



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διπλωματική εργασία

*«Εισαγωγή "Εσωτερικής Θερμοκρασίας Ηλίου-Αέρος" κατ' αναλογία
της εξωτερικής για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό της απόδοσης των
υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σε εσωτερικούς τοίχους κτιρίων»*

ΣΚΕΥΗ ΚΥΡΙΑΚΗ

Επιβλέπων: ΚΙΜΩΝ Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2014

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κίμωνα Α. Αντωνόπουλο, που ήταν πάντα διαθέσιμος να ασχοληθεί με κάθε απορία μου σχετική με τη διπλωματική εργασία μου. Η πολύτιμη βοήθειά του, η υποστήριξη και συνεχής καθοδήγησή του, καθώς και ο χρόνος που μου αφιέρωσε, διευκόλυναν την προσπάθειά μου και συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Τζιβανίδη Χρήστο για τη συμμετοχή του σε κάποιο στάδιο της διπλωματικής εργασίας μου.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τον αγαπημένο μου Βασίλη Τ. και όλους τους δικούς μου ανθρώπους για την αγάπη που μου δείχνουν και για τη συμπαράσταση και κατανόησή τους όλο αυτό το διάστημα.

Κυριακή Σκεύη

Αθήνα, Απρίλιος 2014

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το θέμα των υλικών αλλαγής φάσης, δίνοντας έμφαση στη δυνατότητα εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας υλικών (PCM) στον κτιριακό τομέα, όπου η χρήση τους και ο τρόπος λειτουργίας τους μπορούν να εξασφαλίσουν θερμική άνεση στο εσωτερικό των κτιρίων και ταυτόχρονα εξοικονόμηση ενέργειας. Συγκεκριμένα, η μελέτη που πραγματοποιήσαμε αποσκοπεί στον προσεγγιστικό προσδιορισμό της απόδοσης των υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σε εσωτερικούς τοίχους κτιρίων, μέσω της χρήσης ενός νέου μεγέθους, αυτό της «Εσωτερικής Θερμοκρασίας Ηλίου-Αέρος», το οποίο εισάγουμε για πρώτη φορά στην παρούσα εργασία.

Αρχικά, λοιπόν, στο πρώτο μέρος (βιβλιογραφικό), γίνεται μία προσπάθεια θεωρητικής προσέγγισης και κάλυψης των βασικότερων πτυχών που σχετίζονται με τα υλικά αλλαγής φάσης. Έτσι, σε γενικές γραμμές περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας τους, οι ιδιότητες, οι κατηγορίες και τα προβλήματα τους, οι μέθοδοι ενσωμάτωσής τους, καθώς και τρόποι μέτρησης των ιδιοτήτων τους και οι τομείς στους οποίους βρίσκουν και έχουν βρει εφαρμογή. Επίσης, για τις ανάγκες του δεύτερου μέρους της εργασίας γίνεται μία σύντομη περιγραφή σε μεθόδους προσομοίωσης αλλαγής φάσης.

Στο δεύτερο μέρος (υπολογιστικό) της παρούσας εργασίας, παρουσιάζεται σε πρώτη φάση, ένα μοντέλο προσομοίωσης για τη μελέτη ηλιακής φόρτισης εσωτερικού τοίχου με ενσωματωμένο PCM, σε κτίριο στην περιοχή της Αθήνας κατά τη χειμερινή περίοδο, ενώ ακολουθεί ως πρωτοτυπία, η εφαρμογή ενός βελτιωμένου μοντέλου προσομοίωσης για τα ίδια δεδομένα, το οποίο βασίζεται σε ένα νέο μέγεθος που εισάγεται εδώ για πρώτη φορά, αυτό της «Εσωτερικής Θερμοκρασίας Ηλίου-Αέρος» ή αλλιώς «Ισοδύναμης Εσωτερικής Θερμοκρασίας». Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται παραμετρικές μελέτες ως προς διάφορες παραμέτρους του υπό μελέτη προβλήματος και τέλος γίνεται σύγκριση ενός υλικού αλλαγής φάσης και ενός συμβατικού δομικού υλικού, προκειμένου να αναδειχθεί η υπεροχή του πρώτου.

Abstract

The subject of the present thesis is the study of phase change materials (PCM), emphasizing in the applicability of this materials technology to building sector, where thermal comfort and energy conservation can be achieved by using them. A new quantity is introduced i.e. the indoor equivalent temperature, which is an increased indoor temperature containing the effect of solar radiation entering through fenestration. The introduced new quantity, which facilitate the simulation, is similar to the outdoor equivalent air temperature or sol-air temperature.

Initially, in the first part (literature review), the theory and the main aspects related to the phase change materials are analyzed. In particular, the properties and the classifications of these materials are described, the difficulties that occur during their use and the incorporation methods are presented, as well as the measurement techniques of thermal properties are discussed. Furthermore, the areas of PCM applications are also presented. A review of the phase change simulation methods is discussed for the needs of the second part of the study.

In the second part of the present thesis, a simulation method is developed for the study of solar loading of PCM contained in interior walls of buildings in the Athens area during winter. In the simulation, the new quantity “equivalent indoor temperature” mentioned earlier is used. A parametric study is also carried out for the main parameters of the problem considered. Moreover, a comparison is also made between PCM and other materials which do not change phase, thus showing the profit gained by the use of PCM in buildings.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

<i>Εισαγωγή</i>	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η σπουδαιότητα της ενέργειας	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θερμική ενέργεια	5
2.1 Γενικά.....	5
2.2 Μεταφορά θερμότητας.....	5
2.2.1 Μεταφορά θερμότητας με θερμική αγωγή.....	6
2.2.2 Μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση (συναγωγή)	6
2.2.3 Μεταφορά θερμότητας με θερμική ακτινοβολία.....	7
2.3 Θερμοχωρητικότητα.....	7
2.4 Θερμική μάζα κτιρίου	8
2.5 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας	10
2.5.1 Τρόποι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας	10
2.5.1.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας	11
2.5.1.1.1 Υγρά υλικά	12
2.5.1.1.2 Στερεά υλικά	12
2.5.1.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας	14
2.5.1.2.1 Φαινόμενο αλλαγής φάσης.....	14
2.5.1.3 Αποθήκευση θερμοχημικής ενέργειας.....	16
2.5.2 Σύγκριση μεθόδων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Υλικά αλλαγής φάσης (PCM)	18
3.1 Γενικά.....	18
3.2 Ιδιότητες και κριτήρια επιλογής PCM	20
3.3 Κατηγοριοποίηση PCM.....	22
3.3.1 Οργανικά PCM.....	23
3.3.1.1 Παραφίνες.....	23
3.3.1.2 Μη παραφίνες	25
3.3.2 Ανόργανα PCM	27
3.3.2.1 Ένυδρα άλατα	27
3.3.2.2 Μέταλλα	28
3.3.3 Εύτηκτα μίγματα	29

3.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κατηγοριών PCM.....	30
3.4 Βασικά προβλήματα των PCM και τρόποι επίλυσής τους.....	31
3.4.1 Φαινόμενο υπέρψυξης/υπόψυξης (supercooling/subcooling).....	31
3.4.2 Φαινόμενο διαχωρισμού φάσεων	33
3.4.3 Ανεπαρκής σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε μακρά κυκλική φόρτιση	33
3.4.4 Χαμηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	34
3.4.5 Μη συμβατότητα με άλλα υλικά	34
3.5 Μορφές συσκευασίας και ενσωμάτωση των PCM	35
3.5.1 Ενσωμάτωση σε κάψουλες.....	36
3.5.1.1 Μακροενσωμάτωση (macro-encapsulation).....	36
3.5.1.2 Μικροενσωμάτωση (micro-encapsulation)	38
3.5.2 Σύνθετα υλικά.....	40
3.5.3 Μέθοδοι ενσωμάτωσης PCM χωρίς τη χρήση δοχείων	41
3.5.3.1 Άμεση ενσωμάτωση	41
3.5.3.2 Ενσωμάτωση με απορρόφηση	41
3.6 Διαθέσιμα PCM στην αγορά	41
3.7 Μέτρηση ιδιοτήτων PCM.....	44
3.7.1 DSC	44
3.7.2 DTA.....	46
3.7.3 TGA.....	47
3.7.4 T-History	48
3.8 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης	51
3.8.1 Μέθοδος Ενθαλπίας	51
3.8.2 Μέθοδος Ενεργού Θερμοχωρητικότητας.....	52
3.9 Μοντέλα θερμικής προσομοίωσης κτιρίων.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογές PCM	56
4.1 Γενικά.....	56
4.2 Κτιριακές εφαρμογές.....	56
4.2.1 Παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας.....	57
4.2.1.1 PCM σε γυψοσανίδες και πάνελ.....	57
4.2.1.2 Η ελληνική κατοικία του μέλλοντος.....	61
4.2.1.3 PCM σε άλλα δομικά υλικά.....	64
4.2.1.3.1 PCM σε σκυρόδεμα-τσιμέντο	65
4.2.1.3.2 PCM σε τούβλα	66
4.2.1.3.3 PCM σε μάρμαρο	67

4.2.1.4 Τοίχος Trombe με PCM.....	67
4.2.1.5 PCM σε ταβάνια/οροφές.....	69
4.2.1.6 PCM σε δάπεδα	70
4.2.1.7 PCM σε παράθυρα.....	74
4.2.1.8 PCM σε μονωτικά υλικά.....	76
4.2.2 Ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας	77
4.2.2.1 PCM σε οροφές	78
4.2.2.2 PCM σε δάπεδα	79
4.2.2.3 Συνδυασμένο σύστημα θέρμανσης και ψύξης με ενσωματωμένο PCM.....	81
4.2.2.4 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα με PCM.....	82
4.2.2.5 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM.....	83
4.2.2.6 PCM σε φωτοβολταϊκά συστήματα (PV).....	88
4.2.2.7 Άλλα ενεργητικά συστήματα.....	90
4.2.2.8 PCM σε έπιπλα	90
4.3 Άλλες εφαρμογές.....	91
4.3.1 Εφαρμογή πλακιδίων PCM στην αίθουσα αναχωρήσεων ενός αεροδρομίου	91
4.3.2 PCM στις μεταφορές και συσκευασίες αγαθών	92
4.3.3 PCM στην ιατρική	95
4.3.4 PCM σε υφάσματα	97
4.3.5 PCM στην αυτοκινητοβιομηχανία	101
4.3.6 PCM σε ηλεκτρονικά και στην τηλεπικοινωνία.....	104
4.3.7 PCM σε διαστημικές εφαρμογές	106

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

<i>Εισαγωγή</i>	107
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μοντέλο προσομοίωσης	109
5.1 Υπολογισμός ολικής στιγμιαίας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επίπεδο, G_T	109
5.1.1 Υπολογισμός άμεσης και διάχυτης στιγμιαίας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου, G_b και G_d	109
5.1.2 Υπολογισμός του λόγου της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση οριζοντίου επιπέδου, R_b	116
5.2 Ηλιακή φόρτιση του τοίχου που φέρει στρώμα PCM	127
5.2.1 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM	127

5.2.2 Υπολογισμός της ενεργού θερμοχωρητικότητας C_{peff} του PCM	129
5.2.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει των ωρών του 24ώρου	133
5.2.4 Ποσοστό αξιοποίησης του PCM	148
5.2.5 Ενεργειακή συνεισφορά του PCM στο χώρο	173
5.3 Βελτιωμένο μοντέλο προσομοίωσης της ηλιακής φόρτισης του τοίχου που φέρει PCM	187
5.3.1 Εισαγωγή μεγέθους «Εσωτερικής Θερμοκρασίας Ηλίου-Αέρος», T_e^i	188
5.3.2 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του RT27	189
5.3.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας του RT27 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου	190
5.3.4 Σύγκριση αρχικού και βελτιωμένου μοντέλου προσομοίωσης ως προς τις θερμοκρασίες του PCM	196
5.3.5 Ποσοστό αξιοποίησης του RT27	201
5.3.6 Ενεργειακή συνεισφορά του RT27 στο χώρο	206
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παραμετρικές μελέτες	211
6.1 Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος στρώματος του PCM	211
6.1.1 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του RT27	211
6.1.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας του RT27 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου	212
6.1.3 Ποσοστό αξιοποίησης του RT27	226
6.1.4 Ενεργειακή συνεισφορά του RT27 στο χώρο	246
6.2 Παραμετρική μελέτη ως προς τη θερμοκρασία του εξεταζόμενου χώρου	260
6.2.1 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του RT27	260
6.2.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας του RT27 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου	261
6.2.3 Ποσοστό αξιοποίησης του RT27	276
6.2.4 Ενεργειακή συνεισφορά του RT27 στο χώρο	286
6.3 Παραμετρική μελέτη ως προς την επιφάνεια του υαλοπίνακα	300
6.3.1 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του RT27	300
6.3.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας του RT27 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου	300
6.3.3 Ποσοστό αξιοποίησης του RT27	315
6.3.4 Ενεργειακή συνεισφορά του RT27 στο χώρο	325
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Σύγκριση PCM (RT27) και συμβατικού δομικού υλικού (μπετόν)	339
7.1 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του υλικού	339

7.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας του υλικού συναρτήσει των ωρών του 48ώρου .	341
Παράρτημα	354
Βιβλιογραφία	364

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

Εισαγωγή

Πρωταρχικός ρόλος των κτιρίων είναι η εξυπηρέτηση και προστασία των ανθρώπων από τις ακραίες καιρικές συνθήκες, εξασφαλίζοντας τους ταυτόχρονα ένα θερμοκρασιακά άνετο εσωτερικό περιβάλλον (θερμική άνεση), που μεταφράζεται σε δροσερές συνθήκες κατά τους θερινούς μήνες και επαρκή θέρμανση κατά τη χειμερινή περίοδο. Για την επίτευξη θερμικής άνεσης στο εσωτερικό των κτιρίων έχουν αναπτυχθεί διάφορα μηχανικά συστήματα θέρμανσης/ψύξης, που όμως πλέον έχουν καταστεί ιδιαίτερα ενεργοβόρα. Έτσι, τα δεδομένα της σημερινής εποχής, τα οποία υπαγορεύουν και επιβάλλουν μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας, ώθησαν στην αναζήτηση νέων συστημάτων, παθητικών και ενεργητικών, που αποθηκεύουν θερμική ενέργεια αισθητής αλλά και λανθάνουσας μορφής. Στον κτιριακό τομέα λοιπόν, τα υλικά αλλαγής φάσης (PCM), που πραγματεύεται η παρούσα εργασία και έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών ως υλικά πολλά υποσχόμενα, μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε ενεργητικά όσο και σε παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Ωστόσο, ο κτιριακός τομέας είναι ένα μικρό δείγμα των πολυπληθών εφαρμογών αυτών των υλικών (PCM), καθώς η χρήση τους επεκτείνεται και σε άλλους τομείς μεταξύ των οποίων είναι ο τομέας μεταφορών, η ιατρική, η αυτοκινητοβιομηχανία και όχι μόνο.

Αρχικά, λοιπόν, αναφέρεται η σπουδαιότητα της ενέργειας για τις κοινωνίες, η άρρηκτη σχέση που τη συνδέει με την καθημερινή μας ζωή και ο κύριος ρόλος των κτιρίων να εξασφαλίζουν θερμική άνεση, είτε πρόκειται για χώρους κατοικίας, είτε για χώρους εργασίας. Παράλληλα, παρατίθενται στοιχεία και ποσοστά που αφορούν τη συμμετοχή του κτιριακού τομέα, σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο, στην κατανάλωση ενέργειας και την έκλυση ρύπων και καταδεικνύεται η επιτακτική ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας, ορθολογικότερη χρήση των ενεργειακών αποθεμάτων, αξιοποίηση των διαφόρων ανανεώσιμων πηγών και ανάπτυξη νέων τρόπων αποθήκευσης ενέργειας.

Στη συνέχεια, περιγράφονται οι τρόποι μεταφοράς θερμότητας και γίνεται μία σύντομη αναφορά στις έννοιες της θερμοχωρητικότητας των δομικών υλικών και θερμικής μάζας κτιρίου, που αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό ενός κτιρίου. Κατόπιν, παρουσιάζονται και αναλύονται οι τρόποι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, διάφορες περιπτώσεις υλικών για αποθήκευση αισθητής θερμότητας, ενώ γίνεται αναφορά και στο φαινόμενο αλλαγής φάσης, το οποίο λαμβάνει χώρα κατά την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας.

Ακολουθεί εκτεταμένη ανάλυση των υλικών αλλαγής φάσης. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται οι ιδιότητές τους, αλλά και τα κριτήρια που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία επιλογής ενός PCM. Ταυτόχρονα, παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες και υποκατηγορίες, στις οποίες διακρίνονται τα υλικά αυτά με βάση τη χημική τους σύσταση, καθώς επίσης και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που συγκεντρώνει κάθε μία από αυτές. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα βασικότερα προβλήματα που εντοπίζονται κατά τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης με παράλληλη αναφορά στους τρόπους επίλυσης ορισμένων εξ' αυτών. Με αφορμή τους τρόπους επίλυσης, παρουσιάζονται οι μορφές συσκευασίας και ενσωμάτωσης των PCM. Έπειτα, γίνεται μία σύντομη αναφορά στα διαθέσιμα υλικά αλλαγής φάσης στην αγορά και στους κυριότερους κατασκευαστές αυτών. Στη

συνέχεια, περιγράφονται μερικές από τις συνηθέστερες τεχνικές θερμικής ανάλυσης, με τις οποίες επιτυγχάνεται η μέτρηση των σημαντικότερων ιδιοτήτων των PCM, ενώ ακολουθεί η ανάλυση των δύο σημαντικότερων μεθόδων προσομοίωσης αλλαγής φάσης. Επίσης, παρουσιάζονται μερικά από τα δημοφιλέστερα μοντέλα θερμικής προσομοίωσης κτιρίων.

Τέλος, γίνεται μία εκτεταμένη ανάλυση στις κτιριακές εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης, διακρίνοντάς τες σε παθητικά και ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας. Έτσι, παρουσιάζεται η χρήση των PCM σε διάφορα δομικά στοιχεία των κτιρίων, μεταξύ των οποίων είναι γυψοσανίδες, οροφές, δάπεδα, παράθυρα, αλλά και η εφαρμογή τους σε ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, με ταυτόχρονη αναφορά σε πλήθος μελετών και πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί για κάθε περίπτωση. Σημαντική κρίθηκε και η καταγραφή και περιγραφή της ελληνικής κατοικίας του μέλλοντος, ενός κατασκευαστικού εγχειρήματος που έλαβε χώρα υπό τη συνεργασία του Εργαστηρίου Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και δύο εταιρειών που δραστηριοποιούνται στον κατασκευαστικό κλάδο. Ακόμα, θέλοντας τα τονιστεί η δυναμική των PCM και η ποικιλία εφαρμογών τους, παρουσιάζονται σε μικρότερη έκταση και άλλοι τομείς στους οποίους μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα συγκεκριμένα υλικά, όπως είναι ο τομέας μεταφορών, η ιατρική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η τηλεπικοινωνία, καθώς και ο χώρος ένδυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η σπουδαιότητα της ενέργειας

Η ενέργεια μπορεί να χαρακτηριστεί ως η ζωογόνος πηγή της σύγχρονης κοινωνίας, καθώς σε όλες τις μορφές της είναι πάντα καθοριστική για τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Χάρη σ' αυτήν, μπορούμε να απολαμβάνουμε υπηρεσίες που είναι σημαντικές για την ανθρώπινη ευημερία, όπως ο φωτισμός, η θέρμανση και η ψύξη, οι επικοινωνίες, οι μεταφορές, οι κατασκευαστικές και άλλες βιομηχανικές και εμπορικές διαδικασίες. Η ενέργεια λοιπόν, είναι τόσο άρρηκτα συνδεδεμένη με την καθημερινή μας ζωή που μόνο η έλλειψή της καθιστά πρόδηλη την αναγκαιότητά της. Αρκεί να αναλογιστούμε την επίδραση που έχει η διακοπή ρεύματος σε μία πόλη επί ένα εικοσιτετράωρο για να αντιληφθούμε πόσο εξαρτημένοι είμαστε από αυτήν. Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι ανελκυστήρες παύουν να λειτουργούν, τα νοσοκομεία προσφέρουν μόνο την βασική φροντίδα και τα φώτα σβήνουν. Συνεπώς, χωρίς τις ενεργειακές πηγές, οι κοινωνίες δεν θα μπορούσαν να λειτουργήσουν και θα κατέρρεαν.

Τα κτίρια έχουν πολλές λειτουργίες, ωστόσο πρωταρχικός τους ρόλος, είτε πρόκειται για χώρους κατοικίας, είτε για χώρους εργασίας, είναι η εξυπηρέτηση, αλλά και προστασία των ανθρώπων από τις ακραίες καιρικές συνθήκες. Έτσι, για την επίτευξη άνετων συνθηκών διαβίωσης, αναπτύχθηκαν μέθοδοι και συστήματα που καλύπτουν τις ανθρώπινες ανάγκες και εξασφαλίζουν το εκάστοτε κατάλληλο εσωτερικό περιβάλλον (θερμική άνεση), δροσερές συνθήκες κατά τη θερινή περίοδο και επαρκή θέρμανση κατά τη χειμερινή περίοδο. Ωστόσο, η αύξηση του πληθυσμού, η άνοδος του βιοτικού επιπέδου, το μεγάλο πλήθος αναγκών που αντιστοιχεί σε κάθε άτομο χωριστά και η αλόγιστη κατανάλωση ενέργειας, κατέστησαν τις μηχανικές αυτές μεθόδους θέρμανσης/ψύξης ιδιαίτερα ενεργοβόρες και επιβαρυντικές για το περιβάλλον και τον πλανήτη.

Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα, οι ανάγκες για θέρμανση των κατοικιών ανέρχονται περίπου στο 70% της συνολικής ενεργειακής τους κατανάλωσης. Οι οικιακές συσκευές, ο φωτισμός και ο κλιματισμός καταναλώνουν το 18% του συνολικού ενεργειακού ισοζυγίου. Οι κατοικίες με κεντρικό σύστημα θέρμανσης, το οποίο χρησιμοποιεί ως καύσιμο αποκλειστικά το πετρέλαιο αντιστοιχούν στο 35,5% του συνόλου, ενώ το υπόλοιπο 64%, που είναι αυτόνομα θερμαινόμενες κατοικίες, χρησιμοποιούν σε ποσοστό 25% πετρέλαιο, 12% ηλεκτρισμό και 18% καυσόξυλα. [1] Σύμφωνα με τη EuroACE (:Investing in Building Energy Efficiency in the Enlarged EU), ο κτιριακός τομέας συμμετέχει με υψηλό ποσοστό στην κατανάλωση ενέργειας και στην έκλυση ρύπων, ιδιαίτερα στην Ευρωπαϊκή Ένωση, όπου το ποσοστό συμμετοχής των κτιρίων στη συνολική κατανάλωση ενέργειας ανέρχεται περίπου στο 40%. Το έτος 2005 τα Ελληνικά κτίρια (οικιακός και τριτογενής τομέας) συμμετείχαν με ποσοστό 34% στο Ελληνικό ενεργειακό ισοζύγιο και με ποσοστό 65% στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Το άμεσο αποτέλεσμα είναι ότι το ποσοστό των εκπομπών του CO₂ που αντιστοιχεί στα κτίρια υπερβαίνει το 43% (ΕΑΑ 2007, Πρόβλεψη αερίων ρύπων του θερμοκηπίου, Ετήσια έκθεση για ΕΕ). Το έτος 1995, το αντίστοιχο ποσοστό συμμετοχής των ελληνικών κτιρίων στην κατανάλωση ενέργειας ήταν 25%, ενώ το έτος 1985 ήταν 20% (ΥΠΙΑΝ, ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ 1985-2005). Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος, οι κατοικίες στην Ελλάδα παράγουν περίπου 12-13 τόνους CO₂/κάτοικο/έτος. Η τιμή αυτή είναι συγκριτικά μεγαλύτερη από όλες τις άλλες μεσογειακές χώρες και μεγαλύτερη ακόμα και από πολύ βορειότερες χώρες όπως η Νορβηγία, η Γερμανία, η Αυστρία και η Βρετανία. Τέλος, σε παγκόσμιο επίπεδο, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προγράμματος TOPOFILIA, στα κτίρια αντιστοιχεί το 1/6 των

παγκόσμιων πόρων, το 40% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, το 16% του νερού και το 70% των εκπομπών CO₂. [2-4]

Όλα τα παραπάνω καταδεικνύουν την ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας, ορθολογικότερη χρήση των ενεργειακών αποθεμάτων, αξιοποίηση των διαφόρων ανανεώσιμων πηγών και ανάπτυξη νέων τρόπων αποθήκευσης ενέργειας τόσο σε εθνικό, όσο και σε διεθνές επίπεδο. Μάλιστα, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας ειδικότερα, προσελκύει ολοένα και πιο πολύ το ενδιαφέρον, καθώς είναι μια τεχνολογία που μπορεί να συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας, μειώνοντας σημαντικά τις απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας για θερμικές εφαρμογές σε κτίρια, όπως θέρμανση χώρων και νερού, ψύξη και κλιματισμός. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός πως η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκδώσει πλήθος οδηγιών για την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια. Βάσει της Οδηγίας 89/106/ΕΟΚ, η οποία έχει ως κύριο στόχο την ομαλή και ελεύθερη διακίνηση και εμπορία δομικών προϊόντων μεταξύ των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Κοινότητας με την κατάργηση των τεχνικών εμποδίων που υπήρχαν μέχρι σήμερα, καθορίστηκαν έξι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν τα δομικά έργα και τα προϊόντα που τα αποτελούν. Μία εξ' αυτών είναι η «εξοικονόμηση ενέργειας και συγκράτηση θερμότητας». Η δε Κοινοτική Οδηγία 2002/91/ΕΚ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων θέτει απαιτήσεις ενεργειακής κατανάλωσης για τη θέρμανση, ψύξη, φωτισμό και ηλεκτρική χρήση στα κτίρια, καθώς και απαιτήσεις ενεργειακής πιστοποίησής τους. [5]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θερμική ενέργεια

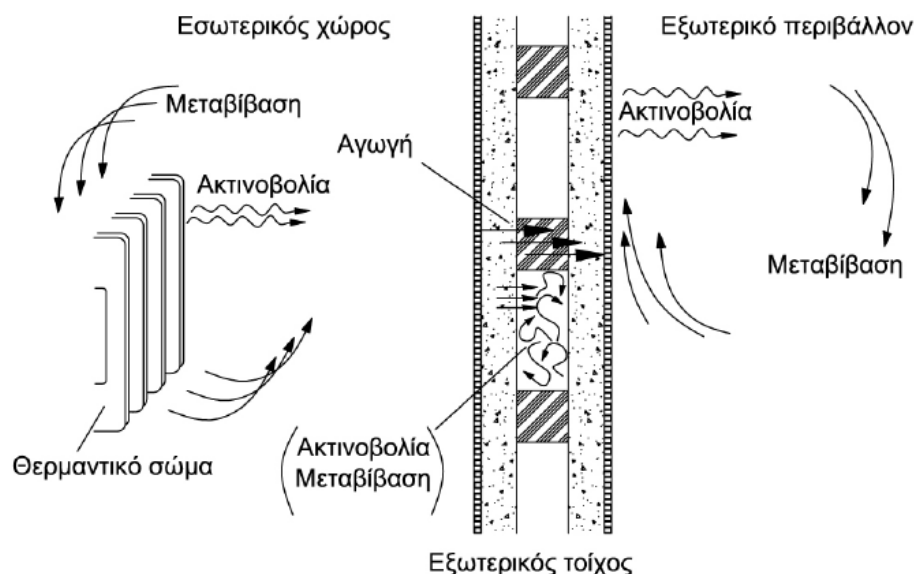
2.1 Γενικά [6-8]

Όπως προαναφέραμε, ένας απ' τους κυριότερους στόχους των κτιρίων θα πρέπει να είναι η εξασφάλιση ενός θερμοκρασιακά άνετου χώρου για τον άνθρωπο. Σύμφωνα με την Αμερικάνικη Επιστημονική Εταιρεία Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning), ως θερμική άνεση ορίζεται η κατάσταση του μυαλού κατά την οποία ένα άτομο δεν επιθυμεί καμία θερμική αλλαγή του εσωτερικού περιβάλλοντος και εκφράζει ικανοποίηση με τις επικρατούσες θερμικές συνθήκες. Με άλλα λόγια, η θερμική άνεση σαν έννοια, θα μπορούσε να προσδιοριστεί ως το αίσθημα που δημιουργείται, όταν ο ανθρώπινος οργανισμός καταναλώνει την ελάχιστη ενέργεια για να διατηρήσει το θερμικό ισοζύγιο του ατόμου. Έτσι λοιπόν, για την επίτευξη της κατάλληλης θερμοκρασίας σε ένα κτίριο, πρέπει μεταξύ άλλων να γίνεται και σωστή διαχείριση της μεταφοράς θερμότητας που συντελείται από το εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον και αντίστροφα. Για το σκοπό αυτό, επιστρατεύεται εκτός από τη μόνωση και η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη χρήση κατάλληλων δομικών υλικών. Όλα τα δομικά υλικά όπως το ξύλο, το γυαλί, ο γύψος και γενικότερα όλες οι ουσίες, συμπεριλαμβανομένου του αέρα, υπακούουν προφανώς στους ίδιους φυσικούς νόμους μεταξύ των οποίων είναι και η μεταφορά θερμότητας.

2.2 Μεταφορά θερμότητας

Μεταφορά θερμότητας όπως γνωρίζουμε από τη θερμοδυναμική, πραγματοποιείται όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντος του και σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα, η θερμότητα μεταφέρεται μόνη της από ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας σ' ένα χαμηλότερης και ποτέ προς την αντίθετη κατεύθυνση. Υπάρχουν τρεις τρόποι μεταφοράς θερμότητας:

- Αγωγή
- Συναγωγή
- Ακτινοβολία



Εικόνα 2.2.1: Τρόποι μεταφοράς θερμότητας στο χώρο [9]

2.2.1 Μεταφορά θερμότητας με θερμική αγωγή [8-11]

Η μεταφορά θερμότητας με θερμική αγωγή οφείλεται κυρίως στη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των ατόμων ή των μορίων ενός σώματος ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Συγκεκριμένα, η θερμότητα μεταφέρεται από τα πιο ενεργά σωματίδια μιας ουσίας προς τα γειτονικά λιγότερο ενεργά λόγω των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Η αγωγή μπορεί να συμβεί τόσο στα στερεά όσο και στα υγρά και στα αέρια. Καθώς όμως μειώνεται η πυκνότητα, μειώνεται και η αγωγή. Ως εκ τούτου, τα υγρά και ακόμα περισσότερο τα αέρια ευνοούν λιγότερο από τα στερεά τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή. Σύμφωνα με το Νόμο του Fourier, η μεταφορά θερμότητας με αγωγή εκφράζει τη ροή θερμότητας Q από ένα σώμα σε ένα άλλο μέσω επαφής και είναι ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας τους. Η σχέση Fourier δίνει την πυκνότητα παροχής θερμότητας q_x [W/m^2]:

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.2.1.1)$$

όπου ο παράγων k [W/Mk] είναι η ειδική θερμική αγωγιμότητα και εξαρτάται από τις ιδιότητες του σώματος.

Οι ικανότεροι αγωγοί θερμότητας (μεγάλο k) είναι τα μέταλλα, ακολουθούν τα κράματα μετάλλων και τα υγρά, ενώ τέλος τις χαμηλότερες τιμές k παρουσιάζουν τα αέρια.

2.2.2 Μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση (συναγωγή)

Η μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση (συναγωγή) εμφανίζεται μεταξύ της επιφάνειας ενός σώματος και του γειτονικού ρευστού (υγρό ή αέριο) που βρίσκεται σε κίνηση, όταν οι θερμοκρασίες τους διαφέρουν. Στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, εκτός από τις τυχαίες κινήσεις των μορίων, τη διάχυση, μεταφέρεται θερμική ενέργεια και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία μετακινείται συλλογικά μεγάλος αριθμός μορίων. [10] Όσο πιο γρήγορη είναι η κίνηση του ρευστού, τόσο πιο μεγάλη είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. [12] Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή διακρίνεται σε εξαναγκασμένη και σε ελεύθερη ή φυσική. Η εξαναγκασμένη συναγωγή εμφανίζεται όταν η κίνηση του ρευστού επιβάλλεται από εξωτερικά αίτια, δηλαδή από ανεμιστήρα, αντλία ή στροβιλοσυμπιεστή, ενώ ελεύθερη συναγωγή έχουμε όταν η κίνηση του ρευστού είναι αποτέλεσμα ανωστικών δυνάμεων που δημιουργούνται από την μεταβολή πυκνότητας λόγω θερμοκρασιακών διαφορών στο ρευστό. Ένα παράδειγμα ελεύθερης συναγωγής είναι ένα θερμαντικό σώμα (καλοριφέρ) όταν λειτουργεί. Ο θερμαινόμενος αέρας είναι ελαφρύτερος και καταλαμβάνει τα ανώτερα στρώματα, ενώ ο ψυχρότερος αέρας παρασύρεται προς το θερμαντικό σώμα για να ακολουθήσει και αυτός στη συνέχεια την πορεία του θερμού. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας παροχής θερμότητας q [W/m^2] που είναι ανάλογη της υπάρχουσας θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ επιφάνειας T_s και ρευστού T_∞ , χρησιμοποιείται η σχέση Newton:

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (2.2.2.1)$$

όπου ο συντελεστής h [W/m^2K] είναι η ειδική συναγωγιμότητα και εξαρτάται από τη ταχύτητα του ρευστού u , το δυναμικό ιξώδες η , την πυκνότητα του ρευστού ρ και την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση c_p . [10]

Με συναγωγή θερμότητας μεταφέρεται η αισθητή θερμότητα. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις συναγωγής με μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας, όταν εμφανίζεται αλλαγή της φάσης του υγρού σε ατμό κατά την ατμοποίηση, ή του ατμού σε υγρό κατά τη συμπύκνωση. [10] Οι έννοιες αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας θα αναλυθούν στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

2.2.3 Μεταφορά θερμότητας με θερμική ακτινοβολία

Μεταφορά θερμότητας με θερμική ακτινοβολία ονομάζεται η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ των επιφανειών στερεών σωμάτων που απέχουν μεταξύ τους και γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. [9, 10] Τα ηλεκτρομαγνητικά αυτά κύματα διαφέρουν από άλλες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπως είναι οι ακτίνες-Χ, οι ακτίνες-γ, τα μικροκύματα, τα ραδιοκύματα και τα τηλεοπτικά κύματα που δε σχετίζονται με τη θερμοκρασία. Σε αντίθεση με τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή και με συναγωγή όπου απαιτείται η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου, στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία δε συμβαίνει κάτι τέτοιο. Η ακτινοβολία εμφανίζεται στο κενό και μάλιστα με εντονότερο ρυθμό. [10] Χαρακτηριστικό παράδειγμα στη φύση είναι η θέρμανση της Γης από τον Ήλιο, όπου δεν υπάρχει μέσο μετάδοσης. [11] Τα στερεά σώματα, τα περισσότερα υγρά και αρκετά αέρια ακτινοβολούν θερμότητα λόγω της θερμοκρασίας τους και ταυτόχρονα απορροφούν μέρος ακτινοβολίας που εκπέμπουν άλλα σώματα, με αποτέλεσμα να θερμαίνονται. [10] Η ποσότητα της ενέργειας που διαφεύγει από μία επιφάνεια σαν ακτινοβολία εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία και τη φύση της επιφάνειας. Σε χαμηλές θερμοκρασίες η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία θεωρείται συνήθως αμελητέα και δε λαμβάνεται υπόψη. [11]

Η ιδανική επιφάνεια που εκπέμπει ακτινοβολία με το μέγιστο ρυθμό ονομάζεται μέλαν σώμα. Η ακτινοβολούμενη θερμότητα από ένα πραγματικό μη μέλαν σώμα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$q = \varepsilon \sigma T_S^4 \quad (2.2.3.1)$$

όπου $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$ η σταθερά ακτινοβολίας Stefan- Boltzmann του μέλανος σώματος και ε ο συντελεστής εκπομπής του πραγματικού σώματος με τιμές από 0 έως και 1 για το μέλαν σώμα. [10]

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία πέφτει σε μία αδιαφανή ή στερεά επιφάνεια, όπως ο τοίχος ή η στέγη ενός κτιρίου, ένας μέρος αυτής απορροφάται από την εξωτερική επιφάνεια και μετατρέπεται σε θερμότητα. Ένα τμήμα της θερμότητας επανεκπέμπεται προς τα έξω, ενώ το υπόλοιπο διαπερνά τον τοίχο ή τη στέγη και καταλήγει στο εσωτερικό του κτιρίου κατά ένα ποσοστό που εξαρτάται από τα θερμικά χαρακτηριστικά διάχυσης των δομικών υλικών του κτιριακού κελύφους. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν, πως η ροή θερμότητας και ως εκ τούτου η θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό του κτιρίου καθ' όλη τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου, επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμική μάζα ή θερμοχωρητικότητα του κελύφους του κτιρίου.

2.3 Θερμοχωρητικότητα [9]

Θερμοχωρητικότητα ενός σώματος ή στοιχείου κατασκευής ονομάζεται η ικανότητά του να αποθηκεύει κάποια ποσότητα θερμότητας, όταν θερμαίνεται. Αυτό

το ποσό θερμότητας που αποθηκεύεται αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του στοιχείου της κατασκευής και του αέρα που το περιβάλλει και είναι τόσο μεγαλύτερο, όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα και η μάζα του στοιχείου. Στην περίπτωση που η θερμοχωρητικότητα είναι αυξημένη, ο ρυθμός θέρμανσης και ψύξης του χώρου είναι αργός και τις ζεστές ημέρες παρατηρείται μειωμένη θέρμανση του χώρου. Η αυξημένη θερμοχωρητικότητα συμβάλλει στην εξισορρόπηση της θερμοκρασίας κατά τις απότομες εναλλαγές θερμότητας-ψύχους. Τα σύγχρονα δομικά υλικά, λόγω του μικρού τους βάρους χαρακτηρίζονται από μικρή θερμοχωρητικότητα.

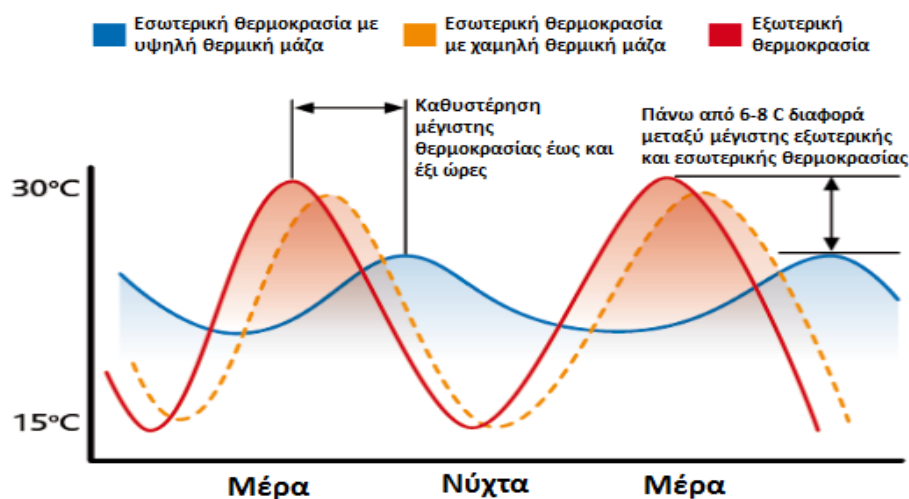
2.4 Θερμική Μάζα κτιρίου

Στις νέες υπό κατασκευή κατοικίες, υπάρχει μία αυξανόμενη τάση να περιλαμβάνεται στο σχεδιασμό τους η χρήση δομικών υλικών χαμηλής πυκνότητας ενέργειας και υλικών από ανανεώσιμες πηγές. Αυτό αποτυπώνεται και με την αύξηση του αριθμού ξύλινων κατοικιών στην Αγγλία τα τελευταία χρόνια. Το ξύλο θεωρείται φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς είναι υλικό χαμηλής ενέργειας και προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Παρ' όλα αυτά, αυτοί οι τύποι κατασκευής είναι σημαντικά πιο ελαφριοί σε σχέση με τους σύγχρονους παραδοσιακούς τύπους κατοικιών από τούβλο ή μπλοκ και παρότι εξοπλίζονται με καλή μόνωση, εμφανίζουν θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο εσωτερικό τους. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη θερμικής άνεσης, ειδικότερα το καλοκαίρι, με αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη, είτε με χρήση ηλεκτρικών ανεμιστήρων είτε με χρήση κλιματιστικού. Τέτοια ελαφριά υλικά όπως το ξύλο παρουσιάζουν μικρή θερμοχωρητικότητα και αντίστοιχα οι ελαφριές κατασκευές χαρακτηρίζονται από μικρή θερμική μάζα. [13]

Η θερμική μάζα είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό ενός κτιρίου, και εκφράζει την ικανότητα των δομικών του υλικών να αποθηκεύουν θερμότητα και να την εκπέμπουν με χρονική καθυστέρηση. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι η μεγάλη θερμική μάζα συμβάλλει στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, μειώνοντας την απαίτηση για κλιματισμό κατά τη θερινή περίοδο και την κατανάλωση καυσίμου θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο. Η απουσία της απαραίτητης θερμικής μάζας, έχει σαν αποτέλεσμα την εξισορρόπηση των εσωτερικών και εξωτερικών θερμοκρασιών σε μικρό χρονικό διάστημα, επηρεάζοντας άμεσα το εσωτερικό περιβάλλον του κτιρίου και κατά συνέπεια οδηγεί στη συνεχή λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης και κατ' επέκταση στην αυξημένη κατανάλωση καυσίμων και εκπομπών CO₂. Όσο μεγαλύτερη είναι δηλαδή η θερμική μάζα της κατασκευής, τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να επηρεαστούν οι εσωτερικές συνθήκες από τις εξωτερικές. Αν για παράδειγμα ένα κτίριο έχει μεγάλη θερμική μάζα, κατά τη διάρκεια του χειμώνα θα έχει συνεχώς μεγάλη ποσότητα θερμότητας αποθηκευμένη, οπότε το σύστημα θέρμανσης θα αναγκάζεται να λειτουργεί για μικρή χρονική διάρκεια και σε αραιά διαστήματα. Στο κλίμα της Ελλάδας, η ύπαρξη θερμικής μάζας είναι μία από τις βασικότερες προϋποθέσεις που δίνουν δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας έως και 70% το χειμώνα και έως και 100% το καλοκαίρι. [14, 15]

Η θερμική μάζα ενός κτιρίου εξαρτάται κυρίως από την ειδική θερμοχωρητικότητα, την πυκνότητα και τη θερμική αγωγιμότητα των δομικών του υλικών. [5] Συγκεκριμένα, αν το περίβλημα ενός κτιρίου δομείται από υλικά μικρής θερμοχωρητικότητας, οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος θα γίνονται άμεσα αισθητές στο εσωτερικό του. Αντίθετα, σε ένα

κτίριο με δομικά υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας, ένα μέρος της θερμότητας κατά τη διάρκεια των υψηλών θερμοκρασιών της ημέρας αποθηκεύεται στα στοιχεία του κελύφους και αυξάνει τη θερμοκρασία τους. Κατά τη διάρκεια της νύχτας με τη θερμοκρασία να μειώνεται, η θερμότητα που είχε αποθηκευτεί στα υλικά αποδίδεται πλέον στο περιβάλλον. Έτσι, η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου μεταβάλλεται πιο ομαλά σε σχέση με την αντίστοιχη στο περιβάλλον. [7] Επομένως, μεγάλη θερμοχωρητικότητα ενός υλικού, που είναι και ανάλογη με τον όγκο και την πυκνότητά του, συνεπάγεται μεγάλη θερμική μάζα στο κέλυφος του κτιρίου. [15]

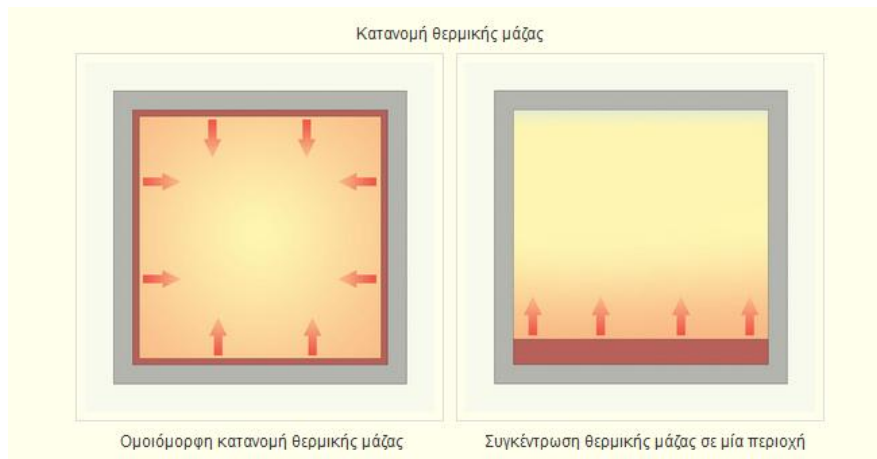


Εικόνα 2.4.1: Θερμοκρασιακή διακύμανση εσωτερικού χώρου κτιρίου κατά τη διάρκεια εικοσιτετράωρου ανάλογα με τη θερμική μάζα.

Από τα υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας που χρησιμοποιούνται τόσο στον παραδοσιακό όσο και στο σύγχρονο τρόπο δόμησης όπως, οι φυσικοί λίθοι, το τούβλο και το σκυρόδεμα, μεγαλύτερη πυκνότητα παρουσιάζει ο φυσικός λίθος. [15] Όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξάνεται, τα υλικά αυτά απορροφούν θερμότητα από τον αέρα και την απελευθερώνουν όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μειώνεται. Για να είναι αποτελεσματική η επιφάνεια του υλικού, θα πρέπει να εκτίθεται επαρκώς, ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά θερμότητας. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η εκτιθέμενη επιφάνεια στο εσωτερικό περιβάλλον ενός κτιρίου, τόσο μεγαλύτερα είναι τα οφέλη στη θερμική μάζα αυτού. [13] Εκτός όμως, από τα παραπάνω συνηθισμένα δομικά υλικά, η θερμική μάζα ενός κτιρίου μπορεί να αυξηθεί και με άλλα λιγότερο εφαρμοσμένα υλικά και τεχνικές, μεταξύ των οποίων είναι και τα Υλικά Αλλαγής Φάσης που παρουσιάζουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα και θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο. [16]

Θέση θερμικής μάζας

Η θερμική μάζα τοποθετείται στο εσωτερικό του κτιρίου. Προϋπόθεση για την αποδοτική λειτουργία της είναι η πλήρης εξωτερική της κάλυψη με θερμομόνωση. Η σωστή θερμική λειτουργία του κτιρίου και η διατήρηση της θερμικής ισορροπίας μεταξύ των χώρων του (μείωση θερμοκρασιακών διακυμάνσεων), δεν εξαρτάται μόνο από τη συνολική ποσότητα της θερμικής μάζας αλλά και από την ισορροπημένη κατανομή της. [15]



Εικόνα 2.4.2: Περιπτώσεις κατανομής θερμικής μάζας

Όσο αυξάνεται η επιφάνεια της θερμικής μάζας, τόσο μειώνεται το πάχος της και βελτιώνεται η απόδοσή της. Το πάχος της στο ελληνικό κλίμα είναι καλό να κυμαίνεται μεταξύ 10-20 cm. [15]

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η θερμική μάζα λειτουργεί ως «ρυθμιστής» της θερμοκρασίας τόσο το καλοκαίρι όσο και το χειμώνα και βασικό ρόλο στη ρύθμιση αυτής παίζει η διαδικασία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και απόδοσής της στο εσωτερικό περιβάλλον μέσω των δομικών στοιχείων του κτιρίου. [15]

2.5 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια όπως και οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζει εποχιακές διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά της, αφού εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Έτσι, τις πιο πολλές φορές η προσφορά και η ζήτηση του ενεργειακού φορτίου δε μπορούν να συμβαδίσουν. Τη λύση σ' αυτό το πρόβλημα έρχεται να δώσει η αποθήκευση θερμικής ενέργειας, η οποία επιτρέπει την αποθήκευση θερμότητας με σκοπό αυτή να χρησιμοποιηθεί αργότερα όποτε είναι απαραίτητη. Η θερμότητα ωστόσο, δύναται να ανακτηθεί εφόσον η μέθοδος αποθήκευσης είναι αντιστρεπτή. Μία ολοκληρωμένη διαδικασία αποθήκευσης θερμότητας αποτελείται από τρία βήματα: τη φόρτιση, την αποθήκευση και την εκφόρτιση. [17]

2.5.1 Τρόποι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους: αποθήκευση αισθητής θερμότητας, αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας και αποθήκευση ενέργειας χημικών δεσμών μέσω θερμοχημικών αντιδράσεων. Οι πρώτες δύο μέθοδοι, αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας είναι αυτές που έχουν μελετηθεί περισσότερο τις τελευταίες δεκαετίες με την πρώτη (υπό μορφή αισθητής θερμότητας) να είναι η πιο διαδεδομένη. [18]

2.5.1.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας [19]

Αισθητή θερμότητα καλείται το ποσό θερμότητας που απορροφάται ή απελευθερώνεται από ένα υλικό καθώς η θερμοκρασία του αυξάνεται ή μειώνεται αντίστοιχα και ως εκ τούτου δημιουργεί αλλαγή στην τυχαία κίνηση των μορίων του υλικού.

Κατά την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται αυξάνοντας τη θερμοκρασία ενός στερεού ή υγρού υλικού. Καθοριστικός παράγοντας στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας υπό μορφή αισθητής θερμότητας, είναι η θερμοχωρητικότητα του υλικού και η μεταβολή της θερμοκρασίας που υφίσταται αυτό κατά τη διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης, δηλαδή κατά τη διαδικασία απορρόφησης και απόδοσης της θερμότητας. Το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση C_p [J/KgK] του μέσου, τη θερμοκρασιακή αλλαγή ($T_f - T_i$) [K] και την ποσότητα της μάζας m [Kg] του υλικού και δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT = m C_p (T_f - T_i) , \quad (2.5.1.1.1)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού, καθώς αποθηκεύεται αισθητή θερμότητα. Η σχέση θερμοκρασίας και αποθηκευόμενης θερμότητας είναι γραμμική.



Εικόνα 2.5.1.1.1: Αποθήκευση αισθητής θερμότητας συναρτήσει θερμοκρασίας

Η ειδική θερμοχωρητικότητα C_p εκφράζει το ποσό ενέργειας που απορροφάται ή αποδίδεται σε θερμοκρασιακή μεταβολή του υλικού κατά 1° Kelvin υπό σταθερή πίεση. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις για τη μεταξύ των υλικών σύγκριση προτιμάται το μέγεθος της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερό όγκο C_v [J/m³K], που εκφράζει το ποσό ενέργειας που απορροφάται ή αποδίδεται σε θερμοκρασιακή μεταβολή του υλικού κατά 1° Kelvin υπό σταθερό όγκο.

Από τα παραπάνω, είναι προφανές ότι βασικό κριτήριο για την επιλογή υλικού κατάλληλου να αποθηκεύει θερμότητα, είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή αυτής, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσό που μπορεί να αποθηκεύσει το υλικό. Εκτός όμως, από την υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα υπάρχει και ένα πλήθος άλλων προϋποθέσεων που πρέπει να πληρούν τα δομικά υλικά προκειμένου να επιλέγονται για την αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Αυτά είναι:

- Να έχουν θερμική και γεωμετρική σταθερότητα
- Να έχουν μεγάλο ρυθμό απορρόφησης ή απελευθέρωσης θερμότητας
- Να έχουν μεγάλη πυκνότητα
- Να μην είναι εύφλεκτα, διαβρωτικά και τοξικά
- Να διαθέτουν αντοχή
- Να έχουν σχετικά χαμηλό κόστος
- Να δύναται να χρησιμοποιηθούν και σαν θερμικά και σαν ψυκτικά μέσα
- Να λειτουργούν σε ευρύ φάσμα εφαρμογών

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αισθητής θερμότητας είναι υγρά, μεταξύ των οποίων είναι το νερό, έλαια, τηγμένα άλατα και υγρά μέταλλα και στερεά όπως πέτρα, τούβλο, σκυρόδεμα, σίδηρο, στεγνό και βρεγμένο χώμα κλπ. Τα αέρια λόγω χαμηλών τιμών ειδικής θερμοχωρητικότητας αποφεύγονται.

2.5.1.1.1 Υγρά υλικά

➤ Αποθήκευση σε νερό [20-22]

Σε χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω των 100° C), το νερό είναι ένα από τα καλύτερα μέσα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, αφού, είναι φθινό, πάντα διαθέσιμο και έχει υψηλότερη ειδική θερμοχωρητικότητα ($C_p=4180\text{J/KgK}$) συγκριτικά με άλλα υλικά. Σε μία θερμοκρασιακή μεταβολή των 70° C αποθηκεύει 290 MJ/m³. Στα πλεονεκτήματα του μπορούν να προστεθούν η μη τοξικότητα του, η μεγάλη πυκνότητά του, η ευκολία στη διαχείρισή του, ότι δεν είναι εύφλεκτο και η ικανότητά του να λειτουργεί ταυτόχρονα και ως μέσο αποθήκευσης και ως μέσο μεταφοράς. Όμως, εξαιτίας της μεγάλης τάσης ατμών που εμφανίζει, απαιτείται μόνωση και δοχεία ανθεκτικά στην πίεση για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Επιπλέον, εξαιτίας του μικρού του ιξώδους περιορίζονται πιο δύσκολα οι διαρροές και τέλος προκαλεί διαβρώσεις. Σήμερα, είναι το πιο χρησιμοποιημένο υλικό σε εφαρμογές όπως θέρμανση νερού και χώρων μέσω της ηλιακής ενέργειας.

➤ Αποθήκευση σε άλλα υγρά υλικά [20, 23]

Τα υλικά που αντικαθιστούν πιο συχνά το νερό είναι έλαια με βάση το πετρέλαιο και τηγμένα άλατα. Η θερμοχωρητικότητά τους είναι περίπου 25-40% αυτής του νερού, όμως εμφανίζουν μικρότερη τάση ατμών από το νερό και έχουν την ικανότητα να λειτουργούν σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 300° C. Όσον αφορά τα έλαια, τα σημαντικότερα προβλήματα στη χρήση τους είναι αφενός η εξασθένηση των ιδιοτήτων τους με το πέρασμα του χρόνου και αφετέρου ο κίνδυνος ανάφλεξης σε θερμοκρασίες υψηλότερες της θερμοκρασίας ανάφλεξής τους. Από την άλλη μεριά, τα υγρά μέταλλα ενώ παρουσιάζουν πολλές παρόμοιες ιδιότητες με το νερό, έχουν και αυτά χαμηλή ειδική θερμοχωρητικότητα και μπορούν πιο εύκολα να κάνουν αντίδραση με το δοχείο.

2.5.1.1.2 Στερεά υλικά [20-22]

Το μειονέκτημα της υψηλής τάσης ατμών που παρουσιάζει το νερό, καθώς και οι περιορισμοί που θέτουν τα υπόλοιπα υγρά υλικά μπορούν να αποφευχθούν με τη χρήση στερεών υλικών για αποθήκευση αισθητής θερμότητας, όπως είναι η πέτρα, τα

μέταλλα, το σκυρόδεμα, η άμμος, τα τούβλα κλπ. Τα στερεά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες, αφού ούτε παγώνουν ούτε βράζουν, καθώς επίσης δεν διαρρέουν από το δοχείο τους. Συγκεκριμένα, οι θερμοκρασίες λειτουργίας τους καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, από 40 έως 70° C για σκυρόδεμα ή πέτρα, μέχρι πάνω από 160° C για μέταλλα. Το βασικότερο μειονέκτημα των στερεών υλικών είναι η χαμηλή θερμοχωρητικότητά τους (κατά μέσο όρο ~ 1200KJ/m³K) που οδηγεί σε χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα. Σε εφαρμογές στον κτιριακό τομέα, χρησιμοποιούνται κυρίως για θέρμανση χώρων, για πλήρωση των στερεών θερμικών κλινών, στους θερμικούς τοίχους αποθήκευσης και στη μακράς διάρκειας υπόγεια αποθήκευση. Το κυριότερο στερεό υλικό για αποθήκευση αισθητής θερμότητας είναι ο χυτοσίδηρος, ο οποίος υπερβαίνει το επίπεδο αποθήκευσης ενεργειακής πυκνότητας του νερού. Ωστόσο, είναι πιο ακριβός από την πέτρα ή το τούβλο, με αποτέλεσμα η περίοδος απόσβεσης να είναι πολύ μεγαλύτερη.

➤ Αποθήκευση σε πέτρα

Τα πλεονεκτήματα της πέτρας είναι η μη τοξικότητα, το ελάχιστο κόστος, η έλλειψη κινδύνου διάβρωσης στις δεξαμενές και το γεγονός ότι δεν είναι εύφλεκτο υλικό.

Σε αυτό τον τρόπο αποθήκευσης, συναντάμε πέτρες ή χαλίκια χαλαρά τοποθετημένα μεταξύ τους, μέσω των οποίων ρέει ρευστό που μεταφέρει θερμότητα. Σε εφαρμογές στα κτίρια, αυτή η μέθοδος αποθήκευσης συνδυάζεται συχνά με ηλιακούς συλλέκτες.

➤ Αποθήκευση σε μέταλλα

Τα μέταλλα είναι τα καταλληλότερα στερεά υλικά για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών της τάξεως 120-1400° C και όπου απαιτείται καλή θερμική αγωγιμότητα, αν και το σχετικά μεγάλο κόστος τους συχνά περιορίζει τη χρήση τους. Περιπτώσεις μετάλλων που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση θερμότητας είναι το αλουμίνιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος.

➤ Αποθήκευση στον ιστό του κτιρίου

Η αποθήκευση θερμότητας μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε νέα όσο και σε ήδη υπάρχοντα κτίρια και μπορεί να ολοκληρωθεί με συστήματα διανομής αέρα και νερού. Το πιο διαδεδομένο υλικό αποθήκευσης είναι το κεραμικό τούβλο. Η μάζα του κτιρίου και το τσιμέντο μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για παθητικά ή ενεργητικά αποθηκευτικά συστήματα.

Παρακάτω φαίνεται πίνακας με κάποιες βασικές ιδιότητες υγρών και στερεών υλικών αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.

Πίνακας 2.5.1.1.2.1: Βασικές ιδιότητες υγρών και στερεών υλικών αποθήκευσης αισθητής θερμότητας

Material	Type	Temperature range (°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/(kg K))	k (W/(mK)) (at 20 °C)	e (W s ^{1/2} /(m ² K))
Water	Liquid	0–100	1000	4.19	0.58	49.30
Caloria HT43	Liquid	12–260	867	2.2	–	–
Ethanol	Liquid	Up to 78	790	2.4	0.171	18.01
Propanol	Liquid	Up to 97	800	2.5	0.161	17.94
Butanol	Liquid	Up to 118	809	2.4	0.167	18.01
Isobutanol	Liquid	Up to 100	808	3	0.133	17.96
Isopentanol	Liquid	Up to 148	831	2.2	0.141	16.06
Octane	Liquid	Up to 126	704	2.4	0.134	15.05
Engine Oil	Liquid	Up to 160	888	1.88	–	–
Brick	Solid	20–70	1600	0.84	1.20	1270
Concrete	Solid	20–70	2240	1.13	0.9–1.3	47.73–57.36
Cement sheet	Solid	20–70	700	1.050	0.36	514
Gypsum plastering	Solid	–	1200	0.837	0.42	649
Granite	Solid	20–70	2650	0.900	2.90	2967
Marble	Solid	20–70	2500	0.880	2.00	2285
Sandstone	Solid	20–70	2200	0.712	1.83	1710
Clay sheet	Solid	–	1900	0.837	0.85	1163
Asphalt sheet	Solid	–	2300	–	1.20	2166
Steel slab	Solid	20–70	7800	0.502	50	13,992
Cork board	Solid	–	160	1.888	0.04	110
Wood	Solid	–	800	2.093	0.16	324
Plastic board	Solid	–	1050	0.837	0.50	663
Rubber board	Solid	–	1600	0.200	0.30	310
PVC board	Solid	–	1379	1.004	0.16	410
Asbestos sheet	Solid	–	2500	1.050	0.16	648
Formaldehyde board	Solid	–	30	1.674	0.03	39
Thermalite board	Solid	–	753	0.837	0.19	346
Fiber board	Solid	–	300	1	0.06	134
Siporex board	Solid	–	550	1.004	0.12	257
Polyurethane board	Solid	–	30	0.837	0.03	27
Light plaster	Solid	–	600	1	0.16	712
Dense plaster	Solid	–	1300	1	0.50	806
Aluminum	Solid	Up to 160	2707	0.896	204	703.42
Aluminum oxide	Solid	Up to 160	3900	0.84	30	313.50
Aluminumsulfate	Solid	Up to 160	2710	0.75	–	–
Cast iron	Solid	Up to 160	7900	0.837	29.3	440.16
Pure iron	Solid	Up to 160	7897	0.452	73	510.46
Calcium chloride	Solid	Up to 160	2510	0.67	–	–
Copper	Solid	Up to 160	8954	0.383	385	1149.05
Stone, granite	Solid	Up to 160	2640	0.82	1.7–3.98	61.20–92.82
Stone, sandstone	Solid	Up to 160	2200	0.71	1.83	53.46

(–): not available.

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες από τους κατασκευαστές για αποθήκευση/ απελευθέρωση θερμικής ενέργειας. Παρ' όλυτά, η μέθοδος αυτή μειονεκτεί σε σχέση με τη μέθοδο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, λόγω του πολύ μεγαλύτερου όγκου υλικών που απαιτεί για την αποθήκευση του ίδιου ποσού θερμότητας. [24]

2.5.1.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας [7, 19, 21, 23, 25]

Λανθάνουσα θερμότητα καλείται το ποσό θερμότητας που επιφέρει αλλαγή στην κατάσταση της ύλης (αλλαγή φάσης), χωρίς τη μεταβολή της θερμοκρασίας της (δηλαδή, η θερμότητα αυτή δεν είναι αντιληπτή με τις αισθήσεις) και αποδίδεται στη μεταβολή των δεσμών και της κινητικής ενέργειας των μορίων του υλικού.

2.5.1.2.1 Φαινόμενο αλλαγής φάσης [26]

Οι καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένα υλικό ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που του επιβάλλονται είναι η στερεή, η υγρή, η αέρια και αυτή του πλάσματος, με την τελευταία να είναι και η πιο σπάνια.

Το φαινόμενο της αλλαγής φάσης εκδηλώνεται συνήθως μεταξύ της στερεάς, υγρής και αέριας φάσης και κατά τη διάρκεια αυτού, η πίεση και η θερμοκρασία παραμένουν σχεδόν σταθερές, με τη σχεδόν σταθερή αυτή θερμοκρασία να ονομάζεται θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Χαρακτηριστικό αυτού του φαινομένου είναι η αλλαγή μιας ή περισσοτέρων φυσικών ιδιοτήτων του υλικού όπως η θερμοχωρητικότητα, ο όγκος κ.α.

Πιο συγκεκριμένα, ως προς την αλλαγή φάσης οι πιθανές μετατροπές είναι οι ακόλουθες:

- *Τήξη*: μετατροπή από στερεή σε υγρή φάση
- *Πήξη*: αντίστροφη διαδικασία της τήξης, δηλαδή από υγρή σε στερεά φάση
- *Ατμοποίηση ή βρασμός*: μετατροπή από υγρή σε αέρια φάση
- *Υγροποίηση ή συμπύκνωση*: αντίστροφη διαδικασία της ατμοποίησης, δηλαδή από αέρια σε υγρή φάση
- *Εξάχνωση*: μετατροπή από στερεή σε αέρια φάση
- *Εναπόθεση*: αντίστροφη διαδικασία της εξάχνωσης, δηλαδή από αέρια σε στερεή φάση
- *Ιονισμός*: μετατροπή από αέριο σε πλάσμα
- *Ανασυνδυασμός*: αντίστροφη διαδικασία του ιονισμού, δηλαδή από πλάσμα σε αέριο

και τέλος, η μετατροπή από στερεό σε στερεό, όπου γίνεται μετάβαση από μία κρυσταλλική δομή σε μία άλλη ή μετάβαση από μία άμορφη δομή σε μία κρυσταλλική.

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας βασίζεται στην ιδιότητα των υλικών να απορροφούν θερμότητα καθώς αλλάζουν φάση. Η μετατροπή από στερεό σε στερεό, λόγω της μικρής ποσότητας λανθάνουσας θερμότητας που εμφανίζει, δεν είναι σύνηθες να εφαρμόζεται στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Από την άλλη μεριά, οι μετατροπές από στερεό σε αέριο καθώς και από υγρό σε αέριο, αν και παρουσιάζουν μεγαλύτερα ποσά λανθάνουσας θερμότητας απ' ό,τι η τήξη, που περιγράφεται παρακάτω, δεν είναι κατάλληλες για κτιριακές εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, αφού συνδέονται με μεγάλες μεταβολές όγκου (λόγω σχηματισμού αερίου) και επομένως με πιο αυστηρές απαιτήσεις περιορισμού, κάτι που καθιστά το σύστημα σύνθετο και μη πρακτικό (δοχεία υπό πίεση κλπ.). Έτσι, η πιο συνηθισμένη διεργασία για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας είναι η τήξη, καθώς με αυτήν μπορούν να αποθηκεύονται σχετικά μεγάλα ποσά λανθάνουσας θερμότητας μέσα σε μικρό θερμοκρασιακό εύρος και με μικρές μεταβολές όγκου (<10%).

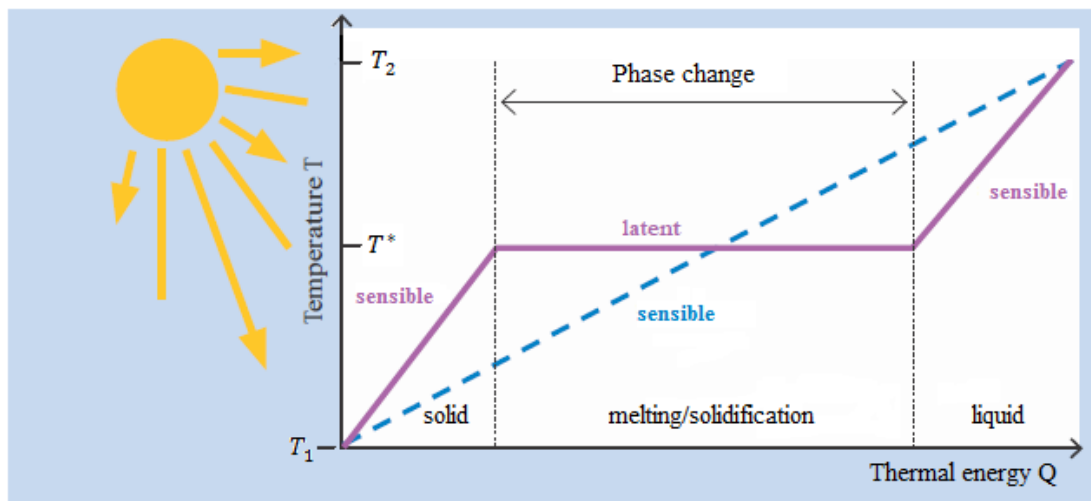
Κατά τη διάρκεια της τήξης, όπου το υλικό αποθήκευσης μεταβαίνει από τη στερεή κρυσταλλική δομή στην υγρή φάση, απορροφάται θερμότητα για τη διάσπαση των διαμοριακών δεσμών του και η θερμοκρασία του διατηρείται περίπου σταθερή. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται θερμοκρασία τήξης και η θερμότητα που παρέχεται λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Κατά την αντίστροφη διαδικασία (πήξη), απελευθερώνεται θερμότητα, προκειμένου τα μόρια του υλικού να αποκτήσουν αυστηρή διάταξη.

Η συνολική θερμότητα που αποθηκεύεται σε ένα υλικό, μεταβαίνοντας από μία θερμοκρασία T_1 σε μια θερμοκρασία $T_2 > T_1$ και αλλάζοντας φάση έστω από στερεό σε υγρό σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία T^* , είναι:

$$Q_S = m[C_S(T^* - T_1) + \lambda + C_L(T_2 - T^*)], \quad (2.5.1.2.1.1)$$

όπου m : η μάζα του υλικού, C_s, C_l : οι ειδικές θερμοχωρητικότητες της στερεής και υγρής φάσης του υλικού αντίστοιχα και λ : η λανθάνουσα θερμότητα τήξης.

Δηλαδή, η συνολική αυτή θερμότητα, είναι το άθροισμα της αισθητής θερμότητας για τη μετάβαση όντας στερεό από τη θερμοκρασία T_1 στη θερμοκρασία τήξης T^* , της λανθάνουσας θερμότητας στη θερμοκρασία T^* και της αισθητής θερμότητας για τη μετάβαση όντας πλέον υγρό από τη θερμοκρασία T^* στην τελική θερμοκρασία T_2 . Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η μετάβαση από στερεό σε υγρό που περιγράψαμε.



Εικόνα 2.5.1.2.1.1: Θερμική ενέργεια συναρτήσει της θερμοκρασίας και μετάβαση από τη στερεή στην υγρή φάση

Κάθε σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας θα πρέπει να διαθέτει τις ακόλουθες τρεις ιδιότητες: ένα υλικό αλλαγής φάσης (PCM) κατάλληλο για το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής που μας ενδιαφέρει, ένα χώρο κατάλληλο για την τοποθέτηση του υλικού αλλαγής φάσης και ο οποίος θα πρέπει να είναι συμβατός με αυτό και έναν κατάλληλο εναλλάκτη θερμότητας για τη μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας πλεονεκτούν έναντι των συστημάτων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας όπως έχουμε προαναφέρει. Ο λόγος είναι ότι τα πρώτα έχουν υψηλότερη πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας και δυνατότητα απορρόφησης/απελευθέρωσης θερμότητας σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης του υλικού.

2.5.1.3 Αποθήκευση θερμοχημικής ενέργειας [19, 27, 28]

Τα συστήματα αποθήκευσης που χρησιμοποιούν κάποια χημική αντίδραση ονομάζονται θερμοχημικά συστήματα και αποθηκεύουν την ηλιακή θερμική ενέργεια ως θερμότητα χημικής αντίδρασης (αντιστρεπτής), δηλαδή ως ενέργεια χημικών δεσμών. Σ' αυτή την περίπτωση, το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \alpha_r m \Delta h_r \quad (2.5.1.3.1)$$

Το κυριότερο κριτήριο για την επιλογή μιας αμφίδρομης χημικής αντίδρασης είναι οι τιμές της σταθεράς ισορροπίας και των σταθερών ταχύτητας στη θερμοκρασία

αποθήκευσης, οι οποίες θα πρέπει να είναι μεγάλες προς την κατεύθυνση της ενδόθερμης αντίδρασης, ώστε να εξασφαλίζεται γρήγορη και πλήρης απορρόφηση της ηλιακής θερμότητας. Επίσης, η αντίστροφη αντίδραση, που οδηγεί στην παραλαβή της θερμότητας, πρέπει να έχει ικανοποιητική απόδοση σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Τα θερμοχημικά συστήματα παρουσιάζουν μερικά ειδικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα συστήματα των προηγούμενων μεθόδων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, τα οποία είναι τα εξής:

- Μεγάλη πυκνότητα ενέργειας (2 έως 10 φορές μεγαλύτερη από αυτές των προηγούμενων μεθόδων)
- Δυνατότητα αποθήκευσης σε θερμοκρασία δωματίου
- Εξαιρετικά μεγάλους χρόνους αποθήκευσης
- Δυνατότητα μεταφοράς της ενέργειας
- Δυνατότητα λειτουργίας ως αντλιών θερμότητας
- Χαμηλό ενεργειακό κόστος

Από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, παρατηρούμε ότι τα θερμοχημικά συστήματα συγκεντρώνουν πολλά πλεονεκτήματα. Παρά ταύτα, το επίπεδο ανάπτυξης τους βρίσκεται σε πολύ αρχικό στάδιο.

2.5.2 Σύγκριση μεθόδων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας [23]

Από τις τρεις μεθόδους αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που αναλύθηκαν παραπάνω, πιο συχνά συναντάμε σε εφαρμογές τις μεθόδους αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας. Μεταξύ αυτών των δύο, πιο ελκυστική και πρακτική θεωρείται η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, για την εφαρμογή της οποίας χρησιμοποιούνται υλικά που ονομάζονται Υλικά Αλλαγής Φάσης ή PCM και τα οποία θα αναλυθούν πλήρως στο επόμενο κεφάλαιο. Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας προτείνονται ιδιαίτερος για μελλοντική χρήση σε εφαρμογές μεσαίων και υψηλών θερμοκρασιών.

Η επιλογή της μεθόδου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ωστόσο, καθορίζεται από την εκάστοτε εφαρμογή. Ορισμένοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά τη επιλογή της μεθόδου αποθήκευσης είναι οι ακόλουθοι:

- Η περιοχή θερμοκρασιών στην οποία καλείται να λειτουργήσει το σύστημα αποθήκευσης
- Η ικανότητα αποθήκευσης
- Περιορισμός των θερμικών απωλειών από την αποθήκευση στο ελάχιστο
- Το ποσοστό φόρτισης και εκφόρτισης
- Το κόστος της μονάδας αποθήκευσης, που περιλαμβάνει το αρχικό κόστος του αποθηκευτικού μέσου, τα δοχεία και τη μόνωση και τέλος το λειτουργικό κόστος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Υλικά αλλαγής φάσης (PCM)

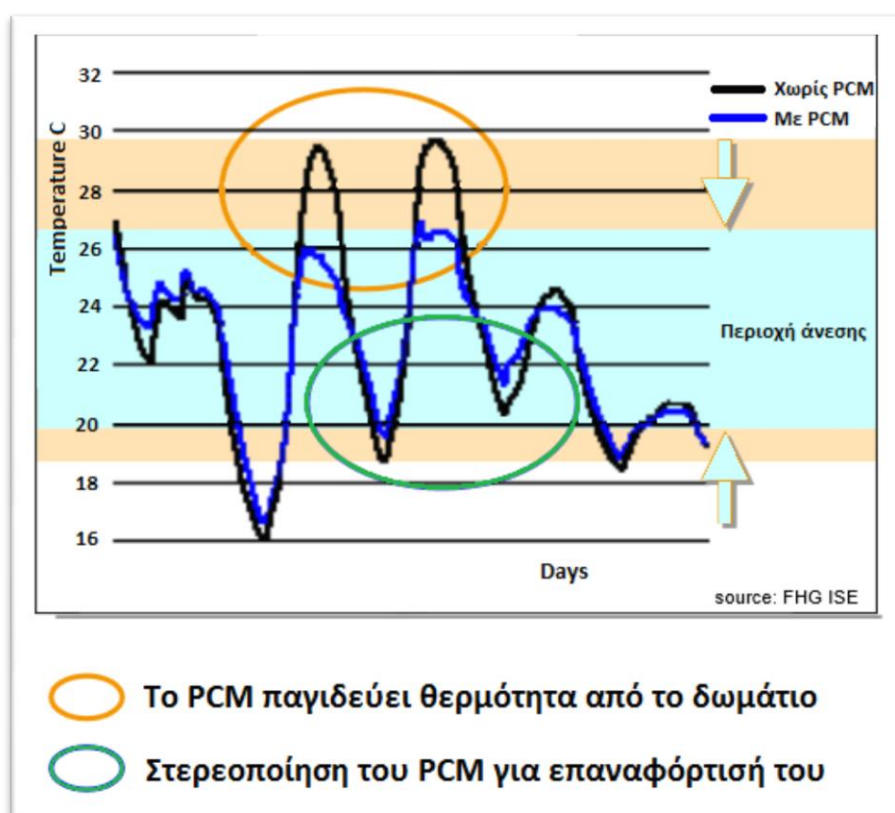
3.1 Γενικά

Τα Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM) είναι ουσίες ή μίγματα ιδιαίτερης φυσικής και χημικής σύστασης, που ενόσω υφίστανται αλλαγή φάσης, έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν/απελευθερώνουν θερμική ενέργεια με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας διατηρώντας σταθερή θερμοκρασία (σημείο αλλαγής φάσης) ή σχεδόν σταθερή θερμοκρασία (ονομαστική θερμοκρασία αλλαγής φάσης) για την περίπτωση μιγμάτων πολλών συστατικών. Τα υλικά αυτά, ως εκ τούτου, χαρακτηρίζονται και ως υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Σε θερμοκρασίες ωστόσο, διαφορετικές της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης τους, συμπεριφέρονται όπως τα συμβατικά υλικά(υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας), δηλαδή αποθηκεύουν θερμότητα και ταυτόχρονα αυξάνουν τη θερμοκρασία τους. [29]

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η αποθήκευση και μεταφορά θερμικής ενέργειας με τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης, επιτυγχάνεται στην πράξη συνθηθέστερα κατά τη μετάβασή τους από τη στερεή στην υγρή φάση και αντίστροφα. Η αρχή λειτουργίας τους είναι απλή: Όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξηθεί, οι χημικοί δεσμοί του υλικού διασπώνται και το υλικό μεταπίπτει από τη στερεά στην υγρή φάση. Αυτή η αλλαγή φάσης είναι μία ενδόθερμη διαδικασία και επομένως κατά τη διάρκεια αυτής το PCM απορροφά θερμότητα. Καθώς η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αρχίζει και πάλι να μειώνεται, το PCM επιστρέφει από την υγρή στη στερεή του κατάσταση(εξώθερμη διαδικασία) και απελευθερώνει την απορροφηθείσα θερμότητα. Αυτή η εναλλαγή του υλικού αλλαγής φάσης από στερεό σε υγρό και από υγρό σε στερεό, μπορεί να γίνεται επαναλαμβανόμενα. [30]

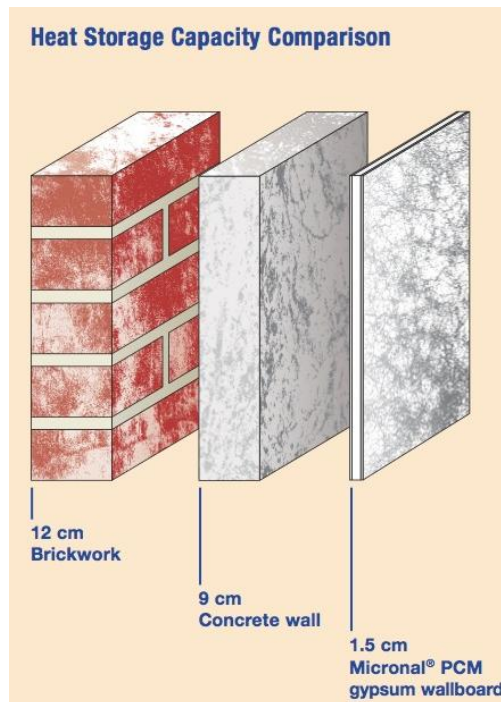
Τα υλικά αλλαγής φάσης αποτελούν αντικείμενο μελέτης για τη θερμική αποθήκευση στον κτιριακό τομέα ήδη πριν από το 1980. Η χρήση αυτών στα κτίρια μπορεί να συμβάλλει στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης αυτών και εντοπίζεται σε δύο είδη εφαρμογών: Σ' αυτές, όπου τα PCM ενσωματώνονται στο κτιριακό κέλυφος και έτσι βελτιώνουν τη θερμική αδράνεια του κτιρίου και σταθεροποιούν το κλίμα του εσωτερικού χώρου (έλεγχος θερμοκρασίας) και σε εκείνες, όπου τα PCM ενσωματώνονται στις συσκευές αποθήκευσης ενεργητικών συστημάτων, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα αυτών (αποθήκευση θερμότητας). [31, 32] Όσον αφορά το πρώτο είδος εφαρμογής, η ρύθμιση της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου μέσω PCM γίνεται κατανοητή με το ακόλουθο παράδειγμα. Θεωρούμε ένα κτίριο στο κέλυφος του οποίου είναι ενσωματωμένες ποσότητες PCM με θερμοκρασία αλλαγής φάσης έστω τους 25°C. Αν (και όταν) η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου υπερβεί τους 25°C, τα PCM θα αρχίσουν να τήκονται απορροφώντας παράλληλα θερμική ενέργεια από το περιβάλλον. Η απορροφούμενη στο στάδιο αυτό θερμότητα είναι λανθάνουσα, δηλαδή, δε συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Όμως, αφαιρούμενη από το περιβάλλον, εμποδίζει την αύξηση της θερμοκρασίας άλλων υλικών και του αέρα. Έχουμε, με άλλα λόγια, συγκράτηση της ανόδου της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Αν (και όταν) ολοκληρωθεί η διαδικασία αλλαγής φάσης (τήξη) του υλικού και η θερμοκρασία περιβάλλοντος εξακολουθεί να παραμένει μεγαλύτερη των 25°C, τότε το (τηγμένο πλέον) υλικό θα συνεχίσει να συμπεριφέρεται συμβατικά, δηλαδή, να απορροφά θερμότητα και να αυξάνει η θερμοκρασία του. Κατά την αντίστροφη διαδικασία, της ψύξης, όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 25°C, τα PCM αρχίζουν να στερεοποιούνται και παράλληλα να αποδίδουν την αποθηκευμένη

λανθάνουσα θερμότητα στο περιβάλλον. Η απελευθερούμενη ποσότητα θερμικής ενέργειας συγκρατεί την πτώση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η επίδραση των PCM στην εσωτερική θερμοκρασία. [7]



Εικόνα 3.1.1: Χρονική εξέλιξη εσωτερικής θερμοκρασίας δωματίου με και χωρίς χρήση PCM

Τα PCM παρουσιάζουν αρκετά υψηλότερες πυκνότητες αποθήκευσης ενέργειας σε σύγκριση με τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Συγκεκριμένα, τα πρώτα αποθηκεύουν 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου απ' ό,τι συμβατικά υλικά όπως το νερό, το τούβλο ή η πέτρα, με αποτέλεσμα να απαιτούνται μικρότερες ποσότητες PCM για το ίδιο αποτέλεσμα. Όπως υποστηρίζει και η χημική βιομηχανία BASF, η θερμότητα που απορροφά μία γυψοσανίδα πάχους 3εκ. με ενσωματωμένο PCM σε ποσοστό 30% είναι σχεδόν ίδια με τη θερμότητα που αποθηκεύει στα όρια των θερμοκρασιών άνεσης ένας τοίχος 18εκ. από σκυρόδεμα ή 23εκ. από τούβλα. [7] Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνονται τρεις τοίχοι διαφορετικού πάχους και δομικού υλικού με την ίδια θερμοχωρητικότητα. Ειδικότερα, πρόκειται για μία γυψοσανίδα πάχους 1,5cm με ενσωματωμένο PCM (Micronal PCM), για ένα τοίχο από σκυρόδεμα πάχους 9cm και για μία πλινθοδομή πάχους 12cm.



Εικόνα 3.1.2: Τρεις διαφορετικοί τοίχοι με πανομοιότυπη θερμοχωρητικότητα

Συμπερασματικά, τα βασικά πλεονεκτήματα των PCM έναντι των υλικών αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι: μεγάλη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας, σχετικά χαμηλό βάρος και αποθήκευση/απελευθέρωση θερμικής ενέργειας σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Από την άλλη πλευρά, το κύριο μειονέκτημά τους είναι η μικρή θερμική αγωγιμότητα που συνήθως είναι στην περιοχή από $0.2 \text{ W}/(\text{m K})$ έως $0.7 \text{ W}/(\text{m K})$. [33]

3.2 Ιδιότητες και κριτήρια επιλογής PCM [19, 34, 35]

Δεν είναι όλα τα υλικά αλλαγής φάσης κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν και να αποδώσουν σε όλες τις εφαρμογές και ειδικότερα στις κτιριακές και αυτό διότι κάθε εφαρμογή φέρει διαφορετικές ανάγκες-απαιτήσεις και αλλιώς ιεραρχημένες, τις οποίες θα πρέπει να ικανοποιεί το PCM. Για το λόγο αυτό, η διαδικασία επιλογής PCM γίνεται με βάση την εφαρμογή χρήσης του. Τα κριτήρια για την επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης, με σκοπό την επιτυχή λειτουργία του στο εκάστοτε σύστημα, είναι τόσο οι ιδιότητες του PCM που διακρίνονται σε θερμικές, φυσικές, κινητικές και χημικές, όσο και τεχνικοί και οικονομικοί παράγοντες.

Θερμοφυσικές ιδιότητες

Για την κατά το δυνατό ορθότερη επιλογή υλικού αλλαγής φάσης, όσον αφορά τις θερμοφυσικές ιδιότητες, εξετάζονται συνήθως η θερμοκρασία αλλαγής φάσης και το ποσό της απορροφούμενης/αποδιδόμενης λανθάνουσας θερμότητας. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PCM θα πρέπει να είναι εντός του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας της εφαρμογής, ειδάλλως δε θα πραγματοποιηθεί αλλαγή φάσης και συνεπώς δε θα αξιοποιηθεί το πλεονέκτημα των PCM να απορροφούν/απελευθερώνουν θερμότητα κατά τη διάρκεια αυτής. Προκειμένου για εφαρμογές στον κτιριακό τομέα, επιλέγονται συνήθως PCM με θερμοκρασία αλλαγής φάσης $1-3^\circ\text{C}$ πάνω από τη επιθυμητή θερμοκρασία άνεσης του χώρου. Σχετικά με τη λανθάνουσα θερμότητα, ενδιαφέρει ιδιαίτερα η λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα

όγκου, η οποία θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, ώστε να ελαχιστοποιείται η ποσότητα του υλικού αλλαγής φάσης που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών αποθήκευσης. Εκτός όμως, από τις δύο παραπάνω απαιτήσεις, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που συμβάλλουν στη θετική αξιολόγηση ενός PCM και επομένως στην επιλογή του και αυτοί είναι η μεγάλη ειδική θερμότητα, ώστε επιπρόσθετα να αποθηκεύεται σημαντικό ποσό αισθητής θερμότητας, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα τόσο στη στερεή όσο και στην υγρή φάση, ώστε να εξυπηρετείται σε δεδομένο όγκο υλικού η αποθήκευση και απελευθέρωση ενέργειας σε σύντομο χρονικό διάστημα, η μεγάλη πυκνότητά του που συνεπάγεται μικρό όγκο, αλλά και η χαμηλή πίεση ατμών και η μικρή μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης που οδηγεί σε λιγότερες απαιτήσεις μηχανικής αντοχής του δοχείου του PCM. Τέλος, σημασία έχει και η σταθερή συμπεριφορά ή κυκλική σταθερότητα στους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης με αποτέλεσμα τη σταθερή αποθηκευτική ικανότητα του μέσου και τη δυνατότητα επανειλημμένης χρήσης αυτού. Ο αριθμός των κύκλων κυμαίνεται από έναν και μοναδικό, όταν το υλικό αλλαγής φάσης χρησιμοποιείται για προστασία από τη θερμότητα σε περίπτωση φωτιάς, μέχρι πολλές χιλιάδες κύκλους όταν προορίζεται για θέρμανση ή ψύξη κτιρίων.

Κινητικές ιδιότητες

Οι κινητικές ιδιότητες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι η ταχύτητα ανάπτυξης κρυστάλλων που επιθυμούμε να είναι μεγάλη, καθώς και η ταχύτητα σχηματισμού πυρήνα. Η τελευταία θα πρέπει επίσης να είναι μεγάλη, ώστε να περιορίζεται ένα από τα βασικά προβλήματα που εμφανίζουν αρκετά PCM, αυτό της υπέρψυξης (supercooling). Το φαινόμενο αυτό θα αναλυθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Χημικές ιδιότητες

Στις χημικές ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης βασική είναι η συμβατότητα του PCM με άλλα δομικά υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή (δεν πρέπει να αλληλεπιδρά, ούτε να προκαλεί διαβρώσεις). Επιπλέον, για λόγους ασφαλείας των χρηστών του κτιρίου και περιβαλλοντικούς λόγους, το PCM δεν πρέπει να είναι τοξικό, εύφλεκτο και εκρηκτικό. Επίσης, έχει σημασία ο κύκλος πήξης/τήξης να είναι απόλυτα αναστρέψιμος, να μην υποβαθμίζεται η ποιότητα του υλικού αλλαγής φάσης μετά από πολλούς κύκλους αλλαγής φάσης, ώστε να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και τέλος να διαθέτει χημική σταθερότητα.

Τεχνικά κριτήρια

Πέρα από τις ιδιότητες του PCM, πρέπει να δίνεται βάση και σε μία σειρά άλλων παραγόντων, προκειμένου η επιλογή του να είναι επιτυχημένη. Πιο συγκεκριμένα, το υλικό αλλαγής φάσης θα πρέπει να είναι απλό στη χρήση, εφαρμόσιμο, αποτελεσματικό, συμπαγές, αξιόπιστο, καθώς επίσης και να δίνει τη δυνατότητα να εισαχθεί σε κάψουλες.

Οικονομικά κριτήρια

Δεδομένου ότι η χρήση των PCM μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας, τα οικονομικά κριτήρια για την επιλογή αυτών είναι εξίσου σημαντικά καθώς μπορεί να επηρεάσουν το βαθμό έκτασης της χρήσης τους. Έτσι, η επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης θα πρέπει να γίνεται με γνώμονα τη ευρεία διαθεσιμότητα και αφθονία του στην αγορά και το χαμηλό του κόστος, προκειμένου να είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλα κατασκευαστικά υλικά που αποθηκεύουν

θερμική ενέργεια. Θα πρέπει επιπλέον να είναι φιλικό προς το περιβάλλον και ανακυκλώσιμο και τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση του να καθίστανται ανταγωνιστικά σε σχέση με το κόστος αγοράς και τοποθέτησής του.

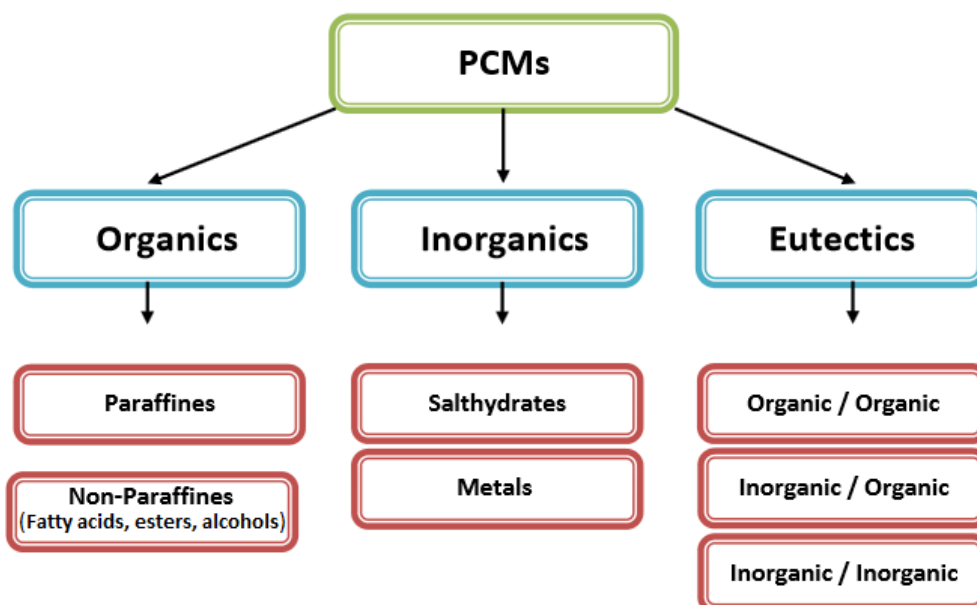
Όπως είναι λογικό, δεν υπάρχει ιδανικό PCM, δηλαδή PCM που να ικανοποιεί όλες τις παραπάνω απαιτήσεις και συνεπώς να είναι κατάλληλο για οποιαδήποτε εφαρμογή. Ανάλογα με την εφαρμογή και τις προϋποθέσεις που τίθενται σε αυτή, επιλέγεται το υλικό που πληροί τις περισσότερες από αυτές. Ωστόσο, τα σημαντικότερα στοιχεία που εξετάζονται σε υποψήφια προς χρήση υλικά αλλαγής φάσης είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης και η λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου.

3.3 Κατηγοριοποίηση PCM

Η πρώτη ουσία που χρησιμοποιήθηκε ως PCM ήταν το νερό, το οποίο δύναται να αποθηκεύσει μεγάλα ποσά θερμότητας κατά τη μετάβασή του σε πάγο. Παρόλαυτα, υπήρξε ανάγκη για εύρεση άλλων υλικών αλλαγής φάσης που αφενός να συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα του νερού (μεγάλη θερμική αγωγιμότητα και μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα) και αφετέρου να περιορίζουν τα εξίσου σημαντικά μειονεκτήματα αυτού, όπως χαμηλή θερμοκρασία τήξης (0°C), μεγάλη μεταβολή πυκνότητας με τη θερμοκρασία και χαμηλή θερμοκρασία προσαγωγής στο σύστημα. Έτσι, σήμερα υπάρχει μία πληθώρα υλικών αλλαγής φάσης με υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης και σε μεγάλο φάσμα θερμοκρασιών αλλαγής φάσης, ικανή να καλύψει μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

Τα PCM μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε με βάση τη χημική τους σύσταση, είτε με βάση το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο γίνεται η αλλαγή φάσης τους, είτε ακόμα με κριτήριο τις εφαρμογές στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η κατηγοριοποίηση όμως, που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι αυτή ως προς τη σύσταση και αυτή θα αναλυθεί παρακάτω.

Τα PCM ταξινομούνται ως προς της σύστασή τους, σε τρεις κατηγορίες: οργανικά, ανόργανα και εύτηκτα υλικά. Κάθε μία από αυτές τις ομάδες υλικών αλλαγής φάσης μπορεί να διαιρεθεί σε υποκατηγορίες. Έτσι, τα οργανικά PCM διακρίνονται σε παραφίνες και μη παραφίνες. Οι μη παραφίνες περιλαμβάνουν ένα μεγάλο πλήθος οργανικών υλικών όπως λιπαρά οξέα, εστέρες, αλκοόλες και γλυκόλες, με τα πρώτα να συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Τα ανόργανα PCM διακρίνονται σε ένυδρα άλατα και μέταλλα ενώ τα εύτηκτα PCM είναι μίγματα οργανικών ή/και ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης. Παρακάτω, απεικονίζονται οι διάφορες κατηγορίες και υποκατηγορίες των υλικών αλλαγής φάσης. [36]



Εικόνα 3.3.1: Κατηγορίες και υποκατηγορίες PCM

3.3.1 Οργανικά

Τα οργανικά PCM όπως προαναφέραμε, διακρίνονται σε παραφίνες και μη παραφίνες. Έχουν τη δυνατότητα να τήκονται και να πήζουν επανειλημμένα χωρίς να υφίστανται διαχωρισμό φάσης και μείωση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης τους. Επίσης, στα πλεονεκτήματά τους μπορεί να προστεθεί η χημική και θερμική σταθερότητά τους, ότι δεν είναι διαβρωτικά, δεν εμφανίζουν έντονα το φαινόμενο της υπέρψυξης (supercooling) και έχουν χαμηλότερο κόστος από τις άλλες δύο κατηγορίες PCM. Ωστόσο, συγκριτικά με τα ανόργανα υλικά μειονεκτούν στο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (~ 0,2 W/mk) και έχουν χαμηλότερη πυκνότητα. Επίσης, είναι αναφλέξιμα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. [19, 30]

3.3.1.1 Παραφίνες

Οι παραφίνες ανήκουν στην κατηγορία των αλκανίων, τα οποία είναι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες με γενικό μοριακό τύπο C_nH_{2n+2} . Για $5 \leq n \leq 15$, οι παραφίνες βρίσκονται σε υγρή μορφή, ενώ για $20 \leq n \leq 40$, σε εύπλαστη στερεή μορφή (κεριά παραφίνης), που είναι και η πιο συνηθισμένη για χρήση ως PCM. [22] Οι καθαρές παραφίνες είναι ιδιαίτερος ακριβές, για το λόγο αυτό στις εφαρμογές επιλέγονται τεχνητές παραφίνες, οι οποίες αποτελούνται από μίγματα κυρίως αλυσίδων n-αλκανίων $CH_3-(CH_2)-CH_3$, με αποτέλεσμα η τήξη/πήξη τους να πραγματοποιείται σε ένα εύρος θερμοκρασιών και όχι σε ένα συγκεκριμένο σημείο αλλαγής φάσης. [20] Διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες, ανάλογα με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα στην αλυσίδα τους. Έτσι, υπάρχουν οι n-Παραφίνες, οι οποίες έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα και οι ισο-Παραφίνες, των οποίων η ανθρακική αλυσίδα αποτελείται από περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα. Το κατά πόσον μία παραφίνη θα είναι ισο-παραφίνη ή όχι, εξαρτάται από τον αριθμό των αλκανίων που περιέχονται στην ουσία (75% έως 100%). Τόσο το σημείο τήξης, όσο και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης αυξάνονται με την αύξηση των ατόμων του άνθρακα και το μήκος

της αλυσίδας. Η κρυστάλλωση/τήξη της μοριακής αλυσίδας απελευθερώνει ένα μεγάλο ποσό λανθάνουσας θερμότητας. [19] Οι παραφίνες που είναι κατάλληλες να χρησιμοποιηθούν ως PCM σε αποθηκευτικά συστήματα είναι κυρίως αυτές που έχουν από 14 έως 40 μόρια άνθρακα. Η μέση λανθάνουσα θερμότητα τήξης των παραφινών που είναι κατάλληλη για κτιριακές εφαρμογές είναι $170\text{MJ}/\text{m}^3$, δηλαδή σχεδόν η μισή αυτής των ένυδρων αλάτων που αναλύονται στη συνέχεια. Παράδειγμα εμπορικής παραφίνης που έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη έκταση από ερευνητές είναι το P-116, με θερμοκρασία τήξης 47°C και λανθάνουσα θερμότητα τήξης $202\text{MJ}/\text{m}^3$. [22]

Οι παραφίνες διαθέτουν αρκετά ελκυστικά χαρακτηριστικά για τη χρήση τους ως PCM σε διάφορες εφαρμογές. Συγκεκριμένα, καλύπτουν μία ευρεία περιοχή θερμοκρασιών τήξης, έχουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης, αμελητέα εμφάνιση του φαινομένου υπέρψυξης, χαμηλή τάση ατμών, χημική αδράνεια και σταθερότητα, δεν παρουσιάζουν διαχωρισμό φάσης, είναι διαθέσιμα στο εμπόριο σε λογικές τιμές και εντελώς ακίνδυνα για το περιβάλλον. [20, 22] Ειδικότερα, είναι σημαντικό το γεγονός της ύπαρξης μεγάλου πλήθους παραφινών με σημεία τήξης από $20\text{-}26^\circ\text{C}$, δηλαδή στα πλαίσια των απαιτήσεων των κτιριακών εφαρμογών που μας ενδιαφέρουν εν προκειμένω. Όμως, εκτός από τις επιθυμητές αυτές ιδιότητες, φέρουν και κάποια αρνητικά στοιχεία, όπως η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και η μεγάλη μεταβολή όγκου που υφίστανται κατά την αλλαγή φάσης τους. [20] Τα προβλήματα αυτά ωστόσο, μπορούν να εξαλειφθούν με μεθόδους που θα αναπτύξουμε στη συνέχεια του κεφαλαίου. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από μέτρια αναφλεξιμότητα και μη συμβατότητα με πλαστικά δοχεία αποθήκευσης. [19] Παρακάτω φαίνονται πίνακες, που παρουσιάζουν τη θερμοκρασία τήξης και τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης διαφόρων παραφινών.

Πίνακας 3.3.1.1.1: Θερμοκρασία τήξης και θερμότητα τήξης διαφόρων παραφινών [19]

Paraffin ^a	Freezing point/ range ($^\circ\text{C}$)	Heat of fusion (kJ/kg)
6106	42–44	189
P116 ^c	45–48	210
5838	48–50	189
6035	58–60	189
6403	62–64	189
6499	66–68	189

Πίνακας 3.3.1.1.2: Θερμοκρασία τήξης και θερμότητα τήξης διαφόρων παραφινών ανάλογα με τον αριθμό των μορίων άνθρακα [19]

No. of carbon atoms	Melting point (°C)	Latent heat of fusion (kJ/kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28.0	244
19	32.0	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44.0	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251
31	68.0	242
32	69.5	170
33	73.9	268
34	75.9	269

3.3.1.2 Μη παραφίνες

Οι μη παραφίνες είναι η μεγαλύτερη κατηγορία υποψήφιων υλικών για αποθήκευση θερμότητας μέσω αλλαγής φάσης. Σε αντίθεση με τις παραφίνες, όπου όλες μεταξύ τους έχουν παρόμοιες ιδιότητες, κάθε ένα υλικό που ανήκει στην κατηγορία των μη παραφινών φέρει τις δικές του ξεχωριστές ιδιότητες. [19] Οι μη παραφίνες όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, διακρίνονται σε λιπαρά οξέα, εστέρες, αλκοόλες και γλυκόλες. [20] Η ομάδα των μη παραφινών χαρακτηρίζεται κυρίως από υψηλή θερμότητα τήξης, ευφλεκτότητα, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλό σημείο ανάφλεξης, πήξη χωρίς εμφάνιση του φαινομένου supercooling, ποικίλα επίπεδα τοξικότητας και αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω της ευφλεκτότητάς τους, τα οργανικά αυτά υλικά δεν πρέπει να εκτίθενται σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες, φλόγες και οξειδωτικά μέσα, γεγονός που περιορίζει σε κάποιο βαθμό τη χρήση τους ως υλικά αποθήκευσης θερμότητας σε κτίρια. [19, 22]

Λιπαρά οξέα

Η πιο ενδιαφέρουσα υποκατηγορία των μη παραφινών είναι τα λιπαρά οξέα που ανήκουν στα καρβοξυλικά οξέα, περιγράφονται από το γενικό μοριακό τύπο $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ και διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα κορεσμένα και τα ακόρεστα. [19, 22] Το σημείο τήξης τους κυμαίνεται από 10 έως 70° C, ενώ η θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου από 128 έως 183MJ/m³ και είναι συγκρίσιμη με αυτή των παραφινών. [22] Στα πλεονεκτήματα των λιπαρών οξέων συγκαταλέγεται η δυνατότητα συνεχούς παροχής τους, αφού προέρχονται από κοινά φυτικά και ζωικά έλαια, καθώς και η εμπορική τους διαθεσιμότητα, δεδομένου ότι πολλά από αυτά χρησιμοποιούνται ήδη σε μεγάλες ποσότητες για την παραγωγή πλαστικών, καλλυντικών και υφασμάτων. [37] Επίσης, παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση τήξης/πήξης. Το βασικότερο, ίσως, μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος τους(2-2,5 φορές υψηλότερο από αυτό των εμπορικών παραφινών), το

οποίο περιορίζει την έκταση της εφαρμογής τους στον τομέα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Επιπλέον, είναι ελαφρώς διαβρωτικά και χαρακτηρίζονται από κακοσμία. [19, 37] Τα κυριότερα λιπαρά οξέα είναι το καπριλικό οξύ, το καπρικό οξύ ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$), το λαυρικό οξύ ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$), το μυριστικό οξύ ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$), το παλμιτικό οξύ ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$) και το στεαρικό οξύ ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$), με τα δύο πρώτα να είναι επικρατέστερα υποψήφια για χρήση σε κτιριακές θερμικές εφαρμογές. [36] Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται βασικές ιδιότητες διαφόρων μη παραφινών.

Πίνακας 3.3.1.2.1: Θερμοκρασία τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης διαφόρων μη παραφινών.

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
Formic acid	7.8	247
Acetic acid	16.7	187
Glycerin	17.9	198.7
Butyl stearate	19	140
Polyethylene Glycol-600	20-25	146
D-Lactic Acid	26	184
Myristic acid + Capric acid	24	147.7
1-3 Methyl pentacosane	29	197

Πίνακας 3.3.1.2.2: Θερμότητα τήξης, λανθάνουσα θερμότητα τήξης, θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα διαφόρων λιπαρών οξέων.

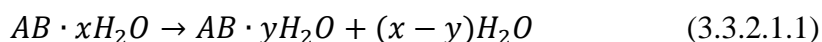
Material	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
Caprylic acid	16	149	0.149 (liquid, 38 °C)	901 (liquid, 30 °C) 981 (solid, 13 °C)
Butyl stearate	19	140 123–200	Not available	Not available
Capric acid	32	153	0.153 (liquid, 38 °C), 0.149 (liquid, 40 °C)	886 (liquid, 40 °C), 1,004 (solid, 24 °C)
Lauric acid	42–44	178	0.147 (liquid, 50 °C)	870 (liquid, 50 °C), 1,007 (solid, 24 °C)
Myristic acid	49–58	186, 204	Not available	861 (liquid, 55 °C), 990 (solid, 24 °C)
Palmitic acid	61, 64	185, 203	0.162 (liquid, 68 °C), 0.159 (liquid, 80 °C),	850 (liquid, 65 °C) 989 (solid, 24 °C)

3.3.2 Ανόργανα

Τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης περιλαμβάνουν τα ένυδρα άλατα και τα μέταλλα (τα μέταλλα έχουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες τήξης για παθητικές εφαρμογές κτιρίων). Γενικά, τα ανόργανα PCM καλύπτουν μία πλατιά θερμοκρασιακή κλίμακα, χαρακτηρίζονται από αρκετά μεγάλη θερμότητα τήξης και καλή θερμική αγωγιμότητα, είναι οικονομικά, μη εύφλεκτα και λόγω της μεγάλης πυκνότητάς τους έχουν σε γενικές γραμμές, σχεδόν διπλάσια ογκομετρική ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ($250-400\text{kg/dm}^3$) σε σχέση με τα οργανικά PCM ($128-200\text{kg/dm}^3$). Τα περισσότερα όμως από αυτά, προκαλούν διαβρώσεις σε αρκετά μέταλλα, υφίστανται έντονα υπέρψυξη και διαχωρισμό φάσης και η ικανότητά τους να αποθηκεύουν λανθάνουσα θερμότητα μειώνεται μετά από κυκλική καταπόνηση. Ακόμα, έχουν μεγάλο κόστος πάλησης, λόγω της επιβεβλημένης ενσωμάτωσής τους σε προστατευτικό κάλυμμα και της χρήσης πρόσθετων ουσιών σταθεροποίησης των ιδιοτήτων τους. Όλα τα παραπάνω μειονεκτήματα αποτέλεσαν έναυσμα για τους ερευνητές να στραφούν στη μελέτη των οργανικών PCM που αναπτύχθηκαν προηγουμένως. [17, 19, 30, 38]

3.3.2.1 Ένυδρα άλατα

Τα ένυδρα άλατα είναι τα πιο συνηθισμένα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης. Είναι τα πρώτα PCM που μελετήθηκαν και έχουν αποτελέσει αντικείμενο διεξοδικής έρευνας για εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας σε κατοικίες. Αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως κράματα ανόργανων αλάτων (AB) και νερού (H_2O) και αποτελούν ένα τυπικό κρυσταλλικό στερεό με γενικό μοριακό τύπο ($\text{AB} \cdot x\text{H}_2\text{O}$). Η αλλαγή φάσης τους από στερεό σε υγρό είναι ουσιαστικά μία αφυδάτωση της υγρασίας του άλατος, παρόλο που αυτή η διαδικασία μοιάζει θερμοδυναμικά με τήξη. Τα ένυδρα άλατα συνήθως τήκονται είτε σε ένα ένυδρο άλας με λιγότερα moles νερού: [19]



είτε στην άνυδρη μορφή του:



Στο σημείο τήξης οι κρύσταλλοι των ένυδρων αλάτων διασπώνται σε άνυδρα άλατα και νερό ή σε ένυδρα άλατα με χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας και νερό. Ένα πρόβλημα με τα περισσότερα ένυδρα άλατα είναι ότι κατά τη διάρκεια της τήξης, το νερό που απελευθερώνεται δεν αρκεί για να διαλύσει όλη τη στερεή φάση. Εξαιτίας της διαφοράς στην πυκνότητα το ένυδρο άλας με το χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας ή το άνυδρο άλας εγκαθίσταται στον πυθμένα του δοχείου σχηματίζοντας ίζημα. Επίσης, τα πιο πολλά ένυδρα άλατα παρουσιάζουν αδυναμία σχηματισμού πυρήνα, γεγονός που οδηγεί σε εμφάνιση του φαινομένου supercooling στο υγρό πριν την κρυσταλλοποίηση. Οι πιο ελκυστικές ιδιότητες των ένυδρων αλάτων είναι η υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου ($\sim 350\text{MJ/m}^3$), η σχετικά μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, περίπου $0,5\text{W/(m K)}$ (σχεδόν διπλάσια αυτής των παραφινών), η μικρή μεταβολή όγκου κατά την τήξη και το λογικό κόστος τους συγκριτικά με τα κεριά παραφίνης. Επιπρόσθετα, είναι συμβατά με τα πλαστικά, δεν είναι πολύ διαβρωτικά και μόνο ελαφρώς τοξικά. [19, 30, 35]

Πλήθος ένυδρων αλάτων, όπως το δεκαένυδρο θειικό νάτριο (άλας του Glauber), το εξαένυδρο χλωριούχο ασβέστιο, το τριυδρικό οξικό νάτριο και το οκταένυδρο υδροξείδιο του βαρίου έχουν διερευνηθεί σε μεγάλο βαθμό λόγω του χαμηλού κόστους τους. [20] Το πιο γνωστό ένυδρο άλας είναι το άλας του Glauber που αποτελείται από 44%Na₂SO₄ και 56%H₂O κατά μάζα, έχει θερμοκρασία τήξης μεταξύ 32 και 35°C και λανθάνουσα θερμότητα τήξης 254KJ/Kg και είναι ένα από τα φθηνότερα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Η χρήση του όμως, περιορίζεται εξαιτίας των φαινομένων υπέρψυξης και διαχωρισμού φάσης που εμφανίζει, προβλήματα που πλήττουν άλλωστε όλα τα ένυδρα άλατα. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τη θερμοκρασία τήξης και τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης διαφόρων ένυδρων αλάτων. [30]

Πίνακας 3.3.2.1.1: Θερμοκρασία τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης ένυδρων αλάτων.

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
K ₂ HO ₄ .6H ₂ O	14	108
KF.4H ₂ O	18	330
K ₂ HO ₄ .4H ₂ O	18.5	231
LiBO ₂ .8H ₂ O	25.7	289
FeBr ₃ .6H ₂ O	27	105
CaCl ₂ .6H ₂ O	29-30	170-192
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O (Glaubeur' s salt)	32	251-254

3.3.2.2 Μέταλλα

Η ομάδα των μετάλλων αποτελείται από μέταλλα χαμηλής τήξης και εύηκτα μέταλλα. Τα μέταλλα δεν έχουν μελετηθεί σοβαρά σε επίπεδο χρησιμοποίησής τους ως PCM, λόγω του βάρους τους. [19] Επιπλέον, η χαμηλή διαθεσιμότητά τους και το μεγάλο τους κόστος, αποτελούν μειονεκτήματα για την εφαρμογή τους ως μέσα αποθήκευσης θερμότητας. Όμως, σε περιπτώσεις όπου ο όγκος είναι σημαντικός παράγοντας, η κατηγορία αυτή μπορεί να είναι υποψήφια για χρήση, χάρη στην υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου που χαρακτηρίζει τα υλικά της. Ακόμα, σημαντικό πλεονέκτημα αυτών έναντι όλων των υπολοίπων κατηγοριών PCM, είναι η μεγάλη θερμική αγωγιμότητά τους. [22] Τέλος, μερικά άλλα χαρακτηριστικά τους είναι η χαμηλή ειδική θερμότητα και η χαμηλή τάση ατμών. Ακολουθεί πίνακας με ιδιότητες διαφόρων μετάλλων. [19]

Πίνακας 3.3.2.2.1: Θερμοκρασία τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης διαφόρων μετάλλων [19]

Melting point and latent heat of fusion: metallics		
Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
Gallium-gallium antimony eutectic	29.8	-
Gallium	30.0	80.3
Cerrolow eutectic	58	90.9
Bi-Cd-In eutectic	61	25
Cerrobend eutectic	70	32.6
Bi-Pb-In eutectic	70	29
Bi-In eutectic	72	25
Bi-Pb-tin eutectic	96	-
Bi-Pb eutectic	125	-

3.3.3 Εύτηκτα μίγματα

Τα εύτηκτα υλικά αλλαγής φάσης είναι μίγματα ανόργανων PCM(κυρίως ένυδρων αλάτων) και/ ή οργανικών PCM. [22] Έτσι, μπορούν να χωριστούν σε τρεις υποκατηγορίες ανάλογα με τα υλικά από τα οποία συντίθενται: οργανικά-οργανικά, ανόργανα-ανόργανα και οργανικά-ανόργανα εύτηκτα υλικά. [30] Κάθε ένα από τα συστατικά ενός εύτηκτου μίγματος, λιώνει και στερεοποιείται χωρίς προβλήματα, σχηματίζοντας έτσι όλα μαζί ένα μίγμα κρυστάλλων των συστατικών κατά τη διαδικασία της κρυστάλλωσης. [19] Η θερμοκρασία τήξης/πήξης τους είναι συνήθως χαμηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης/πήξης των συστατικών τους. [22]

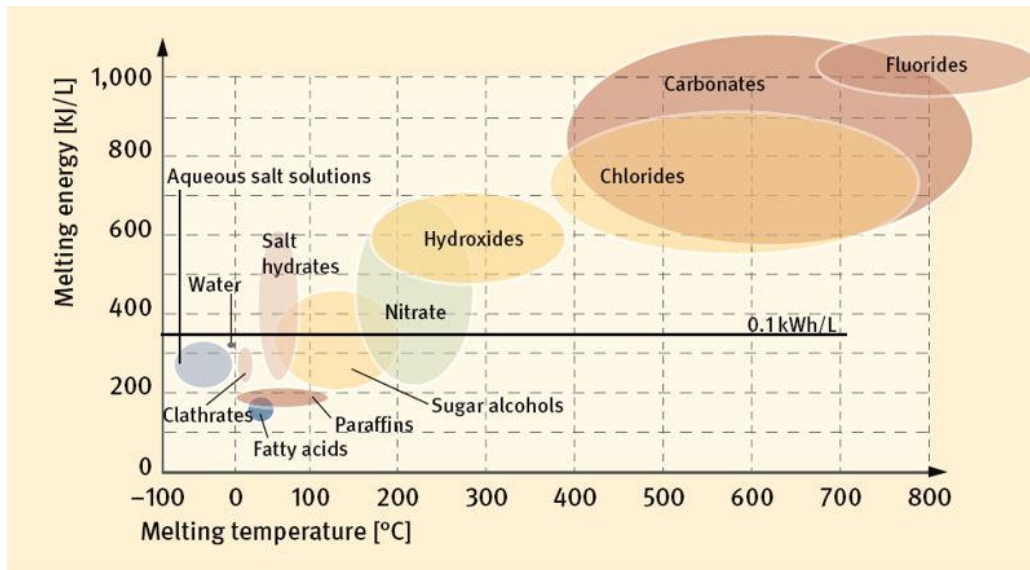
Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ομάδας των εύτηκτων μιγμάτων είναι η δυνατότητά τους να τήκονται/στερεοποιούνται χωρίς να παρουσιάζουν διαχωρισμό φάσεων. [22] Επίσης, καταφέρνουν να συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα και των οργανικών και των ανόργανων PCM, χωρίς παράλυτα να κάνουν το ίδιο με τα μειονεκτήματα αυτών. Από την άλλη πλευρά, το κόστος παραγωγής τους μπορεί να είναι διπλάσιο ή ακόμα και τριπλάσιο απ' αυτό των οργανικών και ανόργανων PCM, κάτι που αποτελεί βασικό μειονέκτημα. Γενικά, τα οργανικά εύτηκτα μίγματα έχουν μικρότερη θερμοκρασία τήξης και μεγαλύτερη θερμότητα τήξης απ' ότι τα ανόργανα εύτηκτα μίγματα, καθιστώντας τα πρώτα λίγο πιο κατάλληλα για αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε κτιριακές εφαρμογές. [22]

Οι πληροφορίες για τα εύτηκτα μίγματα σχετικά με τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες, είναι αρκετά περιορισμένες. [30] Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια μελετάται η δημιουργία εύτηκτων μιγμάτων με ανάμιξη οργανικών και ανόργανων υλικών για χρήση ως PCM με βελτιωμένες ιδιότητες. Παρακάτω, φαίνεται πίνακας με οργανικά και ανόργανα εύτηκτα μίγματα και βασικές ιδιότητές τους.

Πίνακας 3.3.3.1: Θερμοκρασία τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης διαφόρων οργανικών και ανόργανων εύτηκτων μιγμάτων. [28]

S. No.	Inorganic Eutectics	Melting point (°C)	Latent heat of fusion (kJ/kg)
1	49.3% MgCl ₂ ·6H ₂ O + 50.7% Mg (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	58	132.3
2	Na ₂ SO ₄ (32.5%) H ₂ O (41.4%), NaCl (6.66%), NH ₄ Cl (6.16%)	13	146
3	61.5% Mg (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + 38.5% NH ₄ NO ₃	51	131.3
4	58.3% Mg (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + 41.7% MgCl ₂ ·6H ₂ O	58	106
5	CaCl ₂ ·6H ₂ O + CaBr ₂ ·6H ₂ O	14	140
	Organic Eutectics		
6	Lauric-capric acid	18	120
7	Lauric-palmitic	33	145
8	Lauric-stearic	34	150
9	Palmitic-stearic	51	160

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται συνοπτικά διάφορες κατηγορίες PCM και το εύρος θερμοκρασίας τήξης και ενθαλπίας τήξης κάθε κατηγορίας.



Εικόνα 3.3.2: Ομάδες υλικών που χρησιμοποιούνται ως PCM και εύρος θερμοκρασίας τήξης και ενθαλπίας τήξης κάθε ομάδας

Όπως είναι φυσικό όλες οι κατηγορίες διαθέτουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία όμως αποκτούν διαφορετική βαρύτητα ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται ένα υποψήφιο PCM. Παρακάτω, συνοψίζονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τριών κατηγοριών PCM.

3.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κατηγοριών PCM

Οργανικά PCM

Πλεονεκτήματα

- Καθόλου ή αμελητέα εμφάνιση του φαινομένου υπέρψυξης
- Δεν υφίστανται διαχωρισμό φάσεων
- Χημική και θερμική σταθερότητα
- Μη διαβρωτικά
- Διαθέσιμα στο εμπόριο

Μειονεκτήματα

- Μικρότερη θερμική αγωγιμότητα από τα ανόργανα PCM
- Μικρότερη πυκνότητα από τα ανόργανα PCM
- Αναφλεξιμότητα

Ανόργανα PCM

Πλεονεκτήματα

- Μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα τήξης από τα οργανικά PCM

- Μεγάλη πυκνότητα
- Μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου
- Υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα οργανικά PCM
- Μη εύφλεκτα
- Διαθέσιμα στο εμπόριο
- Οικονομικά

Μειονεκτήματα

- Εμφάνιση υπέρψυξης
- Εμφάνιση διαχωρισμού φάσεων
- Διαβρωτικά
- Δημιουργία ιζήματος(ένυδρα άλατα)

Εύτηκτα μίγματα

Πλεονεκτήματα

- Δεν εμφανίζουν διαχωρισμό φάσης
- Συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα των οργανικών και ανόργανων PCM, χωρίς όμως να παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα αυτών

Μειονεκτήματα

- Πολύ μεγάλο κόστος παραγωγής σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες
- Χαμηλή διαθεσιμότητα

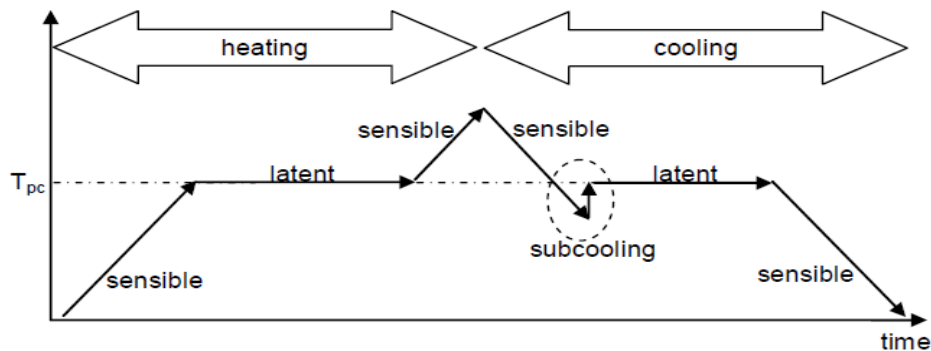
3.4 Βασικά προβλήματα των PCM και τρόποι επίλυσής τους

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, κανένα PCM δεν πληροί όλες τις προϋποθέσεις. Κάθε ένα φέρει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή αποκτούν διαφορετική ισχύ. Όσον αφορά τα μειονεκτήματα, τα βασικότερα είναι το φαινόμενο της υπέρψυξης (ή αλλιώς υπόψυξης) και αυτό του διαχωρισμού φάσης που συναντώνται κυρίως στα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης, η ανεπαρκής σταθερότητα, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα κυρίως στα οργανικά PCM και τέλος προβλήματα συμβατότητας των PCM με άλλα δομικά υλικά. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που μπορούν να ελαχιστοποιήσουν ή ακόμα και να εξαλείψουν τα μειονεκτήματα αυτά. Στην παρούσα ενότητα, περιγράφονται τόσο τα προβλήματα, όσο και οι τρόποι επίλυσης ή αποφυγής τους.

3.4.1 Φαινόμενο υπέρψυξης/υπόψυξης (supercooling/subcooling) [17, 35, 39]

Ένα ιδανικό υλικό αλλαγής φάσης θα έπρεπε να τήκεται και να στερεοποιείται στην ίδια θερμοκρασία. Παρ' όλα αυτά, σε πολλά PCM η διαδικασία στερεοποίησης πραγματοποιείται σε μια θερμοκρασία σημαντικά χαμηλότερη της θερμοκρασίας τήξης. Το φαινόμενο αυτό καλείται υπέρψυξη ή υπόψυξη και αφορά κυρίως τα ανόργανα PCM και ιδιαίτερα τα ένυδρα άλατα. Συγκεκριμένα, κατά την ψύξη ενός δείγματος PCM με υπέρψυξη, παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας του υγρού PCM κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησής του, πριν εκκινήσει η αλλαγή φάσης.

Κατά τη συνέχιση της ψύξης, η θερμοκρασία του δείγματος αυξάνεται και σταθεροποιείται, τις περισσότερες φορές για μικρό χρονικό διάστημα, στη θερμοκρασία στερεοποίησης. Το φαινόμενο γίνεται πιο κατανοητό, αν παρατηρηθεί η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου που ακολουθεί.



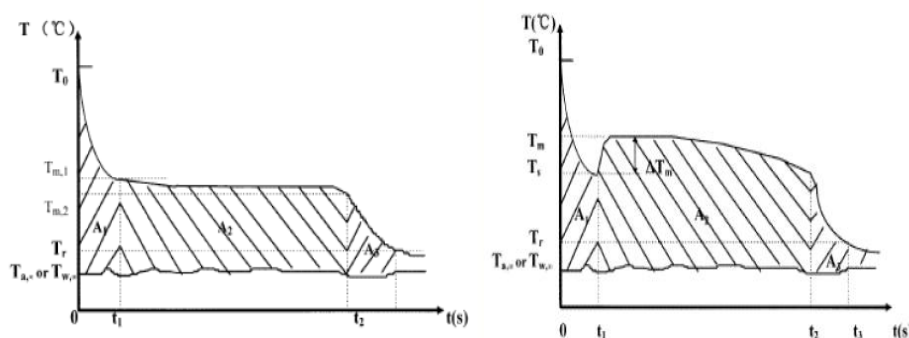
Εικόνα 3.4.1.1: Θερμοκρασιακή μεταβολή κατά τη διάρκεια θέρμανσης(τήξης) και ψύξης(πήξης) ενός PCM με υπέρψυξη.

Κατά τη διάρκεια της υπέρψυξης, το υλικό βρίσκεται σε μια μεταβατική κατάσταση, δηλαδή δε βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Τέλος, πρέπει να επισημάνουμε ότι ο βαθμός υπέρψυξης δεν είναι φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο όγκος του δείγματος, η καθαρότητα του υλικού, ο ρυθμός ψύξης, η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης.

Το πρόβλημα της υπέρψυξης μπορεί να περιοριστεί και ενίοτε να εξαλειφθεί, μέσω της χρήσης ενός μέσου πυρήνωσης (nucleator) στο PCM, το οποίο εξασφαλίζει το σχηματισμό της στερεής φάσης με ελάχιστη υπέρψυξη. Υπάρχουν δύο είδη πυρήνων που δύνανται να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό και είναι τα ακόλουθα:

- Εγγενείς πυρήνες: Σωματίδια στερεού PCM, που πρέπει να παραμένουν χωριστά από το PCM, ειδάλλως θα λιώσουν μαζί του κατά την τήξη και κατ' επέκταση θα καταστούν ανενεργά.
- Ξένοι πυρήνες: Χημικά που έχουν παρόμοια κρυσταλλική δομή με το στερεό PCM, κάτι που συνήθως συνεπάγεται παραπλήσια θερμοκρασία τήξης και αδρανοποίησή τους σε θερμοκρασίες κοντινές σε αυτή.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παριστάνεται η διαδικασία ψύξης χωρίς υπέρψυξη και με υπέρψυξη.



Εικόνα 3.4.1.1.2: Καμπύλη ψύξης PCM χωρίς υπέρψυξη (αριστερά) και με υπέρψυξη (δεξιά)

3.4.2 Φαινόμενο διαχωρισμού φάσεων [17, 22, 35]

Το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσεων είναι ένα ακόμη συνηθισμένο πρόβλημα των ένυδρων αλάτων, το οποίο ευθύνεται κατά ένα μεγάλο μέρος για την υποβάθμιση των θερμικών ιδιοτήτων τους και ειδικότερα της υψηλής πυκνότητας αποθήκευσης ενέργειας που τα χαρακτηρίζει. Τα ένυδρα άλατα ακολουθούν μια ιδιαίτερη διαδικασία κατά την αλλαγή φάσης τους, καθώς διέρχονται από τα περίπλοκα στάδια ενυδάτωσης και αφυδάτωσης και όχι απλά από την τήξη και πήξη όπως τα οργανικά PCM.

Η συμπεριφορά των ένυδρων αλάτων κατά τη μετάβασή τους από μία φάση σε μία άλλη διακρίνεται σε τρεις κύριους τύπους: ομοιόμορφο, ανομοιόμορφο και ημι-ομοιόμορφο τρόπο συμπεριφοράς. Ο επιθυμητός τρόπος συμπεριφοράς είναι ο ομοιόμορφος, ο οποίος λαμβάνει χώρα όταν η σύσταση της στερεάς φάσης είναι ίδια με τη σύσταση της υγρής. Ημι-ομοιόμορφη τήξη πραγματοποιείται όταν το PCM έχει δύο ή περισσότερες ένυδρες μορφές με διαφορετικές συστάσεις στερεού μέρους και διαφορετικά σημεία τήξης, ενώ ανομοιόμορφη τήξη συμβαίνει όταν κατά την τήξη του PCM εμφανίζονται δύο ξεχωριστές φάσεις, ένα κορεσμένο διάλυμα και ένα ίζημα αδιάλυτης άνυδρης ουσίας. Το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσεων εμφανίζεται λόγω του ότι τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος (ανομοιόμορφη τήξη), καθιστώντας κατ' αυτόν τον τρόπο μη αναστρέψιμη τη διαδικασία αλλαγής φάσης και οδηγώντας σε εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους.

Το πρόβλημα αυτό έχει μελετηθεί σε πολλές έρευνες και μπορεί να περιοριστεί, αλλάζοντας τις ιδιότητες του ένυδρου άλατος μέσω της προσθήκης άλλου υλικού, το οποίο εμποδίζει τη βύθιση της στερεάς φάσης στον πυθμένα. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με πηκτικά υλικά είτε με υλικά που προκαλούν πύκνωση. Ένας άλλος τρόπος αποφυγής εμφάνισης του φαινομένου διαχωρισμού φάσης είναι με προσθήκη επιπλέον ποσότητας νερού, ώστε όλο το άνυδρο άλας να μπορεί να διαλυθεί στο νερό στο σημείο τήξης και να μη δημιουργείται υπερκορεσμός. Επίσης, το πρόβλημα μπορεί να μειωθεί με αλλαγή της χημικής σύστασης του συστήματος ή με τοποθέτηση του PCM σε κάψουλες, κάτι που θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα. Τέλος, η ανάδευση αποτελεί έναν ακόμη τρόπο να περιορίσουμε το διαχωρισμό φάσεων.

3.4.3 Ανεπαρκής σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε μακρά κυκλική φόρτιση

Ο ωφέλιμος χρόνος ζωής ενός PCM είναι το πιο σημαντικό κριτήριο για την αξιοποίηση αυτού σε βιομηχανικές εφαρμογές και μετريέται καλύτερα σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού παρά σε πραγματικό χρόνο. Η διάρκεια αυτού του χρόνου συνδέεται με την έννοια της διατήρησης της ποιότητας του PCM και πιο συγκεκριμένα των ιδιοτήτων του σε ικανοποιητικά υψηλά επίπεδα. Η ανεπαρκής σταθερότητα ενός υλικού οφείλεται σε δύο παράγοντες:

- Στη χαμηλής σταθερότητας χημική σύσταση των υλικών που αποτελούν το PCM
- Στην πιθανή διάβρωση που μπορεί να προκληθεί μεταξύ του PCM και του δοχείου του.

Η ανάπτυξη των δοχείων των PCM πρέπει να κατευθύνεται προς την επίτευξη σταθερότητας των φυσικών και θερμικών ιδιοτήτων των υλικών, προκειμένου τα PCM να μπορούν να υφίστανται επαναλαμβανόμενους κύκλους θέρμανσης και

ψύξης. [35] Η αντοχή και σταθερότητα στην κυκλική φόρτιση ενός υλικού αλλαγής φάσης πρέπει να ελέγχεται και να εξασφαλίζεται από την εταιρεία παραγωγής του. Έτσι, οι κατασκευαστές των PCM ελέγχουν τη μακροπρόθεσμη απόδοσή τους, διεξάγοντας δοκιμές κυκλικής φόρτισης, όπως για παράδειγμα κάνει η εταιρεία BASF, όπου όπως ισχυρίζεται υποβάλλει τα υλικά της σε δοκιμές 10000 κύκλων. [40]

Το πρόβλημα της όχι και τόσο καλής σταθερότητας θερμικών ιδιοτήτων εντοπίζεται και πάλι κυρίως στα ένυδρα άλατα, λόγω των διαβρωτικών τάσεων που εμφανίζουν και συνεπώς το μεγαλύτερο πλήθος ερευνών με αυτό το αντικείμενο, αφορά αυτή την ομάδα ανόργανων PCM. Συγκεκριμένα, τα ένυδρα άλατα προκαλούν διαβρώσεις όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τα περισσότερα μέταλλα, όπως ο χαλκός, ο σίδηρος κ.α. Αντίθετα, οι παραφίνες και τα παράγωγά τους χαρακτηρίζονται από άριστη σταθερότητα των ιδιοτήτων τους και χημική αδράνεια κατά την επαφή τους με πολλά δομικά υλικά και μέταλλα.

3.4.4 Χαμηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Από χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας χαρακτηρίζονται όλα τα αμέταλλα υγρά συμπεριλαμβανομένων και των υλικών αλλαγής φάσης και ειδικότερα τα οργανικά PCM. Η χαμηλή τιμή αυτής της θερμικής ιδιότητας συνεπάγεται χαμηλούς ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης και αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την αποδοτική λειτουργία ενός υλικού αλλαγής φάσης, δεδομένου ότι το PCM αποθηκεύει μεγάλα ποσά θερμότητας σε μικρό όγκο και πρέπει η μεταφορά θερμότητας από και προς το εξωτερικό περιβάλλον να γίνεται εύκολα και γρήγορα. Στην υγρή φάση γενικά η μεταφορά θερμότητας ενισχύεται σημαντικά λόγω της συναγωγής που λαμβάνει χώρα, αν και πολλές φορές αυτό δεν αρκεί. Από την άλλη μεριά, στην στερεή φάση, δεν μεταφέρεται θερμότητα μέσω συναγωγής. [17]

Για τη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας των PCM έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές μεταξύ των οποίων είναι η ανάμειξη των PCM με υλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, όπως μέταλλα ή γραφίτης που χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα με τη μορφή σκόνης ή ίνας, αλλά ενισχύουν το φαινόμενο της οξειδωσης, η χρήση σωλήνων με πτερύγια διαφορετικών σχηματισμών, η εισαγωγή μεταλλικών καλουπιών στα PCM και ο εγκλεισμός των υλικών αλλαγής φάσης σε μικροκάψουλες. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνικές βασίζονται στην εφαρμογή πτερυγίων διαφόρων σχηματισμών, λόγω της απλότητας, της ευκολίας παρασκευής και του χαμηλού κόστους που τα διακρίνει.. [17, 41]

3.4.5 Μη συμβατότητα με άλλα υλικά [35, 42, 43]

Η συμβατότητα των PCM με άλλα υλικά είναι ένας παράγοντας που πρέπει επίσης να λαμβάνεται οπωσδήποτε υπόψη, καθώς η επιλογή ενός υλικού αλλαγής φάσης ασύμβατου με τα υλικά με τα οποία προορίζεται να έρθει σε επαφή, μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες στην εκάστοτε εφαρμογή. Ένα από τα συνηθέστερα προβλήματα συμβατότητας που εμφανίζονται είναι η διάβρωση των μετάλλων. Η διαβρωτικότητα είναι κυρίως χαρακτηριστικό των ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης και μπορεί σε βάθος χρόνου και σε συνδυασμό με τις επαναλαμβανόμενες μεταβολές θερμοκρασίας και φάσης να καταστρέψει το δοχείο που φέρει το PCM. Αποτέλεσμα αυτού μπορεί να είναι η διαρροή του τήγματος προς τον περιβάλλοντα χώρο και συνεπώς η καταστροφή του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. Άλλα προβλήματα σχετιζόμενα με τη συμβατότητα, είναι η απώλεια σταθερότητας δομής

των πλαστικών που έρχονται σε επαφή με οργανικά υλικά αλλαγής φάσης και η μετακίνηση υγρών ή αερίων μέσω των πλαστικών δοχείων, που επηρεάζει τη δομή του περιεχόμενου ανόργανου ή οργανικού PCM.

Για να αποφευχθούν τα διάφορα προβλήματα συμβατότητας, πραγματοποιούνται πειράματα σε τυπικές συνθήκες για την εκάστοτε εφαρμογή και τα αποτελέσματα που προκύπτουν αποτελούν «οδηγό» για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού υλικών. Στις τρεις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται τα στάδια ενός πειράματος συμβατότητας ανόργανων PCM σε επαφή με διάφορα υλικά, όπου η πρώτη δείχνει τους δοκιμαστικούς σωλήνες που περιέχουν δύο υλικά, στη δεύτερη φαίνεται η τοποθέτησή τους σε ελεγχόμενο περιβάλλον για συγκεκριμένο χρόνο και η τρίτη απεικονίζει την επίδραση στο μέταλλο.



Εικόνα 3.4.5.1: Στάδια πειράματος συμβατότητας ανόργανων PCM με διάφορα υλικά

3.5 Μορφές συσκευασίας και ενσωμάτωση των PCM

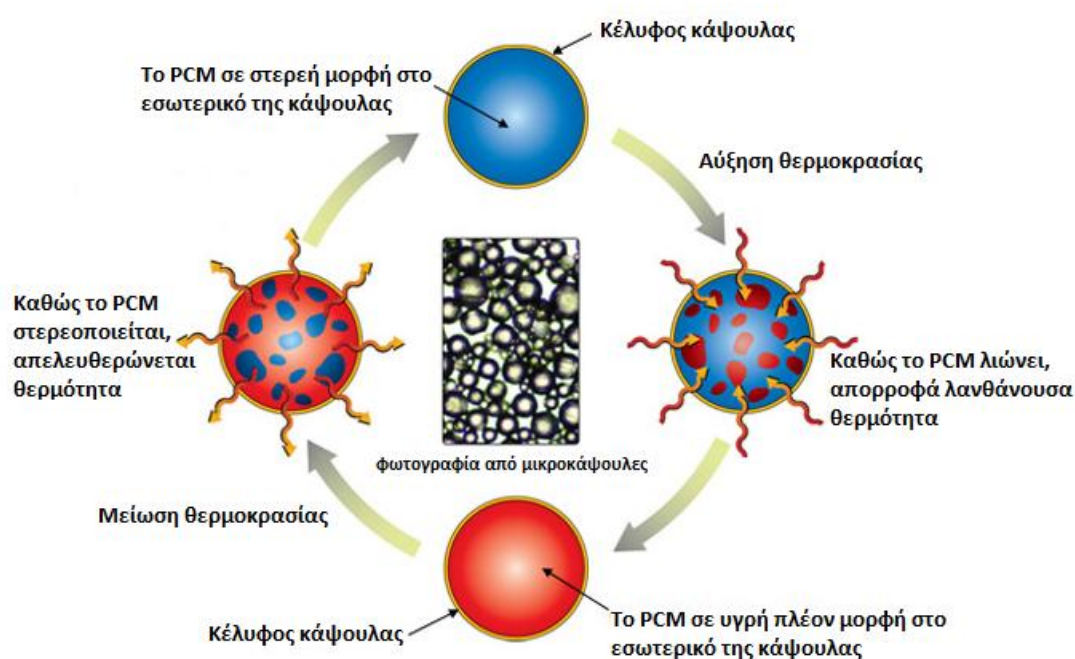
Η αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό και αντίστροφα, που υφίστανται τα PCM και κατ' επέκταση η ύπαρξη πιθανότητας διαρροής του τήγματος, καθιστά αναγκαία τη συσκευασία του υλικού αλλαγής φάσης. Επίσης, χάρη σ' αυτήν, συνήθως διευκολύνεται η μεταφορά θερμότητας και το PCM προστατεύεται από την επίδραση των συνθηκών του περιβάλλοντος. Έτσι, η συσκευασία ενός PCM θα πρέπει να ανταποκρίνεται και να πληροί μία σειρά προϋποθέσεων, οι πιο σημαντικές εκ των οποίων είναι οι ακόλουθες: [44]

- Κάλυψη απαιτήσεων μηχανικής αντοχής, αντίστασης στη διάβρωση, θερμικής σταθερότητας και ελαστικότητας
- Να λειτουργεί ως εμπόδιο μεταξύ υλικού και περιβάλλοντος, ώστε να αποφεύγονται διάφορες επιπτώσεις από τυχόν αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών
- Να φέρουν ικανοποιητική επιφάνεια για την καλή μεταφορά θερμότητας
- Να παρέχει δομική σταθερότητα και ευκολία στο χειρισμό
- Να παρέχει επαρκή επιφάνεια για ευκολότερη και ταχύτερη μεταφορά θερμότητας
- Να έχει κατάλληλο μέγεθος, προκειμένου να μην παρουσιάζεται πρόβλημα κατά την μεταβολή όγκου του PCM
- Να χαρακτηρίζεται από μεγάλη θερμική αγωγιμότητα

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι τοποθέτησης υλικών αλλαγής φάσης στις διάφορες εφαρμογές χρήσης τους. Οι πιο γνωστές είναι η ενσωμάτωση σε κάψουλες, η άμεση ενσωμάτωση, η ενσωμάτωση με απορρόφηση, τα σύνθετα υλικά και η μαζική ή ογκώδης αποθήκευση. Από τις παραπάνω μορφές ενσωμάτωσης, οι πιο υποσχόμενες για το μέλλον είναι η ενσωμάτωση σε κάψουλες και τα σύνθετα υλικά. [45]

3.5.1 Ενσωμάτωση σε κάψουλες

Η ενσωμάτωση των PCM σε κάψουλες και συγκεκριμένα τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των πιθανών μορφών αυτών και η συμβατότητα των υλικών κατασκευής τους με τα περιεχόμενα υλικά αλλαγής φάσης, έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών μελετητών. [46] Η ενσωμάτωση των PCM σε κάψουλες διακρίνεται σε μακροενσωμάτωση και μικροενσωμάτωση. [45]



Εικόνα 3.5.1.1: Σχηματική απεικόνιση κύκλου λειτουργίας PCM ενσωματωμένου σε σφαιρική κάψουλα

3.5.1.1 Μακροενσωμάτωση (macro-encapsulation)

Η μακροενσωμάτωση είναι η πιο συνηθισμένη μορφή συσκευασίας υλικών αλλαγής φάσης. Μία σημαντική ποσότητα PCM τοποθετείται εντός μιας διακριτής με γυμνό μάτι κάψουλας, με την ποσότητα του PCM ανά κάψουλα να κυμαίνεται από μερικά γραμμάρια έως και ένα κιλό και το σχήμα του δοχείου-κάψουλας να ποικίλλει. Έτσι, το δοχείο-κάψουλα μπορεί να είναι σε μορφή σωλήνα, σακούλας, ορθογώνιου πάνελ, πλάκας, σφαιρικό, ή κυλινδρικό. Τα πιο οικονομικά και συνηθισμένα υλικά κατασκευής της κάψουλας είναι μέταλλα, όπως κασσίτερος και χάλυβας και πλαστικά, όπως το πολυπροπυλένιο και η πολυολεφίνη. Σε κάθε περίπτωση όμως, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή συνδυασμού κάψουλας-PCM, ώστε να αποφευχθούν τυχόν διαβρώσεις σε μεταλλικές

κάψουλες ή αλλοιώσεις σε πλαστικές κάψουλες από την επαφή PCM και δοχείου. [35, 44]



Εικόνα 3.5.1.1.1: Παραδείγματα μακροενσωμάτωσης

Τρία από τα πλέον χρησιμοποιούμενα μέταλλα για την κατασκευή της κάψουλας είναι το αλουμίνιο, το τιτάνιο και ο ανοξείδωτος χάλυβας. Αυτά τα υλικά χαρακτηρίζονται από υψηλές αναλογίες αντοχής προς βάρος και ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Ωστόσο, κάθε ένα από αυτά παρουσιάζει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και συνεπώς ο σχεδιαστής του εκάστοτε συστήματος οφείλει να επιλέγει εκείνο το μέταλλο ή συνδυασμό μετάλλων που είναι καταλληλότερο και ασφαλέστερο για την εφαρμογή. Ακολουθούν πίνακες που παρουσιάζουν τα PCM με τα οποία είναι συμβατά το αλουμίνιο και το τιτάνιο. [47]

Πίνακας 3.5.1.1.1: PCM συμβατά με αλουμίνιο [47]

Category	PCMs
Acids	Acetic, elaidic, myristic, stearic, benzoic
Alcohols	Ethylene glycol
Dry inorganic salts (except salt hydrates)	Most fused salt eutectics
Miscellaneous organics	Acetamide, methyl fumarate, paraffins, polyethylene glycol, tristearin, oxazoline waxes, silicates
Oxidizing PCMs	(Only if protective aluminum oxide film is present)
Sulfur compounds	Most PCMs that are inorganic sulfides or organic sulfides
Water	High-purity: distilled or deionized water

Πίνακας 3.5.1.1.2: PCM συμβατά με τιτάνιο [47]

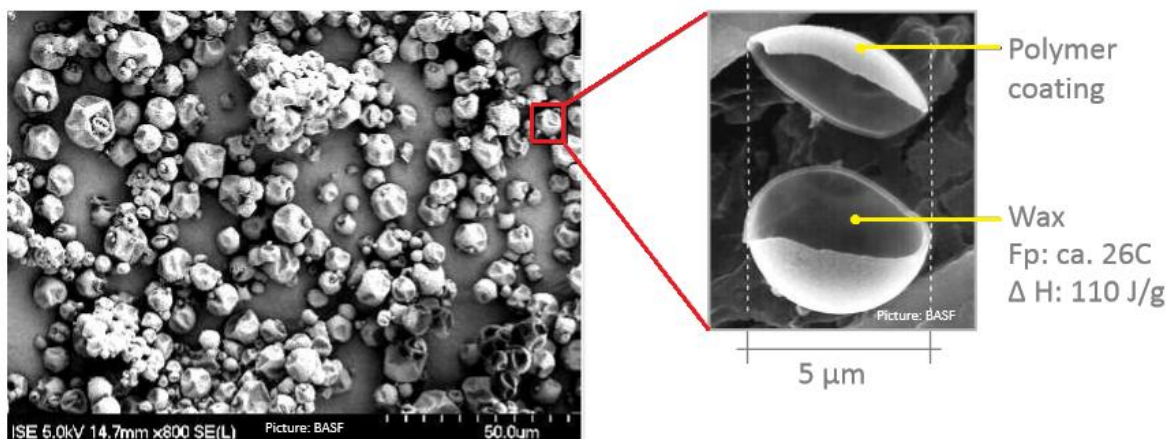
Category	PCMs
Acids	Acetic, chloroacetic, stearic, lactic, salicylic, succinic
Salts	Most inorganic and organic salts, magnesium sulfate, sodium chloride, sodium sulfate, potassium chloride
Miscellaneous	Water, gallium, hydrogen sulfide

Ένα από τα πλεονεκτήματα της μακροενσωμάτωσης είναι η δυνατότητα ενθυλάκωσης υλικού αλλαγής φάσης τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια φάση. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή μπορεί να συμβάλει στην αποφυγή του φαινομένου διαχωρισμού φάσεων, στην αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας και στην ενίσχυση της δομής του PCM. [44] Ωστόσο, παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα, μεταξύ των οποίων είναι η δυσκολία προστασίας τους από τυχόν καταστροφές, όπως τρύπες με τρυπάνια στους τοίχους, καρφιά κλπ (στην περίπτωση κτιριακών εφαρμογών), το υψηλό κόστος τους, που οφείλεται στη δυσκολία ενσωμάτωσής τους στην κτιριακή δομή και στην περισσότερη εργασία επί του κτιρίου και σε ορισμένες περιπτώσεις η μειωμένη θερμική αγωγιμότητα που προκαλούν. [45, 48]

3.5.1.2 Μικροενσωμάτωση (micro-encapsulation)

Κατά τη μικροενσωμάτωση, σωματίδια του PCM εσωκλείονται σε μία λεπτή και υψηλού μοριακού βάρους μεμβράνη από πολυμερές υλικό, σχηματίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο μία μικροκάψουλα διαμέτρου από μερικά μm έως κάποια mm. [17, 48] Η παραγωγή των PCM σε μικροκάψουλες μπορεί να γίνει είτε με φυσικές διεργασίες, όπως είναι η ξήρανση με ψεκασμό, είτε με χημικές διεργασίες. Οι μικροκάψουλες αυτές στη συνέχεια μπορούν να ενσωματωθούν σε οποιαδήποτε μήτρα, υπό την

προϋπόθεση ότι τα υλικά τους είναι συμβατά μεταξύ τους. [17, 35] Οι παραφίνες είναι μια κατηγορία υλικών αλλαγής φάσης που μπορούν να εσωκλειστούν σε μικροκάψουλες των οποίων το κέλυφος μπορεί να αποτελείται από φορμαλδεύδες ή πολυακρυλεστέρες. [49]



Εικόνα 3.5.1.2.1: Μικροκάψουλες μέσα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο(αριστερά), ανοιγμένη μικροκάψουλα(δεξιά)

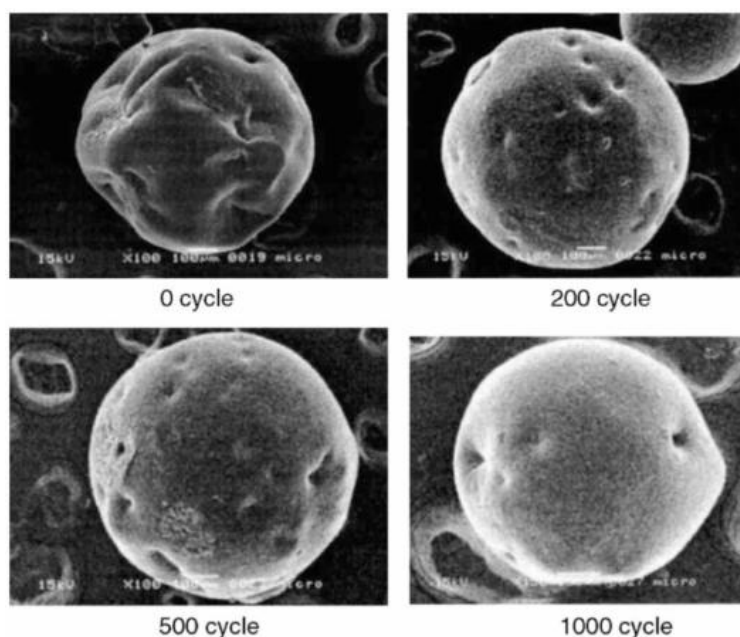
Ανάλογα με την εφαρμογή οι μικροκάψουλες PCM μπορεί να είναι σε υγρή μορφή, αλλά και σε μορφή σκόνης. Για παράδειγμα, η ενίσχυση του γύψου με υλικό αλλαγής φάσης απαιτεί νερό και επομένως οι μικροκάψουλες πρέπει να διασκορπιστούν σε νερό προτού ενοποιηθούν στο γύψο. Από το διασκορπισμό αυτόν προκύπτει ένα είδος πολτού γνωστό ως PCM slurry. Αν όμως, η εφαρμογή υπαγορεύει το υλικό αλλαγής φάσης να είναι σε μορφή σκόνης, τότε ο παραπάνω πολτός εισέρχεται σε κατάλληλο ξηραντήρα (μέθοδος της ξήρανσης με ψεκασμό) από όπου το PCM εξέρχεται ως σκόνη. [40]



Εικόνα 3.5.1.2.2: PCM slurry (αριστερά) και περίπτωση μικροενσωμάτωσης PCM σε μορφή σκόνης (Micronal powder της εταιρείας BASF)(δεξιά)

Τα πλεονεκτήματα της μικροενσωμάτωσης είναι ότι αφενός λόγω της μεγάλης αναλογίας επιφάνειας προς όγκο κάψουλας, ενισχύεται η μεταφορά θερμότητας προς το περιβάλλον και αφετέρου λόγω του περιορισμού του διαχωρισμού φάσεων, εξασφαλίζεται σταθερή καταπόνηση κατά την κυκλική φόρτιση. [17] Επιπλέον, λόγω του μικρού μεγέθους της κάψουλας, αποφεύγεται πρακτικά η φθορά της κατά τη

διάρκεια εργασιών που απαιτούν σφυρηλάτηση ή χρήση τρυπανιού σε διάφορα δομικά στοιχεία. [45] Από την άλλη πλευρά, εκτός της περίπτωσης κατά την οποία η μήτρα που ενσωματώνει το PCM έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, το σύστημα ενσωμάτωσης σε μικροκάψουλες πάσχει από χαμηλό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Η ακαμψία της μήτρας εμποδίζει τη μεταφορά μέσω συναγωγής και εξαναγκάζει τη μεταφορά αποκλειστικά με αγωγή. Τέλος, η μικροενσωμάτωση χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος σε σχέση με άλλες μορφές συσκευασίας και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται μόνο σε εφαρμογές θερμικού ελέγχου. [44]



Εικόνα 3.5.1.2.3: Προφίλ παραφίνης σε μικροκάψουλα μέσα από μικροσκόπιο σε διάφορους θερμικούς κύκλους

3.5.2 Σύνθετα υλικά [38, 48]

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ένα υλικό αλλαγής φάσης (όπως παραφίνη) και τουλάχιστον ένα ακόμα υλικό (υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο-HDPE), το οποίο συμβάλλει στη βελτίωση κάποιων ιδιοτήτων του PCM. Η δημιουργία των σύνθετων υλικών προκύπτει είτε με τη μέθοδο της άμεσης ενσωμάτωσης, είτε με τη μέθοδο απορρόφησης. Τα σύνθετα υλικά προσελκύουν ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον των ερευνητών, λόγω της μεγάλης ειδικής θερμότητας, της κατάλληλης θερμικής αγωγιμότητας, της ικανότητάς τους να διατηρούν το σχήμα του PCM σταθερό κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης του, καθώς και της καλής τους επίδοσης σε πολλαπλούς θερμικούς κύκλους.

3.5.3 Μέθοδοι ενσωμάτωσης PCM χωρίς τη χρήση δοχείων

Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να ενσωματωθούν σε δομικά υλικά και χωρίς να έχει προηγηθεί η συσκευασία-τοποθέτησή τους σε κάψουλες. Έτσι, εκτός από τη μακροενσωμάτωση και μικροενσωμάτωση, υπάρχει η άμεση ενσωμάτωση και η ενσωμάτωση με απορρόφηση. [49]

3.5.3.1 Άμεση ενσωμάτωση

Κατά την άμεση ενσωμάτωση, που είναι η απλούστερη μέθοδος, το PCM προστίθεται σε υγρή μορφή ή με τη μορφή σκόνης σε δομικά υλικά, όπως ο γύψος και το σκυρόδεμα και αναμιγνύεται με αυτά κατά τη διάρκεια της παραγωγής τους. [48] Ένα παράδειγμα είναι η ενσωμάτωση 21-22% βουτυλικού εστέρα σε γυψοσανίδα, που πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακό επίπεδο. Η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόστηκε και για την ανάμιξη σκυροδέματος και 5% PCM σε μικροκάψουλες. Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί ως προς το κόστος, δεδομένου ότι δεν απαιτεί τη χρήση κάποιου επιπρόσθετου εξοπλισμού. [45] Ταυτόχρονα όμως, συγκεντρώνει δύο σοβαρά μειονεκτήματα, την αυξημένη πιθανότητα διαρροής της υγρής φάσης του PCM και τη μη συμβατότητα με κάποια υλικά κατασκευής, με τα οποία έρχεται σε επαφή. [48]

3.5.3.2 Ενσωμάτωση με απορρόφηση

Στην τεχνολογία ενσωμάτωσης PCM με απορρόφηση, τα δομικά υλικά όπως ο γύψος, το τούβλο ή το σκυρόδεμα βυθίζονται σε τηγμένο υλικό αλλαγής φάσης και μέσω των πόρων που φέρουν, απορροφούν το PCM. [45] Ένα παράδειγμα αποτελούν τα εμποτισμένα με υλικό αλλαγής φάσης τούβλα που βρήκαν εφαρμογή στο κτίριο της πρεσβείας του Καναδά στο Βερολίνο το 2005. [49] Το μειονέκτημα της ενσωμάτωσης με απορρόφηση είναι και πάλι η πιθανότητα διαρροής του PCM από τους πόρους του δομικού υλικού. [45]

3.6 Διαθέσιμα PCM στην αγορά

Η διαθεσιμότητα των εμπορικών PCM, των σύνθετων υλικών και των PCM με τη μέθοδο της ενσωμάτωσης είναι καθοριστικός παράγοντας για την άνθιση των εφαρμογών των υλικών αλλαγής φάσης. Ο λόγος είναι ότι από την πλευρά των πελατών, μόνο τα εμπορικά PCM διαθέτουν καθορισμένες ιδιότητες, καθορισμένη τιμή, εγγύηση και μπορούν να παραδοθούν σε δεδομένη χρονική στιγμή. Επίσης, η διαθεσιμότητα των εμπορικών υλικών αλλαγής φάσης δίνει τη δυνατότητα ακόμα και σε εταιρείες με ανύπαρκτη ή περιορισμένη γνώση πάνω στα PCM, να τα χρησιμοποιήσουν σε δικά τους προϊόντα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι παγοκύστες, που χρησιμοποιούνται από πολλούς καταναλωτές για τη διατήρηση τροφίμων σε χαμηλές θερμοκρασίες. [17]

Σύμφωνα με μελέτες, πολλές ουσίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά αλλαγής φάσης. Ωστόσο, μόνο μερικές από αυτές είναι εμπορικά διαθέσιμες ως PCM. Σ' αυτό το σημείο αξίζει να αναφέρουμε, πως οι καθορισμένες από τους κατασκευαστές τους ιδιότητες, που όπως προαναφέρθηκε αποτελούν σημαντικό κριτήριο για την επιλογή κατάλληλου υλικού αλλαγής φάσης, θα πρέπει να εξετάζονται και να επαληθεύονται, καθώς μερικές φορές τα εργαστηριακά αποτελέσματα διαφέρουν από αυτά που παρέχουν οι κατασκευαστές. [38] Για το

σκοπό αυτό, η Fraunhofer ISE (FhG-ISE) σε συνεργασία με τη ZAE Bayern, με άλλα ινστιτούτα έρευνας, κατασκευαστές αλλά και καταναλωτές υλικών αλλαγής φάσης, θέσπισε ένα πρότυπο για τον έλεγχο της ποιότητας των υλικών αλλαγής φάσης και έτσι, από την άνοιξη του 2007, το σήμα ποιότητας που απεικονίζεται παρακάτω, υποδηλώνει ότι τα PCM που το φέρουν, έχουν ελεγχθεί σύμφωνα με αυτό το πρότυπο. [17, 50]



Εικόνα 3.6.1: Σήμα ποιότητας για τα PCM

Σήμερα, είναι εμπορικά διαθέσιμα περισσότερα από 100 PCM από εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον τομέα αυτό, όπως οι γερμανικές εταιρείες Rubitherm GmbH και Dörken GmbH & Co. KG, η γαλλική CRISTOPIA Energy Systems, η TEAP και PCP στην Αυστραλία, η Mitsubishi Chemical Co στην Ιαπωνία, η Climator AB στη Σουηδία, η EPS Ltd στη Μεγάλη Βρετανία, αλλά και η αμερικανική Microtek Laboratories με ειδικευση μεταξύ άλλων, στην μικροενσωμάτωση και μακροενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης. Οι τιμές των PCM κυμαίνονται τυπικά από 0,5€/kg έως 10€/kg. [17] Παρακάτω, παρουσιάζεται ένας πίνακας με τους κυριότερους κατασκευαστές υλικών αλλαγής φάσης παγκοσμίως, το πλήθος διαφορετικών παραγόμενων PCM από αυτούς καθώς και το θερμοκρασιακό εύρος που καλύπτουν τα PCM αυτών. Ακολουθεί μία λίστα με υλικά αλλαγής φάσης διαθέσιμα στην αγορά, οι εταιρείες παραγωγής τους και οι θερμοφυσικές ιδιότητες τους, όπως παρέχονται από τους κατασκευαστές (σημείο τήξης, θερμοότητα τήξης και πυκνότητα).

Πίνακας 3.6.1: Εταιρείες παραγωγής PCM παγκοσμίως [51]

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

Πίνακας 3.6.2: Διαθέσιμα υλικά αλλαγής φάσης στην αγορά, οι εταιρείες παραγωγής τους και οι θερμοφυσικές ιδιότητές τους [46]

PCM name	Type of product	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Density (kg/m ³)	Source
SN33	Salt solution	-33	245	1.24	Cristopia [41]
TH-31	n.a.	-31	131	n.a.	TEAP [42]
SN29	Salt solution	-29	233	1.15	Cristopia [41]
SN26	Salt solution	-26	268	1.21	Cristopia [41]
TH-21	n.a.	-21	222	n.a.	TEAP [42]
SN21	Salt solution	-21	240	1.12	Cristopia [41]
STL-21	Salt solution	-21	240	1.12	Mitsubishi Chemical [43]
SN18	Salt solution	-18	268	1.21	Cristopia [41]
TH-16	n.a.	-16	289	n.a.	TEAP [42]
STL-16	n.a.	-16	n.a.	n.a.	Mitsubishi Chemical [43]
SN15	Salt solution	-15	311	1.02	Cristopia [41]
SN12	Salt solution	-12	306	1.06	Cristopia [41]
STLN10	Salt solution	-11	271	1.05	Mitsubishi Chemical [43]
SN10	Salt solution	-11	310	1.11	Cristopia [41]
TH-10	n.a.	-10	283	n.a.	TEAP [42]
STL-6	Salt solution	-6	284	1.07	Mitsubishi Chemical [43]
SN06	Salt solution	-6	284	1.07	Cristopia [41]
TH-4	n.a.	-4	286	n.a.	TEAP [42]
STL-3	Saltsolution	-3	328	1.01	Mitsubishi Chemical [43]
SN03	Saltsolution	-3	328	1.01	Cristopia [41]
ClimSel C 7	n.a.	7	130	n.a.	Climator [44]
RT5	Paraffin	9	205	n.a.	Rubitherm GmbH [45]
ClimSel C 15	n.a.	15	130	n.a.	Climator [44]
ClimSel C 23	Salt hydrate	23	148	1.48	Climator [44]
RT25	Paraffin	26	232		Rubitherm GmbH [45]
STL27	Salt hydrate	27	213	1.09	Mitsubishi Chemical [43]
S27	Salt hydrate	27	207	1.47	Cristopia [41]
RT30	Paraffin	28	206	n.a.	Rubitherm GmbH [45]
TH29	Salt hydrate	29	188	n.a.	TEAP [42]
ClimSel C 32	Salt hydrate	32	212	1.45	Climator [44]
RT40	Paraffin	43	181	n.a.	Rubitherm GmbH [45]
STL47	Salt hydrate	47	221	1.34	Mitsubishi Chemical [43]
ClimSel C 48	n.a.	48	227	1.36	Climator [44]
STL52	Salt hydrate	52	201	1.3	Mitsubishi Chemical [43]
RT50	Paraffin	54	195	n.a.	Rubitherm GmbH [45]
STL55	Salt hydrate	55	242	1.29	Mitsubishi Chemical [43]
TH58	n.a.	58	226	n.a.	TEAP [42]
ClimSel C 58	n.a.	58	259	1.46	Climator [44]
RT65	Paraffin	64	207		Rubitherm GmbH [45]
ClimSel C 70	n.a.	70	194	1.7	Climator [44]
PCM72	Salt hydrate	72	n.a.	n.a.	Merck KgaA [6]
RT80	Paraffin	79	209	n.a.	Rubitherm GmbH [45]
TH89	n.a.	89	149	n.a.	TEAP [42]
RT90	Paraffin	90	197	n.a.	Rubitherm GmbH [45]
RT110	Paraffin	112	213	n.a.	Rubitherm GmbH [45]

n.a.: not available.

Σύμφωνα με μία έρευνα της εταιρείας έρευνας αγοράς «Markets and Markets» που εκδόθηκε τον Απρίλιο του 2013 και μελετά και προβλέπει την αγορά PCM μέχρι το 2018, η πρώτη θέση στην αγορά υλικών αλλαγής φάσης από άποψη αξίας, καταλαμβάνεται από τα οργανικά PCM, λόγω του υψηλού κόστους τους, ενώ από άποψη μεγάλης κατανάλωσης υπερτερούν τα ανόργανα, τα οποία και χρησιμοποιούνταν παραδοσιακά κατά το παρελθόν. Αργότερα, η χρήση οργανικών PCM με υψηλότερα σημεία τήξης, καλύτερη απόδοση και δυνατότητα ενσωμάτωσης σε μικροκάψουλες οδήγησε στην ευρεία καθιέρωση τους σε ποικίλες εφαρμογές, ενώ η ανάπτυξη υλικών αλλαγής φάσης βασιζόμενων σε φυτικές ή ζωικές ίνες προσφέρει τα σημαντικά πλεονεκτήματα της χαμηλότερης αναφλεξιμότητας και υψηλότερης βιοδιασπασιμότητας. [52]

Η ίδια έρευνα εκτιμά ότι η παγκόσμια αγορά PCM θα αυξηθεί από 460 εκατομμύρια δολάρια το 2013, σε 1,15 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2018, με

σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 20,1% για την ίδια περίοδο, ενώ η μείωση των τιμών των υλικών αλλαγής φάσης θα δημιουργήσει νέες ευκαιρίες και θα δώσει μεγάλη ώθηση στην αγορά αυτών των προϊόντων. Επιπλέον, αναφέρεται ότι η μεγαλύτερη ανάπτυξη παρατηρείται στην Ευρώπη, όπου και έχουν ιδρυθεί οι περισσότερες εταιρείες παραγωγής PCM, ενώ σημαντική είναι η εξέλιξη του κλάδου αυτού και στη Βόρεια Αμερική. Οι ολοένα περισσότερες εφαρμογές υλικών αλλαγής φάσης, το υψηλό κόστος ενέργειας και οι κανονισμοί που επιβάλλουν οι κυβερνήσεις ανά τον κόσμο, αποτελούν προκλήσεις για τους κατασκευαστές αυτών των υλικών. Αυτή τη στιγμή, η Ευρώπη είναι η μεγαλύτερη αγορά υλικών αλλαγής φάσης, ακολουθούμενη από τη Βόρεια Αμερική, και θα παραμείνει στην πρώτη θέση έως το 2018. [52]

3.7 Μέτρηση ιδιοτήτων PCM

Κατά τα τελευταία χρόνια, έχει παρατηρηθεί ότι ο θερμικός χαρακτηρισμός των υλικών αλλαγής φάσης είναι βασικός παράγοντας για το σωστό και κατάλληλο τελικό σχεδιασμό ενός συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. [53] Το εκάστοτε PCM πρέπει να έχει την κατάλληλη θερμοκρασία τήξης, την επιθυμητή θερμότητα τήξης και τη θερμική αγωγιμότητα που υπαγορεύει η πρακτική εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Έτσι, αναπτύχθηκαν τεχνικές θερμικής ανάλυσης με τις οποίες επιτυγχάνεται η μέτρηση των σημαντικότερων ιδιοτήτων των PCM. Μεταξύ αυτών των τεχνικών, οι πιο συνηθισμένες είναι οι: [48]

- Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC)-(Differential Scanning Calorimetry)
- Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)-(Differential Thermal Analysis)
- Θερμοσταθμική Ανάλυση (TGA)-(Thermo Gravimetric Analysis)
- T-History

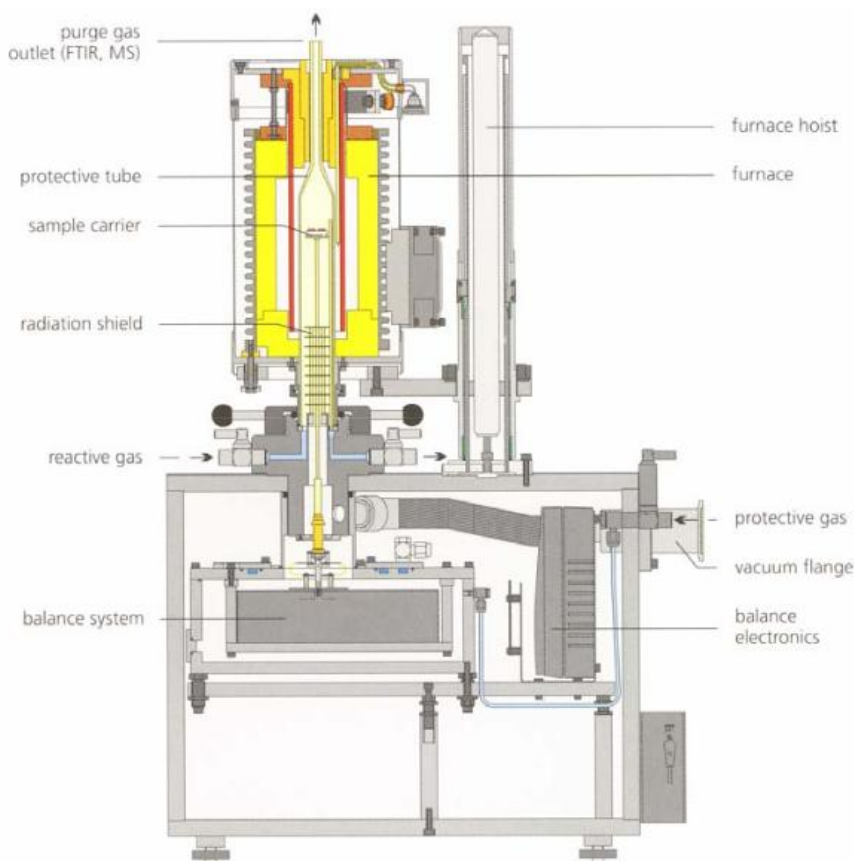
3.7.1 DSC

Η μέθοδος Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης (DSC) είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική για τη θερμική ανάλυση ενός PCM, καθώς παρέχει τις ενθαλπίες τήξης/στερεοποίησης, τις θερμοκρασίες τήξης/στερεοποίησης, την ειδική θερμότητα των υπό μελέτη υλικών και άλλες θερμικές ιδιότητες. [53] Αυτή η μέθοδος μετρά τη διαφορά του ποσού θερμότητας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας ενός δείγματος PCM και ενός υλικού αναφοράς(με γνωστές θερμοφυσικές ιδιότητες), όταν αυτά υποβάλλονται σε ένα ελεγχόμενο πρόγραμμα θερμοκρασίας. [54, 55] Συγκεκριμένα, το δείγμα, το οποίο συγκρατείται σε ένα όργανο με διάμετρο και ύψος 6,3mm, διατηρείται στην ίδια σχεδόν θερμοκρασία με το υλικό αναφοράς, καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας μέτρησης και υπολογίζοντας τη διαφορά προστιθέμενης ή αφαιρούμενης θερμότητας ανάμεσα στο δείγμα και το υλικό αναφοράς, μπορούν να προσδιοριστούν διάφορες θερμικές ιδιότητες του δείγματος, όπως η θερμότητα τήξης, η θερμοχωρητικότητα και η θερμοκρασία τήξης/στερεοποίησης. [30, 48] Η τεχνική DSC μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση θερμικών ιδιοτήτων PCM-γυψοσανίδων, δίνοντας τη δυνατότητα υπολογισμού όχι μόνο της θερμοκρασίας τήξης και θερμότητας τήξης, αλλά και της κατανομής του PCM μέσα στη

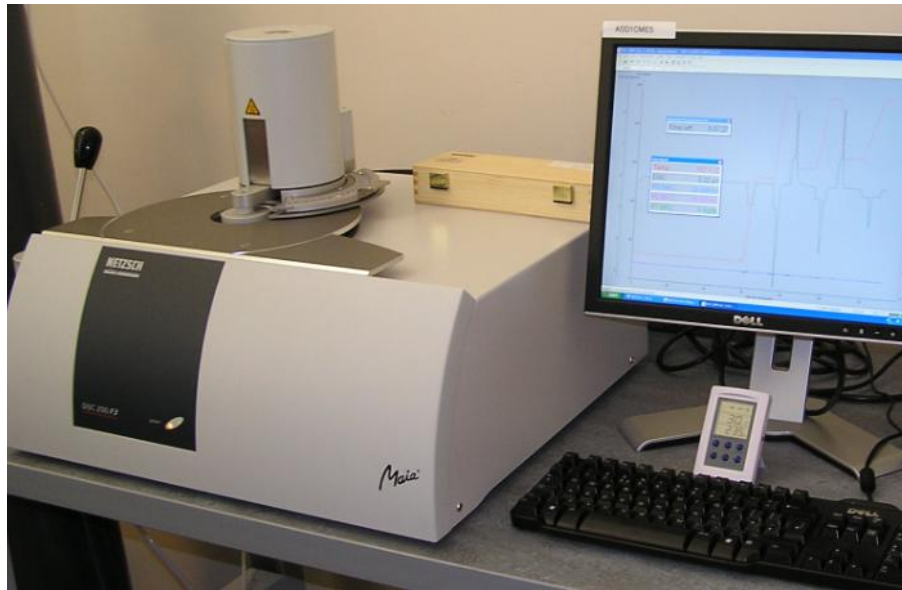
γυψοσανίδα και της επιρροής των πολλαπλών θερμικών κύκλων στις θερμικές ιδιότητες του PCM. [48]

Αναφορικά με τα θερμοκρασιακά προγράμματα, διακρίνουμε δύο διαφορετικά είδη αυτών: τη δυναμική μέθοδο(σταθερός ρυθμός θέρμανσης ή ψύξης) και τη βηματική μέθοδο(ισόθερμα βήματα). Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους θερμοκρασιακού προγράμματος, παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Πρόσφατη έρευνα πάνω στη θερμική ανάλυση PCM καταδεικνύει τη δυναμική μέθοδο ως την πλέον χρησιμοποιούμενη. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Castellon, η βηματική μέθοδος παρέχει υψηλότερη ακρίβεια συγκρίνοντας τις καμπύλες θέρμανσης και ψύξης και μικρότερη ευαισθησία σε μεταβολή των παραμέτρων μέτρησης απ' ότι η δυναμική μέθοδος. Το μειονέκτημα της βηματικής μεθόδου είναι η πολυπλοκότητα του προγραμματισμού, καθώς και οι χρονοβόρες μετρήσεις και εκτιμήσεις των καμπυλών. [55]

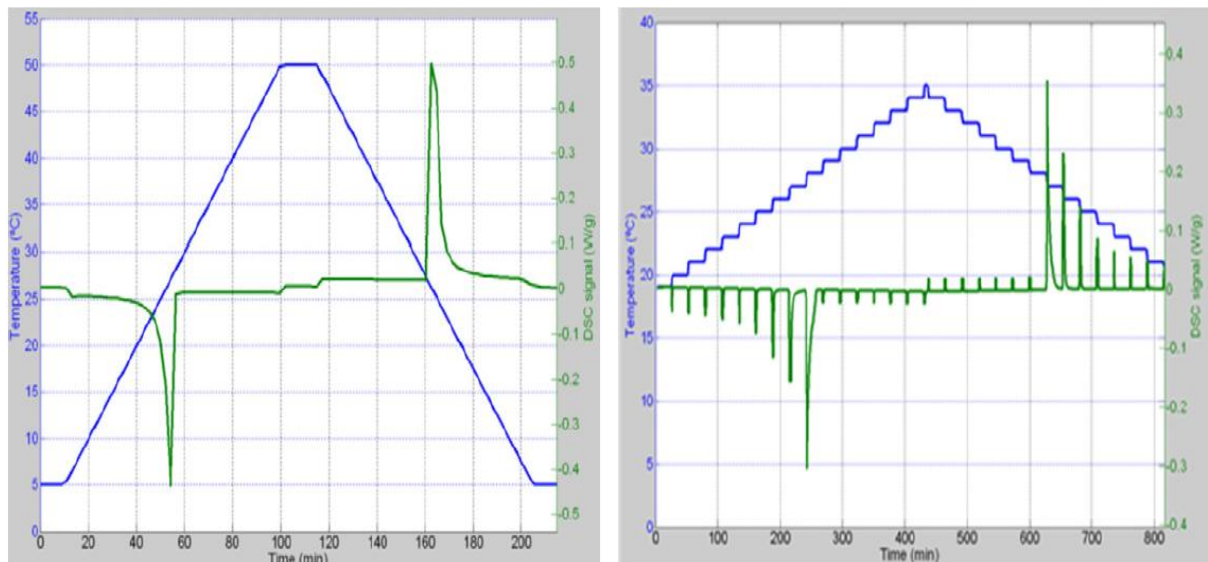
Τέλος, κάποια αρνητικά χαρακτηριστικά της μεθόδου DSC οδήγησαν στην ανάπτυξη άλλων μεθόδων μέτρησης θερμικών ιδιοτήτων υλικών αλλαγής φάσης, όπως είναι η T-History, που περιγράφεται παρακάτω. Κάποια από αυτά είναι το μικρό μέγεθος δείγματος που επιβάλλει η μέθοδος(μικρότερο από 90mg), η επιρροή της μάζας του δείγματος στη θερμική απόκριση, η εξάρτηση της απόκρισης από το ρυθμό θέρμανσης και η παρέμβαση του κύριου συστατικού στο σήμα, στην περίπτωση μελέτης σύνθετων υλικών. [53]



Εικόνα 3.7.1.1: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης DSC [56]



Εικόνα 3.7.1.2: Πειραματική διάταξη κατά την εφαρμογή της μεθόδου DSC

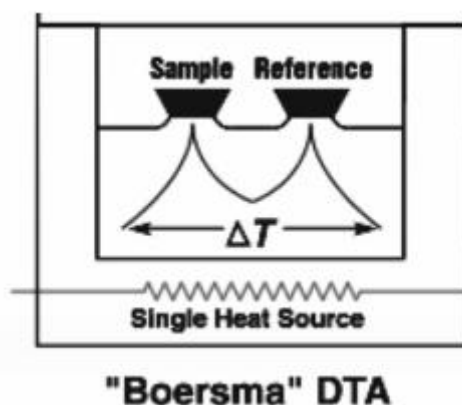


Εικόνα 3.7.1.3: Τυπική απόκριση της μεθόδου DSC με εκτέλεση της δυναμικής μεθόδου, θέρμανση και ψύξη(αριστερά) και τυπική απόκριση της μεθόδου DSC με εκτέλεση της βηματικής μεθόδου, θέρμανση και ψύξη(δεξιά) [55]

3.7.2 DTA

Η μέθοδος DTA είναι μία εναλλακτική τεχνική της DSC. Αντίθετα με την DSC, όπου μετράται η απαιτούμενη ενέργεια για τη διατήρηση δείγματος και υλικού αναφοράς στην ίδια θερμοκρασία, στην DTA υπολογίζεται η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δείγματος και υλικού αναφοράς, όταν και στα δύο προστίθενται ίδια ποσά θερμότητας και έτσι μπορούν να ελεγχθούν η αλλαγή φάσης και διάφορες θερμικές ιδιότητες. [36] Η DSC και η DTA παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά και πολλά κοινά μειονεκτήματα, με τη δεύτερη να χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον για πιο ποιοτικές μετρήσεις. [53]

Στη Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA), σε γενικές γραμμές, η συσκευή περιλαμβάνει δύο κοιλότητες ευρισκόμενες σε ένα φούρνο, στις οποίες τοποθετούνται το δείγμα και το υλικό αναφοράς, θερμοστοιχεία που συνδέονται με αυτά τα δύο υλικά και ανιχνεύουν τις αλλαγές αυτών και ένα σύστημα καταγραφής των αποκρίσεων. [57]



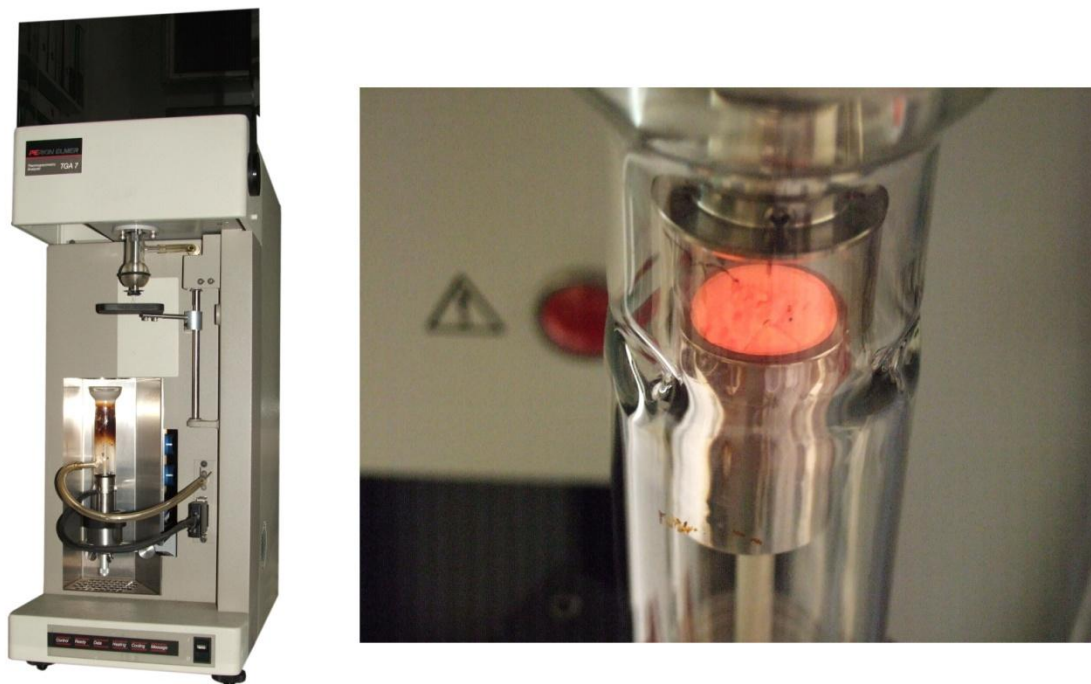
Εικόνα 3.7.2.1: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης κατά την εφαρμογή της μεθόδου DTA

3.7.3 TGA

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αλλαγής της μάζας του δείγματος συναρτήσει της θερμοκρασίας. [56] Η πειραματική διάταξη αυτής της μεθόδου αποτελείται συνήθως από μια υποδοχή στην οποία τοποθετείται το δείγμα, ένα φούρνο που θερμαίνει το δείγμα μέχρι μια υψηλή θερμοκρασία, έναν ευαίσθητο αναλυτικό ζυγό, ένα μικροεπεξεργαστή και ένα σύστημα καθαρισμού με διαβίβαση αερίου που εξασφαλίζει αδρανές περιβάλλον.



