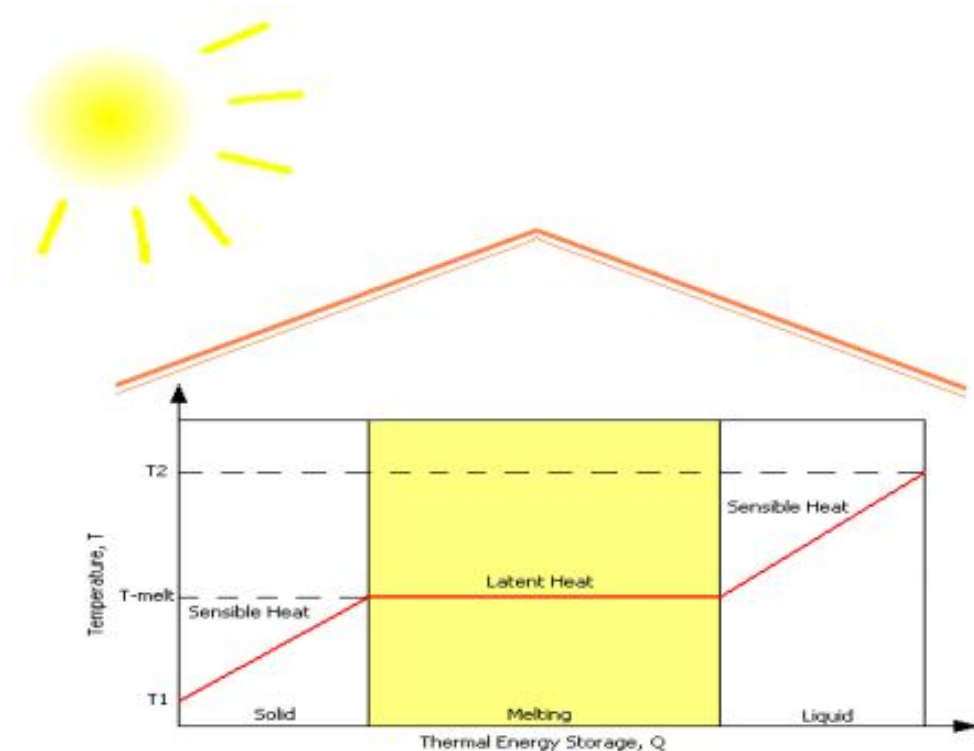




### Τομέας Θερμότητας

#### Διπλωματική Εργασία:

Προσομοίωση και παραμετρική μελέτη ηλιακής φόρτισης τοιχοποιίας με στρώμα υλικών αλλαγής φάσης (PCM), μέσω έναντι υαλοστασίου διάφορων προσανατολισμών για την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης καθόλο το τυπικό έτος Αθηνών.



ΕΚΠΙΟΝΗΣΗ: Μαρία Παναγιώτα Νούρκα

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Πολυτεχνείου

Αθήνα 2013

*Στην αδερφή μου Άννα και την μικρή μου Έρικα.*

## Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της εργασίας οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή Κ. Κίμωνα Αντωνόπουλο καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος , τις πληροφορίες που μου παρείχε για το συγκεκριμένο θέμα, την εποπτεία της εργασίας, την καθοδήγησή, την ενθάρρυνση και τον χρόνο που μου προσέφερε για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα αγαπημένα μου πρόσωπα την οικογένεια μου για την διαρκή στήριξη και την κάθε είδους βοήθεια που μου προσέφεραν, τους φίλους μου και συμφοιτητές μου για αυτά τα όμορφα χρόνια .

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική ασχοληθήκαμε με την θεωρητική και πειραματική μελέτη των υλικών αλλαγής φάσης. Στο πρώτο (θεωρητικό) μέρος γίνεται αρχικά αναφορά για την αναγκαιότητα της χρήσης νέων τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια και κυρίως των υλικών αλλαγής φάσης. Έπειτα ακολουθεί η παρουσίαση των ιδιοτήτων τους, των προβλημάτων που συχνά εμφανίζονται καθώς και η ταξινόμηση τους σε κατηγορίες. Στη συνέχεια αναλύονται διεξοδικά όλα τα είδη των εφαρμογών του υλικού, έμφαση δίνεται στο τομέα των κτιρίων και κυρίως στις μελέτες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα για την χρήση των υλικών αλλαγής φάσης σε τοιχοποιία.

Στο δεύτερο μέρος αρχικά γίνεται μια θεωρητική προσομοίωση της ηλιακής φόρτισης εσωτερικής τοιχοποιίας μέσω έναντι υαλοπίνακα όταν ενσωματώνεται σε αυτόν στρώμα υλικού αλλαγής φάσης με σκοπό την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης και ύστερα ακολουθεί παραμετρική μελέτη ως προς διαφόρους παραμέτρους.

## Περιεχόμενα

### Μέρος 1<sup>ο</sup> : Θεωρητική Ανασκόπηση

<u>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> : Εισαγωγή.....</u>	σελ 8
<u>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Υλικά αλλαγής φάσης.....</u>	11
2.1 : Ορισμός.....	11
2.2 : Κριτήρια επιλογής ενός PCM.....	11
2.3 : Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων των PCM.....	15
2.3.1 : Μέθοδος T-History.....	18
2.3.2 : Μειονεκτήματα και τρόποι βελτίωσης της μεθόδου.....	20
2.4 : Κατηγοριοποίηση των PCMS.....	26
2.4.1: Οργανικά.....	26
2.4.1.1 : Παραφίνες.....	26
2.4.1.2 : Μη παραφίνες.....	28
2.4.2 : Ανόργανα.....	30
2.4.2.1 : Ένυδρα άλατα.....	30
2.4.2.2 : Μεταλλικά PCMs.....	31
2.4.3 : Μίγματα PCMs.....	31
2.5 : Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης.....	32
2.6 : Προβλήματα κατά τη χρήση των PCMs.....	35
<u>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> : Εφαρμογές PCM.....</u>	43
3.1 : Γενικές Εφαρμογές .....	43
3.2 : Εφαρμογές σε κτίρια .....	48
3.2.1 : Ενσωμάτωση σε δομικά υλικά .....	48
3.2.2 : Ενεργειακά αποδοτικά παράθυρα.....	50

3.2.3 : Ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης με PCM.....	52
3.2.4 : Οροφές με PCM.....	54
3.2.5 : Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα με PCM.....	57
3.2.6 : Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM.....	58
<u>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> : Επισκόπηση ηλιακής φόρτισης τοιχοποιίας με PCM.....</u>	<u>61</u>
4.1: Υλικά αλλαγής φάσης σε τοιχοποιία.....	61
4.1.1 : Γυψοσανίδα με PCM.....	63
4.1.2 : Ηλιακοί τοίχοι.....	65
4.1.3 : PCM με άλλα δομικά υλικά.....	66
4.2 : Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τοίχων με PCM.....	67
4.3 : Εφαρμογές τοιχοποιίας με PCM και αποτελέσματα.....	68
<u>Μέρος 2<sup>ο</sup> : Θεωρητική προσομοίωση και παραμετρικές μελέτες</u>	
<u>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> :</u>	
5.1 : Παρουσίαση της μελέτης.....	76
5.2 : Υπολογισμός άμεσης, διάχυτης και ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου.....	78
5.2.1 : Υπολογισμός και παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	78
5.2.2 : Σύγκριση αποτελεσμάτων και παρατηρήσεις.....	107
5.2.3: Έλεγχος ορθότητας του χρησιμοποιηθέντος προγράμματος.....	108
5.3 : Προσομοίωση ηλιακής φόρτισης τοιχοποιίας με στρώμα υλικού αλλαγής φάσης (PCM).....	116
5.3.1 : Επιλογή PCM.....	116
5.3.2 : Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM.....	119

5.3.3 : Ηλιακή φόρτιση τοιχοποιίας.....	120
5.3.4 : Ανάγκες συμπληρωματικής ισχύς.....	144
<u>Κεφάλαιο 6</u> : Παραμετρικές μελέτες.....	151
6.1 : 1 <sup>η</sup> Παραμετρική μελέτη ως προς το μοντέλο του χρησιμοποιηθέντος (PCM).....	151
6.2 : 2 <sup>η</sup> Παραμετρική μελέτη ως προς τον τρόπο υπολογισμού της ειδικής θερμοχωρητικότητας .....	204
6.3 : 3 <sup>η</sup> Παραμετρική μελέτη ως προς τις διαστάσεις του έναντι της τοιχοποιίας υαλοπίνακα.....	220
6.4 : 4 <sup>η</sup> Παραμετρική μελέτη ως προς το μήνα και το προσανατολισμό μελέτης για το 48ωρο.....	257
6.5 : 5 <sup>η</sup> Παραμετρική μελέτη ως προς το μήνα και το προσανατολισμό για συνεχείς συνεφιασμένες μέρες.....	272
Βιβλιογραφία .....	284

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### *Εισαγωγή*

Ο κύριος ρόλος των κτιρίων είναι η προστασία του ανθρώπου από τις ακραίες κλιματικές συνθήκες. Ολόκληρη η ιστορία του ανθρώπου αποδεικνύει τη συνεχή προσπάθειά του να επιλέξει ή να κατασκευάσει κατάλληλα καταφύγια. Έτσι οι παραδοσιακές μορφές δόμησης έδιναν ιδιαίτερη προσοχή στις κλιματικές συνθήκες και χρησιμοποιούσαν παθητικές τεχνικές ώστε να εξασφαλίσουν δροσερές συνθήκες το καλοκαίρι και επαρκή θέρμανση το χειμώνα στον εσωτερικό χώρο των κτηρίων. Η μοντέρνα αρχιτεκτονική αντίθετα αγνόησε σε μεγάλο βαθμό της τεχνικές αυτές στηριζόμενη σε ενεργοβόρες, μηχανικές μεθόδους θέρμανσης και ψύξης.

Ως συνέπεια του γεγονότος αυτού ο κτηριακός, θεωρείται ένας από τους πιο ενεργοβόρους τομείς, όντας υπεύθυνος για το 25-40% της συνολικής ζήτησης ενέργειας στις χώρες του οργανισμού οικονομικής συνεργασίας και ανάπτυξης (μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα) και για το 40% της καταναλισκόμενης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Επιπρόσθετα οι απαιτήσεις αυτές σε ενέργεια αυξάνονται με πολύ γρήγορο ρυθμό ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται σημαντικά και η μεταβλητότητα της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργώντας πολλά προβλήματα στο δίκτυο παραγωγής και διανομής. Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι ο όλο και μεγαλύτερος ανταγωνισμός για την εκμετάλλευση πηγών ορυκτών καυσίμων. Ταυτόχρονα η συνεχιζόμενη άνοδος των επιπέδων των αερίων του θερμοκηπίου και η αύξηση των τιμών των ορυκτών καυσίμων είναι η κύρια κινητήρια δύναμη πίσω από τις προσπάθειες για την όλο και πιο αποτελεσματική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε πολλές χώρες του κόσμου η ηλιακή ακτινοβολία θεωρείται από τις περισσότερο υποσχόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενώ επιστήμονες από όλο τον κόσμο ερευνούν για νέες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Προκειμένου να επιτευχθούν, και κυρίως να διατηρηθούν, οι στόχοι μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ζωτική η αναθεώρηση του τρόπου που η ενέργεια αυτή καταναλώνεται στον εμπορικό και οικιακό τομέα.

Η αξιοποίηση μεθόδων εξοικονόμησης και αποθήκευσης ενέργειας είναι ουσιαστικά το ίδιο σημαντική όσο και η ανάπτυξη νέων πηγών. Έτσι τα



τελευταία χρόνια υπάρχει μια νέα τάση στη δόμηση που αναζητεί την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης με ελαχιστοποίηση της χρήσης συμβατικής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό εντάσσεται και η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Materials (PCMs) ή ΥΑΦ) στη δόμηση. Μέσω της λανθάνουσας θερμότητας (latent heat) τα υλικά αυτά μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ μεγαλύτερη θερμική ενέργεια σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά (τούβλο, Μπετόν, πέτρα), που στηρίζονται μόνο στην αισθητή θερμότητα (sensible heat), με αποτέλεσμα να μπορούν να προσθέσουν πολύ μεγαλύτερη θερμική μάζα ανάλογα με τον όγκο τους, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν το σημαντικό πλεονέκτημα ότι η αποθήκευση της ενέργειας αυτής και η ανάκτησή της γίνονται σχεδόν ισοθερμικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές ψύξης/θέρμανσης χώρων.

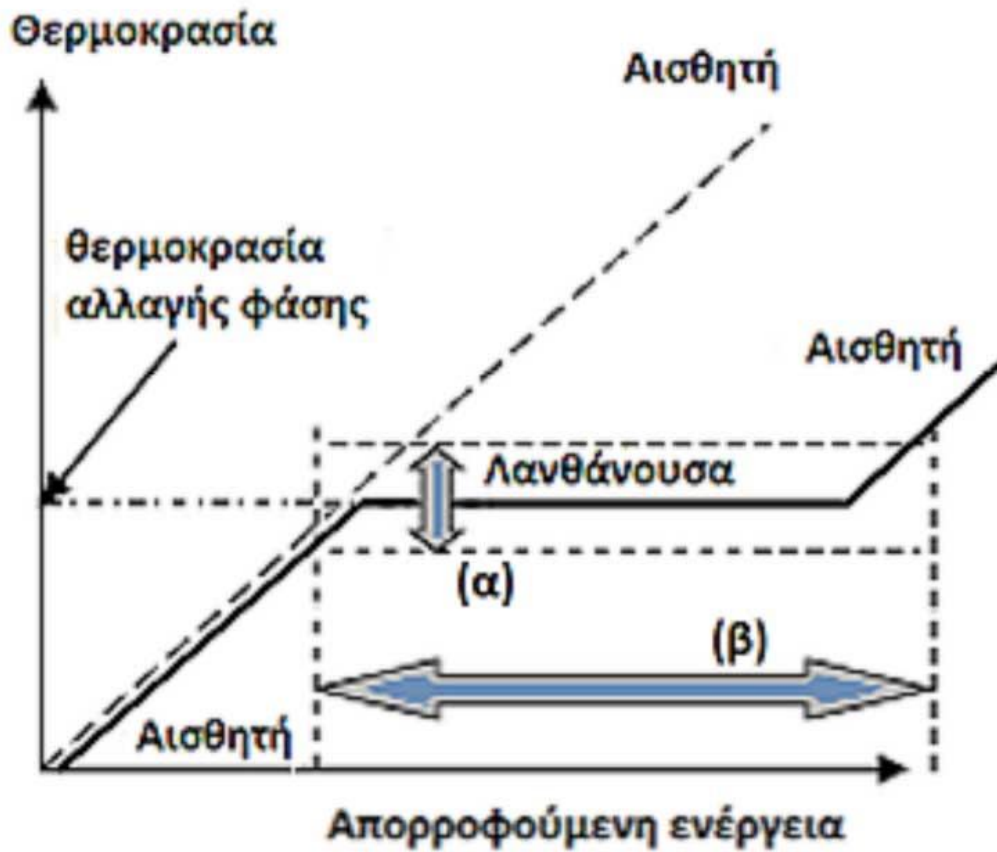
### Αποθήκευση θερμότητας

Η αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή θερμότητας είναι μια τεχνολογία που μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας και την εξισορρόπηση παροχής και ζήτησης ενέργειας ιδιαίτερα στον τομέα της θέρμανσης ή ψύξης χώρων. Η αποθήκευση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάφορες χημικές ή φυσικές διεργασίες που η κάθε μια έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αποθήκευσης θερμότητας είναι υπό τη μορφή της αισθητής θερμότητας. Η αποθήκευση θερμότητας υπό μορφή αισθητής θερμότητας γίνεται κατά κύριο λόγο σε στερεά δομικά στοιχεία, όπως τούβλο, πέτρα κα, καθώς επίσης και σε υγρά, όπως το νερό. Τα αέρια λόγω της χαμηλής θερμοχωρητικότητάς τους δεν χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Στα σύγχρονα κτήρια το μεγάλο κόστος είναι ο κύριος παράγοντας που εμποδίζει την ανάπτυξη τεχνικών αποθήκευσης με τη μέθοδο της αισθητής θερμότητας καθώς απαιτείται μεγάλη μάζα υλικού για την επίτευξη ικανοποιητικής χωρητικότητας αποθήκευσης.

Μια άλλη τεχνική αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι η αποθήκευση με τη μορφή λανθάνουσας ενέργειας (latent heat), δηλαδή με την αλλαγή φάσης του υλικού στο οποίο αποθηκεύουμε θερμότητα (σχήμα 1.1). Όσο και αν αυτό φαίνεται παράξενο, αυτή είναι μια πανάρχαια τεχνική αφού

ένα από τα πρώτα μέσα αποθήκευσης θερμότητας (κρύου) υπήρξε ο πάγος.



Σχήμα 1.1. Αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### *Υλικά αλλαγής φάσης*

#### **2.1 Ορισμός**

Είναι γνωστό ότι η αλλαγή φάσης ενός υλικού από στερεό σε υγρό η από υγρό σε αέριο ακολουθείται από ταυτόχρονη ανταλλαγή ενέργειας με το περιβάλλον, η οποία είναι αποτέλεσμα της αναδιάταξης της μοριακής του κατάταξης. Με τον όρο υλικά αλλαγής φάσης (PCM) ορίζονται εκείνα τα υλικά τα οποία μπορούν να αποθηκεύουν και να ελευθερώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας, ως αποτέλεσμα της αλλαγής φάσης στη μοριακή τους δομή. Πρόκειται δηλαδή για αποθηκευτικά υλικά λανθάνουσας θερμότητας που χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και έπειτα για να απελευθερώσουν θερμότητα.[1]

Η ιδέα για τα υλικά αλλαγής φάσης προήλθε από το νερό, το οποίο μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλα ποσά θερμότητας κατά την αλλαγή φάσης του σε πάγο. Παρατηρήθηκε όμως ότι η χρήση του πάγου παρουσιάζει αρκετά προβλήματα κυρίως λόγω των ιδιοτήτων του νερού. Αυτά τα προβλήματα επικεντρώνονται κυρίως στη θερμοκρασία τήξεως του, στη μεγάλη μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία, καθώς και στο γεγονός ότι η θερμοκρασία προσαγωγής στο σύστημα αποθήκευσης είναι χαμηλή. Ωστόσο η μεγάλη αποθήκευση θερμότητας κατά την αλλαγή φάσης του νερού ήταν αυτό που οδήγησε σε έρευνες για εύρεση υλικών αλλαγής φάσης τα οποία θα παρουσίαζαν τα πλεονεκτήματα του νερού και στα οποία θα ελαχιστοποιούνταν τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα και κυρίως η πολύ χαμηλή και καθόλου λειτουργική θερμοκρασία τήξεως. Έτσι οδηγηθήκαμε στην ανακάλυψη πολλών PCM τα οποία παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης κάνοντας πιο λειτουργική την χρήση τους

#### **2.2 Κριτήρια επιλογής PCM[2,3,4,5,6]**

Για να επιτυγχάνονται τα αναμενόμενα αποτελέσματα της χρήσης των PCM ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή είναι απαραίτητη η γνώση των φυσικών, τεχνικών και των άλλων ιδιοτήτων του. Η επιλογή του γίνεται με βάση αυτές. Για την επιλογή του σωστού υλικού αλλαγής φάσης, δεν υπάρχει πάντα ένα κριτήριο επιλογής. Αντιθέτως ανάλογα με την

εφαρμογή οι μηχανικοί πρέπει να λαμβάνουν υπόψη ένα μεγάλο αριθμό κριτηρίων επιλογής υλικού και να προβούν σε προσεκτική εξέταση των ιδιοτήτων των διαφόρων υποψηφίων, ζυγίζοντας τα σχετικά πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες τους. Βέβαια η εύρεση ενός ιδανικού μέσου θερμικής αποθήκευσης είναι δύσκολη για αυτό κάθε φορά επιδιώκεται ο καλύτερος συνδυασμός των ιδιοτήτων του. Επίσης ο σκοπός χρήσης του PCM είναι ένας σημαντικός παράγοντας καθώς αυτός θέτει την ιεράρχηση των σημαντικότερων ιδιοτήτων που πρέπει να ληφθούν υπόψη σε κάθε περίπτωση. Οι ιδιότητες που πρέπει να έχουν κατά κύριο λόγο όλα τα υλικά αλλαγής φάσης προκειμένου να αποτελεί ένα ιδανικό μέσο αποθήκευσης καθώς και άλλα κριτήρια που πρέπει να πληρούν αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω.

### Θερμικές και φυσικές ιδιότητες

Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PCM είναι σημαντικό να βρίσκεται μέσα στο εύρος θερμοκρασιών της συγκεκριμένης εφαρμογής. Η διαδικασία τήξης που λαμβάνει χώρα στη θερμοκρασία αυτή θα πρέπει επιπλέον να παράγει αρκετή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου ώστε να ικανοποιήσει τις ανάγκες αποθήκευσης της συγκεκριμένης εφαρμογής περιορίζοντας ταυτόχρονα τον όγκο του υλικού που απαιτείται. Πέρα από τη λανθάνουσα θερμότητα ωστόσο και η αισθητή θερμότητα που μπορεί να αποθηκευτεί από το PCM θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Άλλη μια σημαντική ιδιότητα είναι η ενθαλπία αλλαγής φάσης την οποία επιθυμούμε να είναι αρκετά υψηλή ώστε να επιτευχθεί υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης σε σύγκριση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Βέβαια πρέπει να ληφθεί υπόψη και η αποδοτικότητα με την οποία η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να επανακτηθεί. Η μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας αυτής μπορεί να γίνει με την επιλογή ενός υλικού με υψηλή θερμική αγωγιμότητα.

### Χημικές ιδιότητες

Για εφαρμογές υλικών αλλαγής φάσης σε κτήρια μία από τις θεμελιώδεις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η ασφάλεια. Η μακροχρόνια χημική σταθερότητα του υλικού PCM θα πρέπει να εκτιμηθεί πριν την εφαρμογή του στη δομή του κτηρίου. Η ελάχιστη

εκφύλιση του υλικού και η ολοκληρωτική αντιστρεψιμότητά του είναι παράγοντες υψηλής προτεραιότητας καθώς το υλικό PCM πρόκειται να εκτελέσει πολλούς κύκλους αλλαγής φάσης στη διάρκεια της ζωής του.

Επίσης το PCM θα πρέπει να είναι συμβατό με τα υπόλοιπα κατασκευαστικά υλικά και να μην προκαλεί δομικές ζημιές. Δεν πρέπει να είναι τοξικό ή εύφλεκτο και να μην αποτελεί κίνδυνο για τους χρήστες του κτηρίου κατά τη διάρκεια της ζωής του.

Η αλλαγή φάσης του υλικού PCM κατά τους κύκλους της φόρτισης και αποφόρτισης θα πρέπει να είναι ολοκληρωτική και ομογενής. Ένα πρόβλημα που αναγνωρίστηκε στη συμπεριφορά αρκετών υλικών αλλαγής φάσης είναι το φαινόμενο της υπερ-ψύξης ή υπό-ψύξης (super-cooling ή sub-cooling). Το φαινόμενο αυτό δεν επιτρέπει στο PCM να στερεοποιηθεί αμέσως κατά την ψύξη στη θερμοκρασία τήξης αλλά αρχίζει να κρυσταλλοποιείται όταν η θερμοκρασία φτάσει αρκετά χαμηλότερα, με αποτέλεσμα η έκλυση της αποθηκευμένης ενέργειας να γίνεται σε ένα εύρος θερμοκρασιών 5-10°C χαμηλότερα από το σημείο τήξης.

#### Οικονομικά κριτήρια

Η διαθεσιμότητα των διαφόρων τύπων PCM θα είναι ουσιαστικός παράγοντας που θα καθορίσει τη χρήση τους στο μέλλον στη σχεδίαση και κατασκευή κτηρίων. Το ίδιο σημαντικοί είναι παράγοντες όπως το κόστος των υλικών και η ευκολία εφαρμογής τους. Το κόστος των υλικών προς το παρόν για τα εμπορικά διαθέσιμα PCM είναι αρκετά υψηλό (ενδεικτική τιμή 0.5-10 €/kg). Αυτό σημαίνει ότι η αποθήκευση 1kWh=3600kJ απαιτεί 20kg PCM (με πυκνότητα αποθήκευσης 180kJ/kg) ή  $20 \cdot 0.5 = 10\text{€}$ . Αν υποθέσουμε ότι η συμβατική ενέργεια κοστίζει 0.05 €/kWh, η αποπληρωμή της επένδυσης απαιτεί  $10/0.05 = 200$  κύκλους χρήσης. Συνεπώς η εποχική αποθήκευση θερμότητας είναι προς το παρόν ασύμφορη και για να είναι οικονομικά ανταγωνιστική η αποθήκευση με PCM θα πρέπει η φόρτιση και αποφόρτισή τους να γίνεται στη διάρκεια του 24ώρου. Η τιμή των PCM ωστόσο δεν είναι αντιπροσωπευτική για το άμεσο μέλλον αφού θα επηρεαστεί από το εύρος εφαρμογής των υλικών και τη διάδοση της χρήσης τους. Σε κάθε περίπτωση πάντως η επίτευξη θερμικού ελέγχου των χώρων είναι κρίσιμη για την αειφόρο ανάπτυξη στον κτηριακό τομέα και εφόσον η εφαρμογή PCM μπορεί να συντελέσει αποτελεσματικά στην εξοικονόμηση ενέργειας, το αρχικό κόστος εγκατάστασης μπορεί να εξισορροπηθεί από την εξοικονόμηση αυτή.

Όπως προαναφέραμε το υλικό αλλαγής φάσης δεν είναι δυνατό για κάθε εφαρμογή να πληροί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις και ιδιότητες για αυτό η επιλογή ενός υλικού γίνεται συνήθως σε σχέση με τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, την ενθαλπία, τη σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση, και την υπόψυξη οι οποίοι είναι σημαντικοί παράγοντες για την σωστή λειτουργία του. [7-10]. Για να είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας επιθυμητό, πρέπει να πληρούνται κάποια κριτήρια που αφορούν τις ιδιότητες του, μερικά από τα οποία παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Table 3. Selection criteria [8].

Thermodynamic properties	(1) Melting temperature in desired range
	(2) High latent heat of fusion per unit volume
	(3) High thermal conductivity
	(4) High specific heat and high density
	(5) Small volume changes on phase transformation and small vapor pressure at operating temperatures to reduce the containment problems
	(6) Congruent melting
Kinetic properties	(1) High nucleation rate to avoid super cooling
	(2) High rate of crystal growth to meet demands of heat recovery from the storage system
Chemical properties	(1) Complete reversible freezing/melting cycle
	(2) Chemical stability
	(3) No degradation after a large number of freezing/melting cycle
	(4) No corrosiveness
	(5) No toxic, no flammable and no explosive material
Economic properties	(1) Effective cost
	(2) Large-scale availabilities

Σχήμα 2.1. Κριτήρια επιλογής PCM [11]

### **2.3 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων των PCMs [12-15]**

Όπως προαναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο κριτήριο για την επιλογή ενός υλικού αλλαγής φάσης είναι κυρίως κάποιες ιδιότητες τους. Για το λόγο αυτό έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες για την εύρεση μεθόδων μέτρησης των ιδιοτήτων(κυρίως των θερμικών και φυσικών) ενός PCM.Οι τρεις βασικές μέθοδοι που έχουν επικρατήσει και μας δίνουν πληροφορίες κυρίως για τη θερμότητα τήξης, την ειδική θερμότητα και του σημείου τήξης στο πεδίο της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι οι παρακάτω :

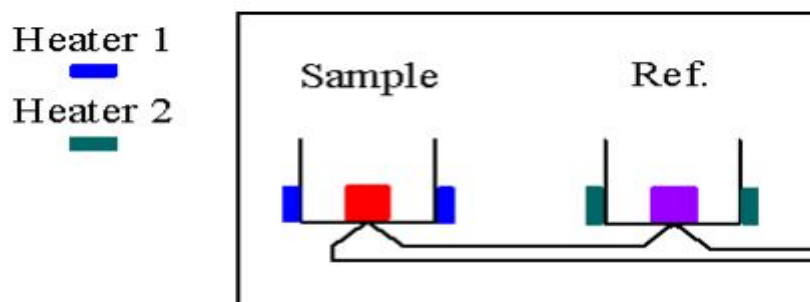
- Οι συμβατικές θερμιδομετρικές μέθοδοι (conventional calorimetry method),
- Οι μέθοδοι διαφορικής θερμικής ανάλυσης (differential thermal analysis-DTA)
- Οι μέθοδοι διαφορικής θερμιδομετρικής σάρωσης(differential scanning calorimetry-DSC).

Η τελευταία μέθοδος είναι η πιο συνηθισμένη. Αποτελεί μια διαδεδομένη πειραματική τεχνική θερμικής ανάλυσης. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για τη μελέτη μεταβάσεων φάσης σε ευρύ φάσμα υλικών όπως κεραμικά, πολυμερή, υγροκρυσταλλικά υλικά κ.ά.

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου στηρίζεται στη μέτρηση της διαφοράς ροής θερμότητας προς μία ουσία-δείγμα και μία ουσία αναφοράς, συναρτήσει της θερμοκρασίας, όταν οι δύο ουσίες υπόκεινται σε ελεγχόμενο πρόγραμμα θέρμανσης ή και ψύξης. Ένα θερμιδόμετρο διαφορικής σάρωσης αποτελείται από ένα σύστημα δύο κυψελίδων οι οποίες θερμαίνονται ή ψύχονται ομοιόμορφα από διαφορετικά θερμαντικά σώματα με σταθερό ρυθμό. Στη μία κυψελίδα περιέχεται το υλικό αναφοράς ενώ στην άλλη η ουσία-δείγμα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος η θερμοκρασία του υπό μελέτη δείγματος παραμένει συνεχώς ίση με αυτή του δείγματος αναφοράς, ενώ η θερμοκρασία και των δύο αυξάνει (ή μειώνεται) γραμμικά με το χρόνο ακολουθώντας τον προκαθορισμένο ρυθμό θέρμανσης (ή ψύξης). Κατά την εφαρμογή της μεθόδου μετράται η διαφορά στη ροή θερμότητας που προσφέρεται (ή απάγεται) στο υπό μελέτη δείγμα για την αύξηση (ή μείωση) της θερμοκρασίας του έναντι αυτής που προσφέρεται (ή απάγεται) σε δείγμα αναφοράς, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Όταν το υπό μελέτη δείγμα

υπόκειται σε μετατροπή φάσης περισσότερη (ή λιγότερη) θερμότητα προσφέρεται σε αυτό προκειμένου η θερμοκρασία του να διατηρηθεί ίση με αυτή του δείγματος αναφοράς. [16]

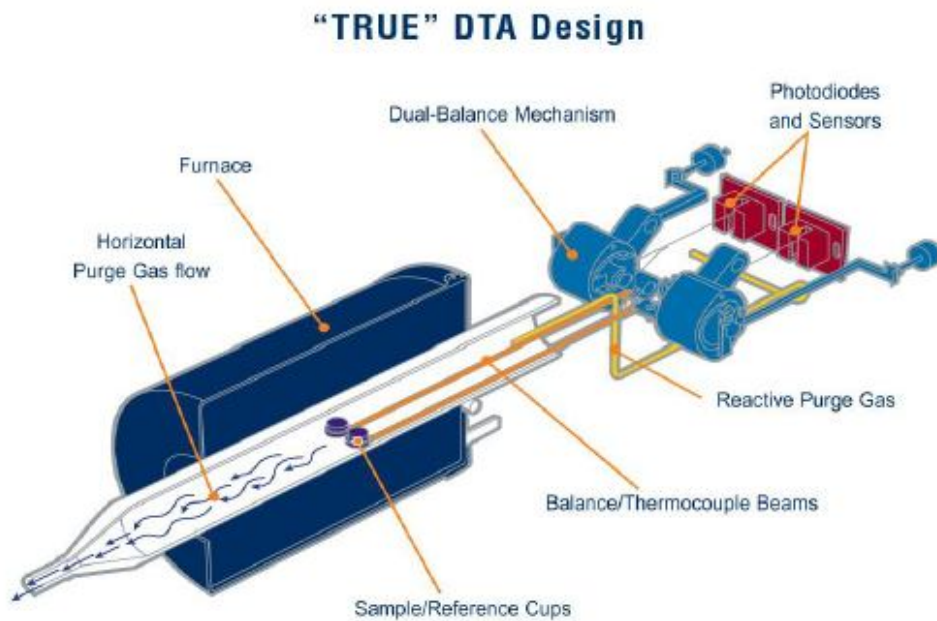
Παρατηρώντας τις διαφορές ροής θερμότητας ανάμεσα στο δείγμα και τη κυψελίδα αναφοράς μπορούμε να καταγράψουμε τα ποσά ενέργειας που απορροφούνται ή απελευθερώνονται κατά τη μετατροπή των διαφόρων φάσεων.



Σχήμα2.3.1:Το υπό μελέτη δείγμα και το δείγμα αναφοράς τοποθετούνται σε κυψελίδες οι οποίες θερμαίνονται από διαφορετικά θερμαντικά σώματα.[16]

Η μέθοδος DTA είναι παρόμοια με την προηγούμενη. Αυτή η τεχνική καταγράφει τη διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ της ουσίας και ενός υλικού αναφοράς ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ενώ η ουσία και το υλικό αναφοράς υποβάλλονται στο ίδιο ελεγχόμενο θερμοκρασιακό πρόγραμμα. Όταν το PCM υφίσταται μετατροπή που περιλαμβάνει αλλαγή ενθαλπίας αυτή η αλλαγή καταδεικνύεται από μία ενδοθερμική ή εξωθερμική απόκλιση από την βασική γραμμή της καταγραφόμενης θερμοκρασίας. Οπότε αυτή η καμπύλη δίνει πληροφορίες για την αποκρυστάλλωση, την τήξη ή την εξάχνωση. Η περιοχή κάτω από την καμπύλη της DTA είναι η ενθαλπία αλλαγής φάσης, η οποία δεν επηρεάζεται από τη θερμοχωρητικότητα του δείγματος προς μέτρηση. Μία τυπική διάταξη αυτής της μεθόδου παρατίθεται στο σχήμα 2.3.2.





Σχήμα 2.3.2 Τοπική διάταξη της μεθόδου DTA[17]

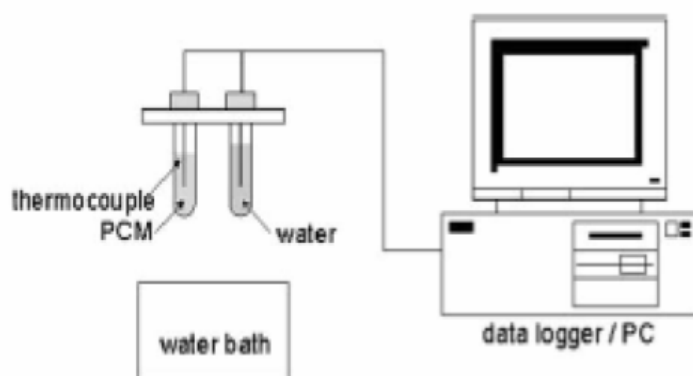
Τα μειονεκτήματα όμως των μεθόδων DSC και DTA όπως το μέγεθος των δειγμάτων το οποίο είναι πολύ μικρό (μεταξύ 1-10mg) σε σύγκριση με το πραγματικό μέγεθος των χρησιμοποιηθέντων PCMs, οπότε οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δειγμάτων είναι συχνά πολύ διαφορετικές από τα πραγματικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις πρακτικές εφαρμογές. Για παράδειγμα στις αλλαγές φάσης μεταξύ στερεού και υγρού των πιο σύνθετων PCMs, ειδικά των ένυδρων αλάτων, αν το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετηθεί μέσα σε ένα μικρό δοχείο, τότε ο βαθμός της υπέρψυξης αυξάνεται όσο ο βαθμός του διαχωρισμού των φάσεων μειώνεται, δηλαδή αποτέλεσμα που είναι αναληθές. Επίσης ο εξοπλισμός, επίσης, για τις δύο αυτές μεθόδους είναι αρκετά πολύπλοκος και ακριβός και είναι αδύνατον να μετρηθούν η θερμότητα της τήξης, η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα διαφόρων δειγμάτων PCM ταυτόχρονα.

Όσον αφορά τώρα τις συμβατικές θερμοδομετρικές μεθόδους, έχουν στο σύνολό τους τα ίδια μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν και για τις άλλες δύο κατηγορίες, εκτός από το πρώτο. Άλλωστε, η διαδικασία αλλαγής φάσης ενός δείγματος PCM κατά τη διάρκεια της μέτρησης είναι δύσκολο να παρατηρηθεί με σαφήνεια χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους.

Λόγω των μειονεκτημάτων αυτών των μεθόδων οι έρευνες έχουν στραφεί σε μία καινούργια μέθοδο που ονομάζεται T-history. Αυτή η μέθοδος βοηθά να προσδιοριστεί το σημείο τήξης, ο βαθμός υπέρψυξης, η θερμότητα της τήξης, η ειδική θερμότητα και η ειδική αγωγιμότητα διαφορετικών δειγμάτων PCMs ταυτόχρονα άρα όπως βλέπουμε είναι ιδιαίτερος χρήσιμη για την επιλογή των υποψηφίων PCM για κάθε εφαρμογή και για την προετοιμασία των PCM για πρακτική χρήση.

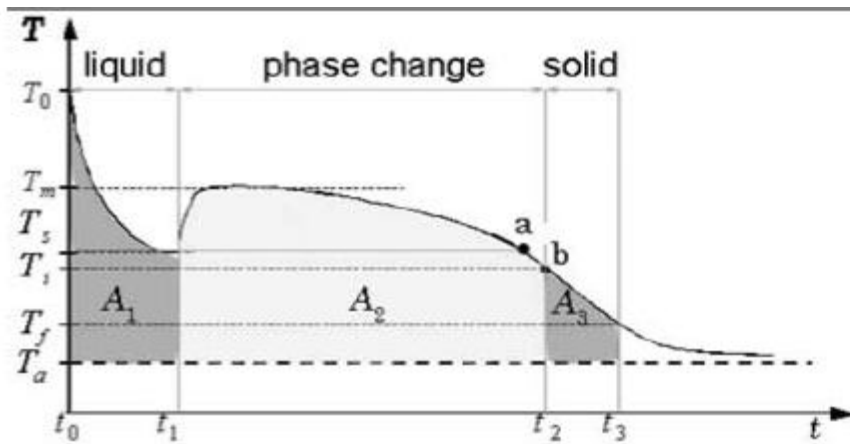
### 2.3.1 Μέθοδος T-history[18-24]

Με τη μέθοδο T-history υπολογίζεται η ειδική θερμοχωρητικότητα ενός υλικού PCM, μέσα από τη σύγκριση του θερμοκρασιακού ιστορικού του PCM και του ιστορικού ενός υλικού αναφοράς, κάτω από σταθερές πειραματικές συνθήκες.



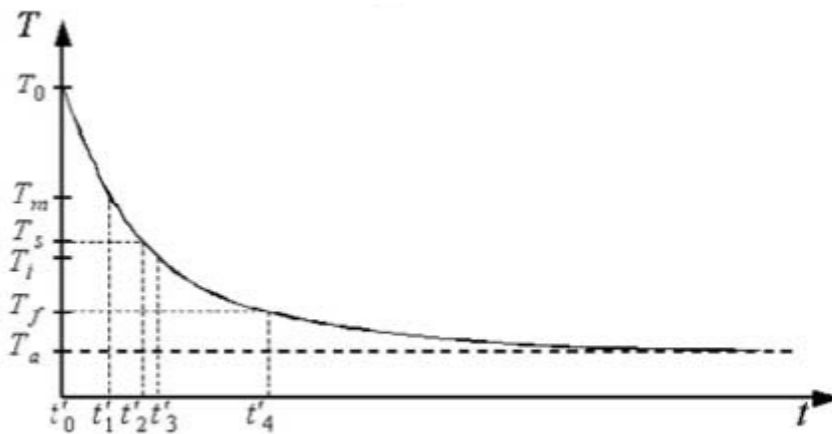
Σχήμα 2.3.1.1 Διάταξη μεθόδου T-history

Στη μέθοδο, δύο δοκιμαστικοί σωλήνες διατηρούνται σε μία θερμοκρασία υψηλότερη από το σημείο ψύξης σε ένα σταθερής θερμοκρασίας λουτρό. Ο ένας σωλήνας είναι γεμάτος με το PCM του οποίου μετρούνται οι ιδιότητες και ο άλλος με ένα υλικό αναφοράς (συνήθως καθαρό νερό) χωρίς PCM. Κατόπιν, οι δύο δοκιμαστικοί σωλήνες απομακρύνονται γρήγορα από το λουτρό και μετρώνται οι θερμοκρασίες και των δύο δοκιμαστικών σωλήνων και του περιβάλλοντος ταυτόχρονα. Οι καμπύλες της μεθόδου T-history, οι οποίες είναι συναρτήσεις του χρόνου λαμβάνονται από το PCM και το υλικό αναφοράς, όπως φαίνεται από τα παρακάτω σχήματα.



(a) PCM

Σχήμα 2.3.1.2 Καμπύλη ψύξης υλικού που παρουσιάζει υπόψυξη [18]



(b) Pure water

Σχήμα 2.3.1.3 Καμπύλη ψύξης νερού [18]

Εάν ο αριθμός Biot είναι μικρότερος του 0,1 τότε η θερμοκρασιακή κατανομή του δείγματος μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη, οπότε μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος των ομοιόμορφων ιδιοτήτων (lumped capacitance) [18-21]

$$Bi = \frac{h \times L_s}{k_s} \approx \frac{h \times R}{2k_s}$$

$R$  η ακτίνα της κυλινδρικής ράβδου

$k_s$  η θερμική αγωγιμότητα του PCM

$h$  ο συντελεστής φυσικής συναγωγής μεταξύ εξωτερικής επιφάνειας και αέρα

$L_s$  το χαρακτηριστικό μήκος  $L_s = \frac{V}{A}$

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

$$m \times C_p \times \frac{dT(t)}{dt} = h \times A \times (T(t) - T_\infty) \rightarrow$$

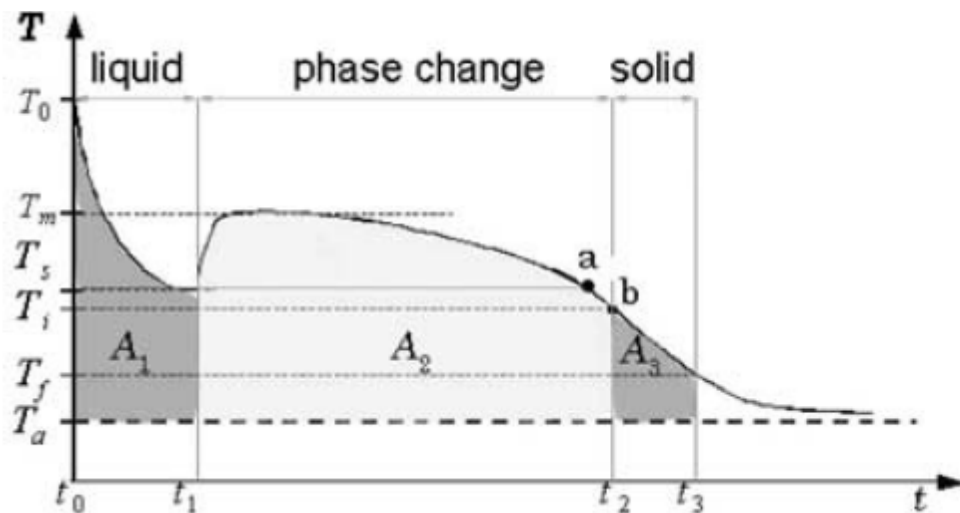
$$m \times C_p \times (T_1 - T_2) = h \times A \times \int_2^1 (T(t) - T_\infty) dt$$

Θέτοντας τις κατάλληλες αρχικές συνθήκες για το διάστημα υπολογισμού, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο συντελεστής συναγωγιμότητας  $h$  του PCM είναι ο ίδιος με αυτόν του νερού. Οπότε λύνοντας τις εξισώσεις υπολογίζεται η ειδική θερμοχωρητικότητα του PCM.

Η αρχική μέθοδος T-history, όπως προτάθηκε από τον Zhang και τους συνεργάτες του, παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Καταρχήν το σύστημα του πειράματος είναι αρκετά απλό και χρήσιμο για τη μέτρηση θερμικών ιδιοτήτων ανακατεμένων δειγμάτων, ενώ έχει μεγάλη ευελιξία ως προς το είδος των PCM που μπορεί να μετρήσει, αλλά και ως προς τις μετρούμενες ιδιότητες. Δεν απαιτείται διαδικασία δειγματοληψίας και τελικά η ακρίβεια των μετρήσεων είναι ικανοποιητική για τις μηχανικές εφαρμογές και επίσης η διαδικασία αλλαγής φάσης κάθε δείγματος PCM μπορεί να παρατηρηθεί με μεγάλη ευκρίνεια. Με αυτή τη μέθοδο έχουν μετρηθεί σε διάφορα πειράματα οι θερμοφυσικές ιδιότητες και των παραφινών και των ένυδρων αλάτων και τα αποτελέσματα ήταν πολύ κοντά στα αντίστοιχα θεωρητικά που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

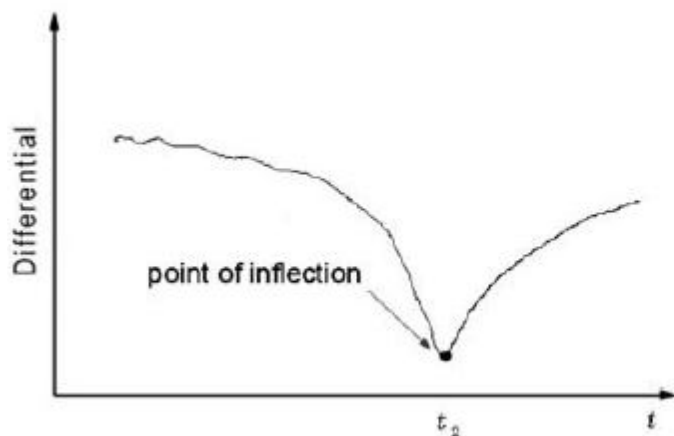
### **2.3.2 Μειονεκτήματα και τρόποι βελτίωσης της μεθόδου**

Δύο σοβαρά προβλήματα στην ανάλυση των δεδομένων αναφέρονται σε δημοσίευση των Hiki Hong, Sun Kuk Kim, Yong-Shik Kim [22]. Το πρώτο είναι η υιοθέτηση του χαμηλότερου σημείου υπόψυξης, ως το τέλος της αλλαγής φάσεως. (Σημείο  $a$  στο σχήμα)



Σχήμα 2.3.1.4 Τυπική καμπύλη ψύξης PCM που παρουσιάζει υπόψυξη [22]

Αυτή η επιλογή είναι λανθασμένη διότι ο βαθμός υπόψυξης επηρεάζεται από την ταχύτητα ψύξης και την καθαρότητα του υλικού. Επίσης η υπόψυξη δεν έχει καμία σχέση με το τέλος της αλλαγής φάσης. Αντί αυτού προτείνεται η χρήση ενός σημείου όπου η πρώτη παράγωγος ελαχιστοποιείται, δηλαδή έχουμε αλλαγή της κλίσης.



Σχήμα 2.3.1.5 Κλίση της πρώτης παραγώγου της καμπύλης ψύξεως [22]

Το δεύτερο πρόβλημα οφείλεται στην παράλειψη της αισθητής θερμότητας στην αλλαγή φάσης.

Στην αρχική μέθοδο δεν έχει γίνει αναφορά στην επιφάνεια επαφής του κυλίνδρου με το PCM, η οποία λόγω της διαστολής του κυλίνδρου

αλλάζει. Αυτός ήταν και ο λόγος που οι Hiki Hong, Sun Kuk Kim και Yong-Shik Kim χρησιμοποίησαν το μέσο όρο της επιφάνειας, πριν και μετά την αλλαγή φάσης, προτείνοντας τις παρακάτω εξισώσεις: [22]

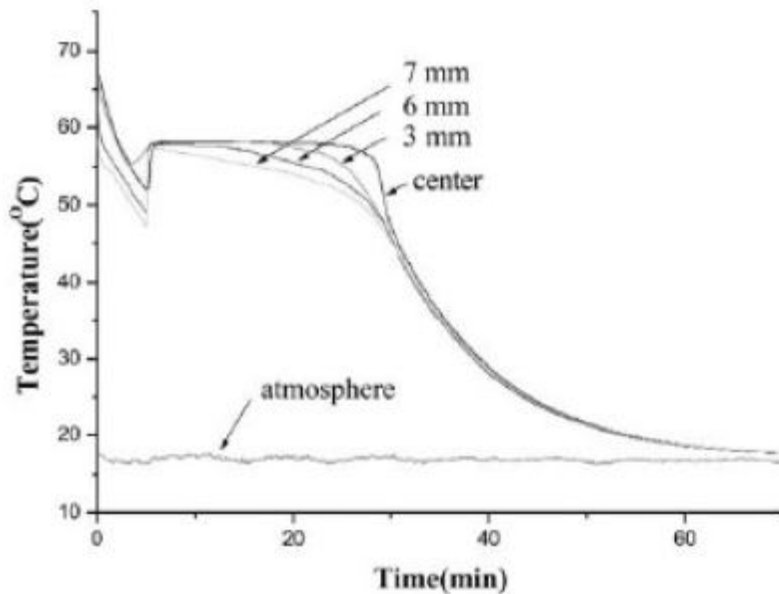
$$C_{p,l} = \frac{m_{t,w} C_{p,t} + m_w C_{p,w} \frac{A_c}{A_c'} \frac{A_1}{A_1'}}{m_p} - \frac{m_{t,p}}{m_p} C_{p,t}$$

$$C_{p,s} = \frac{m_{t,w} C_{p,t} + m_w C_{p,w} \frac{A_c}{A_c'} \frac{A_3}{A_3'}}{m_p} - \frac{m_{t,p}}{m_p} C_{p,t}$$

$$H_m = - \left( \frac{m_{t,p}}{m_p} C_{p,t} + \frac{C_{p,l} + C_{p,s}}{2} \right) (T_m - T_i) + \frac{m_{t,w} C_{p,t} + m_w C_{p,w} \frac{A_c}{A_c'} \frac{A_2}{A_2'}}{m_p} (T_m - T_i)$$

Με τις νέες αυτές εξισώσεις έγιναν νέες μετρήσεις, σε κάποιες από τις οποίες το σημείο ελαχιστοποίησης της πρώτης παραγώγου δεν ήταν απόλυτα εμφανές. Επίσης για απόκλιση  $\pm 1^\circ\text{C}$  στον ορισμό του σημείου έναρξης της αλλαγής φάσης, η μέγιστη απόκλιση βρέθηκε ίση με  $3,1\%/^\circ\text{C}$ .

Κάνοντας χρήση της μεθόδου των ομοιόμορφων ιδιοτήτων (lumped capacitance), γίνεται η υπόθεση ότι εάν  $Bi < 0.1$  η θερμοκρασία του δοκιμίου είναι ομοιογενής. Μια τέτοια απλούστευση μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για αισθητά φορτία και όχι για λανθάνουσα θερμότητα. Γενικά υπάρχει, κατά την στερεοποίηση του PCM, κατανομή της θερμοκρασίας στο δείγμα. Οπότε σε αυτήν την περίπτωση, αν και ισχύει το κριτήριο  $Bi < 0.1$ , αυτό καθ'εαυτό δεν διασφαλίζει την ομοιογένεια της θερμοκρασίας μέσα στο δείγμα. Αναφέρεται ότι σε κύλινδρο εσωτερικής διαμέτρου 16 mm έγιναν μετρήσεις με το θερμοστοιχείο να είναι τοποθετημένο παράκεντρα, σε αποστάσεις από το κέντρο του σωλήνα 0, 3, 6 και 7mm. Αυτό απεικονίζεται στην παρακάτω καμπύλη ψύξης.

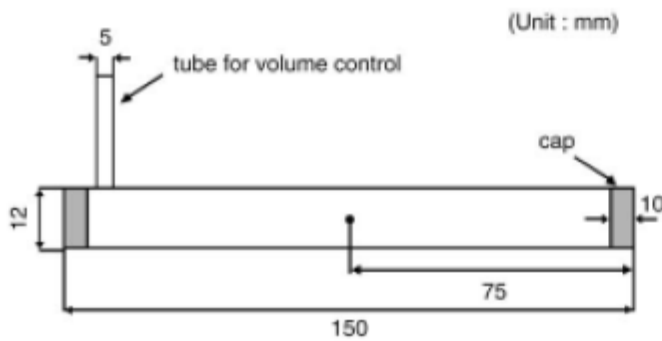


Σχήμα 2.3.1.6 Σφάλματα μέτρησης που οφείλονται σε παράκεντρη τοποθέτηση του θερμοστοιχείου [22]

Αποδείχτηκε ότι δεν υπάρχει σημαντικό σφάλμα στον καθορισμό της θερμότητας στερεοποίησης στην περίπτωση που η απόκλιση από το κέντρο είναι έως 3 mm. Επίσης επαληθεύτηκε ότι δεν υπάρχει σφάλμα μέτρησης στην περίπτωση κάθετης μετατόπισης του θερμοστοιχείου.

Λόγω της ακτινικής κατανομής της θερμοκρασίας έχει προταθεί η κυλινδρική ράβδος να τοποθετηθεί οριζοντίως [23]. Κατά την αρχική παραλλαγή της μεθόδου με την κάθετη τοποθέτηση παρατηρήθηκε τήξη και στερεοποίηση από την εξωτερική επιφάνεια προς τον εσωτερικό όγκο με αποτέλεσμα, την διαφορετική τήξη ή στερεοποίηση του επάνω τμήματος με το κάτω και την εσωτερική κίνηση του στερεού τμήματος.

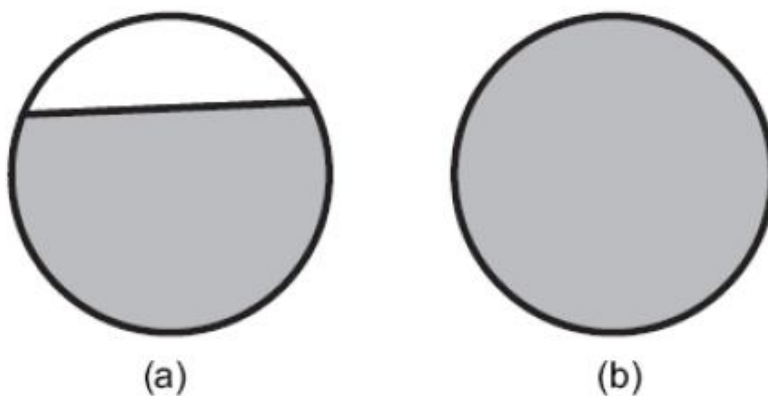
Για την μείωση της αρνητικής αυτής παραμέτρου προτείνεται η χρήση μίας οριζόντια τοποθετημένης κυλινδρικής ράβδου με εφαρμογή ενός καθέτου τμήματος που θα επιτρέπει την διαστολή-συστολή του υλικού. Η διάταξη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.3.1.7 Οριζόντια τοποθέτηση της κυλινδρικής ράβδου με δοχείο διαστολής [23]

Η ακρίβεια της μεθόδου είναι σημαντικά μικρότερη στην μέτρηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας σε αντίθεση με την μέτρηση της λανθάνουσας θερμότητας. Για τον λόγο αυτό είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί μια άλλη πιο ακριβής μέθοδος για τον προσδιορισμό του  $C_p$  ή να χρησιμοποιηθούν τιμές από την βιβλιογραφία. Η ακρίβεια της σχέσεως (8) της λανθάνουσας θερμότητας  $H_m$  βελτιώνεται περαιτέρω εισάγοντας τις πιο ακριβείς τιμές του  $C_p$ .

Όμως η παραλλαγή αυτή της T-history έχει πολλές δυσκολίες στην εφαρμογή της για μετρήσεις πολλών κύκλων. Μερικά προβλήματα που αναφέρονται είναι τα εξής. Κατά την τήξη λόγω της διαστολής του υγρού χύνεται το υγρό από τον σωλήνα διαστολής, ενώ κατά την ψύξη λόγω της στερεοποίησης συστέλλεται το στερεό και χύνεται υγρό PCM από τον σωλήνα διαστολής στον κυρίως σωλήνα. Επίσης κατά την ψύξη, η παρουσία μιας φυσαλίδας έχει αρνητική επίδραση στην δημιουργία ενός κανονικώς συμπυκνούμενου στερεού. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διαχωριστική επιφάνεια που παρατηρείται πριν και μετά την τήξη.



Σχήμα 2.3.1.8 διαχωριστική επιφάνεια που δημιουργείται στην οριζόντια τοποθέτηση της κυλινδρικής ράβδου με δοχείο διαστολής [23]

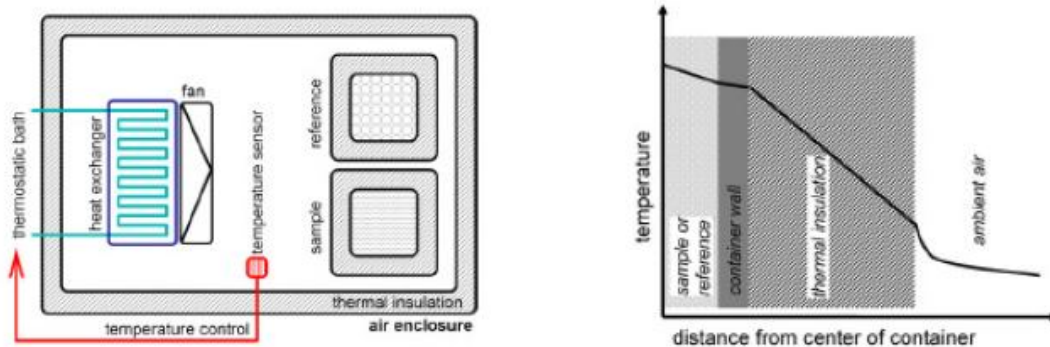


Η μετάδοση θερμότητας από το PCM μέσω του θύλακα στο πάνω μέρος του τοιχώματος του σωλήνα, θεωρείται αμελητέα και κατά τον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή της επιφάνειας επαφής πριν και μετά την τήξη.

Κατά την τήξη είναι δύσκολο να προσδιοριστεί πότε ακριβώς ξεκινά η αλλαγή φάσης. Πχ. στην περίπτωση του πάγου το δίλημμα είναι εάν ξεκινά η αλλαγή φάσης ακριβώς στους 0°C ή όταν μεγιστοποιείται η πρώτη παράγωγος. Από την άλλη μεριά στην περίπτωση της παραφίνης  $C_{14}H_{30}$  η θερμοκρασία τήξης αλλάζει κατά την τήξη λόγω της υπάρξεως διαλυμένων ουσιών μέσα στην παραφίνη. Η έρευνα έχει δείξει ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της μεγιστοποίησης της πρώτης παραγώγου (inflection point).

Οι μετρήσεις πάντως έδειξαν ότι η βελτιωμένη παραλλαγή της T-history με τον κάθετα τοποθετημένο κύλινδρο και την εισαγωγή του inflection point είχε καλύτερα αποτελέσματα από αυτήν με το οριζόντια τοποθετημένο κύλινδρο και το δοχείο διαστολής.

Άλλος τρόπος εφαρμογής της T-history γίνεται στο ZAE-Bayern όπου χρησιμοποιούνται μονωμένα δοχεία για την μέτρηση, ώστε η μόνωση να αποτελεί την κύρια αιτία θερμικής αντίστασης και να μπορεί να θεωρηθεί ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ίσος από το περιβάλλον προς το δείγμα και από το περιβάλλον προς το δείγμα αναφοράς. Έτσι η θερμική διαπερατότητα του δείγματος μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα πράγμα που είναι θετικό μιας και συνήθως δεν είναι γνωστή.[24]



Σχήμα 2.3.19 Αριστερά βλέπουμε την διάταξη T-history που χρησιμοποιείται στο ZAE-Bayern και δεξιά βλέπουμε σχηματικά την κατανομή της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του δοκιμίου.[24]

## **2.4 Κατηγοριοποίηση PCMs [25]**

### **2.4.1 Οργανικά PCMs**

Τα οργανικά PCM μπορούν να λιώσουν και να παγώσουν επανειλημμένα χωρίς διαχωρισμό της φάσης. Μπορούν επίσης να κρυσταλλωθούν με μικρή ή καθόλου υπερψύξη. Δυστυχώς όμως εμφανίζουν χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, ιδιότητα που περιορίζει τις εφαρμογές τους (περίπου 0,2 W/mK). Καλύπτουν ένα θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 0 °C και περίπου 150 °C . Τα οργανικά PCMs ταξινομούνται περαιτέρω σε παραφίνες και μη-παραφίνες.

#### **2.4.1.1 Παραφίνες**

Οι παραφίνες έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας αυτό οφείλεται στην υψηλή θερμότητα τήξης τους, τις ποικίλες θερμοκρασίες αλλαγής φάσης, την σχεδόν αμελητέα υπέρψυξη, τη χαμηλή τάση ατμών καθώς επίσης λόγω του ότι είναι χημικά αδρανή , έχουν σταθερή συμπεριφορά και συνήθως δεν διαβρώνουν το υλικό του δοχείου. Επίσης, είναι εμπορικά διαθέσιμες σε λογικό κόστος. Αυτά τα PCM είναι οικολογικά ακίνδυνα και μη τοξικά και είναι εύκολα διαθέσιμα από πολλούς κατασκευαστές. Οι κανονικές παραφίνες του τύπου  $C_nH_{2n+2}$  είναι οικογένεια των κορεσμένων υδρογονανθράκων και έχουν σχεδόν παρόμοιες ιδιότητες. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του n, τόσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία τήξεως και η λανθάνουσα θερμότητα. Παραφίνη είναι επίσης επιστημονική ονομασία για ένα αλκάνιο γενικότερα, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις αναφέρεται γενικά σε ένα γραμμικό (κανονικό) αλκάνιο.

Το Κερί παραφίνης είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μορφή στο εμπόριο ως οργανικό PCM αποθήκευσης θερμότητας, προσδιορίστηκε από τον Carl Reichenbach το 1830 βρίσκεται κυρίως ως ένα λευκό, άοσμο, άγευστο και κυρώδες στερεό, με τυπικό σημείο τήξης μεταξύ 46 °C και 68 °C, έχοντας πυκνότητα περίπου 0,9. Είναι αδιάλυτο στο νερό, αλλά διαλυτό στη βενζίνη ή σε συγκεκριμένους εστέρες, επίσης είναι ένας καλός αγωγός ηλεκτρισμού.

Αρκετές μελέτες έχουν γίνει πάνω στις παραφίνες. Ο M. Hadjiena μελέτησε τρεις παραφίνες ως δείγματα A, B, και C με υδρογονάνθρακα τύπου C<sub>22</sub>H<sub>44</sub>.1 (σ.τ. 47,1 ° C), C<sub>23</sub>H<sub>40</sub>.4 (σ.τ. 57,1 ° C) και C<sub>24</sub>H<sub>51</sub>.3 (σ.τ. 62,6 ° C), αντίστοιχα. Μελετήθηκαν οι αλλαγές στις θερμο-φυσικές ιδιότητες μετά από 900 θερμικούς κύκλους λειτουργίας και παρατηρήθηκε χαμηλή ενθαλπία στο δείγμα C, ενώ στα δείγματα A και B δεν υπήρχε αξιοσημείωτη αλλαγή στη δομή των παραφινών μετά από 900 θερμικούς κύκλους. Ωστόσο η παραφίνη του δείγματος B προτάθηκε ως το πιο αποτελεσματικό υλικό επειδή έδειξε την υψηλότερη ενθαλπία και ήταν ένα φθηνό προϊόν.

Οι ερευνητές σε μια άλλη έρευνα ανέλυσαν τις αλλαγές στην λανθάνουσα θερμότητα τήξης, στην θερμοκρασία τήξης και στην ειδική θερμότητα χρησιμοποιώντας την τεχνική DSC. Στη μελέτη τους αυτή, μετά από επανειλημμένη εξέταση θερμικών κύκλων το κερί παραφίνης βρέθηκε να είναι το πιο σταθερό υλικό αλλαγής φάσης (PCM).

Στο παρακάτω σχήμα δίνονται παραφίνες που έχουν μελετηθεί κατά καιρούς μαζί με το σημείο τήξης τους και τη λανθάνουσα θερμότητα της τήξης. Μπορεί να σημειωθεί ότι οι πιο μελετημένες μορφές παραφινών έχουν θερμοκρασία τήξης στην περιοχή από 45 ° C έως 60 ° C.

Table 2. Melting point and latent heat of thermal cycled paraffins.

Sr. no.	PCMs	Melting point (°C)	Latent heat (J/g)	Thermal cycles
1.	Paraffin (70 wt%) +Polypropylene(30 wt%)	44.77	136.16	3000
2.	Paraffin (C <sub>22.2</sub> H <sub>44.1</sub> ) (technical grade)	47.1	166	900
3.	Paraffin (C <sub>23.2</sub> H <sub>46.4</sub> ) (technical grade)	57.1	220	900
4.	Paraffin wax 53 (commercial grade)	53	184	300
		53	184	1500
5.	Paraffin wax 54	53.32	184.48	1500
6.	Paraffin wax 58–60	58.27	129.8	600
7.	Paraffin wax 60–62	57.78	129.7	600
8.	n-Heptadecane/polymethyl methacrylate (C <sub>17</sub> H <sub>36</sub> )	18.4	84.7	5000

Σχήμα 2.4.1.1.1 Παραφίνες και ιδιότητες τους.

### 2.4.1.2 Μη παραφίνες

Οι μη-παραφίνες είναι τα πιο άφθονα οργανικά υλικά αλλαγής φάσης με εξαιρετικά ποικίλες ιδιότητες. Καθένα από τα υλικά σ' αυτήν την κατηγορία έχει τις δικές του ιδιότητες σε αντίθεση με τις παραφίνες, των οποίων οι ιδιότητες σχεδόν ταυτίζονται. Αυτά τα οργανικά υλικά έχουν περαιτέρω υπο-ομάδες όπως τα λιπαρά οξέα, εστέρες, αλκοόλη, γλυκόλες, κλπ. Εν τούτοις, τα λιπαρά οξέα είναι τα πιο ελπιδοφόρα PCMs μεταξύ όλων των μη-παραφινών, λόγω της διαθεσιμότητάς τους σε κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και σε υψηλή θερμότητα τήξης. Λιπαρό οξύ ονομάζεται ένα καρβοξυλικό οξύ, συνήθως με μακριά ανθρακική αλυσίδα. Τα υλικά αυτά είναι εύκολα να παραχθούν από κοινά φυτικά και ζωικά έλαια. Έτσι παρέχουν την εγγύηση της συνεχούς προσφοράς, παρά την έλλειψη πηγών καυσίμων. Για να ελέγξουν τη θερμική σταθερότητα των εν λόγω PCMs, διάφοροι ερευνητές πραγματοποίησαν δοκιμές για πολλούς θερμικούς κύκλους αυτών των υλικών. Τα πιο κοινά λιπαρά οξέα τα οποία μπορούν να

χρησιμοποιηθούν ως υλικά θερμικής αποθήκευσης είναι το στεατικό οξύ, το παλμιτικό οξύ και το λαυρικό οξύ.

Από τον Sari διεξάγεται δοκιμή θερμικής αξιοπιστίας για το στεατικό οξύ (σ.τ. 54,7 ° C), το παλμιτικό οξύ (σ.τ. 61.31 ° C), το μυριστικό οξύ (σ.τ. 53 ° C) και το λαυρικό οξύ (σ.τ. 42.46 ° C) για 1200 θερμικούς κύκλους προκειμένου να μετρηθεί η λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και τα χαρακτηριστικά τους. Τα λιπαρά οξέα που ερευνήθηκαν είχαν δείξει καλή θερμική σταθερότητα εν όψει των αλλαγών στην λανθάνουσα θερμότητα της τήξης και της θερμοκρασίας τήξεως κατά τους θερμικούς κύκλους .

Ακόμη οι Sari και Kaygusuz μελέτησαν τα λιπαρά οξέα όπως το στεατικό (σ.τ. 53,8 ° C), το παλμιτικό (σ.τ. 59,9 ° C), το μυριστικό (σ.τ. 53,8 ° C) και λαυρικό οξύ (σ.τ. 42,6 ° C) για τον προσδιορισμό της ικανότητας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας και της θερμοκρασίας αλλαγής φάσεων των PCMS μετά από επανειλημμένους θερμικούς κύκλους, όπως 40, 410, 700 και 910 με τη χρήση της τεχνικής DSC. Μέσα απ' αυτό παρατήρησαν ότι οι θερμικές ιδιότητες του στεατικού και του λαυρικού οξέος μετά από 700 και 910 θερμικούς κύκλους είχαν μειωθεί σε ένα ανεπιθύμητο επίπεδο. Έτσι οι Sari και Kaygusuz, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα παλμιτικά οξέα και τα μυριστικά οξέα μπορούν να θεωρηθούν ως η καλύτερη μορφή PCMS από τα άλλα λιπαρά οξέα όσον αφορά τις μακροπρόθεσμες ηλιακές θερμικές εφαρμογές.

### **2.4.2 Ανόργανα PCMs**

Στα ανόργανα υλικά κατατάσσονται τα ένυδρα άλατα και τα μεταλλικά PCMs. Αυτή η κατηγορία δεν εμφανίζει έντονο φαινόμενο του supercooling και η θερμότητα τήξης τους δε φθίνει κατά τη διάρκεια της κυκλικής αλλαγής φάσης τους.

#### **2.4.2.1 Ένυδρα Άλατα**

Τα ένυδρα άλατα είναι χρήσιμα για εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας λόγω του χαμηλού τους κόστους και της διαθεσιμότητας τους. Έχουν την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα άλλα PCMs. Ωστόσο, λόγω του διαχωρισμού φάσης και της υπέρψυξης που εμφανίζεται στα ένυδρα άλατα, οι ερευνητές είχαν δώσει λιγότερη προσοχή σε αυτά. Κατά τη διάρκεια της τήξης των ένυδρων αλάτων, σχηματίζονται άλλα ένυδρα άλατα ή αφυδατωμένα. Το πρόβλημα του διαχωρισμού φάσεων μπορεί να εξαλειφθεί σε κάποιο βαθμό με τη χρήση πηκτωματοποιημένων μειγμάτων. Αυτή η διαδικασία όμως επηρεάζει τα χαρακτηριστικά θερμικής αποθήκευσης του μίγματος και το μίγμα με το χρόνο αποικοδομείται. Άλλο ένα μεγάλο πρόβλημα των ένυδρων αλάτων είναι η υπέρψυξη, δηλαδή δεν αρχίζουν να κρυσταλλώνουν στο σημείο πήξης τους. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση κατάλληλων παραγόντων πυρήνωσης για να αρχίσει η κρυσταλλική ανάπτυξη των μέσων αποθήκευσης. Τα ένυδρα άλατα χρησιμοποιήθηκαν ευρέως κατά τη περίοδο μεταξύ 1980 και 1990. Τα περισσότερα ένυδρα άλατα ελέγχθηκαν για τη θερμική σταθερότητα του κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.

Ο παρακάτω πίνακας παρέχει μια λίστα των ένυδρων αλάτων που έχουν μελετηθεί, μαζί με το σημείο τήξης τους και τη λανθάνουσα θερμότητα της τήξης. Η περισσότερη μελέτη των PCMs έχει γίνει στην κλίμακα των 30-60°C, πρόκειται για PCM τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για χαμηλή θερμοκρασία σε ηλιακές θερμικές εφαρμογές, όπως για τη θέρμανση του νερού και πρέπει να έχει θερμοκρασία τήξης σε αυτό το εύρος μόνο.

Sr. no.	PCMs	Melting point (°C)	Latent heat (J/g)	Thermal cycles
1.	Calcium chloride hexahydrate( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )	29.8	190.8	1000
		28	86	1000
		27	-	5650
		23.26	125.4	1000
2.	Glauber's salt ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )	32.4	238	320
		32	-	5650
3.	Magnesium chloride hexahydrate ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )	111.5	155.11	500
		110.8	138	1000
4.	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	-	-	1000
5.	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 1/2\text{NaCl} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	20	-	5650
6.	$\text{NaOH} \cdot 3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	15	-	5650
7.	Sodium acetate trihydrate ( $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )	58	230	500
		58	252	100
8.	Trichlorofluoromethane heptadecahydrate ( $\text{CCl}_3\text{F} \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ )	8.5	210	100

Σχήμα 2.4.1.1.2 Ένδρα άλατα και ιδιότητες τους

### 2.4.2.2 Μεταλλικά PCMs

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τα χαμηλής θερμοκρασίας τήξης μέταλλα και ευτηκτικά μεταλλικά μείγματα. Τα μεταλλικά PCM δεν έχουν ακόμη εξεταστεί σοβαρά λόγω του βάρους. Ωστόσο, όταν απαιτούνται υλικά με μεγάλη συγκέντρωση όγκου, είναι πιθανοί υποψήφιοι λόγω της υψηλής θερμότητας τήξης ανά μονάδα όγκου. Μερικά από τα πλεονεκτήματα τους είναι ότι έχουν υψηλές αγωγιμότητες, χαμηλή θερμοκρασία τήξης ανά μονάδα βάρους, υψηλή θερμοκρασία τήξης ανά μονάδα όγκου και σχετικά χαμηλή πίεση ατμού.

