματική θέρμανση.

Συνοψίζοντας, η εφαρμογή του υλικού αλλαγής φάσης σε ενδοδαπέδια θέρμανση με χρήση ηλιακών συλλεκτών είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη την διάρκεια των χειμερινών μηνών. Υπενθυμίζεται όμως ότι δεν προσφέρει 100% κάλυψη και πιθανόν κάποιες ώρες της ημέρα να χρειάζεται και συμπληρωματική θέρμανση.



Εικόνα 12.1: Κατανομή της θερμότητας που αποθηκεύεται στο υλικό μας (υλικό αλλαγής φάσης/μπετο) συναρτήσει της ώρας



Εικόνα 12.2: Κατανομή της θερμοκρασίας T1 στις περιπτώσεις που μελετήσαμε συναρτήσει της ώρας.

Βιβλιογραφία

[1] Ibrahim Dincer & Marc a.Rosen, Thermal energy Storage and applications, Wiley Editions

[2] <http://news.mongabay.com>

[3]http://knowledge.allianz.com/en/globalissues/climate_change/global_warming_basics/global_warming_greenhouse_effect.html

[4] <http://www.CSO.ie/statistics/acidrainozone.htm>

[5] http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/768/1/rizosn_pcm.pdf

[6] http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/el/Phase_Change_Material

[7] Από τις σημειώσεις του μαθήματος <<Θερμική Συμπεριφορά κτιρίων>> , Χρήστος Τζιβανίδης

[8] <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/592>

[9] Shapiro M. Development of the properties of phase change materials. Subcontract report to Florida Solar Energy Center 1989

[10]http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=1518050820&_sort=r&_st=21&_view=c&_acct=C000059642&_version=1&_urlVersion=0&_userid=275166&md5=d84907dde3a4fd69780a367372d6affd&searchtype=i

[11]http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=1518054241&_sort=r&_st=21&_view=c&_acct=C000059642&_version=1&_urlVersion=0&_userid=275166&md5=bac01ce20131b30e136c52185b3f8d9a&searchtype=i

[12]http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=1518055631&_sort=r&_st=21&_view=c&_acct=C000059642&_version=1&_urlVersion=0&_userid=275166&md5=8629e23f84dcec6323a5d0af78305ad5&searchtype=i

[13] <http://dspace.lib.ntua.gr/items-by-author?author=Rizos%2C+Nikolaos+J>.

[14] Luisa F. Cabeza, Cecilia Castelon, Miquel Nogues, Marc Medrano – Department d'informatica I Eng. Industrial, Universitat de Leida, Spain, Ron Leppers – INTRON B.V., The Netherlands, Oihana Zubillaga – Fundacion INASMET, San Sebastian , Spain , Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, 2006

[15]http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MiamiCaptionURL&_method=retrieve&_udi=B6V51-4YT6N8K-1&_image=fig1&_ba=1&_user=275166&_coverDate=07%2F31%2F2010&_alid=15

[17556421&_rdoc=12&_fmt=full&_orig=search&_cdi=5773&_issn=09270248&_pii=S0927024810001418&_st=13&view=c&_acct=C000059642&_version=1&_urlVersion=0&_userid=275166&md5=87e2fa64c764880d6efe3cf98f786dd6](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V2P-4WW7NH7-3&_user=275166&_coverDate=11%2F30%2F2009&_alid=1517563424&_rdoc=2&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_cdi=5708&_sort=r&_st=13&_docanchor=&view=c&_ct=76&_acct=C000059642&_version=1&_urlVersion=0&_userid=275166&md5=87e2fa64c764880d6efe3cf98f786dd6)

[16]http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V2P-4WW7NH7-3&_user=275166&_coverDate=11%2F30%2F2009&_alid=1517563424&_rdoc=2&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_cdi=5708&_sort=r&_st=13&_docanchor=&view=c&_ct=76&_acct=C000059642&_version=1&_urlVersion=0&_userid=275166&md5=fd21df950f45bd30b0e23f83299bb3e0&searchtype=a

[17]Feldman D, Banu D, Hawes D, Ghanbari E, Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. Solar Energy Materials, 1991

[18]Hawes DW, Feldman D, Absorption of phase change materials in concrete, Solar Energy Materials and Solar Cells, 1992

[19]Darkwa K, Kim JS, Heat transfer in neuron composite laminated phase change drywall. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A, Journal of Power and Energy, 2004

[20]Samira Hghshenaskashani, Department of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Teheran and Hadi Pasdarsahri, Department of Mechanical Engineering, tarbiat Modares University.