Εικόνα 3.7.3.1: Υποδοχές-συγκρατητές του δείγματος [56]



Εικόνα 3.7.3.2: Πειραματική διάταξη μεθόδου TGA (αριστερά) και θέρμανση του δείγματος (δεξιά)

3.7.4 T-History

Οι Zhang και Jiang ανέλυσαν τους περιορισμούς των συμβατικών μεθόδων συμπεριλαμβανομένων των DSC και DTA και έτσι το 1999 διατύπωσαν μία νέα μέθοδο, την T-History, με την οποία μπορούν να υπολογιστούν η θερμοκρασία τήξης, ο βαθμός supercooling, η θερμότητα τήξης, η ειδική θερμότητα, η θερμοχωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα των PCM. [48, 58] Ο Hong τροποποίησε τη μέθοδο T-History, βελτιώνοντας κάποιες ακατάλληλες υποθέσεις στην αρχική μορφή αυτής από τους Zhang και Jiang. Συγκεκριμένα, στην αρχική μορφή της μεθόδου το σημείο υπέρψυξης θεωρούνταν ως το τέλος της αλλαγής φάσης, κάτι που αποτελούσε λανθασμένη επιλογή, αφού ο βαθμός υπέρψυξης εξαρτάται από την ταχύτητα ψύξης και την καθαρότητα του υλικού. Επιπρόσθετα, το φαινόμενο της υπέρψυξης δεν έχει καμία σχέση με το πέρας της αλλαγής φάσης. Για τη διόρθωση αυτού του προβλήματος, προτάθηκε η χρήση ενός σημείου, στο οποίο η πρώτη παράγωγος ελαχιστοποιείται. [48, 59] Ο Marin προχώρησε σε μια επιπλέον βελτίωση αυτής της μεθόδου μέτρησης, θέτοντας το δοκιμαστικό σωλήνα οριζοντίως, γεγονός που ελαχιστοποιούσε τη διαφορά θερμοκρασίας κατά τη διαμήκη κατεύθυνση του δοκιμαστικού σωλήνα και συνέβαλε στη λήψη ακριβέστερων αποτελεσμάτων. Συνεπώς, η μέθοδος T-History εκπλήρωσε την ανάγκη των ερευνητών να χαρακτηρίζουν τα δείγματα υλικών αλλαγής φάσης με πιο υπεύθυνα αποτελέσματα και πιο πιστά στην πραγματική θερμική συμπεριφορά αυτών. [53]

Η εφαρμογή της μεθόδου T-History, όπως προτάθηκε από τον Yinping το 1999, απαιτεί τουλάχιστον δύο δοκιμαστικούς σωλήνες, ο ένας εκ των οποίων περιέχει το εξεταζόμενο PCM και ο άλλος ένα υλικό αναφοράς, του οποίου οι θερμικές ιδιότητες και ειδικότερα η αισθητή και λανθάνουσα θερμοχωρητικότητα πρέπει να είναι οπωσδήποτε γνωστές. Για το σκοπό αυτό, επιλέγεται συνήθως αποσταγμένο νερό. Οι δοκιμαστικοί σωλήνες πρέπει να είναι αρκετά μεγάλοι σε μήκος και ιδιαίτερα στενοί, προκειμένου να διατηρείται ο αριθμός Biot κάτω από 0,1. [60]

$$B_i = \frac{U \cdot r}{2 \cdot k} \ll 0,1 \quad (3.7.4.1)$$

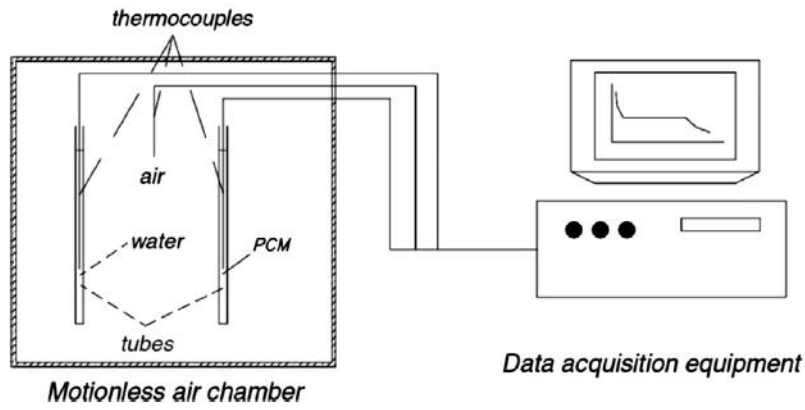
όπου U: ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ σωλήνα και περιβάλλοντος, r: η ακτίνα του σωλήνα και k: η θερμική αγωγιμότητα του δείγματος.

Τα δείγματα μέσα στους σωλήνες θερμαίνονται σε μία θερμοκρασία πάνω από το σημείο τήξης του υλικού αλλαγής φάσης και κατόπιν εκτίθενται σε περιβάλλον με θερμοκρασία μικρότερη του σημείου τήξης. Από τη στιγμή αυτή και καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας ψύξης του δείγματος, καταγράφονται σε υπολογιστή οι θερμοκρασίες των δειγμάτων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, προκύπτουν οι καμπύλες θερμοκρασίας-χρόνου για το PCM, το υλικό αναφοράς και τον αέρα του περιβάλλοντος, με βάση τις οποίες αξιολογούνται στη συνέχεια οι θερμικές ιδιότητες του PCM. Αντίστοιχα, το πείραμα μπορεί να εκτελεστεί και για θέρμανση του δείγματος. [53, 60]

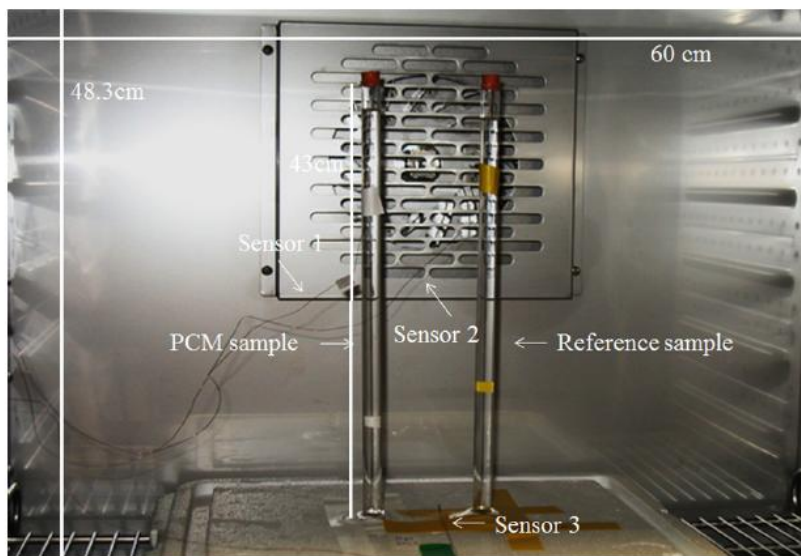
Πολλοί ερευνητές έχουν ήδη χρησιμοποιήσει τη μέθοδο αυτή για να αναλύσουν διάφορα PCM. Μεταξύ αυτών, έχουν αναλυθεί ένα ένυδρο άλας και μία παραφίνη της εταιρείας Climator. Επίσης, ο Li παρατήρησε ότι η μέγιστη απόκλιση ανάμεσα στις μετρήσεις της T-History και τις τιμές που προέκυψαν από τη DSC είναι μικρότερη από 8%, όταν αξιολογούνται μίγματα εύτηκτων αλάτων. [53]

Η μέθοδος T-History συγκεντρώνει κάποια βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. Ένα από αυτά είναι η απλότητα και η απλή πειραματική της διάταξη. Το μέγεθος του δείγματος είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον προσδιορισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων. Ένα μικρό δείγμα οδηγεί σε μείωση του χρόνου απόκρισης της συσκευής και ως εκ τούτου σε βελτίωση της θερμοκρασιακής ανάλυσης. Όμως, δεδομένου ότι τα υλικά αλλαγής φάσης προορίζονται κατά κύριο λόγο για κτιριακές εφαρμογές, όσο μεγαλύτερο είναι το δείγμα που μελετάται, τόσο πιο αντιπροσωπευτικό θα είναι. [53] Εκτός αυτού, τόσο το πρόβλημα της υπέρψυξης που εμφανίζουν πολλά PCM, όσο και το γεγονός ότι πολλά υλικά αλλαγής φάσης αποτελούν μίγματα υλικών, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα και παραπλανητικά αποτελέσματα σε περίπτωση εξέτασης μικρού δείγματος. [61] Η δυνατότητα λήψης μεγάλου δείγματος είναι ακόμη ένα από τα χαρακτηριστικά της μεθόδου T-History, που την κάνει να πλεονεκτεί έναντι των προηγούμενων μεθόδων μέτρησης που παρουσιάστηκαν. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή λόγω του μεγάλου δείγματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μία μεγάλη ποικιλία PCM (ανόργανα και οργανικά, τοποθετημένα μέσα σε κάψουλες ή σύνθετα), καθώς επίσης και να υπολογίζει διάφορες θερμοφυσικές ιδιότητες διαφόρων δειγμάτων PCM, συγχρόνως. Στα πλεονεκτήματα της T-History συγκαταλέγεται επίσης ο μικρός πειραματικός χρόνος και το χαμηλό κόστος αγοράς και συντήρησης του εξοπλισμού, αφού αυτός αποτελείται από βασικές εργαστηριακές συσκευές. [53]

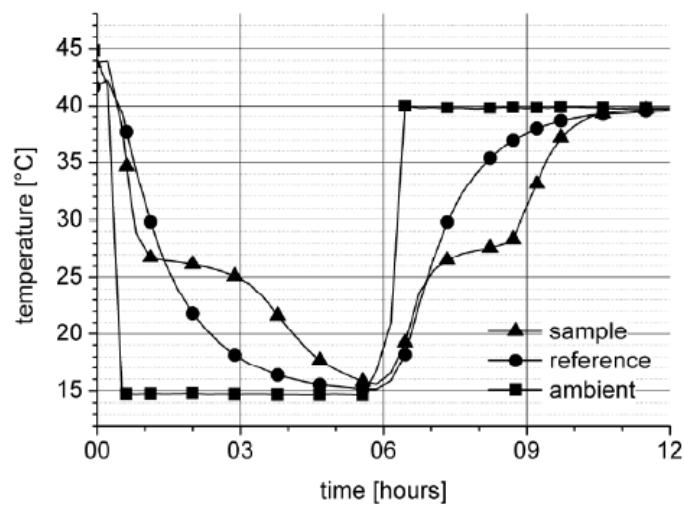
Από την άλλη πλευρά, το σφάλμα των μετρήσεων σχετίζεται και επηρεάζεται άμεσα από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, την προσεκτική κατασκευή της πειραματικής διάταξης και την ορθότητα της διεξαγωγής του πειράματος, κάτι που αποτελεί μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου.



Εικόνα 3.7.4.1: Πειραματική διάταξη όπως προτάθηκε από τον Marin [53]



Εικόνα 3.7.4.2: Πειραματική διάταξη μεθόδου T-History εντός του περιβαλλοντικού θαλάμου BINDER KMF 115 [60]



Εικόνα 3.7.4.3: Καμπύλες θερμοκρασίας-χρόνου PCM, υλικού αναφοράς και περιβάλλοντος κατά τη διαδικασία ψύξης και θέρμανσης όπως προκύπτουν με τη μέθοδο T-History [61]

3.8 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης

Η ανάλυση της συμπεριφοράς των συστημάτων, στα οποία λαμβάνει χώρα η διαδικασία αλλαγής φάσης είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Αυτό οφείλεται σε μία σειρά παραγόντων που χαρακτηρίζει τα συστήματα αυτά, όπως είναι η περιορισμένη γνώση της διεργασίας μεταφοράς θερμότητας στη διεπιφάνεια στερεού και υγρού, οι διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM στις δύο φάσεις, η αβεβαιότητα για τη θερμική αντίσταση στη διεπιφάνεια δοχείου και στερεού PCM, η μεταβολή του όγκου του υλικού αλλαγής φάσης κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, η ύπαρξη κενών σε ένα στερεό και κυρίως η μη γραμμικότητα του προβλήματος, που οφείλεται στην κίνηση της διεπιφάνειας στερεής και υγρής φάσης κατά την αλλαγή φάσης. [19, 44]

Το μη γραμμικό πρόβλημα της κίνησης της διεπιφάνειας-ορίου στερεής και υγρής φάσης εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία αποθηκεύεται και απελευθερώνεται θερμότητα από το PCM και είναι γνωστό ως πρόβλημα «κινούμενου ορίου» ή πρόβλημα Stefan. [19] Αν και το πρόβλημα αυτό μελετήθηκε για πρώτη φορά από τους Clapeyron και Lamé το 1831, το όνομά του δόθηκε από τον Σλοβένο φυσικό Josef Stefan, ο οποίος γύρω στο 1890 έδωσε τη λύση σ' αυτό, καθώς υπολόγιζε πόσο γρήγορα μεγαλώνει ένα στρώμα πάγου πάνω στο νερό. [62] Αρχικά, το πρόβλημα Stefan προσεγγίστηκε θεωρώντας τη μεταφορά θερμότητας μόνο μέσω αγωγής σε ένα ημι-άπειρο υλικό και αργότερα θεωρώντας τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή κατά τη διάρκεια τήξης και στερεοποίησης του υλικού αλλαγής φάσης. [19]

Για την επίλυση του προβλήματος Stefan υπάρχουν διάφορες αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι. Μερικές αναλυτικές τεχνικές προσέγγισης είναι το ολοκλήρωμα της θερμικής ισορροπίας (heat balance integral), η τεχνική της μεταβολής (variation technique), η «ισοθερμική μετανάστευση» (isothermal migration), η μέθοδος της πηγής (source method) και η περιοδική λύση (periodic solution). Ένα βασικό μειονέκτημα όμως των αναλυτικών μεθόδων επίλυσης είναι, ότι η εφαρμογή τους περιορίζεται μόνο σε περιπτώσεις μονοδιάστατων προβλημάτων, αφού σε πολυδιάστατα προβλήματα γίνονται ιδιαίτερα πολύπλοκες. [19] Έτσι, τη λύση στο πρόβλημα μπορεί να δώσει η άλλη κατηγορία, αυτή των αριθμητικών μεθόδων επίλυσης, στις οποίες ανήκουν οι μέθοδοι εντοπισμού του μετώπου αλλαγής φάσης ή αλλιώς μέθοδοι μεταβλητού πλέγματος (front-tracking methods/variable grid methods) και οι μέθοδοι σταθερού πλέγματος (fixed-domain methods). [19, 63] Οι μέθοδοι εντοπισμού του μετώπου αλλαγής φάσης εντοπίζουν συνεχώς τη διεπιφάνεια αλλαγής φάσης. Ωστόσο, παρουσιάζουν τα εξής μειονεκτήματα: απαιτούν πλέγμα που να αλλάζει συνεχώς, μετασχηματισμό συντεταγμένων ή χρήση χωροχρονικού πλέγματος, που μπορεί να κοστίζει πολύ υπολογιστικά και δεν είναι κατάλληλες για αλλαγή φάσης με πεπερασμένο εύρος ψύξης. [63] Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης είναι η μέθοδος ενθαλπίας και η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας, που αναλύονται συνοπτικά παρακάτω. [64]

3.8.1 Μέθοδος Ενθαλπίας

Το πρόβλημα της αλλαγής φάσης γίνεται πιο εύκολο εισάγοντας τη μέθοδο της ενθαλπίας, καθώς διαθέτει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: η εξίσωση που διέπει το πρόβλημα είναι παρόμοια με την εξίσωση της κάθε φάσης, δεν υπάρχει καμία προϋπόθεση που πρέπει να πληρείται στη διεπιφάνεια στερεού και υγρού και τέλος η μέθοδος ενθαλπίας επιτρέπει τη δημιουργία μιας πολτώδους ζώνης μεταξύ των δύο

φάσεων, η οποία είναι γνωστή ως mushy zone και χάρη στη θεώρηση αυτής αποφεύγονται ασυνέχειες που μπορεί να δημιουργούν αριθμητικές αστάθειες. [19] Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιοδήποτε υλικό, ακόμα και αν δεν πρόκειται για υλικό αλλαγής φάσης. Για την περίπτωση PCM, είναι δυνατός ο καθορισμός της συνάρτησης ενθαλπίας, εξετάζοντας τα αποτελέσματα των DSC-μετρήσεων. [64] Η μέθοδος ενθαλπίας έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πολλές περιπτώσεις, ενώ ο Hunter το 1989 και ο Amdjadi το 1990 επιβεβαίωσαν πως είναι η καταλληλότερη για τυπικές εφαρμογές, με τον περιορισμό ότι δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο αριθμητικό μοντέλο στη διεπιφάνεια. Προτού περιγράψουμε τη μέθοδο ενθαλπίας, πρέπει να κάνουμε κάποιες παραδοχές. Συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι οι θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM είναι ανεξάρτητες της θερμοκρασίας, αλλά παίρνουν διαφορετικές τιμές στη στερεή και στην υγρή φάση, το υλικό αλλαγής φάσης είναι αρχικά στερεό, ομοιογενές και ιστροπικό και η μεταφορά θερμότητας γίνεται μέσω αγωγής. [19]

Για μία διαδικασία αλλαγής φάσης, συμπεριλαμβανομένων είτε της τήξης είτε της στερεοποίησης, η διατήρηση της ενέργειας μπορεί να εκφραστεί με τους όρους της ολικής ογκομετρικής ενθαλπίας και της θερμοκρασίας για σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες ως εξής:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k_k(\nabla T)) \quad (3.8.1.1)$$

όπου H: είναι η ολική ογκομετρική ενθαλπία και αποτελεί το άθροισμα της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας του PCM, δηλαδή:

$$H(T) = h(T) + \rho_l f(T)\lambda, \quad (3.8.1.2)$$

Επίσης, ρ : η πυκνότητα, k : η θερμική αγωγιμότητα, λ : η θερμική αντίσταση και

$$h = \int_{T_m}^T \rho_k c_k dT \quad (3.8.1.3)$$

Σε περίπτωση ισοθερμικής αλλαγής φάσης, το ποσοστό της υγρής φάσης παίρνει τις παρακάτω τιμές: [19]

$$f = \begin{cases} 0, & \text{αν } T < T_m \text{ (στερεό)} \\ 0 - 1, & \text{αν } T = T_m \text{ (πολτώδες)} \\ 1, & \text{αν } T > T_m \text{ (υγρό)} \end{cases} \quad (3.8.1.4)$$

3.8.2 Μέθοδος Ενεργού Θερμοχωρητικότητας [63, 64]

Ιδανικά, ένα PCM κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης μπορεί να απορροφήσει ή να απελευθερώσει θερμότητα σε μία σταθερή θερμοκρασία, δηλαδή ιδανικά έχουμε ταύτιση θερμοκρασίας τήξης και θερμοκρασίας στερεοποίησης. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται άπειρη θερμοχωρητικότητα του υλικού αλλαγής φάσης, που προφανώς δεν υφίστανται στην πράξη για κανένα PCM. Είναι φανερό λοιπόν, ότι η αλλαγή φάσης στην πραγματικότητα, λαμβάνει χώρα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος, μεταξύ θερμοκρασίας τήξης T_l και στερεοποίησης T_s . Η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας είναι μία ακόμη μέθοδος που δίνει τη δυνατότητα περιγραφής της μη-ισοθερμοκρασιακής αλλαγής φάσης ενός PCM και είναι η πιο εύχρηστη από

τις δύο μεθόδους προσομοίωσης που αναπτύσσουμε εδώ, καθώς χρησιμοποιεί τη διαδικασία της συνηθισμένης αριθμητικής λύσης της εξίσωσης μεταφοράς ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, το μέγεθος της ενεργού θερμοχωρητικότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας $C_{p,eff}(T)$ και είναι ανάλογο τόσο του ποσού ενέργειας που αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, όσο και της ειδικής θερμότητας. Ωστόσο, είναι αντιστρόφως ανάλογο με το θερμοκρασιακό εύρος τήξης ή στερεοποίησης.

Για τη δημιουργία της συνάρτησης ενεργού θερμοχωρητικότητας χρειάζονται κάποια χαρακτηριστικά του υλικού αλλαγής φάσης. Πρόκειται για τη θερμοκρασία τήξης T_l και στερεοποίησης T_s του υλικού αλλαγής φάσης, τις αντίστοιχες θερμοχωρητικότητες του C_{pl} και C_{ps} και τη θερμότητα αλλαγής φάσης του H .

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, χρησιμοποιείται η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας και συγκεκριμένα η τριγωνική συνάρτηση (Triangular function). Άλλες εκδοχές της μεθόδου είναι η συνάρτηση αναβαθμού (Ramp function), η αντίστροφη συνάρτηση αναβαθμού (Reversed ramp function) και η βηματική συνάρτηση (Step function).

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι η μέθοδος ενθαλπίας επιλέγεται, όταν η διαδικασία αλλαγής φάσης ενδιαφέρει ως μικροσκοπικό φαινόμενο, ενώ η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας χρησιμοποιείται, όταν υφίσταται ενδιαφέρον για μακροσκοπική μελέτη του φαινομένου, όπως συμβαίνει στην παρούσα εργασία.

3.9 Μοντέλα θερμικής προσομοίωσης κτιρίων

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα σημεία της εργασίας, η επιλογή του κατάλληλου PCM για αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε μία κτιριακή εφαρμογή είναι βασικός παράγοντας, καθότι υπάρχει πληθώρα τέτοιων υποψήφιων υλικών, που δύναται να χρησιμοποιηθούν, ώστε να βελτιώσουν την ενεργειακή αποδοτικότητα των κτιρίων. Η βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς των κτιρίων μέσω της χρήσης PCM, εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, μεταξύ των οποίων είναι το κλίμα, ο σχεδιασμός και ο προσανατολισμός της κτιριακής κατασκευής, καθώς και η ποσότητα και οι ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου υλικού αλλαγής φάσης. [65] Παράλληλα, πρέπει να εξετάζονται παράγοντες όπως το κόστος, η αξιοπιστία και η ασφάλεια του υλικού. Όλα τα παραπάνω, είναι κρίσιμοι παράγοντες για τη διαδικασία σχεδιασμού του συστήματος και επομένως το πρόβλημα επιλογής υλικών αλλαγής φάσης μπορεί να ιδωθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης. Έτσι, για τη λύση αυτών των προβλημάτων βελτιστοποίησης έχουν αναπτυχθεί διάφορα προγράμματα προσομοίωσης κτιρίων.

Σήμερα, υπάρχουν ποικίλα εμπορικά λογισμικά για την προσομοίωση υλικών αλλαγής φάσης σε κτιριακά κελύφη (παθητικές εφαρμογές), με τα οποία διευκολύνεται η αξιόπιστη λήψη αποφάσεων στη διαστασιολόγηση του εκάστοτε συστήματος και επιταχύνεται το λανσάρισμα των PCM στην αγορά. Μερικά από αυτά τα μοντέλα προσομοίωσης είναι τα EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS, PCM express, TAS, BLAST, DOE, ECOTECT, eQUEST, SUNREL και WUFI 5. [65, 66] Μάλιστα, τα EnergyPlus, ESP-r και TRNSYS είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα και ευέλικτα. Ωστόσο, λίγα είναι τα υπολογιστικά προγράμματα, που προσομοιώνουν υλικά αλλαγής φάσης σε ενεργητικά συστήματα, γεγονός που οφείλεται στις ιδιαίτερες δυσκολίες που παρουσιάζουν αυτά τα συστήματα, όπως πολυδιάστατη μεταφορά θερμότητας και έλεγχος συστήματος. Για παράδειγμα, το EnergyPlus δεν περιελάμβανε αυτή τη δυνατότητα μέχρι και την έκδοση EnergyPlus 6.0 (2010). [32]

Σ' αυτό το σημείο, αξίζει να αναφέρουμε, ότι το Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ χρησιμοποίησε συνδυαστικά τα λογισμικά TRNSYS και MATLAB, για την προσομοίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων κατασκευασμένων με τοίχους και άλλα δομικά στοιχεία από PCM, σε συνδυασμό με συμβατικά ή άλλα νέα ενεργειακής απόδοσης συστήματα, συμβάλλοντας έτσι στην εκτίμηση των ενεργειακών κερδών σε αυτά τα κτίρια. [67]

EnergyPlus

Το EnergyPlus είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης ενεργειακής ανάλυσης και θερμικού φορτίου που μοντελοποιεί τη θέρμανση, τη ψύξη, το φωτισμό, τον αερισμό και άλλες ροές ενέργειας μέσα σε κτίρια και περιλαμβάνει μερικές σημαντικές δυνατότητες προσομοίωσης όπως μεταβλητά χρονικά βήματα και συστήματα ρυθμιζόμενα από το χρήστη. [36]

Παρακάτω, φαίνεται μια κατοικία στο Oak Ridge του Τενεσί, όπως είναι στην πραγματικότητα και όπως προέκυψε το σχέδιο της από τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης EnergyPlus. [68]



Εικόνα 3.9.1: Φωτογραφία(πάνω) και σχέδιο κατοικίας με χρήση του EnergyPlus(κάτω)

ESP-r [36]

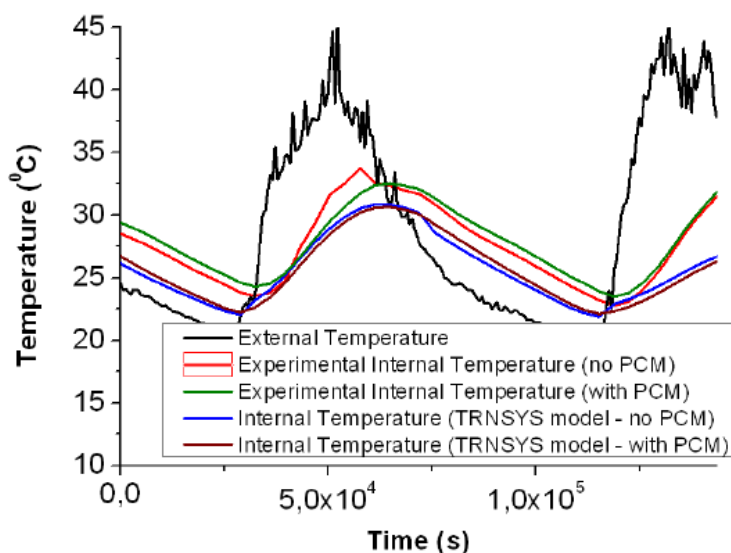
Όπως ανέφεραν οι Almeida et al., το ESP-r είναι ένα προηγμένο εργαλείο κτιριακής ενεργειακής προσομοίωσης, το οποίο δίνει τη δυνατότητα λεπτομερούς θερμικής και οπτικής περιγραφής των κτιρίων. Το λογισμικό αυτό διακρίνει το πεδίο του προβλήματος σε ένα σύστημα ελέγχου όγκου και λύνει τις αντίστοιχες εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής, ενέργειας κλπ. Επίσης, μπορεί να ενσωματώσει το αποτέλεσμα μιας ποικιλίας παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων του καιρού, της εξωτερικής σκίασης, των συστημάτων θέρμανσης, κλιματισμού και αερισμού και πολλών άλλων. Οι Almeida et al. αξιολόγησαν το ενδεχόμενο χρήσης πολλαπλών στρωμάτων PCM, έναντι της χρήσης ενός μονού στρώματος PCM και το αποτέλεσμα ήταν, ότι αφενός η εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης επηρεάζει σημαντικά τη

κτιριακή θερμική απόδοση και αφετέρου τα πολυστρωματικά PCM προσφέρουν πολλά περισσότερα θερμικά οφέλη, απ' ότι το μονό στρώμα υλικού.

TRNSYS [36, 69]

Το λογισμικό TRNSYS χρησιμοποιείται για δυναμική προσομοίωση κτιρίων, βασίζεται σε τεχνικές συναρτήσεων μεταφοράς και περιέχει πολλές υπορουτίνες για διάφορα συστήματα. Οι Ibanez et al. στην εργασία τους, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα αυτό, περιγράφουν μία απλή μεθοδολογία για την ενεργειακή προσομοίωση των κτιρίων με PCM. Τα αποτελέσματα αποθήκευσης και απελευθέρωσης ενέργειας από τα υλικά αλλαγής φάσης προσομοιώθηκαν με τη χρήση του εργαλείου ενεργού στρώματος στο TRNSYS Type 56.

Ακολουθεί διάγραμμα που δείχνει τη μεταβολή της εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, όπως προέκυψε πειραματικά, αλλά και με τη χρήση του μοντέλου TRNSYS για την περίπτωση εφαρμογής ή μη εφαρμογής PCM σε ένα κτίριο.



Εικόνα 3.9.2: Προσομοίωση PCM ενσωματωμένου σε κτίριο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογές PCM

4.1 Γενικά

Εδώ και αρκετά χρόνια, τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν μονοπωλήσει και εξακολουθούν να μονοπωλούν το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας, αποτελώντας αντικείμενο εκτεταμένων μελετών, από τις οποίες αναδείχθηκαν τόσο τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν, όσο και η τεράστια ποικιλία τους, ικανή να καλύψει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Όπως γίνεται λοιπόν αντιληπτό, τα υλικά αυτά δε θα μπορούσαν να μείνουν ανεκμετάλλευτα και έτσι σήμερα μπορούμε να τα συναντήσουμε σε ένα εκτεταμένο πλήθος εφαρμογών. Η χρήση τους στον κτιριακό τομέα, που είναι απλώς ένα μικρό δείγμα των πολυπληθών εφαρμογών τους, προσφέρει πολλαπλά οφέλη, ανάμεσα στα οποία είναι η βελτίωση του κτιριακού κελύφους, η αύξηση θερμικής άνεσης, η καλύτερη αποδοτικότητα των συστημάτων, η μείωση ενεργειακών απαιτήσεων και η εξοικονόμηση ενέργειας σε εκτός αιχμής περιόδους. [49] Συγκεκριμένα, στα κτίρια τα PCM βρίσκουν εφαρμογή και σε παθητικά, αλλά και ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, όπως θα δούμε στη συνέχεια του κεφαλαίου. Εκτός, όμως από τον κτιριακό τομέα, τα PCM έχουν να επιδείξουν σημαντικές και αξιόλογες εφαρμογές στον τομέα των μεταφορών, της τηλεπικοινωνίας, στα ηλεκτρονικά, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην ένδυση, στην ιατρική-φαρμακευτική, ακόμα και σε διαστημικές αποστολές.

4.2 Κτιριακές εφαρμογές

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα υλικά αλλαγής φάσης για τη θέρμανση ή ψύξη των κτιρίων. Τα συστήματα με τα οποία μπορούν να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι χωρίζονται στις παρακάτω δύο κατηγορίες και ορίζονται κατά τους Tyagi και Buddhi ως εξής: [70]

- Παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας: Αποθηκεύουν ζέστη ή δροσιά, όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξηθεί ή μειωθεί πέραν της θερμοκρασίας του μέσου αποθήκευσης
- Ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας: Είναι συστήματα θερμικά μονωμένα από το περιβάλλον και απαιτούν ένα δευτερεύον ρευστό μεταφοράς θερμότητας για την ανταλλαγή θερμικής ενέργειας μεταξύ δεξαμενής και πηγής θερμότητας.

Αυτοί οι γενικοί ορισμοί των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορούν να εφαρμοστούν και έχουν εφαρμοστεί σε συστήματα θέρμανσης και ψύξης μέσω PCM. Μερικά συστήματα, όπως οι γυψοσανίδες με ενσωματωμένο PCM εμπίπτουν ξεκάθαρα στις παθητικές εφαρμογές, ενώ συστήματα όπως μονωμένες δεξαμενές που περιέχουν PCM και νερό υπό ροή για τη μεταφορά θερμότητας στο κτίριο, ανήκουν στις ενεργητικές εφαρμογές. Ωστόσο, ορισμένα συστήματα δεν είναι ευδιάκριτο σε ποια από τις δύο κατηγορίες ανήκουν, καθώς έχουν πτυχές που είναι και παθητικές και ενεργητικές. Έτσι, υπάρχουν συστήματα που θερμαίνουν ή ψύχουν παθητικά ένα χώρο όσο αυτά βρίσκονται σε άμεση επαφή, αλλά μπορούν επίσης να δράσουν ενεργητικά διοχετεύοντας θερμότητα σε ένα ρευστό, το οποίο ρέει μέσω ενός ενσωματωμένου δικτύου σωληνώσεων. [70]

4.2.1 Παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας

Στα παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας δεν χρησιμοποιούνται μηχανικά μέσα για τη συλλογή ηλιακής ενέργειας. Σ' αυτά, τα PCM χρησιμοποιούνται στο κτιριακό κέλυφος, αντικαθιστώντας τη θερμική μάζα των κτιρίων. Έτσι, τα συναντάμε ενσωματωμένα σε στοιχεία του κτιρίου όπως σε τοίχους, οροφές, δάπεδα, γυψοσανίδες, παράθυρα αλλά και σε δομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα και τα τούβλα. Η εφαρμογή τους μπορεί να εξυπηρετήσει τόσο κατά τους χειμερινούς μήνες όσο και κατά τους θερινούς. Στην πρώτη περίπτωση, όπου η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου είναι μεγαλύτερη από του εξωτερικού περιβάλλοντος και υπάρχει ανάγκη να συγκρατήσουμε όσο περισσότερη θερμότητα γίνεται εντός, ένα μέρος της θερμότητας που διαπερνά το σοβά, εγκλωβίζεται από το PCM και έτσι καλύπτεται η ανάγκη αυτή. Αντίστοιχα, το καλοκαίρι, όπου υπάρχει ροή θερμότητας από έξω προς τα μέσα, το PCM αποθηκεύει τη θερμότητα που εισέρχεται εντός του κτιρίου, καθυστερώντας με αυτόν τον τρόπο την άνοδο της εσωτερικής θερμοκρασίας. Διάφορα υλικά αλλαγής φάσης, που προορίζονται για δομικά υλικά, έχουν αναπτυχθεί υπό τη συνεργασία πολλών βιομηχανικών εταιρειών και ελέγχονται σε πειραματικούς χώρους κάτω από πραγματικές εξωτερικές συνθήκες. [70]

4.2.1.1 PCM σε γυψοσανίδες και πάνελ

Οι γυψοσανίδες χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό σε κτίρια ελαφριάς κατασκευής. Τέτοια κτίρια χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμική μάζα και ως εκ τούτου στο εσωτερικό τους υφίστανται πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις απ' ό,τι στο εσωτερικό ογκωδών και συμπαγών κατασκευών. Τις διακυμάνσεις αυτές καλούνται να αντισταθμίσουν συστήματα κλιματισμού αέρα, θέρμανσης ή ψύξης, τα οποία όμως οδηγούν σε υψηλό λειτουργικό κόστος και αυξημένες εκπομπές CO₂. Ένας τρόπος με τον οποίο μπορούν να περιοριστούν σημαντικά τα μειονεκτήματα αυτά, είναι η ενίσχυση του κτιριακού κελύφους με γυψοσανίδες που περιέχουν υλικά αλλαγής φάσης. [71]

Οι γυψοσανίδες με PCM θεωρούνται μία αποτελεσματική και σχετικά οικονομική μέθοδος αντικατάστασης της θερμικής μάζας για αποθήκευση ηλιακής ενέργειας στα κτίρια. [48] Μπορούν να υποκαταστήσουν ή να λειτουργήσουν συμπληρωματικά στις συμβατικές χρησιμοποιούμενες γυψοσανίδες. [72] Οι κύριοι τρόποι ενσωμάτωσης υλικού αλλαγής φάσης σε γυψοσανίδα είναι η ενσωμάτωση με απορρόφηση, κατά την οποία η γυψοσανίδα βυθίζεται σε υγρό PCM και έτσι το απορροφά και η άμεση ενσωμάτωση, όπου το PCM ενσωματώνεται στη γυψοσανίδα συνήθως σε μορφή κάψουλας. Η αναλογία με την οποία τα υλικά αλλαγής φάσης προστίθενται σε γυψοσανίδες είναι συνήθως 20-30% κατά βάρος. Παρά ταύτα, έχει αποδειχθεί ότι μείωση του ποσοστού του PCM σε 15-20% κατά βάρος και η επίστρωση πυροπροστατευτικού υλικού μπορεί να ελαχιστοποιήσει τον κίνδυνο ανάφλεξης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των γυψοσανίδων με PCM είναι πολλαπλοί, οι βασικότεροι από τους οποίους είναι η θερμοκρασία τήξης του υλικού αλλαγής φάσης, η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, η μέθοδος ενσωμάτωσης του υλικού στη γυψοσανίδα, ο προσανατολισμός του φερόμενου με γυψοσανίδα τοίχου, οι κλιματικές συνθήκες και άλλα. [30] Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες, που επικεντρώνονται σε αυτούς τους παράγοντες, από τις οποίες έχουν αναδυθεί τα οφέλη της χρήσης τέτοιων προϊόντων παθητικής χρήσης.

Το 1991, οι Peippo et al. χρησιμοποιώντας γυψοσανίδες με PCM σε μιας ελαφριάς κατασκευής κατοικία 120m² στο Madison, Wisconsin, απέδειξαν πως η εφαρμογή αυτή μπορούσε να επιφέρει εξοικονόμηση έως και 4GJ το χρόνο ή αλλιώς 15% του ετήσιου ενεργειακού κόστους. [73]

Οι Scalat et al. πίστευαν πως η χρησιμοποίηση μιας γυψοσανίδας με ενσωματωμένο PCM, θα μπορούσε να διατηρήσει τα θερμοκρασιακά επίπεδα ενός δωματίου εντός της περιοχής θερμικής άνεσης για αρκετό χρονικό διάστημα μετά τη διακοπή λειτουργίας συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης. [48] Έτσι, το 1996 διεξήγαγαν έναν εργαστηριακό έλεγχο στον οποίο εμπότισαν συνηθισμένες γυψοσανίδες με λιπαρούς εστέρες. Στη συνέχεια εγκατέστησαν αυτές αλλά και απλές γυψοσανίδες σε ένα δοκιμαστικό χώρο διαστάσεων 2,29×2,27×2,45m και από τη δοκιμή προέκυψε ότι ο απαιτούμενος χρόνος για τη μετάβαση της θερμοκρασίας του αέρα από 18 σε 22°C ήταν 24,1 ώρες για την απλή γυψοσανίδα και 45,6 ώρες για την γυψοσανίδα με PCM. [70]

Οι Athienitis et al. εγκατέστησαν το 1997 γυψοσανίδες με PCM ως επενδύσεις τοίχων ενός υπαίθριου πειραματικού χώρου κανονικής κλίμακας στο Μόντρεαλ στον Καναδά. Η συγκεκριμένη γυψοσανίδα αποτελούνταν από στεατικό βουτυλεστέρα με αλλαγή φάσης σε εύρος από 16 έως 20,8°C και ενθαλπία τήξης 30,7kJ/kg. Εξεταζόμενες υπό συνηθισμένες канаδικές χειμερινές συνθήκες, το κύριο συμπέρασμα της έρευνας ήταν ότι η εφαρμογή αυτών των γυψοσανίδων μείωσε τον κίνδυνο υπερθέρμανσης του χώρου κατά 4°C, καθώς απορροφούνταν η περίσσεια ηλιακή θερμότητα κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Επιπρόσθετα, οι παραπάνω συγγραφείς ανέπτυξαν επικυρωμένο μαθηματικό μοντέλο που αξιολογεί την επίδοση των γυψοσανίδων με PCM. [72]

Ο Neeper εμπότισε γυψοσανίδες με λιπαρά οξέα και κεριά παραφινών και μελέτησε τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας υπό την ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας του δωματίου (χωρίς να λάβει υπόψη την απορροφούμενη ακτινοβολία), με το PCM τοποθετημένο εσωτερικά και εξωτερικά αντίστοιχα. Από τη μελέτη αυτή διαπίστωσε ότι όταν το σημείο τήξης του υλικού αλλαγής φάσης βρίσκεται κοντά στη μέση θερμοκρασία του χώρου, τότε επιτυγχάνεται η μέγιστη ημερήσια αποθήκευση θερμικής ενέργειας, ενώ μειώνεται η ημερήσια αποθήκευση θερμότητας όταν η διαδικασία αλλαγής φάσης λαμβάνει χώρα σε ένα εύρος θερμοκρασιών. [48]

Επίσης, στα βορειοανατολικά της Κίνας, οι Lv et al. οικοδόμησαν ένα συνηθισμένο δωμάτιο, καθώς και ένα δωμάτιο με γυψοσανίδες με PCM. Όπως διαπίστωσαν, χάρη στις γυψοσανίδες περιορίστηκαν οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του εσωτερικού αέρα, μειώθηκε η μεταφορά θερμότητας προς το εξωτερικό περιβάλλον και το δωμάτιο παρέμεινε ζεστό. [48] Μία ακόμη προσέγγιση παθητικής εφαρμογής είναι η ενσωμάτωση PCM σε μία κατασκευή από σκυρόδεμα, τοποθετώντας ένα πάνελ μεταξύ δύο πλακών σκυροδέματος. Κάτι τέτοιο έκαναν οι Pasupathy και Velraj το 2008, που κατάφεραν να ενισχύσουν τη συγκράτηση της εσωτερικής θερμοκρασίας, θέτοντας ένα στρώμα PCM μεταξύ πλακών τούβλου, ασβεστοκονιάματος και σκυροδέματος. [70]

Το 2007 οι Shilei et al. ερεύνησαν μια γυψοσανίδα με 26% κατά μάζα PCM που περιείχε 82% καπριλικό οξύ και 18% λαυρικό οξύ. Εξετάζοντας τις σανίδες αυτές σε ένα πειραματικό δωμάτιο διαστάσεων ενός κοινού γραφείου, προέκυψαν αποτελέσματα που συμφωνούσαν με αυτά της μεθόδου DSC και αποδείκνυαν τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε αυτές. Έτσι, κατέληξαν πως η χρήση PCM στο κτιριακό κέλυφος μπορεί να μετατοπίσει τα θερμοκά και ψυκτικά φορτία σε ώρες εκτός αιχμής ζήτησης ηλεκτρισμού. [72]

Το 2013, οι Gowreesunker και Tassou διερεύνησαν την επίδοση μιας σανίδας από PCM και πηλό, τοποθετημένης σε κοινής κατασκευής δοκιμαστικό θάλαμο. Η σανίδα περιελάμβανε 21% Micronal® PCM, με μέση ενθαλπία 16,5kJ/kg για ένα θερμοκρασιακό φάσμα από 12 έως 22°C. Η μελέτη έδειξε ότι, η εφαρμογή των σανίδων με PCM οδήγησε σε μείωση 3°C των μέγιστων θερμοκρασιών και θερμοκρασιών επιφάνειας σε σχέση με αυτές υπό την χρήση απλών γυψοσανίδων, προλαμβάνοντας με αυτόν τον τρόπο την τάση υπερθέρμανσης του χώρου. [72]

Η γενική ιδέα συνδυασμού ελαφριάς κατασκευής και αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας χωρίς κάποια τεχνολογία ψύξης έχει εφαρμοστεί σε ένα από τα γραφεία της εταιρείας BASF στο Ludwigshafen στη Γερμανία. Τα γραφεία αυτά, ακόμη και στα τέλη της φθινοπωρινής εποχής, παρουσίαζαν υψηλές θερμοκρασίες άνω των 28°C. Έτσι, το 2004, στην οροφή ενός εκ' των γραφείων χρησιμοποιήθηκε μια γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM. Συνολικά, εγκαταστάθηκαν 6kg PCM ανά τετραγωνικό μέτρο με θερμοχωρητικότητα 660kJ/m². Η συγκεκριμένη παθητική εφαρμογή ελέγχθηκε και προέκυψε ότι κατά τη διάρκεια 6 ημερών η θερμοκρασία αυτού του γραφείου δεν ξεπέρασε τους 26°C, σε αντίθεση με το δοκιμαστικό δωμάτιο που υπερέβη τους 28°C, τιμή σαφώς υπερβολικά υψηλή για ένα περιβάλλον χωρίς εργασιακό άγχος. Θερμοκρασίες κάτω των 25°C δεν επηρεάστηκαν από την ύπαρξη PCM. [74]

Η γυψοσανίδα «maxit-clima», δημιούργημα της εταιρείας Maxit που βρίσκεται στο Merdingen στη Γερμανία, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στο κτίριο διοίκησης της εταιρείας παροχής ενέργειας Badenova στο Offenburg στη Γερμανία και κάλυψε πλήρως τις απαιτήσεις για μεγαλύτερη αποθήκευση θερμικής μάζας χωρίς την προσθήκη επιπρόσθετου βάρους στο κτίριο. [74]

Τα PCM πάνελ είναι θερμικά αγωγία δοχεία εντός των οποίων υπάρχει PCM και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε παρόμοιες εφαρμογές με τις γυψοσανίδες PCM. Το 2006, οι Ahmad et al. κατασκεύασαν εξωτερικούς δοκιμαστικούς θαλάμους με και χωρίς PCM-πάνελ συνδυασμένα με πάνελ μόνωσης κενού (VIP) και ύστερα από έλεγχο διαπίστωσαν πως η μέγιστη θερμοκρασία στους θαλάμους που περιείχαν τα PCM-πάνελ ήταν 40°C, ενώ στους άλλους ήταν 60°C. Το 2007, οι Cabeza et al. κατασκεύασαν θαλάμους από πάνελ σκυροδέματος που περιείχαν 5% κατά βάρος Micronal® PCM. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν μία άμβλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων του θαλάμου, 1°C κάτω από τη μέγιστη θερμοκρασία και 2°C πάνω από την ελάχιστη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε στο θάλαμο από καθαρό σκυρόδεμα. [70]

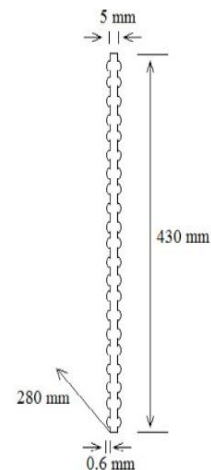
Ένα δημοφιλές PCM πάνελ, που έχει χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες μελέτες είναι το Rubitherm CSM® panel. Αυτή η πλάκα αποτελείται από πλαίσιο αλουμινίου και περιέχει υλικό αλλαγής φάσης που έχει δημιουργήσει η εταιρεία Rubitherm GmbH. Το 2010 οι Castell et al. ενσωμάτωσαν τέτοια CSM πάνελ(με RT-27 και SP-25) σε ένα θάλαμο μεσογειακού στυλ στην Ισπανία κατασκευασμένο από συμβατικά τούβλα και τούβλα με κυψελίδες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι κάτω από ελεύθερα κυμαινόμενες συνθήκες, οι μέγιστες θερμοκρασίες εντός του κλειστού θαλάμου μειώθηκαν κατά 1°C και οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις ελαττώθηκαν σημαντικά συγκριτικά με το θάλαμο χωρίς PCM. Δίνεται έμφαση στη σημασία του νυχτερινού αερισμού κατά τη διάρκεια διαδοχικών θερμών ημερών με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας επαναφόρτισης του υλικού αλλαγής φάσης. Επιπλέον, η χρήση των PCM πάνελ σε ένα θάλαμο με κλιματιζόμενο αέρα στους 24°C κατέδειξε τη δυνατότητα μείωσης κατά 15% της ενεργειακής κατανάλωσης σε σχέση με ένα θάλαμο χωρίς PCM. [72]

Το γεγονός ότι τα Rubitherm CSM® panels είναι ιδιαίτερος γνωστά μπορεί να συνδεθεί με τη σχετική ευκολία στη χρήση τους, τη μεγάλη ποικιλία PCM που διατίθενται από την Rubitherm GmbH και τις ενισχυμένες ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας λόγω του σχεδιασμού της επιφάνειάς τους. Εκτός από την ικανότητα εφαρμογής τους στα κτιριακά κελύφη, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως εναλλάκτες θερμότητας. [72]

Το 2009 οι Kuznik et al. δοκίμασαν τα πάνελ DuPont Energain® σε ένα θάλαμο δοκιμών MICROBAT, τοποθετώντας τα στην εσωτερική πλευρά των τοιχωμάτων. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα, η εσωτερική θερμοκρασία του δοκιμαστικού θαλάμου χωρίς PCM ακολουθούσε στενά την εξωτερική τόσο κατά τη θέρμανση όσο και κατά την ψύξη, ενώ με την εφαρμογή του PCM πάνελ αυξανόταν η χρονική καθυστέρηση και μειωνόταν η μέγιστη θερμοκρασία εντός του θαλάμου. Την ίδια χρονιά, οι ίδιοι επέκτειναν περαιτέρω τη μελέτη τους στο θάλαμο δοκιμών MINIBAT, εξετάζοντας την επίδοση του DuPont Energain® πάνελ και την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας σε τρεις εποχές. Η εφαρμογή των PCM πάνελ κατά τη θερινή περίοδο είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας κατά 3,9°C και την αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας κατά 0,8°C. Κατά την περίοδο μεταξύ θέρους και χειμώνα, η μέγιστη θερμοκρασία μειώθηκε κατά 2,3°C και η ελάχιστη αυξήθηκε κατά 0,4°C. Παρομοίως, το χειμώνα μειώθηκε αποτελεσματικά η διακύμανση της θερμοκρασίας μέσα στο χώρο, εμποδίζοντας την υπερθέρμανση λόγω ηλιακής ακτινοβολίας. Δηλαδή, η κύρια επίδραση της χρήσης των PCM πάνελ είναι η διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα σε επίπεδα άνεσης. [72]

Στο πλαίσιο του διαγωνιστικού προγράμματος American Solar Decathlon 2009, η ομάδα της Γερμανίας κατασκεύασε ένα σπίτι, στο οποίο εφάρμοσε τεχνολογία μικροκαψουλών PCM ενσωματωμένες σε πάνελ στο εσωτερικό των τοίχων της κατοικίας. Τα πάνελ PCM που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν τα εμπορικά Smartboard της Knauf, τα οποία περιέχουν μικροσκοπικά σφαιρίδια από πολυμερές εντός των οποίων υπάρχει παραφίνη ανεπτυγμένη από την εταιρεία BASF (Micronal). Η ομάδα σχεδίασε αυτήν την εφαρμογή για ψύξη του χώρου και επέλεξε ένα υλικό αλλαγής φάσης με θερμοκρασία τήξης 26°C. Έτσι, όταν η θερμοκρασία του δωματίου γίνεται μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία τήξης του PCM, το τελευταίο απορροφά θερμότητα, μειώνοντας την υπερθέρμανση του χώρου. Στη συνέχεια, η πλεονάζουσα θερμότητα διαχέεται στους τοίχους, αποθηκεύεται εκεί και με το νυχτερινό αερισμό, εισάγεται αέρας με θερμοκρασία κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του PCM για να το εκφορτίσει. Κατά συνέπεια, περιορίζονται οι θερμοκρασιακές κορυφές, βοηθώντας στην επίτευξη μιας πιο ομοιόμορφης θερμοκρασίας χώρου και μειώνοντας την ανάγκη ενός μηχανικού συστήματος κλιματισμού. [49]

Σήμερα, διατίθενται στο εμπόριο διάφορες γυψοσανίδες και πάνελ με ενσωματωμένο PCM από εταιρείες όπως η BASF Ltd, η Eco Building Boards Ltd, η Datum Phase change Ltd, η Delta Membrane systems Ltd και η Rubitherm GmbH. [72] Ορισμένα από τα πιο γνωστά προϊόντα αυτού του είδους είναι το Knauf PCM Smartboard (γυψοσανίδα πάχους 15mm με Micronal® PCM της εταιρείας BASF, που είναι παραφίνη σε μικροκάψουλες), το DuPont Energain® πάνελ (παραφίνη σε συνδυασμό με ένα σταθεροποιητή σχήματος πολυαιθυλενίου για εγκατάσταση πίσω από γυψοσανίδες), μία γυψοσανίδα με PCM της εταιρείας Maxit και το Rubitherm CSM® panel. [75]



Εικόνα 4.2.1.1.1: Knauf PCM Smartboard (πάνω αριστερά), DuPont Energain πάνελ(πάνω δεξιά), γυψοσανίδα με PCM της Maxit (κάτω αριστερά) και Rubitherm CSM® πάνελ(κάτω δεξιά)

4.2.1.2 Η ελληνική κατοικία του μέλλοντος

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να γίνει αναφορά σε ένα κατασκευαστικό εγχείρημα που αφορά την ελληνική κατοικία του μέλλοντος. Υπό τη συνεργασία του Εργαστηρίου Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και της εταιρείας UPONOR και με συντονιστή την εταιρεία KNAUF Γυψοποιία ΑΒΕΕ, κατασκευάστηκε στο Στανό Αμφιλοχίας, στο εργοστάσιο της εταιρείας KNAUF, το ελληνικό σπίτι του μέλλοντος, στο πλαίσιο του προγράμματος «MESSIB- Multi-Source Energy Storage System Integrated in Buildings» (EC-FP7-NMP). [76]

Στην πιλοτική αυτή κατοικία εγκαταστάθηκε συνδυασμός συστημάτων ξηράς δόμησης με σύγχρονα συστήματα θερμικής ενέργειας, στο πλαίσιο του προγράμματος «ISSB- The Integrated Safe and Smart Built Concept» (2007-2010, FP6, Χρηματοδότηση Ευρωπαϊκή Ένωση, Διεύθυνση Έρευνας, Πρόγραμμα NMP). Επιπλέον, στα πλαίσια του προγράμματος «MESSIB- Multi-Source Energy Storage System Integrated in Buildings» (2009-2012, FP7, Χρηματοδότηση Ευρωπαϊκή Ένωση, Διεύθυνση Έρευνας, Πρόγραμμα NMP), η κατοικία εξοπλίστηκε με συστήματα αποθήκευσης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω θερμικής αποθήκευσης και η ενεργός διαχείριση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλεκτρικής αποθήκευσης. [76]

Για τη θέρμανση της οικίας χρησιμοποιείται αντλία θερμότητας αέρα/νερού της Hitachi Yutaki, η οποία συνδέεται με ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης. Στο δάπεδο

εφαρμόστηκαν Knauf-System F131-Vidifloor και γυψοσανίδες Knauf- Integral Gifafloor. Για το δροσισμό χρησιμοποιείται η ίδια αντλία θερμότητας σε συνδυασμό με σύστημα δροσισμού οροφής, το οποίο συνδυάζει σύστημα ξηράς δόμησης με σωληνώσεις νερού. Στην οροφή τοποθετήθηκαν K713-Knauf Thermoboards (γυψοσανίδες με γραφίτη, ειδικές για επικαλύψεις συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης ενσωματωμένων με τα δομικά στοιχεία). Για τη θέρμανση και δροσισμό χρησιμοποιούνται ενεργητικά αποθηκευτικά συστήματα της εταιρείας UPONOR-Siccus system, τα οποία συνδυάζουν το σύστημα γυψοσανίδων με σωληνώσεις νερού. Το σύστημα θέρμανσης-ψύξης της κατοικίας έχει σχεδιασθεί, τοποθετηθεί και χρηματοδοτηθεί από την εταιρεία THEROS Energy Solutions & Projects και συνδυάζει τη λειτουργία ηλιοθερμικού συστήματος (ηλιακοί συλλέκτες και λέβητες) με την αντλία θερμότητας για θέρμανση-ψύξη και Ζεστό Νερό Χρήσης. Για τη θερμική αποθήκευση χρησιμοποιήθηκαν συστήματα ξηράς δόμησης-γυψοσανίδες Knauf Smartboard, που περιέχουν υλικά αλλαγής φάσης. Τα συστήματα αυτά αυξάνουν τη θερμοχωρητικότητα της ελαφριάς κατασκευής και εξομαλύνουν έτσι τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας, ειδικότερα τους θερινούς μήνες. Η χρήση των PCM στην κατοικία έρχεται ως συμπλήρωμα των άλλων ενεργητικών συστημάτων θέρμανσης και δροσισμού, συμβάλλοντας στην ορθολογική χρήση της θερμικής ενέργειας, με στόχο την εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και στην επίτευξη συνθηκών άνεσης. [77]

Προκειμένου να αξιοποιηθούν οι ιδιότητες της τοιχοποιίας με PCM και για περαιτέρω μείωση των ενεργειακών απωλειών (π.χ. λόγω κακής ρύθμισης των συστημάτων), ενσωματώθηκε στα συστήματα θέρμανσης/ψύξης δαπέδου και οροφής, το σύστημα δυναμικής διαχείρισης ενέργειας της UPONOR. Μέσω αυτού ελέγχονται οι θερμοκρασίες νερού σε σχέση με τις εσωτερικές συνθήκες χώρου, βελτιστοποιείται η απόδοση των συστημάτων και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μία επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας έως 12% συγκριτικά με ένα σύστημα ρυθμισμένο από άνθρωπο. [76]

Παρακάτω, απεικονίζονται δύο όψεις της κατοικίας.

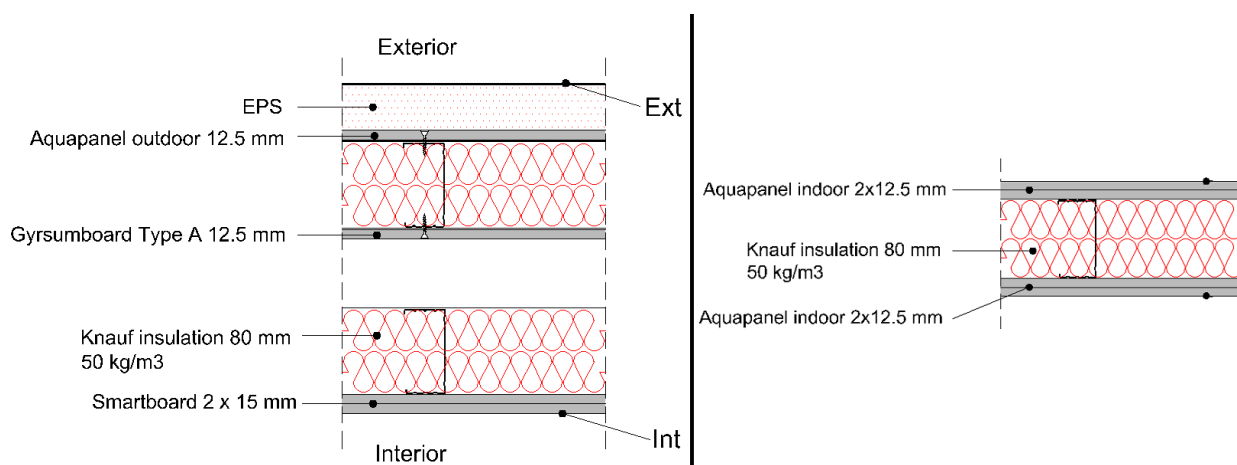


Εικόνα 4.2.1.2.1: Ελληνική κατοικία του μέλλοντος στην Αμφιλοχία

Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για μία πρότυπη διώροφη μονοκατοικία τυπικής διαρρύθμισης, δίπλα στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις της Knauf, στην Αμφιλοχία, χτισμένη σύμφωνα με τα ελληνικά πρότυπα μεσογειακής κατοικίας. Στο ισόγειο βρίσκονται η κουζίνα, το σαλόνι, ένας βοηθητικός χώρος, το WC και το μηχανοστάσιο που φιλοξενεί τον Η/Μ εξοπλισμό για τον κλιματισμό. Στον άνω όροφο βρίσκονται δύο υπνοδωμάτια και ένα λουτρό. Η συνολική επιφάνεια της κατοικίας είναι 151,23m², ενώ η θερμαινόμενη επιφάνεια δαπέδου είναι 128,42m².

Οι διαστάσεις της κατοικίας είναι 12,33m (πλάτος)× 9,90m (μήκος)× 9,90m (ύψος). Διαθέτει έναν υβριδικό χαλύβδινο σκελετό και η εξωτερική και εσωτερική τοιχοποιία είναι κατασκευασμένες εξ' ολοκλήρου με σύστημα ξηράς δόμησης με αντοχή σε σεισμικές δονήσεις και πυρκαγιά, με ταυτόχρονη θερμική και ακουστική μόνωση. Η θεμελίωση του κτίσματος είναι από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος. [78]

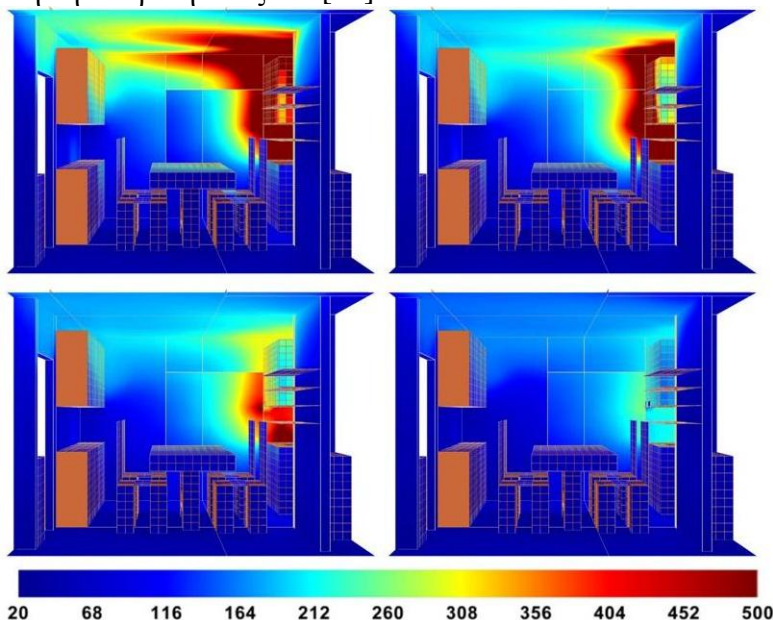
Πιο αναλυτικά και όσον αφορά την κατασκευή των τοίχων, οι εξωτερικοί τοίχοι της κατοικίας είναι πολυστρωματικοί, αποτελούμενοι από (ξεκινώντας από έξω προς τα μέσα) ένα στρώμα 50mm μόνωσης EPS 80, ένα πάνελ τσιμεντοσανίδας (Aquapanel) 12,5mm, ένα στρώμα 80mm μόνωσης πετροβάμβακα, μία γυψοσανίδα 12,5mm, ένα κενό 300mm (αφήνοντας χώρο για το μεταλλικό σκελετό και τις σωληνώσεις), ένα στρώμα 80mm μόνωσης πετροβάμβακα και τέλος δύο γυψοσανίδες με PCM 15mm ενωμένες μεταξύ τους. Η επένδυση των εξωτερικών τοίχων ολοκληρώθηκε με το σύστημα μόνωσης της Knauf που ονομάζεται «Thermoprosopsis». Αναφορικά με τη δομή των εσωτερικών τοίχων, αυτή είναι διαφορετική για κάθε δωμάτιο. Ο εσωτερικός τοίχος, ανάμεσα στο μηχανοστάσιο και στο σαλόνι, αποτελείται από δύο γυψοσανίδες με PCM 15mm, ένα στρώμα 80mm μόνωσης πετροβάμβακα και δύο γυψοσανίδες των 12,5mm. Ο εσωτερικός τοίχος μεταξύ μηχανοστασίου και κουζίνας αποτελείται από δύο τσιμεντοσανίδες (Aquapanel) των 12,5mm, ένα στρώμα 80mm μόνωσης πετροβάμβακα και άλλες δύο τσιμεντοσανίδες (Aquapanel) των 12,5mm, ενώ ο εσωτερικός τοίχος μεταξύ κουζίνας και βοηθητικού χώρου αποτελείται από δύο γυψοσανίδες με PCM 15mm, ένα στρώμα 80mm μόνωσης πετροβάμβακα και δύο τσιμεντοσανίδες (Aquapanel) 12,5mm. Τέλος, ο τοίχος ανάμεσα στο WC και στο βοηθητικό χώρο δομείται από δύο γυψοσανίδες με PCM 15mm, ένα στρώμα 80mm μόνωσης πετροβάμβακα και μία τσιμεντοσανίδα (Aquapanel) 12,5mm. Οι γυψοσανίδες με PCM 15mm, που χρησιμοποιήθηκαν τόσο στους εξωτερικούς όσο και στους εσωτερικούς τοίχους είναι τα γνωστά προϊόντα Knauf PCM Smartboard, που αναφέρθηκαν και παραπάνω. [78]



Εικόνα 4.2.1.2.2: Δομή εξωτερικού τοίχου (αριστερά), δομή εσωτερικού τοίχου (δεξιά) [78]

Για την κατοικία αυτή εξετάστηκε μεταξύ άλλων και η επίδραση των υλικών αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκαν σε μία πιθανή εξάπλωση πυρκαγιάς εντός του σπιτιού. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένας ευρέως αναγνωρισμένος κώδικας πρόβλεψης πυρκαγιάς (Fire Dynamics Simulator-FDS) για την προσομοίωση μιας πιθανής τυπικής φωτιάς εντός της ελληνικής κατοικίας του μέλλοντος. Ο κώδικας επεκτάθηκε προκειμένου να λαμβάνει υπόψη τα PCM και εφαρμόστηκε για τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών εξάπλωσης φωτιάς καθώς και για τη θερμική συμπεριφορά των δομικών υλικών. Έτσι, αριθμητικές προβλέψεις της χρονικής

εξέλιξης των ταχυτήτων αερίου και θερμοκρασιών των τοίχων, συγκεντρώσεις τοξικών αερίων και κίνηση καπνού στο εσωτερικό της οικίας ποσοτικοποίησαν την αναμενόμενη επίδραση των PCM στο κτίριο. Παρακάτω, φαίνεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας του τοίχου της κουζίνας (από PCM γυψοσανίδες) σε μία περίοδο 8 λεπτών, έτσι όπως παρουσιάζεται από το μοντέλο προσομοίωσης για μία φωτιά που ξεκίνησε από την ηλεκτρική κουζίνα. [79]



Εικόνα 4.2.1.2.3: Στιγμιότυπα της εξέλιξης θερμοκρασίας αερίου κατά τα πρώτα 8 λεπτά (βήμα 2 λεπτών) μιας υποθετικής πυρκαγιάς εντός του χώρου της κουζίνας της ελληνικής κατοικίας του μέλλοντος. [79]

Τέλος, η κατοικία αυτή μελετήθηκε με βάση τον Κ.Εν.Α.Κ για τις κλιματολογικές συνθήκες τις Ζώνης Β'. Η εξαιρετική επίδοση του κτιρίου οφείλεται στην πολύ καλή θερμομονωτική ικανότητα του συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης, ενώ έχει δοθεί παράλληλα ιδιαίτερη προσοχή στην εξάλειψη θερμογεφυρών. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι οι απαιτήσεις για θέρμανση είναι εξαιρετικά χαμηλές (χαμηλότερες από τις απαιτήσεις ενός παθητικού κτιρίου οι οποίες ανέρχονται σε 15kWh/m^2) συγκρινόμενες και με τις αντίστοιχες απαιτήσεις του κτιρίου αναφοράς. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και στην ψύξη, με μικρότερη διαφορά. [77]

4.2.1.3 PCM σε άλλα δομικά υλικά

Κάθε σύνθετο υλικό με PCM αποτελείται από δύο συστατικά: μία χημική, οργανική ή ανόργανη, ουσία που υποβάλλεται σε αλλαγή φάσης εντός ενός επιθυμητού θερμοκρασιακού εύρους και μία πορώδη δομή που δρα ως στεγανό για την ουσία που αποθηκεύει θερμότητα. Σε κτιριακά πλαίσια, καθαρά οργανικά ή ανόργανα PCM μπορούν να εμποτιστούν στην πορώδη δομή που φέρουν παραδοσιακά δομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα-τσιμέντο, τα τούβλα και το μάρμαρο. [80] Συνεπώς, μία άλλη μέθοδος εφαρμογής υλικών αλλαγής φάσης σε κτιριακές δομές είναι η ενσωμάτωση PCM στα παραπάνω δομικά υλικά, αυξάνοντας έτσι τη θερμική μάζα του κτιρίου. Βέβαια, κατά την επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης για ενσωμάτωση σε ένα δομικό υλικό θα πρέπει να εξετάζεται η συμβατότητα τους τόσο στην στερεή όσο και στην υγρή φάση. Ειδικά για την υγρή φάση θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι δε θα υπάρξει διαρροή του PCM από το εσωτερικό του δομικού

υλικού. Από πειραματικές μελέτες έχει προκύψει ότι η κατηγορία των παραφινών είναι συμβατή τόσο με το σκυρόδεμα όσο και με το γύψο και για το λόγο αυτό τις βρίσκουμε συχνά εμποτισμένες στα συγκεκριμένα δομικά υλικά.

4.2.1.3.1 PCM σε σκυρόδεμα-τσιμέντο

Οι Hawes et al., μελετώντας τη θερμική απόδοση των PCM σε διαφορετικούς τύπους σκυροδέματος, ανέφεραν ότι η τροποποίηση του σκυροδέματος μέσω διαφόρων τεχνικών ενσωμάτωσης PCM σε αυτό, συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στη θερμοχωρητικότητα. [48] Το 1989 πραγματοποιήθηκε η πρώτη ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης σε τσιμέντο από τους Hawes et al. εμβαπτίζοντας δοκίμια τσιμέντου σε υγρή δωδεκανόλη και βουτυλεστέρα. Το 2007 οι Cabeza et al. ενσωμάτωσαν μικροκάψουλες PCM σε τσιμέντο και κατασκεύασαν πρότυπα δωμάτια. Από τη μελέτη αυτή προέκυψε ότι τα δωμάτια από τσιμέντο με PCM είχαν αυξημένη θερμική αδράνεια σε σχέση με τα δωμάτια αναφοράς του ίδιου υλικού χωρίς PCM. Συγκεκριμένα, η μέγιστη θερμοκρασία στο εσωτερικό των δωματίων κατά τους θερινούς μήνες ήταν έως και 3°C χαμηλότερη απ' ό,τι στα δωμάτια αναφοράς. [34]

Το 2006, οι Castellon et al. μελέτησαν την επίδραση της ενσωμάτωσης PCM σε σκυρόδεμα στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας ενός κτιρίου. Χρησιμοποιώντας κόκκους από μικροενσωματωμένο PCM ως μέρος της σύστασης του σκυροδέματος, το υλικό αλλαγής φάσης ενσωματωνόταν απλά και αποτελεσματικά μέσα το δομικό υλικό. Συγκρίνοντας λοιπόν, ένα μικρό θάλαμο κατασκευασμένο από καθαρό σκυρόδεμα και ένα θάλαμο από το παραπάνω μίγμα, παρατήρησαν ότι ο θάλαμος με το μίγμα σκυροδέματος και PCM έπιασε τη μέγιστη θερμοκρασία δύο ώρες αργότερα απ' ό,τι ο άλλος με καθαρό σκυρόδεμα, δηλαδή έμεινε δροσερότερος για περισσότερη ώρα.

Ωστόσο, η παρουσία PCM στη σύσταση αυτού του σύνθετου υλικού(σκυρόδεμα και PCM) μειώνει σημαντικά την αντοχή του τσιμέντου. Το πρόβλημα αυτό μελέτησαν οι Cabeza et al., οι οποίοι δημιούργησαν ένα θάλαμο από ένα νέο καινοτόμο σκυρόδεμα με υλικό αλλαγής φάσης και έναν από καθαρό σκυρόδεμα. Μετά από 6 μήνες παρακολούθησης των δύο θαλάμων, απεδείχθη ότι η ύπαρξη υλικού αλλαγής φάσης δεν επέφερε καμία διαφορά στη μηχανική αντοχή των δύο θαλάμων. Οι Baetens et al. υποστήριξαν πως η ενίσχυση της θερμικής μάζας μέσω ενσωμάτωσης PCM στο τσιμέντο φαίνεται καλύτερη από τη χρήση γυψοσανίδων PCM. [48]

Την ενσωμάτωση καψουλών PCM σε σκυρόδεμα διερεύνησαν επίσης οι Bentz και Turpin το 2007. Η υψηλή θερμική μάζα του σκυροδέματος αποτελεί ένα πλεονέκτημα καθώς αποθηκεύει θερμότητα κατά τη διάρκεια της μέρας και την απελευθερώνει το βράδυ. Σε τροπικά κλίματα όμως, η νυχτερινή απελευθέρωση θερμότητας μπορεί να προκαλέσει ένα όχι και τόσο θερμικά άνετο περιβάλλον. Ως εκ τούτου, ενσωματώνοντας PCM σε σκυρόδεμα μπορεί να ρυθμιστεί η απορρόφηση θερμότητας και η θερμοκρασία του τοίχου να λαμβάνει τιμές θερμικής άνεσης. Έτσι, με τη χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης εξετάστηκαν τα αποτελέσματα που επιφέρουν μικροκάψουλες στεατικού βουτυλεστέρα και άλλων παραφινών εμποτισμένες σε σκυρόδεμα. Η μελέτη αυτή έδειξε μια ετήσια μείωση 30% στους κύκλους πήξης/τήξης με την προσθήκη υλικού αλλαγής φάσης σε σκυρόδεμα, για διάφορες περιοχές της Αμερικής, γεγονός που υπόσχεται ενίσχυση των θερμικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος μέσω της ενσωμάτωσης των PCM. [72]

Οι Castellon et al. μελέτησαν την ενσωμάτωση του Micronal® PCM σε σκυρόδεμα για ένα μικρό θάλαμο στην Ισπανία. Το PCM είχε σημείο τήξης 26°C και

ενθαλπία τήξης 110kJ/kg. Παρατήρησαν πως τα αποτελέσματα της παθητικής ψύξης από το PCM ήταν πιο έντονα με κλειστά τα παράθυρα κατά τη διάρκεια της μέρας και ανοιχτά κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ταυτόχρονα, παρατήρησαν μείωση των θερμοκρασιών κατά 4°C και χρονική μετατόπιση της μέγιστης θερμοκρασίας κατά 2 ώρες. [72]

4.2.1.3.2 PCM σε τούβλα

Η ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης σε τούβλα γίνεται είτε υπό μορφή σφαιρικής κάψουλας, είτε υπό μορφή κυλινδρικών σωλήνων.

Ο Alawadhi παρουσίασε μία θερμική ανάλυση ενός δισδιάστατου μοντέλου για ένα κτίριο από κοινά τούβλα με κυλινδρικές οπές, στις οποίες περιέχονταν PCM, για θερμό κλίμα. Σύμφωνα με τον συγγραφέα, σκοπός της ενσωμάτωσης PCM στα τούβλα είναι η μείωση της ροής θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον προς τον εσωτερικό χώρο, μέσω της απορρόφησης θερμικού κέρδους στο τούβλο, προτού εισέλθει θερμότητα στο κτίριο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τη νύχτα, η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια απελευθερώνεται σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Διερευνώντας την επίδραση διαφόρων σχεδιαστικών παραμέτρων, όπως η ποσότητα του PCM, ο τύπος και η τοποθέτηση του μέσα στο τούβλο, διαπίστωσε ότι μπορεί να επιτευχθεί μείωση ροής θερμότητας κατά 17,55% όταν εισαχθούν στην κεντρική γραμμή των τούβλων 3 κύλινδροι με PCM. [36]

Οι Zhang et al. χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο θερμικής αγωγιμότητας, αξιολόγησαν τη θερμική απόκριση ενός τοίχου από τούβλα με PCM κάτω από συνθήκες κυμαινόμενων εξωτερικών θερμοκρασιών. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η θερμοχωρητικότητα του τοίχου από τούβλα με υλικά αλλαγής φάσης ήταν υψηλότερη σε σχέση με έναν τοίχο από συμβατικά τούβλα. Παράλληλα, η ενσωμάτωση των PCM στα τούβλα ήταν ευεργετική στη θερμομόνωση, στη υστέρηση θερμοκρασίας και στη θερμική άνεση. [36]

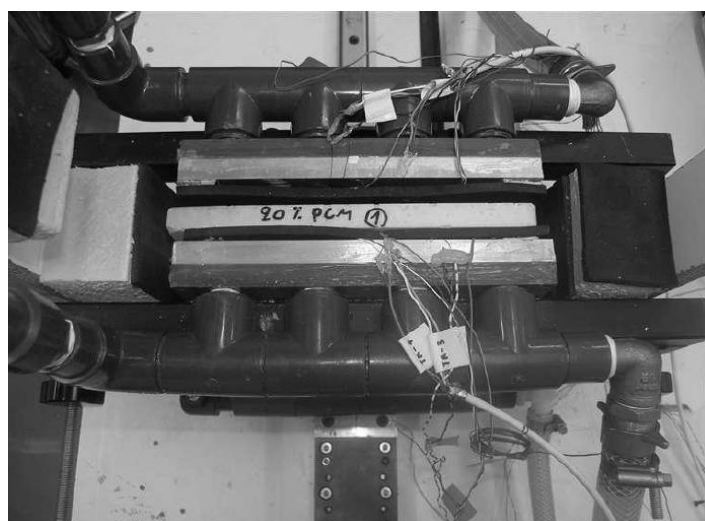
Οι Silva et al. διερεύνησαν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης παραφίνης σε μακροκάψουλες εντός ενός τυπικού πορτογαλικού τοίχου από τούβλα. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι η ενσωμάτωση PCM συμβάλλει στην εξασθένηση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων του εσωτερικού χώρου, μειώνοντας το θερμικό πλάτος από 5 σε 10°C και αυξάνοντας την χρονική καθυστέρηση περίπου σε 3 ώρες. Οι Lai και Chiang ασχολήθηκαν με την ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης σε κούφια θερμομονωτικά τούβλα και ανακάλυψαν ότι τα τούβλα με PCM προσέφεραν καλύτερο αποτέλεσμα μόνωσης κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν εκτίθονταν σε ηλιακή ακτινοβολία, συγκριτικά με τα ανεπεξέργαστα τούβλα και πιο συγκεκριμένα με μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία 35,5°C, η μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία ήταν 31,7°C. Επίσης, παρείχαν πιο αποτελεσματική διατήρηση εσωτερικής θερμότητας τη νύχτα. [36]



Εικόνα 4.2.1.3.2.1: Τούβλα με PCM σε μακροκάψουλες [36]

4.2.1.3.3 PCM σε μάρμαρο

Σε μελέτη που διεξήχθη από τους Ιωάννης Μανδηλάρας, Μαρία Φούντη, Μιχάλης Πατρώνης και Κωνσταντίνος Λασκαρίδης εξετάστηκε η δυνατότητα ενσωμάτωσης PCM σε πλακίδια μαρμάρου. Έτσι, με βάση εργαστηριακά αποτελέσματα των Founti et al. (2006), που αφορούν επικάλυψη πλακιδίων με μείγμα υλικών αλλαγής φάσης και ρητινών, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε βιομηχανία επεξεργασίας μαρμάρου στη Β. Ελλάδα στη Θάσο. Για τις βιομηχανικές δοκιμές επιλέχθηκε λευκό δολομιτικό μάρμαρο από την περιοχή «Λιμένας Θάσου», το οποίο διατίθεται στην αγορά με την εμπορική ονομασία «ΠΡΙΝΟΣ» και χρησιμοποιείται σήμερα στην Ελλάδα κυρίως για ορθομαρμαρώσεις (μεγάλη χρονική διάρκεια έκθεσης σε ηλιακή ακτινοβολία) καθώς και για άλλες χρήσεις σε μεγάλα κτίρια. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 11 δοκίμια διαστάσεων 20×20×3cm, το ένα εκ των οποίων αποτέλεσε το δοκίμιο αναφοράς και τα υπόλοιπα 10 επικαλύφθηκαν με μείγμα PCM (BASF Micronal DS 5001) και ρητίνης/πληρωτικού. Για την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς των νέων υλικών σε μεταβατικές συνθήκες σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε κατάλληλη πειραματική διάταξη. Από τη μελέτη αυτή διαπιστώθηκε η δυνατότητα χρήσης των υλικών που προέκυψαν για εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα. Η εξομάλυνση της ημερήσιας θερμοκρασιακής διακύμανσης καθιστά εφικτή τη μείωση του απαιτούμενου θερμικού φορτίου για ψύξη ή θέρμανση κατά το καλοκαίρι και το χειμώνα αντίστοιχα. Μάλιστα, από τα PCM που διατίθενται στην αγορά κατάλληλες για ενσωμάτωση σε πλακίδια μαρμάρου είναι οι μικροκάψουλες παραφίνης, καθώς προσφέρουν ευκολία ενσωμάτωσης, καλή θερμική αγωγιμότητα, αποφυγή διαρροής του υλικού αλλαγής φάσης και μία σειρά άλλων πλεονεκτημάτων. [34]



Εικόνα 4.2.1.3.3.1: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση θερμικής συμπεριφοράς πλακιδίων μαρμάρου με PCM [34]

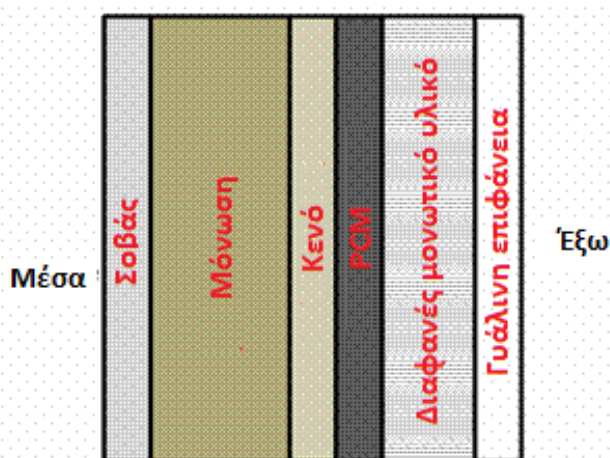
4.2.1.4 Τοίχος Trombe με PCM

Ένα άλλο παθητικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με PCM είναι οι ηλιακοί τοίχοι. Ουσιαστικά πρόκειται για τοίχους Trombe, των οποίων η λιθοδομή έχει αντικατασταθεί από υλικά αλλαγής φάσης.

Ο κλασικός τοίχος Trombe τοποθετείται στη νότια πλευρά ενός κτιρίου, είναι πλίνθινος και σε απόσταση 4 ιντσών μπροστά από την επιφάνειά του τοποθετείται ένα μονό ή διπλό στρώμα γυάλινης ή πλαστικής υαλοκατασκευής. Στο κενό αυτό μεταξύ τοίχου και υαλοκατασκευής δεσμεύεται η ηλιακή ενέργεια. Η εξωτερική

επιφάνεια του τοίχου είναι μαύρου χρώματος, προκειμένου να απορροφάται μεγάλο ποσό θερμότητας το οποίο στη συνέχεια αποθηκεύεται στη μάζα του. Η θερμική συνεισφορά του τοίχου προς το χώρο που είναι εγκατεστημένος, ολοκληρώνεται μέσα σε ένα χρονικό διάστημα ωρών. Έτσι, όταν η εσωτερική θερμοκρασία λάβει τιμή χαμηλότερη από αυτήν της επιφάνειας του τοίχου, αρχίζει να απελευθερώνεται θερμότητα στο χώρο. Η λειτουργία του τοίχου Trombe βασίζεται στην αξιοποίηση της αισθητής θερμότητας. Πολλοί μελετητές πρότειναν την τροποποίηση των τοίχων Trombe μέσω της ενσωμάτωσης υλικών αλλαγής φάσης, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη ενεργειακή αποθήκευση ανά μονάδα μάζας, δεδομένου ότι μέσω των PCM αξιοποιείται και η λανθάνουσα θερμότητα. Έτσι, προέκυψαν οι ηλιακοί τοίχοι.

Οι ηλιακοί τοίχοι αποτελούνται από έξι στρώματα. Ξεκινώντας από την εξωτερική του πλευρά, ο ηλιακός τοίχος φέρει μία γυάλινη επιφάνεια, η οποία ακολουθείται από διαφανές μονωτικό υλικό. Τα δύο αυτά στρώματα επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος να διέλθει, αποτρέποντας συγχρόνως τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Το τρίτο στρώμα είναι το υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο βρίσκεται εντός ενός διαφανούς πλαστικού δοχείου από πολυεστέρα και απορροφά κυρίως λανθάνουσα θερμότητα. Ακολουθεί ένα διάκενο από το οποίο διέρχεται και θερμαίνεται ο αέρας για τον αερισμό και οδηγείται στο χώρο. Τέλος, στην εσωτερική πλέον πλευρά του τοίχου συναντάται η μόνωση και κατόπιν ο σοβάς. Τα PCM που ενσωματώνονται συνήθως στους τοίχους Trombe είναι τα ένυδρα άλατα και οι υδρογονάνθρακες, ενώ πολλές φορές χρησιμοποιούνται ειδικά μεταλλικά πρόσθετα που ενισχύουν τη συνολική αγωγιμότητα και απόδοση. [81]



Εικόνα 4.2.1.4.1: Εσωτερική δομή ηλιακού τοίχου

Για να δοθεί μία καλύτερη εικόνα του τρόπου με τον οποίο η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας μέσω PCM βελτιώνει τη θερμική απόδοση ενός συνηθισμένου τοίχου Trombe, πραγματοποιήθηκε ένας υπολογισμός με δεδομένα χειμερινού κλίματος σε μία περιοχή της Β. Καρολίνας. Συγκεκριμένα, η ανάλυση αξιολόγησε τη μεταβατική θερμοκρασία δύο παραδοσιακών τοίχων Trombe από σκυρόδεμα, με πάχος 30cm και 10cm. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις τιμές ενός τοίχου ίδιας διαμόρφωσης, που όμως περιείχε 20% κατά βάρος παραφίνη ομοιογενώς αναμεμιγμένη με το σκυρόδεμα. [19]

Οι Castellon et al. διερεύνησαν, αν με την ενσωμάτωση PCM σε ένα τοίχο Trombe νοτίου προσανατολισμού, μπορούν να μειωθούν οι απαιτήσεις ψυκτικού και θερμικού φορτίου σε μεσογειακά κλίματα καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Οι Bourdeau et al.

εξέτασαν δύο ηλιακούς τοίχους με εξαένυδρο χλωριούχο ασβέστιο (σημείο τήξης 29°C) ως υλικό αλλαγής φάσης, καταλήγοντας πως ο τοίχος με PCM πάχους 8,1cm είχε ελαφρώς καλύτερη θερμική απόδοση από έναν απλό πλίνθινο τοίχο πάχους 40cm. [19] Οι Swet, Ghoneim et al. και Chandra et al. χρησιμοποίησαν, ως υλικό αλλαγής φάσης, δεκαένυδρο θειικό νάτριο (σημείο τήξης 32°C) σε ένα τοίχο Trombe νοτίου προσανατολισμού, ενώ διαπίστωσαν επίσης, πως τοίχος Trombe με PCM μικρότερου πάχους παρέχει πιο αποτελεσματική αποθήκευση θερμικής ενέργειας συγκρητικά με έναν κοινό πλίνθινο τοίχο. [82] Ο Knowler χρησιμοποίησε εμπορική παραφίνη αναμεμιγμένη με μεταλλικά πρόσθετα, ώστε να αυξήσει τη συνολική αγωγιμότητα και απόδοση ενός τοίχου Trombe. Οι Stritih και Novak παρουσίασαν ένα ηλιακό τοίχο για αερισμό κτιρίων, ο οποίος απορροφά ηλιακή ενέργεια στην παραφίνη μαύρου χρώματος που περιέχει (σημείο τήξης 25-30°C). Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιούνταν για θέρμανση του αέρα για τον αερισμό του σπιτιού και η απόδοση της απορρόφησης βρέθηκε 79%. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κατέδειξαν τόσο την επιρροή του στρώματος PCM στο ποσό αποθηκευμένης θερμότητας αισθητής ή λανθάνουσας μορφής, όσο και την επιρροή του σημείου τήξης του υλικού αλλαγής φάσης στην τελική θερμοκρασία του αέρα. Από την ανάλυση για την περίοδο θέρμανσης φάνηκε ότι το βέλτιστο πάχος του στρώματος PCM εντός του ηλιακού τοίχου είναι 50mm και η θερμοκρασία τήξης μόλις μερικούς βαθμούς πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου. [19]

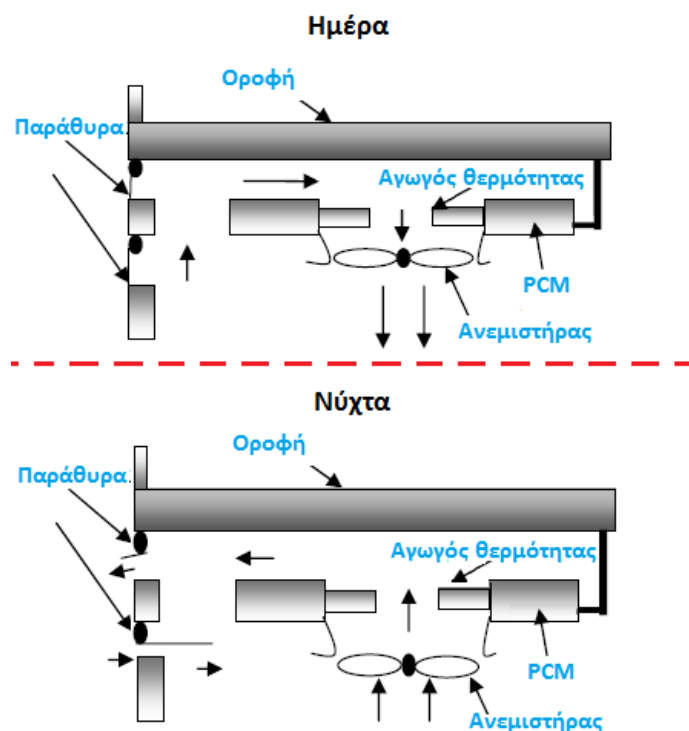
4.2.1.5 PCM σε ταβάνια/οροφές

Κατά τα τελευταία χρόνια, έχουν διεξαχθεί διάφορες έρευνες για παθητική ηλιακή θέρμανση μέσω ενσωμάτωσης υλικών αλλαγής φάσης σε ταβάνια και οροφές. Μία ηλιακή οροφή λανθάνουσας θερμότητας εξετάστηκε σε ένα χωριό στο Περού, προκειμένου να ελεγχθεί η συμβολή της στη διατήρηση σχεδόν ισοθερμοκρασιακών συνθηκών εντός ενός εκκολαπτηρίου πτηνών. Το εκκολαπτήριο χωρίστηκε σε δύο συνδεδεμένα μεταξύ τους τμήματα, μία αυλή και μία θερμαινόμενη περίφραξη. Δύο ημικυλινδρικές δεξαμενές με το πάνω μέρος τους καλυμμένο με γυαλί, περιείχαν η καθεμία 42kg παραφίνη και ήταν τοποθετημένες κάτω από μία γυάλινη αεροστεγή οροφή. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας ανάμεσα στους 22 και 30°C, τοποθετήθηκε μόνωση από πολουρεθάνη πάχους 0,1m μεταξύ γυάλινης οροφής και των δεξαμενών. Η παραφίνη κόκκινου χρώματος και με σημείο τήξης περίπου 58-60°C, ανέλαβε τη συλλογή και αποθήκευση ηλιακής ακτινοβολίας. [83]

Οι Guthertz και Schiler ανέπτυξαν ένα παθητικό σύστημα θέρμανσης χώρου που περιελάμβανε PCM ενσωματωμένο σε ταβάνι. Για το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκαν ηλιακά κάτοπτρα, που κατηύθυναν την εισερχόμενη από τα παράθυρα ηλιακή ενέργεια, πάνω στην επιφάνεια των PCM. Το βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος ήταν, ότι έδινε τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας σε μεγάλη επιφάνεια, χωρίς όμως να απαιτείται μεγάλος όγκος αποθηκευτικού μέσου, όπως συμβαίνει στην περίπτωση συστημάτων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Η διερεύνηση της χρήσης αυτού του παθητικού συστήματος έδειξε πως υπάρχει δυνατότητα ανάκτησης του 17-36% των θερμικών απωλειών από το αρχικό ηλιακό κέρδος. [19]

Οι Turnpenney et al. ανέπτυξαν ένα άλλο παθητικό σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, αποτελούμενο από αγωγούς θερμότητας, ενσωματωμένους σε PCM. Το σύστημα αυτό αποθήκευε δροσιά κατά τη διάρκεια της νύχτας και την απελευθέρωνε κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η διαστασιολόγηση της πειραματικής

διάταξης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός μονοδιάστατου μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της μεταφοράς θερμότητας από τον αέρα στο PCM. [19]



Εικόνα 4.2.1.5.1: Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης των Turpenney et al.

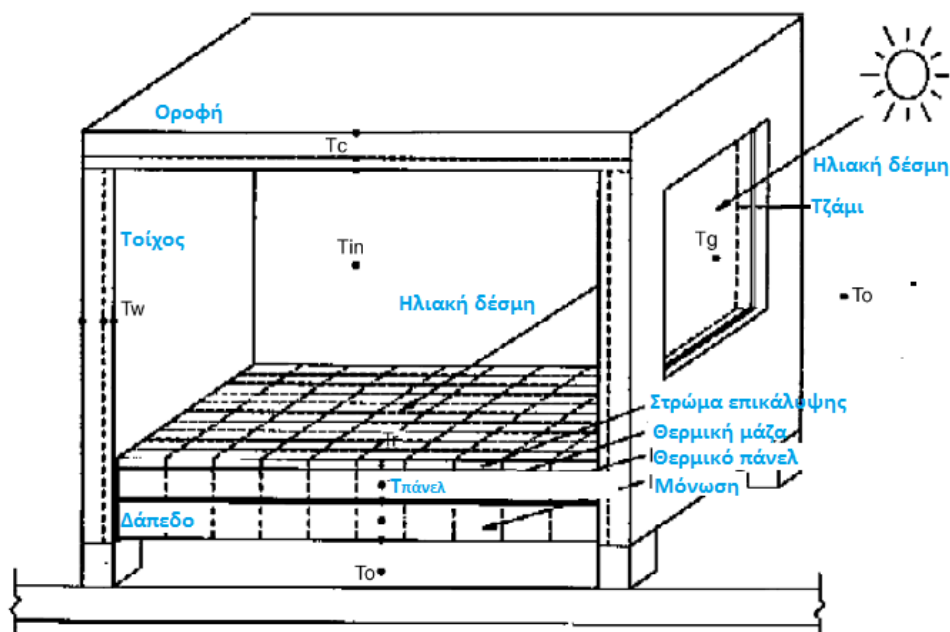
Οι Pasupathy και Velraj ασχολήθηκαν με την επίδραση ενός PCM πάνελ στην οροφή ενός κτιρίου, μελετώντας παράγοντες όπως η τοποθέτησή του και το πάχος αυτού. Έτσι, πρότειναν την ενσωμάτωση ενός διπλού στρώματος στην οροφή, η οποία περιορίζει τη θερμοκρασιακή διακύμανση του αέρα στον εσωτερικό χώρο και δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε όλες τις εποχές. [48]

Επίσης, προσφάτως αναδείχθηκαν νέα σημαντικά προϊόντα στη μορφή πλακιδίων οροφής, γνωστά ως RACUS. [70] Πρόκειται για ένα καινοτόμο και ευέλικτο παθητικό σύστημα οροφής που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε από την εταιρεία Datum Phase Change Materials Ltd και μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε νέα κατασκευαστικά έργα, είτε κατά την ανακαίνιση ήδη υφιστάμενων κτιρίων. Στα πλακάκια οροφής RACUS είναι ενσωματωμένο Micronal® PCM της εταιρείας BASF. [84] Δεδομένου ότι τα πλακάκια δεν αποτελούν μόνιμο εξοπλισμό εντός του πλέγματος οροφής, μπορούν να μετακινηθούν σε περιοχές του κτιρίου, όπου εντοπίζονται σημαντικά θερμικά κέρδη, όπως είναι σημεία με πολλούς υαλοπίνακες, ή πάνω από μονάδες ψύξης, όπου παράγονται υψηλά θερμικά κέρδη από τον κινητήρα, ή ακόμα και σε αίθουσες συσκέψεων. [85] Ένα τέτοιο σύστημα εγκαταστάθηκε σε δύο αίθουσες συνεδριάσεων του Τμήματος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (DECC) στο Λονδίνο. [84]

4.2.1.6 PCM σε δάπεδα

Τα δάπεδα είναι ένα ακόμα σημαντικό μέρος του κτιρίου και ως εκ τούτου έχουν γίνει προσπάθειες για κτιριακή θέρμανση και ψύξη μέσω αυτού. Οι Athienities και Chen διερεύνησαν το μεταβατικό φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας σε ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης. Ασχολήθηκαν με την επίδραση της επένδυσης του δαπέδου και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην κατανομή θερμοκρασίας δαπέδου

και στην ενεργειακή κατανάλωση. Χαλιά πλήρους ή μερικής κάλυψης, καθώς επίσης και επένδυση δαπέδου από σκληρό ξύλο πάνω από σκυρόδεμα ή από μίγμα σκυροδέματος-γύψου εξετάστηκαν ως μέσα θερμικής αποθήκευσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα και προσομοιώσεις για ένα υπαίθριο θάλαμο δοκιμών, αποκαλύπτουν ότι μία δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει στην επιφάνεια πρόσπτωσής της, τοπική θερμοκρασία επιφάνειας δαπέδου 8°C μεγαλύτερη από ότι στην σκιασμένη περιοχή. Η κάλυψη με χαλιά αυξάνει περαιτέρω αυτή τη θερμοκρασιακή διαφορά στους 15°C . Επιπλέον, έχει βρεθεί ότι με την αποθήκευση θερμότητας στη θερμική μάζα του δαπέδου, μειώνεται σημαντικά η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση (30% ή περισσότερο). [82]



Εικόνα 4.2.1.6.1: Σχηματική απεικόνιση δοκιμαστικού θαλάμου Athienities και Chen [82]

Οι Xu et al. χρησιμοποίησε ένα δάπεδο με ενσωματωμένο PCM σε παθητικά ηλιακά κτίρια και ανέπτυξε ένα μοντέλο που αναλύει την επιρροή στη θερμική απόδοση ποικίλων παραγόντων, όπως το πάχος του στρώματος PCM, η θερμοκρασία πήξης, η θερμότητα τήξης και η θερμική αγωγιμότητα του PCM. Οι ίδιοι απέδειξαν, ότι η θερμότητα τήξης και η θερμική αγωγιμότητα του υλικού αλλαγής φάσης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 120kJ/kg και $0,5\text{W/mK}$ αντίστοιχα και το πάχος της πλάκας PCM δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 20mm . [48]

Οι Κ. Αντωνόπουλος, Μ. Σταματιάδου και Μ. Φούντη εξέτασαν τη δυνατότητα εξοικονόμησης θερμικής ενέργειας από την τοποθέτηση μαρμάρινων πλακιδίων, με ενσωματωμένο PCM στη μάζα τους, στο δάπεδο ενός τυπικού ηλιακού αίθριου στην Αθήνα. Αυτός ο τύπος εφαρμογής αναμένεται να μειώσει την ετήσια κατανάλωση θέρμανσης. Στην μελέτη αυτή εξετάστηκαν τρία διαφορετικά είδη πλακιδίων: ένα συμβατικό και δύο που περιείχαν 10% και 20% PCM στη μάζα τους, ενώ η ανάλυση της εξοικονόμησης ενέργειας έγινε με τη χρήση της γνωστής μεθόδου SLR (Solar Load Ratio), προσαρμοσμένη να περιλαμβάνει την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Για τη δημιουργία του ηλιακού αίθριου χρησιμοποιήθηκαν διπλά τζάμια νοτίου προσανατολισμού για μέγιστο ηλιακό κέρδος κατά τους χειμερινούς μήνες. Οι βασικές διαστάσεις τους συστήματος είναι ο όγκος του κτιρίου (350m^3), η επιφάνεια των τζαμιών ($32,7\text{m}^2$) και η επιφάνεια του δαπέδου του ηλιακού χώρου ($32,2\text{m}^2$). Υπολογίστηκε ότι υπάρχει μία αύξηση της ηλιακής εξοικονόμησης, λόγω της

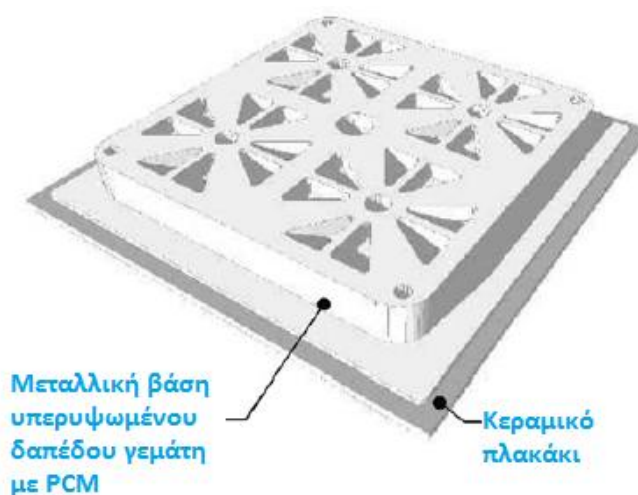
προσθήκης του υλικού αλλαγής φάσης, περίπου 1,85% για τα πλακάκια με 10% PCM στη μάζα τους και περίπου 3,75% για τα πλακάκια με 20% PCM στη μάζα τους. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η προσθήκη αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας στα δομικά στοιχεία μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στα θερμικά φορτία. [86]

Στο διαγωνισμό American Solar Decathlon 2009, η ομάδα του Οντάριο από τον Καναδά, σχεδίασε ένα σύστημα που περιλαμβάνει PCM σε μακροκάψουλες εντός ενός στρώματος δαπέδου, το οποίο βρίσκεται κάτω από ξύλινο πάτωμα. Η καναδική συμμετοχή χρησιμοποίησε ένα εμπορικό προϊόν PCM, το DELTA-COOL 24, που αποτελείται από ένυδρο άλας ενσωματωμένο σε ένα πάνελ από πολυπροπυλένιο πάχους 15mm. Το υλικό αλλαγής φάσης είναι κατασκευασμένο να τήκεται στους 24°C και να στερεοποιείται στους 22°C, ενώ κάθε πάνελ έχει θερμοχωρητικότητα 62,6kWh κατά προσέγγιση. Στο διαγωνιζόμενο αυτό σπίτι εγκαταστάθηκαν σε επιφάνεια 62,1m² τέτοια PCM πάνελ, με ενθαλπία τήξης 158kJ/kg. Η ομάδα εξόπλισε το σπίτι με αυτόματο σύστημα εξωτερικών ρολών παραθύρων που ανταποκρίνονται ενεργά στις μεταβαλλόμενες εξωτερικές συνθήκες. Όταν απαιτείται θέρμανση του εσωτερικού χώρου, τα ρολά μαζεύονται, το δωμάτιο θερμαίνεται και το PCM απορροφά θερμική ενέργεια απευθείας από το ηλιακό φως που πέφτει στο πάτωμα και από την περίσσεια θερμότητας εντός του σπιτιού, προκειμένου να απελευθερώσει την αποθηκευμένη θερμότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Διαφορετικά, αν απαιτείται δροσισμός του χώρου, κατά τη διάρκεια της μέρας, τα ρολά εμποδίζουν αυτόματα την ηλιακή ακτινοβολία, προτού φτάσει στο τζάμι, εξαλείφοντας τα ανεπιθύμητα θερμικά κέρδη και το υλικό αλλαγής φάσης μειώνει τα ψυκτικά φορτία αιχμής απομακρύνοντας την περίσσεια θερμότητας. Έτσι, κατά τη διάρκεια της νύχτας, το σύστημα εξαναγκασμένου αέρα για αερισμό του χώρου ενεργοποιείται, επιτρέποντας στο PCM να απελευθερώσει την αποθηκευμένη θερμότητα στον ψυχρό βραδινό αέρα. Σε αυτές τις δύο καταστάσεις λειτουργίας, τα ρολά συμβάλλουν στην διατήρηση της εσωτερικής θερμικής άνεσης, αλλάζοντας τις γωνίες σε παράλληλη ή κάθετη διεύθυνση με τις ακτίνες του ήλιου, ανάλογα τις εκάστοτε ανάγκες. Από προσομοιώσεις με το πρόγραμμα ESP-r, που διεξήγαγε η ομάδα, φάνηκε μία μείωση της συνολικής ενεργειακής ζήτησης για κλιματισμό χώρου κατοικίας από 2800kWh/yr σε λιγότερο από 2000kWh/yr μέσω της χρησιμοποίησης PCM στο δάπεδο. Η προσομοίωση της εφαρμογής έδειξε επίσης πως η μείωση της ενεργειακής ζήτησης αφορά κυρίως τη θέρμανση της οικίας, έχοντας μία μικρή επιρροή στο σπίτι κατά τη διάρκεια των περιόδων ψύξης. [49] Παρακάτω, φαίνεται φωτογραφία από το σύστημα δαπέδου του διαγωνιζόμενου σπιτιού από την ομάδα του Οντάριο.



Εικόνα 4.2.1.6.2: Πάνελ από πολυπροπυλένιο με ενσωματωμένο PCM εντός ξύλινου δαπέδου (ONTARIO BC)

Το 2005, το Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Μαδρίτης, συμμετείχε στο διαγωνιστικό πρόγραμμα American Solar Decathlon. Η ισπανική ομάδα ανέπτυξε ένα σύστημα υπερυψωμένου δαπέδου γεμάτο με PCM, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν παθητικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας κυρίως για περιόδους θέρμανσης. Πιο αναλυτικά, τα κομμάτια, που εφαρμόστηκαν για το δεδομένο σύστημα, ήταν κεραμικά πλακάκια σκούρου γκρι χρώματος, που στο κάτω μέρος τους διέθεταν ένα μεταλλικό δοχείο, γεμάτο με εύτηκτο μίγμα παραφίνης σημείου τήξης 23°C. Το χειμώνα, η μεγάλη γυάλινη πρόσοψη νοτίου προσανατολισμού επιτρέπει την εκμετάλλευση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και το σκούρο χρώμα στα πλακάκια εξασφαλίζει μέγιστο θερμικό κέρδος. Μετά τη λήξη του διαγωνισμού, αυτή η ομάδα ανέπτυξε ένα νέο PCM πλακάκι δαπέδου και διεξήγαγε μια συγκριτική μελέτη μεταξύ παρόμοιων πλακιδίων δαπέδου με και χωρίς υλικό αλλαγής φάσης στο σπίτι που δημιούργησε κατά την περίοδο θέρμανσης. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν τη δυνατότητα θερμοκρασιακής ρύθμισης μέσω αυτού του συστήματος και ότι η επιφάνεια του πλακιδίου με PCM έφτασε τιμές μεταξύ 1,5 και 2°C πάνω από τη θερμοκρασία του πλακιδίου χωρίς PCM. [49]



Εικόνα 4.2.1.6.3: Κεραμικό πλακάκι δαπέδου που εφαρμόστηκε στο σπίτι της διαγωνιζόμενης ισπανικής ομάδας το 2005 [49]

Άλλες έρευνες με αντικείμενο πλακάκια δαπέδου με PCM έγιναν από τον Hittle, ο οποίος ασχολήθηκε με τη δημιουργία ενός πλακιδίου με θραύσματα χαλαζία και σκόνη, πολυεστερική ρητίνη και ενσωματωμένη παραφίνη. Η αριθμητική μελέτη για το Denver στο Κολοράντο, έδειξε μία μείωση πάνω από 20% του ετήσιου θερμικού φορτίου με τη χρήση πλακιδίων δαπέδου πάχους 20mm. Οι Takeda et al. πραγματοποίησαν πείραμα με υπερυψωμένο δάπεδο με PCM σε ένα σύστημα παροχής κλιματισμού και βρήκαν ότι η αποθηκευμένη θερμότητα τη νύχτα ήταν 2,38MJ/m² συνολικά που φτάνει σχεδόν το ημερήσιο φορτίο ψύξης. Αυτό επιτρέπει την πλήρη μετατόπιση του φορτίου κατά τη νύχτα και η θερμοκρασία της επιφάνειας παραμένει πάντα 1-3°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του δωματίου. [49]

4.2.1.7 PCM σε παράθυρα

Ένα άλλο δομικό στοιχείο στο οποίο μπορεί να γίνει εφαρμογή των PCM είναι τα παράθυρα. Μέσω των παραθύρων μεταφέρονται μεγάλα ποσά θερμότητας και ως εκ τούτου συντελούν σε ένα μεγάλο ποσοστό στην ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη των χώρων. Με την ενσωμάτωση λοιπόν υλικών αλλαγής φάσης στα παράθυρα, μπορούν να περιοριστούν οι θερμικές απώλειες και να μειωθεί η ενεργειακή κατανάλωση, καθιστώντας έτσι αυτό το δομικό στοιχείο ενεργειακά αποδοτικό.

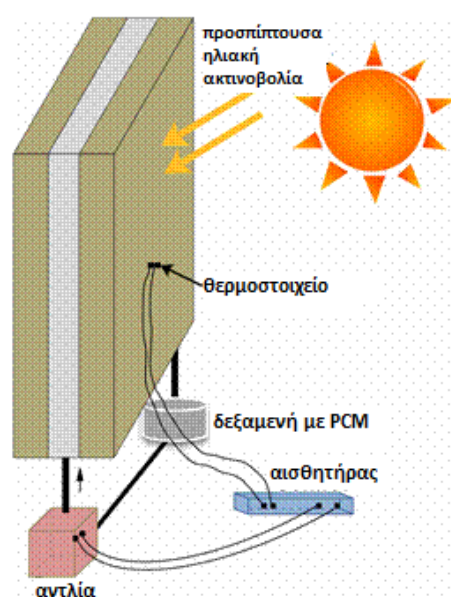
Έτσι, PCM συναντάμε ενσωματωμένα σε παραθυρόφυλλα τα οποία τοποθετούνται εξωτερικά της επιφάνειας του παραθύρου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι γρίλιες παραμένουν ανοιχτές με την εξωτερική τους επιφάνεια εκτεθειμένη σε ηλιακή ακτινοβολία. Το υλικό αλλαγής φάσης που περιέχουν απορροφά θερμότητα και έτσι λιώνει. Τη νύχτα, οι γρίλιες κλείνουν και μέσω του παραθύρου, η αποθηκευμένη θερμότητα μεταφέρεται στον εσωτερικό χώρο. Αυτό το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας παρουσιάστηκε από τον Harald Mehling στο 8^ο Expert Meeting and Work Shop στο Kizkalesi στην Τουρκία με θέμα «Innovative PCM-Technologies». Σύμφωνα με τον Mehling, η χρήση παντζουριών με PCM στα παράθυρα μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία δωματίου κατά 2°C. [19] Ένα τέτοιο σύστημα ηλιοπροστασίας κατασκευάστηκε από τον Warema, τον μεγαλύτερο κατασκευαστή συστημάτων ηλιοπροστασίας στη Γερμανία. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα αυτό ήταν το Delta®-Cool 28 της εταιρείας Dörken, ένα ένυδρο άλας με περιοχή τήξης μεταξύ 26 και 30°C και ενθαλπία τήξης 188J/g. [87]



Εικόνα 4.2.1.7.1: Κατακόρυφες γρίλιες με ένυδρο άλας (αριστερά) και οριζόντιες γρίλιες με PCM (δεξιά)

Οι Weinlader et al. παρουσίασαν ένα άλλο είδος ενεργειακού παραθύρου, το οποίο αποτελείται από δύο υαλοπίνακες και ένα PCM τοποθετημένο στο μεταξύ τους χώρο. Συγκριτικά με ένα διπλό υαλοπίνακα χωρίς υλικό αλλαγής φάσης, η τοποθέτηση αυτού του ενεργειακού παραθύρου σε προσόψεις κτιρίων νότιου προσανατολισμού μειώνει κατά 30% της θερμικές απώλειες και κατά 50% τα θερμικά κέρδη ηλιακής ενέργειας του κτιρίου, πράγμα πολύ σημαντικό για την θερμική άνεση στο εσωτερικό του κτιρίου. [88]

Οι Ismail et al. το 2001, πρότειναν ένα άλλο είδος ενεργειακού παραθύρου με μία κινούμενη «κουρτίνα» από PCM. Το συγκεκριμένο παράθυρο αποτελείται από δύο γυάλινες επιφάνειες, μεταξύ των οποίων υπάρχει κενό και από ένα αεραγωγό στην πάνω γωνία. Τόσο η βάση όσο και οι πλευρές του παραθύρου είναι σφραγισμένες, με εξαίρεση δύο τρύπες στη βάση αυτού, οι οποίες συνδέονται μέσω πλαστικού αγωγού με μία αντλία και μία δεξαμενή γεμάτη με υλικό αλλαγής φάσης. Η αντλία συνδέεται και αυτή με τη δεξαμενή, που περιέχει το PCM σε υγρή μορφή και η λειτουργία της ελέγχεται από έναν αισθητήρα θερμοκρασίας. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας φτάσει μία προκαθορισμένη τιμή, τότε η αντλία ενεργοποιείται και μέσω αυτής ρέει υγρό PCM που γεμίζει το διάκενο μεταξύ των δύο γυάλινων επιφανειών. Λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας που επικρατεί στην εξωτερική επιφάνεια, το υλικό αλλαγής φάσης αρχίζει να στερεοποιείται και με την πάροδο του χρόνου το στερεό στρώμα που δημιουργεί αυξάνει σε πάχος. Μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία στερεοποίησης του PCM, η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου παραμένει σταθερή. Για να λειτουργήσει σωστά αυτό το σύστημα, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να μειωθεί η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου, θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί κατάλληλα και να εξασφαλίζεται πως η εξωτερική θερμοκρασία θα αρχίσει και πάλι να αυξάνεται, προτού στερεοποιηθεί πλήρως το υλικό αλλαγής φάσης. Το παραπάνω σύστημα θεωρείται βιώσιμο και θερμικά αποδοτικό. Η πλήρωση του διακένου με PCM συντελεί στο φιλτράρισμα της θερμικής ακτινοβολίας και μειώνει τις θερμικές απώλειες, αφού το μεγαλύτερο μέρος της μεταφερόμενης ενέργειας απορροφάται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Τέλος, έχει βρεθεί ότι η χρήση χρωματιστού PCM και ειδικότερα πράσινου χρώματος, μειώνει ακόμα περισσότερο τις θερμικές απώλειες. [81] Παρακάτω φαίνεται η πλήρης διάταξη του παραθύρου.



Εικόνα 4.2.1.7.2: Σχηματική απεικόνιση ενεργειακά αποδοτικού παραθύρου με PCM

Εκτός από το Delta®-Cool 28, ένα άλλο προϊόν που διατίθεται στην αγορά και μπορεί να ενταχθεί στην κατηγορία παραθύρων με PCM είναι το GLASSX, ένα σύστημα υαλοπινάκων, εντός των οποίων είναι ενσωματωμένο εξανένυδρο χλωριούχο ασβέστιο και χρησιμοποιείται κυρίως για θέρμανση, χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η δυνατότητα εφαρμογής του για ψύξη δωματίου. Ο κατασκευαστής του ισχυρίζεται πως η εφαρμογή του μπορεί να προκαλέσει μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά 7°C τη θερινή περίοδο, ενώ από τη χρήση του ίδιου προϊόντος αναμένεται πάνω

από 70% εξοικονόμηση σε ενέργεια ψύξης και 6% σε θερμικά φορτία. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από πολλά στρώματα: Ένα στρώμα PCM ευρισκόμενο στην πλευρά που βλέπει στον εσωτερικό χώρο απορροφά θερμότητα από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Πολλαπλά τζάμια στην πρόσοψη αποτρέπουν τις θερμικές απώλειες και το πρισματικό τζάμι, που είναι τοποθετημένο στα κενά, επιτρέπει στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία να περάσει μόνο όταν η γωνία ακτινοβολίας είναι μικρή (δηλαδή το χειμώνα), προστατεύοντας με αυτόν τον τρόπο τον εσωτερικό χώρο από την υπερθέρμανση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Το σύστημα αυτό έχει ήδη εγκατασταθεί σε ένα μεγάλο αριθμό κτιρίων σε Ελβετία και Γερμανία με πολύ θετικά αποτελέσματα. [89] Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η διαδικασία αλλαγής φάσης και μία από τις πολλές κτιριακές εφαρμογές του προϊόντος GLASSX Crystal.



Εικόνα 4.2.1.7.3: GLASSX Crystal σε υγρή φάση, κατά την αλλαγή φάσης και σε στερεή φάση (από πάνω αριστερά μέχρι πάνω δεξιά) και εφαρμογές του GLASSX Crystal στο Centre professionnel στην Ελβετία (κάτω) [90]

4.2.1.8 PCM σε μονωτικά υλικά

Κατά την τελευταία δεκαετία, έχουν γίνει μελέτες όσον αφορά την ενίσχυση μονωτικών υλικών με PCM και συγκεκριμένα του μονωτικού αφρού πολυουρεθάνης (PU-foam) και της μόνωσης κυτταρίνης. Ο αφρός πολυουρεθάνης με PCM συνήθως τοποθετούνταν σε δύο στρώματα των 6mm μεταξύ τριών φύλλων αλουμινίου και με σημείο τήξης του υλικού αλλαγής φάσης στους 25,5°C και μέγιστη ενθαλπία 140kJ/kg. Από δοκιμή που έγινε πάνω στο συγκεκριμένο μονωτικό υλικό προέκυψε ότι απαιτούνται τρεις ώρες για την πλήρη φόρτιση του PCM. Συγκρίνοντας τα παραδοσιακά μονωτικά υλικά με τον ενισχυμένο με υλικό αλλαγής φάσης αφρό πολυουρεθάνης, φάνηκε ότι ο δεύτερος παρέχει τη δυνατότητα μείωσης κατά 40% του ψυκτικού φορτίου σε ώρες αιχμής. [30]

Ένα ακόμα θερμομονωτικό υλικό ενισχυμένο με PCM, που έχει αναπτυχθεί, είναι η μόνωση κυτταρίνης με παραφίνη. Μικροκάψουλες διαμέτρου 2-20μm που περιέχουν παραφίνη σημείου τήξης 25,8°C παρήχθησαν μέσω μιας νέας τεχνολογίας

μικροενσωμάτωσης, η οποία συγκρατεί το PCM μέσα σε ένα σκληρό ακρυλικό πολυμερές κέλυφος. Δεδομένου ότι η παραγωγή μόνωσης περιλαμβάνει ήδη την προσθήκη ξηρής χημικής ουσίας, η προσθήκη ενός ξηρού υλικού αλλαγής φάσης δεν απαιτεί τροποποιήσεις στις διαδικασίες κατασκευής και συσκευασίας. Έχει παρατηρηθεί μέσα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, ότι ποσότητες PCM μεγαλύτερες από 10%, σχηματίζουν συστάδες σφαιριδίων μεταξύ των ινών κυτταρίνης. Η δομή της ίνας της μόνωσης κυτταρίνης είναι ικανή να υποστηρίξει την προσθήκη πάνω από 40% κατά βάρος μικροκαψουλών PCM χωρίς διαχωρισμό. Έχει διεξαχθεί μία σειρά μετρήσεων θερμικής αγωγιμότητας, μέσω συσκευής σταθερής ροής θερμότητας, σε δείγματα πάχους 5cm μόνωσης κυτταρίνης ενισχυμένης με υλικό αλλαγής φάσης. Οι δοκιμές έδειξαν ότι προσθέτοντας πάνω από 30% PCM σε μικροκάψουλες δεν επιφέρει αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης κυτταρίνης. [91]

Ερευνητές από το κέντρο ενεργειακών ερευνών Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems, που βρίσκεται στη Βοστώνη, προσδιόρισαν τα επίπεδα κόστους, στα οποία μπορούν τα υλικά αλλαγής φάσης να γίνουν οικονομικά ανταγωνιστικά σε σχέση με τις συμβατικές θερμομονώσεις κτιρίων. Η ομάδα μελέτης πραγματοποίησε αριθμητικές παραμετρικές αναλύσεις αποκλειστικά για μίγματα μόνωσης. Ειδικότερα, χρησιμοποίησε μία σειρά μονοδιάστατων δυναμικών προσομοιώσεων με ημιτονοειδή προφίλ εξωτερικής θερμοκρασίας, ώστε να παράγει δεδομένα μεταβατικής ροής θερμότητας για διαφορετικές διαμορφώσεις κτιριακής μόνωσης που περιέχουν PCM. Τα χαρακτηριστικά θερμικής απόδοσης που προέκυψαν για συνδυασμούς θερμικών μονώσεων και οργανικών υλικών αλλαγής φάσης έδειξαν μια σημαντική δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας σε τέτοια μίγματα. Μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν δύο διαφορετικά πάχη ενισχυμένων μονώσεων με PCM: ένα τοίχωμα πάχους 0,14m και μία διαμόρφωση δαπέδου σοφίτας πάχους 0,3m. Από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας, το λεπτότερο τοίχωμα (0,14m), που περιλάμβανε μίγμα μόνωσης και υλικού αλλαγής φάσης, είχε σαν αποτέλεσμα μικρότερη μείωση σε ψυκτικά φορτία (από τρεις έως πέντε φορές) απ' ό,τι το παχύτερο (0,3m). Συγκρίνοντας τις τιμές θερμικής ροής, αποδεικνύεται ότι η ενισχυμένη με PCM μόνωση στο λεπτότερο τοίχωμα, που εκτίθεται σε κυκλικές εξωτερικές θερμοκρασίες, μειώνει τις ροές θερμότητας κατά τις ώρες αιχμής ψύξης και μετατοπίζει σε μεταγενέστερο χρόνο τη μέγιστη ροή θερμότητας. Η ομάδα έρευνας παρατήρησε τις ίδιες επιπτώσεις στο παχύτερο στρώμα μόνωσης (μόνωση δαπέδου σοφίτας), όμως αυτή η περίπτωση μόνωσης οδήγησε επίσης σε σημαντική μείωση του συνολικού φορτίου. Επιπρόσθετα, το παχύτερο στρώμα παρουσίασε μία ιδιαίτερος μεγαλύτερη χρονική μετατόπιση της μέγιστης ροής θερμότητας (φθάνοντας τις 11 ώρες) και μία κατά προσέγγιση τετραπλάσια μείωση του ψυκτικού φορτίου κατά τις ώρες αιχμής συγκριτικά με το λεπτότερο στρώμα. [92]

4.2.2 Ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας

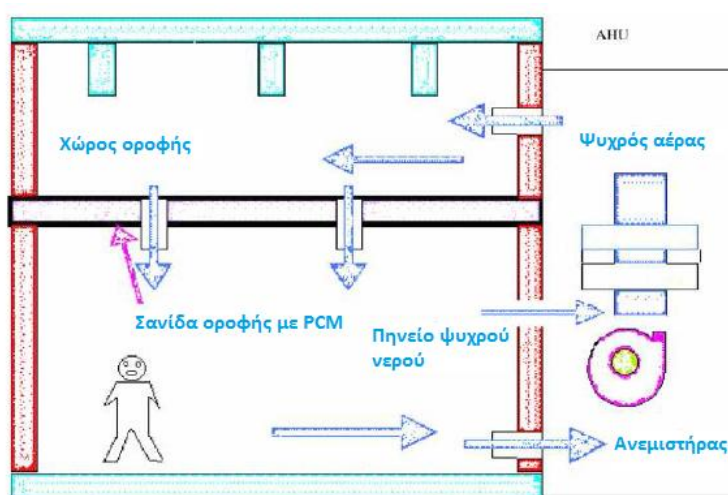
Ένα πρόβλημα που παρουσιάζει η ενσωμάτωση PCM στο κτιριακό κέλυφος είναι η δυσκολία ανταλλαγής ενός υψηλού ποσοστού θερμότητας μεταξύ του αέρα και του υλικού αλλαγής φάσης. Ο τρόπος μεταφοράς του αέρα μέσα στο δωμάτιο δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός για τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας, καθώς η κίνηση του αέρα κοντά στους τοίχους, που καθορίζει το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας, είναι σχετικά μικρή. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα μπορεί να δώσει η εφαρμογή ενός ενεργητικού συστήματος αποθήκευσης θερμότητας με PCM, το οποίο χρησιμοποιεί μία μονάδα αποθήκευσης θερμότητας με ενσωματωμένο PCM, καθώς και αέρα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. [93]

Τα ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας χαρακτηρίζονται κυρίως από εξαναγκασμένη μεταφορά θερμότητας στο αποθηκευτικό μέσο, το οποίο κυκλοφορεί μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Σε αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται μία ή δύο θερμικά μονωμένες δεξαμενές, οι οποίες πληρούνται με το αποθηκευτικό μέσο θερμότητας, το ρόλο του οποίου παίζει το υλικό αλλαγής φάσης. Η συντριπτική πλειοψηφία των ενεργητικών συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας βασίζονται στην ψύξη. [70, 94]

4.2.2.1 PCM σε οροφές

Ο Bruno ανέπτυξε ένα σύστημα δροσισμού με τη βοήθεια υλικών αλλαγής φάσης, που αποθηκεύουν ψύξη σε περιόδους εκτός αιχμής (χαμηλής ζήτησης) και την απελευθερώνουν σε ώρες αιχμής. Η ψύξη παρέχεται στο σύστημα από την κλιματιστική μονάδα και αποθηκεύεται στο στρώμα PCM που βρίσκεται στην ψευδοροφή. Το σημείο τήξης του PCM είναι στο εύρος 20-30°C, δηλαδή είναι κατάλληλο για την επίτευξη θερμικής άνεσης του εσωτερικού χώρου. [19]

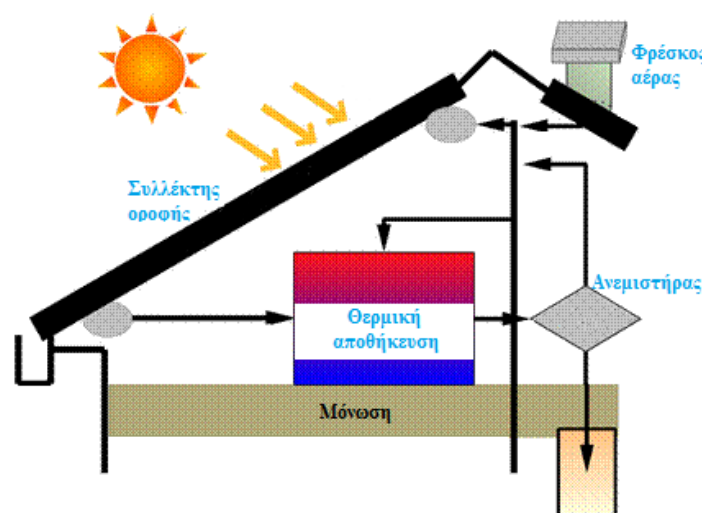
Οι Kodo και Ibamoto προσπάθησαν να μειώσουν το φορτίο αιχμής των συστημάτων κλιματισμού αέρα, μέσω της χρησιμοποίησης PCM σε σανίδες οροφής σε ένα κτίριο με γραφεία. Στην ψευδοροφή ενσωματώθηκαν μικροκάψουλες PCM με σημείο τήξης περίπου 24,5°C και λανθάνουσα θερμότητα τήξης 174,4kJ/kg. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο ψυχρός αέρας από τη μονάδα διαχείρισης αέρα διέρχεται του θαλάμου οροφής, ψύχει το υλικό αλλαγής φάσης που βρίσκεται στην ψευδοροφή και ως εκ τούτου αποθηκεύει ψύξη σε αυτήν. Κατά τη διάρκεια των ωρών που μεγιστοποιείται το θερμικό φορτίο, η ενέργεια αυτή απελευθερώνεται στο χώρο, διατηρώντας τον δροσερό. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η θερμοκρασία του χώρου αυξήθηκε μόνο κατά 2°C, όταν η αποθηκευμένη ψύξη αποδόθηκε στο χώρο κατά τις ώρες αιχμής, ικανοποιητικό αποτέλεσμα δεδομένου ότι χωρίς PCM η άνοδος της θερμοκρασίας ήταν 6°C. [19]



Εικόνα 4.2.2.1.1: Σχηματική απεικόνιση συστήματος οροφής με PCM των Kodo και Ibamoto [82]

Το 1997, το Πανεπιστήμιο της Ν. Αυστραλίας (UniSA) ανέπτυξε μία οροφή με ενσωματωμένο σύστημα θέρμανσης χώρου, το οποίο χρησιμοποιεί υφιστάμενα φύλλα σιδήρου οροφής, που φέρουν αυλακώσεις, ως ηλιακούς συλλέκτες για θέρμανση του αέρα. Μια μονάδα θερμικής αποθήκευσης με PCM χρησιμοποιείται για

την αποθήκευση θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας, ώστε η αποθηκευμένη αυτή θερμότητα να παρέχεται τη νύχτα ή σε περιόδους χωρίς ηλιοφάνεια. Το σύστημα λειτουργεί με τρεις τρόπους. Πιο αναλυτικά, σε περιπτώσεις λιακάδας και ανάγκης για θέρμανση, ο αέρας διέρχεται από το συλλέκτη και ακολούθως στο εσωτερικό του κτιρίου, ενώ όταν δεν απαιτείται θέρμανση, ο αέρας αντλείται στην εγκατάσταση θερμικής αποθήκευσης και τήκοντας το υλικό αλλαγής φάσης, το φορτίζει για μελλοντική χρήση. Σε περίπτωση μη διαθέσιμης ηλιοφάνειας, ο εσωτερικός αέρας διέρχεται από την εγκατάσταση, θερμαίνεται και κατόπιν εισέρχεται στο δωμάτιο. Όταν η εγκατάσταση αποθήκευσης είναι παγωμένη, τη θέρμανση του χώρου αναλαμβάνει ένα βοηθητικό σύστημα θέρμανσης με αέριο. Επαρκείς ποσότητες φρέσκου αέρα εισάγονται όταν το σύστημα θέρμανσης ελευθερώνει θερμότητα στο χώρο. [81]



Εικόνα 4.2.2.1.2: Σχηματική απεικόνιση ηλιακού συστήματος θέρμανσης

4.2.2.2 PCM σε δάπεδα

Ένα ακόμα κτιριακό στοιχείο το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για την αποθήκευση θερμότητας είναι τα δάπεδα. Ως επί το πλείστον, τα ενεργητικά ενδοδαπέδια συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θερμική αποθήκευση σε εκτός αιχμής ώρες και σε αυτά η θερμότητα λαμβάνεται από σωληνώσεις θερμού νερού ή θερμού αέρα και από ηλεκτρικά στοιχεία. Έτσι, μπορούν να μειωθούν τα φορτία αιχμής και να μετατοπιστούν τη νύχτα, όταν η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι χαμηλότερη. [82]

Ένα ηλεκτρικό ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης που χρησιμοποιεί ως υλικό αλλαγής φάσης παραφίνη, με σημείο τήξης 40°C, προτάθηκε από τους Farid και Chen. Αυτοί τοποθέτησαν ένα στρώμα PCM πάχους 30mm μεταξύ της επιφάνειας θέρμανσης και της καλυμμένης με πλακάκια επιφάνειας δαπέδου. Από την εφαρμογή υπολογιστικής προσομοίωσης απεδείχθη ότι η παραγωγή θερμότητας από το δάπεδο θα μπορούσε να αυξηθεί σημαντικά από 30 σε 75W/m² μέσω της χρήσης PCM. [82]

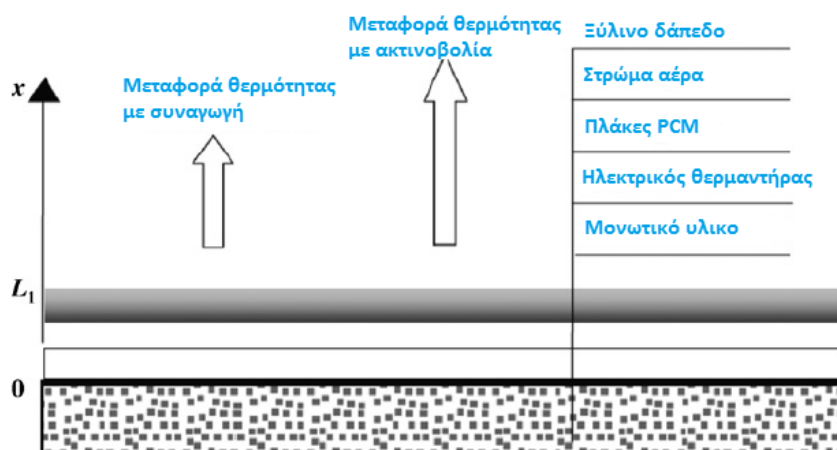
Οι Nagano et al. παρουσίασαν ένα ενδοδαπέδιο σύστημα κλιματισμού με εργαζόμενο μέσο τον αέρα και με χρήση λανθάνουσας θερμότητας στα κτίρια. Το πειραματικό δάπεδο είχε εμβαδόν 0,5m² και το υλικό αλλαγής φάσης που εφαρμόστηκε ήταν μίγμα παραφίνης σε μορφή κόκκων. Το στρώμα υλικού αλλαγής φάσης με πάχος 3cm εγκαταστάθηκε κάτω από το πάτωμα με πολλαπλές μικρές οπές. Από τη μέτρηση των θερμοκρασιακών αλλαγών του δωματίου και του ποσού αποθηκευμένης θερμότητας, προέκυψαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα για τη

δυνατότητα μετατόπισης ψυκτικού φορτίου και γενικότερα διαχείρισης ενεργειακών φορτίων μέσω της εφαρμογής μιας τέτοιας διάταξης. [82]

Οι Lin et al. πραγματοποίησαν πειραματική μελέτη για ηλεκτρικό ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης σε κτίριο, με πλάκες PCM σταθερού σχήματος, που σε αντίθεση με τα συμβατικά PCM, μπορεί να διατηρήσει το σχήμα κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης, αποφεύγοντας έτσι τον κίνδυνο διαρροής του υλικού αλλαγής φάσης. Χρησιμοποίησαν 75% κατά βάρος παραφίνη ως διασκορπισμένο υλικό αλλαγής φάσης και 25% κατά βάρος πολυαιθυλένιο για υλικό υποστήριξης. Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης και η θερμότητα τήξης της παραφίνης ήταν 52°C και 200kJ/kg αντιστοίχως. [82] Για τη διερεύνηση της θερμικής επίδοσης αυτού του ηλεκτρικού ενδοδαπέδιου συστήματος, οι ερευνητές δημιούργησαν ένα πειραματικό σπίτι διαστάσεων 3m (βάθος) ×2m(πλάτος) ×2m(ύψος) στο Tsinghua University, στο Πεκίνο, εξοπλισμένο με το σύστημα αυτό. Το σπίτι διέθετε ένα παράθυρο νοτίου προσανατολισμού με διπλό τζάμι, καλυμμένο με μαύρη κουρτίνα. Η στέγη και οι τοίχοι ήταν από πολυστυρένιο πάχους 100mm με μεταλλική επικάλυψη. Το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης περιελάμβανε μόνωση πολυστυρενίου 120mm, ηλεκτρικούς θερμαντήρες, πλάκες PCM πάχους 15mm, μερικούς ξύλινους υποστηρικτές, στρώμα αέρα πάχους 10mm και ξύλινο δάπεδο πάχους 8mm. [81] Η λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος θέρμανσης έχει ως εξής: Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οπότε και το ρεύμα είναι πιο οικονομικό, το υλικό αλλαγής φάσης τήκεται από τους ηλεκτρικούς θερμαντήρες και αποθηκεύει θερμότητα. Την ημέρα, οι θερμαντήρες κλείνουν και το υλικό αλλαγής φάσης στερεοποιείται αποδίδοντας θερμότητα στο χώρο.

Τα εξαγόμενα συμπεράσματα από τη μελέτη των Lin et al. ήταν ότι η θερμοκρασία των πλακών PCM διατηρήθηκε σταθερή στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την παύση λειτουργίας των θερμαντήρων. Επιπλέον, παραπάνω από τη μισή ποσότητα της ολικής ηλεκτρικής ενέργειας μετατοπίστηκε από τις ώρες αιχμής στις περιόδους χαμηλής ζήτησης, επιφέροντας σημαντικά οικονομικά οφέλη, λόγω της διαφοράς κόστους ηλεκτρικού ρεύματος τη μέρα και τη νύχτα. Τέλος, εμφανίστηκε μικρή θερμοκρασιακή διαφορά στο χώρο κατά μήκος της κατακόρυφης διεύθυνσης, διότι το σύστημα αυτό μπορούσε να θερμάνει ομοιόμορφα τον εσωτερικό αέρα. Έτσι, αυτό το σύστημα θέρμανσης κατέστη άνετο και ενεργειακά αποδοτικό. [82]

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται σχηματικά η δομή ενός ηλεκτρικού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος.

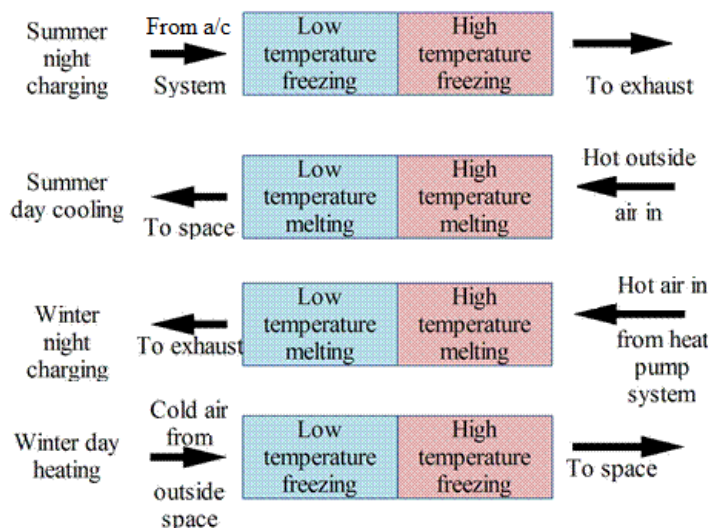


Εικόνα 4.2.2.2.1: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικού ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος

4.2.2.3 Συνδυασμένο σύστημα θέρμανσης και ψύξης με ενσωματωμένο PCM

Το Sustainable Energy Center (SEC) του Πανεπιστημίου της Ν. Αυστραλίας (UniSA) είναι μία από τις λίγες ομάδες παγκοσμίως που εργάζεται πάνω στον τομέα συστημάτων με PCM, τα οποία χρησιμοποιούν εξαναγκασμένη ροή αέρα για τη μεταφορά από και προς το υλικό αλλαγής φάσης. Το έργο αφορά κυρίως εφαρμογές θέρμανσης ή/και ψύξης χώρου, αν και μπορεί να βρει εφαρμογή και σε άλλα συστήματα χρήσης αέρα. Το SEC άρχισε να ασχολείται με τα PCM στα μέσα της δεκαετίας του '90, με την ανάπτυξη μιας μονάδας αποθήκευσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τη θέρμανση όσο και για την ψύξη χώρου. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω της χρήσης δύο υλικών αλλαγής φάσης, διαφορετικών σημείων τήξης και πήξης, σε σειρά. Επιλέγοντας υλικά αλλαγής φάσης με την κατάλληλη θερμοκρασία τήξης και στερεοποίησης, μπορούν και τα δύο PCM να χρησιμοποιηθούν μαζί για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε δύο θερμοκρασιακά επίπεδα. Το χρησιμοποιούμενο μέσο για τη μεταφορά θερμότητας σε αυτά τα συστήματα είναι ο αέρας. Σε αντίθεση με το νερό, η χρήση αέρα έχει πολλά πρακτικά πλεονεκτήματα για ένα σύστημα θέρμανσης και ψύξης, μεταξύ των οποίων είναι η απαίτηση λιγότερων εξαρτημάτων και το μειωμένο βάρος και κόστος. Η πρώτη πρακτική εφαρμογή προτάθηκε για χρήση σε συνδυασμό με αντιστροφή κύκλου ενός κλιματιστικού και με υλικά αλλαγής φάσης σημείων τήξης 29 και 18°C. [93]

Η παρακάτω εικόνα περιγράφει τη διαδικασία φόρτισης κατά τη νύχτα και χρήσης κατά την ημέρα, κατά τη διάρκεια των περιόδων θέρμανσης και ψύξης, για ένα σύστημα αποθήκευσης αποτελούμενο από δύο διαφορετικά PCM ενσωματωμένα σε ένα αντιστροφικού κύκλου σύστημα ψύξης με αντλίες θερμότητας. Καθώς ο αέρας ωθείται μέσω του συστήματος, αυτός υποβάλλεται σε μία δύο-φάσεων διαδικασία θέρμανσης ή ψύξης. Έτσι, διέρχεται πρώτα από το ένα υλικό αλλαγής φάσης και έπειτα από το δεύτερο. [93]



Εικόνα 4.2.2.3.1: Φόρτιση κατά τη νύχτα και χρήση κατά τη μέρα σε περιόδους θέρμανσης και ψύξης για ένα σύστημα αντιστροφικού κύκλου ψύξης με αντλίες θερμότητας

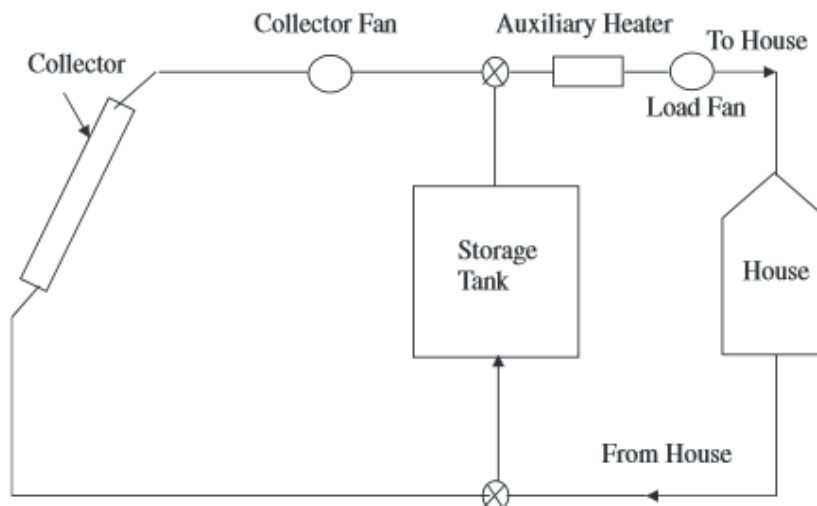
Το σημείο τήξης/πήξης του πρώτου υλικού είναι κάτω από τη θερμοκρασία άνεσης, ενώ το δεύτερο υλικό έχει θερμοκρασία τήξης/πήξης πάνω από τη θερμοκρασία άνεσης. Κατά το χειμώνα (περίοδος θέρμανσης), η ροή αέρα ρυθμίζεται έτσι ώστε το σύστημα να αποθηκεύει θερμότητα (από την τήξη και των δύο PCM) τη

νύχτα και να την απελευθερώνει σε μία θερμοκρασία άνω των συνθηκών άνεσης (μέσω πήξης) κατά την ημέρα. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η κατεύθυνση της ροής αέρα αντιστρέφεται και το σύστημα παρέχει αέρα κάτω από τη θερμοκρασία άνεσης, αφού αυτό είχε φορτιστεί κατά τη διάρκεια της νύχτας. [93]

Το ποσό της μείωσης στην απαιτούμενη χωρητικότητα για το κλιματιστικό και τα μεταφερόμενα ποσά θερμικών και ψυκτικών φορτίων σε ώρες εκτός αιχμής έχουν υπολογιστεί, χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό μοντέλο για το σύστημα αποθήκευσης. Η ετήσια εξοικονόμηση κόστους ενέργειας υπολογίστηκε επίσης. Η χρησιμοποίηση ενός συστήματος αποθήκευσης θερμότητας που περιέχει δύο διαφορετικά υλικά αλλαγής φάσης μπορεί να μειώσει την απαιτούμενη χωρητικότητα και το αρχικό κόστος του κλιματιστικού για μία κατοικία. Επιπροσθέτως, μπορεί να μετατοπίσει ένα μέρος των θερμικών και ψυκτικών φορτίων σε ώρες εκτός αιχμής, κατά τις οποίες το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος είναι χαμηλότερο. Οι υπολογισμοί για ένα τυπικό σπίτι στην Αδελαΐδα έδειξαν, ότι ένα σύστημα αποθήκευσης που αποτελείται από 100kg PCM σημείου τήξης 29°C και 80kg PCM σημείου τήξης 18°C, μείωσε το απαιτούμενο ονομαστικό ποσοστό του κλιματιστικού κατά 50%. Επιπλέον, το ετήσιο κόστος ηλεκτρικού ρεύματος μειώθηκε κατά 32%, λόγω της μετατόπισης του φορτίου σε ώρες χαμηλής ζήτησης. Η εταιρεία κοινής ωφέλειας θα μπορούσε να επωφεληθεί από τη μετατόπιση του 52% και του 41% των φορτίων του κλιματιστικού κατά τη διάρκεια των κρύων και ζεστών περιόδων αντίστοιχα, εφόσον το συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα. [93]

4.2.2.4 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα με PCM

Οι Morrison και Abdel Khalik και Jurinak και Abdel Khalik μελέτησαν την επίδοση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης αέρα, χρησιμοποιώντας μία μονάδα αποθήκευσης ενέργειας που εκμεταλλεύεται την αλλαγή φάσης. Τα βασικά αντικείμενα της μελέτης τους ήταν ο προσδιορισμός της επίδρασης της λανθάνουσας θερμότητας και θερμοκρασίας τήξης του υλικού αλλαγής φάσης στο συγκεκριμένο σύστημα θέρμανσης και η ανάπτυξη εμπειρικού μοντέλου των σημαντικών μονάδων αποθήκευσης θερμότητας με αλλαγή φάσης. Κατέληξαν ότι η επιλογή του PCM πρέπει να γίνεται με βάση το σημείο τήξης και τη λανθάνουσα θερμότητα και πως ένα τέτοιο σύστημα θέρμανσης με δεκαένυδρο θειικό νάτριο ως αποθηκευτικό μέσο, απαιτεί περίπου το 1/4 του όγκου αποθήκευσης ενός πέτρινου τοίχου και το 1/2 του όγκου αποθήκευσης μιας δεξαμενής νερού. Οι Ghonein και Klein συνέκριναν σε θεωρητικό επίπεδο την επίδοση της διαδικασίας αλλαγής φάσης και της αποθήκευσης αισθητής θερμότητας για ηλιακό σύστημα θέρμανσης αέρα και νερού. Παρακάτω, απεικονίζεται σχηματικά ένα τυπικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης αέρα. [82]



Εικόνα 4.2.2.4.1: Σχηματική απεικόνιση τυπικού ηλιακού συστήματος θέρμανσης αέρα [82]

Ο Fatah ανέπτυξε έναν απλό ηλιακό θερμαντήρα αέρα με ενσωμάτωση συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Μία σειρά από σωλήνες χαλκού πληρώθηκε με υλικό αποθήκευσης θερμότητας και τοποθετήθηκε ως απορροφητής. Εξετάστηκαν διάφορα υλικά αποθήκευσης τόσο αισθητής όσο και λανθάνουσας θερμότητας. Τα αποτελέσματα όμως, απέδειξαν ότι όταν ο θερμαντήρας πληρωθεί υλικά αλλαγής φάσης θερμοκρασιών τήξης 51 και 43°C, τότε επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση του συστήματος, διαφορετικά η ημερήσια μέση απόδοση του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 27% και 63%. [95]

Ο Epibe κατασκεύασε και μελέτησε έναν φυσικής κυκλοφορίας ηλιακό θερμαντήρα αέρα, με αποθήκευση ενέργειας μέσω υλικού αλλαγής φάσης και συγκεκριμένα μέσω κεριού παραφίνης. Η μελέτη έγινε υπό φυσικές περιβαλλοντικές συνθήκες, με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος να καλύπτουν το εύρος από 19 έως 41°C και την ημερήσια ολική ακτινοβολία στο εύρος 4,9-19,96MJ/m². Η μέγιστη θερμοκρασιακή αύξηση του θερμαινόμενου αέρα ήταν περίπου 15K, ενώ η ολική απόδοση του συστήματος ήταν περίπου 50%. Βέβαια, το συγκεκριμένο σύστημα θεωρήθηκε κατάλληλο για χρήση ως ηλιακός θάλαμος ξήρανσης γεωργικής σοδειάς ή θάλαμος επώασης αυγών πουλερικών. [95]

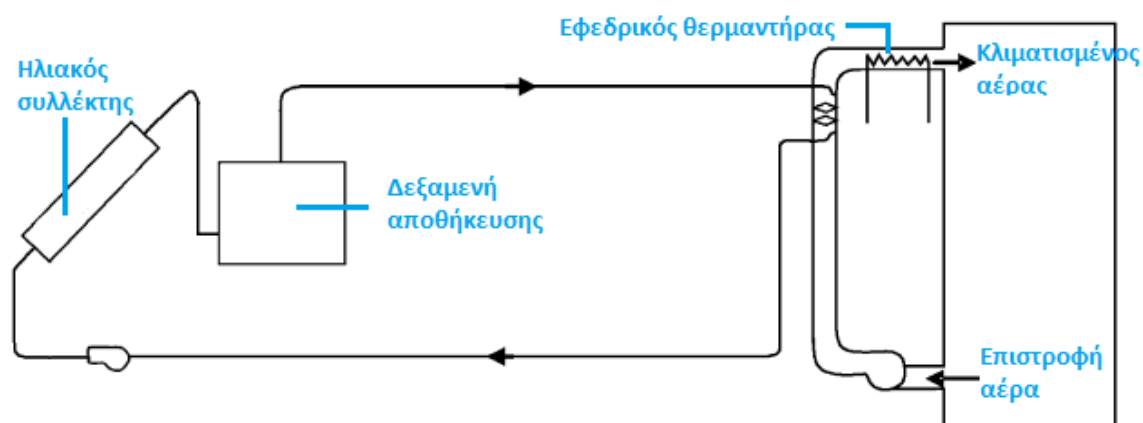
4.2.2.5 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM

Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι ενσωμάτωσης PCM σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού. Μεταξύ αυτών, διακρίνουμε κυρίως την ενσωμάτωση υλικού αλλαγής φάσης στον ηλιακό συλλέκτη και την προσθήκη στοιχείων PCM στο εσωτερικό μιας τυπικής δεξαμενής αποθήκευσης νερού. Μερικοί ερευνητές αναφέρουν ότι η προσθήκη PCM στη δεξαμενή αποθήκευσης έχει ως στόχο την αντιστάθμιση των απωλειών στην άνω επιφάνεια και την αναθέρμανση του ανώτερου στρώματος μετά από μία περίοδο αποφόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να βελτιωθεί η διαθεσιμότητα του ζεστού νερού στον τελικό χρήστη. Ωστόσο, ο εφεδρικός θερμαντήρας, που υπάρχει σχεδόν σε κάθε ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού, μπορεί να επιτύχει αυτές τις λειτουργίες. [96]

Οι Prakash, Garg και Datta ήταν οι πρώτοι που ασχολήθηκαν με τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με υλικά αλλαγής φάσης. Συγκεκριμένα, μελέτησαν την

επίδοση ενός ηλιακού θερμαντήρα νερού, στον πυθμένα του οποίου ήταν τοποθετημένο ένα στρώμα PCM και περιλάμβανε συλλέκτη και δοχείο αποθήκευσης σε μία μονάδα. Σε περιόδους ηλιοφάνειας, το νερό ζεσταίνεται και κατ' επέκταση μεταφέρει θερμότητα στο υλικό αλλαγής φάσης κάτω από αυτό. Τις υπόλοιπες περιόδους, το ζεστό νερό απομακρύνεται και αντικαθίσταται με κρύο, το οποίο απορροφά την αποθηκευμένη στο PCM θερμότητα, μετατρέποντας το τελευταίο από υγρό σε στερεό. Αυτό το σύστημα δεν ήταν ιδιαίτερα αποδοτικό, εξαιτίας της ανεπαρκούς μετάδοσης θερμότητας μεταξύ νερού και υλικού αλλαγής φάσης. [97]

Το 1991, στην πόλη Trabzon της Τουρκίας, ο Kaygusuz διερεύνησε την περίπτωση ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού με την αξιοποίηση της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Το σύστημα που μελέτησε, προοριζόταν για τη θέρμανση εργοστασιακών εγκαταστάσεων και αποτελούνταν από έναν ηλιακό συλλέκτη, μία δεξαμενή αποθήκευσης ενέργειας, έναν εναλλάκτη θερμότητας νερού-αέρα, έναν εφεδρικό ηλεκτρικό θερμαντήρα, μία αντλία διακίνησης νερού και εξοπλισμό μέτρησης και αυτομάτου ελέγχου. Η συλλεγόμενη ηλιακή ενέργεια μεταφερόταν στη δεξαμενή αποθήκευσης, η οποία περιείχε σωλήνες από χλωριούχο πολυβινύλιο, οι οποίοι φιλοξενούσαν 1500kg εξαένυδρου χλωριούχου ασβεστίου. Οποτεδήποτε υπήρχε ανάγκη θέρμανσης του χώρου, χρησιμοποιούνταν η δεξαμενή ενεργειακής αποθήκευσης και ο εφεδρικός θερμαντήρας. Κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης, οι μετρηθείσες τιμές απόδοσης ενός απλού ηλιακού συλλέκτη και του συγκεκριμένου ηλιακού συστήματος με υλικό αλλαγής φάσης ήταν 0,6 και 0,7 αντιστοίχως, διαφορά που οφείλεται στην αδυναμία του απλού συλλέκτη να αποθηκεύσει θερμότητα κατά τη διάρκεια ημερών με συννεφιά. Τέλος, από τη μελέτη του Kaygusuz, αποδείχθηκε ότι το σύστημα αυτό υποβοηθούμενο από ένα σύστημα θερμικών αντλιών, μπορούσε να λειτουργήσει αποδοτικά για την αποθήκευση θερμότητας οικιακής χρήσης, είτε όταν χρησιμοποιούνταν ως PCM το άλας Glauber είτε το εξαένυδρο χλωριούχο ασβέστιο. [98]

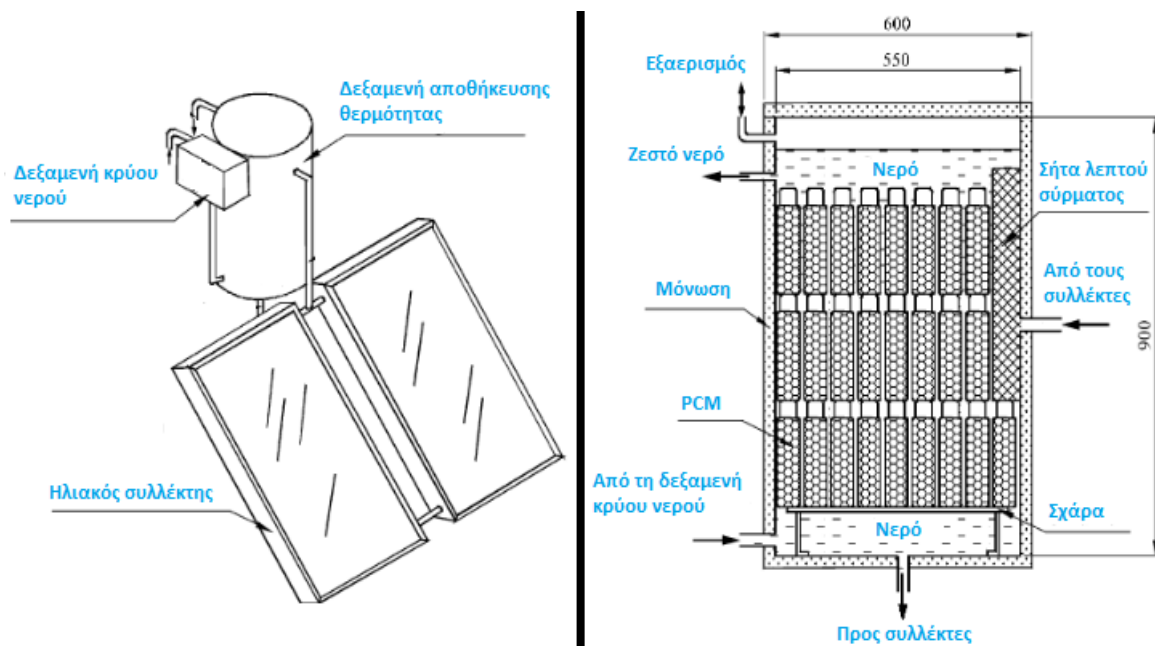


Εικόνα 4.2.2.5.1: Σχηματική απεικόνιση του ηλιακού συστήματος θέρμανσης με PCM από τον Kaygusuz [98]

Οι Esen και Ayhan παρουσίασαν τα αποτελέσματα μιας αριθμητικής προσομοίωσης ενός συστήματος βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης θερμότητας που διαθέτει δεξαμενή αποθήκευσης με PCM. Τα αποτελέσματα αυτά απέδειξαν ότι οι ιδιότητες των PCM, η ακτίνα των κυλίνδρων που τα περιέχουν, η παροχή μάζας και η θερμοκρασία εισόδου του υγρού μεταφοράς θερμότητας, θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά, προκειμένου η απόδοση της δεξαμενής να είναι βέλτιστη. Δύο χρόνια αργότερα, οι Esen et al. μελέτησαν θεωρητικά δύο διαφορετικά είδη δεξαμενών αποθήκευσης, με σκοπό να περιγράψουν τη μεταβατική συμπεριφορά της κάθε μίας

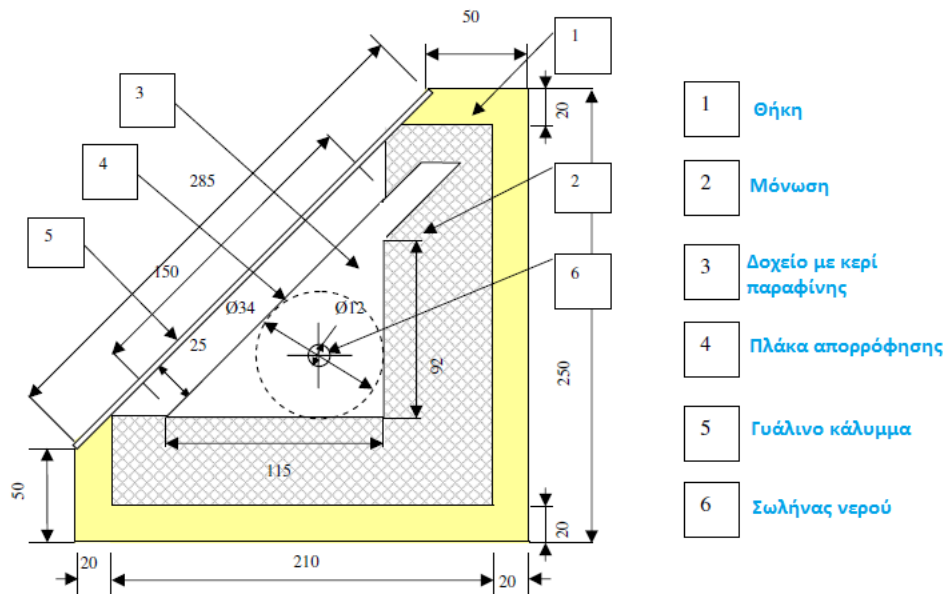
κατά την αλλαγή φάσης. Στην πρώτη περίπτωση, μελετήθηκαν δεξαμενές που περιείχαν PCM, τοποθετημένο εντός κυλίνδρων, ενώ παράλληλα σε αυτούς έρεε το ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας έρεε μέσω των σωλήνων της δεξαμενής, οι οποίοι περιβάλλονταν από το υλικό αλλαγής φάσης. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των δύο ειδών δεξαμενών απέδειξαν ότι οι θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM καθορίζουν το χρόνο τήξης του και ότι η επιλογή του PCM και η διαμόρφωση της δεξαμενής αποθήκευσης πρέπει να εξετάζονται ταυτόχρονα. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι για την αποθήκευση περισσότερης προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας είναι καταλληλότερο το δεύτερο είδος δεξαμενής. Τέλος, ο Esen πραγματοποίησε μία πειραματική και θεωρητική έρευνα που αφορούσε τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας σε μία κυλινδρική δεξαμενή αποθήκευσης με αλλαγή φάσης, συνδυασμένη με ένα ηλιακό σύστημα αντλιών θερμότητας. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε επίσης από τον Kaygusuz σε πειράματα και περιλάμβανε μία δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας όγκου $4,25\text{m}^3$ γεμάτη με 1090kg εξαένυδρου χλωριούχου ασβεστίου. Οι ηλιακοί συλλέκτες, βασιζόμενοι στην κυκλοφορία νερού στις σωληνώσεις του συστήματος, εγκαταστάθηκαν προς τον ισημερινό και με γωνία 48° ως προς την επιφάνεια του ορίζοντα. Το κύριο συμπέρασμα από τη μελέτη του παραπάνω συστήματος ήταν πως η αποθηκευμένη από το σύστημα θερμότητα θεωρούνταν ανεπαρκής για θερμική χρήση. [98]

Οι Canbazoglu et al. το 2005, διεξήγαγαν μία μελέτη με αντικείμενο την αποθήκευση ηλιακής ενέργειας με χρήση πενταένυδρου θειώδους νατρίου ως PCM σε ένα συμβατικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού. Στη μελέτη, η οποία πραγματοποιήθηκε κατά το μήνα Νοέμβριο, στην Malatya της Τουρκίας, όπου παρατηρείται ψυχρό και ξηρό κλίμα, χρησιμοποιήθηκε ένα πειραματικό, ανοιχτού βρόχου, παθητικό ηλιακό σύστημα φυσικής κυκλοφορίας για την παροχή ζεστού νερού οικιακής χρήσης. Το σύστημα αποτελείται από ηλιακούς συλλέκτες, δεξαμενές κρύου και ζεστού νερού και είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες για την εκτέλεση των μετρήσεων. Πιο αναλυτικά, η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας, όγκου 190L , είναι από γαλβανισμένο χάλυβα, μονωμένη με υαλοβάμβακα και κυλινδρική. Στο εσωτερικό της είναι τοποθετημένες σε τρεις σειρές φιάλες από πολυαιθυλένιο, όγκου $0,44\text{L}$, η κάθε μία εκ των οποίων περιέχει $0,7347\text{kg}$ του PCM. Ο όγκος του PCM και του νερού μέσα στη δεξαμενή είναι $107,8$ και $82,2\text{L}$ αντίστοιχα, ενώ η συνολική μάζα του υλικού αλλαγής φάσης είναι 180kg . Από το πείραμα προέκυψε ότι η ποσότητα της συσσωρευμένης θερμότητας στη δεξαμενή με PCM ήταν περίπου $2,6$ - $3,5$ φορές μεγαλύτερη από αυτήν των συμβατικών ηλιακών συστημάτων με απλές δεξαμενές αποθήκευσης και το κόστος της εγκατάστασης του συστήματος με PCM ήταν $0,4\text{€/L}$ όγκου της δεξαμενής. Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση του συστήματος αυτού και της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας. [99]



Εικόνα 4.2.2.5.2: Πλάγια όψη του ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού (αριστερά), τομή κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας με PCM (δεξιά) [99]

Οι Mettawee και Assassa μελέτησαν την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας σε έναν ηλιακό συλλέκτη με υλικό αλλαγής φάσης. Σε αυτόν τον ηλιακό συλλέκτη, η πλάκα απορρόφησης εκτελεί και τη δέσμευση της ηλιακής ενέργειας και την αποθήκευση του PCM. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως PCM για την αποθήκευση ηλιακής ενέργειας ήταν το κερί παραφίνης, το οποίο εκφορτιζόταν με τη βοήθεια κρύου νερού, που έρεε εντός σωλήνων, τοποθετημένων εσωτερικά της παραφίνης. Ως αποδοτική επιφάνεια του συλλέκτη θεωρήθηκε το 1m^2 και ο συνολικός όγκος χωρίστηκε σε πέντε τομείς. Η πειραματική διάταξη σχεδιάστηκε για την προσομοίωση ενός τομέα του συλλέκτη με επιφάνεια απορρόφησης $0,2\text{m}^2$. Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης διεξήχθησαν υπαίθρια πειράματα στα οποία ελέγχθηκε η δυνατότητα χρήσης ενός τέτοιου συστήματος για τη θέρμανση νερού. Μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού αλλαγής φάσης σε σχέση με το χρόνο, καθώς επίσης και η ηλιακή ένταση. Η εκτέλεση των πειραμάτων έγινε για διάφορες παροχές νερού από $8,3$ έως $21,7\text{kg/h}$ και σε κάθε περίπτωση εξετάστηκε η επίδραση αυτού του παράγοντα στο ωφέλιμο θερμικό κέρδος. Επίσης, κατά τη διαδικασία φόρτισης, συνυπολογίστηκαν οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και τέλος, μελετήθηκε η εξάπλωση του μετώπου τήξης και πήξης κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι στη διαδικασία φόρτισης, ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται απότομα, με αυξανόμενο το πάχος του τηγμένου στρώματος, καθώς εξελίσσεται η διαδικασία της συναγωγής και στη διαδικασία της αποφόρτισης, το ωφέλιμο θερμικό κέρδος αυξάνεται με την αύξηση της παροχής μάζας του νερού. [100]



Εικόνα 4.2.2.5.3: Σχηματική απεικόνιση τομής του ηλιακού συλλέκτη των Mettawee και Assassa [100]

Το 2006, οι Cabeza et al. μελέτησαν ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού, στο οποίο κύλινδροι γεμάτοι με υλικό αλλαγής φάσης ήταν τοποθετημένοι στην κορυφή της δεξαμενής νερού. Το υλικό αλλαγής φάσης που επιλέχθηκε ήταν σε μορφή σκόνης και επρόκειτο για ένα μίγμα γραφίτη και τριένυδρου οξικού νατρίου. Τα πειράματα αφορούσαν τη διαδικασία ψύξης, τη διαδικασία αναθέρμανσης και την ηλιακή λειτουργία. Η ενεργειακή πυκνότητα εκτιμήθηκε συγκρίνοντας την αισθητή θερμότητα που αποθηκεύτηκε στη δεξαμενή, όταν αυτή περιείχε μόνο νερό με την αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα που αποθηκεύτηκε στη δεξαμενή υπό την παρουσία PCM. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, οι ερευνητές κατέληξαν ότι ο καταναλωτής θα έχει ζεστό νερό για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στην περίπτωση προσθήκης PCM στη δεξαμενή από ότι στην περίπτωση χωρίς PCM. [96]

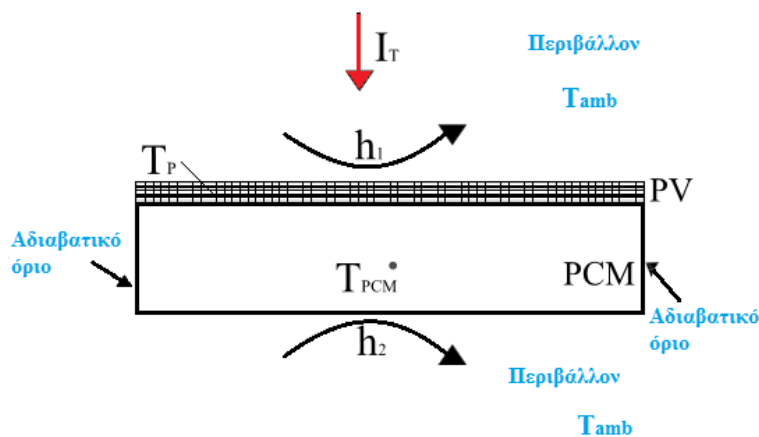
Ο Kenneth στο πανεπιστήμιο του Brighton εξέτασε και ανέλυσε ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης χώρου, με ενσωματωμένο PCM, για οικιακή χρήση στη Μ. Βρετανία. Το σύστημα αποτελείται από μία συστοιχία ηλιακών επίπεδων συλλεκτών, που παρέχουν ζεστό νερό σε μία δεξαμενή αποθήκευσης και σε έναν αριθμό από πάνελ που περιέχουν χλωριούχο ασβέστιο με σημείο τήξης στους 29°C. Τα πάνελ είναι κατασκευασμένα από φύλλα αλουμινίου και φέρουν χάλκινο τύλιγμα σωλήνωσης 15mm. Το θερμαινόμενο από τα ηλιακά πάνελ νερό κυκλοφορεί εσωτερικά του τυλίγματος και η θερμότητα μεταφέρεται στο PCM που περιέχεται εξωτερικά αυτού, τήκοντας έτσι το υλικό αλλαγής φάσης. Οι σωλήνες είναι εγκατεστημένοι κάτω από το δάπεδο και μία σειρά από συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα (fan coil units) περνούν αέρα πάνω από τους σωλήνες. Με αυτόν τον τρόπο, θερμαίνεται ο αέρας και κατόπιν οδηγείται στο χώρο για τη θέρμανση αυτού. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής έδειξαν πως αυτό το σύστημα είχε τη δυνατότητα να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση μεταξύ 18% και 32%. [82]

4.2.2.6 PCM σε φωτοβολταϊκά συστήματα (PV)

Τα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία μετατρέπουν το προσπίπτον ηλιακό φως σε ηλεκτρισμό μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι σχεδιασμένο για να εργάζεται σε συγκεκριμένες συνθήκες. Μία χαρακτηριστική τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας του είναι 25°C. Όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στοιχείου υπερβεί την τιμή αυτή, τότε η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική πραγματοποιείται με αρκετές απώλειες. Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί ότι οι αυξημένες θερμοκρασίες λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων μειώνουν την απόδοση μετατροπής της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια κατά 0,5% K^{-1} . Έτσι, το ποσοστό μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι μόλις 16%, καθώς η υπόλοιπη απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμότητα. [101]

Η μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας για την καλύτερη απόδοση μετατροπής, μπορεί να επιτευχθεί είτε με τη βελτίωση της λειτουργίας ελεύθερης ψύξης (free cooling) στο πίσω μέρος του πάνελ, με φυσική ή εξαναγκασμένη συναγωγή, είτε με επέμβαση στην αρχιτεκτονική του φωτοβολταϊκού πάνελ και τροποποίησή της, για την απορρόφηση πλεονάζουσας θερμότητας. Η δεύτερη λύση περιλαμβάνει την τοποθέτηση PCM στο πίσω μέρος του πάνελ. [101]

Έτσι, ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος, ένα σύστημα φωτοβολταϊκού με υλικό αλλαγής φάσης (PV/PCM) μπορεί να επιτύχει τη λειτουργία του PV κοντά στη χαρακτηριστική θερμοκρασία του και επομένως να διατηρήσει τη μέγιστη απόδοση μετατροπής της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια. Παρακάτω, φαίνεται η μεταφορά θερμότητας εξωτερικά ενός τέτοιου συστήματος.