### 2.4.3 Μείγματα PCMs

Τα μείγματα PCMs αποτελούν μία σύνθεση δύο ή περισσότερων συστατικών καθένα από τα οποία τήκεται και στερεοποιείται κατάλληλα. Κατά τη διάρκεια της κρυσταλλοποίησης τους σχηματίζουν ένα μίγμα

κρυστάλλων από όλα τα συστατικά και ενεργούν ως ένα μόνο στοιχείο. Ένα μίγμα PCM είναι ένας συνδυασμός ενώσεων που αποτελείται είτε από οργανικά, είτε ανόργανα ή και τα δύο. Ένας σημαντικός αριθμός των μιγμάτων αυτών μπορεί να προσαρμοστεί σε σχεδόν οποιοδήποτε επιθυμητό σημείο τήξης για συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Η χρήση αυτών των υλικών στις εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης είναι πολύ πρόσφατη, για το λόγο αυτό δεν γνωρίζουμε πολλές πληροφορίες για τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες. Βασικό πλεονέκτημα των μιγμάτων PCM είναι ότι εμφανίζουν την τάση να συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα και των δύο ομάδων, ενώ παράλληλα δεν έχουν την τάση να κάνουν το ίδιο με τα μειονεκτήματα. Το βασικό τους μειονέκτημα όμως είναι το κόστος παραγωγής, το οποίο είναι διπλάσιο έως τριπλάσιο απ' ότι των οργανικών και ανόργανων PCMs.

## ***2.5 Μέθοδοι Προσωμοίωσης αλλαγής φάσης [26,27]***

Η μετάδοση θερμότητας στην αποθήκευση με PCM είναι ένα περιοδικό μη-γραμμικό φαινόμενο με μία μεταβαλλόμενη διεπιφάνεια μεταξύ των φάσεων του στερεού και του υγρού, το οποίο γενικά αναφέρεται ως το πρόβλημα των κινούμενων ορίων. Η μεταβλητότητα των ορίων, μάλιστα, σε τέτοια προβλήματα καθορίζεται από τη λανθάνουσα θερμότητα η οποία απελευθερώνεται ή αποδίδεται στο όριο. Η μη-γραμμικότητα είναι η πηγή των προβλημάτων στα προβλήματα κινούμενων ορίων, εξαιτίας της οποίας η αναλυτική λύση τέτοιων προβλημάτων είναι γνωστή μόνο για πολύ λίγες περιπτώσεις, όπως για μία απλή γεωμετρία ή για πρόβλημα με απλές συνθήκες ορίων. Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι, ώστε να επιτύχουν μία λύση του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας που να είναι αρκετά ακριβής.

Τα προβλήματα αλλαγής φάσης συνήθως επιλύονται με πεπερασμένες διαφορές ή πεπερασμένα στοιχεία σύμφωνα με την αριθμητική προσέγγιση. Το φαινόμενο αλλαγής φάσης πρέπει να μοντελοποιηθεί ξεχωριστά εξαιτίας της μή-γραμμικής φύσης του προβλήματος. Έχει αναπτυχθεί μία μεγάλη γκάμα αριθμητικών μεθόδων για επίλυση των προβλημάτων με τα PCM. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι η μέθοδος της ενθαλπίας και η μέθοδος της ενεργούς



θερμοχωρητικότητας. Αυτές οι μέθοδοι είναι ικανές να προσεγγίσουν PCM με ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών αλλαγής φάσης. Επίσης, ανήκουν στην κατηγορία των μεθόδων σταθερού τομέα (fixed-domain methods), οι οποίες αντιμετωπίζουν τη στερεή και την υγρή φάση ως ένα ενιαίο μέσο, ενώ η συνθήκη της διεπιφάνειας των φάσεων υποχωρεί σε μία καινούρια μορφή των εξισώσεων που περιέχουν τα αντίστοιχα μεγέθη για κάθε μία από τις δύο μεθόδους. Πριν παρουσιαστούν συνοπτικά οι δύο αυτές μέθοδοι, αναφέρεται εδώ η γενική εξίσωση, γνωστή ως η συνθήκη του Stephan, η οποία περιγράφει την παραπάνω διαδικασία:

$$\lambda \rho \left( \frac{ds(t)}{dt} \right) = k_s \left( \frac{dT_s}{\delta\tau} \right) - k_l \left( \frac{\delta T_l}{\delta t} \right)$$

Όπου  $\lambda$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης,  $\rho$  είναι η πυκνότητα (δεν διευκρινίζεται αν είναι στερεό ή υγρό),  $s(t)$  είναι η θέση της επιφάνειας,  $k$  είναι η θερμική αγωγιμότητα,  $t$  είναι ο χρόνος και  $T$  είναι η θερμοκρασία. Οι δείκτες  $s$  και  $l$  υποδεικνύουν τις φάσεις του στερεού και του υγρού αντίστοιχα.

Τα βασικά προβλήματα, λοιπόν, είναι ότι η θέση και η ταχύτητα των ορίων δεν είναι εκ των προτέρων γνωστά και αφού οι δύο φάσεις εμφανίζουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, πρέπει να προσεχτούν πολύ οι μη-φυσικές ασυνέχειες οι οποίες μπορούν να προκύψουν.

#### Μέθοδος ενθαλπίας [26-28]

Η μέθοδος της ενθαλπίας βασίζεται σε μία αριθμητική λύση της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς ενθαλπίας. Αναπτύσσοντας τη μέθοδο της ενθαλπίας, το πρόβλημα αλλαγής φάσης γίνεται πιο εύκολο, αφού η κύρια παραπάνω εξίσωση είναι η ίδια και για τις δύο περιπτώσεις, οι συνθήκες της διεπιφάνειας επιτυγχάνονται αυτόματα και δημιουργείται μία πολτώδης ζώνη ανάμεσα στις δύο φάσεις του στερεού και του υγρού. Με αυτή τη ζώνη αποφεύγονται κάποιες απότομες ασυνέχειες, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν αριθμητικές αστάθειες. Βέβαια, είναι εμφανές ότι το πάχος και η ποιότητα της διακριτοποίησης αυτής της

ζώνης είναι καθοριστικής σημασίας για τη συμπεριφορά του μοντέλου. Η μέθοδος της ενθαλπίας μπορεί να αντιμετωπίσει και πολτώδη και ισοθερμικά προβλήματα, όμως η θερμοκρασία σε ένα συγκεκριμένο σημείο του πλέγματος μπορεί να ταλαντώνεται με το χρόνο.

Αυτή η μέθοδος έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε πολλές περιπτώσεις. Οι Hunter το 1989 και Amdjadi το 1990 επιβεβαίωσαν ότι η μέθοδος της ενθαλπίας είναι η πιο αρμόζουσα για τυπικές εφαρμογές, κάτω από τον περιορισμό ότι δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο αριθμητικό μοντέλο στην διεπιφάνεια.

#### Μέθοδος ενεργούς θερμοχωρητικότητας [28,29]

Η μέθοδος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας είναι η πιο εύχρηστη, αφού ακολουθεί τη διαδικασία της συνηθισμένης αριθμητικής λύσης της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς ενέργειας. Η θερμοχωρητικότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αλλαγής φάσης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, ενώ αναφέρεται με το όνομα ``η συνάρτηση της ενεργούς θερμοχωρητικότητας`` και συμβολίζεται ως  $Cp_{eff}(T)$ . Το στοιχείο εκείνο που χρειάζεται μεγάλη προσοχή είναι η επιλογή της σωστής συνάρτησης για το  $Cp_{eff}(T)$ .

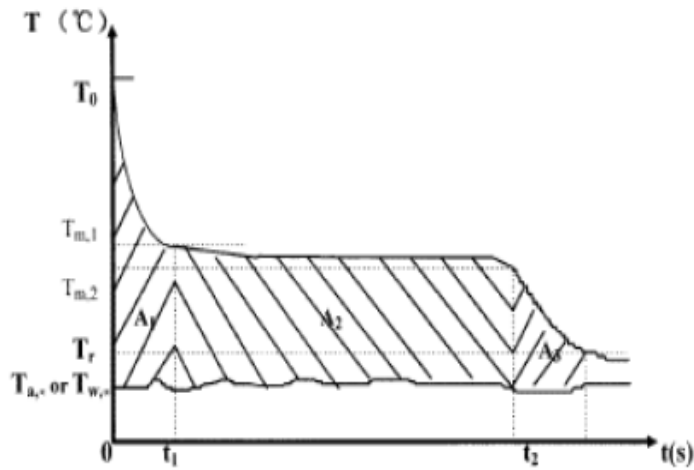
Τα μόνα δεδομένα τα οποία χρειάζονται ώστε να δημιουργηθούν απλές συναρτήσεις του  $Cp_{eff}(T)$  είναι η θερμότητα αλλαγής φάσης του PCM που συμβολίζεται ως  $H$ , οι θερμοκρασίες  $T_s$  και  $T_l$  στο τέλος των δύο περιοχών φάσεων του PCM και οι αντίστοιχες θερμοχωρητικότητες σε αυτά τα σημεία  $Cp_s$  και  $Cp_l$ . Πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι σε όλες τις προσεγγίσεις υπάρχει ένα ασυνεχές σημείο αναβαθμού στη συμπεριφορά της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, το οποίο μπορεί να προκαλέσει αριθμητικές ταλαντώσεις, εξαιτίας της αδυναμίας που υπάρχει να αξιολογηθεί η μήτρα του μεγέθους της χωρητικότητας. Στη θεωρητική προσομοίωση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται η μέθοδος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, ενώ επιλέγεται η τριγωνική συνάρτηση (triangular function) και αναφέρονται και όλες οι προκύπτουσες εξισώσεις οι οποίες και εφαρμόζονται.

## 2.6 Προβλήματα κατά την χρήση των PCMs

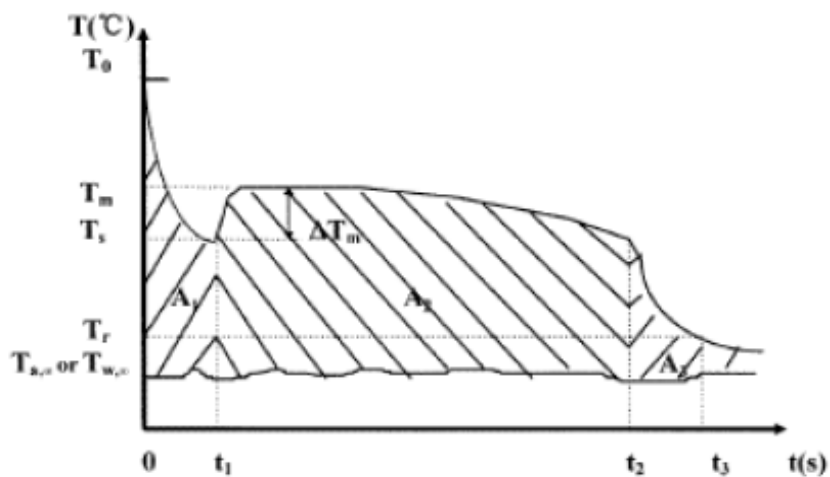
### 1. Το φαινόμενο της υπόψυξης/υπέρψυξης (supercooling)

Το φαινόμενο κατά το οποίο ένα υγρό δεν στερεοποιείται αμέσως, ακόμα κι αν η θερμοκρασία του γίνει μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης του ονομάζεται υπέρψυξη ή υπόψυξη. Κατά τη διάρκεια της υπέρψυξης το υλικό βρίσκεται σε μια μετασταθή κατάσταση δηλαδή είναι σχετικά ασταθές, δεν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Το ίδιο βέβαια μπορεί να συμβεί και όταν ένα υγρό υπερ-θερμαίνεται, παραμένει δηλαδή υγρό ακόμα και σε θερμοκρασίες πολύ μεγαλύτερες από το σημείο βρασμού. Το φαινόμενο οφείλεται στη θερμική επίδραση (λανθάνουσα θερμότητα).

Γενικά, ένα υγρό κάτω από το σημείο στερεοποίησής του διαμορφώνει κρυσταλλική δομή γύρω από έναν παράγοντα διαμόρφωσης κρυσταλλικής δομής (πυρήνα κρυστάλλου). Στην περίπτωση που αυτοί οι παράγοντες λείπουν, το υγρό παραμένει στην ίδια φάση μέχρι τη θερμοκρασία όπου παρατηρείται η ομογενής κρυσταλλική δομή της στερεής φάσης, δηλαδή πολύ χαμηλότερα από τη θερμοκρασία στερεοποίησής του. Η υπόψυξη εμφανίζεται κυρίως στα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης. Στα δυο σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ενδεικτικά διαγράμματα υλικών αλλαγής φάσης χωρίς και με υπόψυξη. Ερμηνεύοντας την καμπύλη ψύξης του PCM με υπόψυξη, παρατηρείται σαφώς η πτώση της θερμοκρασίας του υλικού κάτω από την αντίστοιχη θερμοκρασία στερεοποίησής του, πριν ακόμη ξεκινήσει η διαδικασία αλλαγής φάσης.



Σχήμα 2.6.1 Αλλαγή φάσης χωρίς υπόψυξη [31]



Σχήμα 2.6.2 Αλλαγή φάσης με υπόψυξη [31]

Η μερική ή πλήρης καταστολή του φαινομένου επιτυγχάνεται με την προσθήκη ενός μέσου πυρήνωσης στο PCM, ο οποίος εξασφαλίζει το σχηματισμό της στερεής φάσης με ελάχιστη υπόψυξη. Αυτό επιτυγχάνεται με δύο τρόπους: [32]

- Με μοιογενής πυρήνωση δηλαδή πυρήνωση αποκλειστικά και μόνο από το ίδιο το PCM. Ομοιογενής πυρήνωση περιλαμβάνει πυρήνωση από αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες.

- Με ετερογενής πυρήνωση δηλαδή πυρήνωση όχι από το ίδιο το PCM αλλά από ειδικά πρόσθετα ή ακαθαρσίες που σκόπιμα προστίθεται σε αυτό και έχουν παρόμοια κρυσταλλική δομή με αυτό.

Για τα περισσότερα, καλά μελετημένα PCM έχουν βρεθεί κατάλληλοι πυρήνες που περιορίζουν το φαινόμενο της υπόψυξης, για τα νεότερα όμως υλικά, η αναζήτηση ενός πυρήνα είναι συνήθως χρονοβόρα και ανεπιτυχής. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν έχει αναπτυχθεί ακόμη καμία αξιόπιστη προσέγγιση για τον τρόπο αναζήτησής τους.

## 2. Διαχωρισμός Φάσεων [33,34]

Τα ένυδρα άλατα κυρίως, κατά την διάρκεια αλλαγής φάσης τους περνάνε από στάδια ενυδάτωσης και αφυδάτωσης, και όχι απλά από τις φάσεις της τήξης και της στερεοποίησης, το γεγονός αυτό κάνει πιο περίπλοκη την συμπεριφορά τους κατά τη μετάβασή τους από τη μία φάση σε κάποια άλλη σε σχέση με τα ανοργανα PCM. Κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης τους αναπτύσσονται τρεις τρόποι τήξης ομοιόμορφος, ανομοιόμορφος και ο ημι-ομοιόμορφος. Η επιθυμητή συμπεριφορά είναι αυτή του ομοιόμορφου τρόπου τήξης, ο οποίος λαμβάνει χώρα όταν η σύσταση της στερεάς φάσης είναι ίδια με τη σύσταση της υγρής.

Η ημι-ομοιόμορφη τήξη συμβαίνει όταν το PCM έχει δύο ή περισσότερες ένυδρες μορφές με διαφορετικές συστάσεις στερεού μέρους και διαφορετικά σημεία τήξης. Η ανομοιόμορφη τήξη λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που κατά την τήξη του PCM εμφανίζονται δύο ξεχωριστές φάσεις: ένα κορεσμένο διάλυμα και ένα ίζημα αδιάλυτης άνυδρης ουσίας. Η μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας των ένυδρων αλάτων είναι δύσκολο να διατηρηθεί και συνήθως μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης του υλικού. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών. Κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός άνυδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος. Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα λόγω του ότι τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος (ανομοιόμορφη τήξη), δημιουργώντας μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συχνή εξασθένηση των ιδιοτήτων

τους. Προφανώς, λόγω της διαφοράς πυκνότητας των δύο αυτών φάσεων, η στερεή φάση κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου αποθήκευσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αποσύνθεση του υλικού (ή διαχωρισμός των φάσεων)

Το πρόβλημα με το διαχωρισμό των φάσεων είναι ότι μπορεί να μειώσει σημαντικά την πυκνότητα αποθήκευσης. Επειδή σε τοπικό επίπεδο η σωστή συγκέντρωση των μορίων για το σχηματισμό του PCM δεν είναι πια δεδομένη, το PCM δεν μπορεί να στερεοποιηθεί ολόκληρο. Αυτό σημαίνει ότι η λανθάνουσα θερμότητα της στερεοποίησης μπορεί συνήθως να μην απελευθερώνεται πλήρως, μερικές φορές μόνο σε ένα μικρό κλάσμα. Για την ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας που αποθηκεύεται στο αρχικό υλικό, η σωστή συγκέντρωση των χημικών συστατικών απαιτείται σε όλο το σύνολο του δείγματος. Μόνο τότε, το PCM μπορεί να στερεοποιηθεί εντελώς.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί ο διαχωρισμός φάσεων γίνεται χρήση τεχνητών ανάμιξης. Αυτή είναι μια πολύ γνωστή προσέγγιση για τη διάλυση της ζάχαρης στον καφέ ή του αλατιού στο νερό. Αυτή η προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς με πολλά ένυδρα άλατα. Το κυριότερο μειονέκτημά της είναι ο απαραίτητος εξοπλισμός. Μια εύκολη προσέγγιση τώρα στο επίπεδο του υλικού είναι η προσθήκη επιπλέον νερού στο ένυδρο άλας. Για παράδειγμα αντί για με περίπου 50% κ.β. χρησιμοποιούμε ένα πιο αραιωμένο μείγμα με λιγότερο από 45% κ.β. Στη συνέχεια, το επιπλέον νερό θα κάνει την ομογενοποίηση της υγρής φάσης του με διάχυση γρηγορότερα. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι λόγω της προσθήκης του νερού, η συνολική πυκνότητα αποθήκευσης μειώνεται, και ότι η περιοχή του σημείου τήξεως γίνεται ευρύτερη.

Ένας δεύτερος τρόπος για να μειωθεί το πρόβλημα του διαχωρισμού φάσης είναι με τη χρήση διαδικασιών διάχυσης για ομογενοποίηση. Η διάχυση όμως είναι αποτελεσματική μόνο σε μικρές κλίμακες. Ως εκ τούτου, αυτή η προσέγγιση μπορεί να λειτουργήσει μόνο εάν το PCM χωρίζεται σε μικρές αποστάσεις. Ένας τρόπος για να περιοριστούν οι αποστάσεις είναι να χωριστούν οι φάσεις του σε κλίμακα ορισμένων mm και να χρησιμοποιηθούν ρηγά δοχεία για το PCM. Ωστόσο συνήθως αυτό δεν είναι αρκετό.

### 3. Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα

Όπως προαναφέραμε, μία από τις βασικές επιθυμητές ιδιότητες των PCM είναι η επίτευξη μεγάλων τιμών θερμικής αγωγιμότητας. Κι αυτό γιατί η θερμότητα που αποθηκεύουν τα PCM σε μικρό όγκο θα πρέπει να μεταφέρεται από την επιφάνεια του όγκου στο εξωτερικό περιβάλλον εύκολα, ώστε να χρησιμοποιείται στα διάφορα συστήματα. Όμως γνωρίζουμε ότι τα αμέταλλα υγρά συμπεριλαμβανομένου και των PCM γενικά έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, για το λόγο αυτό τέτοια υλικά μελετήθηκαν και βρέθηκαν τρόποι αύξησης της τιμής τους αυτής. Οι δυο βασικοί τρόποι αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι:

- Χρήση συναγωγής η οποία μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας. Αυτό μπορεί να γίνει κατά την υγρή φάση μόνο άρα δεν είναι αρκετό καθώς στη στερεά φάση, δεν υπάρχει καμία συναγωγή
- Χρήση και προσθήκη αντικειμένων μεγαλύτερης αγωγιμότητας στο PCM. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Παραδείγματα τέτοιων αντικειμένων είναι οι μεταλλικές πλάκες, τα πτερύγια, τα μεταλλικά πλέγματα κλπ. Στο σχήμα 2.17 φαίνεται ένα τέτοιο παράδειγμα.



Σχήμα 2.6.3 Προσθήκη αντικειμένων μεγαλύτερης αγωγιμότητας στο PCM

#### 4. Συσκευασία PCM [36-39]

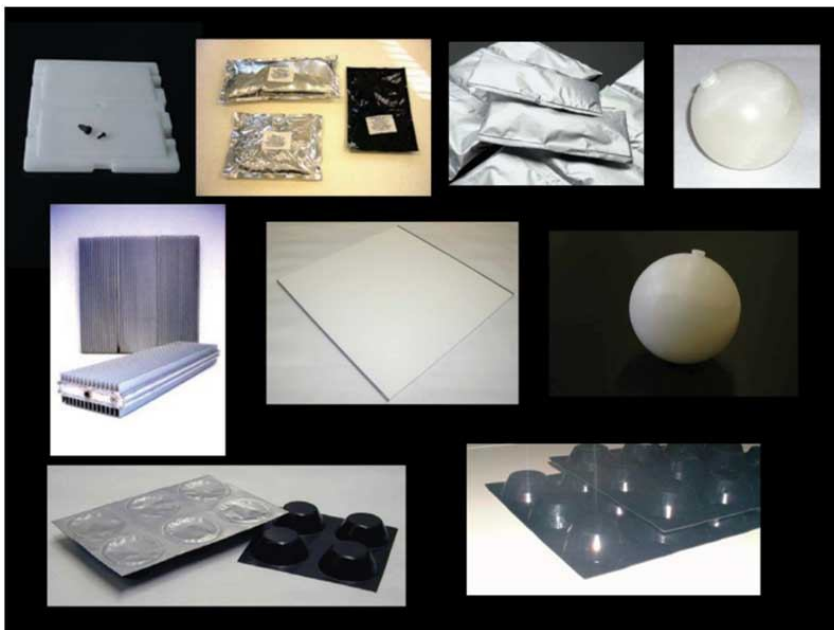
Ένα πρόβλημα στις εφαρμογές των PCMs είναι η δυσκολία έλεγχου της υγρής τους φάσης όταν βρίσκονται ελεύθερα στα σημεία τοποθέτησης, καθώς υπάρχει κίνδυνος διαρροής, επίσης η επαφή τους με το περιβάλλον μπορεί να βλάψει το περιβάλλον ή να αλλάξει τη σύνθεση του PCM. Για την αντιμετώπισή των προαναφερθέντων, τα PCMs βρίσκονται συνήθως μέσα σε στεγανό περίβλημα. Τα περιβλήματα που χρησιμοποιούνται είναι διαφόρων μεγεθών και σχημάτων (Σχήμα 2.6.4) και συνήθως διευκολύνουν τη μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας καθώς η επιφάνεια της εκάστοτε συσκευασίας δρα ως επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας.

Έχουν αναπτυχθεί δύο τρόποι συσκευασίας των PCM.

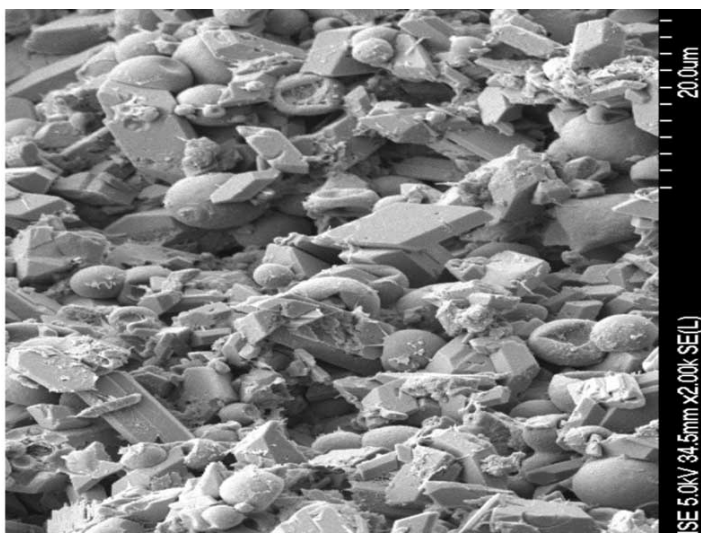
- Μακροενσωμάτωση (macro encapsulation): Ενσωμάτωση σε κάψουλες διαμέτρου μεγαλύτερης του 1cm. Είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος συσκευασίας των PCM. Εκτός από τη συγκράτηση του υγρού υλικού και την προστασία του από την επαφή με το περιβάλλον, η ενσωμάτωση αυτή έχει και άλλα πλεονεκτήματα. Βελτιώνει τη συμβατότητα υλικού-περιβάλλοντος, διευκολύνει τη μεταχείριση του PCM σε μια παραγωγή και περιορίζει τις εξωτερικές μεταβολές όγκου, πράγματα πολύ σημαντικά στις τεχνικές εφαρμογές. [35]
- Μικροενσωμάτωση (micro encapsulation). Μια κατηγορία περιβλήματος PCM που έχει τη μορφή σφαιριδίων πολύ μικρών διαστάσεων που δε διακρίνονται με γυμνό μάτι (μικροκάψουλες). Οι μικροκάψουλες (με PCM στο εσωτερικό τους) μπορούν να αναμιχθούν στη μάζα συμβατικών δομικών υλικών. Η διαμέτρος είναι μικρότερη από 1mm. Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε πρόσφατα και εκτός από τα πλεονεκτήματα της προηγούμενης εμφανίζει και τα ακόλουθα: Βελτίωση της μετάδοσης θερμότητας με τη χρήση των μικροκαψουλών. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης επιφάνειας σε αναλογία όγκου των μικροκαψουλών. Επίσης, βοηθούν τη συγκράτηση της υγρής φάσης του PCM, ώστε να μην υπάρχει κάποιου είδους διαρροή προς το περιβάλλον και επιπλέον



βελτιώνουν τη θερμική σταθερότητα στη κυκλική φόρτιση του PCM, αφού ο διαχωρισμός των φάσεων περιορίζεται σε μικροσκοπική κλίμακα. Ένα μειονέκτημα της χρήσης μικροκαψουλών είναι ότι η πιθανότητα για υπέρψυξη αυξάνεται. Σήμερα οι μικροκάψουλες, σε εμπορικό επίπεδο, απευθύνονται μόνο σε PCM που είναι αδιάλυτα στο νερό. Εκτός από αυτό, η περίπτωση να χρησιμοποιηθούν μικροκάψουλες για ένυδρα άλατα θέτει ένα ακόμη πρόβλημα. Η σύσφιξη στο υλικό του κελιού στα μικρά μόρια νερού, πρέπει να είναι αρκετή ώστε να αποτρέψει αλλαγή στη σύνθεση του ένυδρου άλατος.



Σχήμα 2.6.4: Συσκευασίες PCMs για εφαρμογές από μέταλλο ή πλαστικό σε διάφορους τύπους και μεγέθη



Σχήμα 2.6.5 Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου με μικροκάψουλες με PCMs (σφαιρίδια) αναμεμιγμένα με υλικά επιχρίσματος.

## 5. Συμβατότητα με άλλα υλικά.

Προσοχή πρέπει να δίνεται επίσης στην συμβατότητα των υλικών αλλαγής φάσης με άλλα υλικά καθώς σε περίπτωση μη συμβατότητας δημιουργούνται προβλήματα στη διάρκεια ζωής των καψουλών ή γενικότερα των δοχείων που περιέχουν το PCM.

Τα συνηθέστερα προβλήματα που εμφανίζονται είναι :

- Η μετακίνηση υγρών και αερίων μέσω των πλαστικών, η οποία επηρεάζει την απόδοση του περιεχόμενου PCM με το περιβάλλον.
- Η διάβρωση των μετάλλων που έρχονται σε επαφή με ανόργανα PCM .
- Η αποσταθεροποίηση των πλαστικών που έρχονται σε επαφή με οργανικά PCM .

Για αποφυγή τέτοιων καταστάσεων πρέπει να γίνεται έλεγχος της συμβατότητας ο οποίος προέρχεται από πειράματα που διεξάγονται σε συνθήκες τυπικές της εκάστοτε εφαρμογής. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών καθορίζεται η τελική επιλογή των χρησιμοποιούμενων υλικών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### *Εφαρμογές PCM*

#### *3.1 Γενικές εφαρμογές PCM*

Τα υλικά αλλαγής φάσης ως μέσο αποθήκευσης Θερμότητας είναι ευρέως γνωστά και χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές εδώ και πολλά χρόνια. Ιδιαίτερα στις μέρες μας όπου η εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων αποτελούν σημαντικοί παράγοντες η μελέτη, η χρήση και η εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης έχει παρουσιάσει μεγάλη ανάπτυξη ήδη απαντώνται σε πλήθος εφαρμογών. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται:

- Μεταφορά και αποθήκευση ευαίσθητων σε μεταβολές θερμοκρασίας προϊόντων, όπως τρόφιμα, φάρμακα κλπ. Μεταφορά αίματος για μετάγγιση, οργάνων για μεταμόσχευση.
- Ρύθμιση θερμοκρασίας σώματος (θερμικά τζάκετ, κουβέρτες κλπ). Θεραπείες ζεστού-κρύου.
- Θερμική προστασία ηλεκτρικών μηχανών, ηλεκτρονικών διατάξεων, υπολογιστών. Παρακάτω θα παραθέσουμε τις σημαντικότερες και πρωτοποριακές γενικές εφαρμογές των PCM .  
Παρακάτω παρουσιάζεται λεπτομερή αναφορά των εφαρμογών αυτών.

#### **Μεταφορά και αποθήκευση ευαίσθητων σε μεταβολές θερμοκρασίας προϊόντων [40,41]**

Έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί πολλές κυρίως θήκες με υλικά αλλαγής φάσης που επιτρέπουν τη μεταφορά προϊόντων ευαίσθητων σε μεταβολές θερμοκρασίας. Η μεταφορά του αίματος και των υποπροϊόντων του αίματος από το νοσοκομείο στο όχημα μεταφοράς και έπειτα από το όχημα μεταφοράς στον τελικό προορισμό είναι πολύ κρίσιμη από την άποψη της θερμοκρασίας καθώς αν αυτά τα προϊόντα βρεθούν σε θερμοκρασίες μη επιθυμητές θα αλλοιωθούν και θα απαγορευτεί η μετέπειτα χρήση τους. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης για την μεταφορά αυτών των προϊόντων είναι υψίστης σημασίας.



*Σχήμα 3.1.1 Ειδικές θήκες για μεταφορά αίματος*

Το PCM μπορεί βέβαια να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά και τη διατήρηση όλων των πιθανών, ευαίσθητων στις θερμοκρασιακές αλλαγές, προϊόντων. Άρα έχουν κατασκευαστεί διαφόρων ειδών κιβώτια με αφαιρούμενα μέρη, τα οποία περιέχουν κάποιο PCM (συνηθέστερα το νερό, αλλά σήμερα και άλλα πολλά υλικά που έχουν αναπτυχθεί), το οποίο πρέπει να διατηρείται στο ψύκτη πριν τη χρήση και το οποίο κρατάει μία χαμηλή θερμοκρασία στο κιβώτιο για ένα χρονικό διάστημα. Ένα τέτοιο προϊόν είναι και το ``isothermal water bottle``. Πρόκειται για ένα διπλού τοιχώματος μπουκάλι, στο οποίο έχει ενσωματωθεί ALCAL ως PCM. Το μπουκάλι έχει χωρητικότητα περίπου 0,5l και πρέπει να διατηρηθεί στο ψύκτη μέχρις ότου να στερεοποιηθεί το PCM και μετά το μπουκάλι θα κρατήσει το αφέψημα κρύο. Φυσικά αυτά τα προϊόντα χρησιμοποιούνται και για τον αντίθετο σκοπό την διατήρηση των προϊόντων μεταφοράς σε υψηλές θερμοκρασίες.

Επίσης και η μεταφορά των φαγητών μπορεί να γίνει με την χρήση θηκών ή κιβωτίων που περιέχουν υλικά αλλαγής φάσης διαμορφωμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρουν την επιθυμητή θερμοκρασία είτε αυτή είναι υψηλή είτε χαμηλή ανάλογα με τις ανάγκες.



Σχήμα 3.1.2 Ειδικές θήκες για μεταφορά κρύων η θερμών υγρών.



Σχήμα 3.1.3 μονωμένα κουτιά με ενσωματωμένο PCM για μεταφορά αγαθών [48]

### **Ρύθμιση θερμοκρασίας σώματος [42,43]**

Η χρήση ένδυσης που περιέχει PCM βελτιώνει την θερμική τους συμπεριφορά. Η μέθοδος ενσωμάτωσης μικροκαψουλών με PCM στα υφάσματα ξεκίνησε από την NASA στις αρχές του 1980 για να χρησιμοποιηθούν στις στολές των αστροναυτών, ώστε να τους παρέχουν βελτιωμένη θερμική προστασία ενάντια στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του διαστήματος. Η τεχνική αυτή όμως έχει διευρυνθεί και σε πολλά καταναλωτικά προϊόντα.

Η λειτουργία των PCM στα ενδύματα έχει ως εξής, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, τότε οι μικροκάψουλες απορροφούν και αποθηκεύουν την ενέργεια στο ρευστοποιημένο PCM. Όταν η θερμοκρασία μειώνεται ξανά, τότε η ενέργεια απελευθερώνεται και το PCM στερεοποιείται. Επίσης, εκτός από τη προστασία από τη ζέστη, η ικανότητα για θερμική μόνωση των ενδυμάτων προστασίας από το κρύο μπορεί να βελτιωθεί

πολύ από την ενσωμάτωση των μικροκαψουλών PCM. Το PCM που χρησιμοποιείται συνήθως είναι παραφίνη .

Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι τα παπλώματα, μαξιλάρια και καλύμματα στρωμάτων, ώστε να υπάρχει εξασφαλισμένος έλεγχος της θερμοκρασίας στα κρεβάτια. Επίσης, έχουν δημιουργηθεί πολλά, ειδικά γιλέκα τα οποία είναι ενισχυμένα με μικροκάψουλες PCM. Τα γιλέκα αυτά μπορούν να φορεθούν αυτόνομα ή σε συνδυασμό με κάποιο ένδυμα, ώστε να απομακρύνουν την επιπλέον θερμότητα σε περίπτωση αυξημένης δραστηριότητας. Τα γιλέκα αυτά έχουν μεγάλη απήχηση στα σώματα ασφαλείας και στις ένοπλες δυνάμεις.



Σχήμα 3.1.4 Προϊόντα για χρήση ύπνου [44]



Σχήμα 3.1.5 Προϊόντα για χρήση στις ένοπλες δυνάμεις

Άλλα παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι υποδήματα με PCM, όπως μπότες για σκι, για ορειβασία και για οδηγούς αγωνιστικών αυτοκινήτων, τα αθλητικά ενδύματα, τα γάντια του snowboard και ειδικά εσώρουχα για αναρρίχηση στον πάγο, ποδηλατοδρομία και τρέξιμο. Ειδικά για τα εσώρουχα, έχει παρατηρηθεί ότι είναι πολύ πιο αποτελεσματικά από τα κλασικά ισοθερμικά εσώρουχα, αφού διατηρούν άριστα τη καλή θερμοκρασία του σώματος, ώστε να μην είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί κάποιο εξωτερικό ένδυμα υπερβολικά χοντρό και βαρύ.

### **Θερμική προστασία ηλεκτρικών μηχανών**

Η χρήση των PCM στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα έχει ως κύριο σκοπό την αντιμετώπιση της υπερθέρμανσης όλων των σύνθετων ηλεκτρικών συσκευών. Τα Ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στην υπερθέρμανση, επηρεάζοντας αρνητικά τόσο την διάρκεια ζωής τους όσο και την αξιοπιστία τους. Το πλεονέκτημα είναι ένα μικρότερο σύστημα ψύξης με πολύ υψηλή αξιοπιστία.

Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι φορητές ηλεκτρικές συσκευές, φορητοί υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα κλπ,

### **Φωτοβολταικά πλαίσια**

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στα φωτοβολταικά πλαίσια είναι ότι οι αυξημένες θερμοκρασίες λειτουργίας, που συχνά εμφανίζονται, μειώνουν την ικανότητά τους για μετατροπή της ηλιακής ενέργειας. Το ποσοστό μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι μόνο 16%, ενώ η υπόλοιπη ηλιοφάνεια η οποία απορροφάται από ένα τέτοιο σύστημα μετατρέπεται σε θερμότητα. Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας μπορεί να ελεγχθεί με την χρήση των PCM.

### **Οχήματα**

Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν βρει εφαρμογή και στην βιομηχανία των αυτοκινήτων, κυρίως ως βοηθητικά μέσα για επίλυση κάποιων προβλημάτων ή για βελτιστοποίηση κάποιων στοιχείων.

Έχει πια διαπιστωθεί ότι ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (HS system), προσαρμοσμένο για χρήση σε οχήματα, μπορεί να αποτρέψει μία σειρά από προβλήματα που προκαλούνται από την ``κρύα`` εκκίνηση μίας μηχανής. Τέτοια προβλήματα είναι οι αυξημένες εκπομπές ρύπων, μεγάλη συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογονανθράκων στα καυσαέρια, μείωση του χρόνου ζωής της μηχανής και της ικανότητας για υψηλό φορτίο στους συσσωρευτές και στη μίζα.

## **3.2 Κτιριακές εφαρμογές PCM**

### **3.2.1 Ενσωμάτωση PCM στα δομικά υλικά**

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης στην τοιχοποιία. Οι τρόποι ενσωμάτωσης που έχουν μελετηθεί είναι πολλοί, αλλά οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι η άμεση ενσωμάτωση, η απορρόφηση και η συσκευασία. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι τα PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τη μορφή πολυστρωματικής σανίδας και σε συνδυασμό με τα άλλα υλικά.

#### **Άμεση ενσωμάτωση [44-46]**

Αποτελεί την οικονομικότερη μέθοδο αφού δεν απαιτεί ειδικό εξοπλισμό για να πραγματοποιηθεί. Κατά τη διάρκεια παραγωγής δομικών υλικών , όπως ο γύψος ή το τσιμέντο, το υλικό αλλαγής φάσης προστίθεται σε αυτά είτε σε σκόνη είτε ως υγρό και αναμιγνύεται μαζί τους. Έτσι πραγματοποιείται ή άμεση ενσωμάτωση τους στα οικοδομικά υλικά.

#### **Απορρόφηση[47]**

Σε αυτή τη μέθοδο το υλικό αλλαγής φάσης αρχικά θερμαίνεται και λιώνει. Στη συνέχεια τα δομικά υλικά εμβαπτίζονται στο PCM, με αποτέλεσμα το τελευταίο να απορροφάται από τους πόρους τους λόγω των τριχοειδών φαινομένων που αναπτύσσονται. Ακολούθως τα δομικά



υλικά απομακρύνονται από το PCM, διατηρώντας το στους πόρους τους. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να λάβει χώρα οπουδήποτε και οποιαδήποτε στιγμή, ενώ το πιο σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί ο κίνδυνος διαρροής του PCM από το πορώδες υλικό.

Συσκευασία[47]

Η συσκευασία των PCM αποτελεί ένα τρόπο αποφυγής των προβλημάτων που δημιουργούνται από τη συνεργασία τους με άλλα δομικά υλικά. Υπάρχουν δύο είδη συσκευασίας: η μακρο-συσκευασία και η μικρο-συσκευασία.

### ***3.2.2 Ενεργειακά αποδοτικά παράθυρα***

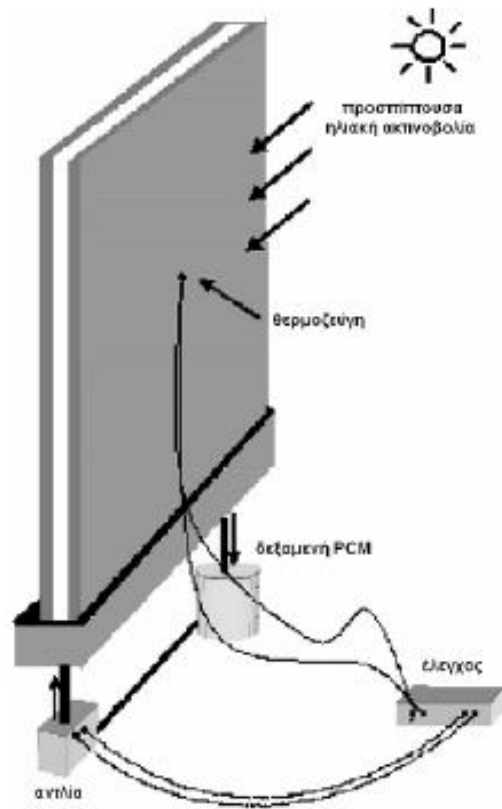
Ένα πολύ ενδιαφέρον και καινοτόμο σύστημα μετάδοσης θερμότητας παρουσίασε ο H.Mehling. αυτό το σύστημα αναφέρεται στην μετατροπή απλών παραθύρων σε ενεργειακά με την χρήση υλικών αλλαγής φάσης στα παραθυρόφυλλα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι γρίλλιες παραμένουν ανοιχτές έτσι ώστε η εσωτερική τους πλευρά να είναι εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία την οποία απορροφά το PCM και την αποθηκεύει σαν λανθάνουσα θερμότητα. Ενώ τη νύχτας οι γρίλλιες κλείνουν και μέσω του παραθύρου μεταδίδεται η θερμότητα στους εσωτερικούς χώρους. Ο μελετητής κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η χρήση πατζουριών με PCM μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία δωματίου μέχρι και 2 °C.



*Σχήμα 3.2.2.1 Κάθετες και οριζόντιες γρίλιες παραθύρων με PCM*

Άλλες μελέτες πάνω στα ενεργειακά παράθυρα πραγματοποίησε ο ερευνητής Ismail και οι συνεργάτες του, πρότειναν ένα άλλο τρόπο δημιουργίας ενεργειακών παραθύρων με PCM. Το συγκεκριμένο παράθυρο αποτελείται από δύο γυάλινες επιφάνειες ανάμεσα στις οποίες υπάρχει κενό, καθώς επίσης και από ένα αεραγωγό στην επάνω γωνία του παραθύρου. Στη βάση υπάρχουν δύο τρύπες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με μία αντλία και μία δεξαμενή PCM αντίστοιχα, ενώ η υπόλοιπη βάση και οι πλευρές του παραθύρου είναι σφραγισμένες. Η αντλία συνδέεται με τη δεξαμενή η οποία περιέχει το PCM σε υγρή μορφή. Η λειτουργία της ελέγχεται από έναν αισθητήρα θερμοκρασίας, ο οποίος θέτει σε λειτουργία την αντλία όταν η διαφορά θερμοκρασίας φτάσει σε μία προκαθορισμένη τιμή. Σε αυτήν την περίπτωση το υγρό PCM πληρώνει τον κενό χώρο που υπάρχει μεταξύ των δύο επιφανειών του παραθύρου και λόγω της χαμηλότερης εξωτερικής θερμοκρασίας το PCM κρυσταλλώνει και στερεοποιείται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος να μένει σταθερή. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου το υλικό αλλαγής φάσης μετατραπεί εξ ολοκλήρου σε στερεό. Ο καλός σχεδιασμός του συγκεκριμένου συστήματος μπορεί να εξασφαλίσει ότι η θερμοκρασία θα αυξηθεί πριν την πλήρη στερεοποίηση του PCM. Σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος να μειωθεί η εσωτερική θερμοκρασία, πράγμα που φυσικά είναι ανεπιθύμητο. Σύμφωνα με τους μελετητές το παραπάνω σύστημα είναι βιώσιμο και θερμικά αποδοτικό. Η πλήρωση του παραθύρου με το PCM βοηθάει στο φιλτράρισμα της θερμικής

ακτινοβολίας και μειώνει τις θερμικές απώλειες, αφού το μεγαλύτερο μέρος της μεταφερόμενης ενέργειας απορροφάται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. [49]



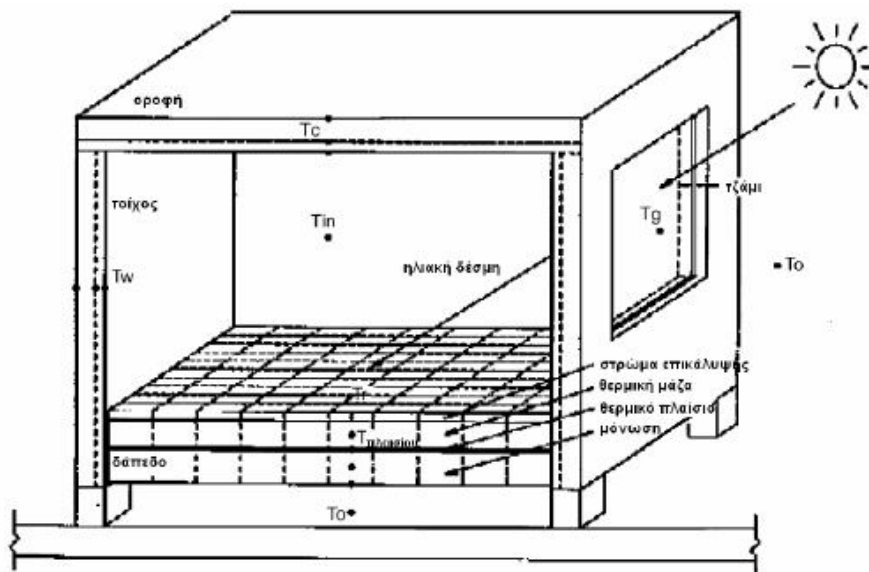
Σχήμα 3.2.2.2 Διάταξη ενεργειακά αποδοτικού παραθύρου με PCM

Ο Weinlader και άλλοι πρότειναν τη χρήση δύο υαλοπινάκων με τοποθετημένο PCM στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ τους. Σε σύγκριση με ένα απλό υαλοπίνακα χωρίς PCM το συγκεκριμένο παράθυρο πέτυχε 30% μείωση θερμικών απωλειών κατά την τοποθέτησή του σε προσόψεις κτιρίων με νότιο προσανατολισμό. [54]

### ***3.2.3 Ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης με PCM***

Γενικά η θέρμανση μέσω ακτινοβολίας παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Η θερμική μάζα του δαπέδου αποθηκεύει την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας κάνοντας δυνατή την καλύτερη κατανομή των ενεργειακών φορτίων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική μάζα του δαπέδου (π.χ. τσιμέντο) τόσο μεγαλύτερες είναι και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος. Η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης εγγυάται μεγάλη αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, βελτιώνοντας έτσι το επίπεδο θερμικής άνεσης.

Οι Athienities και Chen επικεντρώθηκαν στη μελέτη του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας στα ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης. Επικεντρώθηκαν στην συμβολή που έχουν τόσο η προσπίπτουσα ακτινοβολία όσο και η επένδυση του πατώματος στη θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος αυτού και στην κατανάλωση ενέργειας. Μελέτησαν πως επηρεάζει η χρήση χαλιών, πλήρους ή μερικής κάλυψης καθώς και η ξύλινης επένδυσης πατώματος πάνω από τσιμέντο ή μίγμα γύψου τσιμέντου. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι η θερμοκρασία, που προκαλείται από την εκπεμπόμενη ηλιακή ακτινοβολία στην προσπίπτουσα φωτισμένη περιοχή του δαπέδου, είναι αυξημένη κατά 8 °C σε σχέση με τη θερμοκρασία της σκιασμένης, ενώ η χρήση χαλιού αυξάνει τη διαφορά θερμοκρασίας στους 15 °C. Η ενέργεια που αποθηκεύεται στη θερμική μάζα του δαπέδου συμβάλει στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης για θέρμανση κατά τουλάχιστον 30%. [50]

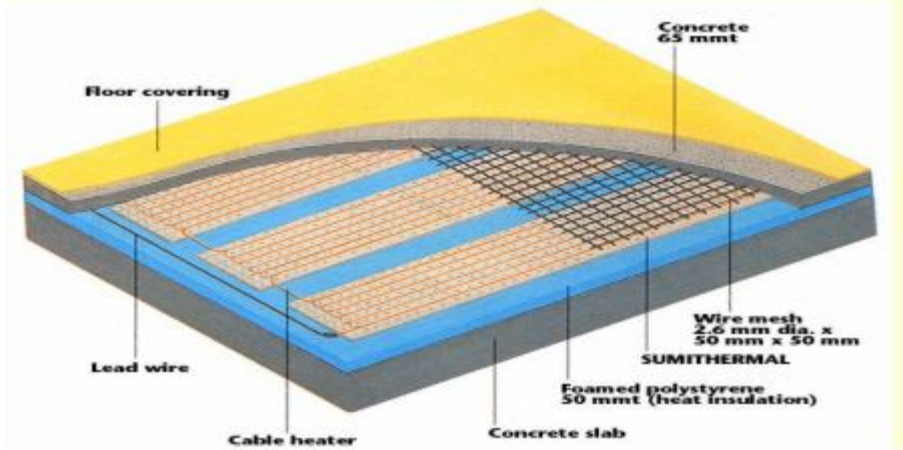


Σχήμα 3.2.3.1 Διάταξη πειραματικού χώρου Athienities και Chen

Αξίζει να αναφερθεί η μελέτη του Nagano [51] ο οποίος παρουσίασε ένα ενδοδαπέδιο σύστημα κλιματισμού με λανθάνουσα θερμότητα στα κτίρια. Τοποθετήθηκε PCM κάτω από το πάτωμα με μικρές πολλαπλές οπές. Τα αποτελέσματα των θερμοκρασιακών αλλαγών και της ποσότητας της αποθηκευμένης ενέργειας που μετρήθηκαν ήταν άκρως ικανοποιητικά, καθώς απέδειξαν πως η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να επιτύχει διαχείριση των ενεργειακών φορτίων ενός χώρου. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε ήταν μίγμα παραφίνης σε μορφή κόκκων, πάχους 3 cm, ενώ το πείραμα έγινε σε δάπεδο  $0,5 \text{ m}^2$ .

Οι Farid και Kong ασχολήθηκαν επίσης με τα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Μελέτησαν και σύγκριναν δύο τσιμεντένιες πλάκες που περιείχαν PCM με μια απλή τσιμεντένια πλάκα. Παρατηρήθηκε ότι, σε αντίθεση με την απλή, η διπλή τσιμεντένια πλάκα με το PCM εμφάνιζε μικρότερες διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Επίσης η θερμοκρασία στην επιφάνεια της ήταν αποδεκτή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε ήταν το  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . [52]

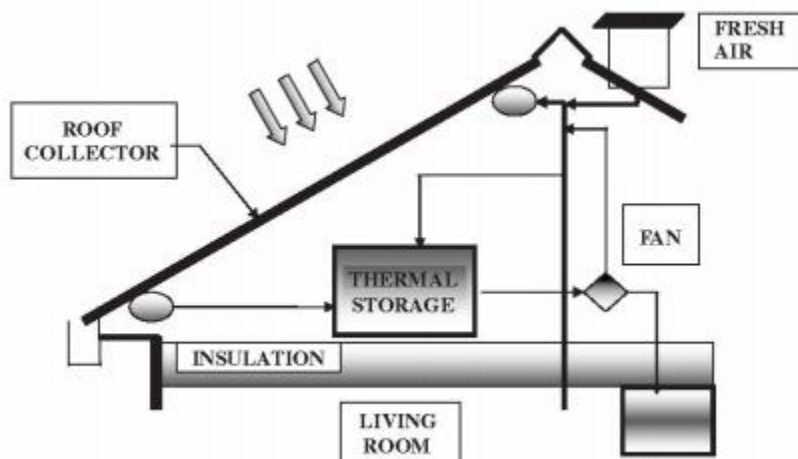
## Electrical floor heating system with PCM



Σχήμα 3.2.3.2 Ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης με PCM.

### 3.2.4 Οροφές PCM

Στο πανεπιστήμιο της Νότιας Αυστραλίας κατασκευάστηκε ένα νέο σύστημα ηλιακής θέρμανσης. Η συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται από μία μεταλλική οροφή για θέρμανση αέρα. Ο αέρας αυτός διοχετεύεται στο εσωτερικό του κτηρίου ή σε μια δεξαμενή με PCM για την αποθήκευση της θερμότητας η οποία χρησιμοποιείται όταν κρίνεται αναγκαία. Με σκοπό την επίτευξη θερμικής χωρητικότητας ίση με τα εσωτερικά φορτία στο εσωτερικό κτηρίων προτάθηκε η λύση της κατασκευής μίας θερμικά ενεργής ψευδο-οροφής.



Σχήμα 3.2.4.1 Ηλιακό σύστημα θέρμανσης με ΥΑΦ ενσωματωμένο σε οροφή

Πολλοί επιστήμονες ασχολήθηκαν με το συγκεκριμένο σύστημα θέρμανσης ο Bruno ανέπτυξε ένα σύστημα δροσισμού χρησιμοποιώντας υλικά αλλαγής φάσης. Συγκεκριμένα χρησιμοποίησε PCM με σημείο τήξης εύρους 20-30 °C, που ανταποκρίνεται στη θερμοκρασία θερμικής άνεσης του συγκεκριμένου δωματίου. Με αυτόν τον τρόπο αποθηκευόταν ενέργεια τις ώρες χαμηλής ζήτησης η οποία αποδιδόταν κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής. [53]

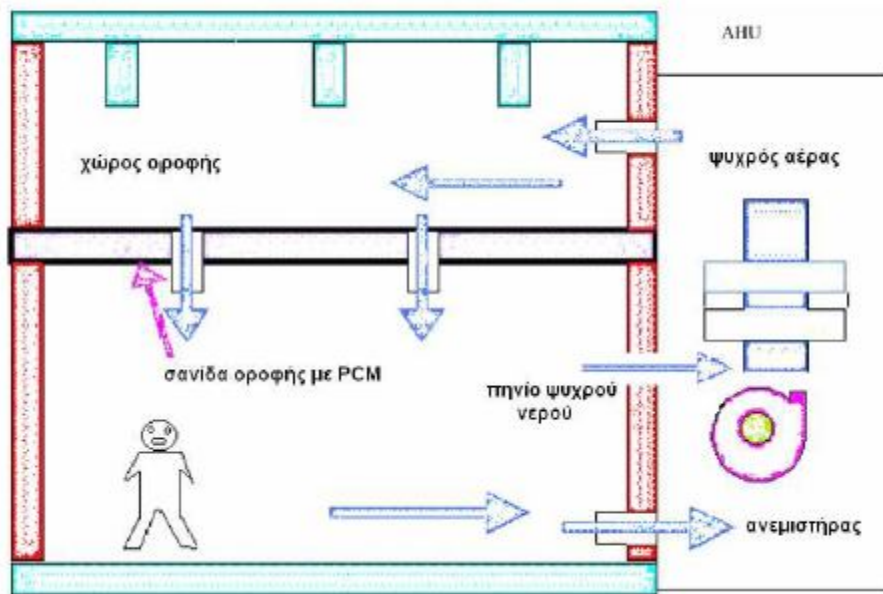
	Walls	Roof	Floor
Passive Solar Heating	<p>With daytime solar radiation</p>	<p>With daytime solar radiation</p>	<p>With daytime solar radiation</p>
Active Heating	<p>With solar collector system</p>	<p>With nighttime cheap electricity</p>	<p>With nighttime cheap electricity</p>
Night Cooling	<p>With nighttime ventilation</p>	<p>With nighttime ventilation</p>	<p>With nighttime ventilation</p>

Σχήμα 3.2.4.2 Χρήσεις PCM στη δομή κτηρίων.

Οι Gutherz και Schiler ανέπτυξαν ένα σύστημα θέρμανσης που περιλαμβάνει τοποθέτηση PCM στο διάκενο της οροφής . Τοποθετήθηκαν ηλιακά κάτοπτρα για να οδηγηθεί η ηλιακή ακτινοβολία από τα παράθυρα προς τα PCM. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι η δυνατότητα του να αποθήκευση θερμότητας, χωρίς την απαίτηση μεγάλων όγκων μέσου αποθήκευσης, πράγμα απαραίτητο σε ένα σύστημα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με το συγκεκριμένο σύστημα μπορούν να ανακτηθούν από 17-36% της χαμένης θερμότητας. [54]

Τέλος αξιοσημείωτη είναι η μελέτη των Kodo και Ibamoto ως προς την επίδραση χρήσης PCM σε συστήματα κλιματισμού στις οροφές κτιρίων με γραφεία. Η μονωτική επένδυση της σανίδας οροφής εμπλουτίστηκε με μικροσυσκευασμένο PCM σημείου τήξης γύρω στους 25 °C. Κατά τη διάρκεια της νύχτας ψυχρός αέρας εισέρχεται στο χώρο από τη μονάδα διαχείρισης αέρα ψύχοντας τη σανίδα με το PCM, με αποτέλεσμα το τελευταίο να αποθηκεύει ψυκτική ενέργεια στο εσωτερικό του και αυτή η ενέργεια αποδίδεται όταν το θερμικό φορτίο γίνεται μέγιστο με αποτέλεσμα να παραμένει ο χώρος δροσερός. Από την πειραματική μελέτη αποδείχθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας το PCM είναι της τάξης των 2 °C, ενώ στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης PCM έφτασε τους 6 °C. Απεικόνιση του παραπάνω συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. [55]





Σχήμα 3.2.4.1 Απεικόνιση του συστήματος οροφής με PCM από τους Kodo και Ibamoto

### 3.2.5 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα με PCM

Οι Telkes και Raymond πραγματοποίησαν μία από τις πρώτες προσπάθειες χρήσης PCM σε ενεργητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης κτιρίων το 1949 στην Αμερική. Μελέτησαν μια μονώροφη κατοικία 5 δωματίων συνολικής έκτασης  $135 \text{ m}^2$ , μήκους 23 m και πλάτους ενός δωματίου. 18 ηλιακοί συλλέκτες, κατασκευασμένοι από γαλβανισμένες απορροφητικές πλάκες λεπτού πάχους, βαμμένες μαύρες και καλυμμένες με διπλά γυάλινα πλαίσια, ήταν υπεύθυνοι για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας. Εν συνεχεία η ενέργεια αυτή μεταφερόταν με τη βοήθεια ανεμιστήρα κατά μήκος ενός αγωγού και κατέληγε σε τρία δοχεία αποθήκευσης τοποθετημένα στις πλευρές των δωματίων. Τα δοχεία αυτά περιείχαν κάδους χωρητικότητας 5 γαλονιών γεμάτους με άλας του Glauber. Η συνολική χρήση 21 τόνων PCM δημιουργεί δυναμικό θερμικής αποθήκευσης 11 GJ, που αντιστοιχεί σε θερμικό φορτίο 12 ημερών, για διακύμανση θερμοκρασίας από αυτή του δωματίου έως τη θερμοκρασία τήξης. Η κατοικία λειτούργησε για 2 χρόνια παρέχοντας θερμική άνεση  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  χωρίς την ανάγκη άλλου συστήματος θέρμανσης, το πείραμα όμως δεν είχε επιτυχία καθώς δεν μπόρεσε να αποφευχθεί η διάσπαση του ένυδρου άλατος. [56]

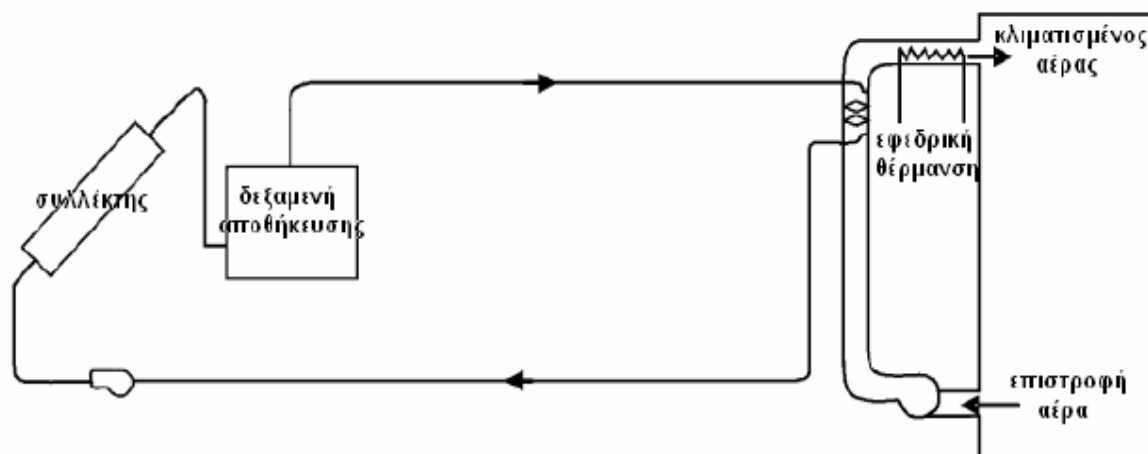
Οι καναδοί επιστήμονες Hodgins και Hoffman πραγματοποίησαν μία ακόμα εφαρμογή PCM σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα. Η μελέτη τους πραγματοποιήθηκε για διώροφη κατοικία 111 m<sup>2</sup>, ενώ το σύστημα αποθήκευσης περιλάμβανε 12 τόνους άλατος Glauber, ενισχυμένο με πυριτικό νάτριο και χρωμικό άλας ως ανασταλτικό μέσο διάβρωσης. Και σε αυτό όμως το πείραμα, παρ' όλες τις προσθήκες, δεν αποφεύχθηκε η διάσπαση του άλατος και το πείραμα απέτυχε. [57]

Η αποτυχία των δύο παραπάνω πειραμάτων ώθησε στην αριθμητική μοντελοποίηση των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης αέρα με χρήση PCM. Οι Jurinak και Abdel-Khalik ασχολήθηκαν με την επίδραση των παραγόντων, όπως οι διαστάσεις και τα θερμικά χαρακτηριστικά της μονάδας αποθήκευσης, η επιφάνεια και η τοποθεσία των συλλεκτών και πως αυτοί οι παράγοντες επιδρούν στη λειτουργικότητα του συστήματος και διεξήγαγαν κατάλληλα πειράματα χρησιμοποιώντας άλας Glauber και παραφίνη ως υλικά αλλαγής φάσης. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το συγκεκριμένο σύστημα απαιτεί περίπου το ¼ του όγκου αποθήκευσης μιας κλίνης χαλκιών και το ½ μιας απλής δεξαμενής νερού, άρα η χρήση του είναι αρκετά συμφέρουσα ως προς τον όγκο. [58]

### ***3.2.6 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM***

Πολλοί ερευνητές στράφηκαν στη χρήση ηλιακών θερμαντήρων νερού για τη θέρμανση κτιριακών εγκαταστάσεων καθώς πρόκειται για μια απλή και φθηνή λύση. Ο Prakash και οι συνεργάτες του ήταν από τους πρώτους που ασχολήθηκαν με ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM. Τοποθέτησαν στον πυθμένα ενός θερμαντήρα στρώμα PCM και ανέλυσαν τη λειτουργία του η οποία είναι η εξής: κατά τη διάρκεια ωρών με ηλιοφάνεια το νερό ζεσταίνεται μεταφέροντας θερμότητα στο PCM που βρίσκεται κάτω από αυτό, με σκοπό το PCM να την αποδώσει τις υπόλοιπες ώρες που το νερό θα είναι κρύο. Βέβαια η ανεπαρκής μετάδοση θερμότητας μεταξύ νερού και PCM έκανε συγκεκριμένο το σύστημα μη αποδοτικό. [59]

Ο Kaygusuz μελέτησε ένα ακόμα ηλιακό σύστημα θέρμανσης, το οποίο σχεδιάστηκε για την θέρμανση εργοστασιακών εγκαταστάσεων και αποτελείται από έναν ηλιακό συλλέκτη, έναν εναλλάκτη θερμότητας νερού-αέρα, έναν εφεδρικό ηλεκτρικό θερμαντήρα, μία αντλία διακίνησης του νερού στο σύστημα σωληνώσεων και εξοπλισμό μέτρησης και αυτόματου ελέγχου. Η ηλιακή ενέργεια που δεσμεύεται από τους συλλέκτες μεταφέρεται στη δεξαμενή αποθήκευσης με τη βοήθεια νερού που ρέει μέσα στις σωληνώσεις. Στο εσωτερικό της δεξαμενής υπάρχουν μικρότεροι σωλήνες που περιέχουν ως PCM χλωριούχο ασβέστιο 6 μορίων νερού. Έτσι η αποθήκευση ενέργειας γίνεται μέσω του PCM και αποδίδεται ανάλογα με τις ανάγκες του κτιρίου κάθε φορά. Όταν το κτίριο απαιτεί θερμικό φορτίο το σύστημα το αποδίδει είτε μέσω της δεξαμενής είτε μέσω του ηλεκτρικού θερμαντήρα. Την καλοκαιρινή περίοδο συγκρίθηκαν οι αποδόσεις του απλού ηλιακού συλλέκτη και του συγκεκριμένου συστήματος με PCM, ο βαθμός απόδοσης του οποίου ήταν καλύτερος λόγω της ικανότητας του για αποθήκευση θερμότητας τις μέρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Επίσης πραγματοποιήθηκε θεωρητική προσέγγιση του παραπάνω πειράματος, με την κατασκευή αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης. Τέλος τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα είναι πιο αποδοτικό όταν ως υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται το άλας Glauber είτε το χλωριούχο ασβέστιο 6 μορίων νερού. [60]



Σχήμα 3.2.6.1 Απεικόνιση του ηλιακού συστήματος θέρμανσης με PCM από τον Kaygusuz

Ο Chaurasia πραγματοποίησε μία συγκριτική μελέτη σε ηλιακά συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας με στόχο να διαπιστωθεί κατά πόσο το νερό που έχει ζεσταθεί από τον ήλιο θα παραμείνει θερμό κατά τη διάρκεια της νύχτας. Χρησιμοποίησε δύο πανομοιότυπες μονάδες αποθήκευσης. Η μία περιείχε παραφίνη ως PCM, βάρους 17,5 kg, τοποθετημένη μέσα σε σωλήνες αλουμινίου, ενώ η άλλη περιείχε απλά νερό σε μία δεξαμενή. Τα αποτελέσματα από τη φόρτιση των δύο μονάδων έδειξαν ότι η αποθήκευση λανθάνουσας ενέργειας αποφέρει περισσότερο ζεστό νερό σε σύγκριση με την αισθητή. [61]

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

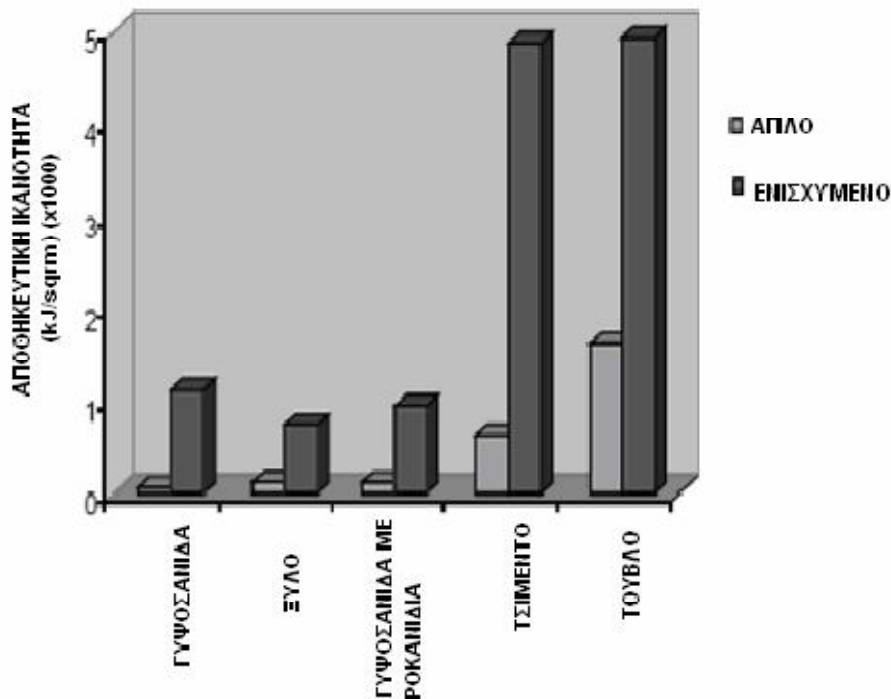
### **Επισκόπηση ηλιακής φόρτισης τοιχοποιίας με PCM μέσω υαλοπίνακα.**

#### **4.1 Υλικά αλλαγής φάσης σε τοιχοποιία**

Πολλές έρευνες και μελέτες έχουν διεξαχθεί για την εύρεση ενός PCM το οποίο να παρέχει γενικές κατευθύνσεις χρήσης και εγκατάστασης, καθώς και για την εύρεση και γενικών οδηγιών για την τελική επιλογή του είδους, της ποσότητας και του τρόπου εφαρμογής του PCM σε τοίχο, με βάση τις εκάστοτε κλιματολογικές συνθήκες. Οι έρευνες έχουν εστιάσει την προσοχή τους στη θερμοκρασία τήξης του PCM το οποίο καθορίζει τη βέλτιστη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας του τοίχου, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Ο αποδοτικότερος τρόπος ρύθμισης του τοίχου, επιτυγχάνεται με επιλογή PCM του οποίου η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ κοντά με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία του τοίχου και όχι του περιβάλλοντος. Εξισώνοντας τη θερμοκρασία τήξης του PCM με τη μέση ημερήσια του τοίχου μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το μεγαλύτερο μέρος της αποθηκευτικής ικανότητας του PCM, καθώς και να πετύχουμε την εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στον εσωτερικό χώρο. Αφού λοιπόν δύναται να υιοθετηθεί μία μόνο θερμοκρασία αλλαγής φάσης (χρήση ενός μόνο PCM) αποδεικνύεται πως αυτή η θερμοκρασία θα πρέπει να κυμαίνεται γύρω από τη συνολική μέση θερμοκρασία του τοίχου, δηλαδή τη μέση τιμή της ημερήσιας θερμοκρασίας και την μέση τιμή της συνάρτησης της θερμοκρασίας του τοίχου σε σχέση με το πάχος του.

Προβλήματα που προκύπτουν από τις κλασσικές εγκαταστάσεις των παθητικών ηλιακών συστημάτων όπως ο μεγάλος όγκος ο οποίος περιορίζει την ευελιξία του κατασκευαστή σε θέματα κάτοψης και γενικότερου σχεδιασμού εσωτερικού ή εξωτερικού και δεν συμβαδίζει με την ελαφρού τύπου κατασκευή που υιοθετείται στις κατοικίες τα τελευταία χρόνια καθώς και ο κίνδυνος υπερθέρμανσης του χώρου αφού η θερμότητα σε τέτοιες εφαρμογές αποθηκεύεται υπό μορφή αισθητής μπορούν να αντιμετωπιστούν με συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Στα συστήματα αυτά χρησιμοποιείται ένα PCM για να απορροφά ή να αποβάλλει αντίστοιχα, σημαντικό ποσό θερμότητας κατά τις μεταβάσεις φάσεων στις οποίες αυτό υποβάλλεται, ενώ η θερμοκρασία του παραμένει πρακτικά σταθερή. Για την ίδια ποσότητα μάζας, η αποθηκευτική ικανότητα των κλασσικών οργανικών PCM είναι συνήθως μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ικανότητα των παραδοσιακών δομικών υλικών (τσιμέντο, πέτρα, τούβλο, ξύλο, κλπ). [62-65]

Με τη χρήση παραφίνης σε τυπικό τοίχο Trombe είναι δυνατή η σημαντική μείωση του πάχους του τοίχου, με συγκριτικά παρόμοιες θερμικές ιδιότητες. Αυτό ανοίγει νέους ορίζοντες στη χρήση PCM σε ελαφρές κατασκευές με παθητικά ηλιακά συστήματα. Η χρήση PCM με κατάλληλο σημείο τήξης εξομαλύνει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο εσωτερικό του χώρου, ελαττώνει την πιθανότητα εμφάνισης υπερθέρμανσης στον εσωτερικό χώρο και γενικότερα ενισχύει την αίσθηση θερμικής άνεσης στο εσωτερικό. Ακόμα, η πρακτικά σταθερή θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο εσωτερικό του κτιρίου, ελαττώνει την πιθανότητα εμφάνισης υψηλού θερμικού φορτίου θέρμανσης ή ψύξης, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη χρήση μικρότερων θερμαντικών και κλιματιστικών σωμάτων, που ως γνωστό λειτουργούν με καλύτερο βαθμό απόδοσης συγκριτικά με τις μεγαλύτερες μονάδες.