[21] Farid M.M., Khudhair M.A., Razack S.A.K., Al-Hallaj S., A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy Conversion and Management 45, 2004

[22]<http://www.pcm-solutions.com/consulting.html>

[23] M. Huang, P. Eames, Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaic, Int. J. Solar Energy

[24] http://www.epia.org/documents/NL_0604_018.pdf

[25] B. Zalba, J. Martin, Free-cooling of buildings with phase change materials, International journal of refrigeration, Vol 27

[26]L. Shiley, Z. Neng, Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter, Energy and Buildings, Vol 38

[27]Y. Rabin, B.Niv, Integrated Solar Collector storage system based on PCM, Solar Energy, Vol 55

[28] S. Canbazoglu, A. Sahinaslan, Enhancement of solar thermal using pcm of solar water system

- [29] <http://www.eren.doe.gov/solarbuildings/techdescr.html>
- [30] F. Tan, C. Tso, Cooling of mobile electronic devices using pcm, Applied thermal engineering, Vol 24
- [31] <http://www.mjm-engineering.com/telecomconsulting.html>
- [32] <http://www.heatmanagement.com/kunze/00english/products/frameset.html>
- [33] <http://www.climator.com>
- [34] <http://www.pcmenergy.com/products/telecom.htm>
- [35] http://en.wikipedia.org/wiki/Base_Station_Subsystem
- [36] L. Vasiliev, V. Burak, latent storage modules for preheating internal combustion petrol engines, Applied Engineering, Vol 20
- [37] <http://www.teappcm.com/applications.htm>
- [38] <http://www.bmw.com>
- [39] V. Tyagi, D. Buddhi, Thermal storage in Buildings, Energy and Buildings, Vol 42
- [40] V. Metivaud, L. Ventola, Thermal Insulation of Buildings using Phase Change Materials, Energy and Buildings, Vol 36
- [41] Balcomb, J.D. (editor), Passive Solar Buildings, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992
- [42] http://www.zae.physik.tumuenchen.de/zae/a1/englisch/arbeit/pcm/e_infoLatent.html
- [43] Ghonein, A.A, Building Walls Using Phase Change Materials, Solar Energy, Vol 47 No.3, 1991
- [44] Hawes, D.W., Feldman, D., Banu, D., "Latent Heat Storage in Building Materials," Energy and Building, Vol. 20, 1993
- [45] Hawes, D.W., Banu, D., Feldman, D., "Latent Heat Storage in Concrete," Solar Energy Materials, Vol. 19, 1989
- [46] Hawes, D.W., Banu, D., Feldman, D., "The stability of Phase Change Materials in Concrete," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 27, 1989
- [47] Feldman, D., Banu, D., Hawes, D.W., "Development and Application of Organic Phase Change Mixtures in Thermal Storage Gypsum Wallboard," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 36, 1995

[48]Kedl, R.J, Stovall, T.K, Activities to support of the Wax- Impregnated Wallboard Concept, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA, 1989

[49]Neeper, D.A., “Thermal Dynamics of Wallboard with Latent Heat Storage,” Solar Energy, Vol. 68, No. 5, 2000.

[50]K. Darkwa, P. Callaghan, Simulation of phase change drywalls in a passive solar building, Applied Thermal Engineering, Vol 26

[51]Stetiu,C, Feustel, H.E, Simplified Numerical Description of Latent Storage Characteristics for Phase Change Wallboard, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 1995

[52] Dr.J.J.Tomlinson , What are the benefits of including latent storage in common wallboard, Conf.920801/7, Oak Ridge National Laboratory, Florida, U.S.A, 1992

[53] K. Lin, Y. Zhang, Experimental study of under-floor electric heating system, with shape- stabilized PCM plates, Energy and Buildings, Vol 37