Εικόνα 4.2.2.6.1: Σχηματικό διάγραμμα μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα PV/PCM

Γενικά, ένα σύστημα PV/PCM κατασκευάζεται από διάφορα στοιχεία: [102]

- PV κάλυμμα (π.χ. γυαλί)
- PV υλικό (ημιαγωγός), στρώμα αγωγών
- Στρώμα ρητίνης
- Στρώμα PCM
- Μεταλλικό πλαίσιο

Ο κύριος σκοπός του PCM κατά την εφαρμογή του σε φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι να ελέγχει τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου γύρω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Σε ένα σύστημα PV/PCM, το PV γίνεται πηγή θερμότητας όταν η θερμοκρασία του αυξηθεί πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του υλικού αλλαγής

φάσης. Όταν η θερμοκρασία του PCM φτάσει τα όρια της αλλαγής φάσης, το PCM γίνεται δεξαμενή θερμότητας, απορροφώντας θερμότητα από την επιφάνεια επαφής του PV και ανταλλάσσοντας θερμότητα με το εξωτερικό περιβάλλον, το οποίο καθορίζει την κατεύθυνση φόρτισης-αποφόρτισης και την αποδοτικότητα του κύκλου αλλαγής φάσης του PCM. Ο χρόνος ολοκλήρωσης της διαδικασίας φόρτισης και αποφόρτισης εξαρτάται από το υλικό αλλαγής φάσης και την ημερήσια διαφορά θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Εάν ο συγχρονισμός μεταξύ της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης και της ημερήσιας μεταβολής στη θερμοκρασία περιβάλλοντος επιτευχθεί, τότε είναι δυνατόν να ελεγχθεί η αύξηση στη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου. [102]

Η εξωτερική επιφάνεια γυαλιού-PV δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, ένα μέρος αυτής απορροφάται, ένα μέρος ανακλάται και το υπόλοιπο μεταβιβάζεται στο τμήμα του PCM (αρχικά σε στερεή φάση), το οποίο απορροφά ένα μέρος αυτής της ενέργειας και ανακλά το υπόλοιπο (η εσωτερική θερμοκρασία παραμένει αμετάβλητη). Στην επιφάνεια μεταξύ PV και PCM, η απορροφημένη από το PCM ακτινοβολία και η φερόμενη από την επιφάνεια PV-γυαλιού θερμότητα, αυξάνει τη θερμοκρασία του PCM, μετατρέποντας ένα στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης σε υγρό. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ολόκληρο το υλικό αλλαγής φάσης μετατραπεί σε υγρό και κατ' επέκταση η θερμοκρασία του εσωτερικού αγωγού αρχίζει να αυξάνεται. Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα PV/PCM εγγυάται ότι η εξωτερική θερμοκρασία θα αρχίσει να μειώνεται προτού γίνει πλήρης τήξη του PCM. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται σχηματικά ένα τμήμα PV/PCM. [102]



Εικόνα 4.2.2.6.2: Τμήμα του PV/PCM [102]

Ο Huang το 2004, χρησιμοποίησε ένα ήδη επινοημένο αριθμητικό μοντέλο για να επικυρώσει πειραματικά αποτελέσματα ενός συστήματος PV/PCM. Τρία συστήματα αναλύθηκαν, μια πλατφόρμα αλουμινίου συνδεδεμένη στο πίσω μέρος ενός φωτοβολταϊκού πάνελ και ένα σύστημα PV/PCM με αλλά και χωρίς περύγια συνδεδεμένα σε φωτοβολταϊκό πάνελ. Το αριθμητικό μοντέλο και τα πειραματικά αποτελέσματα βρέθηκαν να «συμφωνούν». Οι Hasan et al. διερεύνησαν τη χρήση PCM για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του PV ηλιακού στοιχείου και διαπίστωσαν πως η θερμοκρασία της επιφάνειας του PV μπορεί να ρυθμιστεί για έως και 30 λεπτά με μία θερμοκρασιακή μείωση των 18°C συγκριτικά με ένα συμβατικό ηλιακό στοιχείο. Επιπλέον, μία θερμοκρασιακή μείωση 10°C μπορεί να διατηρηθεί για έως και 5 ώρες. [103]

Το Sustainable Energy Center του Πανεπιστημίου της Ν. Αυστραλίας ασχολήθηκε με την ενσωμάτωση PCM σε ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ, με σκοπό τη μείωση της

θερμοκρασίας λειτουργίας και επομένως τη βελτίωση της απόδοσης μετατροπής. Πρόσφατες δοκιμές κατέδειξαν θερμοκρασιακές μειώσεις πάνω από 10°C, από την ενσωμάτωση ενός υλικού αλλαγής φάσης με σημείο τήξης 29°C, ως υπόστρωμα σε ηλιακό συλλέκτη. Αυτό έχει επιτευχθεί με χρήση μεταλλικών σωληνών γεμάτων με PCM. [93]

Οι Browne M. C. et al. μελέτησαν ένα νέο υβριδικό σύστημα PV/PCM, το οποίο αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό (PV) ηλιακό πάνελ με ένα θερμικό απορροφητή. Η ιδέα πίσω από αυτό το σύστημα είναι η συγχώνευση δύο αποτελεσματικών συστημάτων, των PV πάνελ και ενός ηλιακού θερμικού συστήματος, προκειμένου να παραχθεί ένα σύστημα που να επωφελείται από τη διαθεσιμότητα της θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση νερού και της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα αποτελείται από ένα PV ηλιακό πάνελ, με το οποίο συνδέεται ένα δοχείο γεμάτο με υλικό αλλαγής φάσης. Εντός του δοχείου υπάρχουν σωληνώσεις, διαμέσου των οποίων ρέει το νερό. Το PV πάνελ παράγει ηλεκτρική ενέργεια και το νερό ζεσταίνεται μέσω της αποθηκευμένης θερμότητας στο PCM. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το υλικό αλλαγής φάσης φορτίζεται, χρησιμοποιώντας τη θερμότητα που έχει παραχθεί από το PV και αποθηκεύει έτσι θερμική ενέργεια. Τη νύχτα, το PCM αποφορτίζεται, απελευθερώνοντας στο νερό την ήδη απορροφημένη θερμότητα. Παρακάτω, απεικονίζονται οι σωληνώσεις εντός του δοχείου του συγκεκριμένου συστήματος. [103]



Εικόνα 4.2.2.6.3: Σωληνώσεις νερού εντός του δοχείου

4.2.2.7 Άλλα ενεργητικά συστήματα

Οι Kaygusuz και Ayhan εξέτασαν την επίδοση ενός συνδυασμένου συστήματος αντλίας θερμότητας με ενεργειακή αποθήκευση σε ενσωματωμένο υλικό αλλαγής φάσης για θέρμανση κατοικιών. Αυτοί κατέληξαν ότι οι μέσες τιμές εποχιακού συντελεστή απόδοσης (COP) για συστήματα αντλιών θερμότητας σε σειρά, παράλληλα και διπλά για τις εποχές θέρμανσης (Δεκέμβριος-Μάιος) ήταν 4, 3 και 3,5 αντίστοιχα. [82]

4.2.2.8 PCM σε έπιπλα

Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν πολλές αναφορές για έπιπλα που ενσωματώνουν PCM και κάνουν πιο ομαλή την εσωτερική θερμοκρασία. Ωστόσο, η ισπανική ομάδα που διαγωνίστηκε στο American Solar Decathlon το 2007, ανέπτυξε ένα ενεργητικό

σύστημα PCM που τοποθετείται κάτω από τα έπιπλα, στις βάσεις τους. Έτσι, η ομάδα σχεδίασε για το διαγωνιζόμενο σπίτι, έπιπλα υπνοδωματίου και καθιστικού που διέθεταν βάσεις τύπου κουτιού, αντί για πόδια. Η βάση των κρεβατιών καλύπτει όλο το πλάτος του υπνοδωματίου, δίνοντας τη δυνατότητα στο σύστημα να πάρει ή να απελευθερώσει τον αέρα από τη μία πλευρά του χώρου στην άλλη. Παρόμοια, τα έπιπλα του καθιστικού «ακολουθούν» την περίμετρο του δωματίου σε μία διαμόρφωση σχήματος U και καθιστούν δυνατή τη διασύνδεση των μονάδων αποθήκευσης με PCM και την ανταλλαγή θερμότητας σε διαφορετικά σημεία του σπιτιού. Οι υπό μορφή κουτιού βάσεις των επίπλων διευκολύνουν την ενσωμάτωση σχαρών, ανεμιστήρων και εύτηκτου μίγματος σε μακροκάψουλες, θερμοκρασίας τήξης 26°C. [49]

4.3 Άλλες Εφαρμογές

Οι βιβλιογραφικές αναφορές και οι εμπορικές τάσεις έχουν δείξει ότι η εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης σε μεγάλους χώρους είναι λιγότερο δημοφιλείς. Ωστόσο, η αυξανόμενη τάση των αρχιτεκτόνων να σχεδιάζουν μεγάλα και καλαίσθητα κτίρια με μέγιστη θέα προς το εξωτερικό περιβάλλον, μειώνει τη θερμική αδράνεια αυτών, δημιουργώντας έτσι μία εξαιρετική ευκαιρία για χρήση των PCM. Προτού γίνει αναφορά στις μη κτιριακές εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης, παρατίθεται μία μελέτη που αφορά την εφαρμογή PCM σε χώρο αεροδρομίου.

4.3.1 Εφαρμογή πλακιδίων PCM στην αίθουσα αναχωρήσεων ενός αεροδρομίου

Πρόκειται για μία εφαρμογή πλακιδίων PCM στο δάπεδο μιας αίθουσας αναχωρήσεων αεροδρομίου, που μελέτησαν οι Baboo Gowreesunker και Savvas Tassou, από το Πανεπιστήμιο Brunel του Λονδίνου. Σε αντίθεση με τις περισσότερες μελέτες, όπου δοκιμάζονται παθητικά συστήματα με PCM σε σχετικά μικρούς χώρους γραφείων, στους οποίους η ροή αέρα έχει μικρές συνέπειες στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση του χώρου, η συγκεκριμένη μελέτη αποσκοπεί στην αξιολόγηση των ενεργειακών επιπτώσεων από την εφαρμογή πλακιδίων PCM σε έναν μεγάλο ανοιχτό εσωτερικό χώρο, αυτόν της αίθουσας αναχωρήσεων αεροδρομίου, όπου η επίδραση της ροής αέρα είναι κρίσιμη για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης των κλιματιστικών μονάδων. Σε τέτοιους μεγάλους ανοιχτούς εσωτερικούς χώρους όπως τα αεροδρόμια, ο κλιματισμός αέρα παρέχεται είτε μέσω στομιών παροχής αέρα είτε μέσω ακροφυσίων μεγάλου βεληνεκούς. Τα ακροφύσια μεγάλου βεληνεκούς, που χρησιμοποιήθηκαν και στο Διεθνές Αεροδρόμιο της Βαρκελώνης, παρέχουν αέρα σε σχετικά υψηλά επίπεδα και ταχύτητες, ενώ τα στόμια παρέχουν κρύο αέρα σε χαμηλές ταχύτητες και επίπεδα. [104]

Η αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των πλακιδίων PCM έγινε μέσω ενός συνδυασμού προσομοίωσης του TRNSYS και CFD, με το πρώτο να προσομοιώνει τη μονάδα κλιματισμού, ενώ το δεύτερο τη ροή αέρα και την ακτινοβολία εντός του χώρου. Η διαδικασία αλλαγής φάσης προσομοιώθηκε επίσης με το CFD, χρησιμοποιώντας ένα ανεπτυγμένο μοντέλο, που λαμβάνει υπόψη την υστέρηση και τη μη γραμμικότητα ενθαλπίας και θερμοκρασίας των PCM. [104]

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η χρήση των πλακιδίων PCM στο δάπεδο της αίθουσας αναχωρήσεων αεροδρομίου μειώνει τις απαιτήσεις θέρμανσης κατά 2% και 5% και τις απαιτήσεις ψύξης κατά 4% και 8% για την περίπτωση συστήματος με στόμια παροχής αέρα ('Displacement Ventilation') και για την περίπτωση συστήματος με ακροφύσια ('Mixed Ventilation'), αντίστοιχα. Τα

παραπάνω αντιστοιχούν σε ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας περίπου 3% για το σύστημα DV και περίπου 6% για το σύστημα MV και μεταφράζονται σε 174MWh/year και 379MWh/year για αεροδρόμιο μήκους 396m. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι χωρίς τα πλακάκια PCM, οι ετήσια ενεργειακή ζήτηση για το σύστημα DV και MV είναι 6419MWh και 6767MWh αντίστοιχα, ενώ αντίθετα με τη χρήση των πλακιδίων PCM, αυτή μειώνεται σε 6245MWh και 6388MWh αντίστοιχα. [104]

Σε επίπεδο μη κτιριακών εφαρμογών, οι ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης μπορούν να αξιοποιηθούν στον τομέα των μεταφορών, των τηλεπικοινωνιών, των ηλεκτρονικών, αλλά και στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην ιατρική-φαρμακευτική, σε διαστημικές αποστολές και στην ένδυση, εξασφαλίζοντας για ακόμη μία φορά τη θερμική άνεση του ανθρώπινου σώματος.

4.3.2 PCM στις μεταφορές και συσκευασίες αγαθών

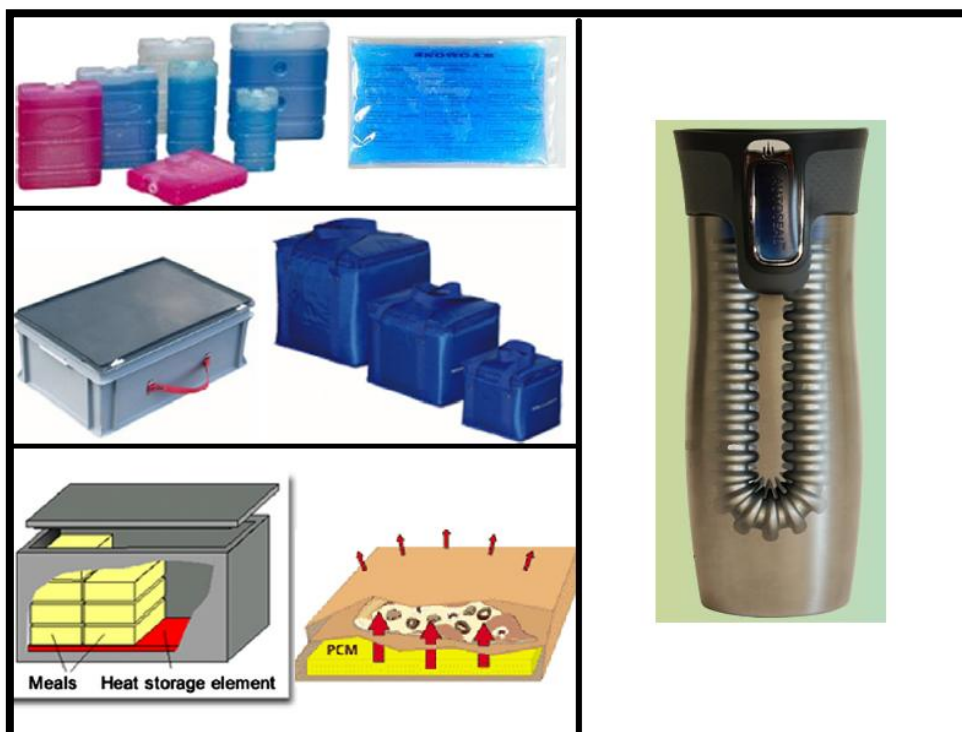
Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, περισσότερα από 3 δισεκατομμύρια δολάρια σε ευαίσθητα στη θερμοκρασία αγαθά χάνονται ετησίως από αλλοιώσεις που υφίστανται, λόγω ακατάλληλης συσκευασίας και κατώτερης ποιότητας δοχείων στα οποία μεταφέρονται. [105] Μία από τις πιο γνωστές μη κτιριακές εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης είναι αυτή της μεταφοράς φορτίων υπό συγκεκριμένες θερμοκρασιακές συνθήκες και ευάλωτων στις θερμοκρασιακές μεταβολές προϊόντων. Τέτοια φορτία είναι συνήθως ευπαθή τρόφιμα, ευαίσθητα στη θερμοκρασία φαρμακευτικά προϊόντα, διάφορα ηλεκτρονικά και χημικά (εκρηκτικά), των οποίων η επίγεια μεταφορά απαιτεί φορτηγά που διαθέτουν ψυγείο. [106] Αυτά τα φορτηγά-ψυγεία διαθέτουν μονάδες ψύξης, τοποθετημένες στο εξωτερικό του οχήματος, οι οποίες διατηρούν σε σταθερή θερμοκρασία και σχετική υγρασία το εσωτερικό του φορτηγού. [107] Ωστόσο, η λειτουργία τέτοιων φορτηγών είναι απαγορευτικά δαπανηρή, καθώς η μονάδες ψύξης που φέρουν χρησιμοποιούν κινητήρα καυσίμου Diesel, όπου το κόστος της παραγόμενης ενέργειας σε αυτήν την περίπτωση είναι έξι φορές υψηλότερο σε σύγκριση με το συμβατικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. [106] Τόσο το αυξημένο κόστος, όσο και οι μεγάλες εκπομπές καυσαερίων και ο έντονος θόρυβος που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία των κινητήρων Diesel είναι παράγοντες που ώθησαν προς την κατεύθυνση αξιοποίησης των PCM στον τομέα των μεταφορών. [107, 108] Έτσι, τα PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μόνωση αυτών των φορτηγών και με αυτόν τον τρόπο να μειώσουν το ποσό καυσίμου που χρειάζεται για τη διατήρηση του εκάστοτε προϊόντος σε ορισμένη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του. [107] Βέβαια, η εφαρμογή των PCM δε γίνεται μόνο στις επίγειες, αλλά και στις θαλάσσιες και εναέριες μεταφορές.

Οι Ahmed, Meade και Medina το 2010 τροποποίησαν τη συμβατική μέθοδο μόνωσης ενός φορτηγού-ψυγείου, χρησιμοποιώντας υλικά αλλαγής φάσης με βάση την παραφίνη στα τοιχώματα του φορτηγού, ως τεχνολογία μείωσης της μεταφοράς θερμότητας. Από την εφαρμογή των PCM σε όλα τα τοιχώματα (νότια, ανατολικά, βόρεια, δυτικά και οροφή) παρατηρήθηκε μία μέση μείωση στην τιμή της μέγιστης μεταφοράς θερμότητας 29,1%, ενώ στην περίπτωση της εφαρμογής αυτών σε μεμονωμένα τοιχώματα η μείωση ήταν στο εύρος 11,3 έως 43,8 %. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν μειώσεις της συνολικής ημερήσιας ροής θερμότητας εντός του ψυκτικού θαλάμου του φορτηγού 16,3%. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να μεταφραστούν σε εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση της ρύπανσης από της ψυκτικές μονάδες καύσης Diesel, μικρότερο μέγεθος εξοπλισμού ψύξης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού. [107]

Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο τα υλικά αλλαγής φάσης εξυπηρετούν στη μεταφορά προϊόντων είναι η ενσωμάτωση των PCM σε δοχεία, στα οποία εσωκλείονται συνήθως ευπαθή τρόφιμα. Προτού χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά, αυτά τα δοχεία θα πρέπει να παραμείνουν στο εσωτερικό ενός ψύκτη-καταψύκτη, έως ότου στερεοποιηθεί το υλικό αλλαγής φάσης που εμπεριέχουν. Ένα παράδειγμα αποτελεί το δοχείο που προωθεί στο εμπόριο η εταιρεία SOFRIGAM με υλικά αλλαγής φάσης σημείων τήξης 0°C, -15°C και -20°C. Αυτά τα δοχεία μπορεί να είναι είτε άκαμπτα είτε μαλακά. Σε δοχεία με PCM μπορούν επίσης να μεταφερθούν, για εφαρμογές catering, μαγειρεμένα γεύματα ή κατεψυγμένα προϊόντα, όπως καπνιστός σολομός, παράγωγα του γάλακτος, ζεστά και κρύα ροφήματα, παγωτά και πολλά άλλα. Οι κύριες εταιρείες που παράγουν τέτοια δοχεία είναι οι Rubitherm, Climator και Tear PCM. [109]

Η εταιρεία Entropy Solutions μεταξύ άλλων ενσωματώνει το PureTemp PCM της σε τοιχώματα φλιτζανιών καφέ, παρατείνοντας έτσι το χρονικό διάστημα, στο οποίο το αφένημα διατηρείται στο ιδανικό θερμοκρασιακό φάσμα για την κατανάλωσή του, ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Τα χρησιμοποιούμενα PCM επιλέγονται με γνώμονα τη θερμοκρασία τήξης τους, η οποία αποτελεί και την ιδανική θερμοκρασία κατανάλωσης του καφέ. Συνεπώς, όταν η θερμοκρασία του καφέ είναι πάνω από την ιδανική περιοχή, το υλικό αλλαγής φάσης απάγει θερμότητα και την αποθηκεύει, μειώνοντας τη θερμοκρασία του περιεχομένου του κυπέλου στα επιθυμητά επίπεδα. Όταν η θερμοκρασία του καφέ γίνει χαμηλότερη από την επιθυμητή, η αποθηκευμένη θερμότητα στο PCM απελευθερώνεται στο αφένημα, διατηρώντας μία βέλτιστη θερμοκρασία κατανάλωσης. [105]

Ακολουθούν εικόνες με περιπτώσεις δοχείων μεταφοράς και συσκευασίας προϊόντων.



Εικόνα 4.3.2.1: Παγοκύστες της εταιρείας SOFRIGAM, κιβώτια μεταφοράς τροφίμων, ιδέα catering με εφαρμογή PCM (από πάνω αριστερά μέχρι κάτω αριστερά), κούπα καφέ της εταιρείας Entropy Solutions (δεξιά)

Εκτός από τα τρόφιμα, ανάγκη για διατήρηση υπό συγκεκριμένες θερμοκρασίες κατά τη μεταφορά τους έχουν και διάφορα ιατρικά και φαρμακευτικά προϊόντα, όπως φάρμακα, όργανα (μοσχεύματα), αίμα, εμβόλια και πολλά ακόμη. Για τη μεταφορά αίματος, ένα σημαντικό σύστημα είναι ένας συσσωρευτής λανθάνουσας θερμότητας που ενσωματώνει PCM της εταιρείας Rubitherm. Η σακούλα που περιέχει το αίμα τοποθετείται ανάμεσα στους προψυχθέντες συσσωρευτές, οι οποίοι στη συνέχεια στοιβάζονται σε ειδικά δοχεία μεταφοράς. Κατ' αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται η διατήρηση του αίματος μεταξύ των 2 και 10°C για τουλάχιστον 12 ώρες, με μία εξωτερική θερμοκρασία στους 35°C. [110]

Η εταιρεία Entropy Solutions δημιούργησε ένα κιβώτιο με την ονομασία Greenbox, ιδανικό για τη μεταφορά ιατροφαρμακευτικών και βιολογικών προϊόντων. Αυτό το βραβευμένο με το Greener Package Award κιβώτιο αποτελείται από ένα σκληρό, αυλακωτό, πλαστικό εξωτερικό περίβλημα, στρώματα μόνωσης Thermal-Lok™ και E-Packs. Στο εσωτερικό των E-Packs περιέχεται ένα 100% βιολογικό, μη τοξικό και βιοδιασπώμενο υλικό αλλαγής φάσης που ονομάζεται PureTemp και παρέχεται επίσης από την Entropy Solutions. Το υλικό αυτό είναι ένα ειδικά σχεδιασμένο παράγωγο φυτικών ελαίων, που ελέγχει θερμοκρασίες που μπορεί να κυμαίνονται σε ένα αρκετά ευρύ φάσμα. Καθώς ένα E-Pack υγροποιείται, ένα άλλο στερεοποιείται, παρέχοντας έτσι ένα θερμοστατικό αποτέλεσμα μέχρις ότου το πακέτο φτάσει στον προορισμό του. Το Greenbox διατηρεί τη θερμοκρασία του μεταφερόμενου προϊόντος για περισσότερες από πέντε μέρες. Η Entropy Solutions υποστηρίζει ότι το συγκεκριμένο κιβώτιο μεταφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πάνω από 50 φορές. Τα επιμέρους εξαρτήματα του Greenbox είναι ανακυκλώσιμα. Το 2009, το Τμήμα Δημόσιας Υγείας του Σικάγο, προκειμένου να προετοιμαστεί για ενδεχόμενη πανδημία από τον ιό H1N1, «επιστράτευσε» κιβώτια Greenbox για την ασφαλή μεταφορά εμβολίων κατά του ιού. Η θερμοκρασία των εμβολίων έπρεπε να διατηρηθεί και διατηρήθηκε στο φάσμα 2-8°C. [111]

Οι σύγχρονες τάσεις στη φαρμακολογία ευνοούν ευαίσθητα σκευάσματα, όπως βιολογικά φάρμακα, προβιοτικά και σκευάσματα χωρίς συντηρητικά, τα οποία απαιτούν αυστηρό έλεγχο θερμοκρασίας κατά την αποθήκευση και διακίνησή τους, καθώς οποιαδήποτε θερμοκρασιακή διακύμανση εκτός των προδιαγεγραμμένων ορίων, μπορεί να τα αλλοιώσει, καθιστώντας τα ακατάλληλα για χρήση. Η ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα έχει να αντιμετωπίσει ένα ιδιαίτερα σύνθετο έργο, καθώς ενδέχεται να εμφανιστούν προβλήματα σε πολλά σημεία της. Συνεπώς, η μέριμνα για τη σωστή συντήρηση των φαρμάκων δεν τελειώνει στο φαρμακείο, αλλά θα πρέπει να συνεχίζεται και στο σπίτι και κατά τη διάρκεια της χρήσης, που ενδεχομένως να γίνεται και εκτός σπιτιού. Η εταιρεία ΑΡΓΩ σε συνεργασία με την Mediline (μια ελληνική εταιρεία που δραστηριοποιείται σε τεχνολογικά προηγμένες ισοθερμικές λύσεις) δημιούργησε το Medshell, μία δευτερογενή συσκευασία για τον έλεγχο θερμοκρασίας φαρμάκων στα τελευταία στάδια ταξιδιού τους. Το Medshell συνδυάζει τρία διαφορετικά ισοθερμικά υλικά: EPS, ένα PCM με βάση το νερό με σημείο τήξης 0°C και ένα PCM με βάση το κερί, σημείου τήξης 5°C. Αυτό το δοχείο παρέχει αυστηρό έλεγχο θερμοκρασίας μεταξύ 2 και 8°C για 8 ώρες σε μέση εξωτερική θερμοκρασία 35°C, δύναται να χρησιμοποιηθεί σε πολλαπλά ταξίδια, αρκεί η εσωτερική θήκη του να ψυχθεί ξανά, μεταφέρεται εύκολα και προστατεύει το φάρμακο από κραδασμούς ή πτώση στο ταξίδι. Επιπλέον, οι διαστάσεις του μπορούν να προσαρμοστούν, ώστε να χωρά περισσότερα του ενός προϊόντα. [112]

Τέλος, ειδικά καλύμματα με ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης δύναται να προστατέψουν υψηλού κόστους ηλεκτρονικά κατά τη θαλάσσια μεταφορά τους σε δοχεία.



Εικόνα 4.3.2.2: Δοχεία για τη μεταφορά αίματος (πάνω αριστερά), σακούλα με PCM της εταιρείας Cryopak κατάλληλη για μεταφορά ιατρικών και φαρμακευτικών προϊόντων (πάνω δεξιά), Greenbox της εταιρείας Entropy Solutions (κάτω αριστερά) και Medshell (κάτω δεξιά)

4.3.3 PCM στην ιατρική

Πέρα από την εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης στη μεταφορά ιατροφαρμακευτικών προϊόντων, τα PCM μπορούν να συμβάλλουν στον ιατρικό τομέα, όντας ενσωματωμένα σε διάφορα προϊόντα που ρυθμίζουν τη θερμοκρασία του ανθρωπίνου σώματος. Κάθε χρόνο, εκατομμύρια ανθρώπων παγκοσμίως βιώνουν επιπλοκές, εξαιτίας ακατάλληλης διαχείρισης της θερμοκρασίας του σώματός τους. Προλαμβάνοντας συνθήκες υποθερμίας κατά τη διάρκεια χειρουργικών διαδικασιών, συνδρόμου σοκ σε θύματα ατυχημάτων και όχι μόνο, τα ενσωματωμένα PCM σε μία ποικιλία ιατρικών προϊόντων μπορούν να διατηρήσουν την κρίσιμη θερμοκρασία σώματος, να βοηθήσουν στην αποστείρωση ιατρικών οργάνων και αλλού. [105]

Τα υλικά αλλαγής φάσης αλληλεπιδρούν με το μικροκλίμα γύρω από το ανθρώπινο σώμα, ανταποκρινόμενα στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, που οφείλονται σε αλλαγές στα επίπεδα δραστηριότητας και στην εξωτερική θερμοκρασία. Επομένως, υφάσματα με ενσωματωμένες μικροκάψουλες PCM στις ίνες τους έχουν τη δυνατότητα να εφαρμοστούν σε στολές χειρουργείου, στρώματα κλινών ασθενών, επιδέσμους και προϊόντα που ρυθμίζουν τη θερμοκρασία των ασθενών που νοσηλεύονται σε μονάδες εντατικής θεραπείας. Επίσης, υφάσματα με PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χειρουργικές γάζες, πάνες και προϊόντα ακράτειας. [113]

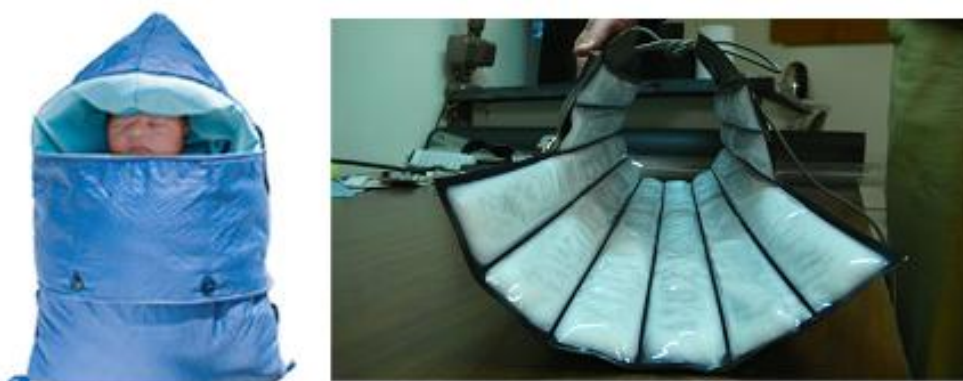
Μία εφαρμογή των PCM στον ιατρικό τομέα είναι και η ενσωμάτωσή τους σε κρύα επιθέματα και θερμοφόρες που θεραπεύουν τοπικούς πόνους στο σώμα. Τέτοια ζεστά επιθέματα παρέχει και η εταιρεία Rubitherm, όπως μαξιλάρια, ζώνες και διάφορα άλλα, τα οποία προσφέρουν ευχάριστη ζεστασιά για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, έπειτα από λίγα μόνο λεπτά φόρτισής τους. Η απορροφημένη θερμότητα

σε αυτά θα απελευθερώνεται σε ένα σχετικά σταθερό θερμοκρασιακό επίπεδο για πάνω από μία με δύο ώρες. [110]



Εικόνα 4.3.3.1: Ζεστά επιθέματα-θερμοφόρες της εταιρείας Rubitherm

Κάθε χρόνο περίπου 4 εκατομμύρια πρόωρα μωρά πεθαίνουν, εξαιτίας κυρίως επιπλοκών που οφείλονται σε υποθερμία. Ειδικές παθητικές θερμοκοιτίδες με ενσωματωμένο PureTemp PCM παρέχουν πάνω από 4 ώρες σωτήριας θερμικής προστασίας σε πρόωρα μωρά, χωρίς την ανάγκη ηλεκτρικού ρεύματος. [105]



Εικόνα 4.3.3.2: Θερμοκοιτίδα με PureTemp PCM (αριστερά), εξοπλισμός θερμοκοιτίδας-το λευκό χρώμα υποδηλώνει τη στερεή φάση του PCM (δεξιά)

Μία αξιοσημείωτη εφαρμογή των PCM στον ιατρικό τομέα είναι η χρήση τους στην καρδιαγγειακή χειρουργική. Η μέθοδος επανασύνδεσης των κομμένων αιμοφόρων αγγείων με βελόνα και κλωστή (ράμματα) αν και αποτελεσματική, μπορεί να οδηγήσει σε επιπλοκές, όπως φράξιμο των αγγείων και δημιουργία θρόμβων αίματος, λόγω τραυματισμού των κυττάρων από το τρύπημα της βελόνας. Τη λύση σε τέτοιου είδους προβλήματα ήρθε να δώσει ένα νέο θερμοευαίσθητο σύνθετο gel και κόλλας, που επιτρέπει την επανασύνδεση των αγγείων χωρίς την παρέμβαση βελόνας και κλωστής. Αρχικά, ο Gurtner είχε σκεφτεί ως λύση τον πάγο. Ωστόσο, αυτό θα σήμαινε να καταστεί το αγγείο πολύ κρύο, διαδικασία δύσκολη και υπερβολικά χρονοβόρα για τα δεδομένα χειρουργικής επέμβασης. Έτσι, ο Gerald Fuller πρότεινε ένα θερμοαναστρέψιμο πολυμερές, ήδη εγκεκριμένο για ιατρική χρήση, το Poloxamer 407. Έπειτα από μελέτες και δοκιμές της ομάδας επιστημόνων του Stanford University Medical Center, το πολυμερές αυτό τροποποιήθηκε ώστε να γίνεται στερεό και ελαστικό όταν θερμαίνεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη του σώματος και να διαλύεται στο κυκλοφορικό σύστημα στη θερμοκρασία του σώματος. Σύμφωνα με ερευνητές, η μέθοδος με το πολυμερές αποδείχτηκε 5 φορές πιο γρήγορη από την μέθοδο ραμμάτων και ικανή να εφαρμοστεί σε ιδιαίτερα λεπτά αιμοφόρα αγγεία πλάτους 0,2mm, πράγμα πρακτικά αδύνατο με τη μέθοδο βελόνας και κλωστής. [114]

4.3.4 PCM σε υφάσματα

Τα τελευταία χρόνια υφάσματα αλλά και ενδύματα με αυτόματα εγκλιματιζόμενες ιδιότητες, χάρη στα υλικά αλλαγής φάσης που εμπεριέχουν, προσελκύουν ολοένα πιο πολύ το ενδιαφέρον των ερευνητών από πανεπιστήμια. Τα υφάσματα που περιέχουν PCM αντιδρούν άμεσα στις μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας διαφόρων περιοχών του σώματος. Στόχος τους είναι η παροχή θερμικής άνεσης, η ομοιόμορφα κατανομημένη θερμοκρασία και κατ' επέκταση η έκκριση λιγότερου ιδρώτα από το ανθρώπινο σώμα. Προτού εφαρμοστούν τα υλικά αλλαγής φάσης στη δομή των υφασμάτων, εσωκλείονται σε υγρή μορφή σε πολύ μικρές σφαίρες διαμέτρου 1μm έως 30μm συνήθως. Οι μικροκάψουλες είναι ανθεκτικές στη μηχανική δράση, στη θερμότητα και στα περισσότερα είδη χημικών ουσιών. Όταν παρατηρηθεί αύξηση θερμοκρασίας, λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας περιβάλλοντος ή αυξημένης θερμοκρασίας του σώματος, οι μικροκάψουλες PCM αντιδρούν απορροφώντας θερμότητα και αποθηκεύοντάς την στο ρευστό υλικό αλλαγής φάσης, δημιουργώντας μία προσωρινή δροσερή αίσθηση στο σώμα. Με την πτώση και πάλι της θερμοκρασίας, οι μικροκάψουλες απελευθερώνουν τη θερμική ενέργεια και το PCM μεταβαίνει στη στερεή φάση, δημιουργώντας μία προσωρινή θερμή αίσθηση στο σώμα. [113]

Η τεχνολογία ενσωμάτωσης μικροκαψουλών PCM στη δομή υφασμάτων, με σκοπό τη βελτίωση της θερμικής τους απόδοσης, αναπτύχθηκε στις αρχές του 1980 στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος της NASA. Αρχική πρόθεση ήταν να χρησιμοποιηθούν αυτά τα υφάσματα στις διαστημικές στολές των αστροναυτών, προκειμένου να παρέχουν βελτιωμένη θερμική προστασία έναντι των ακραίων θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στο διάστημα. [113] Λίγα χρόνια μετά τη δημιουργία της πρώτης διαστημικής στολής με ενσωματωμένη παραφίνη υπό τη συνεργασία της NASA και της Triangle Research and Development (1987), η εταιρεία Gateway Technologies απέκτησε τις αποκλειστικές ευρεσιτεχνίες από την Triangle Research and Development και ήταν η πρώτη που κατέστησε προσιτά τα PCM στους καταναλωτές μέσω της ένδυσης. Η ίδια εταιρεία, γνωστή πλέον ως Outlast Technologies, έχει συνεργαστεί με δημοφιλείς μάρκες στην αγορά των υλικών αλλαγής φάσης και έτσι από το 2003 εμφανίζονται τέτοια «έξυπνα υφάσματα» σε σχεδόν κάθε μεγάλη μάρκα ειδών ένδυσης, μεταξύ των οποίων οι Adidas, Eddie Bauer, Burton, Timberland και North Face. Με επιτυχία σε παρκά (πανωφόρι), γάντια και θερμικά εσώρουχα, η εφαρμογή των PCM συνεχίζει να επεκτείνεται περαιτέρω και σε άλλες μορφές υφασμάτων και σήμερα συναντώνται ενσωματωμένα σε υφάσματα προϊόντων καθημερινής ένδυσης και υπόδησης, σε αθλητικά ρούχα, όπως γάντια snowboard, μπότες σκι, μπότες ορειβασίας, στολές ποδηλασίας και άλλων αθλημάτων, σε είδη και αξεσουάρ ύπνου, όπως κουβέρτες, παπλώματα, στρώματα, μαξιλάρια, υπνόσακοι, σε ιατρικά και προστατευτικά ενδύματα, όπως στολές πυροσβεστών και χειρουργών, ακόμη και σε καλύμματα καθισμάτων αυτοκινήτων, κράνη και διάφορα άλλα. [115]



Εικόνα 4.3.4.1: Γάντια τερματοφύλακα ποδοσφαίρου από την εταιρεία αθλητικών ειδών Adidas με PCM της Outlast (Adidas Response Pro MA GK Gloves)

Για τη δημιουργία υφασμάτων με ενσωματωμένα PCM υπάρχουν τέσσερα συστήματα παραγωγής. Το πρώτο παραγωγικό σύστημα περιλαμβάνει την πλήρωση ή εμποτισμό των ινών με υλικά αλλαγής φάσης. Το 1989, οι Vigo και Frost γέμισαν κοιλότητες ραγιόν και ίνες πολυπροπυλενίου με ανόργανα PCM. Η δεύτερη μέθοδος παραγωγής είναι πολύ εύκολη και χρήσιμη και περιλαμβάνει την επικάλυψη των ινών με κατάλληλο αφρό που περιέχει ενσωματωμένο υλικό αλλαγής φάσης. Ο τρίτος τρόπος παραγωγής υφασμάτων με PCM αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1990 και είναι το γνέσιμο, δηλαδή το στρίψιμο των ινών. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα υλικά αλλαγής φάσης προστίθενται σε υγρό πολυμερές, διάλυμα πολυμερούς ή βασικό υλικό και στη συνέχεια η ίνα περιστρέφεται σύμφωνα με συμβατικές μεθόδους, όπως ξηρή ή υγρή ινοποίηση και εξώθηση του τηγμένου πολυμερούς. Η τελευταία μέθοδος παραγωγής εισήχθη από τον Pause (2003) και περιλαμβάνει άμεση ενσωμάτωση PCM σε μία μεμβράνη πολυμερούς (πάχους 0,3mm). [116]

Παρόλο που πολλές ουσίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά αλλαγής φάσης σε εφαρμογές υφασμάτων και ένδυσης, η παραφίνη είναι το πλέον προτιμώμενο είδος PCM, καθώς το σημείο τήξης της είναι πολύ κοντά στη θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος. Ωστόσο, το σημείο τήξης της εξαρτάται από το πλήθος των μορίων του άνθρακα. Μία άλλη ουσία που χρησιμοποιείται ως PCM σε αυτό το πεδίο εφαρμογών είναι το PEG, μία πολυμερική ουσία συμβατή με τη φύση. Το σημείο τήξης της εξαρτάται από το μέσο μοριακό βάρος της ουσίας, δηλαδή αύξηση του μέσου μοριακού βάρους συνεπάγεται αύξηση του σημείου τήξης. [116]

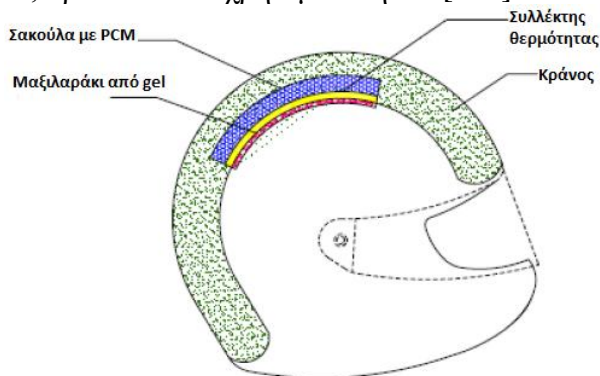
Για το σχεδιασμό ενός ειδικού ρούχου που περιέχει PCM, η ποσότητα του υλικού αλλαγής φάσης θα πρέπει να καθορίζεται με βάση το επίπεδο δραστηριότητας και τη διάρκεια χρησιμοποίησης του ενδύματος, λαμβάνοντας υπόψη τη διατήρηση επαρκούς διαπνοής, ευκαμψίας και μηχανικής σταθερότητας της δομής.

Το 1999 ο Nuckols μελέτησε την αναλυτική μοντελοποίηση μιας στολής δύτη ενισχυμένης με μικροκάψουλες PCM. Αυτός υπογράμμισε το γεγονός ότι ο αφρός Comfortemp με μικροκάψουλες PCM θα μπορούσε να μειώσει την απώλεια θερμότητας σε ένα δύτη κατά τη αρχική φάση μιας κατάδυσης. Η ύπαρξη του υλικού αλλαγής φάσης καθυστερεί το κύμα ψυχρής θερμοκρασίας που διαπερνά τη στολή του δύτη, έως ότου στερεοποιηθεί το PCM, οπότε ο Comfortemp αφρός λειτουργεί πλέον ως συμβατική μόνωση. Το 2001 ο Doherty εφηύρε ένα ένδυμα ψύξης αποτελούμενο από δύο μέρη. Το πρώτο εξωτερικό μέρος του ενδύματος είναι ένα μεταλλικό δέρμα που αντανάκλα την υψηλή ένταση του φωτός και της θερμότητας. Το εσωτερικό μέρος αποτελείται από ένα εύκαμπτο ύφασμα (ίνες αραμιδίου, βαμβάκι

κ.ο.κ.) που περιέχει θυλάκια, εντός των οποίων υπάρχουν σακουλάκια που περιέχουν PCM. Το 2003 ο Pause ανέφερε πως η θερμική καταπόνηση χημικών και μη υφασμένων προστατευτικών ρούχων μειώνεται μέσω της ενσωμάτωσης PCM σε μία λεπτή μεμβράνη πολυμερούς και εφαρμογής αυτού στην εσωτερική πλευρά του υφάσματος, ενώ με τη μείωση της θερμικής καταπόνησης, αποφεύγονται ατυχήματα και λάθη. [116]

Τα προστατευτικά ενδύματα, που φοριούνται σε καταστάσεις εξωτερικής θερμικής καταπόνησης ή εντατικής σωματικής εργασίας, μπορούν να επηρεάσουν το σύστημα ρύθμισης της θερμοκρασίας του σώματος σε τέτοιο βαθμό, ώστε να καθίσταται αδύνατη η θερμική ισορροπία, γεγονός που οδηγεί σε αποθήκευση θερμότητας και κατά συνέπεια σε ανάπτυξη υποθερμίας και δημιουργία αισθήματος δυσφορίας, ακόμη και σε μέτριες θερμοκρασίες έκθεσης. Τα PCM μπορούν να δώσουν λύση σε αυτό το πρόβλημα, να μειώσουν τη θερμική καταπόνηση και να βελτιώσουν τη θερμική άνεση του ανθρώπινου σώματος, απορροφώντας θερμότητα κατά την αλλαγή φάσης τους από στερεό σε υγρό. Η επίδραση της ενσωμάτωσης PCM σε προστατευτικά ενδύματα μελετήθηκε από τους Reinertsen et al.. Στόχος τους ήταν η βελτιστοποίηση της απόδοσης ψύξης των PCM σε προστατευτικά ρούχα δύο διαφορετικών καταστάσεων εργασίας: χειρουργική επέμβαση σε χειρουργείο και καλά μονωμένα ρούχα για χρήση σε μέτρια θερμές συνθήκες. Αυτοί υπέθεσαν ότι η προσεκτική τοποθέτηση των υλικών αλλαγής φάσης, δίνοντας τη δέουσα προσοχή στα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης θερμορύθμισης και στους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας διαμέσου τις προστατευτικής ενδυμασίας, θα μπορούσε να βελτιώσει τη θερμική άνεση του ανθρώπινου σώματος. Στα πειράματα που διεξήγαγαν, χρησιμοποίησαν δύο τύπους υλικών αλλαγής φάσης, το κρυσταλλικό δεκαένυδρο θεικό νάτριο ή αλλιώς Glauber's salt (Climsel C28, C31 Climatro AB, Sweden) και μικροκάψουλες σε υφάσματα (Outlast® 341 Clemmons, Outlast Europe GmbH, Germany). Προστατευτικά ενδύματα με υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούν επίσης οι πυροσβέστες, οι εργάτες στη χαλυβουργία, οι δύτες, μέλη της αστυνομίας και του στρατού και άλλες κατηγορίες επαγγελματιών. [117]

Υλικά αλλαγής φάσης έχουν εφαρμοστεί και σε κράνη μοτοσυκλετιστών, προσφέροντας θερμική άνεση στον αναβάτη, που είναι μεγάλης σημασίας για το βαθμό εγρήγορσής του. Συγκεκριμένα, το PCM είναι ενσωματωμένο σε σακουλάκι, το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στο κράνος και στο κεφάλι του αναβάτη. Η θερμότητα από το κεφάλι μεταφέρεται στο PCM με συναγωγή μέσω ενός συλλέκτη θερμότητας, ο οποίος βρίσκεται πάνω από το κεφάλι του οδηγού. Δεν απαιτείται ηλεκτρική ισχύς για το σύστημα ψύξης. Η μονάδα ψύξης δύναται να παρέχει ψύξη για 2 ώρες, όταν το υλικό αλλαγής φάσης βρίσκεται στην υγρή του μορφή. Ωστόσο, επειδή η θερμότητα δεν αποβάλλεται στο περιβάλλον, το κράνος θα πρέπει να βυθίζεται σε κρύο νερό για την αποφόρτίσή του, προτού επαναχρησιμοποιηθεί. [118]



Εικόνα 4.3.4.2: Σχηματική απεικόνιση κράνους με ενσωματωμένο PCM

Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να αξιοποιηθούν και στον τομέα της υπόδησης. Υποδήματα, κάλτσες, πάτοι υποδημάτων αλλά και υποδήματα αθλητών, όπως μπότες για σκι και ορειβασία, ενισχύονται με PCM, ώστε να εξασφαλίζουν άνετο περιβάλλον στα πόδια, λιγότερη κόπωση και μικρότερη εφίδρωση, συμβάλλοντας έτσι στην αποφυγή μυκητιάσεων και άλλων δερματοπαθειών, που αναπτύσσονται συνήθως υπό συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. [119]



Εικόνα 4.3.4.3: Προϊόντα υπόδησης με PCM από την Outlast

Το γιλέκο ψύξης είναι ένα από τα συνηθέστερα είδη ρουχισμού με ενσωματωμένα PCM και χρησιμοποιείται για την ψύξη του σώματος ανθρώπων που εργάζονται σε περιβάλλον με υψηλές θερμοκρασίες ή που επιτελούν έντονη χειρονακτική εργασία. Ένα τέτοιο γιλέκο είναι το Coolvest της εταιρείας TST-Sweden AB, με υλικό αλλαγής φάσης TEMPTECH™ που βασίζεται στο PCM της εταιρείας Climator και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για θέρμανση είτε για ψύξη του χρήστη. Παρά ταύτα, γιλέκο ψύξης μπορεί να φορεθεί και σε ζώα που εκτελούν κάποια εργασία, σε κατοικίδια, ακόμα και σε άλογα κούρσας. Τέλος, εισαγωγή PCM μπορεί να γίνει και σε βαλλιστικά γιλέκα, που προστατεύουν από πυροβολισμούς. [120]

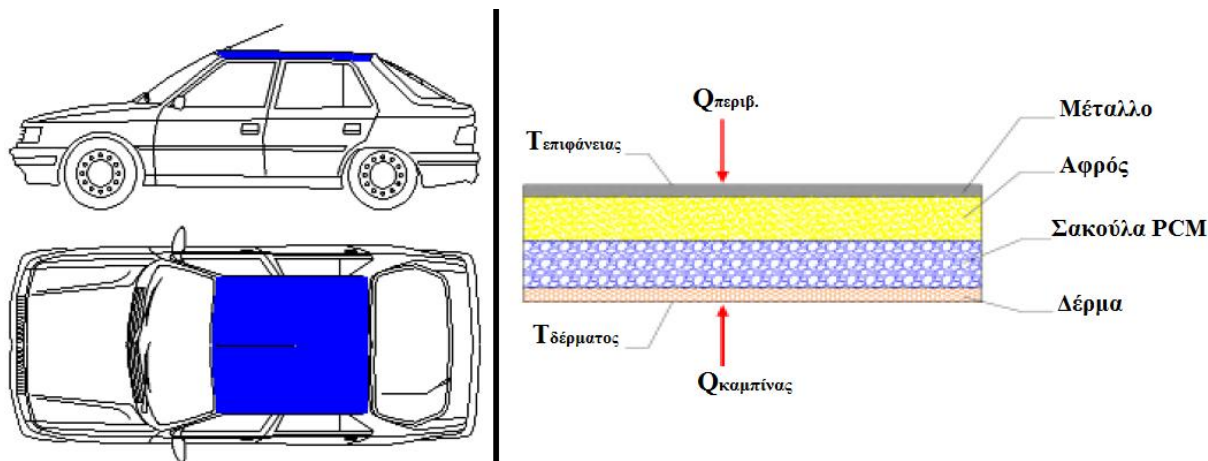


Εικόνα 4.3.4.4: Γιλέκο ψύξης/θέρμανσης από την TST-Sweden και Climator

4.3.5 PCM στην αυτοκινητοβιομηχανία

Τις ηλιόλουστες μέρες ειδικά το καλοκαίρι, οι προσπίπτουσες ακτίνες του ηλίου πάνω στα σταθμευμένα ή ακόμα και κινούμενα οχήματα, προκαλούν στους οδηγούς και επιβάτες ένα έντονο αίσθημα θερμικής δυσφορίας, ιδιαίτερα κατά την είσοδό τους σε αυτά. Ως εκ τούτου, απαιτείται ένα τεράστιο ποσό ενέργειας ψύξης από το σύστημα κλιματισμού προκειμένου να φτάσει η θερμοκρασία σε επίπεδα θερμικής άνεσης. Αρκετές αν και ακραίες είναι οι περιπτώσεις θανάτων μικρών παιδιών ή ζώων (σκύλων), που είχαν μείνει εντός σταθμευμένων αυτοκινήτων σε ώρες και μέρες έντονης ηλιοφάνειας. Για τη διατήρηση συνθηκών άνεσης στο εσωτερικό του αυτοκινήτου κατά τη διάρκεια οδήγησης, οι αυτοκινητοβιομηχανίες εξοπλίζουν τα μοντέλα τους με συστήματα κλιματισμού, γεγονός όμως που οδηγεί σε καύση περισσότερων καυσίμων και συνεπώς σε μεγαλύτερο κόστος και αυξημένους ρύπους προς την ατμόσφαιρα. Από την άλλη πλευρά, κατά τους χειμερινούς μήνες, απαιτείται η πάροδος μερικών λεπτών μετά την ενεργοποίηση του συστήματος θέρμανσης, ώστε να επιτευχθεί κατάσταση θερμικής άνεσης. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, ορισμένα μοντέλα αυτοκινήτων διαθέτουν επιπλέον συστήματα θέρμανσης εγκατεστημένα στα καθίσματά τους, με την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία αυτών να παρέχεται από την μπαταρία του αυτοκινήτου. Προκειμένου να αποφευχθεί η περαιτέρω ζήτηση για αυξημένη χωρητικότητα της μπαταρίας και να παραταθεί η διάρκεια ζωής της είναι απαραίτητη η εξοικονόμηση ενέργειας. [121]

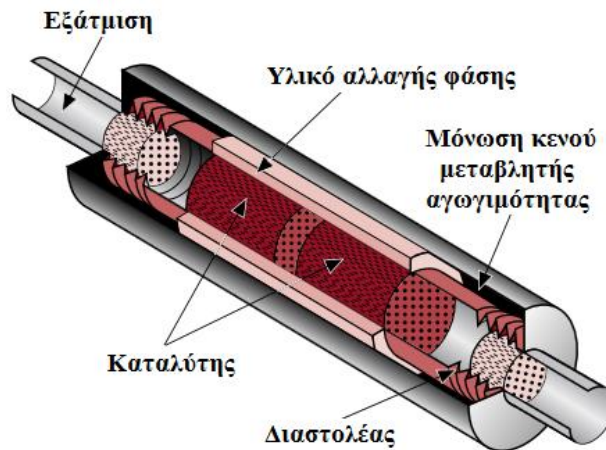
Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μέσω των υλικών αλλαγής φάσης είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρα, καθώς πρόκειται για μέσα μηδενικής χρήσης ενέργειας που δύνανται να μειώσουν το προφίλ θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στην καμπίνα του αυτοκινήτου, τόσο κατά τους θερινούς όσο και κατά τους χειμερινούς μήνες. Οι Jamekhorshid και Sadrameli εισήγαγαν ένα καινοτόμο σχεδιασμό για το θερμοκρασιακό έλεγχο στο θάλαμο ενός σταθμευμένου ή κινούμενου αυτοκινήτου υπό συνθήκες ηλιοφάνειας. Στην οροφή του αυτοκινήτου τοποθετήθηκε ένα πολύ λεπτό στρώμα από PCM σε συσκευασία σακούλας. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία του αυτοκινήτου είναι μεγαλύτερη από το σημείο τήξης του PCM, θερμότητα μεταφέρεται στο υλικό αλλαγής φάσης τήκοντάς το και μειώνοντας έτσι τη θερμοκρασία του οχήματος. Όταν η θερμοκρασία του αυτοκινήτου είναι χαμηλότερη του σημείου τήξης του PCM, απελευθερώνεται θερμική ενέργεια και το υλικό αλλαγής φάσης στερεοποιείται. Στο σύστημα θερμοκρασιακής ρύθμισης με PCM, ανάμεσα στη σακούλα PCM και στο μεταλλικό σώμα του αυτοκινήτου υπάρχει ένα στρώμα αφρού, το οποίο εξαλείφει την ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον, ενώ το δερμάτινο στρώμα είναι για την ικανοποίηση των κριτηρίων εσωτερικού σχεδιασμού. Η απαιτούμενη ποσότητα υλικού αλλαγής φάσης υπολογίστηκε και προέκυψε περίπου 755g, ενώ ως PCM χρησιμοποιήθηκε ένας τύπος παραφίνης (n-Nonadecane). Το σύστημα αυτό είναι απλό και έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί ως πρακτική λύση για την αντιμετώπιση ανεπιθύμητης θέρμανσης της καμπίνας του οχήματος. Παρακάτω φαίνεται σχηματικά η διαμόρφωση του στρώματος PCM στην οροφή ενός αυτοκινήτου. [121]



Εικόνα 4.3.5.1: Διαμόρφωση στρώματος PCM στην οροφή του αυτοκινήτου (αριστερά) και βασικά συστατικά του συστήματος (δεξιά) [121]

Πέρα από την εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης στα υφάσματα καθισμάτων των οχημάτων, που αναφέρθηκε στην ενότητα εφαρμογής των PCM σε υφάσματα, και που στοχεύει στην εξασφάλιση θερμικής άνεσης οδηγού και επιβατών, τα PCM μπορούν να εφαρμοστούν σε μπαταρίες, αλλά και να τοποθετηθούν στο σύστημα εξαγωγής των καυσαερίων (εξάτμιση). Στην πρώτη περίπτωση, το PCM συνδέεται με το ψυγείο του αυτοκινήτου και αποθηκεύει την περίσσεια θερμότητας, όταν ο κινητήρας λειτουργεί στα θερμοκρασιακά όρια σχεδίασης. Η θερμότητα αυτή είναι διαθέσιμη στην επόμενη εκκίνηση του οχήματος με κρύο κινητήρα, με σκοπό τη γρηγορότερη θέρμανση αυτού και κατ' επέκταση την καλύτερη κατανάλωση καυσίμου. Παράλληλα, επιτυγχάνεται και θέρμανση της καμπίνας του αυτοκινήτου. Μία τέτοια μπαταρία λανθάνουσας θερμότητας παρέχεται στα οχήματα της BMW της σειράς 5, από την εταιρεία Bridgeway Ltd. Μάλιστα, χάρη στην εξαιρετική μόνωση της μπαταρίας, η αποθηκευμένη θερμότητα στο υλικό αλλαγής φάσης μπορεί να διατηρηθεί έως και δύο εικοσιτετράωρα για μία εξωτερική θερμοκρασία -20°C . [106]

Κατά την εφαρμογή των PCM στο σύστημα εξαγωγής καυσαερίων, τα υλικά αλλαγής φάσης τοποθετούνται στον καταλυτικό μετατροπέα, ο οποίος αναλαμβάνει τη μείωση των εκπομπών υδρογονανθράκων και άλλων ρύπων. Για τη λειτουργία του καταλύτη προϋποτίθεται μία θερμοκρασία περίπου 300°C , η οποία επιτυγχάνεται μετά την πάροδο μερικών λεπτών από την εκκίνηση του αυτοκινήτου. Αυτό σημαίνει πως κατά την εκκίνηση του οχήματος, όπου ο κινητήρας είναι ακόμα κρύος, ο καταλύτης δεν μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός, κάτι που αποδεικνύεται και από έρευνες, που θέλουν το 60-80% των τοξικών αερίων να εκλύονται κατά την κρύα εκκίνηση. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα έρχονται να δώσουν τα PCM, τα οποία αποθηκεύουν θερμότητα κατά την εκκίνηση και την απελευθερώνουν στην επόμενη εκκίνηση του οχήματος, διατηρώντας τη θερμοκρασία του καταλύτη σε υψηλά επίπεδα. Οι ερευνητές της NREL σχεδίασαν έναν καταλυτικό μετατροπέα με PCM, ο οποίος παραμένει αρκετά ζεστός και ως εκ τούτου λειτουργεί αποτελεσματικά, μειώνοντας κατά 84% τις εκπομπές υδρογονανθράκων και κατά 91% τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα. [122]



Εικόνα 4.3.5.2: Καταλυτικός μετατροπέας με PCM [122]

Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν φανεί χρήσιμα ακόμα και σε αγώνες της Formula1. Το Grand Prix στη Μαλαισία δικαίως χαρακτηρίζεται ως ένας από τους πιο απαιτητικούς αγώνες της Formula1, καθώς μεταξύ άλλων οι οδηγοί έχουν να αντιμετωπίσουν την τροπική ζέστη και υγρασία που επικρατούν. Όπως είναι αναμενόμενο, αυτές οι συνθήκες επιδρούν όχι μόνο στις ανάγκες ψύξης των κινητήρων των μονοθεσίων, αλλά και στην κατάσταση των οδηγών. Σήμερα, δίνεται μεγάλη προσοχή στην κατάσταση των οδηγών (ψύξη και ενυδάτωσή τους), αφού ο περιορισμένος χώρος της καμπίνας και η αγωνιστική στολή τους προκαλούν θερμική δυσφορία και υπερβολική εφίδρωση (έχει υπολογιστεί ότι χάνουν περίπου 3 κιλά υγρό σώματος), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αφυδάτωση, εάν δεν υπάρξει κατάλληλη μέριμνα. Η εταιρεία PCM Products μετά από έναν αγώνα Grand Prix στη Μαλαισία ανέλαβε να σχεδιάσει ένα προϊόν με στόχο τη βελτίωση της άνεσης του οδηγού καθ' όλη τη διάρκεια του αγώνα. Το πρόβλημα είχε προκύψει εξαιτίας των υπερβολικά υψηλών θερμοκρασιών, που είχαν ως αποτέλεσμα τη θέρμανση της φιάλης ενυδάτωσης των οδηγών, καθιστώντας το περιεχόμενο αυτής πρακτικά άχρηστο. Έτσι, πριν το επόμενο Grand Prix, το μονοθέσιο εξοπλίστηκε με φιάλες νερού εγκιβωτισμένες σε PCM, εξασφαλίζοντας τη σωστή ενυδάτωση του οδηγού. Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν επίσης να εφαρμοστούν και για τη μόνωση της δεξαμενής καυσίμου του μονοθεσίου, ώστε η ποσότητα του καυσίμου να καθορίζεται ανεξαρτήτως των περιβαλλοντικών συνθηκών (διαχείριση καυσίμων). [123]



Εικόνα 4.3.5.3: Μονοθέσιο Formula 1

4.3.6 PCM σε ηλεκτρονικά και στην τηλεπικοινωνία

Η συνεχής πρόοδος στον τομέα των ηλεκτρονικών αποτυπώνεται πρακτικά με την κατασκευή ολοένα και μικρότερων διαστάσεων εξαρτημάτων και συσκευών με μεγαλύτερη ισχύ, που όμως χαρακτηρίζονται από μεγάλες θερμικές απώλειες. Οι περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές λειτουργούν καλύτερα εντός συγκεκριμένων θερμοκρασιακών ορίων, ενώ οι πολύ χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούν συνήθως προβλήματα και μειώνουν τη διάρκεια ζωής αυτών. Σήμερα, για τη ρύθμιση και διατήρηση της θερμοκρασίας μέσα στα επιτρεπόμενα όρια, που είναι συνήθως μέχρι 50°C, χρησιμοποιούνται μεταλλικά πτερύγια, ενσωματωμένα σε ανεμιστήρες μικρού μεγέθους, που απάγουν θερμότητα από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, συντελώντας έτσι στην ψύξη τους. Σε αυτά τα συστήματα ψύξης δύναται να εφαρμοστούν υλικά αλλαγής φάσης. Χάρη στην δυνατότητα των PCM να ανανεώνονται από μόνα τους και να επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων μέγιστης θερμοκρασίας, η διαδικασία ψύξης καθίσταται απόλυτα αξιόπιστη και δεν απαιτείται κάποιο είδος κινητήρα ή διάταξη μέτρησης της θερμοκρασίας. [124]

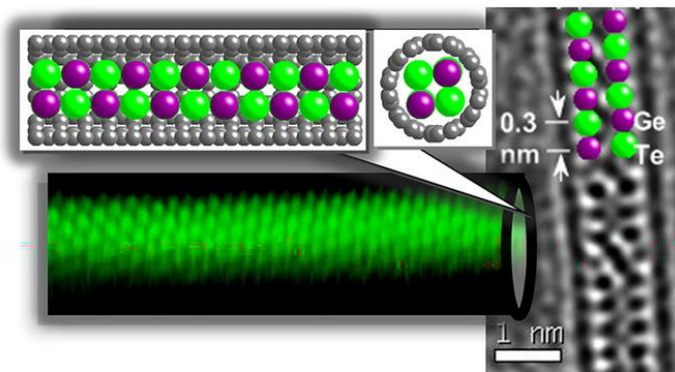
Τα PCM βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται για την προστασία των μπαταριών, που τροφοδοτούν τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Οι μπαταρίες παρουσιάζουν ευαισθησία τόσο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της ισχύος τους, όσο και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες που μπορεί να οδηγήσουν σε πλήρη αστοχία τους. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το φορτίο, τη σωστή επαναφόρτιση και κατ' επέκταση τη διατήρηση κατάλληλων συνθηκών. Δεδομένου λοιπόν, ότι ο εξοπλισμός που παρέχουν οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας προορίζεται και για υπαίθρια χρήση, όπου οι θερμοκρασίες μπορεί να κυμαίνονται από -40 έως 50°C, γίνεται αντιληπτή η ανάγκη προστασίας των μπαταριών από τις ακραίες θερμοκρασίες. Έτσι, έχουν κατασκευαστεί περιβλήματα, με τα οποία τυλίγονται οι μπαταρίες και τα οποία ενισχύονται από υλικά αλλαγής φάσης. Τα PCM απορροφούν τα μέγιστα φορτία και την περίσσεια θερμότητας των κύκλων φόρτισης και τα απελευθερώνουν όταν απαιτείται. Τέτοια περιβλήματα έχουν δημιουργήσει οι εταιρείες TEAP, Power Conversion Products και MJM-Engineering. [124]

Μία άλλη χρήση των PCM στον τομέα των τηλεπικοινωνιών είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας του πομποδέκτη βάσης. Ο πομποδέκτης βάσης είναι ένας μονωμένος και κλιματιζόμενος θάλαμος, όπου «στεγάζεται» ο πυρήνας του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Αυτός διαχειρίζεται την κίνηση, το σήμα δικτύου και εκτελεί εργασίες, όπως η αποκωδικοποίηση των συνομιλιών και ο διαχωρισμός των καναλιών. Ομοίως με τις μπαταρίες, ο πομποδέκτης βάσης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στις υψηλές θερμοκρασίες και πρέπει να διατηρείται υπό τους 35°C. Για το σκοπό αυτό, στις περιπτώσεις διακοπής ρεύματος, που παύει η λειτουργία των κλιματιστικών μονάδων, επιστρατεύονται γεννήτριες Diesel για την ψύξη αυτών. Ωστόσο, ακόμα και αυτές μπορεί να μην επιτελέσουν το σκοπό τους, καθώς η λειτουργία τους εξαρτάται από την ετοιμότητα και εγρήγορση των χειριστών τους. Έτσι, όταν σταματά η παροχή ρεύματος, τα υλικά αλλαγής φάσης είναι μία αξιόπιστη λύση, αφού απάγουν τη θερμότητα που παράγεται από την λειτουργία του πομποδέκτη βάσης, περιορίζοντας σημαντικά τη χρήση της γεννήτριας και κατά συνέπεια το κόστος, καθώς καταναλώνονται λιγότερα συμβατικά καύσιμα. Κατά την επανάκτηση ρεύματος, το PCM επαναφορτίζεται και είναι διαθέσιμο για μελλοντική χρήση. Στην Ινδία χρησιμοποιούνται γενικά 240kg από το υλικό αλλαγής φάσης Latest™29T για κάθε πομποδέκτη βάσης. [106]

Σημαντική είναι και η εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης για την ψύξη φορητών υπολογιστών και άλλων ηλεκτρονικών συσκευών. Ειδικότερα στην περίπτωση των φορητών υπολογιστών, μία αρκετά γνωστή μέθοδος ψύξης τους είναι η συμβατική εξαναγκασμένη συναγωγή, που επιτυγχάνεται μέσω ανεμιστήρων και ενισχύει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα στο θερμαινόμενο ηλεκτρονικό εξάρτημα και στο περιβάλλον. Ωστόσο, παράγοντες όπως το μέγεθος, η κατανάλωση ενέργειας, το βάρος και ο θόρυβος που παράγεται, καθιστούν τη μέθοδο αυτή ακατάλληλη για τα καινούρια εξαρτήματα. Μία εναλλακτική μέθοδος ψύξης είναι με τη βοήθεια της ιδιότητας των PCM να αποθηκεύουν θερμότητα μεταβαίνοντας από τη στερεή στην υγρή φάση, με το PCM να λειτουργεί ως ψύκτρα, όντας ενσωματωμένο σε μικροκάψουλες μέσα σε ένα λεπτό μέταλλο. [125]

Μία μελέτη με επικεφαλής τον David Wright του University of Exeter στην Αγγλία, έδειξε πως τα ημιαγώγιμα υλικά αλλαγής φάσης διαθέτουν ακριβώς τις κατάλληλες ιδιότητες για την κατασκευή ενός υπολογιστή που μπορεί να χειρίζεται τη μνήμη του και ταυτοχρόνως να επεξεργάζεται πληροφορίες, προβάλλοντας ουσιαστικά τη δυνατότητα λειτουργίας των υπολογιστών κατά τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Η ιδιότητα των υλικών αλλαγής φάσης να απελευθερώνουν τεράστια ποσά θερμότητας κατά τη διαδικασία μετάβασής τους από τη στερεή στην υγρή φάση δεν είναι καινούρια στο χώρο της τεχνολογίας, καθώς αυτή έχει χρησιμοποιηθεί στην τεχνολογία οπτικού δίσκου, όπως είναι οι δίσκοι Blue-Ray. Σε αυτή την τελευταία εφαρμογή, τα PCM χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία υπολογιστικά εξελεγμένων επεξεργαστών. Η ομάδα δημιούργησε ένα επεξεργαστή αλλαγής φάσης που ήταν ικανός να εκτελεί αριθμητικές πράξεις, όπως πρόσθεση, αφαίρεση, πολλαπλασιασμό και διαίρεση. Αυτοί ελπίζουν ότι οι προσομοιώσεις των νευρώνων που χρησιμοποιούν αυτοί οι επεξεργαστές ως τεχνητούς νευρώνες, θα είναι σε θέση να μιμούνται τη συμπεριφορά των βιολογικών νευρώνων. [126]

Πολλοί μηχανικοί στην προσπάθειά τους να δημιουργήσουν γρήγορα smart phones και tablets με δυνατότητα αποθήκευσης πληθώρας δεδομένων, έχουν πειραματιστεί με συσκευές μνήμης που βασίζονται σε υλικά αλλαγής φάσης. Με ένα μικρό ποσό θερμότητας, τα υλικά αυτά μεταβαίνουν γρήγορα από κρυσταλλικές δομές σε άτακτες άμορφες δομές, οι οποίες μπορούν να μεταφραστούν στο 0 και 1 της δυαδικής γλώσσας στα κελιά μνήμης. Όπως με κάθε τεχνολογία μνήμης, οι μηχανικοί επιθυμούν να φτιάξουν όσο το δυνατόν μικρότερα κελιά μνήμης αλλαγής φάσης για τη μεγιστοποίηση του αποθηκευτικού χώρου των ελαφριών ηλεκτρονικών. Έχοντας αυτό το στόχο, ερευνητές έχουν ήδη αναπτύξει μία νέα τεχνική σύνθεσης για τη δημιουργία του μικρότερου εργαζόμενου PCM: μονοδιάστατα νανοκαλώδια, πληρωμένα με γερμάνιο και telluride, διαμέτρου λιγότερο από 2nm, ένα έργο που θα μπορούσε να θέσει τα θεμέλια για μία νέα αρχιτεκτονική στις συσκευές μνήμης, σύμφωνα με την Christina E. Giusca, επιστήμονα του National Physical Laboratory. Οι πιο συνηθισμένες συσκευές μνήμης αλλαγής φάσης είναι κατασκευασμένες από λεπτές μεμβράνες. Ωστόσο, μεμβράνες με πάχος μικρότερο των 2nm δεν εμφανίζουν την απαιτούμενη κρυσταλλική δομή για να λειτουργήσουν σε κελιά μνήμης. Η Giusca και η ομάδα της, για να επιτύχουν ακόμα λεπτότερο καλώδιο χρησιμοποίησαν νανοσωλήνες άνθρακα με διαμέτρους τουλάχιστον 1,4nm ως καλούπι. Αν και πρόκειται για μία έξυπνη μέθοδο, χρειάζεται ακόμη έρευνα για την εφαρμογή νανοκαλωδίων σε πρακτικές συσκευές μνήμης. [127]



Εικόνα 4.3.6.1: Σχηματική απεικόνιση νανოსωλήνα άνθρακα (γκρι) γεμάτο με γερμάνιο και telluride, ένα PCM (αριστερά) και μικρογραφία πραγματικού σωλήνα και θέσεις του Ge (μωβ) και Te (πράσινο) (δεξιά) [127]

4.3.7 PCM σε διαστημικές εφαρμογές

Η εφαρμογή των PCM δεν περιορίζεται μόνο στον παθητικό θερμικό έλεγχο εξοπλισμών εδάφους. Η πρόσφατη έρευνα και ανάπτυξη των υλικών αλλαγής φάσης μπορεί να επεκταθεί και σε καινοτόμες εφαρμογές συστημάτων διαστημικών σκαφών. Στον τομέα απομάκρυνσης και απόρριψης θερμότητας, οι εφαρμόσιμες τεχνολογίες για διαστημόπλοια είναι υλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, συσκευές υψηλής μεταφοράς θερμότητας, όπως σωλήνες θερμότητας σταθερής αγωγιμότητας, αγωγοί θερμότητας διαφόρων διαμορφώσεων, και επιστρώσεις χαμηλής απορροφητικότητας σε εκπομπές. Τα PCM χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση της θερμότητας, ως δεξαμενή θερμικής ενέργειας και είναι παρόμοια με τη χρήση υψηλής απόδοσης ελαφριάς μόνωσης, διακοπών θερμότητας και επιστρώσεων μεταβλητής εκπομπής. Η χρήση των PCM για παθητικό θερμικό έλεγχο κατά τη διάρκεια της μεταφοράς διαστημικών σκαφών παρέχει μία πιο αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική μέθοδο για τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Επίσης, οι χαμηλές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εντός των σφραγισμένων δοχείων οδηγούν σε ακριβή έλεγχο της υγρασίας. Έτσι, εξαλείφεται η ανάγκη πολύπλοκων ενεργητικών συστημάτων ελέγχου της θερμοκρασίας για τη μεταφορά των διαστημοπλοίων και άλλων εξοπλισμών. Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν αναγνωρισθεί ως σημαντικά εργαλεία στη βελτιστοποίηση συστημάτων θερμικού ελέγχου για τα οχήματα εξερεύνησης του διαστήματος και χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα PCM σε συνδυασμό με συμβατικά συστήματα θερμικού ελέγχου μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά ο σχεδιασμός συστημάτων διαστημικών σκαφών, ελαχιστοποιώντας τη μάζα των διαστημοπλοίων και επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση κόστους. [128]

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

Εισαγωγή

Στο δεύτερο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μελετάται η περίπτωση εφαρμογής υλικού αλλαγής φάσης, ενσωματωμένου σε κάψουλες, σε εσωτερικό τοίχο κτιρίου στην περιοχή της Αθήνας, με σκοπό τη θέρμανση του εσωτερικού του χώρου, κατά τη χειμερινή περίοδο. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η ηλιακή φόρτιση κατακόρυφης εσωτερικής τοιχοποιίας που φέρει στρώμα PCM, μέσω υαλοπίνακα ευρισκόμενου σε απέναντι κατακόρυφο τοίχο, με σκοπό τον προσεγγιστικό προσδιορισμό της απόδοσης του PCM, κάνοντας χρήση ενός νεοεισαχθέντος μεγέθους, αυτού της «Εσωτερικής Θερμοκρασίας Ηλίου-Αέρος».

Η μελέτη μας αφορά κτίριο-αίθουσα εντός της Αθήνας, με διαστάσεις 10m(μήκος)×10m(πλάτος)×3m(ύψος), ο εσωτερικός κατακόρυφος τοίχος του, που φέρει στρώμα PCM, είναι διαστάσεων 10m×3m, ενώ οι τέσσερις πλευρές του κτιρίου είναι προσανατολισμένες στα τέσσερα κύρια σημεία του ορίζοντα. Όλοι οι υπολογισμοί μας πραγματοποιούνται για κάθε ώρα του 24ώρου της 21^{ης} ημέρας κάθε χειμερινού μήνα, δηλαδή για την 21^η Νοεμβρίου, 21^η Δεκεμβρίου, 21^η Ιανουαρίου, 21^η Φεβρουαρίου και 21^η Μαρτίου και για κάθε κύριο προσανατολισμό του απέναντι κατακόρυφου τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, δηλαδή για νότιο, ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό. Έτσι, χρησιμοποιώντας δύο μοντέλα προσομοίωσης του προβλήματός μας (ένα αρχικό και ένα βελτιωμένο μοντέλο), υπολογίζεται η θερμοκρασία του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου, η ενεργειακή του συνεισφορά στη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας και συνθηκών άνεσης εντός του εξεταζόμενου χώρου κατά τη διάρκεια του 24ώρου, αλλά και το ποσοστό αξιοποίησής του. Τα υλικά αλλαγής φάσης που χρησιμοποιούνται μεμονωμένα στην παρούσα εργασία είναι το RT20 και RT27. Για την απλοποίηση του προβλήματος, κάνουμε κάποιες βασικές παραδοχές. Έτσι, λοιπόν, θεωρούμε ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό της εξεταζόμενης αίθουσας παραμένει σταθερή μέσω της χρήσης θερμαντικών μέσων, όπως κλιματιστικά συστήματα, θερμαντικά σώματα κλπ. Αναφορικά με το υλικό αλλαγής φάσης, υποθέτουμε ότι η θερμοκρασία που επικρατεί στο στρώμα PCM είναι παντού η ίδια, ενώ μεταξύ του στρώματος του PCM και της μόνωσης θεωρούμε πως δεν συναλλάσσεται θερμότητα. Τέλος, υποθέτουμε σταθερές απώλειες εντός του χώρου μελέτης μας, οι οποίες συνεπάγονται σταθερή απαιτούμενη ισχύ για την επίτευξη συνθηκών άνεσης και σταθερής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του χώρου.

Αρχικά, για να μπορέσουμε να προβούμε στους υπολογισμούς μας, υπολογίσαμε πρώτα την ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε κατακόρυφο τοίχο για κάθε κύριο προσανατολισμό αυτού και για την 21^η ημέρα κάθε χειμερινού μήνα. Έχοντας πλέον γνωστό αυτό το μέγεθος, εφαρμόσαμε ισολογισμό ενέργειας στο στρώμα του PCM, κάνοντας χρήση του μοντέλου ενεργού θερμοχωρητικότητας και υπολογίσαμε τις καμπύλες θερμοκρασίας του PCM συναρτήσεως των ωρών της εκάστοτε ημέρας και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα, όπως προαναφέρθηκε. Κατόπιν, προσδιορίσαμε τις καμπύλες ποσοστού αξιοποίησής του για κάθε περίπτωση και στη συνέχεια τις καμπύλες ενεργειακής του συνεισφοράς στο χώρο συναρτήσεως των ωρών και πάλι για κάθε περίπτωση. Οι υπολογισμοί αυτοί, με το αρχικό μοντέλο προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκαν τόσο για το RT20, όσο και για το RT27. Στη συνέχεια, δημιουργήσαμε ένα βελτιωμένο μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο βασίζεται σε ένα νέο μέγεθος που εισάγαμε στην παρούσα διπλωματική εργασία για πρώτη φορά, αυτό της «Εσωτερικής Θερμοκρασίας Ηλίου-Αέρος» ή αλλιώς της

«Ισοδύναμης Εσωτερικής Θερμοκρασίας». Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, το βελτιωμένο μοντέλο προσομοίωσης υπολογίσαμε εκ νέου τη θερμοκρασία, το ποσοστό αξιοποίησης και την ενεργειακή συνεισφορά του RT27. Επιπλέον, για την απόδειξη ισοδυναμίας των δύο μοντέλων προσομοίωσης (αρχικού και βελτιωμένου), πραγματοποιήσαμε σύγκριση των τιμών θερμοκρασίας του PCM, που λάβαμε από τα δύο αυτά μοντέλα.

Στη συνέχεια, θέλοντας να μελετήσουμε την επίδραση που έχει στο σύστημα και στη συμπεριφορά του PCM, η μεταβολή στην τιμή μιας παραμέτρου του προβλήματος που μελετάμε (ηλιακή φόρτιση εσωτερικού τοίχου με στρώμα PCM, απέναντι από τον οποίο βρίσκεται τοίχος που φέρει υαλοπίνακα), εκτελούμε παραμετρικές μελέτες. Πιο συγκεκριμένα, αλλάζοντας κάθε φορά την τιμή σε μία από τις ακόλουθες παραμέτρους, πάχος στρώματος υλικού αλλαγής φάσης, θερμοκρασία εξεταζόμενου χώρου και επιφάνεια υαλοπίνακα, υπολογίζονται, όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι καμπύλες θερμοκρασίας του RT27, ποσοστού αξιοποίησής του και ενεργειακής του συνεισφοράς στη διάρκεια του 24ώρου. Όλες οι παραμετρικές μελέτες γίνονται με χρήση του βελτιωμένου μοντέλου προσομοίωσης.

Τέλος, συγκρίνουμε ένα PCM με ένα συμβατικό δομικό υλικό, ως προς τη θερμοκρασία που αναπτύσσουν καθ' όλη τη διάρκεια του 48ώρου, όταν η κατακόρυφη τοιχοποιία στην οποία έχει ενσωματωθεί το καθένα χωριστά, δέχεται και πάλι ηλιακή ακτινοβολία διερχόμενη από υαλοπίνακα που βρίσκεται σε απέναντι τοίχο. Συγκεκριμένα, η σύγκριση πραγματοποιείται μεταξύ του RT27 και του μετόν, για κάθε ώρα του 48ώρου και πάλι για την 21^η ημέρα κάθε χειμερινού μήνα (Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος και Μάρτιος) και για τους τέσσερις κύριους προσανατολισμούς του τοίχου που φέρει υαλοπίνακα. Μέσω αυτής της σύγκρισης, αποσκοπούμε στην ανάδειξη των μεγαλύτερων ενεργειακών αποθεμάτων του υλικού αλλαγής φάσης σε βάθος χρόνου, σε σχέση με το συμβατικό δομικό υλικό.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονίσουμε ότι το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία, δε δύναται να μας παρέχει αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας, καθώς στο πρόβλημά μας δεν λαμβάνουμε υπόψη τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού αλλαγής φάσης. Επιπλέον, επισημαίνουμε ότι το μοντέλο ενεργού θερμοχωρητικότητας αντιμετωπίζει το υλικό αλλαγής φάσης σαν συμβατικό δομικό υλικό, δηλαδή σαν να μην αλλάζει φάση. Με άλλα λόγια, προσομοιάζει το φαινόμενο αλλαγής φάσης του με αύξηση της θερμοχωρητικότητάς του, που συνεπάγεται μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα του υλικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μοντέλο προσομοίωσης

5.1 Υπολογισμός ολικής στιγμιαίας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου, G_T

Για τον υπολογισμό της ολικής στιγμιαίας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, χρησιμοποιήθηκε το βελτιωμένο μοντέλο από τους Liu και Jordan για ισότροπη διάχυτη ακτινοβολία, το οποίο διαχωρίζει τη διάχυτη εξ' ουρανού και εξ' ανακλάσεως ακτινοβολία και είναι κατάλληλο τόσο για νεφελώδεις όσο και για αίθριες ημέρες. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η ακτινοβολία που δέχεται μία κεκλιμένη επιφάνεια αποτελείται από τις παρακάτω τρεις συνιστώσες:

1. Άμεση ακτινοβολία: $G_b R_b$
2. Διάχυτη ακτινοβολία (προερχόμενη από τον ουρανό): $G_d \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right)$
3. Διάχυτη ακτινοβολία (προερχόμενη από ανάκλαση ολικής στο έδαφος): $(G_b + G_d)\rho \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right)$

Προσθέτοντας τις παραπάνω τρεις συνιστώσες, προκύπτει η σχέση υπολογισμού της ολικής στιγμιαίας προσπίπτουσας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου:

$$G_T = G_b R_b + G_d \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + (G_b + G_d)\rho \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right) \left[\frac{kW}{m^2} \right] \quad (5.1.1)$$

όπου

- $G_b [kW/m^2]$: η άμεση στιγμιαία ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου
- $G_d [kW/m^2]$: η διάχυτη στιγμιαία ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου
- R_b : ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση οριζοντίου επιπέδου
- β : η γωνία κλίσης του κεκλιμένου επιπέδου ως προς το οριζόντιο επίπεδο
- ρ : η ανακλαστικότητα του εδάφους, με τιμές από 0,2 για συνηθισμένο έδαφος έως και 0,7 για χιονισμένο έδαφος, θάλασσα, λεία βράχια κλπ. Στην παρούσα εργασία θεωρήσαμε συνηθισμένο έδαφος, συνεπώς επιλέχθηκε $\rho=0,2$
- $\left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right)$ και $\left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right)$: παράγοντας όρασης ουρανού και παράγοντας όρασης εδάφους κεκλιμένου επιπέδου, αντίστοιχα.

Παρακάτω, υπολογίζονται η στιγμιαία άμεση και διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_b , G_d και ο λόγος R_b , που απαιτούνται για την εφαρμογή της σχέσης υπολογισμού του G_T .

5.1.1 Υπολογισμός άμεσης και διάχυτης στιγμιαίας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου, G_b και G_d

Άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη κατ' ευθείαν από τον ήλιο, χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Αντιθέτως, διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη, αφού έχει υποστεί διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα.

Ο υπολογισμός της στιγμιαίας άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου έγινε για κάθε ώρα της ημέρας όπου υπάρχει ηλιοφάνεια, δηλαδή από τις 7:00 π.μ. μέχρι στις 18:00 μ.μ. χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σχέσεις:

$$G_b = M_t + A_t \sin\left(\frac{360}{365}D - P_t\right) \left[\frac{kW}{m^2}\right] \quad (5.1.1.1)$$

$$G_d = m_t + a_t \sin\left(\frac{360}{365}D - p_t\right) \left[\frac{kW}{m^2}\right] \quad (5.1.1.2)$$

όπου

- $M_t, A_t, P_t, m_t, a_t, p_t$: συντελεστές που δίνονται για κάθε ώρα t (7:00÷18:00) στον πίνακα που ακολουθεί και
- D : ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους ($1÷365$).

Επειδή η μελέτη μας αφορά τους χειμερινούς μήνες (Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος και Μάρτιος), ο υπολογισμός των G_b και G_d έγινε για την 21^η ημέρα καθενός από αυτούς τους μήνες. Επομένως,

για την 21^η Ιανουαρίου → $D=21$, για 21^η Φεβρουαρίου → $D=52(=31+21)$, για την 21^η Μαρτίου → $D=80(=59+21)$, για την 21^η Νοεμβρίου → $D=325(=304+21)$ και για την 21^η Δεκεμβρίου → $D=355(=334+21)$.

Πίνακας 5.1.1.1: Τιμές των συντελεστών των εξισώσεων (5.1.1.1) και (5.1.1.2)

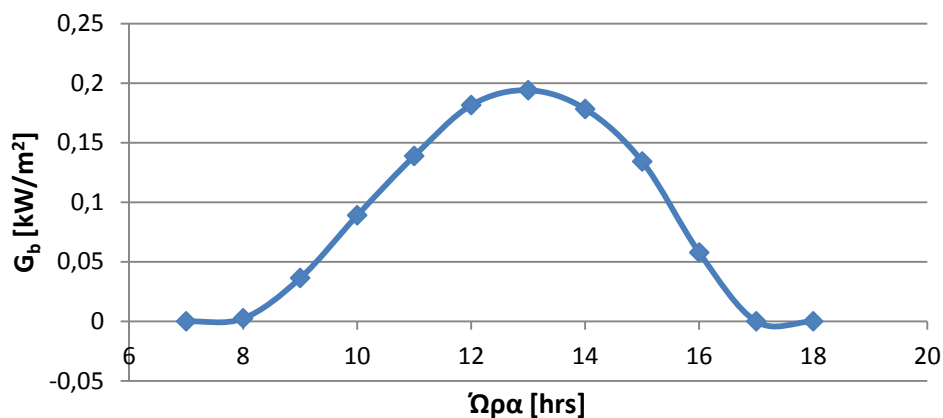
Ώρα [hrs]	M_t [kW/m ²]	A_t [kW/m ²]	P_t [degrees]	m_t [kW/m ²]	a_t [kW/m ²]	p_t [degrees]
7:00	0,007	0,046	86,18	0,048	0,111	81,23
8:00	0,057	0,068	87,31	0,134	0,127	82,45
9:00	0,119	0,104	87,94	0,208	0,133	83,94
10:00	0,191	0,129	88,31	0,261	0,129	85,6
11:00	0,258	0,153	89,35	0,283	0,117	86,05
12:00	0,319	-0,181	-88,88	0,271	0,095	82,71
13:00	0,342	-0,194	-89,18	0,243	0,081	81,95
14:00	0,325	0,183	87,21	0,21	0,083	87,23
15:00	0,269	0,166	86,22	0,176	0,087	89,53
16:00	0,183	0,147	82,1	0,141	-0,085	-88,19
17:00	0,078	0,131	79,85	0,104	-0,079	-88,97
18:00	-0,025	0,114	77,36	0,051	0,091	86,79

Στους πίνακες και στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές της άμεσης και διάχυτης στιγμιαίας προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια, G_b και G_d , όπως υπολογίστηκαν από τις σχέσεις (5.1.1.1) και (5.1.1.2), για κάθε ώρα της ημέρας από τις 7:00π.μ. μέχρι τις 18:00μ.μ και για την 21^η ημέρα κάθε χειμερινού μήνα (Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος και Μάρτιος).

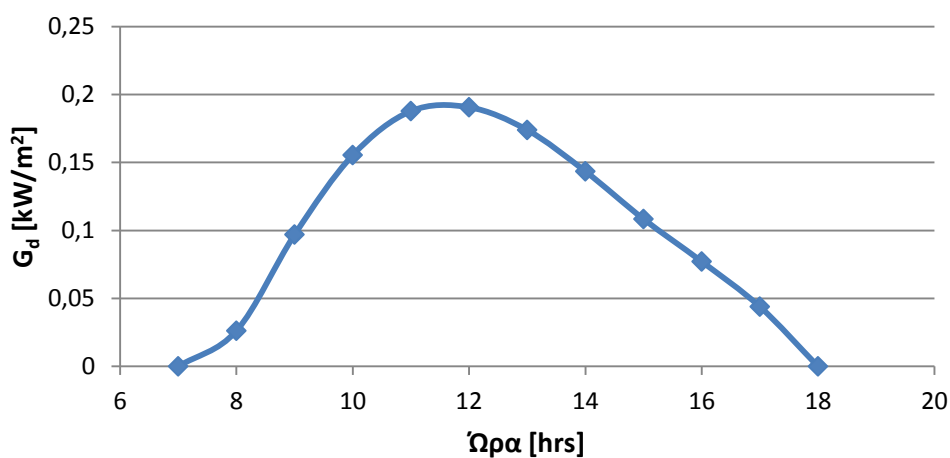
➤ **Για 21^η Νοεμβρίου (D=325)**

Πίνακας 5.1.1.2: Στιγμαία άμεση, G_b [kW/m^2] και διάχυτη, G_d [kW/m^2], ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου για κάθε ώρα κατά την 21^η Νοεμβρίου

Ώρα[hrs]	G_b [kW/m^2]	G_d [kW/m^2]
7:00	0	0
8:00	0,002523442	0,026183238
9:00	0,036372337	0,096955338
10:00	0,089017934	0,15539691
11:00	0,138765056	0,187751156
12:00	0,18151517	0,190578318
13:00	0,193981919	0,173864047
14:00	0,178203036	0,14343726
15:00	0,134147239	0,108371343
16:00	0,057731999	0,077105747
17:00	0	0,043912172
18:00	0	0



Διάγραμμα 5.1.1.1: Στιγμαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, G_b , συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου

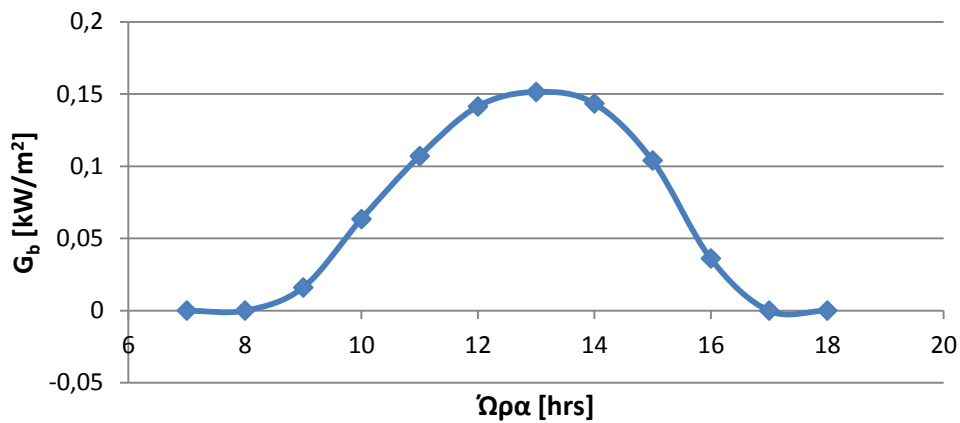


Διάγραμμα 5.1.1.2: Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, G_d , συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου

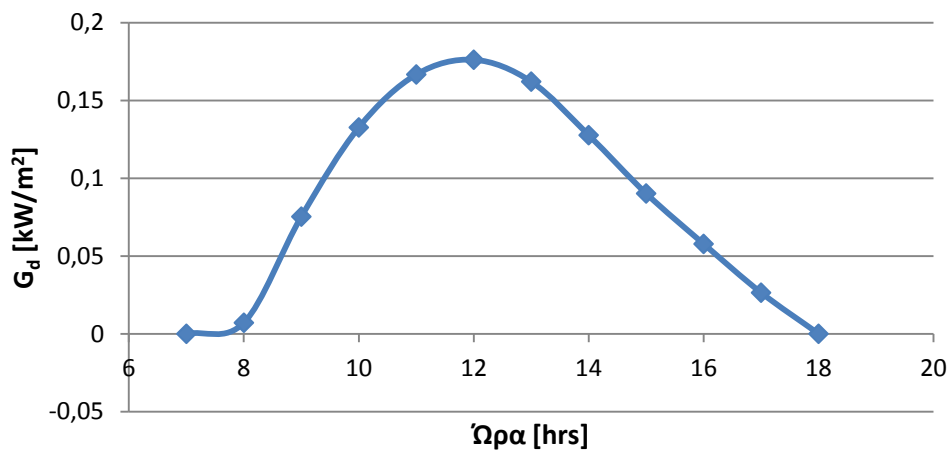
➤ **Για 21^η Δεκεμβρίου (D=355)**

Πίνακας 5.1.1.3: Στιγμαία άμεση, G_b [kW/m^2] και διάχυτη, G_d [kW/m^2], ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου για κάθε ώρα κατά την 21^η Δεκεμβρίου

Ώρα[hrs]	G_b [kW/m^2]	G_d [kW/m^2]
7:00	0	0
8:00	0	0,007103493
9:00	0,015963022	0,075292903
10:00	0,063310285	0,132585984
11:00	0,106973806	0,166622552
12:00	0,141315472	0,176095793
13:00	0,15136268	0,162040559
14:00	0,143392709	0,127635239
15:00	0,103934747	0,090166545
16:00	0,036086287	0,057758063
17:00	0	0,026423537
18:00	0	0



Διάγραμμα 5.1.1.3: Στιγμαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, G_b , συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου

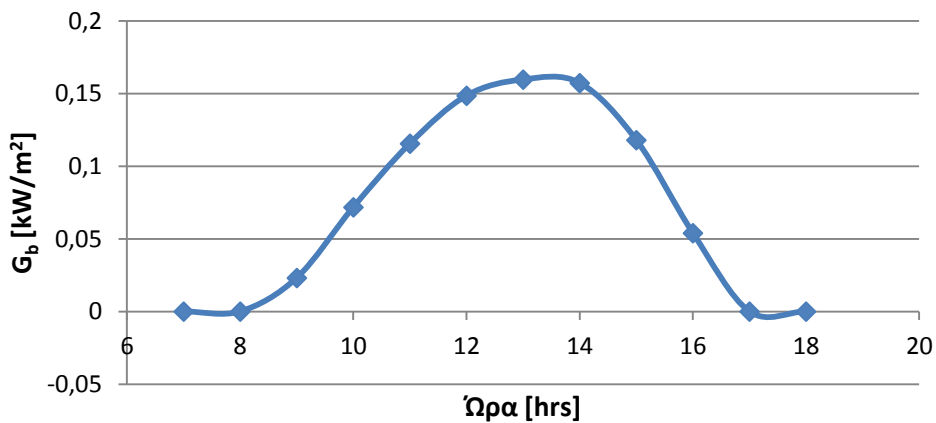


Διάγραμμα 5.1.1.4: Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, G_d , συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου

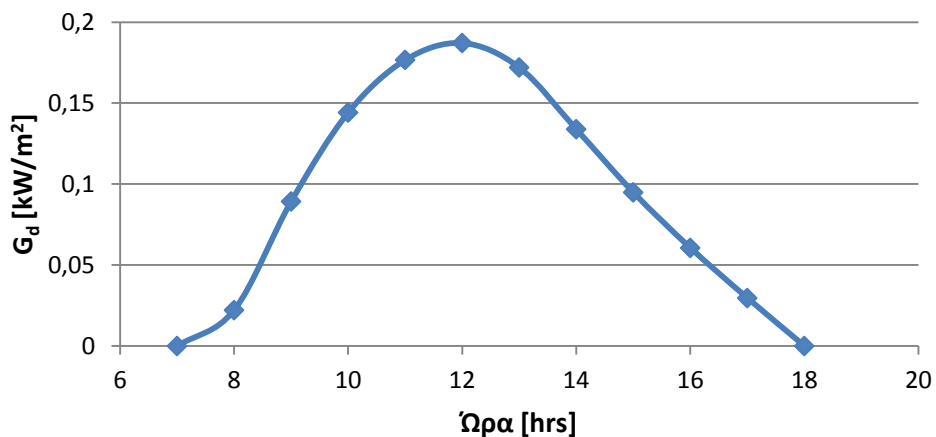
➤ **Για 21^η Ιανουαρίου (D=21)**

Πίνακας 5.1.1.4: Στιγμαία άμεση, G_b [kW/m^2] και διάχυτη, G_d [kW/m^2], ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου για κάθε ώρα κατά την 21^η Ιανουαρίου

Ωρα[hrs]	G_b [kW/m^2]	G_d [kW/m^2]
7:00	0	0
8:00	0	0,022139868
9:00	0,023106819	0,089257195
10:00	0,071735609	0,144193455
11:00	0,115511842	0,176672468
12:00	0,148479375	0,187121832
13:00	0,159575157	0,171993553
14:00	0,157181044	0,133873842
15:00	0,11793728	0,094878162
16:00	0,053951711	0,060583819
17:00	0	0,029615574
18:00	0	0



Διάγραμμα 5.1.1.5: Στιγμαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, G_b , συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου

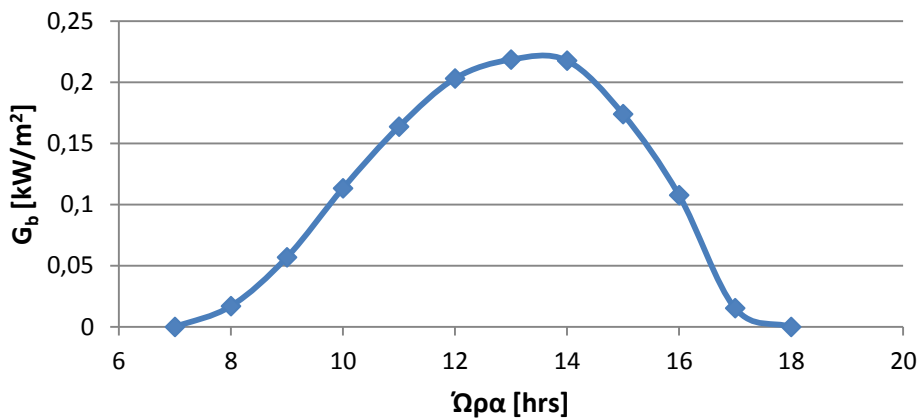


Διάγραμμα 5.1.1.6: Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, G_d , συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου

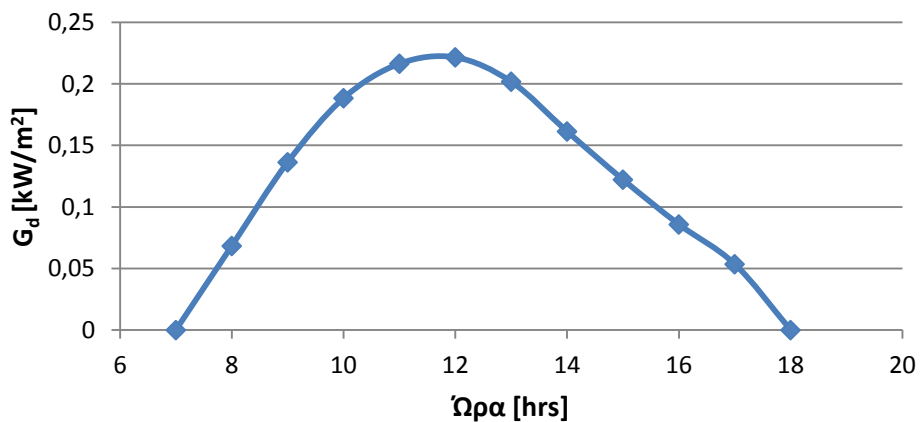
➤ **Για 21^η Φεβρουαρίου (D=52)**

Πίνακας 5.1.1.5: Στιγμαία άμεση, G_b [kW/m^2] και διάχυτη, G_d [kW/m^2], ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου για κάθε ώρα κατά την 21^η Φεβρουαρίου

Ωρα[hrs]	G_b [kW/m^2]	G_d [kW/m^2]
7:00	0	0
8:00	0,017009196	0,068282058
9:00	0,056916429	0,136241237
10:00	0,113325775	0,188282265
11:00	0,163672761	0,216289744
12:00	0,203061412	0,221472526
13:00	0,218516071	0,201691857
14:00	0,217636176	0,161281473
15:00	0,173947051	0,122148013
16:00	0,107702588	0,085771598
17:00	0,01536705	0,053492326
18:00	0	0



Διάγραμμα 5.1.1.7: Στιγμαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, G_b , συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου

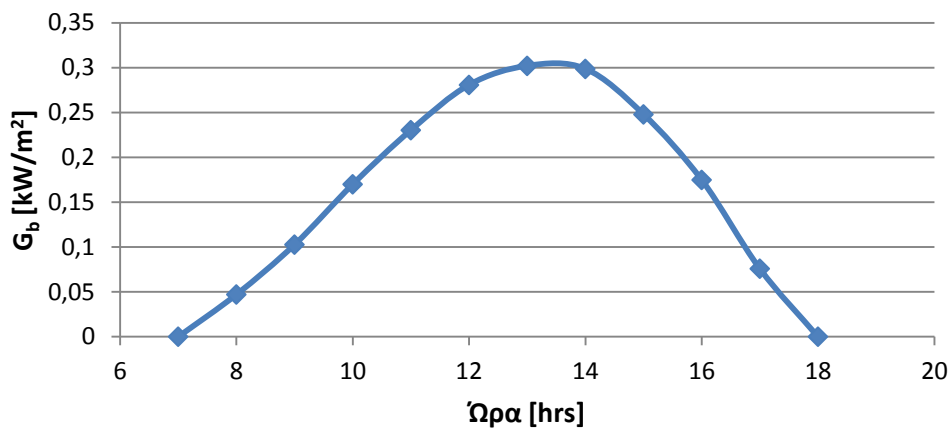


Διάγραμμα 5.1.1.8: Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, G_d , συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου

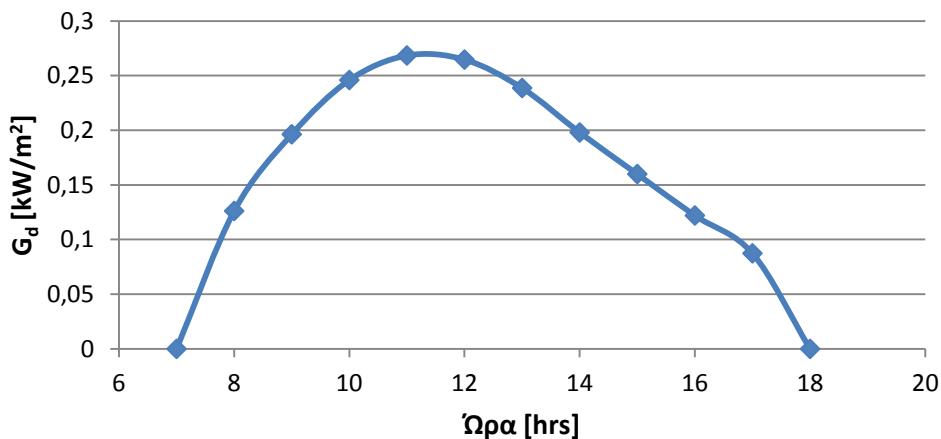
➤ **Για 21^η Μαρτίου (D=80)**

Πίνακας 5.1.1.6: Στιγμαία άμεση, G_b [kW/m^2] και διάχυτη, G_d [kW/m^2], ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου για κάθε ώρα κατά την 21^η Μαρτίου

Ώρα[hrs]	G_b [kW/m^2]	G_d [kW/m^2]
7:00	0	0
8:00	0,047059447	0,126145315
9:00	0,102666488	0,196325303
10:00	0,169917885	0,245958677
11:00	0,230260072	0,268445653
12:00	0,280700711	0,26469424
13:00	0,301943272	0,238696005
14:00	0,298564221	0,197981334
15:00	0,247861628	0,159957605
16:00	0,174804773	0,122015018
17:00	0,075837434	0,087405039
18:00	0	0



Διάγραμμα 5.1.1.9: Στιγμαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, G_b , συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου



Διάγραμμα 5.1.1.10: Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, G_d , συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου

Εξετάζοντας τις τιμές της άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου, όπως αυτές αποτυπώθηκαν στους πίνακες και τα διαγράμματα που παρατέθηκαν ανωτέρω, παρατηρούμε ότι για κάθε μήνα, η μεν άμεση στιγμιαία ακτινοβολία G_b παρουσιάζει μέγιστο στη 13:00, η δε διάχυτη στιγμιαία ακτινοβολία μεγιστοποιείται στις 12:00, γεγονός αναμενόμενο δεδομένου ότι ο ήλιος αυτές τις ώρες είναι σε πιο κάθετη θέση και πιο δυνατός.

5.1.2 Υπολογισμός του λόγου της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση οριζοντίου επιπέδου, R_b

Ο λόγος R_b της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση οριζοντίου επιπέδου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (5.1.2.1)$$

όπου

- G_{bT} : η άμεση ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο
- θ : η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια και ορίζεται ως η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτινών και της καθέτου στην επιφάνεια
- θ_z : η γωνία ζενίθ και ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ήλιου

Για τον υπολογισμό του λόγου R_b , υπολογίζονται πρώτα τα συνημίτονα των γωνιών θ και θ_z από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \quad (5.1.2.2)$$

και

$$\cos\theta_z = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega \quad (5.1.2.3)$$

όπου οι γωνίες που εμφανίζονται στις δύο παραπάνω σχέσεις είναι:

- δ : η ηλιακή απόκλιση, που αποτελεί τη γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού (ή αλλιώς η γωνία που σχηματίζει ο ισημερινός με το επίπεδο περιστροφής της γης) και για την οποία ισχύει $-23,45 \leq \delta \leq 23,45$, με θετικές τιμές προς το βορρά. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \quad (5.1.2.4)$$

όπου $n=1 \div 365$ είναι ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους, δηλαδή για τη μελέτη μας θα έχουμε:

για την 21^η Ιανουαρίου $\rightarrow n=21$,

για την 21^η Φεβρουαρίου $\rightarrow n=52$

για την 21^η Μαρτίου $\rightarrow n=80$

για την 21^η Νοεμβρίου $\rightarrow n=325$ και

για την 21^η Δεκεμβρίου $\rightarrow n=355$

- φ : το γεωγραφικό πλάτος ($-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$) του τόπου. Η μελέτη μας αφορά την Αθήνα, συνεπώς $\varphi = 37,97^\circ$
- β : η κλίση επιπέδου και ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζει μία επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Είναι $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$. Προφανώς, για την περίπτωση μας, όπου μελετάται η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε κατακόρυφο επίπεδο (τοίχος) είναι $\beta = 90^\circ$
- γ : το αζιμούθιο επιφάνειας και ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Εκφράζει ουσιαστικά σε ($^\circ$) τον προσανατολισμό και είναι $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$. Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται κατακόρυφη επιφάνεια (τοίχος) με διαφορετικό προσανατολισμό κάθε φορά. Έτσι:
για νότιο προσανατολισμό $\rightarrow \gamma = 0^\circ$
για δυτικό προσανατολισμό $\rightarrow \gamma = 90^\circ$
για βόρειο προσανατολισμό $\rightarrow \gamma = 180^\circ$ και
για ανατολικό προσανατολισμό $\rightarrow \gamma = -90^\circ$
- ω : η ωριαία γωνία, που είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί του άξονά της με ρυθμό $15^\circ/h = 0,25^\circ/\text{min}$. Προφανώς ισχύει:

$$\omega = 0,25(\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (5.1.2.5)$$

και λαμβάνεται θετικό ($\omega > 0$) για ώρες της ημέρας πριν το ηλιακό μεσημέρι (μ.μ) και αρνητικό ($\omega < 0$) για ώρες μετά το ηλιακό μεσημέρι (π.μ.), όπου ηλιακό μεσημέρι θεωρείται στις 12:00μ.μ.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η γωνία β λόγω κατακόρυφου επιπέδου λαμβάνει την τιμή 90° . Επομένως, η σχέση υπολογισμού του συνημιτόνου της γωνίας θ μπορεί να απλοποιηθεί και να πάρει την παρακάτω μορφή:

$$\cos\theta = -\sin\delta \cos\varphi \cos\gamma + \cos\delta \sin\varphi \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\gamma \sin\omega \quad (5.1.2.6)$$

Με βάση τα παραπάνω, είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο λόγος R_b από τη σχέση (5.1.2.1) για κάθε ώρα της ημέρας από τις 7:00 μέχρι τις 18:00 και για κάθε προσανατολισμό της κατακόρυφης επιφάνειας-τοίχου (νότιος, ανατολικός, δυτικός και βόρειος) κατά την 21^η ημέρα του Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Μαρτίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες που ακολουθούν.

➤ **Για 21^η Νοεμβρίου ($\delta = -20,44^\circ$)**

Πίνακας 5.1.2.1: Λόγος R_b κατά την 21^η Νοεμβρίου για κατακόρυφες επιφάνειες νοτίου, ανατολικού, δυτικού και βόρειου προσανατολισμού

Ωρα[hrs]	ω ($^\circ$)	R_b			
		Νότος ($\gamma=0^\circ$)	Ανατολή ($\gamma=-90^\circ$)	Δύση ($\gamma=90^\circ$)	Βορράς ($\gamma=180^\circ$)
7:00	-75	0	0	0	0
8:00	-60	3,648426232	5,253341556	0	0
9:00	-45	2,221354054	2,15501785	0	0
10:00	-30	1,823211927	1,1027758	0	0
11:00	-15	1,668890739	0,486360549	0	0
12:00	0	1,626199298	0	0	0
13:00	15	1,668890739	0	0,486360549	0
14:00	30	1,823211927	0	1,1027758	0
15:00	45	2,221354054	0	2,15501785	0
16:00	60	3,648426232	0	5,253341556	0
17:00	75	0	0	0	0
18:00	90	0	0	0	0

➤ **Για 21^η Δεκεμβρίου ($\delta = -23,45^\circ$)**

Πίνακας 5.1.2.2: Λόγος R_b κατά την 21^η Δεκεμβρίου για κατακόρυφες επιφάνειες νοτίου, ανατολικού, δυτικού και βόρειου προσανατολισμού

Ωρα[hrs]	ω ($^\circ$)	R_b			
		Νότος ($\gamma=0^\circ$)	Ανατολή ($\gamma=-90^\circ$)	Δύση ($\gamma=90^\circ$)	Βορράς ($\gamma=180^\circ$)
7:00	-75	0	0	0	0
8:00	-60	5,103116948	6,803518968	0	0
9:00	-45	2,674155406	2,433603365	0	0
10:00	-30	2,103634522	1,202386046	0	0
11:00	-15	1,89294171	0,523296803	0	0
12:00	0	1,83563361	0	0	0
13:00	15	1,89294171	0	0,523296803	0
14:00	30	2,103634522	0	1,202386046	0
15:00	45	2,674155406	0	2,433603365	0
16:00	60	5,103116948	0	6,803518968	0
17:00	75	0	0	0	0
18:00	90	0	0	0	0

➤ Για 21^η Ιανουαρίου (δ= -20,14°)

Πίνακας 5.1.2.3: Λόγος R_b κατά την 21^η Ιανουαρίου για κατακόρυφες επιφάνειες νοτίου, ανατολικού, δυτικού και βόρειου προσανατολισμού

Ωρα[hrs]	ω (°)	R_b			
		Νότος ($\gamma=0^\circ$)	Ανατολή ($\gamma=-90^\circ$)	Δύση ($\gamma=90^\circ$)	Βορράς ($\gamma=180^\circ$)
7:00	-75	0	0	0	0
8:00	-60	3,540136704	5,137943844	0	0
9:00	-45	2,182270357	2,13097165	0	0
10:00	-30	1,798065039	1,093843254	0	0
11:00	-15	1,648505961	0,482999986	0	0
12:00	0	1,607068496	0	0	0
13:00	15	1,648505961	0	0,482999986	0
14:00	30	1,798065039	0	1,093843254	0
15:00	45	2,182270357	0	2,13097165	0
16:00	60	3,540136704	0	5,137943844	0
17:00	75	0	0	0	0
18:00	90	0	0	0	0

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου (δ= -11,23°)

Πίνακας 5.1.2.4: Λόγος R_b κατά την 21^η Φεβρουαρίου για κατακόρυφες επιφάνειες νοτίου, ανατολικού, δυτικού και βόρειου προσανατολισμού

Ωρα[hrs]	ω (°)	R_b			
		Νότος ($\gamma=0^\circ$)	Ανατολή ($\gamma=-90^\circ$)	Δύση ($\gamma=90^\circ$)	Βορράς ($\gamma=180^\circ$)
7:00	-75	3,853912145	0	0	0
8:00	-60	1,705921766	3,183330032	0	0
9:00	-45	1,358815211	1,624341811	0	0
10:00	-30	1,229562595	0,891902793	0	0
11:00	-15	1,174240593	0,404814267	0	0
12:00	0	1,158362675	0	0	0
13:00	15	1,174240593	0	0,404814267	0
14:00	30	1,229562595	0	0,891902793	0
15:00	45	1,358815211	0	1,624341811	0
16:00	60	1,705921766	0	3,183330032	0
17:00	75	3,853912145	0	0	0
18:00	90	0	0	0	0

➤ **Για 21^η Μαρτίου ($\delta = -0,40^\circ$)**

Πίνακας 5.1.2.5: Λόγος R_b κατά την 21^η Μαρτίου για κατακόρυφες επιφάνειες νοτίου, ανατολικού, δυτικού και βόρειου προσανατολισμού

Ωρα[hrs]	ω ($^\circ$)	R_b			
		Νότος ($\gamma=0^\circ$)	Ανατολή ($\gamma=-90^\circ$)	Δύση ($\gamma=90^\circ$)	Βορράς ($\gamma=180^\circ$)
7:00	-75	0,825206669	0	0	0
8:00	-60	0,803373728	2,221538245	0	0
9:00	-45	0,796604501	1,278442314	0	0
10:00	-30	0,793619651	0,737049423	0	0
11:00	-15	0,792248942	0,341840469	0	0
12:00	0	0,791844401	0	0	0
13:00	15	0,792248942	0	0,341840469	0
14:00	30	0,793619651	0	0,737049423	0
15:00	45	0,796604501	0	1,278442314	0
16:00	60	0,803373728	0	2,221538245	0
17:00	75	0,825206669	0	0	0
18:00	90	0	0	0	0

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των τιμών των πινάκων

Από τις τιμές που προέκυψαν για το λόγο άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, R_b , παρατηρούμε για την 21^η Νοεμβρίου ότι για κατακόρυφη επιφάνεια ανατολικού προσανατολισμού ο λόγος R_b μηδενίζεται τις μεσημεριανές ώρες από τις 12:00 και μετά, ενώ για κατακόρυφη επιφάνεια δυτικού προσανατολισμού ο λόγος R_b μηδενίζεται τις πρωινές ώρες μέχρι τις 12:00. Αυτό είναι λογικό, αφού όπως γνωρίζουμε και εμπειρικά ένας ανατολικός τοίχος πάει να δέχεται άμεση ακτινοβολία τις μεσημεριανές ώρες, ενώ αντίθετα σε έναν δυτικό τοίχο δεν προσπίπτει άμεση ακτινοβολία τις πρωινές ώρες. Επιπλέον, παρατηρούμε πως μεταξύ κατακόρυφης επιφάνειας ανατολικού προσανατολισμού για τις πρωινές ώρες και κατακόρυφης επιφάνειας δυτικού προσανατολισμού για τις μεσημεριανές ώρες, οι τιμές του R_b είναι ίσες κατά τις ώρες που απέχουν ίσα χρονικά διαστήματα από το ηλιακό μεσημέρι (12:00). Για κατακόρυφη επιφάνεια στραμμένη προς το Νότο παρατηρούνται οι περισσότερες θετικές τιμές για το R_b και μάλιστα ενόσω υφίσταται άμεση ακτινοβολία, οι τιμές παρουσιάζουν φθίνουσα πορεία τις πρωινές ώρες έως τις 12:00 και αύξουσα πορεία τις απογευματινές ώρες. Παράλληλα, παρατηρούμε ισότητα των τιμών του R_b κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες που ισαπέχουν χρονικά από το ηλιακό μεσημέρι. Τέλος για κατακόρυφη επιφάνεια στραμμένη προς το Βορρά οι τιμές του R_b για κάθε ώρα της ημέρας προκύπτουν μηδέν, γεγονός αναμενόμενο αφού οι βόρειοι τοίχοι δεν δέχονται άμεση ακτινοβολία. Ακριβώς οι ίδιες παρατηρήσεις ισχύουν και για την 21^η ημέρα καθενός από τους υπόλοιπους τέσσερις χειμερινούς μήνες που εξετάσαμε.

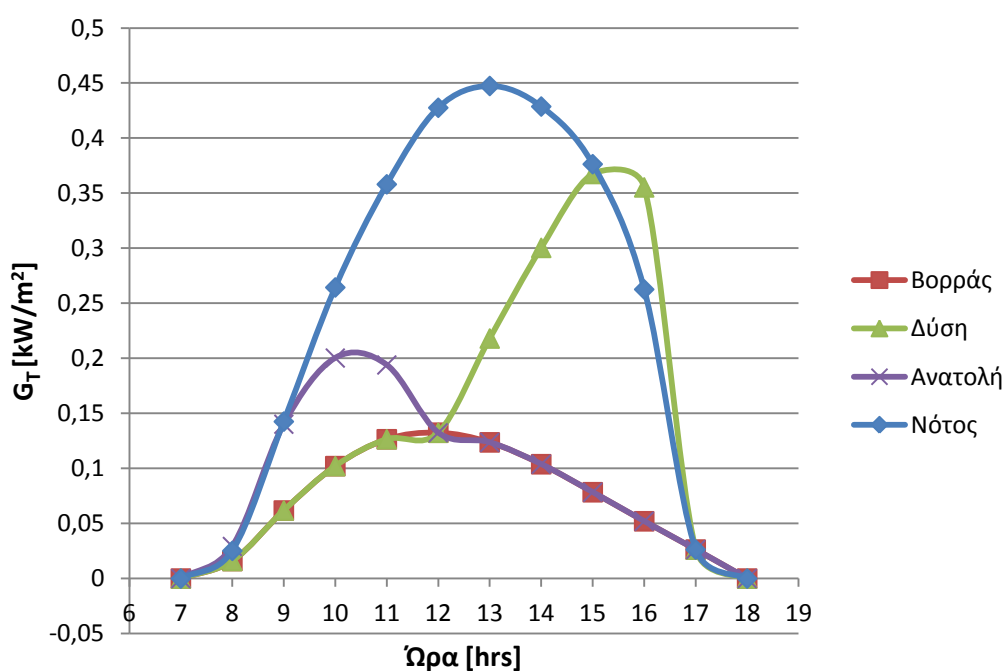
Έχοντας υπολογίσει πλέον τη στιγμιαία άμεση G_b και διάχυτη G_d ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου και το λόγο της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση οριζοντίου επιπέδου R_b , μπορούμε να υπολογίσουμε την ολική στιγμιαία προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G_T για κάθε ώρα της ημέρας από τις 7:00 μέχρι τις 18:00 και για κάθε προσανατολισμό της κατακόρυφης επιφάνειας-τοίχου (νότιος, ανατολικός, δυτικός και βόρειος) κατά την 21^η ημέρα του Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Μαρτίου,

εφαρμόζοντας τη σχέση υπολογισμού της (5.1.1). Ακολουθούν πίνακες όπου παρουσιάζονται οι τιμές της ολικής στιγμιαίας ακτινοβολίας κατακόρυφου επιπέδου, αλλά και διαγράμματα για καλύτερη εποπτεία της μεταβολής της συναρτήσεως των ωρών της εκάστοτε ημέρας.

➤ **Για 21^η Νοεμβρίου**

Πίνακας 5.1.1: Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G_T [kW/m²] για κάθε ώρα κατά την 21^η Νοεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό

Ώρα[hrs]	G_T [kW/m ²]			
	Νότος ($\gamma=0^\circ$)	Ανατολή ($\gamma=-90^\circ$)	Δύση ($\gamma=90^\circ$)	Βορράς ($\gamma=180^\circ$)
7:00	0	0	0	0
8:00	0,025168879	0,02921879	0,015962287	0,015962287
9:00	0,142606275	0,140193472	0,061810437	0,061810437
10:00	0,264438498	0,200306763	0,102139939	0,102139939
11:00	0,358110916	0,194017048	0,126527199	0,126527199
12:00	0,42767835	0,132498899	0,132498899	0,132498508
13:00	0,447451248	0,12371662	0,218061773	0,12371662
14:00	0,42878456	0,10388266	0,300400655	0,10388266
15:00	0,376426043	0,07843753	0,367527224	0,07843753
16:00	0,262667588	0,052036648	0,355322558	0,052036648
17:00	0,026347303	0,026347303	0,026347303	0,026347303
18:00	0	0	0	0

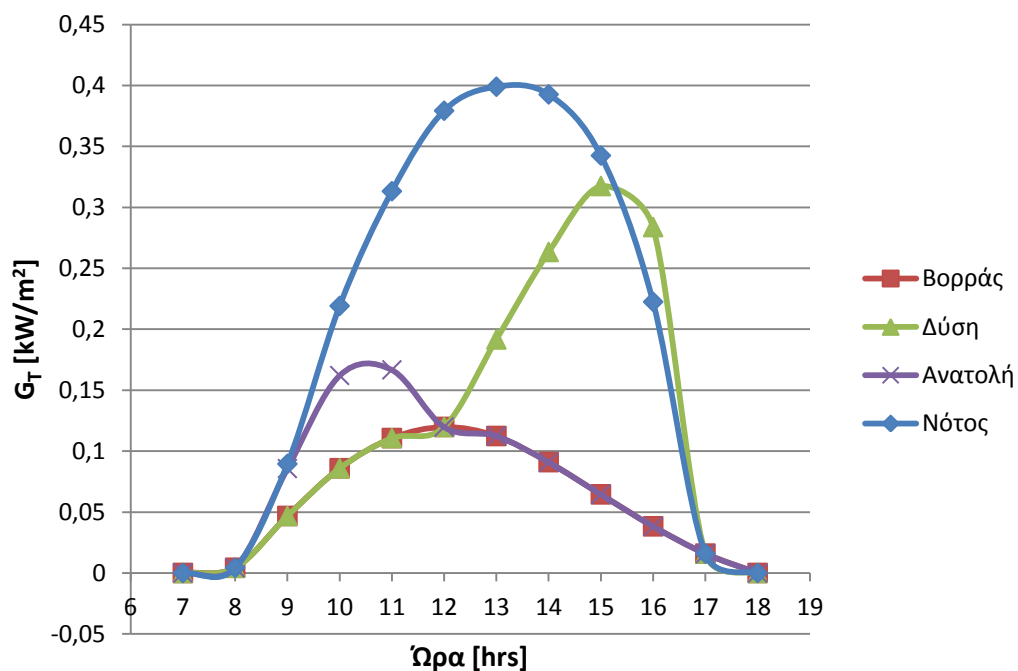


Διάγραμμα 5.1.1: Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G_T [kW/m²] συναρτήσεως των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου

Πίνακας 5.1.2: Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G_T [kW/m²] για κάθε ώρα κατά την 21^η Δεκεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό

Ώρα[hrs]	G_T [kW/m ²]			
	Νότος ($\gamma=0^\circ$)	Ανατολή ($\gamma=-90^\circ$)	Δύση ($\gamma=90^\circ$)	Βορράς ($\gamma=180^\circ$)
7:00	0	0	0	0
8:00	0,004262096	0,004262096	0,004262096	0,004262096
9:00	0,089459646	0,085619708	0,046772044	0,046772044
10:00	0,21906432	0,162006022	0,085882619	0,085882619
11:00	0,313166091	0,166649962	0,110670912	0,110670912
12:00	0,379192453	0,119789367	0,119789367	0,119789023
13:00	0,398881334	0,112360603	0,19156821	0,112360603
14:00	0,392566267	0,090920414	0,263333807	0,090920414
15:00	0,342431067	0,064493402	0,317429352	0,064493402
16:00	0,222416009	0,038263467	0,283777205	0,038263467
17:00	0,015854122	0,015854122	0,015854122	0,015854122
18:00	0	0	0	0

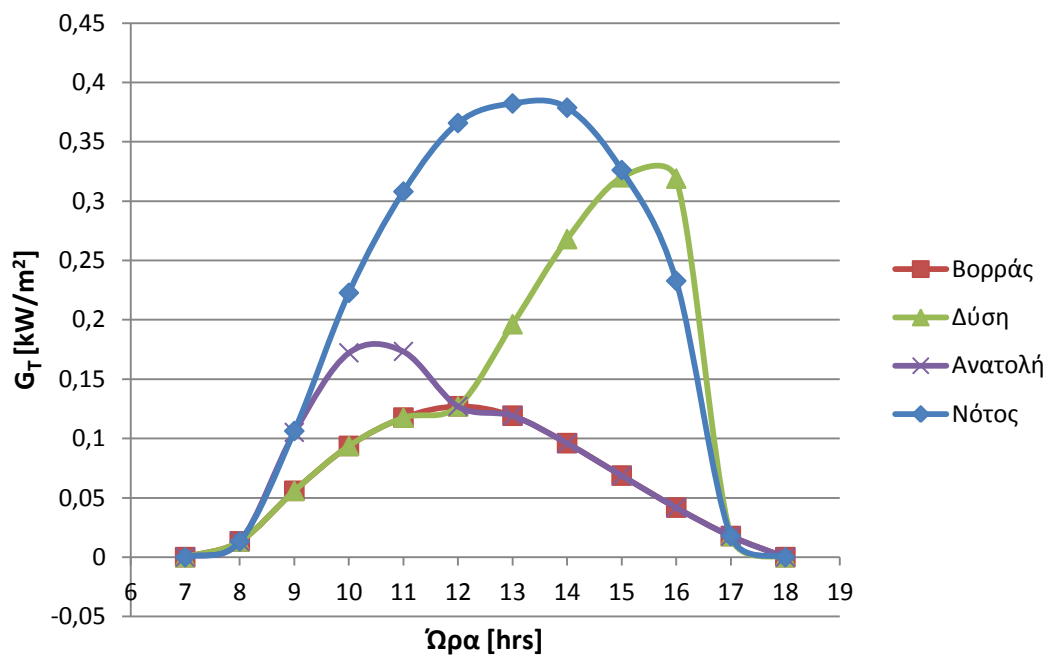


Διάγραμμα 5.1.2: Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G_T [kW/m²] συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό

➤ Για 21^η Ιανουαρίου

Πίνακας 5.1.3: Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G_T [kW/m²] για κάθε ώρα κατά την 21^η Ιανουαρίου και για κάθε προσανατολισμό

Ώρα[hrs]	G_T [kW/m ²]			
	Νότος ($\gamma=0^\circ$)	Ανατολή ($\gamma=-90^\circ$)	Δύση ($\gamma=90^\circ$)	Βορράς ($\gamma=180^\circ$)
7:00	0	0	0	0
8:00	0,013283921	0,013283921	0,013283921	0,013283921
9:00	0,106290325	0,105104975	0,055864999	0,055864999
10:00	0,222674925	0,172157146	0,093689634	0,093689634
11:00	0,307976625	0,173346883	0,117554665	0,117554665
12:00	0,365737563	0,127121353	0,127121353	0,127121037
13:00	0,382214245	0,119153648	0,196228446	0,119153648
14:00	0,37866415	0,09604241	0,267973834	0,09604241
15:00	0,326091655	0,068720625	0,320041625	0,068720625
16:00	0,232741895	0,041745463	0,318946324	0,041745463
17:00	0,017769344	0,017769344	0,017769344	0,017769344
18:00	0	0	0	0

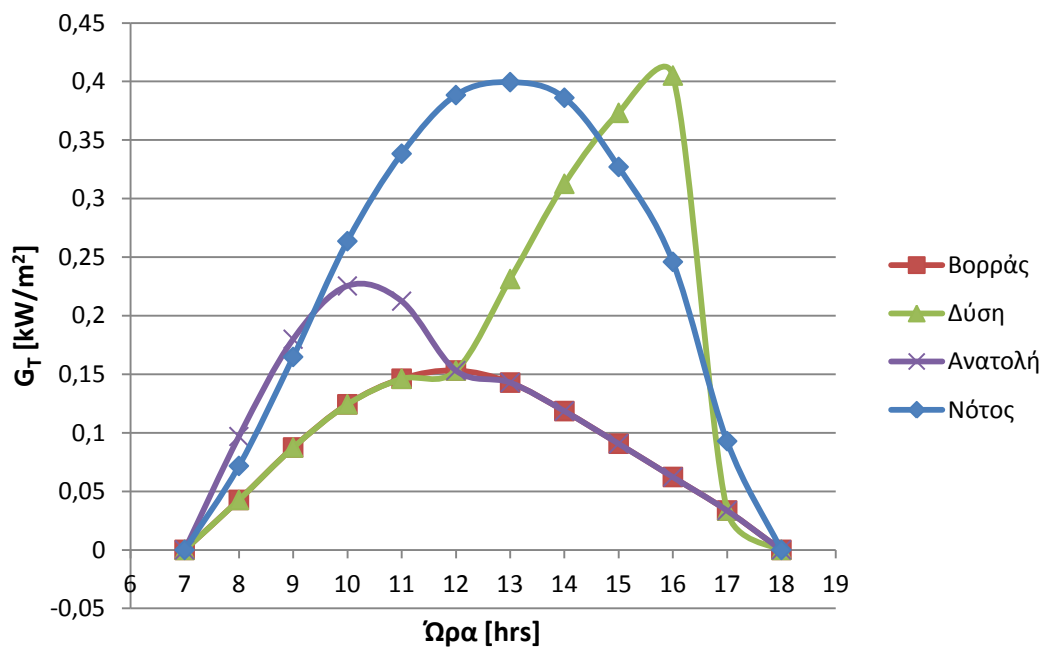


Διάγραμμα 5.1.3: Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G_T [kW/m²] συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου και για κάθε προσανατολισμό

➤ **Για 21^η Φεβρουαρίου**

Πίνακας 5.1.4: Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G_T [kW/m²] για κάθε ώρα κατά την 21^η Φεβρουαρίου και για κάθε προσανατολισμό

Ώρα[hrs]	G_T [kW/m ²]			
	Νότος ($\gamma=0^\circ$)	Ανατολή ($\gamma=-90^\circ$)	Δύση ($\gamma=90^\circ$)	Βορράς ($\gamma=180^\circ$)
7:00	0	0	0	0
8:00	0,071686512	0,096816039	0,042670154	0,042670154
9:00	0,164775295	0,17988812	0,087436385	0,087436385
10:00	0,26364307	0,225377512	0,124301937	0,124301937
11:00	0,338332323	0,212398191	0,146141123	0,146141123
12:00	0,388408417	0,153189969	0,153189969	0,153189657
13:00	0,399457162	0,142866721	0,231325144	0,142866721
14:00	0,386129803	0,118532501	0,312642815	0,118532501
15:00	0,327045412	0,090683513	0,373232981	0,090683513
16:00	0,245965407	0,062233218	0,4050861	0,062233218
17:00	0,092855361	0,033632101	0,033632101	0,033632101
18:00	0	0	0	0

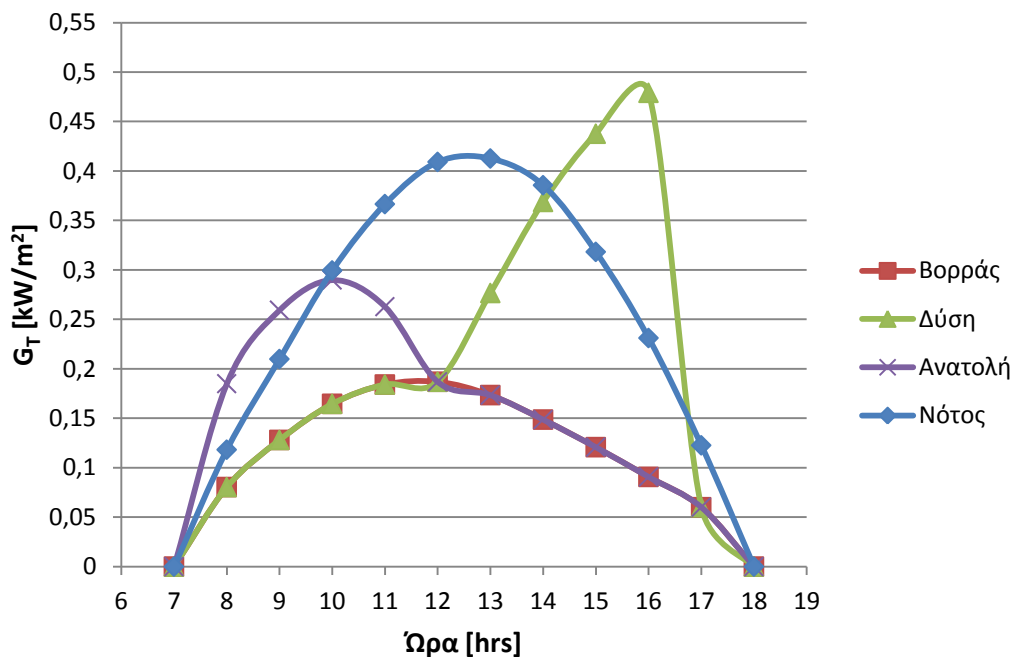


Διάγραμμα 5.1.4: Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G_T [kW/m²] συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου και για κάθε προσανατολισμό

➤ Για 21^η Μαρτίου

Πίνακας 5.1.5: Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G_T [kW/m²] για κάθε ώρα κατά την 21^η Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό

Ώρα[hrs]	G_T [kW/m ²]			
	Νότος ($\gamma=0^\circ$)	Ανατολή ($\gamma=-90^\circ$)	Δύση ($\gamma=90^\circ$)	Βορράς ($\gamma=180^\circ$)
7:00	0	0	0	0
8:00	0,118199457	0,184937495	0,080393134	0,080393134
9:00	0,209846417	0,259315013	0,128061831	0,128061831
10:00	0,299417167	0,289804874	0,164566995	0,164566995
11:00	0,366516697	0,26280561	0,184093399	0,184093399
12:00	0,409157901	0,18688691	0,18688691	0,186886615
13:00	0,412626168	0,17341193	0,27662836	0,17341193
14:00	0,385591655	0,148645223	0,368701809	0,148645223
15:00	0,318208414	0,120760726	0,437637519	0,120760726
16:00	0,23112305	0,090689488	0,479024977	0,090689488
17:00	0,122608323	0,060026767	0,060026767	0,060026767
18:00	0	0	0	0



Διάγραμμα 5.1.5: Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G_T [kW/m²] συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου και για κάθε προσανατολισμό

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Από τους πίνακες και τα διαγράμματα για την ολική στιγμιαία ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G_T , εξάγουμε τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα που ισχύουν και για τους πέντε εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες. Έτσι, σε κάθε περίπτωση οι κατακόρυφες επιφάνειες νοτίου προσανατολισμού δέχονται κατά τη διάρκεια της ημέρας τη μεγαλύτερη ολική ακτινοβολία, σε αντίθεση με τις κατακόρυφες επιφάνειες βόρειου προσανατολισμού που δέχονται τη λιγότερη ολική ακτινοβολία. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί εύκολα, αφού όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, σε μία κατακόρυφη νότια επιφάνεια προσπίπτει καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας (όσο υφίσταται άμεση στιγμιαία ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου) άμεση στιγμιαία ακτινοβολία και συνεπώς αυτή συνυπολογίζεται στην G_T μαζί με τη διάχυτη στιγμιαία ακτινοβολία. Αντίθετα, στον υπολογισμό της ολικής στιγμιαίας ακτινοβολίας G_T για μία κατακόρυφη βόρεια επιφάνεια λαμβάνεται υπόψη μόνο η διάχυτη ακτινοβολία, αφού σε αυτήν δεν προσπίπτει καθόλου άμεση ακτινοβολία. Οι καμπύλες G_T τόσο για την κατακόρυφη επιφάνεια που «βλέπει» προς Νότο, όσο και για την κατακόρυφη επιφάνεια που «βλέπει» προς Βορρά παρουσιάζουν μία ομαλότητα στη μορφή τους, με τη μεν ολική στιγμιαία ακτινοβολία νότιας κατακόρυφης επιφάνειας να εμφανίζει μέγιστο γύρω στη 13:00 και τη δε ολική στιγμιαία ακτινοβολία βόρειας κατακόρυφης επιφάνειας να μεγιστοποιείται γύρω στις 12:00.

Από την άλλη πλευρά, οι καμπύλες G_T για ανατολική και δυτική κατακόρυφη επιφάνεια δεν είναι ομαλές. Παρουσιάζουν ένα «σπάσιμο» περίπου στις 12:00, που στην περίπτωση κατακόρυφης επιφάνειας στραμμένης στην Ανατολή εκδηλώνεται ως απότομη μείωση της τιμής του G_T στο χρονικά διάστημα 11:00-12:00, ενώ στην περίπτωση κατακόρυφης επιφάνειας στραμμένης στη Δύση εμφανίζεται ως απότομη αύξηση της τιμής του G_T στο χρονικό διάστημα 12:00-13:00. Αυτή η απότομη μεταβολή στην τιμή της ολικής στιγμιαίας ακτινοβολίας οφείλεται στο γεγονός ότι στην ανατολική κατακόρυφη επιφάνεια και μέχρι τις 12:00 προσπίπτει τόσο άμεση όσο και διάχυτη ακτινοβολία. Από τις 12:00 και έπειτα παύει να δέχεται άμεση και πλέον υπάρχει μόνο διάχυτη ακτινοβολία. Αντίστροφα, στην κατακόρυφη δυτική επιφάνεια έχουμε πρόσπτωση μόνο διάχυτης ακτινοβολίας κατά τις πρωινές ώρες μέχρι τις 12:00 και από το ηλιακό μεσημέρι και μετά συνυπάρχουν άμεση και διάχυτη ακτινοβολία. Η ολική στιγμιαία ακτινοβολία για την περίπτωση ανατολικής κατακόρυφης επιφάνειας λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της στο χρονικό διάστημα 10:00-11:00, ανάλογα με τον εξεταζόμενο χειμερινό μήνα, ενώ στην περίπτωση δυτικής κατακόρυφης ακτινοβολίας η G_T μεγιστοποιείται στο χρονικό διάστημα 15:00-16:00 και πάλι ανάλογα με το χειμερινό μήνα που μελετάται.

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα του G_T ανά τους πέντε χειμερινούς μήνες, παρατηρούμε πως η μέγιστη τιμή της ολικής στιγμιαίας ακτινοβολίας για νότια κατακόρυφη επιφάνεια μειώνεται από το Νοέμβριο έως τον Ιανουάριο και αυξάνεται κατά το Φεβρουάριο και ακόμη περισσότερο κατά το Μάρτιο, γεγονός λογικό και αναμενόμενο καθώς αρχικά βρισκόμαστε στο κέντρο του χειμώνα και κατόπιν απομακρυνόμαστε από αυτόν. Αντίστοιχα, για τους άλλους τρεις προσανατολισμούς η μέγιστη τιμή της G_T μειώνεται από το Νοέμβριο έως τον Δεκέμβριο και αυξάνεται προχωρώντας από τον Ιανουάριο μέχρι το Μάρτιο.

5.2 Ηλιακή φόρτιση του τοίχου που φέρει στρώμα PCM

Σε αυτήν την ενότητα, εξετάζεται η περίπτωση ενός κατακόρυφου τοίχου που φέρει στρώμα υλικού αλλαγής φάσης και δέχεται ηλιακή ακτινοβολία διερχόμενη από υαλοπίνακα που βρίσκεται σε απέναντι κατακόρυφο τοίχο. Στόχος είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του PCM, ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου, η εύρεση του ποσοστού αξιοποίησής του και ο καθορισμός της ενεργειακής συνεισφοράς του στη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας και συνθηκών άνεσης εντός του εξεταζόμενου χώρου. Πρόκειται για κτίριο-αίθουσα εντός της Αθήνας, με διαστάσεις 10m(μήκος)×10m(πλάτος)×3m(ύψος) και ο τοίχος που φέρει στρώμα PCM είναι εσωτερικός, διαστάσεων 10m×3m. Στο εσωτερικό της υπό μελέτης αίθουσας θεωρούμε ότι η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή με τη βοήθεια θερμαντικών μέσων (θερμοστάτες, καλοριφέρ, κλιματιστικά κλπ). Αρχικά, παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού της θερμοκρασίας του υλικού αλλαγής φάσης, η οποία πραγματοποιείται για κάθε ώρα του 24ώρου της 21^{ης} ημέρας Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Μαρτίου και για κάθε κύριο προσανατολισμό του απέναντι κατακόρυφου τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, δηλαδή για νότιο, ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το ποσοστό αξιοποίησης του υλικού αλλαγής φάσης και κατόπιν η ενεργειακή του συνεισφορά για κάθε μήνα και κάθε προσανατολισμό. Στην παρούσα μελέτη, τα υλικά αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκαν στον εσωτερικό τοίχο είναι σε πρώτη φάση το RT20 και στη συνέχεια το RT27, οι ιδιότητες των οποίων φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5.2: Ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη

Είδος PCM	RT20	RT27
H [kJ/kg]	132,1	167,4
T _s [°C]	15	22
T _l [°C]	26	31
C _{ps} [kJ/(kg °C)]	1,9	2
C _{pl} [kJ/(kg °C)]	2,5	2,3
ρ [kg/m ³]	825	820

5.2.1 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM

Προτού αναφερθεί η σχέση ισολογισμού ενέργειας που εφαρμόστηκε στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης, για κάθε ώρα, κάθε χειμερινό μήνα και κάθε προσανατολισμό, κρίνεται απαραίτητη η παράθεση των παραδοχών και υποθέσεων που έγιναν για την απλοποίηση του προβλήματος. Αρχικά, όπως προαναφέρθηκε, θεωρούμε ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό της εξεταζόμενης αίθουσας παραμένει σταθερή μέσω της χρήσης πηγών θερμότητας, όπως κλιματιστικά συστήματα, θερμαντικά σώματα κλπ. Αναφορικά με το υλικό αλλαγής φάσης, υποθέσαμε ότι η θερμοκρασία που επικρατεί στο στρώμα PCM είναι παντού η ίδια, ενώ μεταξύ του στρώματος του PCM και της μόνωσης θεωρήσαμε πως δεν συναλλάσσεται θερμότητα. Τέλος, μία υπόθεση που χρειάστηκε να κάνουμε και αφορά και στον καθορισμό της ενεργειακής συνεισφοράς του υλικού αλλαγής φάσης, που θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα, είναι οι σταθερές απώλειες εντός του χώρου μελέτης μας, οι οποίες συνεπάγονται σταθερή απαιτούμενη ισχύ για την επίτευξη συνθηκών άνεσης και σταθερής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του χώρου.

Σύμφωνα λοιπόν με τον ισολογισμό ενέργειας που εφαρμόσαμε στο στρώμα υλικού αλλαγής φάσης, το PCM λαμβάνει θερμότητα ίση με το αλγεβρικό άθροισμα της θερμικής ενέργειας λόγω ηλιακής ακτινοβολίας διερχόμενης από τον απέναντι υαλοπίνακα και της συναλλασσόμενης θερμότητας με συναγωγή με τον εσωτερικό αέρα της αίθουσας. Ο όρος της συναλλασσόμενης θερμότητας μεταξύ PCM και εσωτερικού αέρα λαμβάνει θετικό πρόσημο μέσα στην εξίσωση του ισολογισμού ενέργειας (και επομένως προσαιξάνει τη θερμότητα που λαμβάνει το PCM), εφόσον η θερμοκρασία του χώρου είναι μεγαλύτερη αυτής του PCM την εκάστοτε ώρα του 24ώρου. Αν η θερμοκρασία του δωματίου είναι μικρότερη αυτής του PCM, τότε το υλικό αλλαγής φάσης χάνει θερμότητα προσφέροντάς την στο χώρο και προφανώς σε αυτήν την περίπτωση το πρόσημο του όρου θα είναι αρνητικό.

Ο ισολογισμός ενέργειας για το στρώμα του PCM είναι:

$$G_T \cdot A_f \cdot 0,9 \cdot 3600 + U \cdot A_w \cdot \left(T_{\Delta\Omega M} - \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \right) \cdot 3600 = \\ = m_{PCM} \cdot C_{p\text{eff}} \cdot (T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\alpha\rho\chi}) \quad (5.2.1.1)$$

όπου

- $G_T [kW/m^2]$: η ολική στιγμιαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου, έτσι όπως υπολογίστηκε στην προηγούμενη ενότητα αναλυτικά για κάθε ώρα της 21^{ης} ημέρας των πέντε χειμερινών μηνών και για κάθε προσανατολισμό
- $A_f [m^2]$: η επιφάνεια του υαλοπίνακα. Σε αυτήν την ενότητα θεωρούμε υαλοπίνακα διαστάσεων 3m(μήκος)×1,5m(ύψος), δηλαδή $A_f=4,5m^2$
- $U [kW/(m^2\text{ }^\circ C)]$: ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{d}{k} \quad (5.2.1.2)$$

όπου

- $\frac{1}{h_i}$: η θερμική αντίσταση συναγωγής και h_i είναι ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ του τοίχου και του εσωτερικού αέρα του χώρου. Σύμφωνα με την ASHRAE είναι $h_i = 8 W/(m^2\text{ }^\circ C)$
- $\frac{d}{k}$: η θερμική αντίσταση αγωγής διαμέσου του σοβά που υφίσταται πριν το στρώμα του PCM, με d το πάχος του στρώματος του σοβά και k τη θερμική αγωγιμότητα του σοβά. Έτσι, είναι $k = 1,2 W/(m^2\text{ }^\circ C)$ και επιλέξαμε πάχος σοβά $d = 0,02m$

Άρα, ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας προκύπτει $\frac{1}{U} = \frac{1}{8} + \frac{0,02}{1,2} =$

$$0,1417 \frac{m^2\text{ }^\circ C}{W} \rightarrow U = 7,06 \cdot 10^{-3} \frac{kW}{m^2\text{ }^\circ C}$$

- $A_w [m^2]$: η επιφάνεια του τοίχου που φέρει το στρώμα PCM. Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα θα είναι $A_w = 10m \times 3m = 30m^2$
- $T_{\Delta\Omega M} [^\circ C]$: η θερμοκρασία εντός του εξεταζόμενου χώρου, που όπως υποθέσαμε διατηρείται σταθερή και εδώ τη θεωρούμε $T_{\Delta\Omega M} = 20^\circ C$
- $T_{\alpha\rho\chi} [^\circ C]$: η θερμοκρασία του PCM στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου

- $T_{\tau\epsilon\lambda}$ [$^{\circ}C$]: η θερμοκρασία του PCM στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου
- m_{PCM} [kg]: η μάζα του PCM, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$m_{PCM} = \rho_{PCM} V_{PCM} \quad (5.2.1.3)$$

όπου

- ρ_{PCM} : η πυκνότητα του PCM, που θεωρούμε ότι παραμένει αμετάβλητη καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία του PCM. Σύμφωνα με τον πίνακα με τις ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης είναι $\rho = 825kg/m^3$ για το RT20 που θα χρησιμοποιήσουμε σε πρώτη φάση και $\rho = 820kg/m^3$ για το RT27 που θα χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια.
- V_{PCM} : ο όγκος του στρώματος του PCM, ο οποίος ισούται με το γινόμενο της επιφάνειας του τοίχου επί το πάχος του στρώματος του υλικού αλλαγής φάσης. Εδώ θεωρούμε πάχος του PCM $d_{PCM} = 0,03m$. Άρα, $V_{PCM} = 30m^2 \times 0,03 = 0,9m^3$.

Συνεπώς, για το RT20 έχουμε $m_{PCM} = 825 \times 0,9 = 742,5kg$ και για το RT27 έχουμε $m_{PCM} = 820 \times 0,9 = 738kg$

- C_{peff} : η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης και η διαδικασία υπολογισμού της θα παρουσιαστεί στην αμέσως επόμενη ενότητα

Τέλος, ο συντελεστής 0,9 τοποθετείται στον πρώτο όρο του ισολογισμού ενέργειας, ώστε να λάβουμε υπόψη τις απώλειες (λόγω ανακλάσεων, απορρόφησης από τον υαλοπίνακα, αέρα κ.λ.π).

5.2.2 Υπολογισμός της ενεργού θερμοχωρητικότητας C_{peff} του PCM

Στην παρούσα εργασία η μελέτη του φαινομένου της αλλαγής φάσης μας ενδιαφέρει μακροσκοπικά και όχι μικροσκοπικά. Έτσι, θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο ενεργού θερμοχωρητικότητας, κατά την οποία ο υπολογισμός του C_{peff} , γίνεται μέσω μίας συνάρτησης. Από τις διάφορες εκδοχές της συγκεκριμένης μεθόδου, θα εφαρμόσουμε αυτήν της τριγωνικής συνάρτησης. Για αυτή τη συνάρτηση, η οποία εκτιμήθηκε έπειτα από μετρήσεις για διάφορα PCM στο Εργαστήριο Κλιματισμού, απαιτούνται κάποια χαρακτηριστικά του υλικού αλλαγής φάσης και συγκεκριμένα η θερμοκρασία τήξης T_l και στερεοποίησης T_s , οι αντίστοιχες θερμοχωρητικότητες C_{pl} και C_{ps} και η θερμότητα αλλαγής φάσης H , τα οποία έχουν δοθεί ήδη στον πίνακα με τις ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης. Η εξίσωση που δίνει την ενεργό θερμοχωρητικότητα του PCM είναι η εξής:

Για $T \leq T_s$:

$$C_{peff} = C_{ps} \quad (5.2.2.1)$$

Για $T_s < T \leq T_c$:

$$C_{peff}(T) = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps} \quad (5.2.2.2)$$

Για $T_c < T \leq T_l$:

$$C_{peff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl} \quad (5.2.2.3)$$

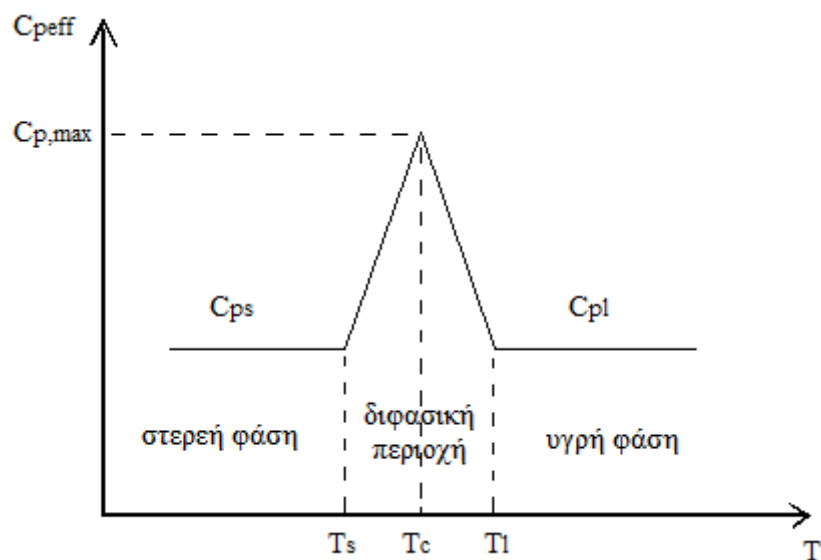
Για $T > T_l$:

$$C_{peff} = C_{pl} \quad (5.2.2.4)$$

όπου

- T : η θερμοκρασία του PCM
- T_s : η θερμοκρασία στερεοποίησης του PCM
- T_l : η θερμοκρασία τήξης του PCM
- C_{ps} : η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM για θερμοκρασία T_s
- C_{pl} : η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM για θερμοκρασία T_l
- T_c : η θερμοκρασία στο μέσον του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης του PCM, δηλαδή $T_c = (T_l - T_s)/2$
- b : το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης, δηλαδή $b = T_l - T_s$
- H : η θερμότητα αλλαγής φάσης του PCM

Η μορφή του διαγράμματος της ενεργού θερμοχωρητικότητας C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας θα είναι όπως φαίνεται παρακάτω:



Διάγραμμα 5.2.2.1: Μορφή συνάρτησης C_{peff} των υλικών αλλαγής φάσης

Με βάση τα παραπάνω και τον πίνακα ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης, μπορούμε να καθορίσουμε πλήρως τη συνάρτηση που δίνει την ενεργό θερμοχωρητικότητα για το RT20 και κατόπιν για το RT27. Επομένως, έχουμε:

➤ **Για το RT20:**

Σε αυτό το σημείο θεωρούμε χρήσιμο να παραθέσουμε ξανά τις τιμές των χαρακτηριστικών του RT20 που χρειάζονται για τη συνάρτηση C_{peff} :

H [kJ/kg]	T_s [°C]	T_1 [°C]	C_{ps} [kJ/(kg °C)]	C_{pl} [kJ/(kg °C)]
132,1	15	26	1,9	2,5

Άρα, προκύπτει:

Για $T \leq 15^\circ C$:

$$C_{peff} = C_{ps} = 1,9 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ C) \quad (5.2.2.5)$$

Για $15^\circ C < T \leq 20,5^\circ C$:

$$C_{peff} = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = 3,676 \cdot T - 53,24 \text{ [kJ}/(\text{kg } ^\circ C)] \quad (5.2.2.6)$$

Για $20,5^\circ C < T \leq 26^\circ C$:

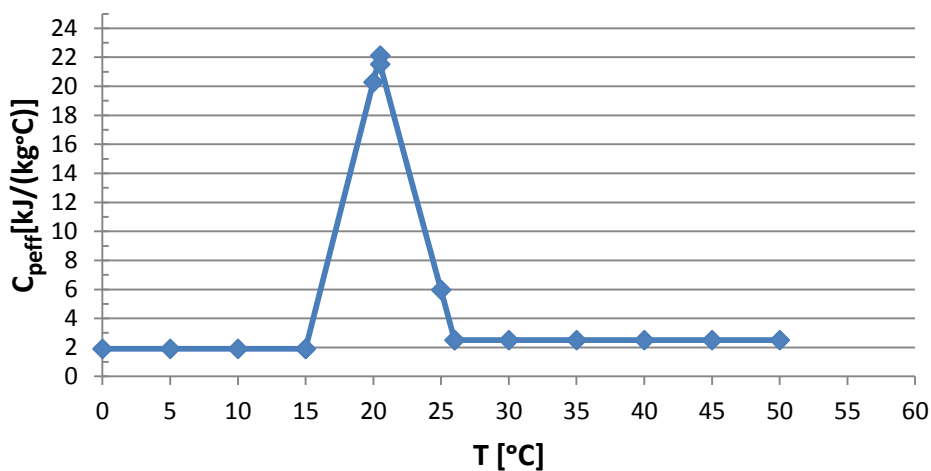
$$C_{peff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = -3,458 \cdot T + 92,41 \text{ [kJ}/(\text{kg } ^\circ C)] \quad (5.2.2.7)$$

Για $T > 26^\circ C$:

$$C_{peff} = C_{pl} = 2,5 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ C) \quad (5.2.2.8)$$

Η ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} του RT20 συναρτήσεται της θερμοκρασίας του αποτυπώνεται διαγραμματικά ως εξής:



Διάγραμμα 5.2.2.2: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσεται της θερμοκρασίας του RT20

➤ **Για το RT27:**

Ομοίως, παραθέτουμε τις τιμές των χαρακτηριστικών του RT27 που χρειάζονται για τη συνάρτηση C_{peff} :

H [kJ/kg]	T_s [°C]	T_1 [°C]	C_{ps} [kJ/(kg °C)]	C_{pl} [kJ/(kg °C)]
167,4	22	31	2	2,3

Άρα, προκύπτει:

Για $T \leq 22^\circ C$:

$$C_{peff} = C_{ps} = 2 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ C) \quad (5.2.2.9)$$

Για $22^\circ C < T \leq 26,5^\circ C$:

$$C_{peff} = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = 7,378 \cdot T - 160,316 \text{ [kJ}/(\text{kg } ^\circ C)] \quad (5.2.2.10)$$

Για $26,5^\circ C < T \leq 31^\circ C$:

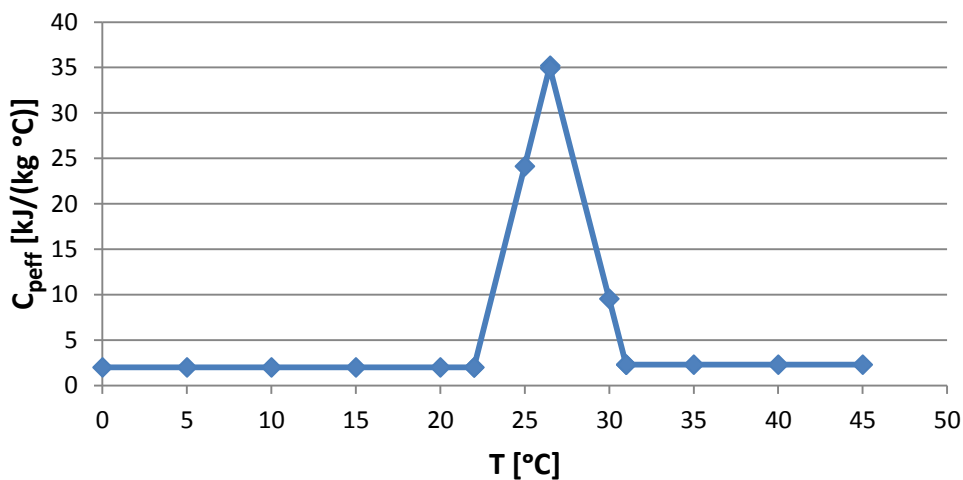
$$C_{peff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = -7,244 \cdot T + 226,87 \text{ [kJ}/(\text{kg } ^\circ C)] \quad (5.2.2.11)$$

Για $T > 31^\circ C$:

$$C_{peff} = C_{pl} = 2,3 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ C) \quad (5.2.2.12)$$

Η ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} του RT27 συναρτήσει της θερμοκρασίας του αποτυπώνεται διαγραμματικά ως εξής:



Διάγραμμα 5.2.2.3: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27

5.2.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει των ωρών του 24ώρου

Με γνωστή τη συνάρτηση που δίνει την ενεργό θερμοχωρητικότητα και με γνωστά όλα τα άλλα απαιτούμενα μεγέθη, μπορούμε πλέον να εφαρμόσουμε τον ισολογισμό ενέργειας στο στρώμα RT20, αλλά και RT27, προκειμένου να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου. Η διαδικασία υπολογισμού της θερμοκρασίας του PCM θα πραγματοποιηθεί για κάθε ώρα της 21^{ης} ημέρας Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα που βρίσκεται στον απέναντι τοίχο από αυτόν που φέρει το υλικό αλλαγής φάσης. Επομένως, θα έχουμε:

$$\begin{aligned}
 G_T \cdot A_f \cdot 0,9 \cdot 3600 + U \cdot A_w \cdot \left(T_{\Delta\Omega M} - \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \right) \cdot 3600 &= \\
 &= m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot (T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\alpha\rho\chi}) \\
 \Rightarrow m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\tau\epsilon\lambda} + U \cdot A_w \cdot \frac{T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \cdot 3600 &= \\
 = G_T A_f 0,9 \cdot 3600 + U A_w T_{\Delta\Omega M} \cdot 3600 - U A_w \frac{T_{\alpha\rho\chi}}{2} 3600 + m_{PCM} C_{peff} T_{\alpha\rho\chi} \\
 \Rightarrow T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{G_T A_f 0,9 \cdot 3600 + U A_w T_{\Delta\Omega M} 3600 - U A_w T_{\alpha\rho\chi} 1800 + m_{PCM} C_{peff} T_{\alpha\rho\chi}}{m_{PCM} C_{peff} + U A_w 1800} & \quad (5.2.3.1)
 \end{aligned}$$

Στην παραπάνω σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας του PCM στο τέλος κάθε ώρας, $T_{\tau\epsilon\lambda}$, παρατηρούμε ότι υπάρχει ένας ακόμη άγνωστος, το $T_{\alpha\rho\chi}$, δηλαδή η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, θα ακολουθήσουμε την παρακάτω διαδικασία:

Αρχικά, θεωρούμε αυθαίρετα γνωστή την τιμή της $T_{\alpha\rho\chi}$, δίνοντάς της μία τυχαία τιμή, έστω $T_{\alpha\rho\chi} = 14^\circ\text{C}$ για τις 7:00 το πρωί. Με γνωστούς πλέον όλους τους όρους της σχέσης (όπου προφανώς στο G_T θέτουμε την τιμή όπως αυτή προέκυψε για τη συγκεκριμένη ώρα στην ενότητα 5.1) υπολογίζουμε τη θερμοκρασία $T_{\tau\epsilon\lambda}$ του PCM στο τέλος των 7:00, η οποία θα αποτελέσει την αρχική θερμοκρασία $T_{\alpha\rho\chi}$ για τις 8:00, ώστε να ευρεθεί η τελική θερμοκρασία $T_{\tau\epsilon\lambda}$ στις 8:00. Κατά τον ίδιο τρόπο εργαζόμαστε για όλες τις ώρες του 24ώρου, υπολογίζοντας έτσι την $T_{\tau\epsilon\lambda}$ στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου. Στη συνέχεια, προκειμένου να επιτύχουμε ανεξαρτησία των τιμών του $T_{\tau\epsilon\lambda}$ από την αρχική συνθήκη, δηλαδή από την αυθαίρετη τιμή που λάβαμε για την $T_{\alpha\rho\chi}$ στις 7:00, επαναλαμβάνουμε ολόκληρη τη διαδικασία για το ίδιο 24ωρο, θέτοντας αυτή τη φορά ως αρχική θερμοκρασία $T_{\alpha\rho\chi}$ των 7:00, την τελική θερμοκρασία $T_{\tau\epsilon\lambda}$ των 6:00 έτσι όπως αυτή προέκυψε από την πρώτη δοκιμή. Οι επαναλήψεις για το ίδιο 24ωρο συνεχίζονται έως ότου οι τιμές του $T_{\tau\epsilon\lambda}$ της ίδιας ώρας να συγκλίνουν μεταξύ δύο διαδοχικών δοκιμών. Στην παρούσα εργασία θεωρούμε σύγκλιση στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο.

Η διαδικασία που περιγράφηκε ανωτέρω πραγματοποιήθηκε για την περίπτωση χρήσης του RT20, αλλά και την περίπτωση χρήσης του RT27, για την 21^η ημέρα καθενός από τους πέντε χειμερινούς μήνες που μελετάμε (Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος και Μάρτιος), για κάθε προσανατολισμό του τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα (Νότος, Ανατολή, Δύση και Βορράς). Επισημαίνουμε ότι σε

όλους τους πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν, αναγράφεται ο προσανατολισμός του τοίχου στον οποίο βρίσκεται ο υαλοπίνακας και όχι του τοίχου στον οποίο έχει ενσωματωθεί το υλικό αλλαγής φάσης.

➤ **Για το RT20:**

Σε αυτό το σημείο κρίνουμε σκόπιμο να υπενθυμίσουμε τις τιμές των μεγεθών που εμπριέχονται στη σχέση υπολογισμού του $T_{\tau\epsilon\lambda}$ για το RT20:

$$A_f = 4,5m^2$$

$$U = 7,06 \cdot 10^{-3}kW/(m^2\text{ }^\circ C)$$

$$A_w = 30m^2$$

$$T_{\Delta\Omega M} = 20^\circ C$$

$$m_{PCM} = 742,5kg$$

Με βάση τη σχέση (5.2.3.1) και τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει η σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας του RT20 στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου:

$$T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{14580G_T - 381,24T_{\alpha\rho\chi} + 742,5C_{p\epsilon f f}T_{\alpha\rho\chi} + 15249,6}{742,5C_{p\epsilon f f} + 381,24} \quad (5.2.3.2)$$

και υπενθυμίζουμε ότι για το $C_{p\epsilon f f}$ του RT20 ισχύει:

Για $T \leq 15^\circ C$:

$$C_{p\epsilon f f} = C_{ps} = 1,9 \text{ kJ}/(kg \text{ }^\circ C)$$

Για $15^\circ C < T \leq 20,5^\circ C$:

$$C_{p\epsilon f f} = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps} \Rightarrow$$

$$C_{p\epsilon f f} = 3,676 \cdot T - 53,24 \text{ [kJ}/(kg \text{ }^\circ C)]$$

Για $20,5^\circ C < T \leq 26^\circ C$:

$$C_{p\epsilon f f}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl} \Rightarrow$$

$$C_{p\epsilon f f} = -3,458 \cdot T + 92,41 \text{ [kJ}/(kg \text{ }^\circ C)]$$

Για $T > 26^\circ C$:

$$C_{p\epsilon f f} = C_{pl} = 2,5 \text{ kJ}/(kg \text{ }^\circ C)$$

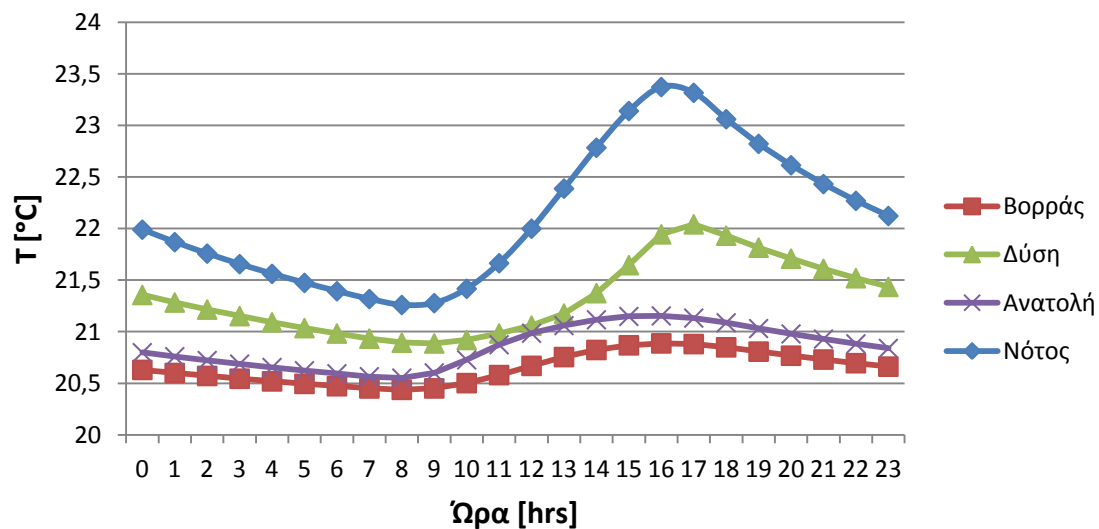
όπου T στις εξισώσεις του $C_{p\epsilon f f}$ θεωρήσαμε τη θερμοκρασία του PCM, $T_{\alpha\rho\chi}$, στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου.

Η σύγκλιση των τιμών για το RT20 επετεύχθη μετά από 7-8 δοκιμές. Οι θερμοκρασίες που επικρατούν στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης συναρτηθεί των ωρών της εκάστοτε ημέρας παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα και έχουν προκύψει για κάθε ώρα από τη σχέση $T_{PCM} = \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2}$. Οι πίνακες παρουσιάζουν τις τιμές του $T_{\tau\epsilon\lambda}$ για κάθε ώρα, όπως προέκυψαν από τη σχέση (5.2.3.2).