Σχήμα 4.1.1 Σύγκριση της αποθηκευτικής ικανότητας απλής και ενισχυμένης εκδοχής κλασσικών δομικών υλικών.

Τις τελευταίες δεκαετίες υπήρξαν αρκετές μελέτες που κατέδειξαν τα οφέλη από τη χρήση PCM σε κτίρια. Οι μελέτες αυτές περιλαμβάνουν παραδείγματα ενσωμάτωσης τέτοιων υλικών στα παραδοσιακά δομικά υλικά, όπως γυψοσανίδες και μπλοκ τσιμέντου (τσιμεντόλιθοι), για εξοικονόμηση ενέργειας και ενίσχυση της αίσθησης θερμικής άνεσης. Εξετάστηκαν υλικά όπως λιπαρά οξέα, οκταδεκάνιο και συγκεκριμένοι τύποι παραφίνης με σημεία τήξης κοντά στη θερμοκρασία δωματίου. Η χρήση PCM σε γυψοσανίδες μπορεί να καταλήξει σε απόσβεση επένδυσης λόγω οικονομίας στην κατανάλωση ενέργειας μέσα σε τρία με πέντε χρόνια. Ακόμα και αν υπάρχουν αρκετές επιβεβαιωμένες επιτυχίες

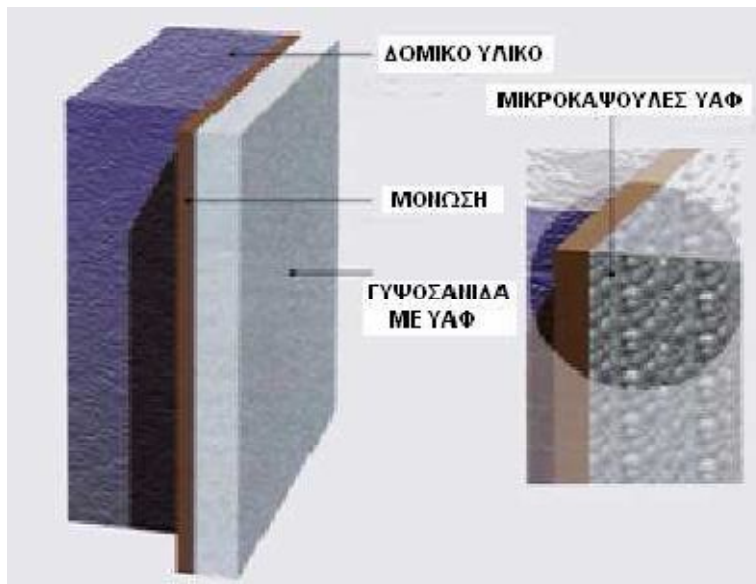
προσπάθειες, υπάρχει ακόμα ανάγκη κατάληξης σε ένα οικουμενικό μοντέλο μελέτης και εφαρμογής PCM στα δομικά υλικά ικανό να εφαρμοστεί και να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα- συμπεράσματα σε πραγματικές μικρότερης ή μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές.  
[62-68]

#### 4.1.1 Γυψοσανίδα με PCM

Η επιδίωξη δημιουργίας δομικών υλικών με αποθηκευτική ικανότητα οδήγησε στην προσθήκη υλικών αλλαγής φάσης κυρίως παραφίνης σε γυψοσανίδα ή σοβά ή κάποιο άλλο επενδυτικό υλικό τοιχοποιίας. Ο συνδυασμού των υλικών αλλαγής φάσης με γυψοσανίδα πραγματοποιείται κυρίως με δυο τρόπους. Ο πρώτος περιλαμβάνει τη μικροσυσκευασία του PCM σε κάψουλες σφαιρικής μορφής διαμέτρου 3mm τα οποία έχουν σκοπό τη συγκράτηση του υλικού όταν αυτό βρίσκεται στην υγρή φάση η τοποθέτηση τους στην γυψοσανίδα γίνεται κατά την κατασκευή της. Βέβαια ο κίνδυνος αφλεξιμότητας του τελικού προϊόντος οδήγησε σε πολλές έρευνες από τις οποίες αποδείχτηκε ότι ο περιορισμός του κατά βάρους ποσοστού του προστιθέμενου PCM στο 15 με 20% καθώς επίσης και η επίστρωση της γυψοσανίδας με πυροπροστατευτικό υλικό, ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο ανάφλεξης της γυψοσανίδας, πράγμα ούτως ή άλλως ελάχιστα πιθανό, κυρίως λόγω της χαμηλής τάσης ατμών των παραφινούχων ουσιών.

Ο άλλος τρόπος επιδιώκει την απορρόφηση του PCM ο την ήδη κατασκευασμένη γυψοσανίδα. Η γυψοσανίδα βυθίζεται σε λεκάνη με υγρό υλικά αλλαγής φάσης ώστε να το απορροφήσει. Από πειράματα προέκυψε πως μία τυπική δομή γυψοσανίδας μπορεί να απορροφήσει περίπου 30% του βάρους της σε λιγότερο από 10 λεπτά.

Το PCM στερεοποιείται ελευθερώνοντας θερμότητα όταν είναι διαθέσιμες ψυκτικές πηγές, και υγροποιείται απορροφώντας θερμότητα όταν απαιτείται ψύξη. Τα PCM προσφέρουν σημαντική αλλαγή στη θερμοχωρητικότητα μιας εγκατάστασης και για καθαρές ουσίες ελευθερώνουν την αποθηκευμένη θερμότητα με σχεδόν μηδενική αλλαγή στη θερμοκρασία τους.



Σχήμα 4.1.1.1 Εφαρμογή ενισχυμένης γυψοσανίδας σε τοίχο

Τα PCM επιτρέπουν στην αποθήκευση θερμότητας να γίνει μέρος των κτιρίων, επιτρέποντας σημαντική αποθήκευση θερμότητας χωρίς αλλαγή θερμοκρασίας δωματίου. Ακριβώς επειδή η θερμότητα αποθηκεύεται μέσα στο κτίριο, εκεί όπου λαμβάνουν χώρα και υπολογίζονται τα φορτία, και όχι εξωτερικά, δεν απαιτείται επιπλέον μεταφορά ενέργειας. Η αυξημένη αποθηκευτική ικανότητα της ενισχυμένης γυψοσανίδας, μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία δωματίου κοντά στο ανώτατο όριο ανθρώπινης θερμικής άνεσης, χωρίς μηχανικό σύστημα κλιματισμού. Σε περιοχές όπου λόγω κλίματος, κατά τη διάρκεια της ημέρας έχουμε μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα εξαερισμού κατά τη διάρκεια της νύχτας για να απομακρύνει την αποθηκευμένη θερμότητα από τη γυψοσανίδα.

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

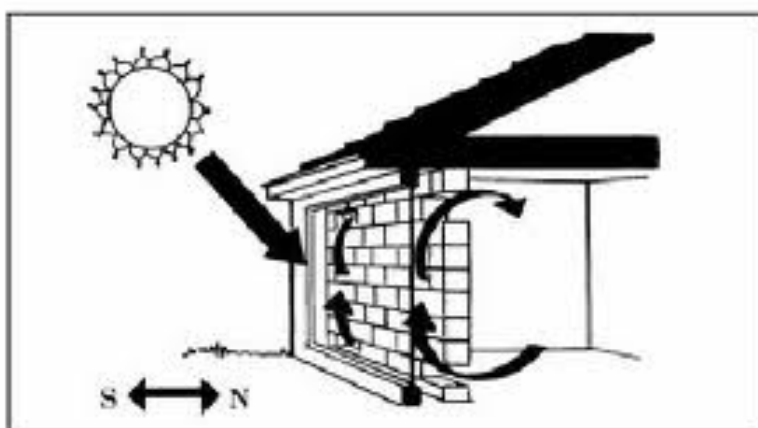
Η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης δεν περιορίζεται μόνο σε κατοικίες αλλά σε όλα τα κτίρια γενικότερα ως δομικά υλικά. Μπορούν να παρέχουν σταθερές εσωτερικές συνθήκες χωρίς μηχανική κλιματιστική υποβοήθηση σε πολλές περιπτώσεις κτιρίων με έντονη δραστηριότητα, αλλά κυρίως με έντονες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του χώρου. Σε χώρους όπου η διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι σημαντική, όπως αποθήκες φαρμάκων ή άλλων χημικών και αποθήκες τροφίμων των οποίων η διατήρηση απαιτεί θερμοκρασίες σταθερά, η



χρήση τους με λίγο πιο προσεκτική μελέτη θα αποτελεσματική και πολύ λειτουργική.

#### 4.1.2 Ηλιακοί τοίχοι

Ο τοίχος Trombe είναι ένας τοίχος από μπετόν πάχους 30-40 cm που είναι εξωτερικά βαμμένος μαύρος και μπροστά από αυτόν και σε απόσταση 5-10 cm υπάρχει μονός ή διπλός υαλοπίνακας. Ο τοίχος έχει προσανατολισμό προς τον νότο και στην εξωτερική του πλευρά υπάρχει κινητό σκίαστρο το οποίο προστατεύει τον χώρο από τις θερμικές απώλειες την νύχτα το χειμώνα και την υπερθέρμανση την ημέρα το καλοκαίρι. Για να διευκολυνθεί η κίνηση του αέρα που οφείλεται στην διαφορά θερμοκρασίας, στο πάνω και κάτω μέρος του τοίχου και σε όλο το μήκος του, υπάρχουν στόμια. Τέλος η απομάκρυνση του ζεστού αέρα προς τα έξω το καλοκαίρι γίνεται μέσω ενός φεγγίτη που βρίσκεται στο πάνω μέρος του υαλοπίνακα.



Σχήμα 3.1.2.1 Ηλιακός τοίχος με PCM

Οι παραδοσιακοί τοίχοι Trombe βασίζονται τη λειτουργία τους στην εκμετάλλευση της αισθητής θερμότητας που λαμβάνουν μέσω δέσμησης της ηλιακής ενέργειας.

Ο ηλιακός τοίχος είναι ουσιαστικά ένας τοίχος Trombe, στον οποίο η λιθοδομή έχει αντικατασταθεί με υλικά αλλαγής φάσης και η ιδιότητα τους να απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται οφείλεται σε αυτά. Η χρήση υλικών αλλαγής φάσης σε τοίχους Trombe δίνει τη δυνατότητα αποθήκευσης περισσότερης ενέργειας ανά μονάδα μάζας καθώς εκμεταλλεύεται και τη λανθάνουσα θερμότητα.

Ο ηλιακός τοίχος στην εξωτερική πλευρά του φέρει γυάλινη επιφάνεια ακολουθούμενη από διαφανές μονωτικό υλικό, PCM τοποθετημένο σε διαφανές πλαστικό δοχείο, το οποίο απορροφά και αποθηκεύει την ενέργεια με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας, ακολουθεί ένα διάκενο από το οποίο διέρχεται και θερμαίνεται ο αέρας που διέρχεται στο χώρο και τέλος στην εσωτερική πλευρά του τοίχου υπάρχει μόνωση και ο σοβάς. Πολλές φορές γίνεται και χρήση μεταλλικών πρόσθετων για την αύξηση της αγωγιμότητας και της απόδοσης.

Οι ηλιακοί τοίχοι καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο και είναι ελαφρύτεροι σε σχέση με άλλους τοίχους αποθήκευσης το γεγονός αυτό διευκολύνει τους κατασκευαστή σε θέματα κάτοψης και γενικότερου σχεδιασμού εσωτερικού ή εξωτερικού . επίσης χαρακτηρίζονται από υψηλής αποδοτικότητας μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα, πράγμα που οφείλεται στη χρήση του γυαλιού και του διαφανούς μονωτικού υλικού. Το πρώτο επιτρέπει την άμεση διέλευση της ακτινοβολίας και την απορρόφηση της από το PCM ενώ το μονωτικό υλικό εξασφαλίζει μηδενικές απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας. Και τέλος οι ηλιακοί τοίχοι συμβάλλουν κατά μεγάλο ποσοστό στη μείωση των θερμικών απωλειών.

#### **4.1.3 Άλλες ενσωματώσεις των PCMs σε δομικά υλικά τοίχων.**

Ενσωμάτωση PCM σκυρόδεμα. [69]

Μια άλλη δυνατότητα εφαρμογής των PCMs στις κατασκευές κτιρίων είναι το ενισχυμένο σκυρόδεμα με PCM η ενσωματωμένο σε μείγμα ξύλου – ελαφρού βάρους σκυροδέματος. Ξύλο και ελαφρού βάρους σκυρόδεμα μπορεί να εφαρμοστεί στην κατασκευή εσωτερικής και εξωτερικής τοιχοποιίας κτιρίου και είναι ένα μίγμα τσιμέντου, κομματιών ξύλου ή σκόνης από πριόνι που δεν πρέπει να υπερβαίνει το 15% κατά βάρος, και επίσης νερού και προσθέτων. Το μίγμα αυτό. Η ενσωμάτωση στο μείγμα αυτό από το

Ο Mehling και τους συνεργάτες του έκαναν έρευνες για δύο υλικά PCM με ξύλο-σκυροδέμα τα μοντέλα GR40, 1-3mm και GR50, 0.2- 0,6mm της Rubitherm και αποδείχτηκε ότι τα PCMs μπορούν να συνδυαστούν με το μείγμα και ότι οι μηχανικές ιδιότητες δεν φαίνεται να αλλάζουν σημαντικά. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης του υλικού αυτού είναι η δημιουργία πιο ελαφριών τοίχων με βελτιωμένες θερμικές επιδόσεις αλλά και η της ικανότητας θερμικής αποθήκευσης.

## Ενσωμάτωση PCM σε τούβλο

Για τη μείωση της ροής θερμότητας από τον εξωτερικό χώρο με απορρόφηση του κέρδους θερμότητας χρησιμοποιούμε το σύστημα τούβλο- PCM ώστε να γίνει απορρόφηση θερμότητας στο τούβλο προτού φθάσει στον εσωτερικό χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας η οποία αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται στους εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους κατά τη διάρκεια της νύχτας.

## Πολυστρωματική σανίδα από PCM.

Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε πολυστρωματικές οικοδομικές σανίδες και να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία ενταγμένα στο κέλυφος του σπιτιού, όπως για παράδειγμα στο εσωτερικό των τοίχων. Από τις έρευνες διαπιστώθηκε ότι η διάρκεια θερμικής επαναφοράς του συστήματος μειώθηκε περίπου 17% σε σχέση με άλλα συστήματα, η θερμική ροή σημείωσε αύξηση κατά 20-50% ενώ ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας κατά 7-18%.

## 4.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα τοίχων με PCM

### Πλεονεκτήματα:

- Η μόνωση με PCM έχει πολύ μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά είδη μόνωσης και προσφέρει εξαιρετική μετάδοση θερμότητας.
- Δεν έχει ιδιαιτερότητες ως προς την εγκατάστασή του, άρα το επιπλέον κόστος εγκατάστασης είναι πολύ μικρό.

### Μειονεκτήματα :

- Η ιδιαιτερότητα σχεδιασμού για κάθε ξεχωριστό κλίμα, ένα σημείο τήξης μπορεί να εξυπηρετεί άριστα ένα κλίμα, αλλά το πιθανότερο είναι ότι δεν εξυπηρετεί καθόλου όλα τα άλλα.
- Η εύρεση της κατάλληλης θερμοκρασίας είναι διπλά δύσκολο πρόβλημα όταν μιλάμε για κλίματα με ανάγκη και για ψυκτικές και για θερμαντικές συσκευές. Οι κατασκευαστές δεν είναι διατεθειμένοι να περιπλέξουν την παραγωγική τους διαδικασία,

ώστε να λάβουν υπ' όψη τις κλιματολογικές ιδιαιτερότητες. Η διαδικασία κατά την οποία η εμφάνιση της γυψοσανίδας γίνεται στον τόπο τοποθέτησής της, ενδέχεται να χωλαίνει από πλευράς ελέγχου τελικής ποιότητας. Άλλα σημεία που ενδεχομένως χρίζουν μνείας ή προσοχής, είναι η εμφάνιση επιφανειακών ασταθών ατελειών (“blooming”), βραδυφλεγία, διάβρωση μετάλλων, οσμή, και τα «παραδοσιακά» θέματα σε τέτοιου είδους εφαρμογές, όπως για παράδειγμα η ικανότητα της μπογιάς να συγκρατείται επί του τοίχου (της γυψοσανίδας).

### **4.3 Εφαρμογές τοιχοποιίας με PCM και αποτελέσματα.**

Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες γύρω από πειράματα με χρήση διαφόρων ΥΑΦ σε διαφορετικούς τύπους τοίχων καθώς και πειράματα για να επιβεβαιώσουν τη θετική συμβολή των υλικών αλλαγής φάσης σε ήδη υπάρχοντα παθητικά ηλιακά συστήματα. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται πολλά από τα σημαντικότερα πειράματα που έχουν διεξαχθεί όσον αφορά την χρήση υλικών αλλαγής φάσης σε τοιχοποιία και τα αποτελέσματά τους.

#### **Προσθήκη PCM σε τοίχο Trombe**

Πολλές μελέτες έγιναν για την προσθήκη υλικών αλλαγής φάσης σε τοίχο Trombe .Ο Castellon και οι συνεργάτες του μελέτησαν κατά πόσο η προσθήκη PCM σε τοίχο Trombe, νοτίου προσανατολισμού, μπορεί να μειώσει τις απαιτήσεις θερμικού και ψυκτικού φορτίου στα μεσογειακά κλίματα κατά τη διάρκεια του χρόνου. Ο Bourdeau χρησιμοποίησε ως υλικό αλλαγής φάσης χλωρίδιο του ασβεστίου (σημείο τήξεως 29°C) [σε δύο τοίχους σε έναν με πάχος 8,1 cm ενισχυμένο με PCM και σε έναν δεύτερο πλίνθινο τοίχο πάχους 40 cm. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο τοίχος με το PCM είχε ελαφρώς καλύτερη θερμική απόδοση σε σχέση με τον απλό και ότι οι Trombe τοίχοι με PCM μικρότερου πάχους ήταν περισσότερο επιθυμητά σε σύγκριση με ένα συνηθισμένο τοίχο για την αποτελεσματική αποθήκευση θερμικής ενέργειας.

Ο Knowler ενσωμάτωσε παραφίνη εμπορίου αναμεμιγμένη με μεταλλικά πρόσθετα σε τοίχο Trombe και κατόρθωσε με αυτόν τον τρόπο να αύξησε την αγωγιμότητα και την απόδοση του τοίχου . [70]

Οι Novak και Stiritih κατασκεύασαν τοίχο με προσθήκη μαύρο κερί παραφίνης(σημείο τήξης, 25-30°C) ως PCM για την αποθήκευση της θερμότητας. Η αποθηκευμένη ενέργεια χρησιμοποιήθηκε για την θέρμανση και τον αερισμό μιας κατοικίας και τα αποτελέσματα ήταν άκρως ενθαρρυντικά. Η αποτελεσματικότητα της απορρόφησης βρέθηκε να είναι 79% Ύστερα από αρκετά πειράματα λοιπόν αποδείχτηκε ότι ο ηλιακός τοίχος παρέχει αποδοτικότερη ενεργειακή αποθήκευση σε σχέση με τον απλό. [71]

### Τοίχοι PCM

Ο Peirpo και οι συνεργάτες ήταν από τους πρώτους που μελέτησαν τη χρήση τοίχων PCM για σύντομης διάρκειας αποθήκευση θερμότητας σε παθητικά ηλιακά συστήματα Χρησιμοποίησαν λιπαρά οξέα σαν υλικά αλλαγής φάσης σε τοιχοποιία, με στόχο την εύρεση της βέλτιστης θερμοκρασίας αλλαγής φάσης και το βέλτιστο πάχος του τοίχου. Τα αποτελέσματα έδειξαν εξοικονόμηση ενέργειας 5-20%.[72].

Ο Athienities κατάφεραν να αναπτύξουν ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών για να προσομοιώσει το μεταβατικό φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας στους τοίχους . Διεξήγαγαν μία πειραματική, αριθμητική προσομοίωση ενός υπαίθριου δωματίου με τοίχους από γυψοσανίδα, εσωτερικά επενδυμένους με PCM βουτυλικό εστέρα, σύστασης 25% κατά βάρος. Αποδείχθηκε ότι η χρήση του τοίχου με υλικό αλλαγής φάσης συντελεί στη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας του δωματίου κατά 4°C κατά τη διάρκεια της ημέρας.. [73]

Οι Kalousk και Hirs σύγκριναν τη θερμική άνεση δύο δωματίων το καλοκαίρι, ενός που διέθετε συμβατική τοιχοποιία και ενός με τοίχους με ενσωματωμένο PCM. Στο τοίχο τοποθετήθηκε το υλικό αλλαγής φάσης TH29 με σημείο τήξης τους 29°C. Η προσομοίωση έδειξε ότι το δωμάτιο με τους τοίχους PCM κατάφερε να διατηρήσει τη θερμική άνεση στο εσωτερικό του παρά την αυξημένη εξωτερική θερμοκρασία, ενώ οι θερμοκρασίες επιφάνειας του τοίχου και του αέρα μειώθηκαν κατά 3,5 και 2,5 °C αντίστοιχα ,αντίθετα στο άλλο δωμάτιο ειδικά τις μεσημεριανές ώρες δεν επικρατούσαν συνθήκες θερμικής άνεσης. [74]

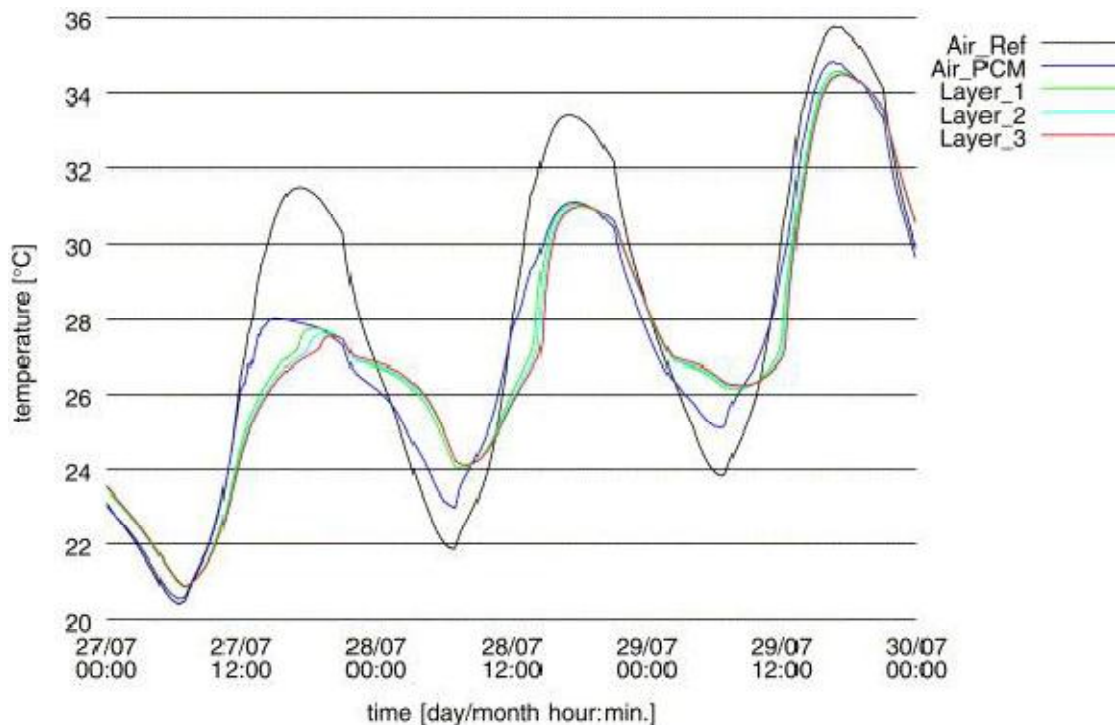
Neepet εξέτασε το θερμικό δυναμικό μιας γυψοσανίδας, που είναι εμποτισμένη με λιπαρά οξέα και κεριά παραφίνης ως PCMs και που υπόκεινται στην ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας του δωματίου αλλά δεν φωτίζεται άμεσα από τον ήλιο. Διαπίστωσε ότι η αποθηκευτική ικανότητα της γυψοσανίδας στο διάστημα μιας μέρας περιορίζεται πρακτικά στα 300-400 kJ/m<sup>2</sup> αν και η θεωρητική θερμοχωρητικότητα της είναι μεγαλύτερη. Ακόμα παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος πραγματοποίησης της αλλαγής φάσης, τόσο μικρότερη της βέλτιστης είναι η αποθήκευση ενέργειας που επιτυγχάνεται. Παρόλα αυτά, μεγάλο εύρος αλλαγής φάσης σημαίνει μεγαλύτερη συμβατότητα του PCM σε περισσότερες εφαρμογές τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό κέλυφος του κτιρίου. [75,76]

Σημαντική μελέτη από τους Heim και Clarke σε ένα αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης ενός παθητικού ηλιακού κτιρίου, πολλαπλών ζωνών, με τζάμια και φυσικό εξαερισμό απέδειξε ότι η αποθηκευμένη στα γύψινα πλαίσια ηλιακή ενέργεια μπορεί να μειώσει την ενεργειακή απαίτηση έως 90% κατά τη διάρκεια της περιόδου θερμικής ζήτησης. Σε αυτή τη περίπτωση οι γυψοσανίδες με ενσωματωμένο PCM χρησιμοποιήθηκαν σαν εσωτερικό χώρισμα μεταξύ των δωματίων..

Meng Zhang και η ομάδα του [77] χρησιμοποίησαν ένα κρυσταλλικό PCM με βάση την n-παραφίνη, μέσω μακροενσωμάτωσής του σε κάψουλες. Το PCM τοποθετήθηκε στο τοίχο ως θερμικό πλαίσιο που μειώνει την αιχμή της ζήτησης κλιματισμού για οικιακή χρήση στα κτίρια. Ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τα υλικά του τοίχου προσδιορίζεται η βέλτιστη ποσότητα της συγκέντρωσης PCM μεταξύ 10 και 30%. Κριτήρια επιλογής του συγκεκριμένου PCM ήταν κυρίως λόγω των σημείων τήξης και στερεοποίησης του που κυμαίνονται στην περιοχή των 20-30°C δηλαδή βρίσκεται στο εύρος θερμοκρασίας της ανθρώπινης ζώνης άνεσης. Επίσης ένας άλλος λόγος για την επιλογή αυτού του PCM ήταν η σταθερότητά του σε κυκλική φόρτιση και αποφόρτιση και κατά τη διάρκεια υπερθέρμανσης. Επειδή αυτό το PCM είναι σταθερό σε θερμοκρασίες μέχρι περίπου 250°C (482°F) και καθόλου χημικές αντιδράσεις δε συμβαίνουν κατά τη διάρκεια των διαδικασιών απορρόφησης και απελευθέρωσης θερμότητας, οι φυσικοχημικές ιδιότητές του δεν θα πρέπει να τροποποιούνται κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του. Επίσης ελκυστική ήταν η χημικώς αδρανής φύση του σε σχεδόν όλα τα υλικά και ο οικολογικά ακίνδυνος χαρακτήρας του .

Ο Schossig πραγματοποίησε ένα πείραμα με δύο διαφορετικούς χώρους με μια ελαφριά κατασκευή στην πρόσοψη της εγκατάστασης και με επίστρωση των εσωτερικών τοίχων με γύψο PCM και γύψο αναφοράς. Στον ένα χώρο δοκιμή ενός γύψου με 40% βάρος PCM και πάχος 6mm ενώ στο δεύτερο το 2003 μελετήθηκε γύψος με 20% βάρος PCM και πάχος 15mm. Η ενσωμάτωση του υλικού αλλαγής φάσης πραγματοποιήθηκε με ένα σύστημα μικροενσωματωμένου σε κάψουλες PCM επιτρέποντας την εύκολη εφαρμογή, καλή μετάδοση της θερμότητας και καμία ανάγκη για προστασία από την καταστροφή. Ειδικότερα η κατανομή των μικροκαψουλών PCM στον τοίχο προσφέρει μια πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, έτσι ώστε ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας για τη φόρτιση και αποφόρτιση της αποθηκευμένης θερμότητας να αυξηθεί σημαντικά. Το πείραμα διεξάχθηκε για την χρονική περίοδο ενός έτους.

Σύμφωνα με τις μετρούμενες θερμοκρασίες τοιχώματος και αέρα που φαίνονται στο σχήμα 4.6 για τα 6 mm γύψου με PCM, για τρεις ημέρες με νυχτερινό αερισμό βλέπουμε ότι στο εύρος θερμοκρασίας τήξης του PCM (24-27°C), η θερμοκρασία στον χώρο δοκιμών με PCM αυξάνεται με βραδύτερο ρυθμό από ό, τι οι θερμοκρασίες στον χώρο δοκιμών αναφοράς. Μετά την επίτευξη των 27°C, η θερμοκρασία και στους δύο χώρους δοκιμών αυξάνεται παράλληλα, έτσι ώστε η διαφορά θερμοκρασίας των 4K να επιτευχθεί στη μέγιστη θερμοκρασία. Επιπλέον, η μέγιστη θερμοκρασία του τοίχου έφθασε μια ώρα αργότερα στο δωμάτιο με PCM. [78,79]

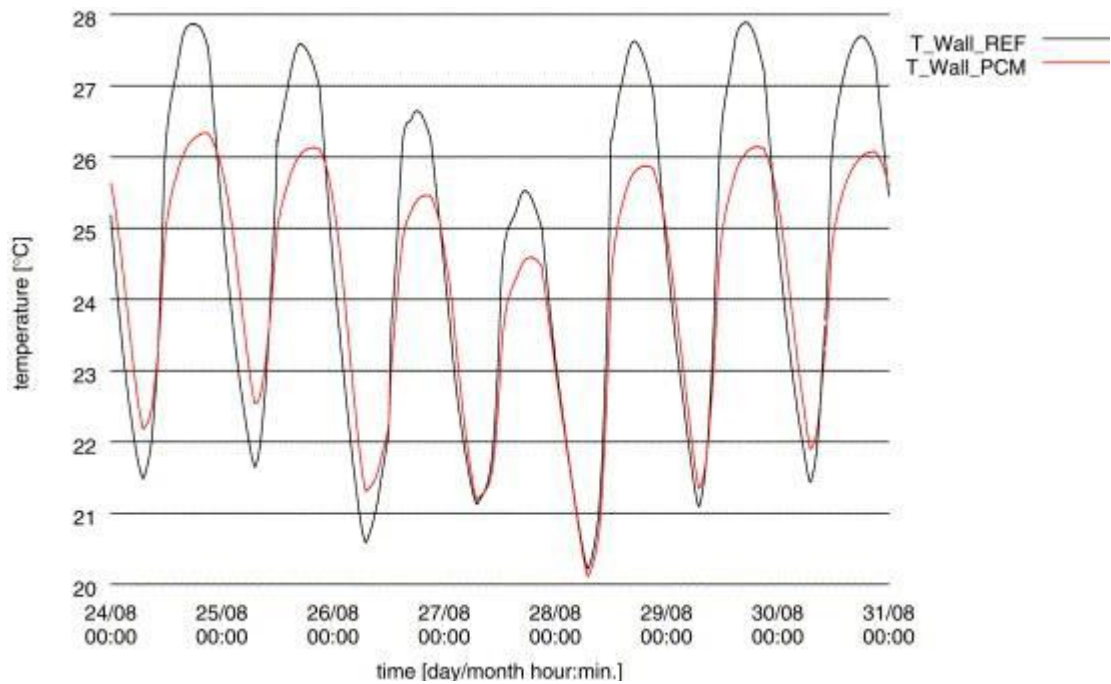


Σχήμα 4.3.1 Μετρημένα προφίλ θερμοκρασίας αέρα και τοίχου για τους δύο χώρους δοκιμών με νυχτερινό αερισμό, αλλά χωρίς σκίαση [79].

Βλέπουμε ότι οι θερμοκρασίες στο χώρο δοκιμών με PCM είναι υψηλότερες από ό, τι στο χώρο δοκιμών αναφοράς.

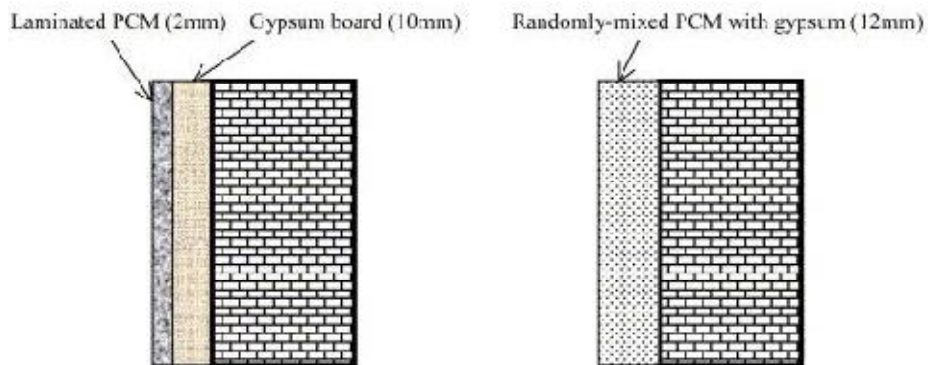
Προκειμένου τώρα να μην υπερφορτωθεί η χωρητικότητα αποθήκευσης όπως συμβαίνει την τελευταία μέρα (σχήμα 4.6), εγκαθιστούμε μια εξωτερικής σκίασης συσκευή (συμβατικά βενετσιάνικα στορ), η οποία πρέπει να ενεργοποιείται αυτόματα σε ζεστές ημέρες και προκύπτουν έτσι οι καμπύλες θερμοκρασίας του σχήματος 4.7, που δείχνουν τη θερμοκρασία στο χώρο δοκιμών με PCM να βρίσκεται περίπου 2K κάτω από την θερμοκρασία του χώρου αναφοράς στη μέγιστη θερμοκρασία. Με βάση το συσσωρευμένο τώρα αριθμό ωρών σε μια ορισμένη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια τριών εβδομάδων με σκίαση έχειδειχθεί ότι στο δωμάτιο αναφοράς, η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από 28°C για περισσότερο από 50 ώρες, ενώ ο χώρος δοκιμών με PCM είναι θερμότερος από 28°C μόνο για περίπου 5 ώρες.





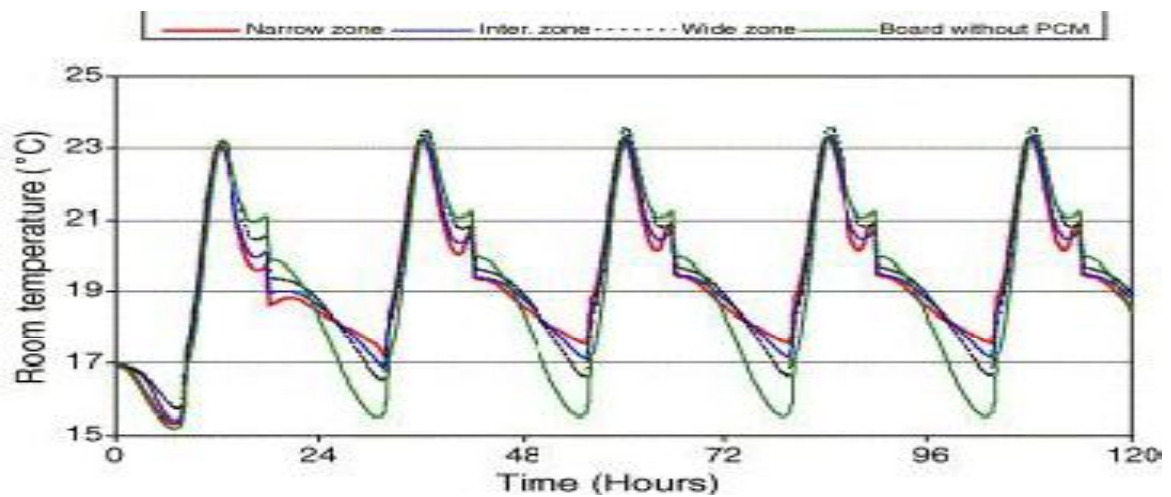
Σχήμα 4.3.2 Μετρημένα προφίλ θερμοκρασίας τοίχου στους δύο χώρους δοκιμών με νυχτερινό αερισμό και σκίαση για τη μείωση των ηλιακών κερδών[79]. Στο χώρο δοκιμών με το υλικό PCM, ο αριθμός των ωρών πέραν των 26°C μειώνονται σημαντικά

Darkwa και η ομάδα του πραγματοποίησαν μια πάρα πολύ ενδιαφέρουσα μελέτη ως προς την χρήση στρώματος PCM σε συνδυασμό με ξεχωριστό στρώμα γύψου και την χρήση γύψου με ενσωματωμένο PCM σε ελαφριά κατασκευής με τις εσωτερικές επιφάνειες επενδυμένες με γυψοσανίδα- PCM πάχους 12 mm . (σχήμα 4.8). Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί επομένως στην προσομοίωση της πρακτικής απόδοσης και των δύο παραπάνω συστημάτων PCM σε ένα παθητικά σχεδιασμένο μοντέλο δωματίου με διαστάσεις 3 m x 4 m x 2,5 m ύψος και με ένα παράθυρο νότιου προσανατολισμού διαστάσεων 1,5 m x 1 m. Και τα δύο δείγματα ξηρού τοίχου περιέχουν το ίδιο ποσό PCM (16,7% μάζας).

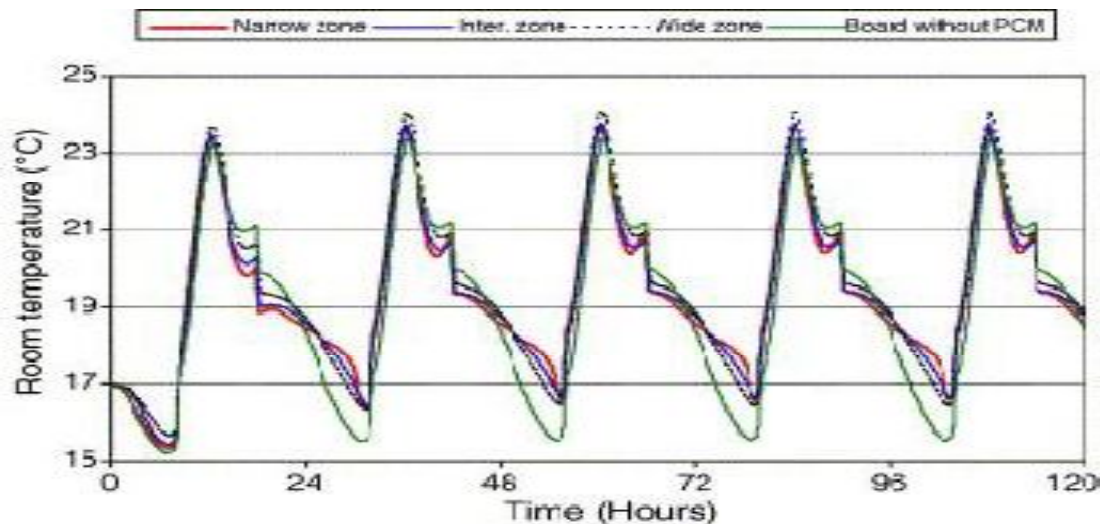


Σχήμα 4.3.3 Αριστερά: Σύστημα PCM με επάλληλα στρώματα, Δεξιά: Τυχαία-μικτό σύστημα PCM [80].

Η προσομοίωση παρουσιάζεται για 120h, παρατηρήθηκε ότι η συνολική θερμική απόδοση του τύπου με στρώμα PCM ήταν πολύ καλύτερη από του τυχαία μικτού τύπου κατά τη διάρκεια των ωρών της νύχτας. Παρουσίασε, επίσης, ταχύτερη απόκριση για τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του δωματίου κατά τις περιόδους αιχμής. Όσον αφορά την επίδραση του εύρους αλλαγής φάσης ο στενός τύπος εμφανίζει την καλύτερη θερμική απόδοση για το τύπο με στρώμα PCM. Αντίθετα δεν υπήρχαν σημαντικές αλλαγές μεταξύ των εύρων αλλαγής φάσης για την γυψοσανίδα PCM τυχαίας ανάμειξης. Γενικά λοιπόν αποδείχτηκε ότι η θερμική απόδοση του συστήματος με στρώμα PCM είναι περίπου 18% καλύτερη από του τυχαία-μικτού τύπου. Ωστόσο, αυτές οι μελέτες ήταν περιορισμένες σε στενές οριακές συνθήκες και υποθέσεις. [80,81]



Σχήμα 4.3.4: Ζώνες αλλαγής φάσης σε σχέση με τη θερμοκρασία δωματίου γυψοσανίδας με στρώμα PCM



Σχήμα 4.3.5: Ζώνες αλλαγής φάσης σε σχέση με τη θερμοκρασία δωματίου τυχαίας μικτής γυψοσανίδα PCM [80].

Ο Lee και η ομάδα του στη μελέτη τους συγκρίναν την απόδοση της θερμικής αποθήκευσης των απλών μπλοκ τσιμέντου με εκείνα που είναι εμποτισμένα με δύο τύπους PCM, BS και εμπορική παραφίνη (ο εμποτισμός επιτεύχθηκε βυθίζοντας το θερμαινόμενο σκυρόδεμα σε μια μπανιέρα γεμάτη με λιωμένο PCM μέχρι η απαιτούμενη ποσότητα PCM να απορροφηθεί (3.9 έως 8.6%)). Δύο τύποι μπλοκ εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν, το κοινό μπλοκ που είναι κατασκευασμένο από τσιμέντο Portland και το κυψελωτό μπλοκ που αποτελείται από τσιμέντο Portland συν διοξείδιο του πυριτίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μπλοκ τσιμέντου μπορούν να αποθηκεύουν τη λανθάνουσα και την αισθητή θερμότητα των ενσωματωμένων PCM καθώς επίσης και την αισθητή θερμότητα του σκυροδέματος. Αυτό επιτρέπει στη θέρμανση και ψύξη που παρέχεται από τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας να μετατοπίζεται από τις ώρες ζήτησης. [82]

Τέλος ο Shi μελέτησε πειραματικά τη χρήση του PCM (παραφίνη) στη μάζα σκυροδέματος για την αποφυγή θερμικών ρωγμών. Καθώς η λανθάνουσα θερμότητα του PCM απελευθερώνεται ή απορροφάται σε μια ορισμένη θερμοκρασία σε μια μάζα σκυροδέματος, το PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της έντασης της θερμοκρασίας και την πρόληψη των ρωγμών λόγω θερμοκρασίας. Η κατανομή της θερμοκρασίας δοκιμάστηκε στη μέση περιοχή μιας μάζας σκυροδέματος με PCM για τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Η αντοχή σε θλίψη και η διαπερατότητα της μάζας σκυροδέματος με PCM δοκιμάστηκαν και η μικροσκοπική πορώδη δομή του PCM κονιάματος ερευνήθηκε επίσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος μειώνεται με την προσθήκη PCM, αλλά η αντι-διαπερατότητα του σκυροδέματος είναι ενισχυμένη. Το συνολικό πορώδες του PCM κονιάματος δεν άλλαξε πολύ σε σύγκριση με εκείνο των απλών κονιαμάτων, όμως η διάμετρος πόρων έγινε μεγαλύτερη. Η μέγιστη θερμοκρασία στη μάζα σκυροδέματος, επίσης, μειώθηκε με την προσθήκη PCM. Επιπλέον ο ρυθμός της διαδικασίας αύξησης της θερμοκρασίας και της διαδικασίας μείωσης της θερμοκρασίας μειώθηκε, έτσι, ο σχηματισμός ρωγμών λόγω θερμοκρασίας στη μάζα του σκυροδέματος θα μπορούσε να αποφευχθεί.

## Μέρος 2<sup>ο</sup>: Υπολογιστικό Μέρος

### Κεφάλαιο 5: Θεωρητική προσομοίωση

#### **5.1 Παρουσίαση του προβλήματος**

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια παρουσίαση εφαρμογής υλικών αλλαγής φάσης ενσωματωμένων σε μικροκάψουλες σε τοίχο νότιου, δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού ξεχωριστά, δηλαδή στη πρώτη περίπτωση το PCM θα χρησιμοποιείται σε νότιο εσωτερικό τοίχο αίθουσας απέναντι από υαλοπίνακα, για την παθητική ηλιακή θέρμανση αυτής, στην δεύτερη περίπτωση σε δυτικό εσωτερικό τοίχο και στην τρίτη σε ανατολικό. Αρχικά σε κάθε περίπτωση μελετάται η συμπεριφορά του PCM και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε αυτό. Στη συνέχεια γίνεται μια μελέτη ως προς την ισχύ που δίνει κάθε φορά το PCM και θεωρώντας ότι στην αίθουσα υπάρχουν σταθερές απώλειες (η παραδοχή αυτή γίνεται για μια πρότυπη προσέγγιση, καθώς οι απώλειες δεν μπορεί να είναι απόλυτα σταθερές) υπολογίζεται η συμπληρωματική ισχύ που απαιτείται από εξωτερικούς παράγοντες ώστε να έχουμε μια επιθυμητή σταθερή θερμοκρασία στην αίθουσα.

Επίσης εξετάστηκε η συμπεριφορά του συστήματος και η επίδραση που είχε σε αυτό οι μεταβολές διάφορων παραγόντων, όπως η αλλαγή του μήνα μελέτης, η αλλαγή της ηλιοφάνειας μίας ημέρας μελέτης, η αλλαγή της επιφάνειας του υαλοπίνακα η αλλαγή του μοντέλου PCM που χρησιμοποιούμε κάθε φορά καθώς και η αλλαγή προσανατολισμού του τοίχου που περιέχει το PCM. Η κάθε μεταβολή ενός παράγοντα αποτελεί μία ξεχωριστή παραμετρική μελέτη.

Χαρακτηριστικά της αίθουσας :

Θεωρήσαμε αίθουσα στην Αθήνα με διαστάσεις πλάτος = 10m

Μήκος = 10m

Ύψος = 3m

Ο τοίχος που θα περιέχει το PCM θα είναι πάντα απέναντι από υαλοπίνακα μεταβλητών διαστάσεων.

- $2,5 \times 3 \text{ m}^2$
- $2,5 \times 4 \text{ m}^2$
- $3 \times 4 \text{ m}^2$

Ο προσανατολισμός του τοίχου θα είναι διαφορετικός σε κάθε περίπτωση.

- Εσωτερικός τοίχος νότιου προσανατολισμού
- Εσωτερικός τοίχος δυτικού προσανατολισμού
- Εσωτερικός τοίχος ανατολικού προσανατολισμού

Ο τοίχος επίσης θα αποτελείται από : Γυψοσανίδα =10mm

Στρώμα PCM = 20mm

Μόνωση =30mm

Τούβλο =60mm

Σοβάς =10mm

Τα μοντέλα PCM που θα χρησιμοποιηθούν είναι τα εξής :

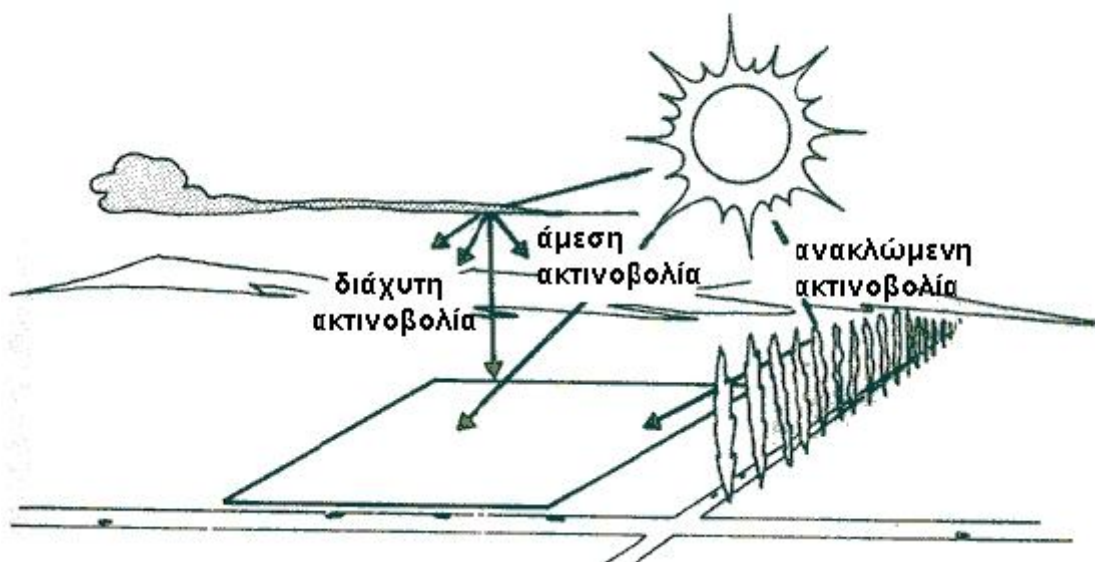
- Υποθετικό PCM
- Μοντέλο RT 20
- Μοντέλο SP25 A8

## 5.2 Υπολογισμός άμεσης, διάχυτης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ( $G_b$ , $G_d$ ) και ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου.[83]

### 5.2.1 Υπολογισμός και παρουσίαση αποτελεσμάτων

**Άμεση ηλιακή ακτινοβολία  $G_b$ :** Ηλιακή ακτινοβολία, που έρχεται απευθείας από τον ήλιο και προσπίπτει στη γη χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα.

**Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία  $G_d$ :** Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο οριζόντιο επίπεδο αφού έχει αλλάξει διεύθυνση από σκέδαση στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 5.2.1.1 Άμεση, διάχυτη, και ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου.

Για τον υπολογισμό της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου  $G_b$  και  $G_d$  αντίστοιχα χρησιμοποιούμε τις σχέσεις που δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\bullet \quad G_b = M_t + A_t \sin\left(\frac{360}{365} D - P_t\right) \quad (5.2.1.1)$$

$$\bullet \quad G_d = m_t + a_t \sin\left(\frac{360}{365} D - p_t\right) \quad (5.2.1.2)$$

Όπου οι συντελεστές  $M_t, m_t, a_t, A_t, P_t, p_t$  δίνονται από τον παρακάτω πίνακα για τις ώρες 07.00-18.00. Ο οποίος βρίσκεται στη σελίδα 27 του βιβλίου Ηλιακή Ενέργεια.

Πίνακας 5.2.1.1 Σταθερές για τον υπολογισμό της  $G_b$  και  $G_d$ .

t [hrs]	Mt	At	Pt	mt	at	pt
07.00	0,007	0,046	86,18	0,048	0,111	81,23
08.00	0,057	0,068	87,31	0,134	0,127	82,45
09.00	0,119	0,104	87,94	0,208	0,133	83,94
10.00	0,191	0,129	88,31	0,261	0,129	85,6
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

Και όπου το μέγεθος  $D$  είναι ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους, για την οποία ζητείται να υπολογισθεί η ηλιακή ακτινοβολία δηλαδή  $D=1-365$ .

Ενώ η ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου συμβολίζεται με  $G_t$  και δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\bullet \quad G_t = G_b R_b + G_d \left( \frac{1+\cos\beta}{2} \right) + (G_b + G_d) \left( \frac{1-\cos\beta}{2} \right) \rho \quad (5.2.1.3)$$

Όπου  $\beta$  : κλίση επιφάνειας, η γωνία μεταξύ της επιφάνειας και του οριζόντιου επιπέδου.

Στη περίπτωση μας όπου μελετάμε κατακόρυφο τοίχο η κλίση της επιφάνειας είναι  $\beta=90^\circ$ . Άρα ο τελικός μας τύπος για την ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου είναι :

$$\bullet G_t = G_b R_b + G_d / 2 + (G_b + G_d) \frac{\rho}{2} \quad (5.2.1.4)$$

Όπου:

➤ Η ανακλαστικότητα του εδάφους για κανονικό έδαφος είναι  $\rho=0,2$ .

$$\bullet R_b = \frac{\sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega}{\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega} \quad \text{για νότιο}$$

προσανατολισμό

$$\text{Και } R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \text{ για δυτικό και ανατολικό}$$

Με:

$$\bullet \cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \cos \beta + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \beta \sin \omega$$

$$\bullet \cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega$$

•  $\Phi=37,97$  γεωγραφικό πλάτος Αθήνας  
γωνιακή θέση βόρεια ή νότια του ισημερινού

•  $\delta$  είναι η γωνιακή απόσταση του ηλίου από τον ισημερινό, δίνεται από το τύπο  $\delta = 23,45 \sin \frac{360(284+n)}{365}$  με  $n$  ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους, για την οποία ζητείται να υπολογισθεί η ηλιακή ακτινοβολία δηλαδή  $n=1-365$ .

•  $\omega=0,25 \times (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι})$  ωριαία γωνία (η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού)



λόγο περιστροφής της γης γύρω από τον αξονά της).

- $\gamma=90^\circ$  για δυτικό προσανατολισμό και  $\gamma=-90^\circ$  για ανατολικό

Ο υπολογισμός έγινε και για τους δώδεκα μήνες του χρόνου για τρεις προσανατολισμούς Νότιο, Δυτικό, Ανατολικό τα αποτελέσματα καθώς και τα διαγράμματα μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας παρατίθενται παρακάτω:

❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου: με  $D=21$ ,  $\delta=-20,14$

Πίνακας 5.2.1.2 : Άμεση  $G_b$ , διάχυτη  $G_d$  ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία  $G_t$  κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Ιανουαρίου νότιου προσανατολισμού.

Ώρες(hrs)	$G_b(KW/m^2)$	$G_d(KW/m^2)$	$\omega$	Rb	$G_t(KW/m^2)$
7	-0,03484	-0,0486	-75	-21,1968	0,705776
8	-0,00539	0,022173	-60	3,538015	-0,00631
9	0,023131	0,089291	-45	2,182949	0,106381
10	0,071765	0,144225	-30	1,798985	0,222816
11	0,115546	0,176701	-15	1,649453	0,308162
12	0,148421	0,187146	0	1,608016	0,365793
13	0,159511	0,172015	15	1,649453	0,382266
14	0,157224	0,133893	30	1,798985	0,378902
15	0,117977	0,094897	45	2,182949	0,326274
16	0,05399	0,060557	60	3,538015	0,23275
17	-0,03442	0,02959	75	-21,1968	0,74381
18	-0,12019	-0,03216	90	-1,28717	0,123393

Πίνακας 5.2.1.3 : Ακτινοβολία  $G_t$  κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Ιανουαρίου δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού.

Ώρα (hrs)	Rb	$G_t(KW/m^2)$	Rb	$G_t(KW/m^2)$
7	45,5708	-1,62016	-45,6046	1,556056
8	-5,12447	0,040387	5,130105	-0,01489
9	-2,12709	0,006686	2,13057	0,105169
10	-1,09163	0,015371	1,094492	0,172258
11	-0,48139	0,061952	0,484018	0,173501
12	0,00128	0,12732	0,00128	0,12732
13	0,484018	0,196366	-0,48139	0,042372
14	1,094492	0,268139	-1,09163	-0,07557
15	2,13057	0,320095	-2,12709	-0,18221

16	5,130105	0,318707	-5,12447	-0,23494
17	-45,6046	1,583818	45,5708	-1,55403
18	-4,44248	0,502641	4,440434	-0,56503

Από το πίνακα εύκολα παρατηρούμε ότι μερικές τιμές δεν είναι λογικές . Για παράδειγμα δεν είναι δυνατόν να υπάρχει αρνητική ακτινοβολία ή επίσης στις 7 η ώρα το πρωί είναι παράλογο η ακτινοβολία να ανέρχεται στις 1,556KW/m<sup>2</sup> για ένα χειμερινό μήνα όπως είναι ο Ιανουάριος. Έτσι αυτές οι τιμές απορρίπτονται και στη θέση τους βάζουμε μηδέν.

Η ενέργεια αυτή, δηλαδή η απαλοιφή των μη λογικών τιμών και η αντικατάσταση τους με μηδέν , γίνεται και για τους υπόλοιπους μήνες και οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται κατευθείαν με την διόρθωση.

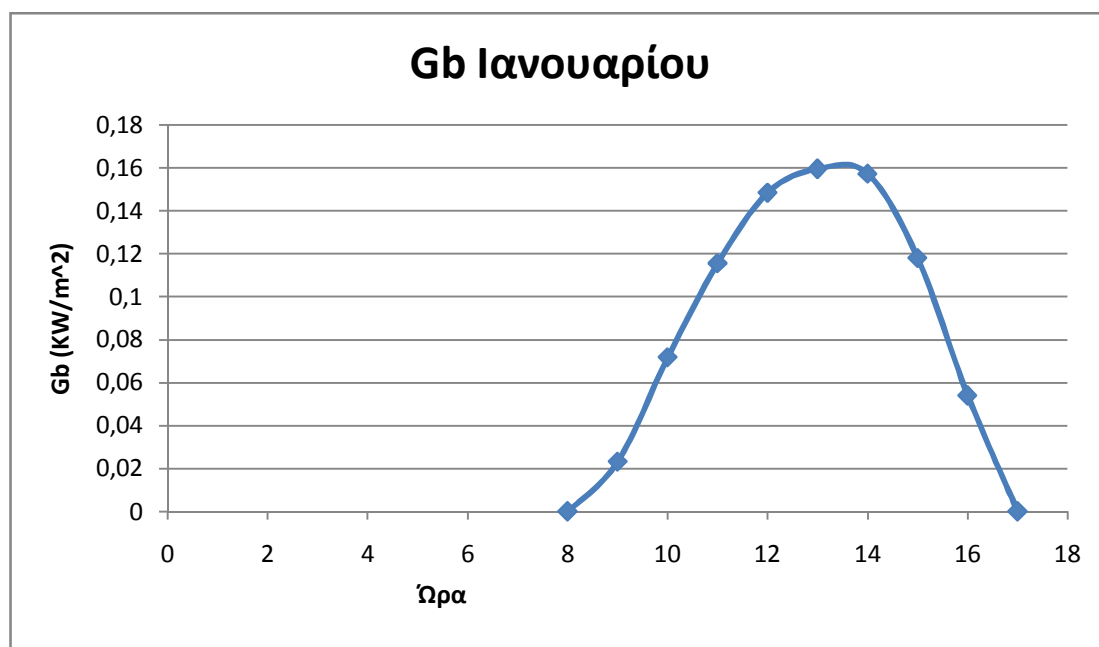
Άρα τελικά προκύπτει ο παρακάτω πίνακας :

Πίνακας 5.2.1.4 :Άμεση Gb , διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία Gt κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Ιανουαρίου νότιου προσανατολισμού.

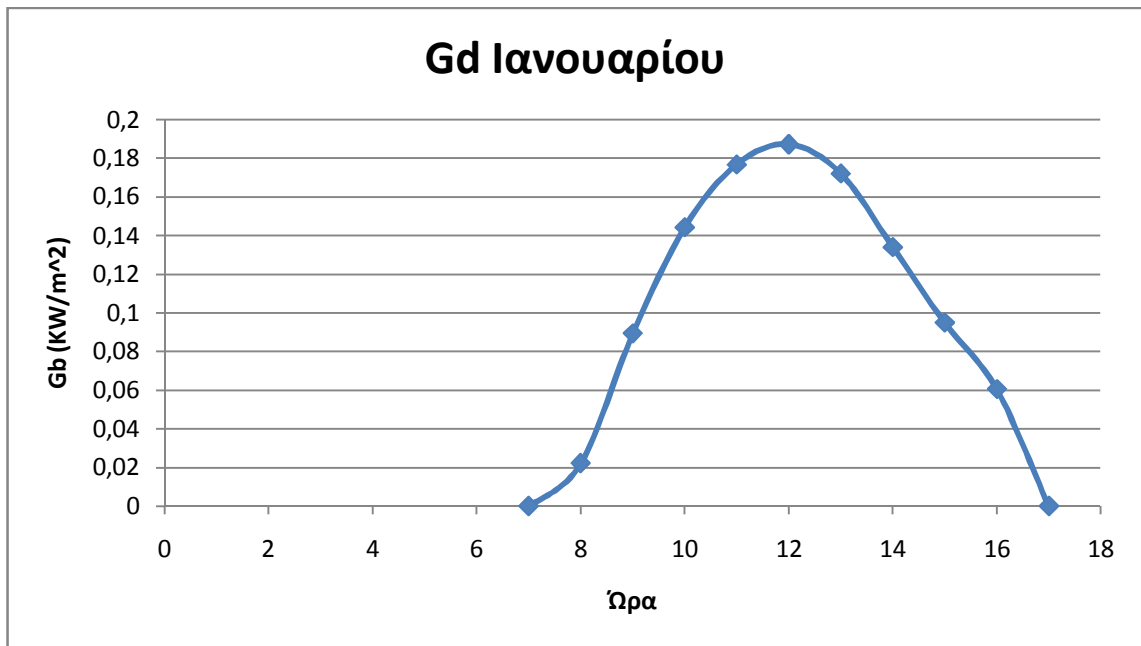
Ώρες(hrs)	Gb(KW/m <sup>2</sup> )	Gd(KW/m <sup>2</sup> )	ω	Rb	Gt(KW/m <sup>2</sup> )
7	0	0	-75	-21,1968	0
8	0	0,022173	-60	3,538015	0
9	0,023131	0,089291	-45	2,182949	0,106381
10	0,071765	0,144225	-30	1,798985	0,222816
11	0,115546	0,176701	-15	1,649453	0,308162
12	0,148421	0,187146	0	1,608016	0,365793
13	0,159511	0,172015	15	1,649453	0,382266
14	0,157224	0,133893	30	1,798985	0,378902
15	0,117977	0,094897	45	2,182949	0,326274
16	0,05399	0,060557	60	3,538015	0,23275
17	0	0,02959	75	-21,1968	0
18	0	0	90	-1,28717	0

Πίνακας 5.2.1.5 : Ακτινοβολία Gt κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Ιανουάριου δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού.

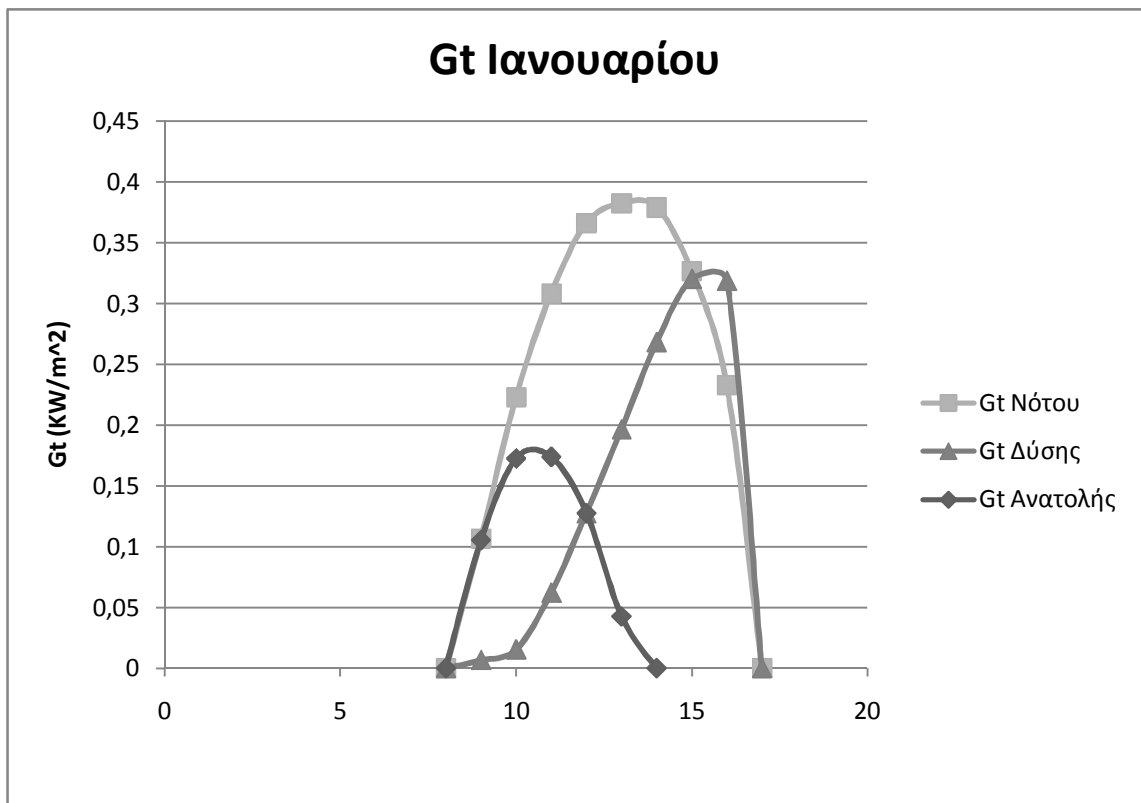
Ώρα (hrs)	Rb	Gt(KW/m <sup>2</sup> )	Rb	Gt(KW/m <sup>2</sup> )
7	45,5708	0	-45,6046	0
8	-5,12447	0	5,130105	0
9	-2,12709	0,006686	2,13057	0,105169
10	-1,09163	0,015371	1,094492	0,172258
11	-0,48139	0,061952	0,484018	0,173501
12	0,00128	0,12732	0,00128	0,12732
13	0,484018	0,196366	-0,48139	0,042372
14	1,094492	0,268139	-1,09163	0
15	2,13057	0,320095	-2,12709	0
16	5,130105	0,318707	-5,12447	0
17	-45,6046	0	45,5708	0
18	-4,44248	0	4,440434	0



Σχήμα. 5.2.1.1: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιανουαρίου.



Σχήμα 5.2.1. 2: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιανουαρίου.

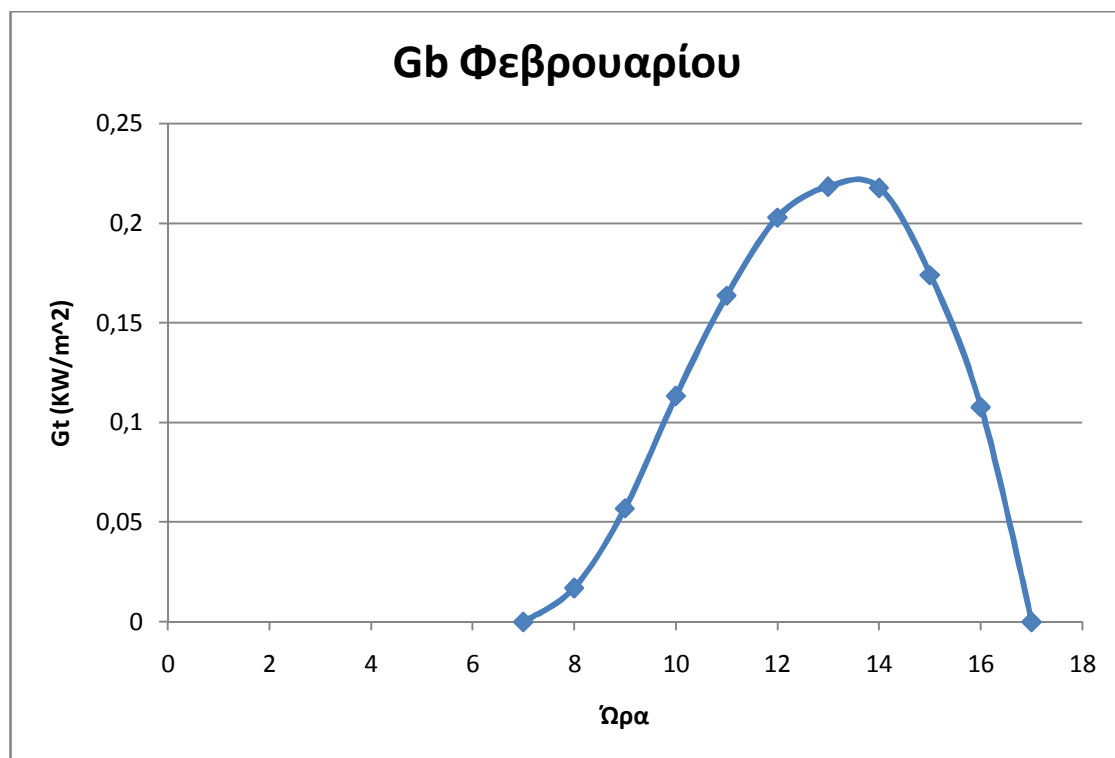


Σχήμα 5.2.1.3: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιανουαρίου του νότιου-δυτικού-ανατολικού προσανατολισμού.

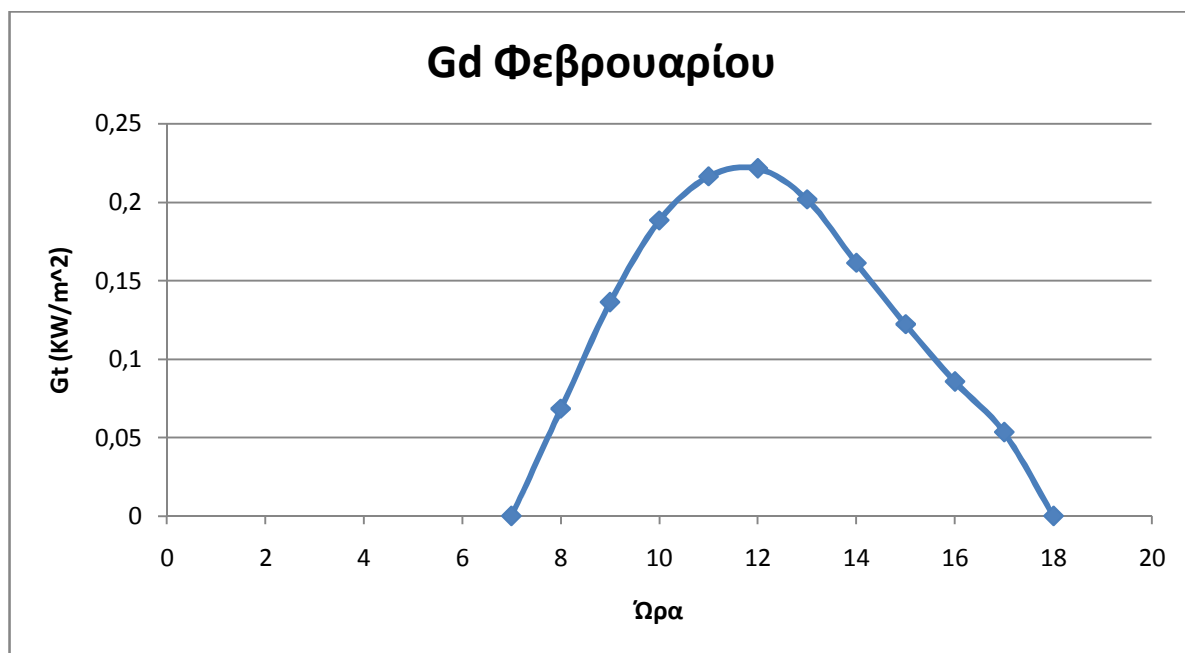
❖ Για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου :  $D=52$  ,  $\delta=-11,2866$

Πίνακας 5.2.1. 6 :Άμεση  $G_b$  , διάχυτη  $G_d$  ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία  $G_t$  κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Φεβρουαρίου νότιου , δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού.