[54]K. Nagano, S. Tadeka, study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building thermal storage, Energy and Buildings, Vol 38

[55] <http://content.honeywell.com/uk/homes/underfloor.htm>

[56] A.Abhat, University of Stuttgart, Low temperature latent heat thermal energy storage ,Solar Energy Journal, Vol.30, No.4 ,1983

[57] http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_energy_storage

[58]Harald Mehling-Luisa F. Cabeza, Heat and cold Storage with PCM, an up to date introduction into basics and applications, Springer 2008

[59] Victor delValle, Dale Bessete, Lisa Sopkov, John Zhou, Kaz Szymocha , Long-term performance of the phase change material applied for heat storage, Alberta Research Council, Canada

[60]Esam M. Alawadhi, Kuwait University Mechanical Engineering Department, 2007

[61]Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, Thermal Energy Storage Laboratory, School of Energy and Environmental Studies , Faculty of Engineering Science, Devi Ahilya University, India, 2005

[62]http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MiamiCaptionURL&_method=retrieve&_udi=B6VMY-4RCF741-1&_image=fig1&_ba=1&_user=275166&_coverDate=02%2F28%2F2009&_alid=1522755021&_rdoc=74&_fmt=full&_orig=mlkt&_cdi=6163&_issn=13640321&_pii=S

1364032107001402&_st=17&view=c&_acct=C000059642&_version=1&_urlVersion=0&_userid=275166&md5=70caa25601ba2cb52c3351359c184d98

[63] Kaygusuz K. Performance of solar- assisted heat- pump systems. *Appl Energy* 1995;51(2):93-109

[64]Kaygusuz K. Investigation of a combined solar-heat pump system for residential heating, Part 1 : experimental results. *Int J Energy Res* 1999;23(14):1213-23

[65] Kaygusuz K. Phase change energy storage for solar heating systems. *Energy Sources* 2003;25(8):791-807

[66] Kaygusuz K. Ayhan T. Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating. *Energy Convers Manage* 1999;40(13):1377-96

[67]Esen M. Thermal performance of a solar-aided latent heat store used for space heating by heat pump. *Sol Energy* 2000;69(1):15-25

[68]Hammou ZA, Lacroix M. A hybrid thermal energy storage system for managing simultaneously solar and electric energy. *Energy Convers Manage* 2006;47(3):273-88

[69] Hammou ZA, Lacroix M. A new PCM storage system for managing simultaneously solar and electric energy. *Energy Build* 2006;38(3):258-65

[70]Hassan MM, Beliveau Y. Modeling of an integrated solar system. *Build Environ* 2008;43(5):804-10

[71]Schweigler C, Hiebler S, Keil C, Kobel H, Kren C, Mehling H. Low-temperature heat storage for solar heating and cooling applications. *ASHRAE Trans* 2007;113(1):89-96

[72]Lin KP, Zhang YP, Xu X, Di HF, Yang R, Qin PH. Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates . *Energy Build* 2005;37(3):215-20

[73] Lin KP, Zhang YP, Di HF, Yang R. Study of an electrical heating system with ductless air supply and shape-stabilized PCM for thermal storage. *Energy Convers Manage* 2007;48(7):2016-24

[74]Zhang YP, Lin KP, Di HF, Yang R, Jiang Y. Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. *Energy Build* 2006;38(10):1262-9

[75]Zhou GB, Zhang YP, Zhang QL, Lin KP, Di HF. Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase-change material plates. *Appl Energy* 2007;84(10):1068-77