➤ Για 21^η Νοεμβρίου

Πίνακας 5.2.3.1: Θερμοκρασία $T_{\text{τελ}}$ του RT20 για κάθε ώρα της 21^{ης} Νοεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ώρα[hrs]	$T_{\text{τελ}}[^{\circ}\text{C}]$ Νότος	$T_{\text{τελ}}[^{\circ}\text{C}]$ Ανατολή	$T_{\text{τελ}}[^{\circ}\text{C}]$ Δύση	$T_{\text{τελ}}[^{\circ}\text{C}]$ Βορράς
7:00	21,28	20,55	20,91	20,44
8:00	21,24	20,55	20,88	20,43
9:00	21,32	20,65	20,89	20,47
10:00	21,52	20,8	20,95	20,54
11:00	21,81	20,95	21,02	20,62
12:00	22,19	21,03	21,1	20,71
13:00	22,59	21,09	21,26	20,79
14:00	22,98	21,14	21,49	20,85
15:00	23,3	21,16	21,8	20,88
16:00	23,44	21,15	22,09	20,89
17:00	23,19	21,12	21,99	20,87
18:00	22,93	21,06	21,87	20,83
19:00	22,71	21	21,76	20,79
20:00	22,52	20,95	21,66	20,75
21:00	22,35	20,91	21,56	20,71
22:00	22,19	20,86	21,48	20,68
23:00	22,05	20,82	21,39	20,65
24:00	21,93	20,78	21,32	20,61
1:00	21,81	20,74	21,25	20,59
2:00	21,7	20,7	21,18	20,56
3:00	21,61	20,67	21,12	20,53
4:00	21,52	20,64	21,06	20,51
5:00	21,43	20,61	21,01	20,48
6:00	21,35	20,58	20,96	20,46

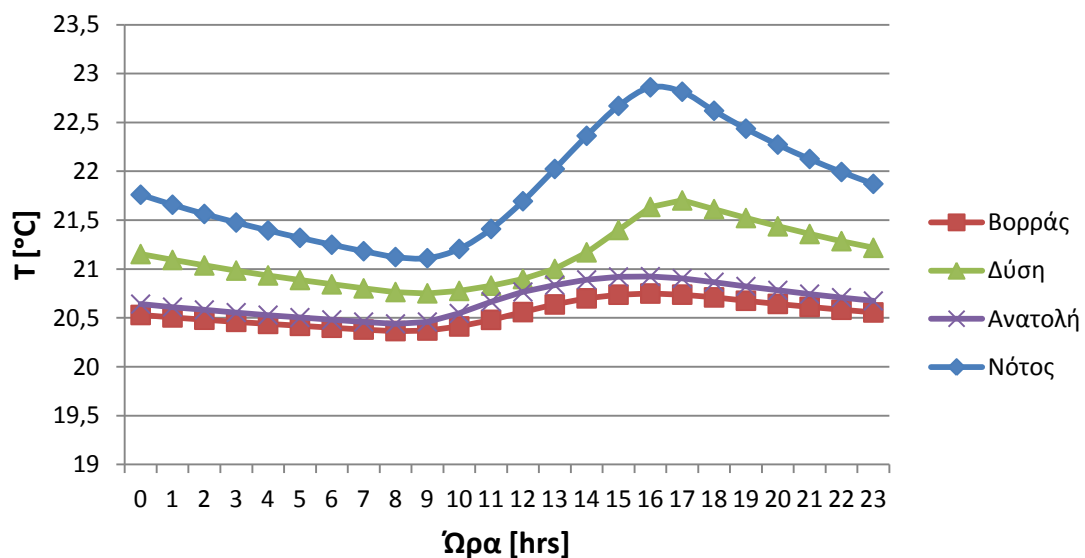


Διάγραμμα 5.2.3.1: Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου

Πίνακας 5.2.3.2: Θερμοκρασία $T_{τελ}$ του RT20 για κάθε ώρα της 21^{ης} Δεκεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό ναλοπίνακα

Ώρα[hrs]	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Νότος	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Ανατολή	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Δύση	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Βορράς
7:00	21,15	20,45	20,78	20,37
8:00	21,09	20,43	20,75	20,36
9:00	21,13	20,49	20,75	20,38
10:00	21,28	20,61	20,8	20,44
11:00	21,53	20,73	20,86	20,52
12:00	21,85	20,8	20,93	20,6
13:00	22,19	20,87	21,07	20,67
14:00	22,53	20,91	21,27	20,73
15:00	22,81	20,93	21,53	20,75
16:00	22,91	20,92	21,74	20,75
17:00	22,72	20,89	21,66	20,73
18:00	22,52	20,84	21,57	20,69
19:00	22,35	20,8	21,48	20,66
20:00	22,2	20,76	21,4	20,63
21:00	22,06	20,73	21,32	20,6
22:00	21,93	20,69	21,25	20,57
23:00	21,81	20,66	21,18	20,54
24:00	21,71	20,63	21,12	20,52
1:00	21,61	20,6	21,06	20,49
2:00	21,52	20,57	21,01	20,47
3:00	21,43	20,54	20,96	20,45
4:00	21,36	20,52	20,91	20,43
5:00	21,28	20,49	20,87	20,41
6:00	21,21	20,47	20,82	20,39

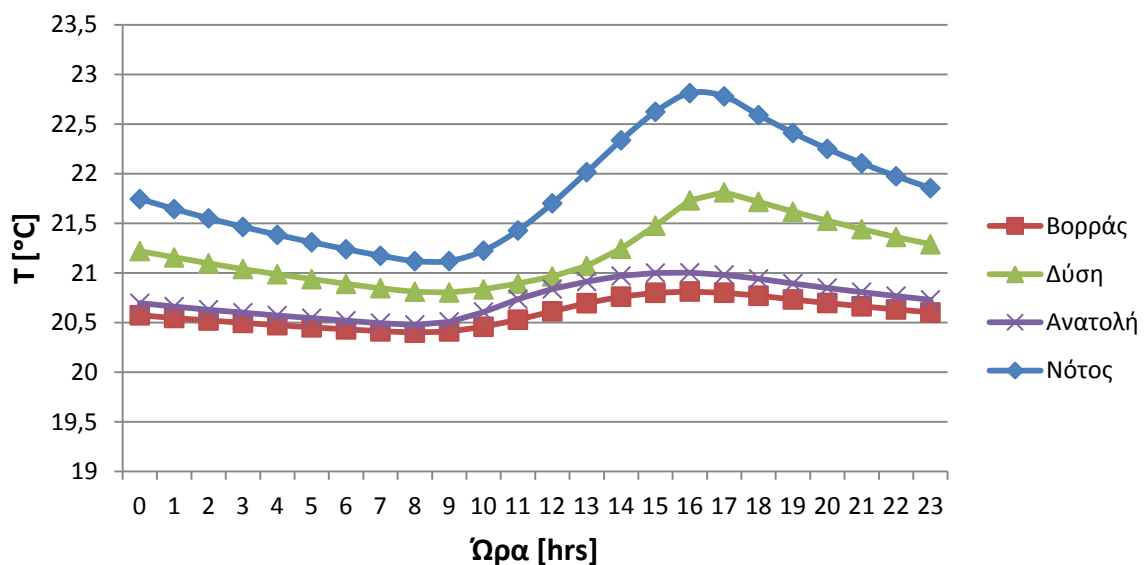


Διάγραμμα 5.2.3.2: Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου για κάθε προσανατολισμό του ναλοπίνακα

➤ Για 21^η Ιανουαρίου

Πίνακας 5.2.3.3: Θερμοκρασία του RT20 $T_{τελ}$ για κάθε ώρα της 21^{ης} Ιανουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα[hrs]	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Νότος	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Ανατολή	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Δύση	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Βορράς
7:00	21,14	20,48	20,82	20,4
8:00	21,09	20,47	20,8	20,39
9:00	21,14	20,54	20,81	20,43
10:00	21,3	20,67	20,86	20,49
11:00	21,55	20,8	20,93	20,57
12:00	21,85	20,88	21	20,66
13:00	22,18	20,95	21,14	20,73
14:00	22,5	20,99	21,35	20,79
15:00	22,75	21,01	21,6	20,81
16:00	22,87	21	21,86	20,81
17:00	22,68	20,96	21,77	20,79
18:00	22,49	20,92	21,66	20,75
19:00	22,32	20,87	21,57	20,71
20:00	22,17	20,83	21,48	20,68
21:00	22,04	20,79	21,4	20,65
22:00	21,91	20,75	21,32	20,62
23:00	21,8	20,71	21,25	20,59
24:00	21,69	20,68	21,19	20,56
1:00	21,59	20,64	21,12	20,53
2:00	21,5	20,61	21,07	20,51
3:00	21,42	20,58	21,01	20,48
4:00	21,34	20,56	20,96	20,46
5:00	21,27	20,53	20,91	20,44
6:00	21,2	20,51	20,87	20,42

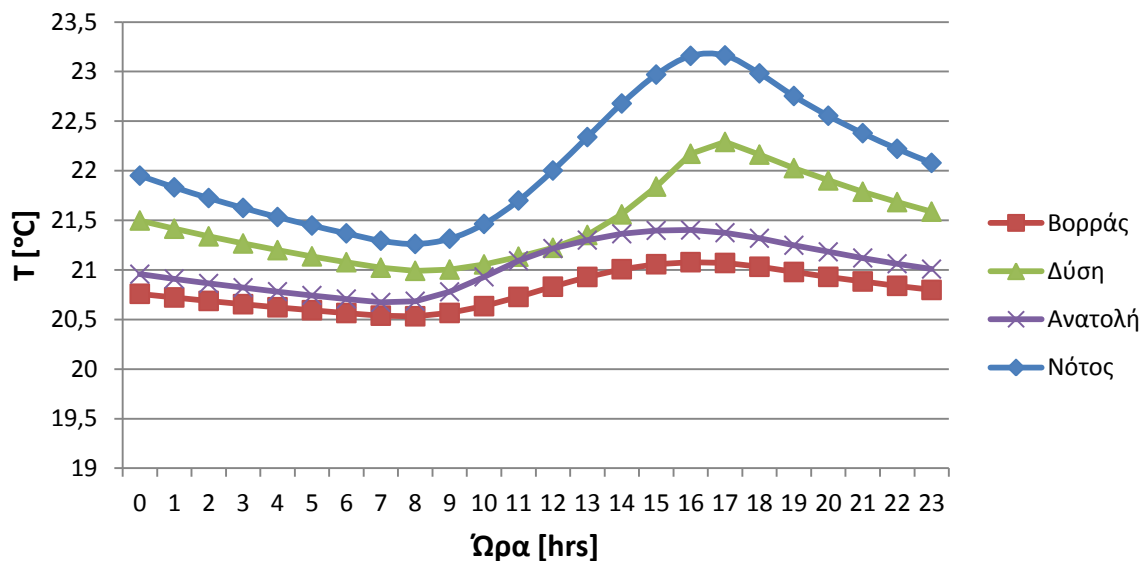


Διάγραμμα 5.2.3.3: Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου

Πίνακας 5.2.3.4: Θερμοκρασία του RT20 $T_{τελ}$ για κάθε ώρα της 21^{ης} Φεβρουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα[hrs]	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Νότος	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Ανατολή	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Δύση	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Βορράς
7:00	21,26	20,66	21	20,53
8:00	21,26	20,71	20,99	20,54
9:00	21,36	20,84	21,02	20,59
10:00	21,56	21,02	21,09	20,68
11:00	21,84	21,17	21,18	20,78
12:00	22,17	21,26	21,27	20,88
13:00	22,51	21,34	21,44	20,97
14:00	22,84	21,39	21,68	21,04
15:00	23,1	21,41	22	21,08
16:00	23,22	21,4	22,35	21,08
17:00	23,1	21,36	22,23	21,06
18:00	22,86	21,28	22,09	21
19:00	22,65	21,21	21,96	20,95
20:00	22,46	21,15	21,84	20,91
21:00	22,3	21,09	21,73	20,86
22:00	22,15	21,03	21,63	20,82
23:00	22,01	20,98	21,54	20,78
24:00	21,89	20,93	21,46	20,74
1:00	21,78	20,89	21,38	20,7
2:00	21,67	20,84	21,3	20,67
3:00	21,58	20,8	21,23	20,64
4:00	21,49	20,76	21,17	20,61
5:00	21,41	20,72	21,11	20,58
6:00	21,33	20,69	21,05	20,55

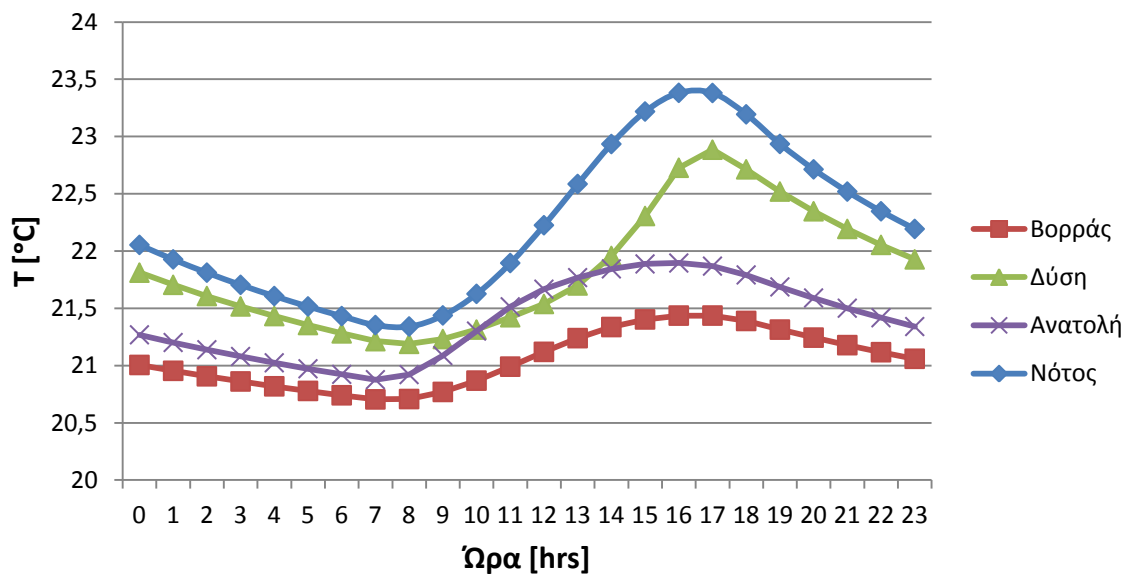


Διάγραμμα 5.2.3.4: Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα

➤ **Για 21^η Μαρτίου**

Πίνακας 5.2.3.5: Θερμοκρασία του RT20 $T_{τελ}$ για κάθε ώρα της 21^{ης} Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ώρα[hrs]	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Νότος	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Ανατολή	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Δύση	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Βορράς
7:00	21,32	20,85	21,18	20,69
8:00	21,37	20,99	21,2	20,73
9:00	21,51	21,19	21,26	20,81
10:00	21,74	21,41	21,36	20,93
11:00	22,05	21,61	21,48	21,06
12:00	22,4	21,72	21,6	21,18
13:00	22,77	21,81	21,8	21,29
14:00	23,1	21,87	22,11	21,38
15:00	23,34	21,9	22,5	21,43
16:00	23,43	21,89	22,95	21,44
17:00	23,33	21,85	22,82	21,43
18:00	23,05	21,74	22,61	21,35
19:00	22,82	21,64	22,43	21,28
20:00	22,61	21,54	22,27	21,21
21:00	22,43	21,46	22,12	21,15
22:00	22,27	21,38	21,99	21,09
23:00	22,12	21,3	21,87	21,03
24:00	21,99	21,23	21,76	20,98
1:00	21,87	21,17	21,65	20,93
2:00	21,76	21,11	21,56	20,88
3:00	21,65	21,05	21,47	20,84
4:00	21,56	21	21,39	20,8
5:00	21,47	20,95	21,32	20,76
6:00	21,39	20,9	21,25	20,72



Διάγραμμα 5.2.3.5: Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Για κάθε μία από τις τέσσερις καμπύλες (μία για κάθε προσανατολισμό) όλων των παραπάνω διαγραμμάτων παρατηρούμε ότι η πρώτη τιμή της θερμοκρασίας και η τελευταία τιμή της θερμοκρασίας είναι σχεδόν ίδιες, γεγονός που αποδεικνύει και την ορθότητα των διαγραμμάτων. Επιπλέον, βλέπουμε ότι όλες οι καμπύλες όλων των διαγραμμάτων ξεκινούν από θερμοκρασία του RT20 μεγαλύτερη από αυτήν που επικρατεί στο χώρο ($T_{\Delta\Omega M}=20^{\circ}\text{C}$). Επομένως, όπως είναι λογικό το υλικό αλλαγής φάσης προσφέρει θερμότητα στην αίθουσα και για το λόγο αυτό η θερμοκρασία του φθίνει από τις 12 το βράδυ, που εκκινεί κάθε διάγραμμα, έως τις 8 περίπου το πρωί. Από τις 8 το πρωί και έπειτα, όπου πλέον έχει βγει ο ήλιος και υφίσταται ολική ακτινοβολία, το υλικό αλλαγής φάσης εξακολουθεί να δίνει θερμότητα, αφού η θερμοκρασία του είναι και πάλι μεγαλύτερη από αυτήν της αίθουσας. Ωστόσο, παρά την πρόσδοση θερμότητας από το PCM στην αίθουσα, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του PCM από τις 8 το πρωί έως τις 16:00-17:00 περίπου το απόγευμα. Αυτό οφείλεται στο ότι σε αυτό το χρονικό διάστημα, λόγω ύπαρξης ολικής ακτινοβολίας G_T , το υλικό αλλαγής φάσης λαμβάνει πολύ μεγαλύτερα ποσά θερμότητας από αυτά που χάνει. Από τις 16:00-17:00 το απόγευμα και μέχρι την ολοκλήρωση του 24ώρου, παύει πλέον να υφίσταται ολική ακτινοβολία G_T και η θερμοκρασία του PCM αρχίζει να φθίνει, διότι συνεχίζει να προσδίδει θερμότητα στο χώρο.

Επίσης, από τα διαγράμματα για τη θερμοκρασία του PCM, εξάγουμε τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα που ισχύουν και για τους πέντε εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες. Έτσι, για κάθε μήνα παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που ο τοίχος που φέρει υαλοπίνακα είναι νότιου προσανατολισμού (δηλαδή, ο τοίχος με το ενσωματωμένο PCM βλέπει στο Βορρά, αφού βρίσκεται απέναντι) αναπτύσσονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας στο στρώμα του RT20. Αντίθετα, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι βόρειος. Αυτό οφείλεται προφανώς στην ολική στιγμιαία ακτινοβολία και σχετίζεται άμεσα με τα σχόλια που έγιναν σε προηγούμενη ενότητα για τα διαγράμματα G_T . Επίσης, τόσο για νότιο όσο και για βόρειο προσανατολισμό, η θερμοκρασία του PCM μεγιστοποιείται γύρω στις 16:00-17:00 και ελαχιστοποιείται κατά το χρονικό διάστημα 8:00-10:00. Στην περίπτωση δυτικού τοίχου με υαλοπίνακα, οι θερμοκρασίες του RT20 είναι υψηλότερες από αυτές που αναπτύσσονται για ανατολικό τοίχο με υαλοπίνακα, για κάθε μήνα. Επιπλέον, για δυτικό τοίχο η θερμοκρασία γίνεται μέγιστη μετά το μεσημέρι (λογικό αφού τότε υπάρχει περισσότερη ολική ακτινοβολία), ενώ για ανατολικό τοίχο το μέγιστο της θερμοκρασίας παρατηρείται πριν το μεσημέρι (επίσης λογικό αφού στο διάστημα αυτό προσπίπτει περισσότερη ολική ακτινοβολία).

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα ανά τους πέντε χειμερινούς μήνες για το νότιο προσανατολισμό, παρατηρούμε πως η καμπύλη του T πέφτει κατακόρυφα, δηλαδή αποκτά μικρότερη μέγιστη αλλά και μικρότερη ελάχιστη τιμή, καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται ξανά οι τιμές της T και κατ' επέκταση η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της. Αυτό είναι λογικό δεδομένου ότι όσο οδεύουμε χρονικά προς το κέντρο του χειμώνα, η διέγερση (G_T) μειώνεται και αρχίζει πάλι να αυξάνει όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν. Αντίστοιχα, κατά τον ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό του τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, παρατηρούμε ότι η καμπύλη του T πέφτει κατακόρυφα καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Δεκέμβριο και αρχίζει να ανεβαίνει σταδιακά οδεύοντας από τον Ιανουάριο μέχρι και το Μάρτιο.

➤ **Για το RT27:**

Ομοίως, υπενθυμίζουμε τις τιμές των μεγεθών που εμπεριέχονται στη σχέση υπολογισμού του $T_{\tau\epsilon\lambda}$ για το RT27:

$$A_f = 4,5m^2$$

$$U = 7,06 \cdot 10^{-3}kW/(m^2\text{ }^\circ C)$$

$$A_w = 30m^2$$

$$T_{\Delta\Omega M} = 20^\circ C$$

$$m_{PCM} = 738kg$$

Με βάση τη σχέση (5.2.3.1) και τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει η σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας του RT27 στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου:

$$T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{14580G_T - 381,24T_{\alpha\rho\chi} + 738C_{peff}T_{\alpha\rho\chi} + 15249,6}{738C_{peff} + 381,24} \quad (5.2.3.3)$$

και υπενθυμίζουμε ότι για το C_{peff} του RT27 ισχύει:

Για $T \leq 22^\circ C$:

$$C_{peff} = C_{ps} = 2 \text{ kJ}/(kg \text{ }^\circ C)$$

Για $22^\circ C < T \leq 26,5^\circ C$:

$$C_{peff} = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = 7,378 \cdot T - 160,316 \text{ [kJ}/(kg \text{ }^\circ C)]$$

Για $26,5^\circ C < T \leq 31^\circ C$:

$$C_{peff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = -7,244 \cdot T + 226,87 \text{ [kJ}/(kg \text{ }^\circ C)]$$

Για $T > 31^\circ C$:

$$C_{peff} = C_{pl} = 2,3 \text{ kJ}/(kg \text{ }^\circ C)$$

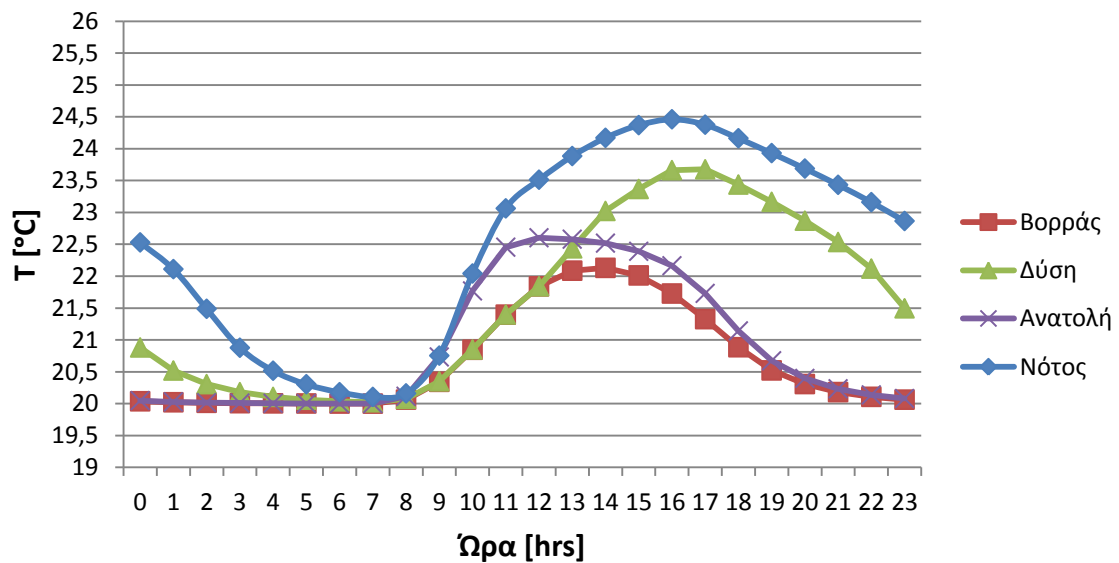
όπου T στις εξισώσεις του C_{peff} θεωρήσαμε τη θερμοκρασία του PCM, $T_{\alpha\rho\chi}$, στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου.

Η σύγκλιση των τιμών για το RT27 επετεύχθη μετά από 3-4 δοκιμές. Οι θερμοκρασίες που επικρατούν στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης συναρτήσκει των ωρών της εκάστοτε ημέρας παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα (τα οποία έχουν οργανωθεί με βάση το μήνα) και έχουν προκύψει για κάθε ώρα από τη σχέση $T_{PCM} = \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2}$. Οι πίνακες παρουσιάζουν τις τιμές του $T_{\tau\epsilon\lambda}$ για κάθε ώρα, όπως προέκυψαν από τη σχέση (5.2.3.3).

➤ Για 21^η Νοεμβρίου

Πίνακας 5.2.3.6: Θερμοκρασία του RT27 $T_{τελ}$ για κάθε ώρα της 21^{ης} Νοεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ώρα[hrs]	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Νότος	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Ανατολή	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Δύση	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Βορράς
7:00	20,08	20	20,02	20
8:00	20,24	20,23	20,13	20,13
9:00	21,26	21,24	20,56	20,56
10:00	22,82	22,3	21,13	21,13
11:00	23,31	22,61	21,66	21,66
12:00	23,72	22,6	22,02	22,02
13:00	24,05	22,56	22,85	22,15
14:00	24,29	22,47	23,19	22,11
15:00	24,45	22,31	23,54	21,92
16:00	24,48	22,02	23,78	21,54
17:00	24,28	21,44	23,57	21,11
18:00	24,05	20,85	23,31	20,66
19:00	23,81	20,5	23,03	20,39
20:00	23,56	20,29	22,72	20,23
21:00	23,3	20,17	22,36	20,13
22:00	23,02	20,1	21,88	20,08
23:00	22,71	20,06	21,11	20,05
24:00	22,35	20,04	20,65	20,03
1:00	21,87	20,02	20,39	20,02
2:00	21,1	20,01	20,23	20,01
3:00	20,65	20,01	20,13	20,01
4:00	20,38	20	20,08	20
5:00	20,23	20	20,05	20
6:00	20,13	20	20,03	20

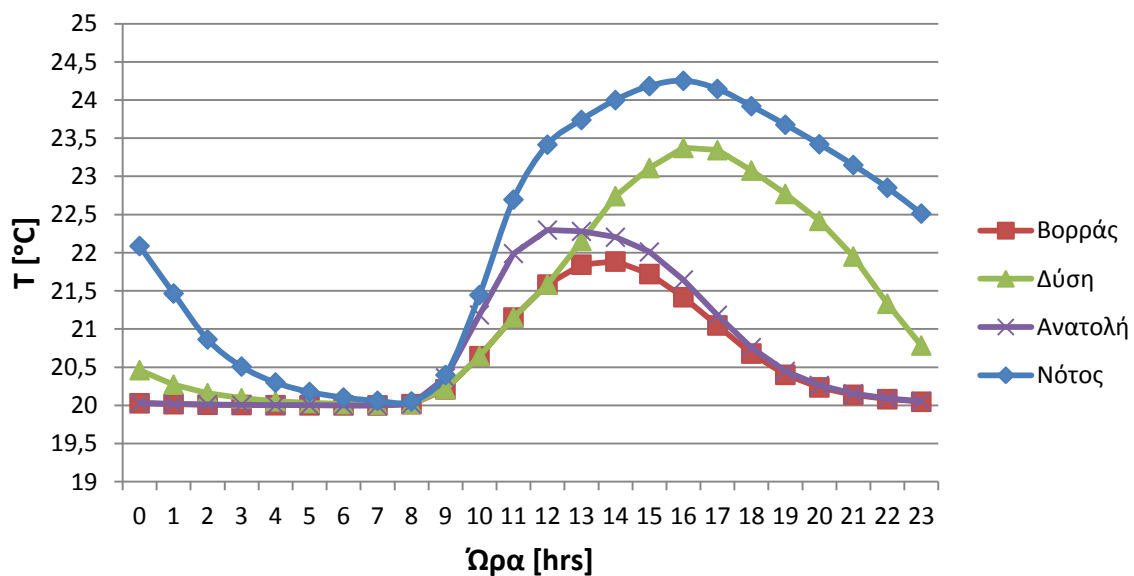


Διάγραμμα 5.2.3.6: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου

Πίνακας 5.2.3.7: Θερμοκρασία του RT27 $T_{τελ}$ για κάθε ώρα της 21^{ης} Δεκεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα[hrs]	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Νότος	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Ανατολή	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Δύση	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Βορράς
7:00	20,05	20	20,01	20
8:00	20,06	20,03	20,04	20,03
9:00	20,74	20,69	20,39	20,39
10:00	22,15	21,68	20,9	20,9
11:00	23,24	22,3	21,4	21,4
12:00	23,59	22,3	21,77	21,77
13:00	23,89	22,26	22,55	21,92
14:00	24,11	22,14	22,94	21,85
15:00	24,25	21,88	23,28	21,6
16:00	24,25	21,41	23,47	21,24
17:00	24,04	20,95	23,22	20,86
18:00	23,8	20,56	22,93	20,5
19:00	23,55	20,33	22,61	20,3
20:00	23,29	20,2	22,23	20,18
21:00	23,01	20,12	21,68	20,1
22:00	22,7	20,07	20,99	20,06
23:00	22,33	20,04	20,58	20,04
24:00	21,85	20,02	20,34	20,02
1:00	21,09	20,01	20,2	20,01
2:00	20,64	20,01	20,12	20,01
3:00	20,38	20	20,07	20
4:00	20,22	20	20,04	20
5:00	20,13	20	20,02	20
6:00	20,08	20	20,01	20

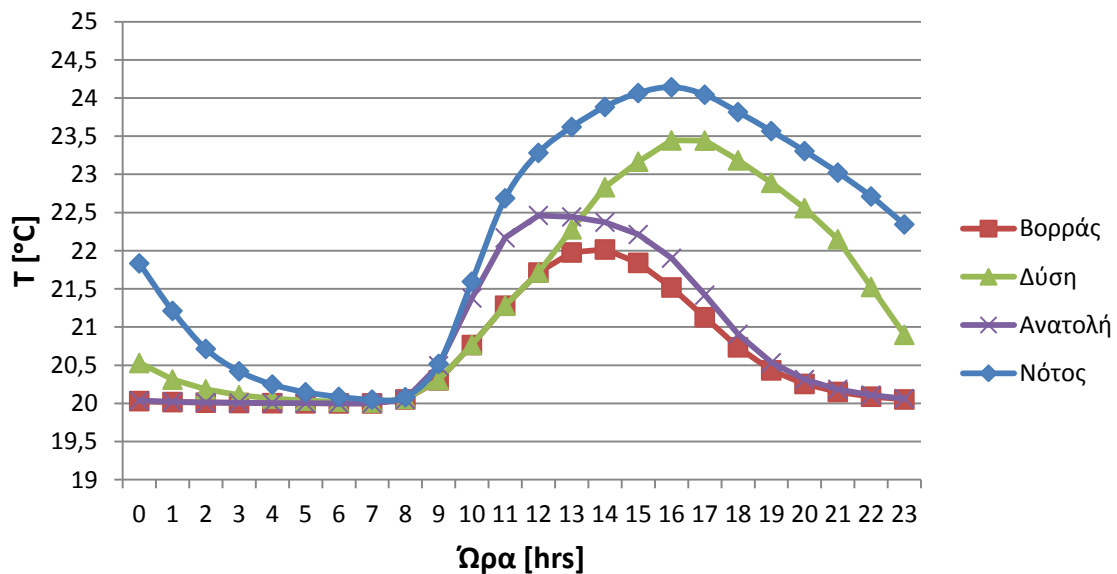


Διάγραμμα 5.2.3.7: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα

➤ Για 21^η Ιανουαρίου

Πίνακας 5.2.3.8: Θερμοκρασία του RT27 $T_{τελ}$ για κάθε ώρα της 21^{ης} Ιανουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ώρα[hrs]	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Νότος	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Ανατολή	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Δύση	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Βορράς
7:00	20,04	20	20,01	20
8:00	20,13	20,1	20,11	20,1
9:00	20,91	20,89	20,5	20,5
10:00	22,28	21,87	21,03	21,03
11:00	23,09	22,47	21,53	21,53
12:00	23,47	22,46	21,9	21,9
13:00	23,77	22,43	22,66	22,06
14:00	24	22,32	23,01	21,98
15:00	24,13	22,11	23,33	21,71
16:00	24,15	21,7	23,56	21,33
17:00	23,94	21,14	23,32	20,93
18:00	23,7	20,67	23,04	20,55
19:00	23,44	20,4	22,74	20,32
20:00	23,17	20,23	22,38	20,19
21:00	22,88	20,14	21,92	20,11
22:00	22,55	20,08	21,13	20,07
23:00	22,14	20,05	20,67	20,04
24:00	21,53	20,03	20,39	20,02
1:00	20,9	20,02	20,23	20,01
2:00	20,53	20,01	20,14	20,01
3:00	20,31	20,01	20,08	20
4:00	20,18	20	20,05	20
5:00	20,11	20	20,03	20
6:00	20,06	20	20,02	20

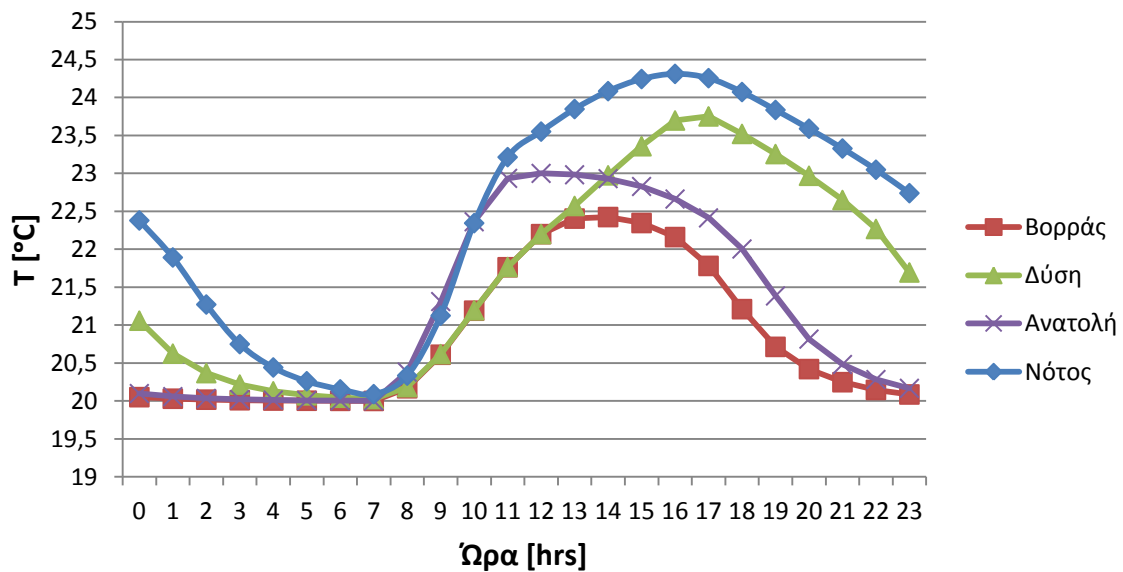


Διάγραμμα 5.2.3.8: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου

Πίνακας 5.2.3.9: Θερμοκρασία του RT27 $T_{τελ}$ για κάθε ώρα της 21^{ης} Φεβρουαρίου και για κάθε προσανατολισμό ναλοπίνακα

Ωρα[hrs]	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Νότος	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Ανατολή	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Δύση	$T_{τελ}[^{\circ}C]$ Βορράς
7:00	20,07	20	20,02	20
8:00	20,6	20,76	20,35	20,34
9:00	21,65	21,86	20,89	20,88
10:00	23,04	22,87	21,5	21,5
11:00	23,39	23	22,03	22,03
12:00	23,72	23	22,37	22,37
13:00	23,98	22,97	22,77	22,44
14:00	24,19	22,89	23,18	22,41
15:00	24,3	22,76	23,54	22,28
16:00	24,32	22,56	23,85	22,04
17:00	24,19	22,27	23,65	21,52
18:00	23,96	21,74	23,39	20,9
19:00	23,72	21,03	23,12	20,53
20:00	23,46	20,61	22,82	20,31
21:00	23,19	20,36	22,48	20,18
22:00	22,9	20,21	22,06	20,11
23:00	22,58	20,12	21,33	20,06
24:00	22,18	20,07	20,79	20,04
1:00	21,6	20,04	20,46	20,02
2:00	20,94	20,03	20,27	20,01
3:00	20,56	20,01	20,16	20,01
4:00	20,33	20,01	20,09	20
5:00	20,19	20,01	20,06	20
6:00	20,11	20	20,03	20

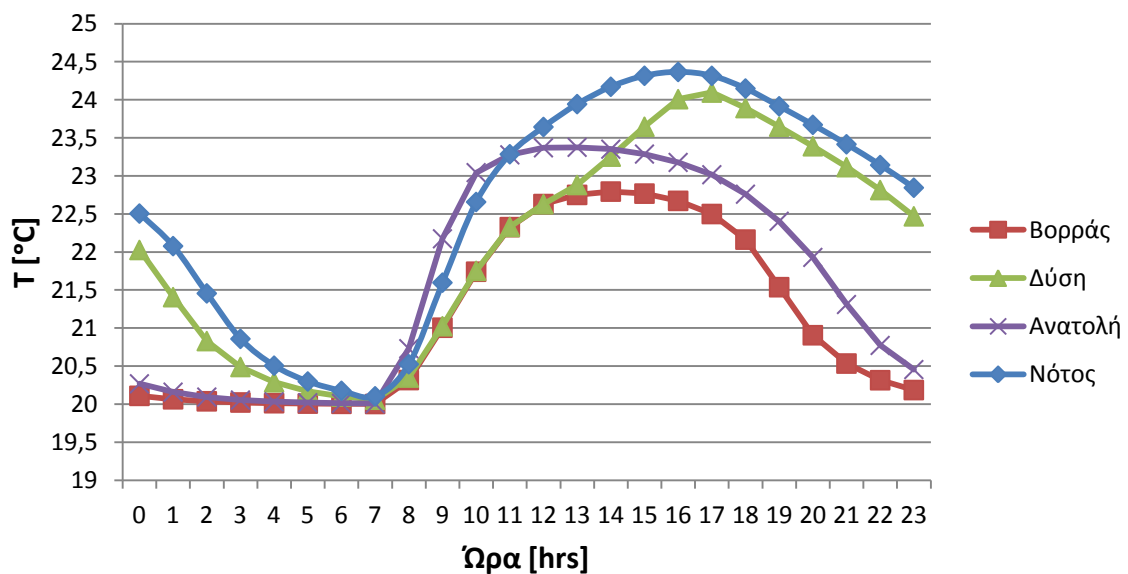


Διάγραμμα 5.2.3.9: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου για κάθε προσανατολισμό του ναλοπίνακα

➤ Για 21^η Μαρτίου

Πίνακας 5.2.3.10: Θερμοκρασία του RT27 $T_{\text{τελ}}$ για κάθε ώρα της 21^{ης} Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ώρα[hrs]	$T_{\text{τελ}}[^{\circ}\text{C}]$ Νότος	$T_{\text{τελ}}[^{\circ}\text{C}]$ Ανατολή	$T_{\text{τελ}}[^{\circ}\text{C}]$ Δύση	$T_{\text{τελ}}[^{\circ}\text{C}]$ Βορράς
7:00	20,08	20	20,04	20
8:00	20,97	21,45	20,66	20,63
9:00	22,22	22,89	21,39	21,38
10:00	23,09	23,19	22,11	22,1
11:00	23,48	23,36	22,55	22,55
12:00	23,81	23,38	22,71	22,71
13:00	24,08	23,37	23,05	22,79
14:00	24,27	23,33	23,45	22,8
15:00	24,36	23,24	23,84	22,74
16:00	24,37	23,11	24,18	22,61
17:00	24,26	22,92	24,01	22,39
18:00	24,03	22,6	23,77	21,93
19:00	23,8	22,21	23,52	21,14
20:00	23,55	21,65	23,26	20,67
21:00	23,28	20,97	22,97	20,4
22:00	23	20,57	22,66	20,23
23:00	22,69	20,34	22,28	20,14
24:00	22,32	20,2	21,77	20,08
1:00	21,83	20,12	21,04	20,05
2:00	21,08	20,07	20,62	20,03
3:00	20,64	20,04	20,36	20,02
4:00	20,38	20,02	20,21	20,01
5:00	20,22	20,01	20,13	20,01
6:00	20,13	20,01	20,07	20



Διάγραμμα 5.2.3.10: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Όπως επισημάνθηκε και στις παρατηρήσεις των διαγραμμάτων θερμοκρασίας του RT20, έτσι και στα διαγράμματα θερμοκρασίας του RT27 παρατηρούμε ότι η πρώτη τιμή της θερμοκρασίας και η τελευταία τιμή της θερμοκρασίας είναι σχεδόν ίδιες, γεγονός που αποδεικνύει και την ορθότητα των διαγραμμάτων. Επιπλέον, βλέπουμε ότι οι καμπύλες για κάθε μήνα και για κάθε προσανατολισμό ξεκινούν με θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτήν που επικρατεί στο χώρο ($T_{\Delta\Omega M}=20^{\circ}\text{C}$), και πιο συγκεκριμένα η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ PCM και δωματίου είναι εμφανής στις καμπύλες νοτίου και δυτικού προσανατολισμού και ελάχιστη στις καμπύλες ανατολικού και κυρίως βόρειου προσανατολισμού (όπως μπορεί να διαπιστωθεί πιο ξεκάθαρα από τους πίνακες). Συνεπώς, αντιλαμβανόμαστε ότι το RT27 δίνει θερμότητα στο δωμάτιο και κατ' επέκταση η θερμοκρασία του θα πρέπει να παρουσιάζει πτώση. Πράγματι, η φθίνουσα αυτή πορεία της θερμοκρασίας του PCM αποτυπώνεται σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα και πίνακες από τις 12 το βράδυ μέχρι τις 8:00 περίπου το πρωί. Από τις 8:00 το πρωί και έπειτα, το υλικό αλλαγής φάσης συνεχίζει να προσδίδει θερμότητα στο χώρο. Ωστόσο, παρά την πρόσδοση θερμότητας στο χώρο, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του από τις 8 το πρωί μέχρι και τις ώρες γύρω από το μεσημέρι, γεγονός που οφείλεται στην εμφάνιση του ήλιου. Πιο συγκεκριμένα, χάρη στην ολική ηλιακή ακτινοβολία, που υφίσταται από τις 8:00 περίπου το πρωί και έπειτα, το PCM λαμβάνει πολύ μεγαλύτερα ποσά θερμότητας από αυτά που προσφέρει στο χώρο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία του. Από τις μεσημεριανές ώρες (ανάλογα με τον προσανατολισμό διαφέρει η ακριβής ώρα) και μέχρι την ολοκλήρωση του 24ώρου, η ολική ακτινοβολία G_T εξασθενεί αρκετά και παύει πλέον να υφίσταται. Έτσι, η θερμοκρασία του PCM αρχίζει να φθίνει, διότι συνεχίζει να προσδίδει θερμότητα στο χώρο.

Επίσης, από τα διαγράμματα για τη θερμοκρασία του RT27, εξάγουμε τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα που ισχύουν και για τους πέντε εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες. Έτσι, για κάθε μήνα παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές οι υψηλότερες θερμοκρασίες καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας αναπτύσσονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι νότιου προσανατολισμού (δηλαδή, ο τοίχος με το ενσωματωμένο PCM βλέπει στο Βορρά, αφού βρίσκεται απέναντι). Αντιθέτως, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι βόρειος. Αυτό οφείλεται προφανώς στην ολική στιγμιαία ακτινοβολία που για νότιο προσανατολισμό συνυπάρχουν άμεση και διάχυτη ακτινοβολία σε ολόκληρο το 24ωρο, ενώ για βόρειο προσανατολισμό υφίσταται μόνο διάχυτη ακτινοβολία. Επίσης, στην περίπτωση νοτίου προσανατολισμού η θερμοκρασία του PCM μεγιστοποιείται γύρω στις 16:00, ενώ στην περίπτωση βορείου προσανατολισμού γύρω στις 14:00. Στην περίπτωση δυτικού τοίχου με υαλοπίνακα, οι θερμοκρασίες του RT27 είναι υψηλότερες από αυτές που αναπτύσσονται για ανατολικό τοίχο με υαλοπίνακα, για κάθε μήνα. Επιπλέον, για δυτικό τοίχο η θερμοκρασία γίνεται μέγιστη μετά το μεσημέρι, γύρω στις 16:00-17:00 (λογικό αφού τότε υπάρχει περισσότερη ολική ακτινοβολία), ενώ για ανατολικό τοίχο το μέγιστο της θερμοκρασίας παρατηρείται πριν το μεσημέρι (επίσης λογικό αφού στο διάστημα αυτό προσπίπτει περισσότερη ολική ακτινοβολία). Συνεπώς, στην περίπτωση δυτικού προσανατολισμού τα ενεργειακά αποθέματα του PCM δεν προλαβαίνουν να μειωθούν πολύ (λόγω πρόσδοσης θερμότητας) σε σχέση με την περίπτωση ανατολικού τοίχου και για το λόγο αυτό «περισσεύει» θερμότητα στο υλικό αλλαγής φάσης, ώστε τις πρωινές ώρες να έχει υψηλότερη θερμοκρασία απ' ότι στην περίπτωση ανατολικού προσανατολισμού. Έτσι, εξηγείται το γεγονός ότι οι καμπύλες

δυτικού προσανατολισμού ξεκινούν ψηλότερα από τις αντίστοιχες ανατολικού προσανατολισμού. Η ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε μήνα και κάθε προσανατολισμό εμφανίζεται εντός του διαστήματος 7:00-9:00 το πρωί και σε κάθε περίπτωση είναι ελάχιστα μεγαλύτερη ή ίση με τη θερμοκρασία του εξεταζόμενου χώρου ($T_{\Delta\Omega M}=20^{\circ}\text{C}$). Παρατηρώντας τα διαγράμματα, εντοπίζουμε ταύτιση των τιμών της θερμοκρασίας του RT27 για δυτικό και βόρειο προσανατολισμό στο διάστημα 7:00-13:00, λόγω ίδιας διάχυτης ακτινοβολίας στους δύο προσανατολισμούς κατά το διάστημα αυτό.

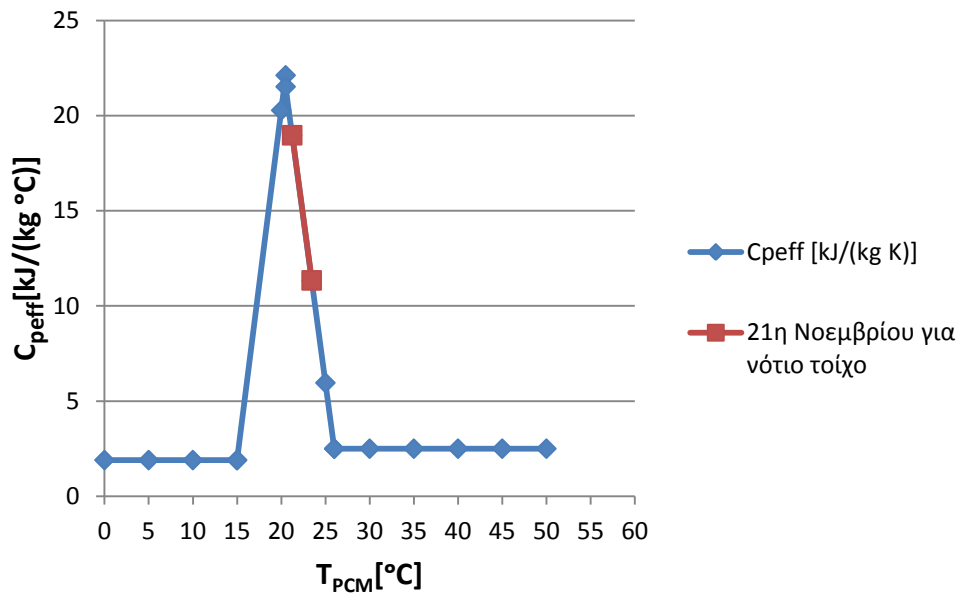
Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα ανά τους πέντε χειμερινούς μήνες για το νότιο προσανατολισμό, παρατηρούμε πως η καμπύλη του T πέφτει κατακόρυφα, δηλαδή αποκτά μικρότερη μέγιστη αλλά και μικρότερη ελάχιστη τιμή, καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται ξανά οι τιμές της T και κατ' επέκταση η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της. Αυτό είναι λογικό δεδομένου ότι όσο οδεύουμε χρονικά προς το κέντρο του χειμώνα, η διέγερση (G_T) μειώνεται και αρχίζει πάλι να αυξάνει όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν. Αντίστοιχα, κατά τον ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό του τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, παρατηρούμε ότι η καμπύλη του T πέφτει κατακόρυφα καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Δεκέμβριο και αρχίζει να ανεβαίνει σταδιακά οδεύοντας από τον Ιανουάριο μέχρι και το Μάρτιο.

5.2.4 Ποσοστό αξιοποίησης του PCM

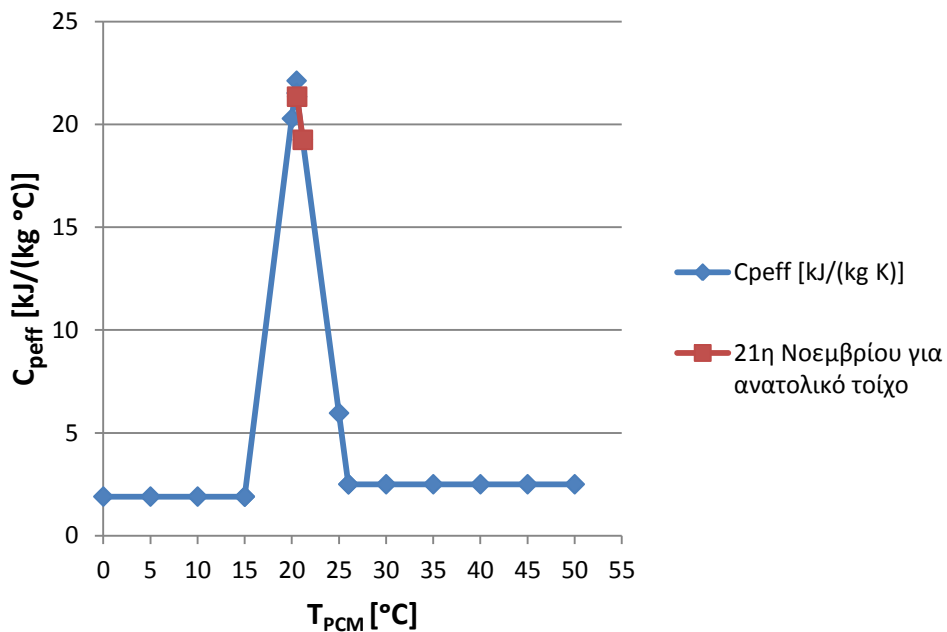
Ενδιαφέρον παρουσιάζει το ποσοστό αξιοποίησης του PCM, το οποίο αποτυπώνεται στα ακόλουθα διαγράμματα για κάθε μήνα και κάθε προσανατολισμό, με τη μορφή περιοχής λειτουργίας του υλικού αλλαγής φάσης, δηλαδή με τη μορφή του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης που καλύπτει το PCM. Ιδανικά, θα επιθυμούσαμε την κάλυψη ολόκληρης της διφασικής περιοχής, προκειμένου το ποσό θερμότητας που θα αποθηκευτεί στο υλικό αλλαγής φάσης (και στη συνέχεια θα προσφερθεί στο χώρο), να είναι το μέγιστο δυνατό. Ωστόσο αυτό είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί. Όπως θα διαπιστώσουμε και στα διαγράμματα που έπονται, το υλικό μας (είτε RT20 είτε RT27) δεν καταφέρνει σε καμία από τις περιπτώσεις να μεταβεί από την πλήρη στερεή κατάσταση στην πλήρη υγρή κατάσταση.

➤ Για το RT20:

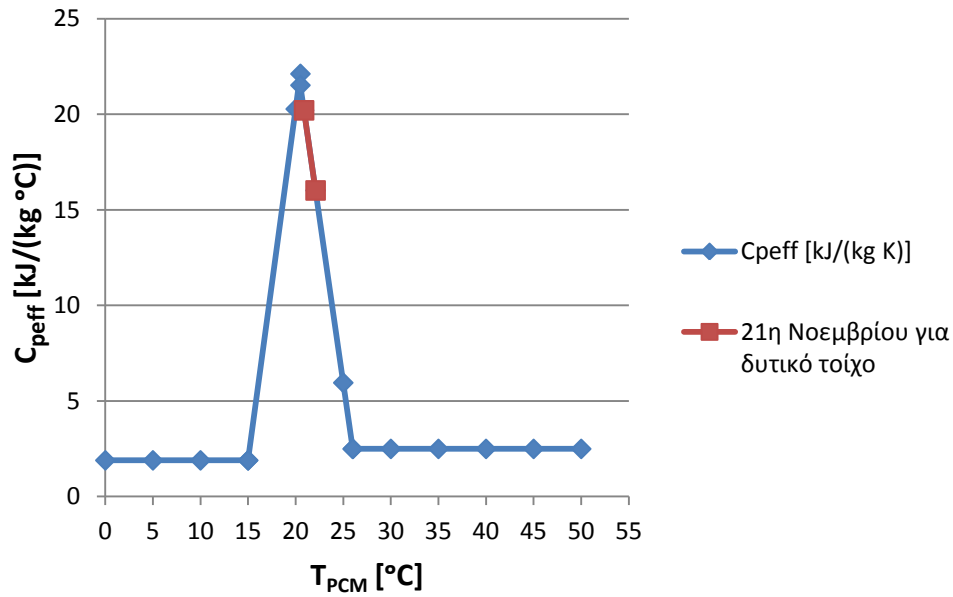
➤ Για 21^η Νοεμβρίου:



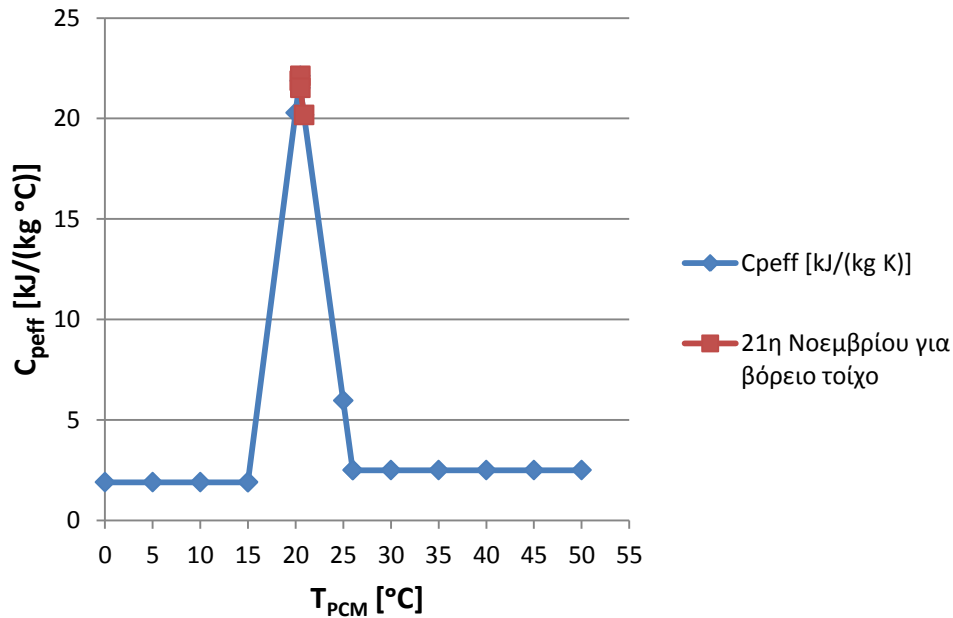
Διάγραμμα 5.2.4.1: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.2: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο

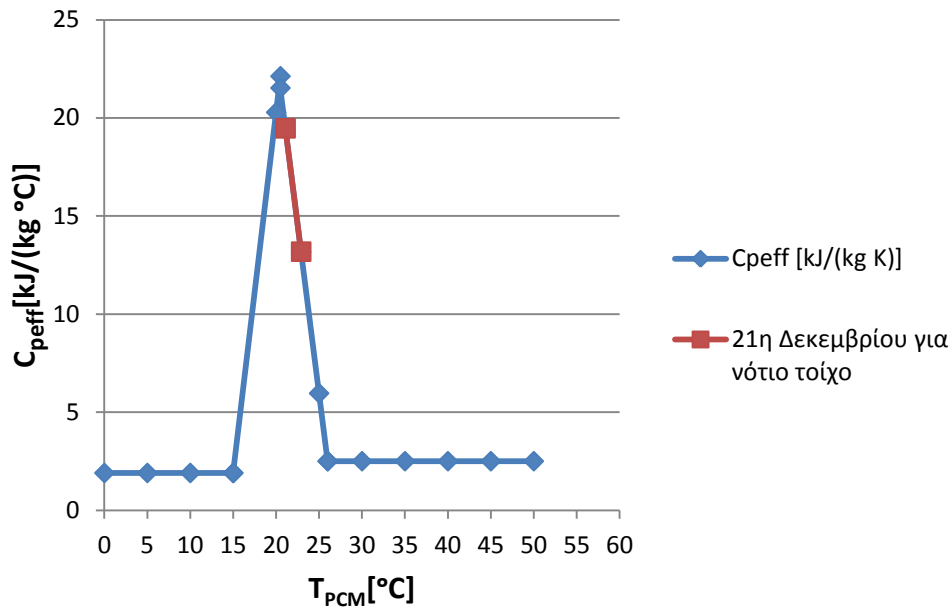


Διάγραμμα 5.2.4.3: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο

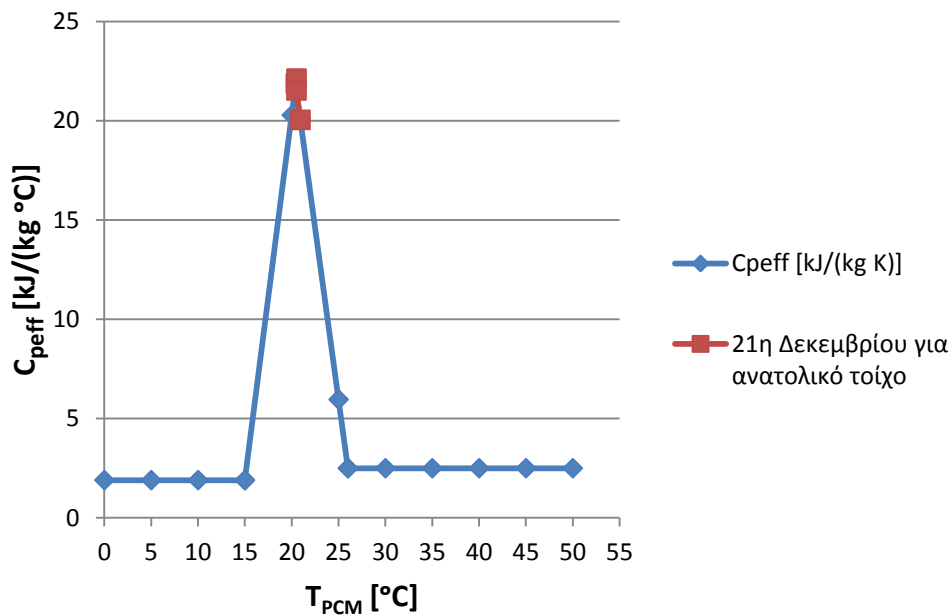


Διάγραμμα 5.2.4.4: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο

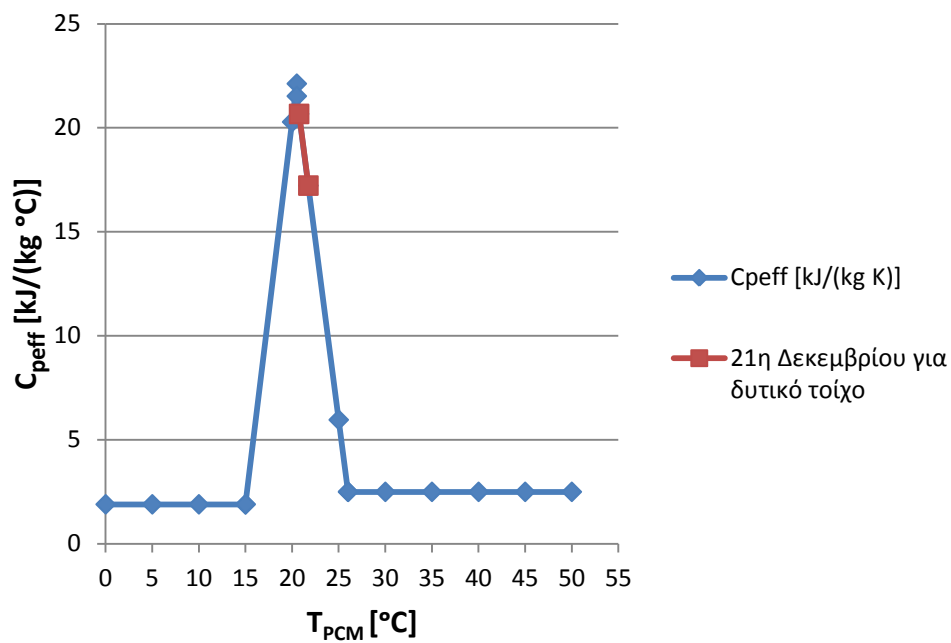
➤ **Για 21^η Δεκεμβρίου:**



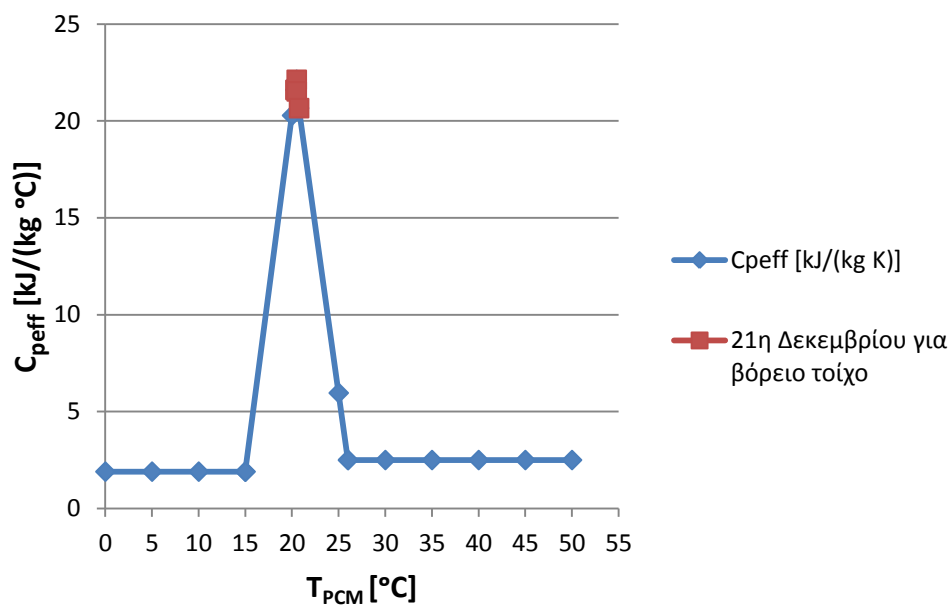
Διάγραμμα 5.2.4.5: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.6: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο

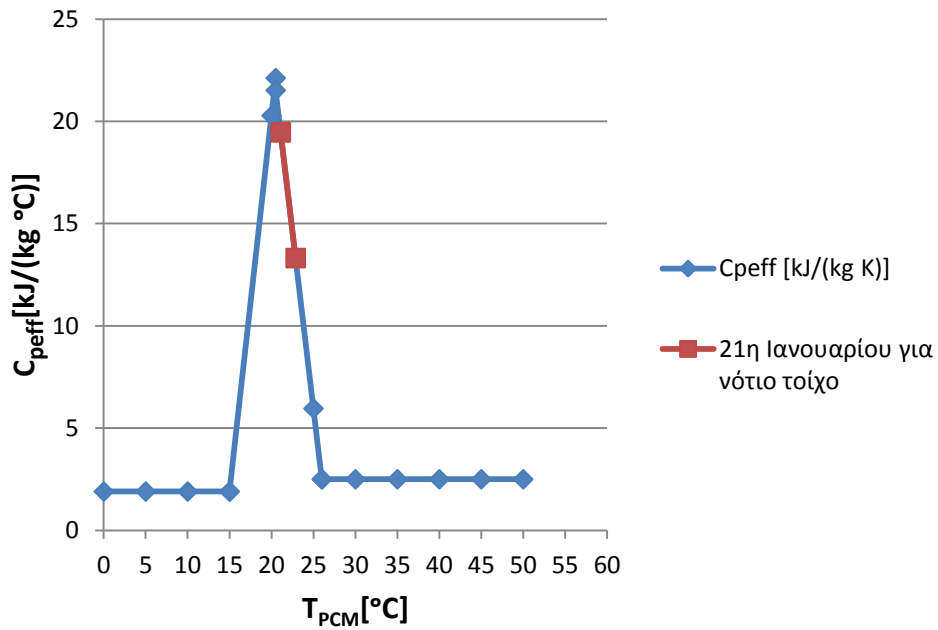


Διάγραμμα 5.2.4.7: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο

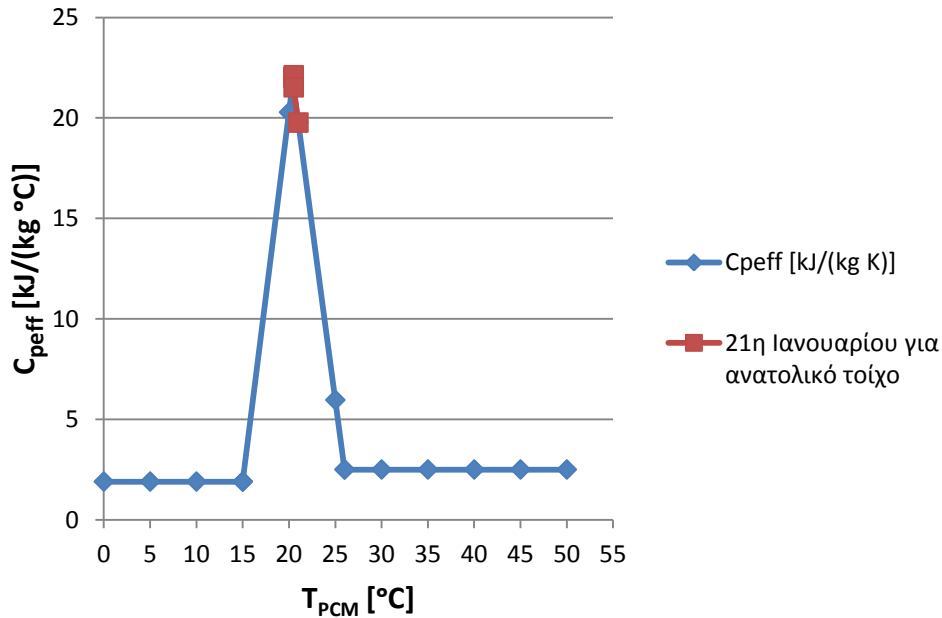


Διάγραμμα 5.2.4.8: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο

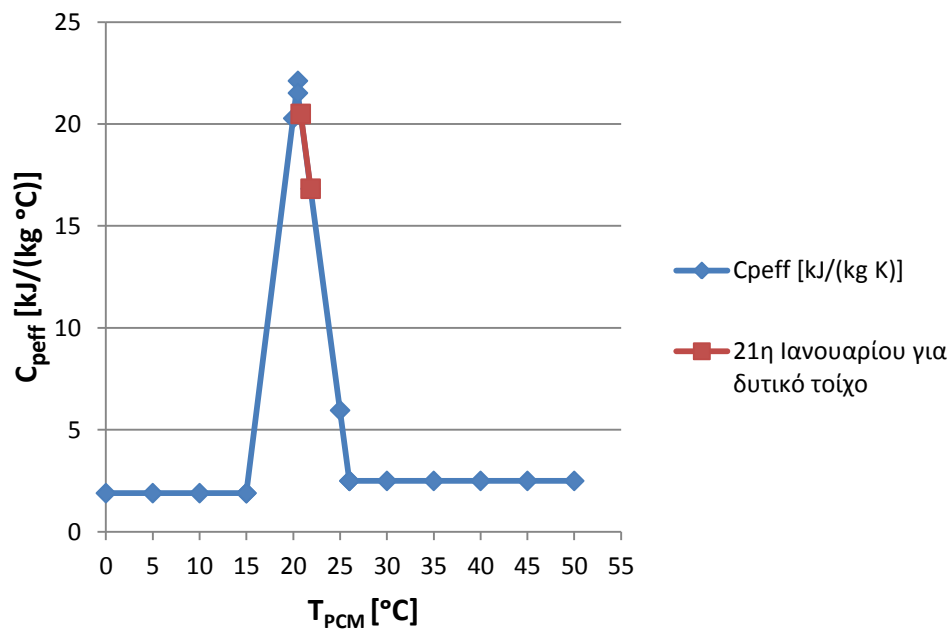
➤ Για 21^η Ιανουαρίου:



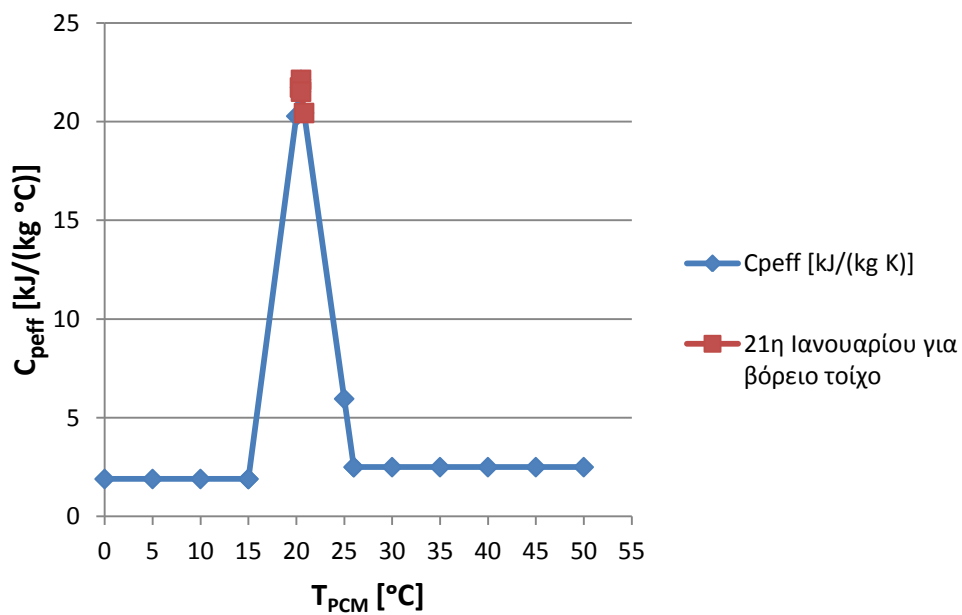
Διάγραμμα 5.2.4.9: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.10: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο

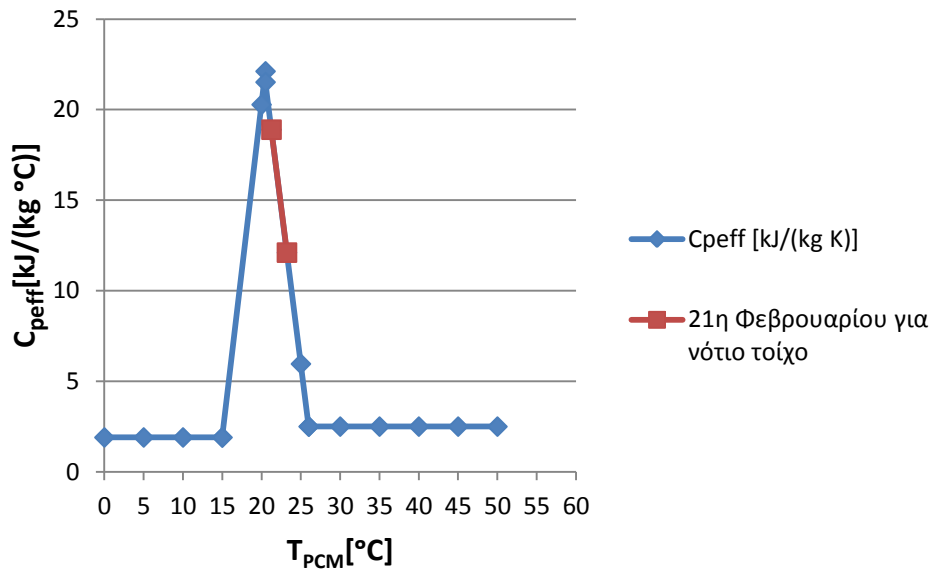


Διάγραμμα 5.2.4.11: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο

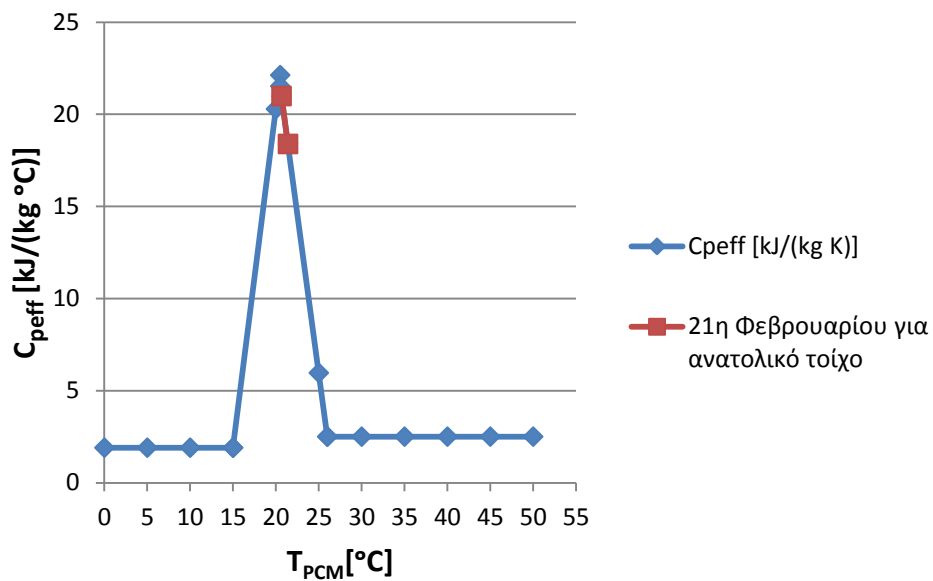


Διάγραμμα 5.2.4.12: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο

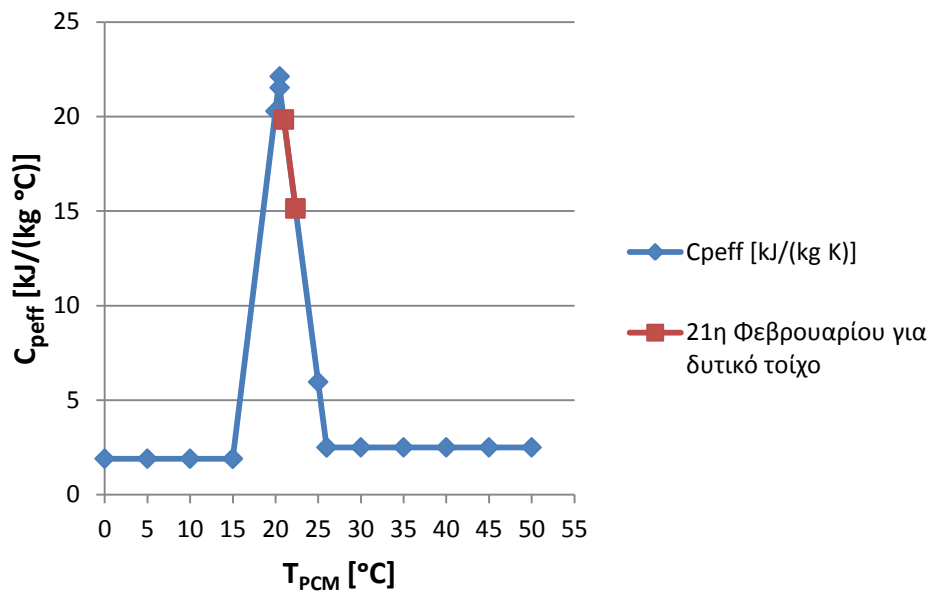
➤ **Για 21^η Φεβρουαρίου:**



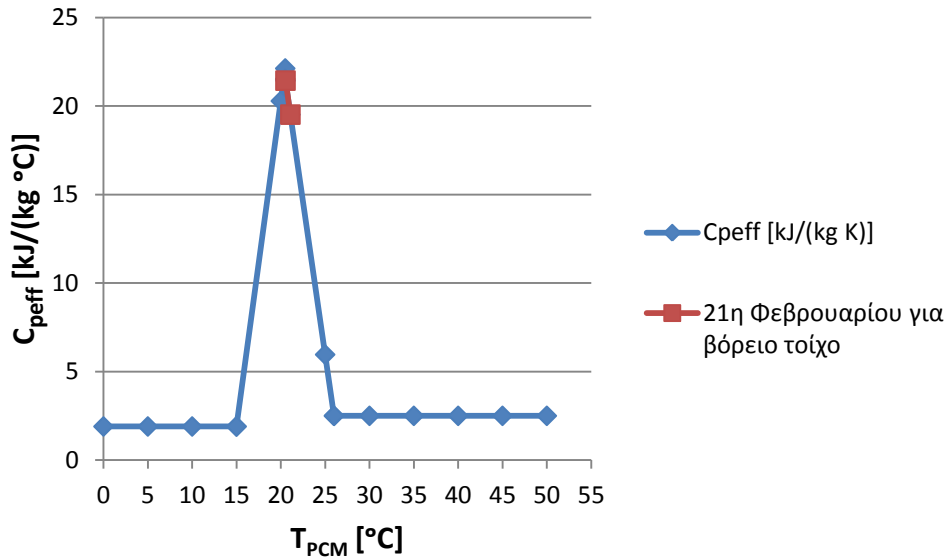
Διάγραμμα 5.2.4.13: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.14: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο

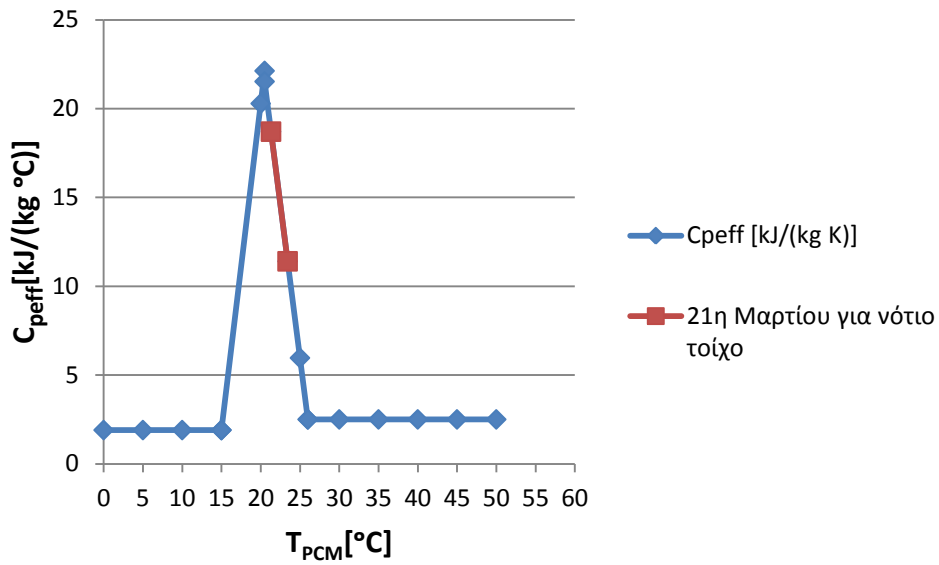


Διάγραμμα 5.2.4.15: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο

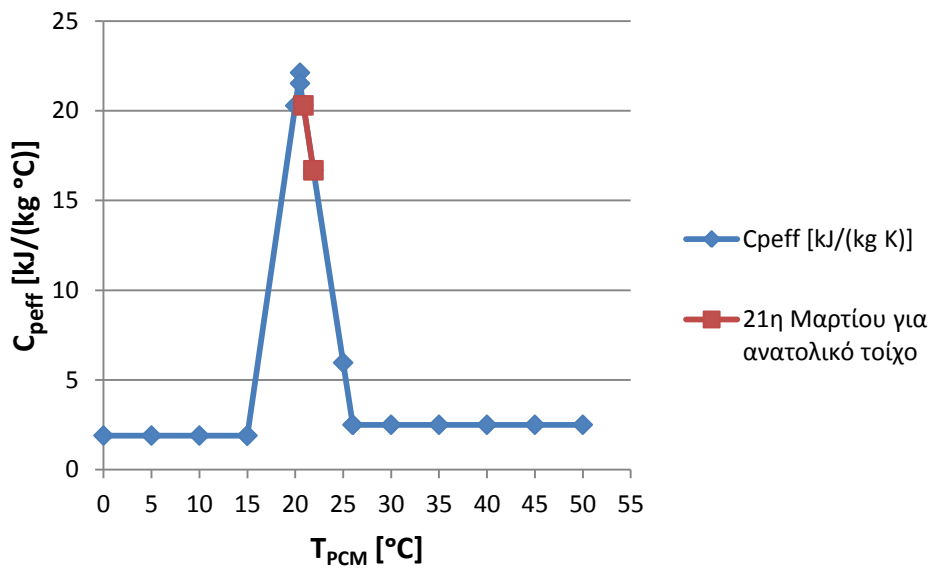


Διάγραμμα 5.2.4.16: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο

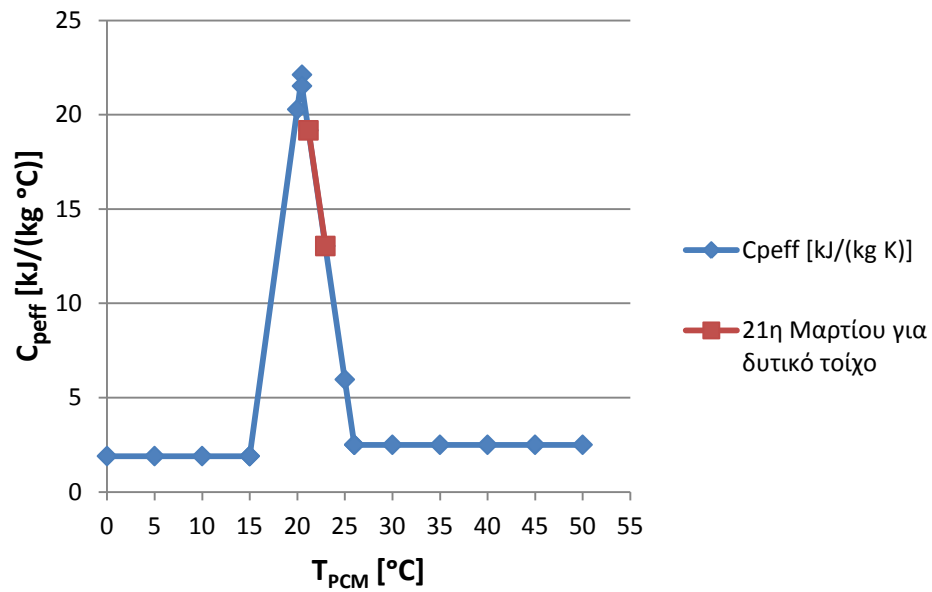
➤ **Για 21^η Μαρτίου:**



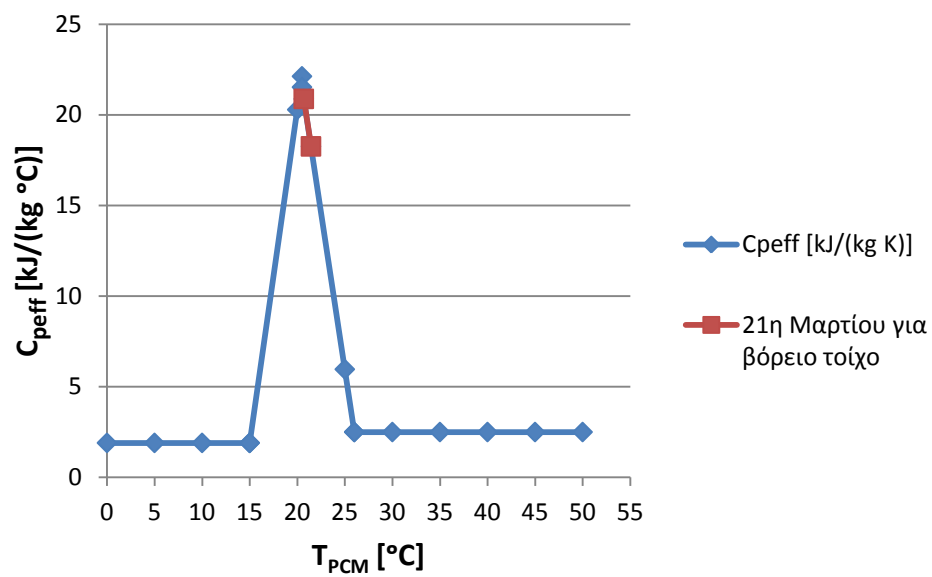
Διάγραμμα 5.2.4.17: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.18: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.19: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο



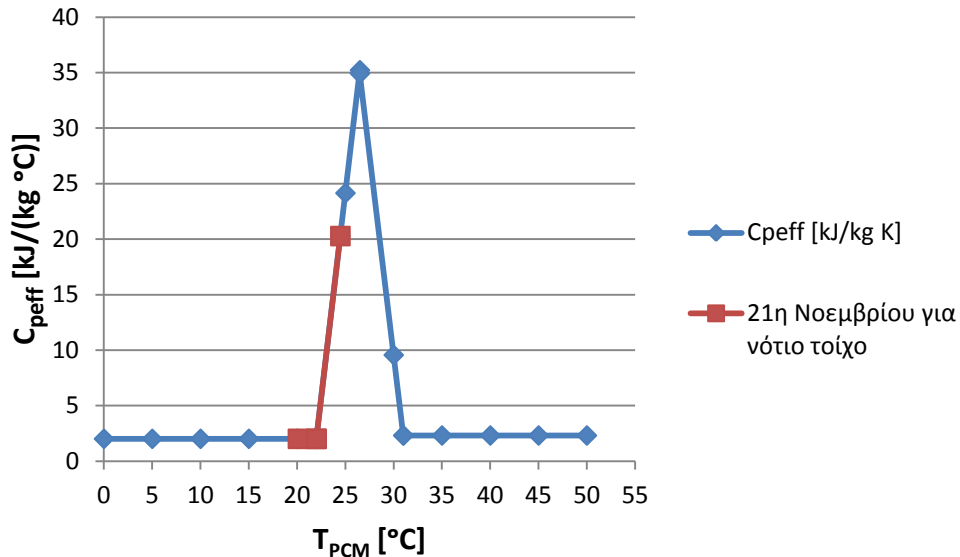
Διάγραμμα 5.2.4.20: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

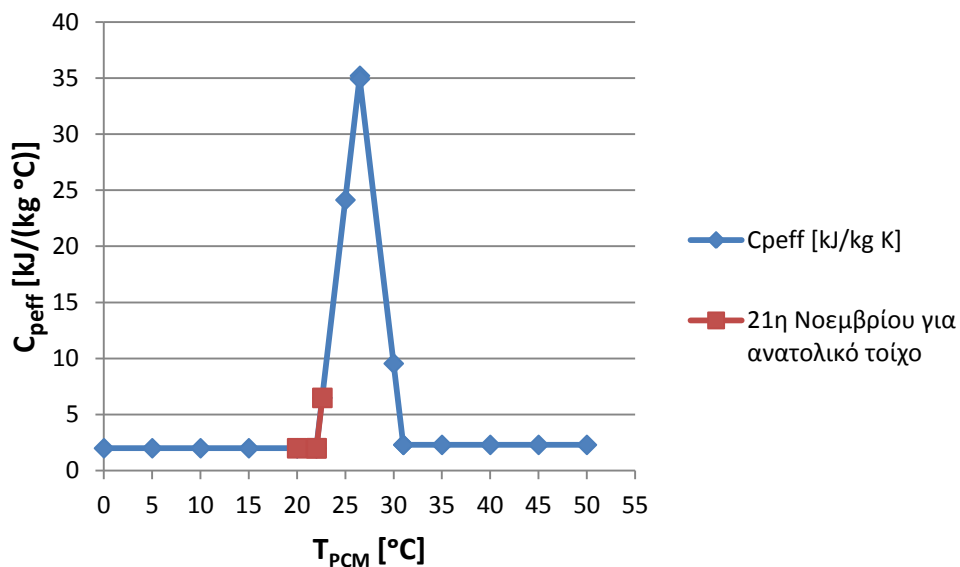
Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται εμφανές ότι στο στρώμα RT20 για κάθε μήνα και για κάθε προσανατολισμό αναπτύσσονται θερμοκρασίες εντός της διφασικής περιοχής και μόνο, δηλαδή αξιοποιείται η ιδιότητά του να αποθηκεύει θερμική ενέργεια μεταπίπτοντας από τη στερεή στην υγρή φάση. Αυτό έχει άμεση σχέση και με την επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης, καθώς οι θερμοκρασίες στερεοποίησης T_s και τήξης T_l του RT20 το καθιστούν κατάλληλο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή και εν δυνάμει αξιοποιήσιμο στις δεδομένες συνθήκες που υποθέσαμε για τη μελέτη μας. Συγκεκριμένα, παρατηρώντας τα διαγράμματα για κάθε μήνα, συμπεραίνουμε ότι το RT20 μπορεί να αποδώσει καλύτερα όταν ο υαλοπίνακας βρίσκεται σε τοίχο δυτικού και ακόμη περισσότερο νοτίου προσανατολισμού, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις καλύπτει μεγαλύτερο μέρος της διφασικής περιοχής και παρουσιάζει μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα, λόγω μεγαλύτερων τιμών ενεργού θερμοχωρητικότητας. Αντίθετα, για ανατολικό και κυρίως για βόρειο προσανατολισμό το RT20 καλύπτει ένα πάρα πολύ μικρό τμήμα της περιοχής αλλαγής φάσης του, κάτι που είναι αναμενόμενο, αφού η ολική στιγμιαία ακτινοβολία G_T για αυτούς τους δύο προσανατολισμούς είναι μικρότερη. Συνεπώς, μπορούμε να πούμε πως το RT20 αξιοποιείται σε σχετικά ικανοποιητικό βαθμό, όταν ο απέναντι τοίχος που φέρει υαλοπίνακα είναι νότιος ή δυτικός, ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις προσανατολισμού (Ανατολή και Βορράς) η εκμετάλλευση του είναι περιορισμένη.

➤ Για το RT27:

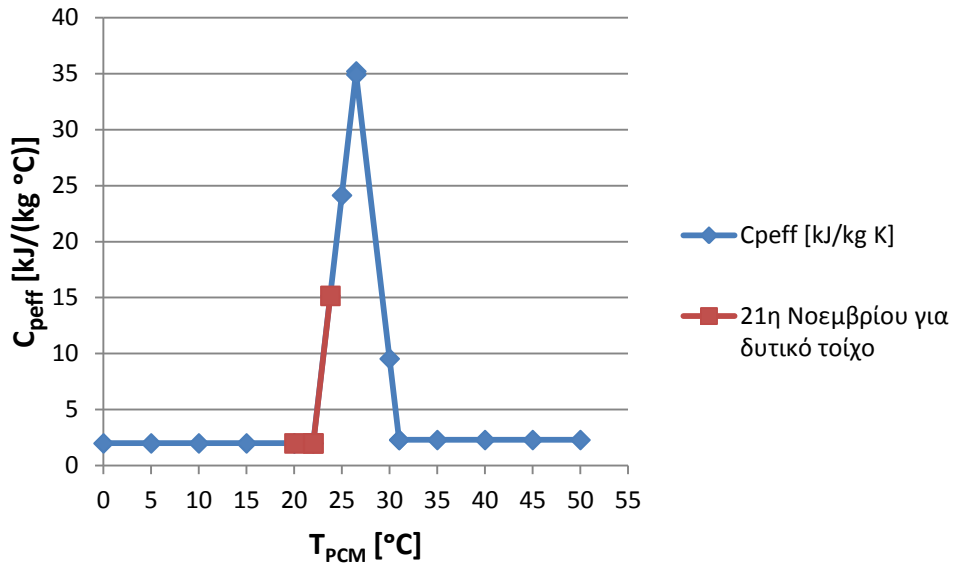
➤ Για 21^η Νοεμβρίου:



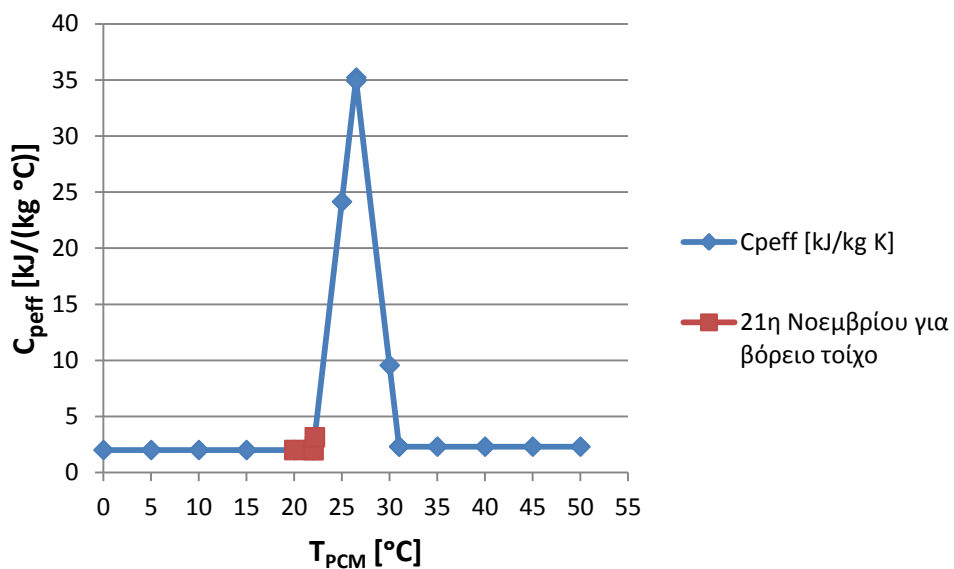
Διάγραμμα 5.2.4.21: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.22: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο

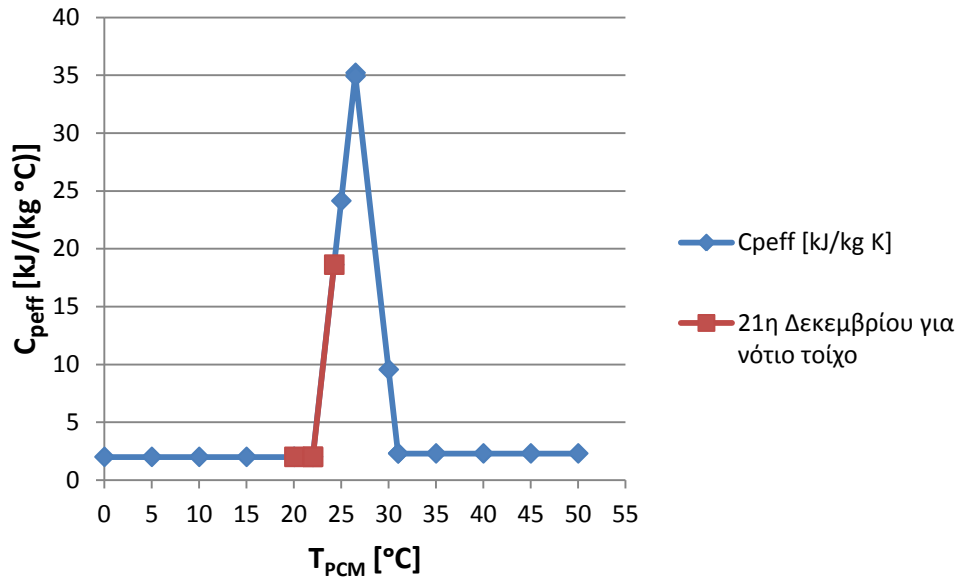


Διάγραμμα 5.2.4.23: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο

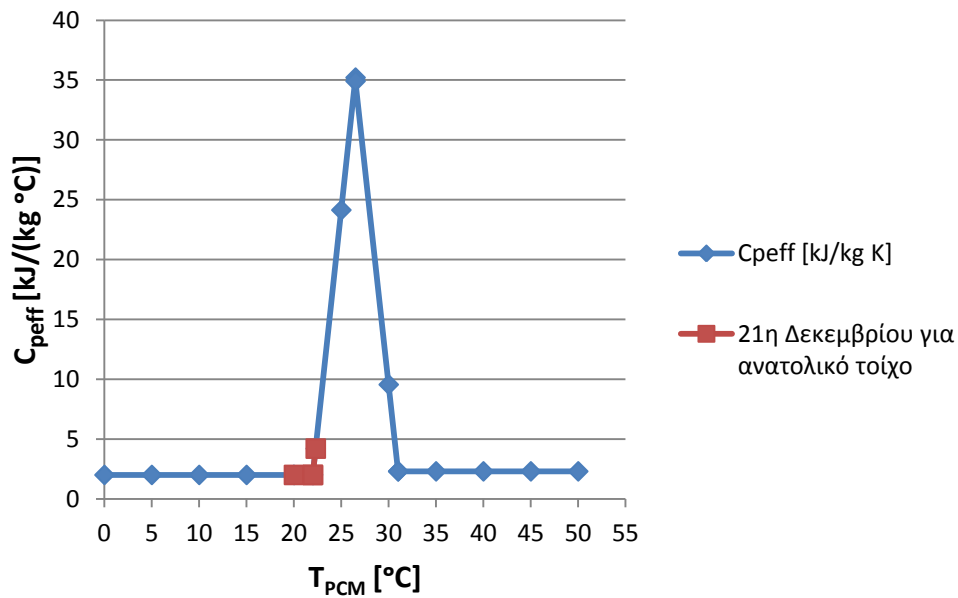


Διάγραμμα 5.2.4.24: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο

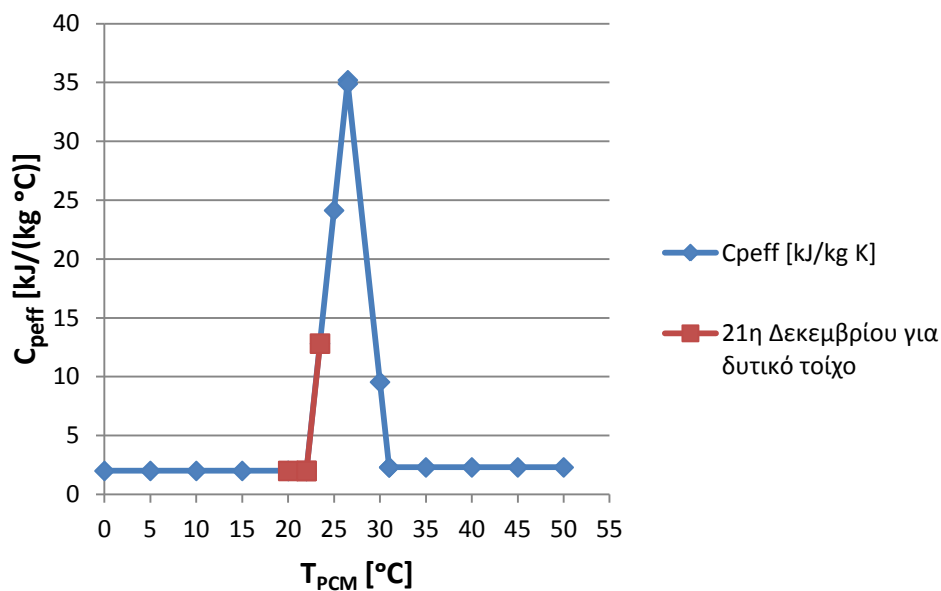
➤ **Για 21^η Δεκεμβρίου:**



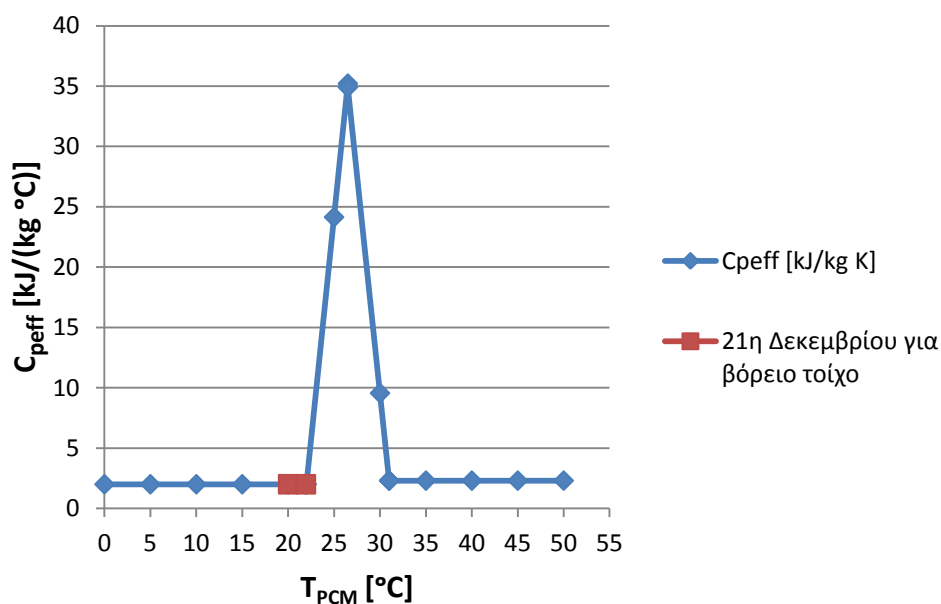
Διάγραμμα 5.2.4.25: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.26: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο

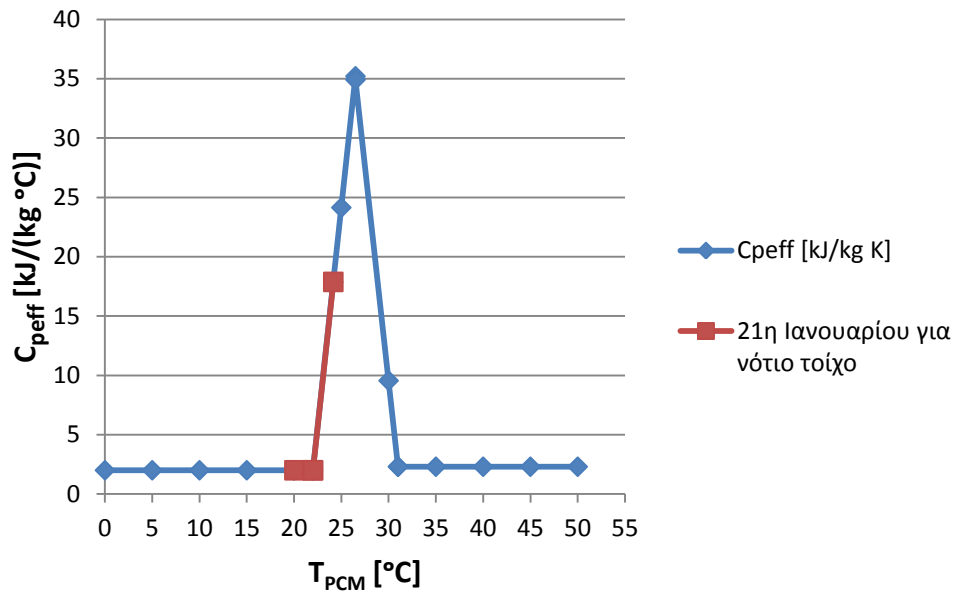


Διάγραμμα 5.2.4.27: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο

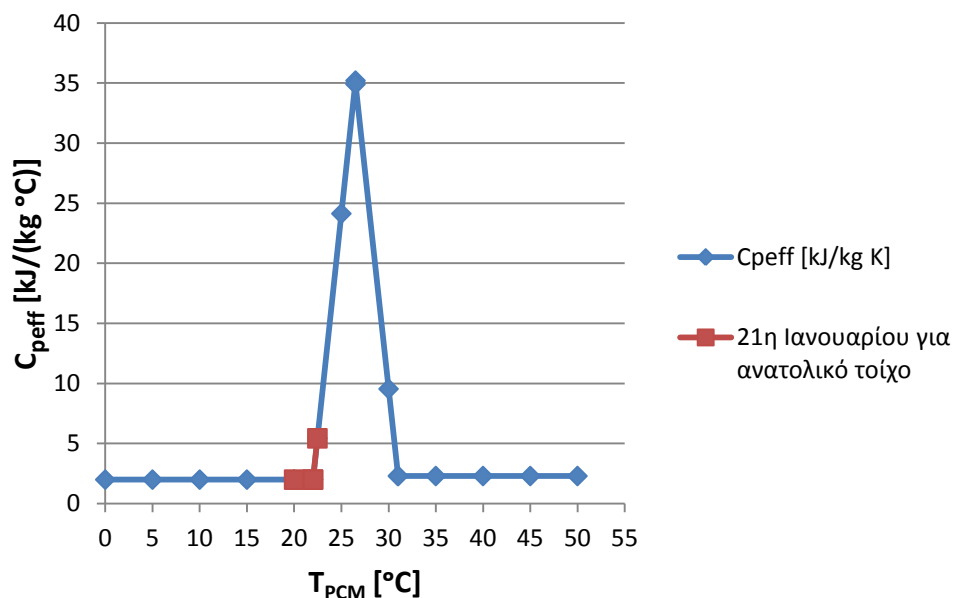


Διάγραμμα 5.2.4.28: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο

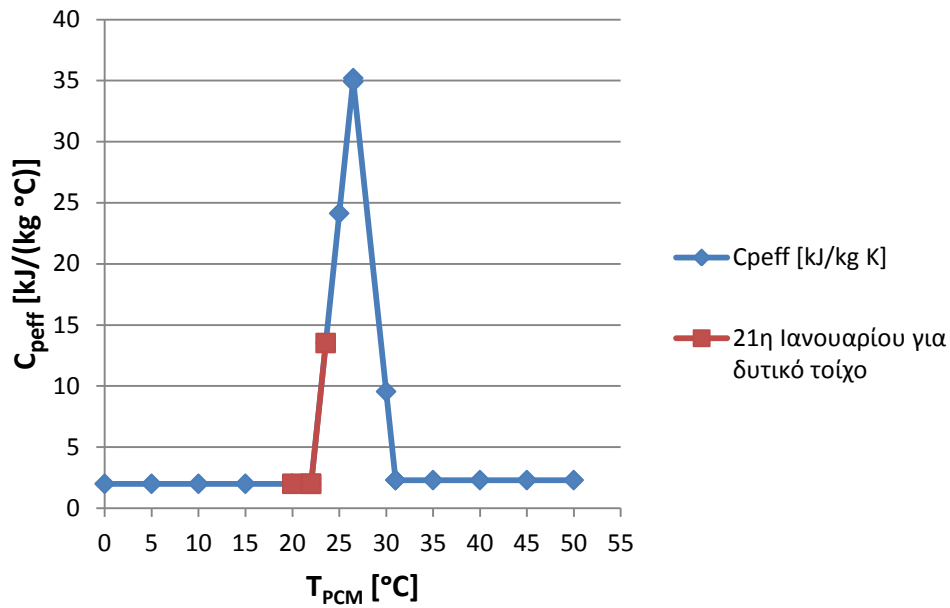
➤ Για 21^η Ιανουαρίου:



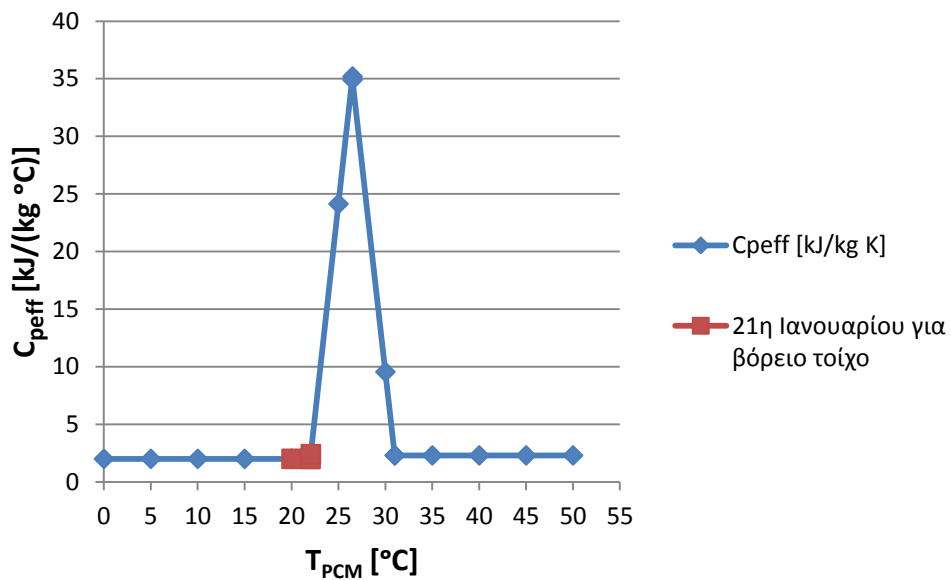
Διάγραμμα 5.2.4.29: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.30: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο

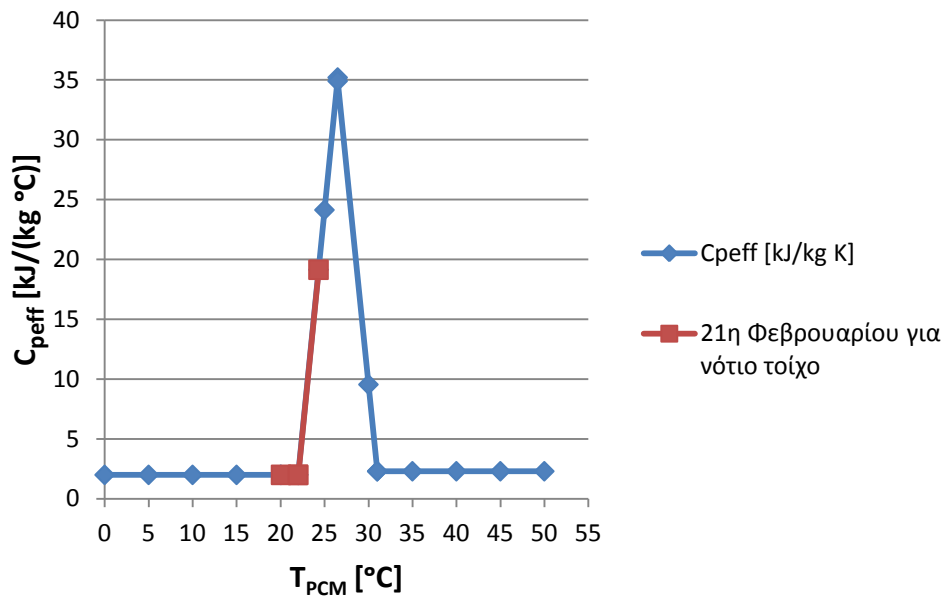


Διάγραμμα 5.2.4.31: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο

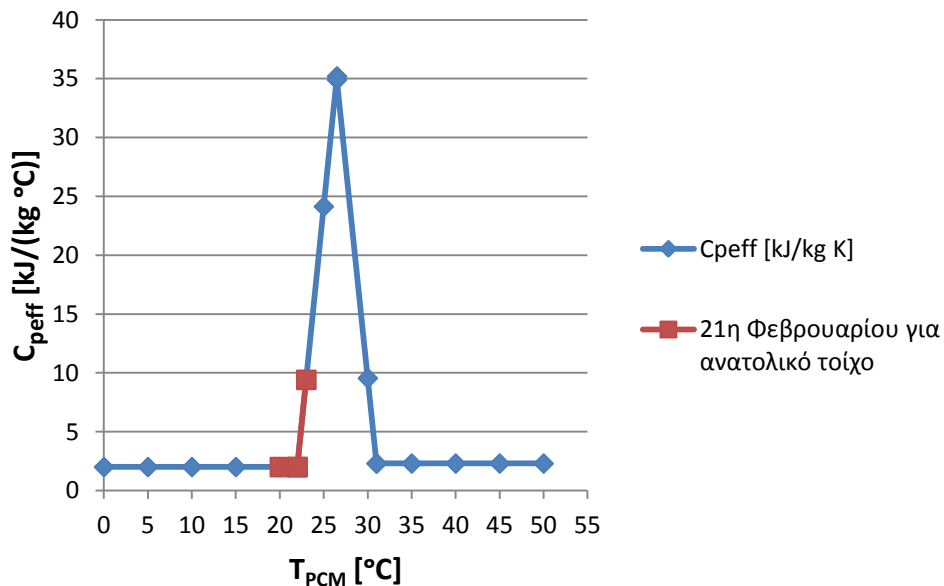


Διάγραμμα 5.2.4.32: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο

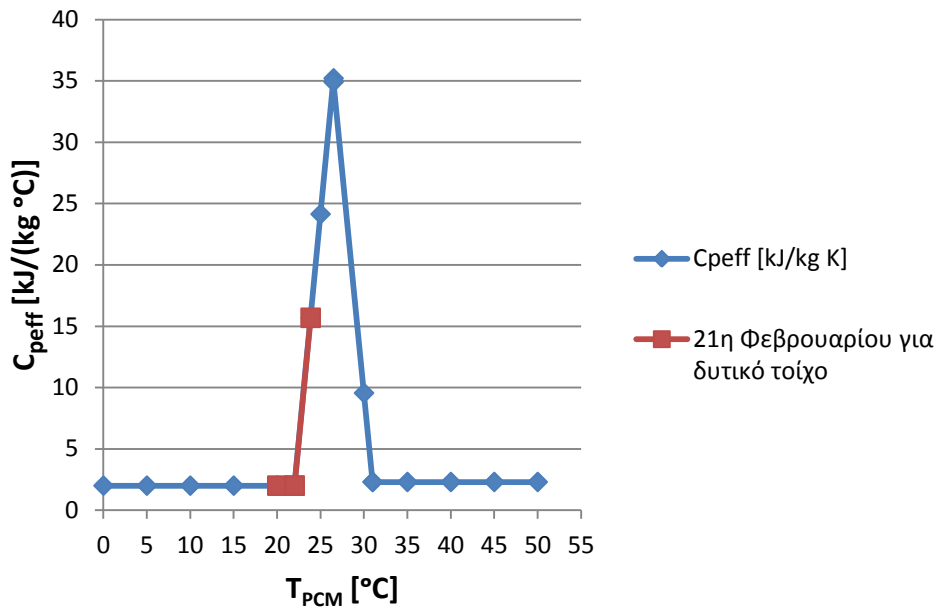
➤ Για 21^η Φεβρουαρίου:



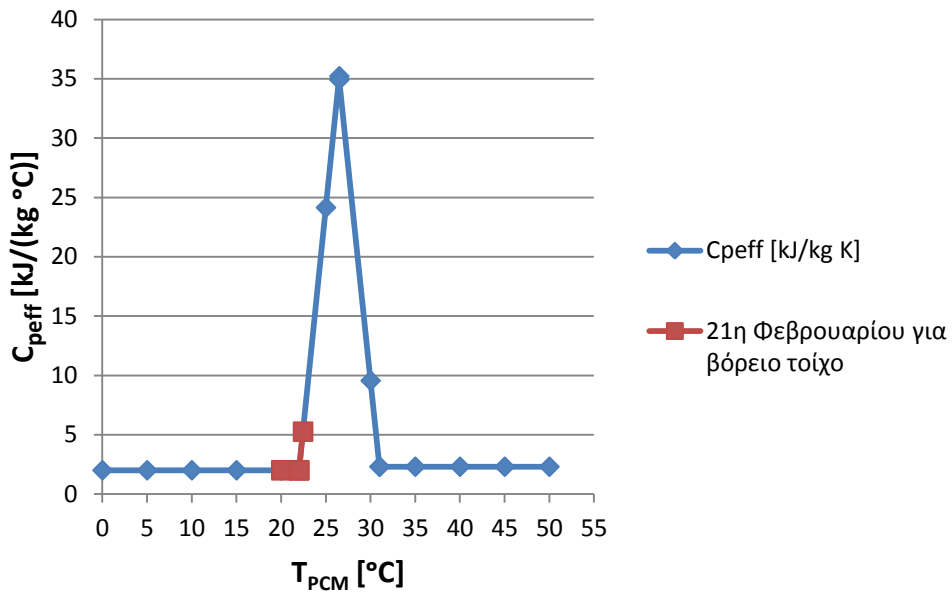
Διάγραμμα 5.2.4.33: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.34: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο

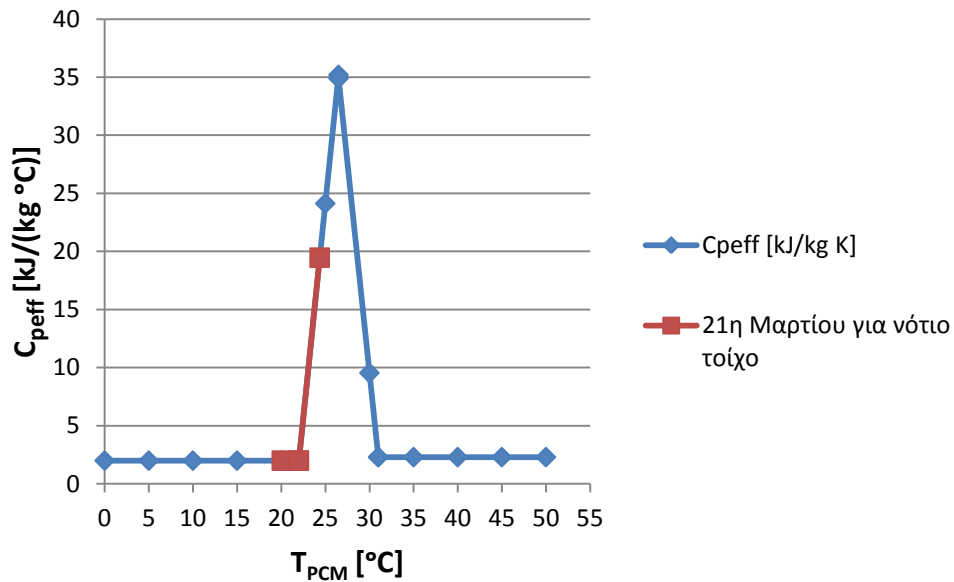


Διάγραμμα 5.2.4.35: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο

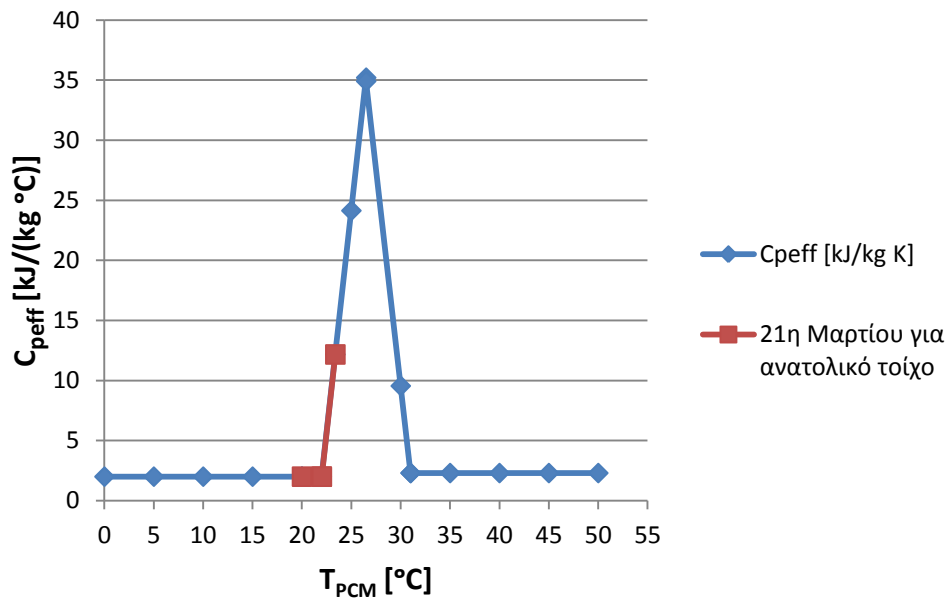


Διάγραμμα 5.2.4.36: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο

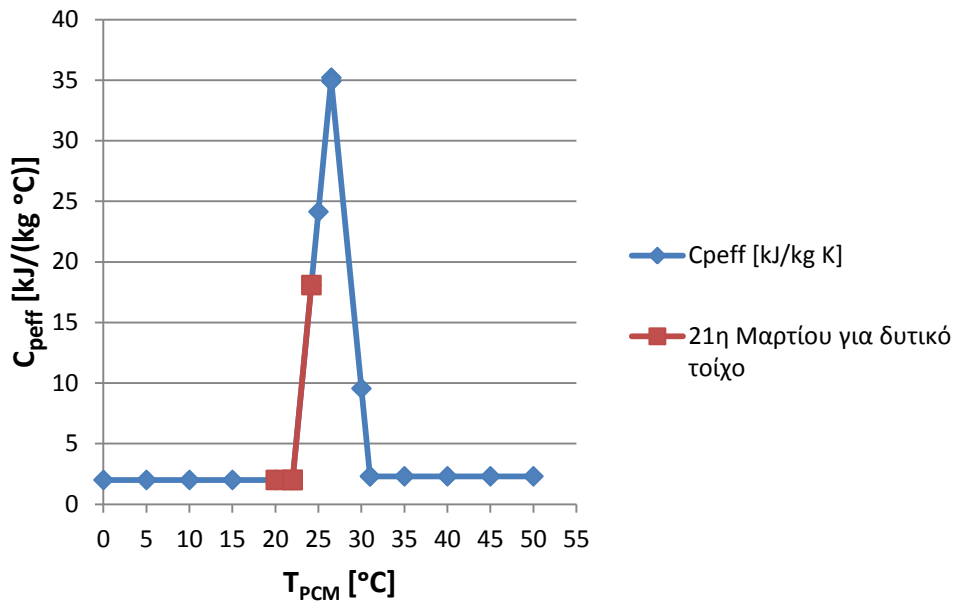
➤ Για 21^η Μαρτίου:



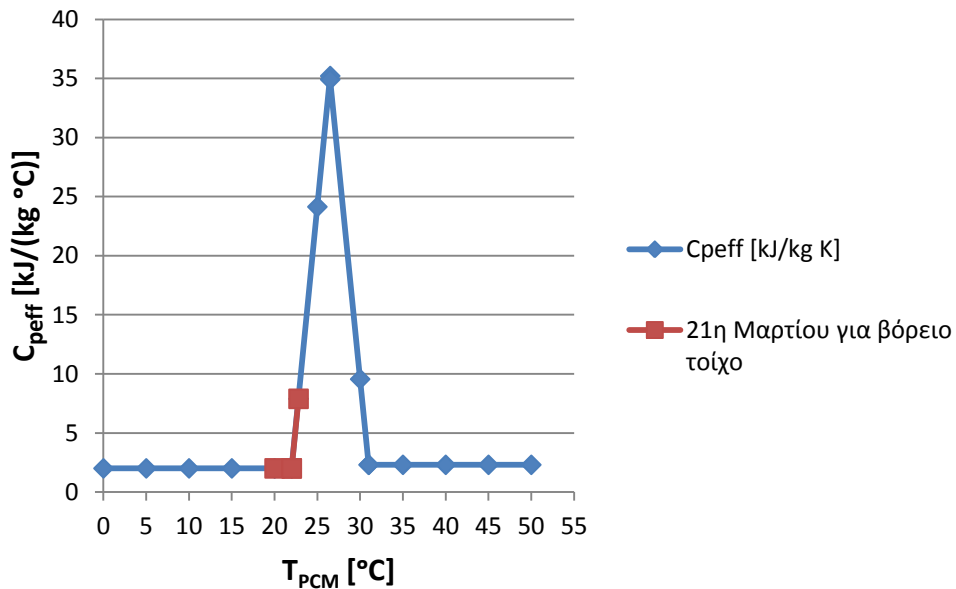
Διάγραμμα 5.2.4.37: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.38: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.39: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο



Διάγραμμα 5.2.4.40: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι στο στρώμα του RT27 αναπτύσσονται θερμοκρασίες εντός της διφασικής περιοχής, με εξαίρεση την περίπτωση 21^{ης} Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, όπου το RT27 δεν καταφέρνει να «εισέλθει» στη διφασική περιοχή, δηλαδή δεν αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα. Επιπλέον, όπως και στο RT20 έτσι και στο RT27 η κατά το δυνατόν καλύτερη αξιοποίησή του επιτυγχάνεται, όταν ο υαλοπίνακας βρίσκεται σε δυτικό και κυρίως σε νότιο προσανατολισμό, ενώ για ανατολικό και βόρειο τοίχο με υαλοπίνακα, η ιδιότητά του να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση αξιοποιείται ελάχιστα (αφού αναπτύσσει εμφανώς χαμηλότερες θερμοκρασίες). Γενικά, παρατηρούμε ότι το RT27 δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλες τιμές ενεργού θερμοχωρητικότητας και επομένως δεν έχει πολύ καλή απόδοση. Η βελτίωση της απόδοσής του, δηλαδή η εκμετάλλευση μεγαλύτερου ποσού ενέργειας που δύναται να προσφέρει, μπορεί να επιτευχθεί αλλάζοντας τις τιμές διαφόρων παραμέτρων στη μελέτη μας, όπως είναι η επιφάνεια παραθύρου (αύξησή της) ή το πάχος του στρώματος του PCM (μείωση). Ο λόγος για τον οποίο η αύξηση της επιφάνειας του υαλοπίνακα και η μείωση του πάχους του στρώματος του PCM συμβάλλουν στην καλύτερη εκμετάλλευση αυτού θα εξηγηθεί στο επόμενο κεφάλαιο, όπου πραγματοποιούνται παραμετρικές μελέτες ως προς τα μεγέθη αυτά.

Ενδεικτικά, στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι περιοχές λειτουργίας του RT27 κατά την 21^η Μαρτίου για νότιο προσανατολισμό έχοντας μεταβάλει τις τιμές δύο παραμέτρων (επιφάνεια παραθύρου και πάχος στρώματος), αρχικά μόνο για αυξημένη επιφάνεια παραθύρου από $A_f=4,5\text{m}^2$ σε $A_f=7,5\text{m}^2$, στη συνέχεια μόνο για μειωμένο πάχος του στρώματος του RT27 από $d_{PCM}=0,03\text{m}$ σε $d_{PCM}=0,015\text{m}$ και τέλος για $A_f=7,5\text{m}^2$ και $d_{PCM}=0,015\text{m}$ ταυτόχρονα. Σε αυτό το σημείο, είναι χρήσιμο να αναφέρουμε την τελική σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας του PCM για τις τρεις περιπτώσεις, η οποία εφαρμόστηκε προκειμένου να είναι δυνατή η εύρεση της περιοχής λειτουργίας. Άρα,

Για επιφάνεια παραθύρου $A_f=7,5\text{m}^2$:

$$T_{\text{τελ}} = \frac{24300G_T - 381,24T_{\alpha\rho\chi} + 738C_{\text{reff}}T_{\alpha\rho\chi} + 15249,6}{738C_{\text{reff}} + 381,24} \quad (5.2.4.1)$$

Για πάχος στρώματος RT27 $d_{PCM}=0,015\text{m}$:

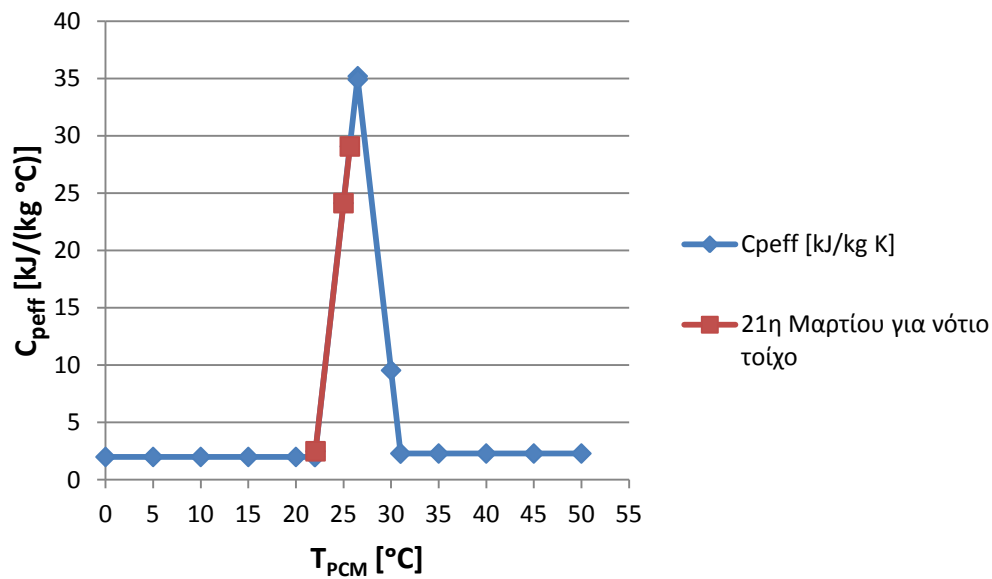
$$T_{\text{τελ}} = \frac{14580G_T - 381,24T_{\alpha\rho\chi} + 369C_{\text{reff}}T_{\alpha\rho\chi} + 15249,6}{369C_{\text{reff}} + 381,24} \quad (5.2.4.2)$$

Για επιφάνεια παραθύρου $A_f=7,5\text{m}^2$ και πάχος στρώματος RT27 $d_{PCM}=0,015\text{m}$:

$$T_{\text{τελ}} = \frac{24300G_T - 381,24T_{\alpha\rho\chi} + 369C_{\text{reff}}T_{\alpha\rho\chi} + 15249,6}{369C_{\text{reff}} + 381,24} \quad (5.2.4.3)$$

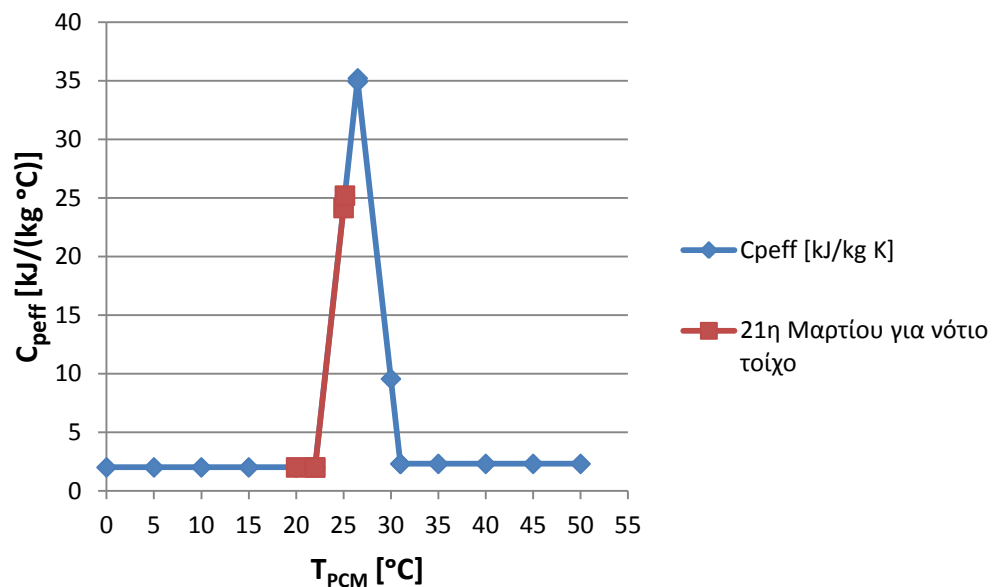
Οπότε η περιοχή λειτουργίας του RT27 για κάθε περίπτωση είναι:

Για επιφάνεια παραθύρου $A_f=7,5m^2$:



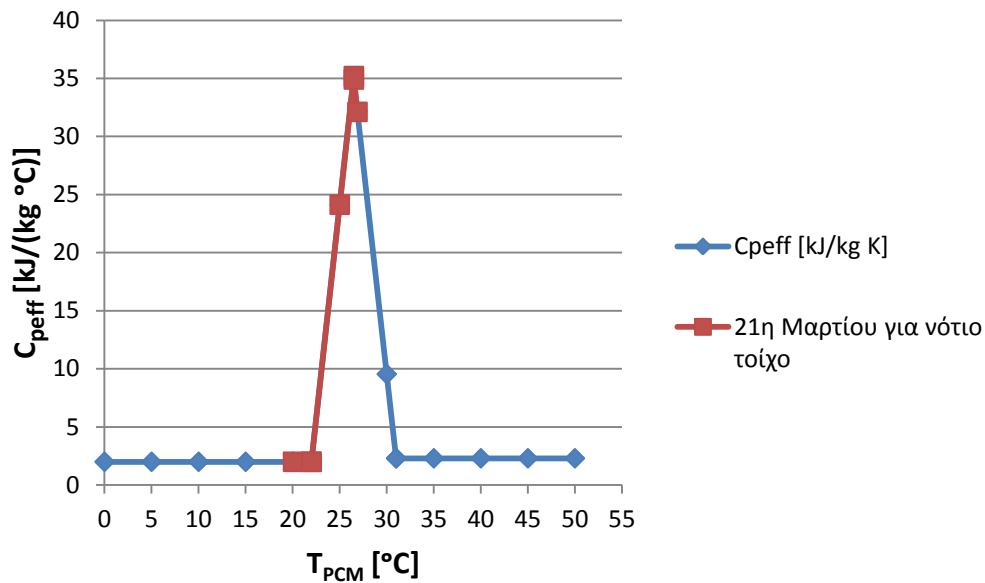
Διάγραμμα 5.2.4.41: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο ($T_{ΔΩΜ}=20^{\circ}C$, $d_{PCM}=0,03m$, $A_f=7,5m^2$)

Για πάχος στρώματος RT27 $d_{PCM}=0,015m$:



Διάγραμμα 5.2.4.42: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο ($T_{ΔΩΜ}=20^{\circ}C$, $d_{PCM}=0,015m$, $A_f=4,5m^2$).

Για επιφάνεια παραθύρου $A_f=7,5m^2$ και πάχος στρώματος RT27 $d_{PCM}=0,015m$:



Διάγραμμα 5.2.4.43: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο ($T_{ΔΩΜ}=20^{\circ}C$, $d_{PCM}=0,015m$, $A_f=7,5m^2$).

Συγκρίνοντας κάθε μία από τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις με την αρχική (για $A_f=4,5m^2$ και $d_{PCM}=0,03m$, διάγραμμα 5.2.4.37), παρατηρούμε όπως ήταν αναμενόμενο μία αισθητή αύξηση στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο στρώμα του RT27, καθώς και κάλυψη σαφώς μεγαλύτερου μέρους θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης. Επομένως, έχοντας μπει περισσότερο στη διαφασική περιοχή, γίνεται μεγαλύτερη θερμική αποθήκευση και ως εκ τούτου καλύτερη εκμετάλλευση του RT27.

5.2.5 Ενεργειακή συνεισφορά του PCM στο χώρο

Σε αυτήν την ενότητα θα υπολογίσουμε το ποσό θερμότητας που προσφέρει το υλικό αλλαγής φάσης στον εξεταζόμενο χώρο, για κάθε ώρα του 24ώρου της 21^{ης} ημέρας καθενός από τους πέντε χειμερινούς μήνες που μελετάμε και για κάθε προσανατολισμό του τοίχου που φέρει υαλοπίνακα. Προς εξυπηρέτηση και διευκόλυνση της μελέτης μας, θεωρήσαμε ότι η ανάγκη για θέρμανση του χώρου κατά τους εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες και με βάση τις συνθήκες που επικρατούν και κατ' επέκταση τις απώλειες του υπό μελέτη κτιρίου, είναι $P=20\text{W/m}^2$ προκειμένου να επιτυγχάνεται σταθερή θερμοκρασία $T_{\Delta\Omega\text{M}}=20^\circ\text{C}$ εντός του χώρου. Η τιμή της απαιτούμενης ισχύος $P=20\text{W/m}^2$ έχει ληφθεί από μελέτες.

Επομένως, για το χώρο της μελέτης μας διαστάσεων $10\text{m}\times 10\text{m}=100\text{m}^2$ θα απαιτούνται:

$$P_{ολ} = \frac{20\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 100\text{m}^2 = 2000\text{W} = 2\text{kW}, \quad (5.2.5.1)$$

από τα οποία ένα μέρος θα παρέχεται από κάποιο κλιματιστικό σύστημα, θερμαντικό σώμα κ.λ.π. και το υπόλοιπο θα προέρχεται από την εφαρμογή του PCM. Έτσι, για κάθε ώρα του 24ώρου θα έχουμε:

$$Q_{απαιτ} = 2\text{kW} \cdot 3600\text{sec} = 7200\text{kJ}, \quad (5.2.5.2)$$

εκ των οποίων το ποσό που θα προσφέρει το PCM ισούται με:

$$Q = U \cdot A_W \cdot (T_{\Delta\Omega\text{M}} - T_{PCM}) \cdot 3600 \text{ [kJ]} \quad (5.2.5.3)$$

$$\Rightarrow Q = 7,06 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot (20 - T_{PCM}) \cdot 3600$$

$$\Rightarrow Q = 762,48 \cdot (20 - T_{PCM}) \quad (5.2.5.4)$$

όπου $T_{PCM} = (T_{αρχ} + T_{τελ})/2$, $T_{αρχ}$, $T_{τελ}$ έτσι όπως προέκυψαν από την ενότητα 5.2.3 για κάθε ώρα του 24ώρου.

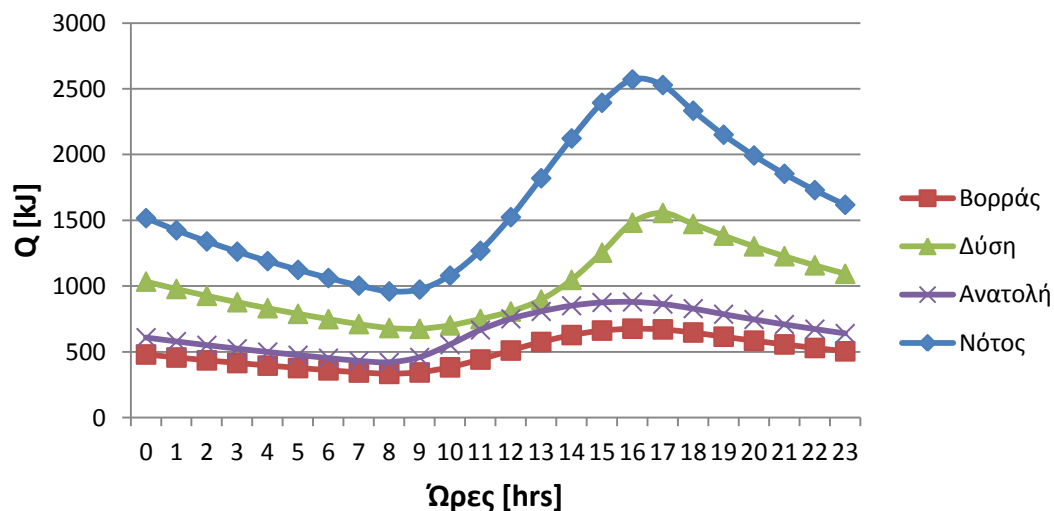
Όπως προαναφέρθηκε, ο υπολογισμός της ενεργειακής συνεισφοράς θα γίνει για κάθε ώρα του 24ώρου της 21^{ης} ημέρας Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Μαρτίου, για κάθε προσανατολισμό του τοίχου που φέρει υαλοπίνακα και προφανώς και για τα δύο υλικά αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήσαμε, αρχικά για το RT20 και κατόπιν για το RT27. Στους πίνακες και στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται η θερμότητα που προσφέρει το PCM συναρτήσει των ωρών του 24ώρου, έτσι όπως υπολογίστηκε από την σχέση (5.2.5.4), αλλά κατά απόλυτη τιμή. Σε αυτό το σημείο, να σημειώσουμε ότι με αυτόν τον τρόπο υπολογισμού της προσφερόμενης θερμότητας δεν γίνεται διακριτό το αισθητό ή (και) το λανθάνον μέρος αυτής.

➤ **Για το RT20:**

➤ **Για 21^η Νοεμβρίου:**

Πίνακας 5.2.5.1: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT20 για κάθε ώρα της 21^{ης} Νοεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ώρα[hrs]	Q [kJ] Νότος	Q [kJ] Ανατολή	Q [kJ] Δύση	Q [kJ] Βορράς
7:00	1004,134	430,8158	711,6912	343,5924
8:00	960,1876	420,5374	681,8937	333,2083
9:00	973,9228	458,8064	676,1408	343,9325
10:00	1080,059	554,7955	701,9125	382,8326
11:00	1268,978	666,8705	750,1034	442,3072
12:00	1524,116	751,429	807,5139	510,5616
13:00	1820,452	807,7192	897,0221	575,5143
14:00	2122,651	851,1712	1047,738	628,0696
15:00	2393,642	875,7893	1254,714	662,442
16:00	2570,932	879,683	1482,691	676,6973
17:00	2528,461	863,6811	1556,597	671,4688
18:00	2333,376	828,9571	1472,798	647,7219
19:00	2151,124	786,3957	1384,222	615,7799
20:00	1993,138	746,406	1302,891	585,6231
21:00	1853,942	708,7881	1227,926	557,1293
22:00	1729,827	673,363	1158,597	530,1869
23:00	1618,139	639,9699	1094,297	504,6943
24:00	1516,9	608,4634	1034,509	480,5582
1:00	1424,587	578,7121	978,7935	457,6931
2:00	1339,996	550,5963	926,7688	436,02
3:00	1262,16	524,007	878,1046	415,4665
4:00	1190,284	498,8446	832,511	395,9654
5:00	1123,707	475,0177	789,7326	377,4545
6:00	1061,873	452,4425	749,5431	360,0573

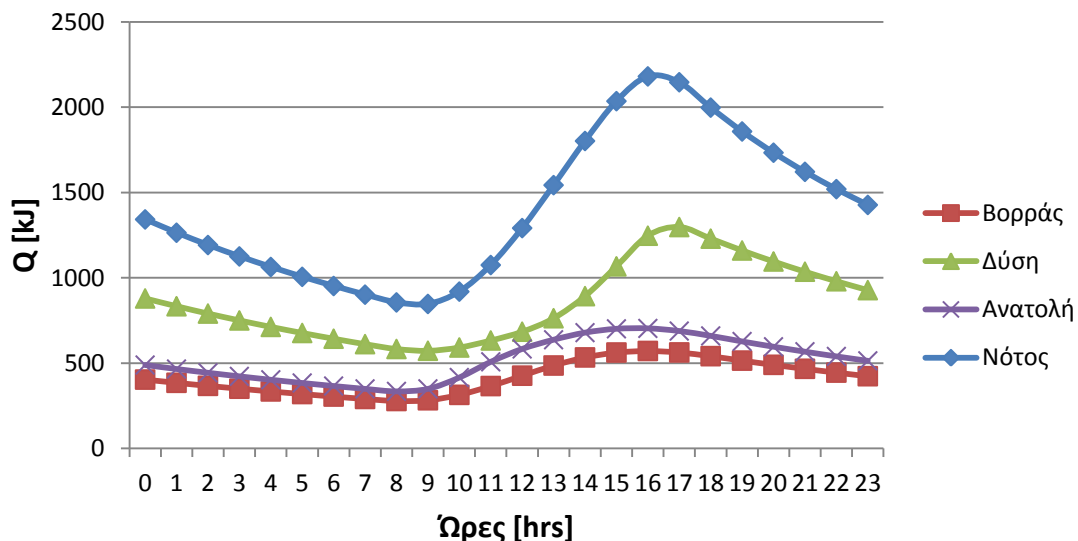


Διάγραμμα 5.2.5.1: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου:

Πίνακας 5.2.5.2: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT20 για κάθε ώρα της 21^{ης} Δεκεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ώρα[hrs]	Q [kJ] Νότος	Q [kJ] Ανατολή	Q [kJ] Δύση	Q [kJ] Βορράς
7:00	901,47	349,5673	611,6867	290,4637
8:00	856,0233	335,0204	583,272	278,4642
9:00	846,938	349,7326	572,9564	282,8216
10:00	919,3476	416,1114	592,0856	314,5074
11:00	1075	508,0246	633,0768	365,9516
12:00	1291,559	583,4629	684,5508	426,7782
13:00	1543,063	637,3649	763,4985	486,295
14:00	1801,89	678,8681	892,9222	533,6712
15:00	2035,226	701,3752	1067,298	562,4642
16:00	2180,266	703,7429	1246,888	571,4798
17:00	2145,947	688,3135	1297,681	562,897
18:00	1997,335	659,8335	1229,817	541,2492
19:00	1857,663	627,2081	1160,349	515,1633
20:00	1733,162	596,4155	1095,923	490,4719
21:00	1621,152	567,329	1036,023	467,0863
22:00	1519,64	539,8334	980,2057	444,9249
23:00	1427,091	513,8237	928,0887	423,9127
24:00	1342,296	489,2035	879,3402	403,9802
1:00	1264,28	465,8846	833,6695	385,0633
2:00	1192,245	443,7858	790,8203	367,314
3:00	1125,526	422,8323	750,5655	350,5981
4:00	1063,564	402,9551	712,7029	334,5857
5:00	1005,884	384,0902	677,0513	319,2519
6:00	952,0767	366,386	643,4481	304,5724

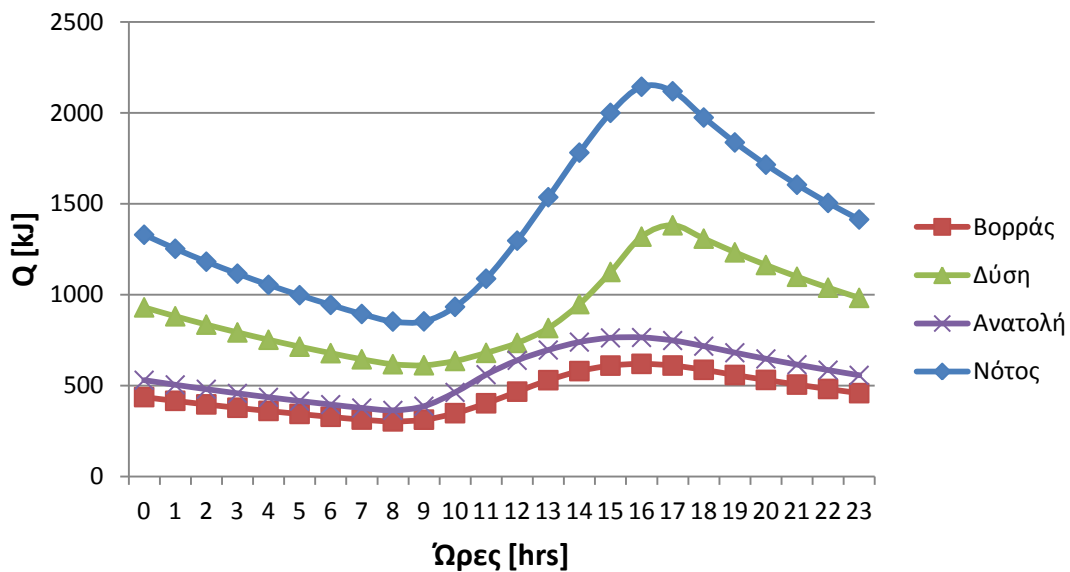


Διάγραμμα 5.2.5.2: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

➤ **Για 21^η Ιανουαρίου:**

Πίνακας 5.2.5.3: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT20 για κάθε ώρα της 21^{ης} Ιανουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ώρα[hrs]	Q [kJ] Νότος	Q [kJ] Ανατολή	Q [kJ] Δύση	Q [kJ] Βορράς
7:00	893,7599	376,8046	644,7057	313,4545
8:00	852,2037	363,8442	617,6884	303,4892
9:00	853,0664	386,6063	612,0873	312,7532
10:00	933,0009	462,5136	635,4982	348,5239
11:00	1087,786	559,9635	680,0099	402,9318
12:00	1296,814	638,6682	734,831	466,8733
13:00	1535,678	695,5645	816,5318	529,8696
14:00	1780,845	739,0203	948,2725	579,7579
15:00	1999,696	762,2276	1124,763	609,904
16:00	2143,156	764,3915	1319,165	619,4387
17:00	2118,196	747,6763	1381,52	610,3446
18:00	1973,965	716,5346	1308,089	586,839
19:00	1836,923	680,6609	1232,724	558,2786
20:00	1714,567	646,8518	1163,041	531,274
21:00	1604,346	614,9588	1098,424	505,7232
22:00	1504,353	584,8476	1038,351	481,5327
23:00	1413,112	556,3962	982,3767	458,6164
24:00	1329,455	529,4935	930,1176	436,8955
1:00	1252,44	504,038	881,2396	416,297
2:00	1181,291	479,9367	835,4502	396,7535
3:00	1115,364	457,104	792,4921	378,2028
4:00	1054,114	435,4616	752,1371	360,7709
5:00	997,0754	414,9368	714,1818	344,3298
6:00	943,8503	395,4627	678,4446	328,5825

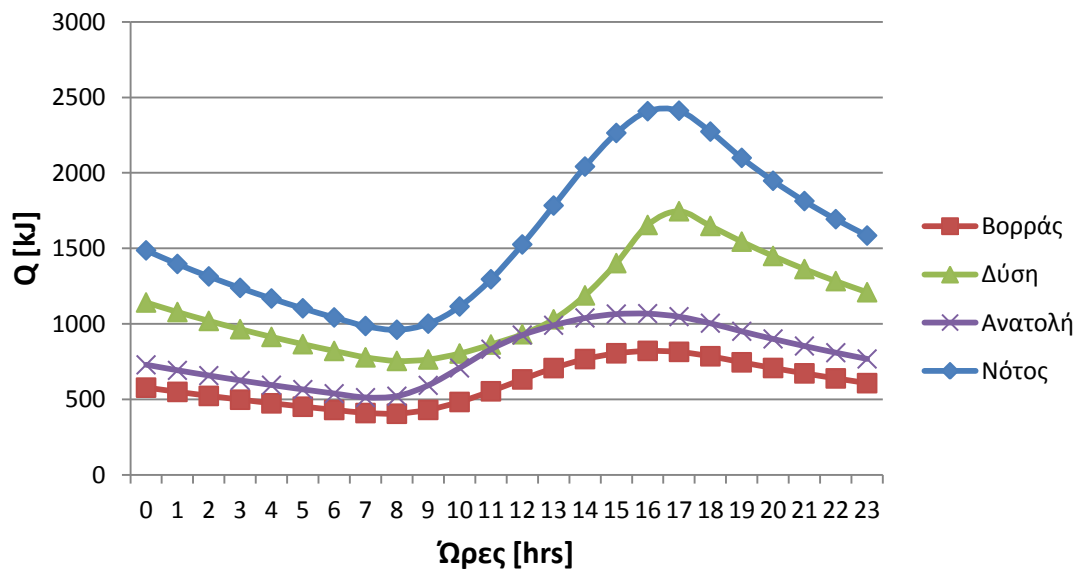


Διάγραμμα 5.2.5.3: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου:

Πίνακας 5.2.5.4: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT20 για κάθε ώρα της 21^{ης} Φεβρουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ώρα[hrs]	Q [kJ] Νότος	Q [kJ] Ανατολή	Q [kJ] Δύση	Q [kJ] Βορράς
7:00	987,0089	512,8981	779,5548	410,7695
8:00	962,094	522,0463	755,6937	406,0636
9:00	1002,433	593,9368	765,4157	431,4885
10:00	1116,095	709,1427	804,8337	483,9087
11:00	1296,309	833,1103	864,4429	554,7797
12:00	1526,639	926,9265	932,6461	633,4412
13:00	1783,991	991,5303	1031,212	708,3518
14:00	2042,144	1040,175	1189,553	768,0988
15:00	2264,478	1066,272	1403,15	806,3722
16:00	2408,512	1068,883	1655,655	822,0888
17:00	2411,845	1048,807	1746,55	815,767
18:00	2273,699	1005,434	1649,377	786,5864
19:00	2099,728	951,6564	1545,281	746,5852
20:00	1948,066	901,3948	1450,516	708,9568
21:00	1813,895	854,3403	1363,794	673,522
22:00	1693,889	810,2214	1284,088	640,1198
23:00	1585,636	768,7981	1210,556	608,6049
24:00	1487,317	729,8574	1142,504	578,8458
1:00	1397,52	693,2086	1079,346	550,7227
2:00	1315,123	658,6811	1020,588	524,1266
3:00	1239,218	626,1209	965,8034	498,9578
4:00	1169,054	595,3889	914,6256	475,1249
5:00	1104,006	566,3589	866,734	452,5441
6:00	1043,546	538,9161	821,848	431,138

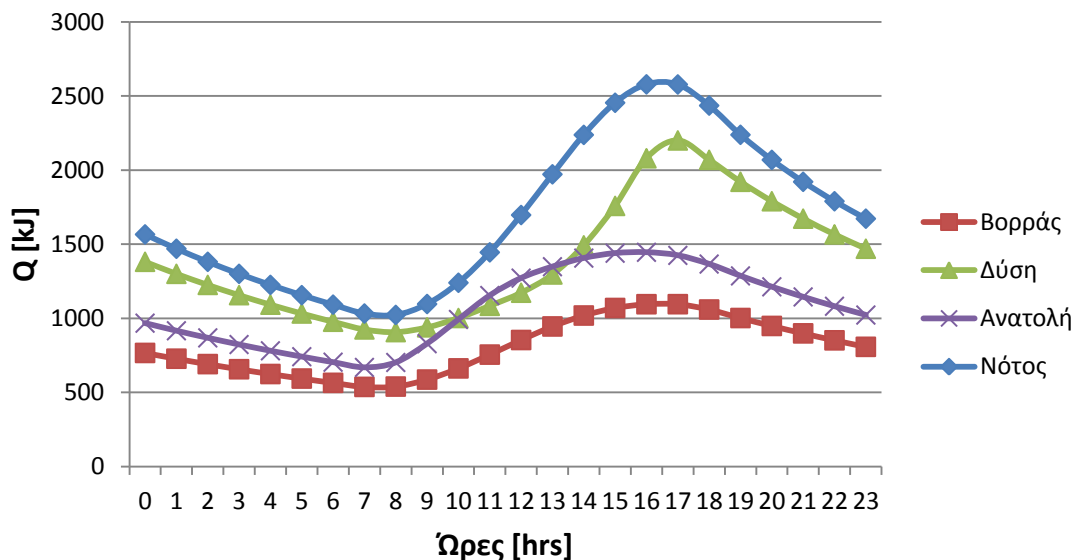


Διάγραμμα 5.2.5.4: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

➤ **Για 21^η Μαρτίου:**

Πίνακας 5.2.5.5: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT20 για κάθε ώρα της 21^{ης} Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ώρα[hrs]	Q [kJ] Νότος	Q [kJ] Ανατολή	Q [kJ] Δύση	Q [kJ] Βορράς
7:00	1032,163	668,6449	924,909	537,1574
8:00	1022,661	702,0546	906,9406	539,4308
9:00	1096,316	828,9158	938,9889	586,7039
10:00	1239,741	992,0397	1001,942	662,0448
11:00	1444,977	1153,662	1084,27	755,0758
12:00	1696,755	1270,797	1172,549	853,4943
13:00	1971,315	1348,068	1295,769	944,9516
14:00	2237,365	1406,127	1492,229	1018,803
15:00	2453,984	1438,996	1758,223	1069,415
16:00	2578,256	1445,066	2079,494	1094,986
17:00	2577,378	1424,412	2199,798	1095,171
18:00	2435,145	1365,957	2068,996	1059,281
19:00	2237,932	1286,079	1921,015	1001,892
20:00	2068,764	1212,397	1789,793	948,3491
21:00	1920,811	1144,21	1672,214	898,3009
22:00	1789,611	1080,931	1565,999	851,4413
23:00	1672,05	1022,064	1469,419	807,5012
24:00	1565,85	967,1813	1381,125	766,2424
1:00	1469,283	915,9138	1300,042	727,4533
2:00	1381,001	867,9406	1225,295	690,9447
3:00	1299,928	822,9797	1156,16	656,5471
4:00	1225,189	780,7824	1092,034	624,1075
5:00	1156,062	741,1282	1032,402	593,4877
6:00	1091,943	703,8202	976,8277	564,5623



Διάγραμμα 5.2.5.5: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Όλα τα παραπάνω διαγράμματα για την προσφερόμενη θερμότητα του RT20 παρατηρούμε ότι έχουν σχεδόν την ίδια μορφή με τα αντίστοιχα διαγράμματα 5.2.3.1 έως 5.2.3.5 για τη θερμοκρασία του RT20. Αυτό είναι λογικό από μαθηματικής πλευράς, αν κοιτάξουμε τη σχέση (5.2.5.4). Εξετάζοντας και ποιοτικά τα διαγράμματα είναι επίσης ορθά και λογικά. Πιο συγκεκριμένα, όπως είδαμε στην ενότητα 5.2.3, η θερμοκρασία του RT20 είναι υψηλότερη αυτής του δωματίου για κάθε ώρα, κάθε μήνα και για κάθε προσανατολισμό και ως εκ τούτου το RT20 μόνο προσδίδει θερμότητα στο χώρο. Αυτό είναι λογικό, αφού από τη στιγμή που έχουμε υποθέσει μονίμως σταθερή θερμοκρασία στο δωμάτιο και μηδενική συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του PCM και του στρώματος μόνωσης και ταυτόχρονα το PCM θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του PCM θα διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα από τη θερμοκρασία δωματίου. Αυτή η μονομερής πρόσδοση θερμότητας από το PCM στο δωμάτιο, σε όλη τη διάρκεια του 24ώρου, αποτυπώνεται στα διαγράμματα 5.2.5.1 έως 5.2.5.5. Επιπλέον, παρατηρούμε για κάθε μία από τις τέσσερις καμπύλες όλων των παραπάνω διαγραμμάτων ότι το ποσό προσφερόμενης θερμότητας μειώνεται από τις 12 το βράδυ μέχρι τις 8 περίπου το πρωί, από τις 8 το πρωί και μέχρι περίπου τις 16:00-17:00 αυξάνεται, ενώ από εκείνες τις ώρες και μέχρι την ολοκλήρωση του 24ώρου έχει πάλι φθίνουσα πορεία. Αυτή η μεταβολή στην προσφερόμενη θερμότητα εξηγείται ως εξής: Στο χρονικό διάστημα 8 το πρωί μέχρι 16:00-17:00 περίπου, η θερμότητα που προσφέρει ολοένα αυξάνεται, αφού η διαφορά θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) αυξάνει κατ' απόλυτη τιμή, λόγω διέγερσης του RT20 από την ηλιακή ακτινοβολία G_T (γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του PCM). Από τις 16:00-17:00 περίπου και μέχρι τις 7 με 8 το πρωί, η διαφορά θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) μειώνεται κατ' απόλυτη τιμή, αφού πλέον δεν υφίσταται η διέγερση G_T (δηλαδή παύει να αυξάνει η θερμοκρασία του RT20) και έτσι η θερμότητα που προσφέρει στο χώρο ολοένα μειώνεται.

Από τους πίνακες και τα διαγράμματα για την προσφερόμενη θερμότητα από το RT20, εξάγουμε τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα που ισχύουν και για τους πέντε εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες. Έτσι, για κάθε μήνα παρατηρούμε ότι τα μεγαλύτερα ποσά θερμότητας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας προσφέρονται όταν ο τοίχος που φέρει υαλοπίνακα είναι νότιου προσανατολισμού, ενώ τα μικρότερα ποσά θερμότητας προσφέρονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι βόρειος. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς οι διαφορές θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) για κάθε ώρα στην περίπτωση νοτίου προσανατολισμού είναι σαφώς μεγαλύτερες κατ' απόλυτη τιμή από τις αντίστοιχες ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) για βόρειο προσανατολισμό (λόγω μεγαλύτερης διέγερσης G_T). Στην περίπτωση δυτικού τοίχου με υαλοπίνακα, τα προσφερόμενα ποσά θερμότητας είναι υψηλότερα από αυτά για ανατολικό τοίχο με υαλοπίνακα, δηλαδή όπως ακριβώς συμβαίνει και με τα διαγράμματα θερμοκρασίας του RT20.

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα ανά τους πέντε χειμερινούς μήνες για το νότιο προσανατολισμό, παρατηρούμε πως η καμπύλη του Q πέφτει κατακόρυφα, δηλαδή αποκτά μικρότερη μέγιστη αλλά και μικρότερη ελάχιστη τιμή, καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται ξανά οι τιμές του Q και κατ' επέκταση η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της. Αυτό είναι λογικό δεδομένου ότι όσο οδεύουμε χρονικά προς το κέντρο του χειμώνα, η διέγερση (G_T) περιορίζεται (συνεπώς προκαλεί μικρότερη αύξηση στη θερμοκρασία του PCM) και αρχίζει πάλι να αυξάνει όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν. Αντίστοιχα, κατά τον ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό του τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, παρατηρούμε ότι η καμπύλη του Q πέφτει κατακόρυφα καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον

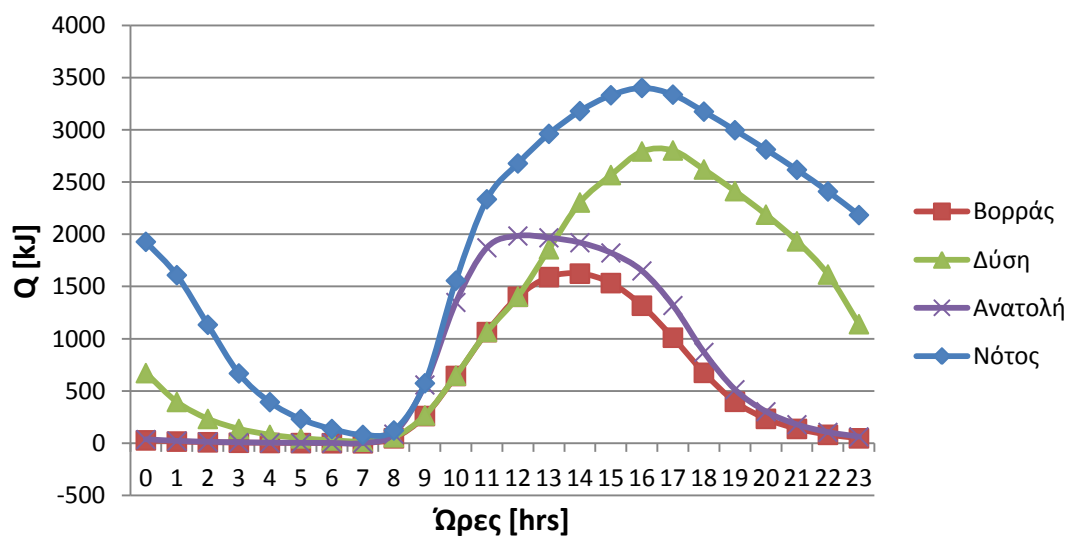
Δεκέμβριο και αρχίζει να ανεβαίνει σταδιακά οδεύοντας από τον Ιανουάριο μέχρι και το Μάρτιο.

➤ Για το RT27:

➤ Για 21^η Νοεμβρίου:

Πίνακας 5.2.5.6: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 για κάθε ώρα της 21^{ης} Νοεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ώρα[hrs]	Q [kJ] Νότος	Q [kJ] Ανατολή	Q [kJ] Δύση	Q [kJ] Βορράς
7:00	80,7456	0,903369	16,62452	0,699888
8:00	122,9231	87,98056	57,57247	48,18561
9:00	574,587	558,8896	266,7001	261,167
10:00	1556,926	1348,514	647,8901	644,6285
11:00	2335,709	1871,661	1066,273	1064,351
12:00	2678,693	1984,583	1403,752	1402,618
13:00	2961,847	1967,207	1858,062	1590,761
14:00	3179,806	1919,989	2305,111	1624,158
15:00	3331,443	1822,138	2567,756	1533,745
16:00	3401,399	1650,176	2793,414	1317,143
17:00	3337,152	1318,977	2803,166	1010,99
18:00	3174,67	870,966	2620,998	674,7874
19:00	2997,031	513,3956	2414,092	397,757
20:00	2812,075	302,6238	2188,769	234,46
21:00	2617,684	178,3832	1933,381	138,2037
22:00	2410,53	105,1489	1615,696	81,4649
23:00	2184,828	61,98059	1140,601	48,01992
24:00	1928,773	36,53479	672,3333	28,3056
1:00	1609,434	21,53562	396,3104	16,68488
2:00	1134,656	12,69429	233,6073	9,834994
3:00	668,829	7,482716	137,7011	5,797289
4:00	394,2448	4,410727	81,16863	3,417243
5:00	232,3897	2,599926	47,84528	2,014312
6:00	136,9833	1,53254	28,20265	1,187347

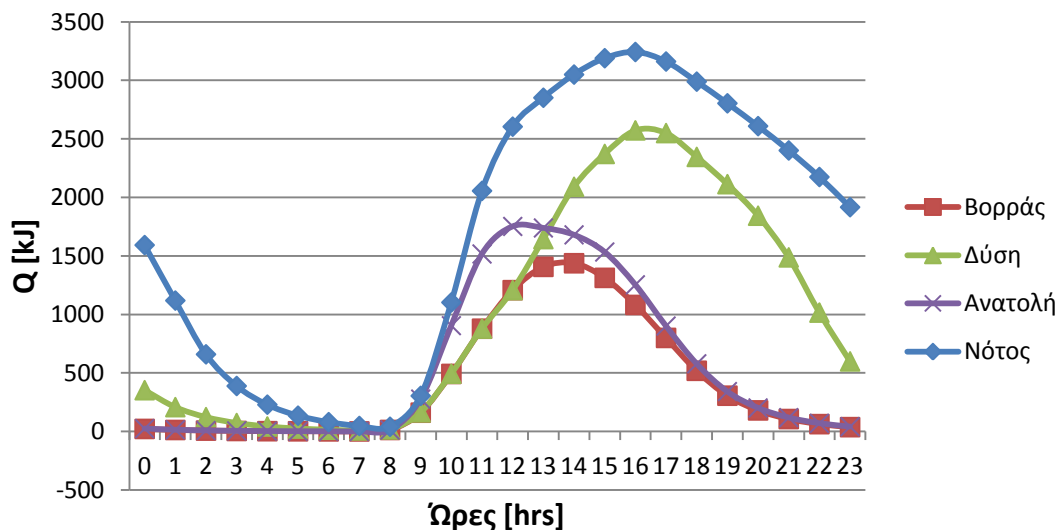


Διάγραμμα 5.2.5.6: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου:

Πίνακας 5.2.5.7: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 για κάθε ώρα της 21^{ης} Δεκεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ώρα[hrs]	Q [kJ] Νότος	Q [kJ] Ανατολή	Q [kJ] Δύση	Q [kJ] Βορράς
7:00	46,91895	0,599902	8,727135	0,537868
8:00	40,41253	13,10952	17,90016	13,07295
9:00	304,3184	276,7321	163,2899	160,4445
10:00	1102,754	904,233	493,2704	491,5931
11:00	2055,719	1516,63	879,0201	878,0315
12:00	2604,267	1751,832	1207,881	1207,297
13:00	2851,307	1738,779	1643,845	1406,442
14:00	3049,443	1680,017	2090,675	1437,428
15:00	3189,223	1533,283	2371,291	1312,433
16:00	3242,199	1253,29	2572,498	1081,159
17:00	3160,92	900,7253	2549,654	799,2617
18:00	2989,026	578,3867	2346,156	518,5784
19:00	2803,704	340,9331	2113,171	305,6788
20:00	2608,831	200,9648	1843,773	180,184
21:00	2401,005	118,4598	1487,74	106,2104
22:00	2174,281	69,82675	1015,811	62,60629
23:00	1916,407	41,15975	598,775	36,90361
24:00	1592,483	24,26183	352,9511	21,75303
1:00	1118,488	14,30127	208,0489	12,82244
2:00	659,2989	8,429958	122,6355	7,558256
3:00	388,6273	4,969084	72,28817	4,455254
4:00	229,0784	2,929053	42,61065	2,626173
5:00	135,0315	1,726546	25,11707	1,548012
6:00	79,59503	1,017722	14,80539	0,912484

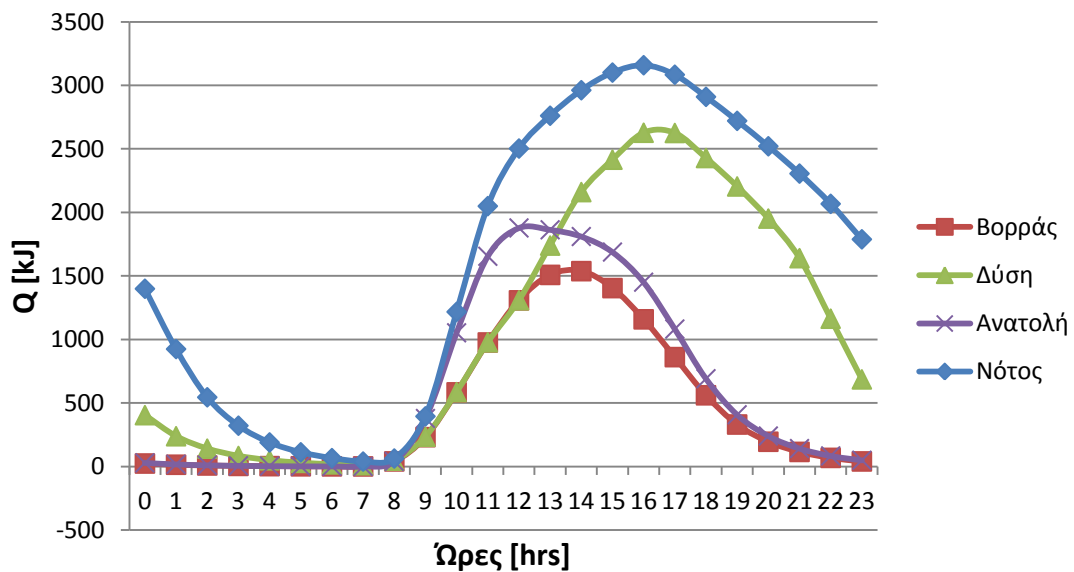


Διάγραμμα 5.2.5.7: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

➤ Για 21^η Ιανουαρίου:

Πίνακας 5.2.5.8: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 για κάθε ώρα της 21^{ης} Ιανουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα[hrs]	Q [kJ] Νότος	Q [kJ] Ανατολή	Q [kJ] Δύση	Q [kJ] Βορράς
7:00	38,77773	0,716825	9,995125	0,581516
8:00	62,61479	40,17959	45,64874	40,09984
9:00	394,7789	378,0067	233,8617	230,5908
10:00	1217,255	1052,628	585,4487	583,5207
11:00	2049,378	1654,526	977,3227	976,1862
12:00	2502,725	1877,678	1308,372	1307,701
13:00	2760,99	1863,295	1738,971	1507,9
14:00	2961,696	1810,161	2160,052	1537,673
15:00	3100,527	1687,878	2414,84	1404,283
16:00	3158,371	1450,757	2626,895	1158,373
17:00	3083,572	1082,244	2625,024	860,9293
18:00	2909,667	691,1157	2428,051	560,6607
19:00	2720,524	407,3818	2204,184	330,4844
20:00	2520,557	240,1334	1951,351	194,8058
21:00	2305,498	141,5479	1639,857	114,8293
22:00	2067,42	83,43617	1163,402	67,68675
23:00	1788,101	49,18189	685,7735	39,89832
24:00	1398,992	28,99053	404,2328	23,51828
1:00	924,3467	17,08862	238,2772	13,86297
2:00	544,8611	10,07298	140,4538	8,171603
3:00	321,1713	5,937571	82,79121	4,816795
4:00	189,3161	3,499933	48,80172	2,839285
5:00	111,5934	2,063054	28,76643	1,673632
6:00	65,77932	1,216078	16,95653	0,986531

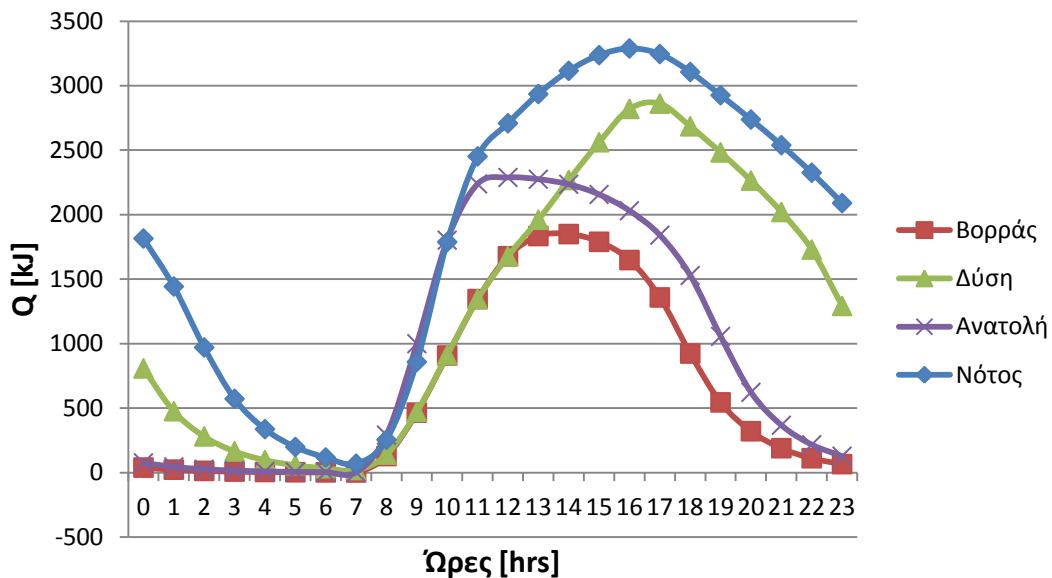


Διάγραμμα 5.2.5.8: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου:

Πίνακας 5.2.5.9: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 για κάθε ώρα της 21^{ης} Φεβρουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα[hrs]	Q [kJ] Νότος	Q [kJ] Ανατολή	Q [kJ] Δύση	Q [kJ] Βορράς
7:00	69,03851	1,8583	19,9684	0,957662
8:00	255,2436	290,8533	139,4767	128,2708
9:00	858,1543	999,5848	471,6074	465,0019
10:00	1788,044	1802,118	911,6969	907,8033
11:00	2451,432	2238,251	1346,806	1344,511
12:00	2708,442	2288,111	1677,726	1677,118
13:00	2934,903	2274,539	1960,673	1833,88
14:00	3114,857	2235,334	2268,577	1849,211
15:00	3236,605	2156,565	2561,3	1789,267
16:00	3288,329	2030,358	2819,822	1647,766
17:00	3245,385	1840,926	2860,93	1358,056
18:00	3105,95	1528,226	2684,972	923,3167
19:00	2925,651	1056,105	2482,642	544,2539
20:00	2737,307	622,5268	2264,142	320,8134
21:00	2538,415	366,9517	2020,429	189,1052
22:00	2324,903	216,3016	1729,479	111,469
23:00	2089,308	127,5002	1292,181	65,70602
24:00	1814,89	75,15564	807,5721	38,73076
1:00	1442,87	44,30089	476,0277	22,83005
2:00	970,1412	26,1134	280,597	13,4573
3:00	571,8549	15,39268	165,3994	7,932475
4:00	337,0829	9,073298	97,49557	4,67584
5:00	198,6953	5,348304	57,46928	2,756199
6:00	117,122	3,152586	33,87557	1,624656

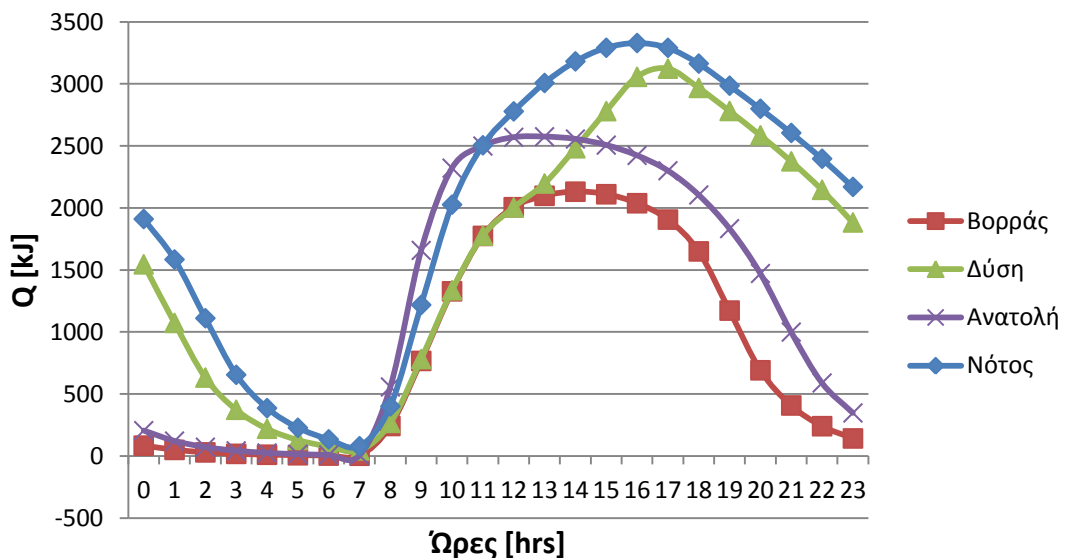


Διάγραμμα 5.2.5.9: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

➤ **Για 21^η Μαρτίου:**

Πίνακας 5.2.5.10: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 για κάθε ώρα της 21^{ης} Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα[hrs]	Q [kJ] Νότος	Q [kJ] Ανατολή	Q [kJ] Δύση	Q [kJ] Βορράς
7:00	79,02663	5,059116	45,0009	2,062738
8:00	400,3384	556,4761	267,1323	241,8221
9:00	1217,78	1657,608	781,3413	766,4221
10:00	2026,312	2320,565	1336,366	1327,572
11:00	2504,745	2498,827	1776,493	1774,177
12:00	2778,106	2569,216	2003,762	2005,331
13:00	3007,036	2573,956	2196,692	2097,457
14:00	3181,025	2555,488	2480,973	2130,607
15:00	3291,02	2506,345	2780,129	2110,125
16:00	3329,288	2422,881	3056,624	2037,567
17:00	3290,489	2299,851	3122,815	1905,744
18:00	3163,22	2104,149	2967,572	1649,33
19:00	2985,152	1832,891	2781,252	1172,285
20:00	2799,652	1471,097	2585,061	691,0097
21:00	2604,544	999,0004	2375,385	407,3194
22:00	2396,39	588,8661	2145,818	240,0966
23:00	2169,163	347,1103	1882,797	141,5262
24:00	1910,39	204,606	1545,231	83,42337
1:00	1584,156	120,6061	1072,793	49,17435
2:00	1110,504	71,0919	632,3633	28,98608
3:00	654,5922	41,9055	372,7499	17,086
4:00	385,8529	24,70142	219,7194	10,07143
5:00	227,443	14,56038	129,5148	5,93666
6:00	134,0675	8,582695	76,34317	3,499396



Διάγραμμα 5.2.5.10: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Όπως σημειώθηκε και στις παρατηρήσεις των διαγραμμάτων προσφερόμενης θερμότητας του RT20, έτσι και εδώ παρατηρούμε πως όλα τα παραπάνω διαγράμματα για την προσφερόμενη θερμότητα του RT27 έχουν σχεδόν την ίδια μορφή με τα αντίστοιχα διαγράμματα θερμοκρασίας του RT27, 5.2.3.6 έως 5.2.3.10, που όπως προαναφέρθηκε είναι λογικό από μαθηματικής πλευράς, αν κοιτάξουμε τη σχέση (5.2.5.4). Επιπλέον, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ενότητας 5.2.3 για το RT27, η θερμοκρασία του είναι υψηλότερη αυτής του δωματίου για κάθε ώρα, κάθε μήνα και για κάθε προσανατολισμό. Αυτό είναι λογικό, αφού από τη στιγμή που έχουμε υποθέσει μονίμως σταθερή θερμοκρασία στο δωμάτιο και μηδενική συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του PCM και του στρώματος μόνωσης και ταυτόχρονα το PCM θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του PCM θα διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα από τη θερμοκρασία δωματίου. Κατά συνέπεια, το RT27 μόνο προσδίδει θερμότητα στο χώρο, γεγονός που επιβεβαιώνεται και στα εν λόγω διαγράμματα 5.2.5.6. έως 5.2.5.10. Επιπλέον, παρατηρούμε για κάθε μία από τις τέσσερις καμπύλες όλων των παραπάνω διαγραμμάτων ότι το ποσό προσφερόμενης θερμότητας μειώνεται από τις 12 το βράδυ μέχρι τις 7:00-8:00 περίπου το πρωί, από τις 7:00-8:00 το πρωί και μέχρι τις ώρες γύρω από το μεσημέρι (αναλόγως του προσανατολισμού ποικίλλει η ακριβής ώρα) αυξάνεται, ενώ από εκεί και έπειτα μέχρι την ολοκλήρωση του 24ώρου έχει πάλι φθίνουσα πορεία. Αυτή η μεταβολή στην προσφερόμενη θερμότητα εξηγείται ως εξής: Στο χρονικό διάστημα 8 το πρωί μέχρι τις ώρες γύρω από το μεσημέρι, η θερμότητα που προσφέρει ολοένα αυξάνεται, αφού η διαφορά θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) αυξάνει κατ' απόλυτη τιμή, λόγω διέγερσης του RT27 από την ηλιακή ακτινοβολία G_T (γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του PCM). Κατόπιν και μέχρι τις 7 με 8 το πρωί, η διαφορά θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) μειώνεται κατ' απόλυτη τιμή, αφού πλέον δεν υφίσταται η διέγερση G_T (δηλαδή παύει να αυξάνει η θερμοκρασία του RT27) και έτσι η θερμότητα που προσφέρει στο χώρο ολοένα μειώνεται. Η ελάχιστη εμφανής μείωση της προσφερόμενης θερμότητας που παρατηρείται κατά το διάστημα 12 το βράδυ με 7-8 το πρωί για τον ανατολικό και κυρίως για το βόρειο προσανατολισμό, οφείλεται όπως είναι προφανές στην ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) κατά τις ώρες αυτές.