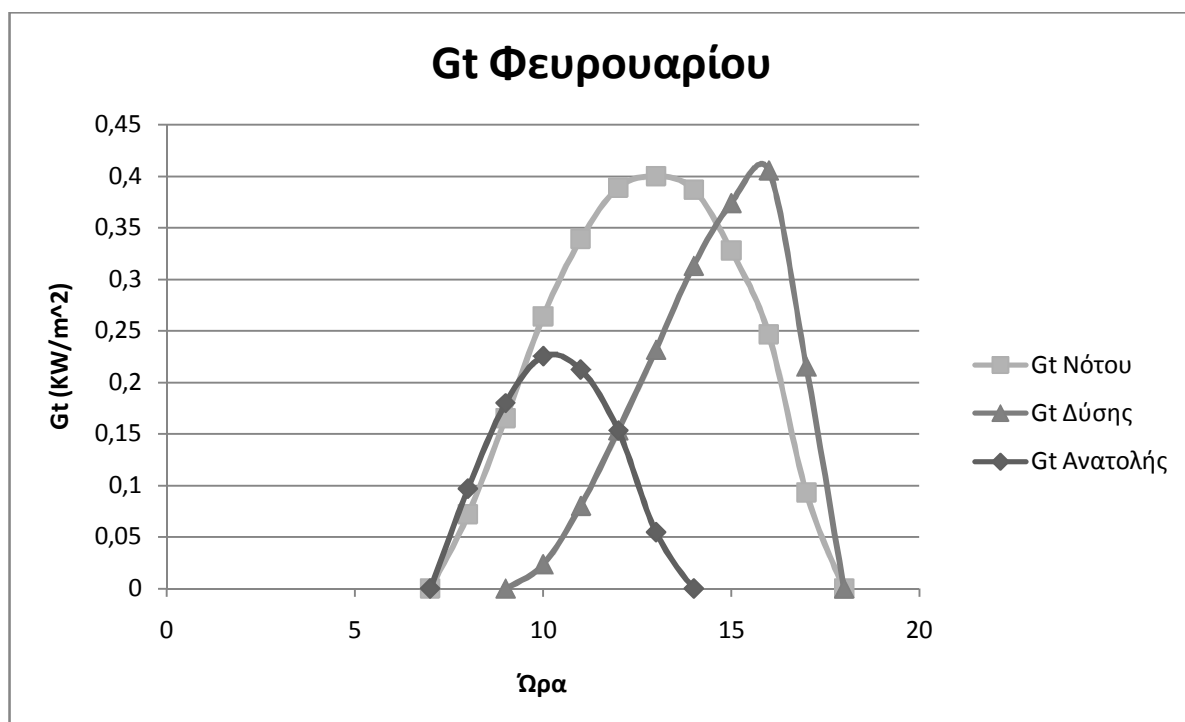
Ώρα (hrs)	$G_b(KW/m^2)$	$G_d(KW/m^2)$	$\omega$	Rb	$G_t(KW/m^2)$ νότου	Rb	$G_t(KW/m^2)$ δύσης	Rb	$G_t(KW/m^2)$ ανατολής
7	0	0	-75	3,86859	0	-11,7857	0	11,79182	0
8	0,017027	0,068312	-60	1,710856	0,07182	-3,18205	0	3,184775	0,096916
9	0,056943	0,136274	-45	1,362053	0,165018	-1,62331	0	1,62548	0,180019
10	0,113359	0,188315	-30	1,232158	0,264001	-0,89094	0,023328	0,892906	0,225544
11	0,163713	0,216319	-15	1,17656	0,338781	-0,40388	0,080042	0,405757	0,212591
12	0,202889	0,221495	0	1,160602	0,38866	0,000924	0,153373	0,000924	0,153373
13	0,218331	0,201711	15	1,17656	0,399738	0,405757	0,231449	-0,40388	0,054679
14	0,217683	0,161303	30	1,232158	0,38677	0,892906	0,312921	-0,89094	0
15	0,173989	0,122171	45	1,362053	0,327684	1,62548	0,373517	-1,62331	0
16	0,107737	0,085692	60	1,710856	0,246511	3,184775	0,405307	-3,18205	0
17	0,015396	0,053417	75	3,86859	0,093151	11,79182	0,215138	-11,7857	0
18	0	0	90	-1,29202	0,088403	-8,19473	0	8,192673	0



Σχήμα 5.2.1.4: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Φεβρουαρίου.



Σχήμα 5.2.1.5: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Φεβρουαρίου.

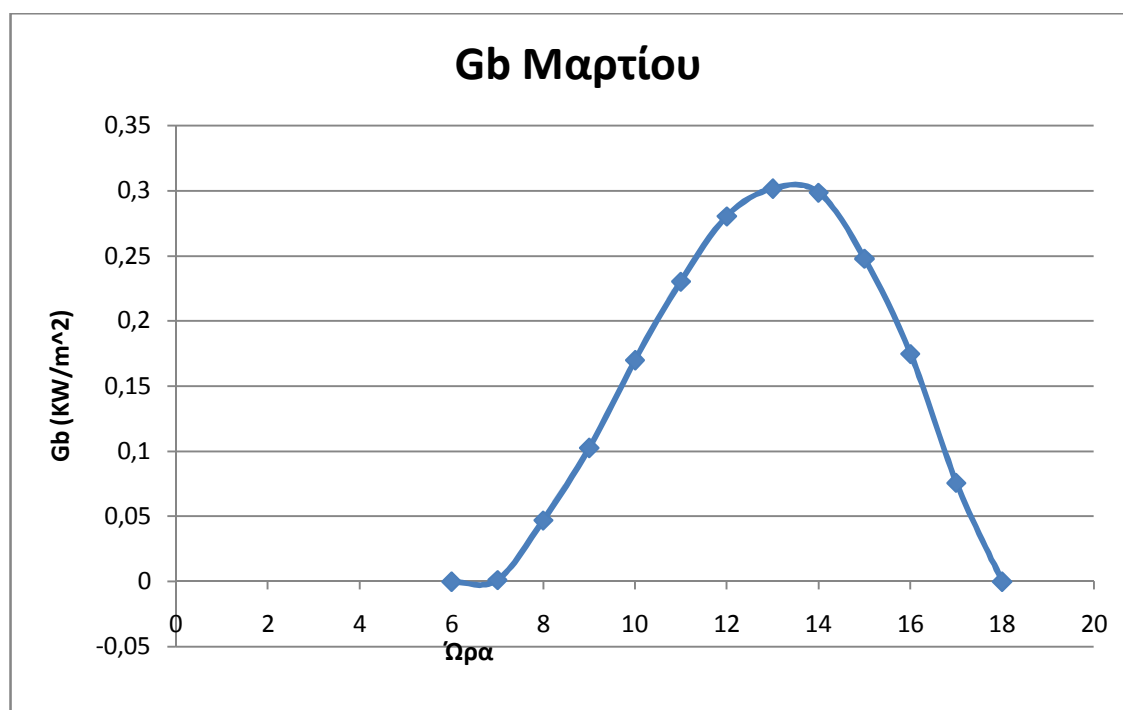


Σχήμα 5.2.1.6: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Φεβρουαρίου νότιου-δυτικού-ανατολικού προσανατολισμού

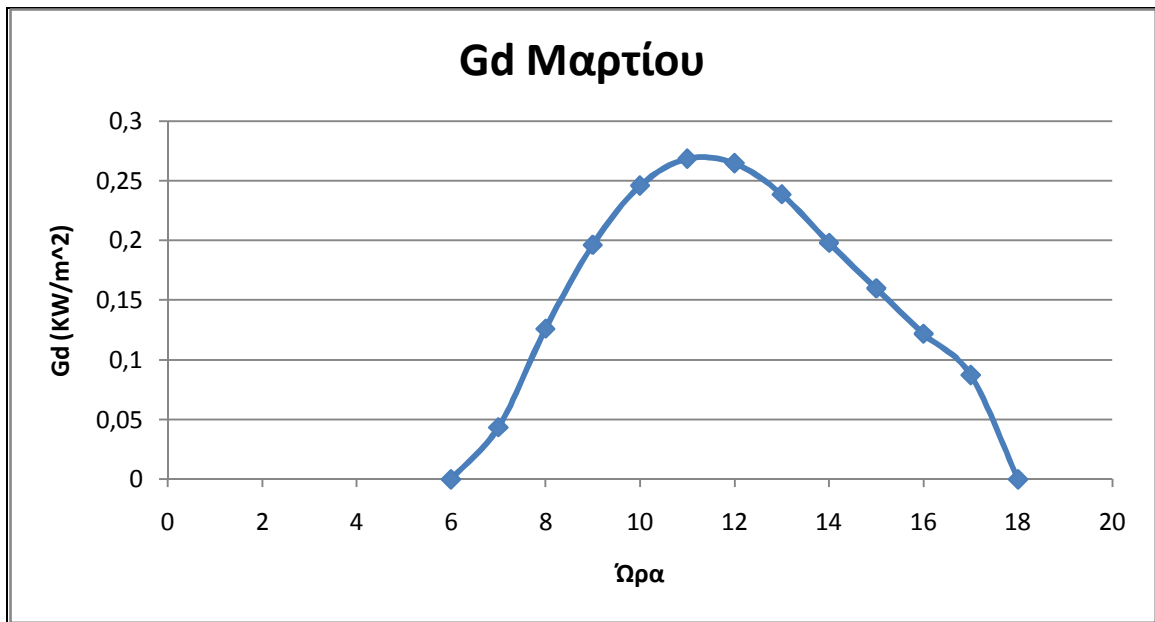
❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου:  $D=80$  ,  $\delta=-0,47813$

Πίνακας 5.2.1.7 : Άμεση  $G_b$  , διάχυτη  $G_d$  ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία  $G_t$  κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Μάρτη νότιου , δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού.

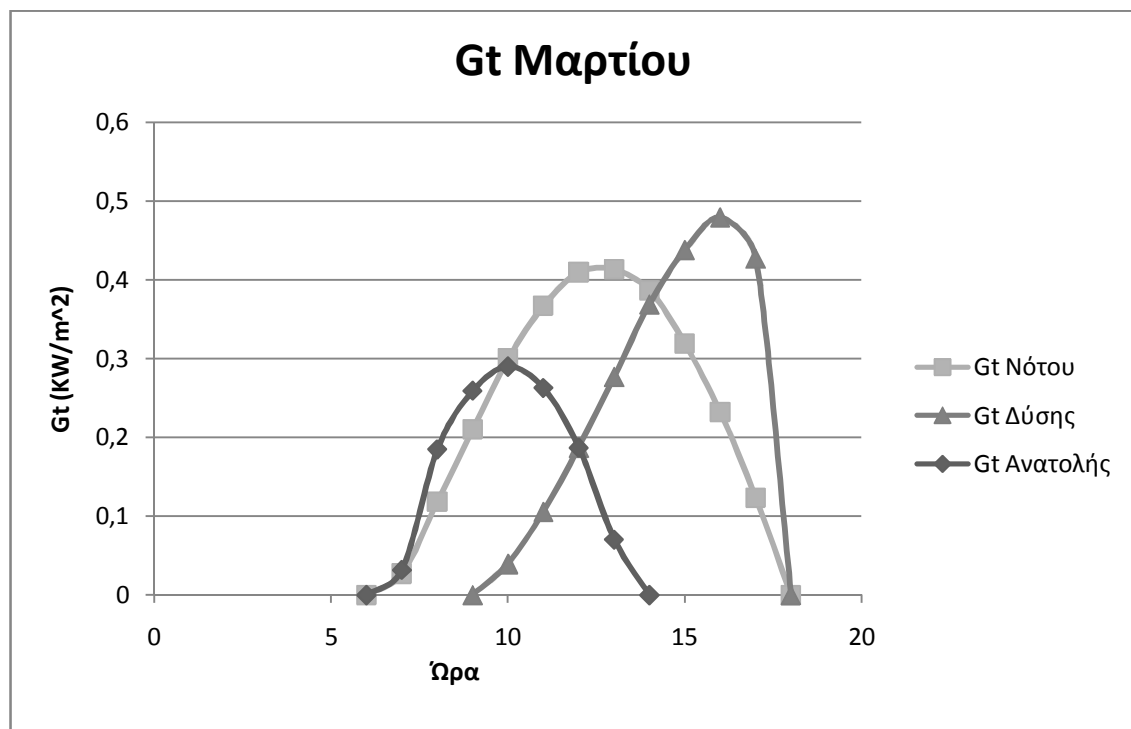
Ωρα (hrs)	$G_b(KW/m^2)$	$G_d(KW/m^2)$	$\omega$	Rb	$G_t(KW/m^2)$ νότου	Rb	$G_t(KW/m^2)$ δύσης	Rb	$G_t(KW/m^2)$ ανατολής
7	0,001177	0,043498	-75	0,833729	0,027198	-4,84106	0	4,842384	0,031917
8	0,047064	0,126149	-60	0,807855	0,118417	-2,22209	0	2,223373	0,185038
9	0,102675	0,196331	-45	0,799837	0,210189	-1,27828	0	1,279554	0,259444
10	0,169928	0,245966	-30	0,796303	0,299887	-0,73663	0,039398	0,737898	0,289962
11	0,230274	0,268453	-15	0,794679	0,367093	-0,34129	0,105508	0,342559	0,262982
12	0,280439	0,264697	0	0,7942	0,409587	0,000632	0,187039	0,000632	0,187039
13	0,301661	0,238698	15	0,794679	0,413109	0,342559	0,276722	-0,34129	0,07043
14	0,298578	0,197987	30	0,796303	0,386408	0,737898	0,36897	-0,73663	0
15	0,247872	0,159966	45	0,799837	0,319024	1,279554	0,437933	-1,27828	0
16	0,174809	0,121893	60	0,807855	0,231837	2,223373	0,479282	-2,22209	0
17	0,075839	0,087291	75	0,833729	0,123187	4,842384	0,427197	-4,84106	0
18	0	0,038521	90	-1,56906	0,055329	-222,145	0	222,1425	0



Σχήμα 5.2.1.7: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαρτίου.



Σχήμα 5.2.1.8: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαρτίου.



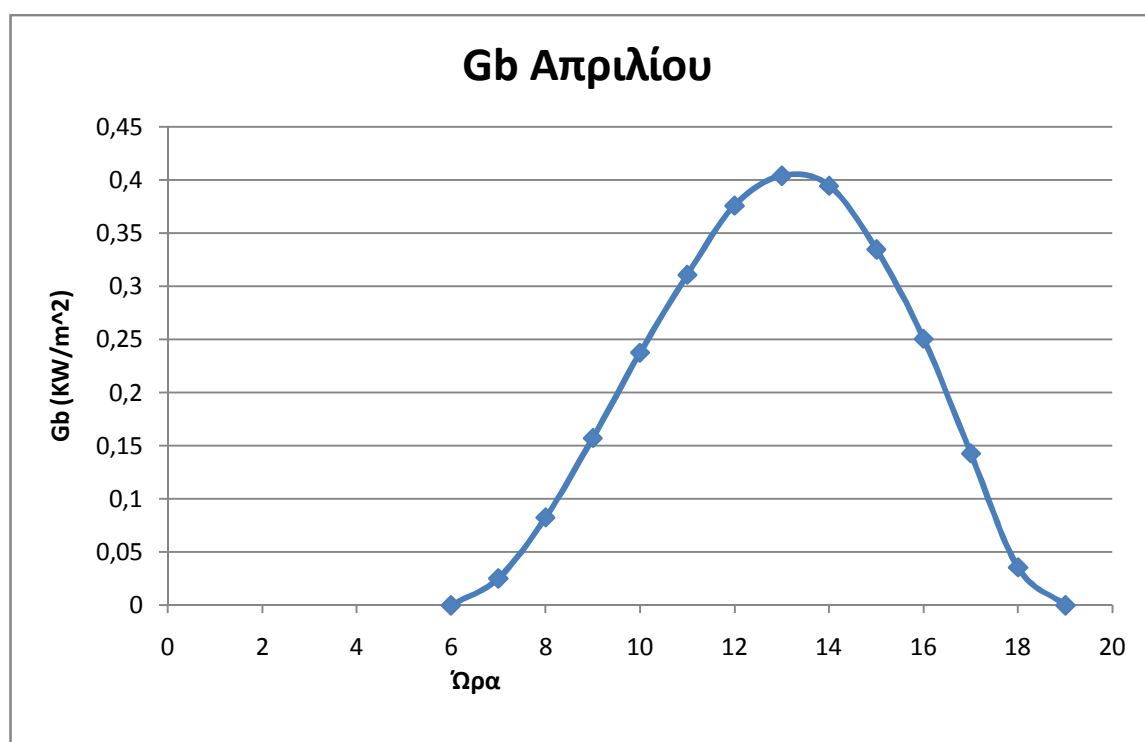
Σχήμα 5.2.1.9: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαρτίου νότιου-δυτικού-ανατολικού προσανατολισμού.



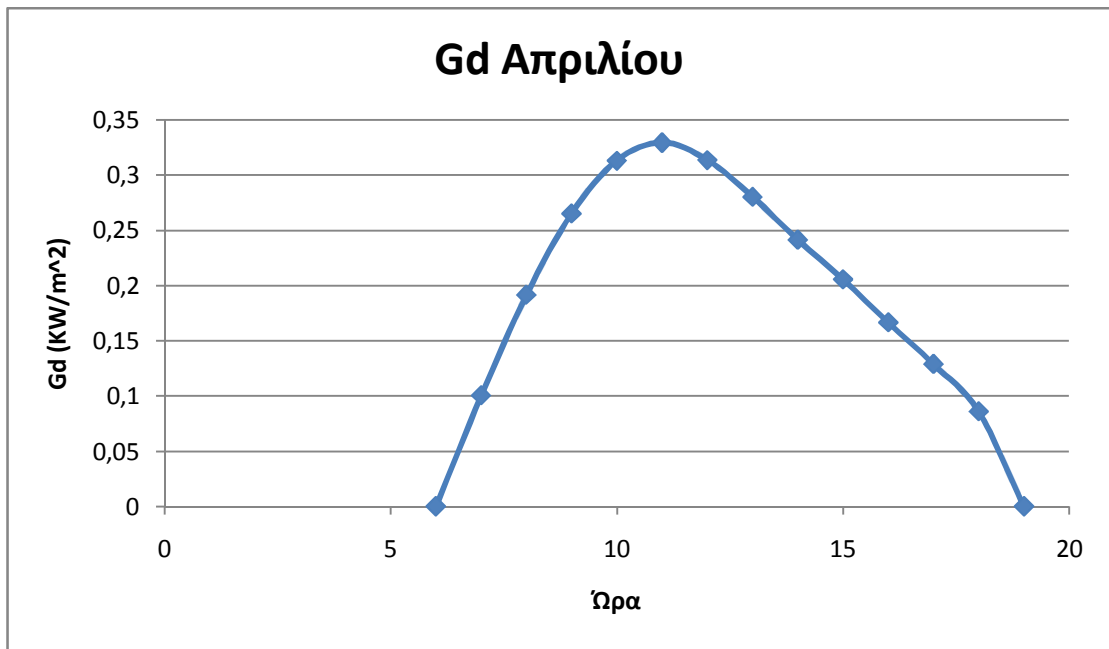
❖ Για την 21<sup>η</sup> Απριλίου:  $D=111$  ,  $\delta=11,50867$

Πίνακας 5.2.1.8 :Άμεση  $G_b$  , διάχυτη  $G_d$  ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία  $G_t$  κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Απρίλη νότιου , δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού

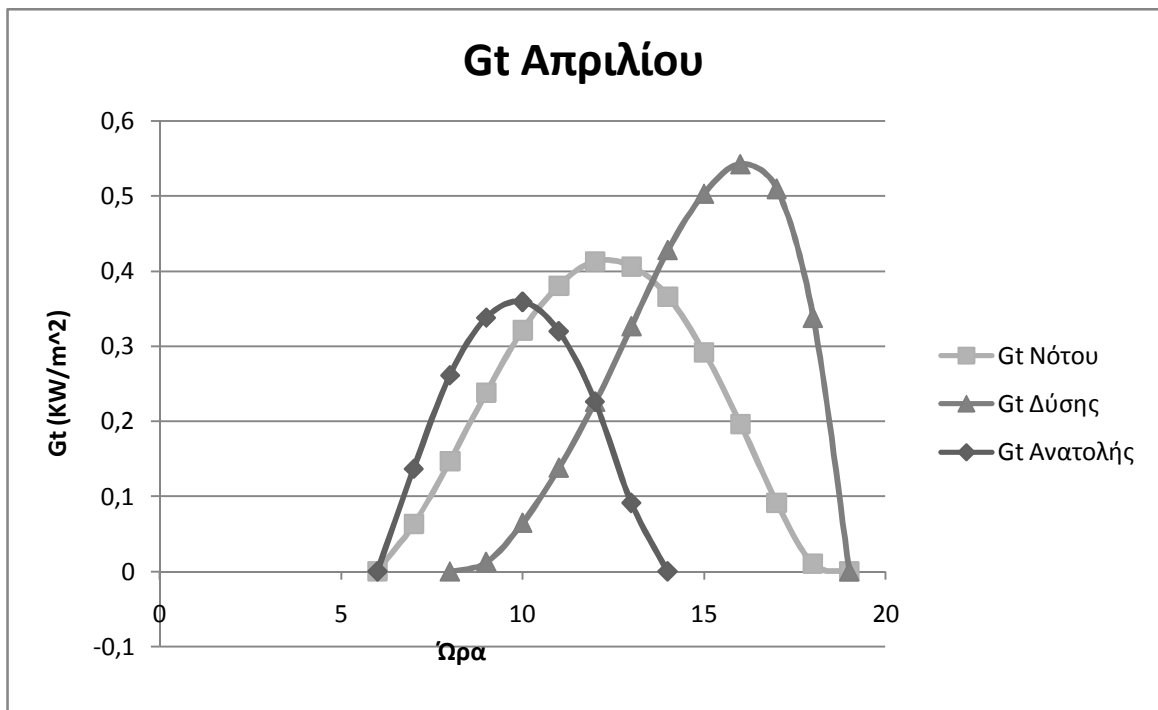
Ωρα (hrs)	$G_b(KW/m^2)$	$G_d(KW/m^2)$	$\omega$	Rb	$G_t(KW/m^2)$ νότου	Rb	$G_t(KW/m^2)$ δύσης	Rb	$G_t(KW/m^2)$ ανατολής
7	0,025186	0,100513	-75	-0,00195	0,062777	-2,92878	0	2,928777	0,136591
8	0,082647	0,191688	-60	0,284191	0,146765	-1,66539	0	1,66584	0,260955
9	0,157164	0,265314	-45	0,402816	0,238213	-1,03463	0,012298	1,035271	0,337612
10	0,237563	0,313196	-30	0,461356	0,321275	-0,61804	0,064849	0,618778	0,358673
11	0,310628	0,329499	-15	0,489694	0,380875	-0,29131	0,138274	0,292086	0,319492
12	0,375709	0,313768	0	0,498243	0,413026	0,000396	0,225981	0,000396	0,225981
13	0,403746	0,280421	15	0,489694	0,406339	0,292086	0,326556	-0,29131	0,091013
14	0,394317	0,241412	30	0,461356	0,366199	0,618778	0,428273	-0,61804	0
15	0,334521	0,205669	45	0,402816	0,291604	1,035271	0,503174	-1,03463	0
16	0,250571	0,166658	60	0,284191	0,196262	1,66584	0,542463	-1,66539	0
17	0,142735	0,128869	75	-0,00195	0,091316	2,928777	0,509634	-0,18925	0
18	0,035585	0,086085	90	-1,27112	0,009977	7,949402	0,338087	-0,29225	0



Σχήμα 5.2.1.10: Μεταβολή της αμέσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Απριλίου.



Σχήμα 5.2.1.11: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Απριλίου.

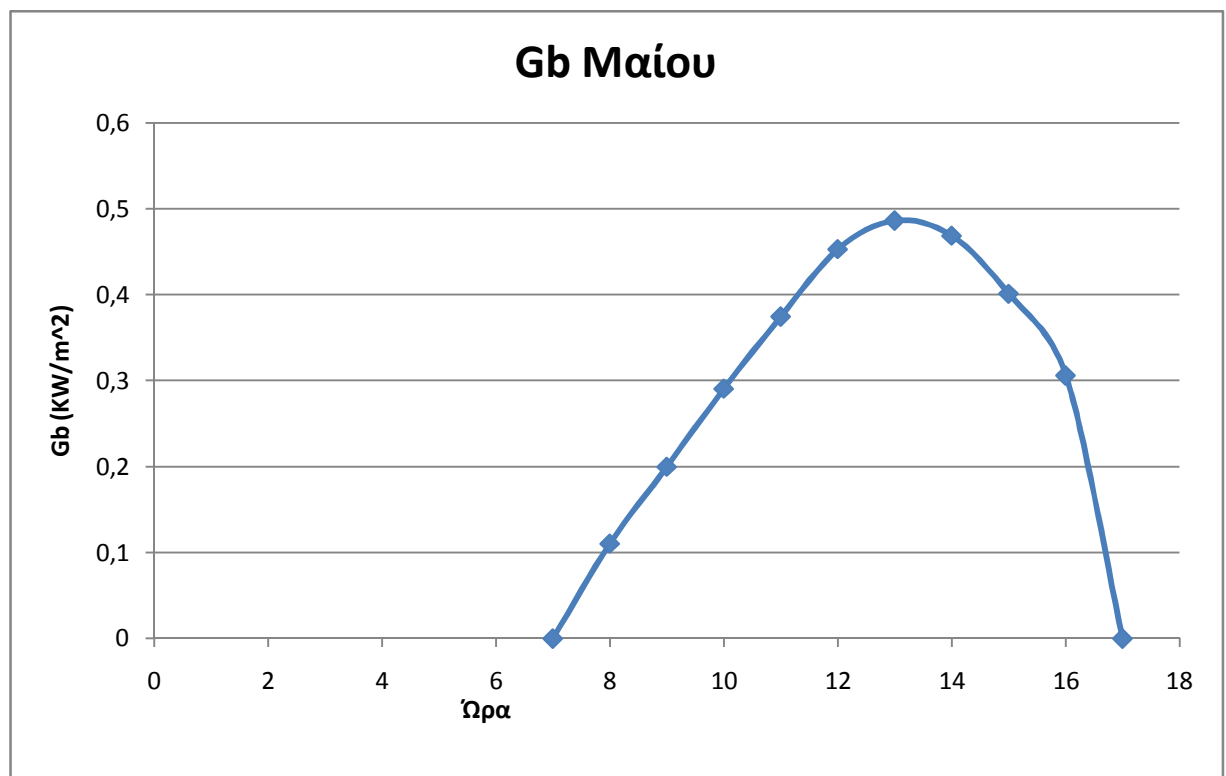


Σχήμα 5.2.1.12: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Απριλίου νότιου-δυτικού-ανατολικού προσανατολισμού.

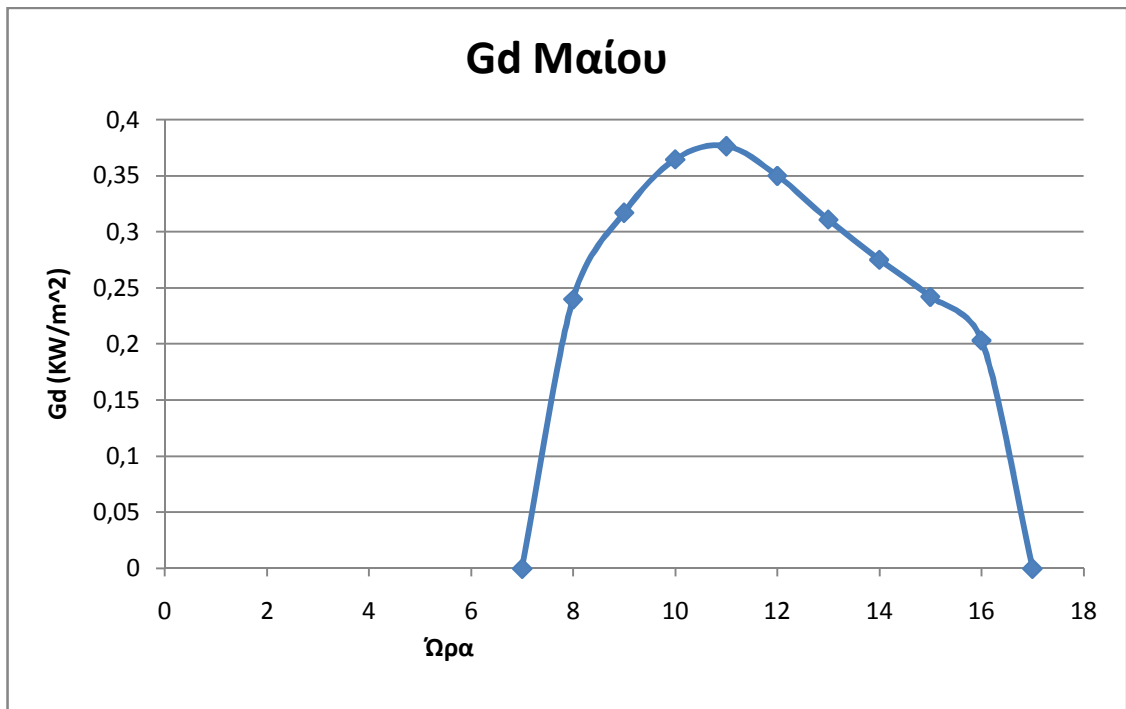
❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαΐου :  $D=141$  ,  $\delta=20,09331$

Πίνακας 5.2.1.9 : Άμεση  $G_b$  , διάχυτη  $G_d$  ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία  $G_t$  κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Μάη νότιου , δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού.

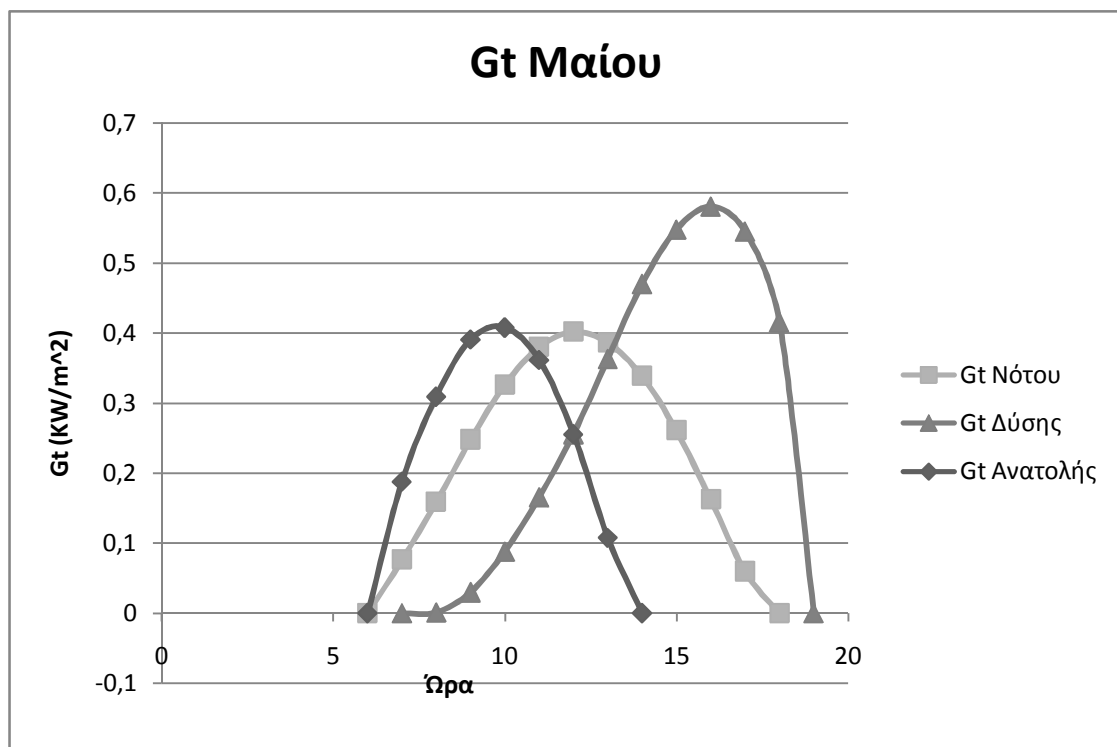
Ώρα (hrs)	$G_b(KW/m^2)$	$G_d(KW/m^2)$	$\omega$	Rb	$G_t(KW/m^2)$ νότου	Rb	$G_t(KW/m^2)$ δύσης	Rb	$G_t(KW/m^2)$ ανατολής
7	0,04367	0,141937	-75	-0,29898	0,076473	-2,2491	0	2,248622	0,187727
8	0,110389	0,240013	-60	0,032232	0,158605	-1,39754	0,000775	1,397586	0,309324
9	0,19994	0,317081	-45	0,188276	0,247887	-0,90297	0,029703	0,903266	0,390842
10	0,290872	0,364619	-30	0,269974	0,326386	-0,55029	0,087796	0,550715	0,408046
11	0,374677	0,37643	-15	0,310715	0,379743	-0,26197	0,165171	0,262466	0,361666
12	0,453155	0,350063	0	0,323164	0,401797	0,000257	0,25547	0,000257	0,25547
13	0,486471	0,311001	15	0,310715	0,386401	0,262466	0,36293	-0,26197	0,107806
14	0,468875	0,275237	30	0,269974	0,338614	0,550715	0,470246	-0,55029	0
15	0,401262	0,242169	45	0,188276	0,260975	0,903266	0,547874	-0,90297	0
16	0,3062	0,20331	60	0,032232	0,162475	1,397586	0,580547	-1,39754	0
17	0,19051	0,162637	75	-0,29898	0,059674	2,248622	0,545019	-2,2491	0
18	0,075353	0,122955	90	-1,27567	0	4,434068	0,415428	-4,4361	0



Σχήμα 5.2.1.13: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαΐου.



Σχήμα 5.2.1.14: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαΐου.

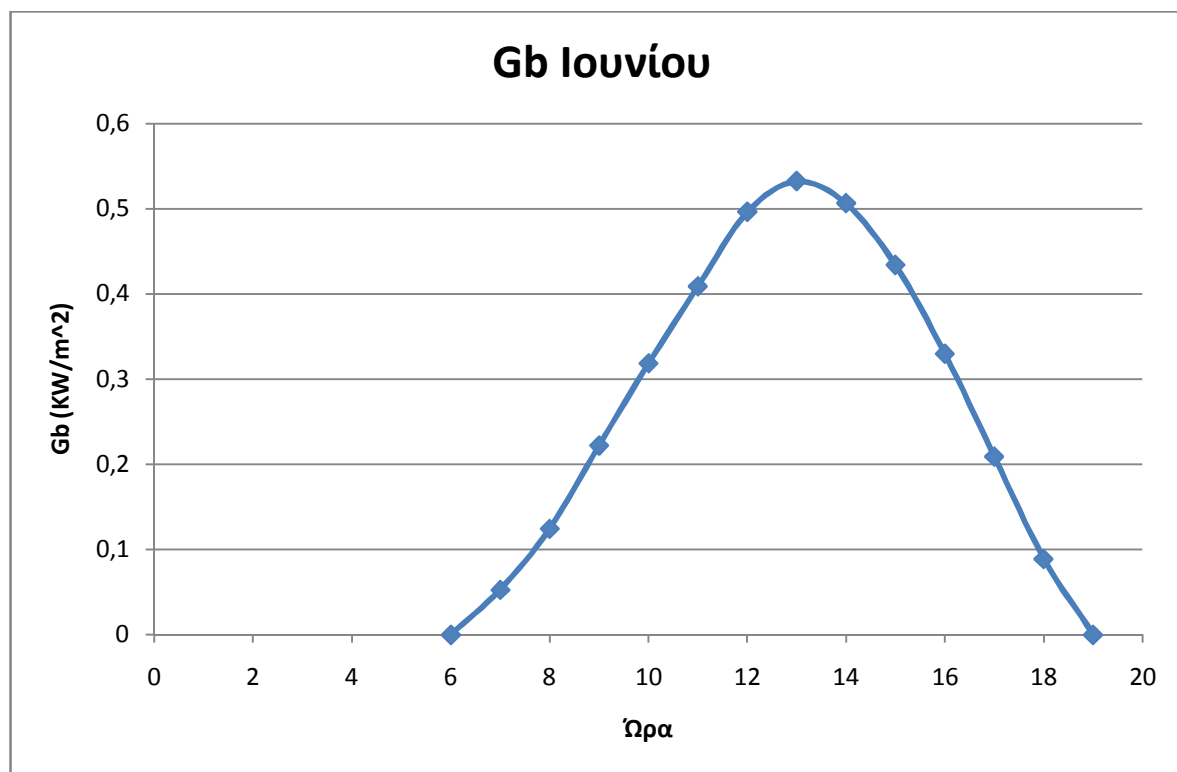


Σχήμα 5.2.1.15: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαΐου νότιου-δυτικού-ανατολικού προσανατολισμού.

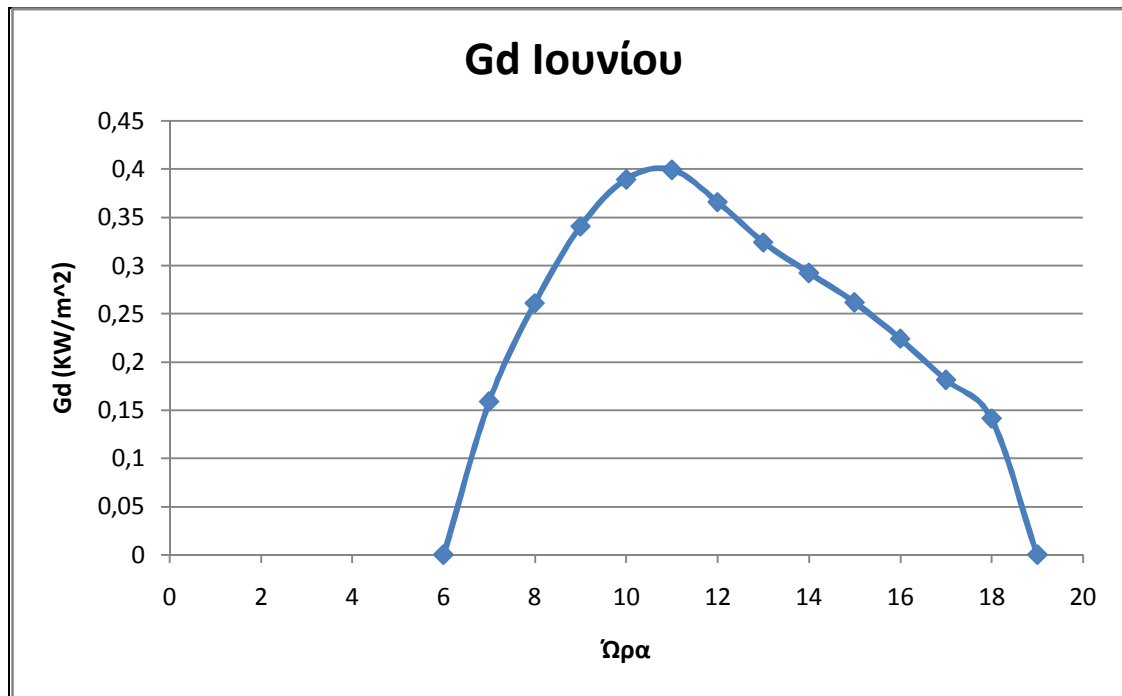
❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου :  $D=172$  ,  $\delta=23,4492$

Πίνακας 5.2.1.10 :Άμεση  $G_b$  , διάχυτη  $G_d$  ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία  $G_t$  κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Ιούνη νότιου , δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού.

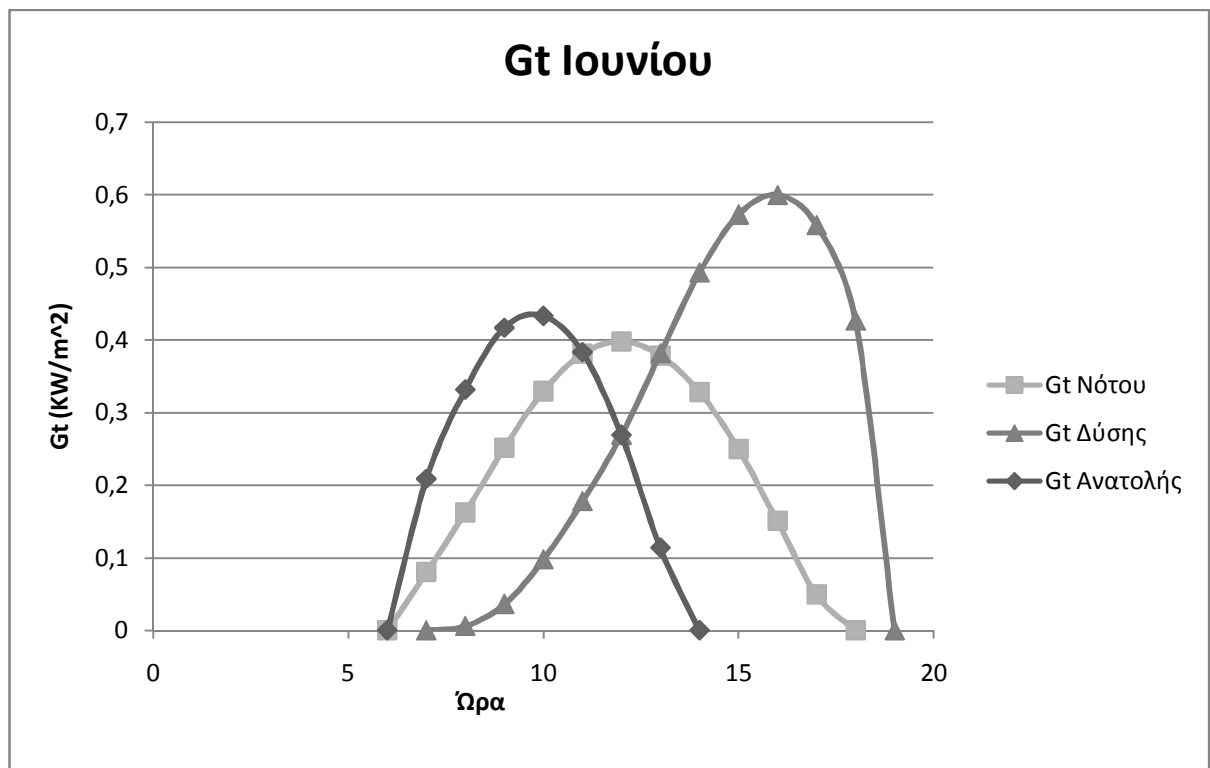
Ώρα (hrs)	$G_b(KW/m^2)$	$G_d(KW/m^2)$	$\omega$	Rb	$G_t(KW/m^2)$ νότου	Rb	$G_t(KW/m^2)$ δύσης	Rb	$G_t(KW/m^2)$ ανατολής
7	0,052697	0,158955	-75	-0,38604	0,080299	-2,04988	0	2,049265	0,208633
8	0,124386	0,260843	-60	-0,05072	0,162635	-1,30935	0,00608	1,309265	0,331798
9	0,221901	0,340619	-45	0,113836	0,251822	-0,85728	0,036329	0,857464	0,416833
10	0,318513	0,389294	-30	0,201756	0,329689	-0,52613	0,097847	0,526454	0,43311
11	0,408791	0,39926	-15	0,246064	0,381024	-0,25138	0,177675	0,251766	0,383355
12	0,496299	0,36586	0	0,259664	0,398017	0,000206	0,269248	0,000206	0,269248
13	0,532234	0,323932	15	0,246064	0,378546	0,251766	0,381581	-0,25138	0,113792
14	0,506389	0,292266	30	0,201756	0,328165	0,526454	0,492589	-0,52613	0
15	0,433894	0,261698	45	0,113836	0,249801	0,857464	0,572456	-0,85728	0
16	0,32986	0,22405	60	-0,05072	0,150684	1,309265	0,59929	-1,30935	0
17	0,208999	0,181409	75	-0,38604	0,049063	2,049265	0,558039	-2,04988	0
18	0,088913	0,141285	90	-1,27657	-0,01984	3,741063	0,426292	-3,7431	0



Σχήμα 5.2.1.16: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουνίου.



Σχήμα 5.2.1.17: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουνίου.

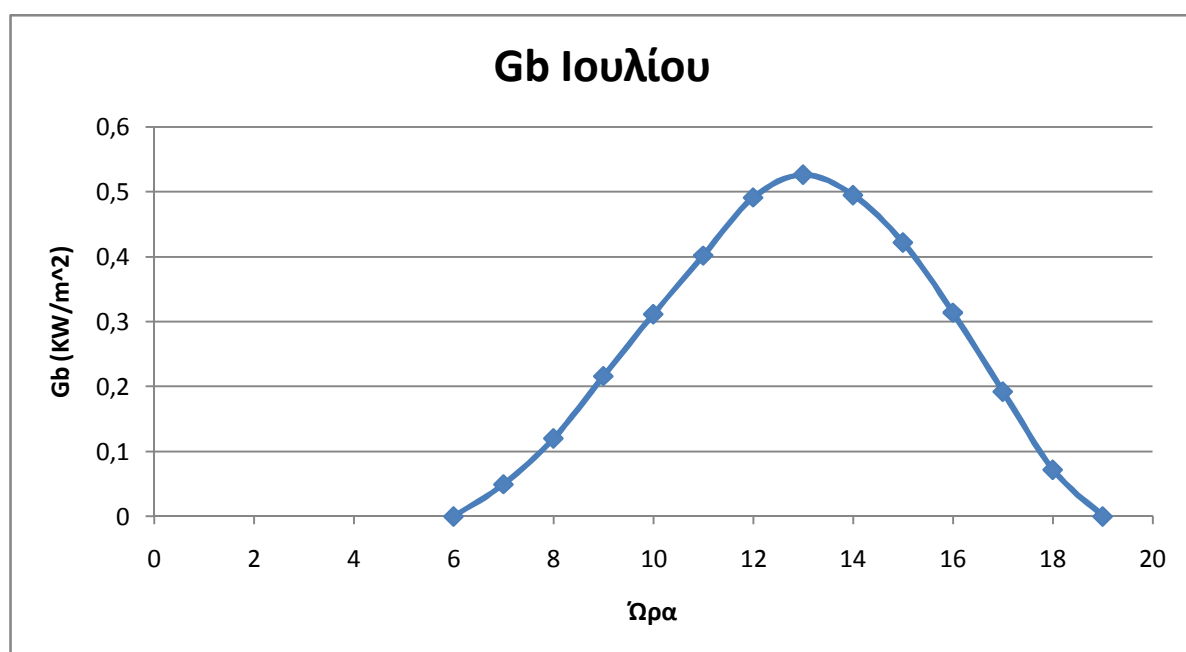


Σχήμα 5.2.1.18: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουνίου νότιου-δυτικού-ανατολικού προσανατολισμού.

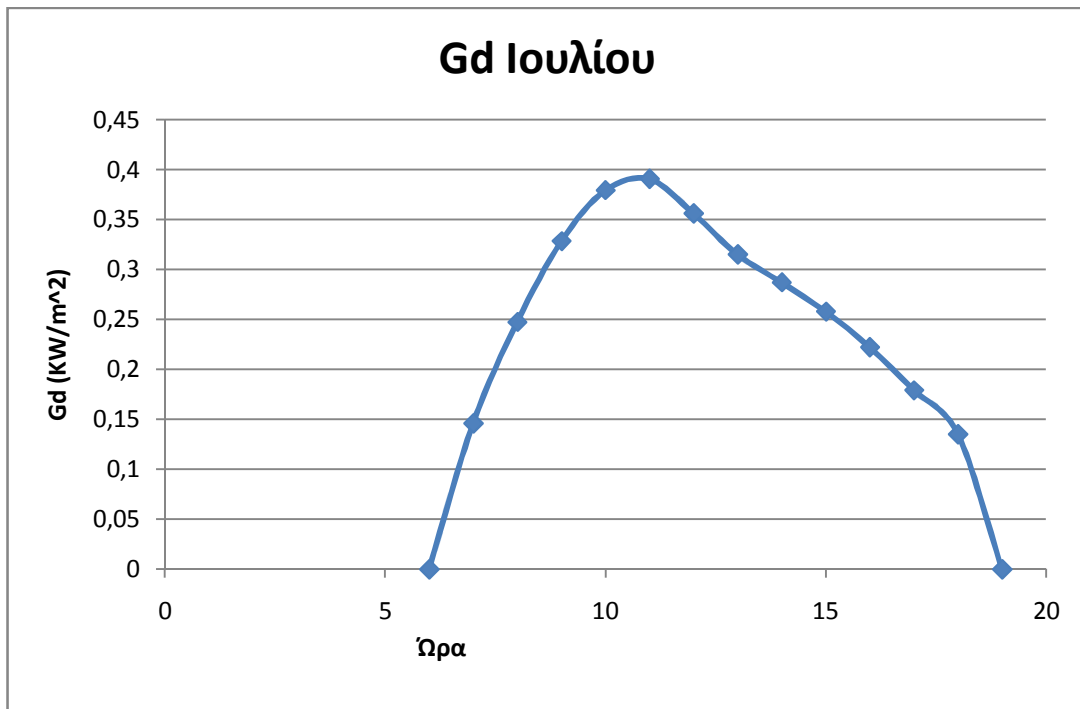
❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου : D=202 ,δ=20,49007

Πίνακας 5.2.1.11 :Άμεση Gb , διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία Gt κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Ιούλη νότιου , δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού.

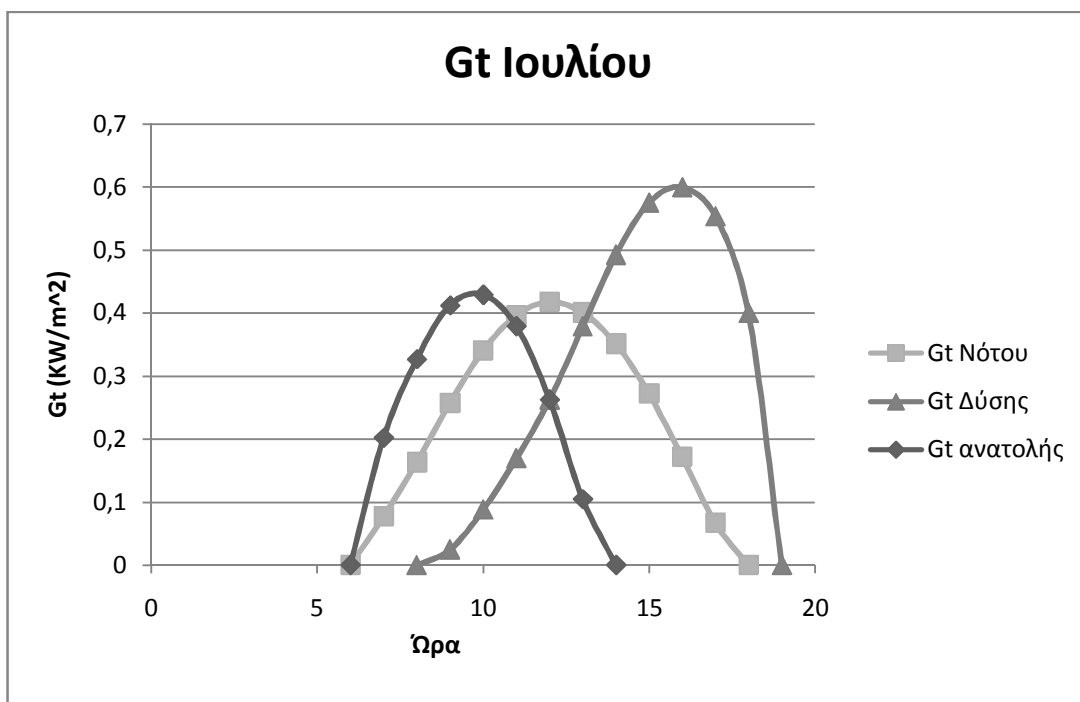
Ώρα (hrs)	Gb(KW/m <sup>2</sup> )	Gd(KW/m <sup>2</sup> )	Ω	Rb	Gt(KW/m <sup>2</sup> ) νότου	Rb	Gt(KW/m <sup>2</sup> ) δύσης	Rb	Gt(KW/m <sup>2</sup> ) ανατολής
7	0,049345	0,146059	-75	-0,30993	0,077277	-2,22406	0	2,223561	0,202291
8	0,120108	0,247435	-60	0,022052	0,16312	-1,38671	0	1,386748	0,327031
9	0,215938	0,328308	-45	0,179247	0,257285	-0,89743	0,02479	0,897711	0,412428
10	0,311539	0,379233	-30	0,261751	0,340239	-0,54737	0,088165	0,54779	0,429352
11	0,40193	0,390599	-15	0,302946	0,396315	-0,2607	0,16977	0,26118	0,379528
12	0,491174	0,356046	0	0,31554	0,41773	0,000251	0,262868	0,000251	0,262868
13	0,526224	0,315028	15	0,302946	0,401056	0,26118	0,379078	-0,2607	0,104453
14	0,494715	0,286985	30	0,261751	0,351155	0,54779	0,492663	-0,54737	0
15	0,421854	0,257935	45	0,179247	0,272563	0,897711	0,575649	-0,89743	0
16	0,313892	0,222165	60	0,022052	0,17161	1,386748	0,599978	-1,38671	0
17	0,192216	0,179109	75	-0,30993	0,067114	2,223561	0,554091	-2,22406	0
18	0,071876	0,135142	90	-1,27579	0	4,340908	0,400281	-4,34294	0



Σχήμα 5.2.1.19: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουλίου



Σχήμα 5.2.1.20: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουλίου.



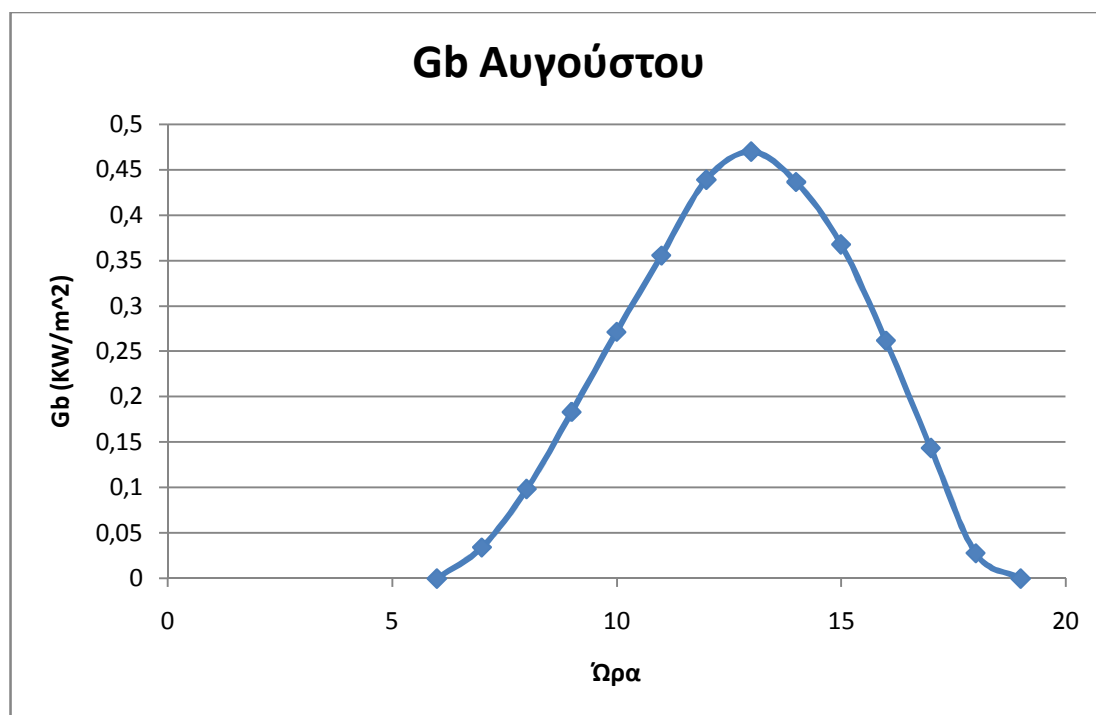
Σχήμα 5.2.1.21: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουλίου νότιου-δυτικού-ανατολικού προσανατολισμού.



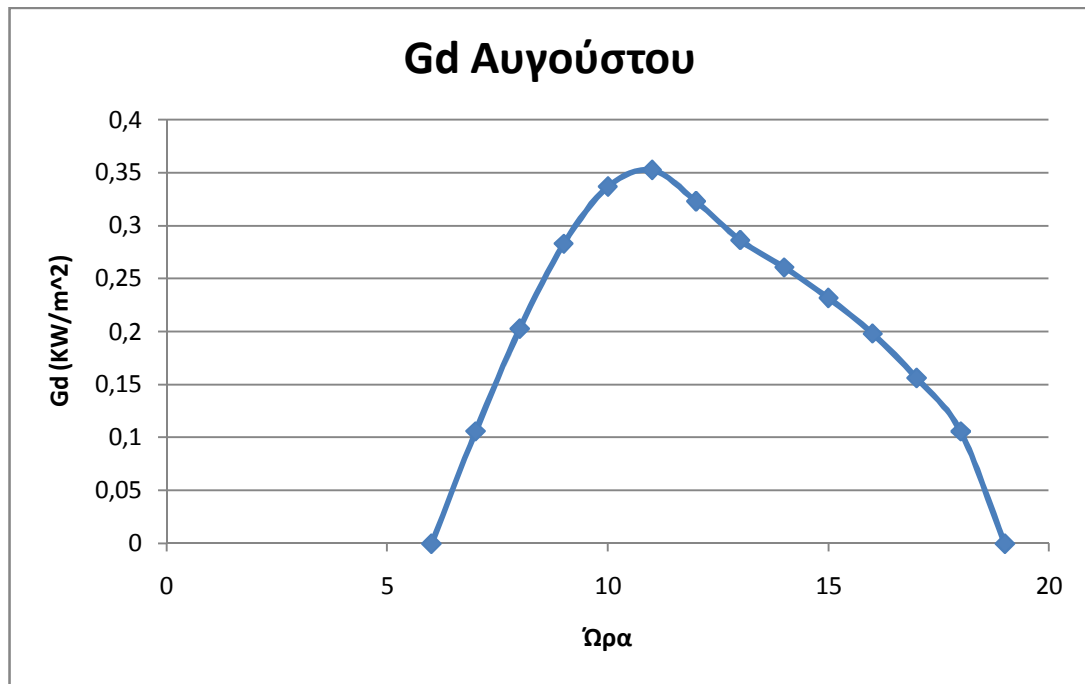
❖ Για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου:  $D=233$  ,  $\delta=11,84555$

Πίνακας 5.2.1.12 :Άμεση  $G_b$  , διάχυτη  $G_d$  ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία  $G_t$  κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Αυγούστου νότιου , δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού.

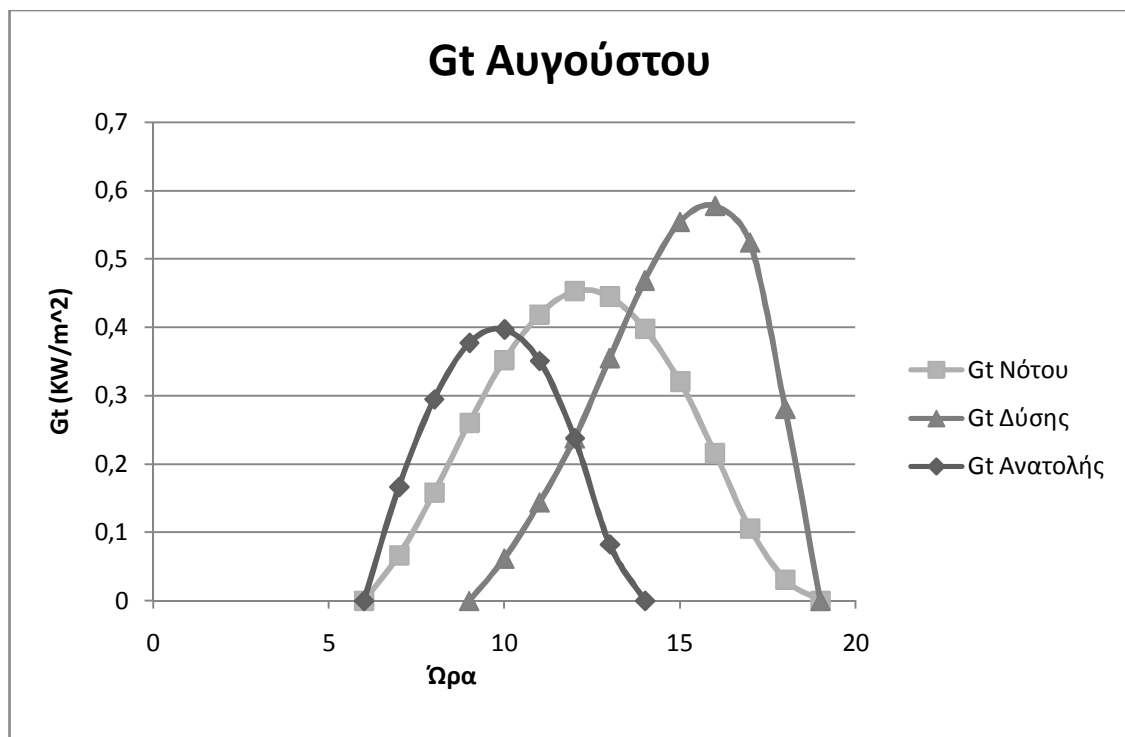
Ώρα (hrs)	$G_b(KW/m^2)$	$G_d(KW/m^2)$	$\omega$	Rb	$G_t(KW/m^2)$	Rb	$G_t(KW/m^2)$	Rb	$G_t(KW/m^2)$
7	0,034326	0,105993	-75	-0,01641	0,066465	-2,8957	0	2,895674	0,166425
8	0,098465	0,202641	-60	0,272922	0,158305	-1,65341	0	1,653843	0,294278
9	0,18332	0,282768	-45	0,393574	0,260143	-1,02896	0	1,029584	0,376736
10	0,271434	0,336578	-30	0,453268	0,352122	-0,61518	0,062109	0,615901	0,396267
11	0,355553	0,35229	-15	0,482201	0,418377	-0,29008	0,143791	0,290846	0,35034
12	0,438871	0,322708	0	0,490934	0,452968	0,00039	0,237683	0,00039	0,237683
13	0,469718	0,286183	15	0,482201	0,44518	0,290846	0,355297	-0,29008	0,082426
14	0,436338	0,26052	30	0,453268	0,397724	0,615901	0,468687	-0,61518	0
15	0,367705	0,231681	45	0,393574	0,320498	1,029584	0,554362	-1,02896	0
16	0,261694	0,198056	60	0,272922	0,216425	1,653843	0,577804	-1,65341	0
17	0,143733	0,156226	75	-0,01641	0,10575	2,895674	0,524313	-2,8957	0
18	0,027867	0,105834	90	-1,27142	0,030856	7,71814	0,281368	-7,72017	0



Σχήμα 5.2.1.22: Μεταβολή της αμέσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Αυγούστου



Σχήμα 5.2.1.23: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Αυγούστου.

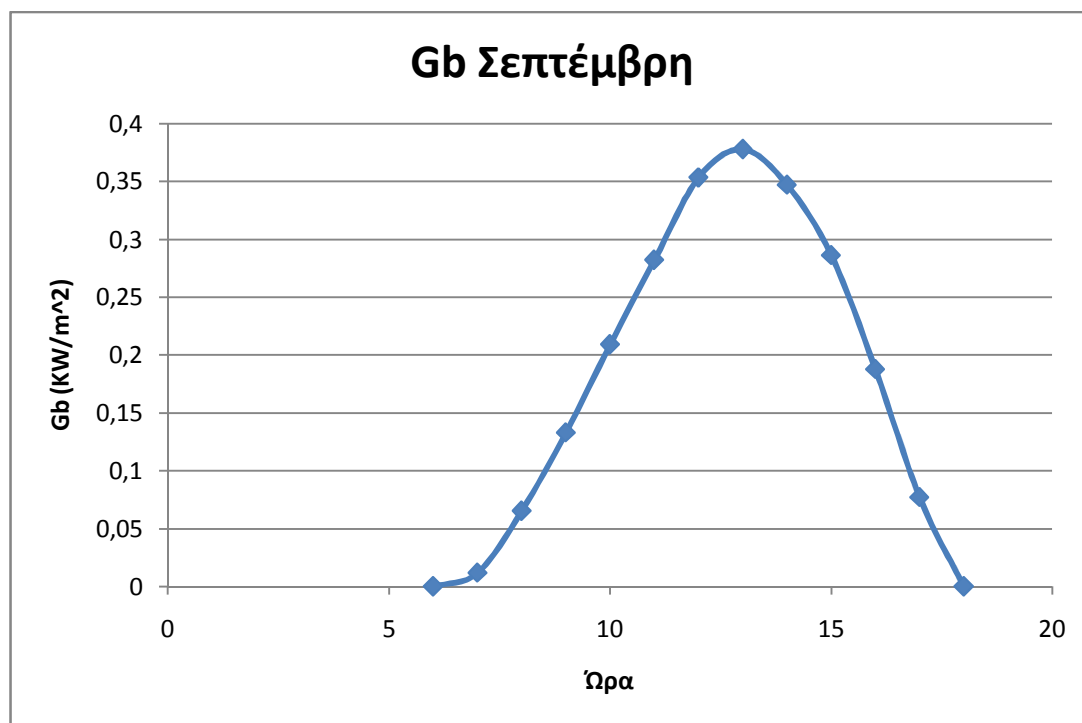


Σχήμα 5.2.1.24: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Αυγούστου νότιου-δυτικού-ανατολικού προσανατολισμού.

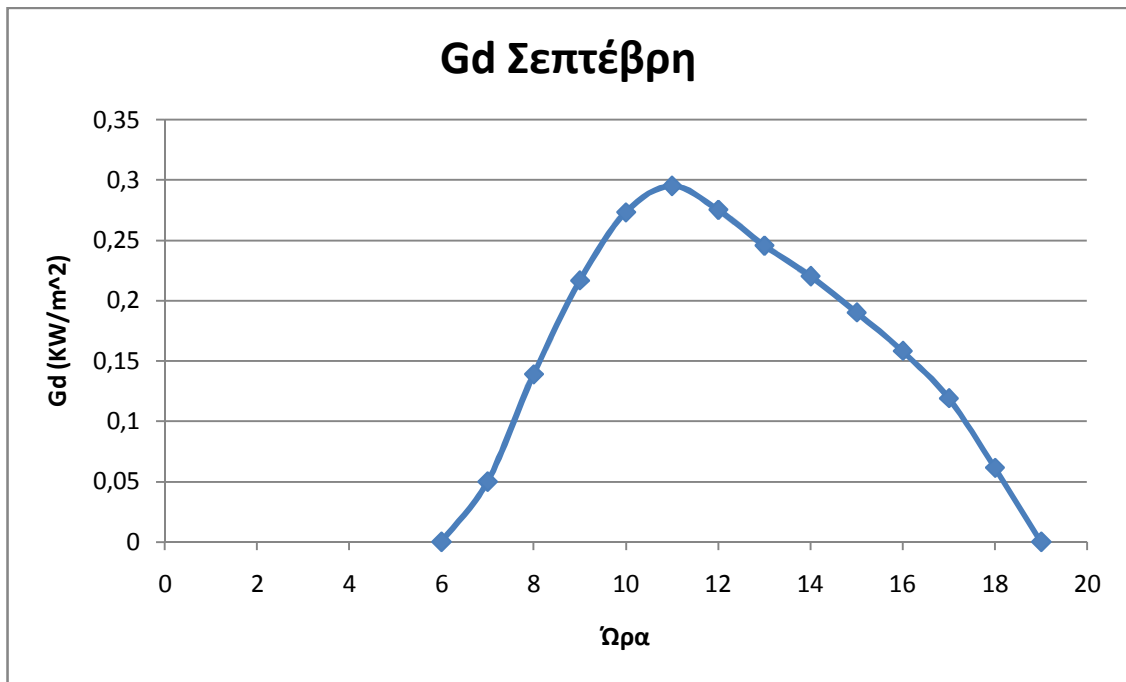
❖ Για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρη:  $D=264$  ,  $\delta=-0,08969$

Πίνακας 5.2.1.13 : Άμεση  $G_b$  , διάχυτη  $G_d$  ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία  $G_t$  κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Σεπτέμβρη νότιου , δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού.

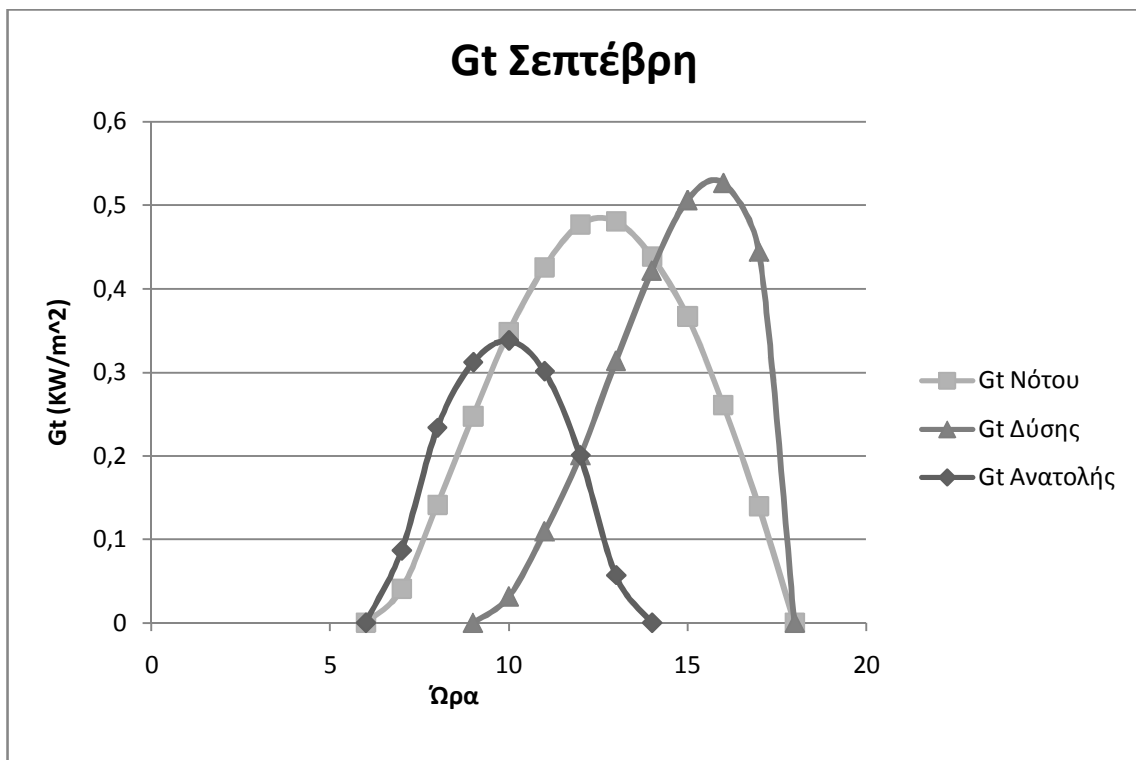
Ώρα (hrs)	$G_b(KW/m^2)$	$G_d(KW/m^2)$	$\omega$	Rb	$G_t(KW/m^2)$	Rb	$G_t(KW/m^2)$	Rb	$G_t(KW/m^2)$
7	0,011716	0,049816	-75	0,790442	0,040322	-4,74201	0	4,743264	0,086634
8	0,065304	0,138779	-60	0,785739	0,14111	-2,19858	0	2,199826	0,233455
9	0,132834	0,216457	-45	0,784262	0,247334	-1,26872	0	1,269971	0,311853
10	0,208984	0,272927	-30	0,783608	0,348416	-0,73214	0,03165	0,733383	0,33792
11	0,282075	0,294732	-15	0,783307	0,425997	-0,33943	0,109302	0,340677	0,301143
12	0,353268	0,275006	0	0,783218	0,477016	0,000623	0,20055	0,000623	0,20055
13	0,377732	0,245342	15	0,783307	0,480858	0,340677	0,313663	-0,33943	0,056765
14	0,34703	0,220021	30	0,783608	0,438651	0,733383	0,421221	-0,73214	0
15	0,286135	0,189959	45	0,784262	0,366994	1,269971	0,505972	-1,26872	0
16	0,187635	0,158096	60	0,785739	0,261053	2,199826	0,526385	-2,19858	0
17	0,076989	0,118835	75	0,790442	0,139856	4,743264	0,444181	-4,74201	0
18	-0,03083	0,061293	90	-5,15521	0	-2991,64	0	2991,636	0



Σχήμα 5.2.1.25: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Σεπτέμβρη .



Σχήμα 5.2.1.26: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Σεπτέμβρη.