- [76]Farid MM, Chen XD. Domestic electrical space heating with heat storage. Proc Inst Mech Eng A: J Power Energy 1999;213(2):83-92
- [77] Farid MM, Kong WJ. Underfloor heating with latent heat storage. Proc Inst Mech Eng A: J Power Energy 2001;215(5):601-9
- [78]Saman W, Bruno F, Halawa E. Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system. Sol Energy 2005;78(2):341-9
- [79]Koschenz M, Lehmann B. Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. Energy Build 2004;36(6):567-78
- [80]Ismail KAR, Henrquez JR. Thermally effective windows with moving phase change material curtains. Appl Thermal Eng 2001;21(18):909-23
- [81]Pasupathy A, Athanasius L, Velraj R, Seeniraj RV. Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management. Appl Therm Eng 2008;28(5-6):556
- [82]Wang XC, Niu JL, Van Paassen AHC. Raising evaporative cooling potentials using combined cooled ceiling and MPCM slurry storage. Energy Build 2008;40(9):1691-8
- [83]Gu ZL, Li Y. Thermal energy recovery of air conditioning system- heat recovery system calculation and phase change materials development. Appl Therm Eng 2004;24(17-18):2511-26
- [84]Vakilatojjar SM,Saman W. Analysis and modeling of a phase change storage system for air conditioning applications. Appl Therm Eng 2001;21(3):249-63
- [85] A.Pasupathy, R.Velraj,Department of Mechanical Enginnering , Anna Venkateswara College of Engineering, Sriperumpudur, Tamilandu, India, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments
- [86] Bourdeau LE, Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage,In: Hayes J, Snyder R, editors Proceedings of the fifth national passive solar conference 19- 26 October, Amercan Solar Energy Society, 1980
- [87] Buddhi D, Sharma SD,Measurements of Transmittance of Solar Radiation through stearic acid : latent heat storage material, Energy Convers Manage,1990
- [88] Buddhi D.Mishra HS, Sharma A, Theoretical performance studies of a test cell having a PCM window in south direction, India 2003

- [89] Arkar C, Medved S., Enhanced solar assisted building ventilation system using sphere encapsulated PCM thermal heat storage, Advanced thermal energy storage techniques-feasibility studies and demonstration projects 2nd workshop, April 2002, Ljubljana Slovenia
- [90] Stritih U, Novak P, Thermal storage of solar energy in the wall for building ventilation. Second workshop IEA, Advanced thermal energy storage techniques-feasibility studies and demonstration projects, Ljubljana, Slovenia, April 2002)
- [91] Feustel HE, Stetiu C., Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application, Lawrence Berkeley National laboratory, 1997
- [92] Kissok JK, Hannig JM, Whitney TI, Drake ML, Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings. Proceedings of 1998 international solar energy conference, New York, USA, 1998
- [93] Hawes DW, Banu D, Feldman D., Latent heat storage in concrete II, Sol. Energy Mater, 1990
- [94] Salyer IO, Sircar AK, Kumar A, Advanced phase change materials technology: valuation in lightweight solid hollow core building blocks, In: Proceedings of the 30th international energy conversion engineering conference, Orlando, USA, 1995
- [95] Chahroudi D, Thermocrete heat storage materials: applications and performance specifications. In: Proceedings of Sharing the Sun Solar Technology in the Seventies Conference, Winnipeg, USA, 1976, Chahroudi D., Development of thermocrete heat storage materials. In: Proceedings of the International Solar Energy Congress, vol 1, New Delhi, India, 1978
- [96] Lee T., Hawes DW, Banu D, Feldman D, Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete. Solar Energy Mater Solar Cells, 2000
- [97] Hadjieva M, Stoykov R, Filipova T, Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage. Renew Energy, 2000 [98] Mehling R, Krippner A, Hauer, Research project on PCM in woodlight weight concrete. In: Proceedings of the second workshop of IEA ECES IA Annex 17, Ljubljana, Slovenia, 2002
- [99] Meng Z, Mario AM, Jennifer BK, Development of a thermally enhanced frame wall with phase change materials for on-peak airconditioning demand reduction and energy savings in residential buildings, Int J Energy Res, Greenheck Fan Corporation, Schofield, USA, 2005
- [100] Peippo K, Kauranen P, Lund PD, Multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating, Energy and Buildings, 1991
- [101] Ξενοφών Κακάτσιος Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης, Εκδόσεις Σημειών Αθήνα 2006

[102]Thermal Sciences Center of Lyon, Frederic Kuznik, Joseph Virgone, Jean-Jaques Roux, 2006-2007

[103]M.J.Huang, P.C.Eames, N.J.Hewitt, Centre for Sustainable Technologies, School of Built Environment University of Ulster, Newrowabbey, N.Ireland, UK, 2006

[104]Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος , "Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα", ΕΜΠ Αθήνα 2008