Από τους πίνακες και τα διαγράμματα για την προσδιδόμενη θερμότητα του RT27, εξάγουμε τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα που ισχύουν και για τους πέντε εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες. Έτσι, για κάθε μήνα παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές τα μεγαλύτερα ποσά θερμότητας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας προσφέρονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι νότιου προσανατολισμού, ενώ τα μικρότερα όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι βόρειος. Αυτό σχετίζεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του RT27 και κατ' επέκταση με την ολική ηλιακή ακτινοβολία G_T , όπου για νότιο προσανατολισμό συνυπάρχουν άμεση και διάχυτη ακτινοβολία σε ολόκληρο το 24ωρο, ενώ για βόρειο προσανατολισμό υφίσταται μόνο διάχυτη ακτινοβολία. Στην περίπτωση δυτικού τοίχου με υαλοπίνακα, τα προσφερόμενα ποσά θερμότητας είναι μεγαλύτερα από αυτά για ανατολικό τοίχο με υαλοπίνακα, για κάθε μήνα. Αναφορικά με τις μέγιστες τιμές προσφερόμενης θερμότητας, αυτές εμφανίζονται κατά τις ώρες μεγίστων θερμοκρασιών του RT27, δηλαδή για νότιο και δυτικό προσανατολισμό γύρω στις 16:00-17:00, για ανατολικό τοίχο μέγιστη προσφερόμενη θερμότητα εντοπίζουμε πριν το μεσημέρι, ενώ στην περίπτωση βόρειου προσανατολισμού γύρω στη 13:00. Γενικότερα, πρέπει να σημειώσουμε ότι τα διάφορα συμπεράσματα που μπορούμε να εξάγουμε από τα

διαγράμματα αυτά είναι όμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν για τα διαγράμματα θερμοκρασιών του RT27.

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα ανά τους πέντε χειμερινούς μήνες για το νότιο προσανατολισμό, παρατηρούμε πως η καμπύλη του Q πέφτει κατακόρυφα, δηλαδή αποκτά μικρότερη μέγιστη αλλά και μικρότερη ελάχιστη τιμή, καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται ξανά οι τιμές του και κατ' επέκταση η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή. Αντίστοιχα, κατά τον ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό του τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, παρατηρούμε ότι η καμπύλη του Q πέφτει κατακόρυφα καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Δεκέμβριο και αρχίζει να ανεβαίνει σταδιακά οδεύοντας από τον Ιανουάριο μέχρι και το Μάρτιο.

5.3 Βελτιωμένο μοντέλο προσομοίωσης της ηλιακής φόρτισης του τοίχου που φέρει PCM

Σε αυτήν την ενότητα, επιχειρούμε και πάλι, όπως στην ενότητα 5.2 τη μελέτη της συμπεριφοράς του PCM, δηλαδή τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου, την εύρεση του ποσοστού αξιοποίησής του και τον καθορισμό της ενεργειακής συνεισφοράς του στη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας και συνθηκών άνεσης εντός του ίδιου εξεταζόμενου χώρου. Ωστόσο, η μελέτη μας στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται με την εφαρμογή ενός βελτιωμένου μοντέλου, το οποίο βασίζεται στη χρήση ενός καινούριου μεγέθους που εισάγουμε για πρώτη φορά. Συγκεκριμένα, κάνουμε την πρωτοτυπία να εισάγουμε για πρώτη φορά το μέγεθος της «Εσωτερικής Θερμοκρασίας Ηλίου-Αέρος» (ή αλλιώς της «Ισοδύναμης Εσωτερικής Θερμοκρασίας»), κατ' αναλογία με την «Εξωτερική Θερμοκρασία Ηλίου-Αέρος» (ή «Ισοδύναμη Εξωτερική Θερμοκρασία») που έχει εισάγει η ASHRAE. Έτσι, όπως η «Ισοδύναμη Εξωτερική Θερμοκρασία» διευκολύνει τους υπολογισμούς, διότι μας απαλλάσσει από το να χρησιμοποιούμε χωριστά την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος, για τον ίδιο λόγο και με τον ίδιο ακριβώς τρόπο εισάγουμε την «Ισοδύναμη Εσωτερική Θερμοκρασία».

Σε αυτό το σημείο, υπενθυμίζουμε πως η μελέτη μας αφορά κατακόρυφο τοίχο που φέρει στρώμα υλικού αλλαγής φάσης και δέχεται ηλιακή ακτινοβολία διερχόμενη από υαλοπίνακα που βρίσκεται σε απέναντι κατακόρυφο τοίχο. Το εξεταζόμενο κτίριο-αίθουσα βρίσκεται εντός της Αθήνας, με διαστάσεις 10m(μήκος)×10m(πλάτος)×3m(ύψος) και ο τοίχος που φέρει στρώμα PCM είναι εσωτερικός, διαστάσεων 10m×3m. Στο εσωτερικό της υπό μελέτη αίθουσας θεωρούμε ότι η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή με τη βοήθεια θερμαντικών μέσων (θερμοστάτες, καλοριφέρ, κλιματιστικά κλπ). Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του υλικού αλλαγής φάσης πραγματοποιείται για κάθε ώρα του 24ώρου της 21^{ης} ημέρας Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Μαρτίου και για κάθε κύριο προσανατολισμό του απέναντι κατακόρυφου τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, δηλαδή για νότιο, ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το ποσοστό αξιοποίησης του υλικού αλλαγής φάσης και κατόπιν η ενεργειακή του συνεισφορά για κάθε μήνα και κάθε προσανατολισμό. Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε εν προκειμένω είναι το RT27.

5.3.1 Εισαγωγή μεγέθους «Εσωτερικής Θερμοκρασίας Ηλίου-Αέρος», T_e^i

Κατ' αναλογία με την «ισοδύναμη εξωτερική θερμοκρασία», η «ισοδύναμη εσωτερική θερμοκρασία», T_e^i , που εισάγουμε εδώ για πρώτη φορά, ορίζεται ως η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα, η οποία σε απουσία όλων των θερμικών συναλλαγών δι' ακτινοβολίας, δίδει σε μία επιφάνεια την ίδια εισερχόμενη θερμότητα με αυτήν που προκύπτει από τον πραγματικό συνδυασμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και της συναλλαγής θερμότητας δια συναγωγής με τον εσωτερικό αέρα.

Στην περίπτωση μας, η εισερχόμενη θερμότητα \dot{Q}/A σε kW/m^2 στον κατακόρυφο τοίχο με στρώμα PCM που δέχεται ηλιακή ακτινοβολία είναι:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \alpha \frac{G_T A_f}{A_w} + h_i (T_{\Delta\Omega M} - T_s) \cdot 10^{-3} [kW/m^2] \quad (5.3.1.1)$$

όπου

- α : ο συντελεστής απορρόφησης του κατακόρυφου τοίχου για την ηλιακή ακτινοβολία. Θεωρούμε σκουρόχρωμο τοίχο και συνεπώς $\alpha=0,88$.
- $G_T [kW/m^2]$: η ολική στιγμιαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου, έτσι όπως υπολογίστηκε στην ενότητα 5.1 αναλυτικά για κάθε ώρα της 21^{ης} ημέρας των πέντε χειμερινών μηνών και για κάθε προσανατολισμό
- $A_f [m^2]$: η επιφάνεια του υαλοπίνακα. Σε αυτήν την ενότητα θεωρούμε υαλοπίνακα διαστάσεων 3m(μήκος)×1,5m(ύψος), δηλαδή $A_f=4,5m^2$ (Στο επόμενο κεφάλαιο θα πραγματοποιήσουμε παραμετρική μελέτη ως προς την επιφάνεια του υαλοπίνακα)
- $A_w [m^2]$: η επιφάνεια του τοίχου που φέρει το στρώμα PCM, δηλαδή θα είναι $A_w = 10m \times 3m = 30m^2$
- h_i : είναι ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ του τοίχου και του εσωτερικού αέρα του χώρου και σύμφωνα με την ASHRAE είναι $h_i = 8 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- $T_{\Delta\Omega M} [^\circ C]$: η θερμοκρασία εντός του εξεταζόμενου χώρου, που όπως υποθέσαμε διατηρείται σταθερή και εδώ τη θεωρούμε $T_{\Delta\Omega M} = 20^\circ C$. (Στο επόμενο κεφάλαιο θα πραγματοποιήσουμε παραμετρική μελέτη και ως προς τη θερμοκρασία του χώρου)
- $T_s [^\circ C]$: η θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου και πιο συγκεκριμένα του σοβά, που αποτελεί το στρώμα που έρχεται σε επαφή με τον εσωτερικό αέρα.

Στην παραπάνω σχέση (5.3.1.1), θεωρήσαμε ότι όλη η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται από τον υαλοπίνακα, δηλαδή δε λάβαμε υπόψη τις απώλειες από ανακλάσεις κ.λ.π. Ο πρώτος όρος εκφράζει το ποσό της ηλιακής ισχύος, ανηγμένο ανά επιφάνεια τοίχου, που εισέρχεται από τον υαλοπίνακα και τελικώς απορροφάται από το σοβά και ο δεύτερος όρος εκφράζει την ισχύ ανά επιφάνεια τοίχου που λαμβάνει ο τοίχος λόγω συναγωγής. Ο πολλαπλασιασμός επί 10^{-3} έγινε για τη μετατροπή μονάδων από W σε kW.

Σύμφωνα λοιπόν με τον ορισμό που δόθηκε παραπάνω για την «ισοδύναμη εσωτερική θερμοκρασία», T_e^i , η θερμότητα \dot{Q}/A εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = h_i (T_e^i - T_s) \cdot 10^{-3} [kW/m^2] \quad (5.3.1.2)$$

Εξισώνοντας τις σχέσεις (5.3.1.1) και (5.3.1.2) προκύπτει:

$$\alpha \frac{G_{TAf}}{A_w} + h_i (T_{\Delta\Omega M} - T_s) \cdot 10^{-3} = h_i (T_e^i - T_s) \cdot 10^{-3} \quad (5.3.1.3)$$

$$\Rightarrow T_e^i = \frac{G_{TAf}}{A_w} \cdot \frac{\alpha}{h_i \cdot 10^{-3}} + T_{\Delta\Omega M} \quad (5.3.1.4)$$

5.3.2 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του RT27

Για την απλούστευση του προβλήματος κάναμε όμοιες παραδοχές με αυτές της περίπτωσης εφαρμογής του αρχικού μοντέλου. Έτσι, θεωρούμε ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό της εξεταζόμενης αίθουσας διατηρείται σταθερή μέσω της χρήσης πηγών θερμότητας, όπως κλιματιστικά συστήματα, θερμαντικά σώματα κλπ., στο υλικό αλλαγής φάσης επικρατεί παντού ενιαία και ομοιόμορφη θερμοκρασία, διότι δεν λαμβάνουμε υπόψη τη θερμική αγωγιμότητα του PCM, ενώ μεταξύ του στρώματος του PCM και της μόνωσης θεωρήσαμε πως δεν συναλλάσσεται θερμότητα. Τέλος, υποθέτουμε σταθερές απώλειες εντός του χώρου μελέτης μας, οι οποίες συνεπάγονται σταθερή απαιτούμενη ισχύ για την επίτευξη συνθηκών άνεσης και σταθερής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του χώρου. Για το βελτιωμένο μοντέλο λοιπόν, όπου χρησιμοποιείται το νεοεισαχθέν μέγεθος «ισοδύναμη εσωτερική θερμοκρασία», το υλικό αλλαγής φάσης λαμβάνει θερμότητα με αγωγή από την εξωτερική επιφάνεια του τοίχου και ο ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM είναι ο ακόλουθος:

$$U_i A_w \left(T_e^i - \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \right) \cdot 3600 = m_{PCM} \cdot C_{p\epsilon f f} \cdot (T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\alpha\rho\chi}) \quad (5.3.2.1)$$

όπου

- $U_i [kW/(m^2 \cdot ^\circ C)]$: ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{d}{k}$$

και έχει ευρεθεί από την ενότητα 5.2.1 ίσος με

$$U_i = 7,06 \cdot 10^{-3} kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$$

- $A_w [m^2]$: η επιφάνεια του τοίχου που φέρει το στρώμα PCM, δηλαδή $A_w = 10m \times 3m = 30m^2$
- $T_e^i [^\circ C]$: η «ισοδύναμη εσωτερική θερμοκρασία», έτσι όπως ορίζεται από τη σχέση (5.3.1.4)
- $T_{\alpha\rho\chi} [^\circ C]$: η θερμοκρασία του PCM στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου
- $T_{\tau\epsilon\lambda} [^\circ C]$: η θερμοκρασία του PCM στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου
- $m_{PCM} [kg]$: η μάζα του PCM. Για RT27, όπως έχουμε ήδη υπολογίσει σε προηγούμενη ενότητα, είναι $m_{PCM} = \rho_{PCM} \cdot V_{PCM} = 820 \times 0,9 = 738kg$
- $C_{p\epsilon f f}$: η ενεργός θερμοχωρητικότητα του RT27

5.3.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας του RT27 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου

Εφαρμόζοντας τον ισολογισμό ενέργειας στο στρώμα του RT27 μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του PCM στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου. Η διαδικασία υπολογισμού της θερμοκρασίας του PCM θα πραγματοποιηθεί, όπως και στην ενότητα 5.2.3, για κάθε ώρα της 21^{ης} ημέρας Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό του τοίχου που φέρει υαλοπίνακα και βρίσκεται απέναντι από τον τοίχο με το υλικό αλλαγής φάσης. Επομένως, θα έχουμε:

$$\begin{aligned}
 U_i A_w \left(T_e^i - \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \right) \cdot 3600 &= m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot (T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\alpha\rho\chi}) \\
 \Rightarrow m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\tau\epsilon\lambda} + U_i \cdot A_w \cdot \frac{T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \cdot 3600 &= \\
 = U_i \cdot A_w \cdot T_e^i \cdot 3600 - U_i \cdot A_w \cdot \frac{T_{\alpha\rho\chi}}{2} \cdot 3600 + m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\alpha\rho\chi} & \\
 \Rightarrow T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{U_i \cdot A_w \cdot T_e^i \cdot 3600 - U_i \cdot A_w \cdot T_{\alpha\rho\chi} \cdot 1800 + m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\alpha\rho\chi}}{m_{PCM} \cdot C_{peff} + U_i \cdot A_w \cdot 1800} & \quad (5.3.3.1)
 \end{aligned}$$

Η επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού του $T_{\tau\epsilon\lambda}$ πραγματοποιείται όπως ακριβώς περιγράψαμε και εργαστήκαμε στην ενότητα 5.2.3.

Υπενθυμίζουμε τις τιμές των μεγεθών που εμπεριέχονται στη σχέση υπολογισμού του $T_{\tau\epsilon\lambda}$ για το RT27:

$$U_i = 7,06 \cdot 10^{-3} kW / (m^2 \cdot ^\circ C)$$

$$A_w = 30 m^2$$

$$T_{\Delta\Omega M} = 20^\circ C$$

$$m_{PCM} = 738 kg$$

Επιπλέον, για τη σχέση (5.3.1.4) που δίνει την «ισοδύναμη εσωτερική θερμοκρασία» θα έχουμε:

$$\begin{aligned}
 T_e^i &= \frac{G_T A_f}{A_w} \cdot \frac{a}{h_i \cdot 10^{-3}} + T_{\Delta\Omega M} \Rightarrow \\
 \Rightarrow T_e^i &= \frac{4,5 G_T}{30} \cdot \frac{0,88}{8 \cdot 10^{-3}} + 20 \\
 \Rightarrow T_e^i &= 16,5 G_T + 20 [^\circ C] \quad (5.3.3.2)
 \end{aligned}$$

Αρα, με βάση τα παραπάνω στοιχεία η σχέση υπολογισμού του $T_{\tau\epsilon\lambda}$, (5.3.3.1) γίνεται:

$$T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{12580,92 G_T - 381,24 T_{\alpha\rho\chi} + 738 C_{peff} T_{\alpha\rho\chi} + 15249,6}{738 C_{peff} + 381,24} \quad (5.3.3.3)$$

όπου το C_{peff} δίνεται από τις σχέσεις (5.2.2.9) έως (5.2.2.12), δηλαδή:

Για $T \leq 22^{\circ}\text{C}$:

$$C_{peff} = C_{ps} = 2 \text{ kJ}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})$$

Για $22^{\circ}\text{C} < T \leq 26,5^{\circ}\text{C}$:

$$C_{peff} = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = 7,378 \cdot T - 160,316 \text{ [kJ}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})]$$

Για $26,5^{\circ}\text{C} < T \leq 31^{\circ}\text{C}$:

$$C_{peff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = -7,244 \cdot T + 226,87 \text{ [kJ}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})]$$

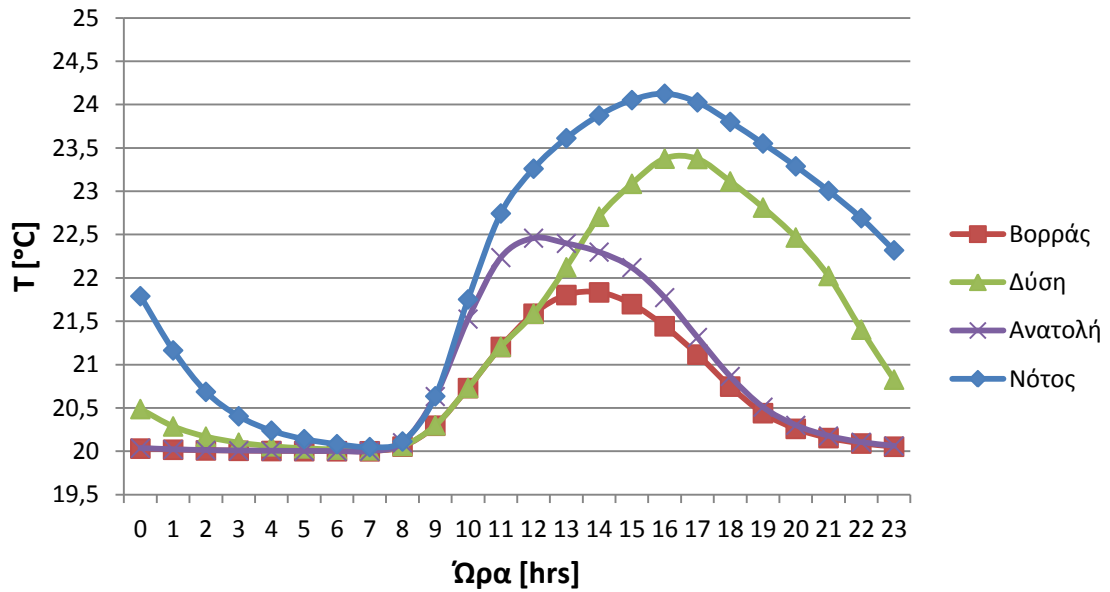
Για $T > 31^{\circ}\text{C}$:

$$C_{peff} = C_{pl} = 2,3 \text{ kJ}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})$$

όπου T στις εξισώσεις του C_{peff} θεωρήσαμε τη θερμοκρασία του PCM, $T_{αρχ}$, στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου.

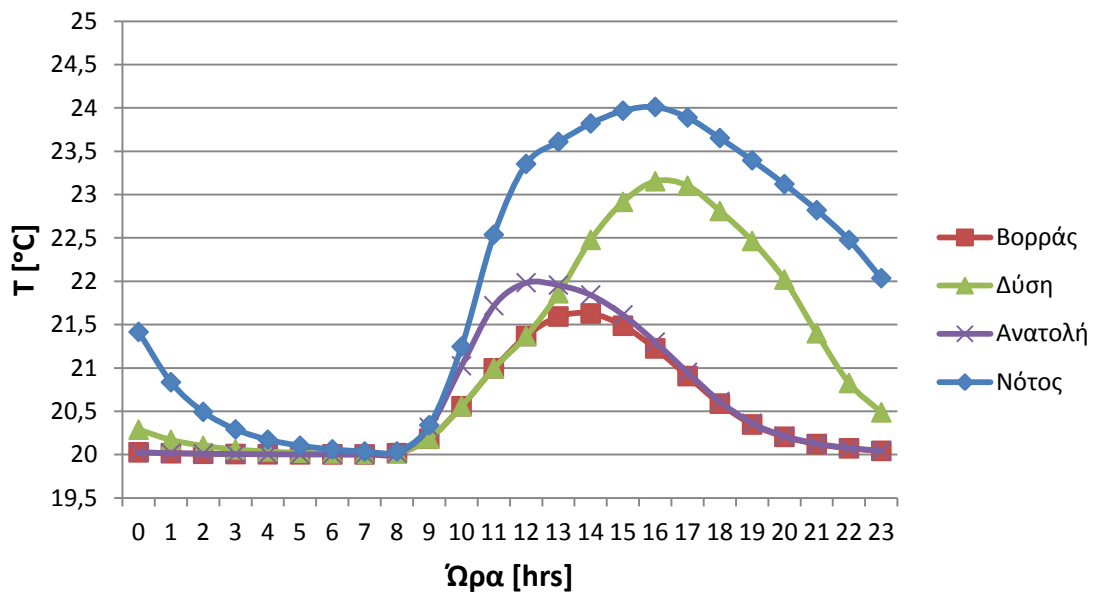
Παρακάτω, παρουσιάζονται διαγραμματικά οι θερμοκρασίες που επικρατούν στο στρώμα του RT27 συναρτήσει των ωρών της εκάστοτε ημέρας, έτσι όπως υπολογίστηκαν από τη σχέση $T_{PCM} = \frac{T_{αρχ} + T_{τελ}}{2}$ για κάθε ώρα. Τα διαγράμματα οργανώθηκαν και πάλι με βάση το μήνα.

➤ **Για 21^η Νοεμβρίου:**



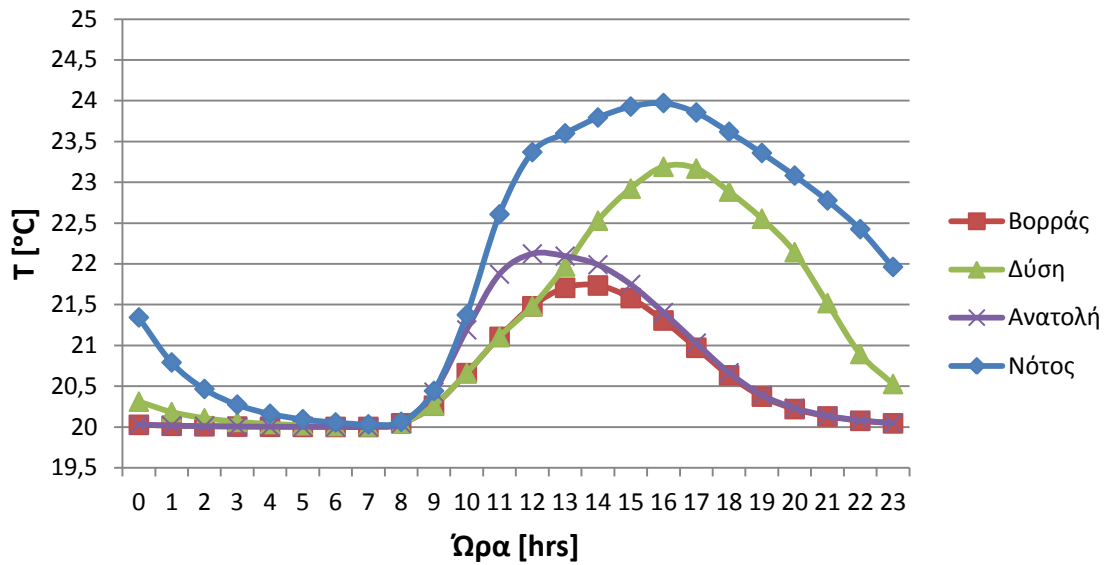
Διάγραμμα 5.3.3.1: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα, με χρήση του βελτιωμένου μοντέλου

➤ **Για 21^η Δεκεμβρίου:**



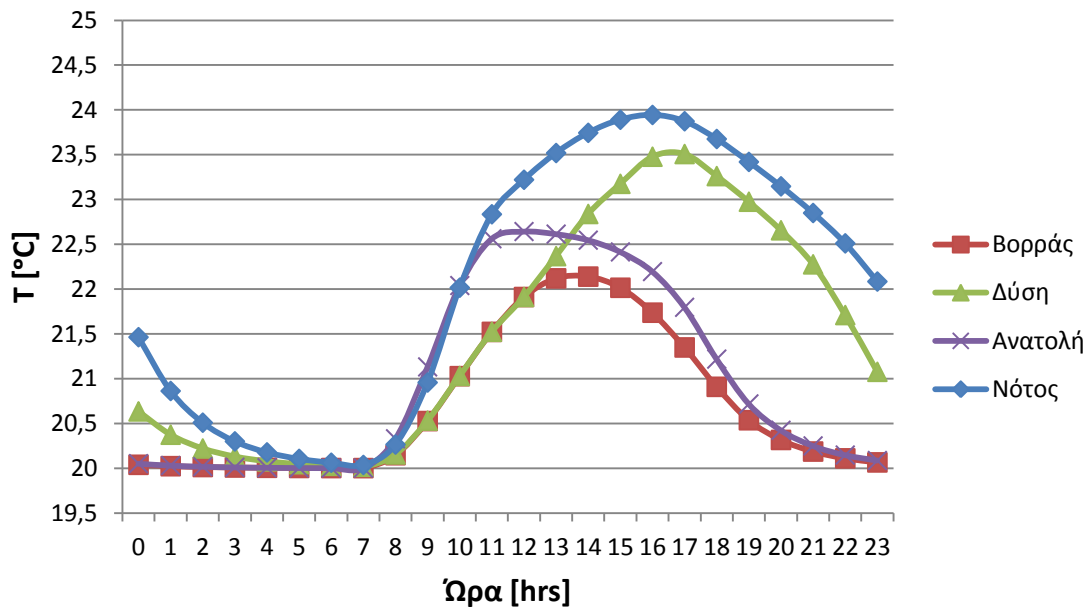
Διάγραμμα 5.3.3.2: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα, με χρήση του βελτιωμένου μοντέλου

➤ Για 21^η Ιανουαρίου:



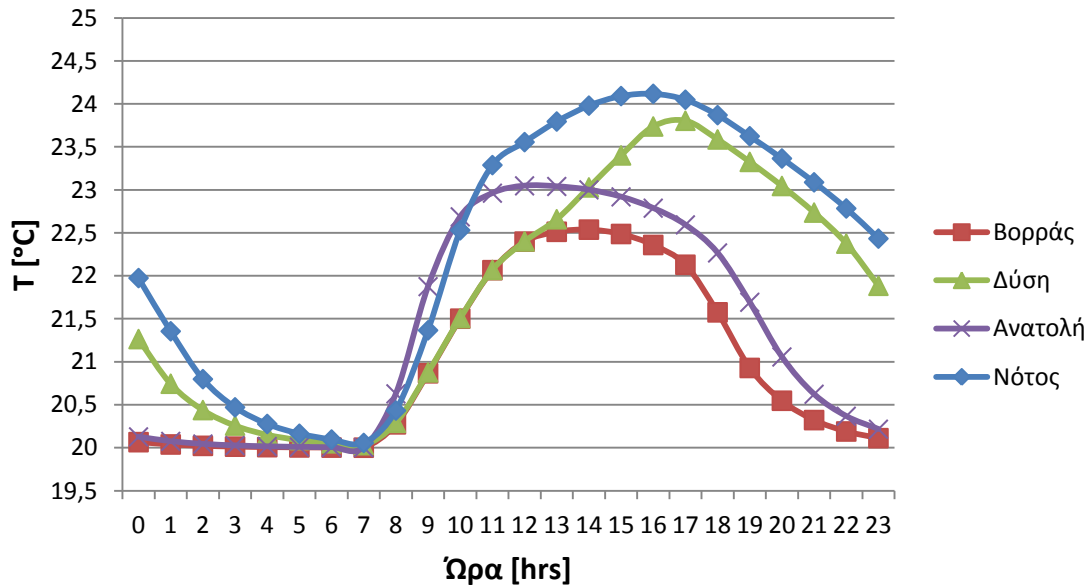
Διάγραμμα 5.3.3.3: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα, με χρήση του βελτιωμένου μοντέλου

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου:



Διάγραμμα 5.3.3.4: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα, με χρήση του βελτιωμένου μοντέλου

➤ Για 21^η Μαρτίου:



Διάγραμμα 5.3.3.5: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου για κάθε προσανατολισμό του υαλοπίνακα, με χρήση του βελτιωμένου μοντέλου

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Η μορφή των παραπάνω καμπυλών θερμοκρασίας του RT27 που προέκυψαν με χρήση του βελτιωμένου μοντέλου μοιάζει με αυτήν των καμπυλών θερμοκρασίας RT27 με χρήση του αρχικού μοντέλου, κάτι που εκ πρώτης όψεως υποδηλώνει πως το βελτιωμένο μοντέλο είναι πιθανόν ορθό. Παράλληλα, όπως παρατηρήσαμε και σε όλα τα μέχρι τώρα διαγράμματα θερμοκρασιών, έτσι και εδώ βλέπουμε ότι η πρώτη τιμή της θερμοκρασίας και η τελευταία τιμή της θερμοκρασίας είναι σχεδόν ίδιες, γεγονός που αποδεικνύει και την ορθότητα των διαγραμμάτων. Επίσης, οι καμπύλες για κάθε μήνα και για κάθε προσανατολισμό ξεκινούν με θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτήν που επικρατεί στο χώρο ($T_{\Delta\Omega M}=20^{\circ}\text{C}$), και πιο συγκεκριμένα η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ PCM και δωματίου είναι εμφανής στις καμπύλες νοτίου και δυτικού προσανατολισμού και ελάχιστη στις καμπύλες ανατολικού και κυρίως βόρειου προσανατολισμού. Επομένως, αντιλαμβανόμαστε ότι το RT27 δίνει θερμότητα στο δωμάτιο με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας του, η οποία παρατηρείται από τις 12 το βράδυ (αρχή του άξονα του χρόνου) μέχρι τις 7:00-8:00 το πρωί, όπου πλέον η θερμοκρασία του είναι ελάχιστη μεγαλύτερη από αυτήν του δωματίου. Από τις 7:00-8:00 το πρωί και έπειτα, όπου υφίσταται ολική ακτινοβολία λόγω εμφάνισης του ήλιου, το υλικό αλλαγής φάσης συνεχίζει να προσφέρει θερμότητα, αφού η θερμοκρασία του εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη από αυτήν της αίθουσας. Ωστόσο, παρά την πρόσδοση θερμότητας από το PCM στην αίθουσα, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του PCM από τις 8 περίπου το πρωί μέχρι και τις ώρες γύρω από το μεσημέρι. Αυτό οφείλεται στα πολύ μεγαλύτερα ποσά θερμότητας που λαμβάνει το PCM από την ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με αυτά που δίνει στο χώρο. Από τις μεσημεριανές ώρες και μέχρι την ολοκλήρωση του 24ώρου, η ολική ακτινοβολία G_T μειώνεται αρκετά και παύει πλέον να υφίσταται.

Έτσι, η θερμοκρασία του PCM αρχίζει να φθίνει, διότι συνεχίζει να προσδίδει θερμότητα στο χώρο.

Από τα διαγράμματα για τη θερμοκρασία του RT27, εξάγουμε τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα που ισχύουν και για τους πέντε εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες. Έτσι, για κάθε μήνα παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές οι υψηλότερες θερμοκρασίες καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας αναπτύσσονται και πάλι, όπως ήταν αναμενόμενο, όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι νότιου προσανατολισμού. Αντίθετα, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι βόρειος. Αυτό όπως έχει ήδη αναφερθεί, οφείλεται στην ολική στιγμιαία ακτινοβολία, που για νότιο προσανατολισμό συνυπάρχουν άμεση και διάχυτη ακτινοβολία σε ολόκληρο το 24ωρο, ενώ για βόρειο προσανατολισμό υφίσταται μόνο διάχυτη ακτινοβολία. Επίσης, στην περίπτωση νοτίου προσανατολισμού η θερμοκρασία του PCM μεγιστοποιείται γύρω στις 16:00, ενώ στην περίπτωση βορείου προσανατολισμού γύρω στη 14:00. Συγκρίνοντας τώρα το δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό παρατηρούμε ότι από τις 7:00 μέχρι τη 13:00 για ανατολικό προσανατολισμό οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες από αυτές που αναπτύσσονται για δυτικό, ενώ από τη 13:00 και έπειτα οι θερμοκρασίες για δυτικό υπερσχύουν και μάλιστα κατά πολύ περισσότερο. Αυτό κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στο ότι για ανατολικό προσανατολισμό η ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις πρωινές ώρες είναι σχετικά εξασθενημένη (εν συγκρίσει με αυτήν για δυτικό τοίχο κατά τις απογευματινές ώρες) λόγω μεγάλης περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς. Για δυτικό τοίχο η θερμοκρασία μεγιστοποιείται μετά το μεσημέρι, γύρω στις 16:00 (λογικό αφού τότε υπάρχει περισσότερη ολική ακτινοβολία), ενώ για ανατολικό τοίχο το μέγιστο της θερμοκρασίας παρατηρείται πριν το μεσημέρι (επίσης λογικό αφού στο διάστημα αυτό προσπίπτει περισσότερη ολική ακτινοβολία). Συνεπώς, στην περίπτωση δυτικού προσανατολισμού τα ενεργειακά αποθέματα του PCM δεν προλαβαίνουν να μειωθούν πολύ (μειώνονται λόγω πρόσδοσης θερμότητας) σε σχέση με την περίπτωση ανατολικού τοίχου και για το λόγο αυτό «περισσεύει» θερμότητα στο υλικό αλλαγής φάσης, ώστε τις πρωινές ώρες να έχει υψηλότερη θερμοκρασία απ' ό τι στην περίπτωση ανατολικού προσανατολισμού. Έτσι, εξηγείται το γεγονός ότι οι καμπύλες δυτικού προσανατολισμού ξεκινούν ψηλότερα από τις αντίστοιχες ανατολικού προσανατολισμού. Η ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε μήνα και κάθε προσανατολισμό εμφανίζεται εντός του διαστήματος 7:00-9:00 το πρωί και σε κάθε περίπτωση είναι ελάχιστα μεγαλύτερη ή ίση με τη θερμοκρασία του εξεταζόμενου χώρου ($T_{\Delta\Omega M}=20^{\circ}\text{C}$). Παρατηρώντας τα διαγράμματα, εντοπίζουμε ταύτιση των τιμών της θερμοκρασίας του RT27 για δυτικό και βόρειο προσανατολισμό στο διάστημα 7:00-12:00, λόγω ίδιας διάχυτης ακτινοβολίας στους δύο προσανατολισμούς κατά το διάστημα αυτό.

Τέλος, κάνοντας σύγκριση των διαγραμμάτων ανά τους πέντε χειμερινούς μήνες για το νότιο προσανατολισμό, παρατηρούμε πως η καμπύλη του T πέφτει κατακόρυφα, δηλαδή αποκτά μικρότερη μέγιστη αλλά και μικρότερη ελάχιστη τιμή, καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται ξανά οι τιμές της T και κατ' επέκταση η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της. Αυτό είναι λογικό δεδομένου ότι όσο οδεύουμε χρονικά προς το κέντρο του χειμώνα, η διέγερση (G_T) μειώνεται και αρχίζει πάλι να αυξάνει όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν. Αντίστοιχα, κατά τον ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό του τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, παρατηρούμε ότι η καμπύλη του T πέφτει κατακόρυφα καθώς προχωράμε από το

Νοέμβριο μέχρι και τον Δεκέμβριο και αρχίζει να ανεβαίνει σταδιακά οδεύοντας από τον Ιανουάριο μέχρι και το Μάρτιο.

5.3.4 Σύγκριση αρχικού και βελτιωμένου μοντέλου προσομοίωσης ως προς τις θερμοκρασίες του PCM

Θέλοντας να βεβαιώσουμε την ορθότητα του βελτιωμένου μοντέλου που εφαρμόσαμε παραπάνω, πραγματοποιήσαμε σύγκριση των τιμών της θερμοκρασίας του PCM που προέκυψαν από τα δύο μοντέλα (το αρχικό και το βελτιωμένο μοντέλο). Στο αρχικό μοντέλο ο συντελεστής με τον οποίο πολλαπλασιάστηκε η ολική στιγμιαία ακτινοβολία G_T ισούταν με 0,9 και αφορούσε, όπως έχουμε προαναφέρει, τις απώλειες λόγω ανάκλασης, απορρόφησης από υαλοπίνακα, αέρος κ.λ.π., ενώ στο βελτιωμένο μοντέλο ο συντελεστής α (με τον οποίο επίσης πολλαπλασιάστηκε το G_T μέσα στη σχέση της «ισοδύναμης εσωτερικής θερμοκρασίας») ισούταν με 0,88 και αποτελούσε το ποσοστό της G_T που απορροφάται από το σοβά του τοίχου που φέρει το PCM, χωρίς να ληφθούν υπόψη τυχόν απώλειες από υαλοπίνακα, αέρα κ.λ.π. Για να είναι λοιπόν συγκρίσιμες οι θερμοκρασίες μεταξύ των δύο μοντέλων, υπολογίσαμε με το βελτιωμένο μοντέλο εκ νέου τη θερμοκρασία $T_{\tau\epsilon\lambda}$ του RT27, θέτοντας αυτή τη φορά όπου α το συντελεστή 0,9. Παρακάτω, ενδεικτικά παρουσιάζονται διαγραμματικά οι θερμοκρασίες T_{PCM} ($= \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2}$) και από τα δύο μοντέλα για το RT27 για την περίπτωση υαλοπίνακα νοτίου προσανατολισμού για κάθε χειμερινό μήνα, καθώς επίσης και οι θερμοκρασίες T_{PCM} ($= \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2}$) από τα δύο μοντέλα για το RT20 για υαλοπίνακα νοτίου προσανατολισμού κατά την 21^η Νοεμβρίου.

➤ Για το RT27:

Η σχέση της «ισοδύναμης εσωτερικής θερμοκρασίας» γίνεται:

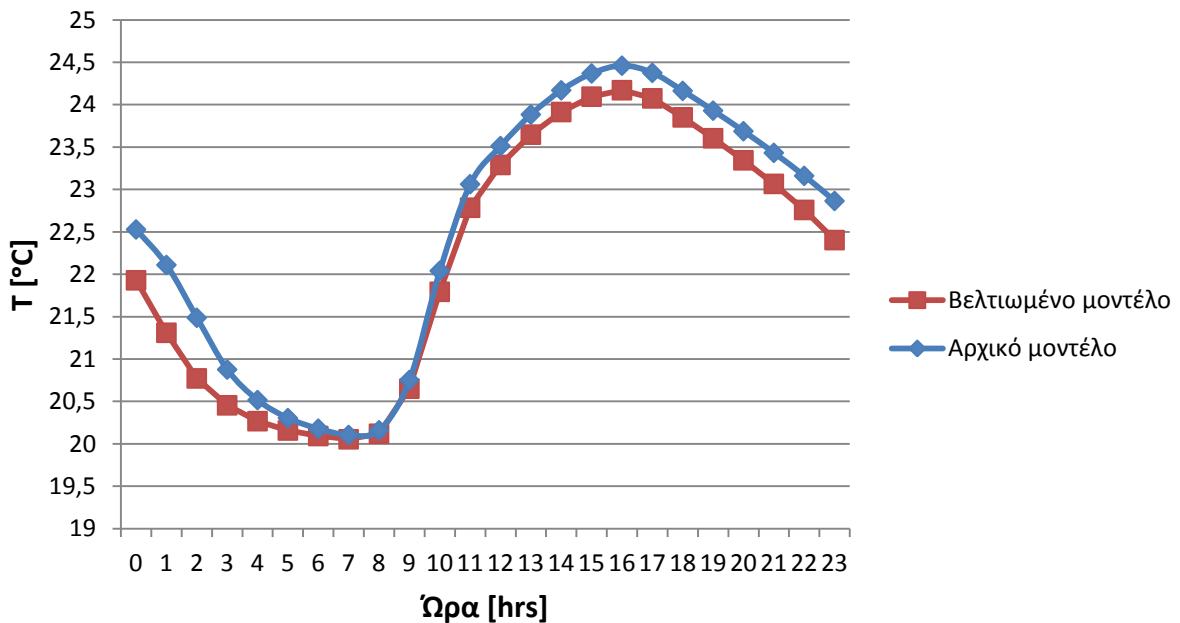
$$\begin{aligned} T_e^i &= \frac{G_T A_f}{A_w} \cdot \frac{\alpha}{h_i \cdot 10^{-3}} + T_{\Delta\Omega M} \Rightarrow \\ &\Rightarrow T_e^i = \frac{4,5 G_T}{30} \cdot \frac{0,9}{8 \cdot 10^{-3}} + 20 \\ &\Rightarrow T_e^i = 16,875 G_T + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned} \quad (5.3.4.1)$$

και επομένως η θερμοκρασία του RT27 δίνεται από τον τύπο:

$$T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{12866,85 G_T - 381,24 T_{\alpha\rho\chi} + 738 C_{\text{reff}} T_{\alpha\rho\chi} + 15249,6}{738 C_{\text{reff}} + 381,24} \quad (5.3.4.2)$$

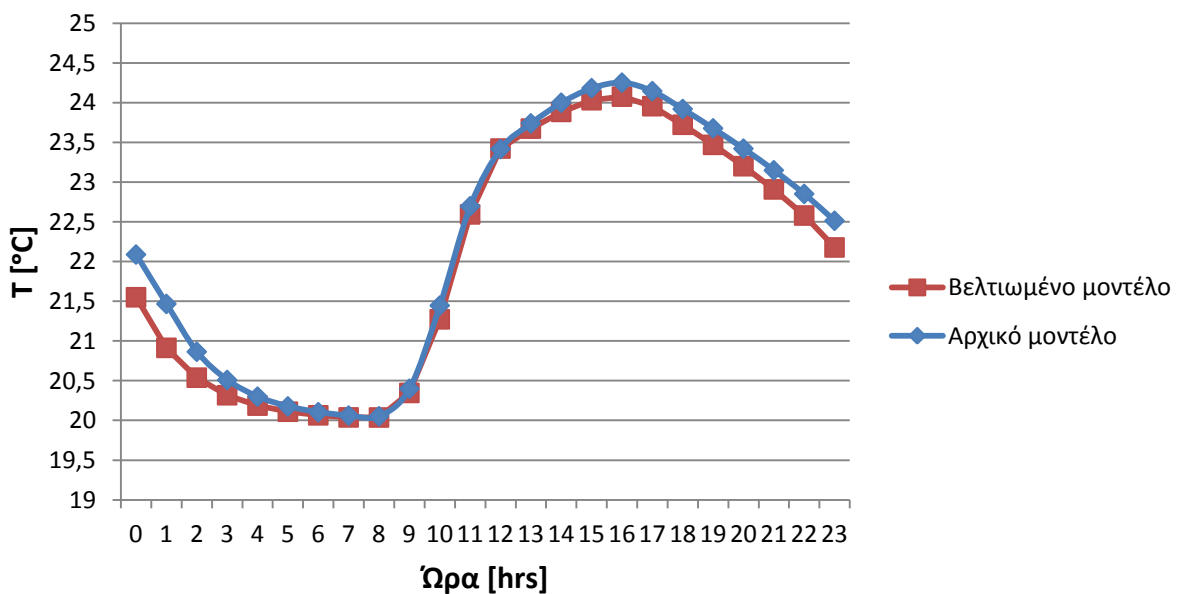
Έτσι, υπολογίζοντας με την γνωστή διαδικασία τις $T_{\tau\epsilon\lambda}$ και $T_{\alpha\rho\chi}$ για κάθε ώρα, βρίσκουμε τη $T_{PCM} = \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2}$ για κάθε ώρα και επομένως προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα.

➤ **Για 21^η Νοεμβρίου:**



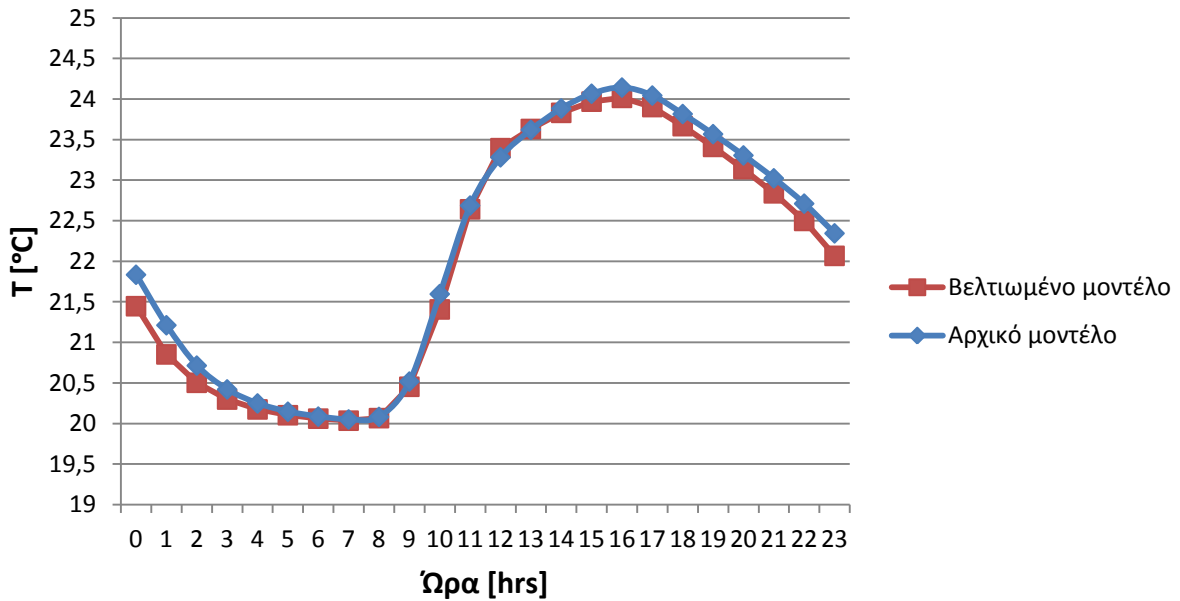
Διάγραμμα 5.3.4.1: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου για νότιο προσανατολισμό του υαλοπίνακα, με χρήση αρχικού και βελτιωμένου μοντέλου

➤ **Για 21^η Δεκεμβρίου:**



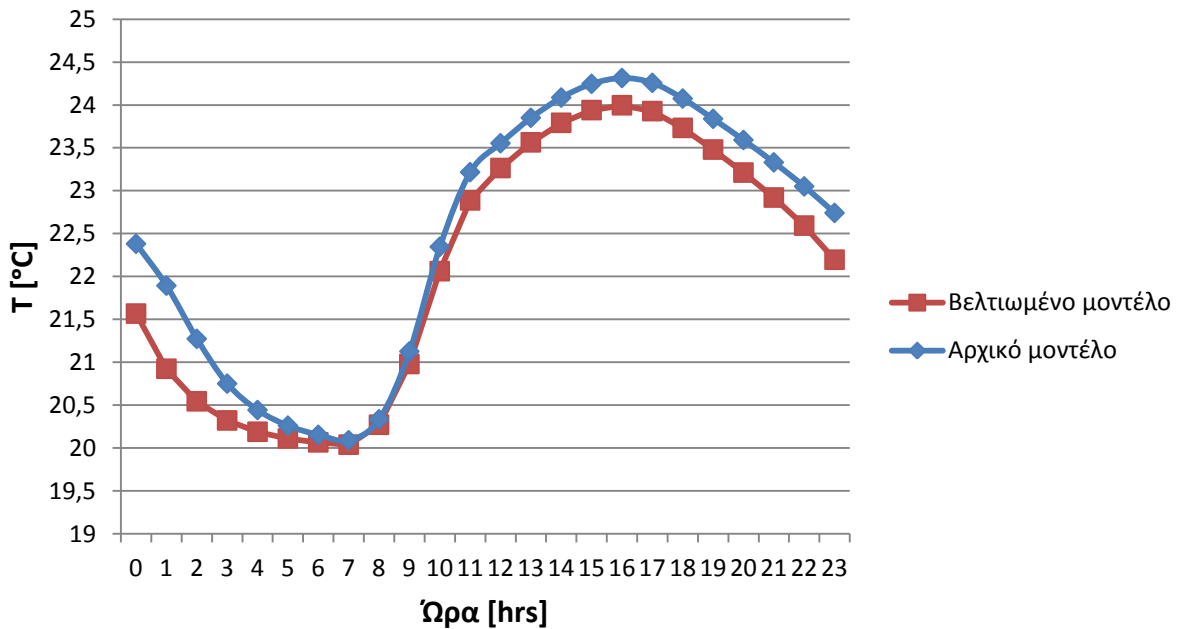
Διάγραμμα 5.3.4.2: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου για νότιο προσανατολισμό του υαλοπίνακα, με χρήση αρχικού και βελτιωμένου μοντέλου

➤ **Για 21^η Ιανουαρίου:**



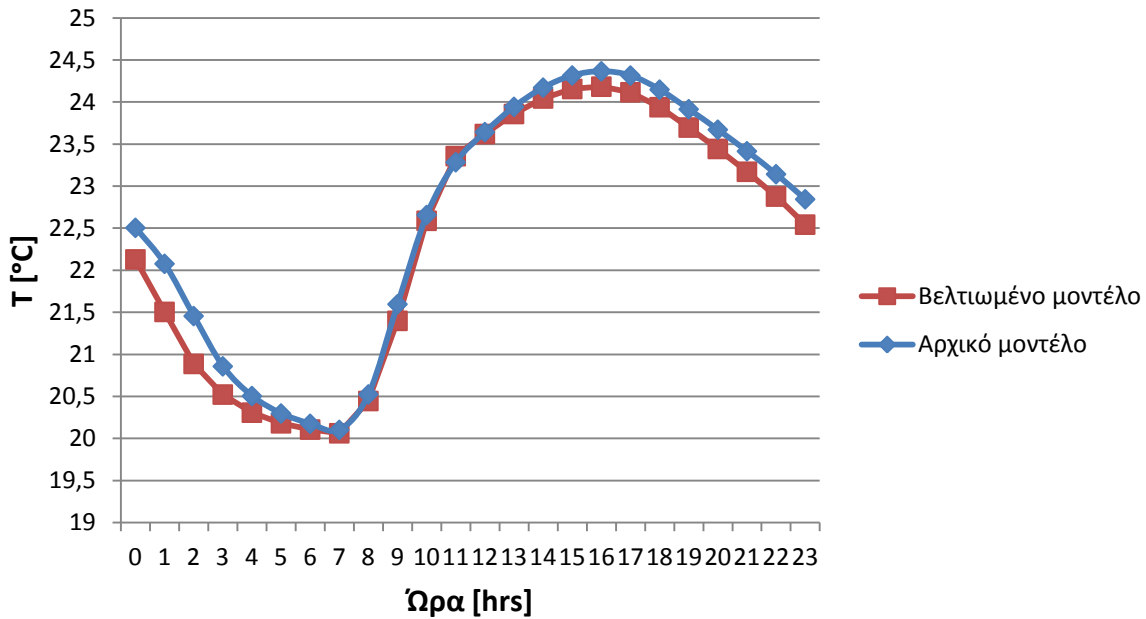
Διάγραμμα 5.3.4.3: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου για νότιο προσανατολισμό του υαλοπίνακα, με χρήση αρχικού και βελτιωμένου μοντέλου

➤ **Για 21^η Φεβρουαρίου:**



Διάγραμμα 5.3.4.4: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου για νότιο προσανατολισμό του υαλοπίνακα, με χρήση αρχικού και βελτιωμένου μοντέλου

➤ Για 21^η Μαρτίου:



Διάγραμμα 5.3.4.5: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου για νότιο προσανατολισμό του υαλοπίνακα, με χρήση αρχικού και βελτιωμένου μοντέλου

➤ Για το RT20:

Η σχέση της «ισοδύναμης εσωτερικής θερμοκρασίας» γίνεται:

$$T_e^i = \frac{G_T A_f}{A_w} \cdot \frac{a}{h_i \cdot 10^{-3}} + T_{\Delta\Omega M} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_e^i = \frac{4,5G_T}{30} \cdot \frac{0,9}{8 \cdot 10^{-3}} + 20$$

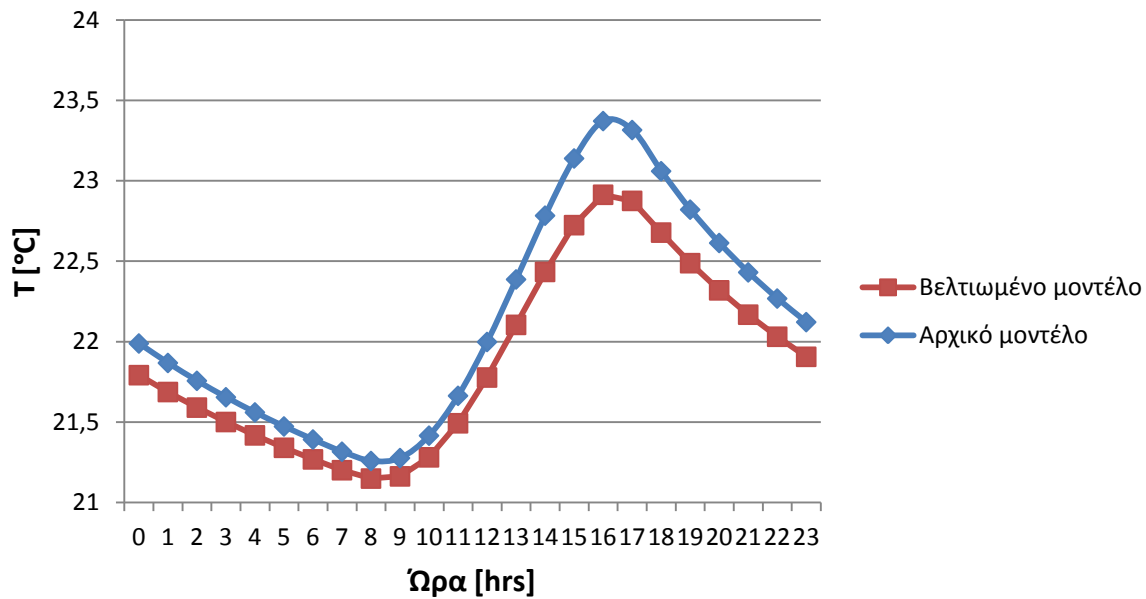
$$\Rightarrow T_e^i = 16,875G_T + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.3.4.3)$$

και επομένως η θερμοκρασία του RT20 δίνεται από τον τύπο:

$$T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{12866,85G_T - 381,24T_{\alpha\rho\chi} + 742,5C_{p\epsilon f f}T_{\alpha\rho\chi} + 15249,6}{742,5C_{p\epsilon f f} + 381,24} \quad (5.3.4.4)$$

Ομοίως, υπολογίζοντας με την γνωστή διαδικασία τις $T_{\tau\epsilon\lambda}$ και $T_{\alpha\rho\chi}$ για κάθε ώρα, βρίσκουμε τη $T_{PCM} = \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2}$ για κάθε ώρα και επομένως προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.

➤ Για 21^η Νοεμβρίου:



Διάγραμμα 5.3.4.6: Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου για νότιο προσανατολισμό του υαλοπίνακα, με χρήση αρχικού και βελτιωμένου μοντέλου

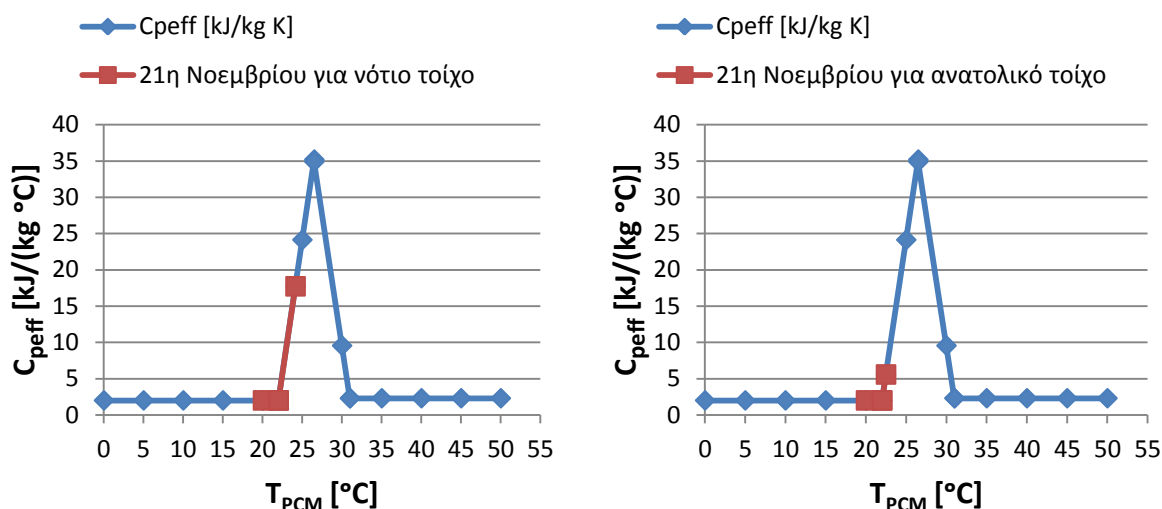
Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Σε κάθε ένα από τα παραπάνω διαγράμματα τόσο για το RT27 όσο και για το RT20 παρατηρούμε πως οι τιμές της θερμοκρασίας που προέκυψαν με το βελτιωμένο μοντέλο είναι πολύ κοντά (ελάχιστα μικρότερες) στις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν με το αρχικό μοντέλο. Η ελάχιστη αυτή διαφορά, η οποία παρατηρείται στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο, είναι λογική και αναμενόμενη. Συμπερασματικά, τα παραπάνω διαγράμματα επιβεβαιώνουν την ορθότητα του βελτιωμένου μοντέλου που χρησιμοποιήσαμε.

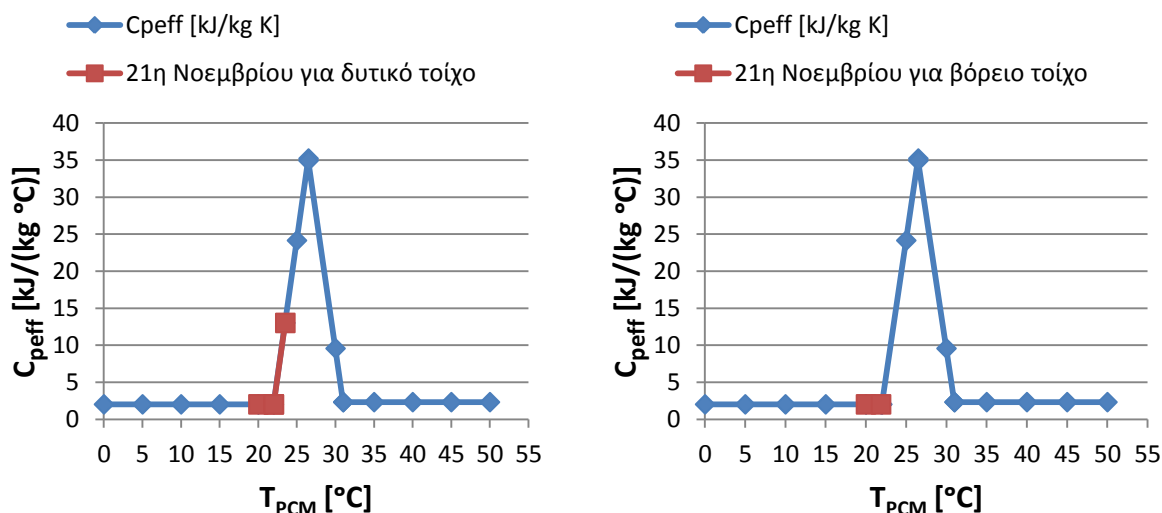
5.3.5 Ποσοστό αξιοποίησης του RT27

Σε αυτήν την παράγραφο παρατίθενται διαγράμματα με την περιοχή λειτουργίας του RT27, δηλαδή το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης που καλύπτει το συγκεκριμένο PCM για κάθε μήνα και κάθε προσανατολισμό, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του βελτιωμένου μοντέλου.

➤ **Για 21^η Νοεμβρίου:**

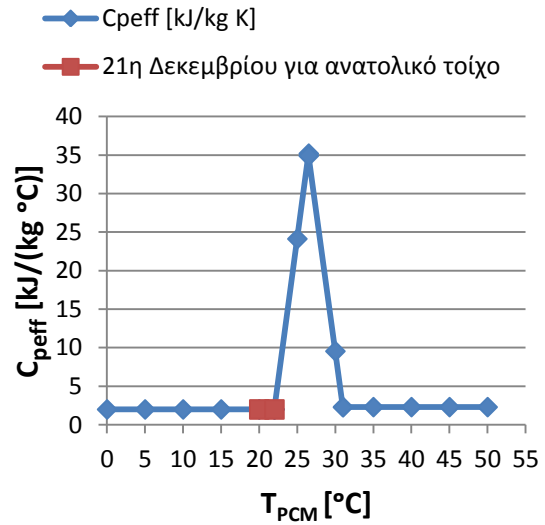
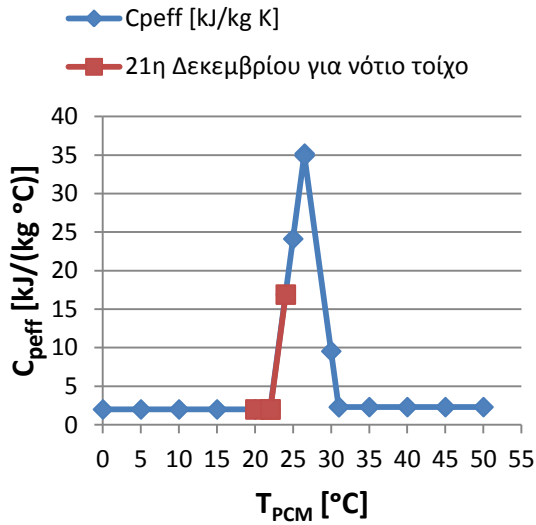


Διάγραμμα 5.3.5.1: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο(αριστερά) και ανατολικό τοίχο(δεξιά), με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

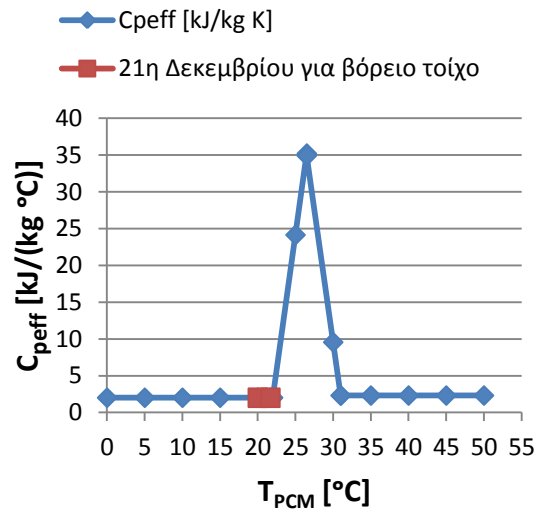
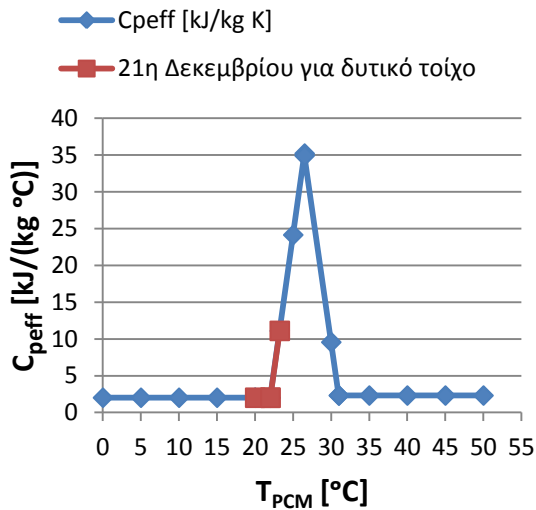


Διάγραμμα 5.3.5.2: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο(αριστερά) και βόρειο τοίχο(δεξιά), με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου:

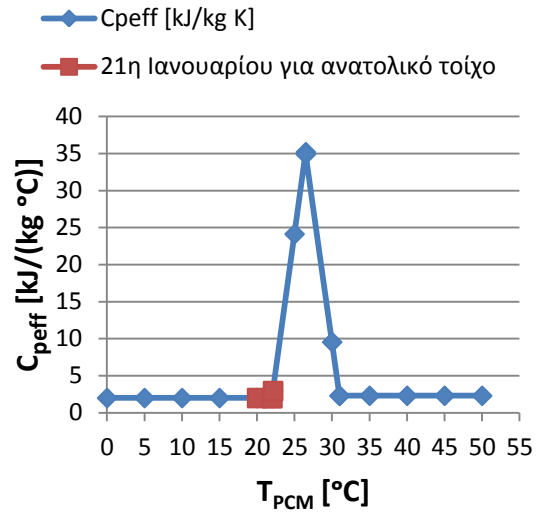
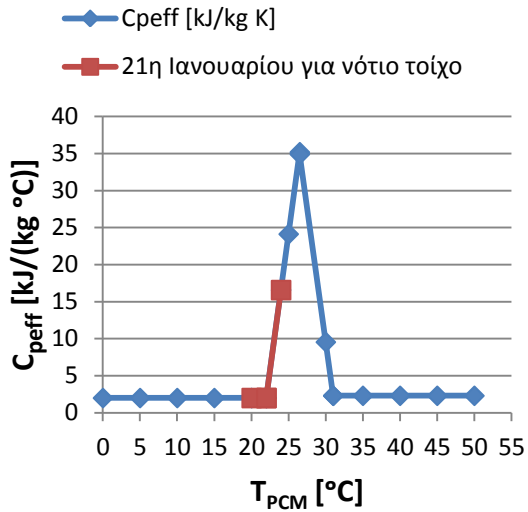


Διάγραμμα 5.3.5.3: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο (αριστερά) και ανατολικό τοίχο (δεξιά), με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

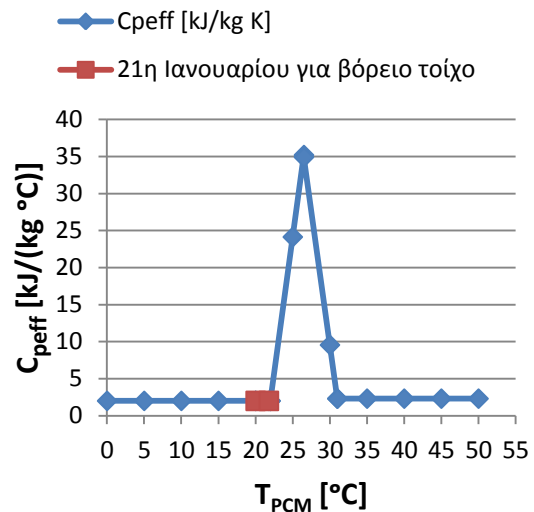
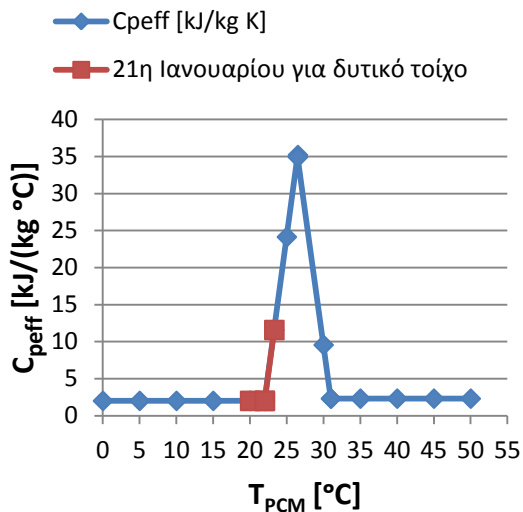


Διάγραμμα 5.3.5.4: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο (αριστερά) και βόρειο τοίχο (δεξιά), με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

➤ Για 21^η Ιανουαρίου:

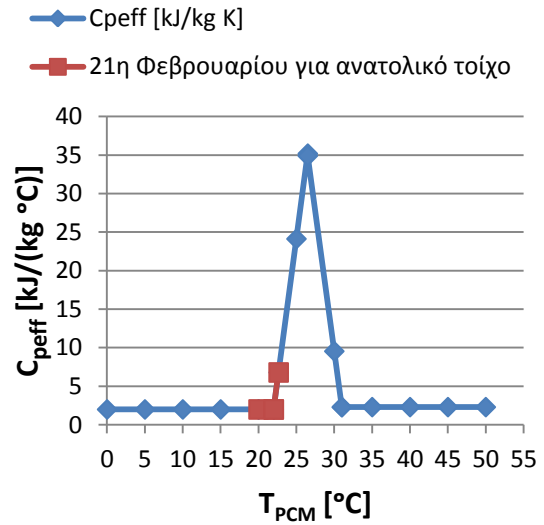
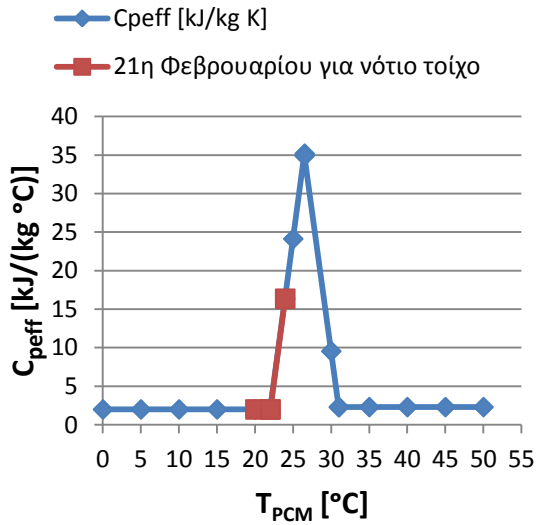


Διάγραμμα 5.3.5.5: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{p,eff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο (αριστερά) και ανατολικό τοίχο (δεξιά), με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

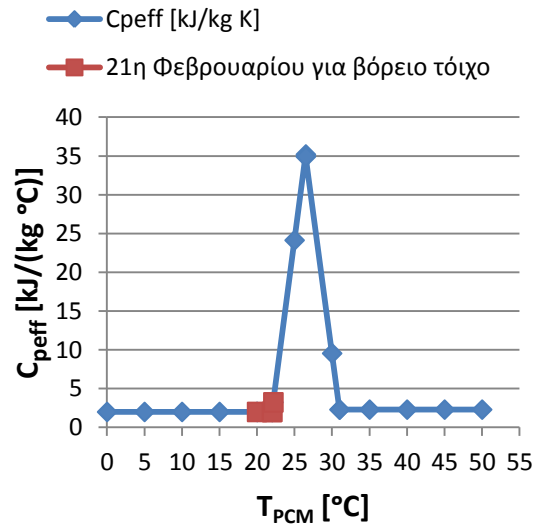
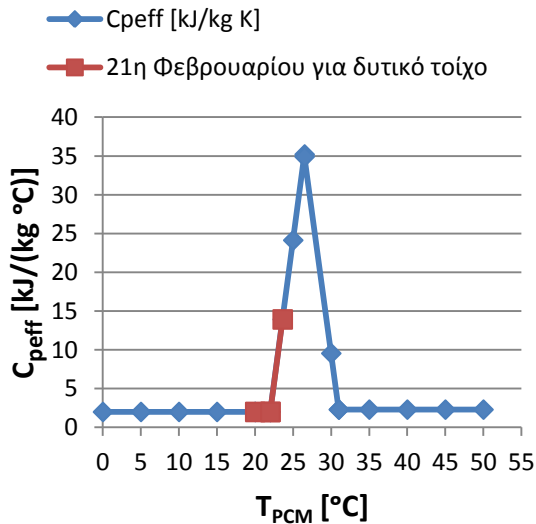


Διάγραμμα 5.3.5.6: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{p,eff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο (αριστερά) και βόρειο τοίχο (δεξιά), με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

➤ **Για 21^η Φεβρουαρίου:**

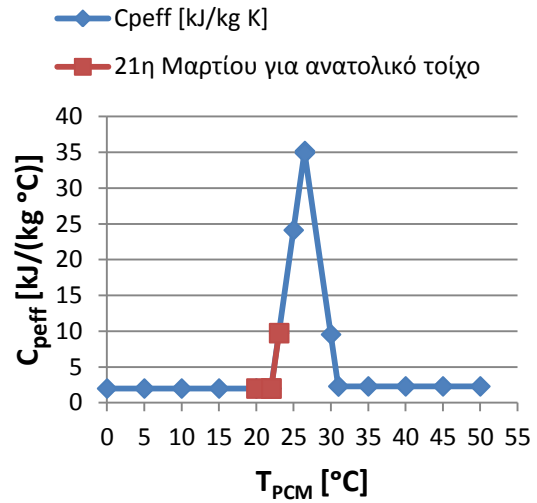
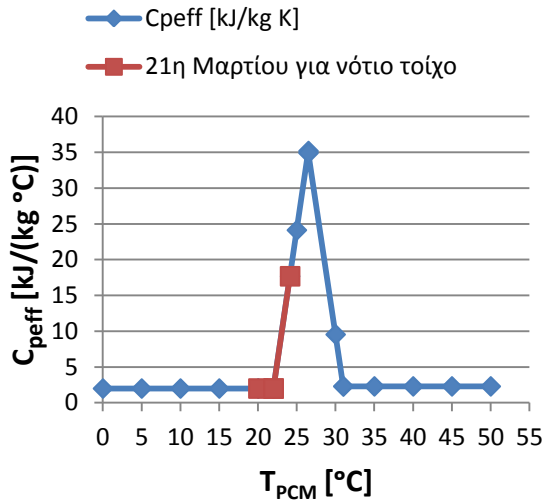


Διάγραμμα 5.3.5.7: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο (αριστερά) και ανατολικό τοίχο (δεξιά), με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

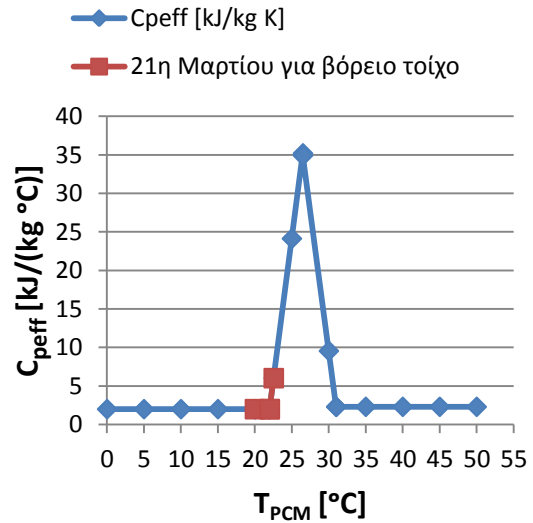
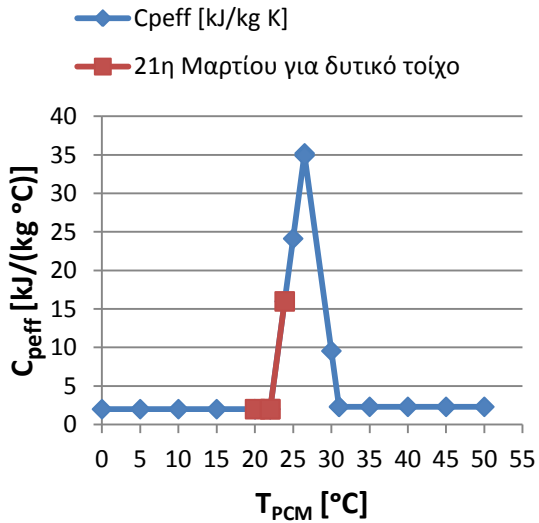


Διάγραμμα 5.3.5.8: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο (αριστερά) και βόρειο τοίχο (δεξιά), με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

➤ **Για 21^η Μαρτίου:**



Διάγραμμα 5.3.5.9: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο (αριστερά) και ανατολικό τοίχο (δεξιά), με χρήση βελτιωμένου μοντέλου



Διάγραμμα 5.3.5.10: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο (αριστερά) και βόρειο τοίχο (δεξιά), με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Δεδομένου ότι οι θερμοκρασίες του RT27 που προέκυψαν με εφαρμογή του βελτιωμένου μοντέλου είναι ελάχιστα μικρότερες από αυτές που υπολογίστηκαν με χρήση του αρχικού μοντέλου, όπως διαπιστώθηκε στην ενότητα 5.3.4, είναι λογικό η περιοχή λειτουργίας του RT27 στα παραπάνω διαγράμματα (5.3.5.1-5.3.5.10) να προκύπτει ελαφρώς μικρότερη. Σύμφωνα με τα διαγράμματα, το RT27 αξιοποιείται κατά το δυνατόν καλύτερα όταν ο υαλοπίνακας βρίσκεται σε δυτικό και κυρίως σε νότιο προσανατολισμό, ενώ για ανατολικό και βόρειο τοίχο με υαλοπίνακα, η ιδιότητά του να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση, αξιοποιείται ελάχιστα έως και καθόλου για κάποιους μήνες. Πιο συγκεκριμένα, το RT27 δεν καταφέρνει να «εισέλθει» στη διαφασική περιοχή (δεν εκμεταλλεύεται την ιδιότητα του να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση) κατά την 21^η Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο και κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο. Σε γενικές γραμμές, το RT27 δεν καλύπτει μεγάλο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης του και οι τιμές ενεργού θερμοχωρητικότητας που εμφανίζει είναι σχετικά μικρές, με αποτέλεσμα τα ποσά λανθάνουσας θερμότητας που αποθηκεύει και στη συνέχεια προσδίδει στο χώρο να είναι αρκετά μικρά. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι για τις παρούσες συνθήκες το RT27 δεν έχει ιδιαίτερα καλή απόδοση. Η βελτίωση της απόδοσής του μπορεί να επιτευχθεί αλλάζοντας τις τιμές διαφόρων παραμέτρων στη μελέτη μας, όπως είναι η επιφάνεια παραθύρου (αύξησή της), το πάχος του στρώματος του PCM (μείωση) ή η θερμοκρασία του δωματίου (αύξηση). Παραμετρικές μελέτες ως προς αυτά τα μεγέθη παρατίθενται στο επόμενο κεφάλαιο.

5.3.6 Ενεργειακή συνεισφορά του RT27 στο χώρο

Σε αυτήν την ενότητα, υπολογίζουμε το ποσό θερμότητας που προσφέρει το υλικό αλλαγής φάσης στον εξεταζόμενο χώρο, όπως ακριβώς εργαστήκαμε και στην ενότητα 5.2.5. Έτσι, για κάθε ώρα του 24ώρου της 21^{ης} ημέρας καθενός από τους πέντε χειμερινούς μήνες (Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος) και για κάθε προσανατολισμό του τοίχου που φέρει υαλοπίνακα, προσδιορίζουμε το προσδιδόμενο από το RT27 ποσό θερμικής ενέργειας στο χώρο. Προς εξυπηρέτηση και διευκόλυνση της μελέτης μας, θεωρήσαμε ότι η ανάγκη για θέρμανση του χώρου κατά τους εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες και με βάση τις συνθήκες που επικρατούν και κατ' επέκταση τις απώλειες του υπό μελέτη κτιρίου, είναι $P=20W/m^2$ προκειμένου να επιτυγχάνεται σταθερή θερμοκρασία $T_{\Delta\Omega M}=20^{\circ}C$ εντός του χώρου. Η τιμή της απαιτούμενης ισχύος $P=20W/m^2$ έχει ληφθεί από μελέτες.

Επομένως, για το χώρο της μελέτης μας, διαστάσεων $10m \times 10m = 100m^2$, θα απαιτούνται:

$$P_{ολ} = 20 \frac{W}{m^2} \cdot 100m^2 = 2000W = 2kW ,$$

από τα οποία ένα μέρος θα παρέχεται από κάποιο κλιματιστικό σύστημα, καλοριφέρ κ.λ.π. και το υπόλοιπο θα προέρχεται από την εφαρμογή του PCM. Έτσι, για κάθε ώρα του 24ώρου θα έχουμε:

$$Q_{απαιτ} = 2kW \cdot 3600sec = 7200kJ$$

εκ των οποίων το ποσό που θα προσφέρει το PCM ισούται με:

$$Q = U \cdot A_W \cdot (T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}) \cdot 3600 [kJ] \quad (5.3.6.1)$$

$$\Rightarrow Q = 7,06 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot (20 - T_{PCM}) \cdot 3600$$

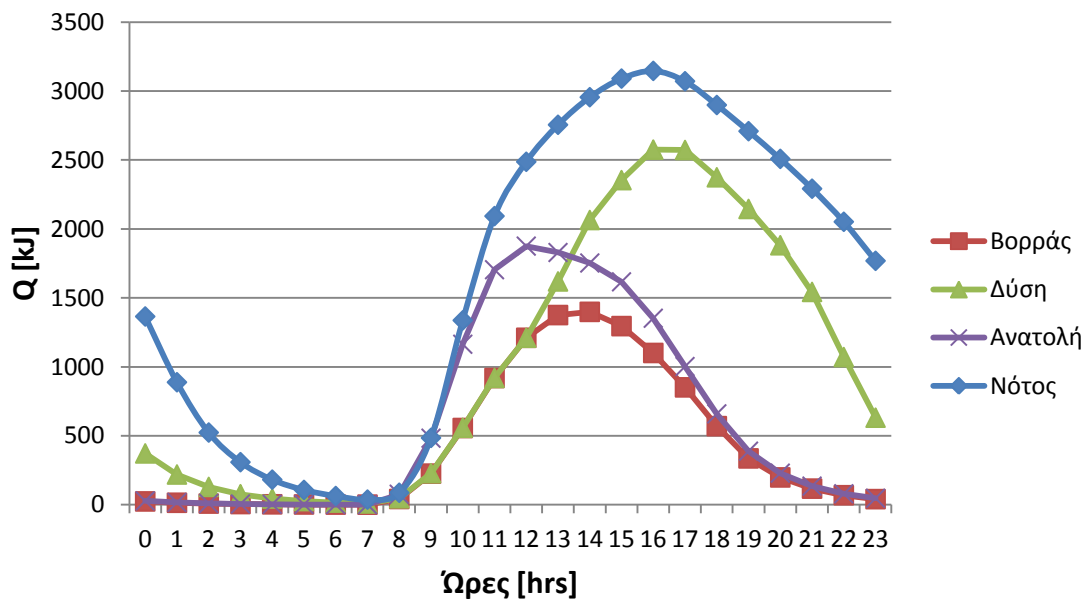
$$\Rightarrow Q = 762,48 \cdot (20 - T_{PCM}) \quad (5.3.6.2)$$

όπου $T_{PCM} = (T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda})/2$, $T_{\alpha\rho\chi}$, $T_{\tau\epsilon\lambda}$ έτσι όπως προέκυψαν από την ενότητα 5.3.3 για κάθε ώρα του 24ώρου.

Σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε ότι με αυτόν τον τρόπο υπολογισμού της προσφερόμενης θερμότητας δεν γίνεται διακριτό το αισθητό ή (και) το λανθάνον μέρος αυτής.

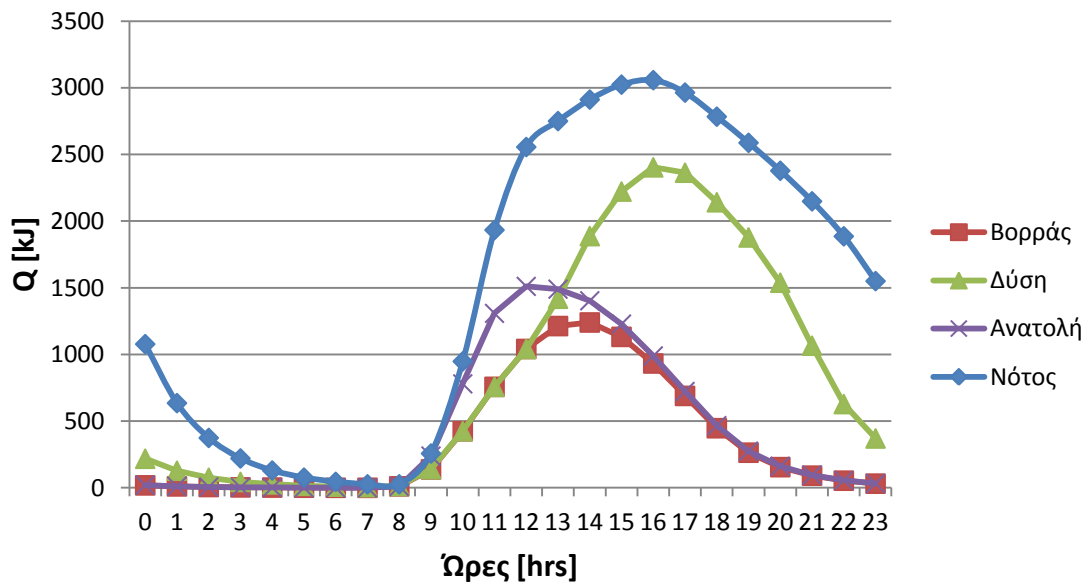
Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται η θερμότητα που προσφέρει το PCM συναρτήσει των ωρών του 24ώρου, έτσι όπως υπολογίστηκε από τη σχέση (5.3.6.2), αλλά κατά απόλυτη τιμή.

➤ **Για 21^η Νοεμβρίου:**



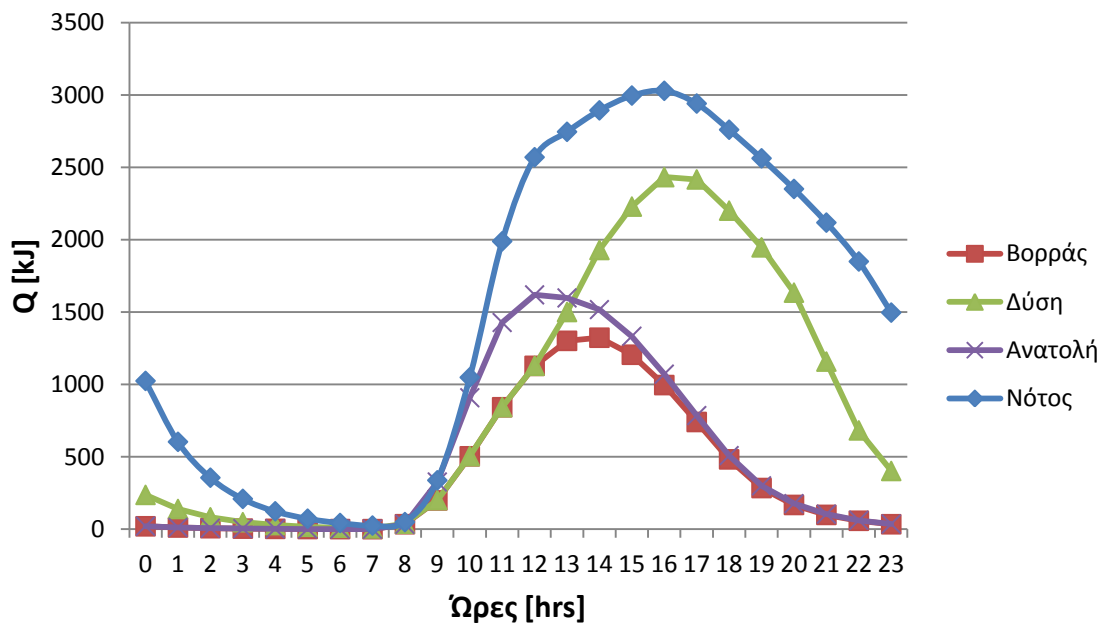
Διάγραμμα 5.3.6.1: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα, με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου:



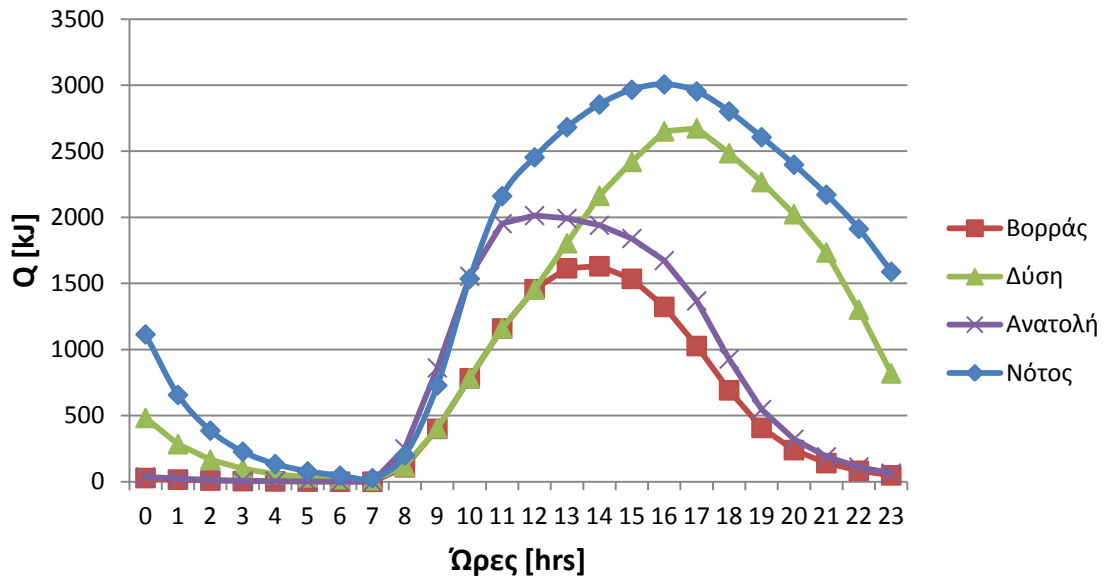
Διάγραμμα 5.3.6.2: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα, με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

➤ Για 21^η Ιανουαρίου:



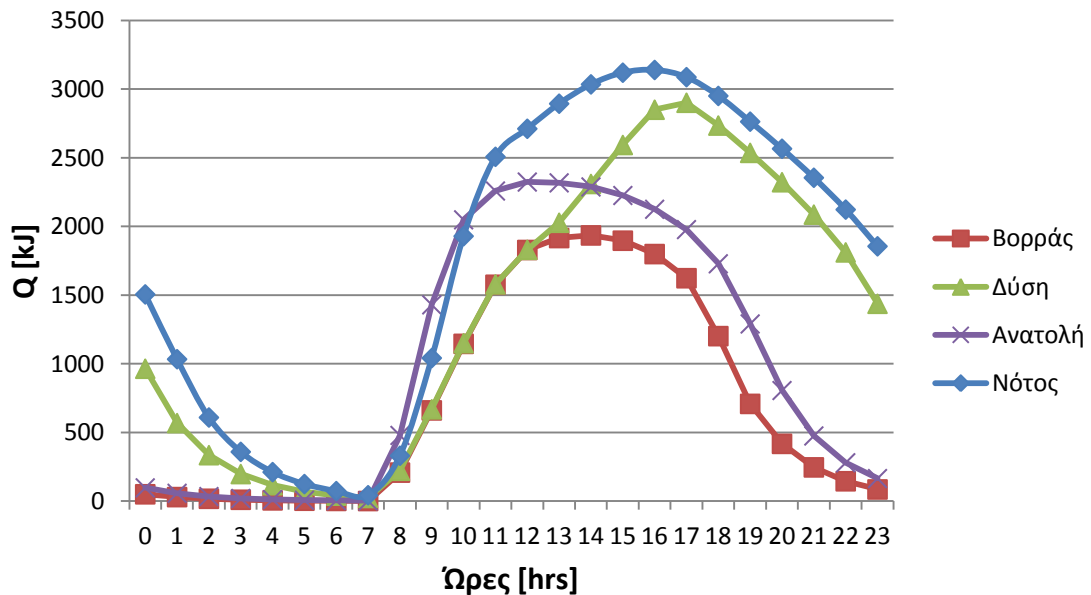
Διάγραμμα 5.3.6.3: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα, με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

➤ **Για 21^η Φεβρουαρίου:**



Διάγραμμα 5.3.6.4: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα, με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

➤ **Για 21^η Μαρτίου:**



Διάγραμμα 5.3.6.5: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα, με χρήση βελτιωμένου μοντέλου

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Από τα παραπάνω διαγράμματα προσφερόμενης θερμότητας του RT27 με χρήση του βελτιωμένου μοντέλου, προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα με αυτά που προέκυψαν και από τα διαγράμματα 5.2.5.6 έως 5.2.5.10, που αφορούσαν την προσφερόμενη θερμότητα του RT27 με εφαρμογή του αρχικού μοντέλου, διότι τα δύο μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμα, αφού τα αποτελέσματα που εξάγονται από αυτά παρουσιάζουν ελάχιστες αποκλίσεις μεταξύ τους, όπως αποδείξαμε στην ενότητα 5.3.4. Για το λόγο αυτό τα συμπεράσματα των παραπάνω διαγραμμάτων, 5.3.6.1 έως 5.3.6.5, δεν επαναλαμβάνονται εδώ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παραμετρικές μελέτες

Σε αυτό το κεφάλαιο, μελετάμε την επίδραση που έχει στο σύστημα και στη συμπεριφορά του PCM η μεταβολή στην τιμή μιας παραμέτρου του προβλήματος που μελετήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (ηλιακή φόρτιση εσωτερικού τοίχου με στρώμα PCM, απέναντι από τον οποίο βρίσκεται τοίχος που φέρει υαλοπίνακα). Πιο συγκεκριμένα, αλλάζοντας κάθε φορά την τιμή σε μία από τις ακόλουθες παραμέτρους, πάχος στρώματος υλικού αλλαγής φάσης, θερμοκρασία εξεταζόμενου δωματίου και επιφάνεια υαλοπίνακα, θα υπολογίσουμε, όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, τη θερμοκρασία του RT27 στη διάρκεια του 24ώρου, το ποσοστό αξιοποίησής του και την ενεργειακή του συνεισφορά. Όλες οι παραμετρικές μελέτες που παρατίθενται στη συνέχεια του κεφαλαίου έχουν γίνει με χρήση του βελτιωμένου μοντέλου προσομοίωσης.

6.1 Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος στρώματος του PCM

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκε η συμπεριφορά του PCM για πάχος στρώματος $d_{PCM} = 0,03m$. Στην παρούσα ενότητα θα προσδιοριστούν εκ νέου, για την 21^η ημέρα κάθε χειμερινού μήνα και για κάθε προσανατολισμό, η θερμοκρασία, η περιοχή λειτουργίας και η προσφερόμενη θερμότητα του RT27, για τις περιπτώσεις όπου το πάχος στρώματος του RT27 είναι $d_{PCM} = 0,01m$, $d_{PCM} = 0,02m$ και $d_{PCM} = 0,06m$. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η τιμή $d_{PCM} = 0,01m$ δεν μπορεί πρακτικά να αποτελέσει πάχος στρώματος PCM, καθώς τα σφαιρίδια στα οποία εσωκλείεται το υλικό αλλαγής φάσης δε δύναται να χωρέσουν σε τόσο λεπτό στρώμα. Επίσης, διευκρινίζουμε ότι οι τιμές των άλλων μεγεθών (A_f και $T_{\Delta\Omega M}$) παραμένουν ίδιες με τις τιμές που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Στην ενότητα 6.1.2 παρατίθενται αναλυτικά οι τιμές όλων των μεγεθών για αποφυγή παρερμηνεύσεων.

6.1.1 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του RT27

Για την απλοποίηση του προβλήματος κάναμε τις ίδιες παραδοχές με αυτές της ενότητας 5.3.2, δηλαδή θεωρήσαμε σταθερή θερμοκρασία στο εσωτερικό της εξεταζόμενης αίθουσας μέσω της χρήσης πηγών θερμότητας, όπως κλιματιστικά συστήματα, θερμαντικά σώματα κλπ., ενιαία και ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλη την έκταση του στρώματος του υλικού αλλαγής φάσης, καθώς δεν λαμβάνουμε υπόψη τη θερμική αγωγιμότητα του PCM, καμία συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του στρώματος του PCM και της μόνωσης και τέλος σταθερές απώλειες εντός του χώρου μελέτης μας, οι οποίες συνεπάγονται σταθερή απαιτούμενη ισχύ για την επίτευξη συνθηκών άνεσης και σταθερής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του χώρου.

Ο ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM δίνεται από τη σχέση (5.3.2.1) της ενότητας 5.3.2 και είναι ο ακόλουθος:

$$U_i A_w \left(T_e^i - \frac{T_{αρχ} + T_{τελ}}{2} \right) \cdot 3600 = m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot (T_{τελ} - T_{αρχ})$$

όπου τα μεγέθη που υπεισέρχονται στον ισολογισμό ενέργειας ορίζονται όπως ακριβώς ορίστηκαν και στην ενότητα 5.3.2, με μόνη διαφορά στην τιμή του μεγέθους της μάζας του PCM, αφού σε αυτήν υπεισέρχεται το πάχος στρώματος του υλικού αλλαγής φάσης. Οι τιμές όλων των μεγεθών παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 6.1.2 που ακολουθεί.

6.1.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας του RT27 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου

Εφαρμόζοντας τον ισολογισμό ενέργειας στο στρώμα του RT27 μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του PCM στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου. Άρα, έχουμε:

$$\begin{aligned} U_i A_w \left(T_e^i - \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \right) \cdot 3600 &= m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot (T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\alpha\rho\chi}) \\ \Rightarrow m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\tau\epsilon\lambda} + U_i \cdot A_w \cdot \frac{T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \cdot 3600 &= \\ = U_i \cdot A_w \cdot T_e^i \cdot 3600 - U_i \cdot A_w \cdot \frac{T_{\alpha\rho\chi}}{2} \cdot 3600 + m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\alpha\rho\chi} \\ \Rightarrow T_{\tau\epsilon\lambda} &= \frac{U_i \cdot A_w \cdot T_e^i \cdot 3600 - U_i \cdot A_w \cdot T_{\alpha\rho\chi} \cdot 1800 + m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\alpha\rho\chi}}{m_{PCM} \cdot C_{peff} + U_i \cdot A_w \cdot 1800} \end{aligned}$$

Η επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού του $T_{\tau\epsilon\lambda}$ πραγματοποιείται όπως ακριβώς περιγράψαμε και εργαστήκαμε στην ενότητα 5.2.3.

Τα δεδομένα μας στη συγκεκριμένη παραμετρική μελέτη έχουν ως εξής:

Διαστάσεις αίθουσας: 10m×10m×3m (μήκος×πλάτος×ύψος)

$$U_i = 7,06 \cdot 10^{-3} kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$$

$$A_w = 30m^2$$

$$A_f = 4,5m^2$$

$$T_{\Delta\Omega M} = 20^\circ C$$

και άρα η «ισοδύναμη εσωτερική θερμοκρασία» θα είναι:

$$\begin{aligned} T_e^i &= \frac{G_T A_f}{A_w} \cdot \frac{a}{h_i \cdot 10^{-3}} + T_{\Delta\Omega M} \Rightarrow \\ \Rightarrow T_e^i &= \frac{4,5 G_T}{30} \cdot \frac{0,88}{8 \cdot 10^{-3}} + 20 \\ \Rightarrow T_e^i &= 16,5 G_T + 20 [^\circ C] \end{aligned} \quad (6.1.2.1)$$

με G_T όπως υπολογίστηκε στην ενότητα 5.1 αναλυτικά για κάθε ώρα της 21^{ης} ημέρας των πέντε χειμερινών μηνών και για κάθε προσανατολισμό.

Επιπλέον, υπενθυμίζουμε ότι για το RT27 που μελετάμε, η συνάρτηση C_{peff} δίνεται από τις σχέσεις (5.2.2.9) έως (5.2.2.12):

Για $T \leq 22^\circ C$:

$$C_{peff} = C_{ps} = 2 kJ/(kg \cdot ^\circ C)$$

Για $22^{\circ}\text{C} < T \leq 26,5^{\circ}\text{C}$:

$$C_{peff} = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = 7,378 \cdot T - 160,316 \text{ [kJ/(kg } ^{\circ}\text{C)]}$$

Για $26,5^{\circ}\text{C} < T \leq 31^{\circ}\text{C}$:

$$C_{peff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = -7,244 \cdot T + 226,87 \text{ [kJ/(kg } ^{\circ}\text{C)]}$$

Για $T > 31^{\circ}\text{C}$:

$$C_{peff} = C_{pl} = 2,3 \text{ kJ/(kg } ^{\circ}\text{C)}$$

όπου T στις εξισώσεις του C_{peff} θεωρήσαμε τη θερμοκρασία του PCM, $T_{αρχ}$, στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου.

Όπως προαναφέρθηκε, το μόνο που διαφοροποιείται είναι η μάζα του RT27, η οποία προκύπτει:

$$\text{Για } d_{PCM} = 0,01\text{m: } m_{PCM} = \rho_{PCM} \cdot V_{PCM} = 820 \times 10 \times 3 \times 0,01 = 246\text{kg}$$

$$\text{Για } d_{PCM} = 0,02\text{m: } m_{PCM} = \rho_{PCM} \cdot V_{PCM} = 820 \times 10 \times 3 \times 0,02 = 492\text{kg}$$

$$\text{Για } d_{PCM} = 0,06\text{m: } m_{PCM} = \rho_{PCM} \cdot V_{PCM} = 820 \times 10 \times 3 \times 0,06 = 1476\text{kg}$$

Επομένως, με βάση τα παραπάνω και ανάλογα με το πάχος d_{PCM} προκύπτει η εξίσωση υπολογισμού της θερμοκρασίας του RT27:

➤ Για $d_{PCM} = 0,01\text{m}$:

$$T_{τελ} = \frac{12580,92G_T - 381,24T_{αρχ} + 246C_{peff}T_{αρχ} + 15249,6}{246C_{peff} + 381,24} \quad (6.1.2.2)$$

➤ Για $d_{PCM} = 0,02\text{m}$:

$$T_{τελ} = \frac{12580,92G_T - 381,24T_{αρχ} + 492C_{peff}T_{αρχ} + 15249,6}{492C_{peff} + 381,24} \quad (6.1.2.3)$$

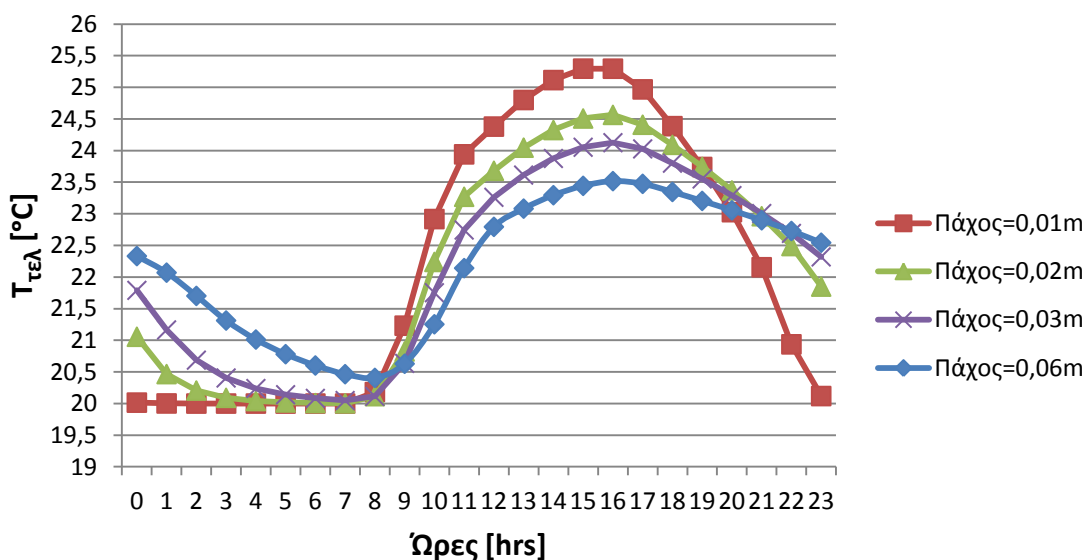
➤ Για $d_{PCM} = 0,06\text{m}$:

$$T_{τελ} = \frac{12580,92G_T - 381,24T_{αρχ} + 1476C_{peff}T_{αρχ} + 15249,6}{1476C_{peff} + 381,24} \quad (6.1.2.4)$$

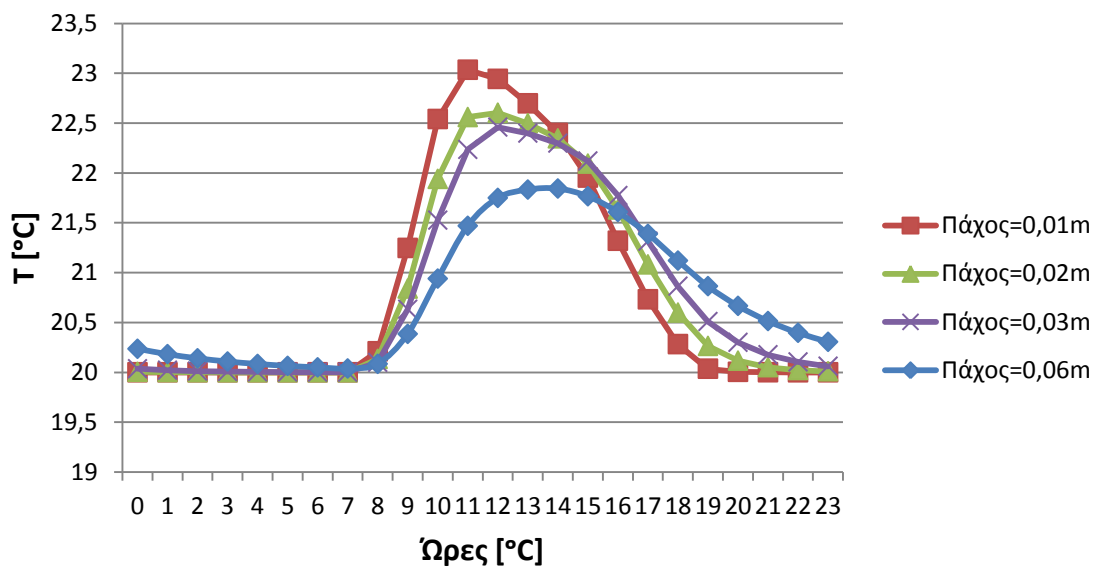
Έχοντας υπολογίσει πλέον τις $T_{αρχ}$ και $T_{τελ}$ για κάθε ώρα, κάθε μήνα, κάθε προσανατολισμό και για κάθε μία από τις τιμές του πάχους d_{PCM} , μπορούμε να βρούμε τη θερμοκρασία $T_{PCM} = \frac{T_{αρχ} + T_{τελ}}{2}$ για κάθε ώρα. Παρακάτω λοιπόν, παρουσιάζονται διαγραμματικά οι θερμοκρασίες T_{PCM} που επικρατούν στο στρώμα

του RT27 συναρτήσει των ωρών της εκάστοτε ημέρας. Για εποπτικούς λόγους και καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων, σε κάθε διάγραμμα εμφανίζεται η θερμοκρασία του RT27 κατά τη διάρκεια του 24ώρου για τις τρεις νέες τιμές του πάχους, αλλά και της αρχικής που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ($d_{PCM} = 0,03m$).

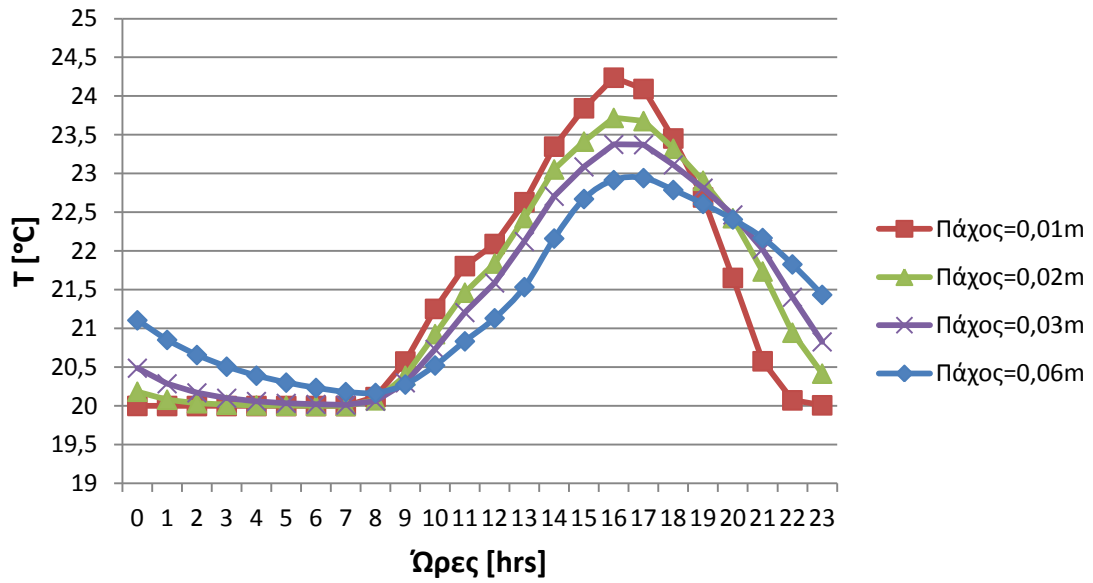
➤ **Για 21^η Νοεμβρίου:**



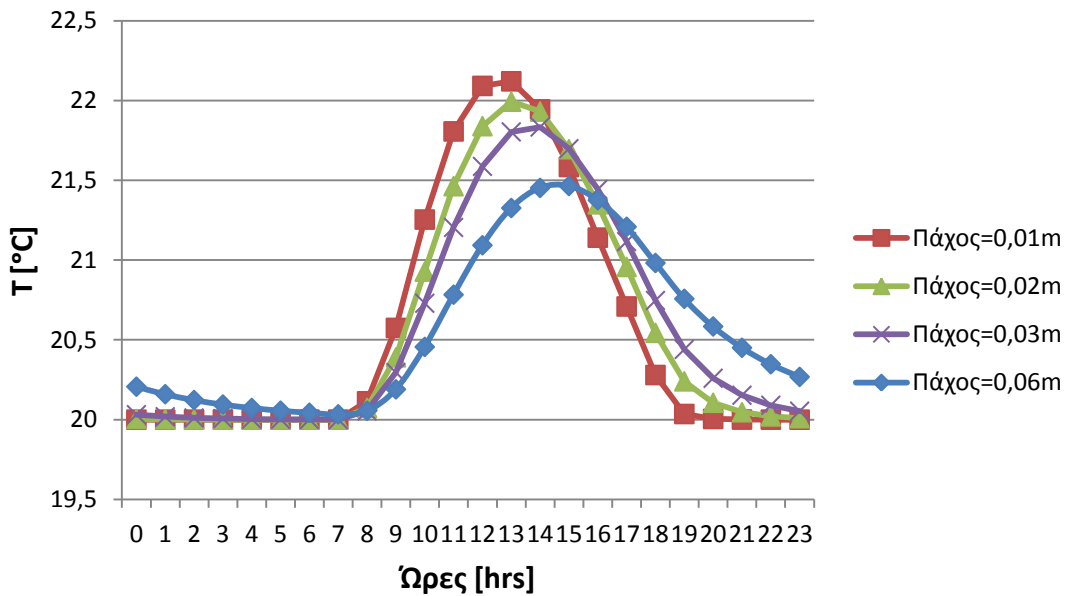
Διάγραμμα 6.1.2.1: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.2.2: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

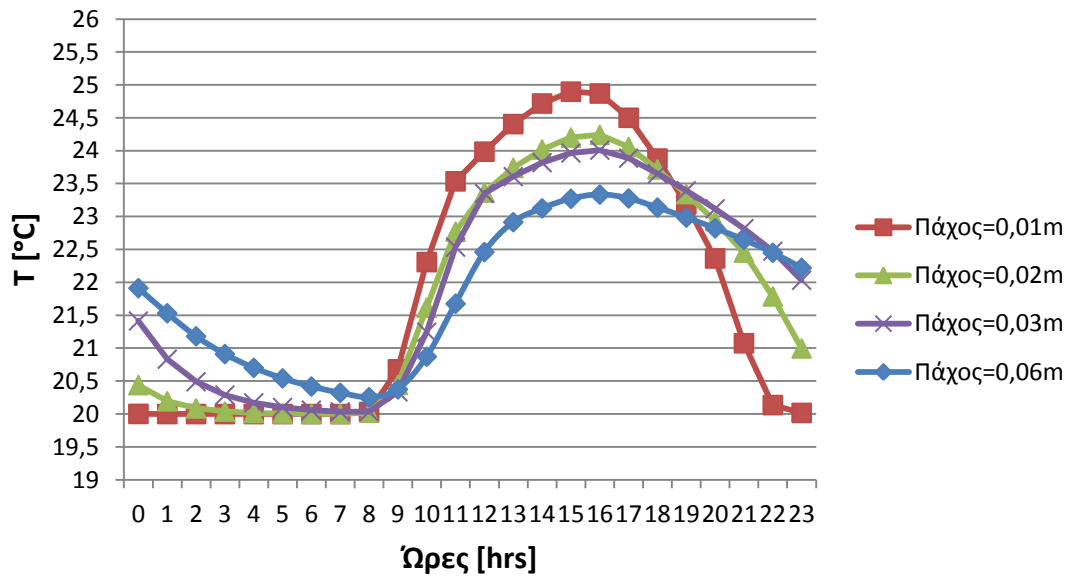


Διάγραμμα 6.1.2.3: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

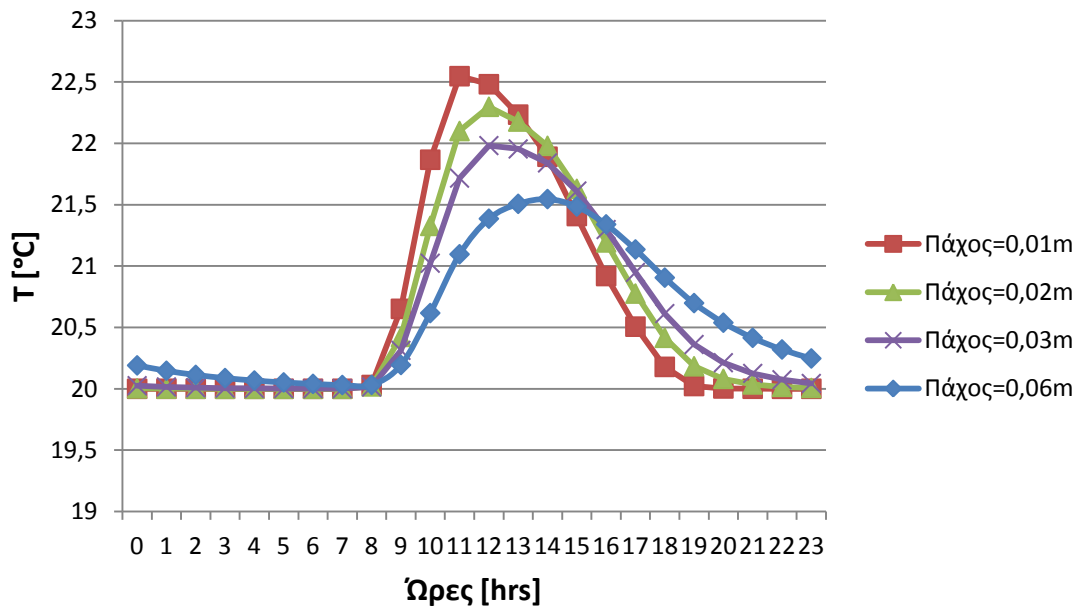


Διάγραμμα 6.1.2.4: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

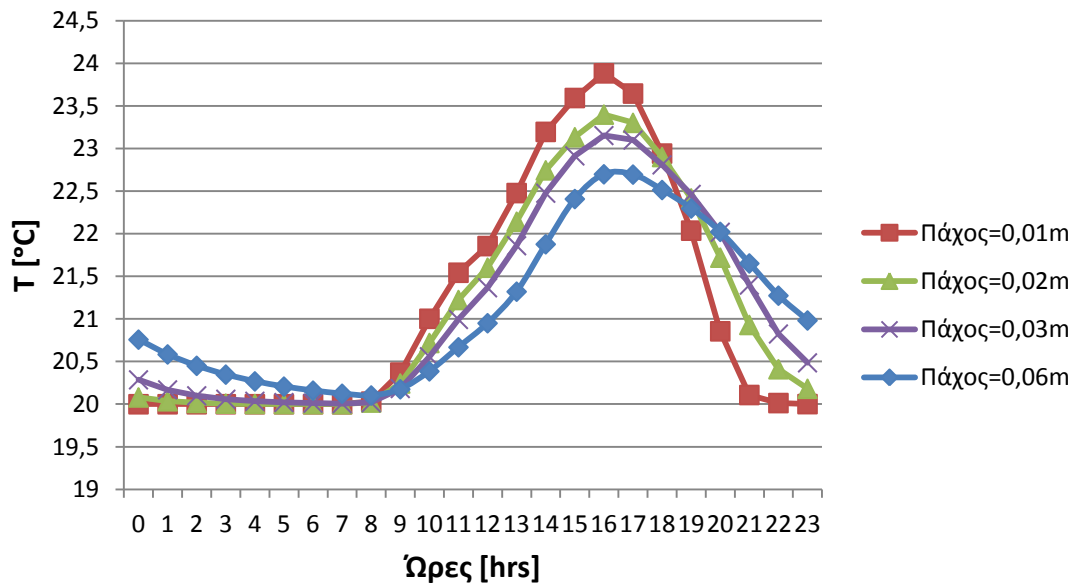
➤ **Για 21^η Δεκεμβρίου:**



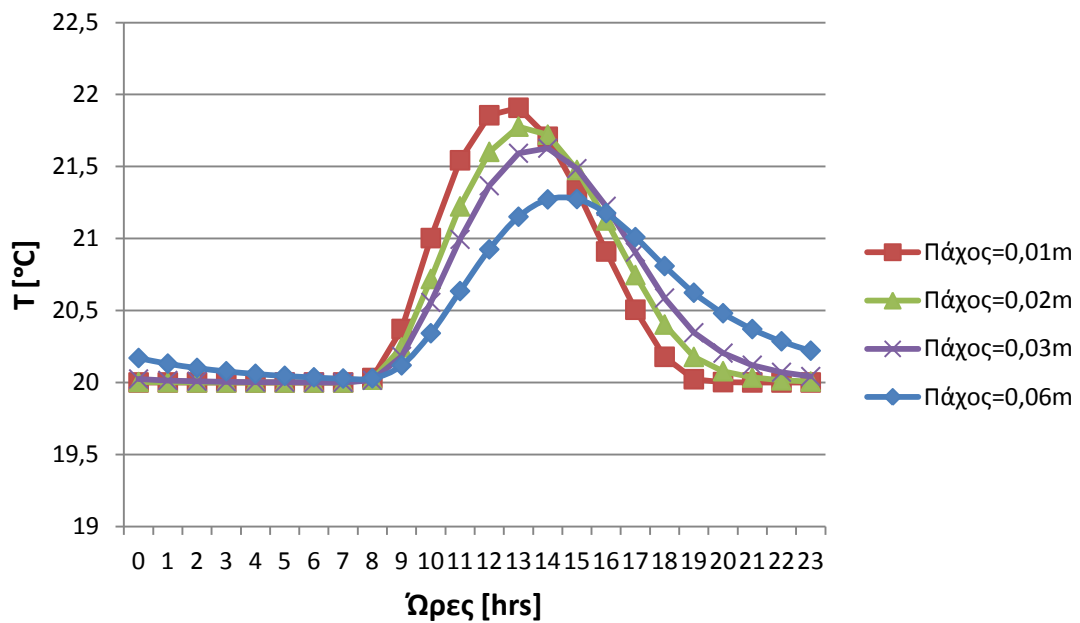
Διάγραμμα 6.1.2.5: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.2.6: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

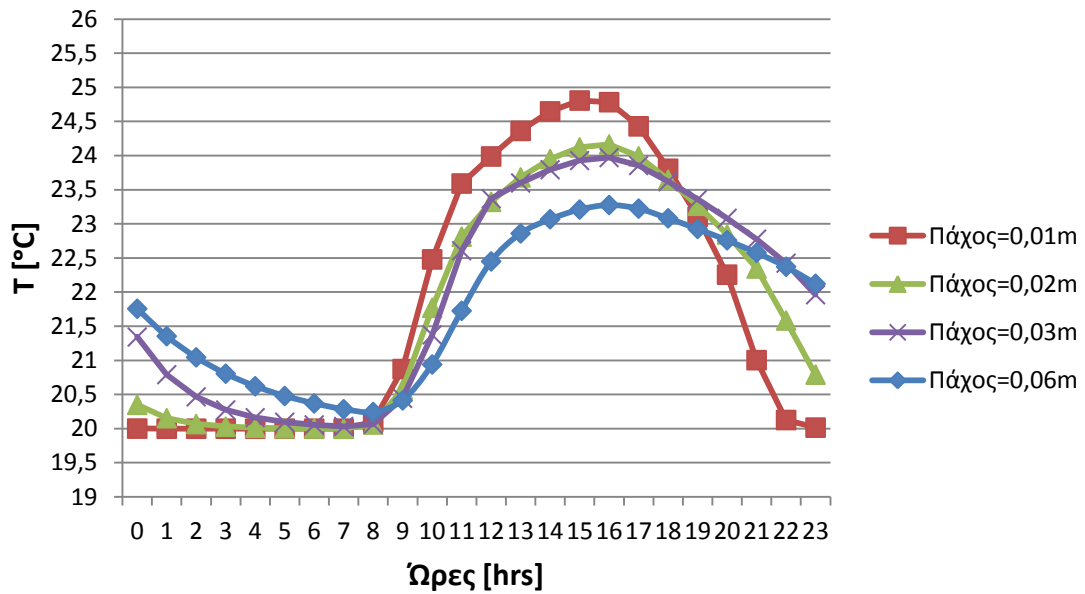


Διάγραμμα 6.1.2.7: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

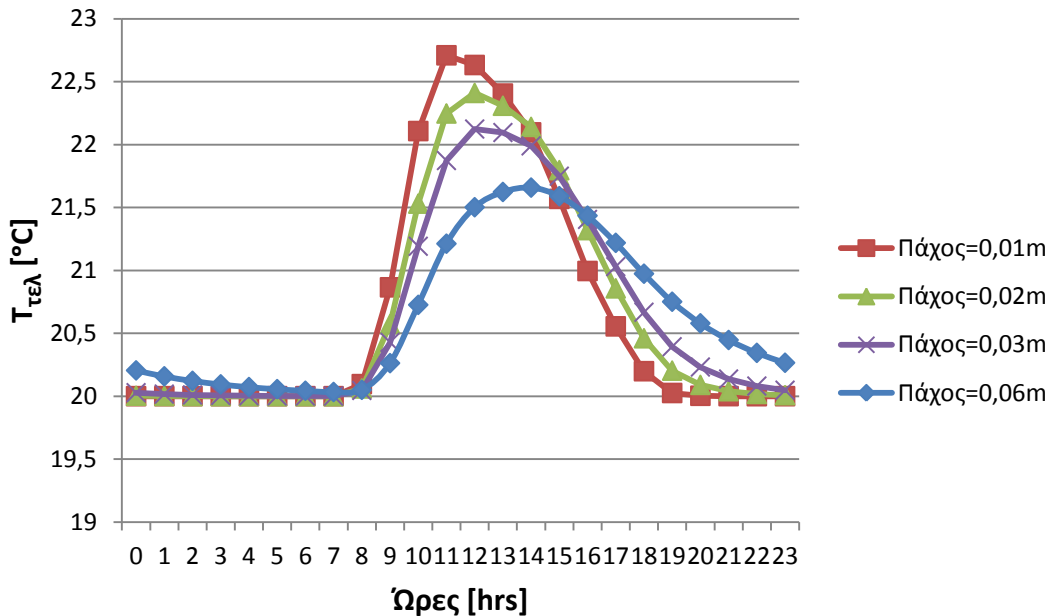


Διάγραμμα 6.1.2.8: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

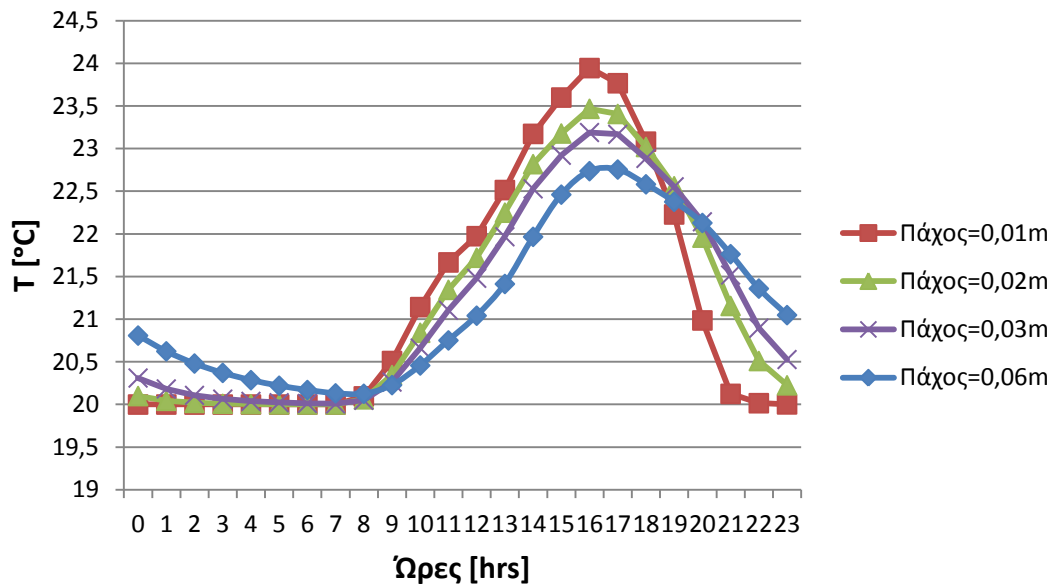
➤ **Για 21^η Ιανουαρίου:**



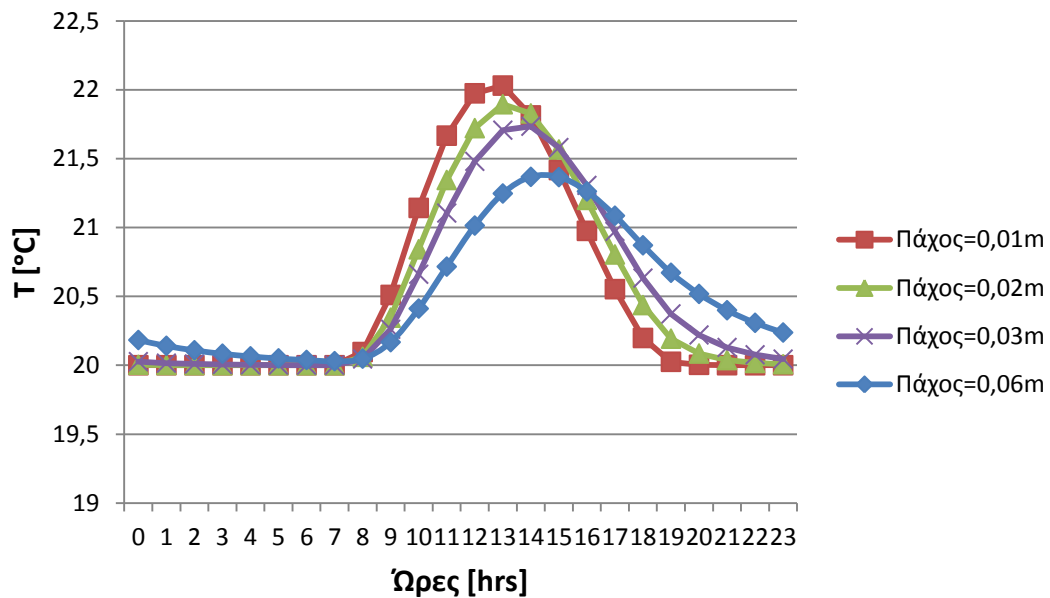
Διάγραμμα 6.1.2.9: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.2.10: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

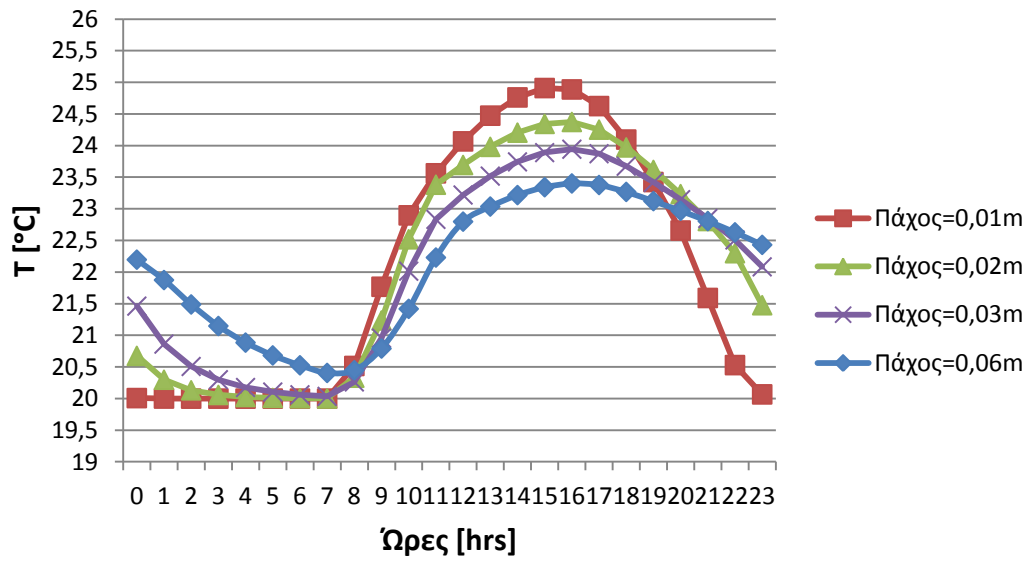


Διάγραμμα 6.1.2.11: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

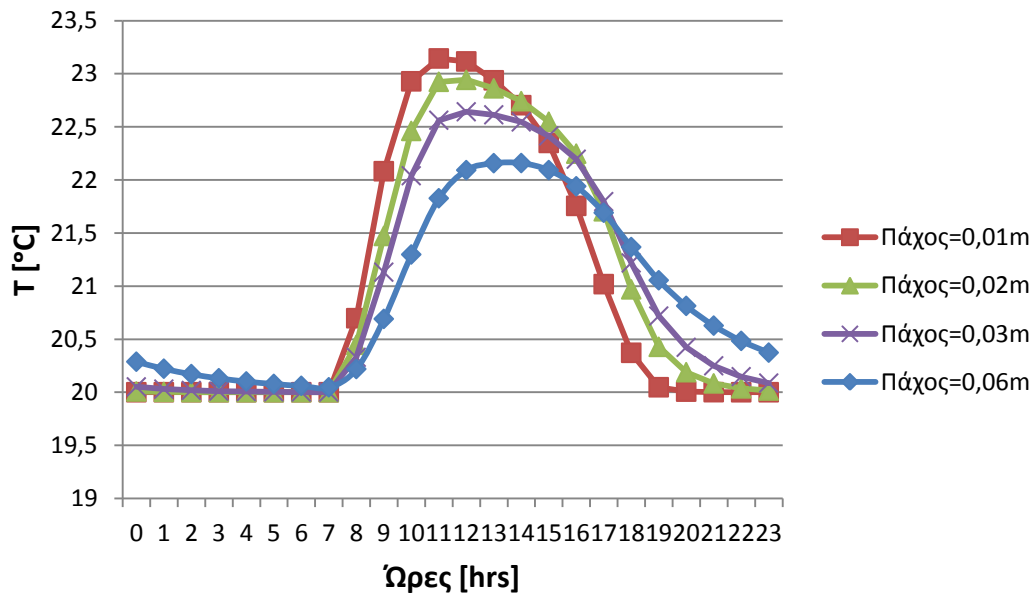


Διάγραμμα 6.1.2.12: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

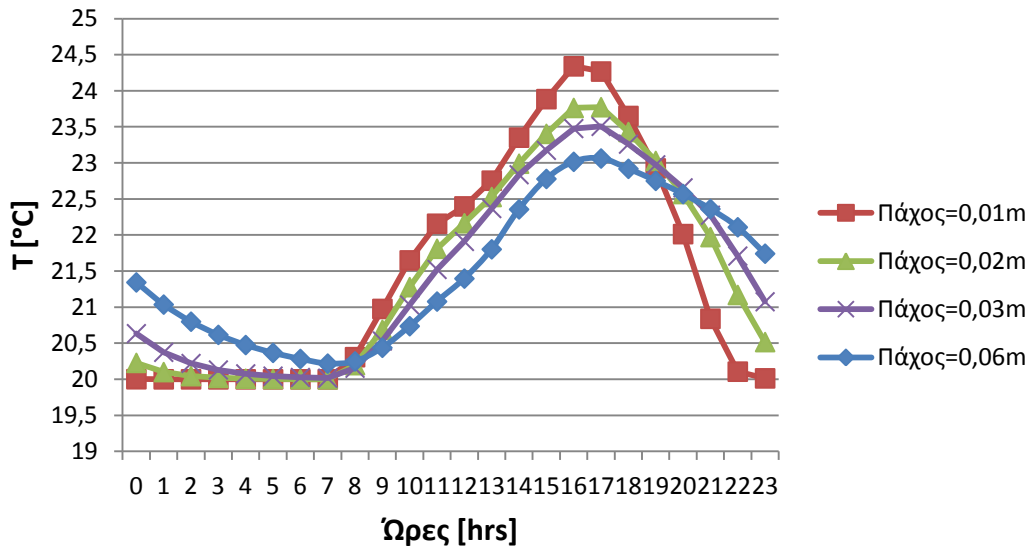
➤ Για 21^η Φεβρουαρίου:



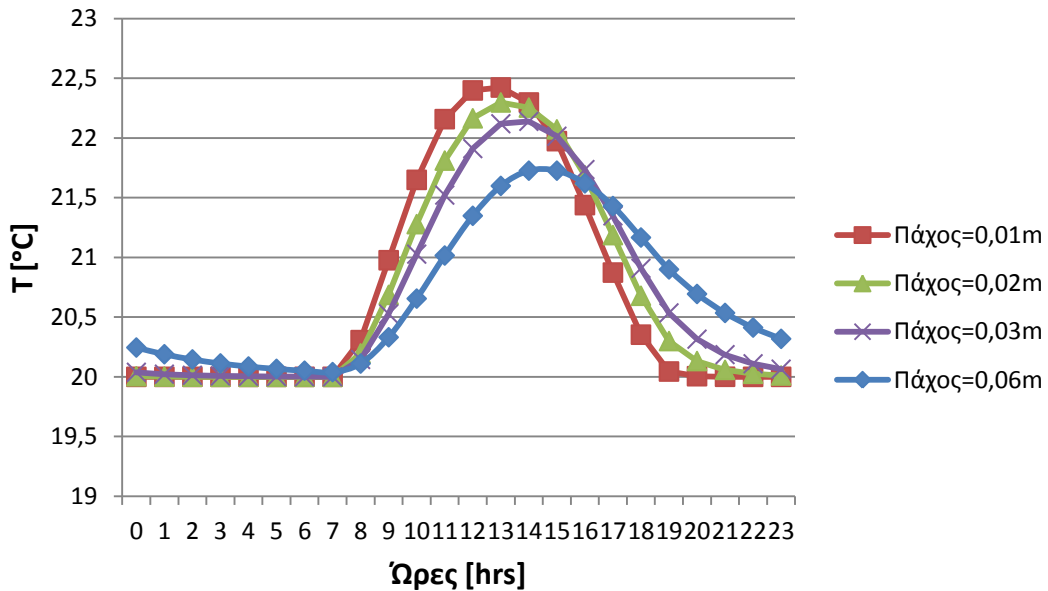
Διάγραμμα 6.1.2.13: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.2.14: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

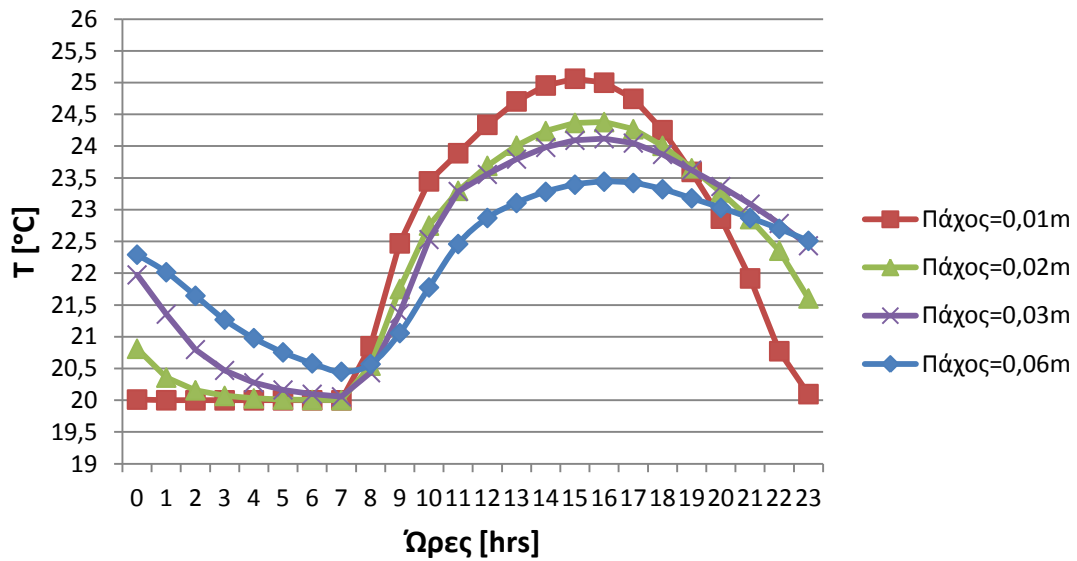


Διάγραμμα 6.1.2.15: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

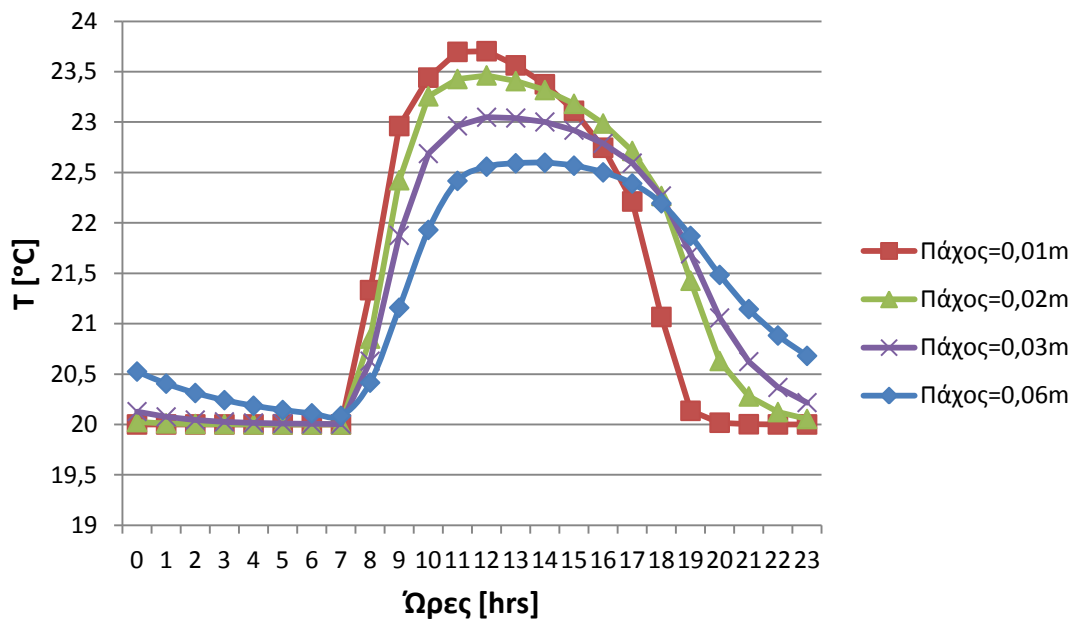


Διάγραμμα 6.1.2.16: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

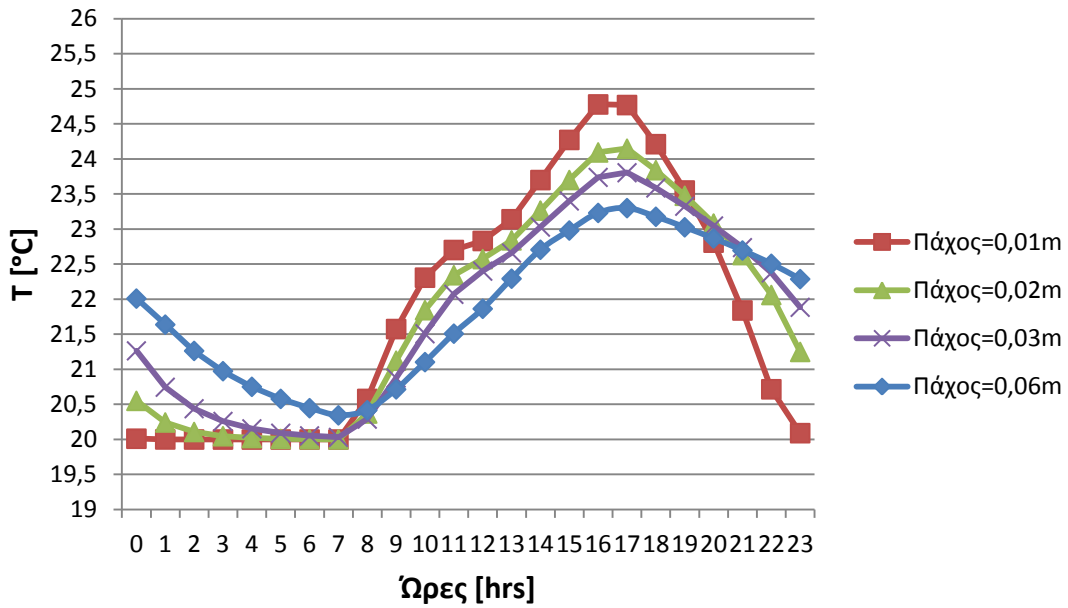
➤ **Για 21^η Μαρτίου:**



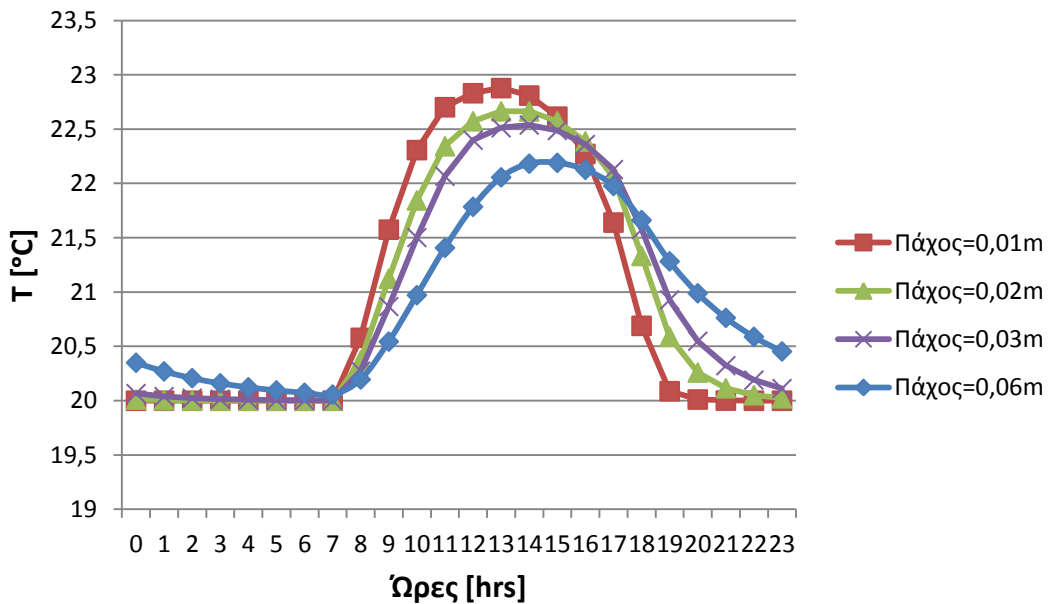
Διάγραμμα 6.1.2.17: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.2.18: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.2.19: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με βαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.2.20: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με βαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

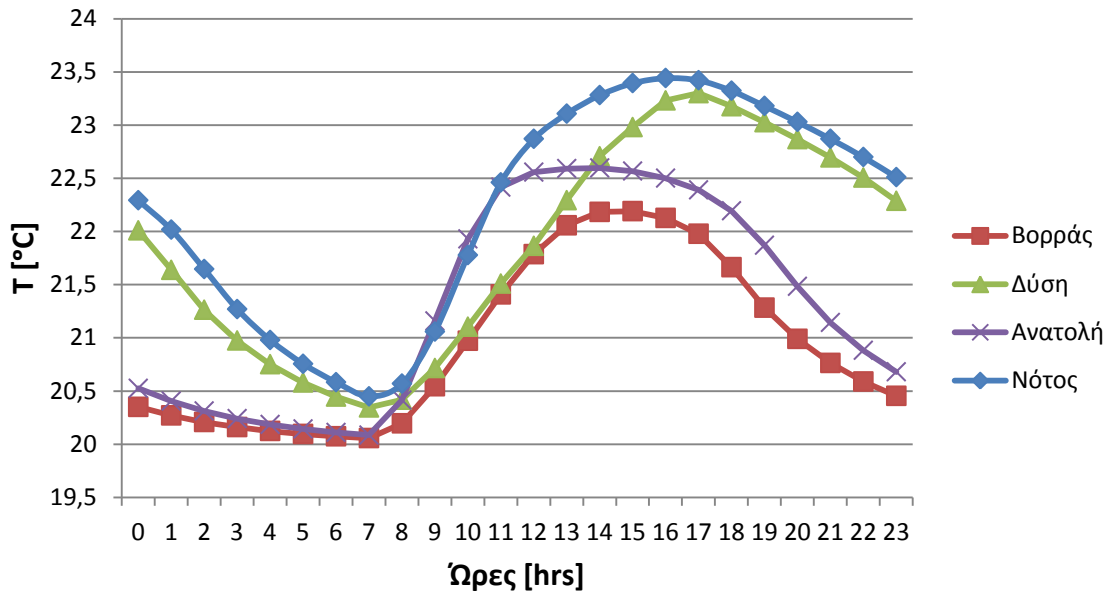
Όπως παρατηρήσαμε στα διαγράμματα 5.3.3.1 έως 5.3.3.5, έτσι και εδώ βλέπουμε ότι για όλα τα πάχη στρώματος PCM υπάρχει μονομερής πρόσδοση θερμότητας από το RT27 στο χώρο, αφού και στις τέσσερις καμπύλες (μία για κάθε πάχος) για κάθε μήνα και κάθε προσανατολισμό, η θερμοκρασία του RT27 είναι μονίμως μεγαλύτερη αυτής που επικρατεί στο χώρο ($T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}\text{C}$) (γεγονός λογικό όπως έχουμε εξηγήσει σε προηγούμενες ενότητες της εργασίας). Επιπλέον, και πάλι όπως στα διαγράμματα 5.3.3.1 έως 5.3.3.5, παρατηρούμε ότι για κάθε πάχος η θερμοκρασία φθίνει από τις 12 το βράδυ μέχρι τις 7:00-8:00 το πρωί (λόγω πρόσδοσης θερμότητας στο χώρο), από τις 7:00-8:00 το πρωί και μέχρι τις ώρες γύρω από το μεσημέρι - αναλόγως του μήνα, του προσανατολισμού και του πάχους- αυξάνεται (αφού το ποσό θερμότητας που λαμβάνει το PCM από την ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερο από αυτό που προσφέρει στο δωμάτιο), ενώ από εκεί και έπειτα αρχίζει ξανά η πτώση της θερμοκρασίας του (διότι πλέον η G_T ελαττώνεται μέχρι σταδιακού μηδενισμού της και συνεπώς το υλικό μας μόνο δίνει θερμική ενέργεια).

Από τα διαγράμματα 6.1.2.1 έως 6.1.2.20, εξάγουμε τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα που ισχύουν και για τους πέντε εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες και για τους τέσσερις διαφορετικούς προσανατολισμούς. Έτσι, για κάθε μήνα και για κάθε προσανατολισμό παρατηρούμε ότι όσο λεπτότερο είναι το στρώμα του RT27, τόσο μεγαλύτερο θερμοκρασιακό φάσμα καλύπτει, δηλαδή το μικρότερο πάχος στρώματος RT27 ($d_{PCM} = 0,01\text{m}$) παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μέγιστη θερμοκρασία και την μικρότερη ελάχιστη θερμοκρασία σε σχέση με τα άλλα τρία πάχη. Αντίστοιχα, το μεγαλύτερο πάχος στρώματος ($d_{PCM} = 0,06\text{m}$) παρουσιάζει τη μικρότερη μέγιστη και τη μεγαλύτερη ελάχιστη θερμοκρασία. Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο, διότι όσο πιο λεπτό ή παχύ είναι το στρώμα του PCM, τόσο πιο μικρή ή μεγάλη είναι αντίστοιχα η μάζα του και συνεπώς τόσο πιο γρήγορα ή αργά αντίστοιχα μεταβάλλεται η θερμοκρασία του κατά τη συναλλαγή θερμότητας. Επομένως, το λεπτότερο στρώμα RT27 (λόγω μεγαλύτερου ρυθμού μεταβολής θερμοκρασίας) θα προλάβει να αναπτύξει πιο υψηλές θερμοκρασίες μέσα στο 24ωρο (κατά τις μεσημεριανές ώρες) και ομοίως θα προλάβει να αποκτήσει και τις πιο χαμηλές (κατά τις πρώτες πρωινές ώρες).

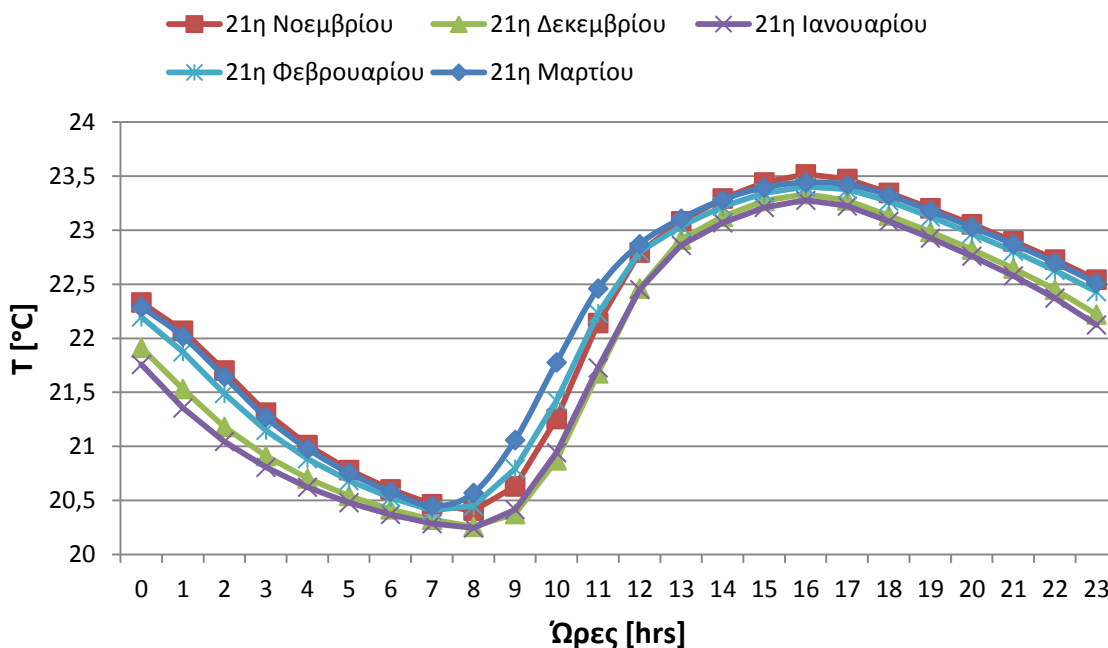
Εξετάζοντας τα διαγράμματα ως προς τον προσανατολισμό του υαλοπίνακα, παρατηρούμε όπως σε όλα τα μέχρι τώρα διαγράμματα θερμοκρασιών, πως για κάθε μήνα και κάθε πάχος, οι υψηλότερες θερμοκρασίες σε γενικές γραμμές καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας αναπτύσσονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι νότιου προσανατολισμού, ενώ αντίθετα, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι βόρειος. Επίσης, όταν ο τοίχος που φέρει υαλοπίνακα είναι δυτικός, οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες σε γενικές γραμμές από αυτές που αναπτύσσονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι ανατολικός, με εξαίρεση τις πρωινές ώρες μέχρι και λίγο πριν το μεσημέρι όπου για δυτικό τοίχο οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες απ' ό,τι για ανατολικό (λόγω ύπαρξης μόνο διάχυτης ακτινοβολίας). Αυτά γίνονται πιο εμφανή στο διάγραμμα 6.1.2.21 που έγινε ενδεικτικά για την 21^η Μαρτίου και για πάχος $d_{PCM}=0,06\text{m}$ και παρατίθεται παρακάτω.

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα ως προς το μήνα, παρατηρούμε πως η καμπύλη του T πέφτει κατακόρυφα, δηλαδή αποκτά μικρότερη μέγιστη αλλά και μικρότερη ελάχιστη τιμή, καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται ξανά οι τιμές του και κατ' επέκταση η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή. Αντίστοιχα, κατά

τον ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό του τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, παρατηρούμε ότι η καμπύλη του $T_{\text{τελ}}$ πέφτει κατακόρυφα καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Δεκέμβριο και αρχίζει να ανεβαίνει σταδιακά οδεύοντας από τον Ιανουάριο μέχρι και το Μάρτιο. Αυτά γίνονται πιο εμφανή στο διάγραμμα 6.1.2.22 που έγινε ενδεικτικά για την 21^η Μαρτίου και για πάχος $d_{\text{PCM}}=0,06\text{m}$ και παρατίθεται παρακάτω.



Διάγραμμα 6.1.2.21: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου, για πάχος $d_{\text{PCM}}=0,06\text{m}$ και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

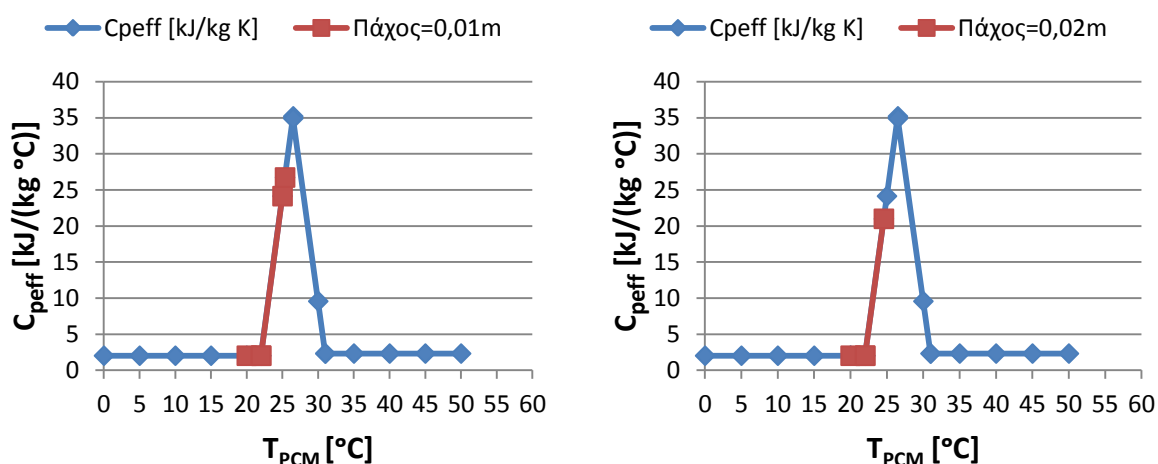


Διάγραμμα 6.1.2.22: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών για νότιο προσανατολισμό υαλοπίνακα, για πάχος $d_{\text{PCM}}=0,06\text{m}$ και για κάθε χειμερινό μήνα

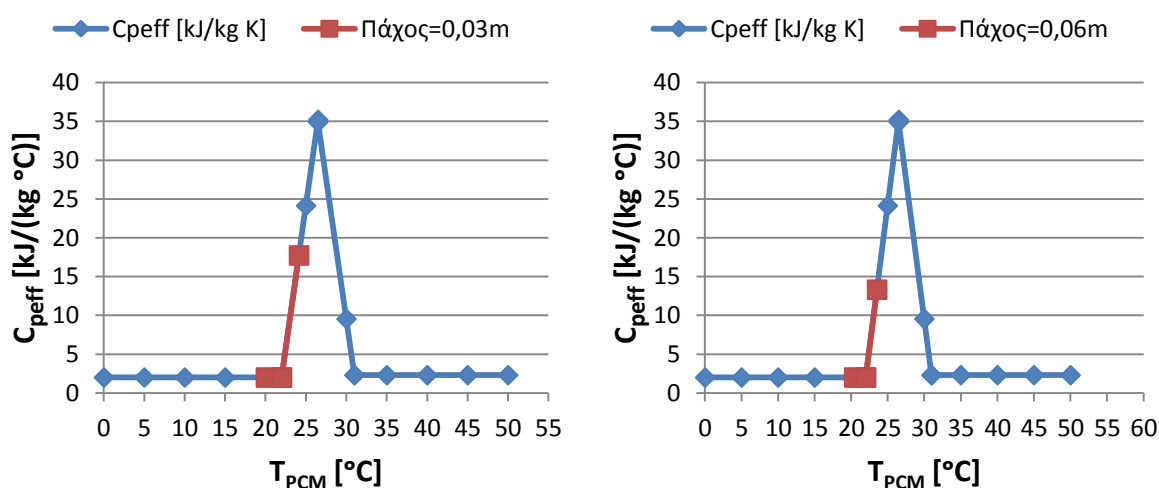
6.1.3 Ποσοστό αξιοποίησης του RT27

Ομοίως με την ενότητα 5.3.5, παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα που αποτυπώνουν την περιοχή λειτουργίας του RT27 για την 21^η ημέρα κάθε χειμερινού μήνα, κάθε προσανατολισμού και για κάθε πάχος στρώματος PCM. Για εποπτικούς λόγους, τα διαγράμματα έχουν οργανωθεί έτσι ώστε να είναι εφικτή η άμεση σύγκριση της περιοχής λειτουργίας με βάση το πάχος του στρώματος του υλικού αλλαγής φάσης.