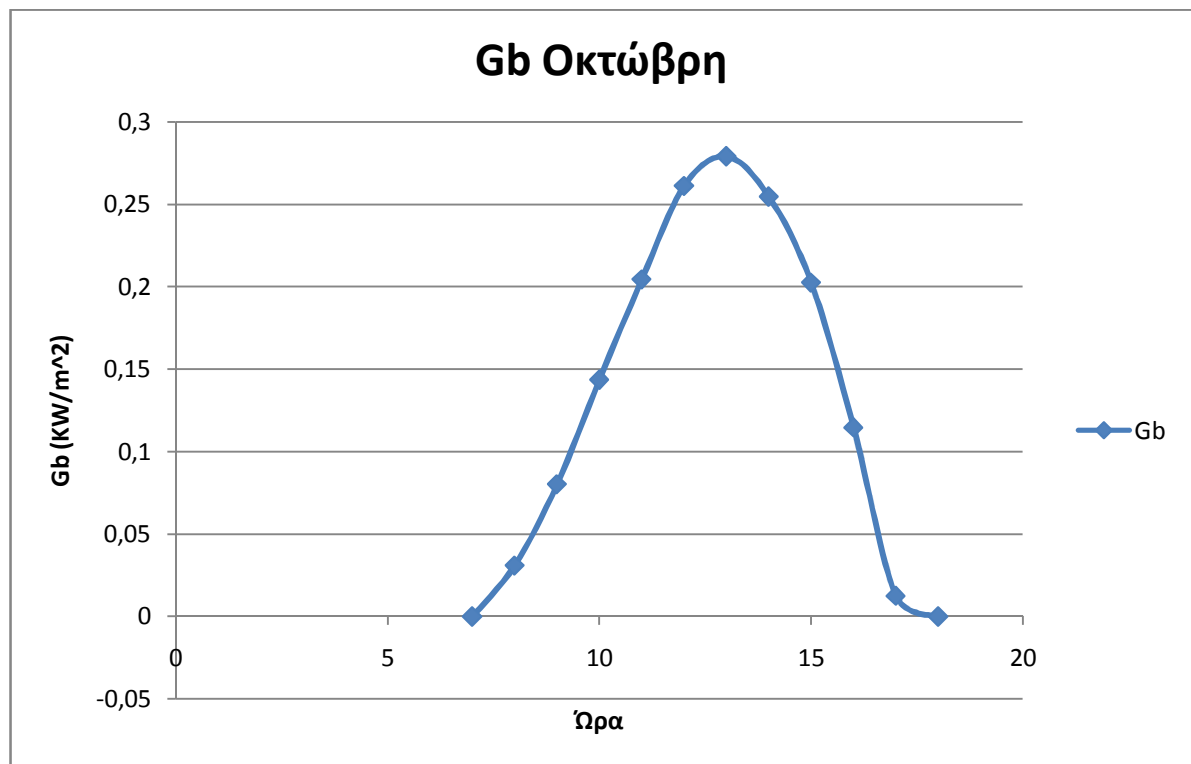


Σχήμα 5.2.1.27: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Σεπτέμβρη νότιου-δυτικού-ανατολικού προσανατολισμού.

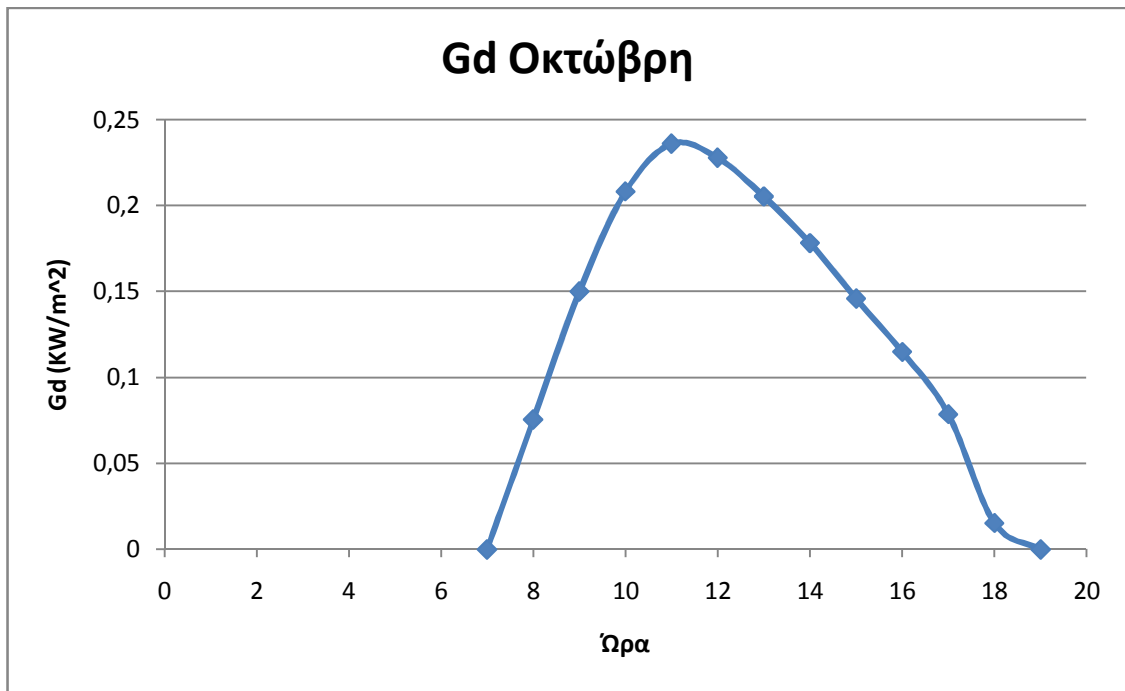
❖ Για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη:  $D=294$  ,  $\delta=-11,6516$

Πίνακας 5.2.1.14 : Άμεση  $G_b$  , διάχυτη  $G_d$  ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία  $G_t$  κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Οκτώβρη νότιου , δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού.

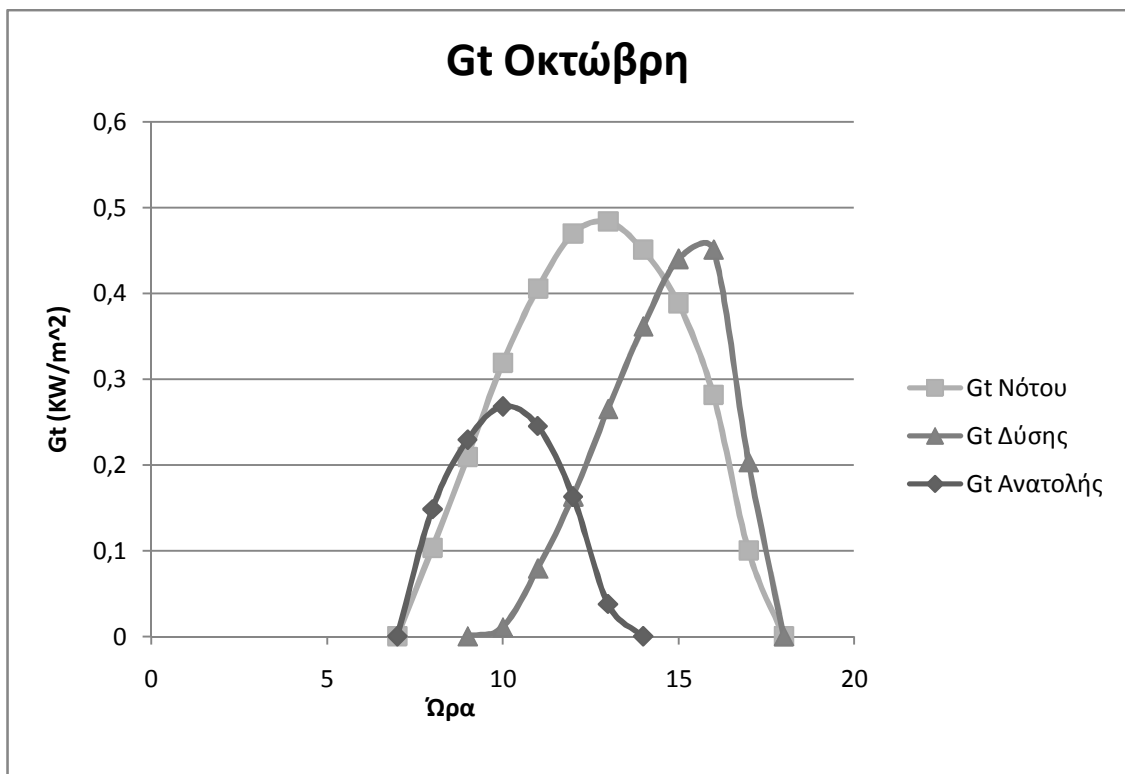
Ώρα (hrs)	$G_b(KW/m^2)$	$G_d(KW/m^2)$	$w*0,25$	Rb	$G_t(KW/m^2)$ νότου	Rb	$G_t(KW/m^2)$ δύσης	Rb	$G_t(KW/m^2)$ ανατολής
7	0	0	-75	4,138276	0	-12,4028	0	12,40937	0
8	0,030912	0,07552	-60	1,75639	0,102697	-3,23046	0	3,233254	0,148349
9	0,080158	0,149847	-45	1,387052	0,209108	-1,63865	0	1,640862	0,229453
10	0,143595	0,207978	-30	1,250579	0,318723	-0,89747	0,010275	0,899457	0,268304
11	0,204366	0,235749	-15	1,19234	0,40556	-0,40647	0,078817	0,408369	0,245343
12	0,261087	0,227638	0	1,175644	0,469637	0,000936	0,162936	0,000936	0,162936
13	0,278967	0,205076	15	1,19234	0,483566	0,408369	0,264864	-0,40647	0,037551
14	0,254498	0,17805	30	1,250579	0,450549	0,899457	0,36119	-0,89747	0
15	0,202411	0,145758	45	1,387052	0,388451	1,640862	0,439825	-1,63865	0
16	0,114516	0,114775	60	1,75639	0,28145	3,233254	0,450574	-3,23046	0
17	0,012468	0,078606	75	4,138276	0,100007	12,40937	0,203132	-12,4028	0
18	0	0,015327	90	-1,29168	0	-7,9299	0	7,927839	0



Σχήμα 5.2.1.28: Μεταβολή της αμέσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Οκτώβρη..



Σχήμα 5.2.1.29: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Οκτώβρη.

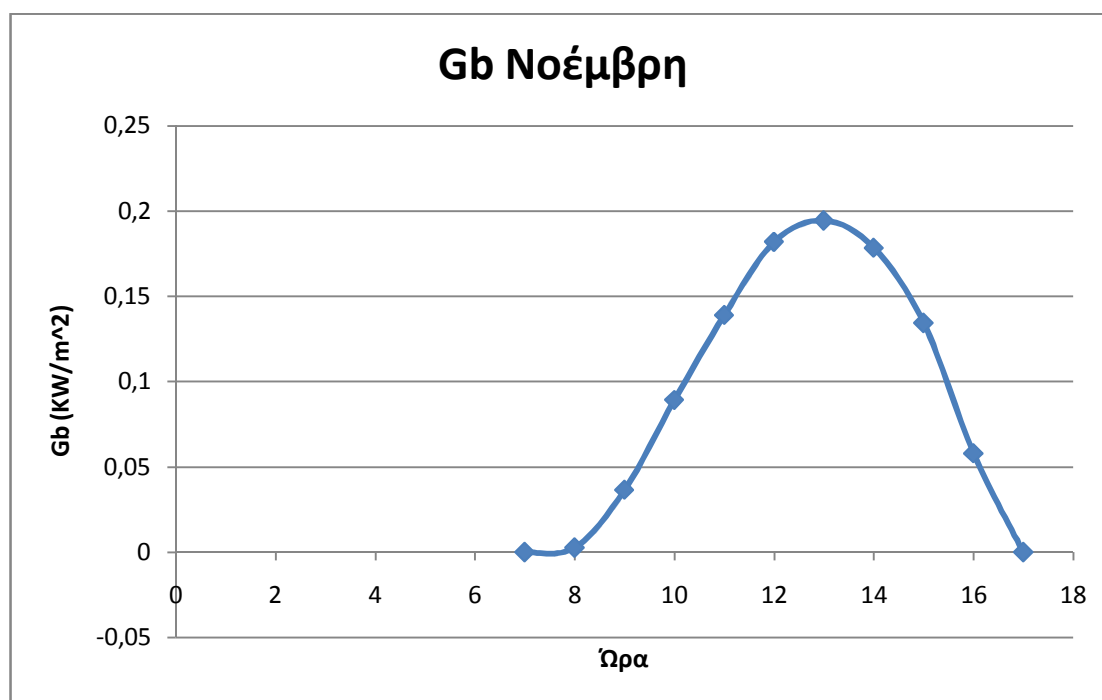


Σχήμα 5.2.1.30: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Οκτώβρη, νότιου-δυτικού-ανατολικού προσανατολισμού.

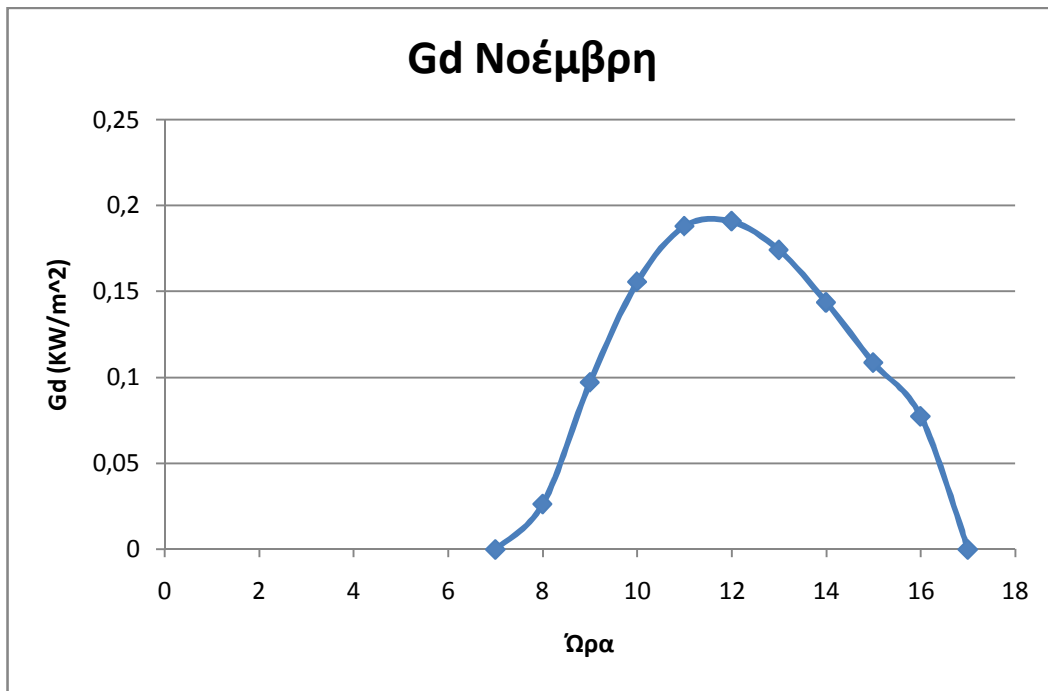
❖ Για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη:  $D=325$  ,  $\delta=-20,3802$

Πίνακας 5.2.1.15 :Άμεση  $G_b$  , διάχυτη  $G_d$  ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία  $G_t$  κεκλιμένου επιπέδου για της 21Νοέμβρη νότιου , δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού.

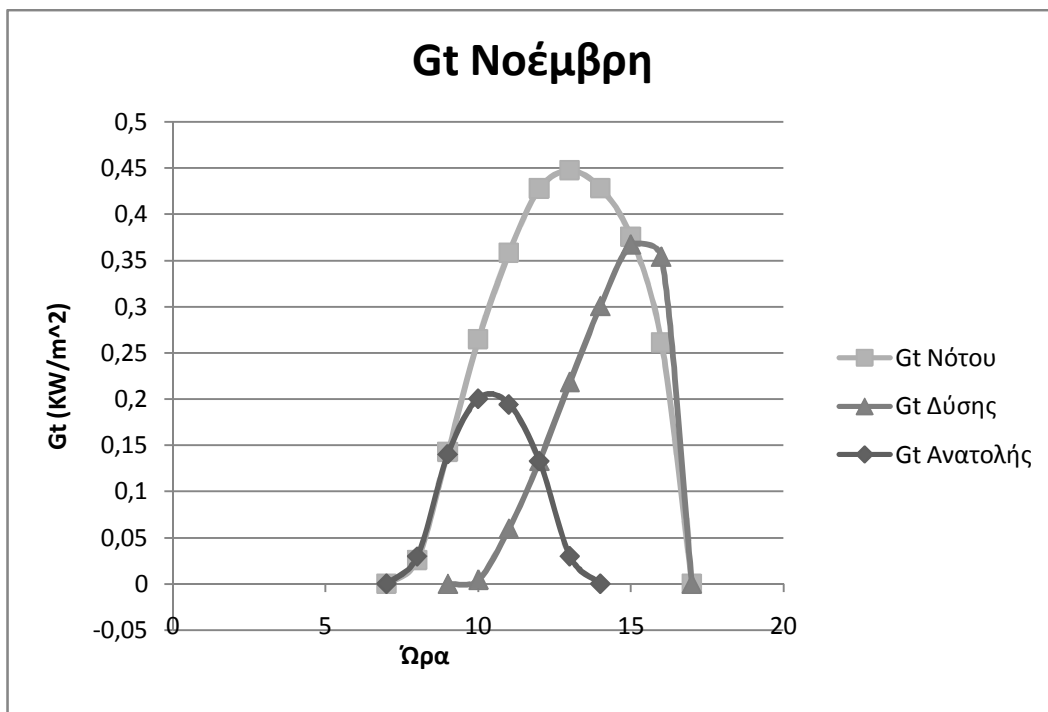
Ώρα (hrs)	$G_b(KW/m^2)$	$G_d(KW/m^2)$	$w*0,25$	Rb	$G_t(KW/m^2)$ νότου	Rb	$G_t(KW/m^2)$ δύσης	Rb	$G_t(KW/m^2)$ ανατολής
7	0	0	-75	-19,0471	0	40,65174	0	-40,6821	0
8	0,002607	0,026325	-60	3,612307	0,025474	-5,20345	0	5,209202	0,029638
9	0,036502	0,097109	-45	2,209904	0,142582	-2,14364	0	2,147155	0,140291
10	0,08918	0,155551	-30	1,816352	0,264231	-1,09778	0,004349	1,100668	0,200406
11	0,138961	0,187892	-15	1,663539	0,357799	-0,4837	0,059416	0,486349	0,194215
12	0,181942	0,190685	0	1,621238	0,427576	0,00129	0,13284	0,00129	0,13284
13	0,194437	0,173953	15	1,663539	0,447269	0,486349	0,21838	-0,4837	0,029766
14	0,178429	0,14354	30	1,816352	0,428056	1,100668	0,300357	-1,09778	0
15	0,134348	0,108483	45	2,209904	0,375421	2,147155	0,36699	-2,14364	0
16	0,057894	0,077309	60	3,612307	0,261307	5,209202	0,353758	-5,20345	0
17	0	0,044098	75	-19,0471	0	-40,6821	0	40,65174	0
18	0	0	90	-1,2871	0	-4,39249	0	4,390436	0



Σχήμα 5.2.1.31: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Νοέμβρη.



Σχήμα 5.2.1.32: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Νοέμβρη.



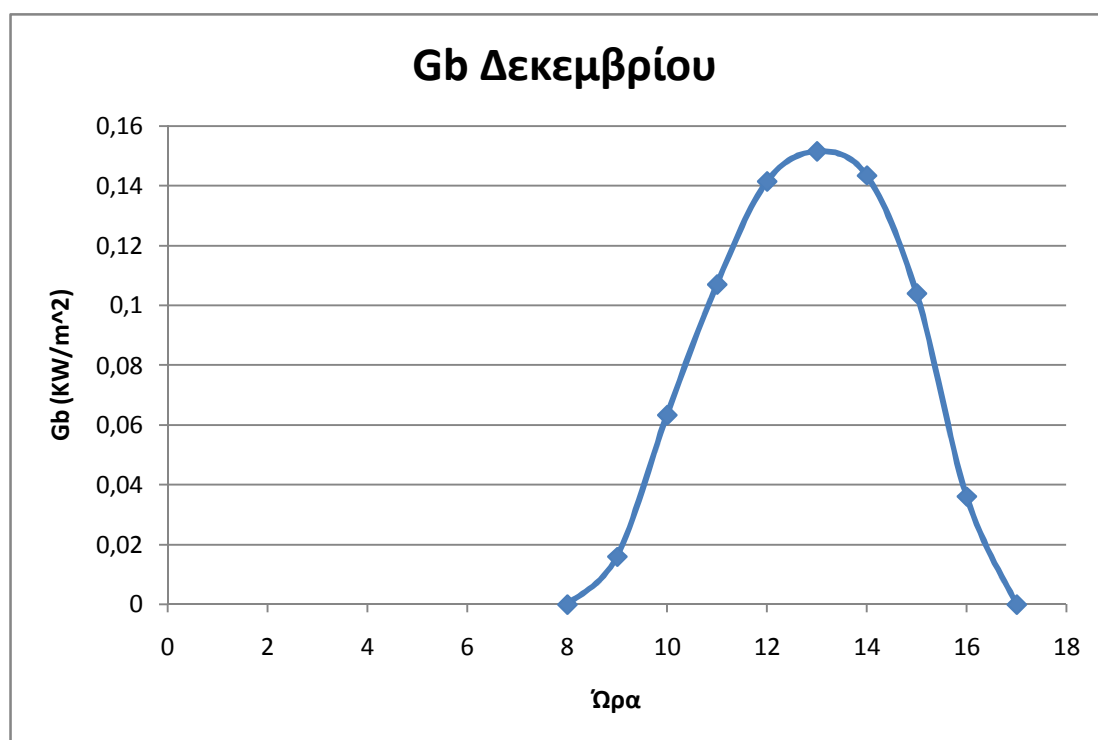
Σχήμα 5.2.1.33: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Νοέμβρη νότιου-δυτικού-ανατολικού προσανατολισμού.



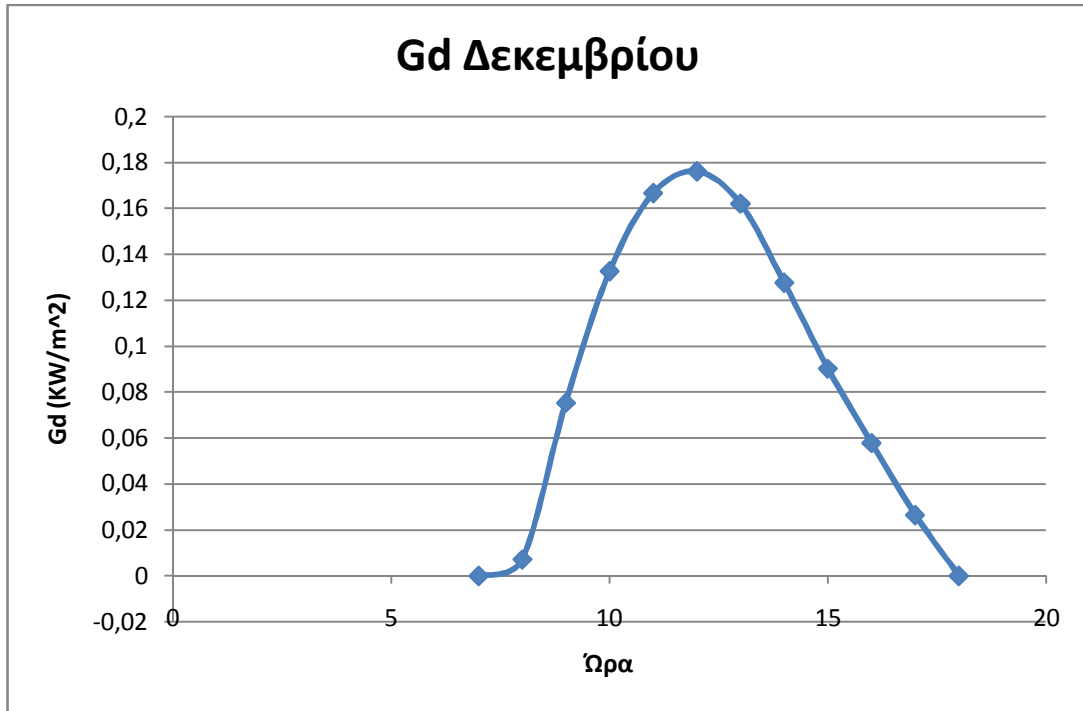
❖ Για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη :  $D=355$  ,  $\delta=-23,45$

Πίνακας 5.2.1.15 : Άμεση  $G_b$  , διάχυτη  $G_d$  ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία  $G_t$  κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Δεκέμβρη νότιου , δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού.

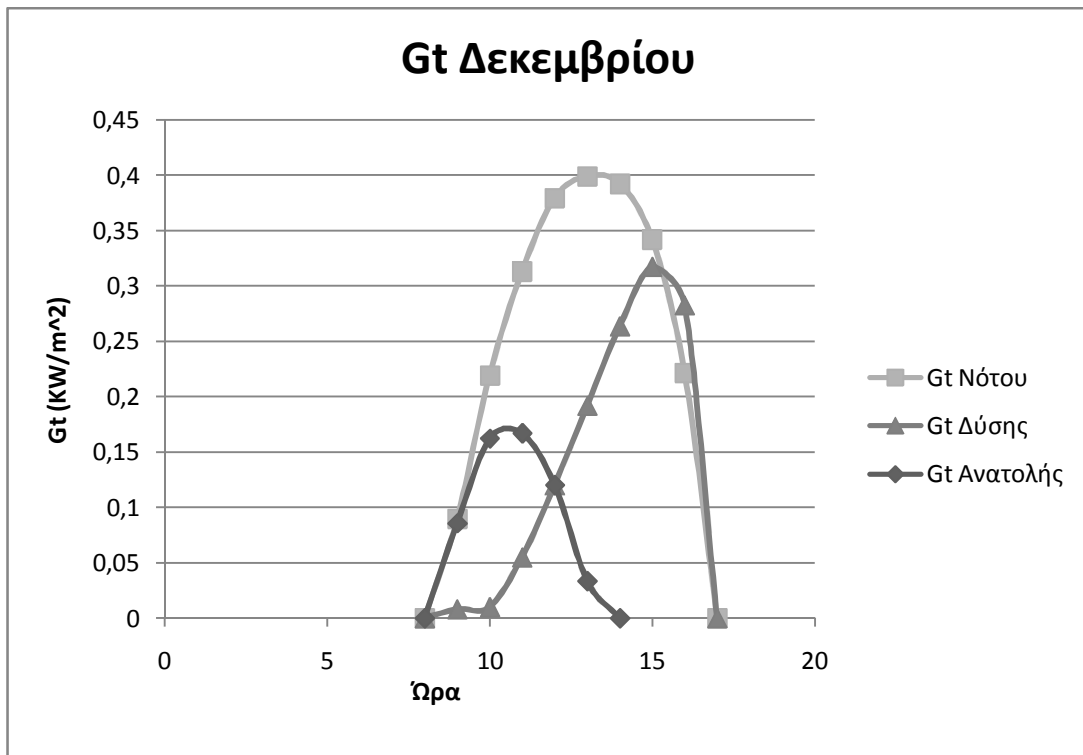
Ώρα (hrs)	$G_b(KW/m^2)$	$G_d(KW/m^2)$	$\omega$	Rb	$G_t(KW/m^2)$ νότου	Rb	$G_t(KW/m^2)$ δύσης	Rb	$G_t(KW/m^2)$ ανατολής
7	0	0	-75	-8,08416	0	15,56555	0	-15,5784	0
8	0	0,007116	-60	5,075262	0	-6,75869	0,073839	6,766773	0
9	0,015996	0,075314	-45	2,668763	0,089478	-2,42524	0,007994	2,429487	0,08565
10	0,063353	0,132615	-30	2,101073	0,219014	-1,19858	0,009971	1,201926	0,16205
11	0,107031	0,166651	-15	1,891188	0,313109	-0,52101	0,054929	0,524023	0,16678
12	0,141451	0,176106	0	1,834077	0,37924	0,00146	0,120015	0,00146	0,120015
13	0,151504	0,162047	15	1,891188	0,3989	0,524023	0,19177	-0,52101	0,033443
14	0,143446	0,127659	30	2,101073	0,39233	1,201926	0,263351	-1,19858	0
15	0,103976	0,090199	45	2,668763	0,342005	2,429487	0,317126	-2,42524	0
16	0,036099	0,057825	60	5,075262	0,221515	6,766773	0,282576	-6,75869	0
17	0	0,026482	75	-8,08416	0	-15,5784	0	15,56555	0
18	0	0	90	-1,28628	0	-3,76063	0	3,758581	0



Σχήμα 5.2.1.34: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Δεκέμβρη.



Σχήμα 5.2.1.35: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Δεκέμβρη.



Σχήμα 5.2.1.36: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Δεκέμβρη νότιου-δυτικού-ανατολικού προσανατολισμού.

### 5.2.2 Παρατηρήσεις και σύγκριση αποτελεσμάτων

Λόγω της κίνησης του ήλιου, παρατηρούμε ότι στο νότιο προσανατολισμό η ακτινοβολία υπάρχει καθόλη τη διάρκεια της μέρας από την ανατολή ως τη δύση του ηλίου και γίνεται μέγιστη κατά τις μεσημεριανές ώρες. Η ακτινοβολία που έχει δυτικό προσανατολισμό παρουσιάζει χαμηλές τιμές τις πρωινές ώρες και υψηλότερες τις μεσημεριανές και τις απογευματινές το αντίθετο συμβαίνει για ανατολικό προσανατολισμό όπου οι υψηλότερες τιμές της ακτινοβολίας εμφανίζονται τις πρωινές ώρες.

Συγκρίνοντας την ακτινοβολία του νότου, της δύσης και της ανατολής παρατηρούμε καθόλη τη διάρκεια του έτους ότι στην ανατολή αναπτύσσεται χαμηλότερη σε μέτρο ακτινοβολία. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι τις πρωινές ώρες η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς είναι ιδιαίτερα αυξημένη με αποτέλεσμα να συγκρατεί την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Από τους παραπάνω πίνακες καθώς και τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι τους καλοκαιρινούς μήνες στο νότιο προσανατολισμό η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο αντί να αυξάνεται (όπως θα ήταν λογικό, εφόσον η άμεση και η διάχυτη ακτινοβολία από τις οποίες εξαρτάται αυξάνονται το καλοκαίρι) παραμένει σταθερή ή σε μερικές περιπτώσεις ελαφρώς μειώνεται. Φαινόμενο το οποίο δεν συμβαίνει στους άλλους προσανατολισμούς καθώς στη δύση και την ανατολή η ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο αυξάνεται κανονικά τη θερινή περίοδο. Επίσης στους καλοκαιρινούς μήνες βλέπουμε ότι η ανατολή παρουσιάζει μεγαλύτερες ακτινοβολίες από το νότο.

Οι δύο αυτές παρατηρήσεις μας κάνουν να αμφιβάλουμε για την ορθότητα του προγράμματός μας και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Για να βεβαιωθούμε λοιπόν στην επόμενη ενότητα, θα προβούμε σε έλεγχο ορθότητας του χρησιμοποιηθέντος προγράμματος.

### 5.2.3 Έλεγχος ορθότητας του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση και παρουσίαση των παραπάνω αποτελεσμάτων.

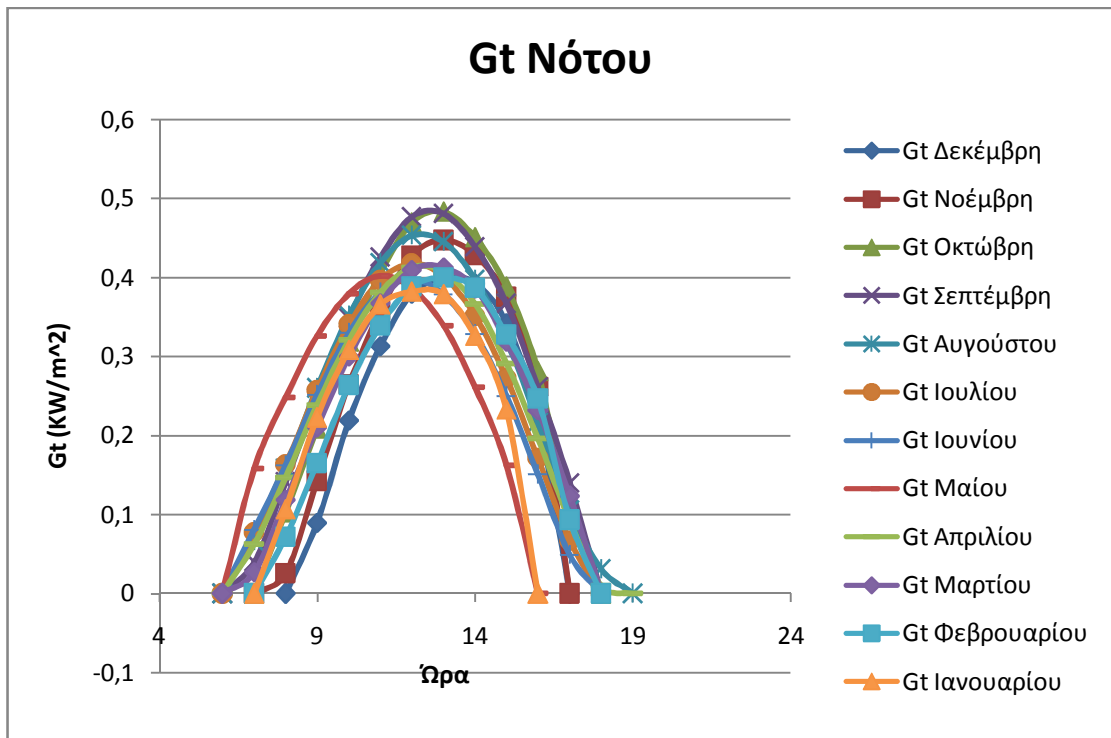
Από τους συνοπτικούς πίνακες και διαγράμματα όπου παρουσιάζουν για κάθε προσανατολισμό τις ακτινοβολίες όλων των μηνών εύκολα παρατηρείται η ελαφρώς μείωση της ακτινοβολίας νότιου προσανατολισμού κατά τη θερινή περίοδο καθώς επίσης και η μεγαλύτερη σε ένταση ακτινοβολία του δυτικού προσανατολισμού έναντι του νότιου σε αυτούς τους μήνες.

Πίνακας 5.2.3.1 : Ακτινοβολία Gt κεκλιμένου επιπέδου για νότιο προσανατολισμό για όλους τους μήνες .

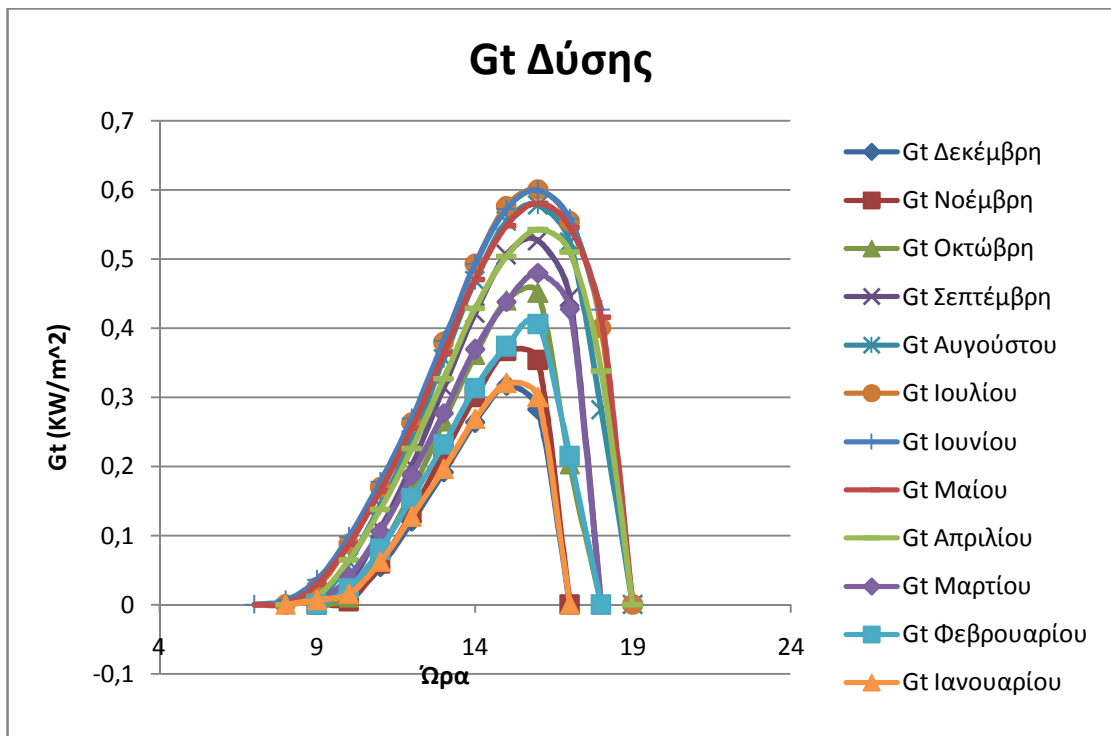
Gt Νότου

Ώρα	Ιανουάρ.	Φεβρ.	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούλιος	Ιούνιος	Αύγουστ	Σεπτεμ.
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0,027198	0,062777	0	0,080299	0,077277	0,066465	0,040322
8	0	0,07182	0,118417	0,146765	0,158605	0,162635	0,16312	0,158305	0,14111
9	0,106381	0,165018	0,210189	0,238213	0,247887	0,251822	0,257285	0,260143	0,247334
10	0,222816	0,264001	0,299887	0,321275	0,326386	0,329689	0,340239	0,352122	0,348416
11	0,308162	0,338781	0,367093	0,380875	0,379743	0,381024	0,396315	0,418377	0,425997
12	0,365793	0,38866	0,409587	0,413026	0,401797	0,398017	0,41773	0,452968	0,477016
13	0,382266	0,399738	0,413109	0,406339	0,386401	0,378546	0,401056	0,44518	0,480858
14	0,378902	0,38677	0,386408	0,366199	0,338614	0,328165	0,351155	0,397724	0,438651
15	0,326274	0,327684	0,319024	0,291604	0,260975	0,249801	0,272563	0,320498	0,366994
16	0,23275	0,246511	0,231837	0,196262	0,162475	0,150684	0,17161	0,216425	0,261053
17	0	0,093151	0,123187	0,091316	0	0,049063	0,067114	0,10575	0,139856
18	0	0	0	0,009977	0	0	0	0,030856	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0

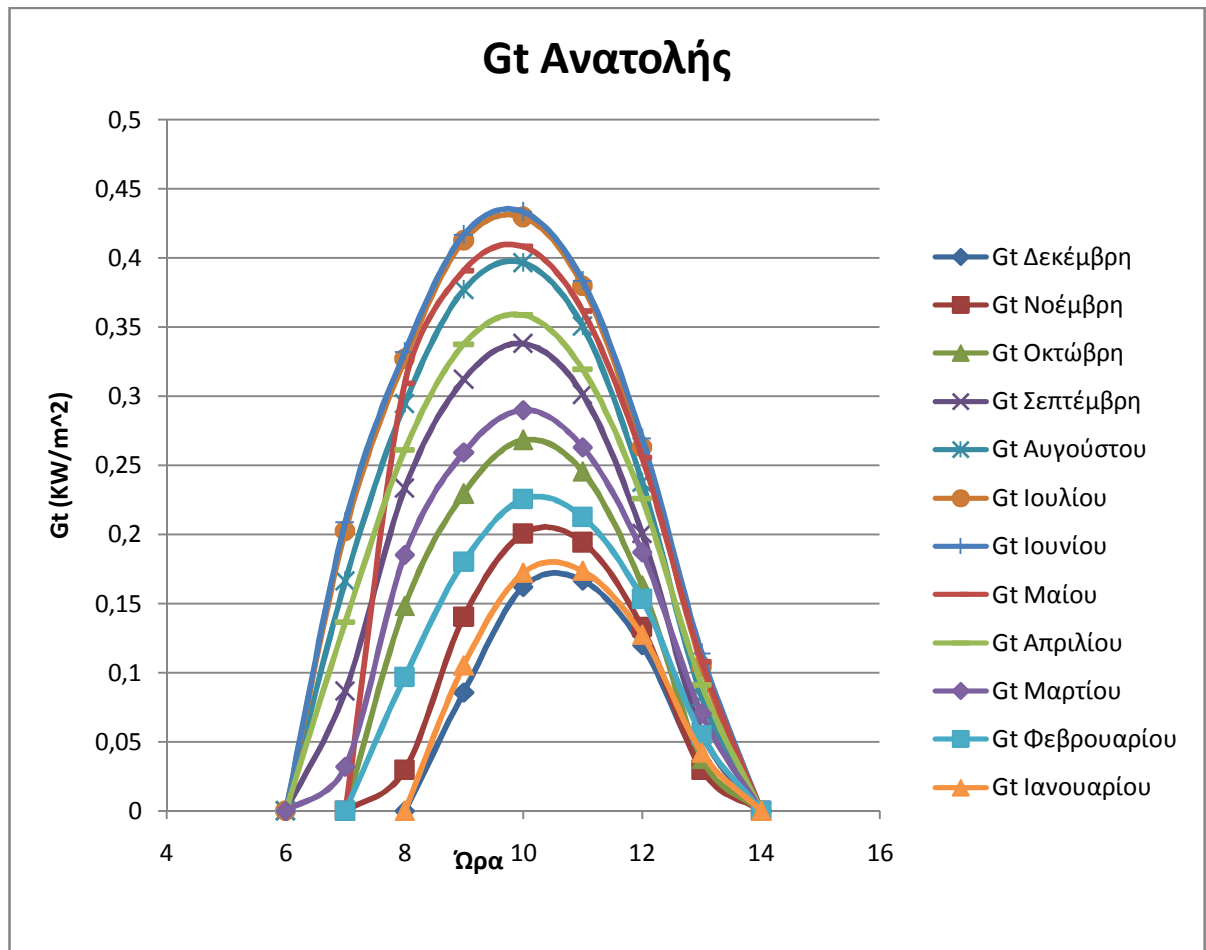
Ώρα	Οκτώβρης	Νοέμβ.	Δεκέμβ.				
6	0	0	0	13	0,483566	0,447269	0,3989
7	0	0	0	14	0,450549	0,428056	0,39233
8	0,102697	0,025474	0	15	0,388451	0,375421	0,342005
9	0,209108	0,142582	0,089478	16	0,28145	0,261307	0,221515
10	0,318723	0,264231	0,219014	17	0,100007	0	0
11	0,40556	0,357799	0,313109	18	0	0	0
12	0,469637	0,427576	0,37924	19	0	0	0



Σχήμα5.2.3.1: Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει της ώρας για νότιο προσανατολισμό για όλους τους μήνες του έτους.



Σχήμα5.2.3.2: Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει της ώρας για δυτικό προσανατολισμό για όλους τους μήνες του έτους.



Σχήμα 5.2.3.3: Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει της ώρας για ανατολικό προσανατολισμό για όλους τους μήνες του έτους.

Με το ίδιο πρόγραμμα θα δούμε και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου σε ηλιακό συλλέκτη. Η μελέτη αυτή γίνεται με σκοπό τον έλεγχο της ορθότητας του χρησιμοποιηθέντος προγράμματος και τον έλεγχο της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων. Για την εφαρμογή θεωρούμε ότι έχουμε έναν ηλιακό συλλέκτη με κλίση επιφάνειας ίση με το γεωγραφικό πλάτος:

$$\text{Άρα } \beta = \varphi = 37,97^\circ$$

Και η ακτινοβολία πέφτει στον ηλιακό συλλέκτη και όχι στον τοίχο που ήταν το πρώτο μας σενάριο. Τα αποτελέσματα της παραπάνω υπόθεσης παρατίθενται στους πίνακες:

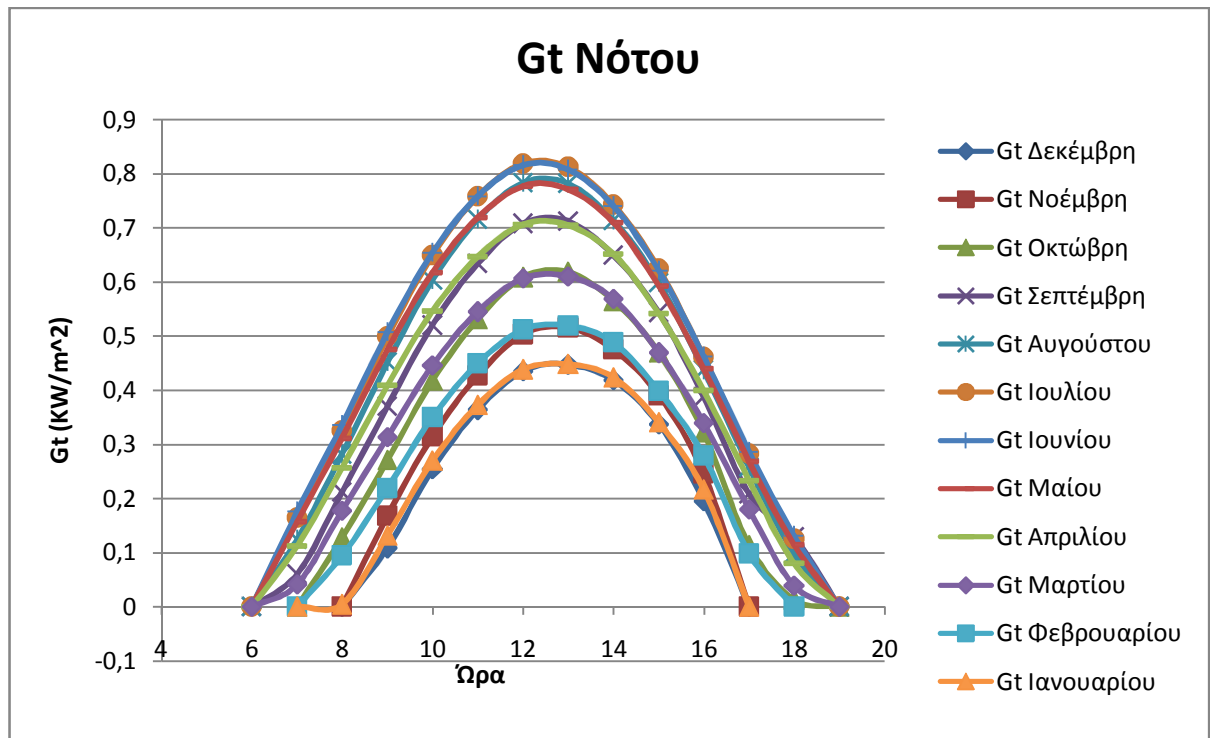
Πίνακας 5.2.3 .2: Ακτινοβολία Gt κεκλιμένου επιπέδου για νότιο προσανατολισμό για όλους τους μήνες για ηλιακό συλλέκτη .

Gt Νότου

Ώρα	Ιανουάρ.	Φεβρ.	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούλιος	Ιούνιος	Αύγουστ	Σεπτεμ.
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0,041374	0,112361	0,157239	0,175641	0,164229	0,124457	0,060778
8	0,004207	0,094226	0,176946	0,256796	0,311226	0,335552	0,325325	0,281706	0,21144
9	0,131508	0,218524	0,313313	0,408983	0,475202	0,506904	0,499078	0,451563	0,369704
10	0,269495	0,350015	0,445883	0,546343	0,617444	0,653625	0,649401	0,603415	0,519661
11	0,372462	0,448955	0,544621	0,646535	0,719372	0,758142	0,757683	0,715641	0,633937
12	0,438192	0,51175	0,60621	0,706372	0,777205	0,81577	0,818699	0,783047	0,707765
13	0,448347	0,519298	0,610038	0,705001	0,771303	0,807755	0,812239	0,781363	0,712211
14	0,423737	0,488759	0,569066	0,65195	0,709216	0,740144	0,742668	0,713197	0,649462
15	0,340719	0,398369	0,468938	0,541836	0,592845	0,621043	0,623983	0,59863	0,543436
16	0,216596	0,27898	0,339885	0,399115	0,439958	0,46173	0,46163	0,436989	0,387225
17	0	0,097986	0,18016	0,233298	0,268012	0,285567	0,282864	0,25787	0,208508
18	0	0	0,038678	0,079781	0,114414	0,131479	0,12548	0,097643	0,128901
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ώρα	Οκτώβρης	Νοέμβ.	Δεκέμβ.
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0,127536	0	0
9	0,270412	0,168041	0,108141
10	0,41702	0,314175	0,254523
11	0,531036	0,42661	0,363646
12	0,608421	0,503185	0,435218
13	0,618027	0,515495	0,447143
14	0,564659	0,475092	0,418287
15	0,469879	0,390607	0,337358
16	0,321426	0,24623	0,194816
17	0,113777	0	0
18	0,012751	0	0
19	0	0	0

Ακολουθεί το σχετικό διάγραμμα:



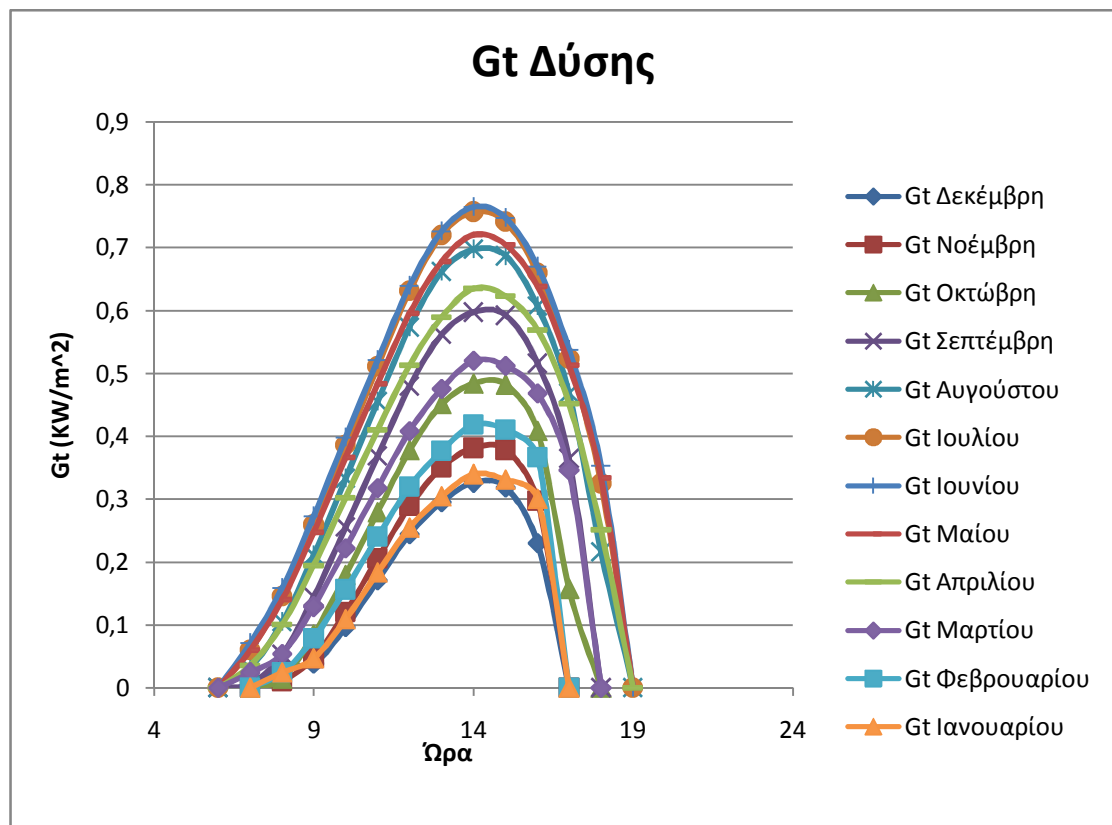
Σχήμα 5.2.3.4: Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει της ώρας για νότιο προσανατολισμό για όλους τους μήνες του έτους σε ηλιακό συλλέκτη.

Πίνακας 5.2.3.3: Ακτινοβολία Gt κεκλιμένου επιπέδου για δυτικό προσανατολισμό για όλους τους μήνες για ηλιακό συλλέκτη .

Ώρα	Gt Δύσης							
	Ιανουάρ.	Φεβρ.	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστ
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0,023645	0,035664	0,059594	0,070589	0,059459	0,030665
8	0,024251	0,024129	0,0533	0,100348	0,140264	0,158165	0,145084	0,104745
9	0,046599	0,0783	0,12848	0,193836	0,246905	0,272095	0,258746	0,210571
10	0,108273	0,155909	0,221811	0,302322	0,366284	0,398009	0,385875	0,332956
11	0,182929	0,240048	0,317618	0,410448	0,483589	0,521193	0,510889	0,454936
12	0,254617	0,319775	0,408427	0,513253	0,595306	0,638796	0,630901	0,572981
13	0,304085	0,376777	0,475163	0,589632	0,678129	0,725729	0,719951	0,661289
14	0,339337	0,418008	0,519976	0,634668	0,720401	0,764581	0,756819	0,697262
15	0,330271	0,410339	0,511675	0,622979	0,70473	0,747001	0,741137	0,686571
16	0,3	0,36659	0,467883	0,568867	0,637945	0,670037	0,659858	0,606341
17	0	0	0,345945	0,451833	0,512997	0,53742	0,52346	0,467765
18	0	0	0	0,25109	0,333164	0,35294	0,324389	0,21572
19	0	0	0	0	0	0	0	0



Ώρα	Σεπτεμ.	Οκτώβρης	Νοέμβ.	Δεκέμβ.
6	0	0	0	0
7	0,006142	0	0	0
8	0,053024	0,013905	0,010389	0,034636
9	0,1443	0,084443	0,046969	0,038086
10	0,255402	0,178802	0,120137	0,096203
11	0,368654	0,279031	0,205196	0,170801
12	0,479106	0,377398	0,289089	0,244016
13	0,562057	0,450643	0,349739	0,29483
14	0,596965	0,483802	0,380994	0,326023
15	0,591778	0,481889	0,378026	0,31838
16	0,515502	0,407723	0,297093	0,230041
17	0,364353	0,156917	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0



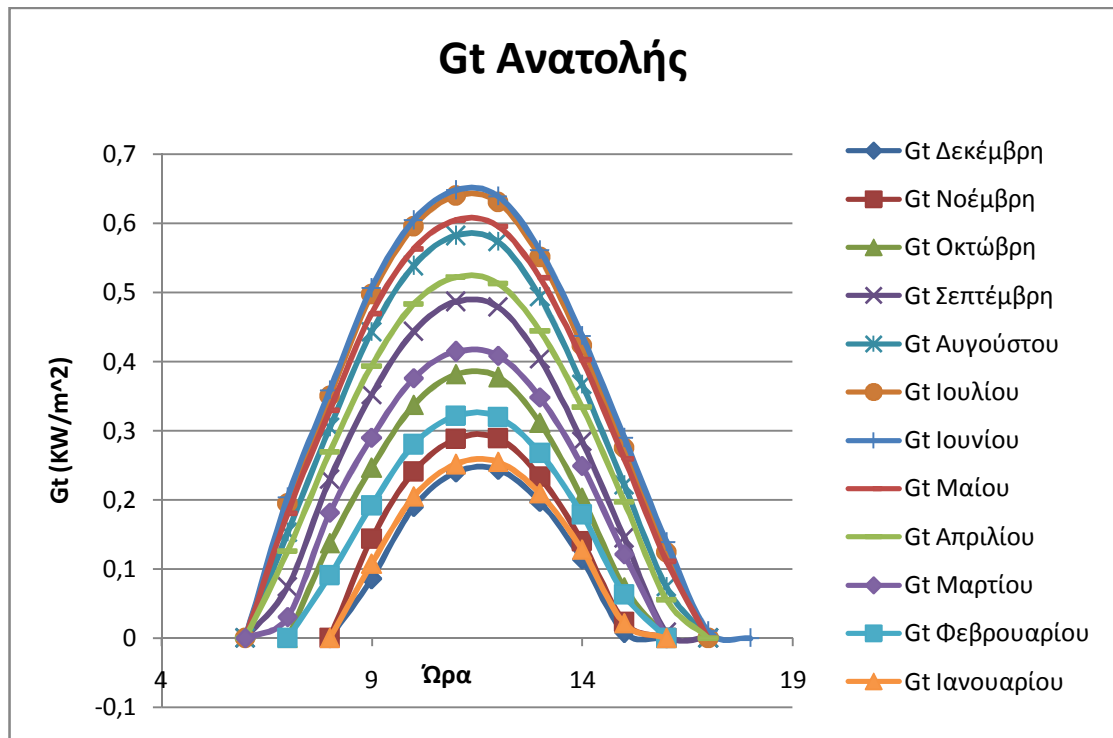
Σχήμα 5.2.3.5: Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει της ώρας για δυτικό προσανατολισμό για όλους τους μήνες του έτους σε ηλιακό συλλέκτη.

Πίνακας 5.2.3.4 Ακτινοβολία Gt κεκλιμένου επιπέδου για ανατολικό προσανατολισμό για όλους τους μήνες για ηλιακό συλλέκτη .

Gt Ανατολής

Ώρα	Ιανουάρ.	Φεβρ.	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστ
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0,030655	0,126391	0,180387	0,203434	0,194427	0,15292
8	0	0,090797	0,181969	0,269664	0,330017	0,358476	0,349944	0,305015
9	0,107164	0,19207	0,28999	0,393899	0,469	0,506099	0,497138	0,442649
10	0,204756	0,280269	0,375904	0,483019	0,563233	0,60419	0,5957	0,538457
11	0,251529	0,321564	0,414462	0,521895	0,60443	0,647683	0,639887	0,58196
12	0,254617	0,319775	0,408427	0,513253	0,595306	0,638796	0,630901	0,572981
13	0,209381	0,268066	0,348296	0,444777	0,521232	0,561042	0,551061	0,493478
14	0,127961	0,179201	0,249222	0,33474	0,402927	0,436783	0,423624	0,366913
15	0,02136	0,062717	0,121765	0,197148	0,259006	0,289442	0,275418	0,221067
16	0	0	0	0,055535	0,111601	0,138829	0,124473	0,074079
17	0	0	0	0	0	0,010553	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0

Ώρα	Σεπτεμ.	Οκτώβρης	Νοέμβ.	Δεκέμβ.
6	0	0	0	0
7	0,074486	0	0	0
8	0,229667	0,136782	0,14329	0
9	0,351687	0,246111	0,24071	0,085843
10	0,443753	0,337485	0,288096	0,189729
11	0,486633	0,381442	0,289089	0,239587
12	0,479106	0,377398	0,233745	0,244016
13	0,404069	0,310849	0,139757	0,197461
14	0,284196	0,202562	0,023513	0,114259
15	0,145048	0,073656	0	0,007951
16	0,007959	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0



Σχήμα 5.2.3.6 Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει της ώρας για ανατολικό προσανατολισμό για όλους τους μήνες του έτους σε ηλιακό συλλέκτη.

Παρατηρούμε λοιπόν στη περίπτωση του ηλιακού συλλέκτη ότι η ηλιακή ακτινοβολία το καλοκαίρι αυξάνεται όπως ήταν το αναμενόμενο. Άρα το πρόγραμμα μας είναι σωστό και η ελάχιστη μείωση της ακτινοβολίας πιθανόν να οφείλεται στην μεγάλη κλίση τους καλοκαιρινούς μήνες του ήλιου με το κατακόρυφο τοίχο.

Επίσης στη περίπτωση του ηλιακού συλλέκτη βλέπουμε ότι στο νότο η ακτινοβολία είναι κατά μέτρο μεγαλύτερη από τους άλλους προσανατολισμούς και κυρίως από την ανατολή ακόμα και τους καλοκαιρινούς μήνες (γεγονός το οποίο δεν παρατηρούταν στο πρώτο σενάριο του τοίχου).

Από τις παραπάνω διαπιστώσεις συμπεραίνουμε ότι το πρόγραμμα μας είναι έγκυρο και ότι η μεγάλη κλίση τους καλοκαιρινούς μήνες του ήλιου με το κατακόρυφο τοίχο επηρεάζει την ένταση της ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου με κατεύθυνση νότιο προσανατολισμό (παρατηρείται μείωση αντί να αυξάνεται). Δεν επηρεάζει όμως την ακτινοβολία με δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό η οποία όπως είναι το αναμενόμενο αυξάνεται τους καλοκαιρινούς μήνες.

## 5.3 Προσομοίωση ηλιακής φόρτισης τοιχοποιίας με στρώμα υλικού αλλαγής φάσης

Σε αυτή την ενότητα με γνωστές τις ακτινοβολίες που δέχεται ένας κατακόρυφος τοίχος κατά τη διάρκεια όλου του έτους και για τους τρεις προς μελέτη προσανατολισμούς, θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά ενός συγκεκριμένου PCM τοποθετημένο σε τοίχο αίθουσας απέναντι από υαλοπίνακα, τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε αυτό καθώς και την ισχύ που μας δίνει η συμβολή του υλικού αλλαγής φάσης μας στην διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας και συνθηκών άνεσης στην αίθουσα. Και στη συνέχεια γνωρίζοντας την προσφερόμενη ισχύ του PCM και τις απαιτήσεις της αίθουσας σε ισχύ θα βρούμε σε κάθε περίπτωση τι συμπληρωματική ισχύ χρειάζεται από άλλες πηγές.

### 5.3.1 Επιλογή PCM

Στην αγορά υπάρχει μεγάλη ποικιλία υλικών αλλαγής φάσης καθώς εκτός από τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα μπορούν εύκολα να προκύψουν καινούργια με την ανάμιξη των προαναφερθέντων, ανάλογα με τις ανάγκες μας.

Σε αυτήν την εφαρμογή χρησιμοποιείται ένα υποθετικό υλικό αλλαγής φάσης με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Θερμότητα αλλαγής φάσης ή θερμότητα της τήξης  **$H=150\text{KJ/Kgr}$**
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης με θερμοκρασία εισόδου στη διφασική  **$T_s=20^{\circ}\text{C}$**  και θερμοκρασία εξόδου από τη διφασική περιοχή ή θερμοκρασία υγροποίησης  **$T_l=26^{\circ}\text{C}$** .
- Ειδική θερμοχωρητικότητα έναρξης της τήξης  **$C_{ps}=4000\text{ J/Kg }^{\circ}\text{C}$**  και ολοκλήρωσης της τήξης (υγρή φάση)  **$C_{pl}=4000\text{J/Kg }^{\circ}\text{C}$** .
- Ειδική θερμική αγωγιμότητα  **$K=1,2$** .
- Πυκνότητα  **$\rho=1019\text{Kgr/m}^3$**

Η προσομοίωση θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση της ενεργός θερμοχωρητικότητας. Θα χρησιμοποιήσουμε την απλή μορφή του  $C_{p,eff}$  δηλαδή η ενεργός θερμοχωρητικότητα θα βρεθεί από τις παρακάτω εξισώσεις και με την χρήση της τριγωνικής μορφής καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας (τριγωνική κατανομή).

Γενική εξίσωση ενεργούς θερμοχωρητικότητας :

Για  $T \leq T_s$  :

$$C_{p,eff} = C_{ps} \quad (5.3.1.1)$$

Για  $T_s < T \leq T_c$  :

$$C_{p,eff} = 4 \times (H - bC_{ps}) \times \frac{T - T_s}{b^2} + C_{ps} \quad (5.3.1.2)$$

Για  $T_c < T \leq T_l$  :

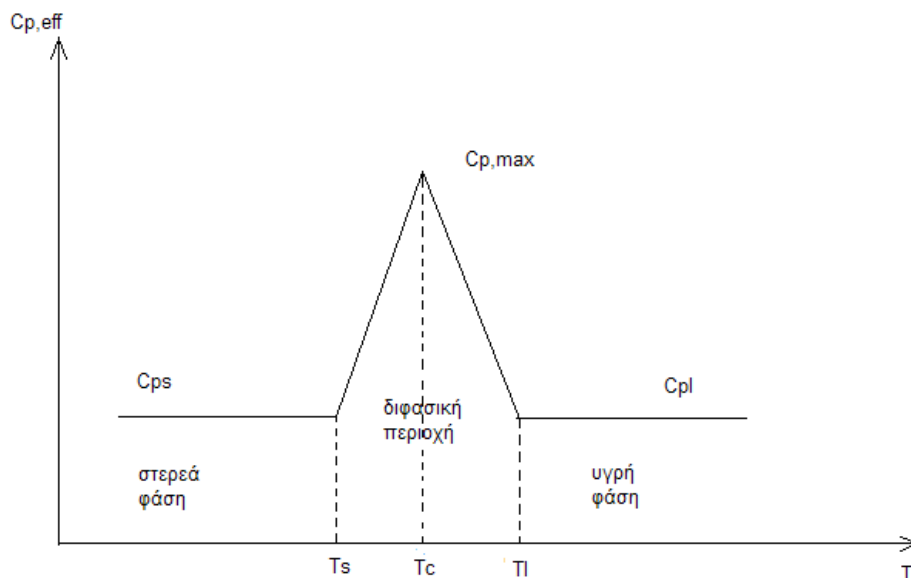
$$C_{p,eff} = 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b^2} \times \left( T - T_s - \frac{b}{2} \right) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} \quad (5.3.1.3)$$

Για  $T > T_l$ :

$$C_{p,eff} = C_{pl} \quad (5.3.1.4)$$

Όπου :  $T_c = \frac{T_s + T_l}{2}$  και  $b = T_l - T_s$

Με αντίστοιχο διάγραμμα :



Σχήμα 5.3.1.1 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας.

Χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά του υλικού αλλαγής φάσης που επιλέχθηκε για αυτήν την προσομοίωση οδηγούμαστε στις παρακάτω εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας που προκύπτουν από τις σχέσεις (5.3.1.1),(5.3.1.2),(5.3.1.3), (5.3.1.4) :

Για  $T \leq 20^{\circ}\text{C}$  :

$$c_{p,eff}=c_{ps}=400 \text{ J/kgK} \quad (5.3.1.5)$$

Για  $20^{\circ}\text{C} < T \leq 23^{\circ}\text{C}$ :

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

$$= 14000 \times (T - 20) + 4000 \quad (5.3.1.6)$$

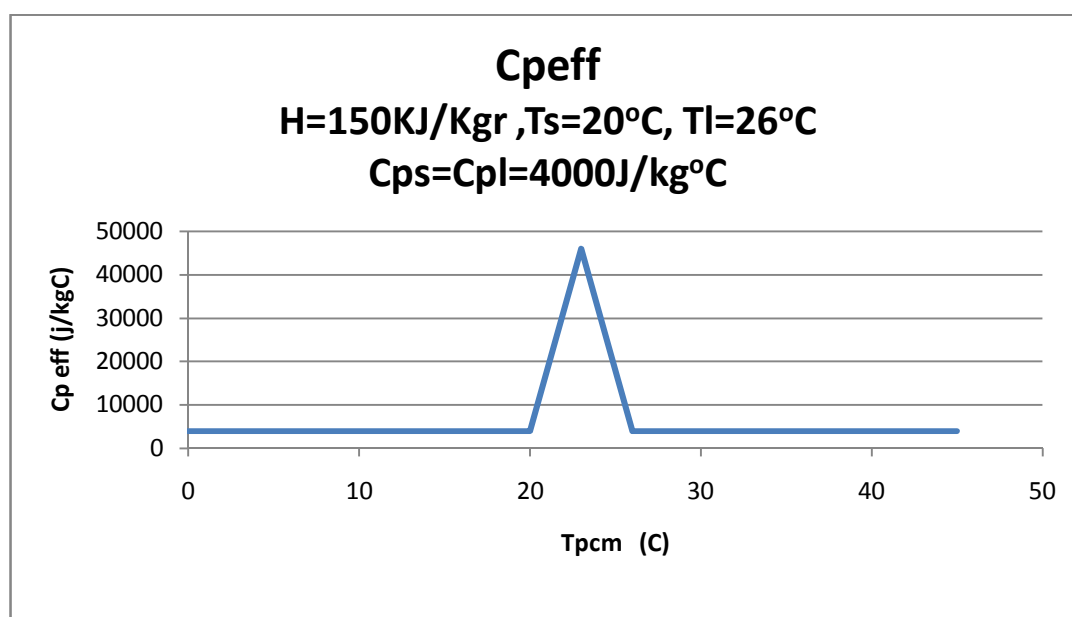
Για  $23^{\circ}\text{C} < T \leq 26^{\circ}\text{C}$ :

$$C_{p,eff} = 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b^2} \times \left(T - T_s - \frac{b}{2}\right) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} =$$

$$= -14000 \times (T - 23) + 46000 \quad (5.3.1.7)$$

Για  $T > 26^{\circ}\text{C}$ :  $c_{p,eff}=c_{pl}=4000 \text{ J/kgK}$  (5.3.1.8)

Όπου παρουσιάζονται και στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 5.3.1.2: Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας του χρησιμοποιηθέντος PCM .

### 5.3.2 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM

Για να γίνει χρήση του ισολογισμού θα πρέπει να προβούμε σε κάποιες παραδοχές ώστε να απλουστέψουμε λίγο το πρόβλημα, έτσι θεωρούμε :

1. Θεωρούμε ότι στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης επικρατεί ομοιόμορφη θερμοκρασία.
2. Η θερμοκρασία της αίθουσας θεωρείται σταθερή.
3. Θεωρούμε ότι μεταξύ του στρώματος υλικού αλλαγής φάσης και της μόνωσης δεν υπάρχει συναλλαγή θερμότητας δηλαδή υπάρχει αδιαβατικό όριο μεταξύ τους, τέλεια μόνωση .
4. Τέλος θεωρούμε ότι στην αίθουσα υπάρχουν σταθερές απώλειες δηλαδή υπάρχει σταθερή ισχύ που χρειάζεται για την κάλυψη των αναγκών.

Ισολογισμός :

Η ενέργεια που δίνει το PCM είναι η ενέργεια λόγω της ακτινοβολίας αφαιρούμενη κατά την ενέργεια που δίνει το PCM στο χώρο.

Άρα :

$$C_{p,eff}m(T^1 - T^0) = 0,9GtA_f 36000 - UA_w 3600 \left( \frac{T^0 + T^1}{2} - T_{\pi} \right) \quad (5.3.2.1)$$

Όπου :

- $C_{p,eff}$  η ειδική θερμοχωρητικότητα η οποία δίνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του PCM από τις (5.3.1.5), (5.3.1.6) (5.3.1.7), (5.3.1.8)
- $m$  η μάζα του PCM  
 $m = \rho V = 1019 \times 0,6 = 611,4 \text{Kgr}$   
με:  $V = (\text{επιφάνεια τοίχου}) \times (\text{πάχος PCM}) =$   
 $= 30\text{m}^2 \times 0,02\text{m} = 0,6\text{m}^3$   
Για το πάχος του PCM επιλέγουμε μια λογική τιμή ίση με 2cm.  
Και  $\rho = 1019 \text{Kgr/m}^3$
- $T^0$  η θερμοκρασία του PCM στην αρχή της χρονικής περιόδου .

- $T^1$  η θερμοκρασία του PCM στο τέλος της χρονικής περιόδου.
- $Gt$  ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου ( έχει βρεθεί αναλυτικά στο πρώτο μέρος του παρόντος κεφαλαίου)
- $A_f$  η επιφάνεια του υαλοπίνακα στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται υαλοπίνακας διαστάσεων (ύψος) x (μήκος) = ( 2,5)x(4) . Άρα  $A_f=10m^2$  ( σε επόμενο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί παραμετρική μελέτη ως προς διάφορες διαστάσεις υαλοπινάκων).
- $A_w$  η επιφάνεια τοίχου στον οποίο έχει ενσωματωθεί το PCM με διαστάσεις (πλάτος αίθουσας)x(ύψος)=(10m)x(3m) Άρα  $A_w=30 m^2$ .
- $U$  είναι η ειδική θερμική διαπερατότητα, η οποία μπορεί να βρεθεί με βάση την εξίσωση :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{l}{k} = \frac{1}{8} + \frac{0,01}{1,2} \quad \text{Άρα } U=5,33 \text{ W/ m}^2.$$

με  $\frac{1}{h}$  τη θερμική αντίσταση συναγωγής και  $\frac{l}{k}$  τη θερμική αντίσταση αγωγής διαμέσου της γυψοσανίδας που υπάρχει πριν το στρώμα του PCM και η οποία έχει πάχος  $l=10mm$  και θερμική αγωγιμότητα . Ο  $k = 0,12W /m C$

- $T_{II}$  η θερμοκρασία στο εσωτερικό της αίθουσας όπου στην περίπτωση μας είναι ίση με  $T_{II}=20^\circ C$

Με γνωστά τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ο ισολογισμός του χρησιμοποιηθέντα PCM και είναι ο εξής :

$$C_{p,eff}611,4(T^1 - T^0) = 0,9Gtx10x36000 - 5,33x30x3600\left(\frac{T^0+T^1}{2} - 20\right) \quad (5.3.2.2)$$

### 5.3.3. Ηλιακή φόρτιση τοιχοποιίας

Θα μελετήσουμε την ηλιακή φόρτιση τοιχοποιίας για την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα του έτους για τις ώρες ύπαρξης ηλιακής ακτινοβολίας (από 07:00 - 18:00) καθώς για αυτές τις μέρες και ώρες είναι γνώστη η ηλιακή ακτινοβολία από προηγούμενο κεφάλαιο. Μελετάται δηλαδή η



θερμοκρασία του στρώματος PCM για κάθε μήνα και για κάθε προσανατολισμό του τοίχου κατά τη διάρκεια της ημέρας

Εύκολα από την εξίσωση ισολογισμού γνωρίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία μπορούμε να βρούμε την θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης στο τέλος της κάθε ώρας .

$$C_{p,eff}mT^1 - C_{p,eff}mT^0 =$$

$$= 0,9GtA_f 36000 - UA_w3600 \frac{T^0 + T^1}{2} + UA_w3600T_{\Pi}$$

$$C_{p,eff}mT^1 = +C_{p,eff}mT^0 + 0,9GtA_f 36000 - UA_w3600 \frac{T^1}{2}$$

$$- UA_w3600 \frac{T^0}{2} + UA_w3600T_{\Pi}$$

$$C_{p,eff}mT^1 + UA_w3600 \frac{T^1}{2} =$$

$$= +C_{p,eff}mT^0 + 0,9GtA_f 36000 - UA_w3600 \frac{T^0}{2}$$

$$+ UA_w3600T_{\Pi}$$

$$T^1 (C_{p,eff}m + UA_w1800) =$$

$$= +C_{p,eff}mT^0 + 0,9GtA_f 36000 - UA_w3600 \frac{T^0}{2}$$

$$+ UA_w3600T_{\Pi}$$

$$T^1 = \frac{C_{p,eff}mT^0 + 0,9GtA_f 36000 - UA_w3600(\frac{T^0}{2} - T_{\Pi})}{C_{p,eff}m + UA_w1800}$$

Τελικά :

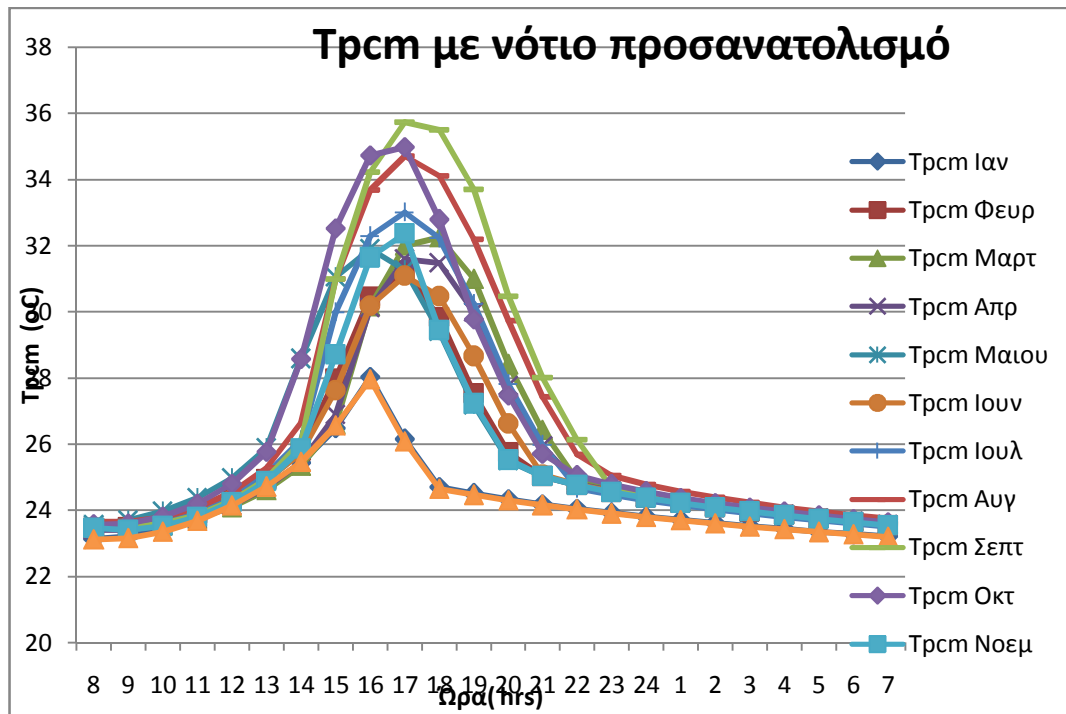
$$T^1 = \frac{C_{p,eff}611,4T^0 + 0,9Gtx10x36000 - 5,33x30x3600(\frac{T^0}{2} - 20)}{C_{p,eff}611,4 + 5,33x30x1800}$$

(5.3.3.1)

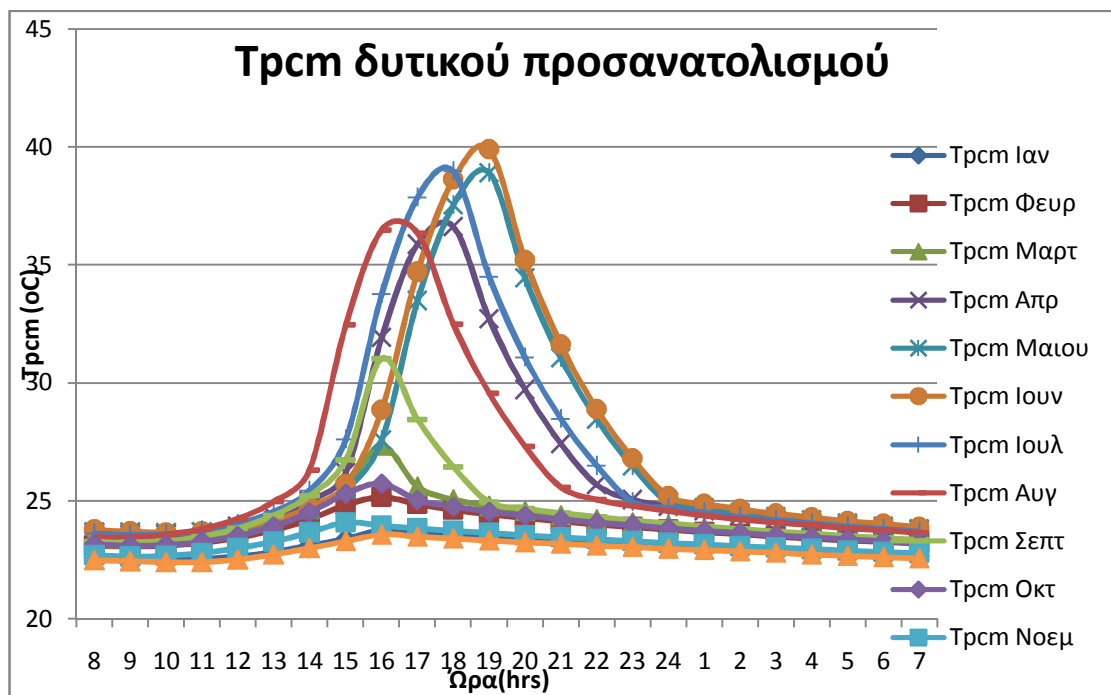
Βέβαια από τη παραπάνω εξίσωση παρατηρούμε την ύπαρξη και ενός άλλου αγνώστου του  $T^0$  της θερμοκρασίας δηλαδή στην αρχή της χρονικής περιόδου στην αρχή κάθε ώρας .Για την εύρεση της όποιας θα εργαστούμε ως εξής:

Αρχικά θα θεωρήσουμε εμείς μια αυθαίρετη τιμή , έστω  $T^0 = 22$  °C για της t=07:00 (7 η ώρα το πρωί ) με αυτή την αρχική τιμή( γνωρίζοντας και την ακτινοβολία που δέχεται ο τοίχος την συγκεκριμένη ώρα ) θα βρούμε από τη σχέση (5.3.3.1) για κάθε ώρα της μέρας μελέτης μας τη νέα θερμοκρασία του PCM  $T^1$  , δηλαδή για κάθε μια από τις ώρες από 07:00 το πρωί ως 06:00 το άλλο πρωί(ένα εικοσιτετράωρο) θα βρεθεί η νέα θερμοκρασία του . Ύστερα θα επαναλάβουμε την διαδικασία αυτή βάζοντας τώρα ως αρχική τιμή της  $T^0$  για t=07:00 την τιμή που μας έχει προκύψει την t=06:00 του προηγούμενου 24ώρου(προηγούμενη δοκιμή) .Οι επαναλήψεις θα συνεχιστούν μέχρι οι τιμές της ίδιας ώρας κάθε 24ώρου να συγκλίνουν. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία από την αρχική αυθαίρετη υποθεθείσα θερμοκρασία.

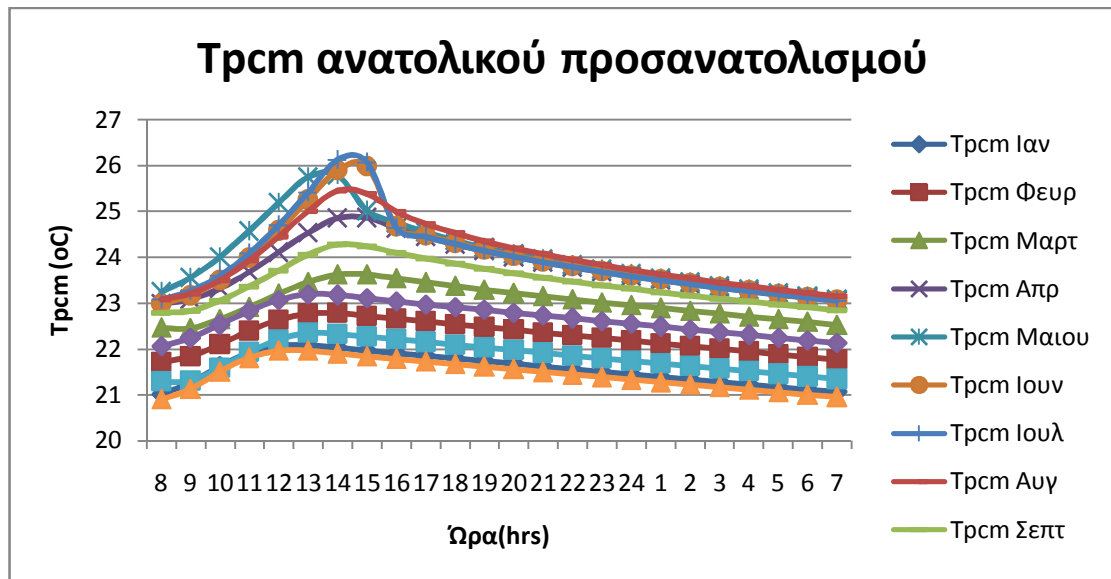
Με την διαδικασία αυτή λοιπόν υπολογίσαμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο στρώμα του PCM για μια τυπική ημέρα 21<sup>η</sup> κάθε μήνα του έτους, οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα ανάλογα με τον προσανατολισμό του τοίχου που περιέχει το PCM.



Σχήμα 5.3.3.1 Διαγράμματα Τρσm συναρτήσεως της ώρας για όλους τους μήνες του έτους σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 5.3.3.2 Διαγράμματα Τρσm συναρτήσεως της ώρας για όλους τους μήνες του έτους σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



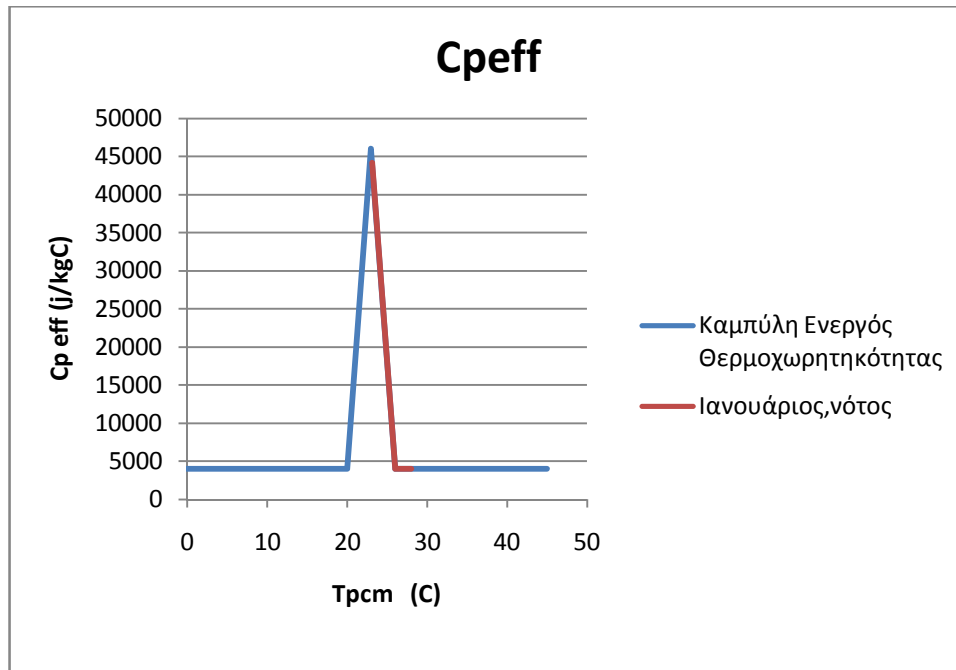
Σχήμα 5.3.3.3 Διαγράμματα Tpcm συναρτήσεως της ώρας για όλους τους μήνες του έτους σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι κατά κύριο λόγο στο τοίχο με νότιο προσανατολισμό αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες στα στρώματα του υλικού αλλαγής φάσης και κατά συνέπεια το PCM καλύπτει μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης με εξαίρεση τρεις καλοκαιρινούς μήνες τον Μάιο, τον Ιούλιο και τον Ιούνιο όπου το υλικό μας εμφανίζει ψηλότερες θερμοκρασίες όταν βρίσκεται σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό. Αντίθετα το υλικό αλλαγής φάσης όταν τοποθετείται σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό δεν αναπτύσσει ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες και δεν καλύπτει μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος της αλλαγής φάσης του όπως φαίνεται και από τις παρακάτω καμπύλες με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εκμετάλλευση μεγάλου μέρους της ενέργειας που θα μπορούσε να προσφέρει.

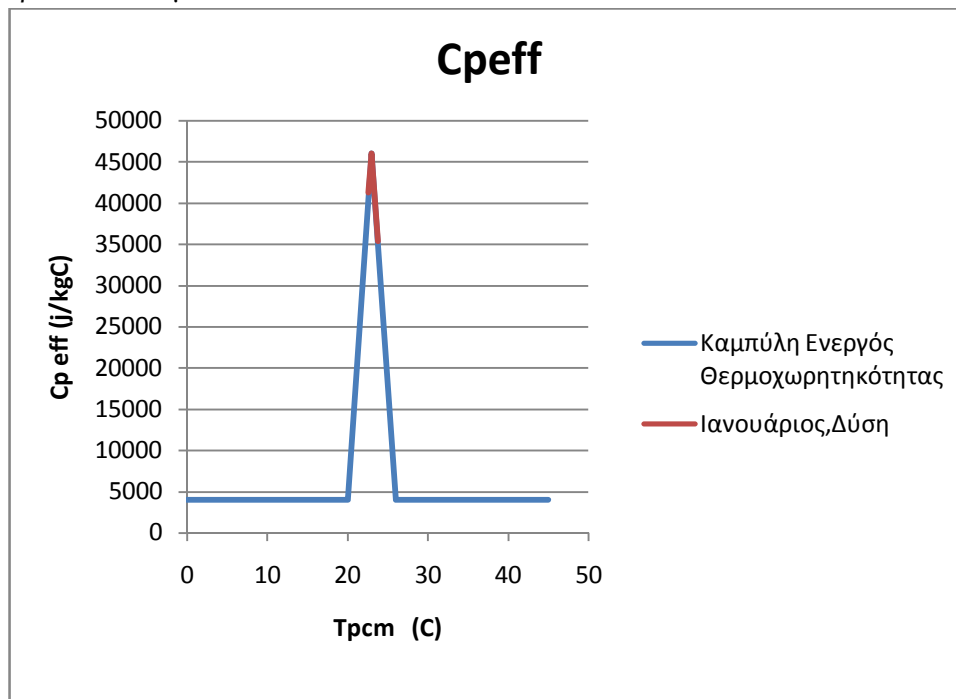
Επίσης μια άλλη παρατήρηση που προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι στο υλικό αλλαγής φάσης που είναι τοποθετημένο σε τοίχο με δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό η θερμοκρασία τη θερινή περίοδο παρουσιάζει αύξηση σε σύγκριση με την χειμερινή ,φαινόμενο το οποίο δεν εμφανίζεται σε νότιο προσανατολισμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο (από την οποία εξαρτάται η θερμοκρασία του PCM) νότιου προσανατολισμού δεν παρουσιάζει αύξηση τους καλοκαιρινούς μήνες. Στη συνέχεια παρουσιάζεται σε διαγράμματα η κάλυψή του

θερμοκρασιακού εύρους της αλλαγής φάσης του PCM για κάθε μήνα και προσανατολισμό.

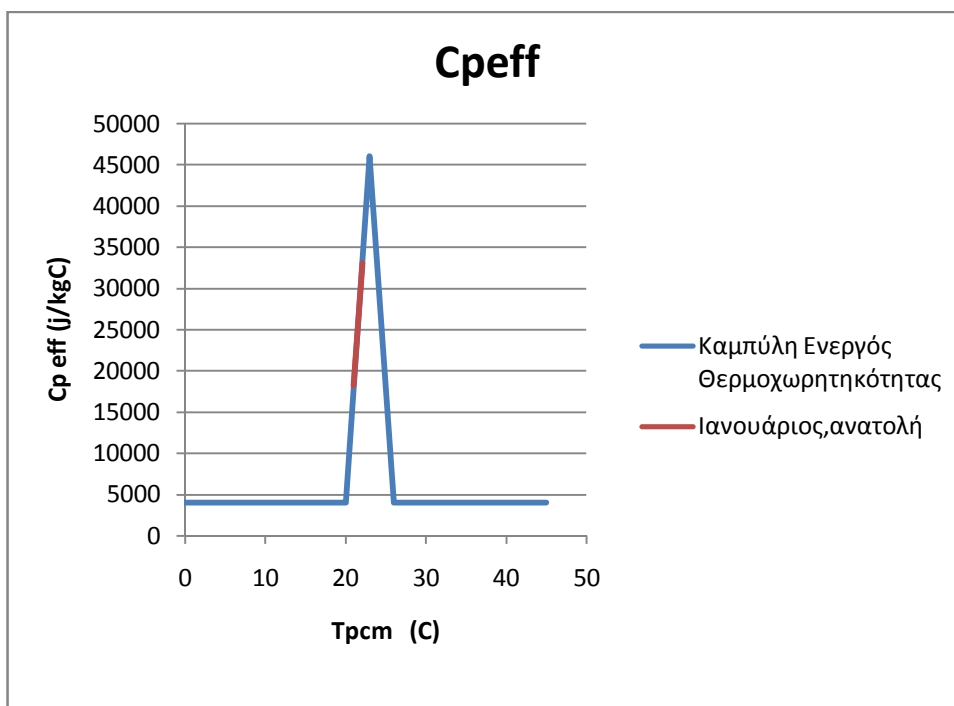
❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου:



Σχήμα 5.3.3.4 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Ιανουάριο το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

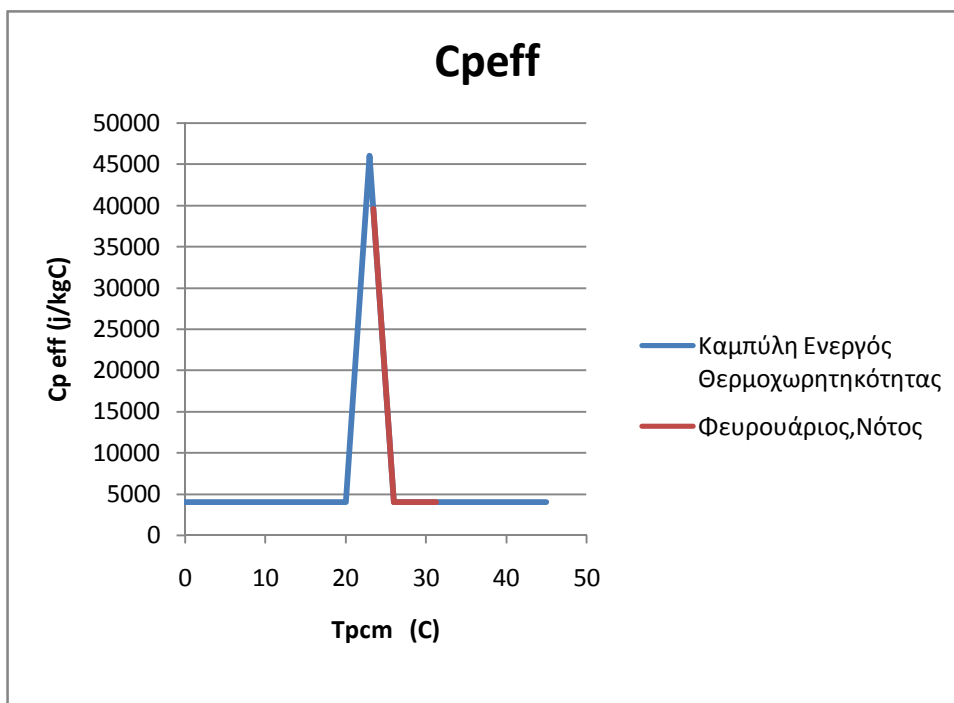


Σχήμα 5.3.3.5: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Ιανουάριο το 24ωρο σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό.

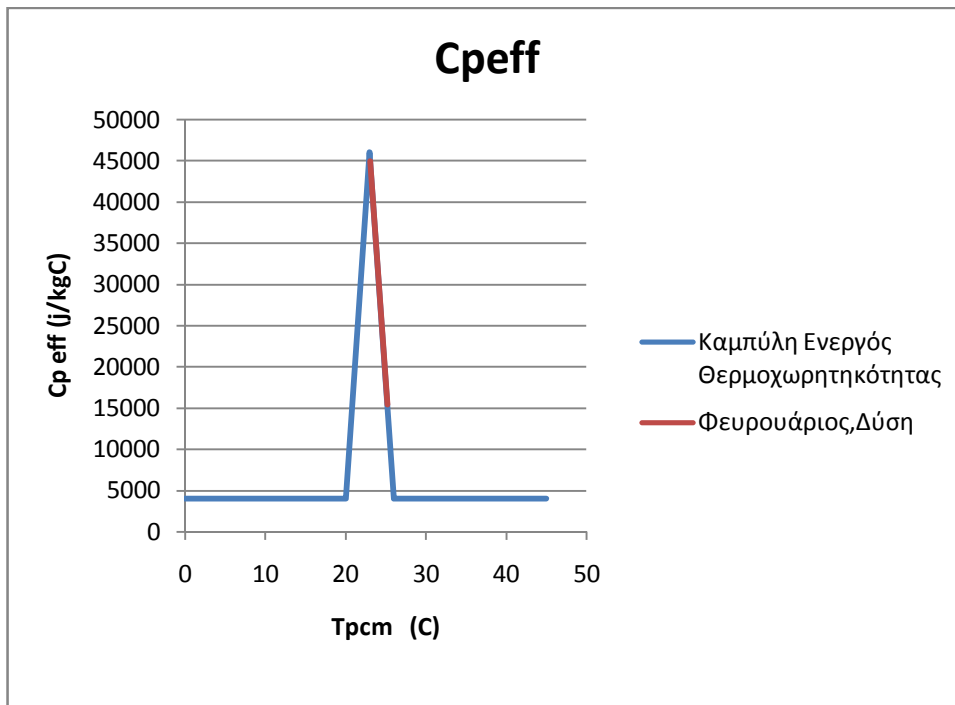


Σχήμα 5.3.3.6: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Ιανουάριο το 24ωρο σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό.

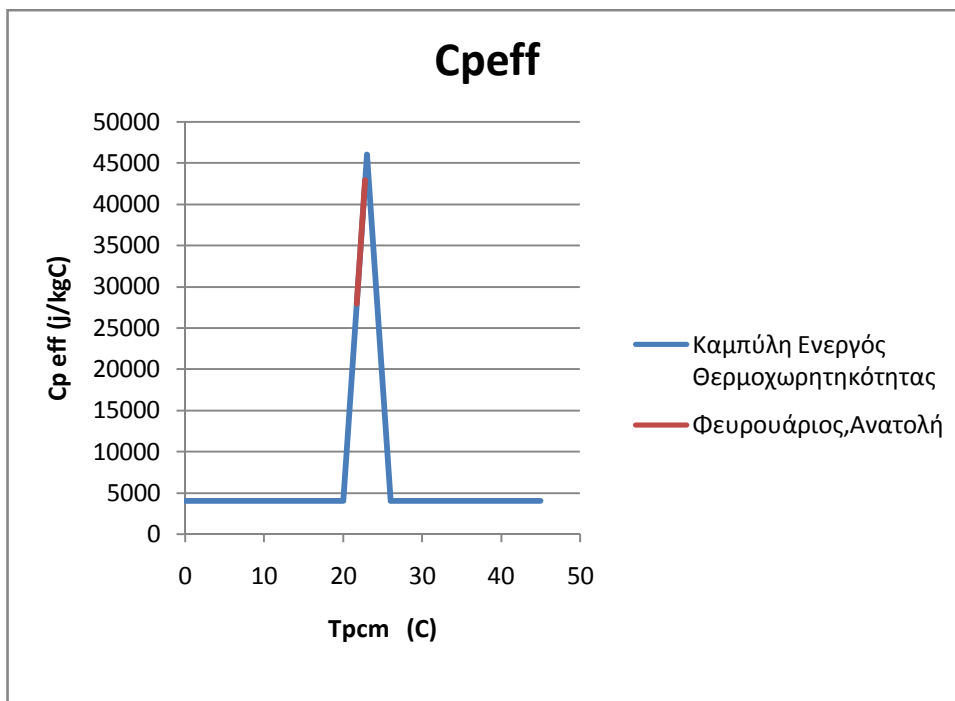
❖ Για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου :



Σχήμα 5.3.3.7: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Φεβρουάριο το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

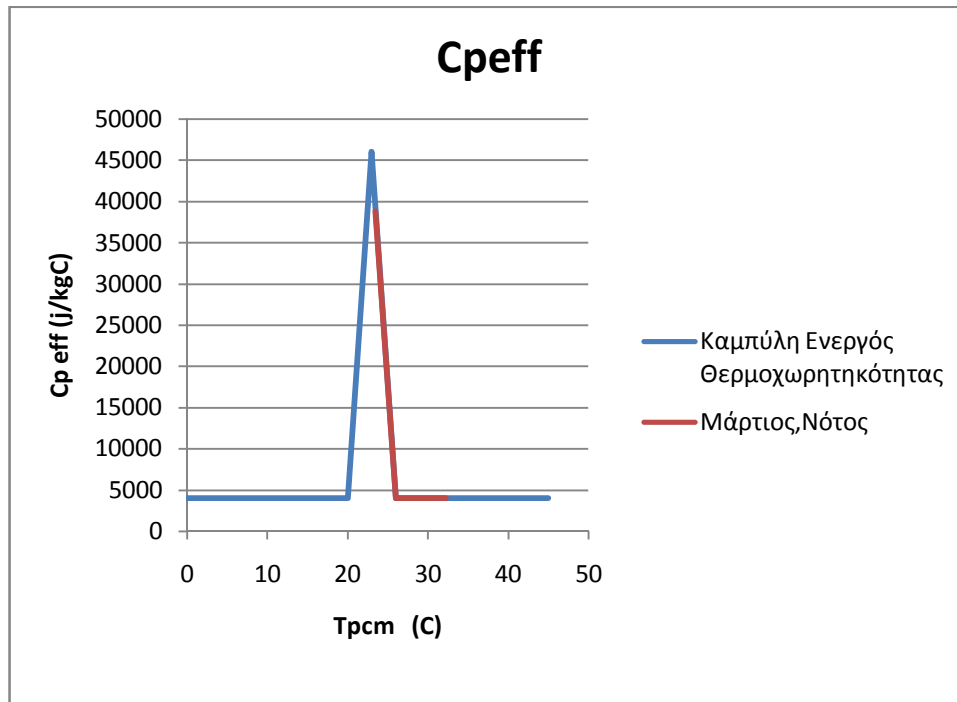


Σχήμα 5.3.3.8: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Φεβρουάριο το 24ωρο σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό.

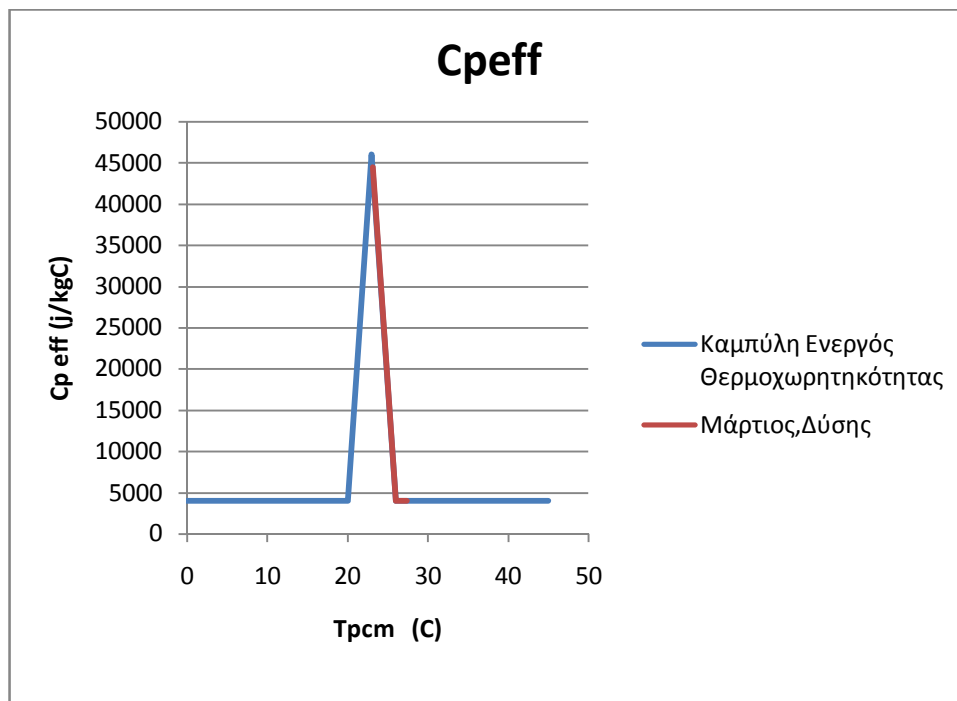


Σχήμα 5.3.3.9: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Φεβρουάριο το 24ωρο σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου:

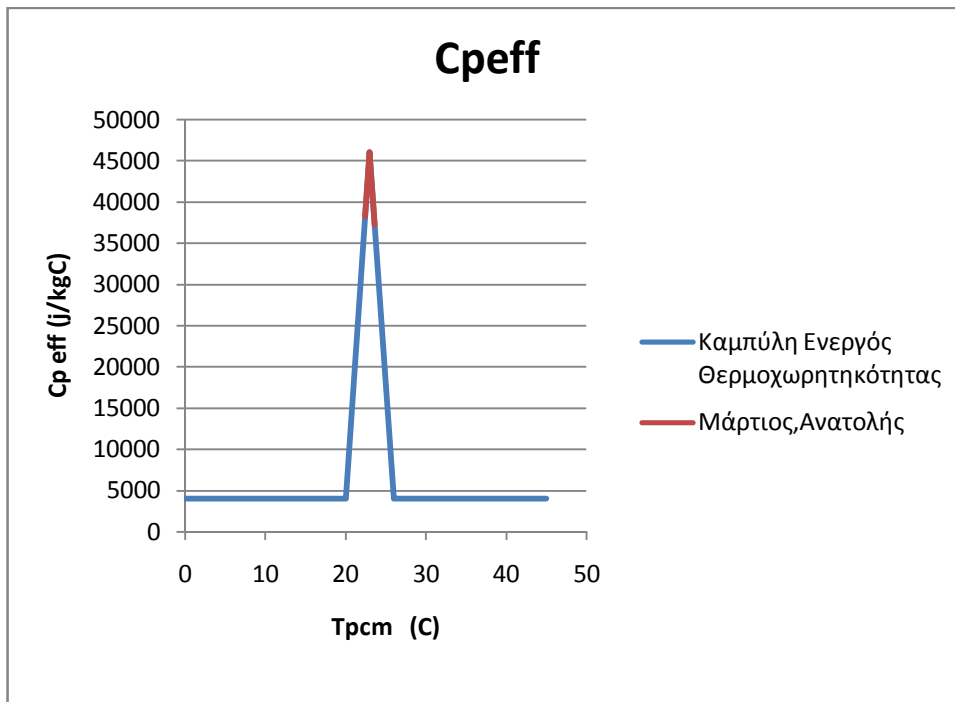


Σχήμα 5.3.3.10: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Μάρτιο το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.



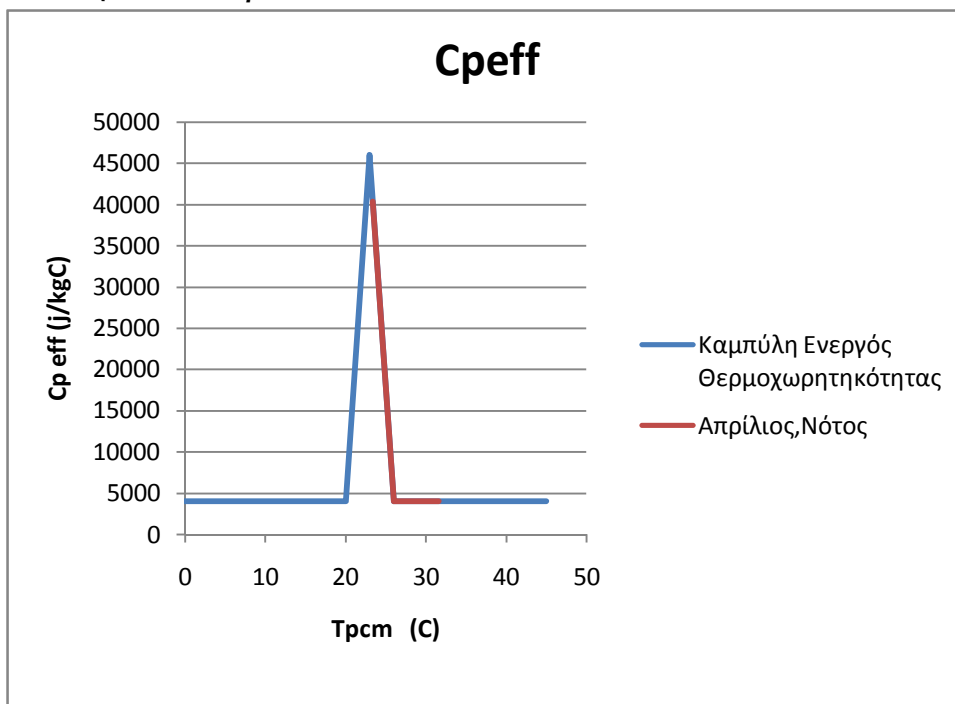
Σχήμα 5.3.3.11: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Μάρτιο το 24ωρο σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό.



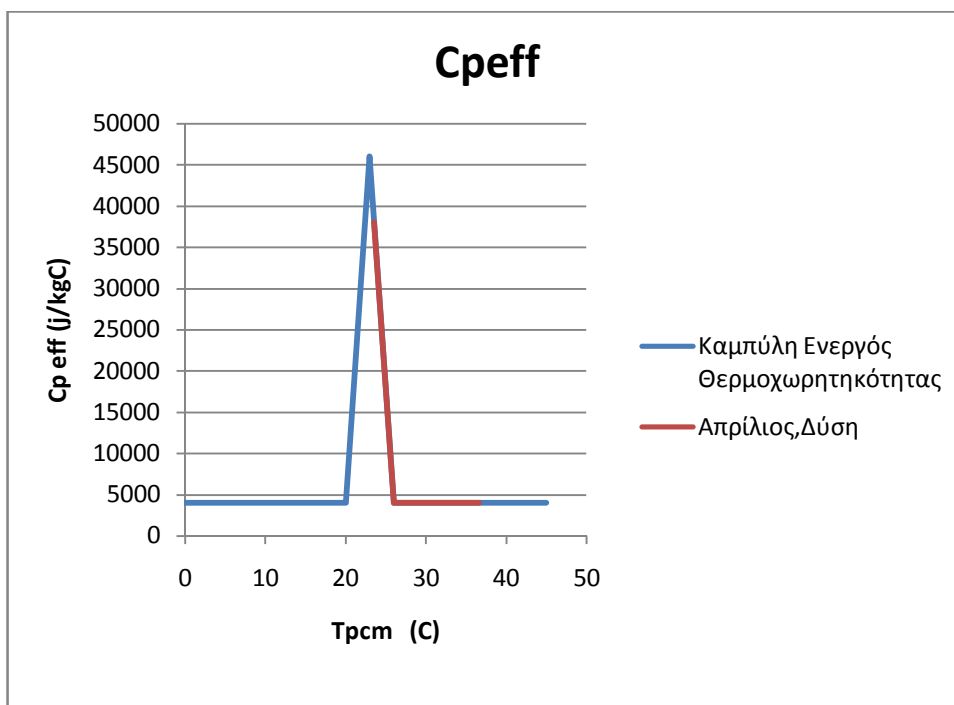


Σχήμα 5.3.3.12: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Μάρτιο το 24ωρο σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό.

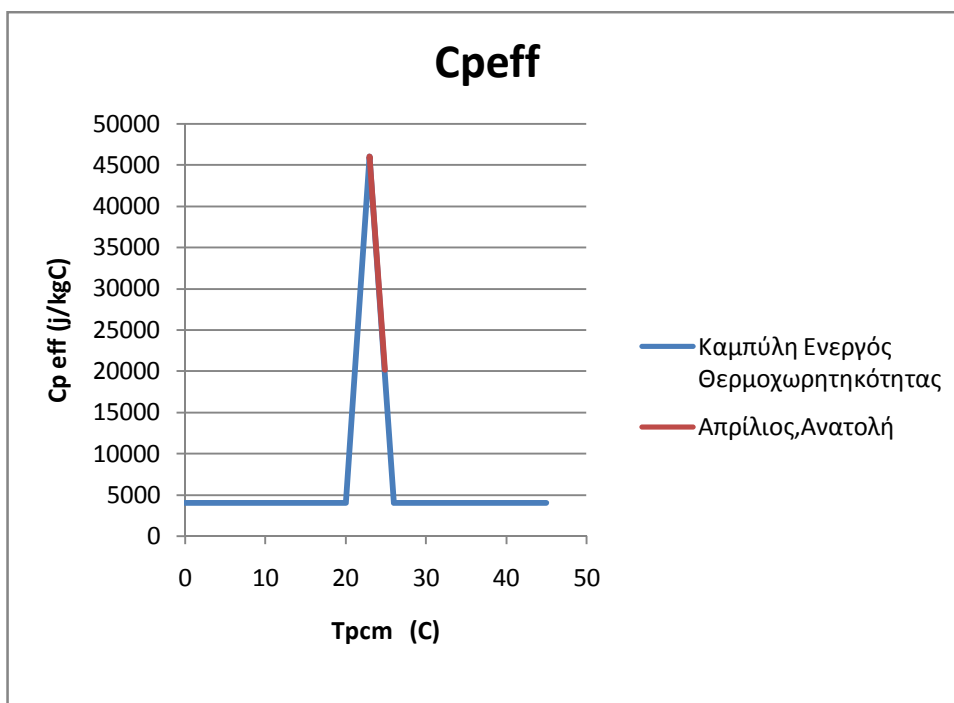
❖ Για την 21<sup>η</sup> Απριλίου:



Σχήμα 5.3.3.13: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Απρίλιο το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

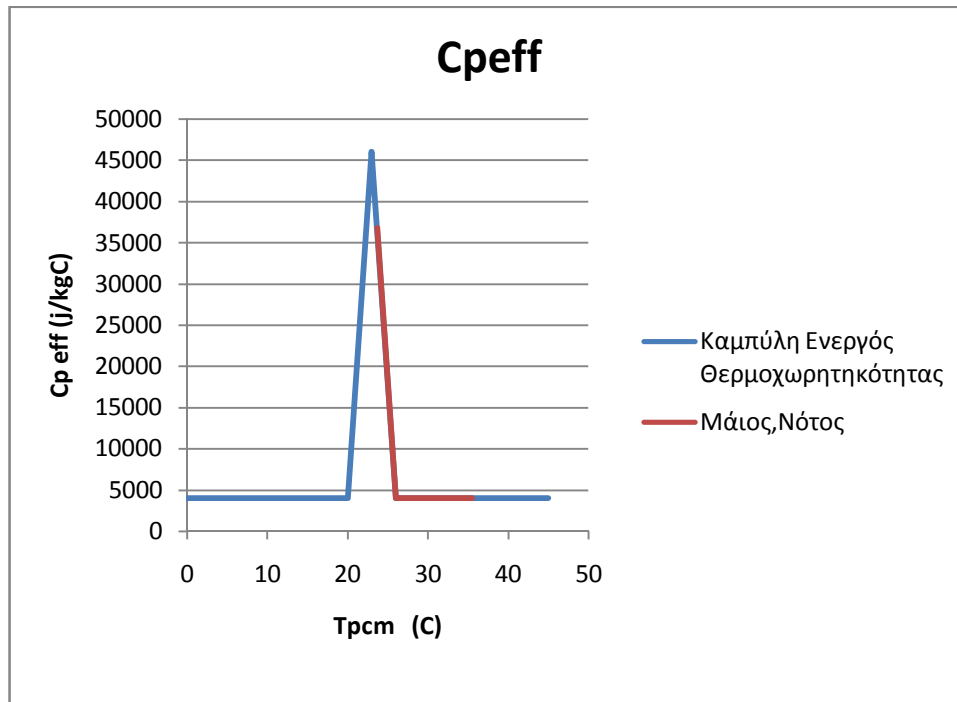


Σχήμα 5.3.3.14: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Απρίλιο το 24ωρο σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό.

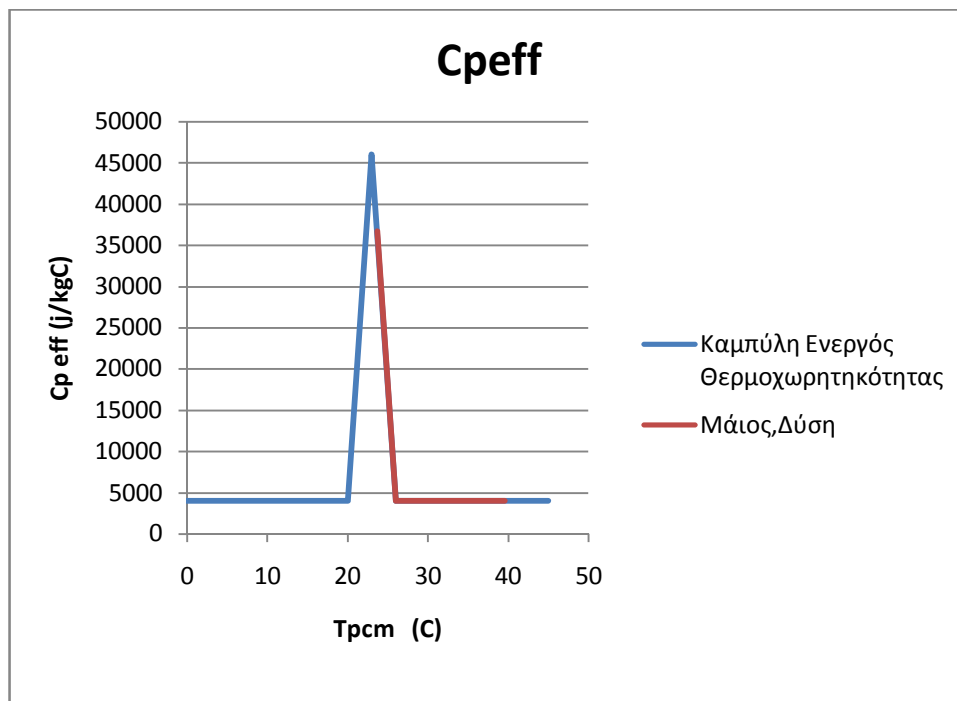


Σχήμα 5.3.3.15: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Απρίλιο το 24ωρο σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό.

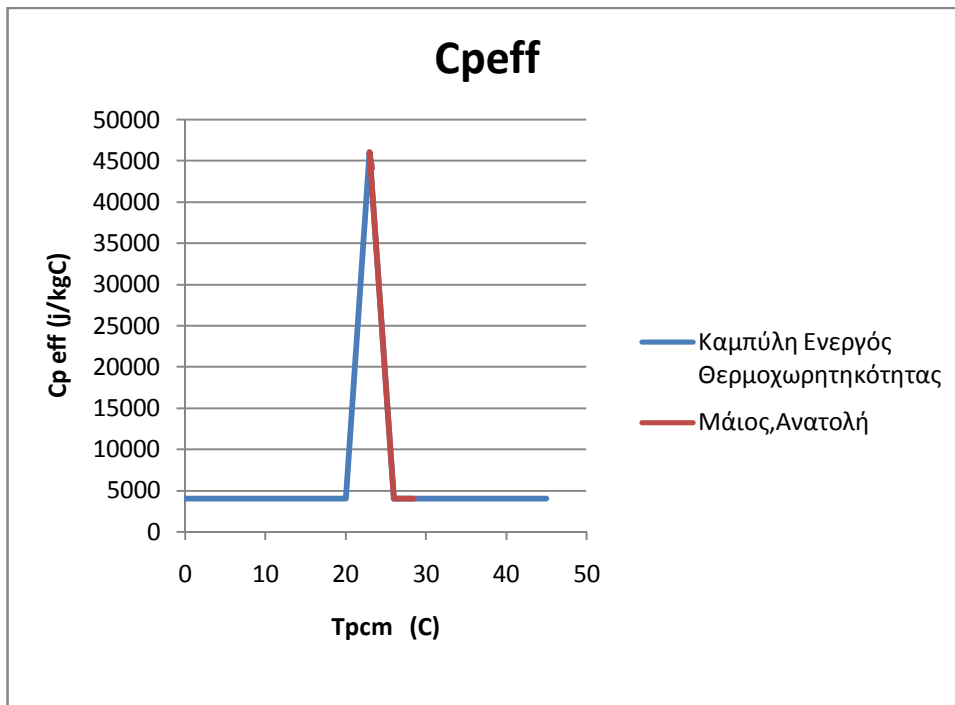
❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαΐου :



Σχήμα 5.3.3.16 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Μάιο το 24ωρο σε τείχο με νότιο προσανατολισμό.

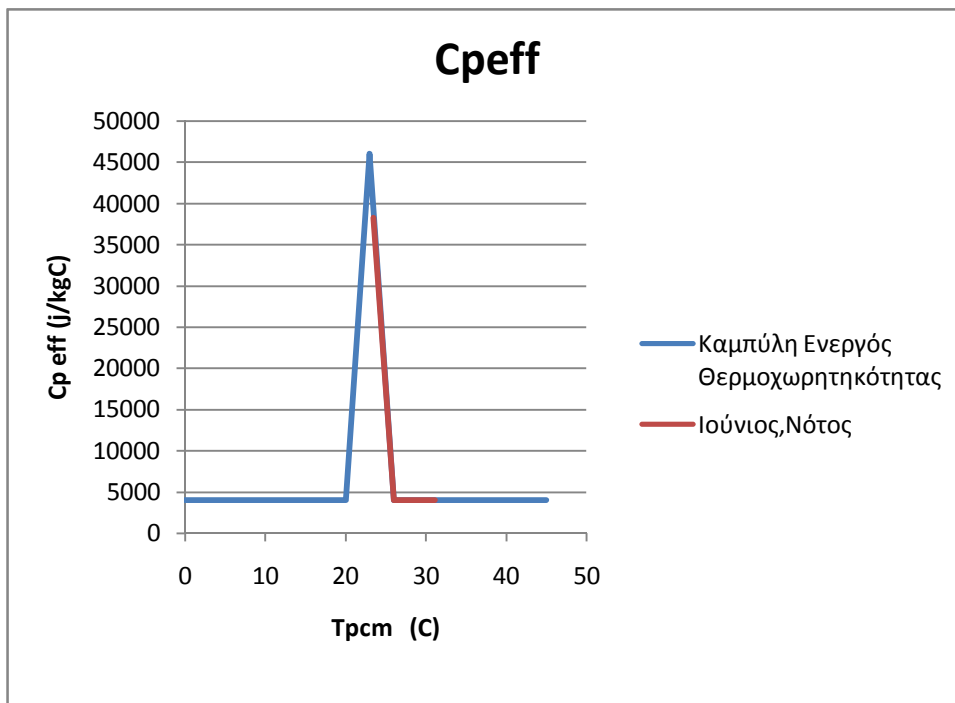


Σχήμα 5.3.3.17: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Μάιο το 24ωρο σε τείχο με δυτικό προσανατολισμό.

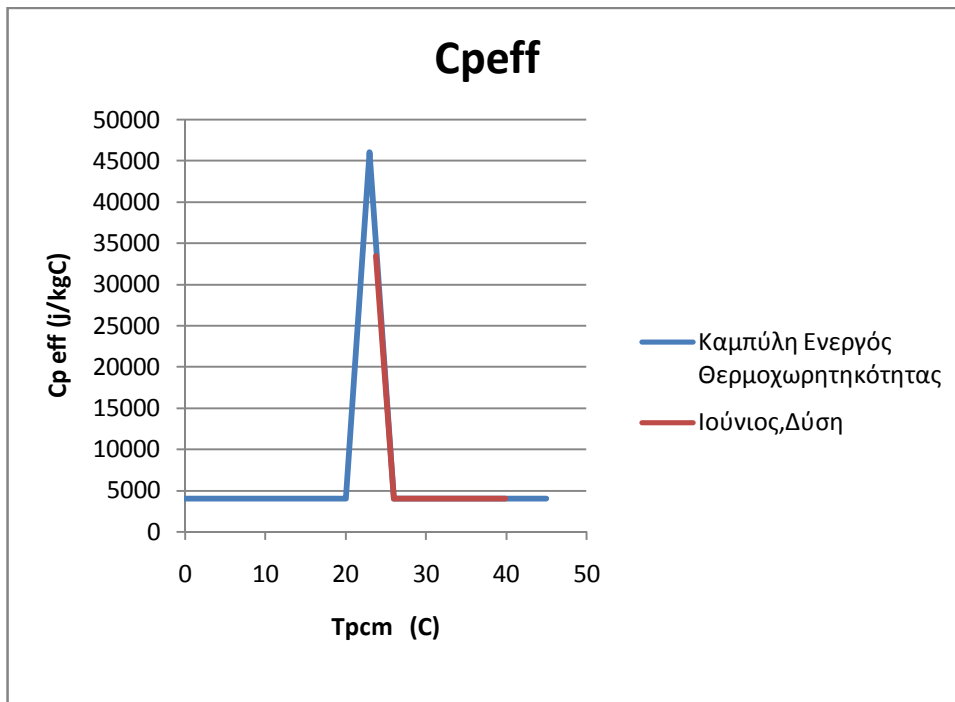


Σχήμα 5.3.3.18: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Μάιο το 24ωρο σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό.

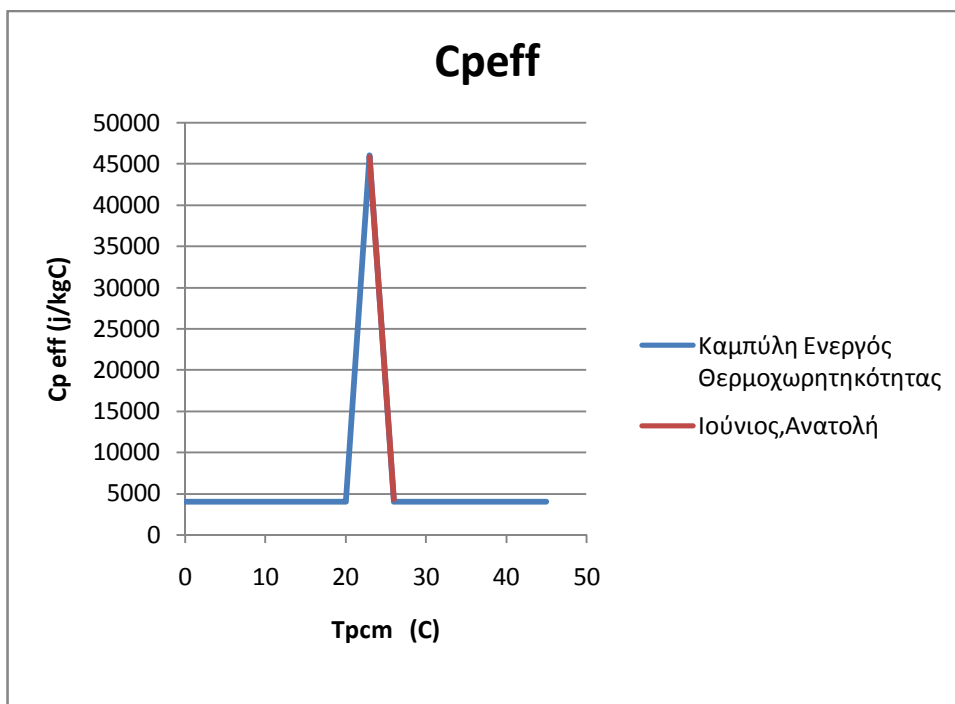
❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου :



Σχήμα 5.3.3.19: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Ιούνιο το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

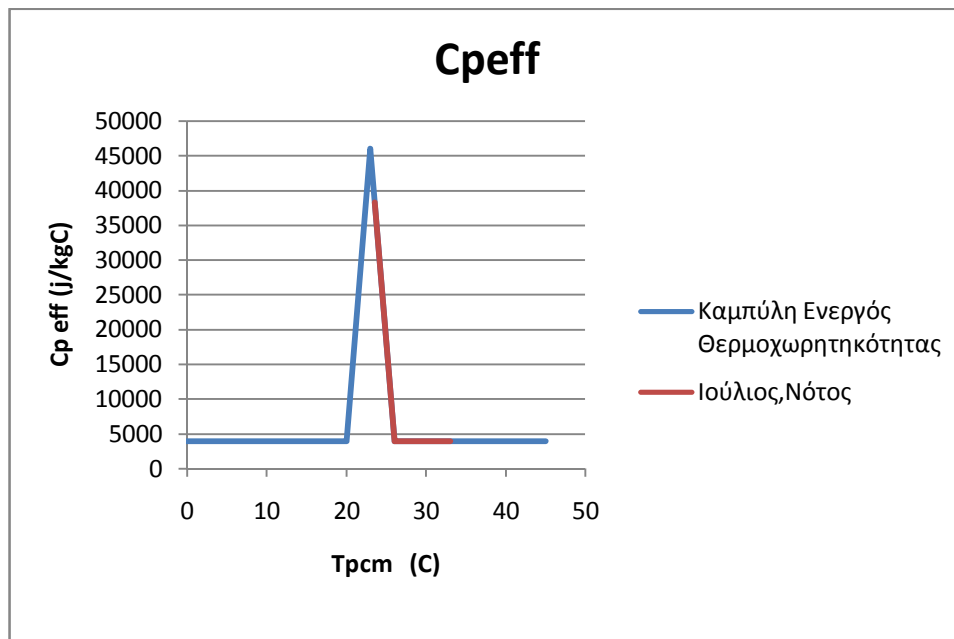


Σχήμα 5.3.3.20: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Ιούνιο το 24ωρο σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό.

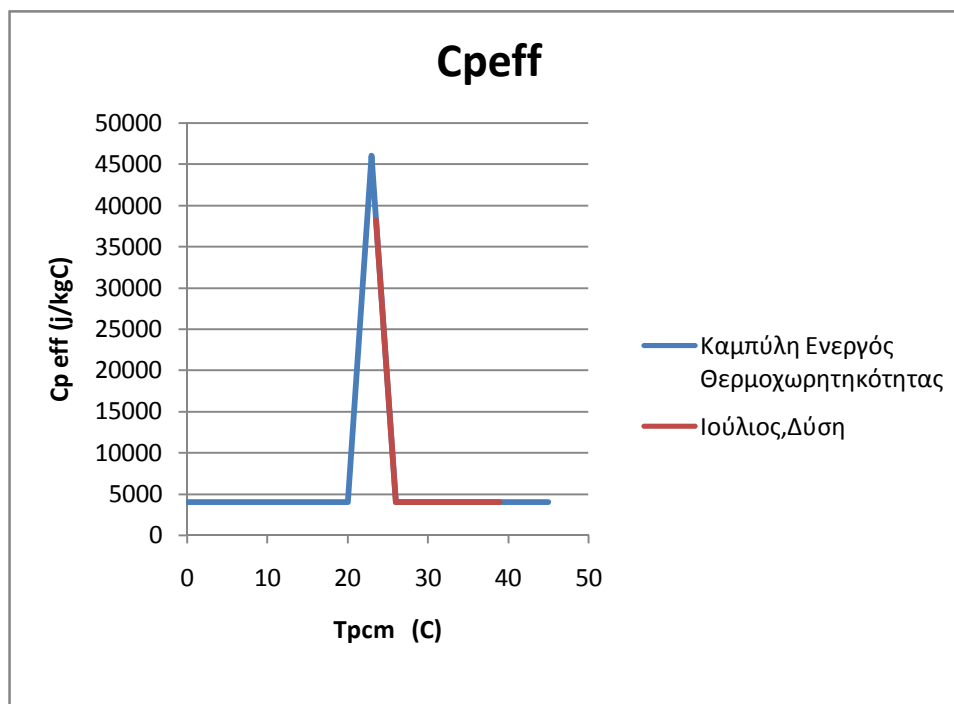


Σχήμα 5.3.3.21: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Ιούνιο το 24ωρο σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό.

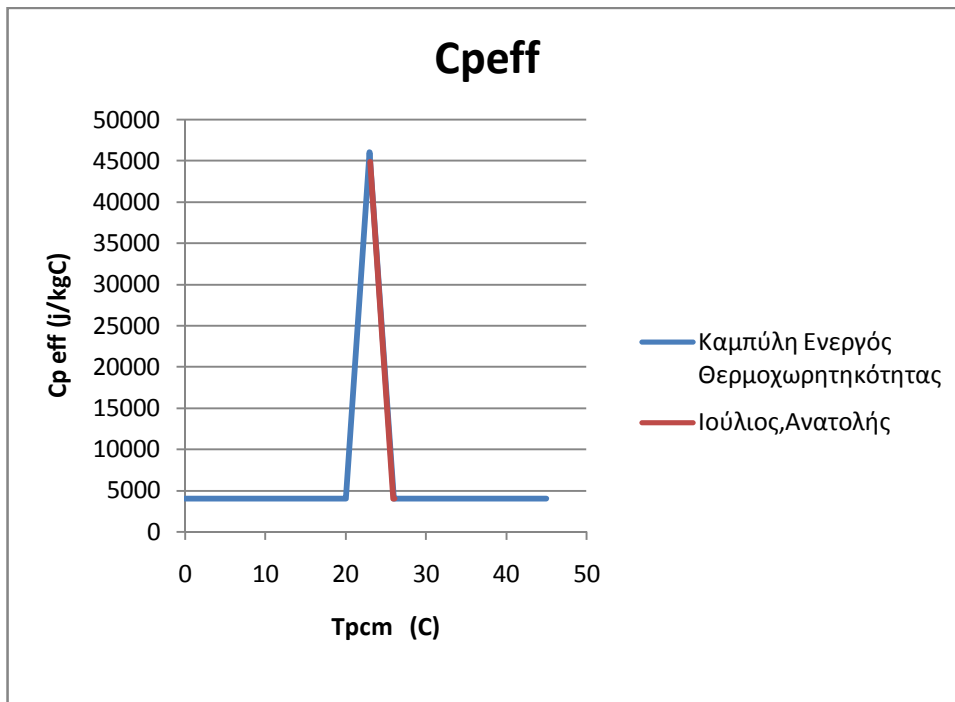
❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου :



Σχήμα5.3.3.22: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Ιούλιο Ιανουάριο το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

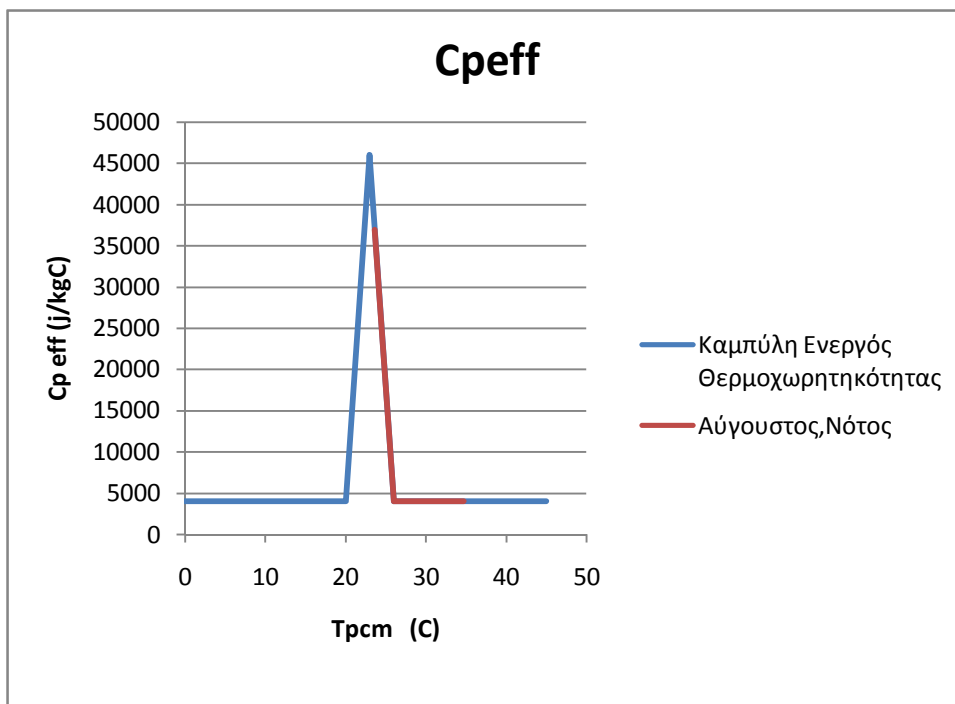


Σχήμα5.3.3.23: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Ιούλιο το 24ωρο σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό.

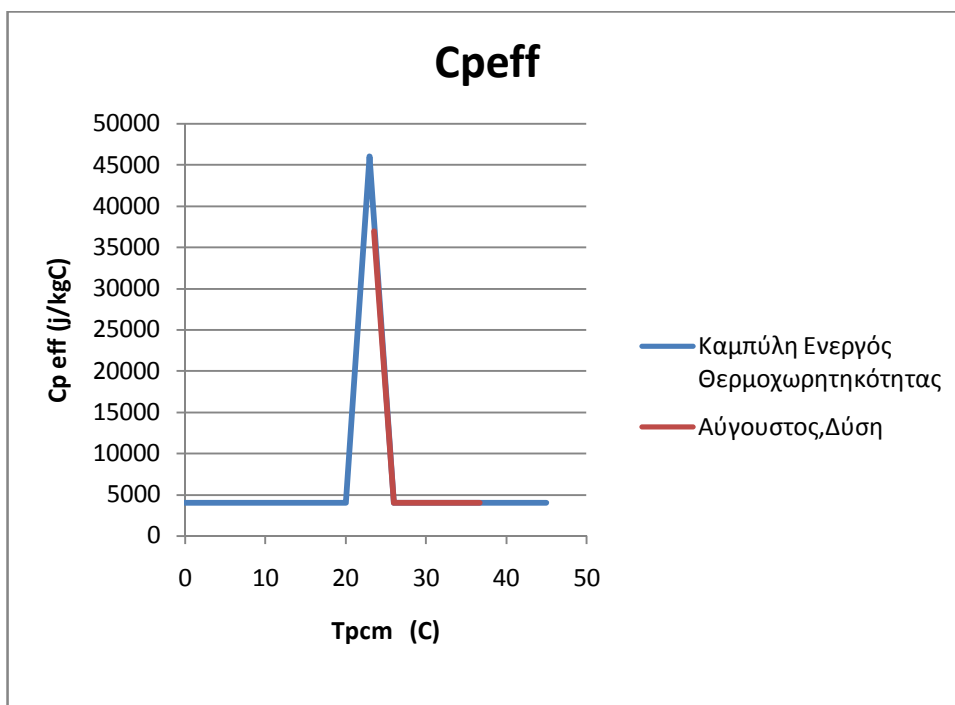


Σχήμα5.3.3.24: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Ιούλιο Ιανουάριο το 24ωρο σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό.

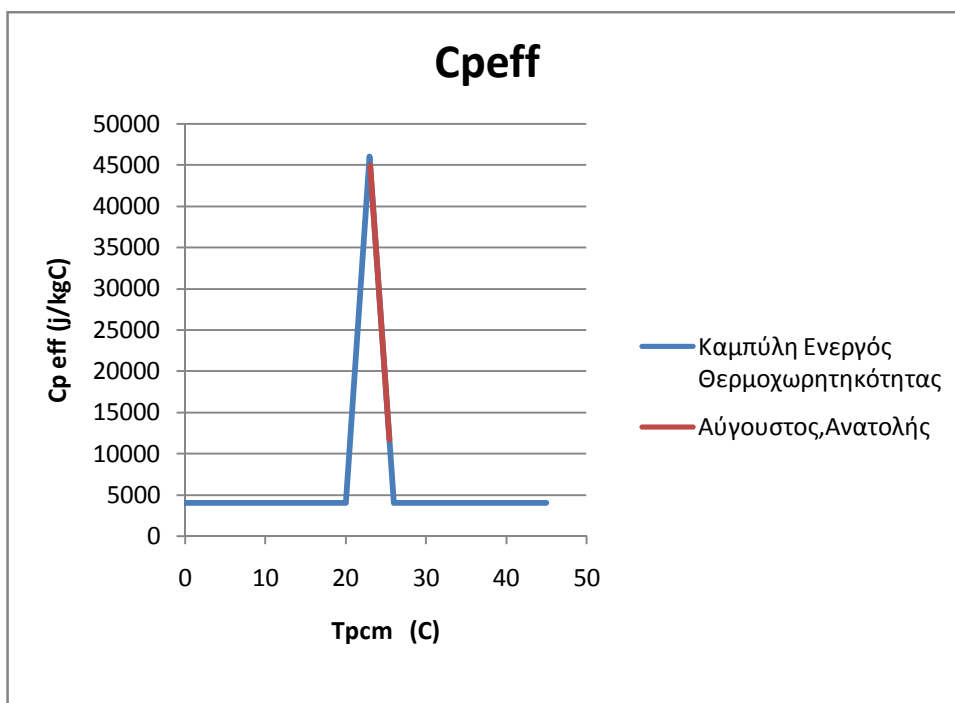
❖ Για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου:



Σχήμα5.3.3.25: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Αύγουστο το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.



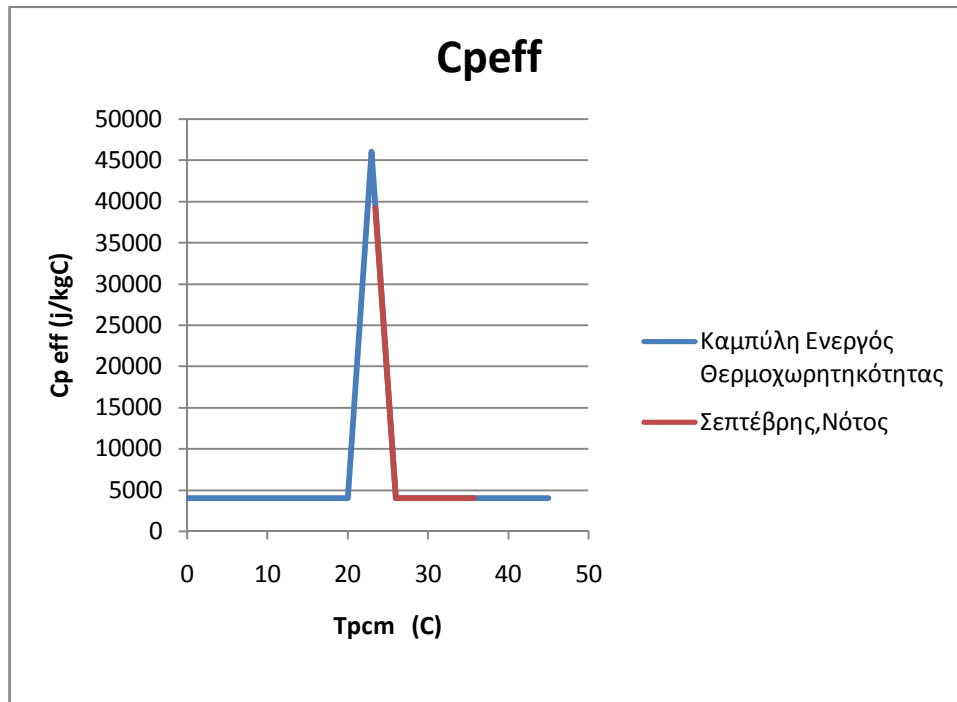
Σχήμα5.3.3.26: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Αύγουστο το 24ωρο σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό.



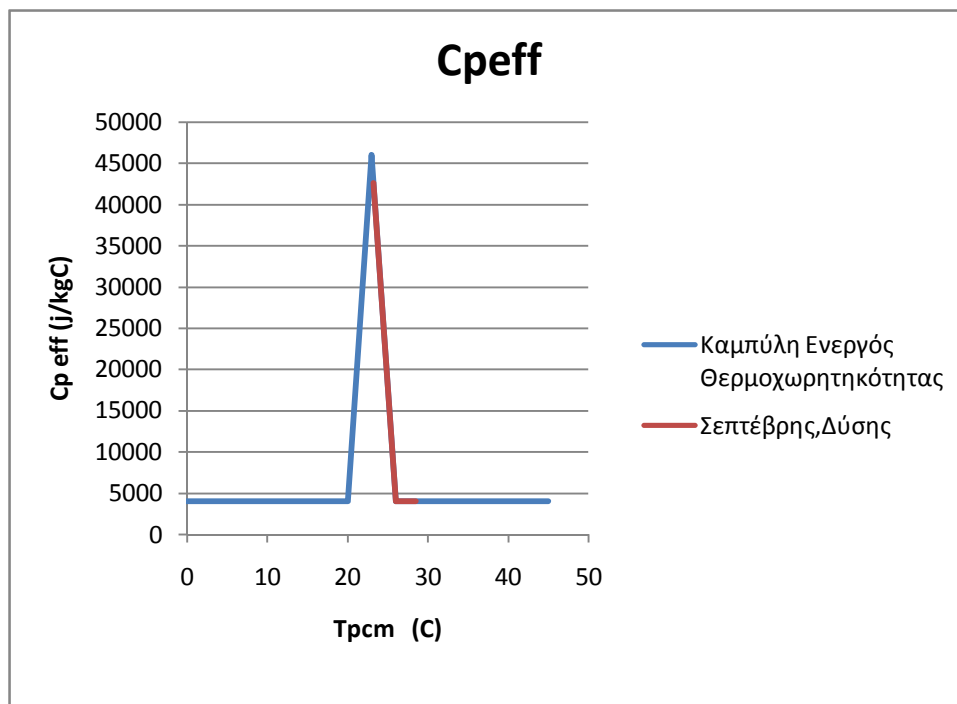
Σχήμα5.3.3.27: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Αύγουστο το 24ωρο σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό.