➤ Για 21^η Νοεμβρίου και υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:

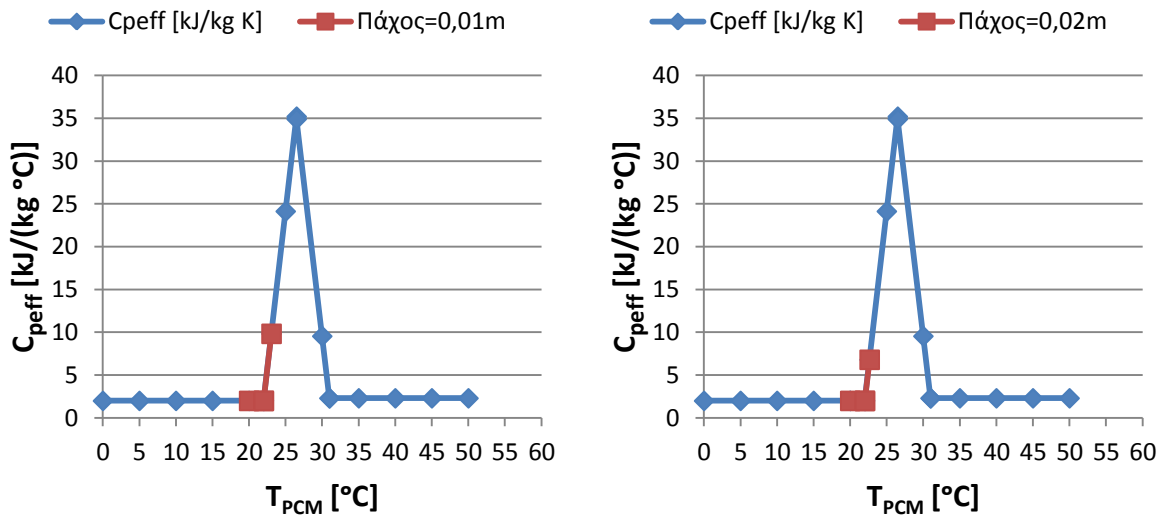


Διάγραμμα 6.1.3.1: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

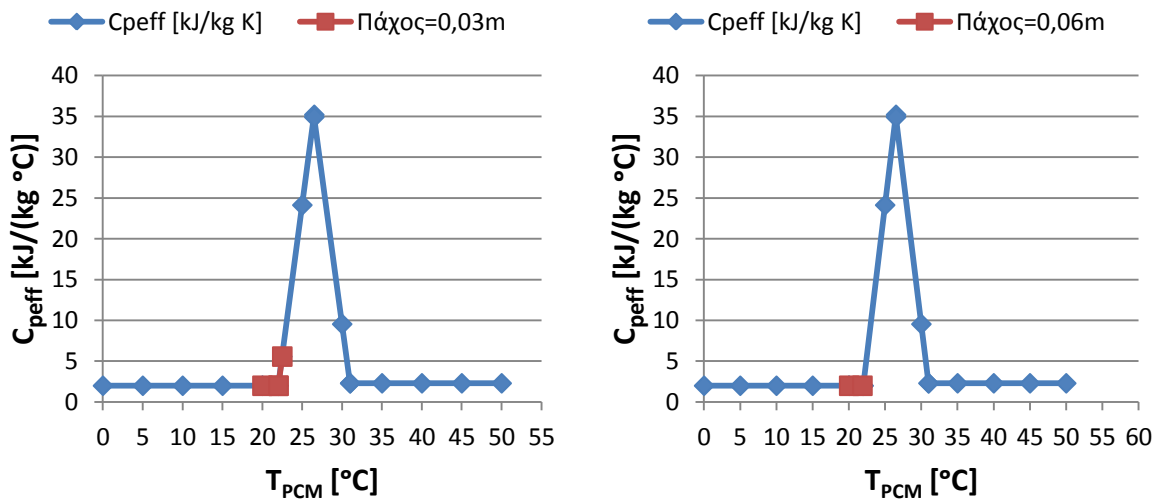


Διάγραμμα 6.1.3.2: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ Για 21^η Νοεμβρίου και υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:

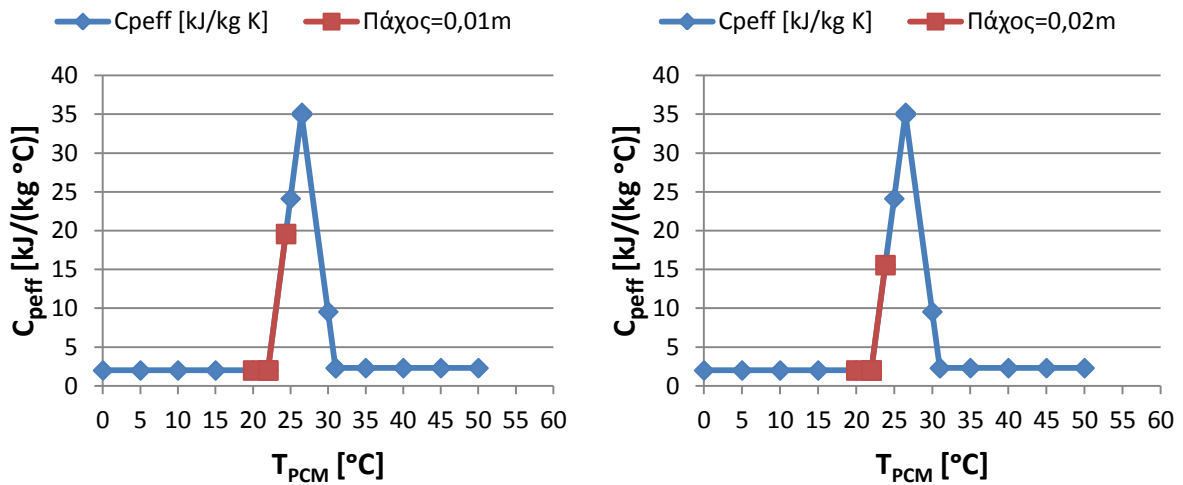


Διάγραμμα 6.1.3.3: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

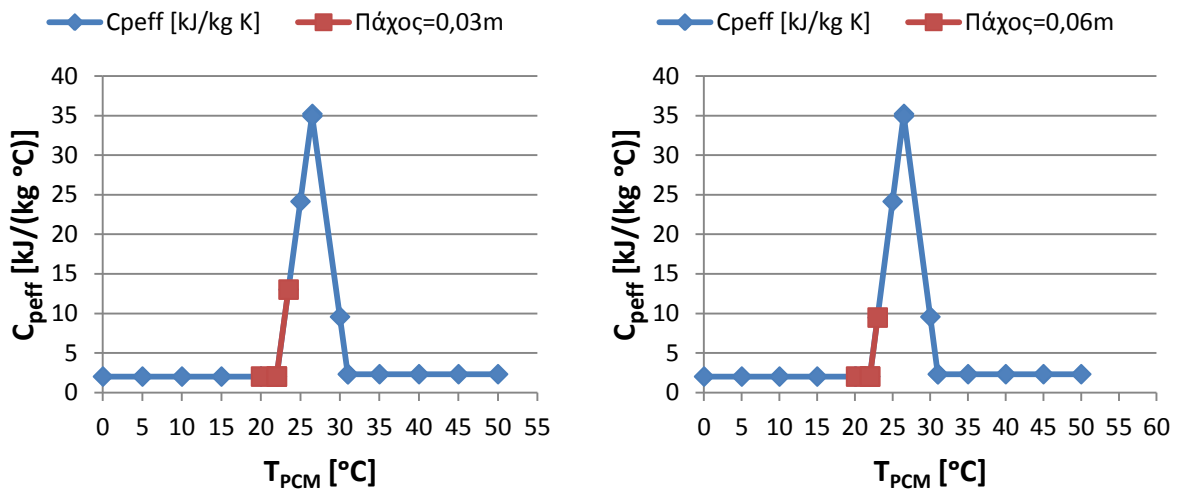


Διάγραμμα 6.1.3.4: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ **Για 21^η Νοεμβρίου και ναλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:**

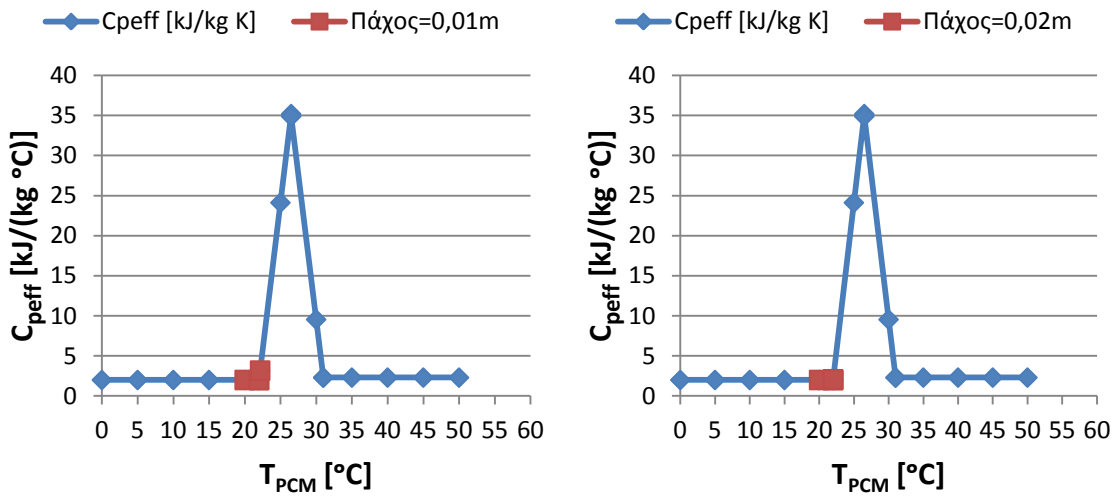


Διάγραμμα 6.1.3.5: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με ναλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

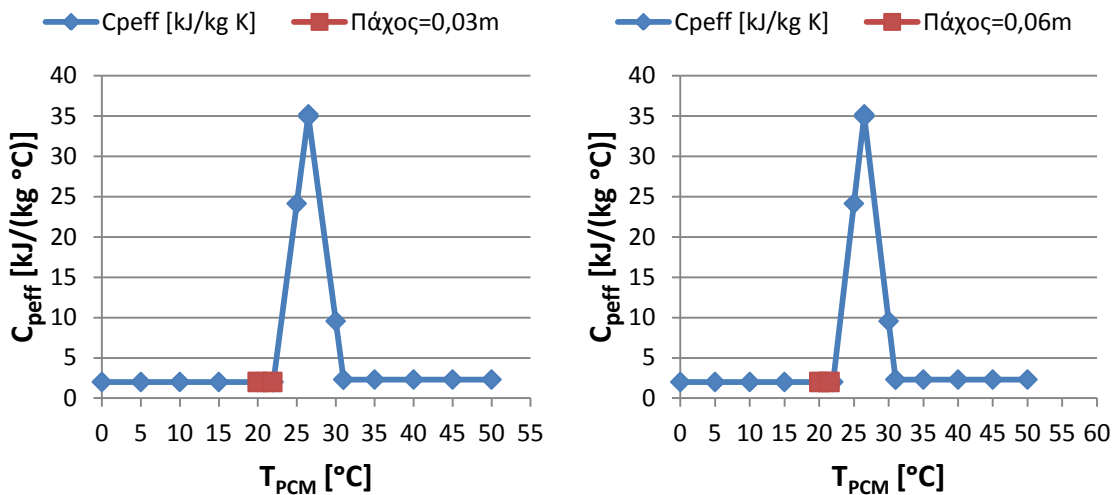


Διάγραμμα 6.1.3.6: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με ναλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ **Για 21^η Νοεμβρίου και ναλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:**

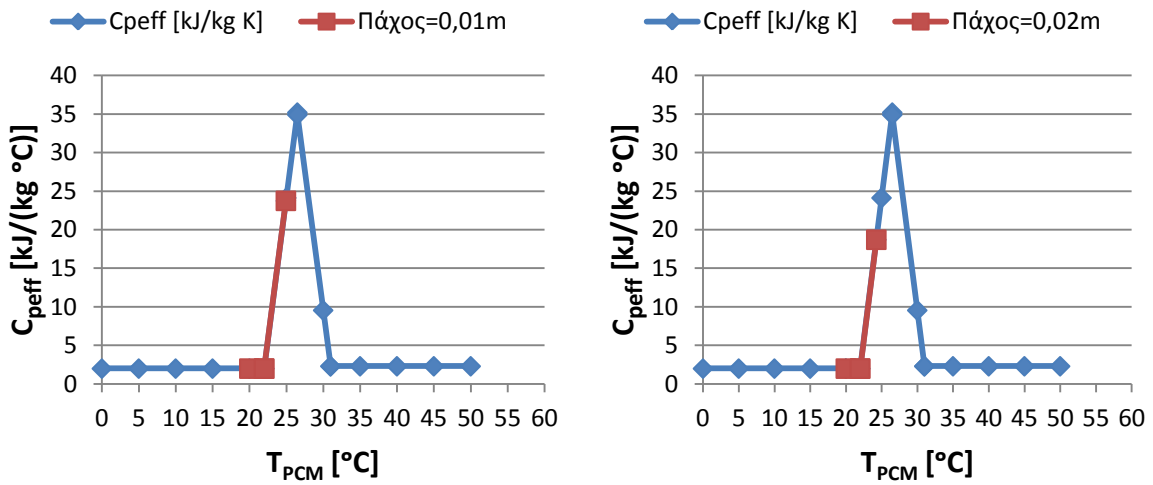


Διάγραμμα 6.1.3.7: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με ναλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

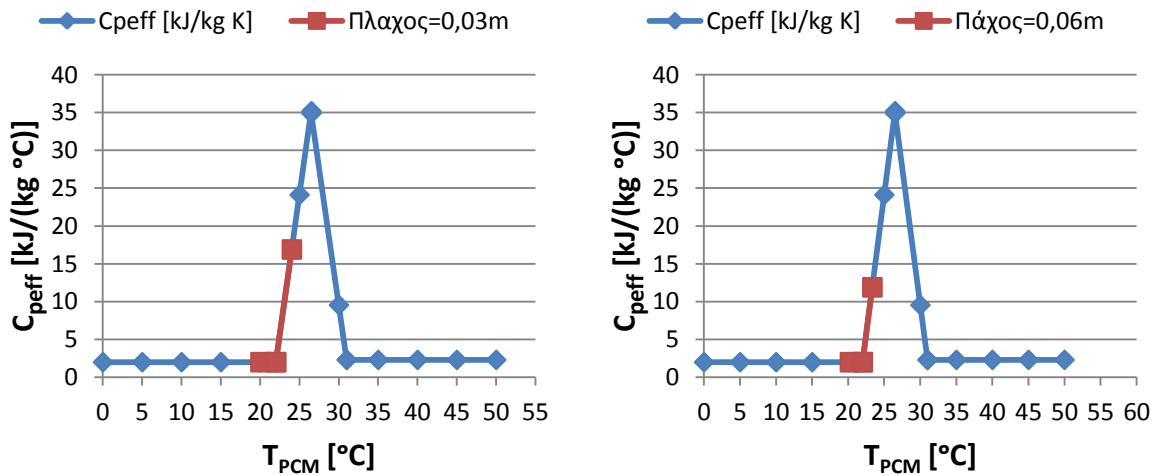


Διάγραμμα 6.1.3.8: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με ναλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ **Για 21^η Δεκεμβρίου και υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:**

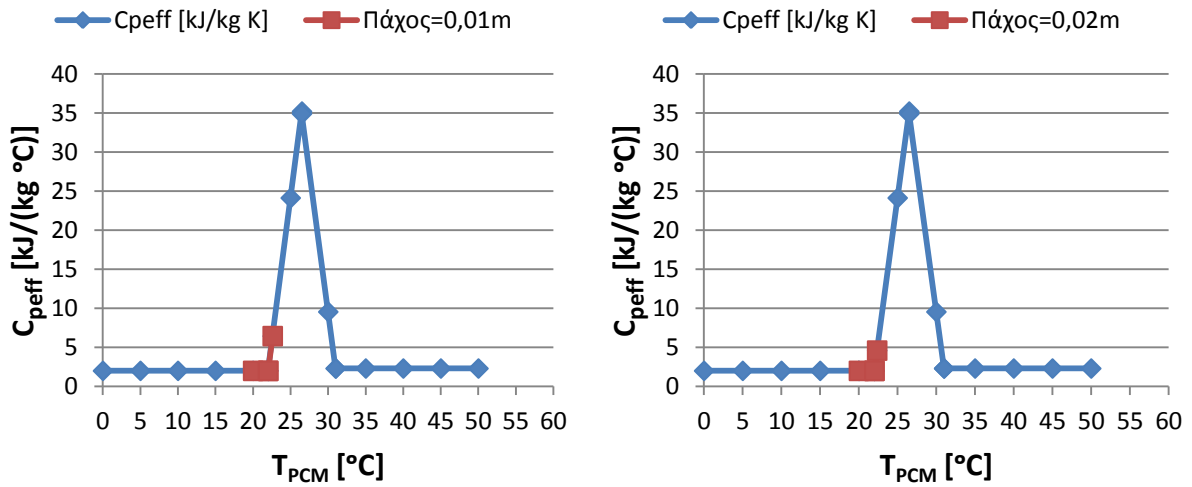


Διάγραμμα 6.1.3.9: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

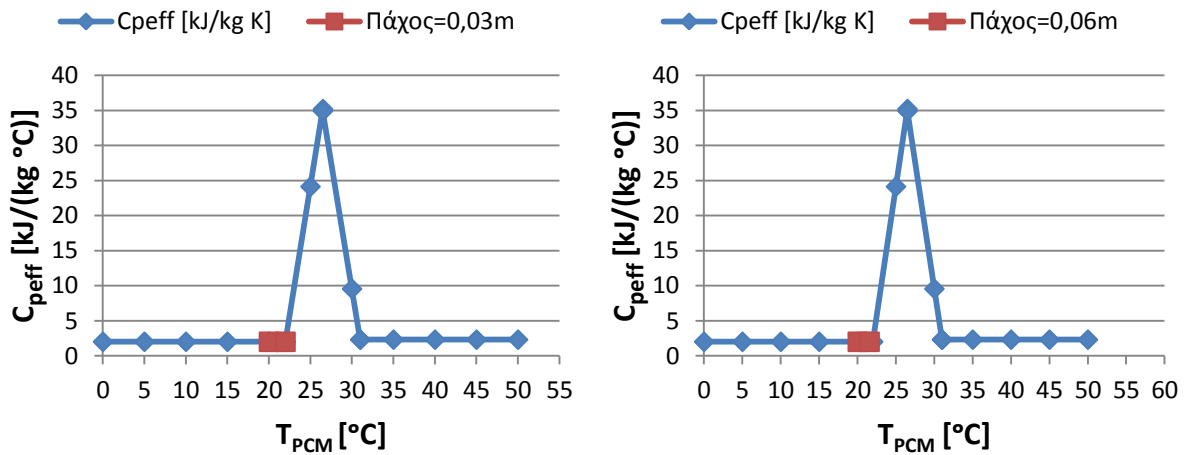


Διάγραμμα 6.1.3.10: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ **Για 21^η Δεκεμβρίου και υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:**

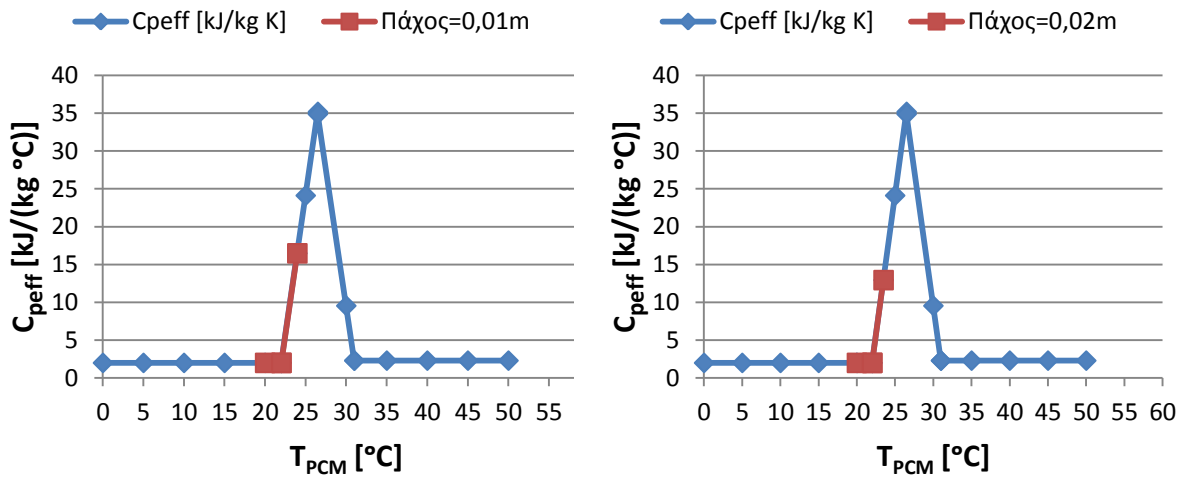


Διάγραμμα 6.1.3.11: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

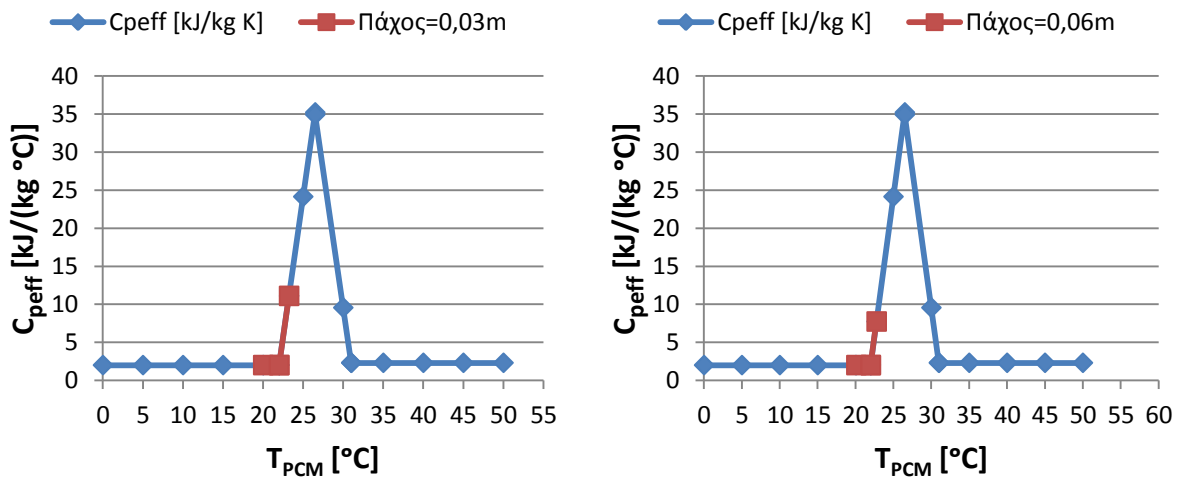


Διάγραμμα 6.1.3.12: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ **Για 21^η Δεκεμβρίου και υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:**

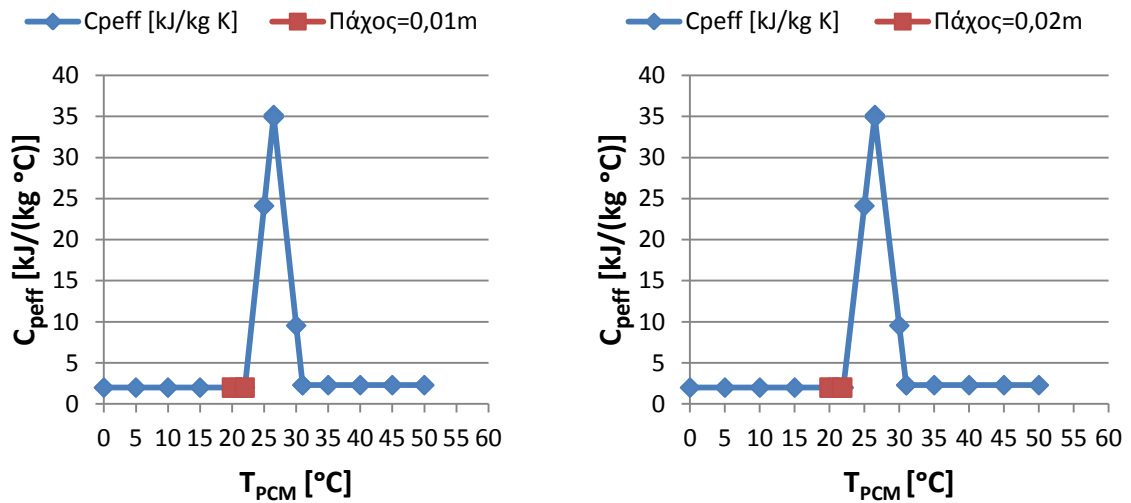


Διάγραμμα 6.1.3.13: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

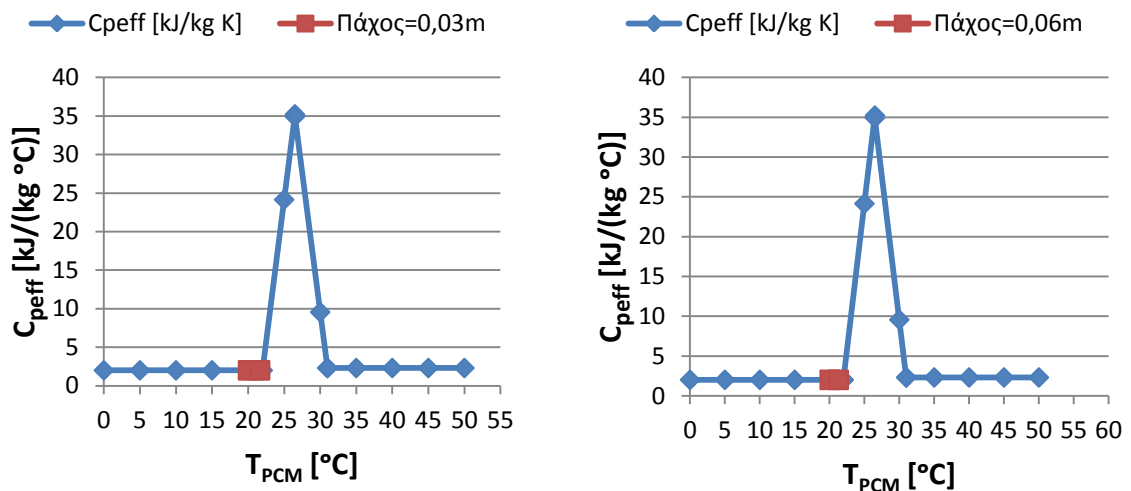


Διάγραμμα 6.1.3.14: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ **Για 21^η Δεκεμβρίου και υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:**

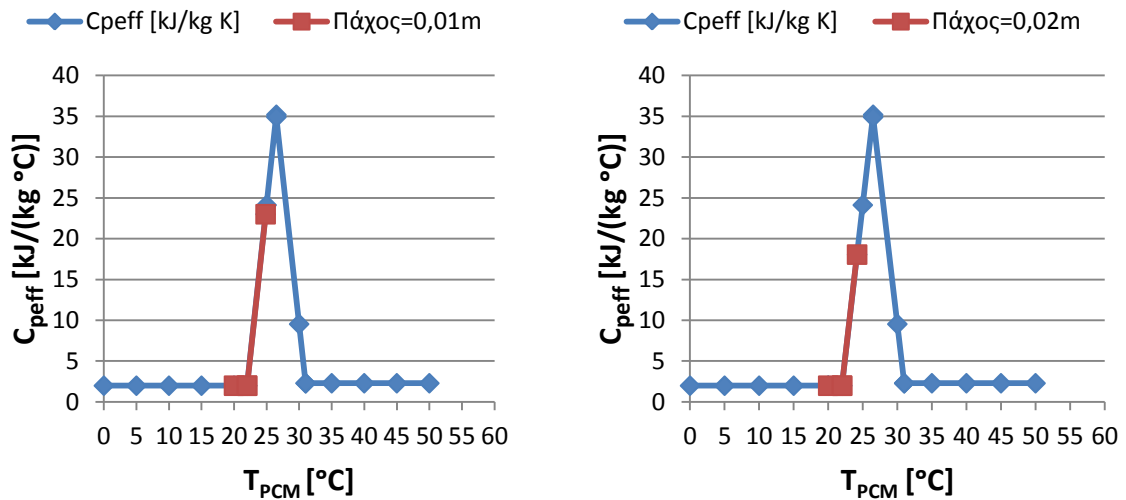


Διάγραμμα 6.1.3.15: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

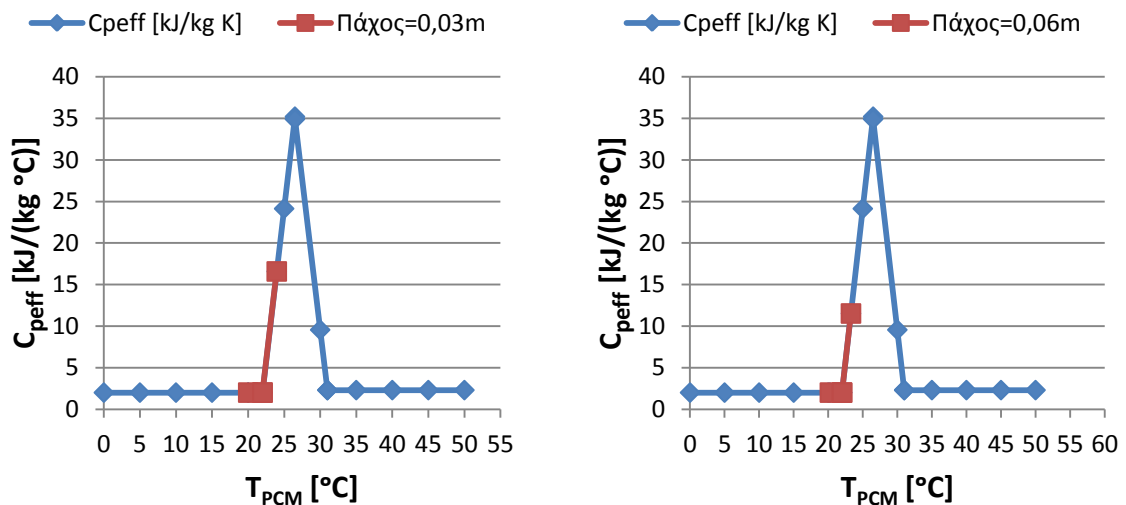


Διάγραμμα 6.1.3.16: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ Για 21^η Ιανουαρίου και υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:

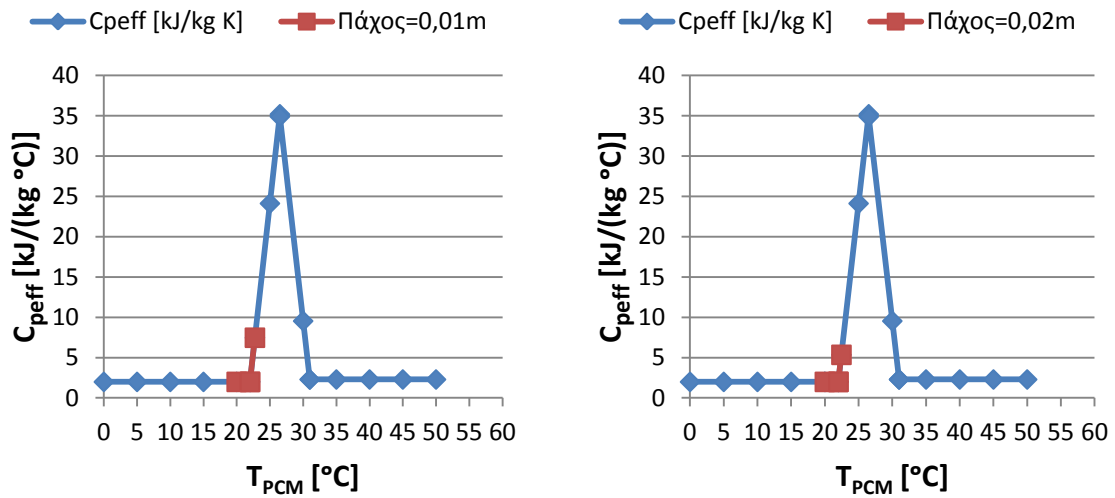


Διάγραμμα 6.1.3.17: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

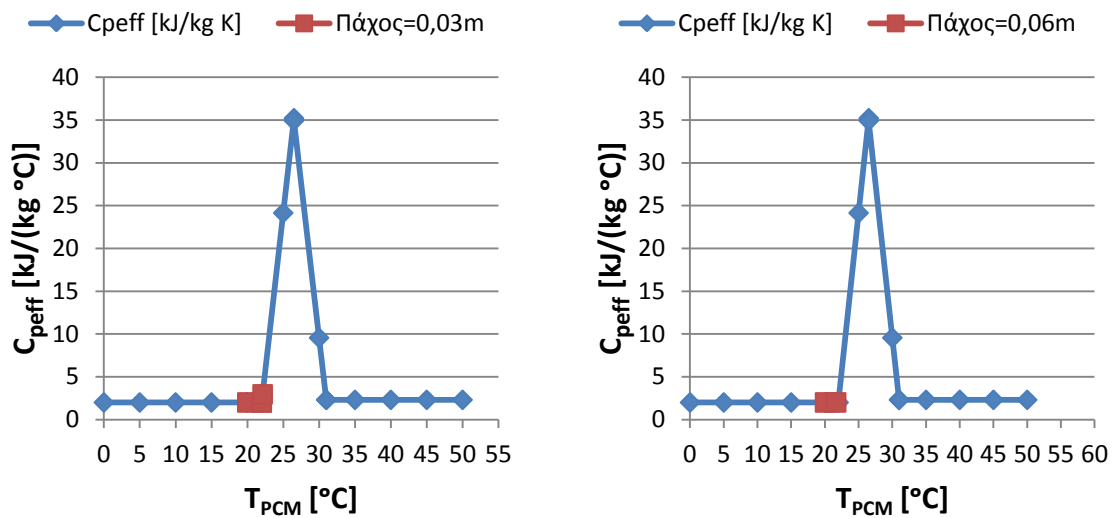


Διάγραμμα 6.1.3.18: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ Για 21^η Ιανουαρίου και υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:

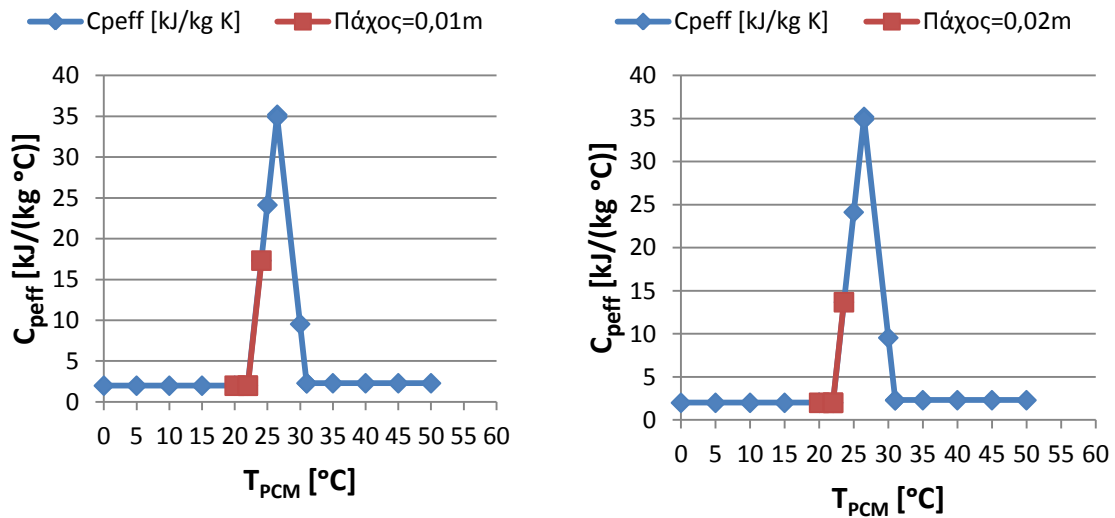


Διάγραμμα 6.1.3.19: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

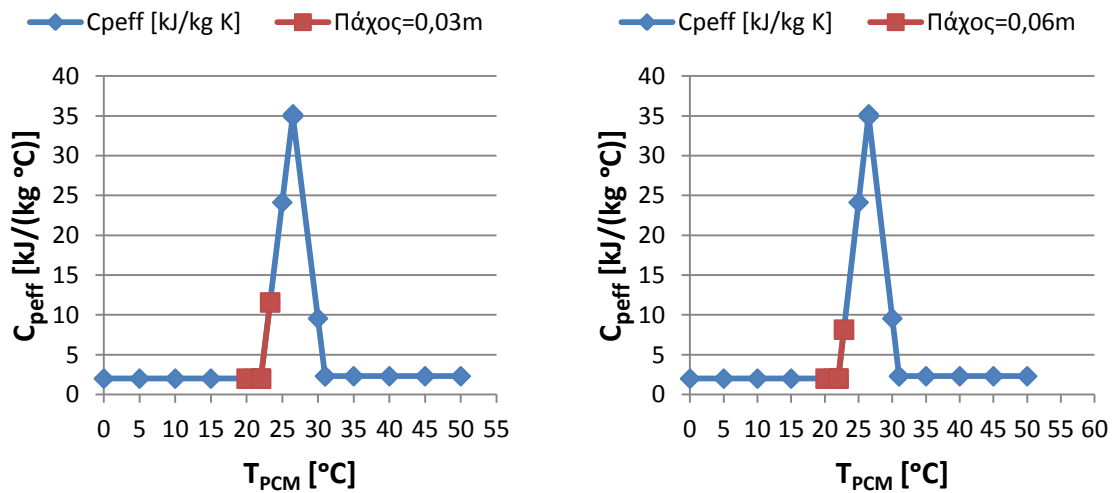


Διάγραμμα 6.1.3.20: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ Για 21^η Ιανουαρίου και υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:

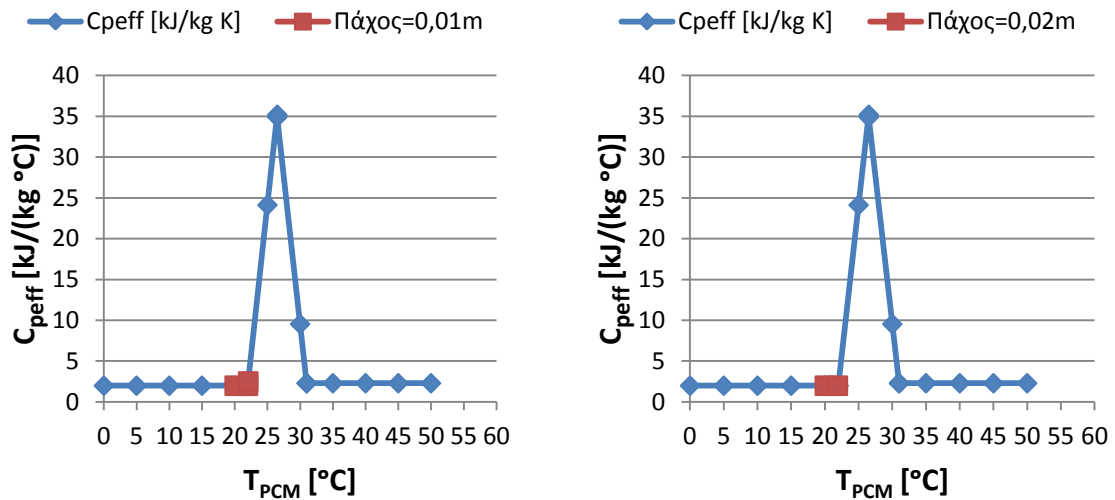


Διάγραμμα 6.1.3.21: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

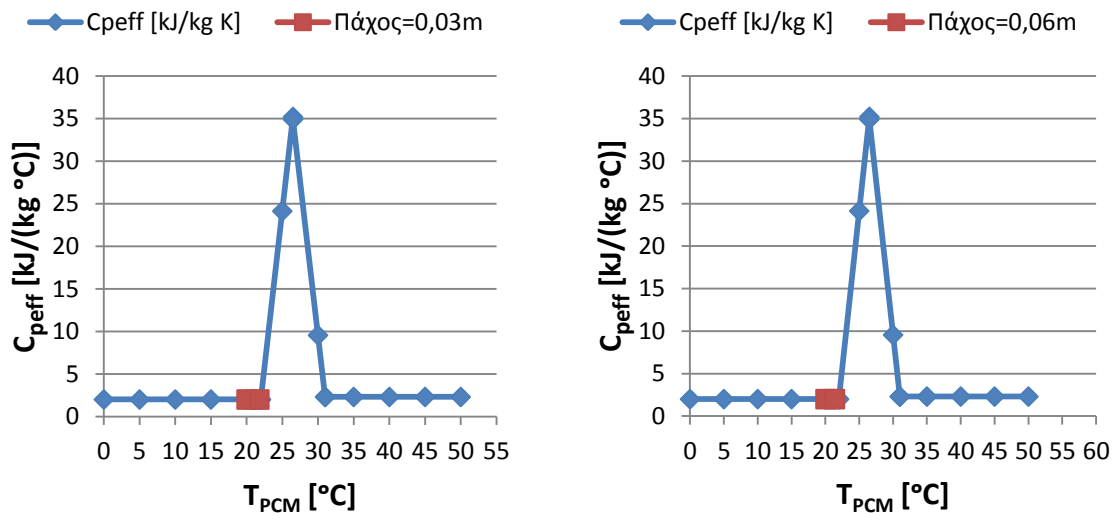


Διάγραμμα 6.1.3.22: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ Για 21^η Ιανουαρίου και υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:

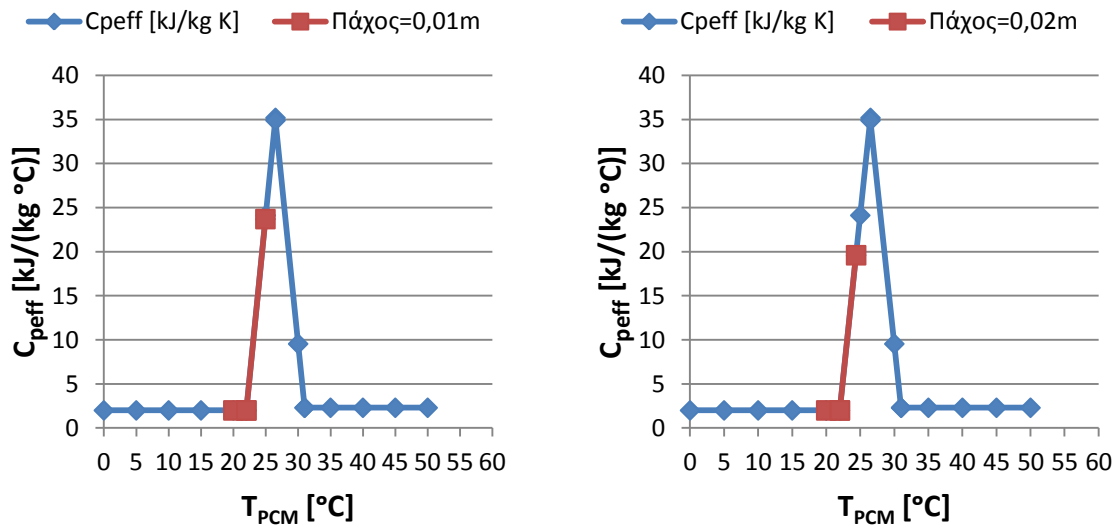


Διάγραμμα 6.1.3.23: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

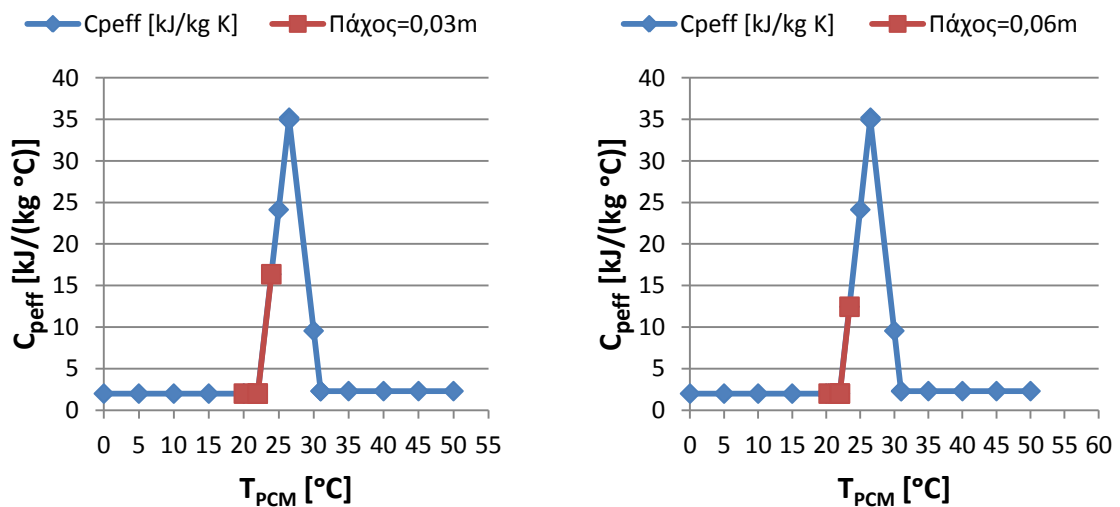


Διάγραμμα 6.1.3.24: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου και υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:

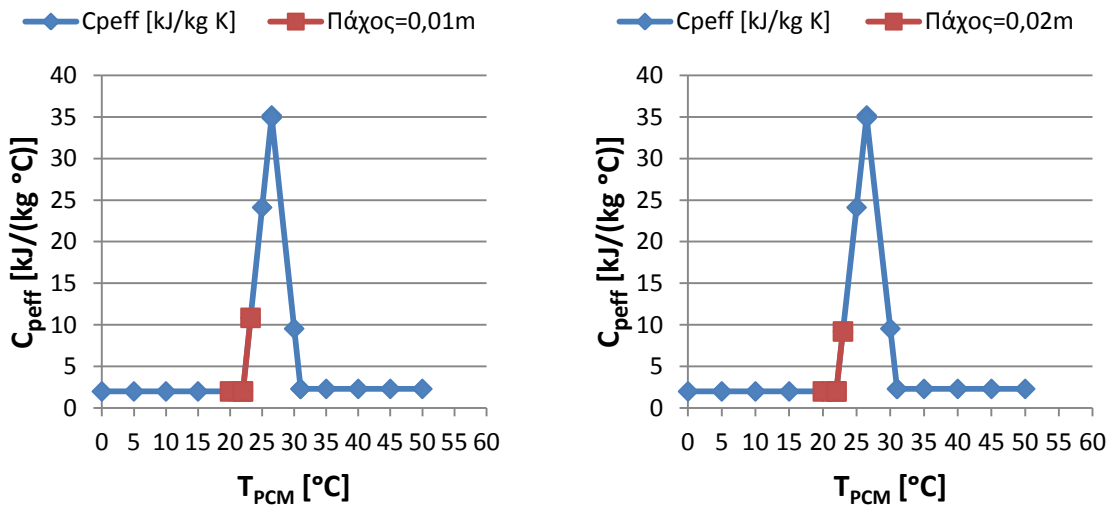


Διάγραμμα 6.1.3.25: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

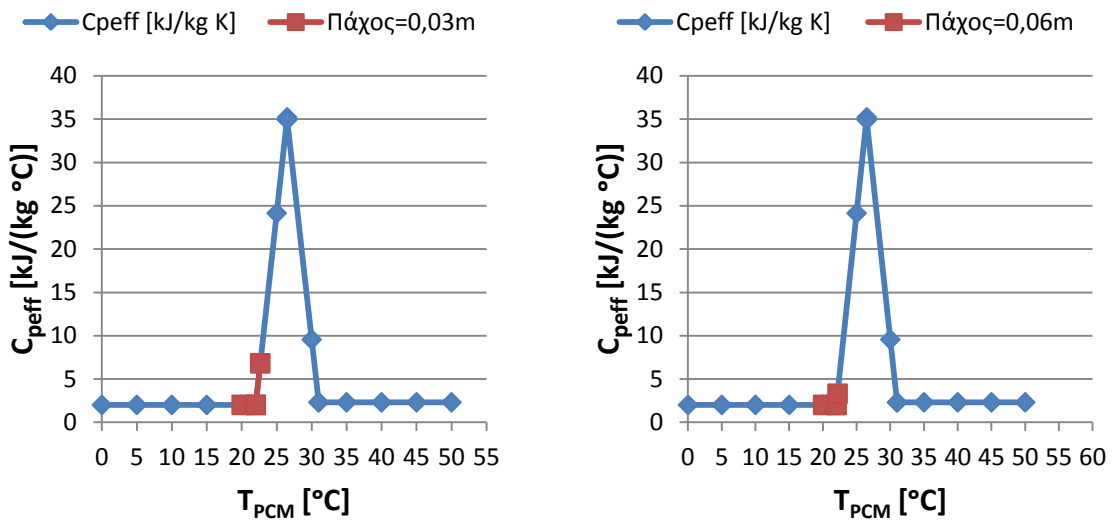


Διάγραμμα 6.1.3.26: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ **Για 21^η Φεβρουαρίου και υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:**

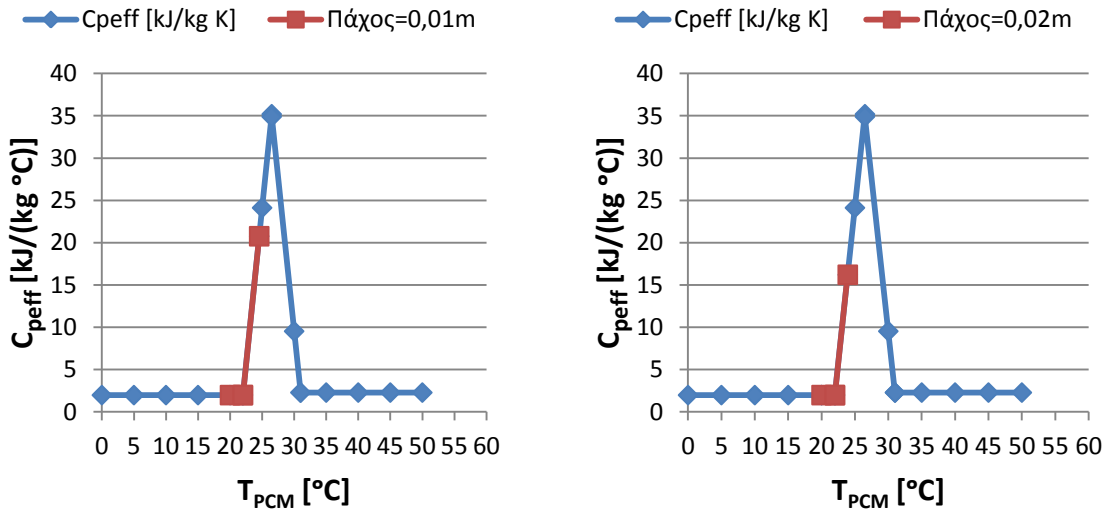


Διάγραμμα 6.1.3.27: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

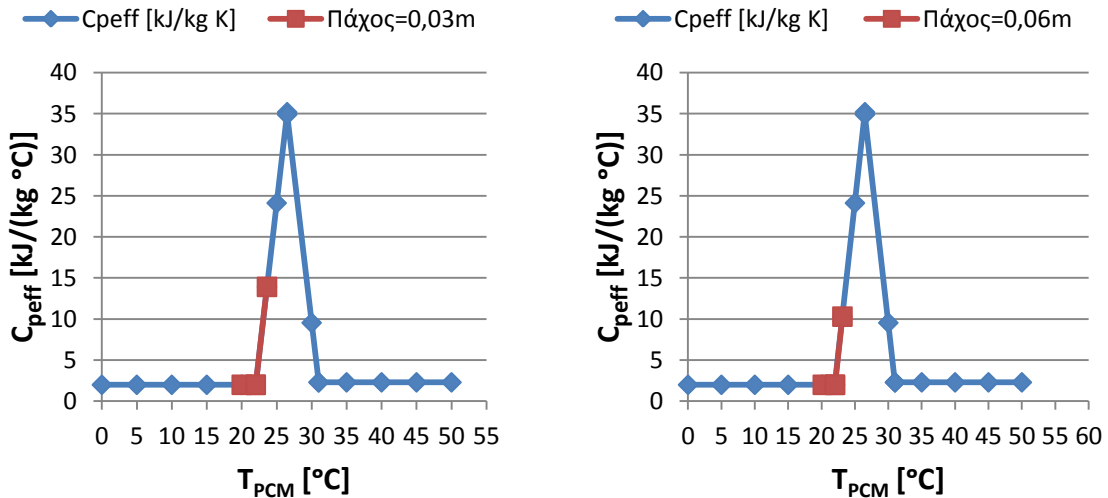


Διάγραμμα 6.1.3.28: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ **Για 21^η Φεβρουαρίου και υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:**

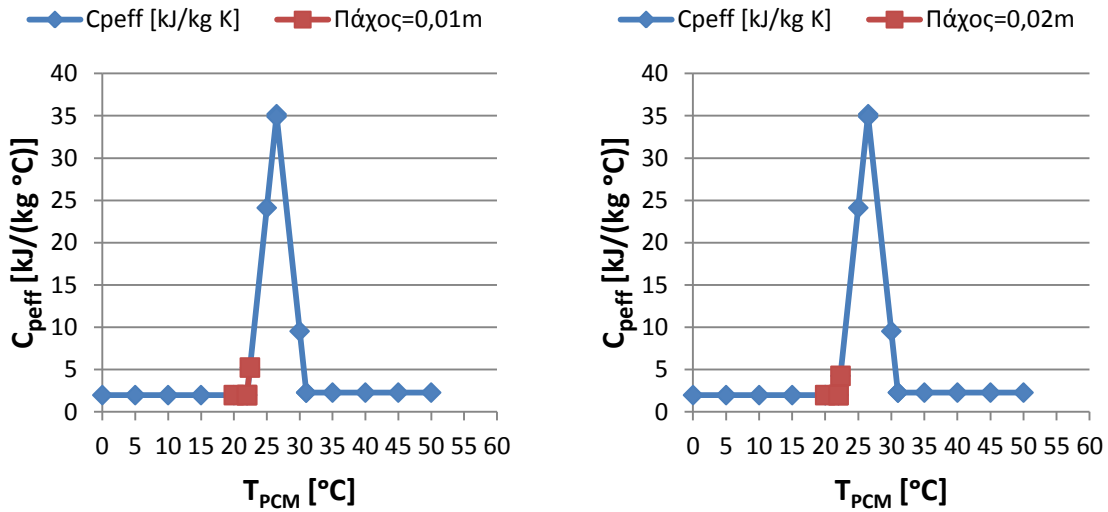


Διάγραμμα 6.1.3.29: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

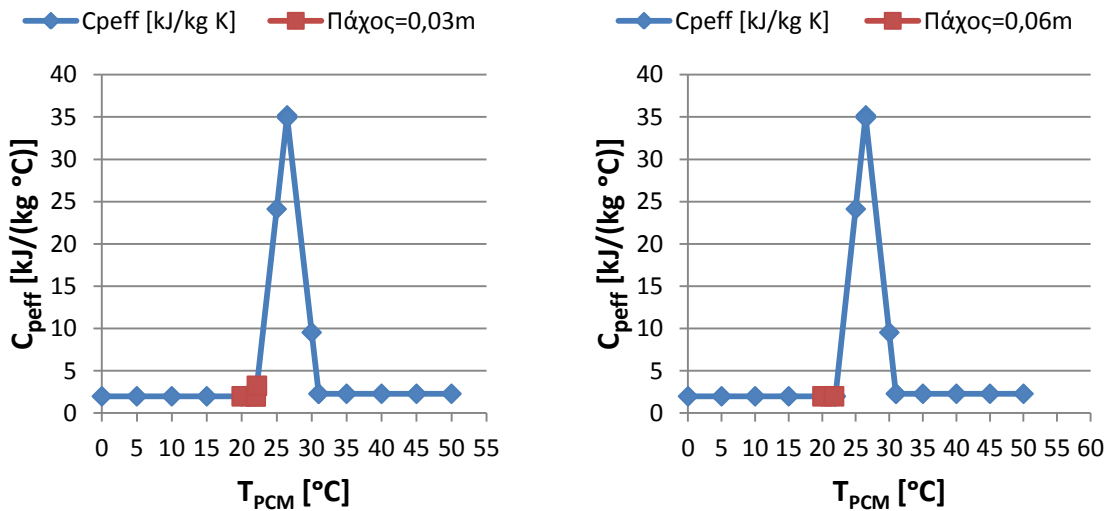


Διάγραμμα 6.1.3.30: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου και υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:

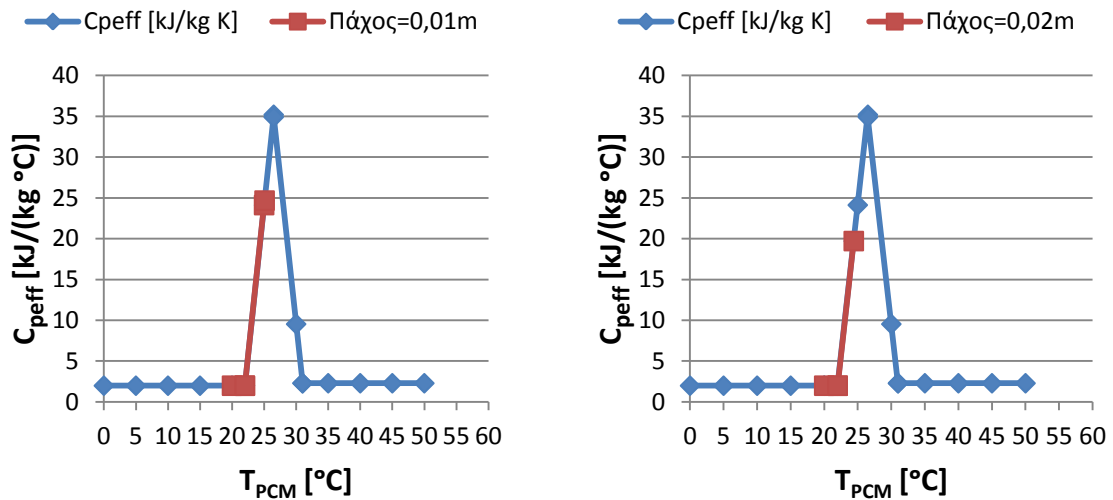


Διάγραμμα 6.1.3.31: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

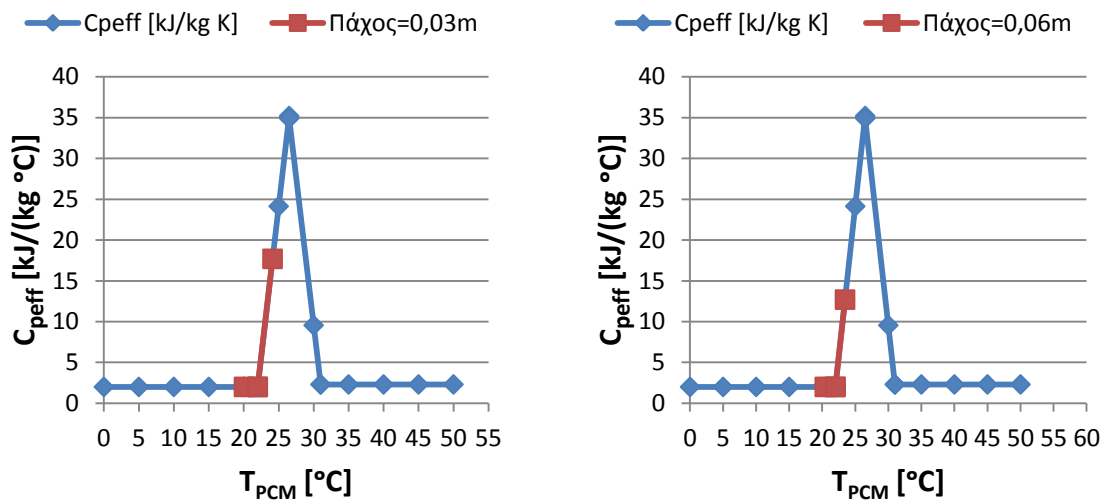


Διάγραμμα 6.1.3.32: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ **Για 21^η Μαρτίου και υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:**

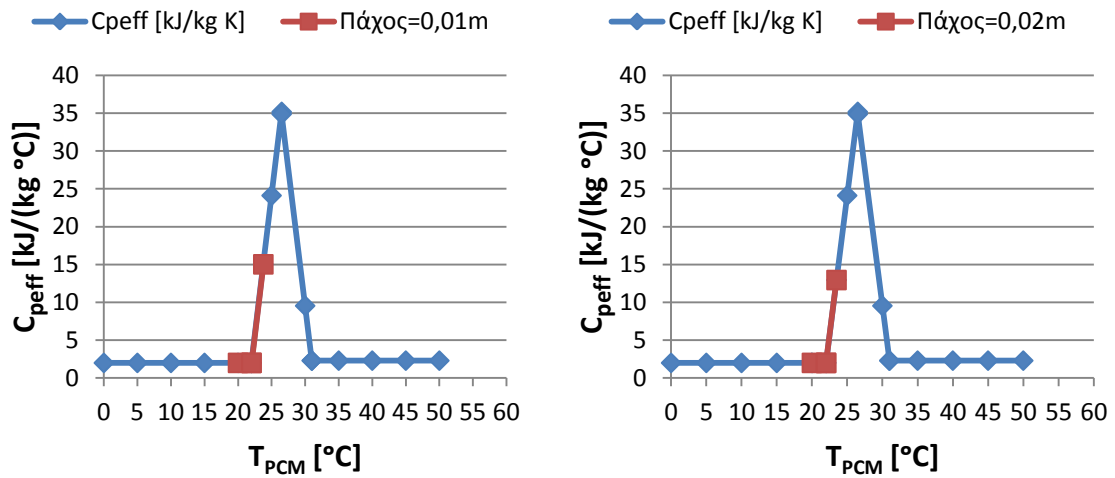


Διάγραμμα 6.1.3.33: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

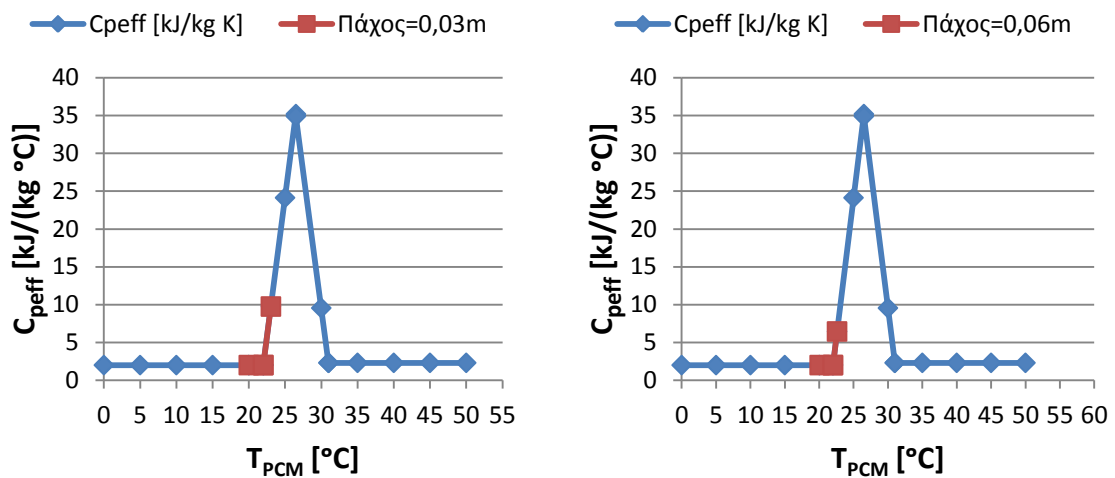


Διάγραμμα 6.1.3.34: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ **Για 21^η Μαρτίου και υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:**

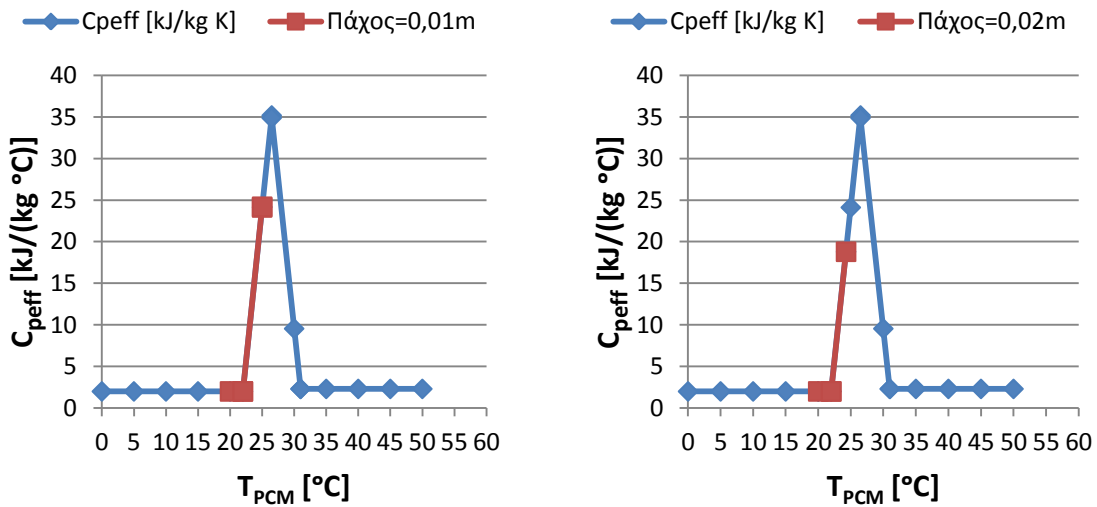


Διάγραμμα 6.1.3.35: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

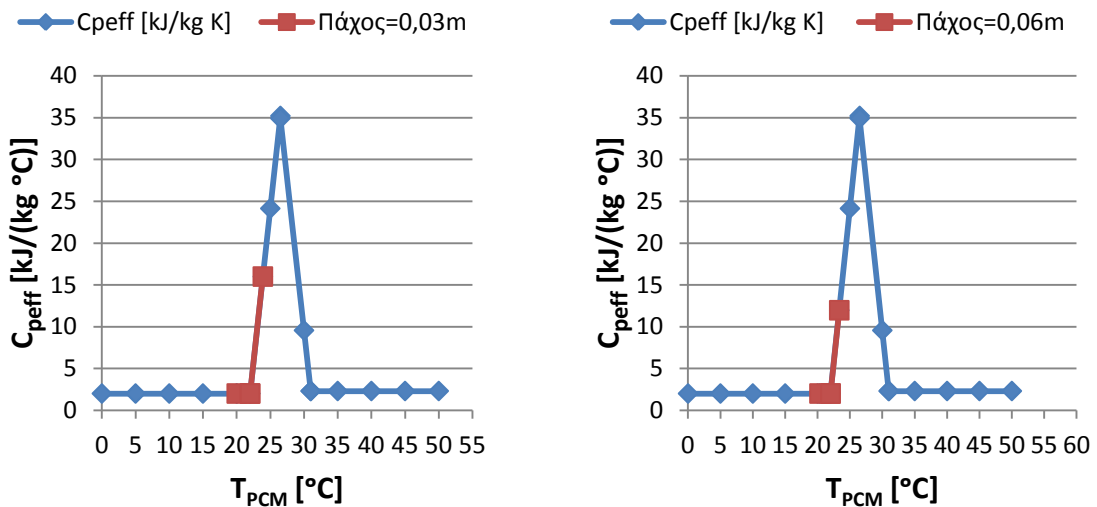


Διάγραμμα 6.1.3.36: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ **Για 21^η Μαρτίου και υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:**

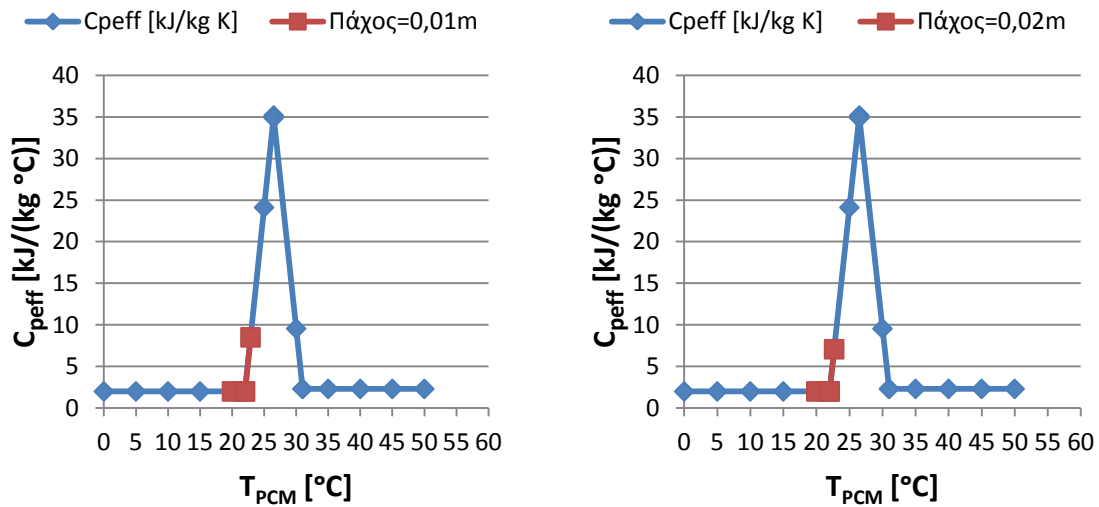


Διάγραμμα 6.1.3.37: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)

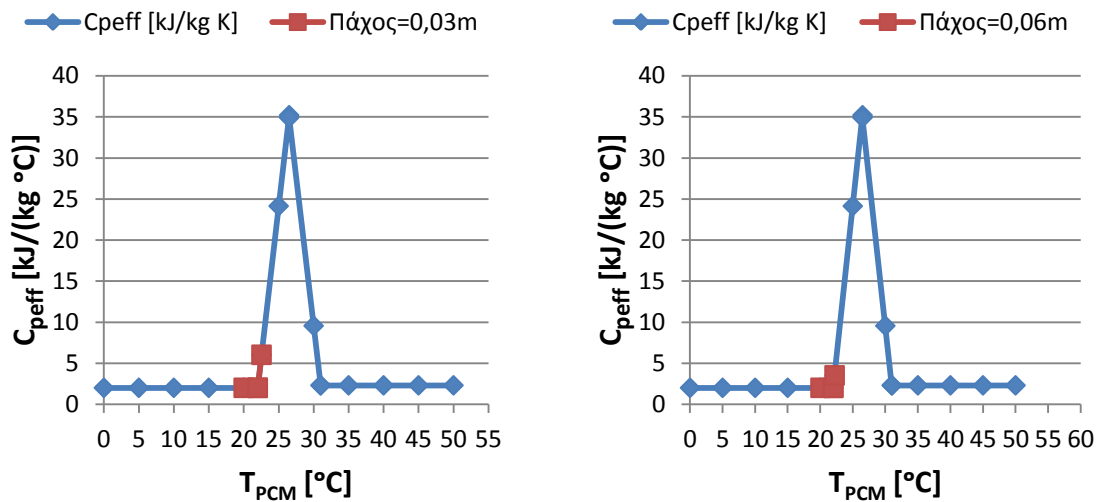


Διάγραμμα 6.1.3.38: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

➤ Για 21^η Μαρτίου και υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:



Διάγραμμα 6.1.3.39: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $d_{PCM}=0,01m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,02m$ (δεξιά)



Διάγραμμα 6.1.3.40: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $d_{PCM}=0,03m$ (αριστερά) και $d_{PCM}=0,06m$ (δεξιά)

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 6.1.3.1 έως 6.1.3.40 ως προς το πάχος στρώματος RT27, προκύπτει ότι από τα τέσσερα εξεταζόμενα πάχη αυτό για το οποίο καλύπτεται μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης και αναπτύσσονται πιο υψηλές θερμοκρασίες, είναι το λεπτότερο, $d_{PCM}=0,01m$, όπως αναμέναμε με βάση τα αποτελέσματα της ενότητας 6.1.2. Αυτό σημαίνει ότι γι' αυτή την τιμή του πάχους αξιοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό η ιδιότητα του PCM (RT27) να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση και επομένως τότε έχει καλύτερη απόδοση. Η μόνη περίπτωση κατά την οποία για $d_{PCM}=0,01m$ το RT27 δε καταφέρνει να εισέλθει στην περιοχή αλλαγής φάσης του και ως εκ τούτου δεν αξιοποιείται η ιδιότητά του, είναι η 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο. Επίσης, παρατηρούμε ότι η κατά το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση του RT27 για το πάχος $d_{PCM}=0,01m$ (αλλά και για τις υπόλοιπες τρεις τιμές $d_{PCM}=0,02m$, $d_{PCM}=0,03m$, $d_{PCM}=0,06m$) επιτυγχάνεται όταν ο υαλοπίνακας βρίσκεται σε δυτικό και κυρίως σε νότιο προσανατολισμό, ενώ για ανατολικό και ειδικότερα για βόρειο τοίχο με υαλοπίνακα, η ιδιότητά του να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση, αξιοποιείται εμφανώς λιγότερο (έως και καθόλου σε ορισμένες περιπτώσεις των άλλων τριών τιμών του πάχους). Τέλος, υπενθυμίζουμε ότι η τιμή $d_{PCM} = 0,01m$ δεν μπορεί πρακτικά να αποτελέσει πάχος στρώματος PCM, καθώς τα σφαιρίδια στα οποία εσωκλείεται το υλικό αλλαγής φάσης δε δύναται να χωρέσουν σε τόσο λεπτό στρώμα.

6.1.4 Ενεργειακή συνεισφορά του RT27 στο χώρο

Κατά τον ίδιο τρόπο με αυτόν που παρουσιάστηκε στις ενότητες 5.2.5 και 5.3.6, θα υπολογίσουμε στην παρούσα ενότητα το ποσό θερμότητας που προσφέρει το RT27 στον εξεταζόμενο χώρο. Έτσι, ανάλογα με το εκάστοτε πάχος στρώματος του PCM, προσδιορίζουμε το προσφερόμενο από το RT27 ποσό θερμότητας στο χώρο για κάθε ώρα του 24ώρου της 21^{ης} ημέρας καθενός από τους πέντε χειμερινούς μήνες (Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος) και για κάθε προσανατολισμό του τοίχου που φέρει υαλοπίνακα. Ομοίως, προς εξυπηρέτηση και διευκόλυνση της μελέτης μας, θεωρήσαμε ότι η ανάγκη για θέρμανση του χώρου κατά τους εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες και με βάση τις συνθήκες που επικρατούν και κατ' επέκταση τις απώλειες του υπό μελέτη κτιρίου, είναι $P=20W/m^2$ προκειμένου να επιτυγχάνεται σταθερή θερμοκρασία $T_{\Delta\Omega M}=20^{\circ}C$ εντός του χώρου. Η τιμή της απαιτούμενης ισχύος $P=20W/m^2$ έχει ληφθεί από μελέτες.

Επομένως, για το χώρο της μελέτης μας, διαστάσεων $10m \times 10m = 100m^2$, θα απαιτούνται:

$$P_{ολ} = 20 \frac{W}{m^2} \cdot 100m^2 = 2000W = 2kW ,$$

Η κάλυψη της παραπάνω θερμικής ισχύος, $P_{ολ}$, θα επιτυγχάνεται κατά ένα μέρος από θερμαντικά σώματα και άλλες πηγές θερμότητας και το υπόλοιπο θα παρέχεται από την εφαρμογή του PCM. Έτσι, για κάθε ώρα του 24ώρου θα απαιτούνται:

$$Q_{απαιτ} = 2kW \cdot 3600sec = 7200kJ$$

εκ των οποίων το ποσό που θα προσφέρει το PCM ισούται με:

$$Q = U \cdot A_W \cdot (T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}) \cdot 3600 [kJ] \quad (6.1.4.1)$$

$$\Rightarrow Q = 7,06 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot (20 - T_{PCM}) \cdot 3600$$

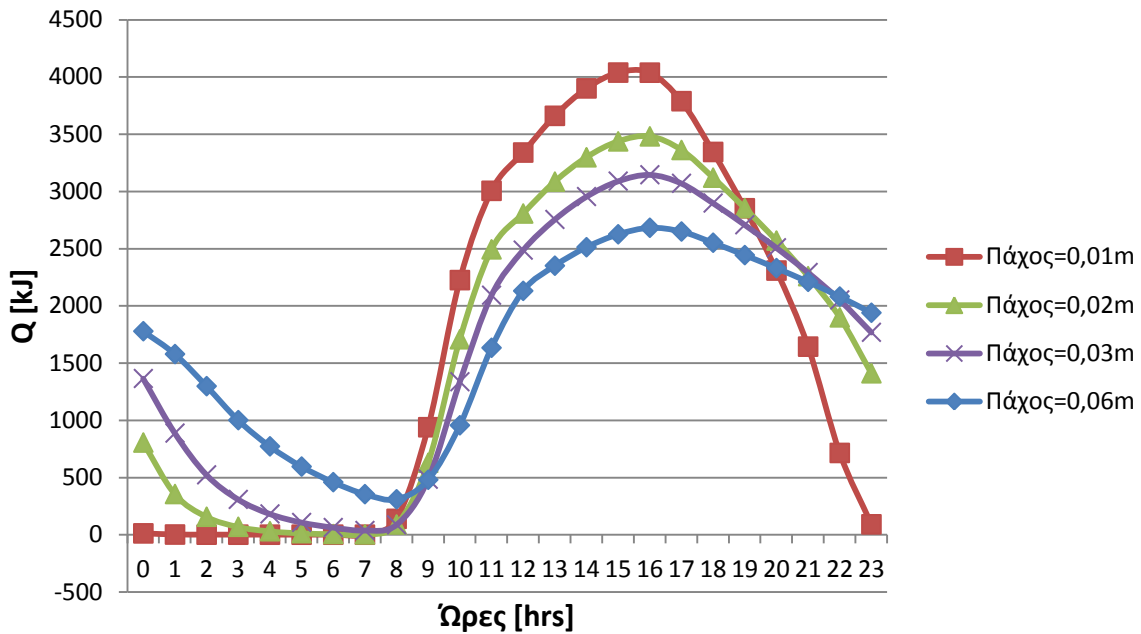
$$\Rightarrow Q = 762,48 \cdot (20 - T_{PCM}) \quad (6.1.4.2)$$

όπου $T_{PCM} = (T_{αρχ} + T_{τελ})/2$, $T_{αρχ}$, $T_{τελ}$ έτσι όπως προέκυψαν από τις σχέσεις (6.1.2.2) έως (6.1.2.4) της ενότητας 6.1.2 αναλόγως του πάχους του στρώματος του PCM, για κάθε ώρα του 24ώρου.

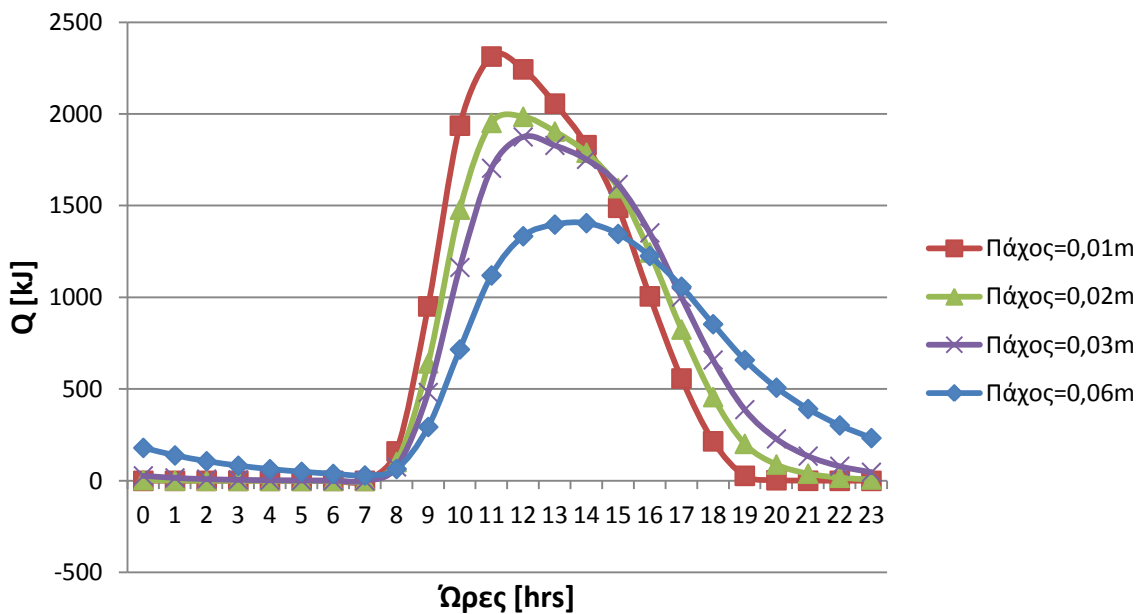
Υπενθυμίζουμε ότι με αυτόν τον τρόπο υπολογισμού της προσφερόμενης θερμότητας δεν γίνεται διακριτό το αισθητό ή (και) το λανθάνον μέρος αυτής.

Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται το προσφερόμενο ποσό θερμότητας από το RT27, συναρτήσει των ωρών της εκάστοτε ημέρας. Για εποπτικούς λόγους και καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων, σε κάθε διάγραμμα εμφανίζεται η ενεργειακή συνεισφορά του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου για τις τρεις νέες τιμές του πάχους, αλλά και της αρχικής που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ($d_{PCM} = 0,03m$).

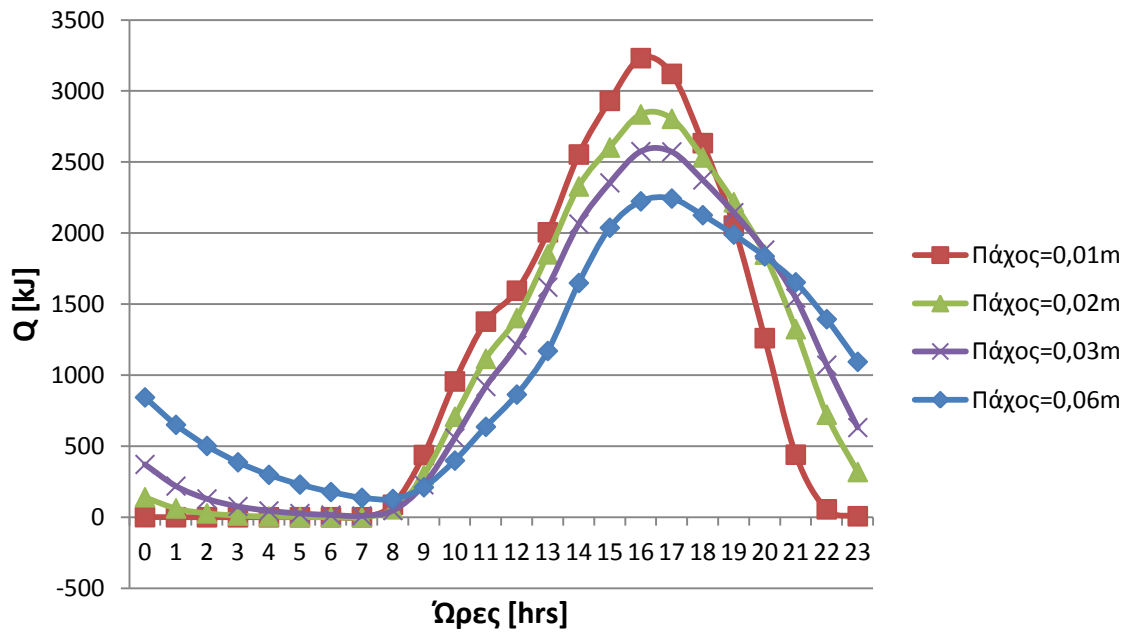
➤ Για 21^η Νοεμβρίου:



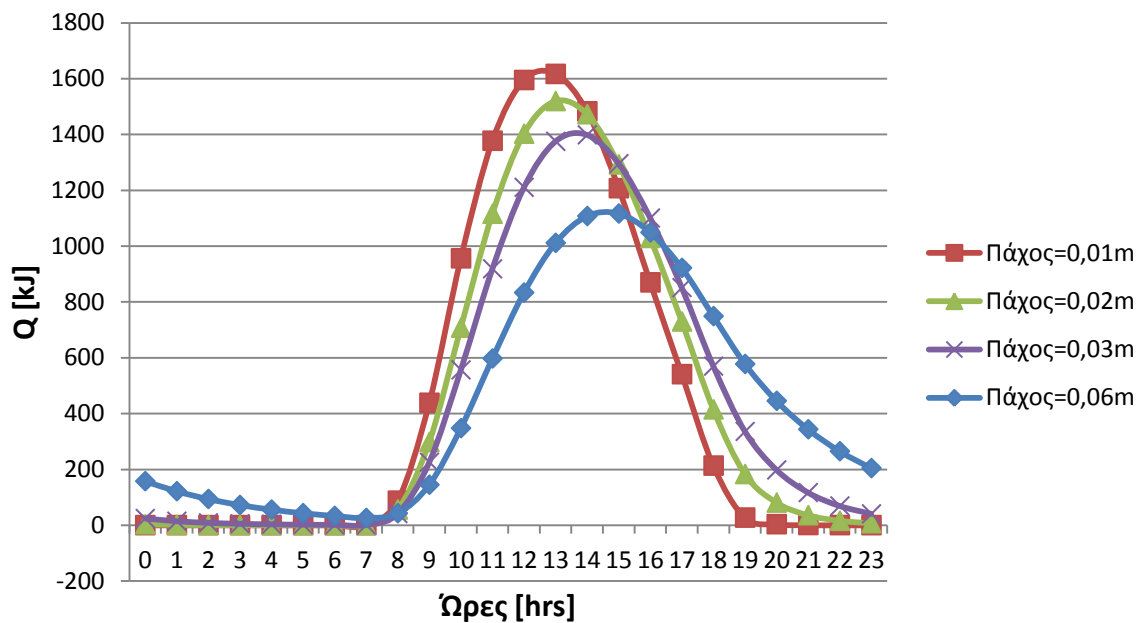
Διάγραμμα 6.1.4.1: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.4.2: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

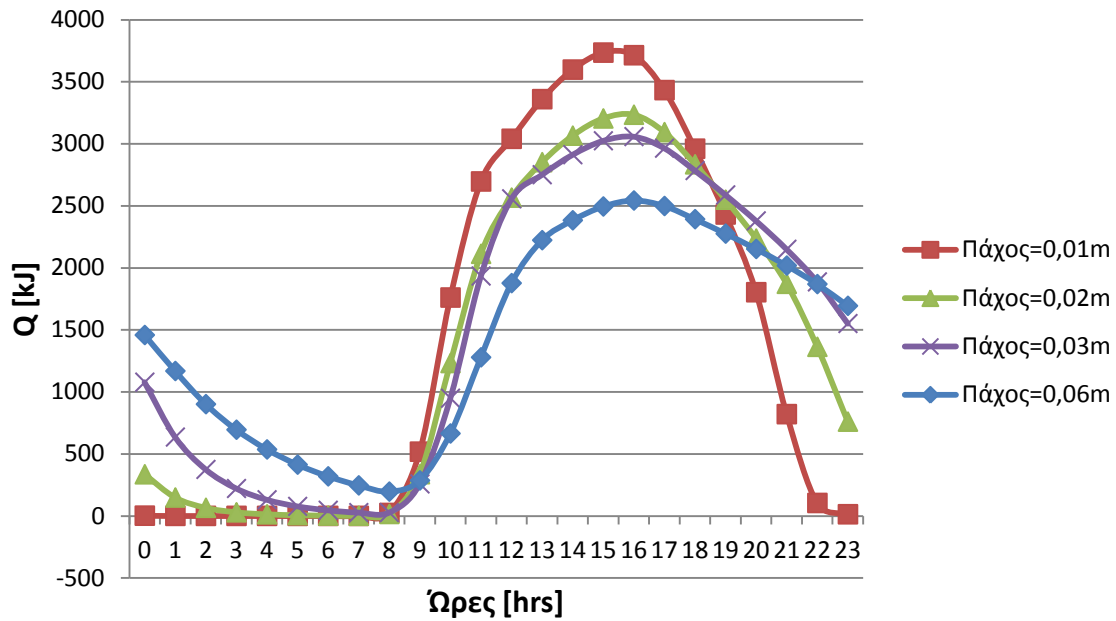


Διάγραμμα 6.1.4.3: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

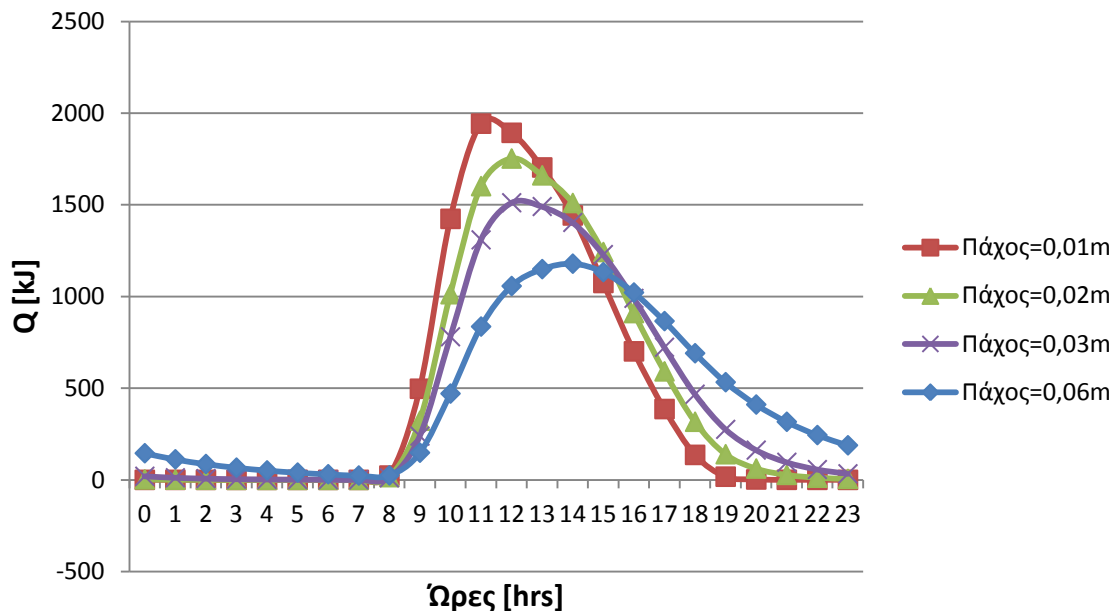


Διάγραμμα 6.1.4.4: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

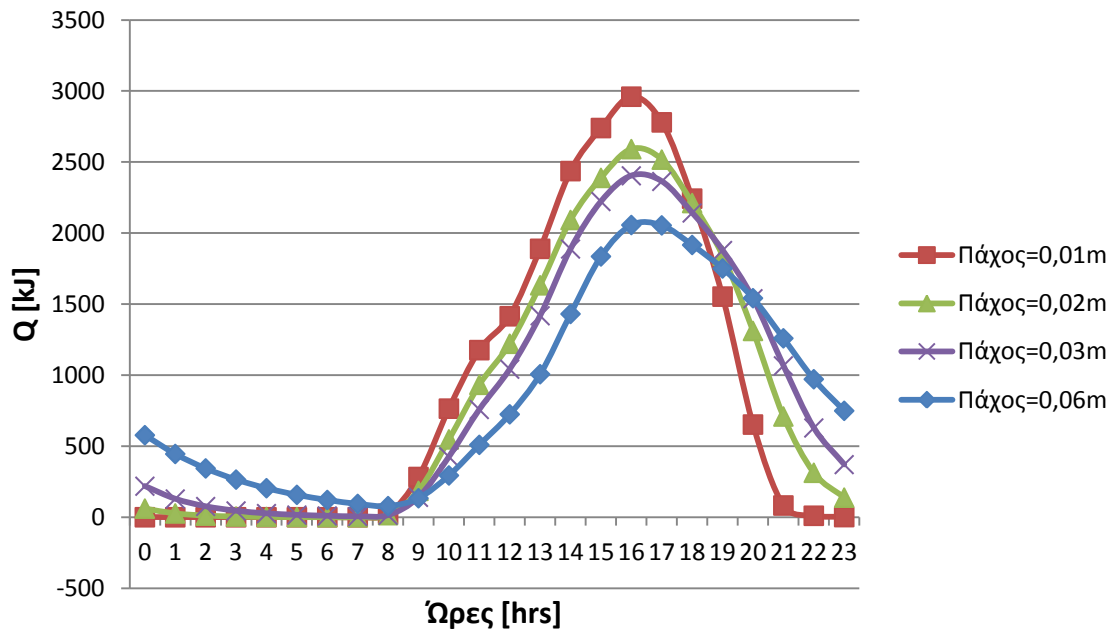
➤ Για 21^η Δεκεμβρίου:



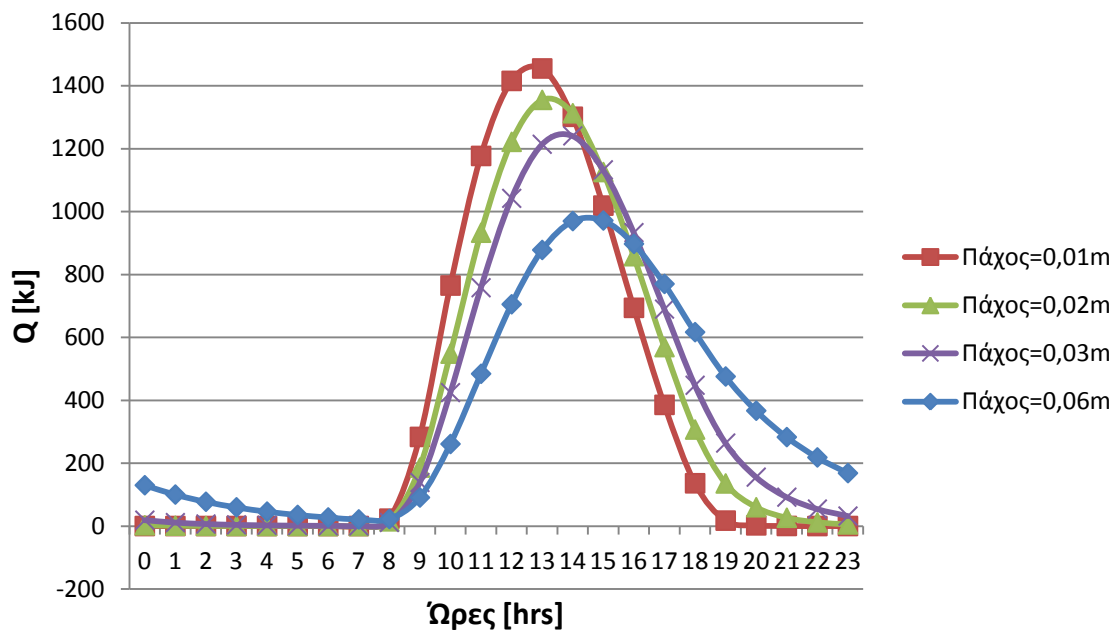
Διάγραμμα 6.1.4.5: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.4.6: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

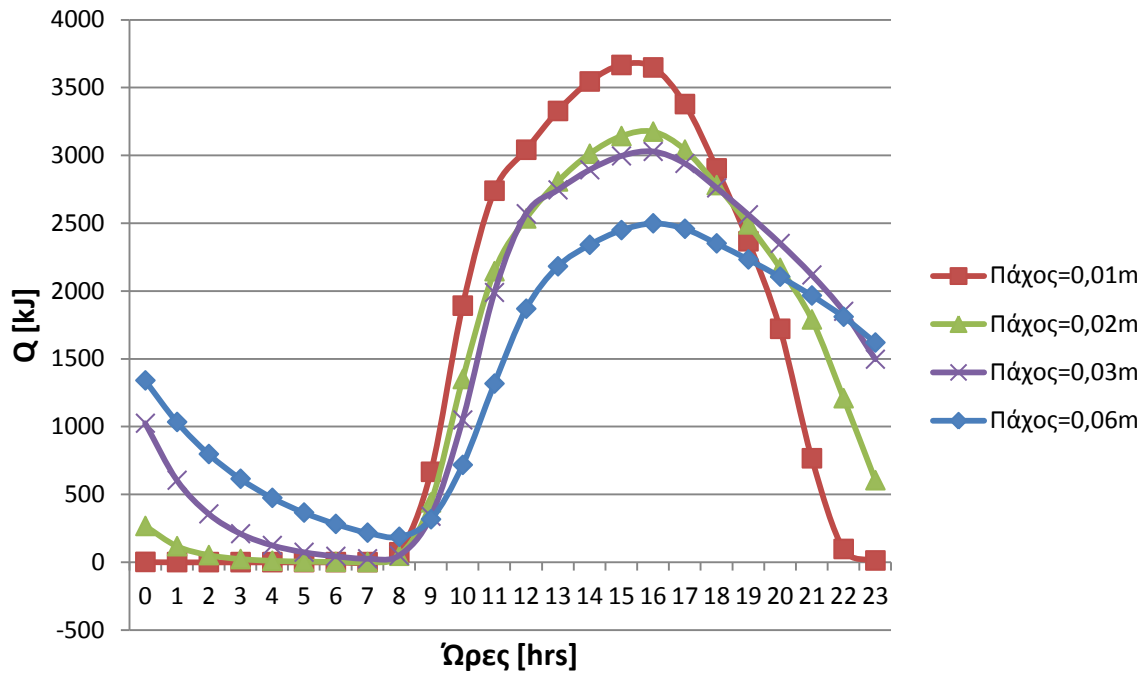


Διάγραμμα 6.1.4.7: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

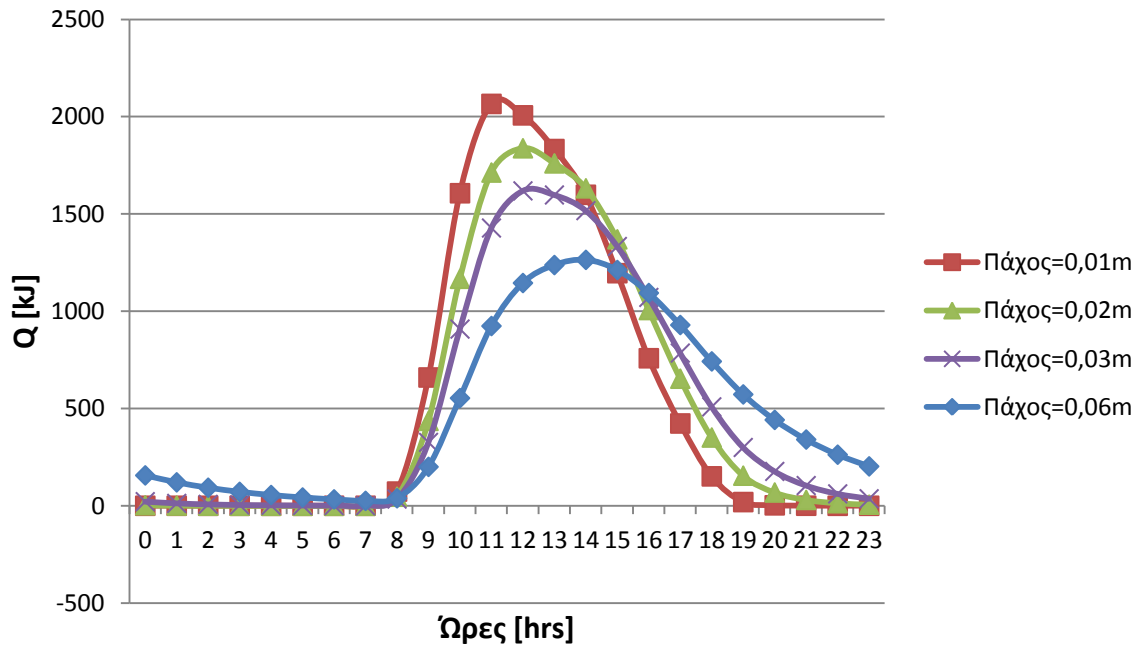


Διάγραμμα 6.1.4.8: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

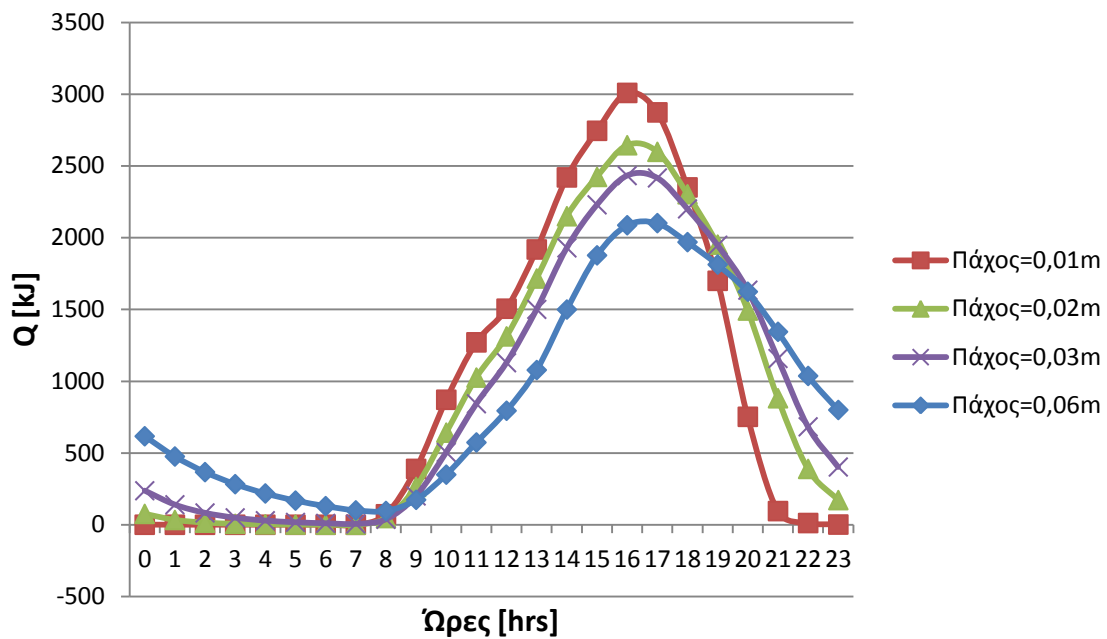
➤ Για 21^η Ιανουαρίου:



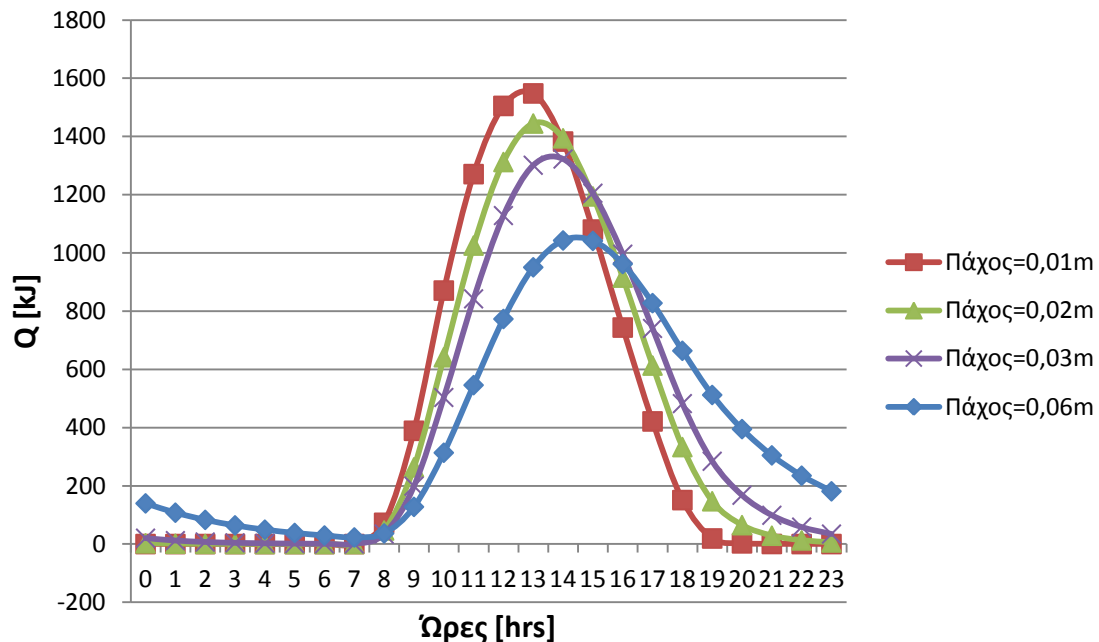
Διάγραμμα 6.1.4.9: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.4.10: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

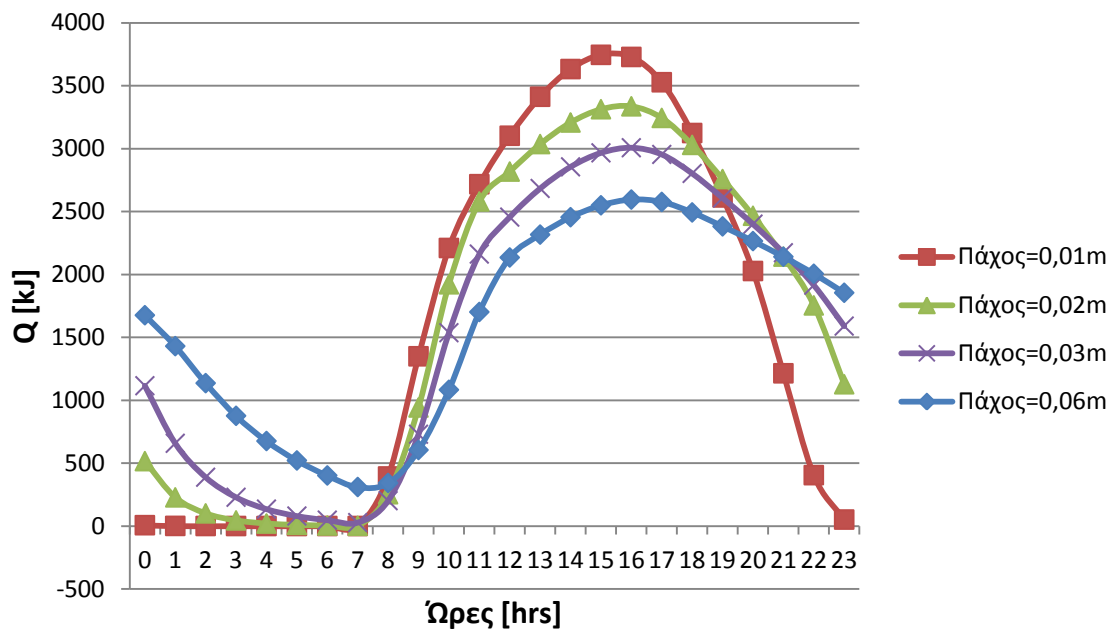


Διάγραμμα 6.1.4.11: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με ναλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

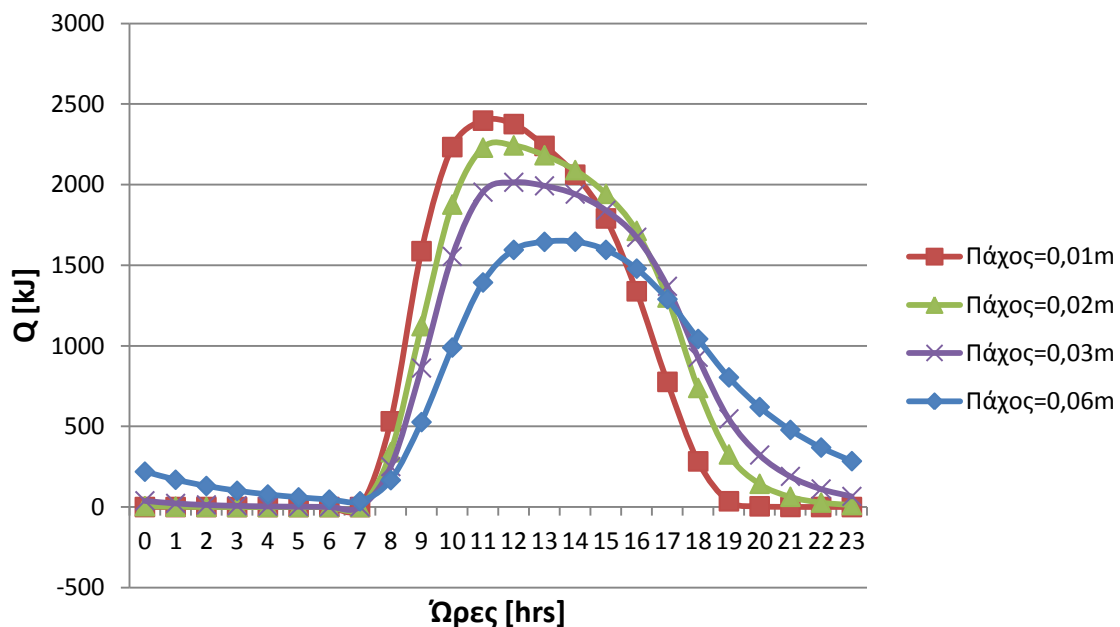


Διάγραμμα 6.1.4.12: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με ναλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

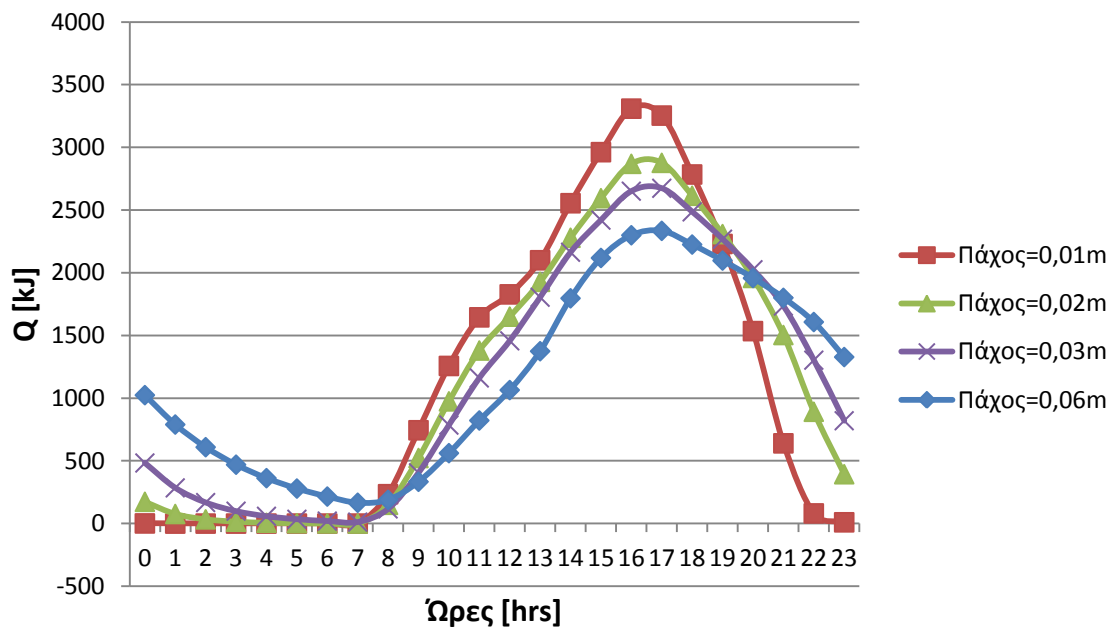
➤ Για 21^η Φεβρουαρίου:



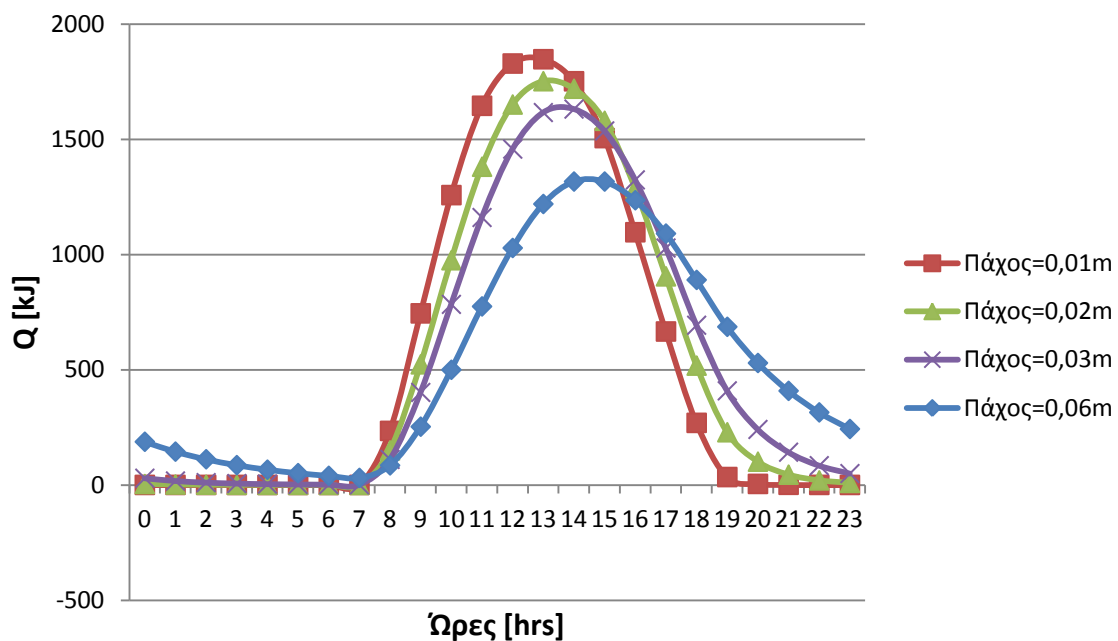
Διάγραμμα 6.1.4.13: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.4.14: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

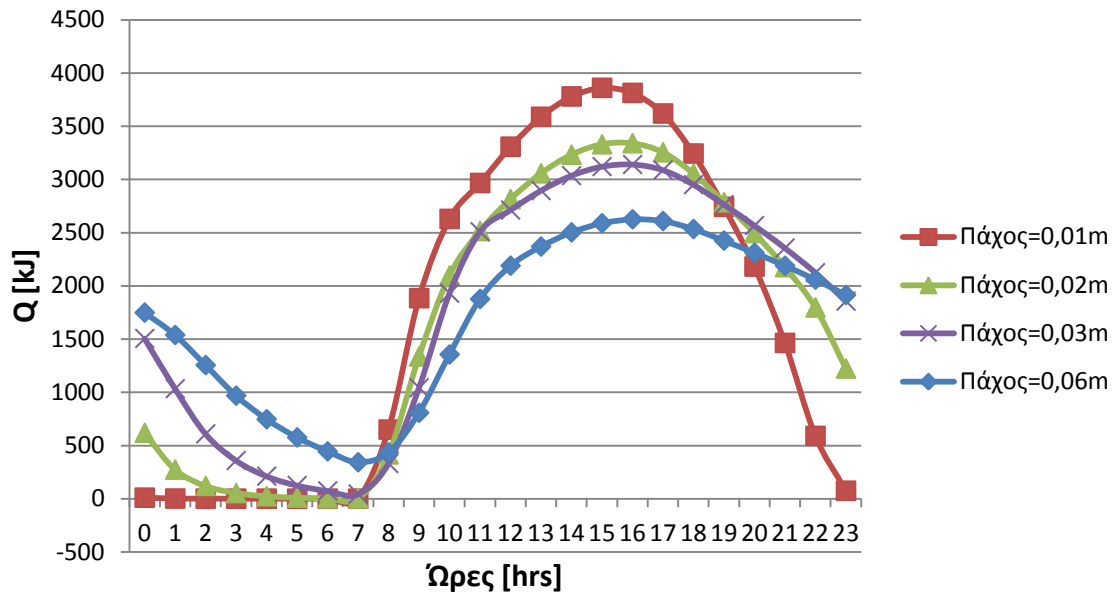


Διάγραμμα 6.1.4.15: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με βαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

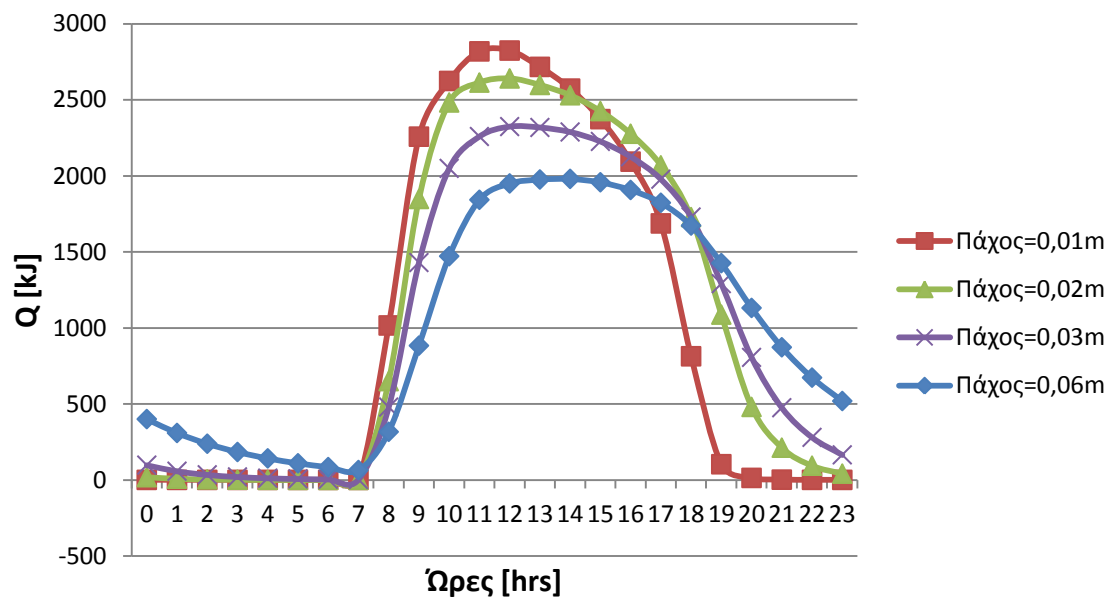


Διάγραμμα 6.1.4.16: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με βαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

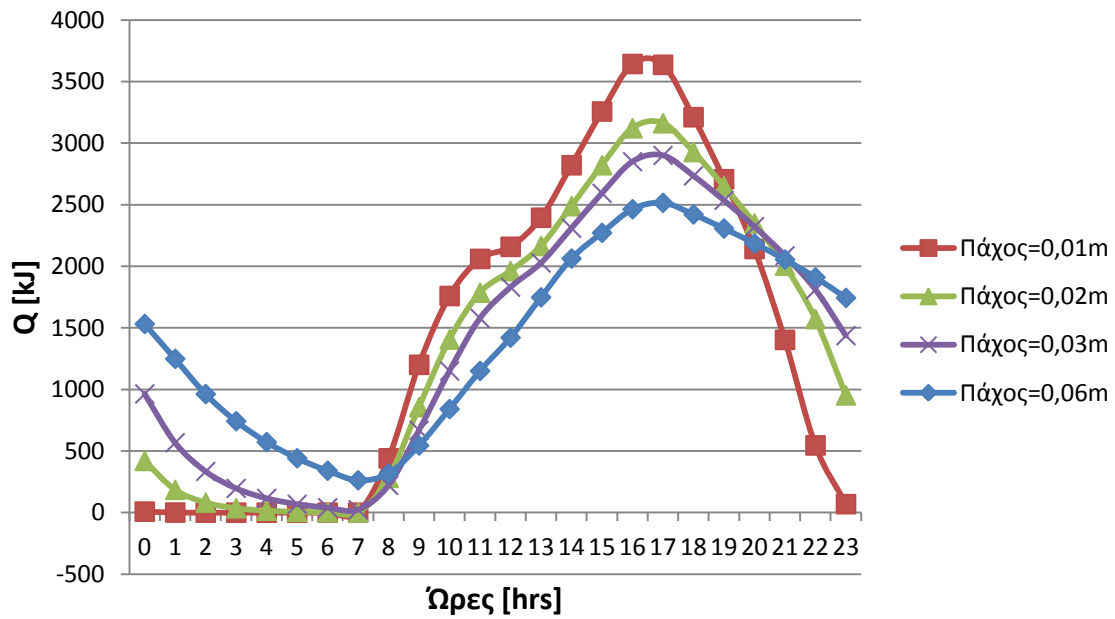
➤ Για 21^η Μαρτίου:



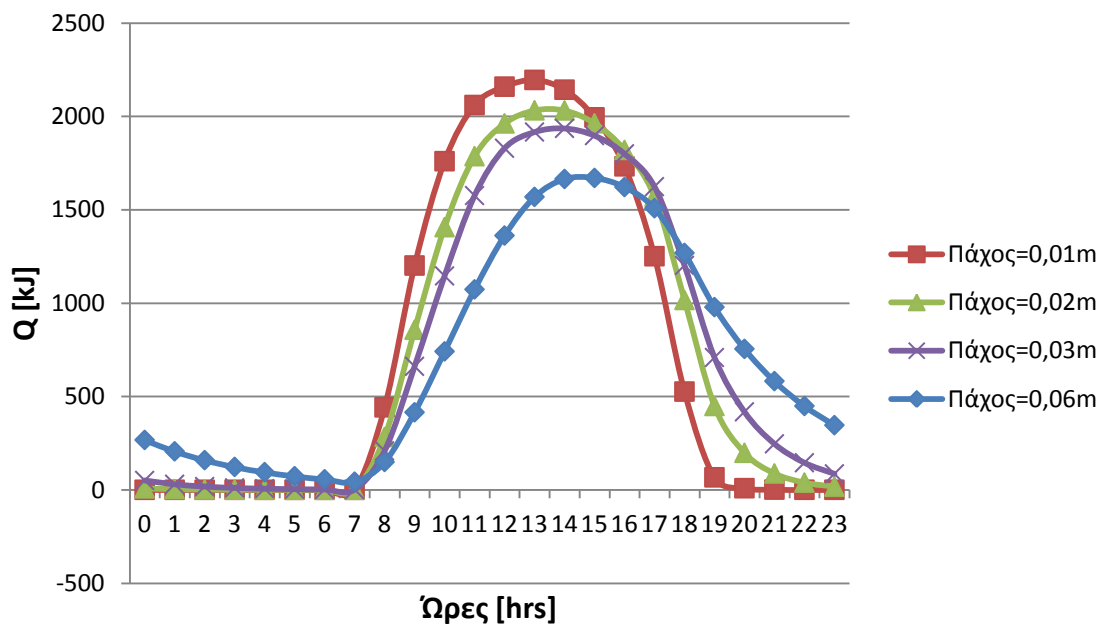
Διάγραμμα 6.1.4.17: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.4.18: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.4.19: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με ναλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27



Διάγραμμα 6.1.4.20: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με ναλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικά πάχη στρώματος του RT27

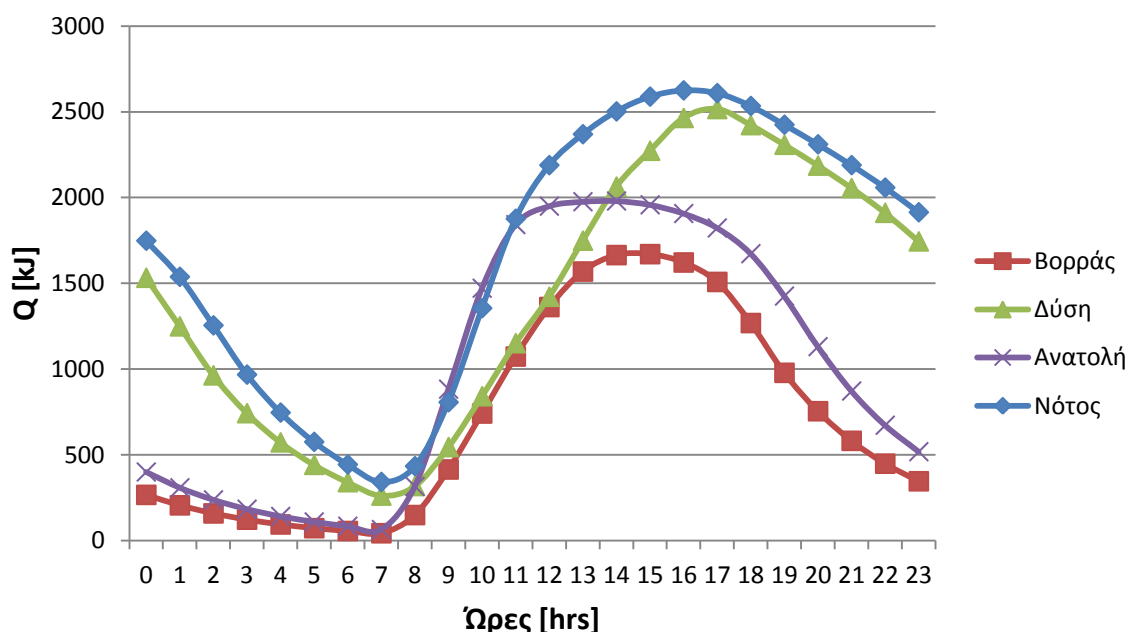
Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Τα παραπάνω διαγράμματα, 6.1.4.1 έως 6.1.4.20, για την προσφερόμενη θερμότητα του RT27 έχουν ουσιαστικά την ίδια μορφή με τα αντίστοιχα διαγράμματα θερμοκρασίας του RT27, 6.1.2.1 έως 6.1.2.20, που όπως προαναφέρθηκε είναι λογικό από μαθηματικής πλευράς, αν κοιτάξουμε τη σχέση (6.1.4.2). Επιπλέον, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ενότητας 6.1.2 για το RT27, η θερμοκρασία του είναι υψηλότερη αυτής του δωματίου καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου, για κάθε μήνα, κάθε προσανατολισμό, καθώς επίσης και για κάθε πάχος στρώματος PCM. Κατά συνέπεια, για οποιαδήποτε περίπτωση, το RT27 μόνο προσδίδει θερμότητα στο χώρο, γεγονός λογικό που επιβεβαιώνεται και στα εν λόγω διαγράμματα 6.1.4.1 έως 6.1.4.20. Επιπλέον, παρατηρούμε για κάθε μία από τις τέσσερις καμπύλες (μία για κάθε πάχος d_{PCM}) όλων των παραπάνω διαγραμμάτων ότι το ποσό προσφερόμενης θερμότητας μειώνεται από τις 12 το βράδυ μέχρι τις 7:00-8:00 περίπου το πρωί, από τις 7:00-8:00 το πρωί και μέχρι τις ώρες γύρω από το μεσημέρι (η ακριβής ώρα ποικίλλει αναλόγως του μήνα, του προσανατολισμού και του πάχους) αυξάνεται, ενώ από εκεί και έπειτα μέχρι την ολοκλήρωση του 24ώρου έχει πάλι φθίνουσα πορεία. Αυτή η μεταβολή στην προσφερόμενη θερμότητα εξηγείται ως εξής: Στο χρονικό διάστημα 8 το πρωί μέχρι τις ώρες γύρω από το μεσημέρι, η θερμότητα που προσφέρει ολοένα αυξάνεται, αφού η διαφορά θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) αυξάνει κατ' απόλυτη τιμή, λόγω διέγερσης του RT27 από την ηλιακή ακτινοβολία G_T (γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του PCM). Κατόπιν και μέχρι τις 7 με 8 το πρωί, η διαφορά θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) μειώνεται κατ' απόλυτη τιμή, αφού πλέον δεν υφίσταται η διέγερση G_T (δηλαδή παύει να αυξάνει η θερμοκρασία του RT27) και έτσι η θερμότητα που προσφέρει στο χώρο ολοένα μειώνεται. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη μέγιστη προσφερόμενη θερμότητα εμφανίζεται για το μικρότερο πάχος στρώματος RT27 $d_{PCM}=0,01m$ (για κάθε μήνα και προσανατολισμό), ενώ η μικρότερη μέγιστη προσφερόμενη θερμότητα εμφανίζεται για το παχύτερο στρώμα RT27 $d_{PCM}=0,06m$ (για κάθε μήνα και προσανατολισμό). Αυτά είναι αναμενόμενα δεδομένου ότι η μεγαλύτερη μέγιστη θερμοκρασία αναπτύσσεται στο λεπτότερο στρώμα και η μικρότερη μέγιστη στο παχύτερο, σύμφωνα και με τις παρατηρήσεις των διαγραμμάτων 6.1.2.1 έως 6.1.2.20. Ακόμη βλέπουμε ότι όσο παχύτερο είναι το στρώμα του RT27 τόσο πιο ψηλά ξεκινούν οι καμπύλες προσφερόμενης θερμότητας. Αυτό εξηγείται ως εξής: Παχύτερο στρώμα PCM συνεπάγεται μεγαλύτερη μάζα PCM που προφανώς η ηλιακή ακτινοβολία G_T δεν μπορεί να τη ζεστάνει στον ίδιο χρόνο και εξίσου με μία μικρότερη μάζα PCM (λεπτότερο στρώμα). Άρα στο παχύτερο στρώμα θα αναπτυχθούν μικρότερες θερμοκρασίες από ότι στα λεπτότερα στρώματα, με αποτέλεσμα η διαφορά θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) να είναι και αυτή μικρότερη κατ' απόλυτη τιμή από ότι στα μικρότερα πάχη και έτσι να είναι μικρότερα και τα ποσά προσφερόμενης θερμότητας του PCM στο χώρο. Από τις μεσημεριανές ώρες και έπειτα, όπου πλέον υποχωρεί η ηλιακή ακτινοβολία και επομένως μειώνεται η θερμοκρασία του PCM, η πρόσδοση θερμότητας στο χώρο θα γίνεται προφανώς πιο αργά για το παχύτερο στρώμα πράγμα που σημαίνει πως τα ενεργειακά αποθέματα παχύτερου στρώματος καθυστερούν να εξαντληθούν και γι' αυτό κατά τις πρώτες πρωινές ώρες είναι υψηλότερα. Για το λόγο αυτό λοιπόν ξεκινούν από πιο ψηλά οι καμπύλες των παχύτερων στρωμάτων. Συμπερασματικά, τα μεγαλύτερα αλλά και μικρότερα ποσά θερμότητας κατά τη διάρκεια του 24ώρου προσφέρονται από το PCM στο χώρο όταν το πάχος του στρώματος του PCM είναι πιο μικρό.

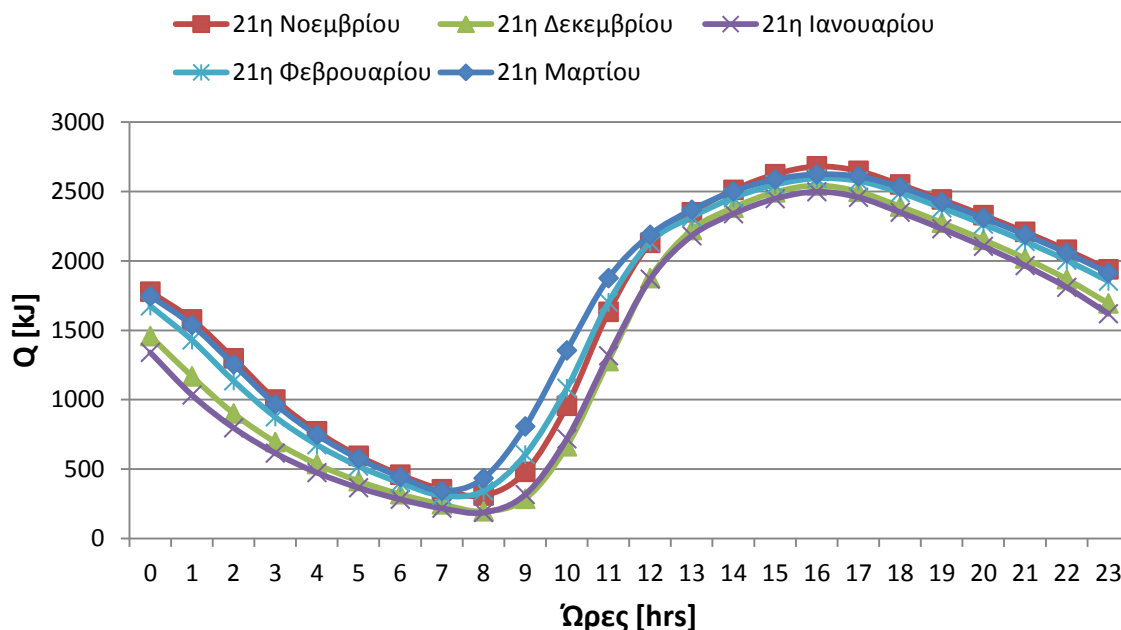
Αναφορικά με τη σύγκριση των διαγραμμάτων ως προς τον προσανατολισμό, εξάγουμε παρόμοια συμπεράσματα με αυτά σε αντίστοιχα διαγράμματα άλλων

ενοτήτων. Έτσι, για κάθε μήνα τα μεγαλύτερα ποσά θερμότητας σε γενικές γραμμές προσφέρονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι νότιου προσανατολισμού, ενώ τα μικρότερα όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι βόρειος. Στην περίπτωση δυτικού τοίχου με υαλοπίνακα, τα προσφερόμενα ποσά θερμότητας είναι μεγαλύτερα από αυτά για ανατολικό τοίχο με υαλοπίνακα, για κάθε μήνα. Αυτά αποτυπώνονται πιο ξεκάθαρα στο διάγραμμα 6.1.4.21 που βρίσκεται παρακάτω και που έγινε ενδεικτικά για την 21^η Μαρτίου και για πάχος στρώματος $RT27$ $d_{PCM}=0,06m$.

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα ως προς το μήνα, παρατηρούμε πως η καμπύλη του Q πέφτει κατακόρυφα, δηλαδή αποκτά μικρότερη μέγιστη αλλά και μικρότερη ελάχιστη τιμή, καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται ξανά οι τιμές του και κατ' επέκταση η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή. Αντίστοιχα, κατά τον ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό του τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, παρατηρούμε ότι η καμπύλη του Q πέφτει κατακόρυφα καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Δεκέμβριο και αρχίζει να ανεβαίνει σταδιακά οδεύοντας από τον Ιανουάριο μέχρι και το Μάρτιο. Αυτά γίνονται πιο εμφανή στο διάγραμμα 6.1.4.22 που βρίσκεται παρακάτω και που έγινε ενδεικτικά για νότιο προσανατολισμό και για πάχος στρώματος $RT27$ $d_{PCM}=0,06m$.



Διάγραμμα 6.1.4.21: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το $RT27$, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου, για $d_{PCM}=0,06m$ και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.1.4.22: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών για νότιο προσανατολισμό υαλοπίνακα, για $d_{PCM}=0,06m$ και για κάθε χειμερινό μήνα

6.2 Παραμετρική μελέτη ως προς τη θερμοκρασία του εξεταζόμενου χώρου

Στο κεφάλαιο 5, καθώς και στην παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος στρώματος PCM (που παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.1), μελετήθηκε η συμπεριφορά του PCM με μονίμως σταθερή θερμοκρασία δωματίου $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$. Στην παρούσα ενότητα, εξετάζουμε τη συμπεριφορά του RT27 για τις περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία δωματίου παραμένει σταθερή στους $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$ και στους $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$. Επομένως, υπολογίζουμε εκ νέου, για την 21^η ημέρα κάθε χειμερινού μήνα και για κάθε προσανατολισμό, τη θερμοκρασία, την περιοχή λειτουργίας και την προσφερόμενη θερμότητα του RT27 για αυτές τις δύο θερμοκρασίες του εξεταζόμενου χώρου. Διευκρινίζουμε πως τα μεγέθη A_f και m_{PCM} διατηρούν τις τιμές που είχαν στο κεφάλαιο 5, όπως θα δούμε άλλωστε και στην ενότητα 6.2.2.

6.2.1 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του RT27

Όμοια με την ενότητα 5.3.2, υποθέτουμε σταθερή θερμοκρασία στο εσωτερικό της εξεταζόμενης αίθουσας (και για τις δύο περιπτώσεις, $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$) με τη βοήθεια κλιματιστικών συστημάτων, θερμαντικών σωμάτων κλπ. Επιπλέον, θεωρούμε ίδια θερμοκρασία σε όλη την έκταση του στρώματος του υλικού αλλαγής φάσης, καμία συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του στρώματος του PCM και της μόνωσης και τέλος σταθερές απώλειες εντός του χώρου μελέτης μας, οι οποίες συνεπάγονται σταθερή απαιτούμενη ισχύ για την επίτευξη συνθηκών άνεσης και σταθερής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του χώρου.

Ο ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM δίνεται και πάλι από τη σχέση (5.3.2.1) της ενότητας 5.3.2 και είναι ο ακόλουθος:

$$U_i A_w \left(T_e^i - \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \right) \cdot 3600 = m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot (T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\alpha\rho\chi})$$

όπου τα μεγέθη που υπεισέρχονται στον ισολογισμό ενέργειας ορίζονται όπως ακριβώς ορίστηκαν και στην ενότητα 5.3.2. Οι τιμές όλων των μεγεθών παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 6.2.2 που ακολουθεί.

6.2.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας του RT27 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου

Εφαρμόζοντας τον ισολογισμό ενέργειας στο στρώμα του RT27 μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του PCM στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου. Συνεπώς, έχουμε:

$$\begin{aligned} U_i A_w \left(T_e^i - \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \right) \cdot 3600 &= m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot (T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\alpha\rho\chi}) \\ \Rightarrow m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\tau\epsilon\lambda} + U_i \cdot A_w \cdot \frac{T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \cdot 3600 &= \\ = U_i \cdot A_w \cdot T_e^i \cdot 3600 - U_i \cdot A_w \cdot \frac{T_{\alpha\rho\chi}}{2} \cdot 3600 + m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\alpha\rho\chi} \\ \Rightarrow T_{\tau\epsilon\lambda} &= \frac{U_i \cdot A_w \cdot T_e^i \cdot 3600 - U_i \cdot A_w \cdot T_{\alpha\rho\chi} \cdot 1800 + m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\alpha\rho\chi}}{m_{PCM} \cdot C_{peff} + U_i \cdot A_w \cdot 1800} \end{aligned}$$

Η επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού του $T_{\tau\epsilon\lambda}$ πραγματοποιείται όπως ακριβώς περιγράψαμε και εργαστήκαμε στην ενότητα 5.2.3.

Τα δεδομένα μας στη συγκεκριμένη παραμετρική μελέτη έχουν ως εξής:

Διαστάσεις αίθουσας: 10m×10m×3m (μήκος×πλάτος×ύψος)

$$U_i = 7,06 \cdot 10^{-3} kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$$

$$A_w = 30m^2$$

$$A_f = 4,5m^2$$

$$m_{PCM} = \rho_{PCM} \cdot V_{PCM} = 820 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 0,03 = 738kg, \text{ αφού } d_{PCM} = 0,03m$$

Επιπλέον, υπενθυμίζουμε για μία ακόμη φορά ότι για το RT27 που μελετάμε, η συνάρτηση C_{peff} είναι:

Για $T \leq 22^\circ C$:

$$C_{peff} = C_{ps} = 2 \text{ kJ}/(kg \cdot ^\circ C)$$

Για $22^\circ C < T \leq 26,5^\circ C$:

$$C_{peff} = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = 7,378 \cdot T - 160,316 \text{ [kJ}/(kg \cdot ^\circ C)]$$

Για $26,5^{\circ}\text{C} < T \leq 31^{\circ}\text{C}$:

$$C_{peff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = -7,244 \cdot T + 226,87 \text{ [kJ/(kg } ^{\circ}\text{C)]}$$

Για $T > 31^{\circ}\text{C}$:

$$C_{peff} = C_{pl} = 2,3 \text{ kJ/(kg } ^{\circ}\text{C)}$$

όπου T στις εξισώσεις του C_{peff} θεωρήσαμε τη θερμοκρασία του PCM, $T_{\alpha\rho\chi}$, στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου.

Η «ισοδύναμη εσωτερική θερμοκρασία» εξαρτάται από τη θερμοκρασία του δωματίου. Επομένως θα έχουμε:

Για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}\text{C}$:

$$T_e^i = \frac{G_T A_f}{A_w} \cdot \frac{a}{h_i \cdot 10^{-3}} + T_{\Delta\Omega M} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_e^i = \frac{4,5G_T}{30} \cdot \frac{0,88}{8 \cdot 10^{-3}} + 19$$

$$\Rightarrow T_e^i = 16,5G_T + 19 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (6.2.2.1)$$

Για $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}\text{C}$:

$$T_e^i = \frac{G_T A_f}{A_w} \cdot \frac{a}{h_i \cdot 10^{-3}} + T_{\Delta\Omega M} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_e^i = \frac{4,5G_T}{30} \cdot \frac{0,88}{8 \cdot 10^{-3}} + 22$$

$$\Rightarrow T_e^i = 16,5G_T + 22 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (6.2.2.2)$$

με G_T όπως υπολογίστηκε στην ενότητα 5.1 αναλυτικά για κάθε ώρα της 21^{ης} ημέρας των πέντε χειμερινών μηνών και για κάθε προσανατολισμό.

Επομένως, με βάση τα παραπάνω και ανάλογα με τη θερμοκρασία του δωματίου, $T_{\Delta\Omega M}$, προκύπτει η εξίσωση υπολογισμού της θερμοκρασίας του RT27:

➤ Για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}\text{C}$:

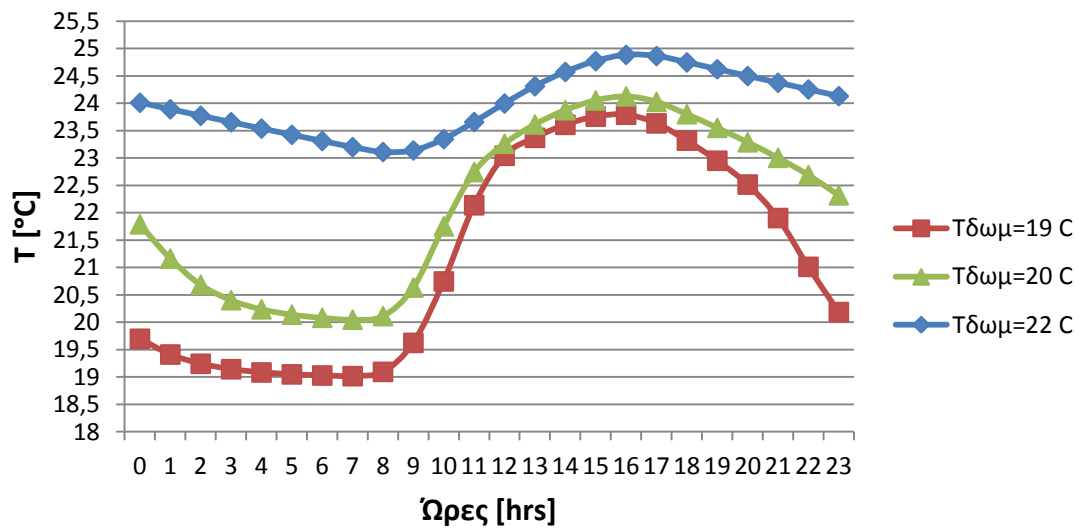
$$T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{12580,92G_T - 381,24T_{\alpha\rho\chi} + 738C_{peff}T_{\alpha\rho\chi} + 14487,12}{738C_{peff} + 381,24} \quad (6.2.2.3)$$

➤ Για $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$:

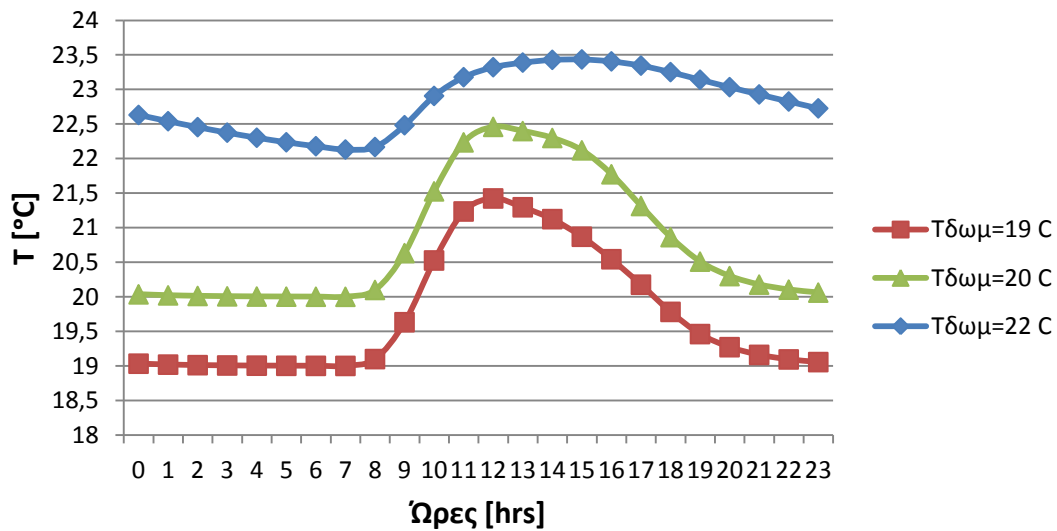
$$T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{12580,92G_T - 381,24T_{\alpha\rho\chi} + 738C_{\rho\epsilon\epsilon\phi}T_{\alpha\rho\chi} + 16774,6}{738C_{\rho\epsilon\epsilon\phi} + 381,24} \quad (6.2.2.4)$$

Παρακάτω, παρουσιάζονται διαγραμματικά οι θερμοκρασίες $T_{PCM} = \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2}$, που επικρατούν στο στρώμα του RT27 συναρτήσει των ωρών της εκάστοτε ημέρας. Για εποπτικούς λόγους και καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων, σε κάθε διάγραμμα εμφανίζεται η θερμοκρασία T_{PCM} του RT27 κατά τη διάρκεια του 24ώρου για τις δύο νέες τιμές της θερμοκρασίας δωματίου, αλλά και για την αρχική που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ($T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$).

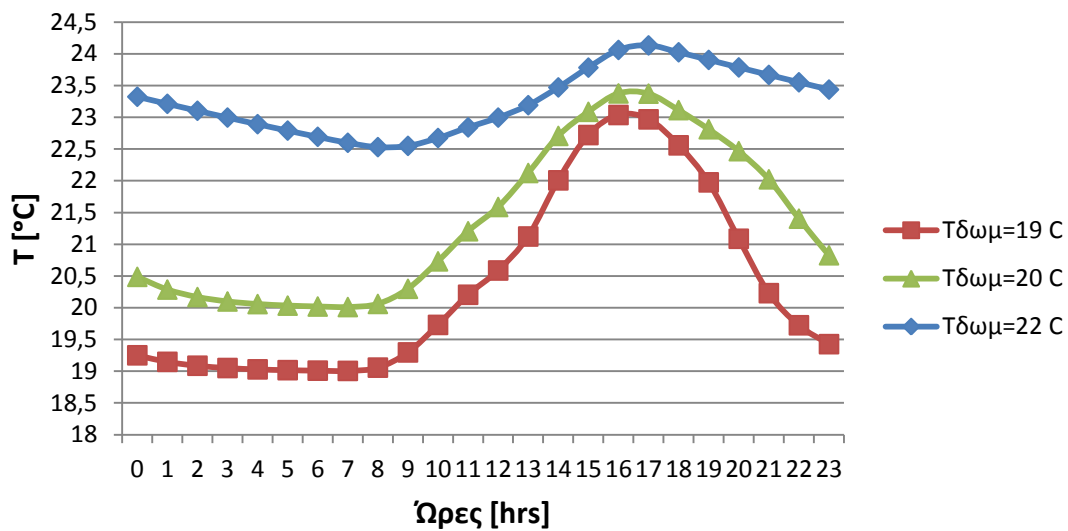
➤ **Για 21^η Νοεμβρίου:**



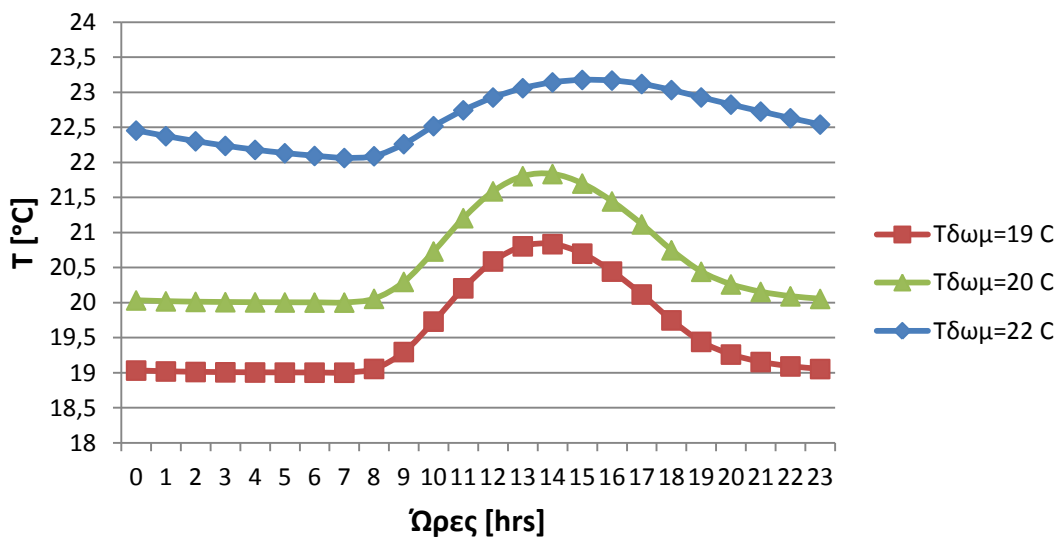
Διάγραμμα 6.2.2.1: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με βαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.2.2: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με βαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

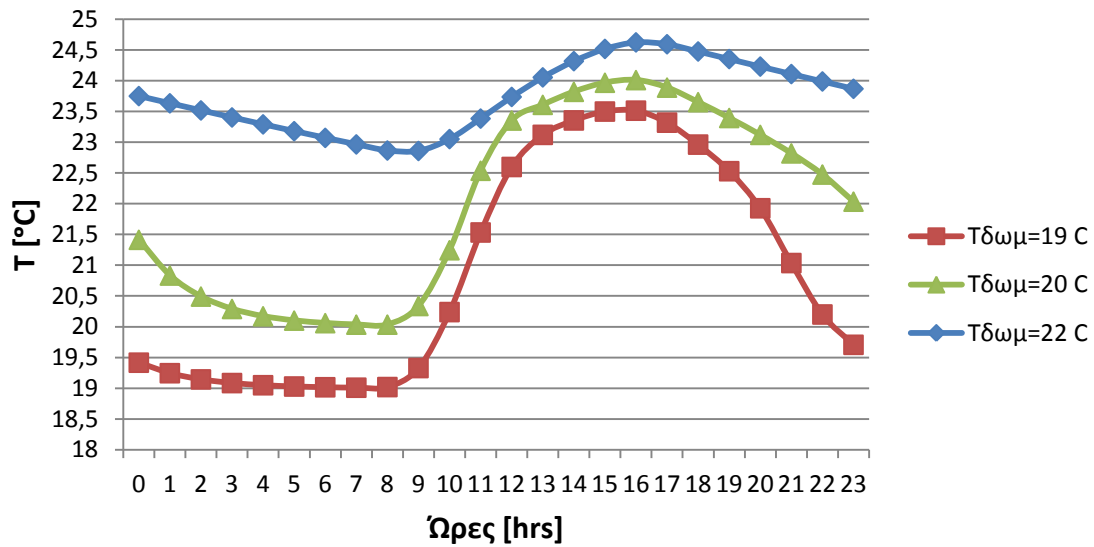


Διάγραμμα 6.2.2.3: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με βαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

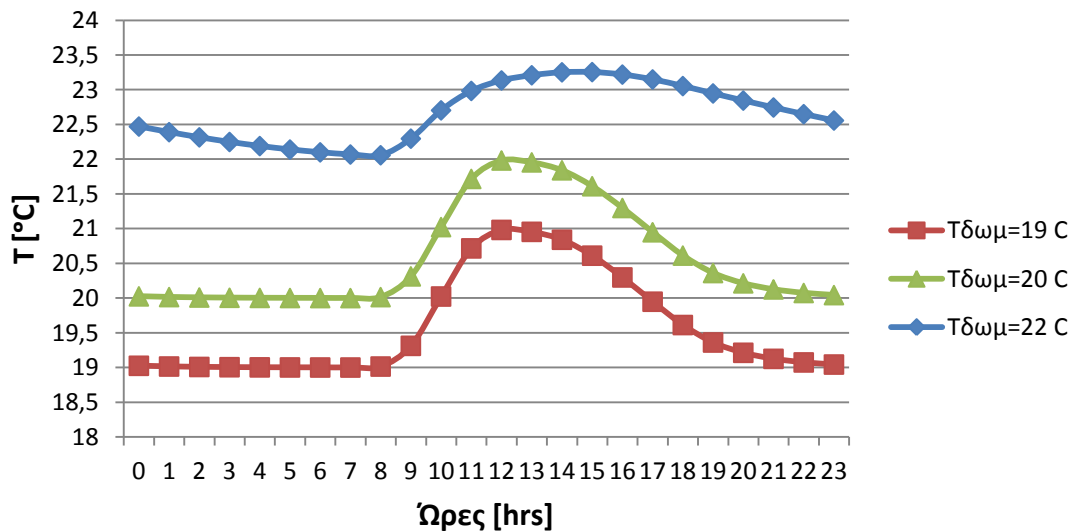


Διάγραμμα 6.2.2.4: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με βαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

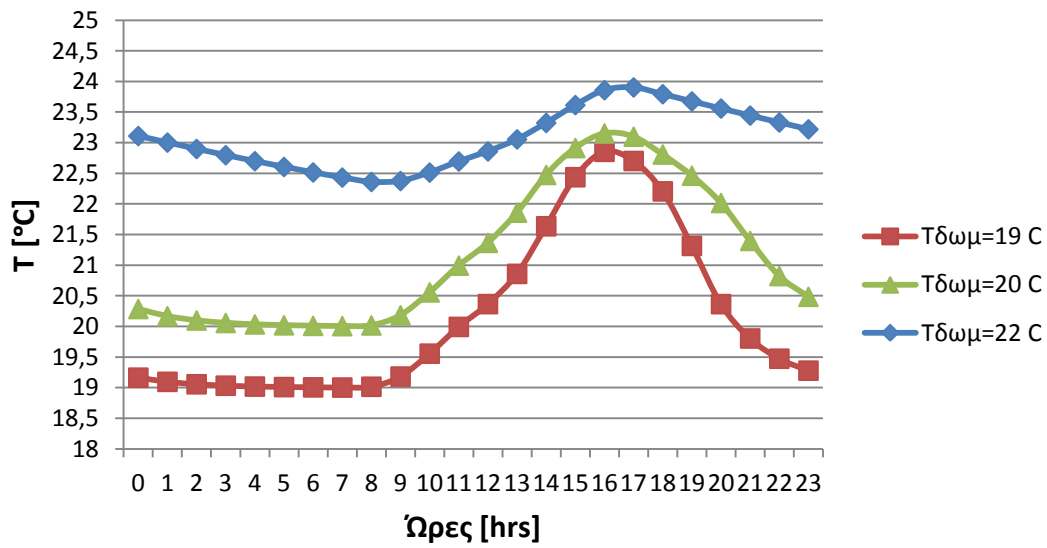
➤ **Για 21^η Δεκεμβρίου:**



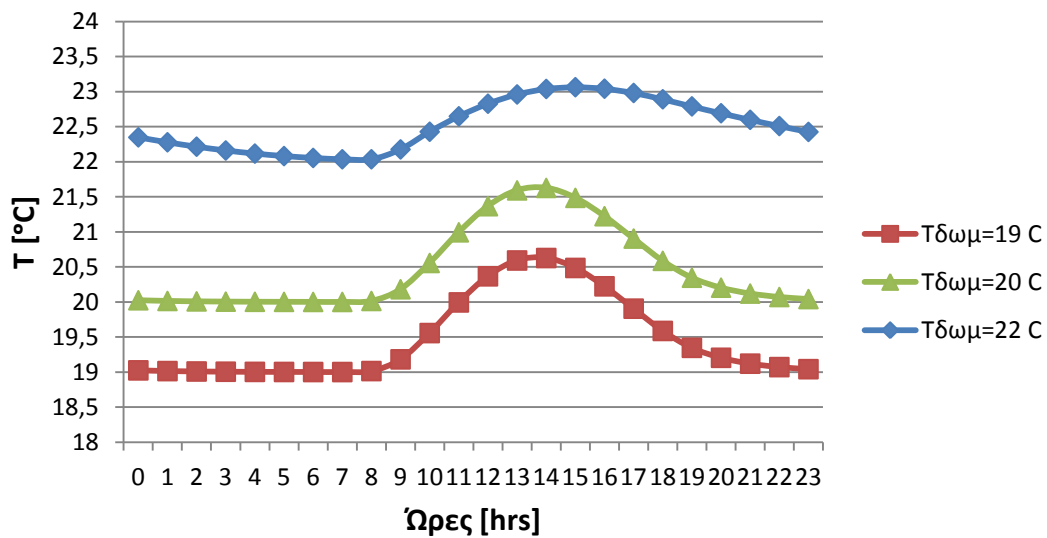
Διάγραμμα 6.2.2.5: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με ναλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.2.6: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με ναλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

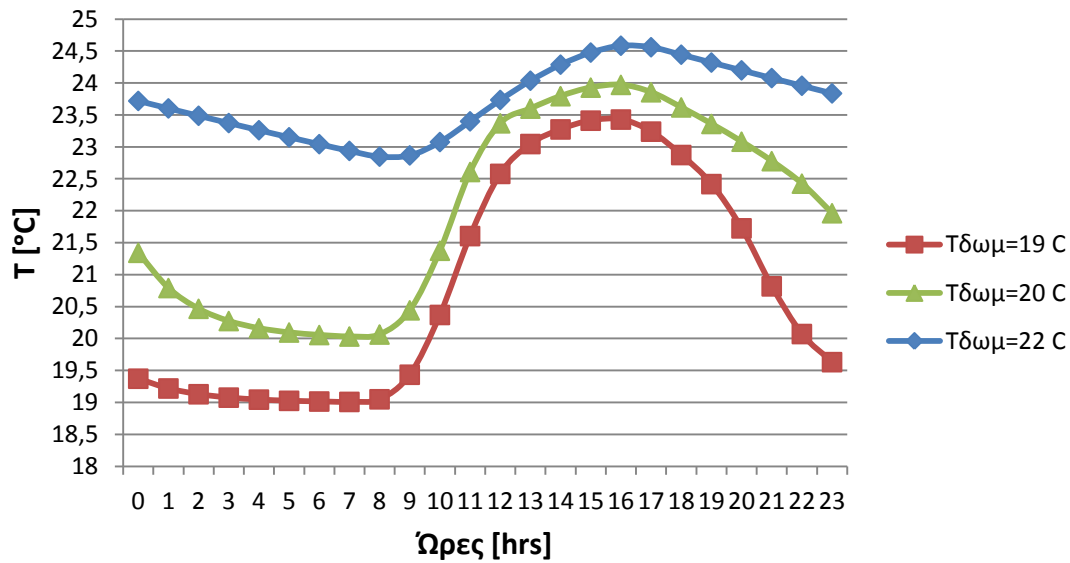


Διάγραμμα 6.2.2.7: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

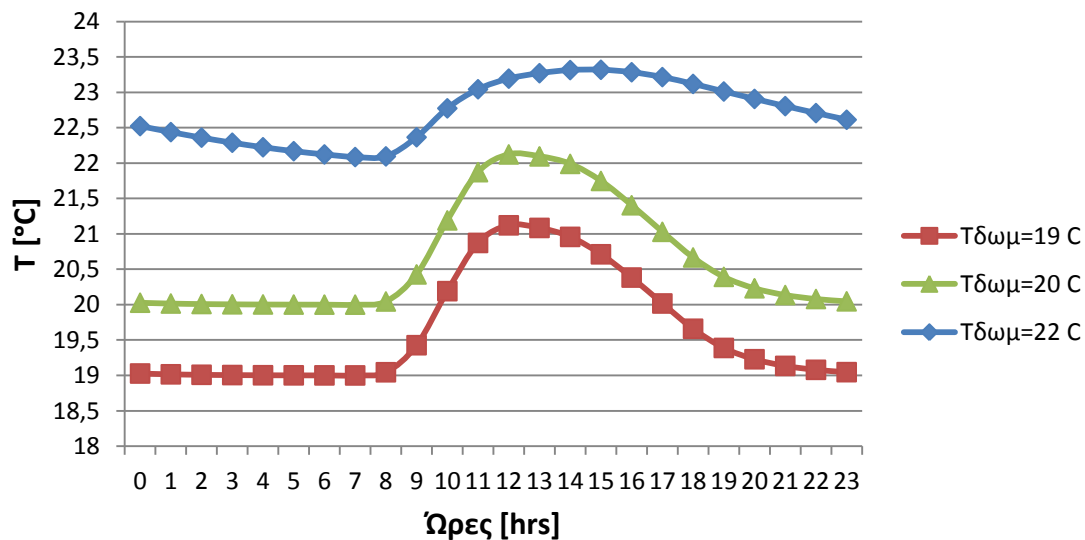


Διάγραμμα 6.2.2.8: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

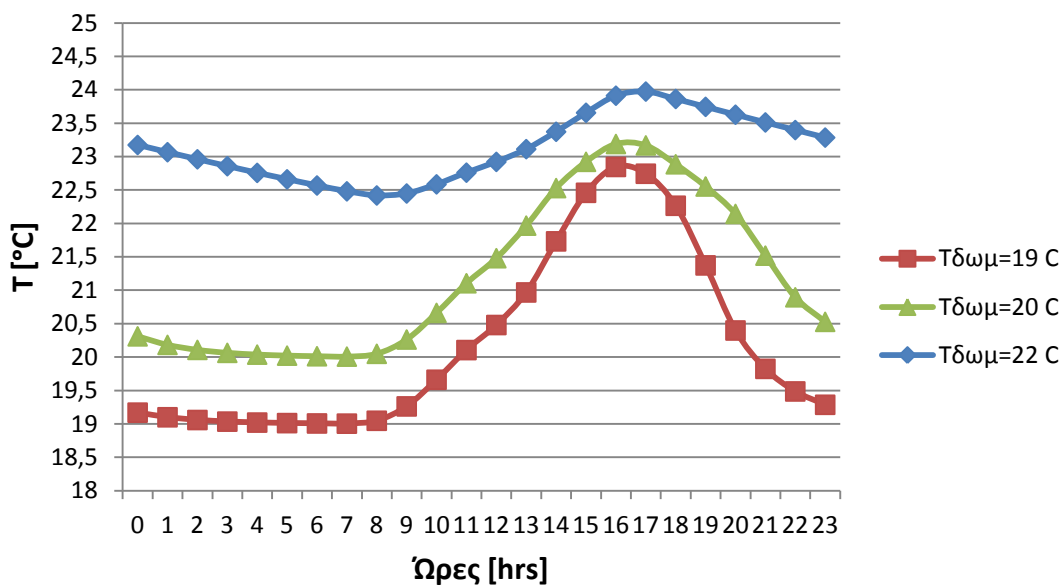
➤ Για 21^η Ιανουαρίου:



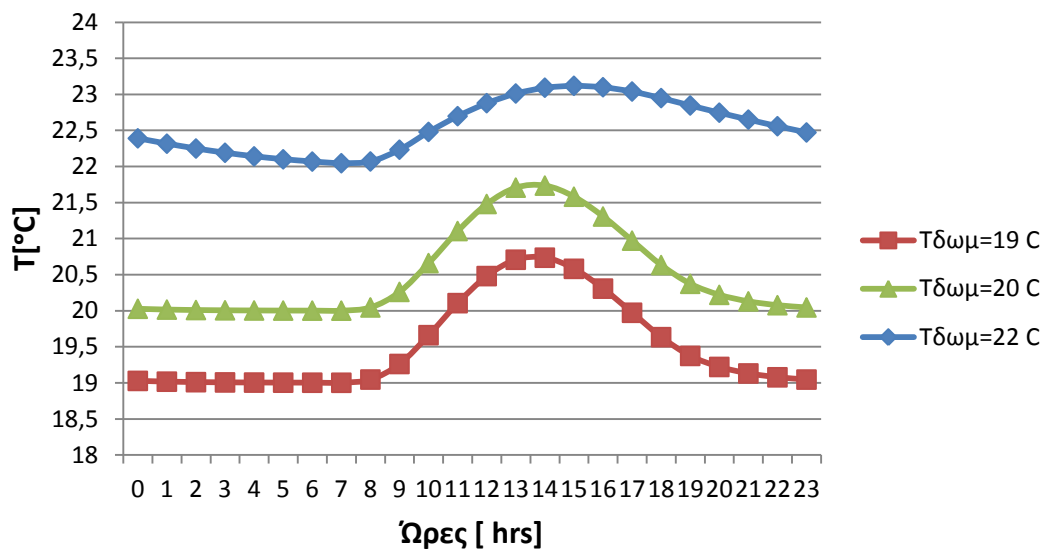
Διάγραμμα 6.2.2.9: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.2.10: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

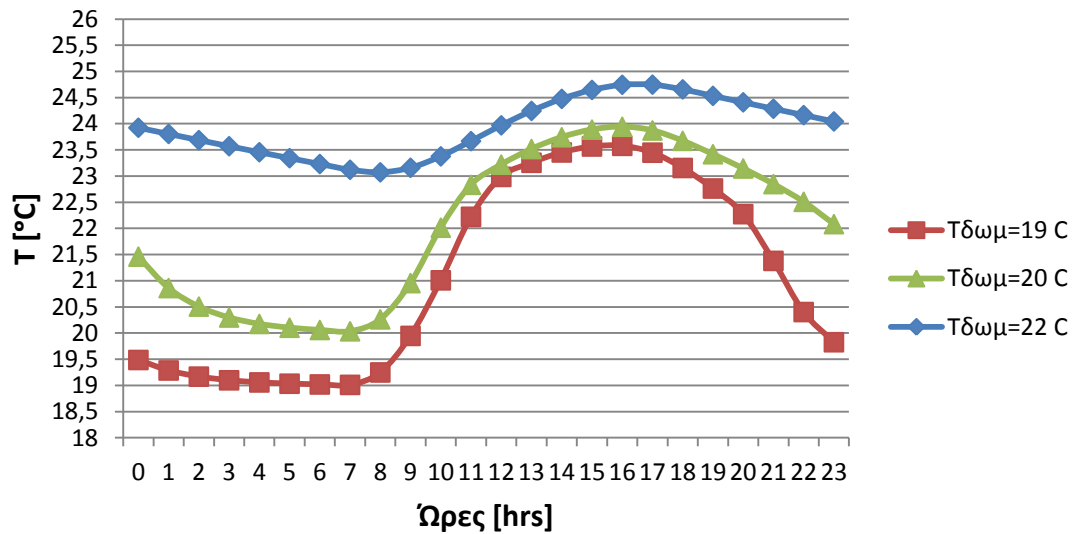


Διάγραμμα 6.2.2.11: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

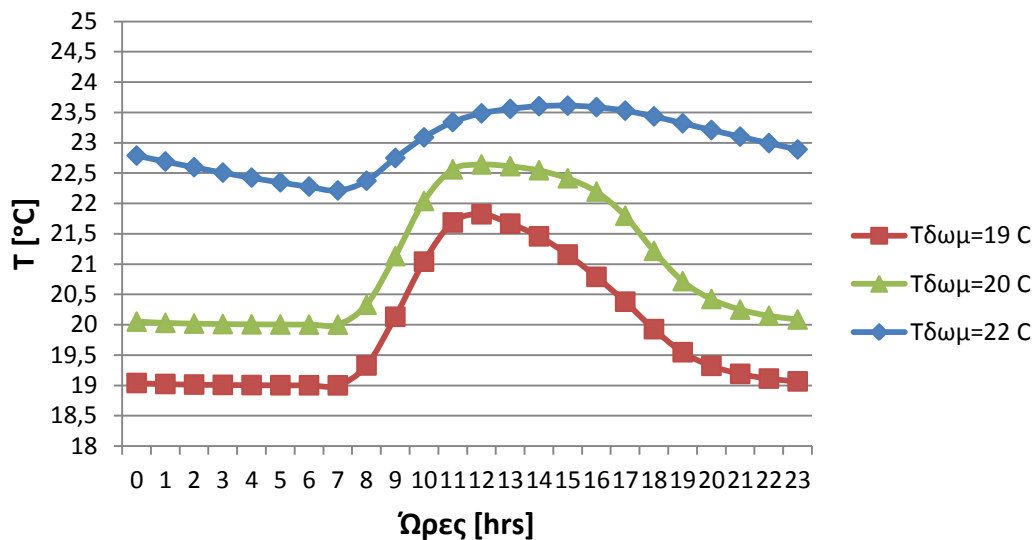


Διάγραμμα 6.2.2.12: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

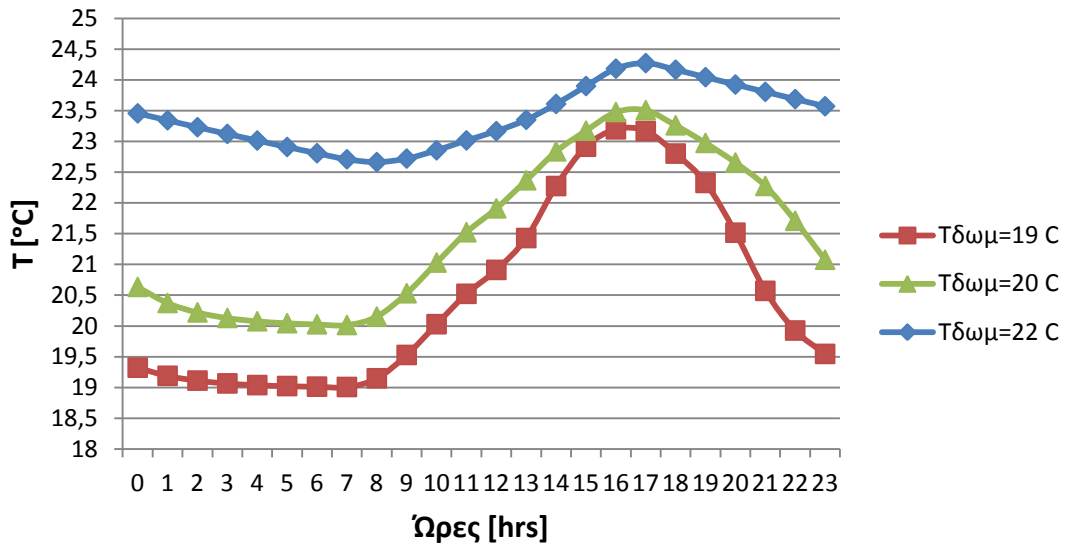
➤ **Για 21^η Φεβρουαρίου:**



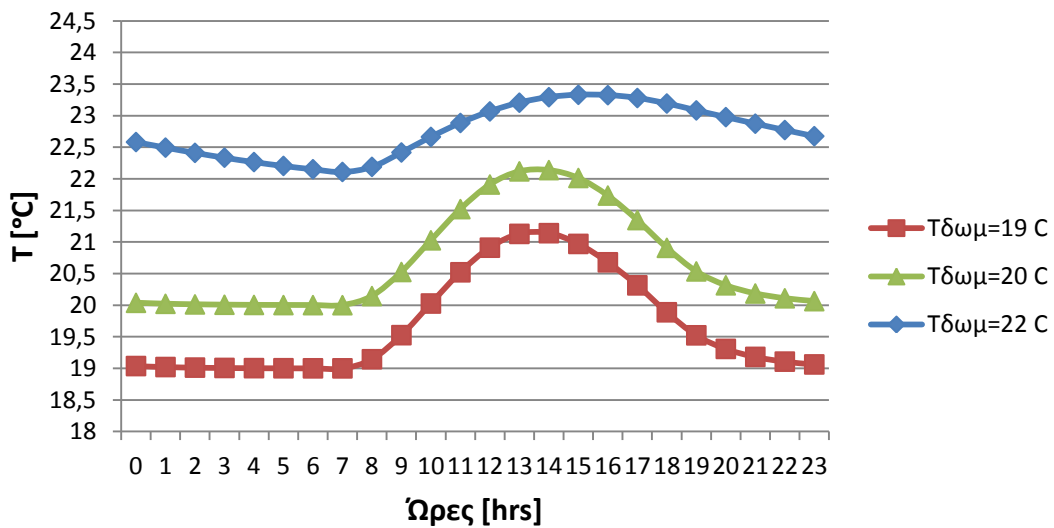
Διάγραμμα 6.2.2.13: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.2.14: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

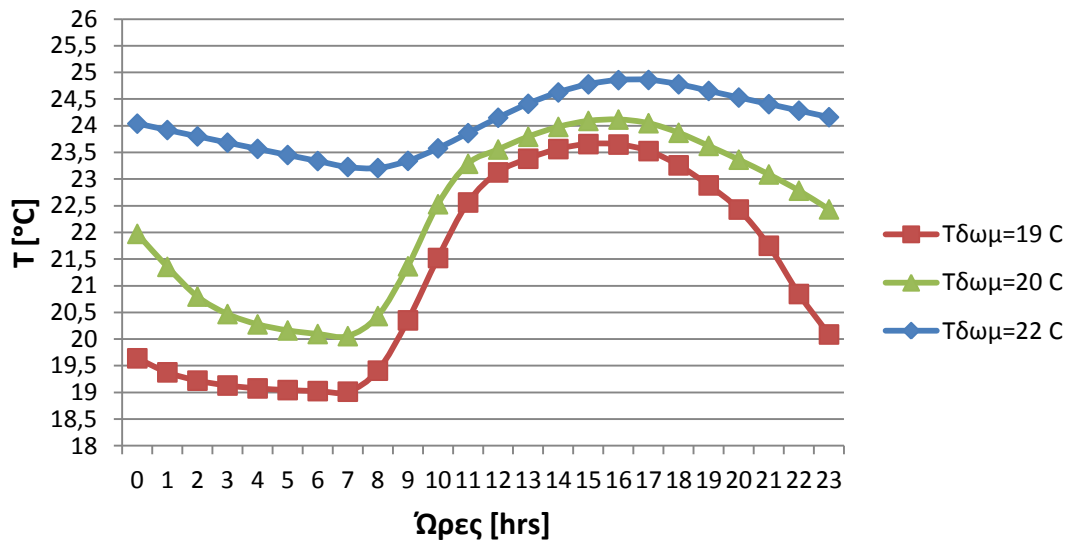


Διάγραμμα 6.2.2.15: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

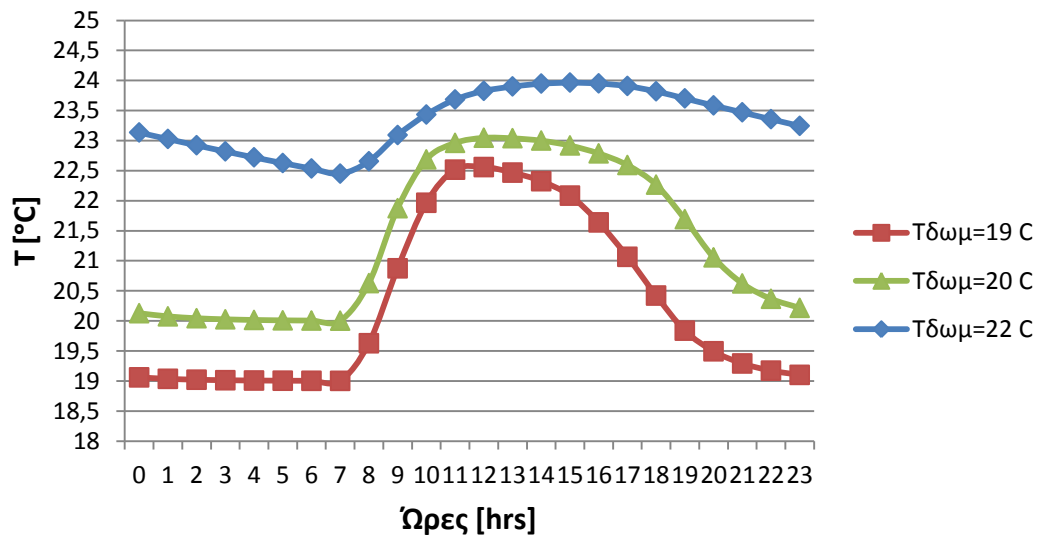


Διάγραμμα 6.2.2.16: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

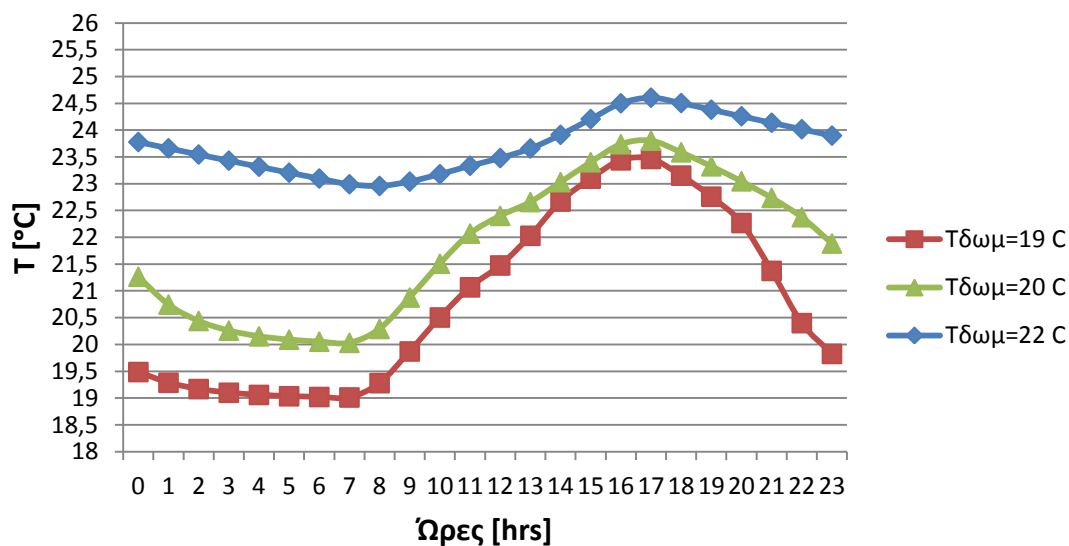
➤ **Για 21^η Μαρτίου:**



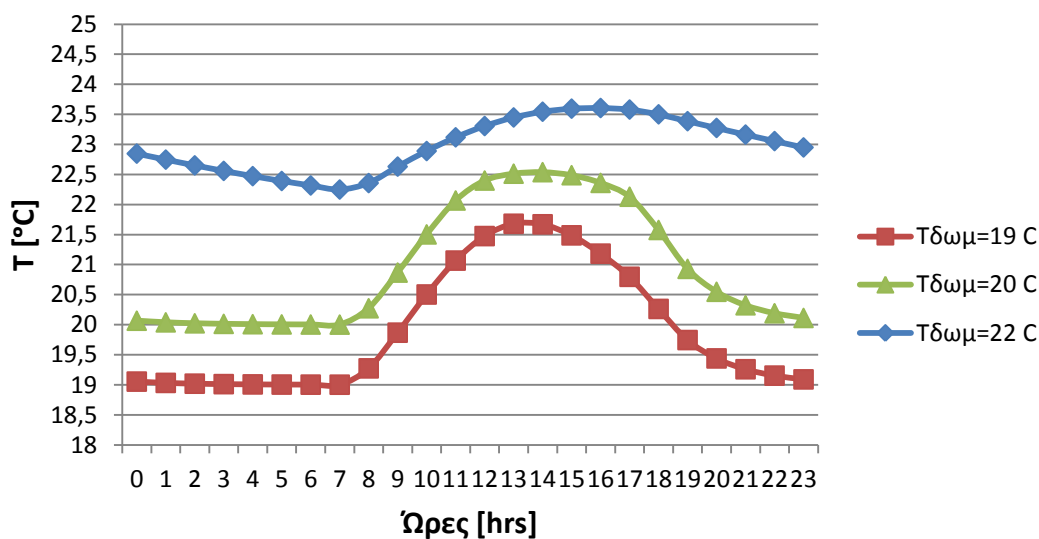
Διάγραμμα 6.2.2.17: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.2.18: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.2.19: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.2.20: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Όπως παρατηρήσαμε σε όλα τα μέχρι τώρα διαγράμματα θερμοκρασίας του PCM, έτσι και στα διαγράμματα 6.2.2.1 έως 6.2.2.20 βλέπουμε ότι για κάθε θερμοκρασία δωματίου (εννοείται μονίμως σταθερή) υπάρχει μονομερής πρόσδοση θερμότητας από το RT27 στο χώρο, αφού και στις τρεις καμπύλες (μία για κάθε θερμοκρασία δωματίου) για κάθε μήνα και κάθε προσανατολισμό, η θερμοκρασία του RT27 είναι καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου μεγαλύτερη αυτής που επικρατεί στο χώρο. Αυτό,

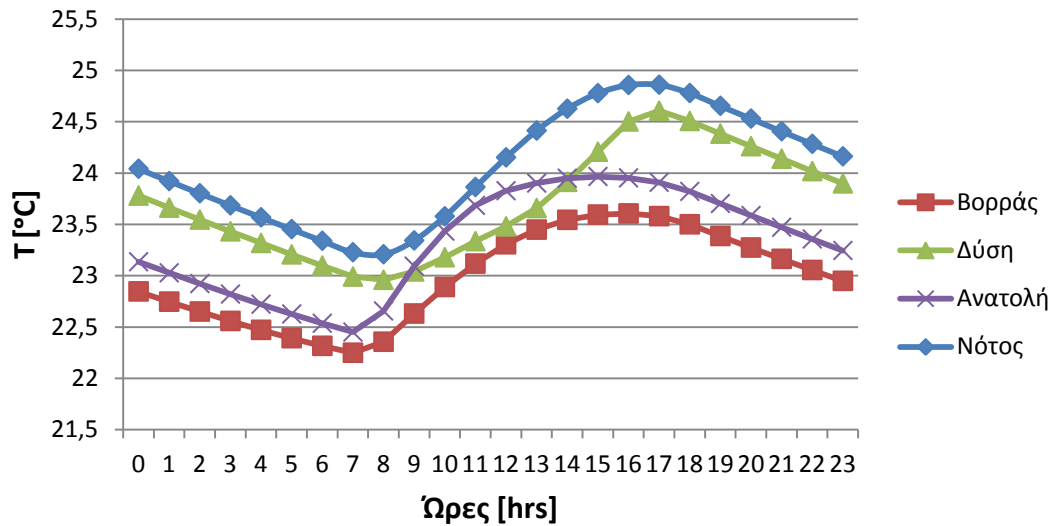
όπως έχουμε αναφέρει ξανά, είναι λογικό, αφού από τη στιγμή που έχουμε υποθέσει μονίμως σταθερή θερμοκρασία στο δωμάτιο και μηδενική συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του PCM και του στρώματος μόνωσης και ταυτόχρονα το PCM θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του PCM θα διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα από τη θερμοκρασία δωματίου. Επιπλέον, σε όλες τις παραπάνω καμπύλες η θερμοκρασία του στρώματος του RT27 ακολουθεί και πάλι φθίνουσα πορεία από τις 12 το βράδυ μέχρι τις 7:00-8:00 το πρωί (λόγω πρόσδοσης θερμότητας στο χώρο), από τις 7:00-8:00 το πρωί και μέχρι τις ώρες γύρω από το μεσημέρι -αναλόγως του μήνα, του προσανατολισμού και του θερμοκρασίας που επικρατεί στο χώρο- αυξάνεται (αφού το ποσό θερμότητας που λαμβάνει το PCM από την ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερο από αυτό που προσφέρει στο δωμάτιο), ενώ από εκεί και έπειτα αρχίζει ξανά η πτώση της θερμοκρασίας του (διότι πλέον η G_T ελαττώνεται μέχρι σταδιακού μηδενισμού της και συνεπώς το υλικό μας μόνο δίνει θερμική ενέργεια).