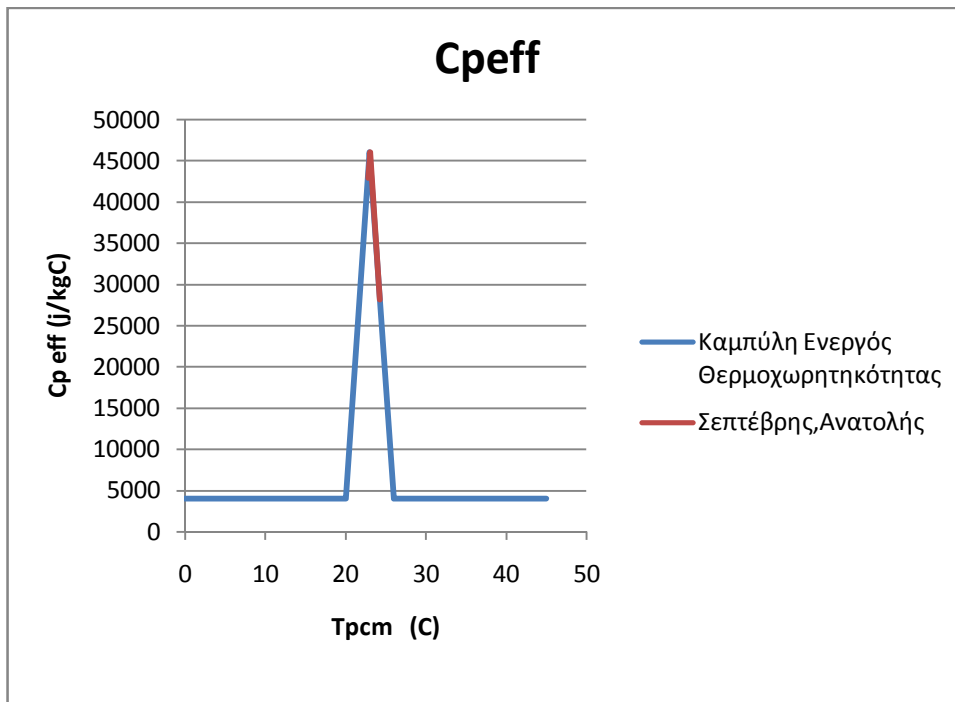
❖ Για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρη:



Σχήμα5.3.3.28: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Σεπτέμβρη το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

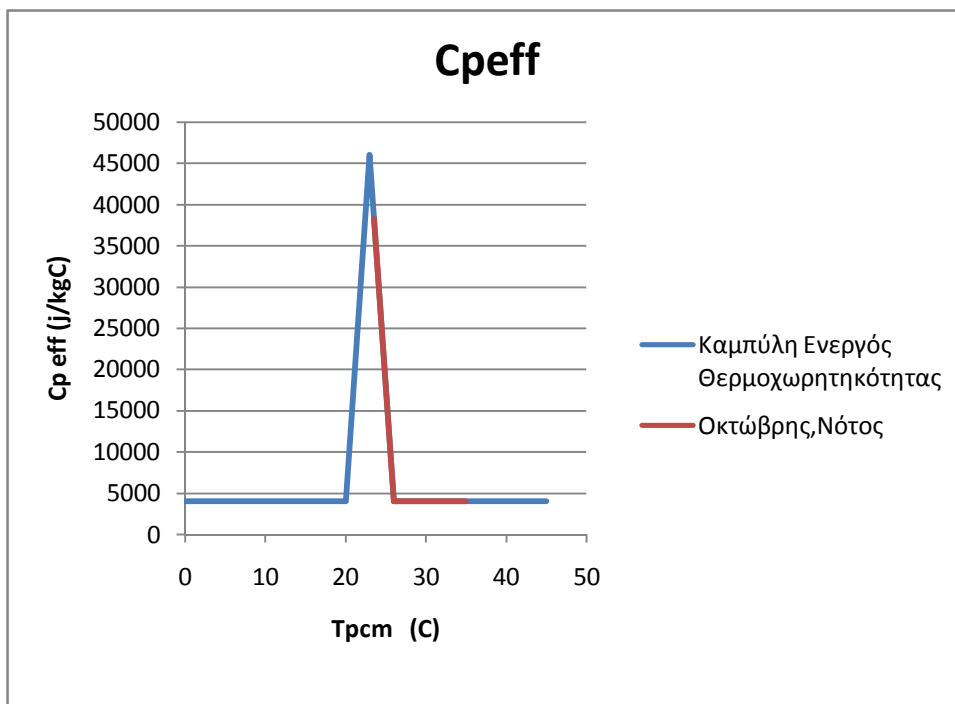


Σχήμα5.3.3.29: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Σεπτέμβρη το 24ωρο σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό.

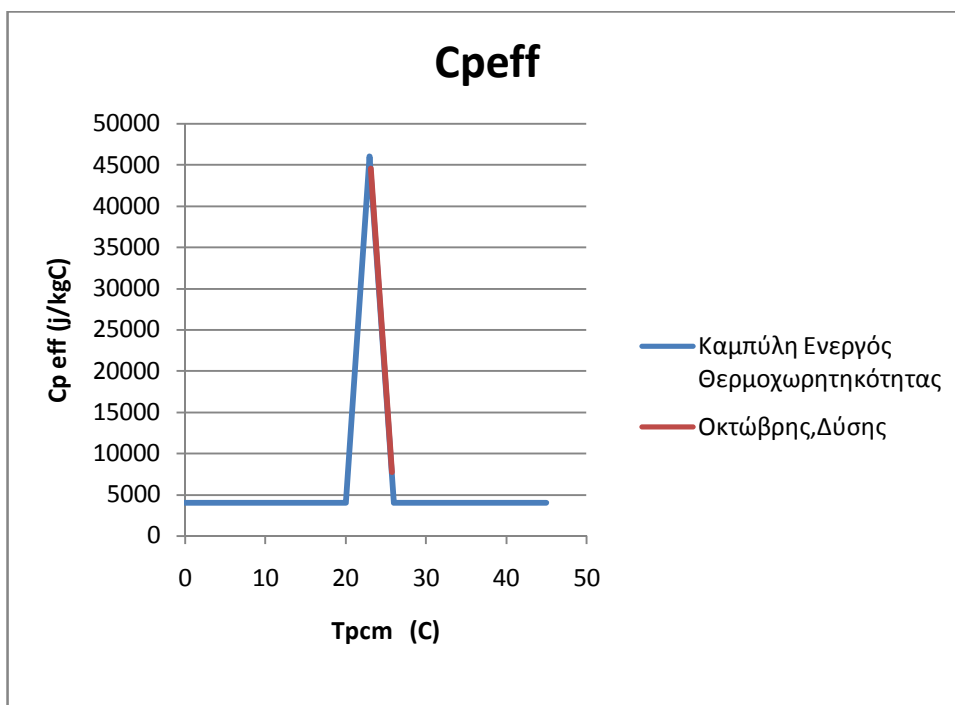


Σχήμα5.3.3.30: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Σεπτέμβρη το 24ωρο σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό.

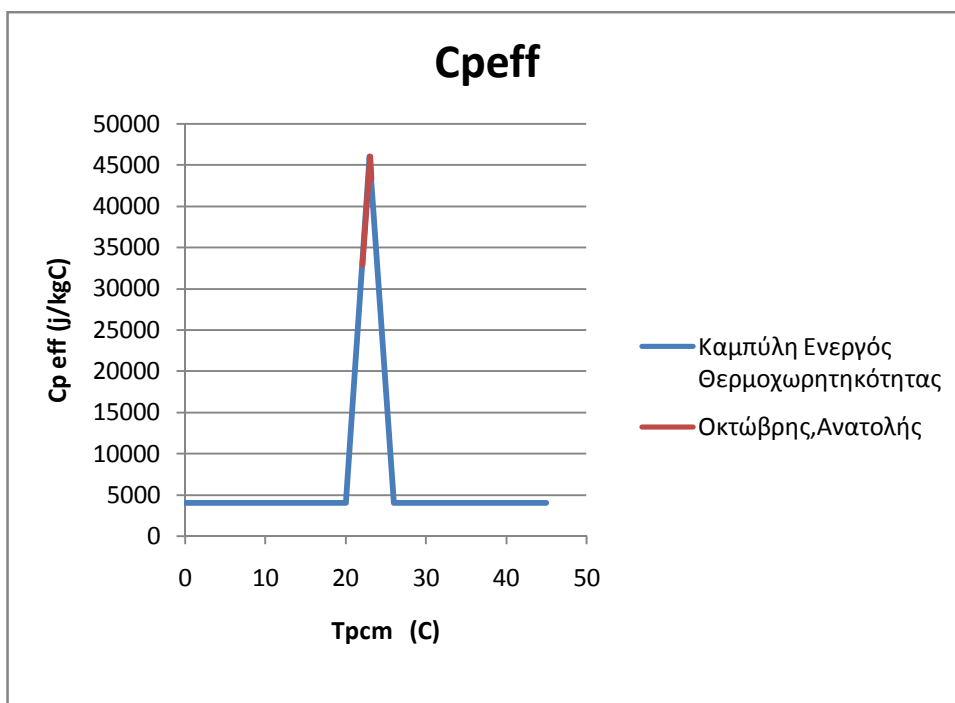
❖ Για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη:



Σχήμα5.3.3.31: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Οκτώβρη το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

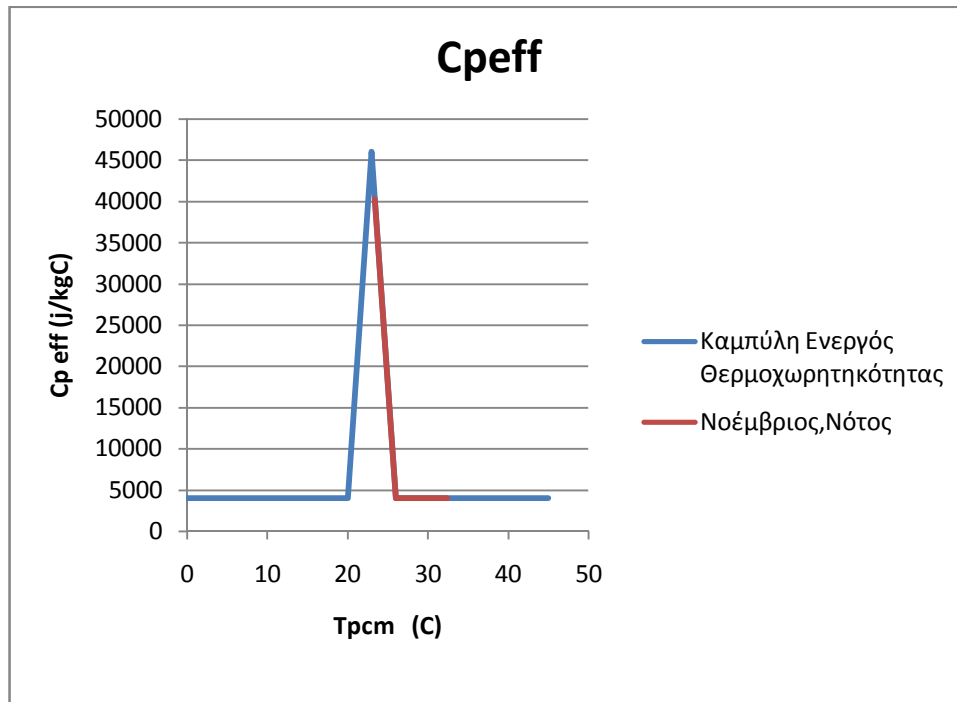


Σχήμα5.3.3.32: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Οκτώβρη το 24ωρο σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό.

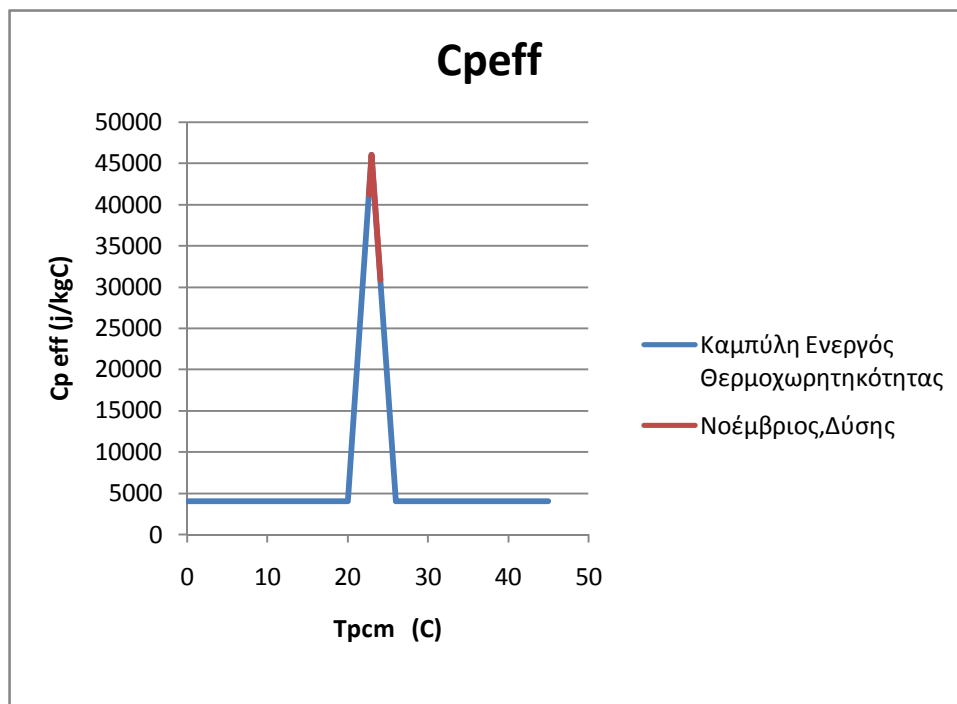


Σχήμα5.3.3.33: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον Οκτώβρη Ιανουάριο το 24ωρο σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό.

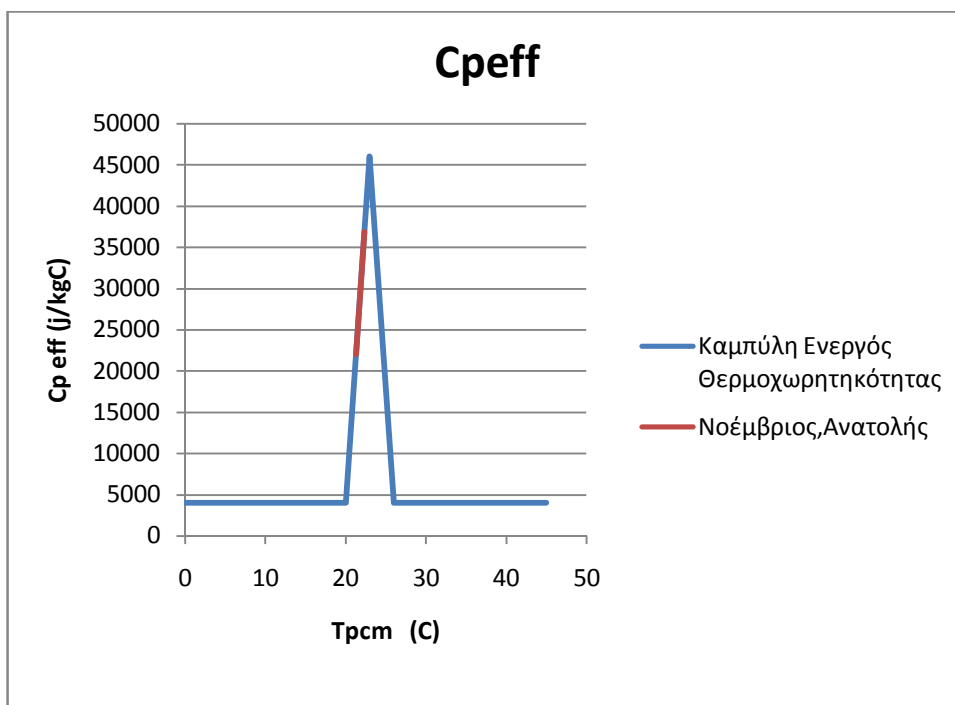
❖ Για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη:



Σχήμα5.3.3.34: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Νοέμβρη το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

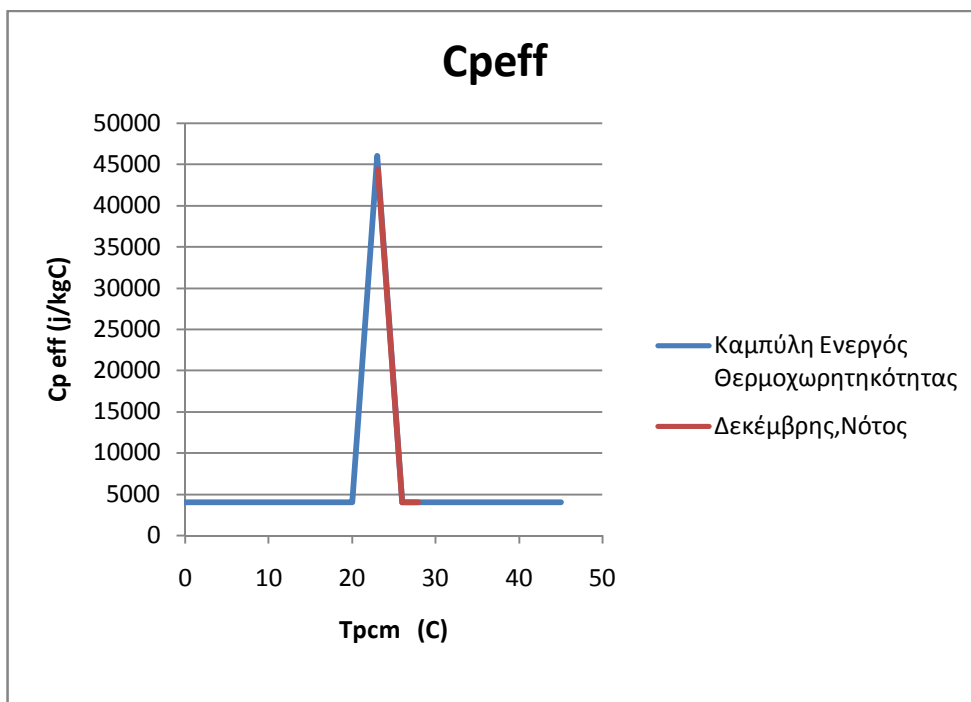


Σχήμα5.3.3.35: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Νοέμβρη το 24ωρο σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό.

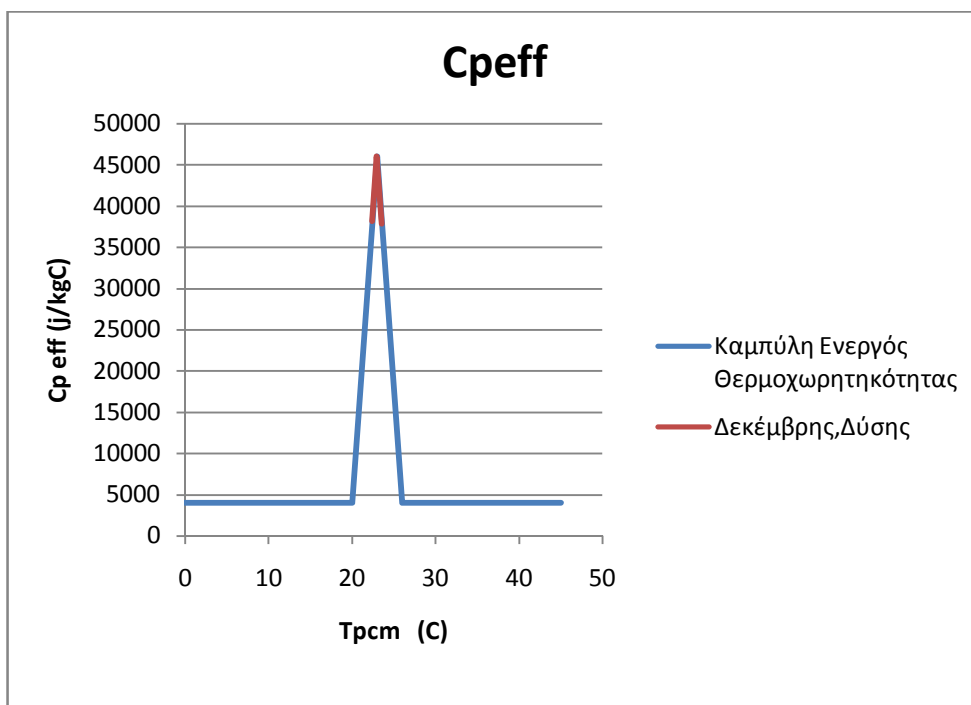


Σχήμα5.3.3.36: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Νοέμβρη το 24ωρο σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό.

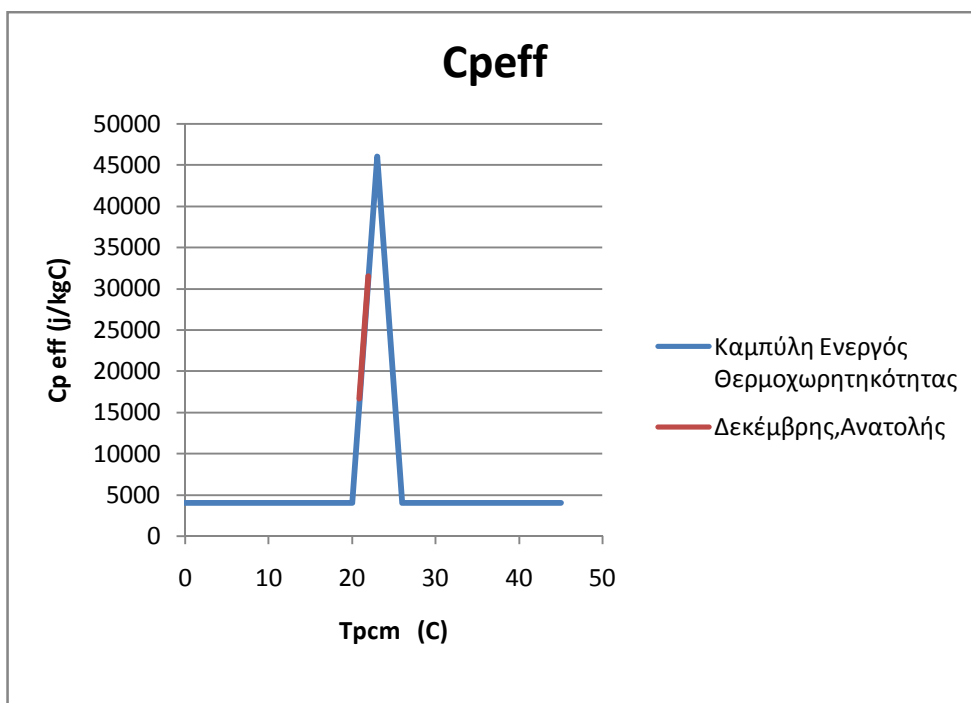
❖ Για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη:



Σχήμα5.3.3.37: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Δεκέμβρη το 24ωρο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό.



Σχήμα5.3.3.38: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Δεκέμβρη το 24ωρο σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό.



Σχήμα5.3.3.39: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για το Δεκέμβρη το 24ωρο σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό.

Για να αποδώσει το υλικό αλλαγής φάσης το 100% της ενέργειας που μπορεί να προσφέρει πρέπει σε αυτό να αναπτύσσονται τέτοιες θερμοκρασίες ώστε να καλύπτεται όλο το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του. Πολλές έρευνες και μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για την εύρεση PCM με ιδιότητες τέτοιες ώστε να εκμεταλλεύεται πλήρως όλη τη λανθάνουσα θερμοκρασία του ,ώμος χωρίς επιτυχία. Βέβαια έχουν βρεθεί PCM που έχουν πλησιάσει πολύ κοντά στο στόχο και εκμεταλλεύονται μεγάλο ποσοστό της λανθάνουσας θερμοκρασίας τους.

Όσον αφορά το PCM που χρησιμοποιούμε στην προσομοίωσή μας από τα σχήματα (5.3.3.4) έως (5.3.3.39) συμπεραίνουμε ότι έχει καλή απόδοση και καλύπτει μεγάλο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης του κυρίως όταν τοποθετείται σε νότιο και δυτικό προσανατολισμό και λιγότερο σε ανατολικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό η ηλιακή ακτινοβολία είναι τις πρωινές ώρες όπου η ατμόσφαιρα έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε υδρατμούς άρα η ένταση της ακτινοβολίας είναι περιορισμένη. Βέβαια παρατηρούμε ότι σε όλους τους προσανατολισμούς χρησιμοποιεί την ιδιότητα του να αποθηκεύει ενέργεια αλλάζοντας φάση αφού όπως προαναφέραμε σε όλες τις περιπτώσεις άλλες λίγο και άλλες περισσότερο καλύπτει μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης του.

Τους καλοκαιρινούς μήνες το υλικό αλλαγής φάσης τις ώρες αιχμής απορροφά την ακτινοβολία του ήλιου επιτυγχάνοντας μικρότερες σε μέτρο θερμοκρασίες στην αίθουσα από το αναμενόμενο. Λόγω της αρκετά υψηλής εξωτερικής θερμοκρασίας είναι δύσκολο να επιτευχθούν συνθήκες θερμικής άνεσης με την χρήση μόνο του PCM τους θερινούς μήνες για το λόγω αυτό προτείνεται χρήση κάποιου κλιματιστικού ή κάποιου άλλου τρόπου δροσισμού. Για την βελτίωση του συστήματος και την επίτευξη μειωμένης χρήσης άλλων πηγών ενέργειας προτείνεται οι δύο παρακάτω λύσεις.

- Αρχικά η εγκατάσταση μιας εξωτερικής συσκευής σκίασης η οποία να ενεργοποιείται αυτόματα σε ζεστές ημέρες είναι ένας πολύ απλός και λειτουργικός τρόπος δροσισμού. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται να υπερφορτωθεί η χωρητικότητα αποθήκευσης του υλικού αλλαγής φάσης έτσι επιτυγχάνεται η χρήση της ιδιότητας να αλλάζει φάση και να μην παραμένει μονίμως λόγω της υπερφόρτωσης του στην υγρή.

- Άλλον έναν τρόπο που θα μπορούσαμε να προτείνουμε είναι η ενσωμάτωση σωλήνων και ανεμιστήρων ώστε την μέρα το υλικό να απορροφά την ακτινοβολία ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση της αίθουσας ενώ το βραδύ όταν απελευθερώνεται η αποθηκευμένη θερμότητα να απομακρύνεται με την χρήση των ανεμιστήρων μέσω των σωλήνων εξωτερικά της αίθουσας.

### 5.3.4 Ανάγκες συμπληρωματικής ισχύς

Το υλικό αλλαγής φάσης μας κάθε ώρα δίνει κάποιο ποσό ενέργειας στο περιβάλλον και συγκεκριμένα στην δίκη μας μελέτη στην αίθουσα. Οι απαιτήσεις τις αίθουσας σε ισχύ δεν γνωρίζουμε αν καλύπτονται πλήρως από την ισχύ που της προσφέρει κάθε φορά το PCM η χρειάζεται και κάποια άλλη πηγή που να της προσφέρει την απαιτούμενη συμπληρωματική ισχύει ώστε να επικρατούν συνθήκες θερμικής άνεσης . Η συμπληρωματική αυτή ισχύ μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές σώματα καλοριφέρ , air-condition κ.λ.π.

Στη συνέχεια, θεωρώντας (για μια πρότυπη προσέγγιση) τις απώλειες στην αίθουσα προς μελέτη σταθερές ,ακολουθεί μια μελέτη για το ποσό της συμπληρωματικής ισχύς που χρειάζεται η αίθουσα για θέρμανση για την 21<sup>η</sup> ημέρα όταν σε τοίχο απέναντι από υαλοπίνακα έχει τοποθετηθεί το προς μελέτη PCM. Η μελέτη έχει πραγματοποιηθεί για τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς του τοίχου.

Ισχύς που δίνει το PCM ανά ώρα:

$$P_{\text{προσφερόμενο}} = UA_w 3600 \left( \frac{T^0 + T^1}{2} - T_{\Pi} \right)$$

Έστω ωριαία απαιτούμενη ισχύ της αίθουσας  $P_{\text{απαιτ}} = 15 \text{ W/m}^2$

Το εμβαδόν της αίθουσας είναι  $100 \text{ m}^2$

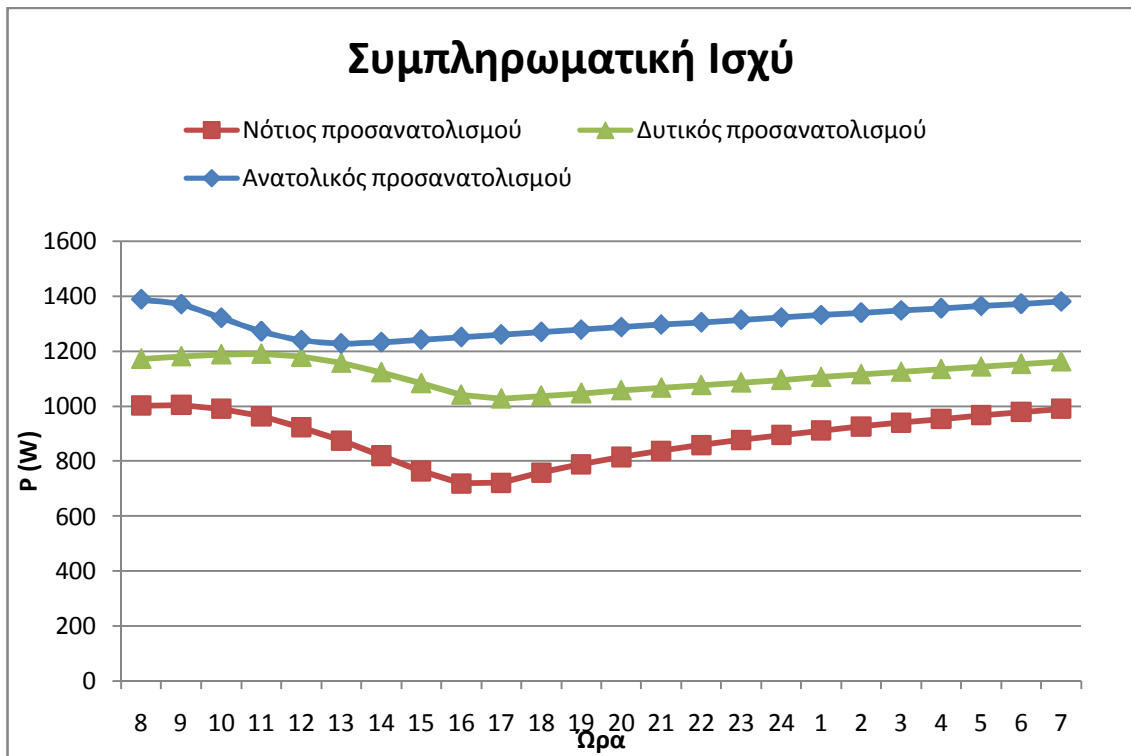
Άρα η συνολική απαιτούμενη ισχύς ανέρχεται στις :  $P_{\text{απαιτ}} = 1500 \text{ W}$

Η απαιτούμενη συμπληρωματική ισχύ βρίσκεται από τη σχέση :

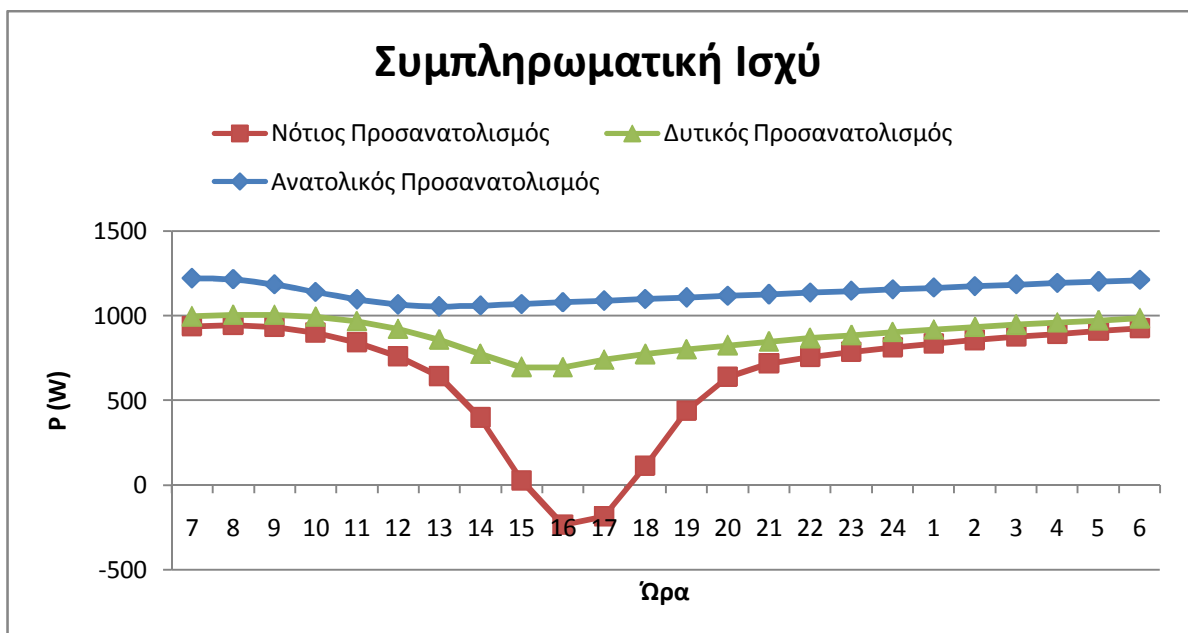
$$P_{\text{συμπλ}} = P_{\text{απαιτ}} - P_{\text{προσφερόμενο}}$$

Η μελέτη έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται σε πίνακες ανάλογα με το μήνα μελέτης και τον προσανατολισμό του τοίχου.





Σχήμα 5.3.4.1 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου σε τοίχο με νότιο, με δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό.



Σχήμα 5.3.4.2 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου σε τοίχο με νότιο, με δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η επιπλέον ισχύς που χρειάζεται η αίθουσα τις μεσημεριανές ώρες για τοίχο με νότιο

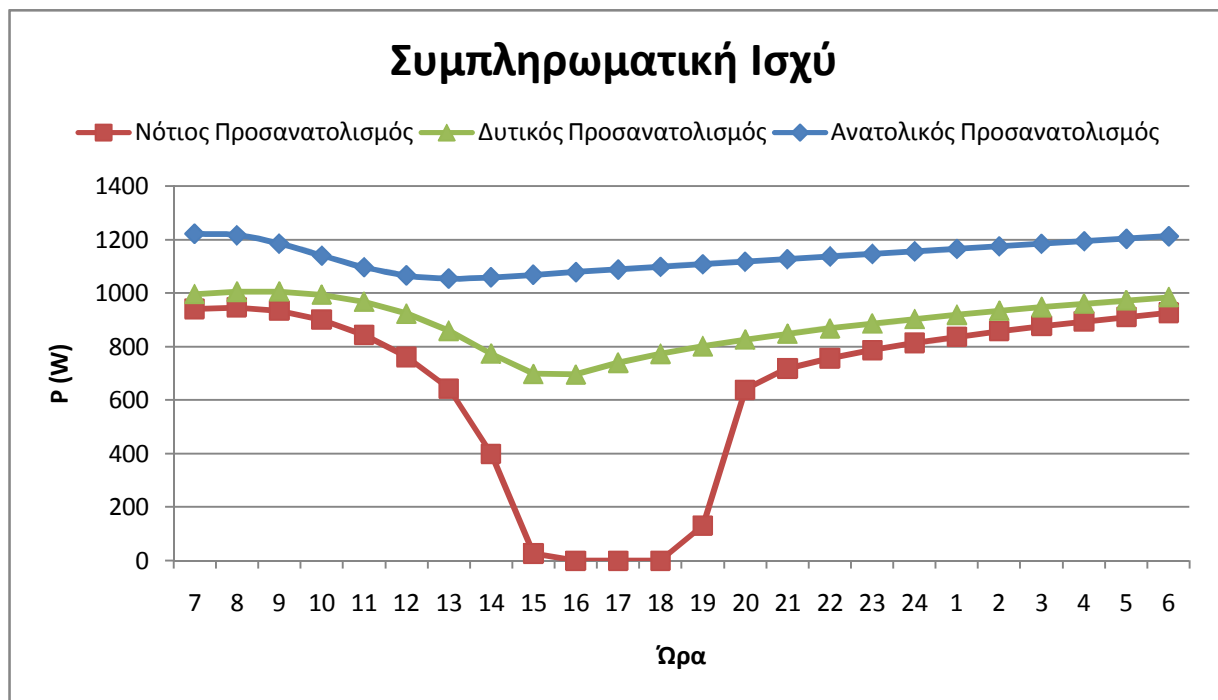
προσανατολισμό παίρνει αρνητικές τιμές ,αυτό σημαίνει ότι το υλικό αλλαγής φάσης δίνει περισσότερη ισχύ από τις ανάγκες της αίθουσας. Η επιπλέον αυτή ισχύ μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί αργότερα τις ώρες όπου η ισχύς του PCM δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας και κατά συνέπεια μείωση της χρήσης και της σπατάλη ισχύς από άλλες πηγές οι οποίες μας επιβαρύνουν οικονομικά . Την παραπανήσια ισχύς την αποθηκεύουμε λοιπόν και την χρησιμοποιούμε τις αμέσως επόμενες ώρες όπου χρειάζεται άλλη πηγή ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών. Για παράδειγμα βλέπουμε ότι στις 16:00 και στις 17:00 η ώρα η ισχύς που δίνει το PCM είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη ,την περίσσεια αυτή ισχύ την χρησιμοποιούμε στις 18:00 η ώρα ώστε να μειώσουμε την ισχύ που παίρνει από άλλη πηγή , όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Η διαδικασία αυτή θα γίνεται σε όλες τις περιπτώσεις όπου υπάρχει περίσσεια ισχύ από το PCM και στα διαγράμματα θα εμφανίζεται κατευθείαν η συμπληρωματική ισχύ που απαιτείται μετά την αποθήκευση και χρήση της επιπλέον ισχύς του PCM στις επόμενες ώρες.

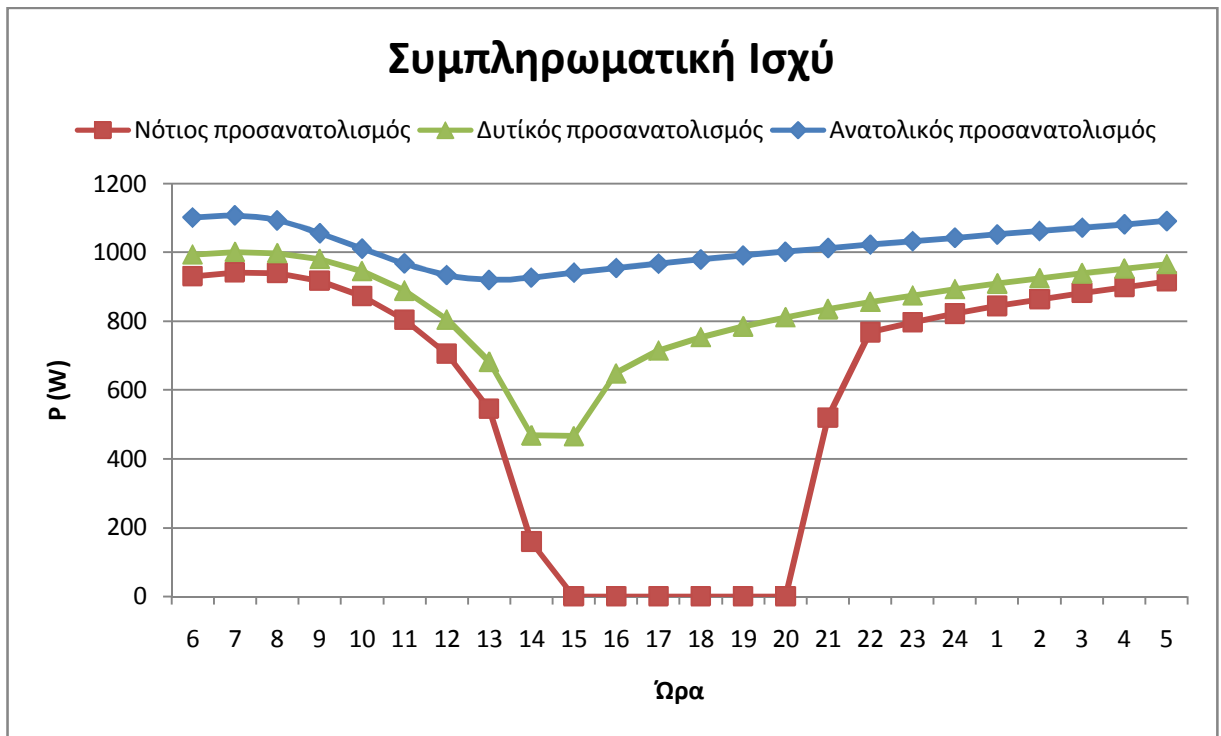
Πίνακας 5.3.4.1 Συμπληρωματική ισχύ για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου για τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

Ώρα	Ppcm	Ραπαιτούμενη	Ρσυμπληρωματικό= Ραπαιτ- Ppcm	Ρσυμπληρωματικό με αποθήκευση της επιπλέον ισχύς
7	560,3115	1500	939,6885	939,6885
8	554,452	1500	945,548	945,548
9	566,6782	1500	933,3218	933,3218
10	600,4244	1500	899,5756	899,5756
11	657,1948	1500	842,8052	842,8052
12	739,4345	1500	760,5655	760,5655
13	856,9811	1500	643,0189	643,0189
14	1101,052	1500	398,9478	398,9478
15	1472,624	1500	27,3763	27,3763
16	1734,188	1500	-234,188	0
17	1685,769	1500	-185,769	0
18	1387,642	1500	112,3582	0
19	1061,022	1500	438,9783	131,38
20	861,7335	1500	638,2665	638,2665
21	782,478	1500	717,522	717,522

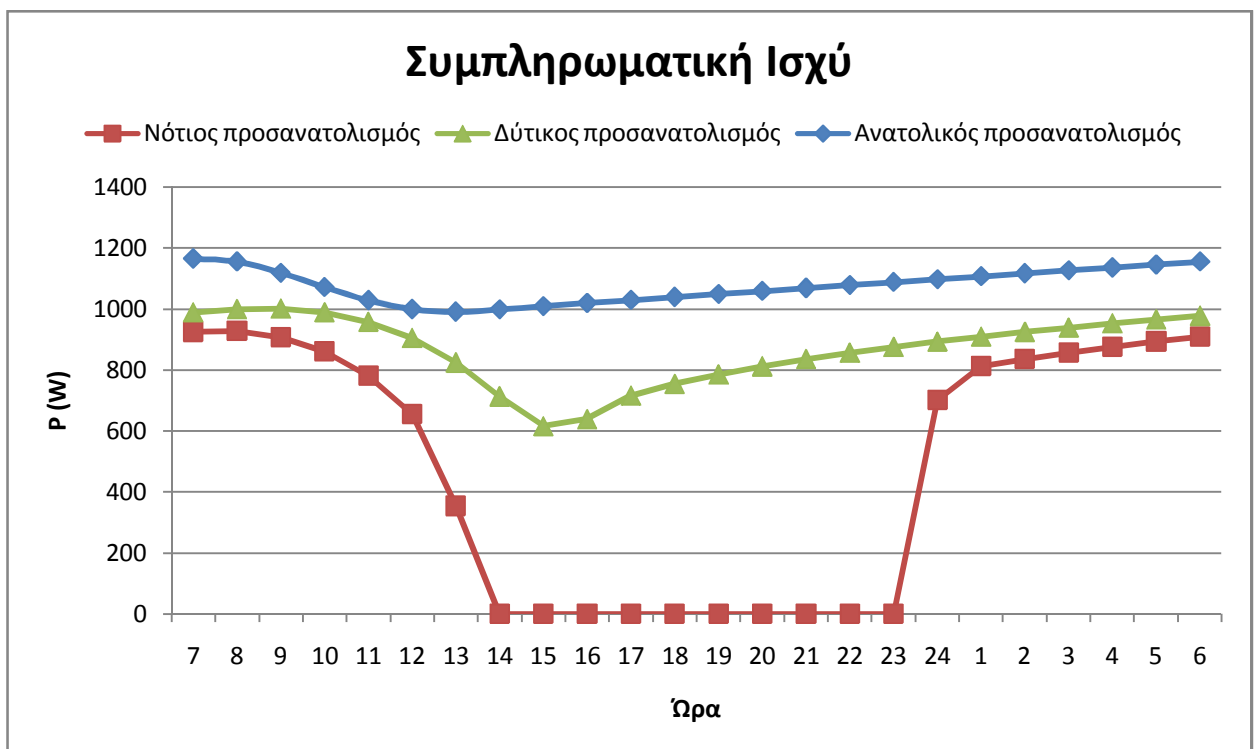
22	744,2223	1500	755,7777	755,7777
23	713,3719	1500	786,6281	786,6281
24	686,9884	1500	813,0116	813,0116
1	663,7137	1500	836,2863	836,2863
2	642,7735	1500	857,2265	857,2265
3	623,6735	1500	876,3265	876,3265
4	606,0736	1500	893,9264	893,9264
5	589,7277	1500	910,2723	910,2723
6	574,4505	1500	925,5495	925,5495



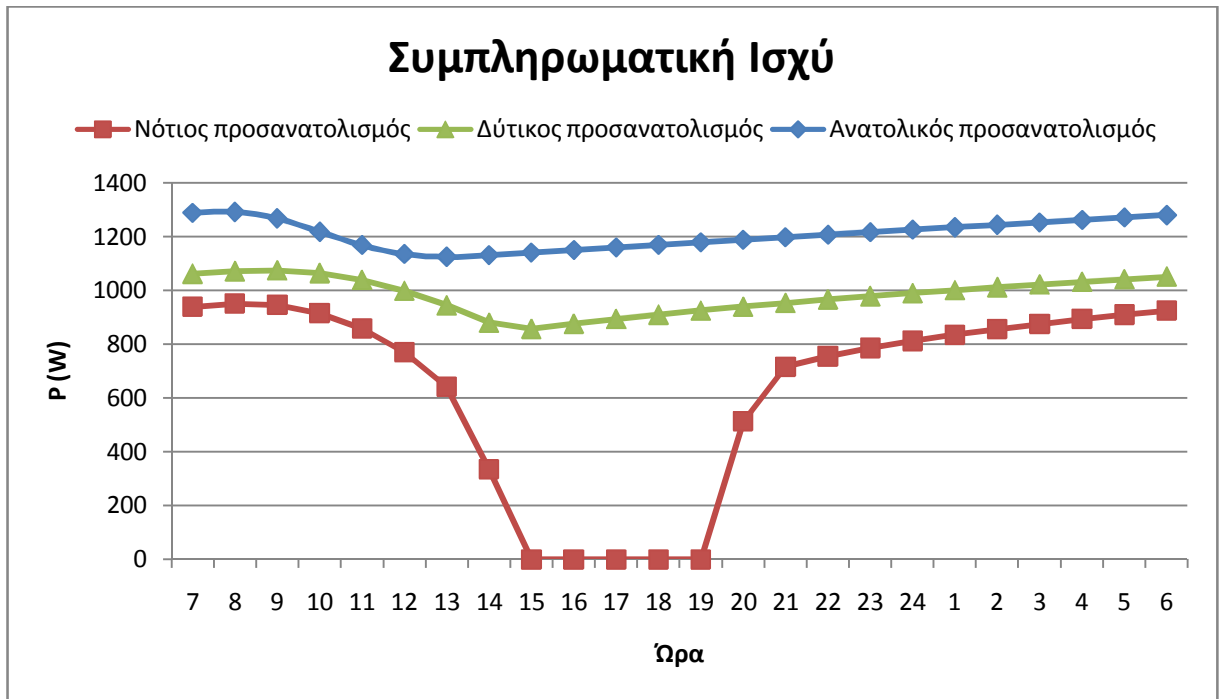
Σχήμα 5.3.4.3 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου σε τοίχο με νότιο, με δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό.



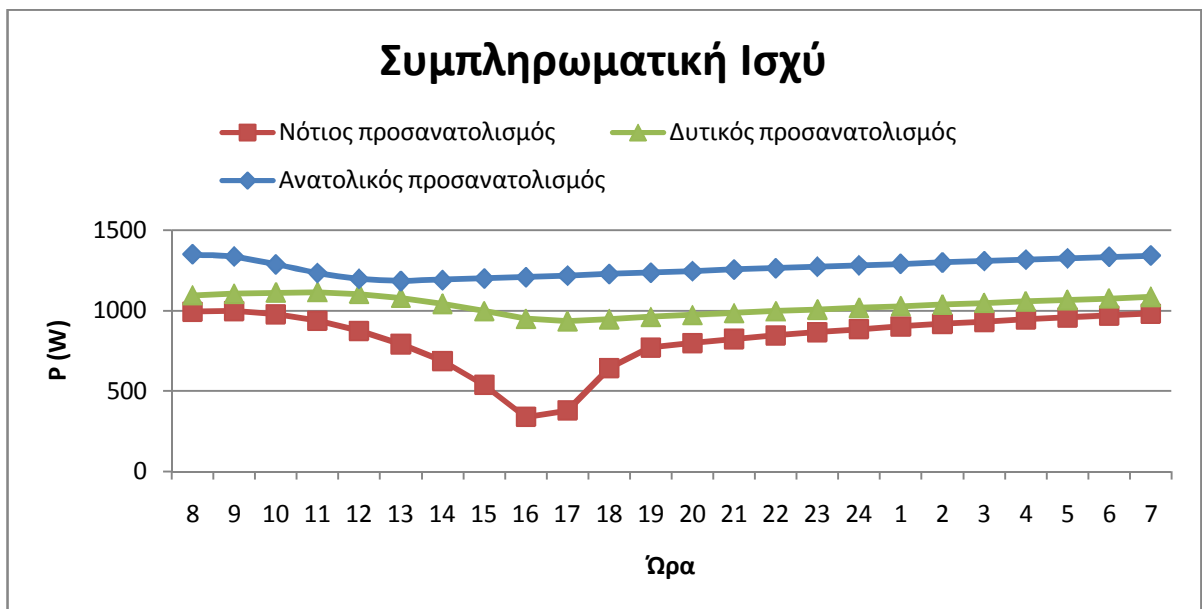
Σχήμα 5.3.4.4 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου σε τοίχο με νότιο, με δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.3.4.5 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη σε τοίχο με νότιο, με δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό.



Σχήμα 5.3.4.6 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη σε τοίχο με νότιο, με δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό.



Σχήμα 5.3.4.7 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη σε τοίχο με νότιο, με δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η συμπληρωματική για θέρμανση υπολογίζεται κάθε φορά μόνο για τους χειμερινούς μήνες καθώς το καλοκαίρι ήδη η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή και δεν υπάρχουν απαιτήσεις για θέρμανση.

Σημαντικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα διαγράμματα είναι αρχικά ότι τους καλοκαιρινούς μήνες το PCM δίνει περισσότερη ισχύ άρα χρειαζόμαστε λιγότερη ενέργεια από εξωτερικούς παράγοντες, αυτό το συμπέρασμα είναι λογικό καθώς τους καλοκαιρινούς μήνες υπάρχει μεγαλύτερη σε ένταση ακτινοβολία.

Άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι το PCM που βρίσκεται σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό ακόμα και την χειμερινή περίοδο δίνει αρκετά μεγάλα ποσά ισχύος σε αντίθεση με τους άλλους δύο προσανατολισμούς όπου τους χειμερινούς μήνες η ένταση της ισχύος είναι χαμηλότερη. Ειδικά το PCM που έχει τοποθετηθεί σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού παρατηρούμε ότι καθ'όλη τη διάρκεια του έτους δεν δίνει μεγάλα ποσά ισχύος. Άρα η τοποθέτηση του υλικού αλλαγής φάσης προτείνεται να γίνεται σε τοίχο κατά προτίμηση νότιου προσανατολισμού και να αποφεύγεται η τοποθέτηση του σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.

## **Κεφάλαιο 6: Παραμετρικής μελέτες**

### **6.1 1<sup>η</sup> Παραμετρική μελέτη ως προς μοντέλο του χρησιμοποιηθέντος PCM.**

Η μελέτη αυτή θα πραγματοποιηθεί με σκοπό την εξέταση της συμπεριφοράς τριών διαφορετικών υλικών αλλαγής φάσης όταν τοποθετηθούν σε, έναντι υαλοπίνακα, τοιχοποιία αίθουσας . Επίσης θα βρεθούν οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε αυτά καθώς και η ισχύς που δίνει το καθένα στην προς μελέτη αίθουσα. Σε κάθε περίπτωση θα γίνεται αναφορά στο ποσοστό εκμετάλλευσης της ικανότητας του υλικού αυτού να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας τη φάση του εντός ενός στενού προκαθορισμένου θερμοκρασιακού εύρους.

Το φαινόμενο θα εξεταστεί για την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα του έτους και για την τοποθέτηση του κάθε υλικού αλλαγής φάσης σε τοίχο με νότιο δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό. Η παραμετρική μελέτη θα γίνει πάνω στην προσομοίωση της ηλιακής φόρτισης τοιχοποιίας του πραγματοποιήθηκε στο κεφαλαίου 5.3. αλλάζοντας κάθε φορά το υλικό αλλαγής φάσης.

Ως υλικά αλλαγής φάσης σε αυτή τη μελέτη θα χρησιμοποιήσουμε αρχικά το υλικό που χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση του προηγούμενου κεφαλαίου, και δύο άλλα μοντέλα της αγοράς , προϊόντα της Rubitherm , το PT 20 και το SP25 A8 των οποίων τα χαρακτηριστικά θα αναφερθούν λεπτομερώς στη συνέχεια.

**Παρουσίαση των υλικών αλλαγής φάσης :**

## 1. PCM προς μελέτη

Αυτό είναι ένα υποτιθέμενο υλικό αλλαγής φάσης το χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση ηλιακής φόρτισης τοιχοποιίας στο κεφάλαιο 5.3 , δεν υπάρχει έτοιμο στην αγορά αλλά αποτελεί αποτέλεσμα ανάμιξης υλικών αλλαγής φάσης ώστε να έχει επιθυμητές ιδιότητες.

Χαρακτηριστικά:

- Θερμότητα αλλαγής φάσης ή θερμότητα της τήξης **H=150KJ/Kgr**
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης με θερμοκρασία εισόδου στη διφασική **Ts=20<sup>0</sup>C** και θερμοκρασία εξόδου από τη διφασική περιοχή ή θερμοκρασία υγροποίησης **Tl=26<sup>0</sup>C**.
- Ειδική θερμοχωρητικότητα έναρξης της τήξης **Cps=4000 J/Kg °C** και ολοκλήρωσης της τήξης (υγρή φάση) **Cpl=4000J/Kg °C**.

Οι εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας του υλικού αλλαγής φάσεις προκύπτουν από τις σχέσεις(5.3.1.1),(5.3.1.2),(5.3.1.3), (5.3.1.4) και είναι :

Για  $T \leq 20^{\circ}\text{C}$  :

$$c_{p,eff}=c_{ps}=4000 \text{ J/kgK} \quad (6.1.1)$$

Για  $20^{\circ}\text{C} < T \leq 23^{\circ}\text{C}$ :

$$c_{p,eff} = 4 \times (H - bC_{ps}) \times \frac{T-T_s}{b^2} + C_{ps} == 14000 \times (T - 20) + 4000 \quad (6.1.2)$$

Για  $23^{\circ}\text{C} < T \leq 26^{\circ}\text{C}$ :

$$c_{p,eff} = 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b^2} \times \left(T - T_s - \frac{b}{2}\right) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} =$$
$$= -14000 \times (T - 23) + 46000 \quad (6.1.3)$$

Για  $T > 26^{\circ}\text{C}$ :  $c_{p,eff}=c_{pl}=4000 \text{ J/kgK}$  (6.1.4)



## 2. Μοντέλο PT 20. [84]

Υλικό αλλαγής φάσης που κυκλοφορεί στην αγορά από την Rubitherm και η νεότερη ονομασία του είναι RT 21.

Χαρακτηριστικά :

- Θερμότητα αλλαγής φάσης ή θερμότητα της τήξης **H=132,1KJ/Kgr**
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης με θερμοκρασία εισόδου στη διφασική **Ts=15<sup>0</sup>C** και θερμοκρασία εξόδου από τη διφασική περιοχή ή θερμοκρασία υγροποίησης **Tl=26<sup>0</sup>C**.
- Ειδική θερμοχωρητικότητα έναρξης της τήξης **Cps=1900 J/Kg °C** και ολοκλήρωσης της τήξης (υγρή φάση) **Cpl=2500J/Kg °C**.

Χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά του υλικού αλλαγής φάσης και από τις σχέσεις (5.3.1.1.), (5.3.1.2.), (5.3.1.3), (5.3.1.4) της ενεργούς θερμοχωρητικότητας που προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις :

$$\text{Για } T \leq 15^{\circ}\text{C} : c_{p,eff} = c_{ps} = 1900 \text{ J/kgK} \quad (6.1.5)$$

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

$$c_{p,eff} = 4 \times (H - bC_{ps}) \times \frac{T - T_s}{b^2} + C_{ps} = 3676,033 \times (T - 15) + 1900 \quad (6.1.6)$$

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

$$c_{p,eff} = 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b^2} \times \left( T - T_s - \frac{b}{2} \right) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} = -3457,85 \times (T - 20,5) + 21518,18 \quad (6.1.7)$$

$$\text{Για } T > 26^{\circ}\text{C} : c_{p,eff} = c_{pl} = 2500 \text{ J/kgK} \quad (6.1.8)$$

### 3. Μοντέλο SP25 A8 [84]

Υλικό αλλαγής φάσης που κυκλοφορεί στην αγορά από την Rubitherm.

Χαρακτηριστικά :

- Θερμότητα αλλαγής φάσης ή θερμότητα της τήξης **H=141,5KJ/Kgr**
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης με θερμοκρασία εισόδου στη διφασική **Ts=22°C** και θερμοκρασία εξόδου από τη διφασική περιοχή ή θερμοκρασία υγροποίησης **Tl=32°C**.
- Ειδική θερμοχωρητικότητα έναρξης της τήξης **Cps=2600 J/Kg °C** και ολοκλήρωσης της τήξης (υγρή φάση) **Cpl=2700J/Kg °C**.

Οι εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας του που προκύπτουν από τις σχέσεις (5.3.1.1),(5.3.1.2),(5.3.1.3), (5.3.1.4) είναι :

$$\text{Για } T \leq 22^{\circ}\text{C} : \quad c_{p,eff}=c_{ps}=2600 \text{ J/kgK} \quad (6.1.9)$$

Για  $22^{\circ}\text{C} < T \leq 27^{\circ}\text{C}$ :

$$c_{p,eff} = 4 \times (H - bC_{ps}) \times \frac{T-T_s}{b^2} + C_{ps} = 4620 \times (T - 22) + 2600 \quad (6.1.10)$$

Για  $27^{\circ}\text{C} < T \leq 32^{\circ}\text{C}$ :

$$c_{p,eff} = 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b^2} \times \left( T - T_s - \frac{b}{2} \right) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} = -4580 \times (T - 27) + 25600 \quad (6.1.11)$$

$$\text{Για } T > 32^{\circ}\text{C} : c_{p,eff}=c_{pl}=2700 \text{ J/kgK} \quad (6.1.12)$$

Έγινε επιλογή των συγκεκριμένων μοντέλων PCM λόγω του εύρους θερμοκρασιών αλλαγής φάσης τους οι οποίες κυμαίνονται κοντά στις θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM της προσομοίωσης που έγινε στο προηγούμενο και οι οποίες είναι λογικές τιμές θερμοκρασιών εσωτερικού τοίχου αίθουσας .

Με γνώστες τις σχέσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, μπορούμε με την χρήση του ισολογισμού ενέργειας στο στρώμα του κάθε υλικού αλλαγής φάσης σχέση 5.3.3.1. που προέκυψε από τον ισολογισμό

$$c_{p,eff}m(T^1 - T^0) = 0,9GtA_f 36000 - UA_w 3600 \left( \frac{T^0 + T^1}{2} - T_{\pi} \right),$$

να βρούμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε αυτό καθώς και την ισχύ που δίνει στην αίθουσα.

Στην παρούσα εφαρμογή όπως προαναφέρθηκε θα χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα της προσομοίωσης που έγινε στο κεφαλαίο 5.3.3 δηλαδή η μελέτη γίνεται σε:

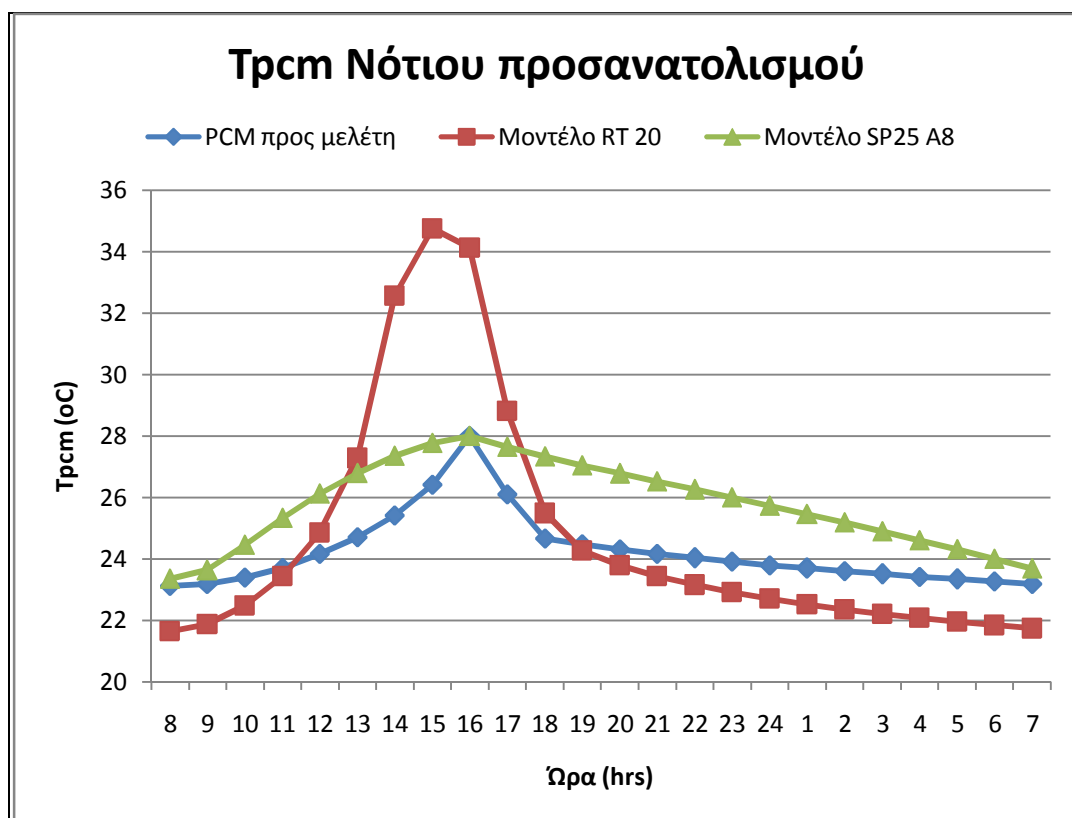
- Αίθουσα με διαστάσεις (μήκος)x(πλάτος αίθουσας)x(ύψος ) = (10m)x(10m)x(3m) .
- Το PCM τοποθετείται σε τοίχο απέναντι από υαλοπίνακα με διαστάσεις (ύψος ) x (μήκος ) = ( 2,5x4)
- Τοποθετούμε στρώμα υλικού αλλαγής φάσης 2cm ,άρα η συνολική μάζα PCM που θα τοποθετηθεί είναι  $m=\rho V =611,4 \text{ Kgr}$
- Η ειδική θερμική διαπερατότητα  $U=5,33 \text{ W/ m}^2$ .
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{\pi}=20^{\circ}\text{C}$
- Η ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου για τις μέρες και τους προσανατολισμούς προς μελέτη έχει υπολογισθεί λεπτομερώς σε προηγούμενο κεφάλαιο (5.2.1) .

Παράλληλα γνωρίζοντας τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται θα φτιάξουμε διάγραμμα  $c_{p,eff} -T$  ώστε κάθε φορά να ελεγχθεί η εκμετάλλευση της ιδιότητας του υλικού αλλαγής φάσης να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση . Αυτό μπορεί να γίνει αν για κάθε PCM σχεδιάσουμε μια καμπύλη της ενεργούς θερμοχωρητικότητας του, και μια άλλη καμπύλη η οποία θα μας δείχνει για το κάθε μήνα και προσανατολισμό τη μέρος της προηγούμενης καμπύλης καλύφτηκε. Το ιδανικό θα ήταν η καμπύλη αυτή να βρίσκεται στην διφασική περιοχή γεγονός το οποίο θα σήμαινε πλήρης αξιοποίηση του υλικού αλλαγής φάσης.

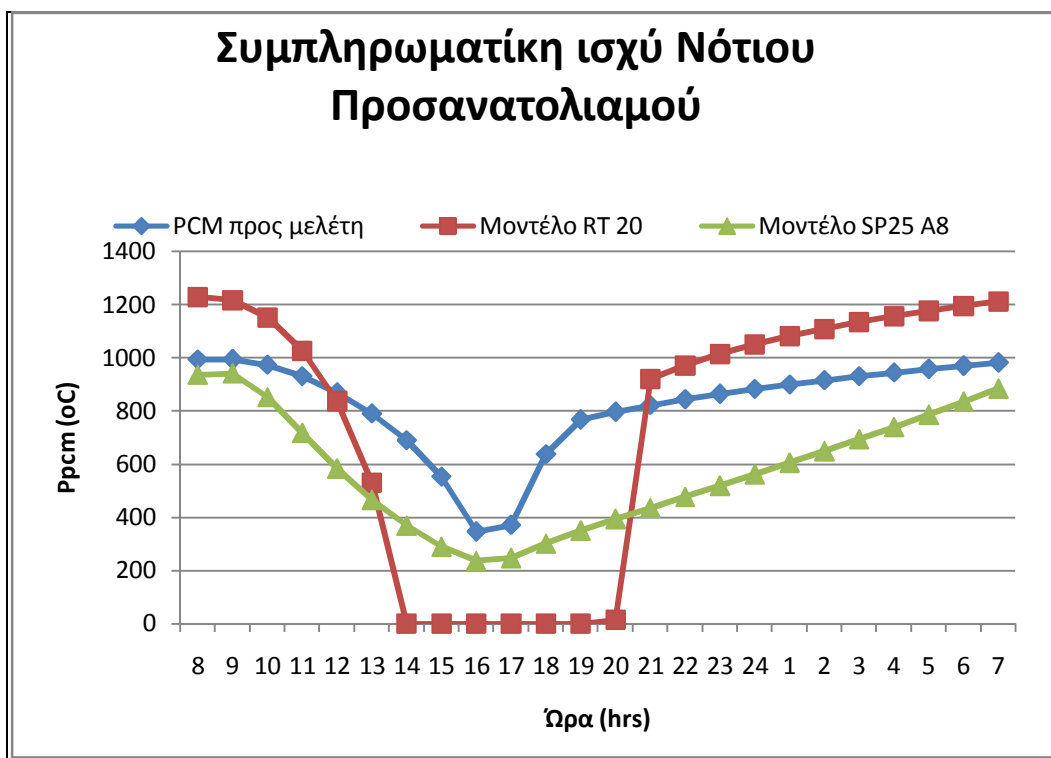
Παρακάτω παρατίθενται σε διαγράμματα τα αποτελέσματα της μελέτης. Για κάθε μήνα και προσανατολισμό του εσωτερικού τοίχου που περιέχει το PCM παρουσιάζονται αρχικά η θερμοκρασίες των

τριών PCM προς μελέτη που όπως προαναφέραμε προκύπτουν από τον ισολογισμό ενέργειας στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης . Στη συνέχεια βρίσκουμε τι ισχύ δίνει το κάθε υλικό αλλαγής φάσης ανά ώρα στην αίθουσα και θεωρώντας τις απώλειες της σταθερές και ίσες με  $P_{\text{απαιτούμ}}=1500\text{W}$  βρίσκουμε και παρουσιάζουμε σε διαγράμματα τι συμπληρωματική ισχύ χρειάζεται για να καλυφθούν οι απαιτούμενες ανάγκες της αίθουσας. Τέλος παρουσιάζονται οι καμπύλες  $c_{p,eff} - T$  ώστε να μελετηθεί η εκμετάλλευση της ιδιότητας του PCM να αποθηκεύει ενέργεια αλλάζοντας φάση όπως προαναφέραμε.

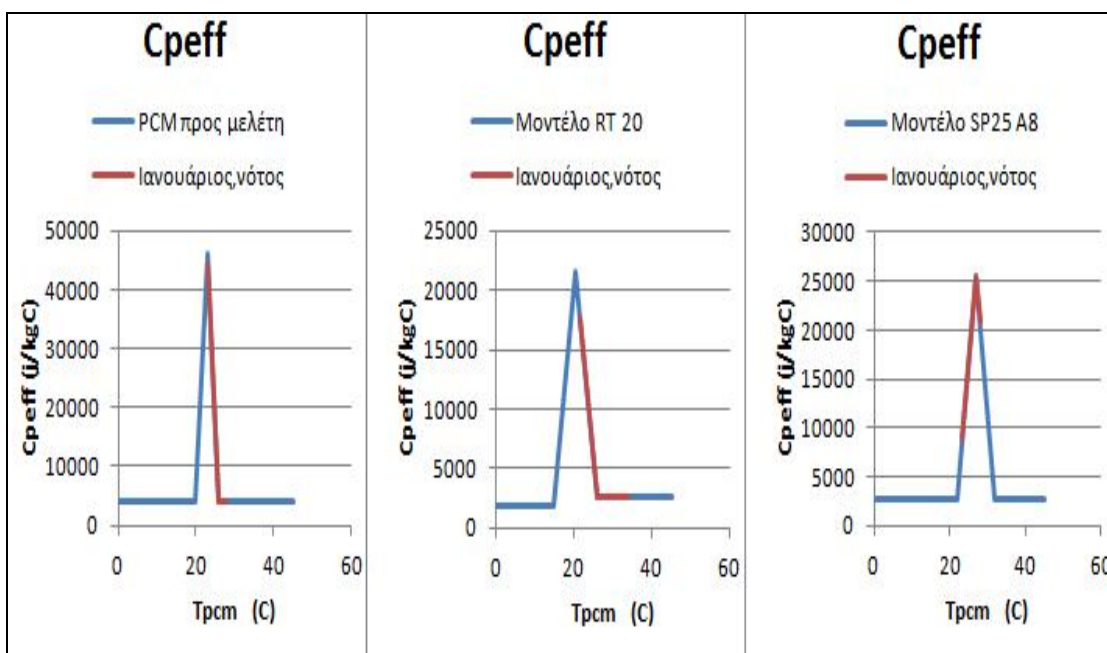
❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου:



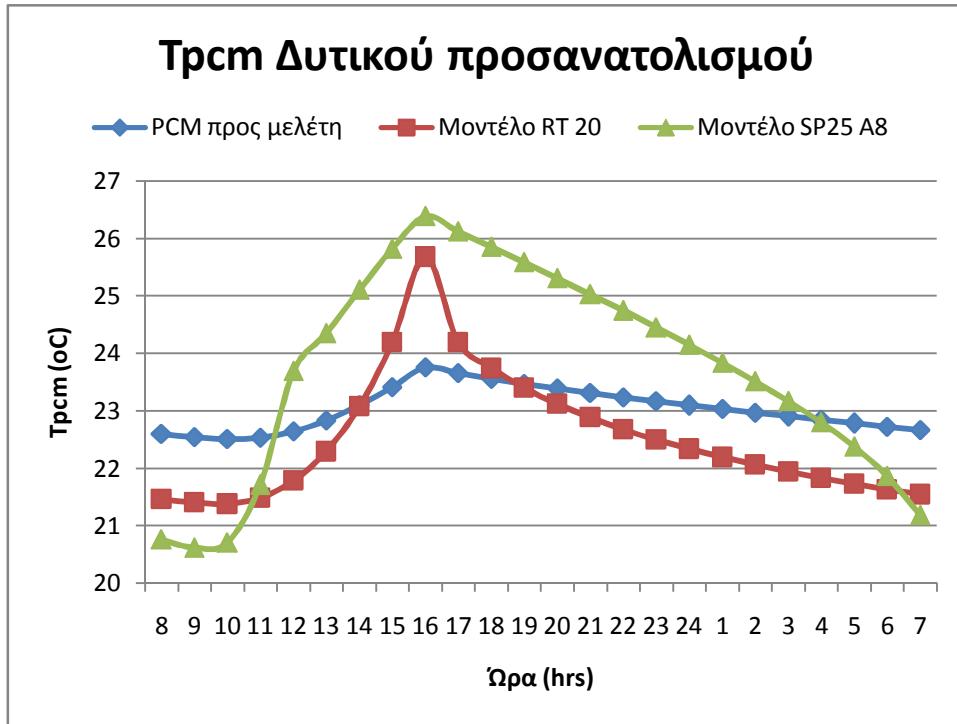
Σχήμα 6.1.1 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου ,τοποθετημένα σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



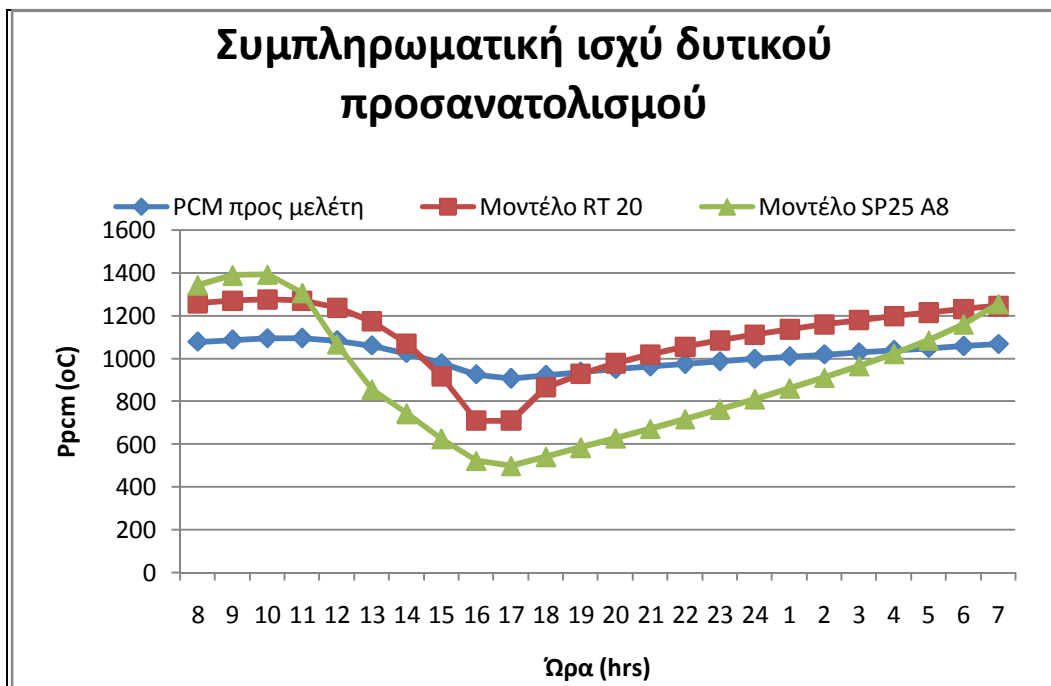
Σχήμα 6.1.2 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου με τη χρήση 3 διαφορετικών μοντέλων PCM.