Επίσης, από τα διαγράμματα 6.2.2.1 έως 6.2.2.20, εξάγουμε τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα που ισχύουν και για τους πέντε εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες και για τους τέσσερις διαφορετικούς προσανατολισμούς. Έτσι, για κάθε μήνα και για κάθε προσανατολισμό παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του εξεταζόμενου χώρου, τόσο μικρότερο είναι το θερμοκρασιακό του φάσμα του PCM. Έτσι, για τη μεγαλύτερη θερμοκρασία δωματίου ($T_{\Delta\Omega M} = 22^\circ C$) το RT27 παρουσιάζει τη μικρότερη διαφορά μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας. Το φαινόμενο είναι πολύπλοκο, ωστόσο μία εξήγηση που θα μπορούσε να δοθεί γι' αυτό είναι η εξής: Τα επίπεδα στα οποία κυμαίνεται η θερμοκρασία του PCM καθορίζονται από τη θερμοκρασία που επικρατεί στο χώρο και συγκεκριμένα οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο PCM είναι μονίμως υψηλότερες από τη θερμοκρασία του χώρου, γεγονός λογικό, όπως έχουμε προαναφέρει. Επομένως, μεταβαλλόμενων των θερμοκρασιακών επιπέδων του PCM, μεταβάλλεται η ενεργός θερμοχωρητικότητα (αφού αυτή είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας) και ως εκ τούτου η αποθηκευτική του ικανότητα. Έτσι για τη μεγαλύτερη θερμοκρασία δωματίου, η θερμότητα που λαμβάνει το PCM από την ηλιακή ακτινοβολία (που είναι ίδια σε κάθε περίπτωση) θα το θερμάνει λιγότερο απ' ό,τι για μία χαμηλότερη θερμοκρασία χώρου. Η θερμότητα λοιπόν θα χρησιμοποιηθεί κυρίως για την αλλαγή φάσης του PCM.

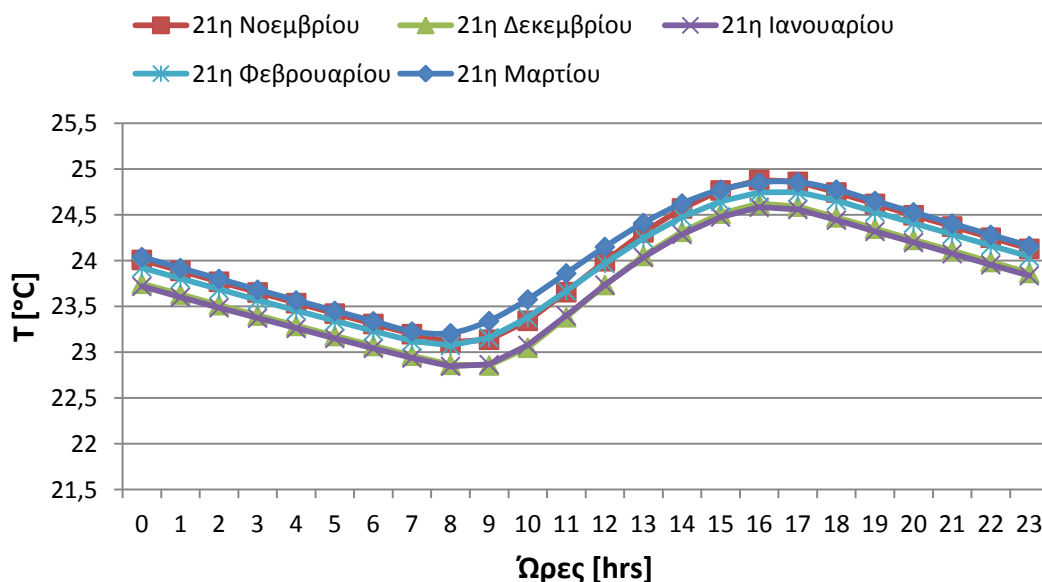
Εξετάζοντας τα διαγράμματα ως προς τον προσανατολισμό του υαλοπίνακα, παρατηρούμε όπως σε όλα τα μέχρι τώρα διαγράμματα θερμοκρασιών, πως για κάθε μήνα και κάθε θερμοκρασία δωματίου, οι υψηλότερες θερμοκρασίες σε γενικές γραμμές καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας αναπτύσσονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι νότιου προσανατολισμού, ενώ αντίθετα, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι βόρειος. Επίσης, όταν ο τοίχος που φέρει υαλοπίνακα είναι δυτικός, οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες σε γενικές γραμμές από αυτές που αναπτύσσονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι ανατολικός, με εξαίρεση τις πρωινές ώρες μέχρι και λίγο πριν το μεσημέρι όπου για δυτικό τοίχο οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες απ' ό,τι για ανατολικό (λόγω ύπαρξης μόνο διάχυτης ακτινοβολίας). Αυτά γίνονται πιο εμφανή στο διάγραμμα 6.2.2.21 που έγινε ενδεικτικά για την 21^η Μαρτίου και για θερμοκρασία δωματίου $T_{\Delta\Omega M} = 22^\circ C$ και παρατίθεται παρακάτω.

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα ως προς το μήνα, παρατηρούμε πως η καμπύλη του T πέφτει κατακόρυφα, δηλαδή αποκτά μικρότερη μέγιστη αλλά και μικρότερη ελάχιστη τιμή, καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται ξανά οι τιμές του και κατ' επέκταση η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή. Αντίστοιχα, κατά

τον ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό του τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, παρατηρούμε ότι η καμπύλη του T πέφτει κατακόρυφα καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Δεκέμβριο και αρχίζει να ανεβαίνει σταδιακά οδεύοντας από τον Ιανουάριο μέχρι και το Μάρτιο. Αυτά γίνονται πιο εμφανή στο διάγραμμα 6.1.2.22 που έγινε ενδεικτικά για την 21^η Μαρτίου και για θερμοκρασία δωματίου $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ και παρατίθεται παρακάτω.



Διάγραμμα 6.2.2.21: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου για $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}C$ και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

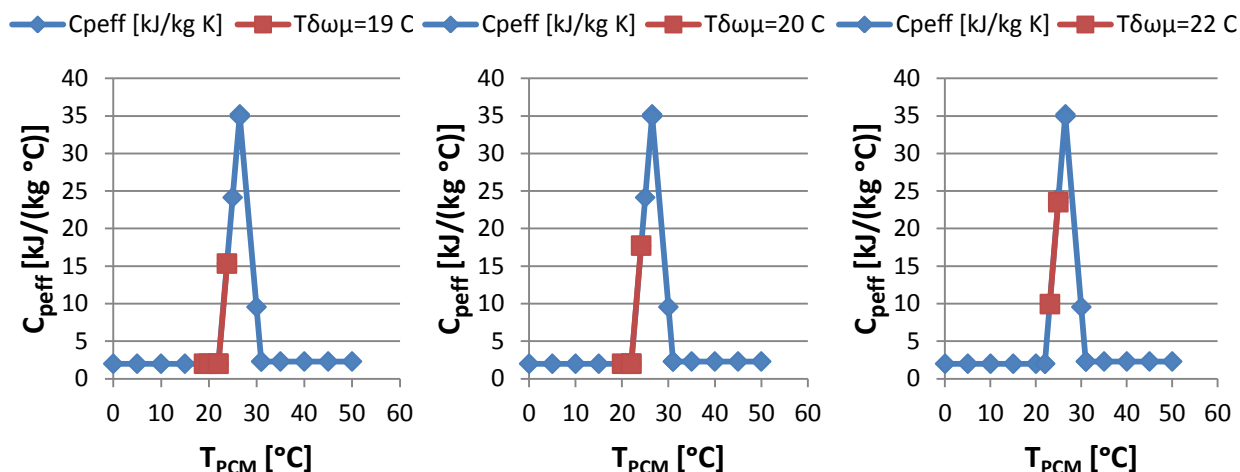


Διάγραμμα 6.2.2.22: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών για νότιο προσανατολισμό υαλοπίνακα, για $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}C$ και για κάθε χειμερινό μήνα

6.2.3 Ποσοστό αξιοποίησης του RT27

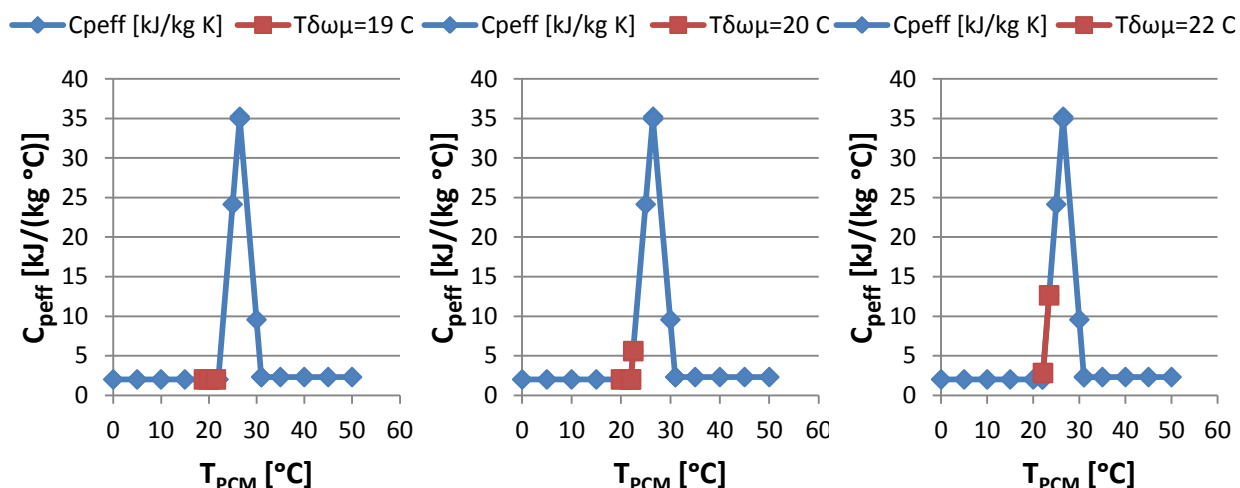
Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα διαγράμματα με την περιοχή λειτουργίας του RT27 για την 21^η ημέρα κάθε χειμερινού μήνα, κάθε προσανατολισμού και για κάθε θερμοκρασία δωματίου. Για εποπτικούς λόγους, τα διαγράμματα έχουν οργανωθεί έτσι ώστε να είναι εφικτή η άμεση σύγκριση της περιοχής λειτουργίας με βάση τη θερμοκρασία του δωματίου.

➤ Για 21^η Νοεμβρίου και ναλοπίνακα σε νότιο τοίχο:



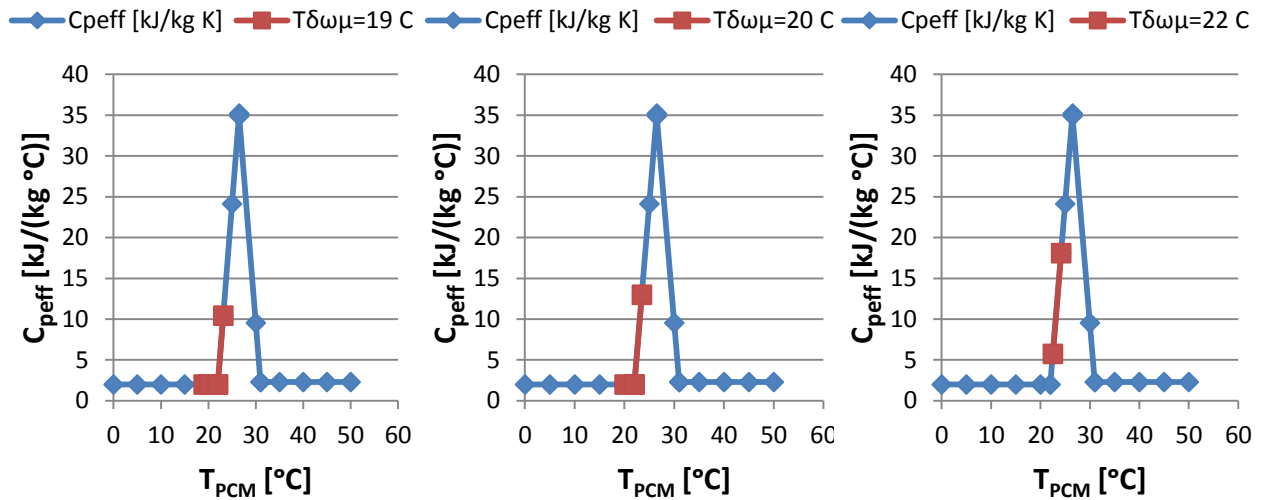
Διάγραμμα 6.2.3.1: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με ναλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Νοεμβρίου και ναλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:



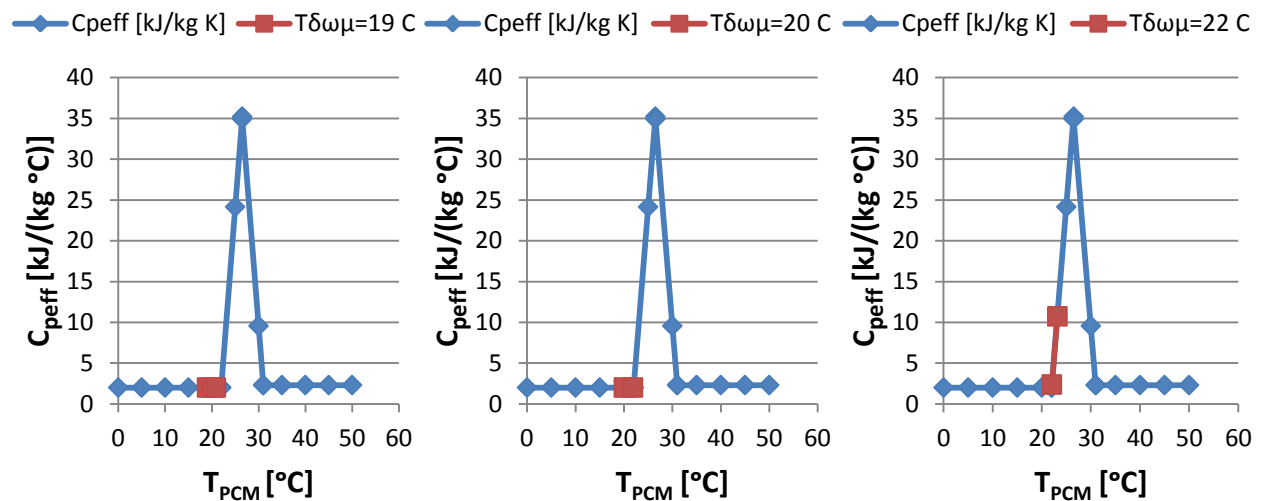
Διάγραμμα 6.2.3.2: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με ναλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Νοεμβρίου και ναλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:



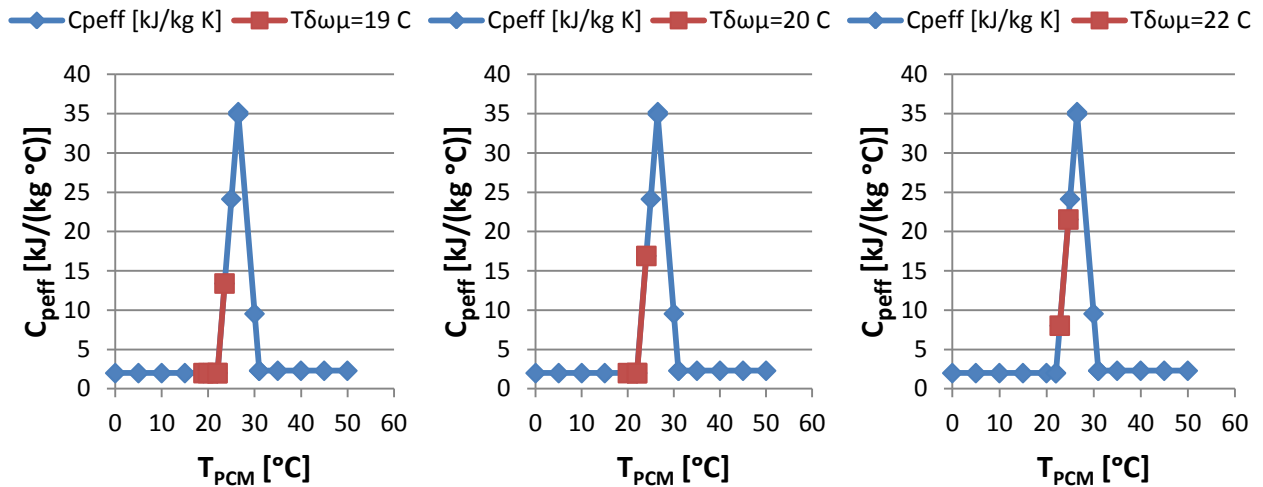
Διάγραμμα 6.2.3.3: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με ναλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}\text{C}$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}\text{C}$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Νοεμβρίου και ναλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:



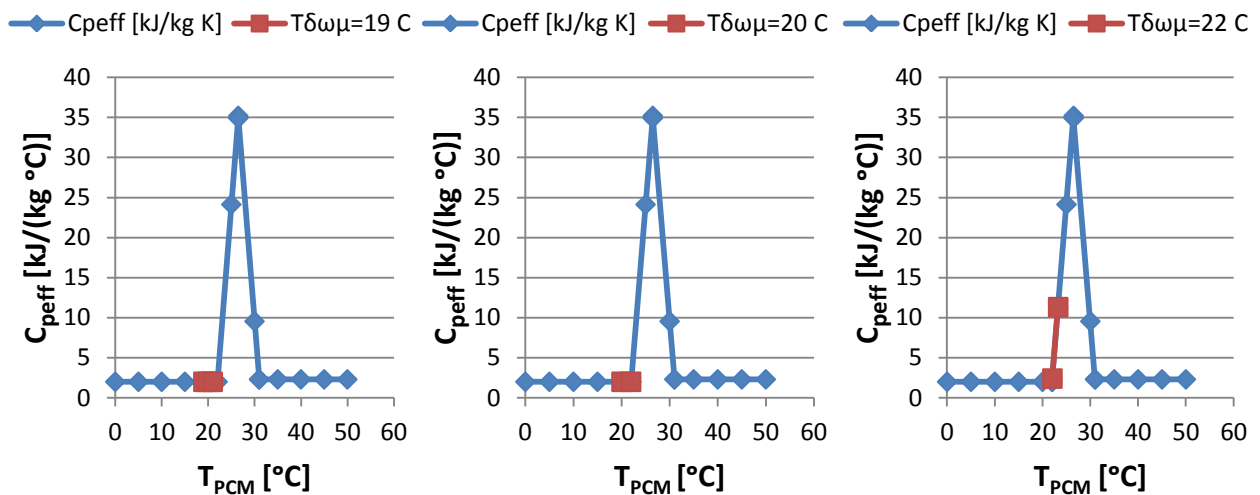
Διάγραμμα 6.2.3.4: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με ναλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}\text{C}$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}\text{C}$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου και υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:



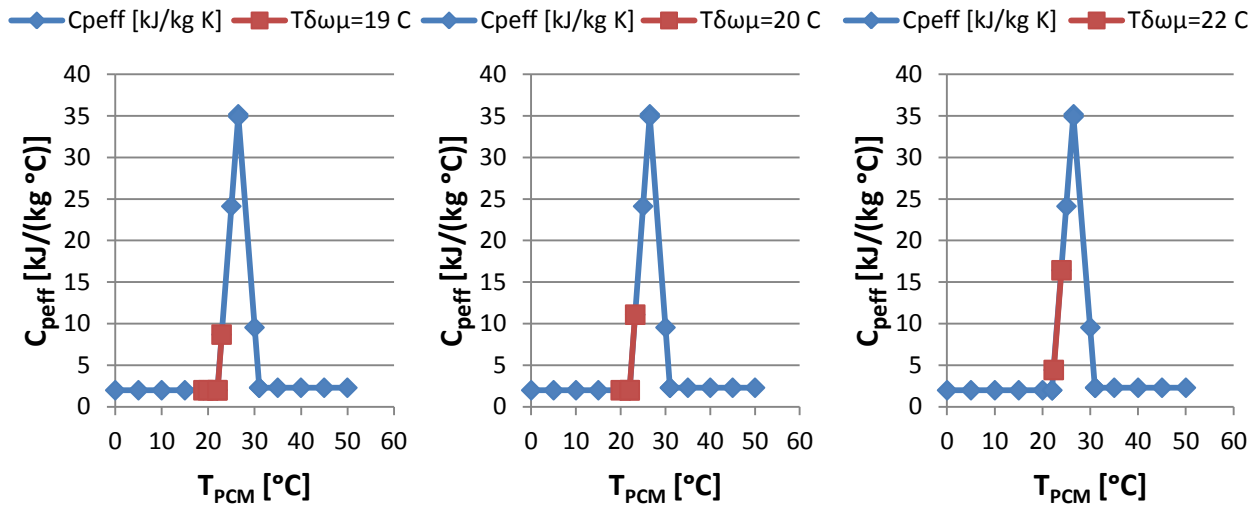
Διάγραμμα 6.2.3.5: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου και υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:



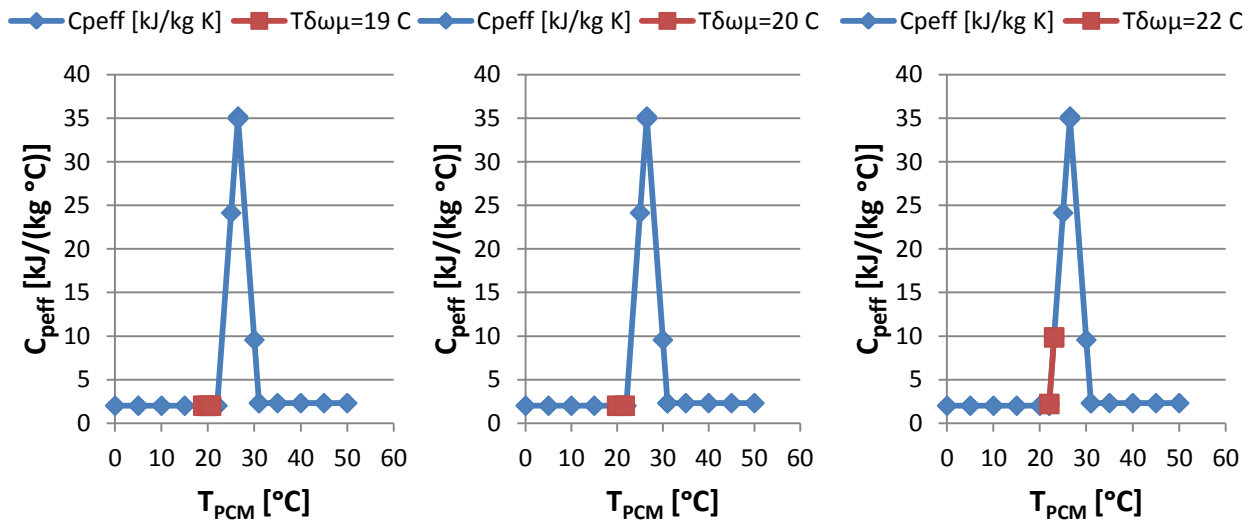
Διάγραμμα 6.2.3.6: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου και ναλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:



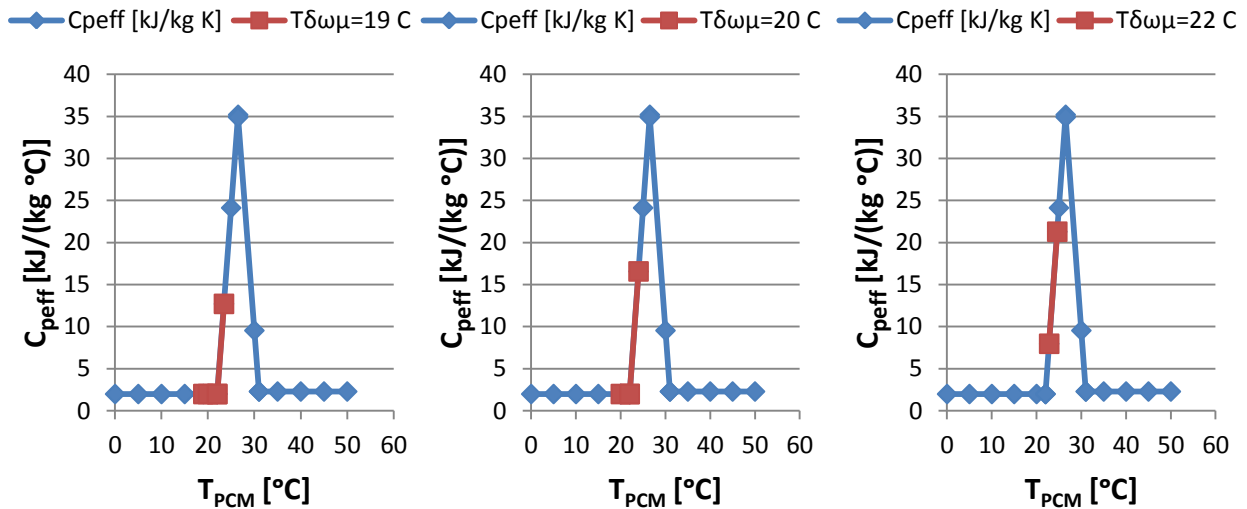
Διάγραμμα 6.2.3.7: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με ναλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου και ναλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:



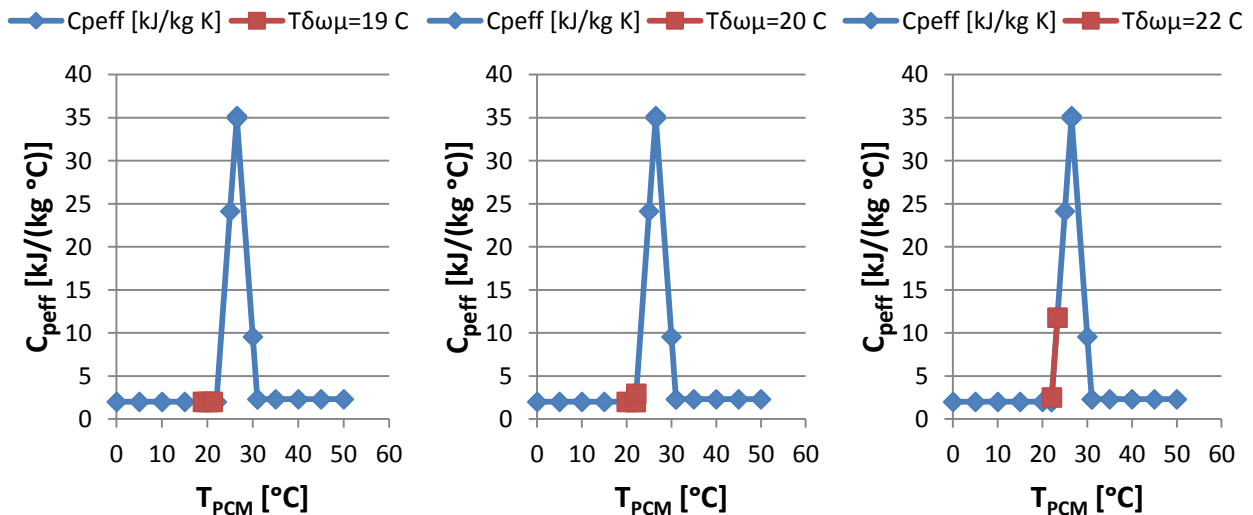
Διάγραμμα 6.2.3.8: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με ναλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Ιανουαρίου και υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:



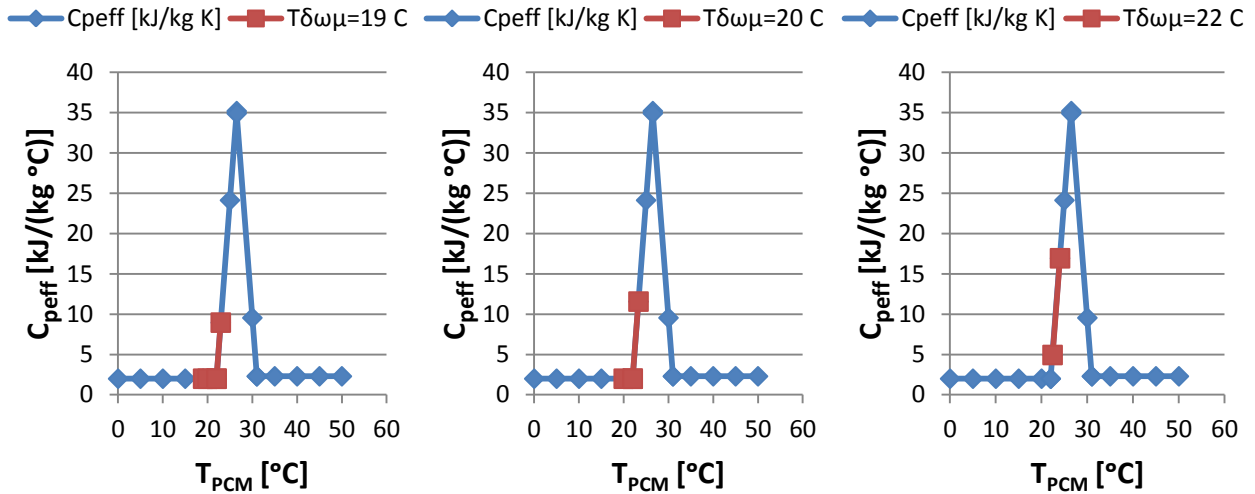
Διάγραμμα 6.2.3.9: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Ιανουαρίου και υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:



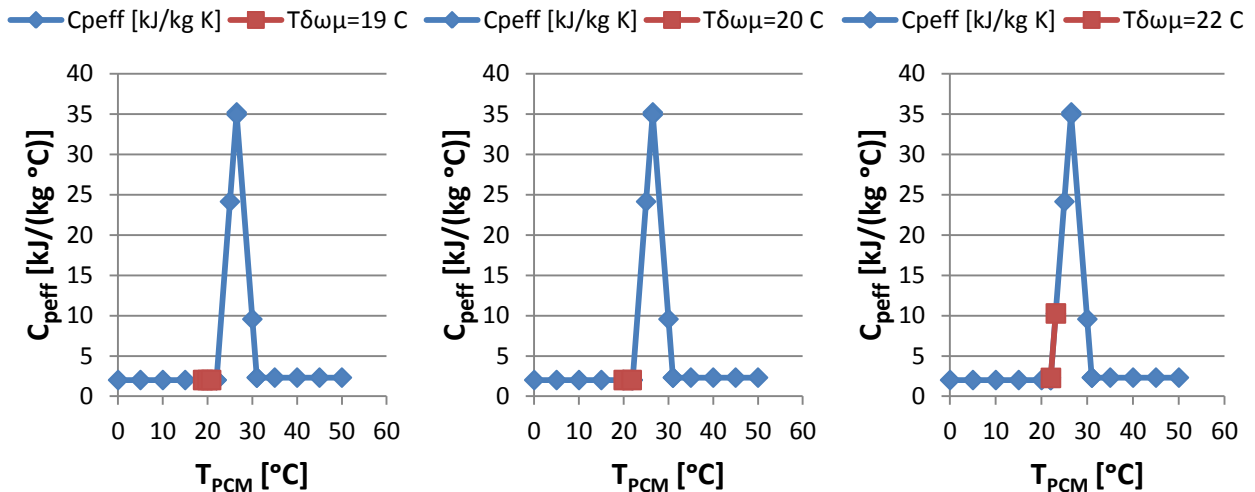
Διάγραμμα 6.2.3.10: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Ιανουαρίου και υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:



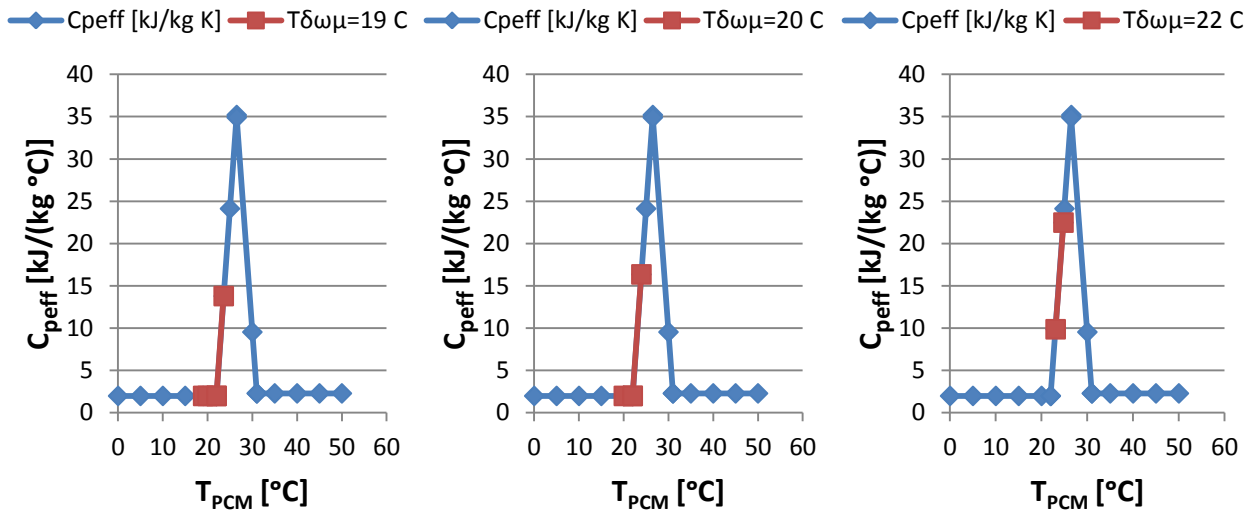
Διάγραμμα 6.2.3.11: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^\circ C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^\circ C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^\circ C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Ιανουαρίου και υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:



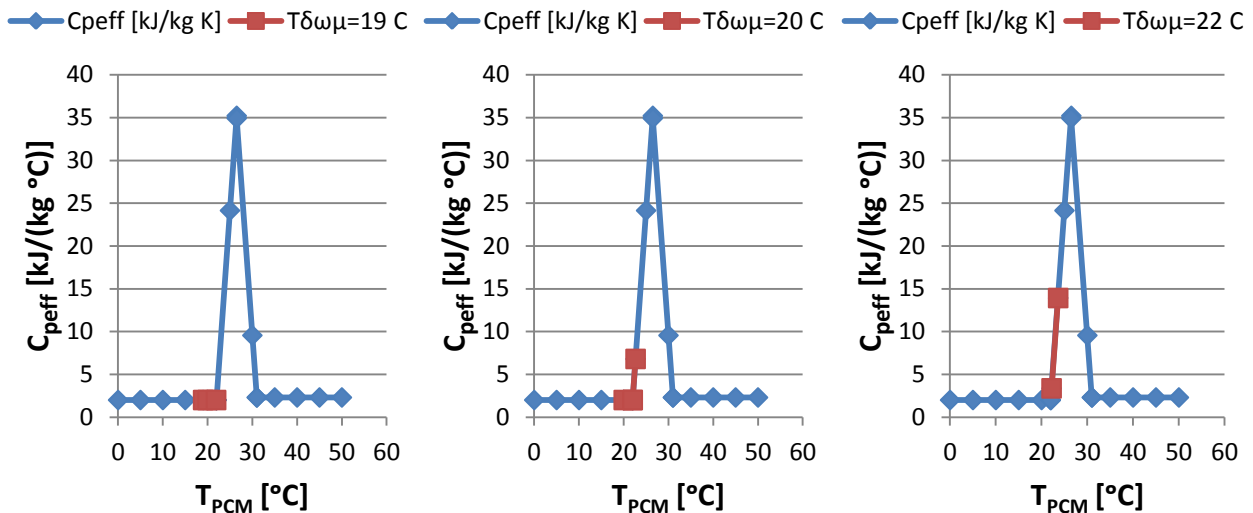
Διάγραμμα 6.2.3.12: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^\circ C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^\circ C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^\circ C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου και ναλοπίνακα σε νότιο τοίχο:



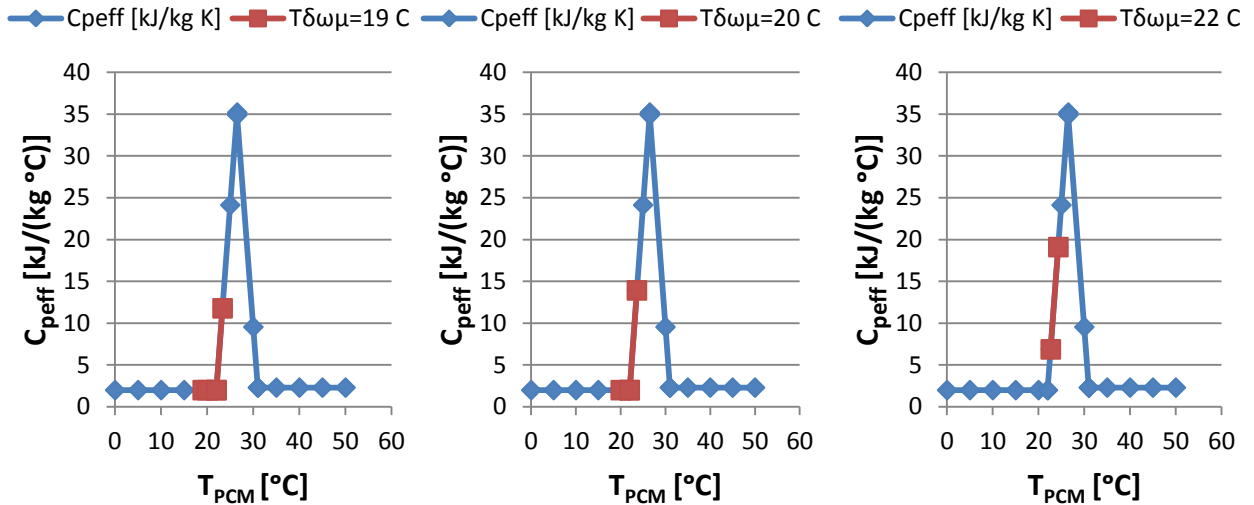
Διάγραμμα 6.2.3.13: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με ναλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^\circ C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^\circ C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^\circ C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου και ναλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:



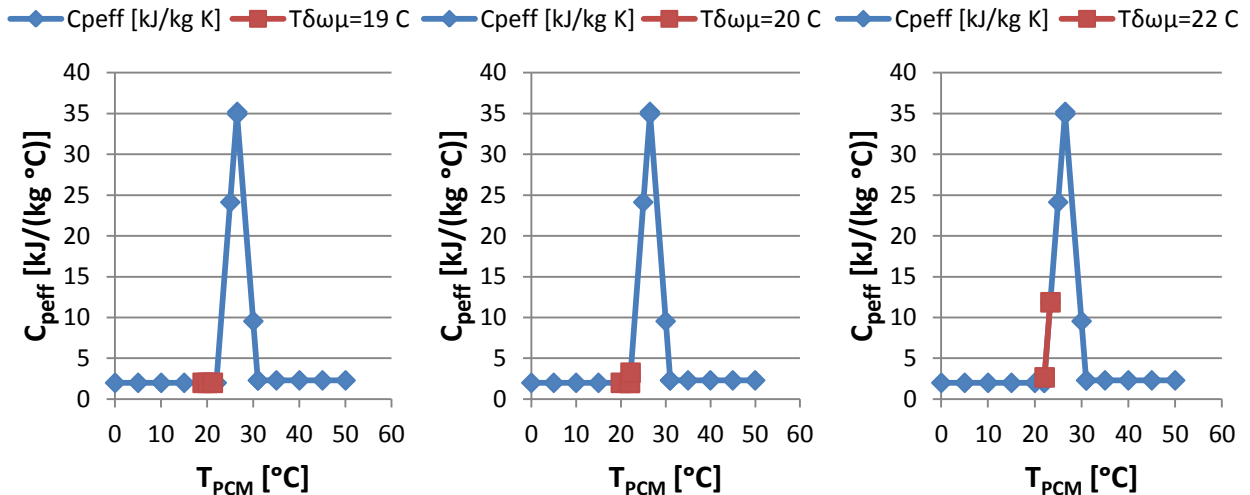
Διάγραμμα 6.2.3.14: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με ναλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^\circ C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^\circ C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^\circ C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου και ναλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:



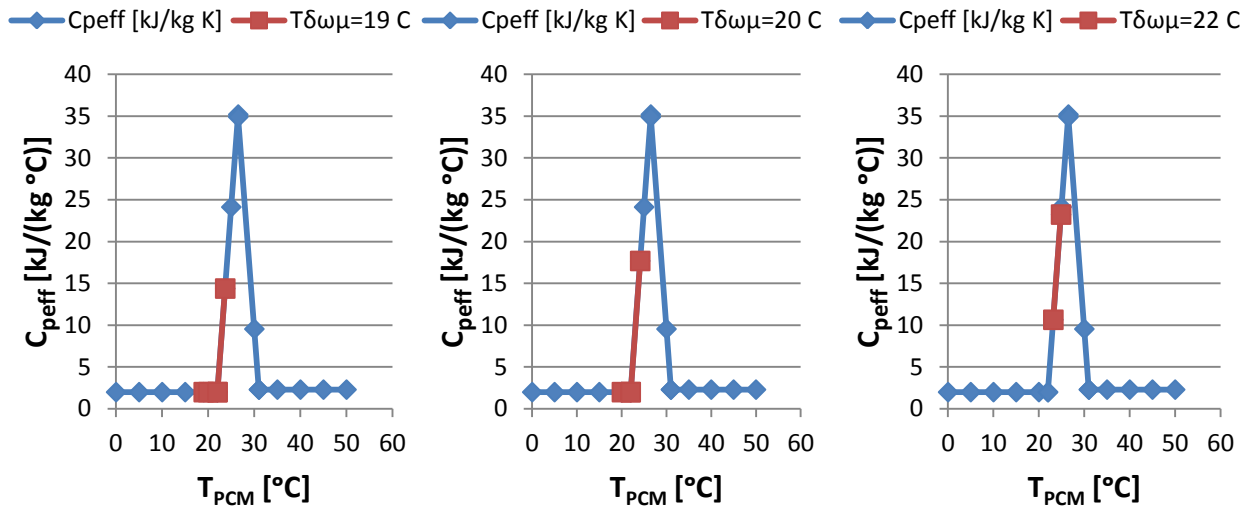
Διάγραμμα 6.2.3.15: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με ναλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}\text{C}$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}\text{C}$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου και ναλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:



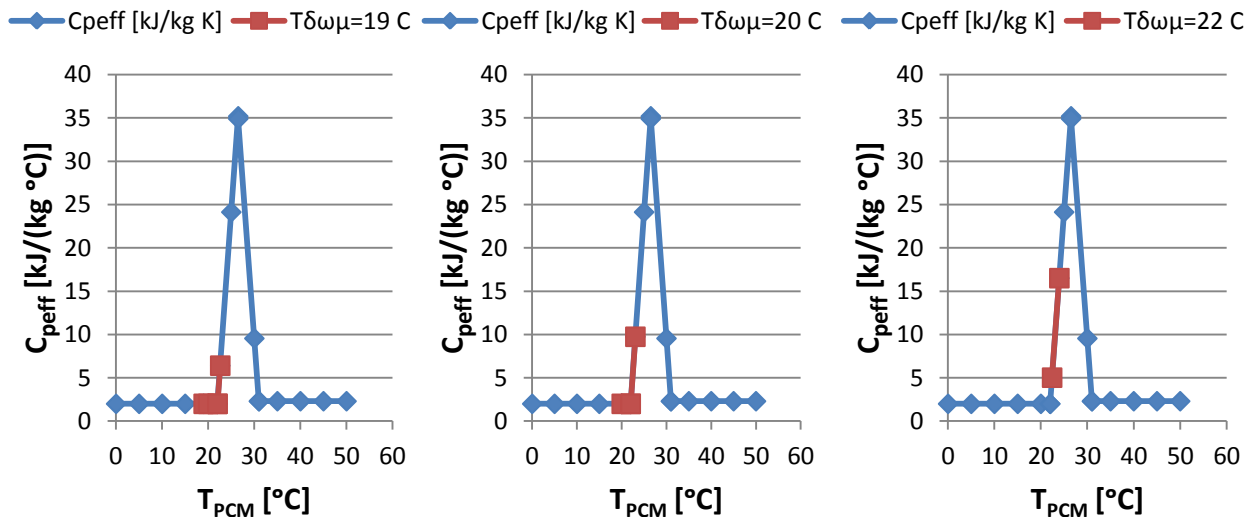
Διάγραμμα 6.2.3.16: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με ναλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}\text{C}$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}\text{C}$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Μαρτίου και βαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:



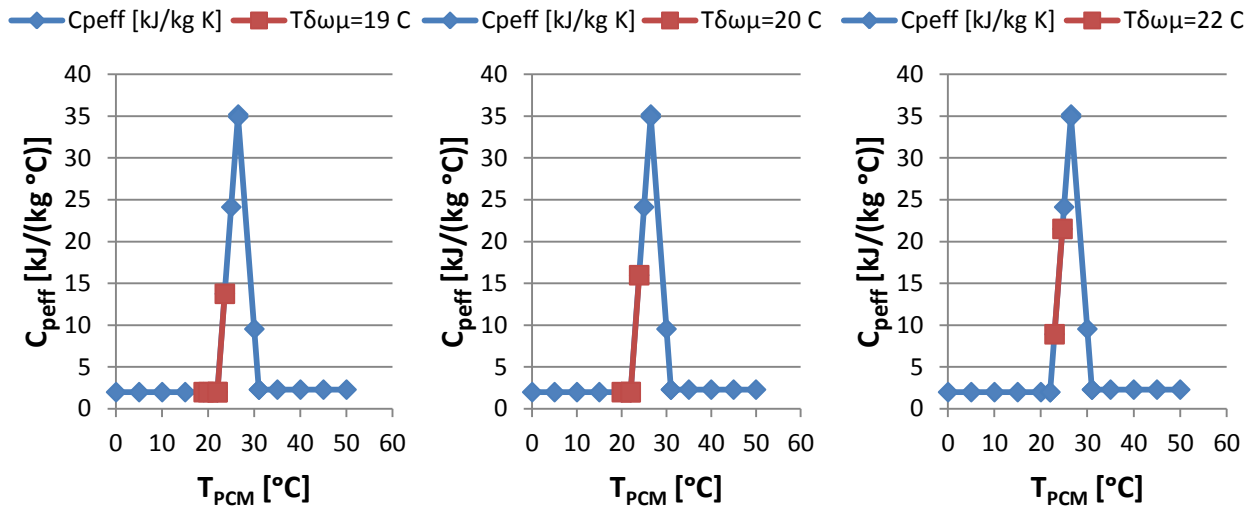
Διάγραμμα 6.2.3.17: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με βαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Μαρτίου και βαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:



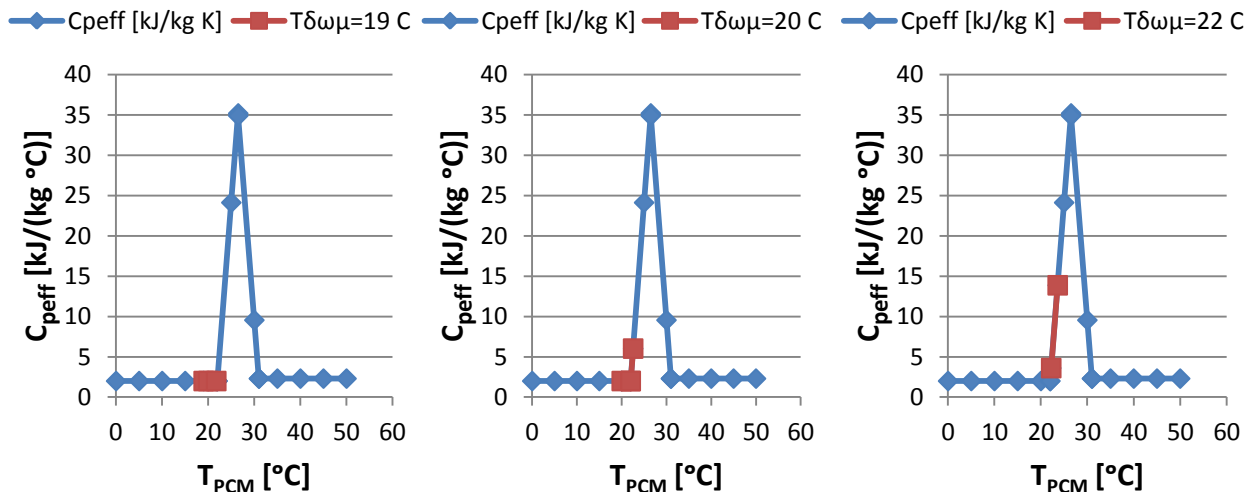
Διάγραμμα 6.2.3.18: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με βαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Μαρτίου και βαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:



Διάγραμμα 6.2.3.19: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με βαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Μαρτίου και βαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:



Διάγραμμα 6.2.3.20: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με βαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $T_{\Delta\Omega M} = 19^{\circ}C$, $T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$ και $T_{\Delta\Omega M} = 22^{\circ}C$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα 6.2.3.1 έως 6.2.3.20 ως προς τη θερμοκρασία που επικρατεί στο χώρο, προκύπτει ότι από τις τρεις εξεταζόμενες θερμοκρασίες δωματίου, αυτή για την οποία φαίνεται να καλύπτεται μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης του RT27 και να εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές ενεργού θερμοχωρητικότητας, είναι η υψηλότερη, $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$. Αυτό σημαίνει ότι σε αυτή τη θερμοκρασία δωματίου αξιοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό η ιδιότητα του PCM (RT27) να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση. Γενικά, το φαινόμενο είναι κάπως πολύπλοκο και ως εκ τούτου δεν μπορούμε να εξάγουμε περαιτέρω σαφή και ασφαλή συμπεράσματα για την επίδραση που έχει στη συμπεριφορά του PCM η οποιαδήποτε μεταβολή της θερμοκρασίας δωματίου. Συγκεκριμένα, η μεταβολή της θερμοκρασίας του δωματίου καθορίζει τα θερμοκρασιακά επίπεδα του PCM και έτσι μεταβάλλεται και η αποθηκευτική του ικανότητα, που εξαρτάται από την ενεργό θερμοχωρητικότητα. Βέβαια, μπορούμε να αντιληφθούμε ότι η κατά το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση του RT27 για κάθε επικρατούσα θερμοκρασία δωματίου επιτυγχάνεται όταν ο υαλοπίνακας βρίσκεται σε δυτικό και κυρίως σε νότιο προσανατολισμό, ενώ για ανατολικό και ειδικότερα για βόρειο τοίχο με υαλοπίνακα, η ιδιότητά του να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση, αξιοποιείται εμφανώς λιγότερο.

6.2.4 Ενεργειακή συνεισφορά του RT27 στο χώρο

Η ενεργειακή συνεισφορά του PCM υπολογίζεται κατά τον ίδιο τρόπο με αυτόν που παρουσιάστηκε στις ενότητες 5.2.5 και 5.3.6. Ανάλογα λοιπόν, με την εκάστοτε επικρατούσα θερμοκρασία εντός του δωματίου, $T_{\Delta\Omega M}$, θα προσδιορίσουμε το ποσό θερμότητας που προσφέρει το RT27 στο χώρο, για κάθε ώρα του 24ώρου της 21^{ης} ημέρας καθενός από τους πέντε χειμερινούς μήνες (Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος) και για κάθε προσανατολισμό του τοίχου που φέρει υαλοπίνακα. Ομοίως, προς εξυπηρέτηση και διευκόλυνση της μελέτης μας, θεωρούμε ότι η ανάγκη για θέρμανση του χώρου κατά τους εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες και με βάση τις συνθήκες που επικρατούν και κατ' επέκταση τις απώλειες του υπό μελέτη κτιρίου, είναι $P=20\text{W}/\text{m}^2$, προκειμένου να επιτυγχάνεται σταθερή θερμοκρασία $T_{\Delta\Omega M}=19^{\circ}\text{C}$ αλλά και $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$ εντός του χώρου. Το γεγονός ότι θεωρούμε την τιμή της απαιτούμενης ισχύος, $P=20\text{W}/\text{m}^2$, ίδια και για τις τρεις θερμοκρασίες δωματίου, $T_{\Delta\Omega M}=19^{\circ}\text{C}$, $T_{\Delta\Omega M}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$, οφείλεται στο ότι υποθέτουμε έστω διαφορετικό πάχος στρώματος μόνωσης για κάθε εξεταζόμενη θερμοκρασία δωματίου.

Επομένως, για το δωμάτιο που μελετάμε, διαστάσεων $10\text{m}\times 10\text{m}=100\text{m}^2$, θα απαιτούνται:

$$P_{ολ} = 20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 100\text{m}^2 = 2000\text{W} = 2\text{kW} ,$$

Ένα μέρος της παραπάνω θερμικής ισχύος, $P_{ολ}$, καλύπτεται από πηγές θερμότητας, όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενα σημεία της εργασίας και το υπόλοιπο εξασφαλίζεται από την ενσωμάτωση του PCM στον εσωτερικό τοίχο του χώρου. Έτσι, για κάθε ώρα του 24ώρου θα απαιτούνται:

$$Q_{απαιτ} = 2\text{kW} \cdot 3600\text{sec} = 7200\text{kJ}$$

εκ των οποίων το ποσό που θα προσφέρει το PCM ισούται με:

$$Q = U \cdot A_W \cdot (T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}) \cdot 3600 [kJ]$$

Για $T_{\Delta\Omega M}=19^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned} Q &= 7,06 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot (19 - T_{PCM}) \cdot 3600 \\ \Rightarrow Q &= 762,48 \cdot (19 - T_{PCM}) [kJ] \end{aligned} \quad (6.2.4.1)$$

Για $T_{\Delta\Omega M}=22^\circ\text{C}$:

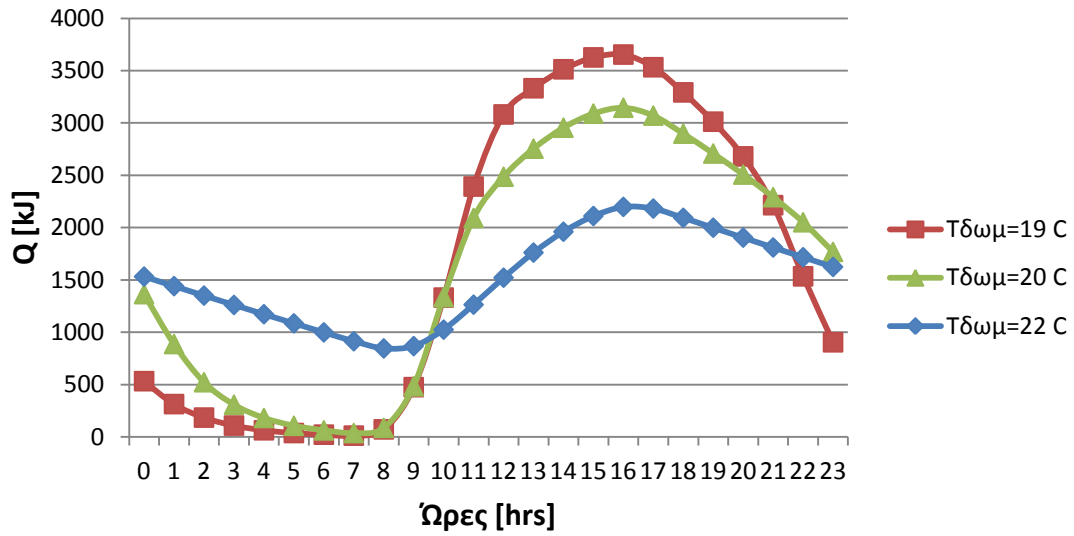
$$\begin{aligned} Q &= 7,06 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot (22 - T_{PCM}) \cdot 3600 \\ \Rightarrow Q &= 762,48 \cdot (22 - T_{PCM}) [kJ] \end{aligned} \quad (6.2.4.2)$$

όπου στις σχέσεις (6.2.4.1) και (6.2.4.2), $T_{PCM} = (T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda})/2$, $T_{\alpha\rho\chi}$, $T_{\tau\epsilon\lambda}$ έτσι όπως προέκυψαν από τις σχέσεις (6.2.2.3) και (6.2.2.4) της ενότητας 6.2.2 αναλόγως της θερμοκρασίας που επικρατεί στο χώρο, για κάθε ώρα του 24ώρου.

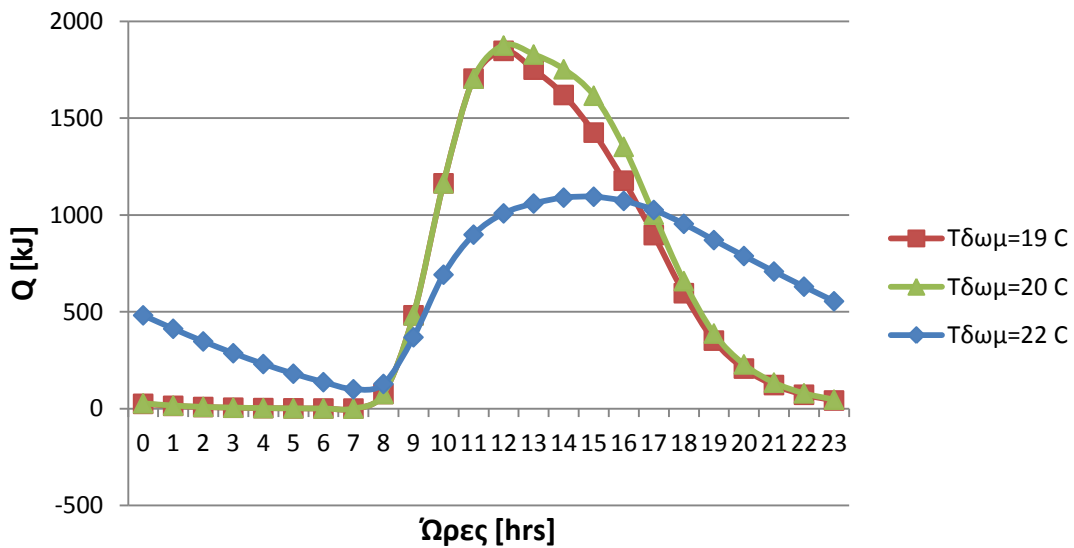
Σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε πάλι, πως με αυτόν τον τρόπο υπολογισμού της προσφερόμενης θερμότητας δεν γίνεται διακριτό το αισθητό ή (και) το λανθάνον μέρος αυτής.

Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται το προσφερόμενο ποσό θερμότητας από το RT27, συναρτήσει των ωρών της εκάστοτε ημέρας για κάθε μήνα και προσανατολισμό. Χάριν εποπτείας και πιο άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων, κάθε διάγραμμα περιλαμβάνει τρεις καμπύλες ενεργειακής συνεισφοράς του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου, εκ των οποίων οι δύο αντιστοιχούν στις δύο νέες τιμές θερμοκρασίας δωματίου ($T_{\Delta\Omega M} = 19^\circ\text{C}$, $T_{\Delta\Omega M} = 22^\circ\text{C}$) και η άλλη στην αρχική, $T_{\Delta\Omega M} = 20^\circ\text{C}$, που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 5.

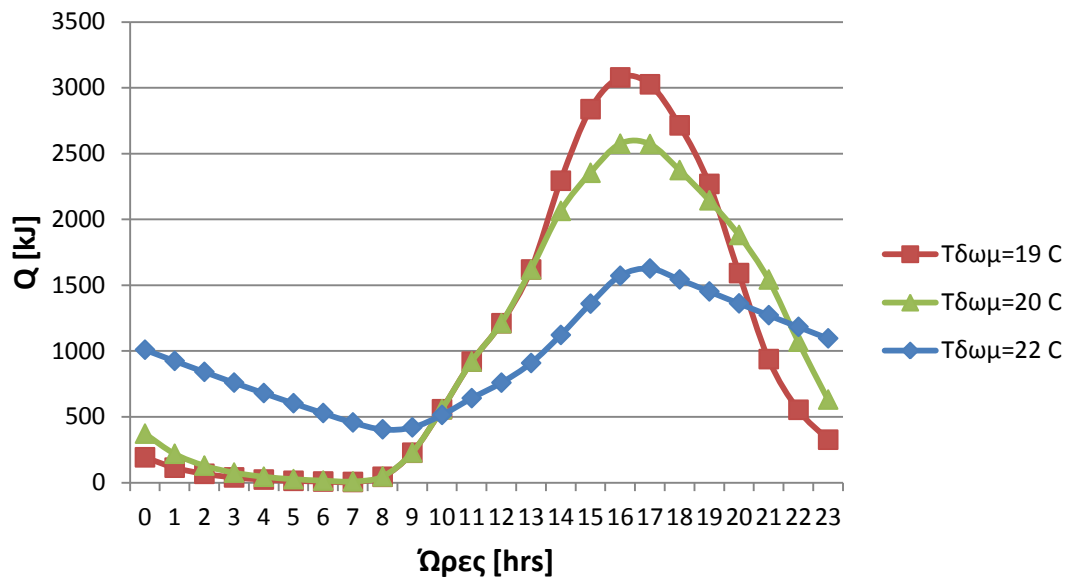
➤ Για 21^η Νοεμβρίου:



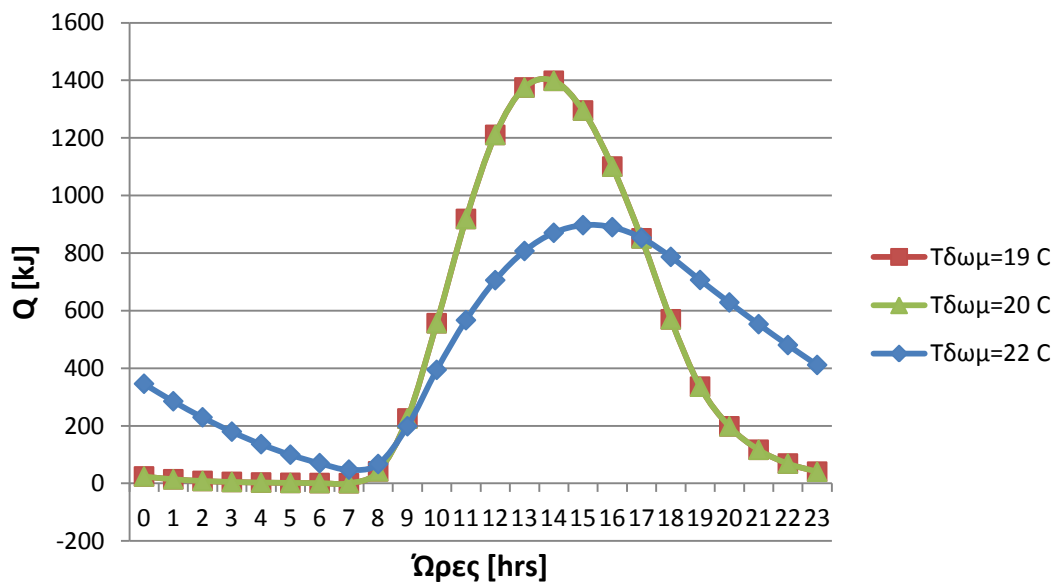
Διάγραμμα 6.2.4.1: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.4.2: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

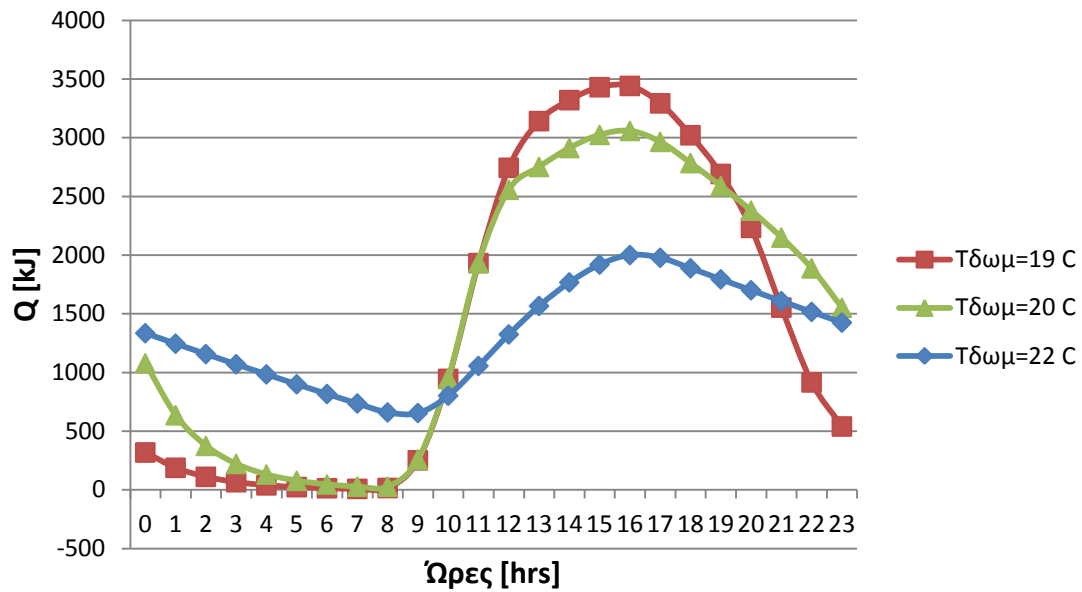


Διάγραμμα 6.2.4.3: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με βαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

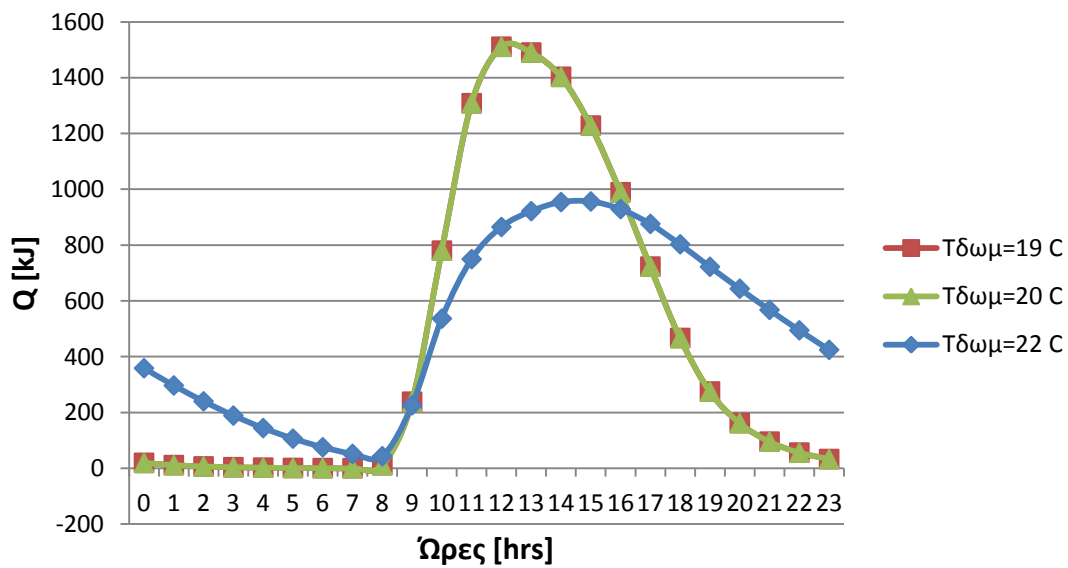


Διάγραμμα 6.2.4.4: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με βαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

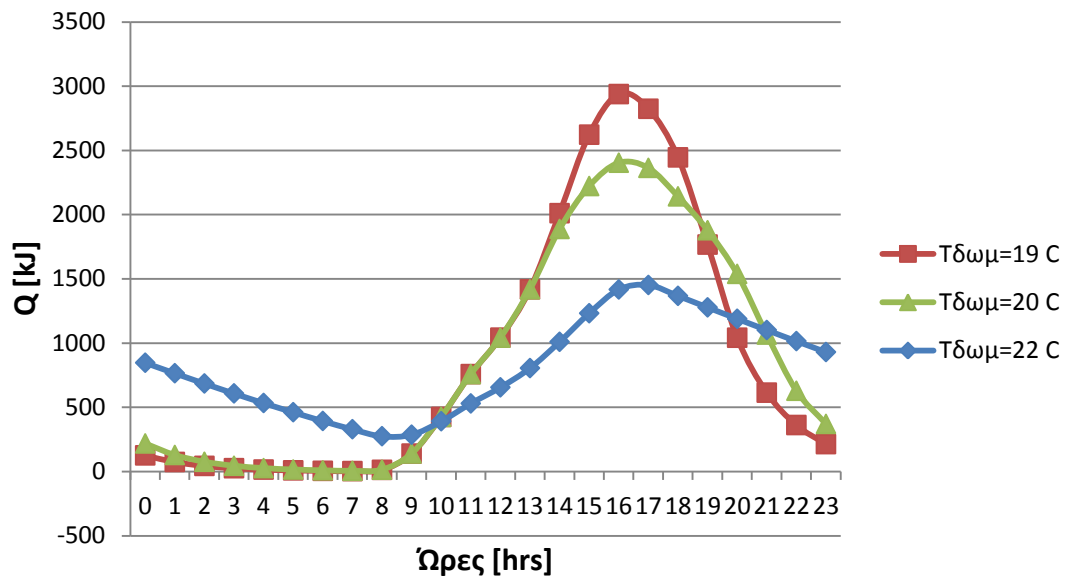
➤ Για 21^η Δεκεμβρίου:



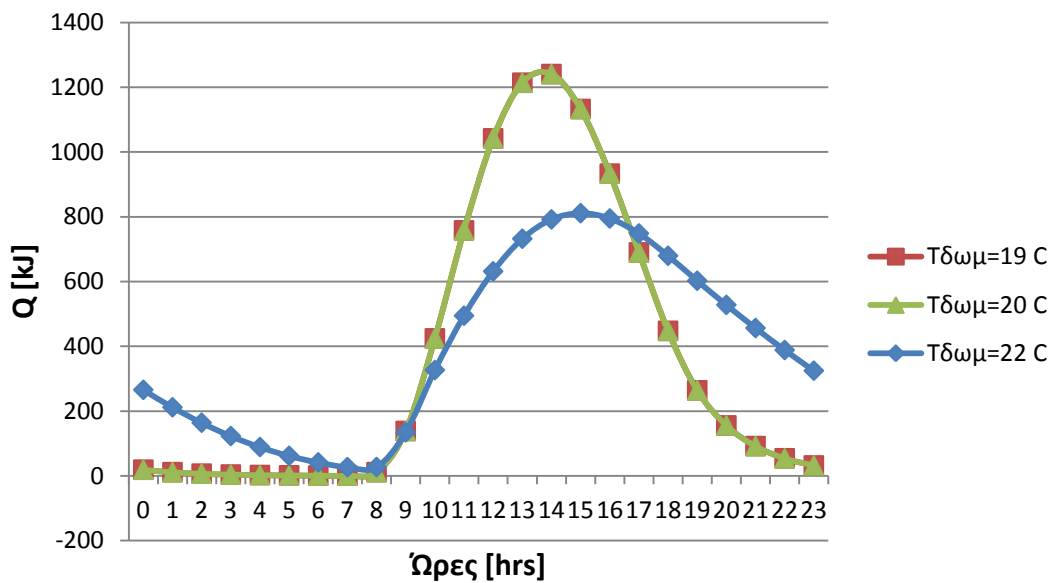
Διάγραμμα 6.2.4.5: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσε των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.4.6: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσε των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

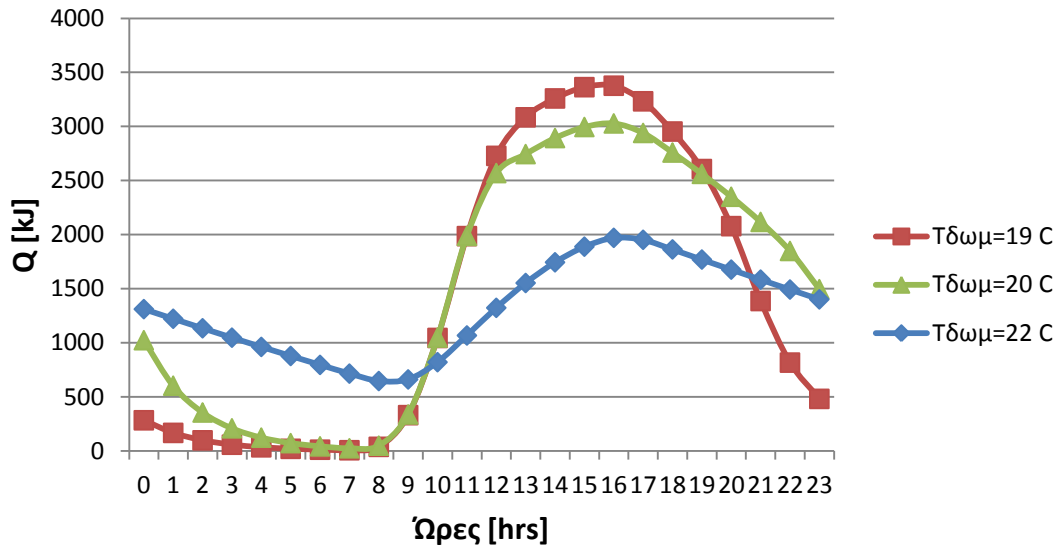


Διάγραμμα 6.2.4.7: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

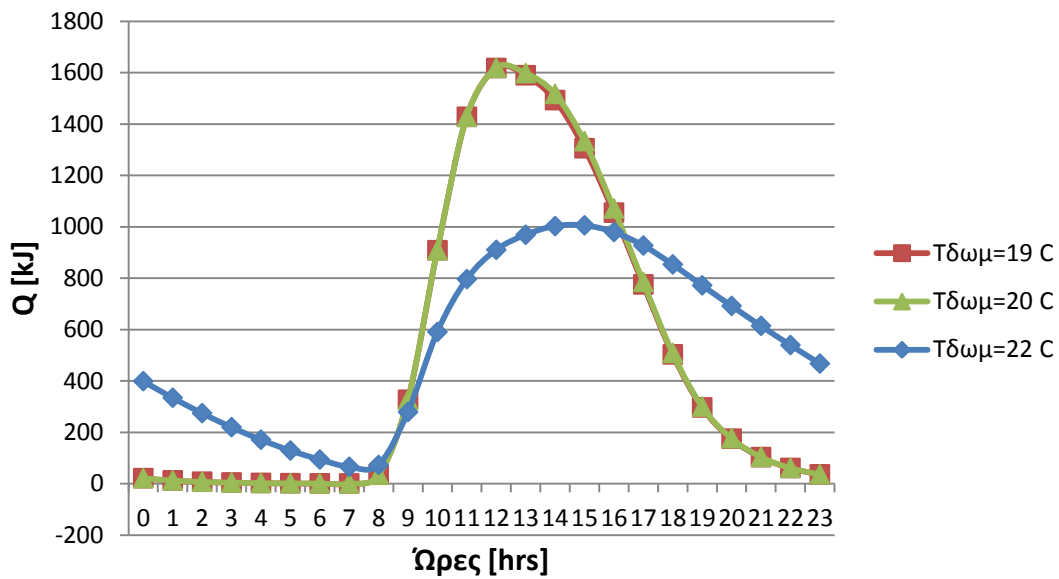


Διάγραμμα 6.2.4.8: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

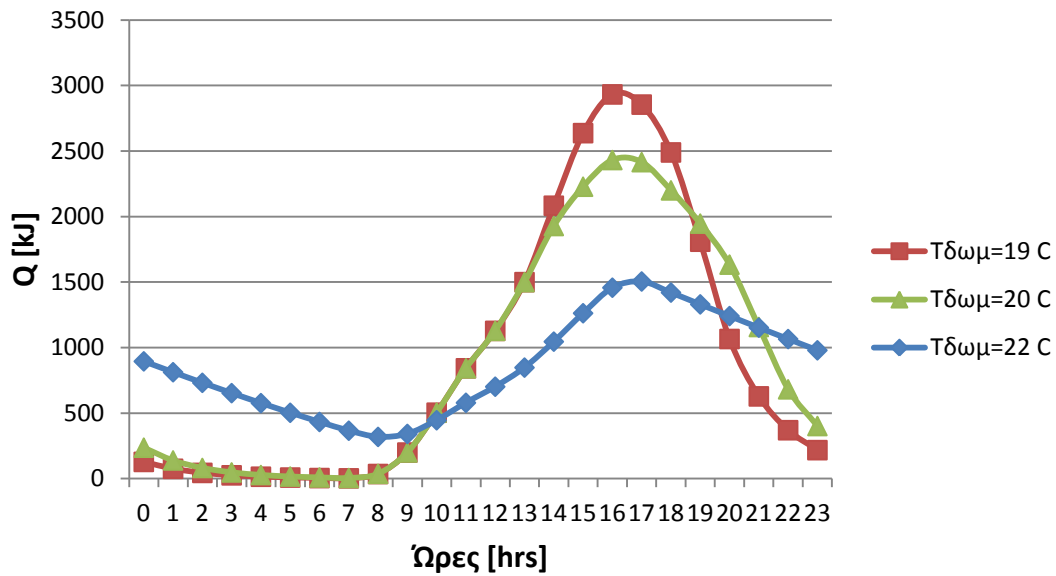
➤ Για 21^η Ιανουαρίου:



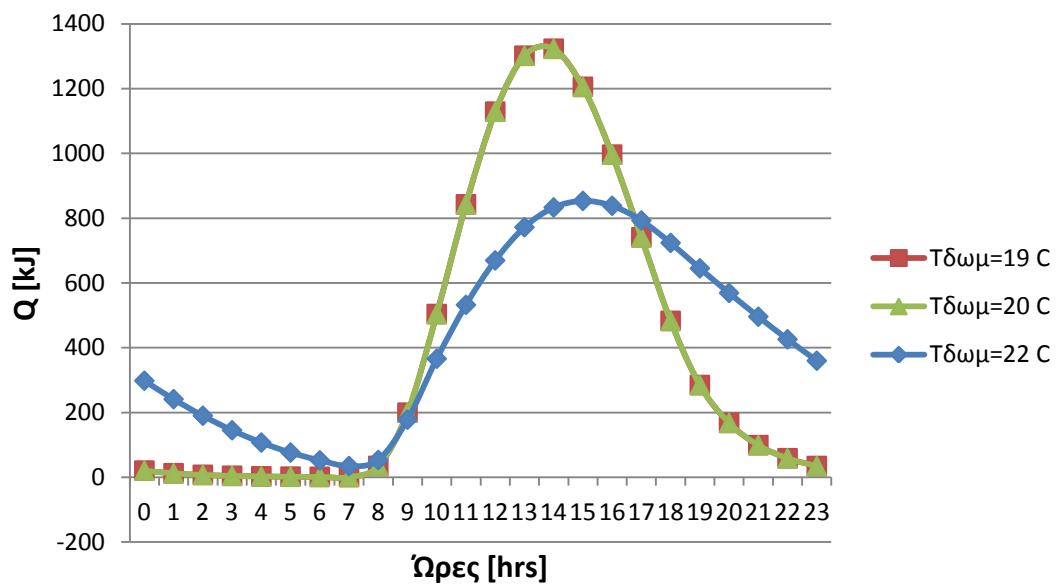
Διάγραμμα 6.2.4.9: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.4.10: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

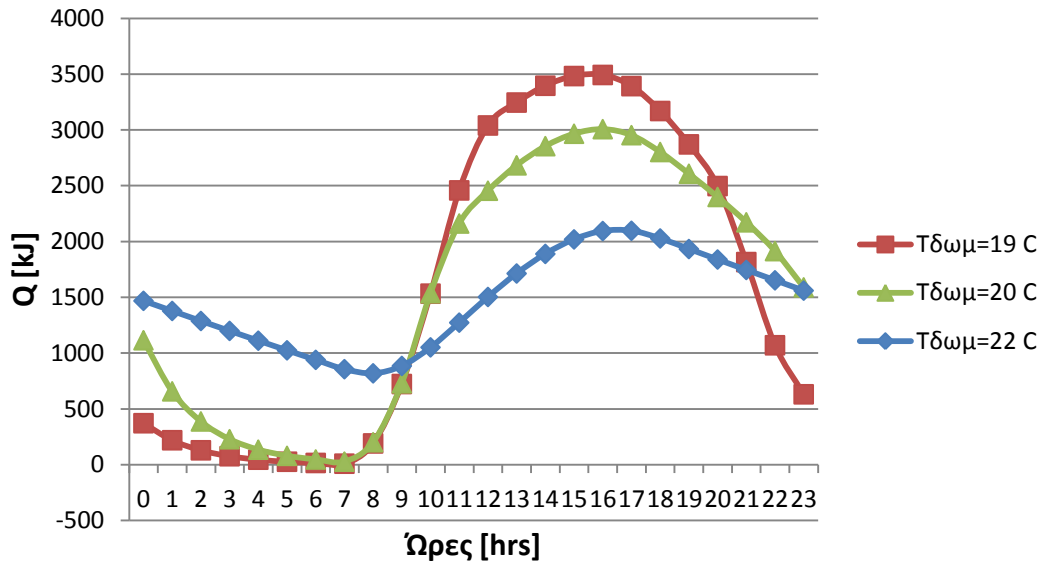


Διάγραμμα 6.2.4.11: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

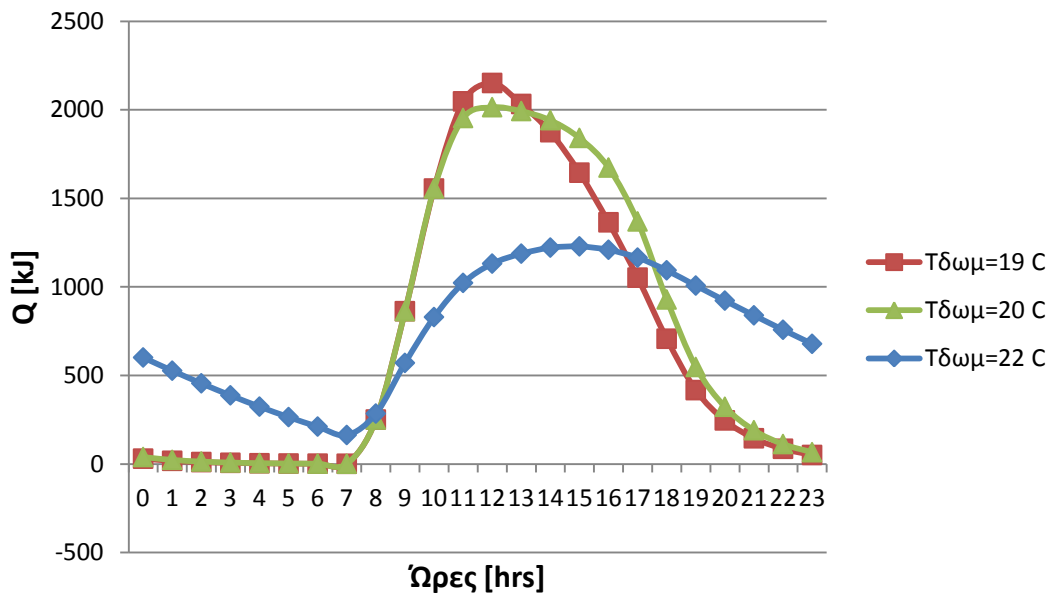


Διάγραμμα 6.2.4.12: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

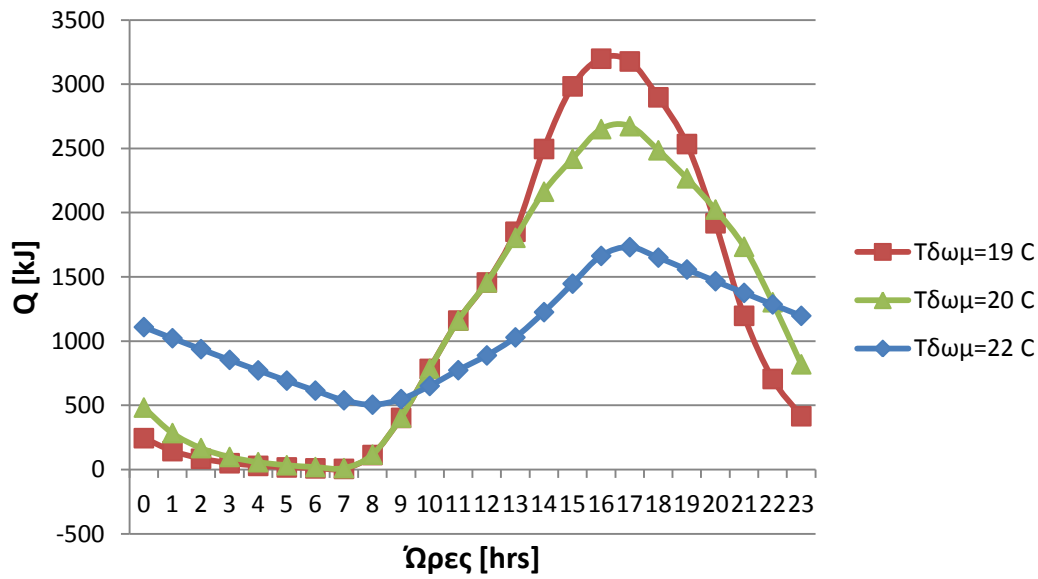
➤ Για 21^η Φεβρουαρίου:



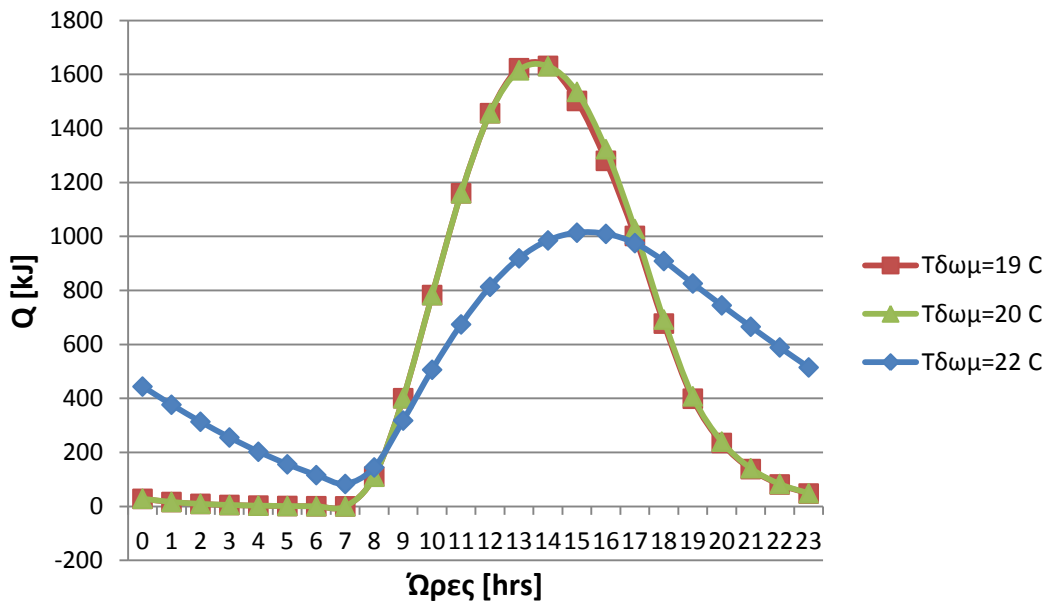
Διάγραμμα 6.2.4.13: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με βαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.4.14: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με βαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

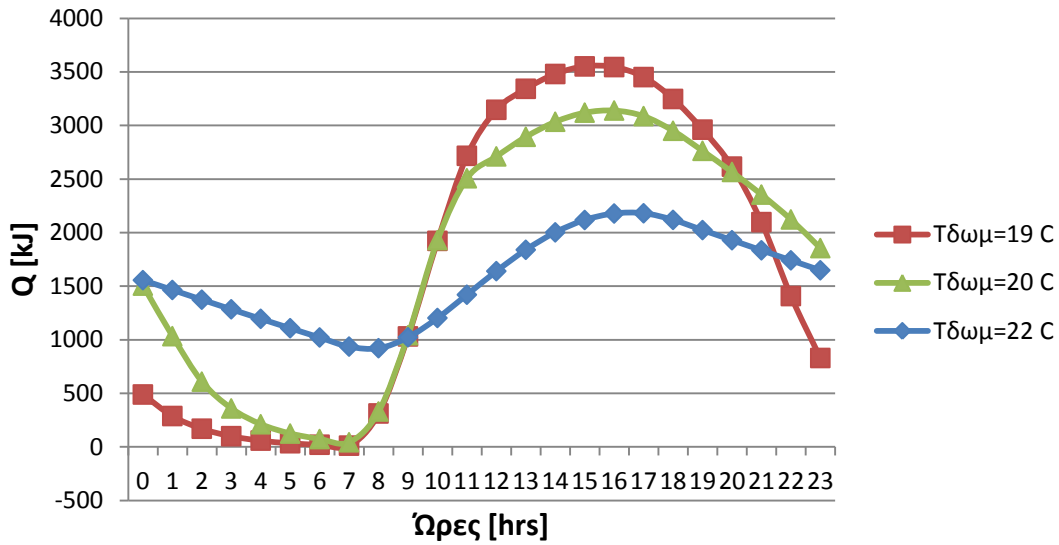


Διάγραμμα 6.2.4.15: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

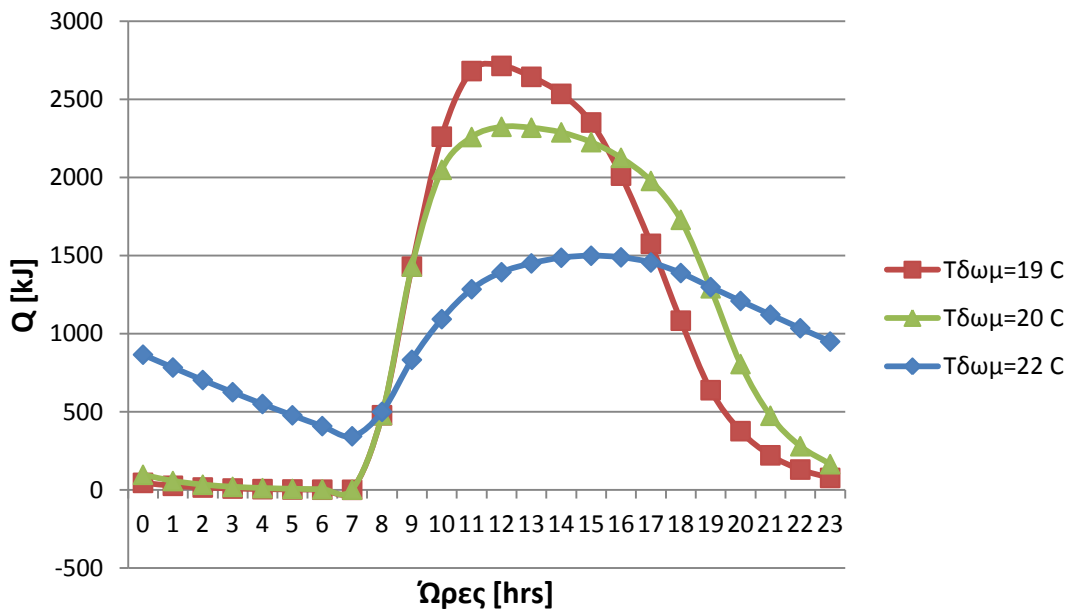


Διάγραμμα 6.2.4.16: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

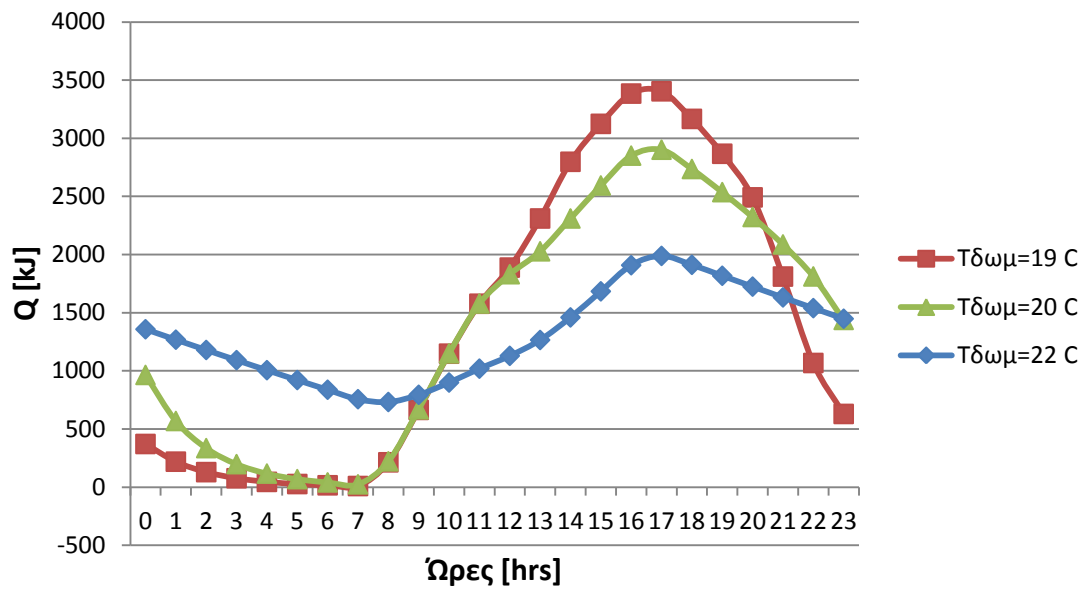
➤ Για 21^η Μαρτίου:



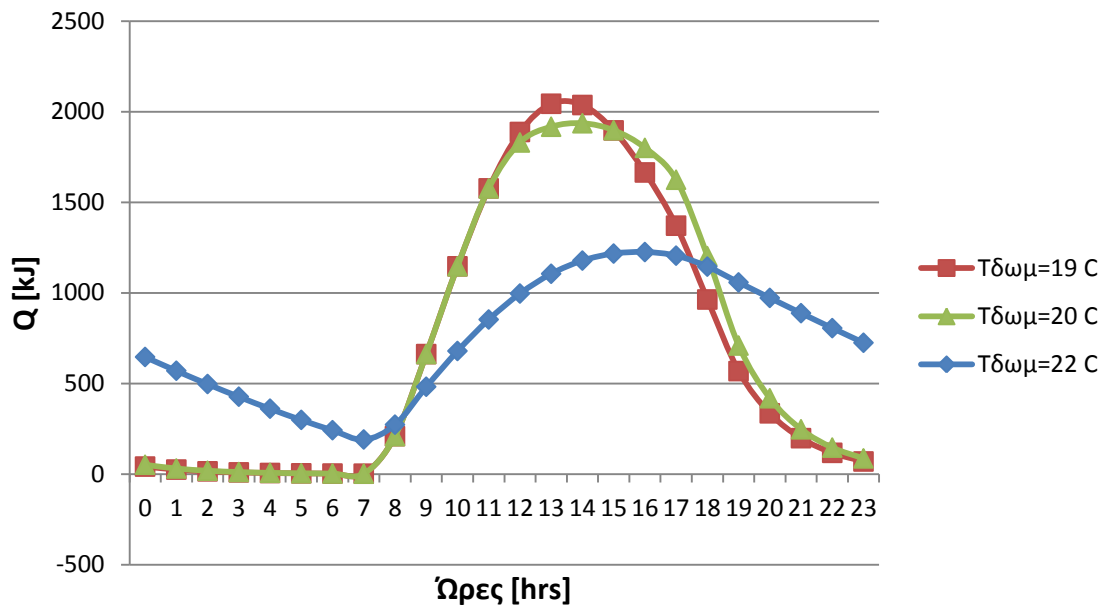
Διάγραμμα 6.2.4.17: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.4.18: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



Διάγραμμα 6.2.4.19: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με βαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου



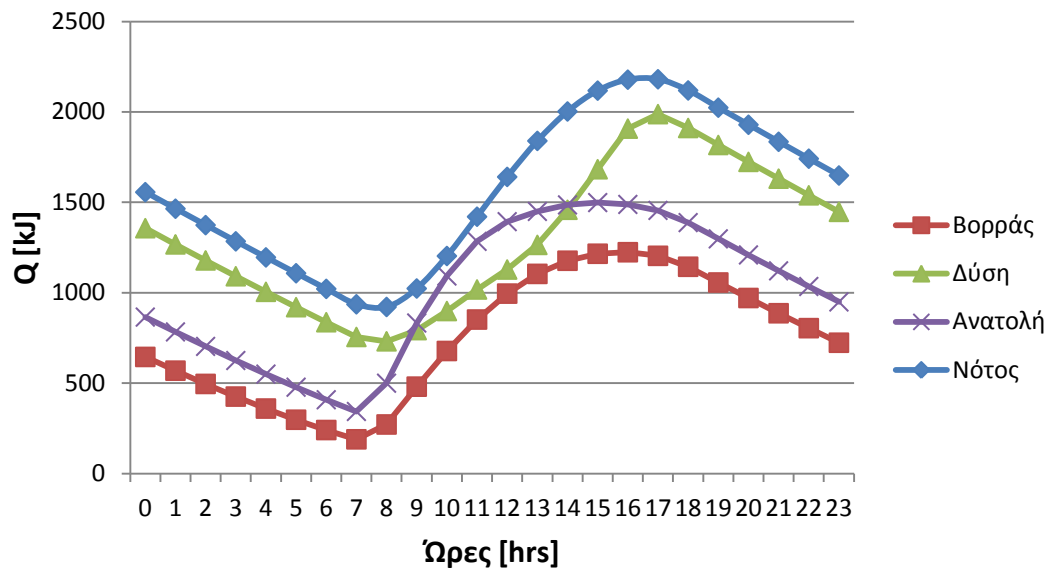
Διάγραμμα 6.2.4.20: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με βαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

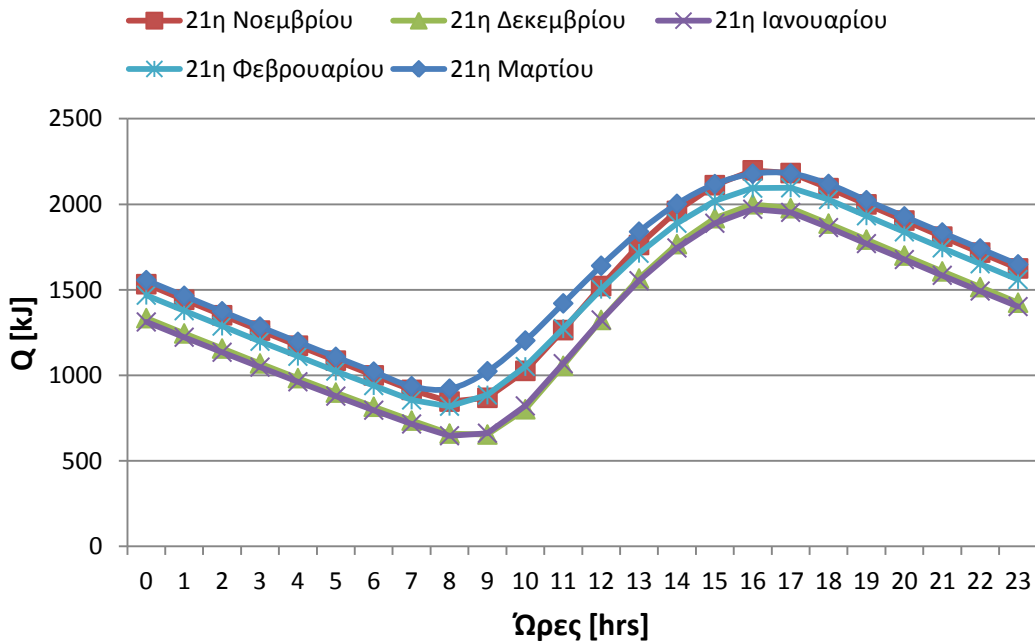
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ενότητας 6.2.2 για το RT27, η θερμοκρασία του είναι υψηλότερη αυτής του δωματίου καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου, για οποιαδήποτε θερμοκρασία δωματίου, για κάθε μήνα και κάθε προσανατολισμό. Κατά συνέπεια, για οποιαδήποτε περίπτωση, το RT27 μόνο προσδίδει θερμότητα στο χώρο, γεγονός λογικό που επιβεβαιώνεται και στα παραπάνω διαγράμματα 6.2.4.1 έως 6.2.4.20. Επιπλέον, παρατηρούμε για κάθε μία από τις τρεις καμπύλες (μία για κάθε θερμοκρασία δωματίου $T_{\Delta\Omega M}$) όλων των παραπάνω διαγραμμάτων ότι το ποσό προσφερόμενης θερμότητας μειώνεται από τις 12 το βράδυ μέχρι τις 7:00-9:00 περίπου το πρωί, από τις 7:00-9:00 το πρωί και μέχρι τις ώρες γύρω από το μεσημέρι (η ακριβής ώρα ποικίλλει αναλόγως του μήνα, του προσανατολισμού και της θερμοκρασία που επικρατεί στο χώρο) αυξάνεται, ενώ από εκεί και έπειτα μέχρι την ολοκλήρωση του 24ώρου έχει πάλι φθίνουσα πορεία. Αυτή η μεταβολή στην προσφερόμενη θερμότητα εξηγείται ως εξής: Στο χρονικό διάστημα από το πρωί μέχρι τις ώρες γύρω από το μεσημέρι, η θερμότητα που προσφέρει ολοένα αυξάνεται, αφού η διαφορά θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) αυξάνει κατ' απόλυτη τιμή, λόγω διέγερσης του RT27 από την ηλιακή ακτινοβολία G_T (γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του PCM). Κατόπιν και μέχρι τις 7 με 9 το πρωί, η διαφορά θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) μειώνεται κατ' απόλυτη τιμή, αφού πλέον δεν υφίσταται η διέγερση G_T (δηλαδή παύει να αυξάνει η θερμοκρασία του RT27) και έτσι η θερμότητα που προσφέρει στο χώρο ολοένα μειώνεται. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη μέγιστη προσφερόμενη θερμότητα εμφανίζεται για τη μικρότερη θερμοκρασία δωματίου $T_{\Delta\Omega M}=19^{\circ}\text{C}$ (για κάθε μήνα και προσανατολισμό), ενώ η μικρότερη μέγιστη προσφερόμενη θερμότητα εμφανίζεται για τη μεγαλύτερη θερμοκρασία δωματίου $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$ (για κάθε μήνα και προσανατολισμό). Όπως επισημάναμε και στο σχολιασμό των διαγραμμάτων της ενότητας 6.2.2 και 6.2.3, το φαινόμενο είναι πολύπλοκο και δεν μπορούμε να εξάγουμε περαιτέρω συμπεράσματα για το πώς επιδρά στη συμπεριφορά του PCM η μεταβολή της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου.

Αναφορικά με τη σύγκριση των διαγραμμάτων ως προς τον προσανατολισμό, εξάγουμε παρόμοια συμπεράσματα με αυτά σε αντίστοιχα διαγράμματα άλλων ενότητων. Έτσι, για κάθε μήνα τα μεγαλύτερα ποσά θερμότητας σε γενικές γραμμές προσφέρονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι νότιου προσανατολισμού, ενώ τα μικρότερα όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι βόρειος. Στην περίπτωση δυτικού τοίχου με υαλοπίνακα, τα προσφερόμενα ποσά θερμότητας είναι μεγαλύτερα από αυτά για ανατολικό τοίχο με υαλοπίνακα, για κάθε μήνα. Αυτά αποτυπώνονται πιο ξεκάθαρα στο διάγραμμα 6.2.4.21 που βρίσκεται παρακάτω και που έγινε ενδεικτικά για την 21^η Μαρτίου και για θερμοκρασία δωματίου $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$.

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα ως προς το μήνα, παρατηρούμε πως η καμπύλη του Q πέφτει κατακόρυφα, δηλαδή αποκτά μικρότερη μέγιστη αλλά και μικρότερη ελάχιστη τιμή, καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται ξανά οι τιμές του και κατ' επέκταση η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή. Αντίστοιχα, κατά τον ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό του τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, παρατηρούμε ότι η καμπύλη του Q πέφτει κατακόρυφα καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Δεκέμβριο και αρχίζει να ανεβαίνει σταδιακά οδεύοντας από τον Ιανουάριο μέχρι και το Μάρτιο. Αυτά γίνονται πιο εμφανή στο διάγραμμα 6.2.4.22 που βρίσκεται παρακάτω και που έγινε ενδεικτικά για νότιο προσανατολισμό και για θερμοκρασία δωματίου $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 6.2.4.21: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου, για $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}C$ και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.2.4.22: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών για νότιο προσανατολισμό υαλοπίνακα, για $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}C$ και για κάθε χειμερινό μήνα

6.3 Παραμετρική μελέτη ως προς την επιφάνεια του υαλοπίνακα

Κατ' αντιστοιχία με τις δύο προηγούμενες παραμετρικές μελέτες (ως προς πάχος στρώματος PCM και ως προς θερμοκρασία δωματίου), θα προσδιορίσουμε τη συμπεριφορά του RT27 μεταβάλλοντας αυτή τη φορά την επιφάνεια του υαλοπίνακα. Τόσο στο κεφάλαιο 5, όσο και στις δύο παραμετρικές μελέτες που προηγήθηκαν, η επιφάνεια του υαλοπίνακα θεωρήθηκε $A_f = 4,5m^2$. Σε αυτήν την ενότητα σκοπός μας είναι να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του RT27, το ποσοστό αξιοποίησής του και την ενεργειακή του συνεισφορά κατά τη διάρκεια του 24ώρου, όταν η επιφάνεια του υαλοπίνακα είναι $A_f = 6m^2$ αλλά και $A_f = 7m^2$, για την 21^η Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό. Διευκρινίζουμε πως τα μεγέθη $T_{\Delta\Omega M}$ και m_{PCM} διατηρούν τις τιμές που είχαν στο κεφάλαιο 5, όπως θα δούμε άλλωστε και στην ενότητα 6.3.2.

6.3.1 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του RT27

Ο ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM δίνεται και πάλι από τη σχέση (5.3.2.1) της ενότητας 5.3.2 και είναι ο ακόλουθος:

$$U_i A_w \left(T_e^i - \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \right) \cdot 3600 = m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot (T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\alpha\rho\chi})$$

όπου τα μεγέθη που υπεισέρχονται στον ισολογισμό ενέργειας ορίζονται όπως ακριβώς ορίστηκαν και στην ενότητα 5.3.2.

Υπενθυμίζουμε ότι οι παραδοχές που κάνουμε για την απλοποίηση του προβλήματος είναι: σταθερή θερμοκρασία στο εσωτερικό της εξεταζόμενης αίθουσας με τη βοήθεια κλιματιστικών συστημάτων, θερμαντικών σωμάτων κλπ., ίδια θερμοκρασία σε όλη την έκταση του στρώματος του υλικού αλλαγής φάσης, καμία συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του στρώματος του PCM και της μόνωσης και τέλος σταθερές απώλειες εντός του χώρου μελέτης μας, οι οποίες συνεπάγονται σταθερή απαιτούμενη ισχύ για την επίτευξη συνθηκών άνεσης και σταθερής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του χώρου.

Οι τιμές όλων των μεγεθών παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 6.3.2 που ακολουθεί.

6.3.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας του RT27 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου

Εφαρμόζοντας τον ισολογισμό ενέργειας στο στρώμα του RT27 μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του PCM στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου. Συνεπώς, έχουμε:

$$\begin{aligned} U_i A_w \left(T_e^i - \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \right) \cdot 3600 &= m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot (T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\alpha\rho\chi}) \\ \Rightarrow m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\tau\epsilon\lambda} + U_i \cdot A_w \cdot \frac{T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \cdot 3600 &= \\ = U_i \cdot A_w \cdot T_e^i \cdot 3600 - U_i \cdot A_w \cdot \frac{T_{\alpha\rho\chi}}{2} \cdot 3600 + m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\alpha\rho\chi} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{U_i \cdot A_w \cdot T_e^i \cdot 3600 - U_i \cdot A_w \cdot T_{\alpha\rho\chi} \cdot 1800 + m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot T_{\alpha\rho\chi}}{m_{PCM} \cdot C_{peff} + U_i \cdot A_w \cdot 1800}$$

Η επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού του $T_{\tau\epsilon\lambda}$ πραγματοποιείται όπως ακριβώς περιγράψαμε και εργαστήκαμε στην ενότητα 5.2.3.

Τα δεδομένα μας στη συγκεκριμένη παραμετρική μελέτη έχουν ως εξής:

Διαστάσεις αίθουσας: 10m×10m×3m (μήκος×πλάτος×ύψος)

$$U_i = 7,06 \cdot 10^{-3} kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$$

$$A_w = 30m^2$$

$$T_{\Delta\Omega M} = 20^\circ C$$

$$m_{PCM} = \rho_{PCM} \cdot V_{PCM} = 820 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 0,03 = 738kg, \text{ αφού } d_{PCM} = 0,03m$$

Επιπλέον, υπενθυμίζουμε τις σχέσεις (5.2.2.9) έως (5.2.2.12) για τη συνάρτηση C_{peff} του RT27:

Για $T \leq 22^\circ C$:

$$C_{peff} = C_{ps} = 2 \text{ kJ}/(kg \cdot ^\circ C)$$

Για $22^\circ C < T \leq 26,5^\circ C$:

$$C_{peff} = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = 7,378 \cdot T - 160,316 \text{ [kJ}/(kg \cdot ^\circ C)]$$

Για $26,5^\circ C < T \leq 31^\circ C$:

$$C_{peff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = -7,244 \cdot T + 226,87 \text{ [kJ}/(kg \cdot ^\circ C)]$$

Για $T > 31^\circ C$:

$$C_{peff} = C_{pl} = 2,3 \text{ kJ}/(kg \cdot ^\circ C)$$

όπου T στις εξισώσεις του C_{peff} θεωρήσαμε τη θερμοκρασία του PCM, $T_{\alpha\rho\chi}$, στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου.

Η «ισοδύναμη εσωτερική θερμοκρασία» εξαρτάται από την επιφάνεια του υαλοπίνακα. Επομένως θα έχουμε:

Για $A_f = 6m^2$:

$$T_e^i = \frac{G_T A_f}{A_w} \cdot \frac{a}{h_i \cdot 10^{-3}} + T_{\Delta\Omega M} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_e^i = \frac{6G_T}{30} \cdot \frac{0,88}{8 \cdot 10^{-3}} + 20$$

$$\Rightarrow T_e^i = 22G_T + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.3.2.1)$$

Για $A_f = 7m^2$:

$$T_e^i = \frac{G_T A_f}{A_w} \cdot \frac{a}{h_i \cdot 10^{-3}} + T_{\Delta\Omega M} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_e^i = \frac{7G_T}{30} \cdot \frac{0,88}{8 \cdot 10^{-3}} + 20$$

$$\Rightarrow T_e^i = 25,7G_T + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.3.2.2)$$

με G_T όπως υπολογίστηκε στην ενότητα 5.1 αναλυτικά για κάθε ώρα της 21^{ης} ημέρας των πέντε χειμερινών μηνών και για κάθε προσανατολισμό.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω και ανάλογα με την επιφάνεια του υαλοπίνακα, A_f , προκύπτει η εξίσωση υπολογισμού της θερμοκρασίας του RT27:

➤ Για $A_f = 6m^2$:

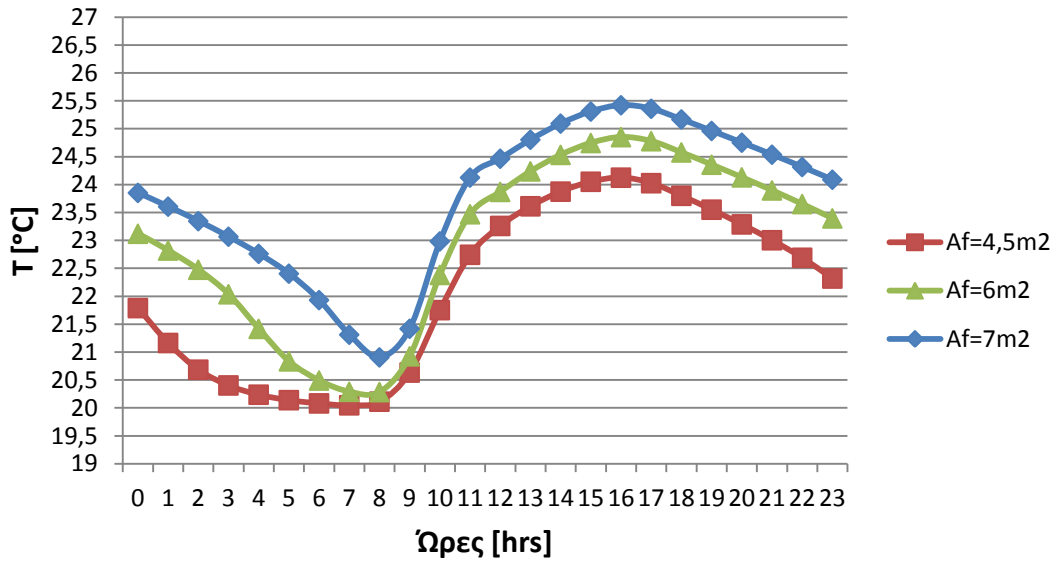
$$T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{16774,6G_T - 381,24T_{\alpha\rho\chi} + 738C_{\text{peff}}T_{\alpha\rho\chi} + 15249,6}{738C_{\text{peff}} + 381,24} \quad (6.3.2.3)$$

➤ Για $A_f = 7m^2$:

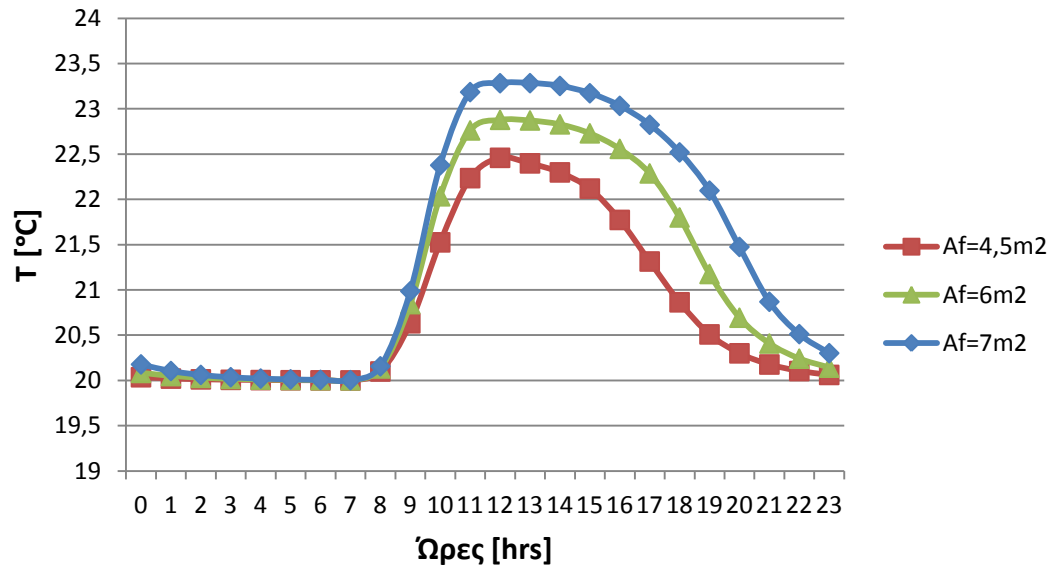
$$T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{19595,74G_T - 381,24T_{\alpha\rho\chi} + 738C_{\text{peff}}T_{\alpha\rho\chi} + 15249,6}{738C_{\text{peff}} + 381,24} \quad (6.3.2.4)$$

Τα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας $T_{PCM} = \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2}$ του RT27 κατά τη διάρκεια του 24ώρου της εκάστοτε ημέρας. Για εποπτικούς λόγους και καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων, σε κάθε διάγραμμα εμφανίζεται η θερμοκρασία του RT27 κατά τη διάρκεια του 24ώρου για τις δύο νέες τιμές της επιφάνειας υαλοπίνακα, αλλά και της αρχικής που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ($A_f = 4,5m^2$).

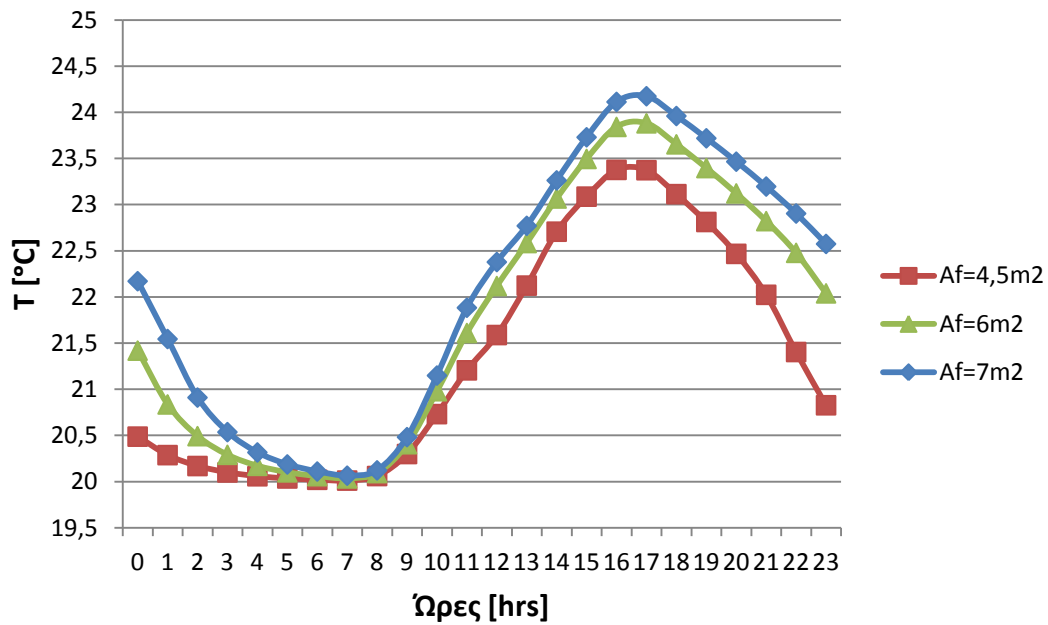
➤ Για 21^η Νοεμβρίου:



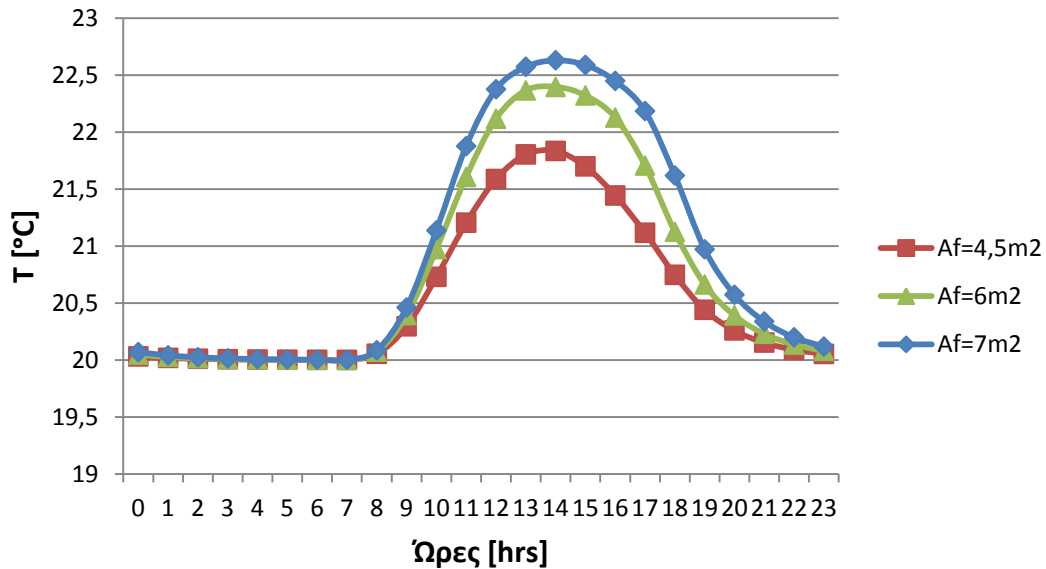
Διάγραμμα 6.3.2.1: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.2.2: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

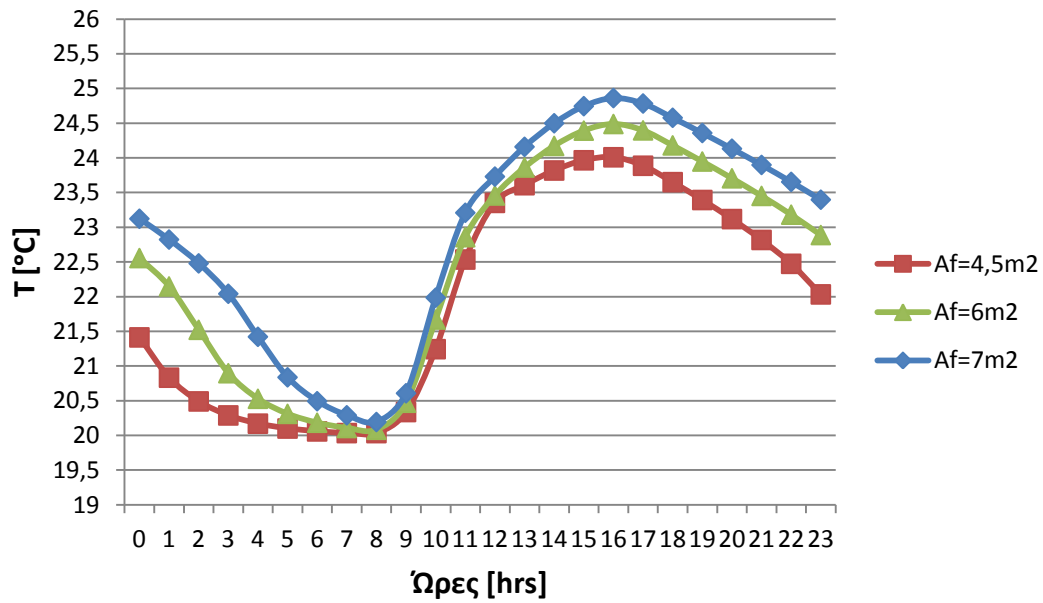


Διάγραμμα 6.3.2.3: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

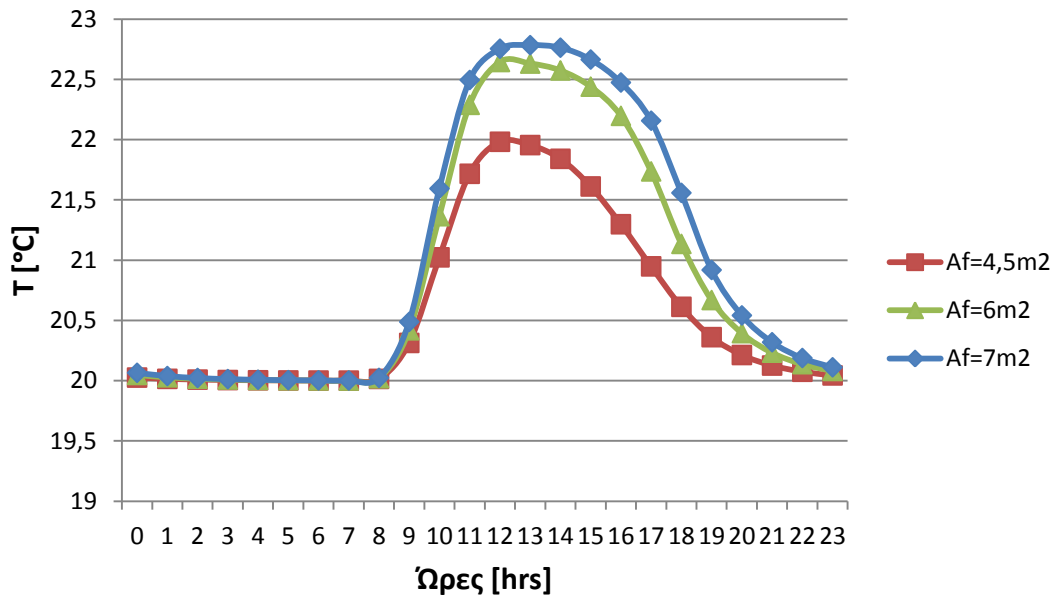


Διάγραμμα 6.3.2.4: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

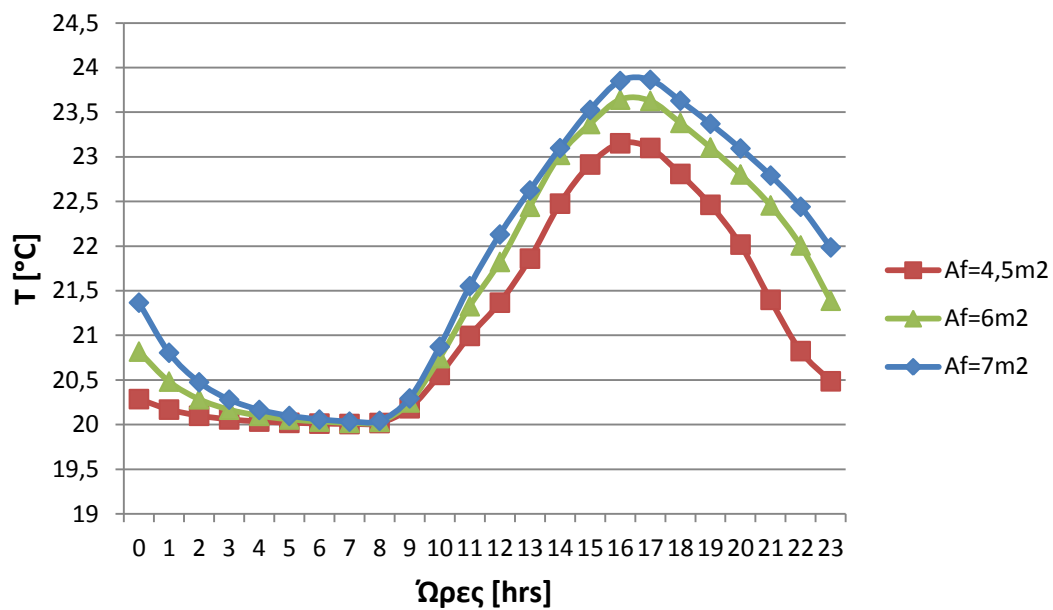
➤ Για 21^η Δεκεμβρίου:



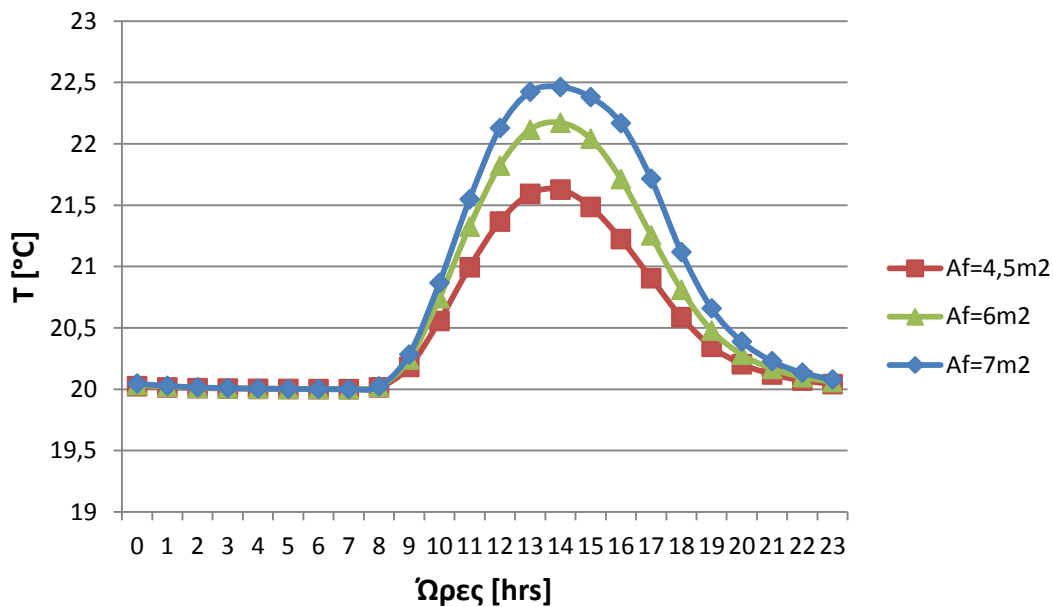
Διάγραμμα 6.3.2.5: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.2.6: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

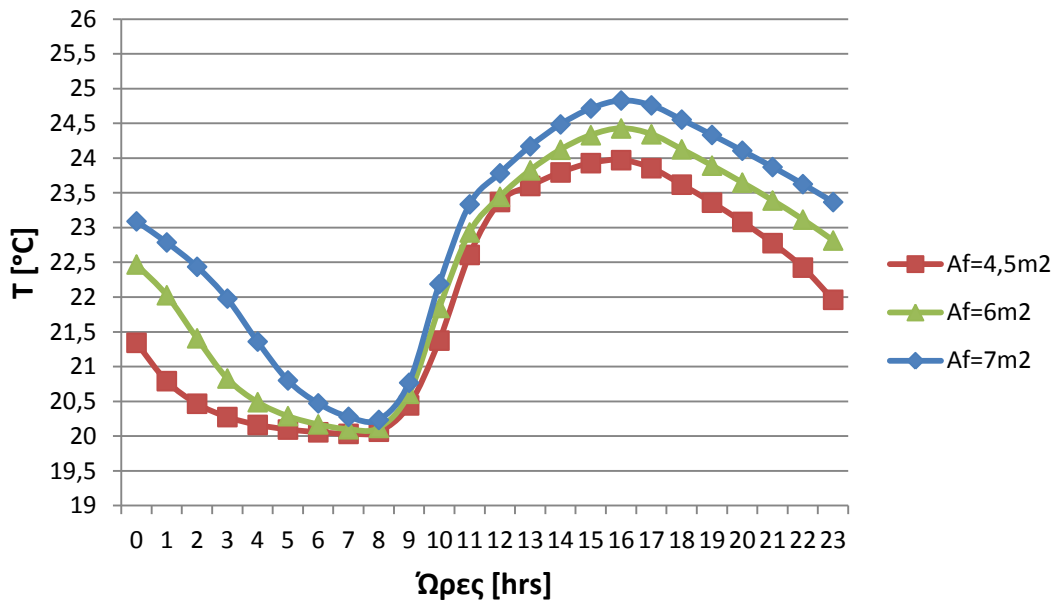


Διάγραμμα 6.3.2.7: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με ναλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες ναλοπίνακα

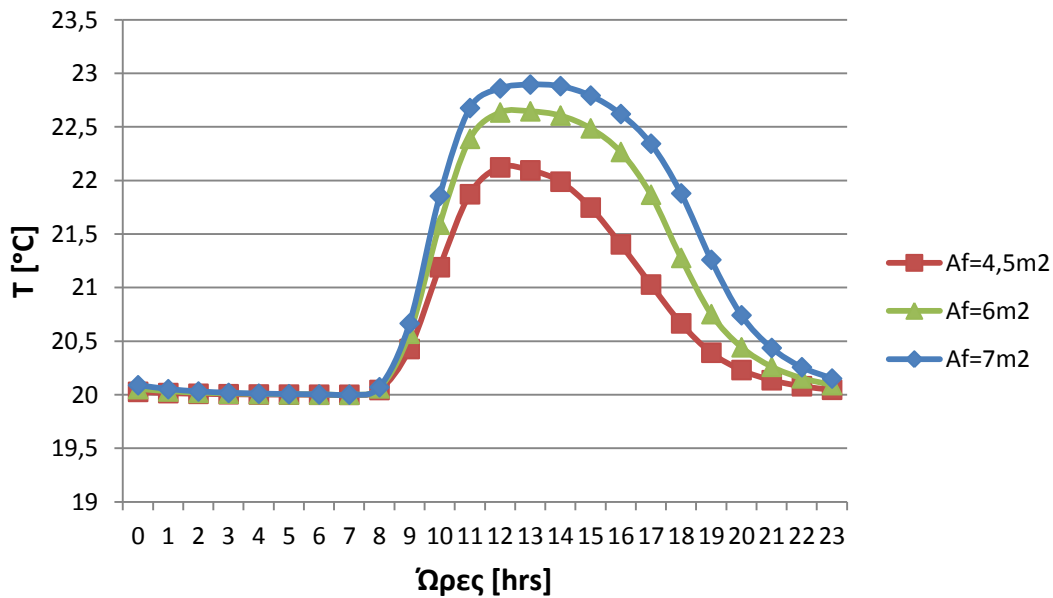


Διάγραμμα 6.3.2.8: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με ναλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες ναλοπίνακα

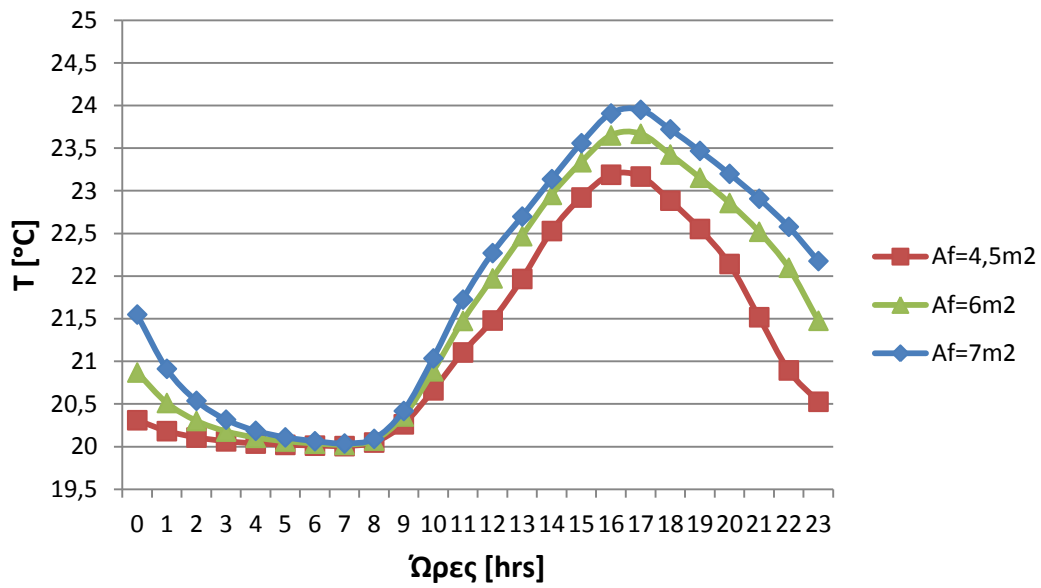
➤ Για 21^η Ιανουαρίου:



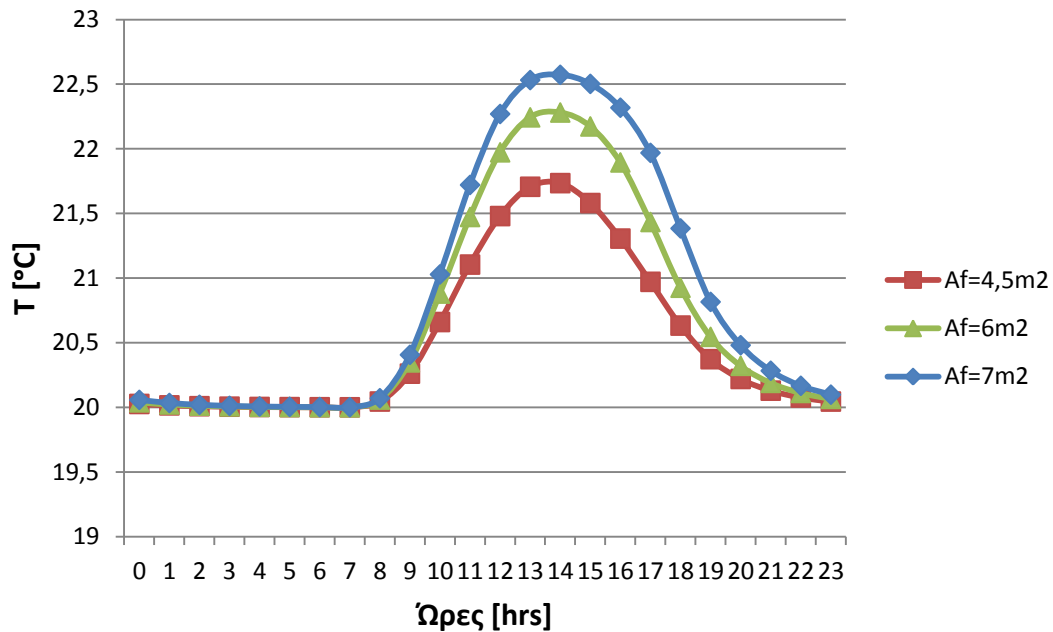
Διάγραμμα 6.3.2.9: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.2.10: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

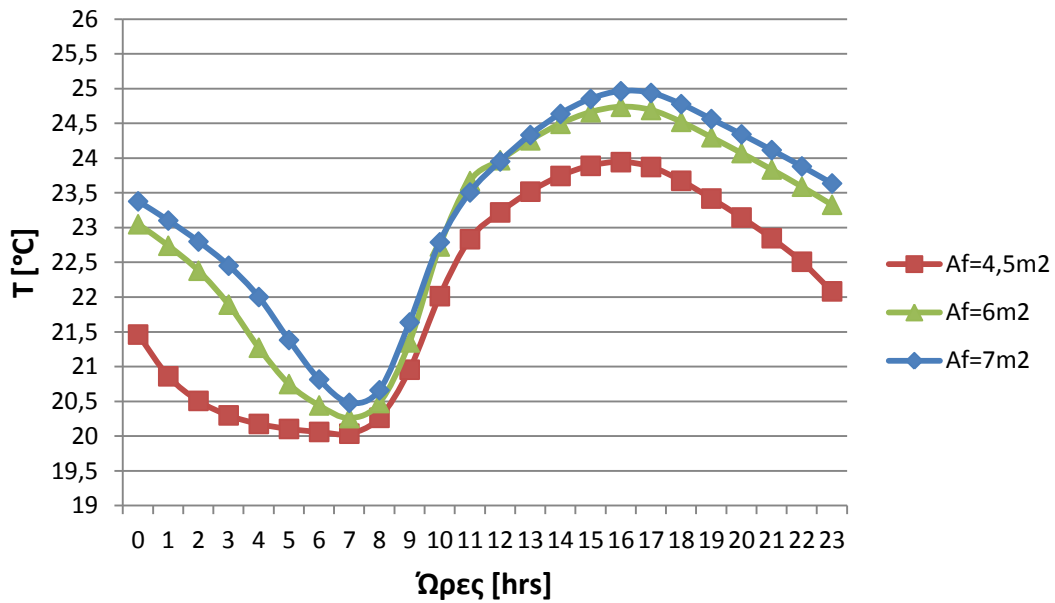


Διάγραμμα 6.3.2.11: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

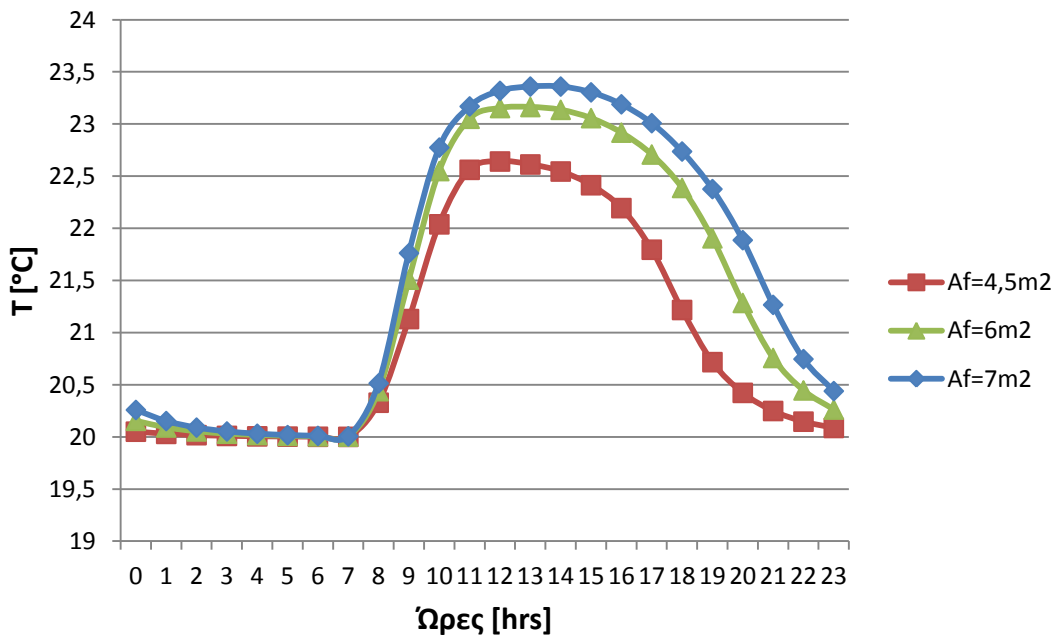


Διάγραμμα 6.3.2.12: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

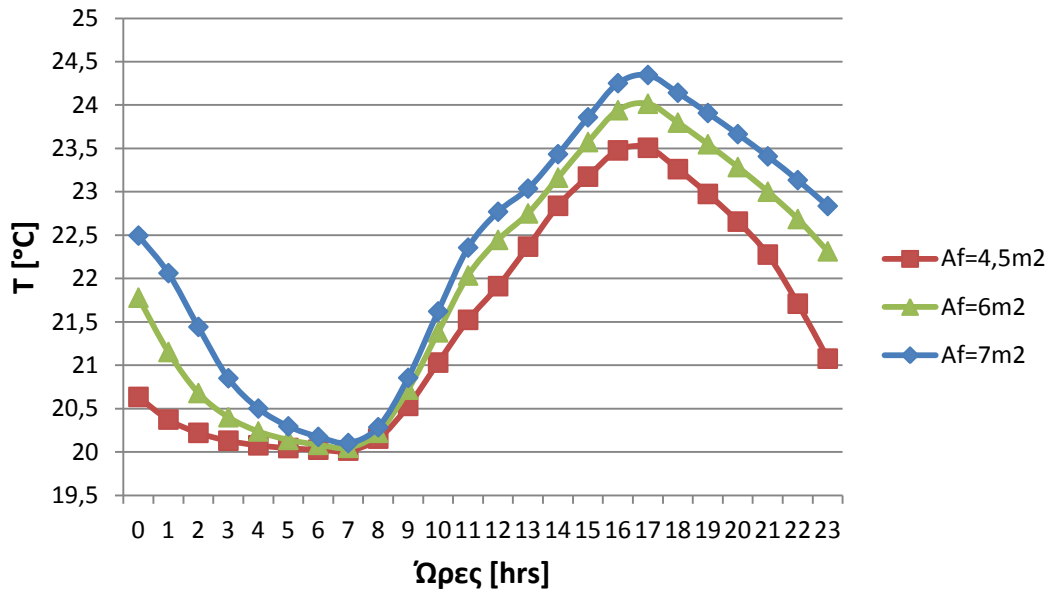
➤ **Για 21^η Φεβρουαρίου:**



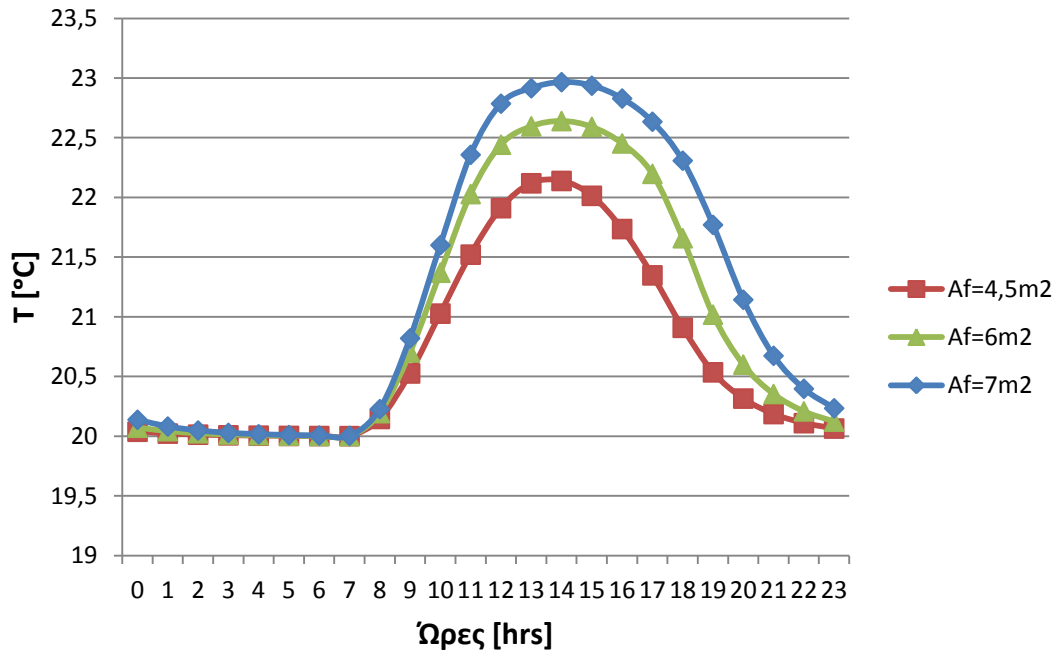
Διάγραμμα 6.3.2.13: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.2.14: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

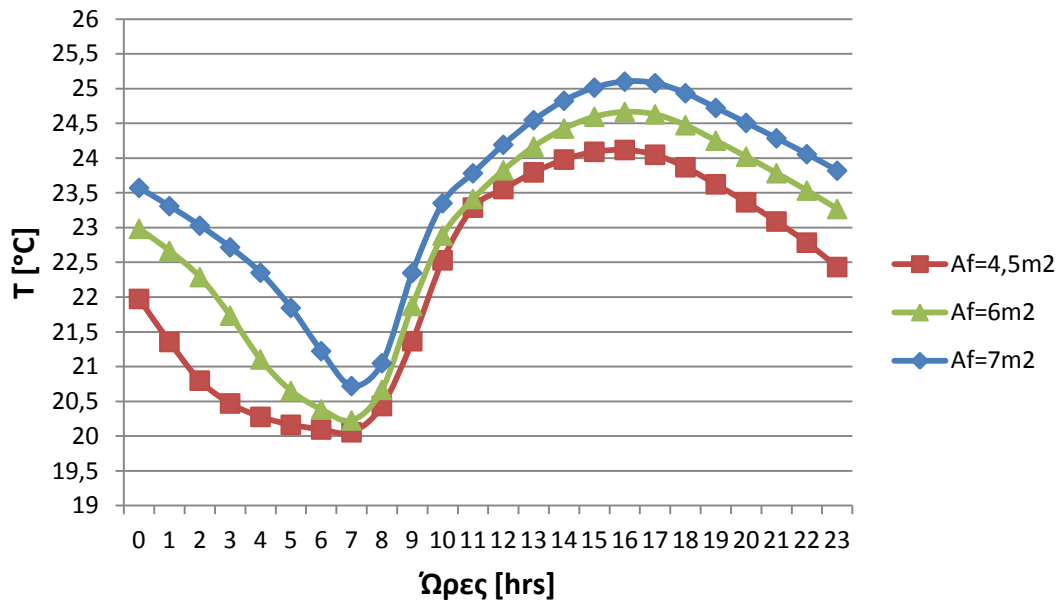


Διάγραμμα 6.3.2.15: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσεως των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

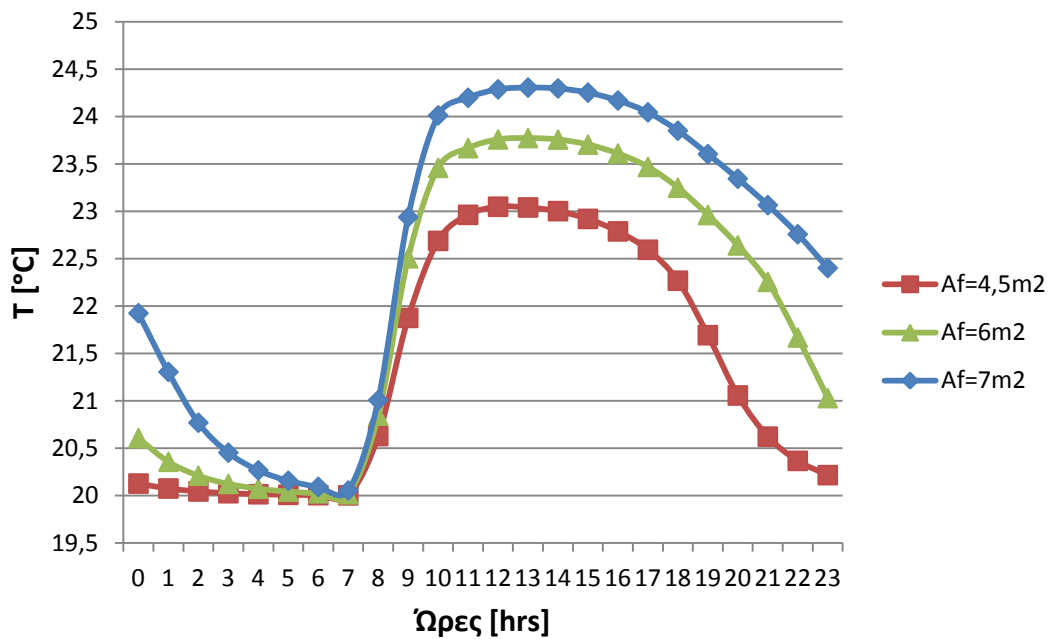


Διάγραμμα 6.3.2.16: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσεως των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

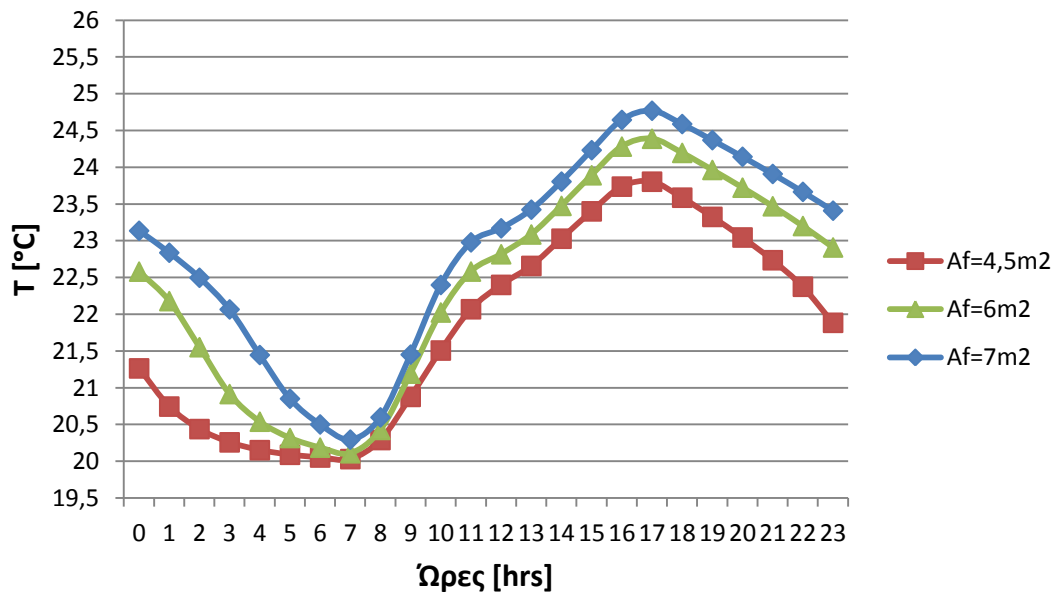
➤ **Για 21^η Μαρτίου:**



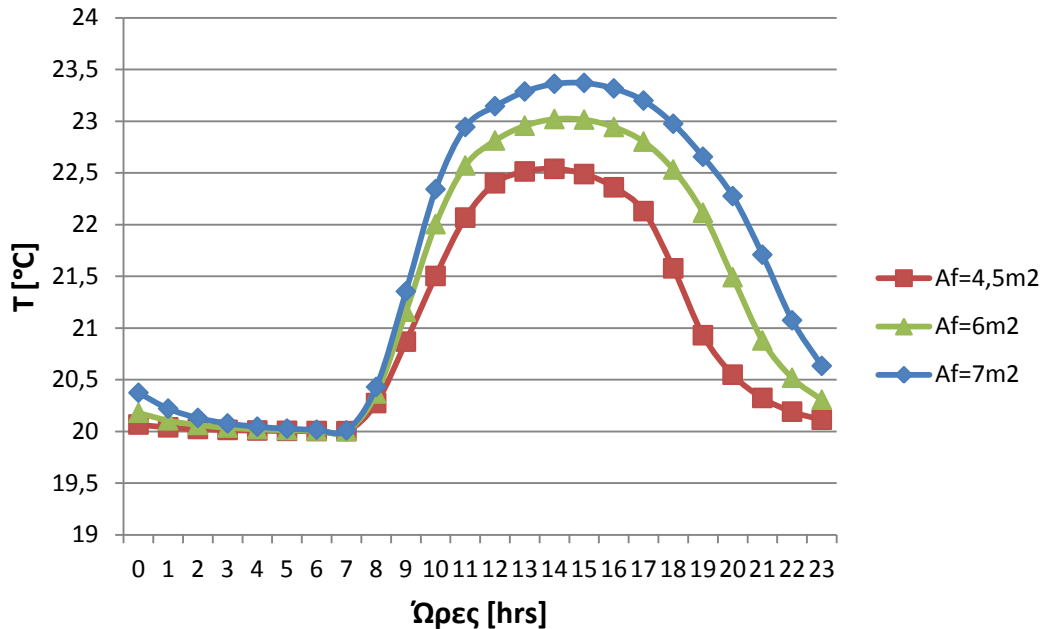
Διάγραμμα 6.3.2.17: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.2.18: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.2.19: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.2.20: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

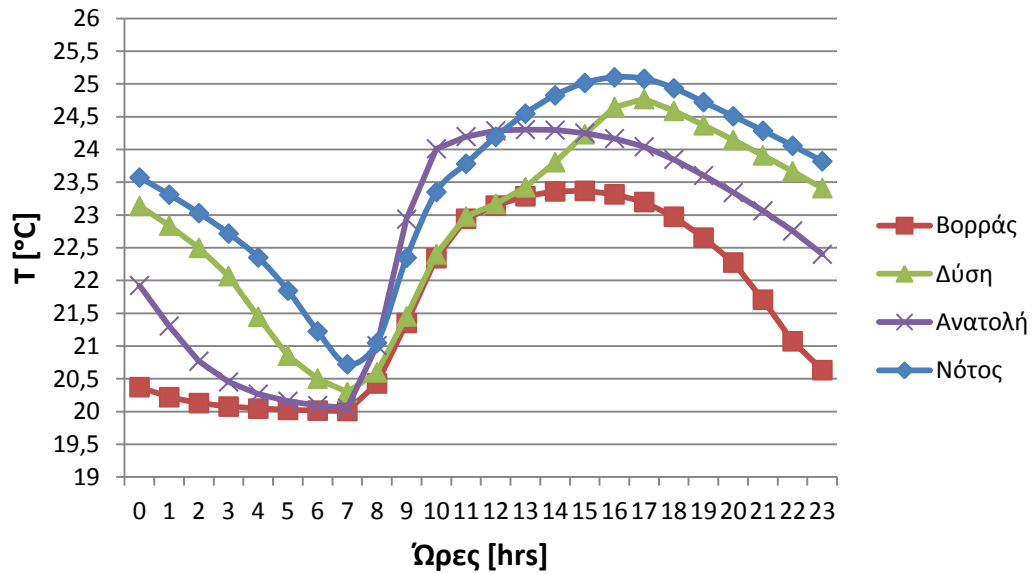
Στα παραπάνω διαγράμματα 6.3.2.1 έως 6.3.2.20 παρατηρούμε και πάλι μονομερή πρόσδοση θερμότητας από το RT27 στο χώρο σε όλες τις περιπτώσεις, αφού και στις τρεις καμπύλες (μία για κάθε επιφάνεια υαλοπίνακα) για κάθε μήνα και κάθε προσανατολισμό, η θερμοκρασία του RT27 είναι μονίμως μεγαλύτερη αυτής που επικρατεί εντός του δωματίου ($T_{\Delta\Omega M} = 20^{\circ}C$). Αυτό, όπως έχουμε αναφέρει και εξηγήσει, είναι λογικό, αφού από τη στιγμή που έχουμε υποθέσει μονίμως σταθερή θερμοκρασία στο δωμάτιο και μηδενική συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του PCM και του στρώματος μόνωσης και ταυτόχρονα το PCM θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του PCM θα διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα από τη θερμοκρασία δωματίου. Επιπλέον, όπως σε όλα τα διαγράμματα θερμοκρασίας PCM που παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία, παρατηρούμε ότι για κάθε επιφάνεια υαλοπίνακα η θερμοκρασία φθίνει από τις 12 το βράδυ μέχρι τις 7:00-8:00 το πρωί (λόγω πρόσδοσης θερμότητας στο χώρο), από τις 7:00-8:00 το πρωί και μέχρι τις ώρες γύρω από το μεσημέρι -αναλόγως του μήνα, του προσανατολισμού και της επιφάνειας παραθύρου- αυξάνεται (αφού το ποσό θερμότητας που λαμβάνει το PCM από την ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερο από αυτό που προσφέρει στο δωμάτιο), ενώ από εκεί και έπειτα αρχίζει ξανά η πτώση της θερμοκρασίας του (διότι πλέον η G_T ελαττώνεται μέχρι σταδιακού μηδενισμού της και συνεπώς το υλικό μας μόνο δίνει θερμική ενέργεια).

Από τα διαγράμματα 6.3.2.1 έως 6.3.2.20, εξάγουμε τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα που ισχύουν και για τους πέντε εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες και για τους τέσσερις διαφορετικούς προσανατολισμούς. Έτσι, για κάθε μήνα και για κάθε προσανατολισμό παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του υαλοπίνακα τόσο υψηλότερες θερμοκρασίες αναπτύσσονται στο στρώμα του RT27, πράγμα αναμενόμενο, καθώς μεγαλύτερη επιφάνεια υαλοπίνακα συνεπάγεται μεγαλύτερο μέρος διερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας που προφανώς θα θερμαίνει πιο πολύ το στρώμα του RT27. Επομένως, όσο πιο μεγάλο είναι το παράθυρο τόσο πιο μεγάλη θα είναι και η μέγιστη θερμοκρασία που «πιάνει» το PCM.

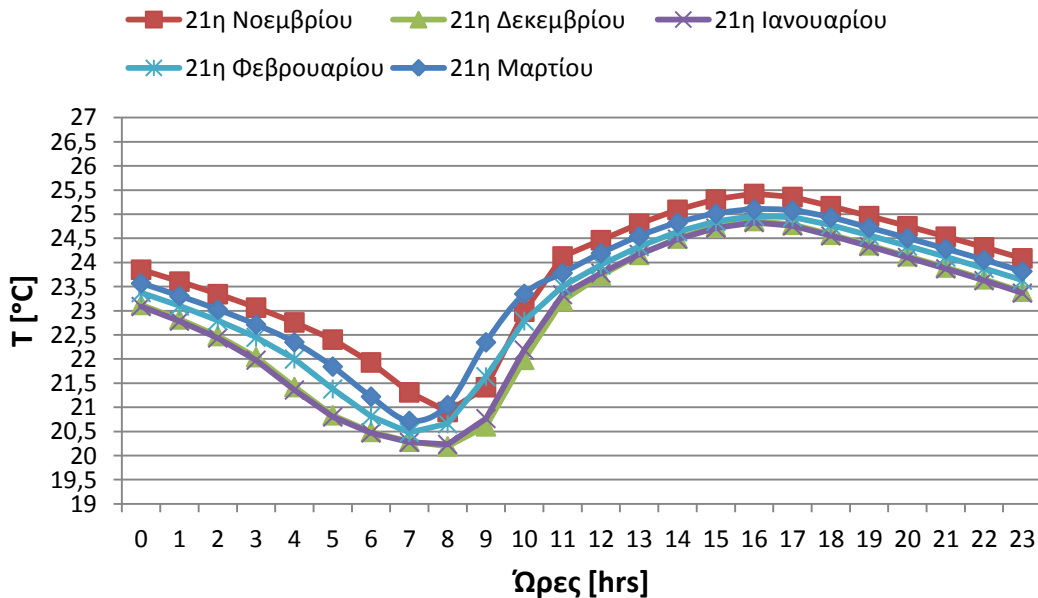
Εξετάζοντας τα διαγράμματα ως προς τον προσανατολισμό του υαλοπίνακα, παρατηρούμε, όπως σε όλα τα μέχρι τώρα διαγράμματα θερμοκρασιών, πως για κάθε μήνα και κάθε επιφάνεια υαλοπίνακα, οι υψηλότερες θερμοκρασίες σε γενικές γραμμές καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας αναπτύσσονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι νότιου προσανατολισμού, ενώ αντίθετα, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι βόρειος. Επίσης, όταν ο τοίχος που φέρει υαλοπίνακα είναι δυτικός, οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες σε γενικές γραμμές από αυτές που αναπτύσσονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι ανατολικός, με εξαίρεση τις πρωινές ώρες μέχρι και λίγο πριν το μεσημέρι όπου για δυτικό τοίχο οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες απ' ότι για ανατολικό (λόγω ύπαρξης μόνο διάχυτης ακτινοβολίας). Αυτά γίνονται πιο εμφανή στο διάγραμμα 6.3.2.21 που έγινε ενδεικτικά για την 21^η Μαρτίου και για επιφάνεια υαλοπίνακα $A_f=7m^2$ και παρατίθεται παρακάτω.

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα ως προς το μήνα, παρατηρούμε πως η καμπύλη του T πέφτει κατακόρυφα, δηλαδή αποκτά μικρότερη μέγιστη αλλά και μικρότερη ελάχιστη τιμή, καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται ξανά οι τιμές του και κατ' επέκταση η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή. Αντίστοιχα, κατά τον ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό του τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, παρατηρούμε ότι η καμπύλη του $T_{\text{τελ}}$ πέφτει κατακόρυφα καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Δεκέμβριο και αρχίζει να ανεβαίνει

σταδιακά οδεύοντας από τον Ιανουάριο μέχρι και το Μάρτιο. Αυτά γίνονται πιο εμφανή στο διάγραμμα 6.1.2.22 που έγινε ενδεικτικά για την 21^η Μαρτίου και για πάχος $A_f=7m^2$ και παρατίθεται παρακάτω.



Διάγραμμα 6.3.2.21: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου, για $A_f=7m^2$ και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

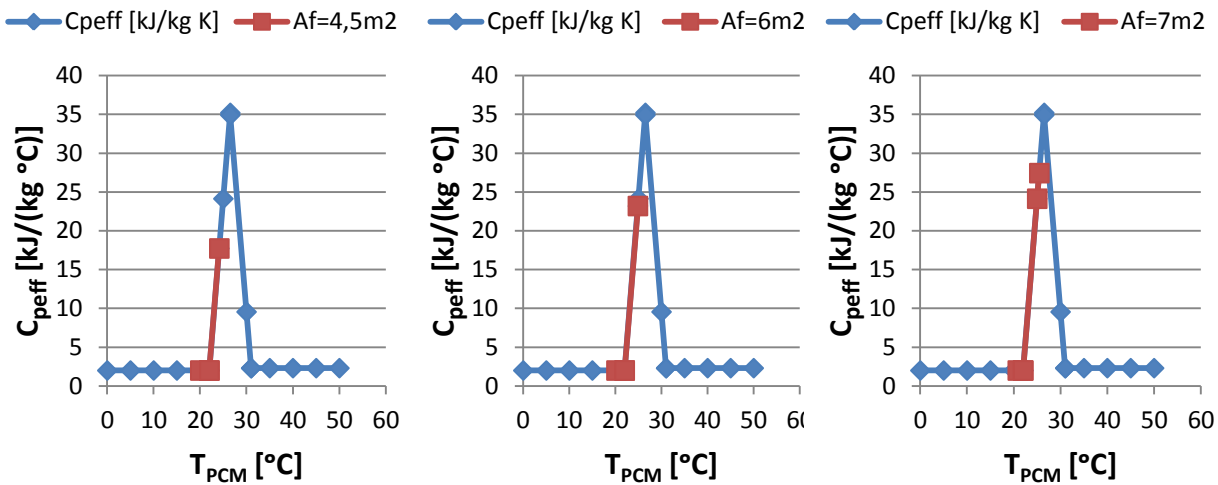


Διάγραμμα 6.3.2.22: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών για νότιο προσανατολισμό υαλοπίνακα, για $A_f=7m^2$ και για κάθε χειμερινό μήνα

6.3.3 Ποσοστό αξιοποίησης του RT27

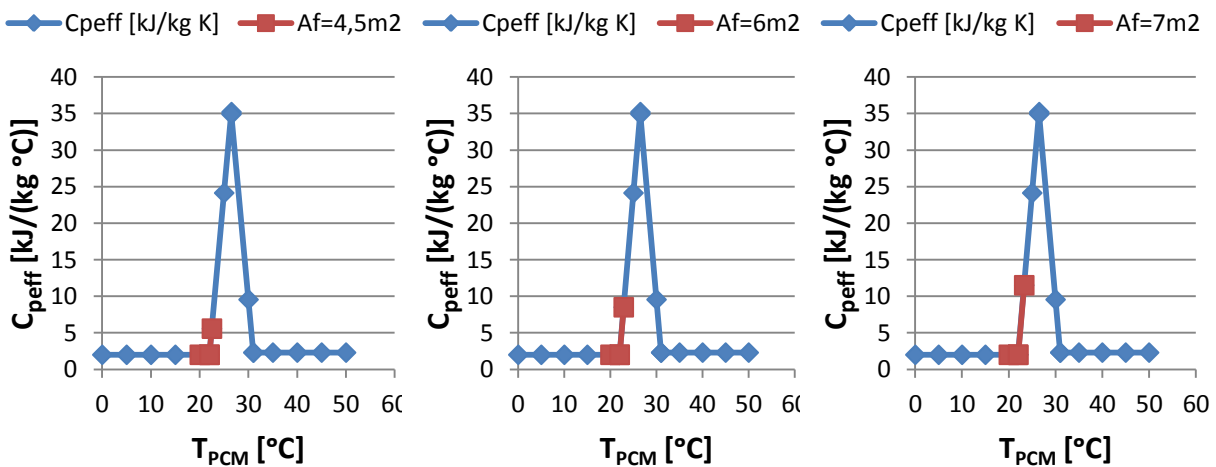
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα διαγράμματα με την περιοχή λειτουργίας του RT27 για την 21^η ημέρα κάθε χειμερινού μήνα, κάθε προσανατολισμού και για κάθε επιφάνεια υαλοπίνακα. Για εποπτικούς λόγους, τα διαγράμματα έχουν οργανωθεί έτσι ώστε να είναι εφικτή η άμεση σύγκριση της περιοχής λειτουργίας με βάση την επιφάνεια του υαλοπίνακα. Όπως και στις δύο προηγούμενες παραμετρικές μελέτες, έτσι και εδώ παραθέτουμε και το διάγραμμα που αντιστοιχεί στην αρχική τιμή της εξεταζόμενης παραμέτρου (επιφάνεια υαλοπίνακα: $A_f = 4,5m^2$), προκειμένου να είναι πιο σφαιρική η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

➤ Για 21^η Νοεμβρίου και υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:



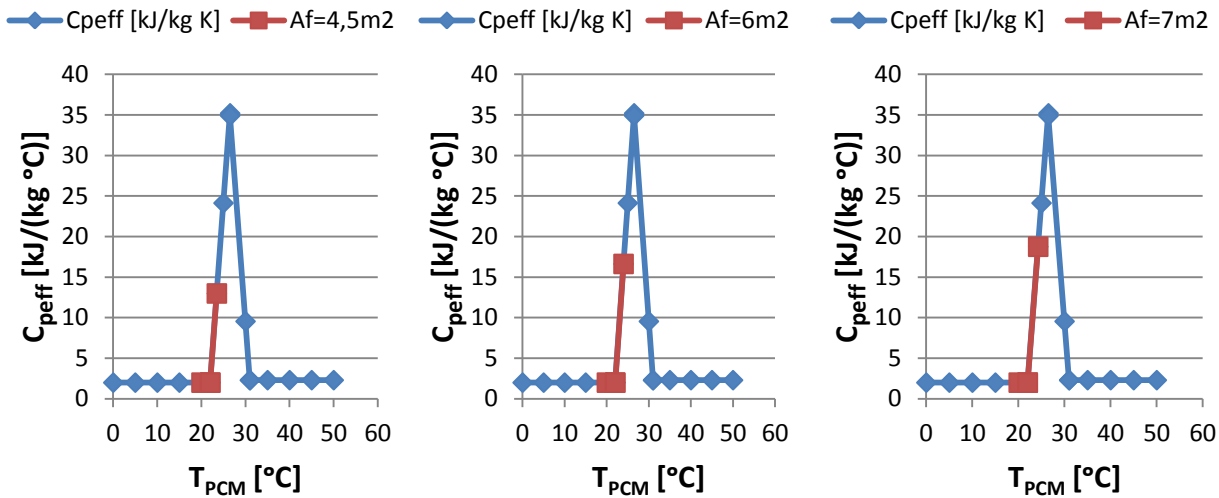
Διάγραμμα 6.3.3.1: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Νοεμβρίου και υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:



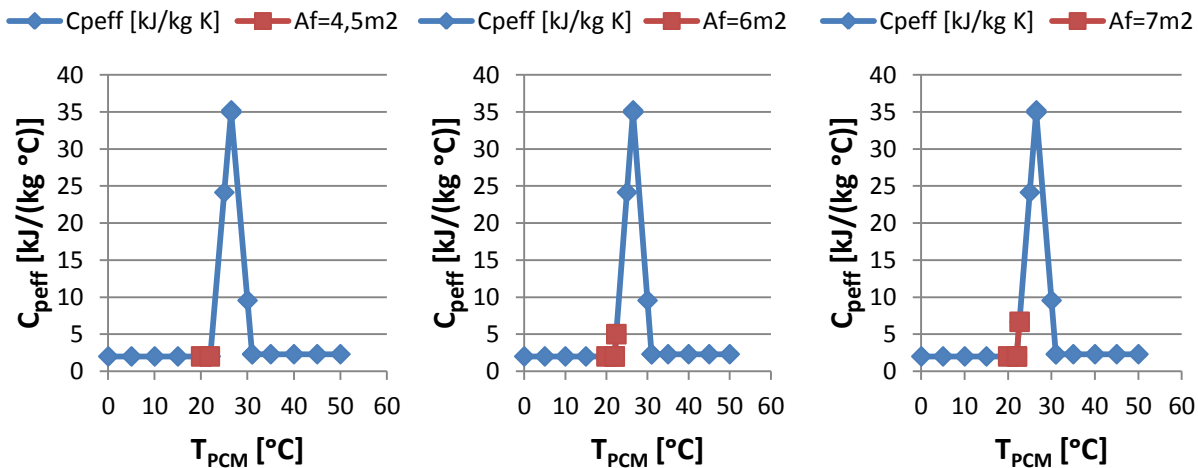
Διάγραμμα 6.3.3.2: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Νοεμβρίου και ναλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:



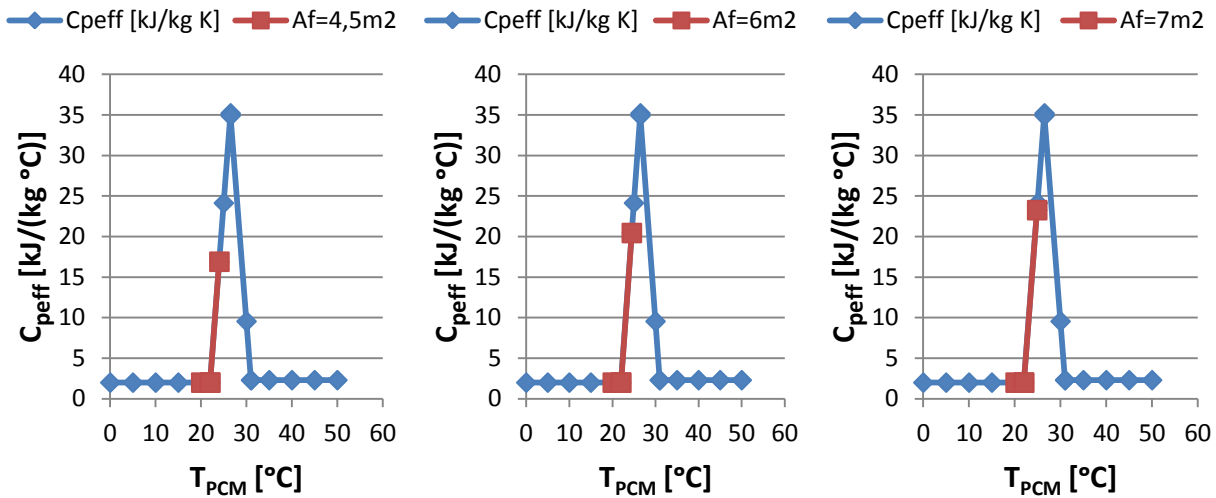
Διάγραμμα 6.3.3.3: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με ναλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Νοεμβρίου και ναλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:



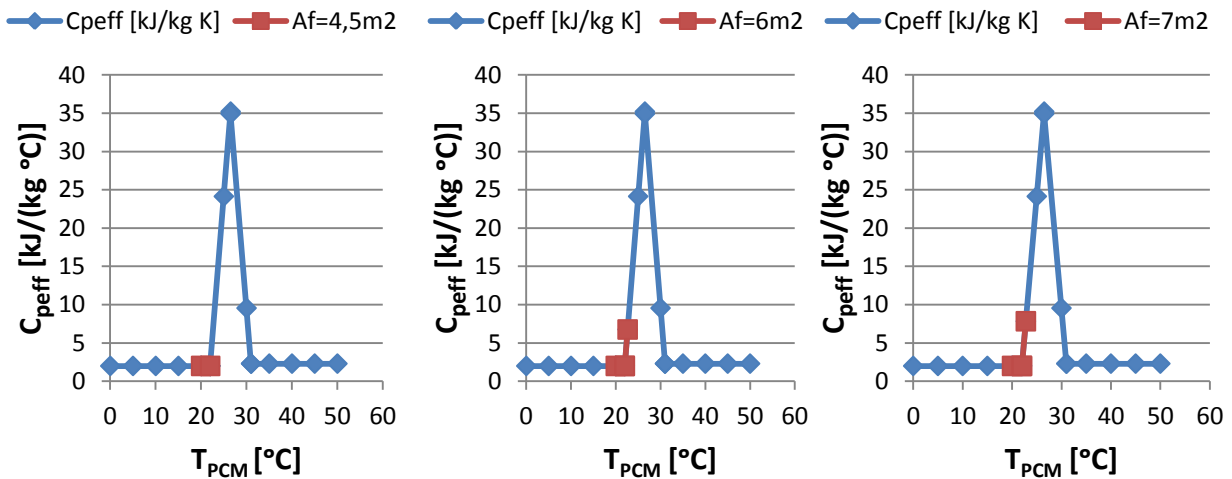
Διάγραμμα 6.3.3.4: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Νοεμβρίου, με ναλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου και υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:



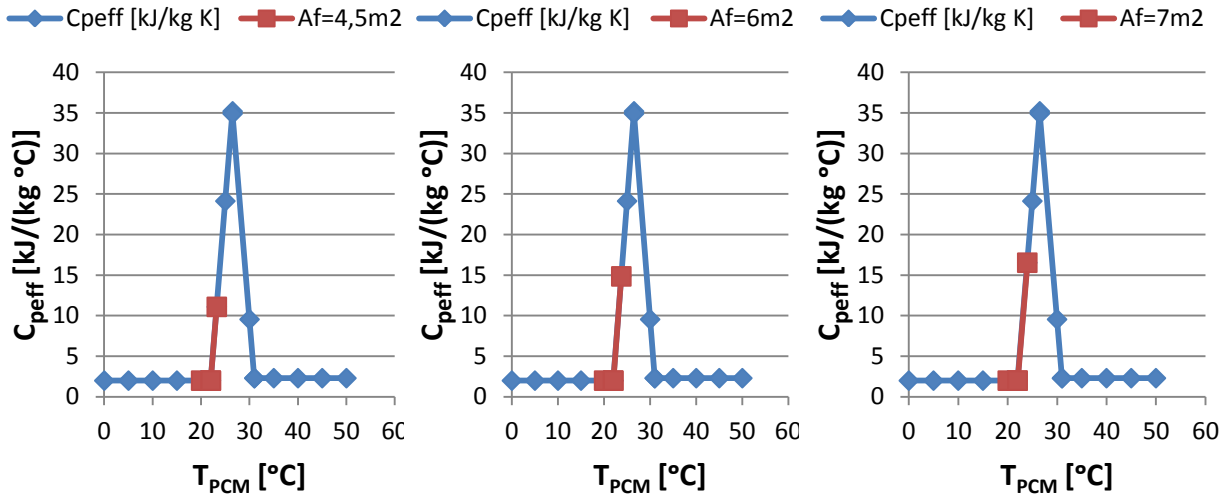
Διάγραμμα 6.3.3.5: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου και υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:



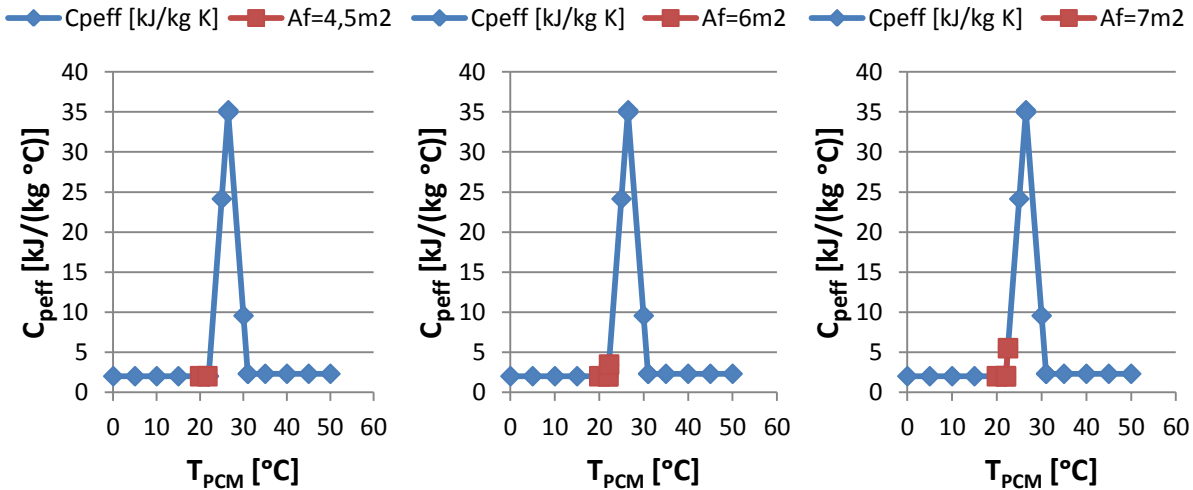
Διάγραμμα 6.3.3.6: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου και υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:



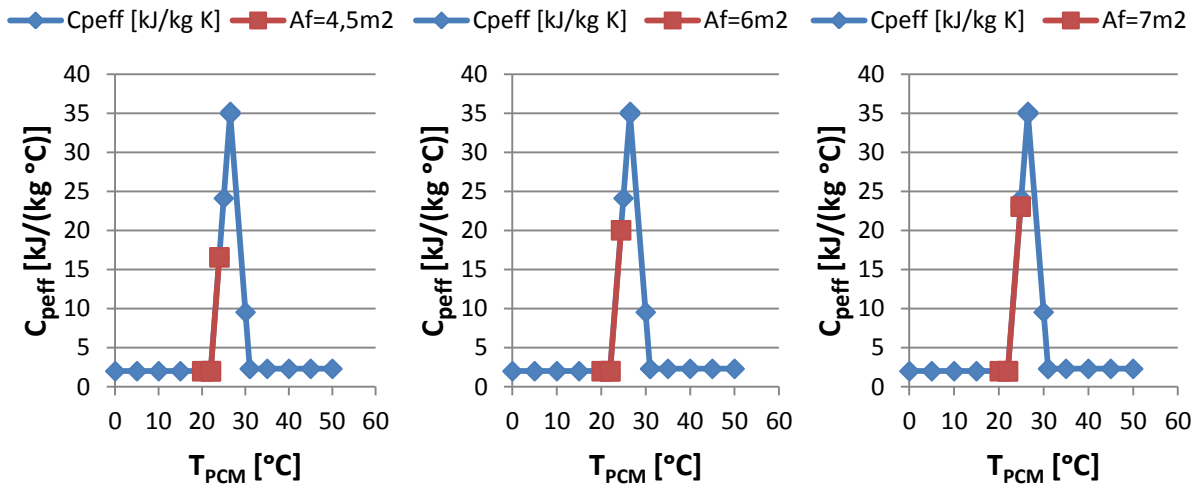
Διάγραμμα 6.3.3.7: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Δεκεμβρίου και υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:



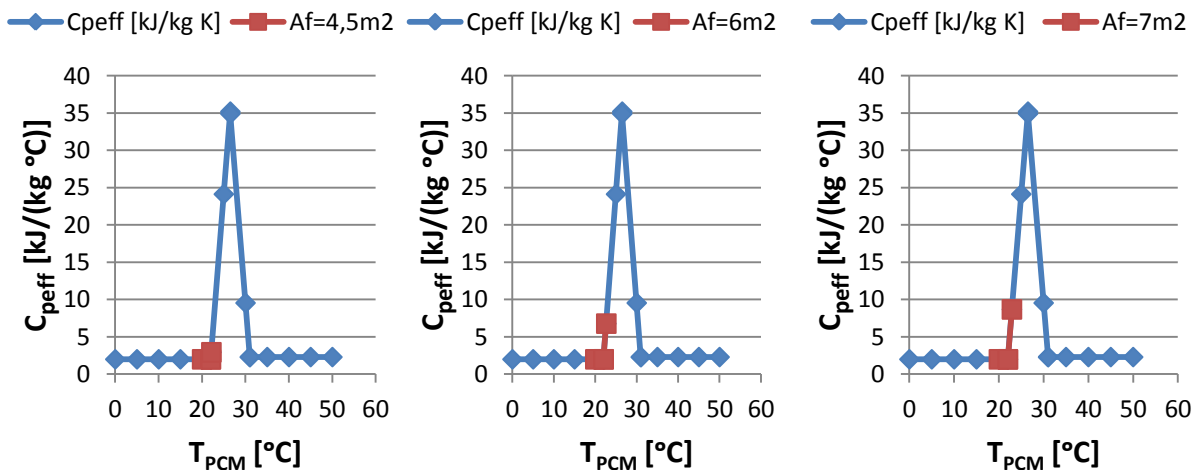
Διάγραμμα 6.3.3.8: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Ιανουαρίου και υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:



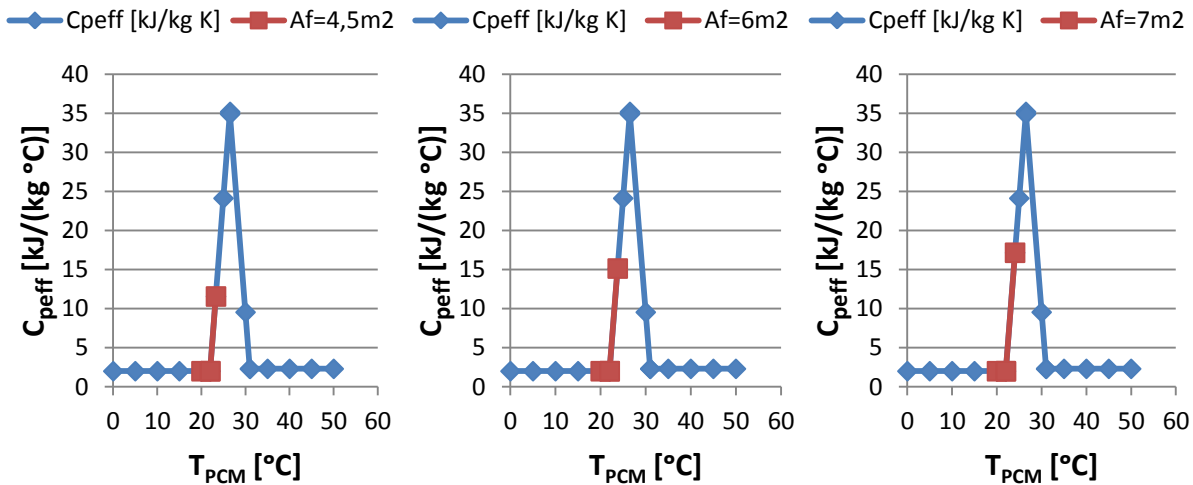
Διάγραμμα 6.3.3.9: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Ιανουαρίου και υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:



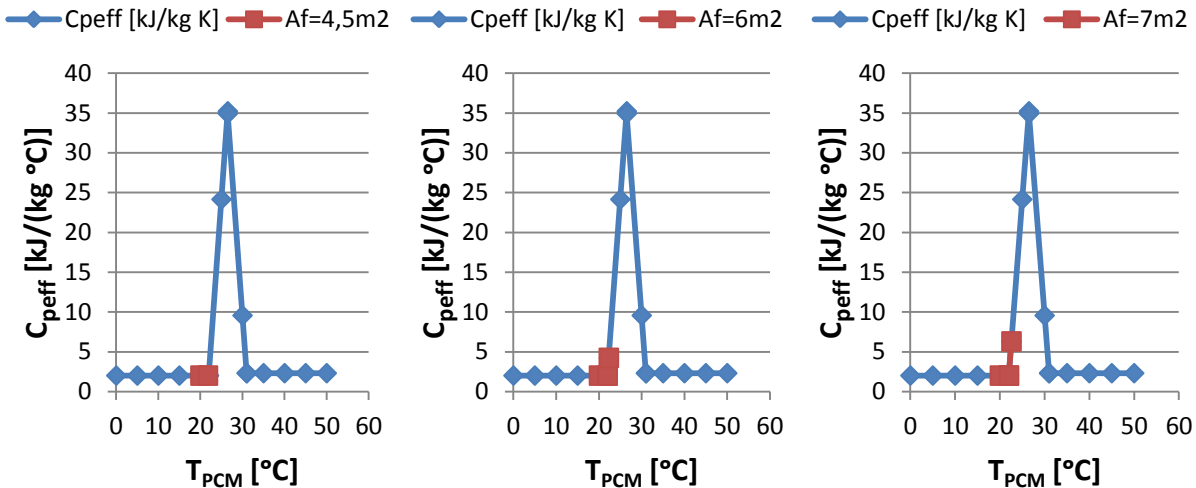
Διάγραμμα 6.3.3.10: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Ιανουαρίου και υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:



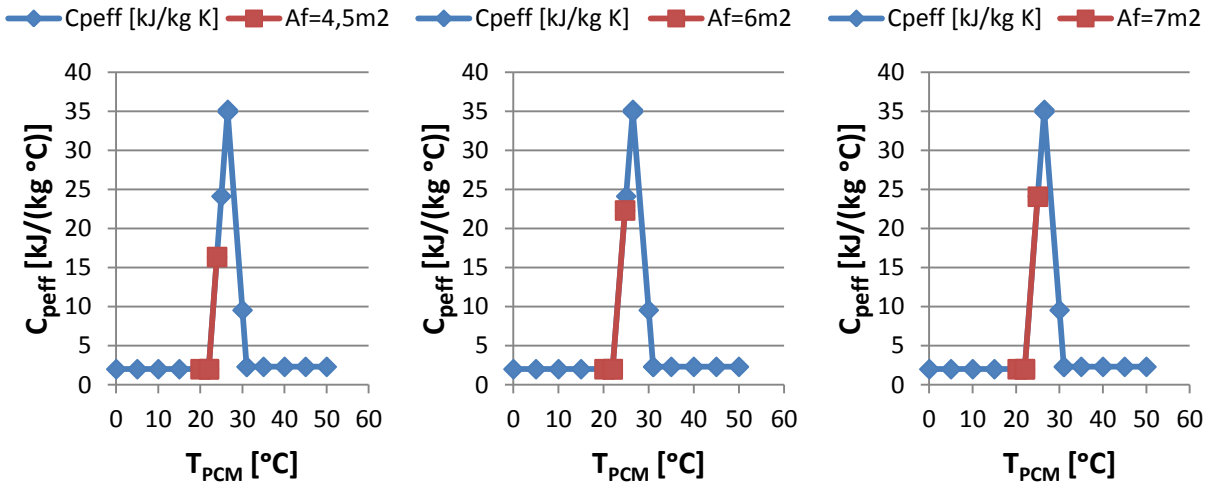
Διάγραμμα 6.3.3.11: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Ιανουαρίου και υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:



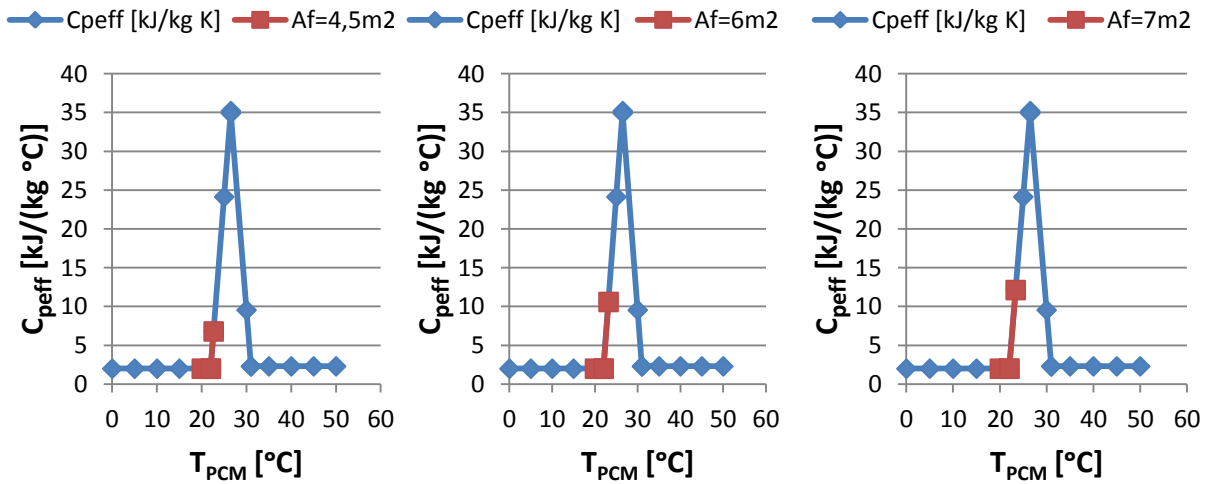
Διάγραμμα 6.3.3.12: Ενεργός θερμοχωρητικότητα C_{peff} συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου και βαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:



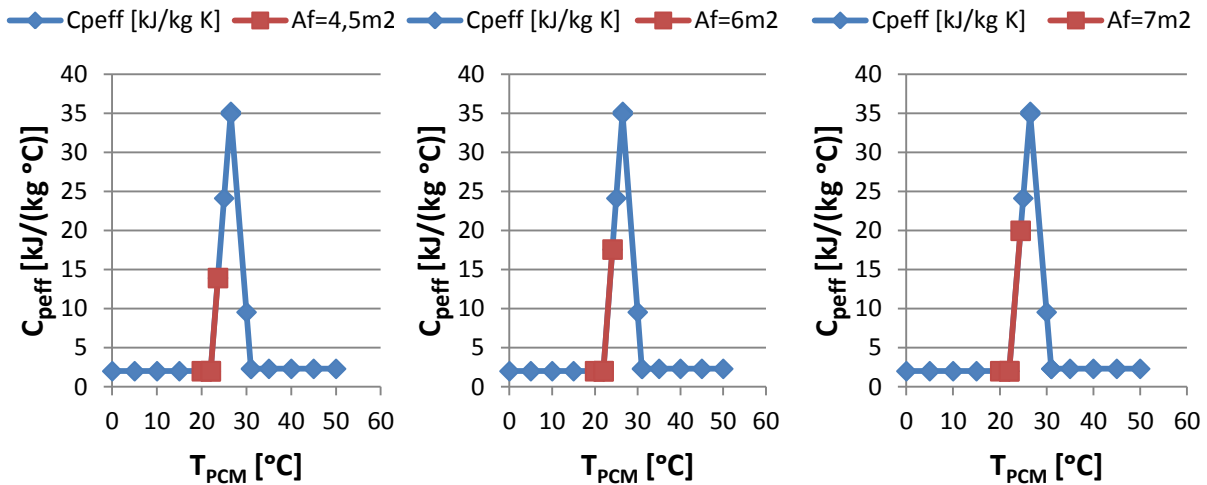
Διάγραμμα 6.3.3.13: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με βαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου και βαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:



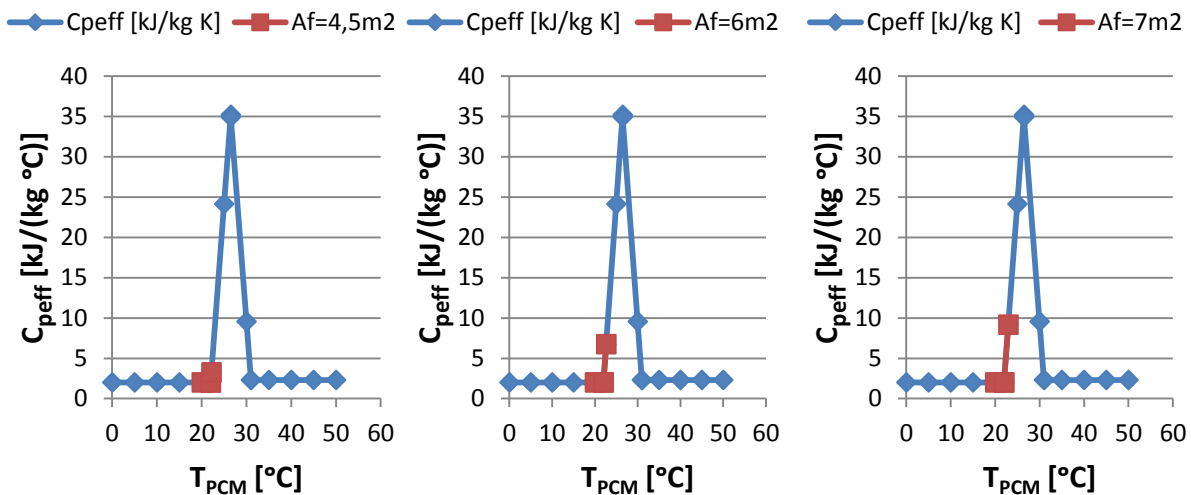
Διάγραμμα 6.3.3.14: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με βαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου και υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:



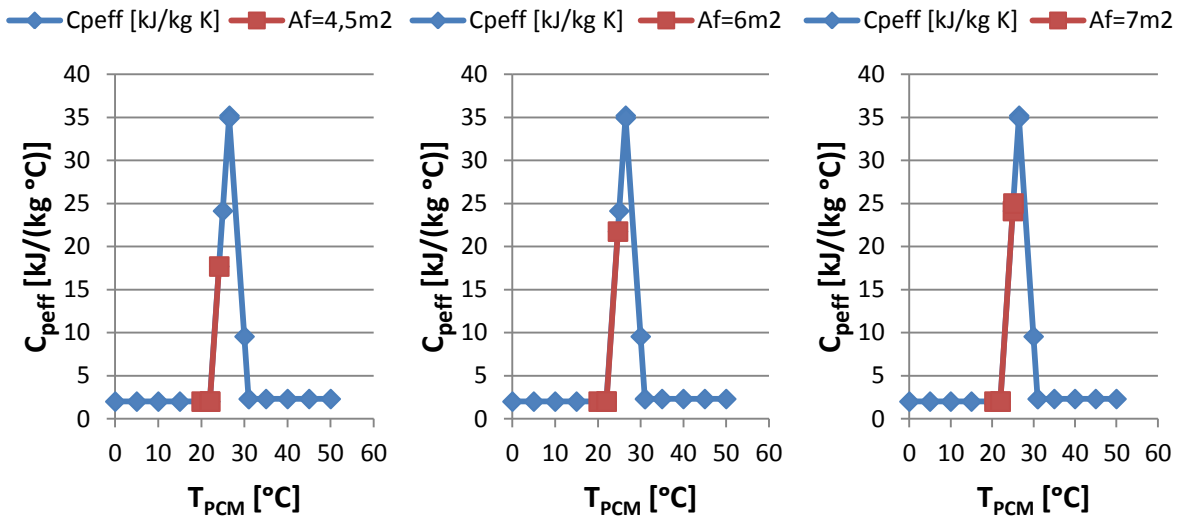
Διάγραμμα 6.3.3.15: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Φεβρουαρίου και υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:



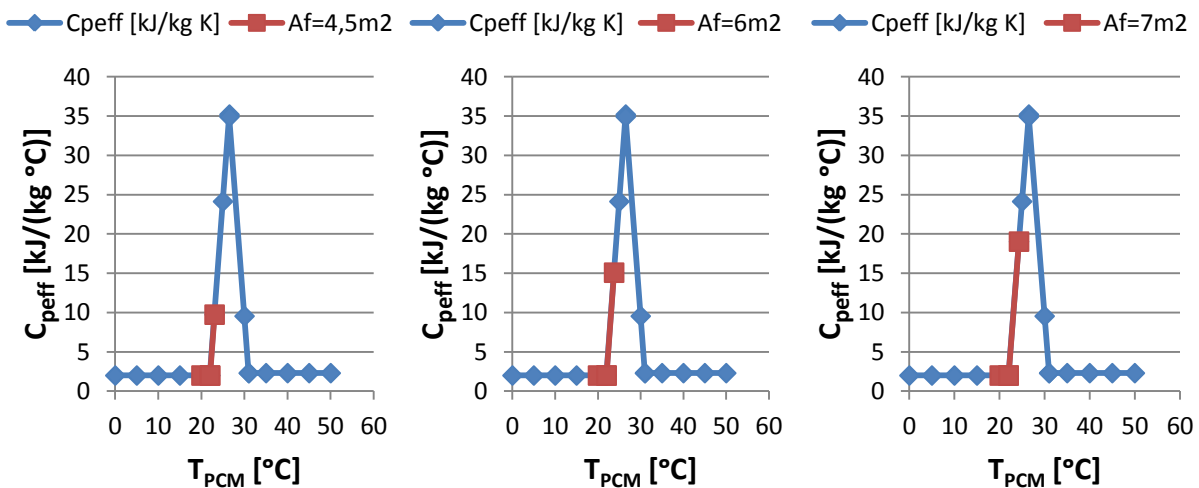
Διάγραμμα 6.3.3.16: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Μαρτίου και υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο:



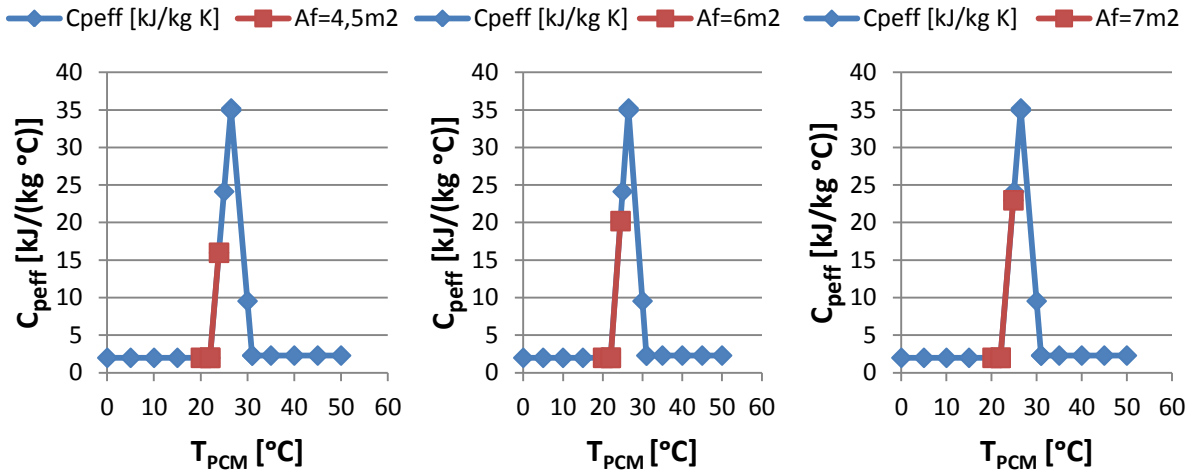
Διάγραμμα 6.3.3.17: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο νότιο τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Μαρτίου και υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο:



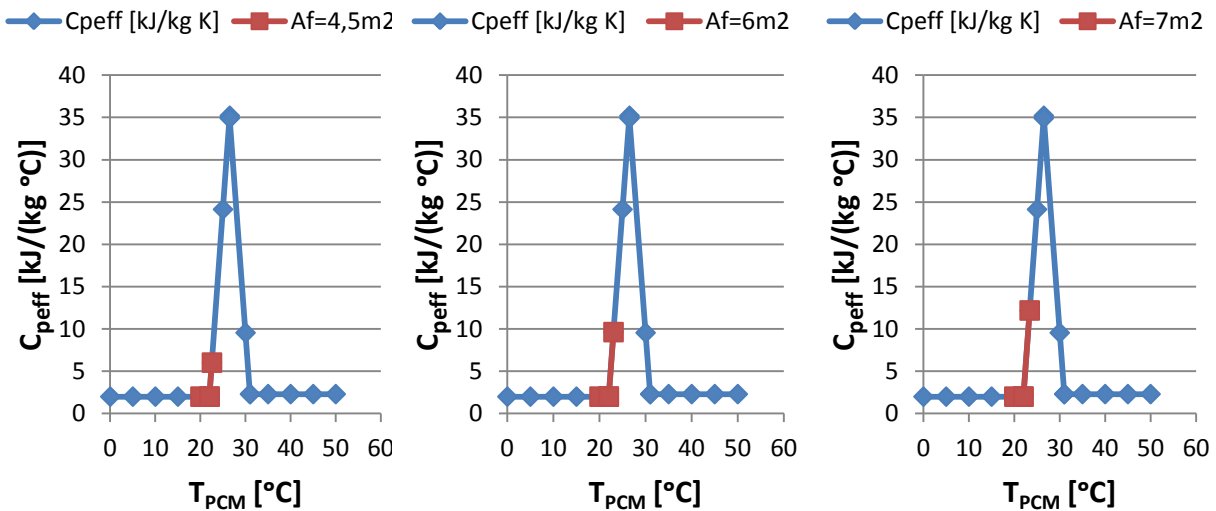
Διάγραμμα 6.3.3.18: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στον ανατολικό τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Μαρτίου και υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο:



Διάγραμμα 6.3.3.19: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο δυτικό τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

➤ Για 21^η Μαρτίου και υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο:



Διάγραμμα 6.3.3.20: Ενεργός θερμοχωρητικότητα $C_{p,eff}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα στο βόρειο τοίχο, για $A_f = 4,5m^2$, $A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$ (από αριστερά προς τα δεξιά)

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 6.3.3.1 έως 6.3.3.20 ως προς την επιφάνεια υαλοπίνακα, προκύπτει ότι από τις τρεις εξεταζόμενες επιφάνειες αυτή για την οποία καλύπτεται μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης και αναπτύσσονται πιο υψηλές θερμοκρασίες, είναι η μεγαλύτερη, $A_f=7m^2$, όπως αναμέναμε με βάση τα αποτελέσματα της ενότητας 6.3.2. Αυτό σημαίνει ότι γι' αυτή την τιμή της επιφάνειας αξιοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό η ιδιότητα του PCM (RT27) να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση και επομένως τότε έχει καλύτερη απόδοση. Επίσης, παρατηρούμε ότι η κατά το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση του RT27 για επιφάνεια υαλοπίνακα $A_f=7m^2$ (αλλά και για τις άλλες δύο τιμές $A_f=6m^2$ και $A_f=4,5m^2$) επιτυγχάνεται όταν ο υαλοπίνακας βρίσκεται σε δυτικό και κυρίως σε νότιο προσανατολισμό, ενώ για ανατολικό και ειδικότερα για βόρειο τοίχο με υαλοπίνακα, η ιδιότητά του να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση, αξιοποιείται εμφανώς λιγότερο.

6.3.4 Ενεργειακή συνεισφορά του RT27 στο χώρο

Η ενεργειακή συνεισφορά του PCM υπολογίζεται κατά τον ίδιο τρόπο με αυτόν που παρουσιάστηκε στις ενότητες 5.2.5 και 5.3.6. Ανάλογα λοιπόν, με την εκάστοτε επιφάνεια υαλοπίνακα, A_f , θα προσδιορίσουμε το ποσό θερμότητας που προσφέρει το RT27 στο χώρο, για κάθε ώρα του 24ώρου της 21^{ης} ημέρας καθενός από τους πέντε χειμερινούς μήνες (Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος) και για κάθε προσανατολισμό του τοίχου που φέρει υαλοπίνακα. Όπως μέχρι τώρα, έτσι και εδώ, για την εξυπηρέτηση και διευκόλυνση της μελέτης μας, θεωρούμε ότι η ανάγκη για θέρμανση του χώρου κατά τους εξεταζόμενους χειμερινούς μήνες και με βάση τις συνθήκες που επικρατούν και κατ' επέκταση τις απώλειες του υπό μελέτη κτιρίου, είναι $P=20W/m^2$, προκειμένου να επιτυγχάνεται σταθερή θερμοκρασία $T_{\Delta\Omega M}=20^\circ C$ εντός του χώρου. Η τιμή της απαιτούμενης ισχύος $P=20W/m^2$ έχει ληφθεί από μελέτες.

Επομένως, για το δωμάτιο που μελετάμε, διαστάσεων $10m \times 10m = 100m^2$, θα απαιτούνται:

$$P_{ολ} = 20 \frac{W}{m^2} \cdot 100m^2 = 2000W = 2kW ,$$

εκ των οποίων ένα μέρος θα παρέχεται από θερμομαντικά σώματα και άλλες πηγές θερμότητας, ενώ το υπόλοιπο θα προσφέρεται από το RT27. Έτσι, για κάθε ώρα του 24ώρου θα απαιτούνται:

$$Q_{απαιτ} = 2kW \cdot 3600sec = 7200kJ$$

από τα οποία, το ποσό που θα προσφέρει το PCM ισούται με:

$$Q = U \cdot A_W \cdot (T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}) \cdot 3600 [kJ]$$

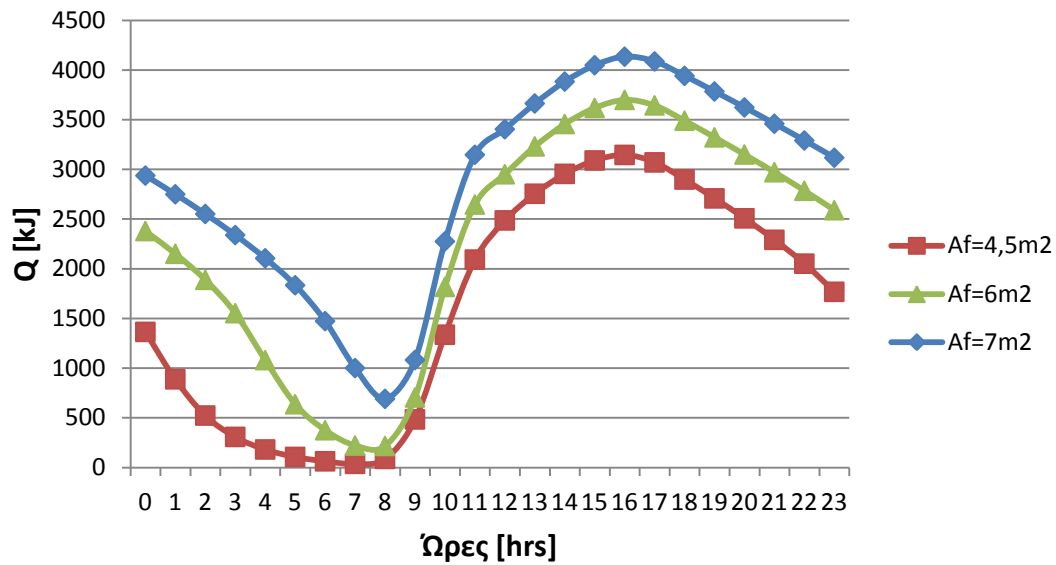
$$Q = 7,06 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot (20 - T_{PCM}) \cdot 3600$$

$$\Rightarrow Q = 762,48 \cdot (20 - T_{PCM}) \quad (6.3.4.1)$$

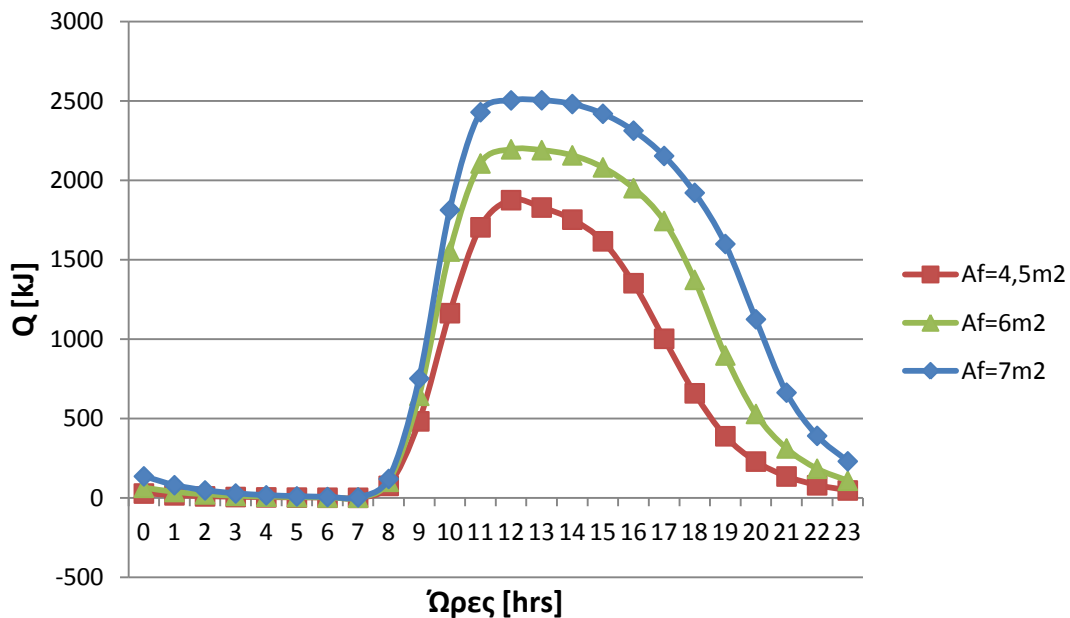
όπου στη σχέση (6.3.4.1) $T_{PCM} = (T_{αρχ} + T_{τελ})/2$, $T_{αρχ}$, $T_{τελ}$ έτσι όπως προέκυψαν από τις σχέσεις (6.3.2.3) και (6.3.2.4) της ενότητας 6.3.2 αναλόγως της επιφάνειας υαλοπίνακα, για κάθε ώρα του 24ώρου.

Ακολουθούν τα διαγράμματα που απεικονίζουν το προσφερόμενο ποσό θερμότητας από το RT27, συναρτήσει των ωρών της εκάστοτε ημέρας για κάθε μήνα και κάθε προσανατολισμό. Χάριν εποπτείας και πιο άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων, κάθε διάγραμμα περιλαμβάνει τρεις καμπύλες ενεργειακής συνεισφοράς του υλικού αλλαγής φάσης κατά τη διάρκεια του 24ώρου, εκ των οποίων οι δύο αντιστοιχούν στις δύο νέες τιμές επιφάνειας παραθύρου ($A_f = 6m^2$ και $A_f = 7m^2$) και η άλλη στην αρχική, $A_f = 4,5m^2$, που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 5.

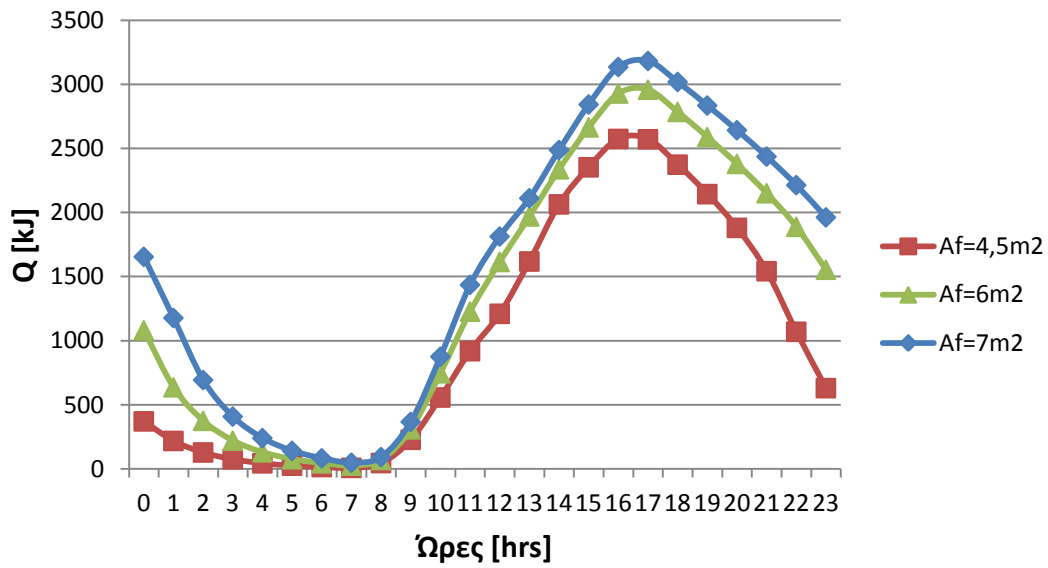
➤ Για 21^η Νοεμβρίου:



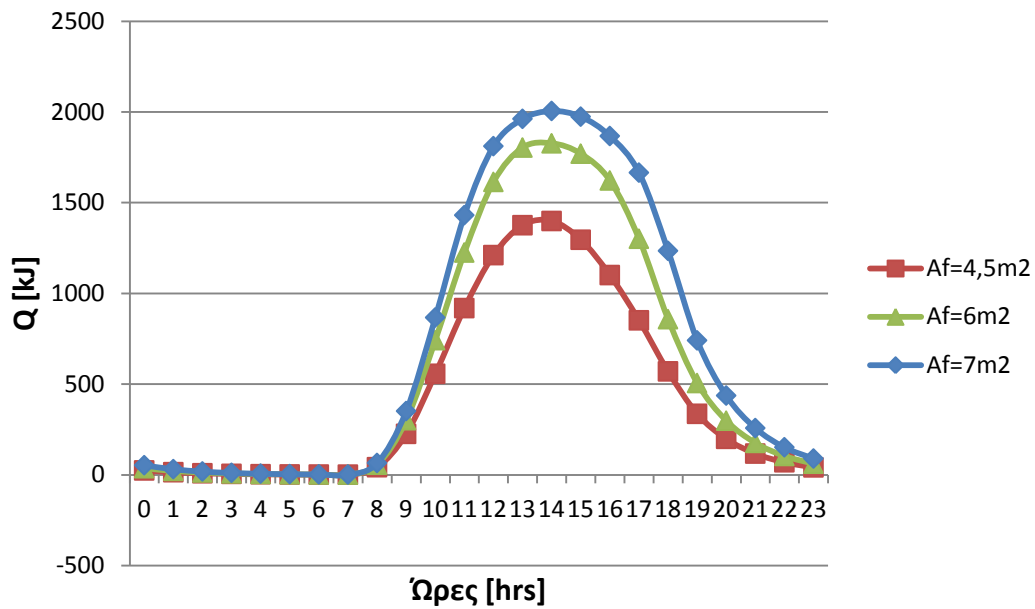
Διάγραμμα 6.3.4.1: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.4.2: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

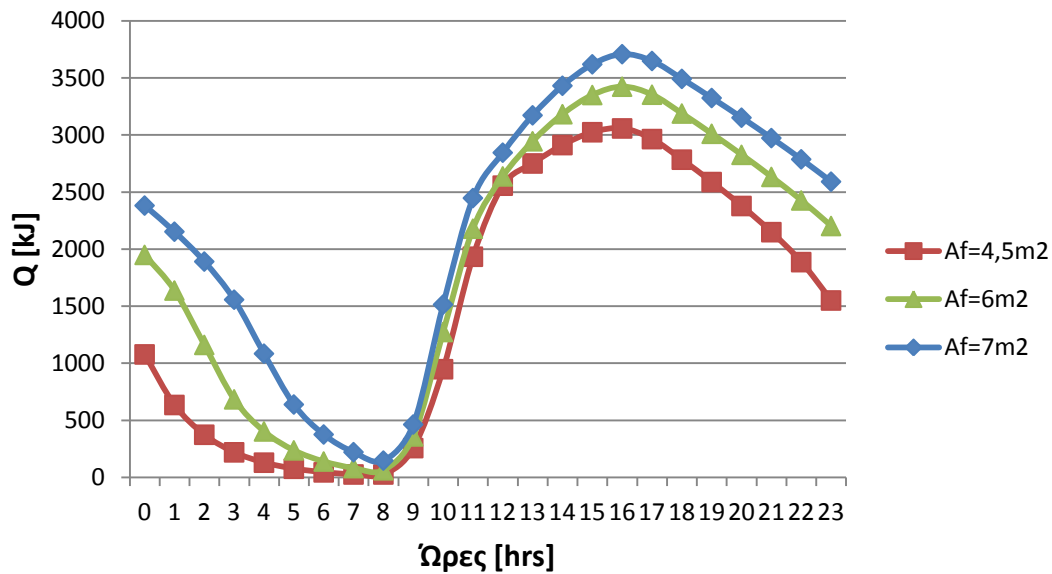


Διάγραμμα 6.3.4.3: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

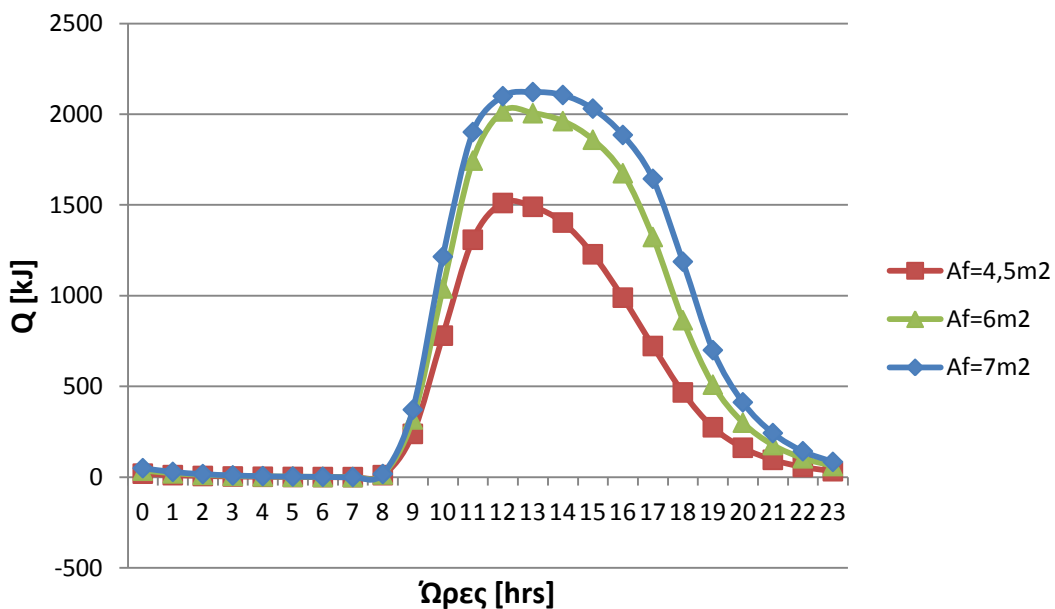


Διάγραμμα 6.3.4.4: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Νοεμβρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

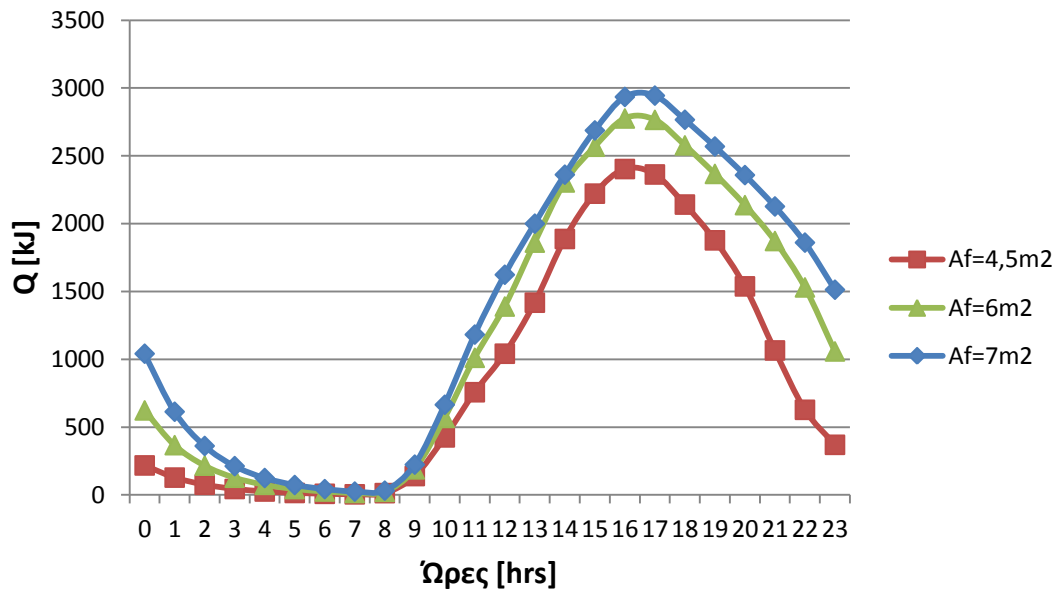
➤ Για 21^η Δεκεμβρίου:



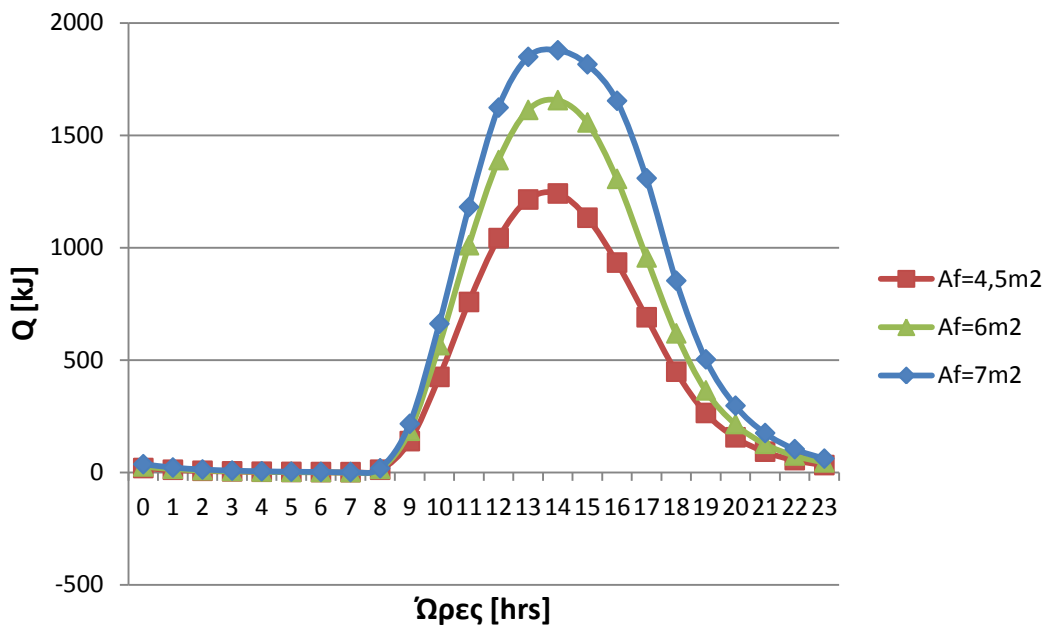
Διάγραμμα 6.3.4.5: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.4.6: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

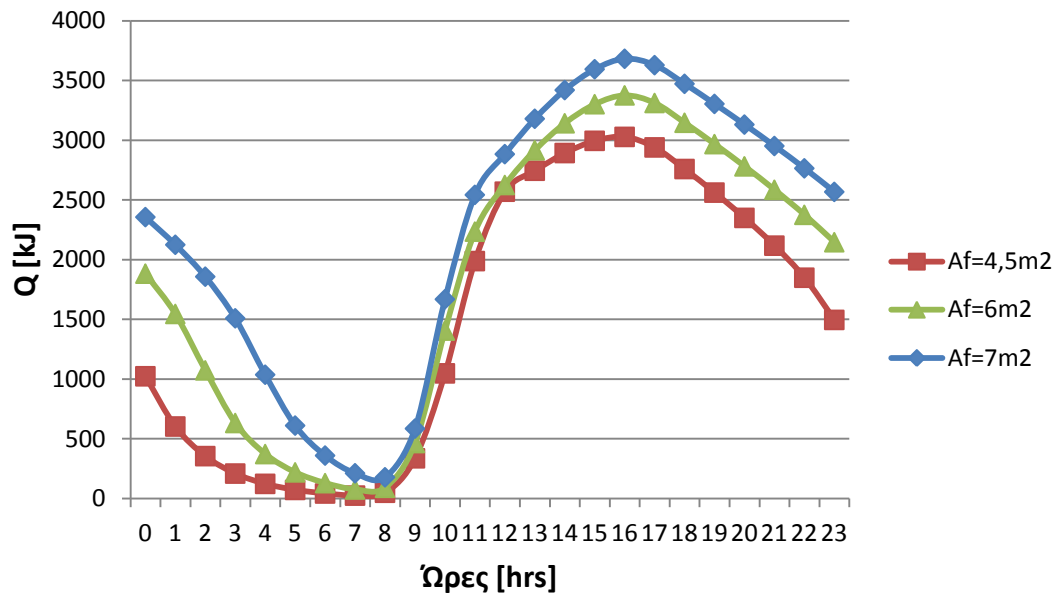


Διάγραμμα 6.3.4.7: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

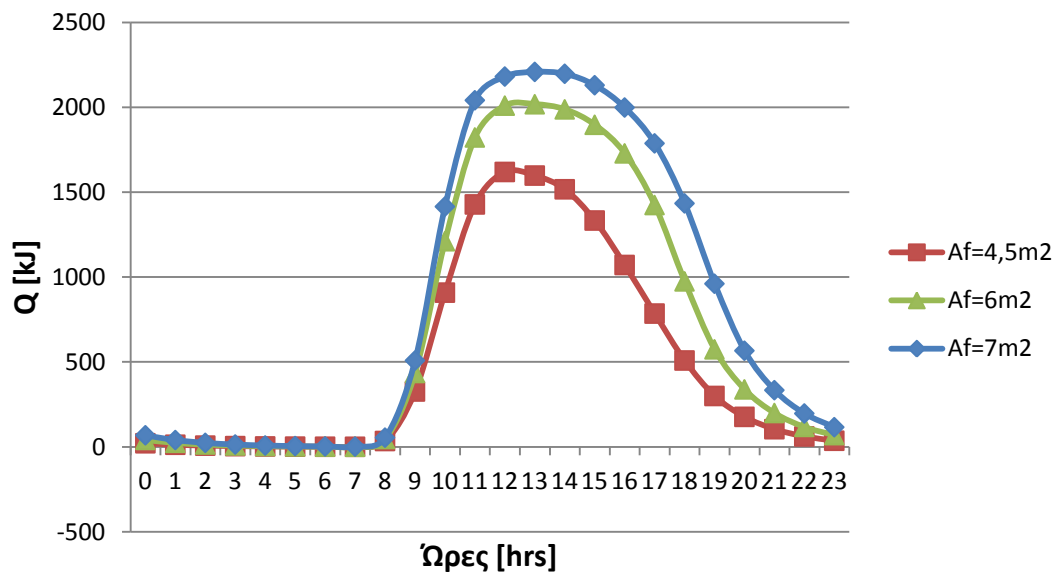


Διάγραμμα 6.3.4.8: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Δεκεμβρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

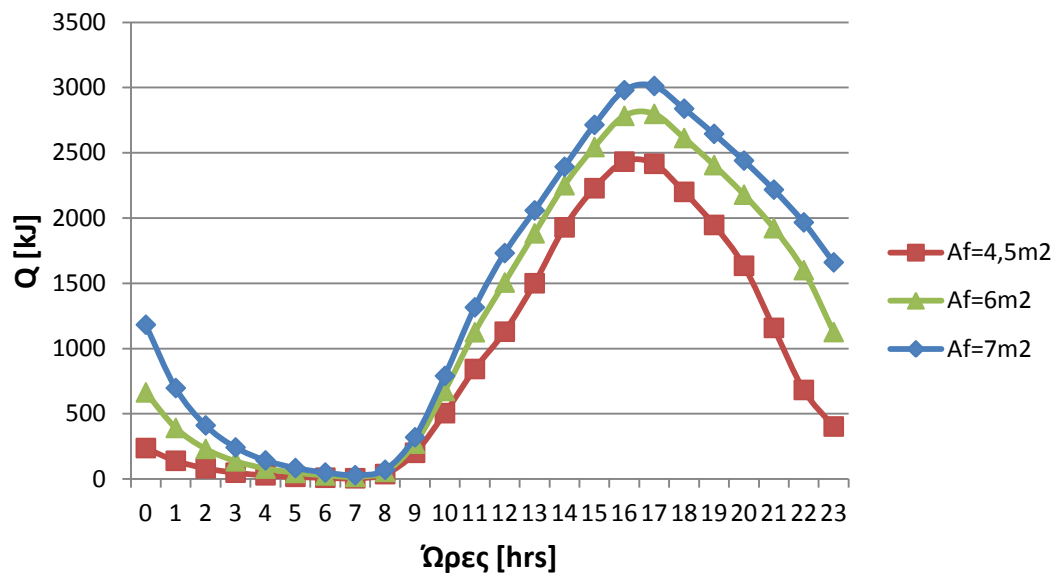
➤ Για 21^η Ιανουαρίου:



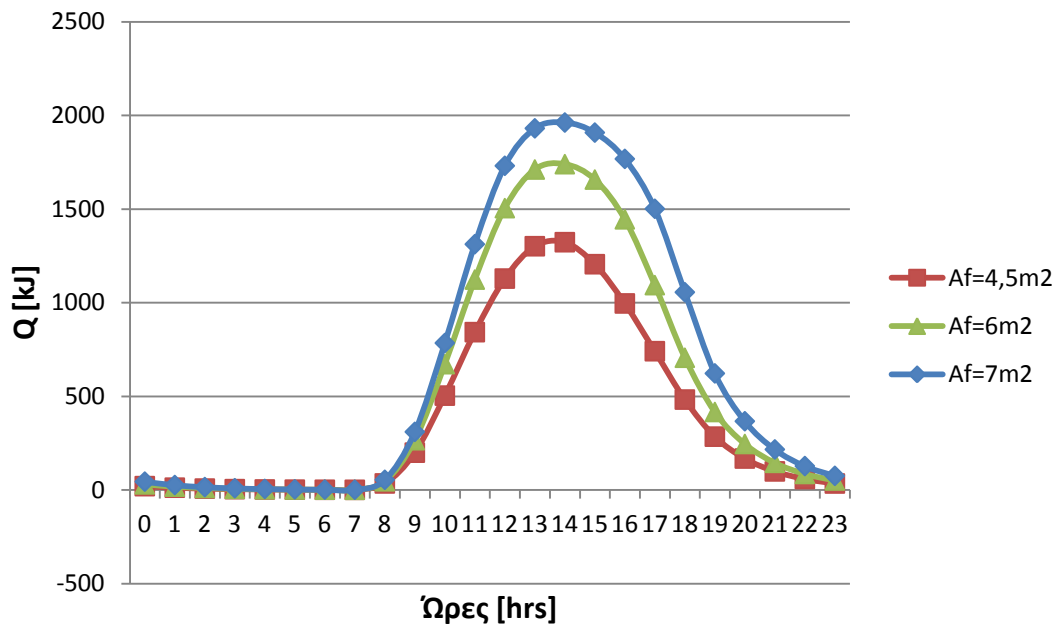
Διάγραμμα 6.3.4.9: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσεως των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.4.10: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσεως των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

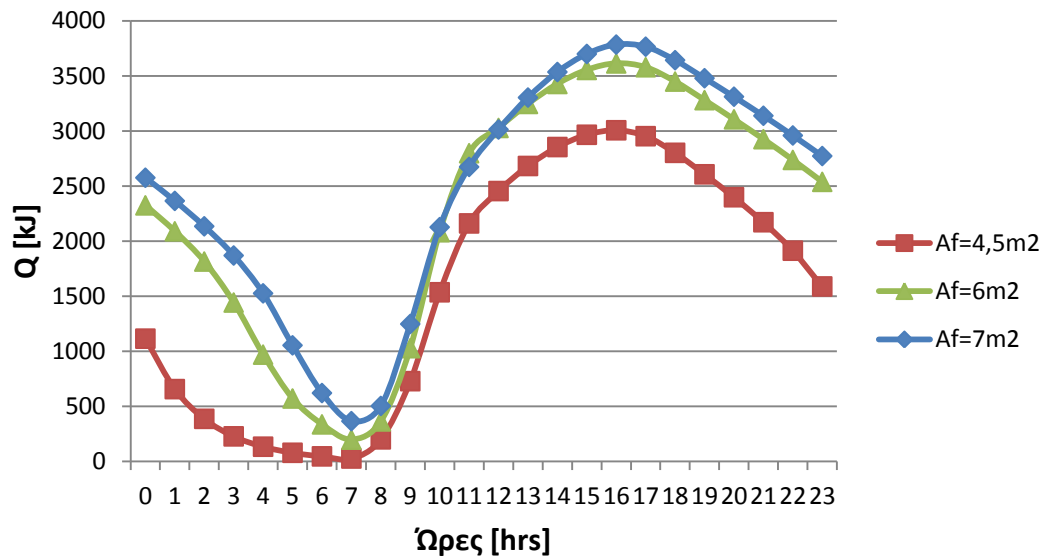


Διάγραμμα 6.3.4.11: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

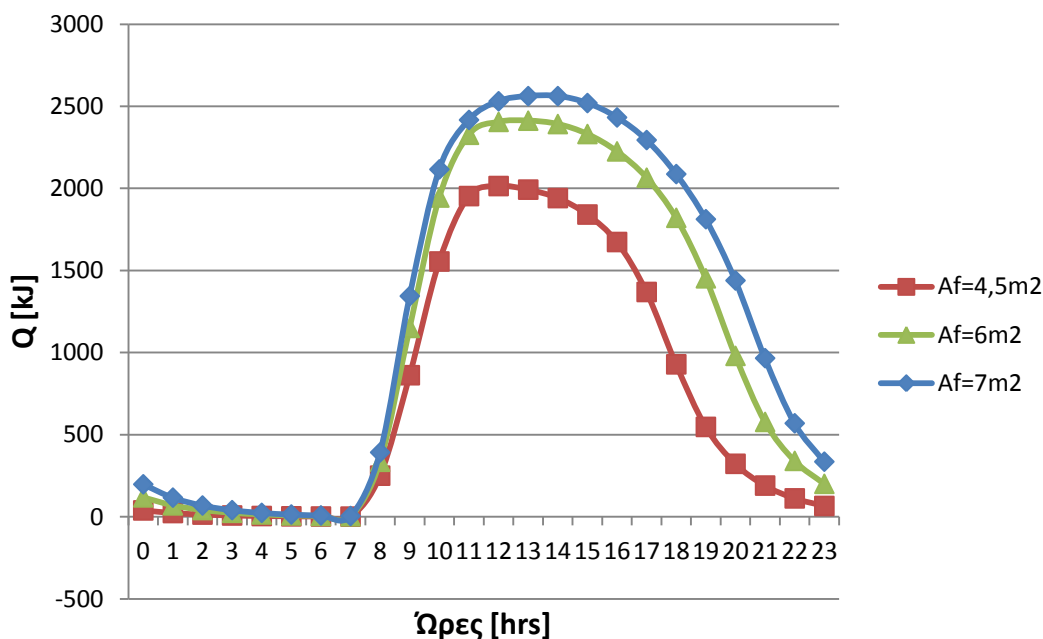


Διάγραμμα 6.3.4.12: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Ιανουαρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

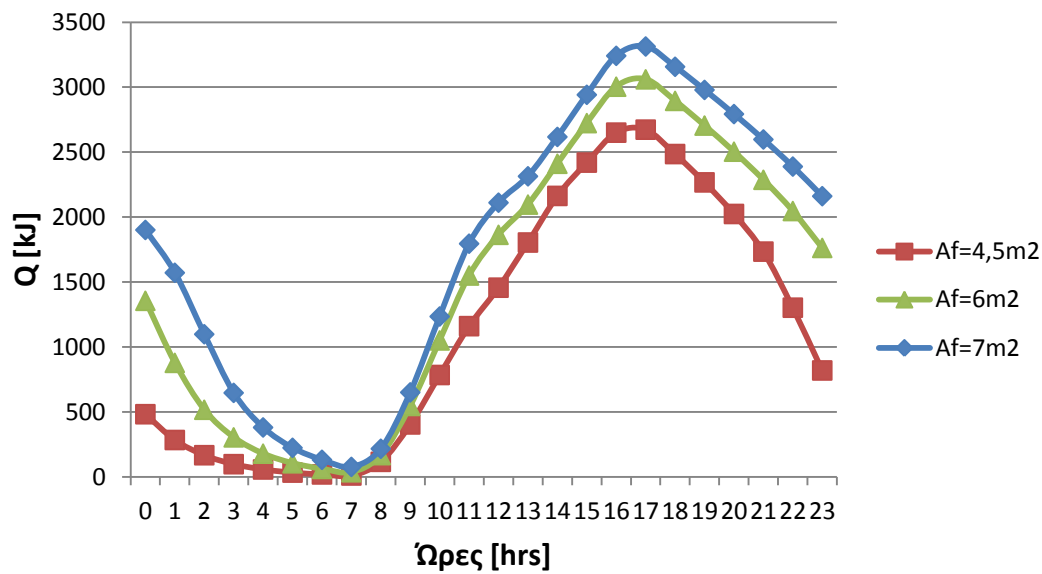
➤ **Για 21^η Φεβρουαρίου:**



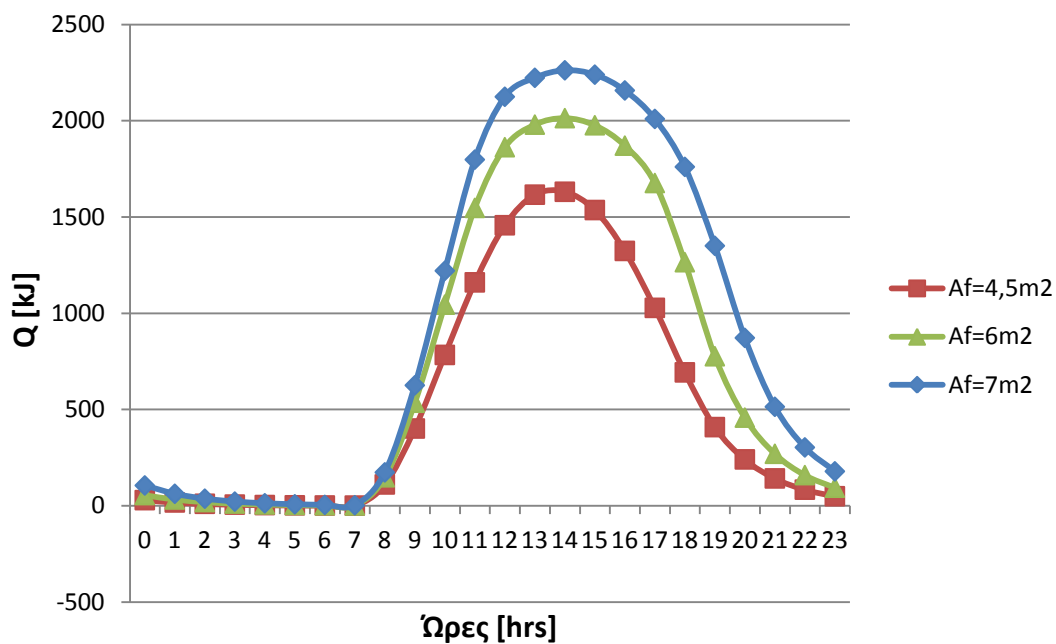
Διάγραμμα 6.3.4.13: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.4.14: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

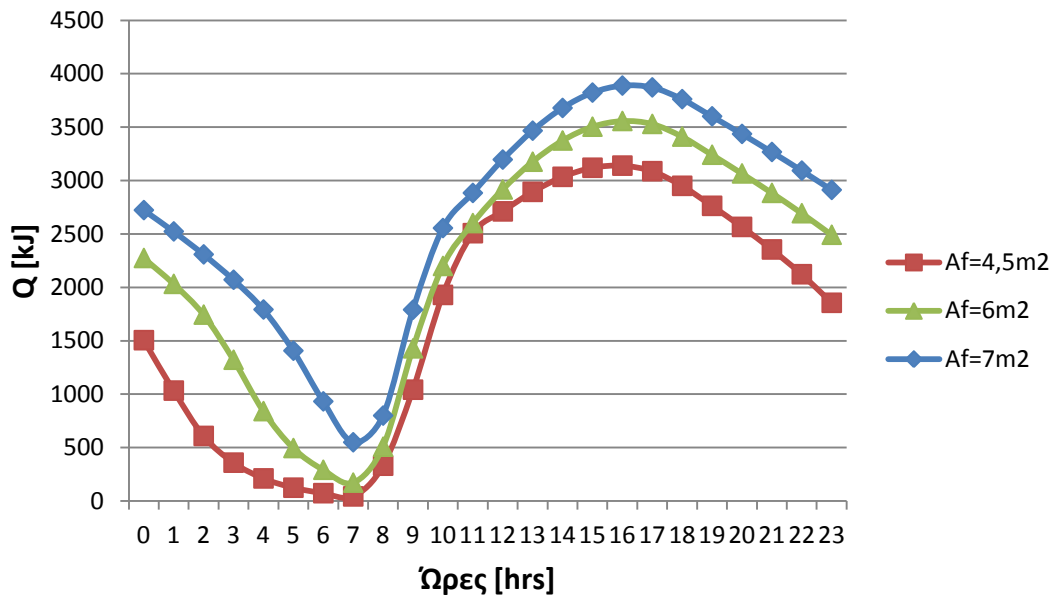


Διάγραμμα 6.3.4.15: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

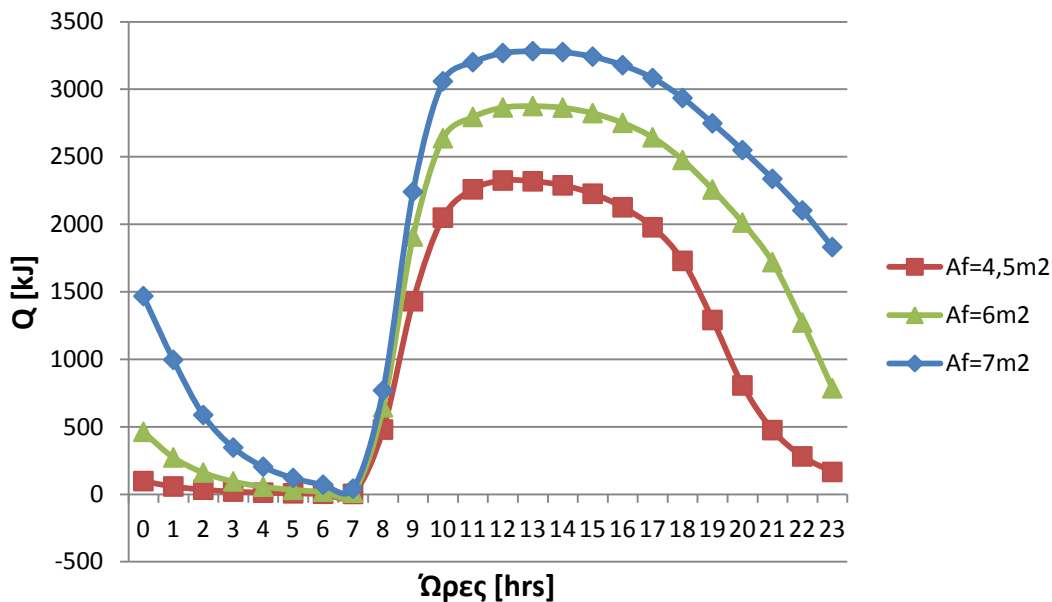


Διάγραμμα 6.3.4.16: Προσφερόμενη θερμότητα Q [kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Φεβρουαρίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

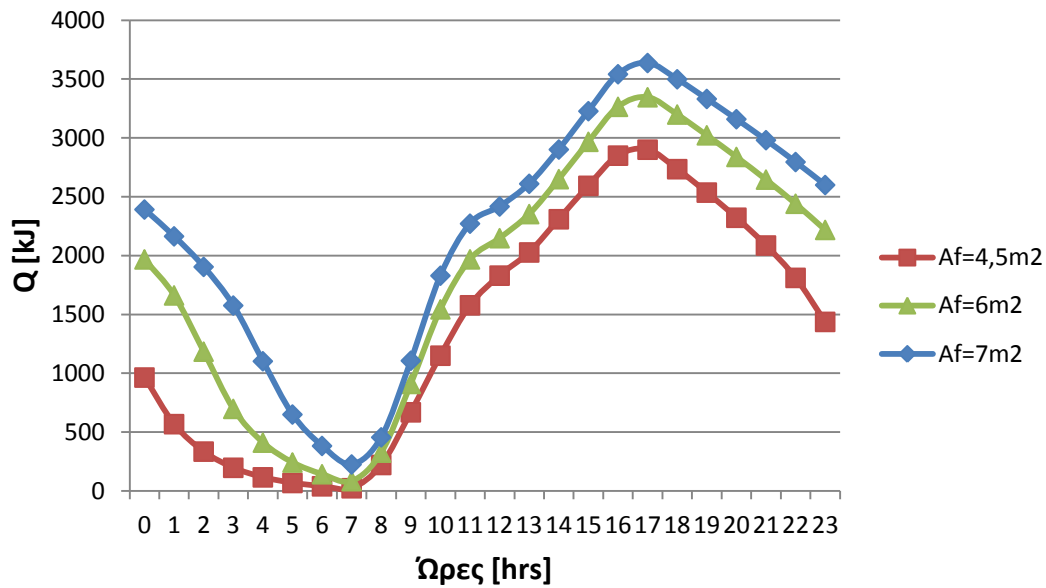
➤ Για 21^η Μαρτίου:



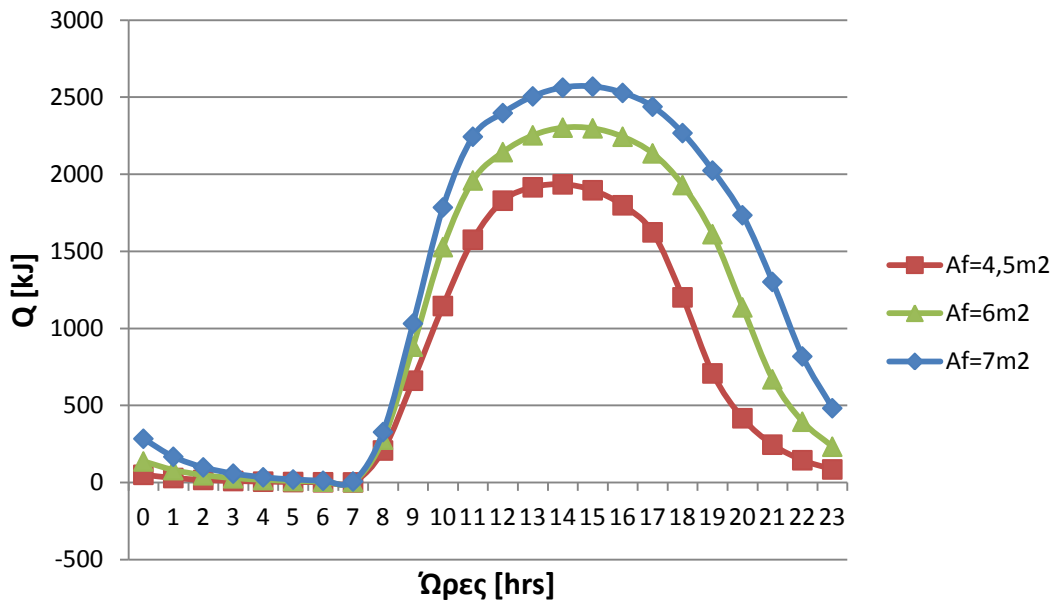
Διάγραμμα 6.3.4.17: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσε των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.4.18: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσε των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.4.19: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.4.20: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο, για διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα

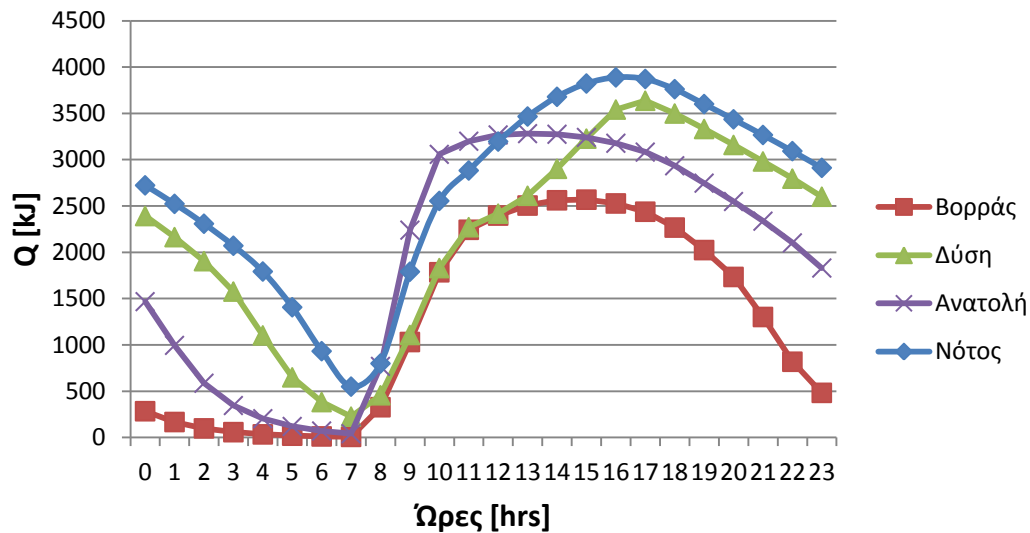
Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Τα παραπάνω διαγράμματα, 6.3.4.1 έως 6.3.4.20, για την προσφερόμενη θερμότητα του RT27 έχουν ουσιαστικά την ίδια μορφή με τα αντίστοιχα διαγράμματα θερμοκρασίας του RT27, 6.3.2.1 έως 6.3.2.20, που όπως προαναφέρθηκε είναι λογικό από μαθηματικής πλευράς, αν κοιτάξουμε τη σχέση (6.3.4.1). Επιπλέον, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ενότητας 6.3.2 για το RT27, η θερμοκρασία του είναι υψηλότερη αυτής του δωματίου καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου, για κάθε μήνα, κάθε προσανατολισμό, καθώς επίσης και για κάθε επιφάνεια υαλοπίνακα. Κατά συνέπεια, για οποιαδήποτε περίπτωση, το RT27 μόνο προσδίδει θερμότητα στο χώρο, γεγονός λογικό που επιβεβαιώνεται και στα εν λόγω διαγράμματα 6.3.4.1 έως 6.3.4.20. Επιπλέον, παρατηρούμε για κάθε μία από τις τέσσερις καμπύλες (μία για κάθε επιφάνεια υαλοπίνακα) όλων των παραπάνω διαγραμμάτων ότι το ποσό προσφερόμενης θερμότητας μειώνεται από τις 12 το βράδυ μέχρι τις 7:00-8:00 περίπου το πρωί, από τις 7:00-8:00 το πρωί και μέχρι τις ώρες γύρω από το μεσημέρι ή και το απόγευμα (η ακριβής ώρα ποικίλλει αναλόγως του μήνα, του προσανατολισμού και της επιφάνειας παραθύρου) αυξάνεται, ενώ από εκεί και έπειτα μέχρι την ολοκλήρωση του 24ώρου έχει πάλι φθίνουσα πορεία. Αυτή η μεταβολή στην προσφερόμενη θερμότητα εξηγείται ως εξής: Στο χρονικό διάστημα 8 το πρωί μέχρι τις ώρες γύρω από το μεσημέρι (ή το απόγευμα), η θερμότητα που προσφέρει ολοένα αυξάνεται, αφού η διαφορά θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) αυξάνει κατ' απόλυτη τιμή, λόγω διέγερσης του RT27 από την ηλιακή ακτινοβολία G_T (γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του PCM). Κατόπιν και μέχρι τις 7 με 8 το πρωί, η διαφορά θερμοκρασίας ($T_{\Delta\Omega M} - T_{PCM}$) μειώνεται κατ' απόλυτη τιμή, αφού πλέον δεν υφίσταται η διέγερση G_T (δηλαδή παύει να αυξάνει η θερμοκρασία του RT27) και έτσι η θερμότητα που προσφέρει στο χώρο ολοένα μειώνεται. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη μέγιστη προσφερόμενη θερμότητα αλλά και η μεγαλύτερη ελάχιστη προσφερόμενη θερμότητα εμφανίζεται για τη μεγαλύτερη επιφάνεια υαλοπίνακα $A_f=7m^2$ (για κάθε μήνα και προσανατολισμό), ενώ η μικρότερη μέγιστη και η μικρότερη ελάχιστη προσφερόμενη θερμότητα εμφανίζεται για τη μικρότερη επιφάνεια υαλοπίνακα $A_f=4,5m^2$ (για κάθε μήνα και προσανατολισμό). Αυτά είναι αναμενόμενα δεδομένου ότι η μεγαλύτερη μέγιστη και μεγαλύτερη ελάχιστη θερμοκρασία στο στρώμα του RT27 αναπτύσσεται για τον μεγαλύτερο υαλοπίνακα και η μικρότερη μέγιστη και μικρότερη ελάχιστη για τον μικρότερο, σύμφωνα και με τις παρατηρήσεις των διαγραμμάτων 6.3.2.1 έως 6.3.2.20. Συμπερασματικά, το PCM προσφέρει τα μεγαλύτερα ποσά θερμότητας στο χώρο σε όλη τη διάρκεια του 24ώρου, όταν ο υαλοπίνακας έχει τη μεγαλύτερη επιφάνεια ($A_f=7m^2$).

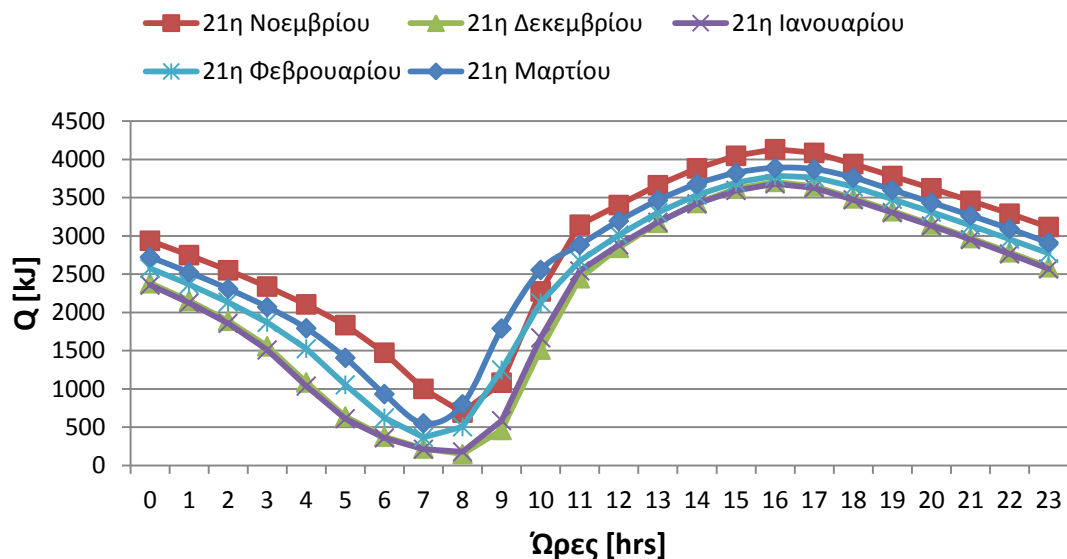
Αναφορικά με τη σύγκριση των διαγραμμάτων ως προς τον προσανατολισμό, εξάγουμε παρόμοια συμπεράσματα με αυτά σε αντίστοιχα διαγράμματα άλλων ενότητων. Ομοίως λοιπόν, για κάθε μήνα τα μεγαλύτερα ποσά θερμότητας σε γενικές γραμμές προσφέρονται όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι νότιου προσανατολισμού, ενώ τα μικρότερα όταν ο τοίχος με τον υαλοπίνακα είναι βόρειος. Στην περίπτωση δυτικού τοίχου με υαλοπίνακα, τα προσφερόμενα ποσά θερμότητας είναι μεγαλύτερα από αυτά για ανατολικό τοίχο με υαλοπίνακα, για κάθε μήνα. Αυτά αποτυπώνονται πιο ξεκάθαρα στο διάγραμμα 6.3.4.21 που βρίσκεται παρακάτω και που έγινε ενδεικτικά για την 21^η Μαρτίου και για επιφάνεια υαλοπίνακα $A_f=7m^2$.

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα ως προς το μήνα, παρατηρούμε πως η καμπύλη του Q πέφτει κατακόρυφα, δηλαδή αποκτά μικρότερη μέγιστη αλλά και μικρότερη ελάχιστη τιμή, καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται

ξανά οι τιμές του και κατ' επέκταση η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή. Αντίστοιχα, κατά τον ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό του τοίχου που φέρει τον υαλοπίνακα, παρατηρούμε ότι η καμπύλη του Q πέφτει κατακόρυφα καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Δεκέμβριο και αρχίζει να ανεβαίνει σταδιακά οδεύοντας από τον Ιανουάριο μέχρι και το Μάρτιο. Αυτά γίνονται πιο εμφανή στο διάγραμμα 6.3.4.22 που βρίσκεται παρακάτω και που έγινε ενδεικτικά για νότιο προσανατολισμό και για επιφάνεια υαλοπίνακα $A_f=7m^2$.



Διάγραμμα 6.3.4.21: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών κατά την 21^η Μαρτίου, για $A_f=7m^2$ και για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα



Διάγραμμα 6.3.4.22: Προσφερόμενη θερμότητα Q[kJ] στο χώρο από το RT27, συναρτήσει των ωρών για νότιο προσανατολισμό υαλοπίνακα, για $A_f=7m^2$ και για κάθε χειμερινό μήνα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Σύγκριση PCM (RT27) και συμβατικού δομικού υλικού (μπετόν)

Σε αυτό το κεφάλαιο θα συγκρίνουμε ένα PCM με ένα συμβατικό δομικό υλικό, ως προς τη θερμοκρασία που αναπτύσσουν καθ' όλη τη διάρκεια του 48ώρου, όταν η κατακόρυφη τοιχοποιία στην οποία έχει ενσωματωθεί το καθένα χωριστά, δέχεται ηλιακή ακτινοβολία διερχόμενη από υαλοπίνακα που βρίσκεται σε απέναντι τοίχο. Συγκεκριμένα, η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί μεταξύ του RT27 και του μπετόν, για κάθε ώρα του 48ώρου για την 21^η ημέρα κάθε χειμερινού μήνα (Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος και Μάρτιος) και για τους τέσσερις κύριους προσανατολισμούς του τοίχου που φέρει υαλοπίνακα, ενώ η μελέτη θα αφορά το κτίριο που μας απασχόλησε σε όλη την έκταση της παρούσας εργασίας. Υπενθυμίζουμε λοιπόν, ότι πρόκειται για κτίριο-αίθουσα στην περιοχή της Αθήνας, με διαστάσεις 10m(μήκος)×10m(πλάτος)×3m(ύψος) και ο τοίχος που φέρει το στρώμα του RT27 ή του μπετόν είναι εσωτερικός, διαστάσεων 10m×3m. Στο εσωτερικό της υπό μελέτης αίθουσας θεωρούμε ότι η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή με τη βοήθεια θερμομαντικών μέσων (θερμοστάτες, καλοριφέρ, κλιματιστικά κλπ). Η μελέτη αυτή θα γίνει με χρήση του βελτιωμένου μοντέλου που παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.3, ενώ η διαδικασία υπολογισμού των θερμοκρασιών θα παρουσιαστεί αναλυτικά στην ενότητα 7.2. Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να καταδειχθεί η υπεροχή του υλικού αλλαγής φάσης έναντι του κοινού δομικού υλικού, όσον αφορά τη διάρκεια των ενεργειακών τους αποθεμάτων και κατά συνέπεια η μεγαλύτερη δυναμική του PCM να συμβάλλει στην επίτευξη συνθηκών άνεσης εντός του χώρου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται οι ιδιότητες των δύο υλικών που είναι χρήσιμες για τη μελέτη μας.

Πίνακας 7.1: Χρήσιμες ιδιότητες του RT27

H [kJ/kg]	T _s [°C]	T _l [°C]	C _{ps} [kJ/(kg °C)]	C _{pl} [kJ/(kg °C)]	ρ [kg/m ³]
167,4	22	31	2	2,3	820

Πίνακας 7.2: Χρήσιμες ιδιότητες του μπετόν

C _p [kJ/(kg °C)]	ρ [kg/m ³]
0,880	2300

7.1 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του υλικού

Προτού αναφερθεί η σχέση ισολογισμού ενέργειας που εφαρμόστηκε στο στρώμα των δύο υλικών, για κάθε ώρα του 48ώρου, κάθε χειμερινό μήνα και κάθε προσανατολισμό, παραθέτουμε και εδώ, όπως και στα δύο προηγούμενα κεφάλαια, τις παραδοχές και υποθέσεις που κάναμε για λόγους απλοποίησης του προβλήματος. Αρχικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, θεωρούμε ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό της εξεταζόμενης αίθουσας παραμένει σταθερή μέσω της χρήσης πηγών θερμότητας, όπως κλιματιστικά συστήματα, θερμομαντικά σώματα κλπ. Όσον αφορά τα δύο υλικά μας (RT27 και μπετόν), υποθέσαμε ότι η θερμοκρασία που επικρατεί στο στρώμα καθενός εξ' αυτών είναι παντού η ίδια, ενώ μεταξύ του στρώματος του εκάστοτε υλικού (RT27 ή μπετόν) και της μόνωσης θεωρήσαμε πως δεν υπάρχει συναλλαγή θερμότητας. Τέλος, θεωρούμε σταθερές απώλειες εντός του χώρου μελέτης μας, οι

οποίες συνεπάγονται σταθερή απαιτούμενη ισχύ για την επίτευξη συνθηκών άνεσης και σταθερής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του χώρου.

Ο ισολογισμός ενέργειας τόσο για το RT27 όσο και για το μπετόν δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$U_i A_w \left(T_e^i - \frac{T_{αρχ} + T_{τελ}}{2} \right) \cdot 3600 = m \cdot C_{peff} \cdot (T_{τελ} - T_{αρχ}) \quad (7.1.1)$$

όπου

- $U_i [kW/(m^2 \cdot ^\circ C)]$: ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{d}{k}$$

και έχει ευρεθεί στην ενότητα 5.2.1 ίσος με $U_i = 7,06 \cdot 10^{-3} kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$, αφού $h_i = 8 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, $k = 1,2 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ και έχουμε επιλέξει πάχος σοβά $d = 0,02m$.

- $A_w [m^2]$: η επιφάνεια του τοίχου που φέρει το στρώμα υλικού (RT27 ή μπετόν), δηλαδή $A_w = 10m \times 3m = 30m^2$
- $T_e^i [^\circ C]$: η «ισοδύναμη εσωτερική θερμοκρασία», έτσι όπως ορίζεται από τη σχέση (5.3.1.4):

$$T_e^i = \frac{G_T A_f}{A_w} \cdot \frac{\alpha}{h_i \cdot 10^{-3}} + T_{\Delta\Omega M}$$

- $G_T [kW/m^2]$: η ολική στιγμιαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου, έτσι όπως υπολογίστηκε στην ενότητα 5.1 αναλυτικά για κάθε ώρα της 21^{ης} ημέρας των πέντε χειμερινών μηνών και για κάθε προσανατολισμό
- $A_f [m^2]$: η επιφάνεια του υαλοπίνακα. Σε αυτήν την ενότητα θεωρούμε υαλοπίνακα επιφάνειας $A_f = 12m^2$
- α : ο συντελεστής απορρόφησης του κατακόρυφου τοίχου για την ηλιακή ακτινοβολία. Θεωρούμε και πάλι σκουρόχρωμο τοίχο και συνεπώς $\alpha = 0,88$
- $T_{\Delta\Omega M} [^\circ C]$: η θερμοκρασία εντός του εξεταζόμενου χώρου, που εδώ τη θεωρούμε σταθερή και $T_{\Delta\Omega M} = 24^\circ C$
- $T_{αρχ} [^\circ C]$: η θερμοκρασία του υλικού (RT27 ή μπετόν) στην αρχή κάθε ώρας του 48ώρου
- $T_{τελ} [^\circ C]$: η θερμοκρασία του υλικού (RT27 ή μπετόν) στο τέλος κάθε ώρας του 48ώρου
- $m [kg]$: η μάζα του υλικού (RT27 ή μπετόν), που δίνεται από τη σχέση:

$$m = \rho \cdot V$$

Εδώ, πρέπει να τονίσουμε πως για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα θερμοκρασίας που θα λάβουμε από τα δύο υλικά θα πρέπει προφανώς να θεωρήσουμε ίδιο πάχος στρώματος για το RT27 και το μπετόν. Θεωρούμε λοιπόν, έστω $d_{PCM} = d_{μπετόν} = 0,02m$. Άρα:

Για τη μάζα του RT27 θα έχουμε: $m = \rho \cdot V = 820 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 0,02 = 492m$

Για τη μάζα του μπετόν θα έχουμε: $m = \rho \cdot V = 2300 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 0,02 = 1380m$

- C_{peff} : η ενεργός θερμοχωρητικότητα του υλικού, όπου για το μπετόν είναι μονίμως σταθερή και ίση με $C_p = 0,880 kJ/(kg K)$, ενώ για το RT27 είναι

συνάρτηση της θερμοκρασίας του και δίνεται από τις σχέσεις (5.2.2.9) έως (5.2.2.12):

Για $T \leq 22^\circ\text{C}$:

$$C_{peff} = C_{ps} = 2 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$$

Για $22^\circ\text{C} < T \leq 26,5^\circ\text{C}$:

$$C_{peff} = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = 7,378 \cdot T - 160,316 \text{ [kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})]$$

Για $26,5^\circ\text{C} < T \leq 31^\circ\text{C}$:

$$C_{peff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl} \Rightarrow$$

$$C_{peff} = -7,244 \cdot T + 226,87 \text{ [kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})]$$

Για $T > 31^\circ\text{C}$:

$$C_{peff} = C_{pl} = 2,3 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$$

όπου T στις εξισώσεις του C_{peff} θεωρήσαμε τη θερμοκρασία του PCM, $T_{\alpha\rho\chi}$, στην αρχή κάθε ώρας του 48ώρου.

7.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας του υλικού συναρτήσει των ωρών του 48ώρου

Έχοντας γνωστά τα απαιτούμενα μεγέθη, μπορούμε τώρα να εφαρμόσουμε τον ισολογισμό ενέργειας τόσο στο στρώμα RT27, όσο και στο στρώμα του μπετόν, προκειμένου να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία των δύο υλικών στο τέλος κάθε ώρας του 48ώρου. Η διαδικασία υπολογισμού της θερμοκρασίας θα πραγματοποιηθεί για κάθε ώρα δύο συνεχόμενων 24ώρων (ενός 48ώρου) της 21^{ης} ημέρας Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό του τοίχου που φέρει υαλοπίνακα. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να αναφέρουμε ότι υποθέτουμε ιδιαίτερα νεφελώδη ημέρα κατά το δεύτερο 24ώρο κάθε χειμερινού μήνα και έτσι λαμβάνουμε μηδενική την ολική ηλιακή ακτινοβολία, καθ' όλη τη διάρκεια του δεύτερου 24ώρου. Επομένως, η σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας και για το RT27 και για το μπετόν προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned} U_i A_w \left(T_e^i - \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \right) \cdot 3600 &= m \cdot C_{peff} \cdot (T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\alpha\rho\chi}) \\ \Rightarrow m \cdot C_{peff} \cdot T_{\tau\epsilon\lambda} + U_i \cdot A_w \cdot \frac{T_{\tau\epsilon\lambda}}{2} \cdot 3600 &= \\ = U_i \cdot A_w \cdot T_e^i \cdot 3600 - U_i \cdot A_w \cdot \frac{T_{\alpha\rho\chi}}{2} \cdot 3600 + m \cdot C_{peff} \cdot T_{\alpha\rho\chi} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{U_i \cdot A_w \cdot T_e^i \cdot 3600 - U_i \cdot A_w \cdot T_{\alpha\rho\chi} \cdot 1800 + m \cdot C_{p\epsilon f f} \cdot T_{\alpha\rho\chi}}{m \cdot C_{p\epsilon f f} + U_i \cdot A_w \cdot 1800} \quad (7.2.1)$$

Στην παραπάνω σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας του υλικού στο τέλος κάθε ώρας, $T_{\tau\epsilon\lambda}$, παρατηρούμε ότι υπάρχει ένας ακόμη άγνωστος, το $T_{\alpha\rho\chi}$, δηλαδή η θερμοκρασία του υλικού στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου, όπως συνέβαινε σε όλες τις μέχρι τώρα εξεταζόμενες περιπτώσεις. Για το λόγο αυτό, θεωρούμε αυθαίρετα γνωστή την τιμή της $T_{\alpha\rho\chi}$, δίνοντάς της μία τυχαία τιμή, έστω $T_{\alpha\rho\chi} = 21^\circ\text{C}$ για τις 12:00 τα μεσάνυκτα του πρώτου 24ώρου. Με γνωστούς πλέον όλους τους όρους της σχέσης (7.2.1) (όπου προφανώς στο G_T θέτουμε την τιμή όπως αυτή προέκυψε για τη συγκεκριμένη ώρα στην ενότητα 5.1) υπολογίζουμε τη θερμοκρασία $T_{\tau\epsilon\lambda}$ του υλικού στο τέλος των 12:00 το βράδυ, η οποία θα αποτελέσει την αρχική θερμοκρασία $T_{\alpha\rho\chi}$ για τη 1:00π.μ., ώστε να ευρεθεί η τελική θερμοκρασία $T_{\tau\epsilon\lambda}$ στη 1:00π.μ. Κατά τον ίδιο τρόπο εργαζόμαστε για όλες τις ώρες του πρώτου 24ώρου. Ολοκληρώνοντας το πρώτο 24ωρο και μπαίνοντας στο δεύτερο, θέτουμε στο $T_{\alpha\rho\chi}$ για τις 12:00 το βράδυ του δεύτερου 24ώρου, την τιμή $T_{\tau\epsilon\lambda}$ που προέκυψε για τις 23:00 του πρώτου 24ώρου. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με αυτήν που περιγράψαμε για το πρώτο 24ωρο, υπολογίζουμε και την $T_{\tau\epsilon\lambda}$ για κάθε ώρα του δεύτερου 24ώρου, ενώ υπενθυμίζουμε ότι για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας καθ' όλη τη διάρκεια του δεύτερου 24ώρου, θεωρούμε μηδενική την ολική ηλιακή ακτινοβολία, G_T ($G_T=0$). Επιπλέον, επισημαίνουμε ότι η μελέτη στην παρούσα ενότητα είναι ουσιαστικά ποιοτική, υπό την έννοια ότι στόχος μας είναι απλά η απόδειξη της «υπεροχής» του PCM σε ενεργειακά αποθέματα σε βάθος χρόνου έναντι ενός συμβατικού δομικού υλικού και όχι ο ακριβής υπολογισμός των θερμοκρασιών των δύο υλικών. Για το λόγο αυτό δεν πραγματοποιήσαμε δοκιμές για τη σύγκλιση των τιμών της θερμοκρασίας όπως κάναμε σε όλες τις προηγούμενες ενότητες της εργασίας.

Με βάση τα δεδομένα για το εκάστοτε υλικό (RT27 ή μπετόν) που αναφέρθηκαν στην ενότητα 7.1 προκύπτουν οι σχέσεις υπολογισμού της θερμοκρασίας για κάθε υλικό ως εξής:

➤ **Για το RT27:**

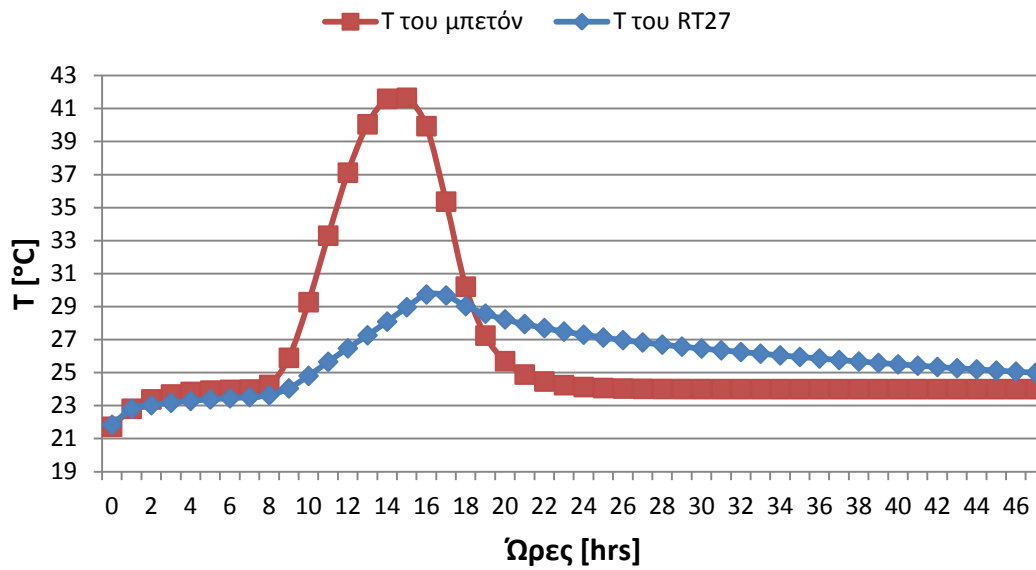
$$T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{33549,12G_T - 381,24T_{\alpha\rho\chi} + 492C_{p\epsilon f f} \cdot T_{\alpha\rho\chi} + 18299,52}{492C_{p\epsilon f f} + 381,24} \quad (7.2.2)$$

➤ **Για το μπετόν:**

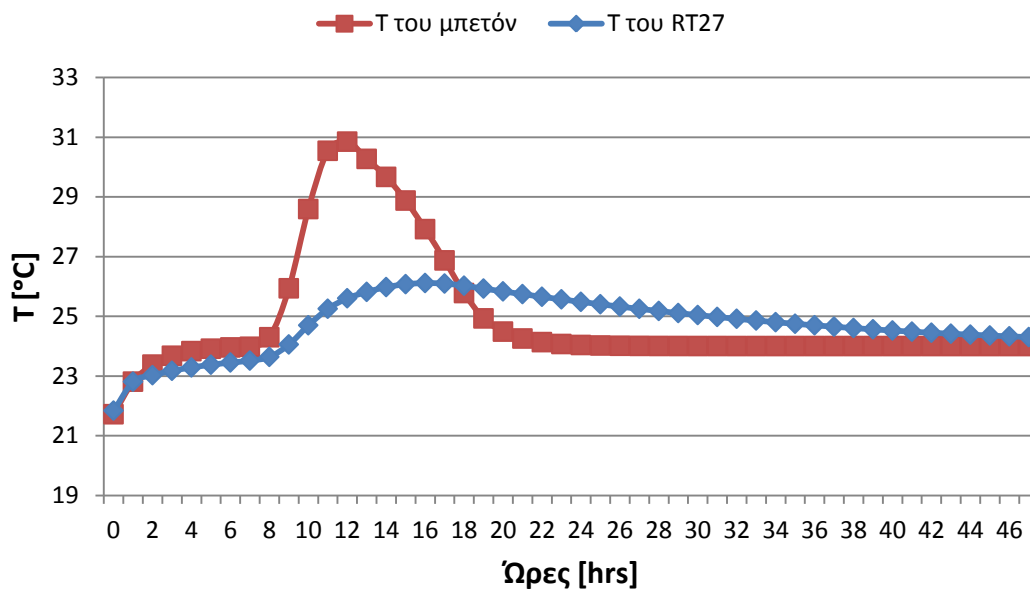
$$T_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{33549,12G_T + 833,16T_{\alpha\rho\chi} + 18299,52}{1595,64} \quad (7.2.3)$$

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας $T_{PCM} = \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2}$, $T_{\mu\beta\epsilon\tau\acute{o}\nu} = \frac{T_{\alpha\rho\chi} + T_{\tau\epsilon\lambda}}{2}$ του RT27 και του μπετόν αντίστοιχα κατά τη διάρκεια του 48ώρου για την 21^η Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου, Μαρτίου και για κάθε προσανατολισμό του τοίχου που φέρει υαλοπίνακα. Τα διαγράμματα και πάλι έχουν οργανωθεί με βάση το μήνα.

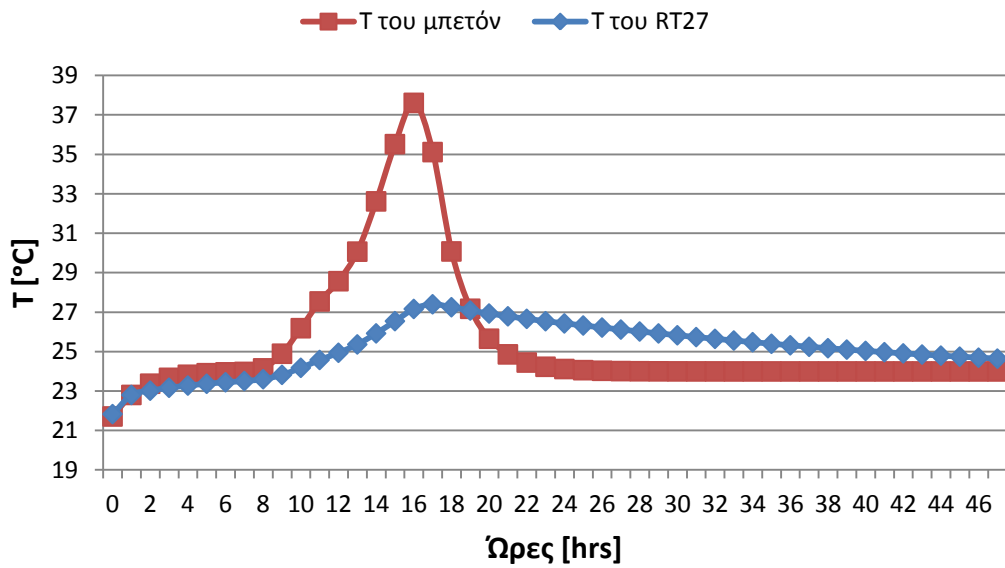
➤ **Για 21^η Νοεμβρίου:**



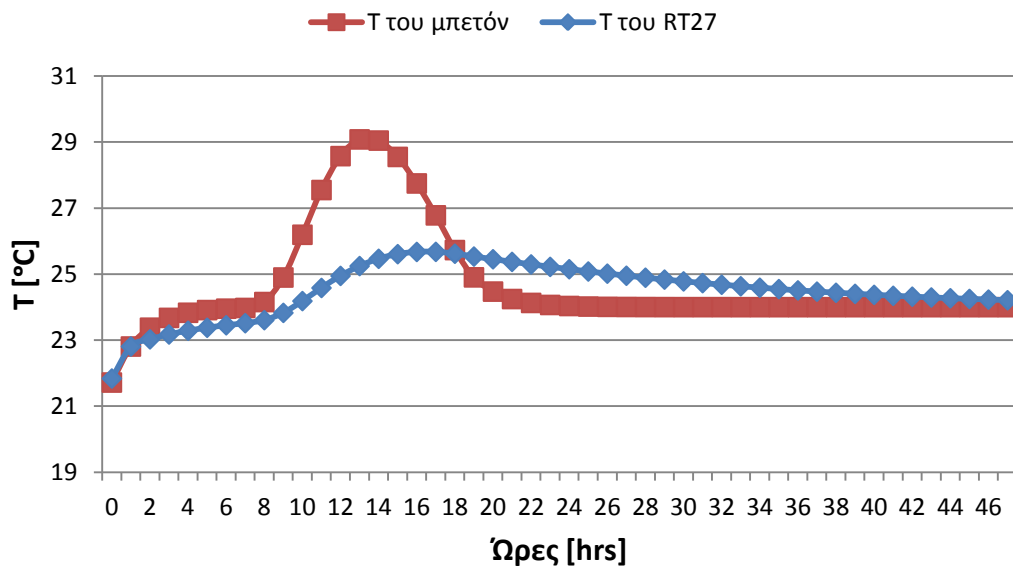
Διάγραμμα 7.2.1: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο



Διάγραμμα 7.2.2: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο

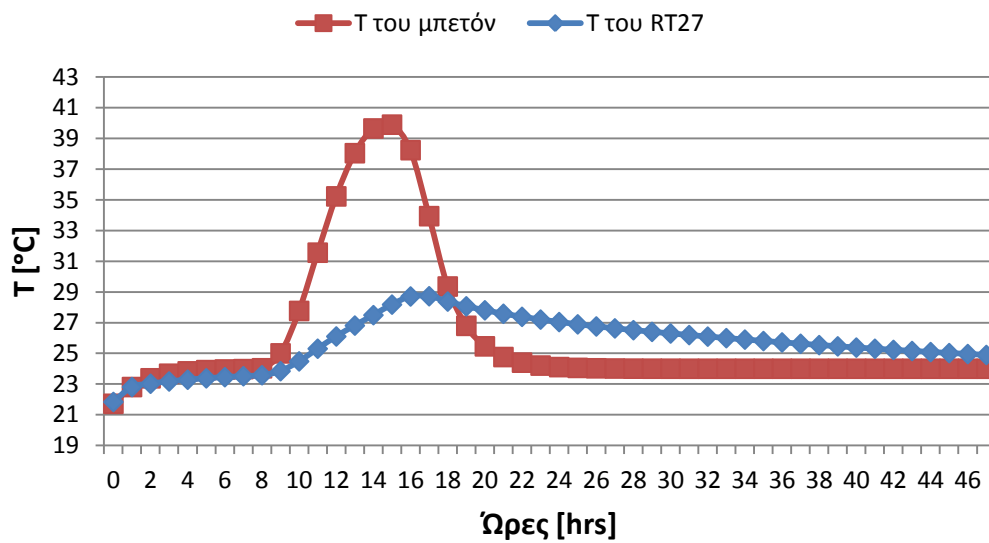


Διάγραμμα 7.2.3: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο

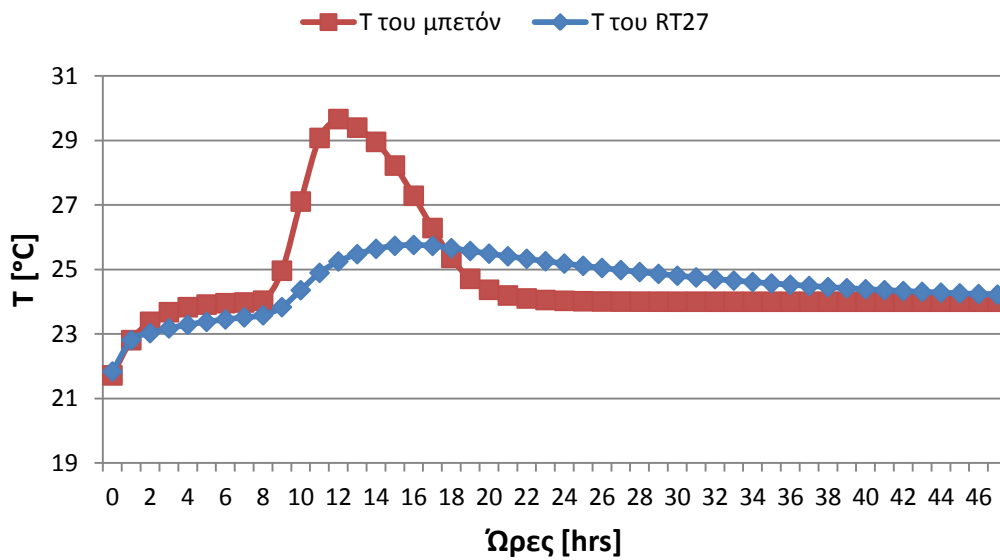


Διάγραμμα 7.2.4: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Νοεμβρίου, με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο

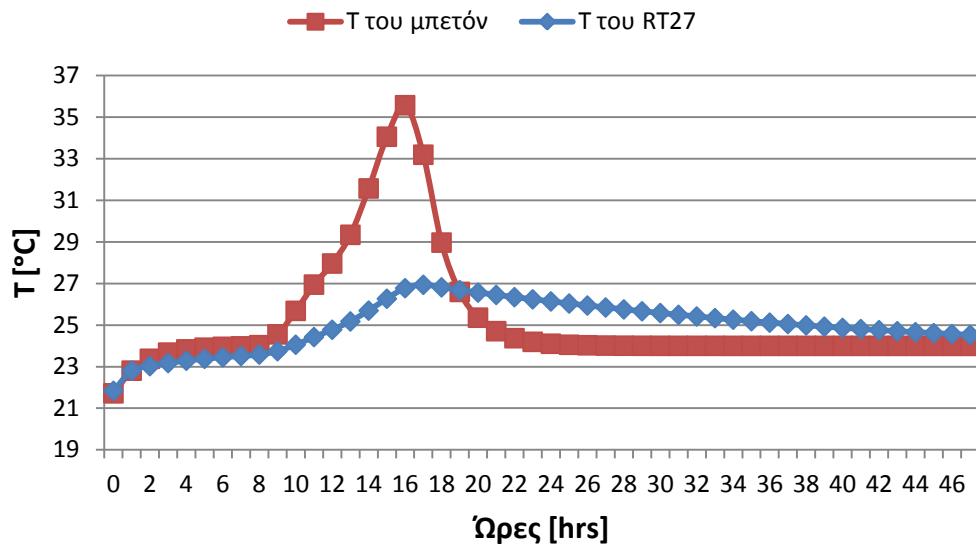
➤ Για 21^η Δεκεμβρίου:



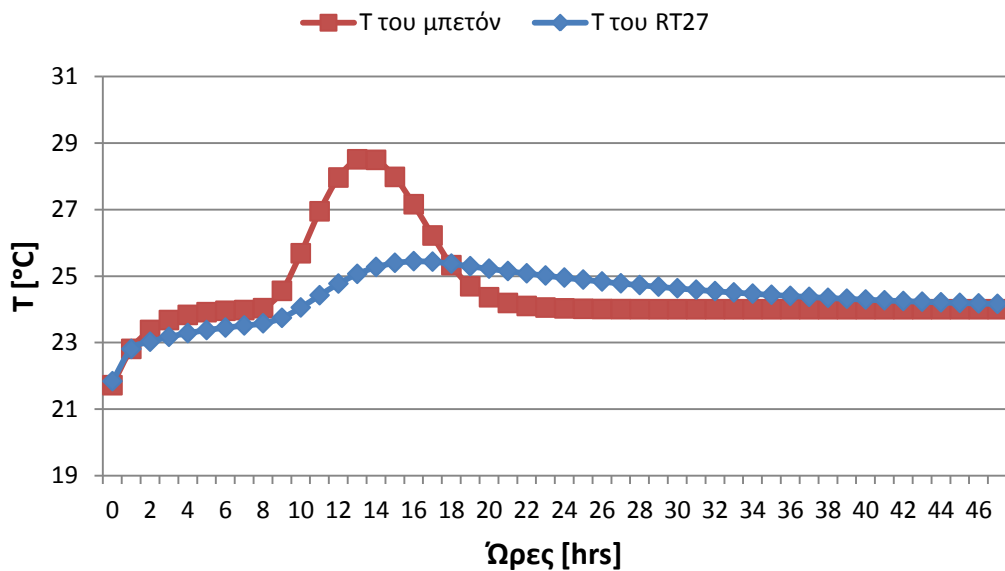
Διάγραμμα 7.2.5: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο



Διάγραμμα 7.2.6: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Δεκεμβρίου, με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο

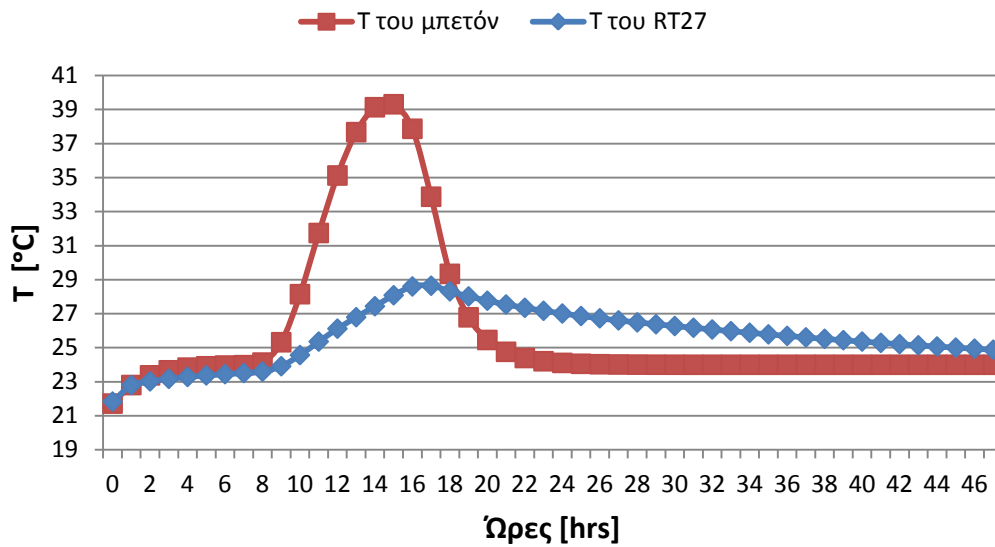


Διάγραμμα 7.2.7: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Δεκεμβρίου, με ναλοπίνακα σε δυτικό τοίχο

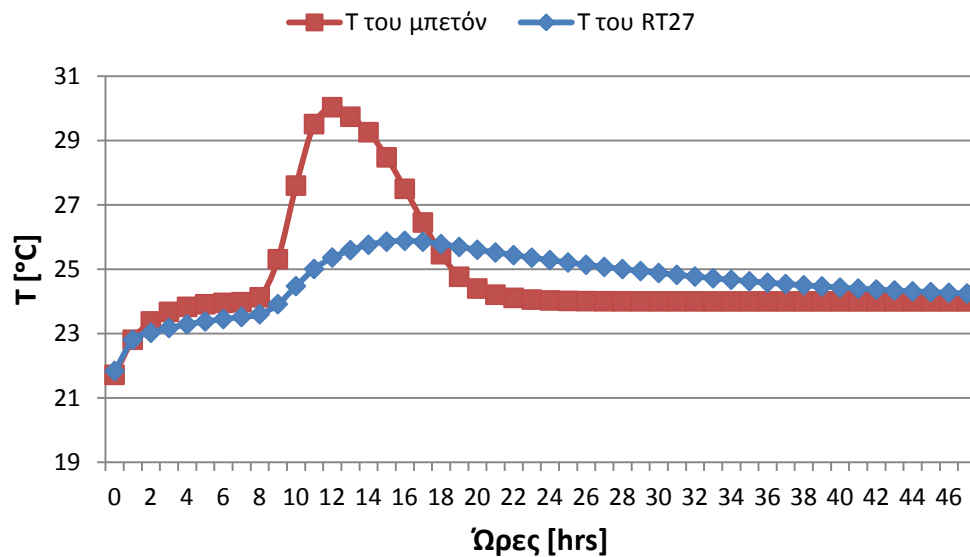


Διάγραμμα 7.2.8: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Δεκεμβρίου, με ναλοπίνακα σε βόρειο τοίχο

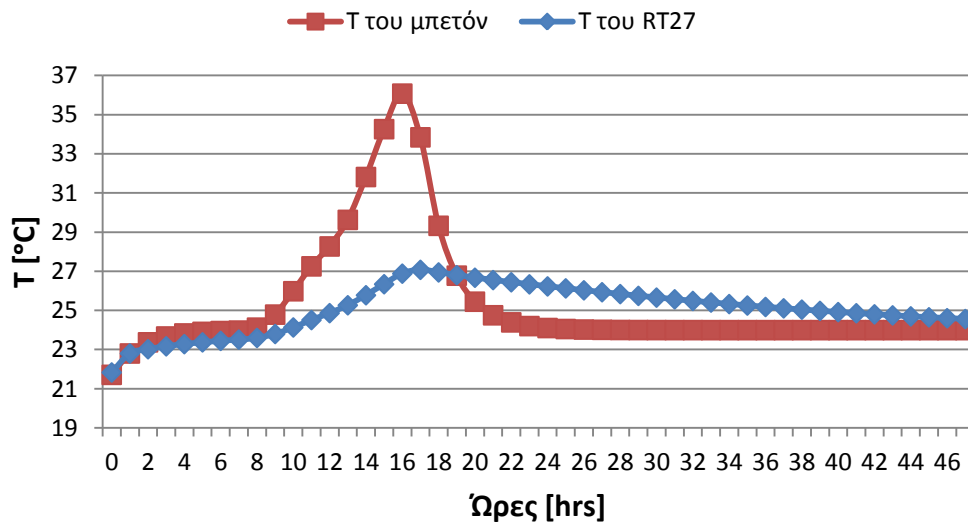
➤ **Για 21^η Ιανουαρίου:**



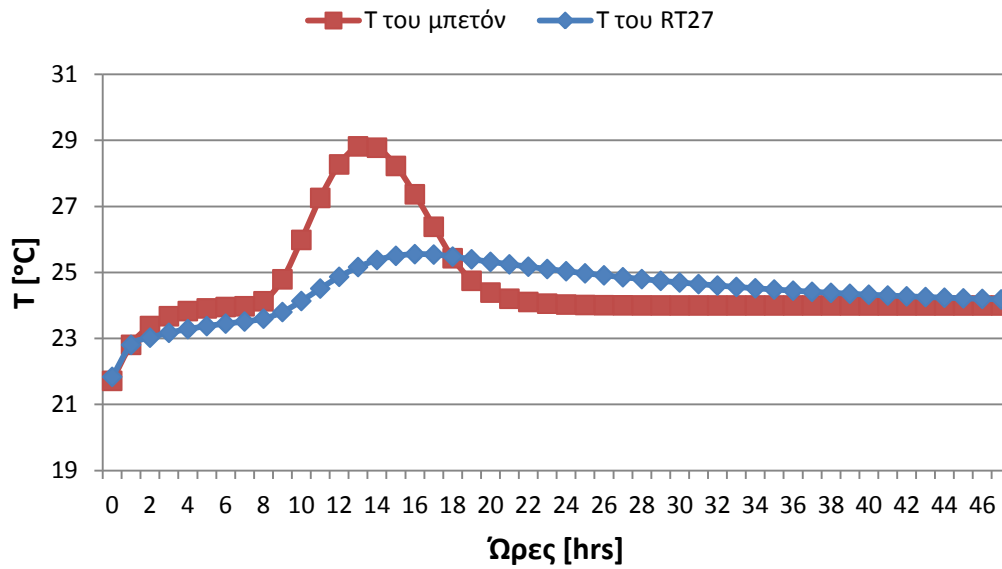
Διάγραμμα 7.2.9: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Ιανουαρίου, με βαλοπίνακα σε νότιο τοίχο



Διάγραμμα 7.2.10: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Ιανουαρίου, με βαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο

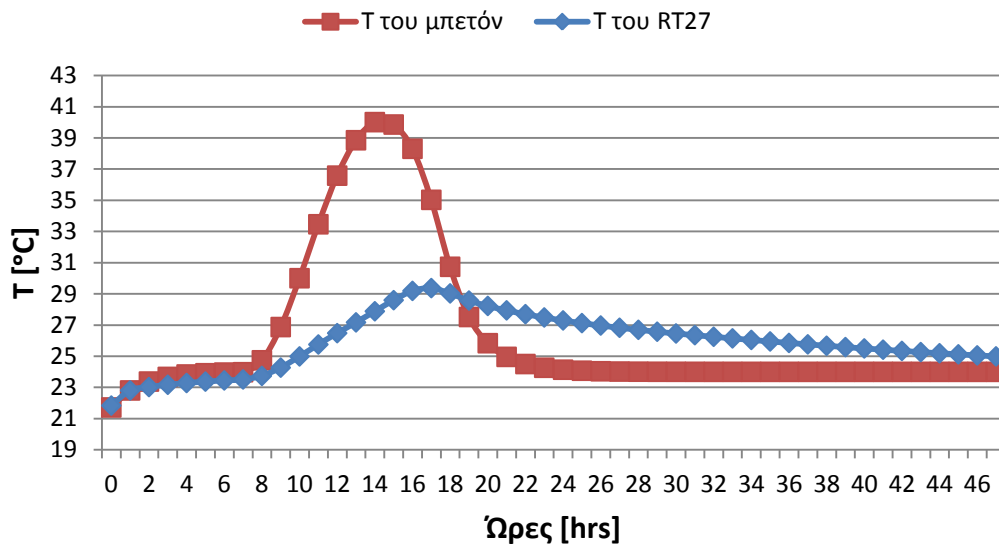


Διάγραμμα 7.2.11: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο

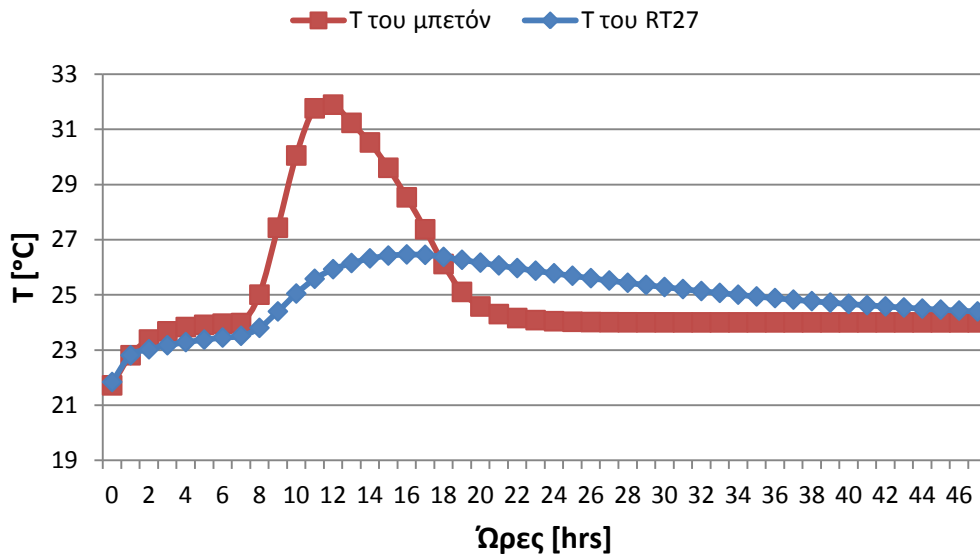


Διάγραμμα 7.2.12: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Ιανουαρίου, με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο

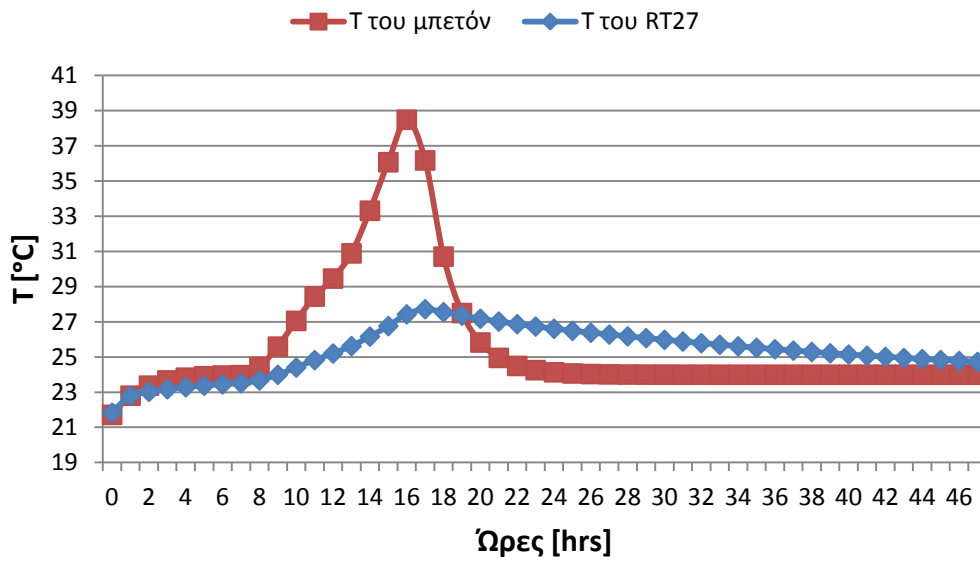
➤ **Για 21^η Φεβρουαρίου:**



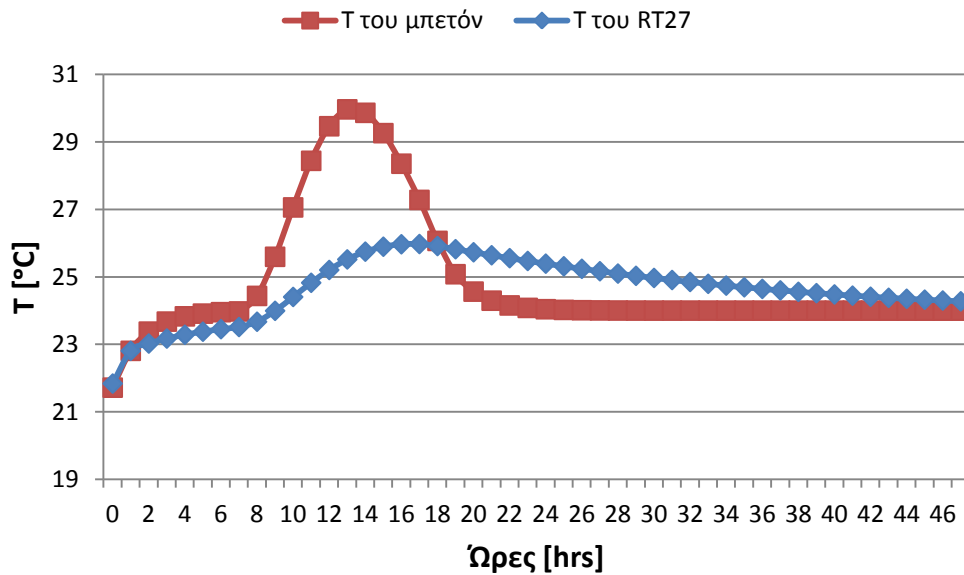
Διάγραμμα 7.2.13: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο



Διάγραμμα 7.2.14: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο

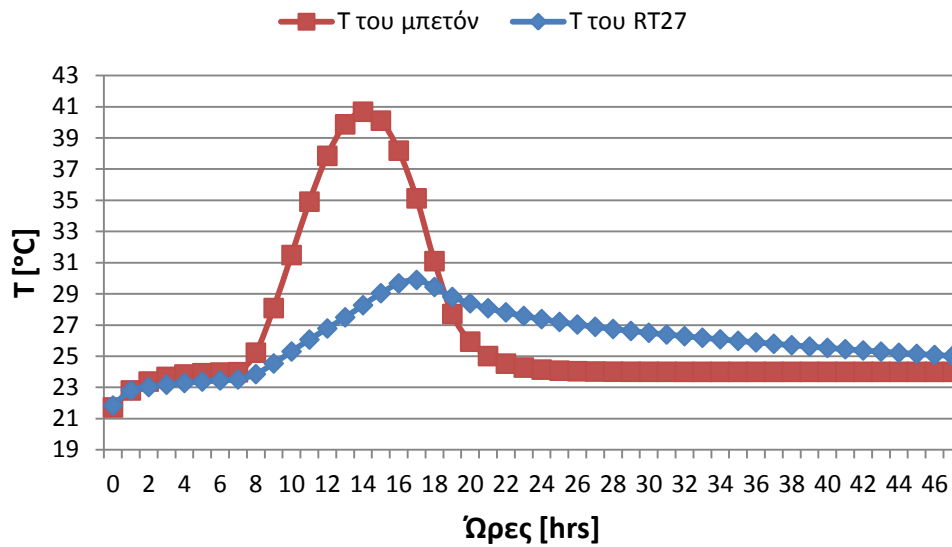


Διάγραμμα 7.2.15: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο

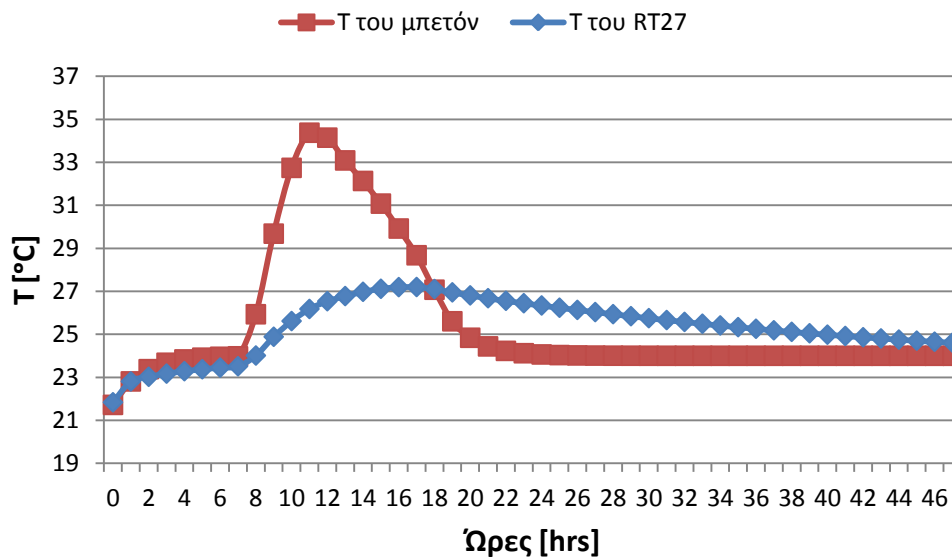


Διάγραμμα 7.2.16: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Φεβρουαρίου, με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο

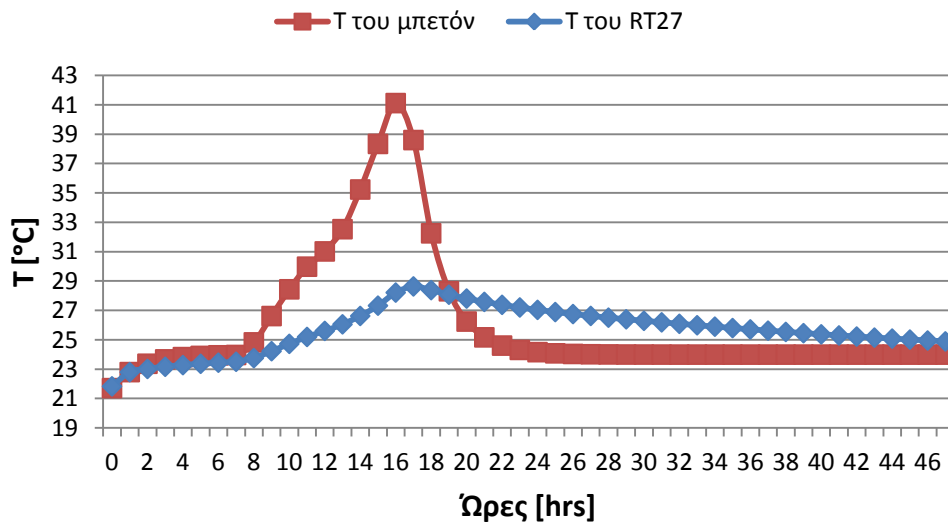
➤ **Για 21^η Μαρτίου:**



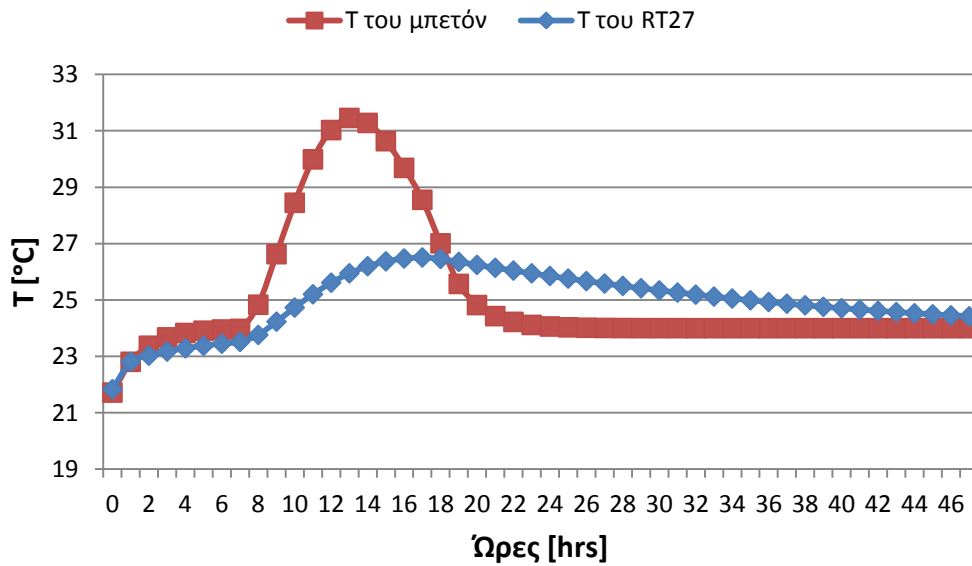
Διάγραμμα 7.2.17: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα σε νότιο τοίχο



Διάγραμμα 7.2.18: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα σε ανατολικό τοίχο



Διάγραμμα 7.2.19: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα σε δυτικό τοίχο



Διάγραμμα 7.2.20: Θερμοκρασία του RT27 και του μπετόν συναρτήσει των ωρών του 48ώρου για την 21^η Μαρτίου, με υαλοπίνακα σε βόρειο τοίχο

Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Δεδομένου ότι οι καμπύλες θερμοκρασίας του μπετόν και του RT27 στα παραπάνω διαγράμματα (7.2.1 έως 7.2.20) προέκυψαν χωρίς να εκτελέσουμε τη γνωστή επαναληπτική διαδικασία σύγκλισης των τιμών (αφού η σύγκριση των δύο υλικών μας ενδιαφέρει ποιοτικά), το μόνο που αξίζει να σημειωθεί από τα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι μέχρι και τα μισά περίπου του πρώτου 24ώρου, το μπετόν αναπτύσσει απότομα πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασίες απ' ό τι το RT27, ενώ από εκεί και έπειτα η θερμοκρασία του φθίνει απότομα, με αποτέλεσμα λίγες ώρες πριν την ολοκλήρωσή της πρώτης ημέρας και σε όλη τη διάρκεια της δεύτερης να υπερिशύει το RT27. Ο λόγος που το μπετόν παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασίες από το RT27 στο πρώτο 24ώρο είναι πως η θερμότητα που λαμβάνει από την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται εξολοκλήρου για την αύξηση της θερμοκρασίας του, σε αντίθεση με το PCM που τη χρησιμοποιεί και για την αλλαγή φάσης του. Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι το συμβατικό δομικό υλικό εξαντλεί τα ενεργειακά του αποθέματα τη δεύτερη ημέρα, όταν ακόμη το υλικό αλλαγής φάσης δύναται να προσφέρει θερμότητα στο χώρο. Έτσι, λοιπόν, πράγματι το PCM διατηρεί τα ενεργειακά του αποθέματα για περισσότερο διάστημα, αναλόγως του ποσοστού αξιοποίησής του.

Παράρτημα

Εδώ, παρατίθενται ενδεικτικά σε πίνακες η θερμοκρασία και η προσφερόμενη θερμότητα του PCM στο χώρο για κάθε ώρα του 24ώρου, για μία από όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Η περίπτωση που παρατίθεται είναι αυτή για πάχος στρώματος RT27 $d_{PCM}=0,03m$, θερμοκρασία δωματίου $T_{\Delta\Omega M}=20^{\circ}C$ και επιφάνεια υαλοπίνακα $A_f=7m^2$, για την οποία όπως είδαμε, χρησιμοποιήθηκε το βελτιωμένο μοντέλο προσομοίωσης.

Πίνακας 1: Θερμοκρασία του RT27 κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Νοεμβρίου για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα [hrs]	T [°C] Νότος	T [°C] Ανατολή	T [°C] Δύση	T [°C] Βορράς
7	21,31265	20,0044	20,06481	20,00171
8	20,90653	20,15674	20,12241	20,08522
9	21,41945	20,98613	20,48245	20,46052
10	22,98407	22,37759	21,1493	21,13638
11	24,12737	23,18555	21,88379	21,87618
12	24,46475	23,28347	22,37857	22,37501
13	24,8043	23,28428	22,77079	22,57238
14	25,09336	23,25323	23,263	22,62937
15	25,30909	23,17281	23,72983	22,58817
16	25,42196	23,03329	24,11306	22,44836
17	25,35916	22,8245	24,17457	22,18384
18	25,16882	22,51969	23,9602	21,61835
19	24,96255	22,09723	23,71896	20,97111
20	24,75213	21,4752	23,46575	20,57243
21	24,5369	20,86956	23,19648	20,33742
22	24,31604	20,51257	22,90412	20,19889
23	24,08842	20,30214	22,57466	20,11724
24	23,85255	20,1781	22,17118	20,06911
1	23,6063	20,10498	21,54501	20,04074
2	23,34648	20,06188	20,91071	20,02401
3	23,06792	20,03648	20,53682	20,01415
4	22,76125	20,0215	20,31643	20,00834
5	22,40584	20,01267	20,18652	20,00492
6	21,93241	20,00747	20,10995	20,0029

Πίνακας 2: Θερμοκρασία του RT27 κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Δεκεμβρίου για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα [hrs]	T [°C] Νότος	T [°C] Ανατολή	T [°C] Δύση	T [°C] Βορράς
7	20,29151	20,00162	20,03379	20,00116
8	20,19432	20,02344	20,0424	20,02317
9	20,60897	20,48799	20,29423	20,28289
10	21,98658	21,594	20,87325	20,86657
11	23,21023	22,4945	21,55166	21,54772
12	23,73154	22,75399	22,13043	22,1281
13	24,16052	22,78362	22,62435	22,42397
14	24,50004	22,76248	23,09788	22,46251
15	24,74649	22,66429	23,52593	22,38054
16	24,86286	22,47359	23,84997	22,16778
17	24,78484	22,15674	23,86255	21,71591
18	24,57927	21,55805	23,62918	21,1179
19	24,35958	20,9184	23,37077	20,65895
20	24,13338	20,54136	23,09421	20,38842
21	23,89927	20,31911	22,79069	20,22896
22	23,65525	20,1881	22,44121	20,13496
23	23,39839	20,11088	21,98572	20,07955
24	23,12404	20,06536	21,36674	20,04689
1	22,82394	20,03852	20,80563	20,02764
2	22,48078	20,02271	20,47488	20,01629
3	22,04296	20,01339	20,27992	20,0096
4	21,42293	20,00789	20,165	20,00566
5	20,83876	20,00465	20,09726	20,00334
6	20,49441	20,00274	20,05733	20,00197

Πίνακας 3: Θερμοκρασία του RT27 κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Ιανουαρίου για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα [hrs]	T [°C] Νότος	T [°C] Ανατολή	T [°C] Δύση	T [°C] Βορράς
7	20,27871	20,00222	20,03835	20,00144
8	20,23437	20,07139	20,09268	20,07093
9	20,76896	20,66664	20,41943	20,4066
10	22,18873	21,85565	21,03621	21,02865
11	23,33516	22,67671	21,72522	21,72076
12	23,78253	22,86006	22,27069	22,26972
13	24,17083	22,8959	22,69949	22,53203
14	24,48575	22,8814	23,13836	22,5727
15	24,71472	22,79307	23,55955	22,5024
16	24,82955	22,62097	23,90779	22,31817
17	24,75943	22,344	23,95052	21,96882
18	24,55441	21,88047	23,72224	21,3844
19	24,33403	21,26009	23,46922	20,81604
20	24,10701	20,74277	23,2002	20,48102
21	23,87187	20,43783	22,9082	20,28354
22	23,62655	20,25808	22,5794	20,16713
23	23,36798	20,15213	22,17742	20,09852
24	23,09119	20,08967	21,55083	20,05807
1	22,78731	20,05286	20,91415	20,03423
2	22,43718	20,03116	20,53885	20,02018
3	21,97975	20,01837	20,31763	20,01189
4	21,36081	20,01083	20,18723	20,00701
5	20,80213	20,00638	20,11036	20,00413
6	20,47282	20,00376	20,06505	20,00244

Πίνακας 4: Θερμοκρασία του RT27 κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Φεβρουαρίου για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα [hrs]	T [°C] Νότος	T [°C] Ανατολή	T [°C] Δύση	T [°C] Βορράς
7	20,48053	20,00642	20,10259	20,00341
8	20,66143	20,51454	20,28558	20,22712
9	21,63734	21,76305	20,85471	20,82025
10	22,78995	22,77512	21,62084	21,60053
11	23,50713	23,16989	22,35582	22,35775
12	23,95225	23,31903	22,76986	22,78596
13	24,33267	23,3602	23,0362	22,91515
14	24,63683	23,36032	23,43351	22,96617
15	24,85205	23,30479	23,85896	22,93656
16	24,96351	23,19002	24,25227	22,82902
17	24,93843	23,00924	24,34657	22,63491
18	24,77765	22,73756	24,1418	22,30834
19	24,56305	22,37709	23,908	21,77067
20	24,34291	21,8873	23,66439	21,14347
21	24,11618	21,26715	23,40807	20,67402
22	23,8814	20,74693	23,13447	20,39731
23	23,63654	20,44028	22,83554	20,23419
24	23,37856	20,25953	22,49449	20,13805
1	23,10263	20,15298	22,06228	20,08137
2	22,80009	20,09017	21,44165	20,04797
3	22,45245	20,05315	20,84979	20,02827
4	22,0022	20,03133	20,50091	20,01667
5	21,38304	20,01847	20,29527	20,00982
6	20,81524	20,01089	20,17405	20,00579

Πίνακας 5: Θερμοκρασία του RT27 κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Μαρτίου για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα [hrs]	T [°C] Νότος	T [°C] Ανατολή	T [°C] Δύση	T [°C] Βορράς
7	20,72134	20,05474	20,29626	20,00922
8	21,04876	21,00791	20,59875	20,42955
9	22,3488	22,93777	21,45264	21,35291
10	23,35139	24,01115	22,40003	22,34124
11	23,78232	24,1968	22,97977	22,94277
12	24,19218	24,28586	23,17113	23,14409
13	24,54693	24,30425	23,4243	23,28612
14	24,82601	24,2955	23,80626	23,36062
15	25,01441	24,25113	24,23359	23,36932
16	25,10079	24,16802	24,6454	23,31572
17	25,07849	24,04304	24,77022	23,19833
18	24,93429	23,84943	24,5894	22,97394
19	24,72326	23,60303	24,36999	22,65494
20	24,50732	23,343	24,14412	22,27471
21	24,28561	23,06415	23,91042	21,7075
22	24,05698	22,75703	23,66692	21,07356
23	23,81984	22,40073	23,41075	20,63281
24	23,57197	21,92452	23,13735	20,37302
1	23,30997	21,30529	22,83874	20,21988
2	23,02829	20,76941	22,49826	20,12961
3	22,71665	20,45353	22,06756	20,0764
4	22,35151	20,26734	21,44674	20,04503
5	21,84552	20,15758	20,85279	20,02654
6	21,22361	20,09289	20,50268	20,01565

Πίνακας 6: Προσφερόμενη θερμότητα του RT27 κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Νοεμβρίου για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα [hrs]	T [°C] Νότος	T [°C] Ανατολή	T [°C] Δύση	T [°C] Βορράς
7	1000,87	3,35779	49,4156	1,30289
8	691,208	119,511	93,336	64,9757
9	1082,31	751,901	367,855	351,138
10	2275,29	1812,86	876,319	866,465
11	3147,03	2428,92	1436,36	1430,55
12	3404,29	2503,58	1813,61	1810,9
13	3663,18	2504,19	2112,67	1961,38
14	3883,59	2480,52	2487,97	2004,84
15	4048,07	2419,2	2843,92	1973,43
16	4134,13	2312,82	3136,13	1866,83
17	4086,25	2153,62	3183,02	1665,13
18	3941,12	1921,21	3019,58	1233,96
19	3783,84	1599,1	2835,63	740,452
20	3623,4	1124,81	2642,57	436,463
21	3459,3	663,025	2437,25	257,276
22	3290,89	390,824	2214,33	151,652
23	3117,34	230,373	1963,13	89,3923
24	2937,49	135,795	1655,48	52,6928
1	2749,73	80,0449	1178,04	31,06
2	2551,62	47,1829	694,4	18,3085
3	2339,22	27,8122	409,318	10,792
4	2105,4	16,3941	241,275	6,36143
5	1834,4	9,66356	142,221	3,74978
6	1473,43	5,69624	83,8327	2,21033

Πίνακας 7: Προσφερόμενη θερμότητα του RT27 κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Δεκεμβρίου για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα [hrs]	T [°C] Νότος	T [°C] Ανατολή	T [°C] Δύση	T [°C] Βορράς
7	222,272	1,23217	25,7673	0,88409
8	148,163	17,8704	32,3328	17,6653
9	464,328	372,08	224,342	215,696
10	1514,73	1215,39	665,838	660,742
11	2447,74	1902,01	1183,11	1180,11
12	2845,22	2099,86	1624,41	1622,64
13	3172,31	2122,45	2001,01	1848,23
14	3431,19	2106,34	2362,07	1877,61
15	3619,1	2031,47	2688,45	1815,12
16	3707,84	1886,06	2935,52	1652,89
17	3648,35	1644,47	2945,12	1308,34
18	3491,6	1187,98	2767,18	852,378
19	3324,09	700,264	2570,14	502,439
20	3151,62	412,774	2359,27	296,165
21	2973,11	243,312	2127,84	174,576
22	2787,05	143,422	1861,38	102,905
23	2591,21	84,5406	1514,07	60,6578
24	2382,02	49,8329	1042,11	35,7551
1	2153,2	29,3743	614,277	21,076
2	1891,55	17,3148	362,089	12,4234
3	1557,71	10,2063	213,435	7,32302
4	1084,96	6,01616	125,81	4,31659
5	639,534	3,54626	74,1597	2,54444
6	376,977	2,09036	43,7138	1,49983

Πίνακας 8: Προσφερόμενη θερμότητα του RT27 κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Ιανουαρίου για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα [hrs]	T [°C] Νότος	T [°C] Ανατολή	T [°C] Δύση	T [°C] Βορράς
7	212,512	1,69062	29,2381	1,09484
8	178,7	54,4306	70,6687	54,0794
9	586,319	508,299	319,805	310,026
10	1668,86	1414,9	790,089	784,325
11	2542,99	2040,94	1315,44	1312,05
12	2884,1	2180,74	1731,35	1730,61
13	3180,17	2208,07	2058,31	1930,62
14	3420,29	2197,01	2392,94	1961,63
15	3594,88	2129,66	2714,09	1908,03
16	3682,43	1998,44	2979,61	1767,56
17	3628,97	1787,25	3012,19	1501,19
18	3472,64	1433,82	2838,13	1055,58
19	3304,61	960,795	2645,21	622,216
20	3131,51	566,346	2440,09	366,769
21	2952,22	333,836	2217,45	216,194
22	2765,17	196,781	1966,74	127,437
23	2568,01	115,994	1660,24	75,1182
24	2356,97	68,3731	1182,48	44,2788
1	2125,27	40,3029	697,018	26,1004
2	1858,3	23,7568	410,861	15,385
3	1509,52	14,0035	242,184	9,06877
4	1037,59	8,25446	142,757	5,34564
5	611,612	4,86564	84,1488	3,15101
6	360,518	2,86808	49,6019	1,85738

Πίνακας 9: Προσφερόμενη θερμότητα του RT27 κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Φεβρουαρίου για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα [hrs]	T [°C] Νότος	T [°C] Ανατολή	T [°C] Δύση	T [°C] Βορράς
7	366,394	4,89298	78,2245	2,60282
8	504,329	392,323	217,749	173,173
9	1248,44	1344,29	651,702	625,427
10	2127,28	2115,97	1235,86	1220,37
11	2674,12	2416,98	1796,27	1797,74
12	3013,51	2530,7	2111,96	2124,24
13	3303,57	2562,09	2315,04	2222,74
14	3535,49	2562,17	2617,98	2261,65
15	3699,59	2519,84	2942,38	2239,07
16	3784,57	2432,32	3242,27	2157,07
17	3765,45	2294,49	3314,18	2009,07
18	3642,87	2087,33	3158,04	1760,06
19	3479,23	1812,49	2979,77	1350,1
20	3311,38	1439,03	2794,02	871,871
21	3138,5	966,177	2598,59	513,929
22	2959,49	569,518	2389,97	302,938
23	2772,79	335,705	2162,04	178,568
24	2576,09	197,883	1902	105,258
1	2365,7	116,643	1572,45	62,045
2	2135,02	68,7561	1099,23	36,5727
3	1869,94	40,5286	647,947	21,558
4	1526,64	23,8898	381,936	12,7075
5	1054,54	14,082	225,134	7,49049
6	621,606	8,3007	132,706	4,41531

Πίνακας 10: Προσφερόμενη θερμότητα του RT27 κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Μαρτίου για κάθε προσανατολισμό υαλοπίνακα

Ωρα [hrs]	T [°C] Νότος	T [°C] Ανατολή	T [°C] Δύση	T [°C] Βορράς
7	550,011	41,7418	225,893	7,03246
8	799,66	768,509	456,532	327,524
9	1790,92	2239,99	1107,61	1031,56
10	2555,37	3058,42	1829,97	1785,15
11	2883,95	3199,97	2272,01	2243,8
12	3196,45	3267,88	2417,92	2397,3
13	3466,94	3281,9	2610,96	2505,6
14	3679,74	3275,23	2902,19	2562,41
15	3823,39	3241,4	3228,03	2569,04
16	3889,25	3178,03	3542,02	2528,17
17	3872,25	3082,74	3637,19	2438,66
18	3762,3	2935,12	3499,33	2267,57
19	3601,39	2747,24	3332,03	2024,34
20	3436,74	2548,97	3159,81	1734,42
21	3267,69	2336,35	2981,61	1301,93
22	3093,36	2102,18	2795,95	818,567
23	2912,56	1830,51	2600,63	482,508
24	2723,56	1467,41	2392,17	284,417
1	2523,79	995,257	2164,48	167,651
2	2309,01	586,659	1904,88	98,8229
3	2071,39	345,809	1576,48	58,2517
4	1792,98	203,839	1103,11	34,3368
5	1407,17	120,154	650,236	20,24
6	932,975	70,8255	383,285	11,9306

Βιβλιογραφία

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

- [1] «http://www.cres.gr/energy-saving/technologies_exikonomisis_ener.htm,» [Ηλεκτρονικό].
- [2] EUROACE, Ενεργειακή ζήτηση τυπικού κτιρίου κατοικίας, 2008.
- [3] Eurostat, Energy consumption in households and number of households combined, 2008.
- [4] «<http://www.omfidas-lamias.gr/enhmerwsh/002.pdf>,» [Ηλεκτρονικό].
- [5] «<http://www.sellandbuild.com/statistically/5477>,» [Ηλεκτρονικό].
- [6] Ά. Μ. Παπαδόπουλος, Θερμική άνεση στα κτίρια, νέα πρότυπα και βελτίωση θερμικής άνεσης στα κτίρια, 2006.
- [7] «<http://www.econ3.gr>,» [Ηλεκτρονικό].
- [8] «<http://www.protek-usa.com/pdf-new/Heat-Gain-Loss-Buildings.pdf>,» [Ηλεκτρονικό].
- [9] Α. Γ. Κορωναίος και Γ. Ι. Πουλάκος, Τεχνικά υλικά, τόμος 2, 2005.
- [10] Ξ. Κακάτσιος, Αρχές μεταφοράς θερμότητας και μάζης, 2006.
- [11] «<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1>,» [Ηλεκτρονικό].
- [12] «<http://site.heatshieldsolution.com>,» [Ηλεκτρονικό].
- [13] M. Fraser, Increasing thermal mass in lightweight dwellings using phase change materials- a literature review, 2009.
- [14] «<http://www.zeroenergybuildings.org/2011/07/blog-post.html>,» [Ηλεκτρονικό].
- [15] «<http://www.anelixi.org/oikologiki-arxitektoniki/bioklimatikos-sxediasmos-ktirion/thermomonosithermiki-maza/>,» [Ηλεκτρονικό].
- [16] «http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/oxe_thermiki_maza.htm,» [Ηλεκτρονικό].
- [17] H. Mehling και L. F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications, New York: Springer, 2008.
- [18] N. Yu, R. Z. Wang και L. W. Wang, Sorption thermal storage for solar energy.
- [19] A. Sharma, V. Tyagi, C. Chen και D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications.
- [20] S. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part 1: Heat storage materials and techniques, 1996.
- [21] H. P. Garg, S. C. Mullick και A. K. Bhargava, Solar thermal energy storage, Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1985.
- [22] P. Tatsidjodoung, N. L. Pierres και L. Luo, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications.
- [23] «<http://www.eolss.net/ebooks/Sample%20Chapters/C08/E3-14-02-00.pdf>,» [Ηλεκτρονικό].
- [24] D. David, F. Kuznik και J.-J. Roux, Numerical study of the influence of the convective heat transfer on the dynamical behaviour of a phase change material wall.
- [25] R. A. Serway και J. W. Jewett, Principles of physics: a calculus- based text, 2006.

- [26] F. P. Incropera και D. P. DeWitt, Introduction to heat transfer, New York: John Wiley and Sons Publishing Co., 1990.
- [27] H. O. Paksoy, Thermal energy storage for sustainable energy consumption- Fundamentals, case studies and design, Springer, 2007.
- [28] A. Pasupathy, R. Velraj και R. V. Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments.
- [29] I. Ceróna, N. Jaview και K. Mohamed, Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use.
- [30] R. Baetens, B. P. Jelle και G. Arild, Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review.
- [31] P. Arce, C. Castellón, A. Castell και L. F. Cabeza, Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings.
- [32] J. Mazo, M. Delgado, J. M. Marin και B. Zalba, Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump.
- [33] J. N.-W. Chiu, Heat transfer aspects of using phase change material in thermal energy storage applications.
- [34] Ι. Μανδηλαράς, Μ. Φούντη, Μ. Πατρώνης και Κ. Λασκαρίδης, Πολυ-Λειτουργικά δομικά προϊόντα με βάση μάρμαρο και υλικά αποθήκευσης ενέργειας με ιδιότητες αποθήκευσης ενέργειας, 2008.
- [35] L. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia και A. I. Fernandez, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review.
- [36] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gaspar και P. Santos, Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency.
- [37] A. Sharma, A. Shukla, C. R. Chen και S. Dwivedi, Development of phase change materials for building applications.
- [38] P. A. Maldonado, Application of passive thermal energy storage in buildings using PCM and awnings.
- [39] W. Zhao, Characterization of Encapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage, 2013.
- [40] «<http://www.micronal.de/portal/streamer?fid=309980>,» [Ηλεκτρονικό].
- [41] Q. T. Nguyen, T. Ngo και P. Mendis, «Performance-enhancement of Phase Change Materials for Energy Conservation in the Built Environment: A State-of-the-art Review».
- [42] H. Mehling και L. F. Cabeza, «Phase change materials and their basic properties».
- [43] G. A. Lane, «Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, vol. I: Background and Scientific Principles,» Florida, CRC Press, Inc, , 1983.
- [44] A. F. Regin, S. C. Solanki και J. S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review.
- [45] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang και H. Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook.
- [46] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza και H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications.

- [47] L. Bledjlan, D. V. Hale, M. J. Hoover και M. J. O'Neill, Spacecraft Thermal Control: 11. Phase - Change Materials.
- [48] D. Zhou, C. Y. Zhao και Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications.
- [49] E. Rodriguez-Ubinas, L. Ruiz-Valero, S. Vega και J. Neila, Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses.
- [50] «<http://www.ise.fraunhofer.de/en>,» [Ηλεκτρονικό].
- [51] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames και M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS).
- [52] «<http://www.marketsandmarkets.com>,» [Ηλεκτρονικό].
- [53] A. Solé, L. Miró, C. Barreneche, I. Martorell και L. F. Cabeza, Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM).
- [54] L. Klimes, P. Charvat και M. Ostry, CHALLENGES IN THE COMPUTER MODELING OF PHASE CHANGE MATERIALS.
- [55] C. Barreneche, A. Solé, L. Miró, I. Martorell, A. I. Fernandez και L. F. Cabeza, Study on differential scanning calorimetry analysis with two operation modes and organic and inorganic phase change material (PCM).
- [56] «http://www.univie.ac.at/chemwiki/lib/exe/fetch.php?media=master:anorg:char_anorg_mat:2_dYNAMIC_METHODS.PDF,» [Ηλεκτρονικό].
- [57] «http://en.wikipedia.org/wiki/Differential_thermal_analysis,» [Ηλεκτρονικό].
- [58] Y. Zhang και Y. Jiang, A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials, 1999.
- [59] H. Hiki, K. S. Kuk και K. Y. Shik, Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials.
- [60] S. B. Stankovic και P. A. Kyriacou, Improved measurement technique for the characterization of organic and inorganic phase change materials using the T-history method.
- [61] E. Günther, S. Hiebler και H. Mehling, DETERMINATION OF THE HEAT STORAGE CAPACITY OF PCM AND PCM-OBJECTS AS A FUNCTION OF TEMPERATURE.
- [62] «http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Stefan,» [Ηλεκτρονικό].
- [63] H. Yang και Y. He, Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods.
- [64] P. Lamberg, R. Lehtiniemi και A.-M. Henell, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage.
- [65] A. M. Khudhair, M. M. Farid, J. J. Chen και P. K. Bansal, Thermal Energy Storage in Buildings Using PCM: Computer Simulation.
- [66] «<http://www.pcm-ral.de/en/products/planungs-und-simulationsprogramme.html>,» [Ηλεκτρονικό].
- [67] «http://www.messib.eu/partners/p13.php?searched=pcm&advsearch=oneword&highlight=ajaxSearch_highlight+ajaxSearch_highlight1,» [Ηλεκτρονικό].
- [68] S. Shrestha, W. Miller, T. Stovall, A. Desjarlais, K. Childs, W. Porter, M. Bhandari και S. Coley,

MODELING PCM-ENHANCED INSULATION SYSTEM AND BENCHMARKING ENERGYPLUS AGAINST CONTROLLED FIELD DAT.

- [69] «www.messib.eu,» [Ηλεκτρονικό].
- [70] G. Susman, THE APPLICATION OF PHASE CHANGE MATERIALS TO COOL BUILDINGS.
- [71] «http://energain.co.uk/Energain/en_GB/uses_apps/lightweight_constructions.html,» [Ηλεκτρονικό].
- [72] B. L. S. Gowreesunker, PHASE CHANGE THERMAL ENERGY STORAGE FOR THE THERMAL CONTROL OF LARGE THERMALLY LIGHTWEIGHT INDOOR SPACES.
- [73] L. Braganca, M. Pinheiro, S. Jalali, R. Mateus, R. Amoeda και M. C. Guedes, Portugal SB07 Sustainable Construction, Materials and Practices.
- [74] «<http://www.micronal.de/portal/streamer?fid=309980>,» [Ηλεκτρονικό].
- [75] «<http://www.bine.info/en/topics/energy-systems/heating-cooling-storage/publikation/latentwaermespeicher-in-gebaeuden/baustoffe-stabilisieren-raumklima/>,» [Ηλεκτρονικό].
- [76] Σ. Λινάρδος, «Η ελληνική κατοικία του μέλλοντος,» *Σύγχρονη Τεχνική Επιθεώρηση-mechanical*, αρ. 225, Φεβρουάριος 2011.
- [77] «http://www.knauf.gr/www/el/nea/newsletter/editions/march_2012/market_news/emp/market_news_1.html,» [Ηλεκτρονικό].
- [78] «http://demohouse.hmcs.mech.ntua.gr/demohouse_site/,» [Ηλεκτρονικό].
- [79] «http://www.messib.eu/about_project/MESSIB_results/computational_tools/fire_prediction.php?searched=pcm&advsearch=oneword&highlight=ajaxSearch_highlight+ajaxSearch_highlight1,» [Ηλεκτρονικό].
- [80] D. Heim και J. A. Clarke, Numerical modelling and thermal simulation of PCM–gypsum composites with ESP-r.
- [81] R. Velraj και A. Pasupathy, PHASE CHANGE MATERIAL BASED THERMAL STORAGE FOR ENERGY CONSERVATION IN BUILDING ARCHITECTURE.
- [82] V. V. Tyagi και D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art.
- [83] C. Benard, D. Gobin και M. Gutierrez, Experimental results of a latent-heat solar roof, used for breeding chickens.
- [84] «<http://www.pcm-ral.de/en/members/basf.html>,» [Ηλεκτρονικό].
- [85] «<http://www.datumphasechange.com/RACUSCeilingBrochure.pdf>,» [Ηλεκτρονικό].
- [86] M. Stamatiadou, K. Antonopoulos και M. Founti, ENERGY SAVINGS USING FLOOR TILES WITH PHASE CHANGE MATERIALS IN A S. EUROPEAN COUNTRY.
- [87] H. Weinlaeder, W. Koerner και M. Heidenfelder, Monitoring results of an interior sun protection system with integrated latent heat storage.
- [88] H. Weinlader, A. Beck και J. Fricke, PCM–facade-panel for day lighting and room heating.
- [89] «<http://www.bine.info/en/publications/themeninfos/publikation/latentwaermespeicher-in-gebaeuden/baustoffe-stabilisieren-raumklima/>,» [Ηλεκτρονικό].
- [90] «<http://glassxpcm.com/cms/wp-content/themes/glassx/pdfs/GlassX-Brochure-Web.pdf>,» [Ηλεκτρονικό].

- [91] J. Košny, D. Yarbrough, W. Miller, T. Petrie, P. Childs και A. M. Syed, PCM-Enhanced Building Envelopes in Current ORNL Research Projects.
- [92] J. Kosny, N. Shukla και A. Fallahi, Cost Analysis of Simple Phase Change Material-Enhanced Building Envelopes in Southern U.S. Climates.
- [93] F. Bruno, USING PHASE CHANGE MATERIALS (PCMs) FOR SPACE HEATING AND COOLING IN BUILDINGS.
- [94] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, P. Dolado, B. Zalba και L. F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization.
- [95] M. M. Alkilani, K. Sopian, M. A. Alghoul, M. Sohif και M. H. Ruslan, Review of solar air collectors with thermal storage units.
- [96] T. Kousksou, P. Bruel, G. Cherreau, V. Leoussoff και T. El Rhafiki, PCM storage for solar DHW: From an unfulfilled promise to a real benefit.
- [97] J. PRAKASH, H. P. GARG και G. DATTA, A SOLAR WATER HEATER WITH A BUILT-IN LATENT HEAT STORAGE.
- [98] M. Kenisarin και K. Mahkamov, Solar energy storage using phase change materials.
- [99] S. Canbazoglu, A. Sahinaslan, A. Ekmekyapar, Y. G. Aksoy και F. Akarsu, Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water-heating system.
- [100] E.-B. S. Mettawee και G. M. Assassa, Experimental study of a compact PCM solar collector.
- [101] P. Biwole, P. Eclache και F. Kuznik, Improving the performance of solar panels by the use of phase-change materials.
- [102] A. L. H. Al-Mosawi, Thermal Energy Storage for Building-Integrated Photovoltaic Components.
- [103] M. C. Browne, I. Severino, P. Patil, K. O'Farrell, L. M. Candanedo, S. J. McCormack και B. Norton, Initial system design and experimental set-up for a photovoltaic/phase change material system.
- [104] B. L. Gowreesunker και S. A. Tassou, Evaluation of the energy impact of PCM tiles in an Airport Terminal Departure hall.
- [105] «<http://www.puretemp.com/industries.html?ind=ind1>,» [Ηλεκτρονικό].
- [106] «<http://www.teappcm.com/applications.htm>,» [Ηλεκτρονικό].
- [107] S. Al-Hallaj και R. Kizilel, Applications of Phase Change Materials for Sustainable Energy.
- [108] P. Kauranen, J. Heikkinen, L. Wikström και L. Pulkki, USE OF A PCM ACCUMULATOR IN TEMPERATURE-CONTROLLED TRANSPORTATION OF FOODSTUFFS.
- [109] E. Oró, A. de Gracia, A. Castell, M. M. Farid και L. F. Cabeza, Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications.
- [110] «www.rubitherm.com,» [Ηλεκτρονικό].
- [111] «http://www.greenerpackage.com/regulations/thermal_shipper_protects_h1n1_vaccines_chicago,» [Ηλεκτρονικό].
- [112] «<http://www.argo-sa.gr/admin/contents/257.pdf>,» [Ηλεκτρονικό].
- [113] S. Mondal, Phase change materials for smart textiles – An overview.
- [114] «<http://www.popsci.com/science/article/2011-08/new-gel-glue-method-rejoins-cut-blood>-

vessels-better-stitches,» [Ηλεκτρονικό].

- [115] «<http://illuminate.usc.edu/2/get-that-34-just-right-34-feel-incorporating-phase-change-materials-into-textiles/>,» [Ηλεκτρονικό].
- [116] G. Erkan, Enhancing The Thermal Properties of Textiles With Phase Change Materials.
- [117] R. E. Reinertsen, H. Fårevik, K. Holbø, R. Nesbakken, J. Reitan, A. Røyset και M. S. Le Thi, Optimizing the Performance of Phase-Change Materials in Personal Protective Clothing Systems.
- [118] F. L. Tan και S. C. Fok, Cooling of helmet with phase change material, Applied Thermal Engineering, 2006.
- [119] «www.outlast.com,» [Ηλεκτρονικό].
- [120] «www.climator.com,» [Ηλεκτρονικό].
- [121] A. Jamekhorshid και S. M. Sadrameli, Application of Phase Change Materials (PCMs) in Maintaining Comfort Temperature inside an Automobile.
- [122] «<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/techbr.pdf>,» [Ηλεκτρονικό].
- [123] «<http://www.pcmproducts.net/files/PCM%20Products%20General.pdf>,» [Ηλεκτρονικό].
- [124] H. Mehling και L. F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM, Heat and Mass Transfer , Chapter 7: Applications in transport and storage containers, Springer Berlin Heidelberg publications , 2008.
- [125] F. L. Tan και C. P. Tso, Cooling of mobile electronic devices using phase change materials.
- [126] «<http://news.discovery.com/tech/phase-change-materials-bring-us-closer-to-brain-like-computers-110630.htm>,» [Ηλεκτρονικό].
- [127] «<http://cen.acs.org/articles/91/web/2013/09/Scientists-Report-Smallest-Phase-Change.html>,» [Ηλεκτρονικό].
- [128] A. KUMAR, A. SEKAR, D. N. S. JAIN και K. V. GOVINDA, PHASE CHANGE MATERIALS (PCM) FOR THERMAL CONTROL DURING SPACECRAFT TRANSPORTATION.

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

- [1] Κίμων Α. Αντωνόπουλος, Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα, Μέρος Πρώτο, 2008
- [2] Κίμων Α. Αντωνόπουλος, Κλιματισμός, Μέρος Πρώτο, 2011