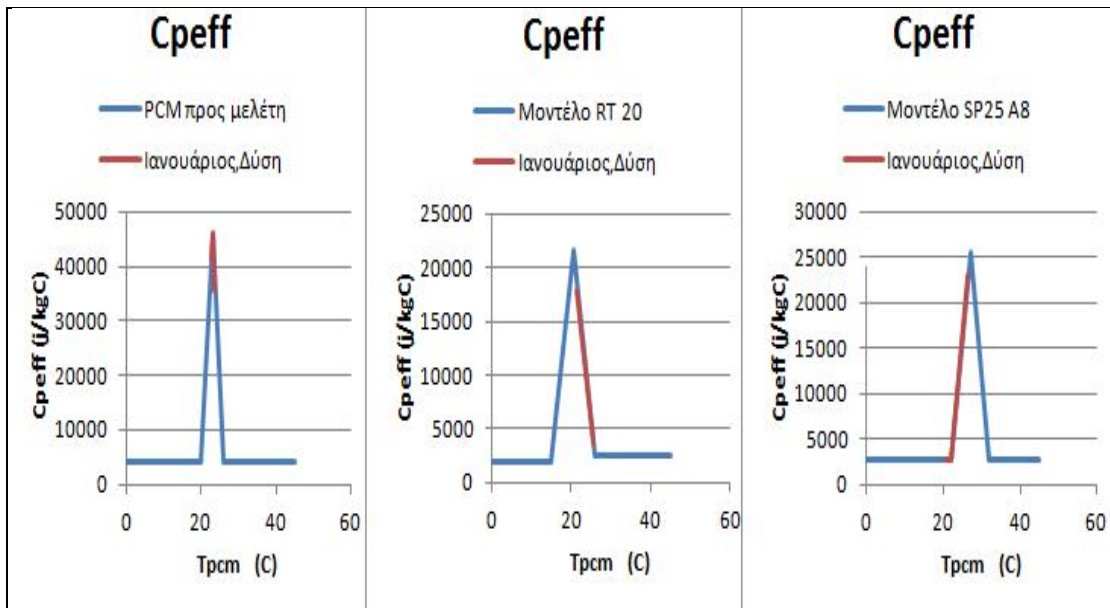
Σχήμα 6.1.3 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .



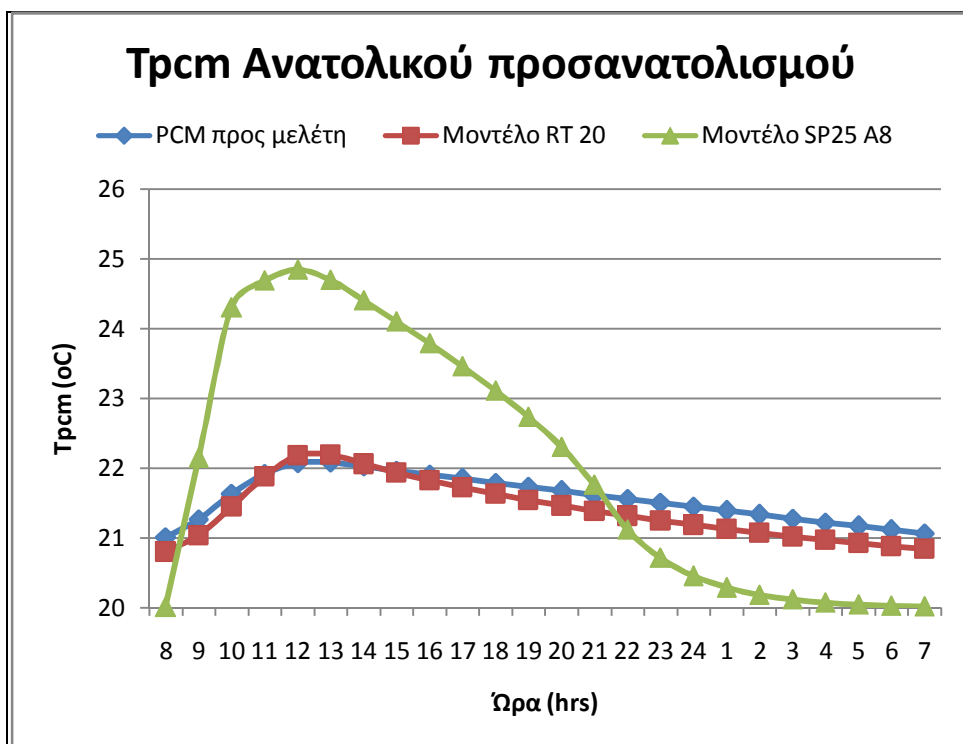
Σχήμα 6.1.3 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου τοποθετημένα σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



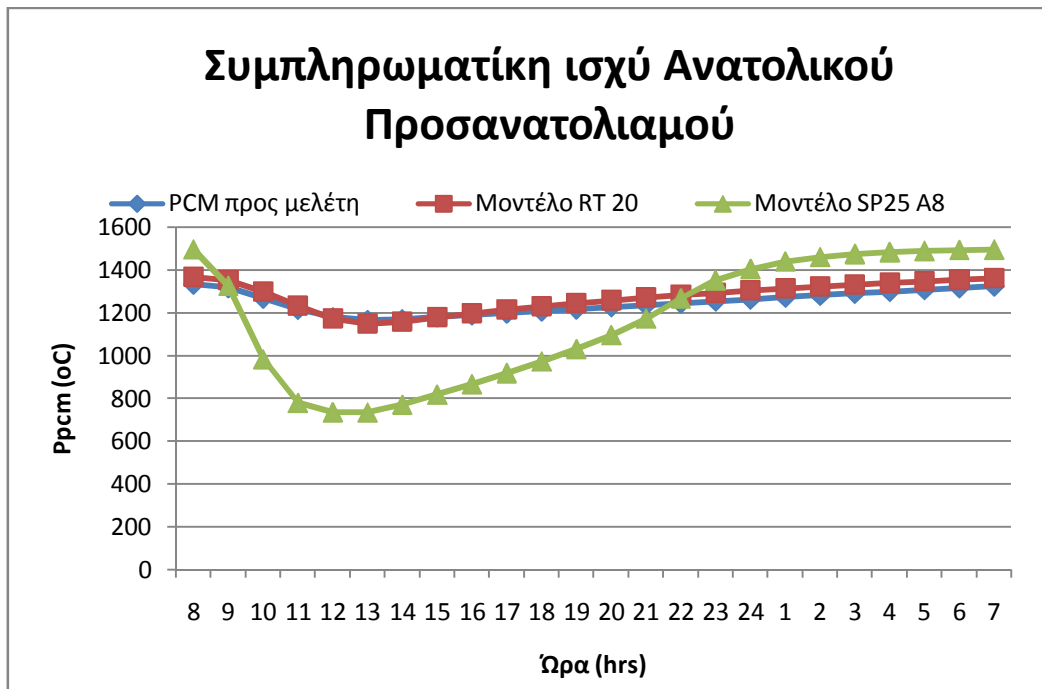
Σχήμα 6.1.4 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.



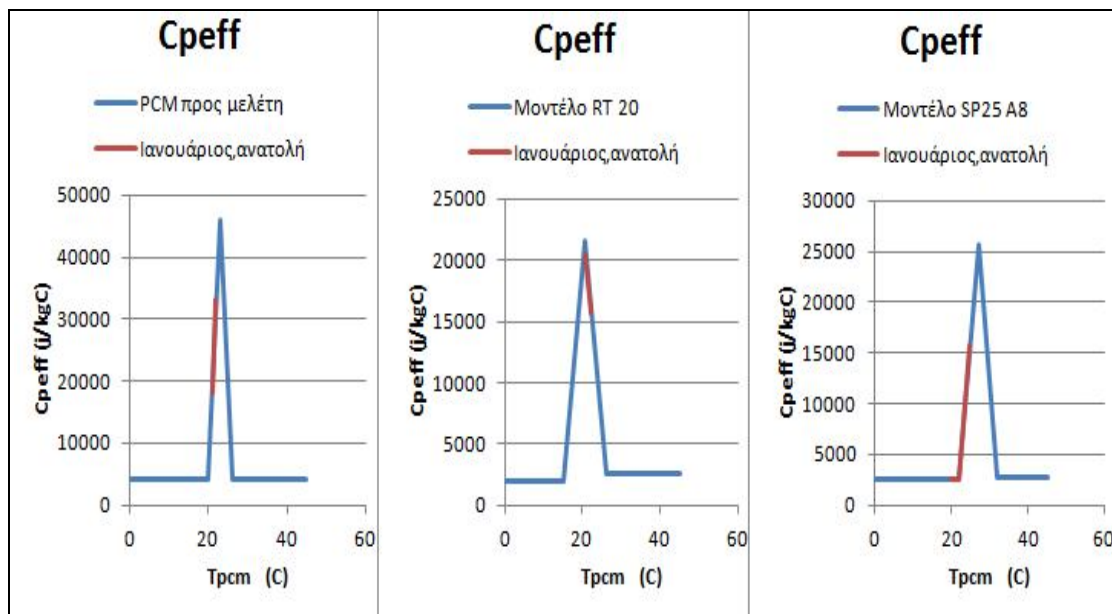
Σχήμα 6.1.5 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .



Σχήμα 6.1.6 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου τοποθετημένα σε τείχος ανατολικού προσανατολισμού.



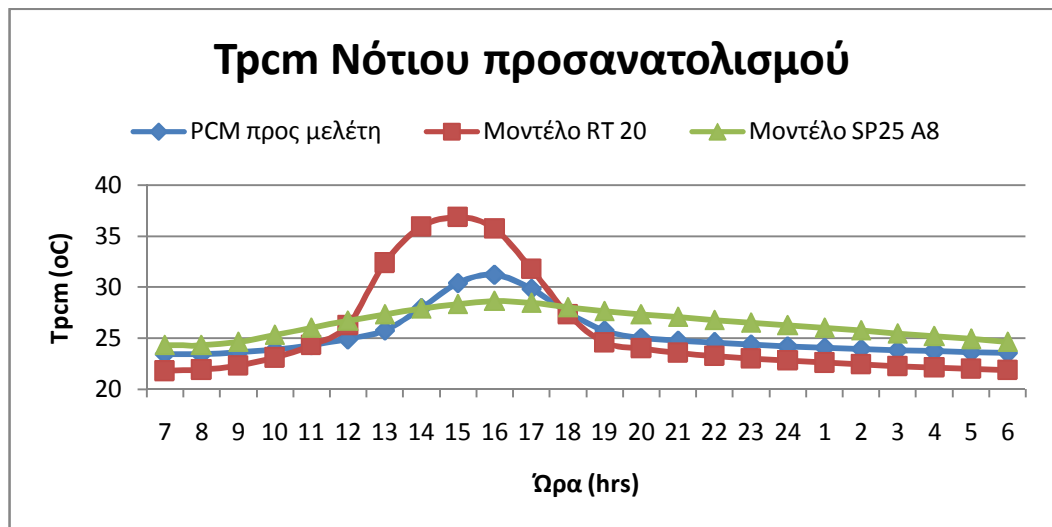
Σχήμα 6.1.7 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.



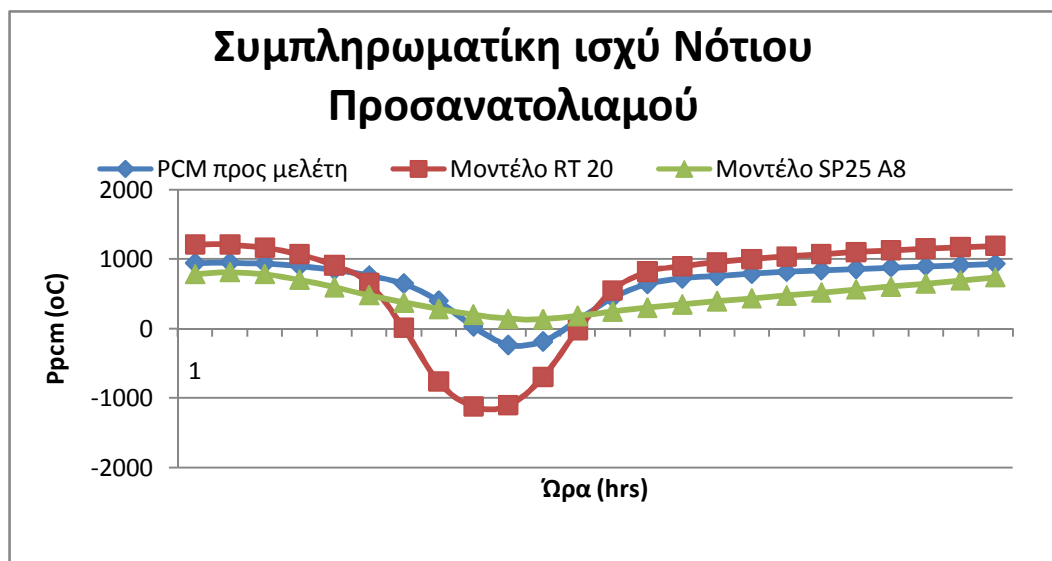
Σχήμα 6.1.8 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.



❖ Για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου :



Σχήμα 6.1.9 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου τοποθετημένα σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 6.1.10 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η επιπλέον ισχύς που χρειάζεται η αίθουσα τις μεσημεριανές ώρες για τοίχο με νότιο προσανατολισμό στο PCM προς μελέτη και το μοντέλο RT 20 παίρνει αρνητικές τιμές ,αυτό σημαίνει ότι το υλικό αλλαγής φάσης δίνει

περισσότερη ισχύ από τις ανάγκες της αίθουσας. Η επιπλέον αυτή ισχύ μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί αργότερα τις ώρες όπου η ισχύς του PCM δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας και κατά συνέπεια μείωση της χρήσης και της σπατάλη ισχύς από άλλες πηγές οι οποίες μας επιβαρύνουν οικονομικά .

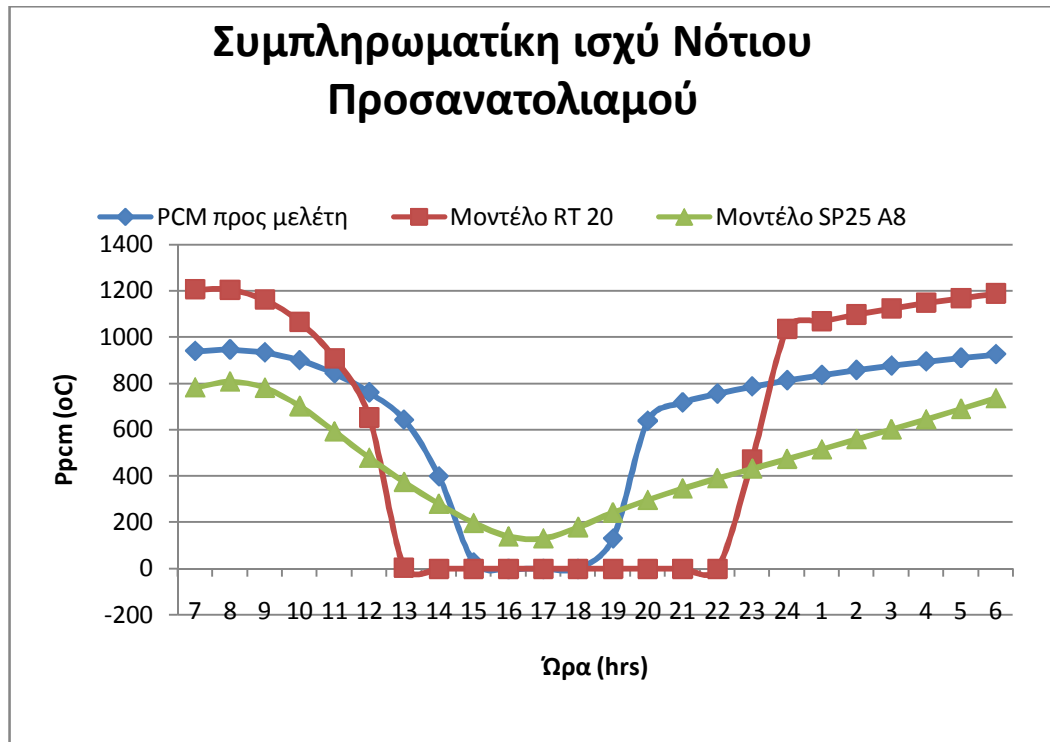
Την παραπάνω ισχύ την αποθηκεύουμε λοιπόν και την χρησιμοποιούμε τις αμέσως επόμενες ώρες όπου χρειάζεται άλλη πηγή ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών. Για παράδειγμα για το PCM προς μελέτη βλέπουμε ότι στις τέσσερις και στις πέντε η ώρα το μεσημέρι η ισχύς που δίνει το PCM είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη ,την περίσσεια αυτή ισχύ την χρησιμοποιούμε στις οχτώ η ώρα ώστε να μειώσουμε την ισχύ που παίρνει από άλλη πηγή , όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.1.1 Συμπληρωματική ισχύ για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου για τοίχο με νότιο προσανατολισμό με ενσωματωμένο το PCM προς μελέτη.

Ωρα	Ppcm	Ραπαιτούμενη	Ρσυμπληρωματικό= Ραπαι- Ppcm	Ρσυμπληρωματικό με αποθήκευση της επιπλέον ισχύς
7	560,3115	1500	939,6885	939,6885
8	554,452	1500	945,548	945,548
9	566,6782	1500	933,3218	933,3218
10	600,4244	1500	899,5756	899,5756
11	657,1948	1500	842,8052	842,8052
12	739,4345	1500	760,5655	760,5655
13	856,9811	1500	643,0189	643,0189
14	1101,052	1500	398,9478	398,9478
15	1472,624	1500	27,3763	27,3763
16	1734,188	1500	-234,188	0
17	1685,769	1500	-185,769	0
18	1387,642	1500	112,3582	0
19	1061,022	1500	438,9783	131,38
20	861,7335	1500	638,2665	638,2665
21	782,478	1500	717,522	717,522
22	744,2223	1500	755,7777	755,7777
23	713,3719	1500	786,6281	786,6281
24	686,9884	1500	813,0116	813,0116
1	663,7137	1500	836,2863	836,2863
2	642,7735	1500	857,2265	857,2265

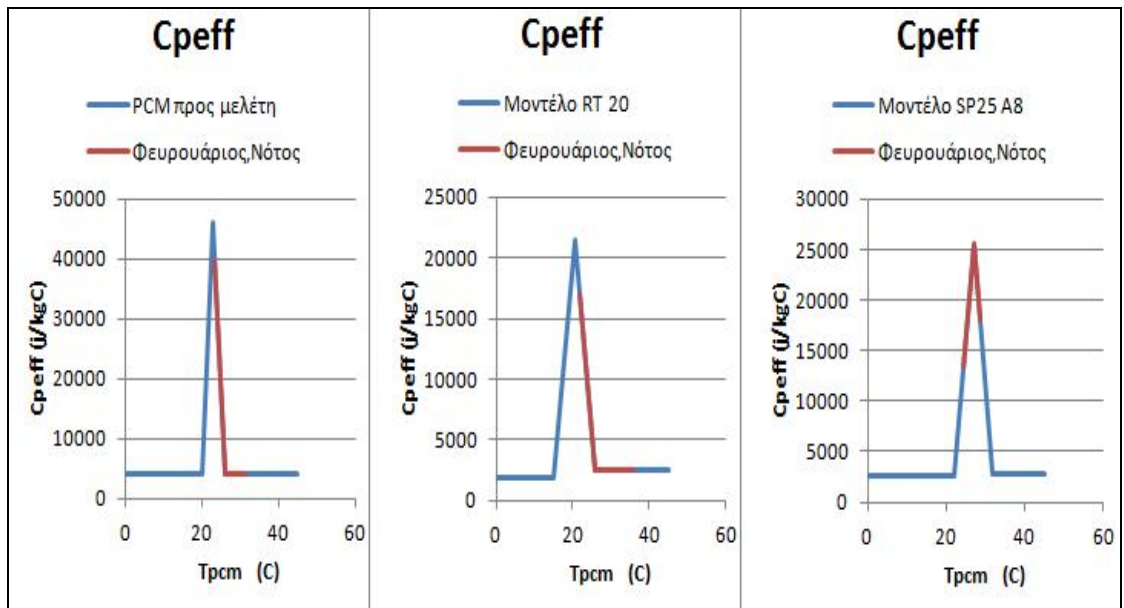
3	623,6735	1500	876,3265	876,3265
4	606,0736	1500	893,9264	893,9264
5	589,7277	1500	910,2723	910,2723
6	574,4505	1500	925,5495	925,5495

Άρα τελικά οδηγούμαστε στο παρακάτω διάγραμμα.

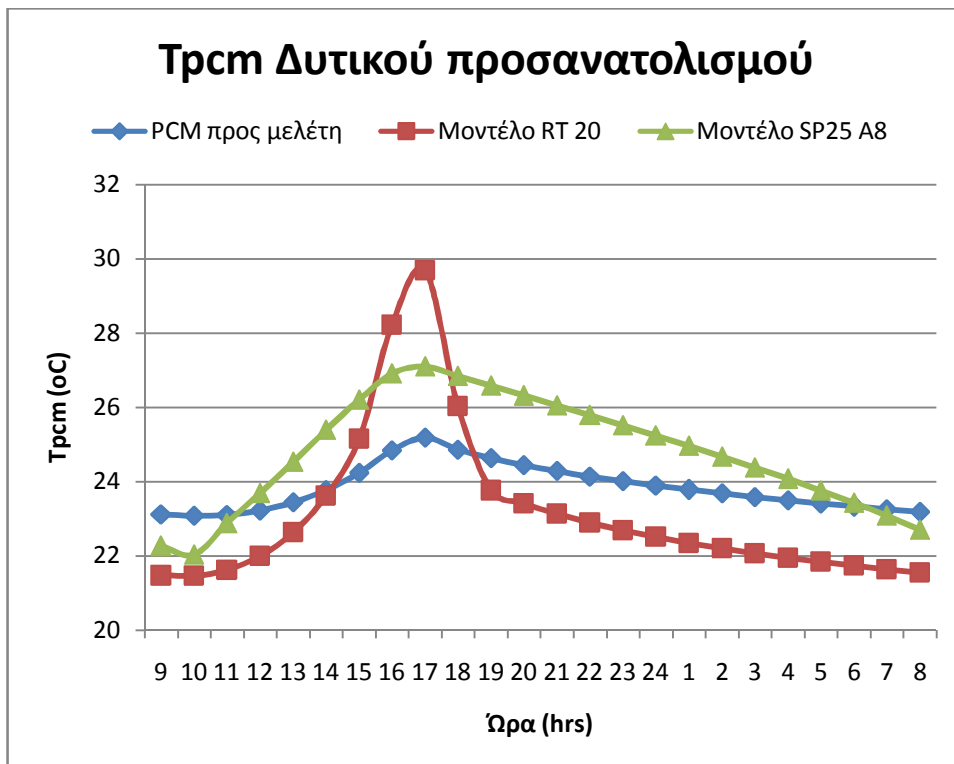


Σχήμα 6.1.11 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.

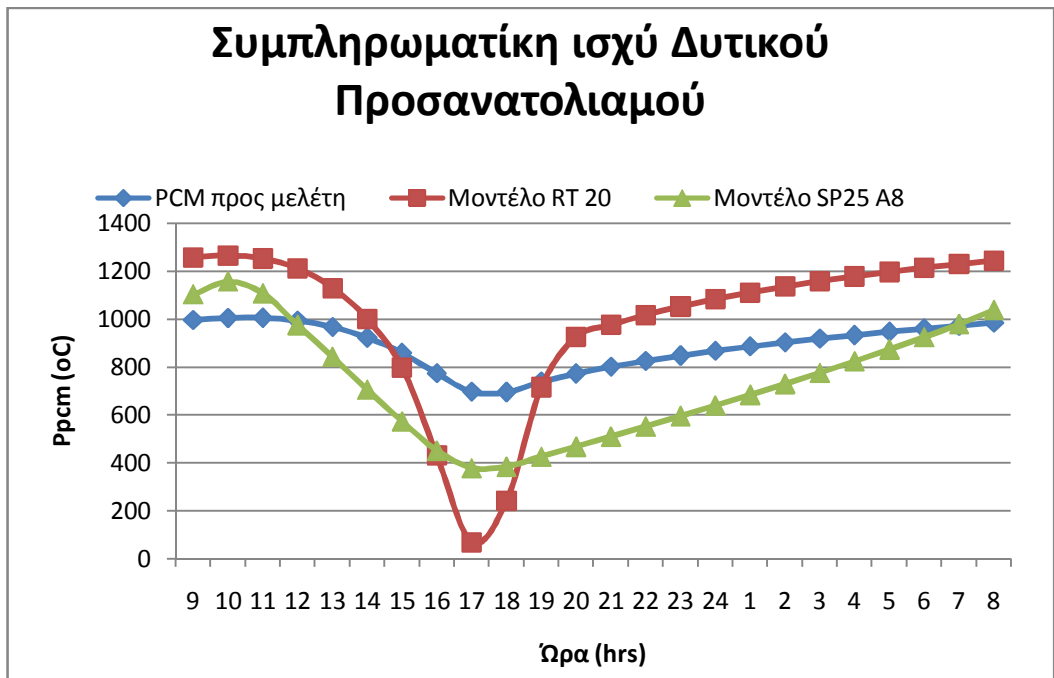
Η διαδικασία αυτή θα γίνεται σε όλες τις περιπτώσεις όπου υπάρχει περίσσεια ισχύς από το PCM και στα διαγράμματα θα εμφανίζεται κατευθείαν η συμπληρωματική ισχύ που απαιτείται μετά την αποθήκευση και χρήση της επιπλέον ισχύς του PCM στις επόμενες ώρες.



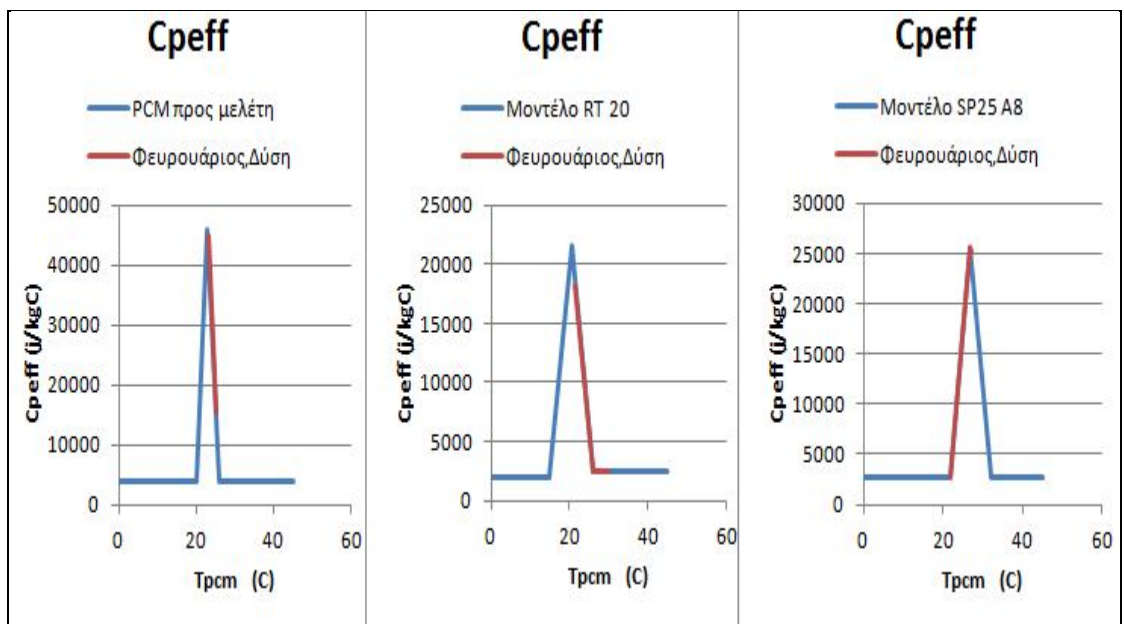
Σχήμα 6.1.12 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.



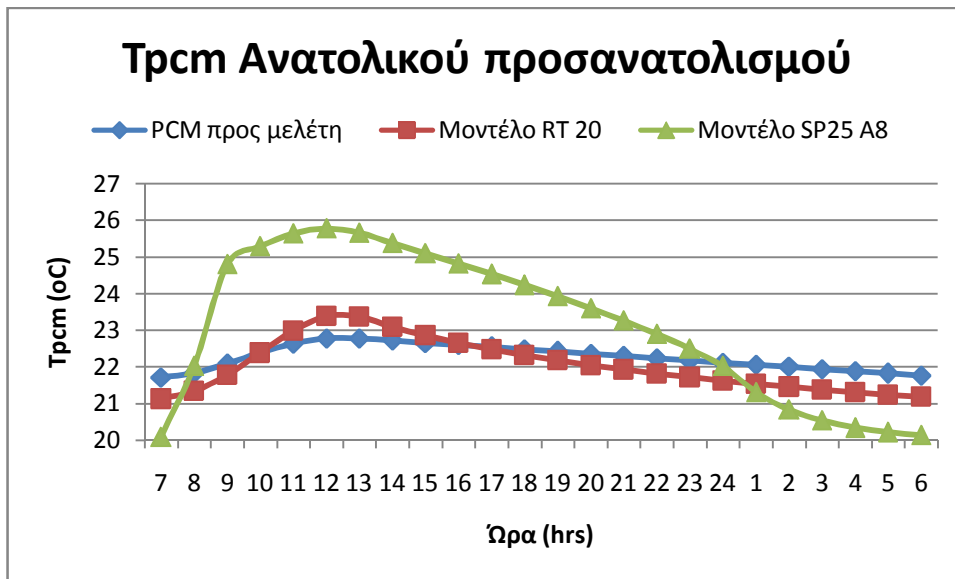
Σχήμα 6.1.13 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου τοποθετημένα σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



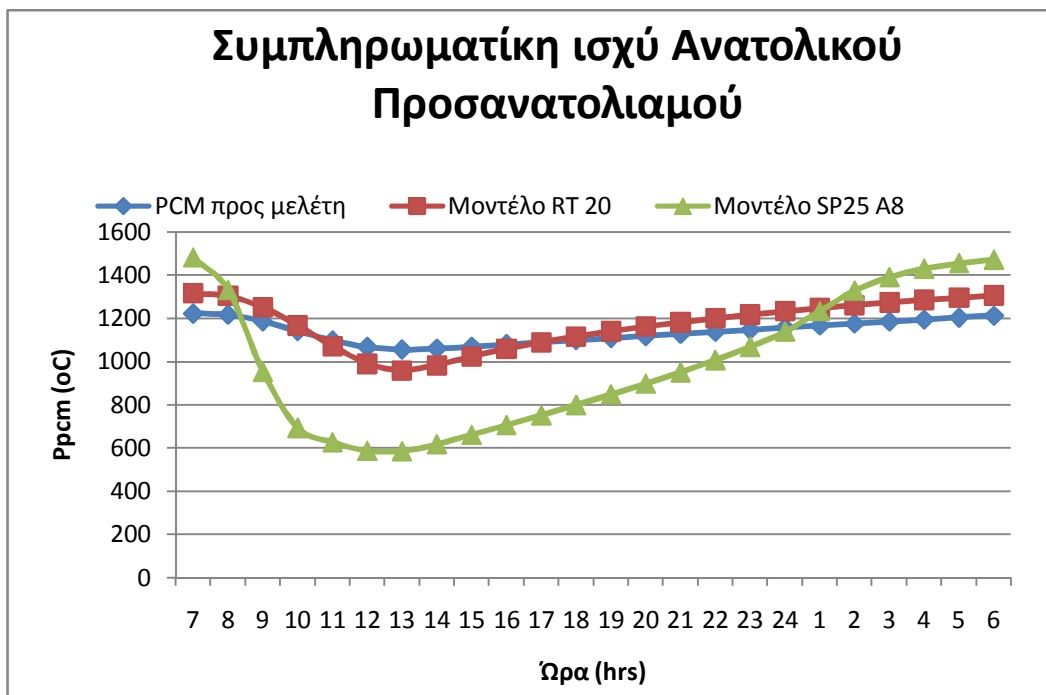
Σχήμα 6.1.14 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.



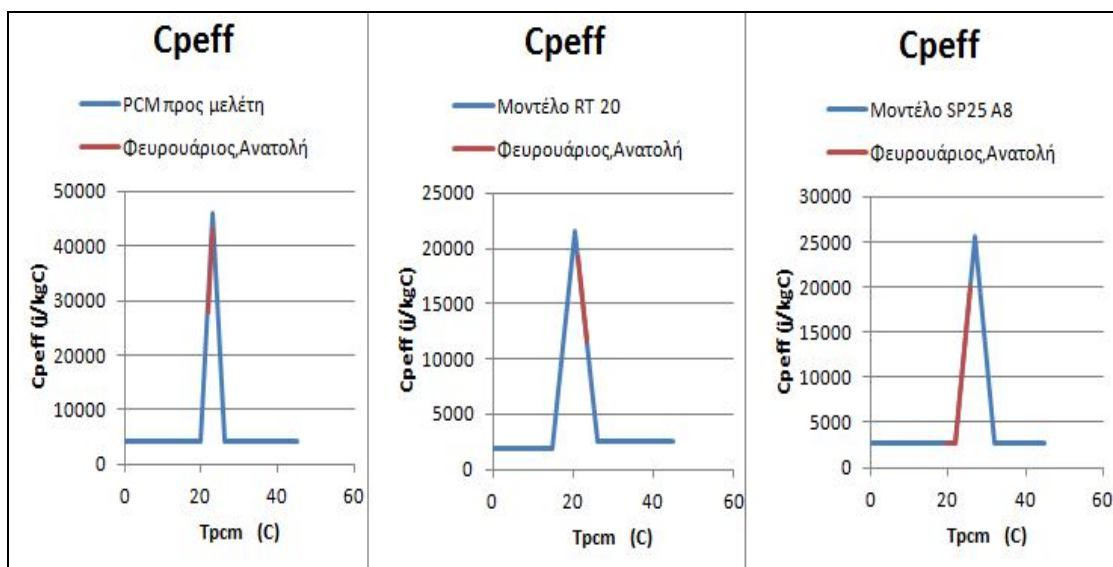
Σχήμα 6.1.15 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .



Σχήμα 6.1.16 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου τοποθετημένα σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.

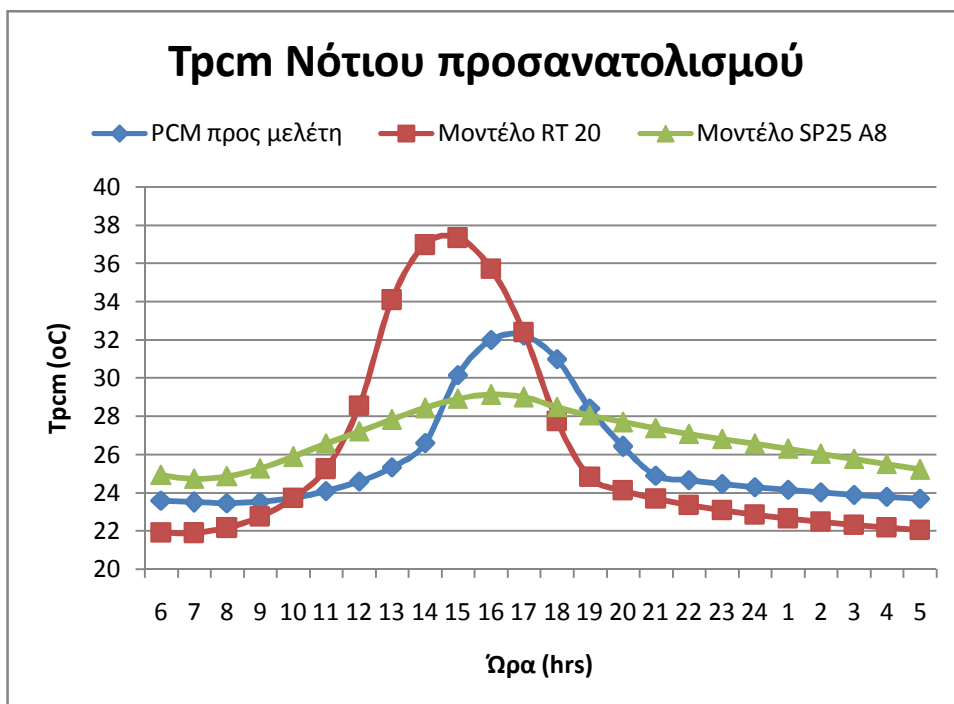


Σχήμα 6.1.17 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.

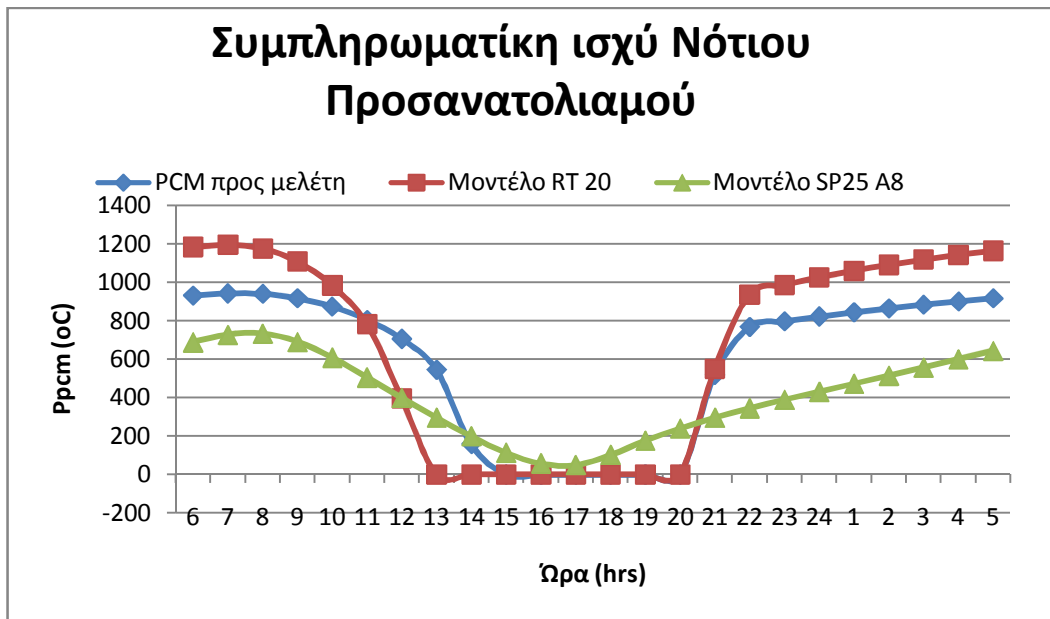


Σχήμα 6.1.18 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .

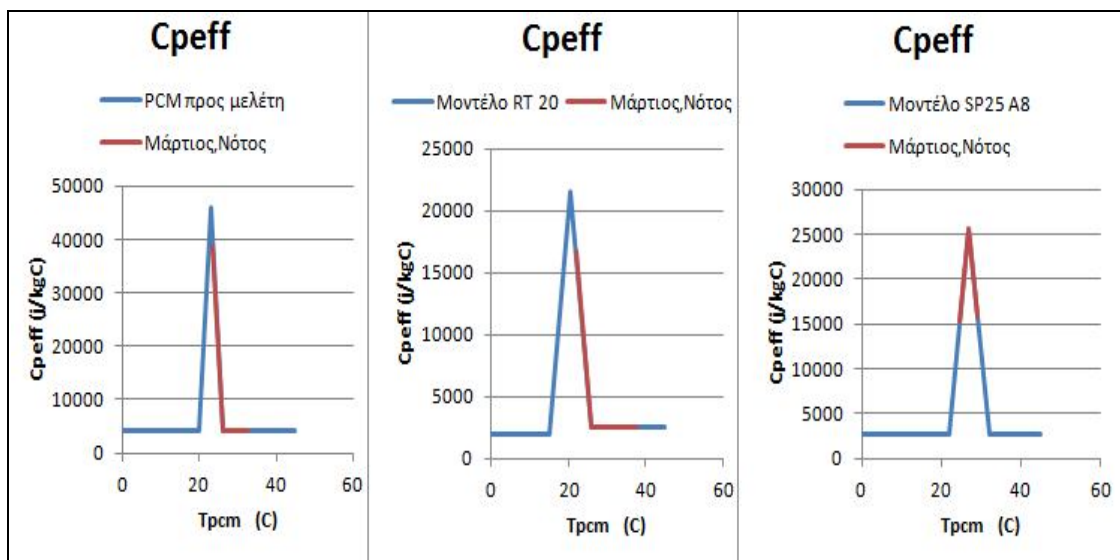
❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου:



Σχήμα 6.1.19 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου Δεκέμβρης τοποθετημένα σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.

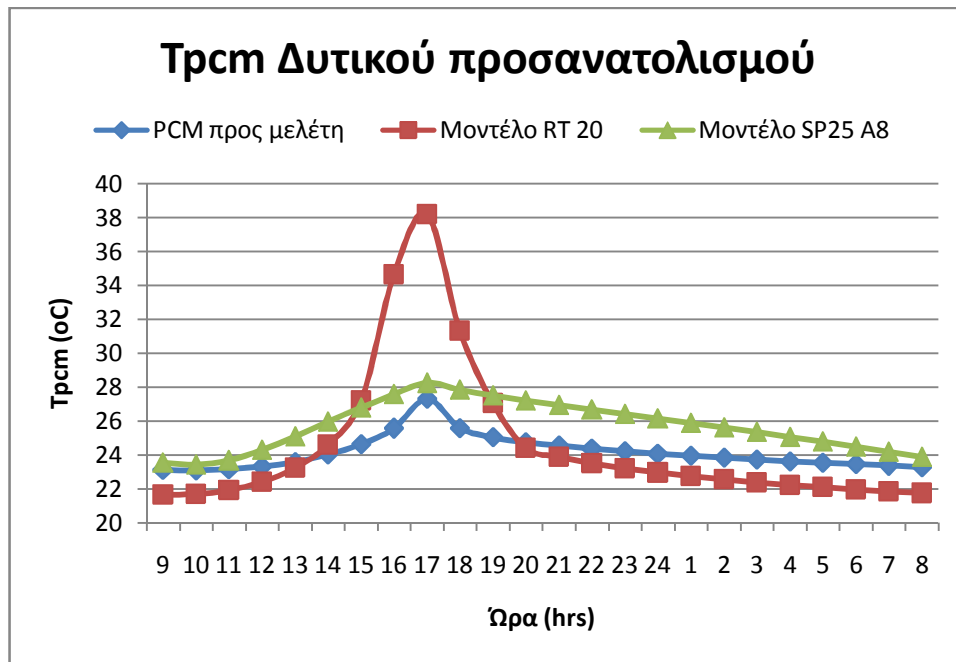


Σχήμα 6.1.20 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.

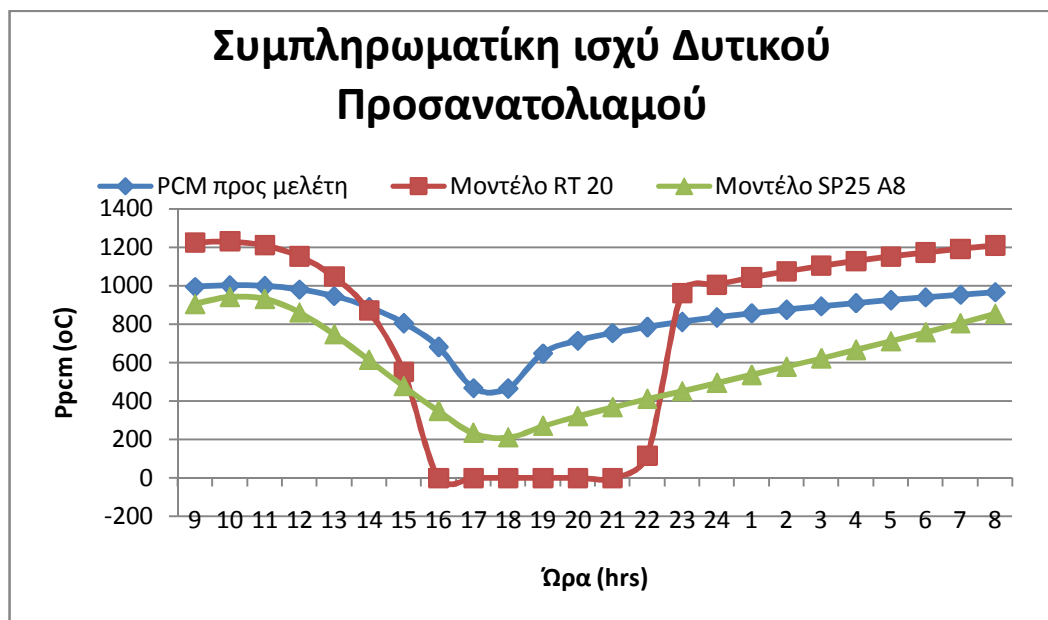


Σχήμα 6.1.21 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.

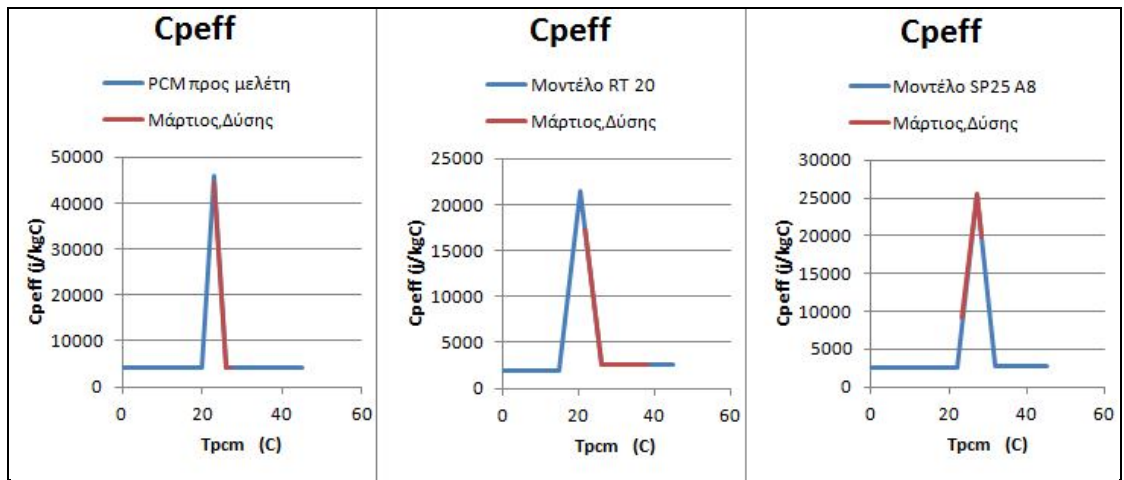




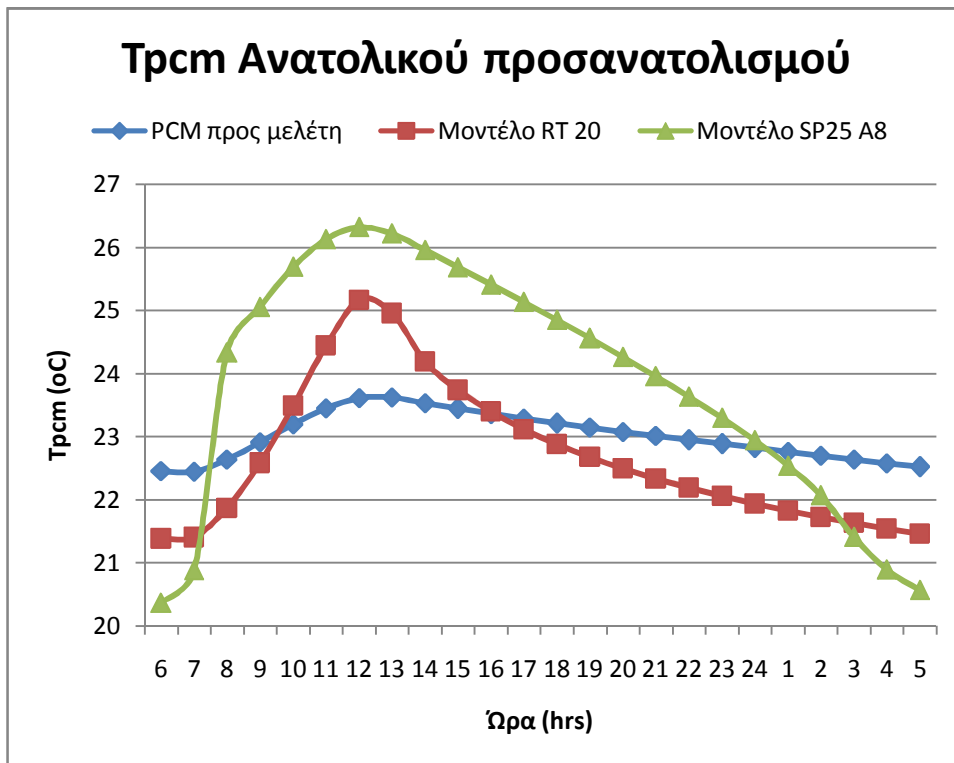
Σχήμα 6.1.22 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου τοποθετημένα σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



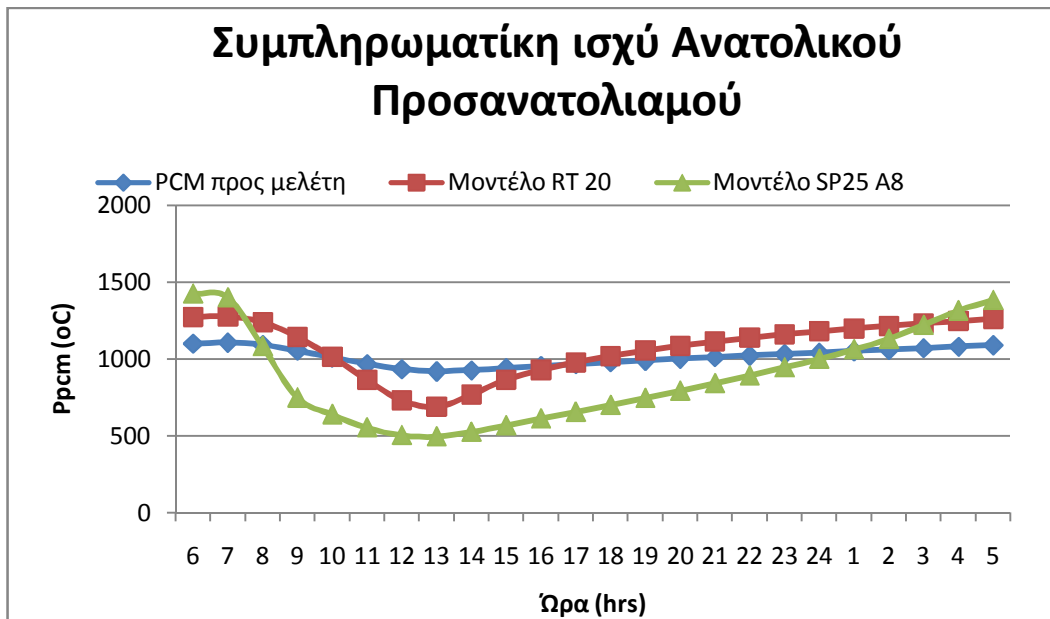
Σχήμα 6.1.23 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.



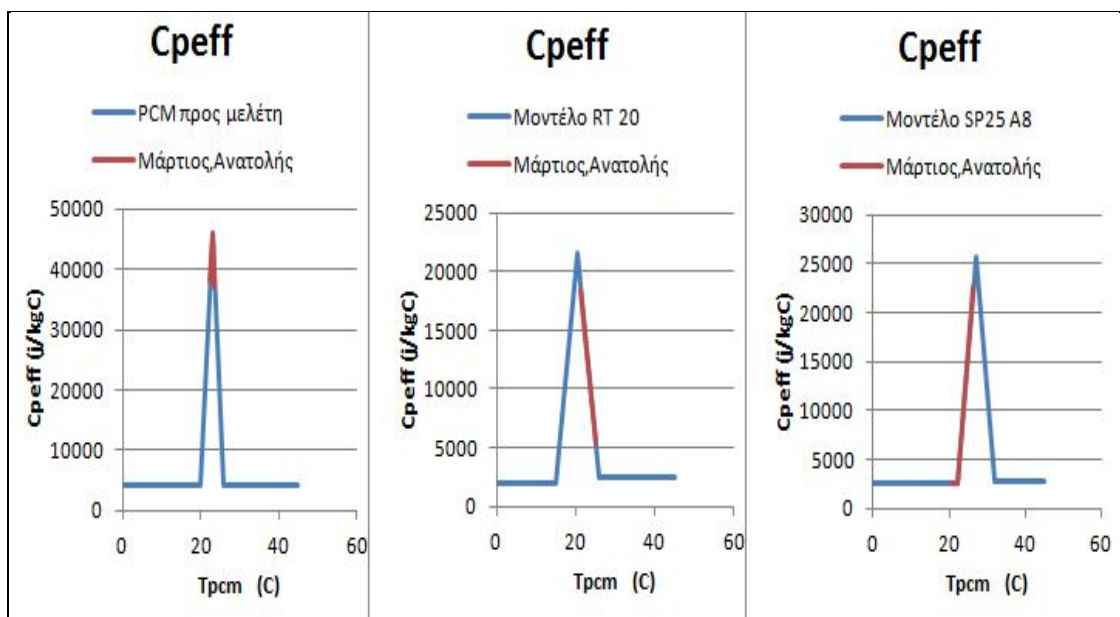
Σχήμα 6.1.24 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .



Σχήμα 6.1.25 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου τοποθετημένα σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.

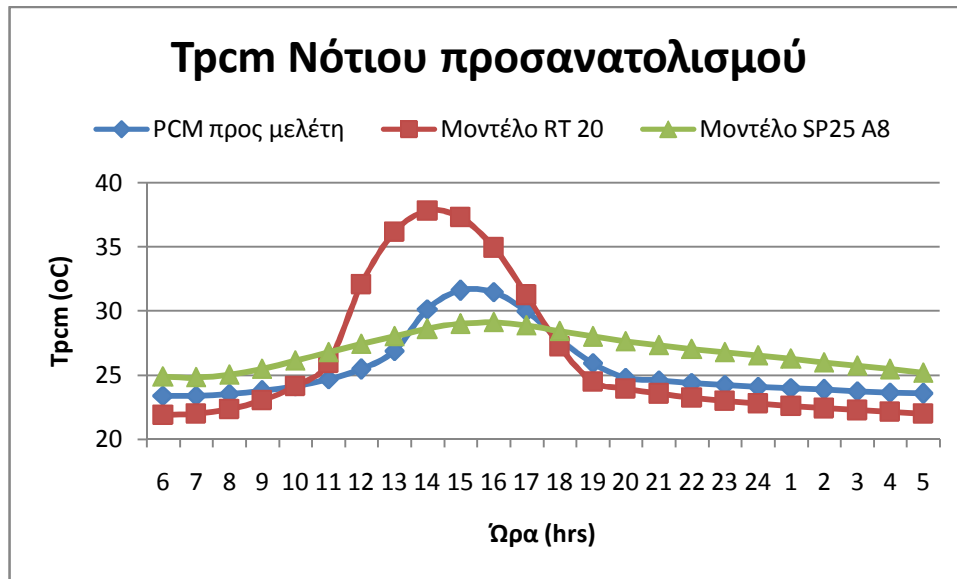


Σχήμα 6.1.26 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.

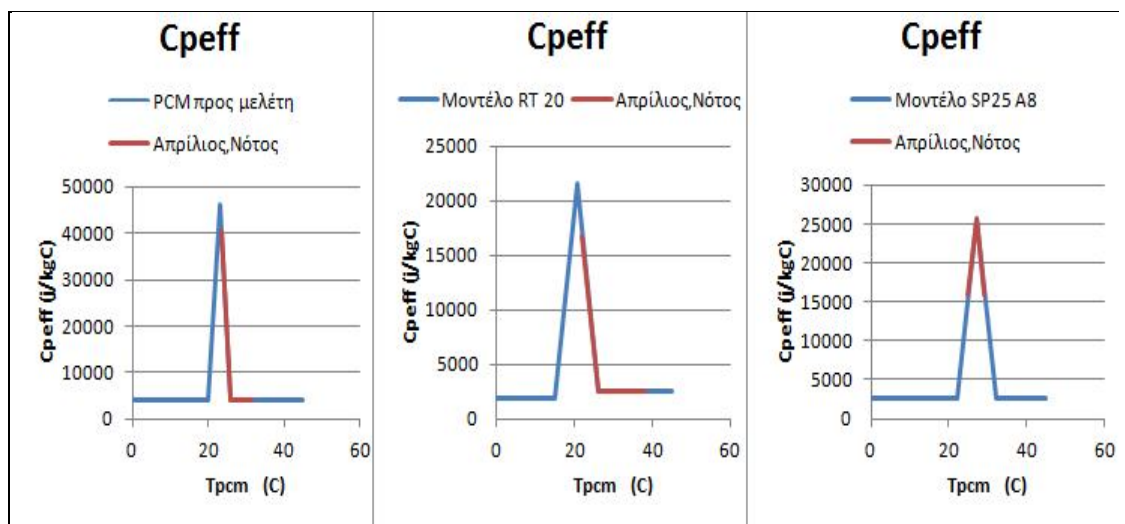


Σχήμα 6.1.27 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.

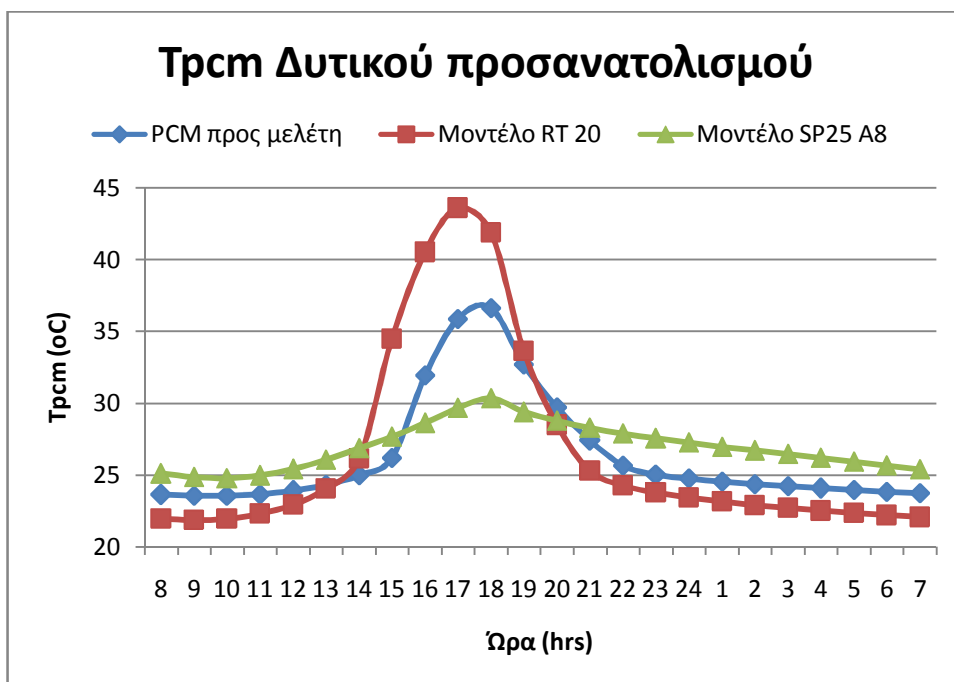
❖ Για την 21<sup>η</sup> Απριλίου:



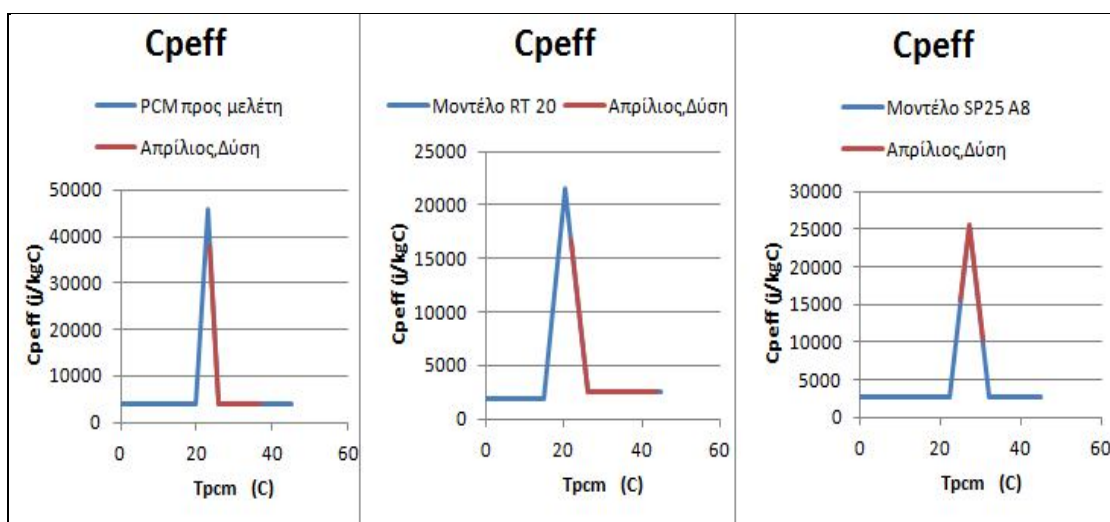
Σχήμα 6.1.28 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Απριλίου τοποθετημένα σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



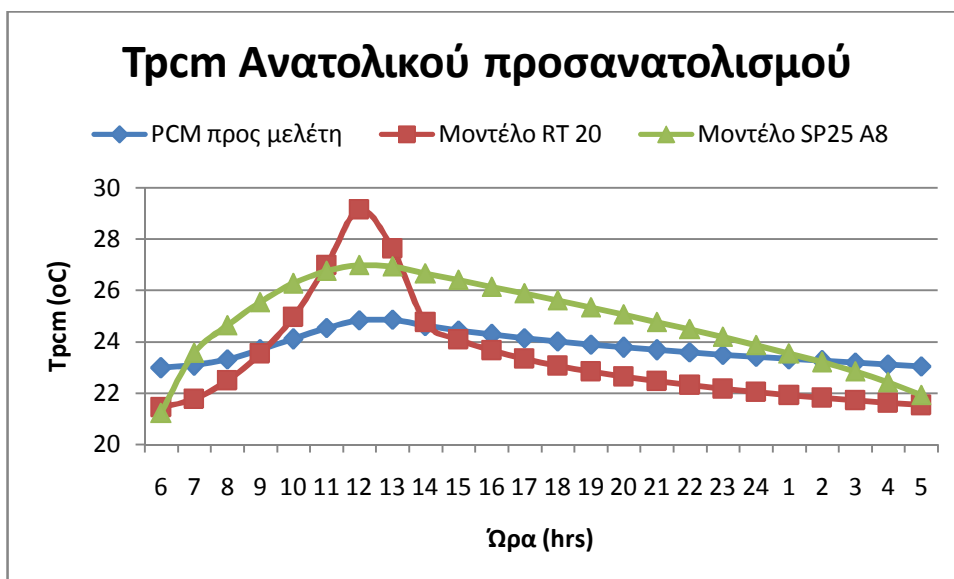
Σχήμα 6.1.29 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.



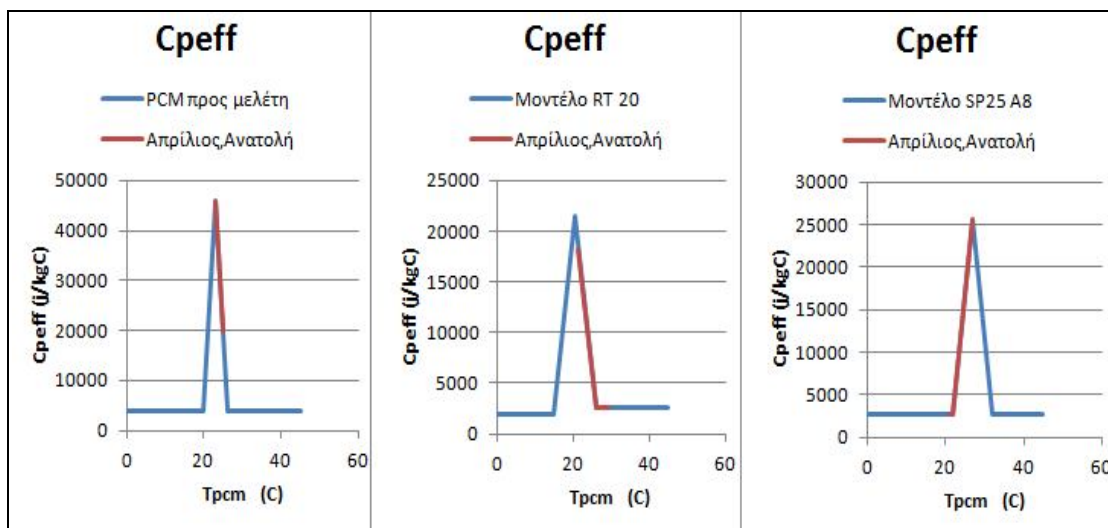
Σχήμα 6.1.30 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Απριλίου τοποθετημένα σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 6.1.31 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .

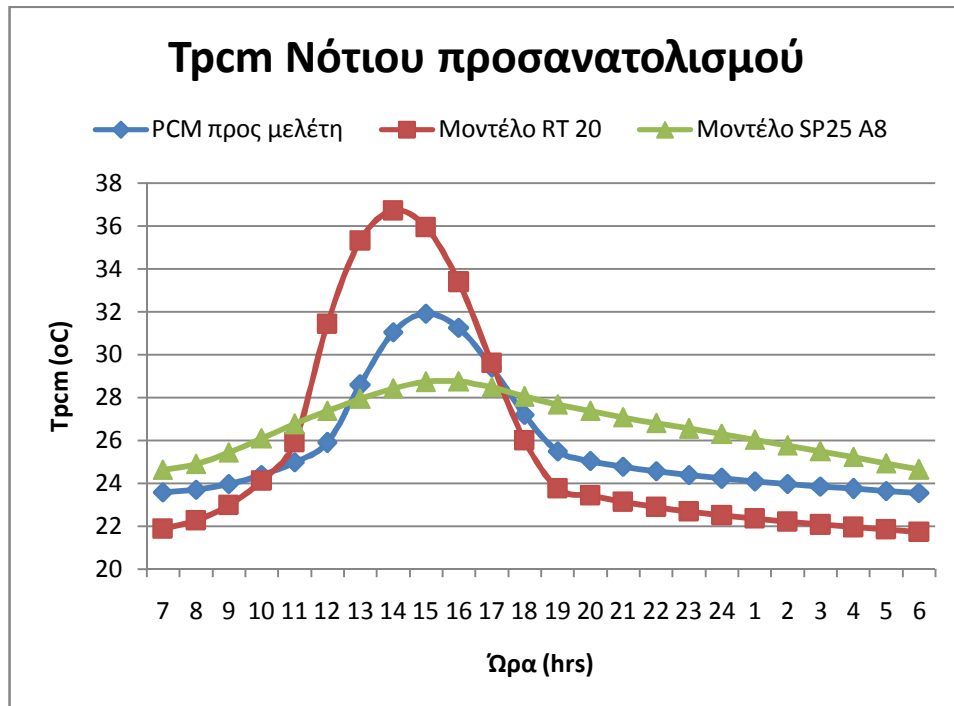


Σχήμα 6.1.32 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Απριλίου τοποθετημένα σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.

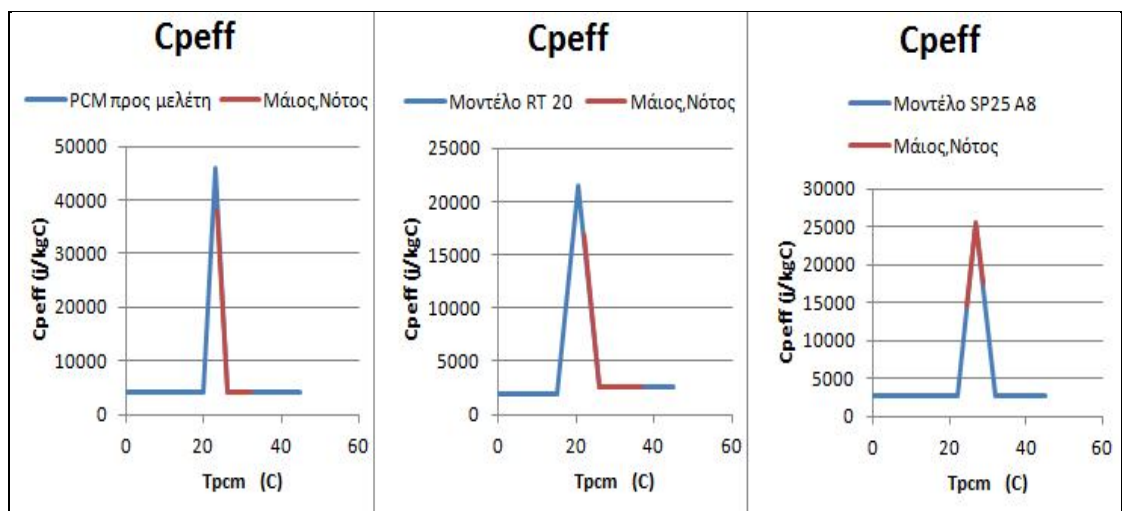


Σχήμα 6.1.33 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .

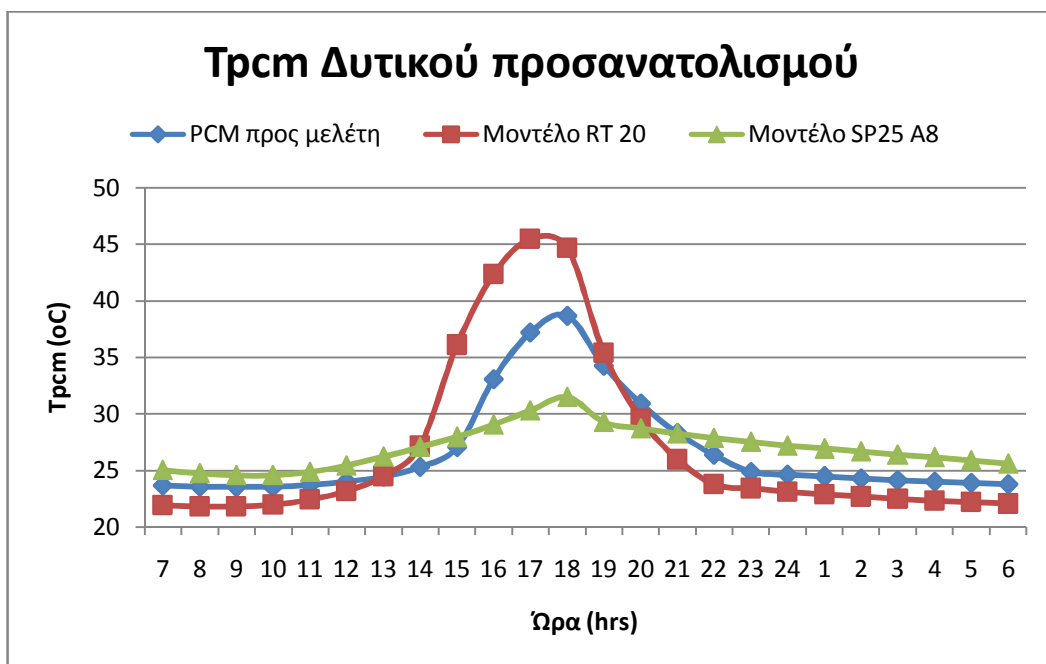
❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαΐου :



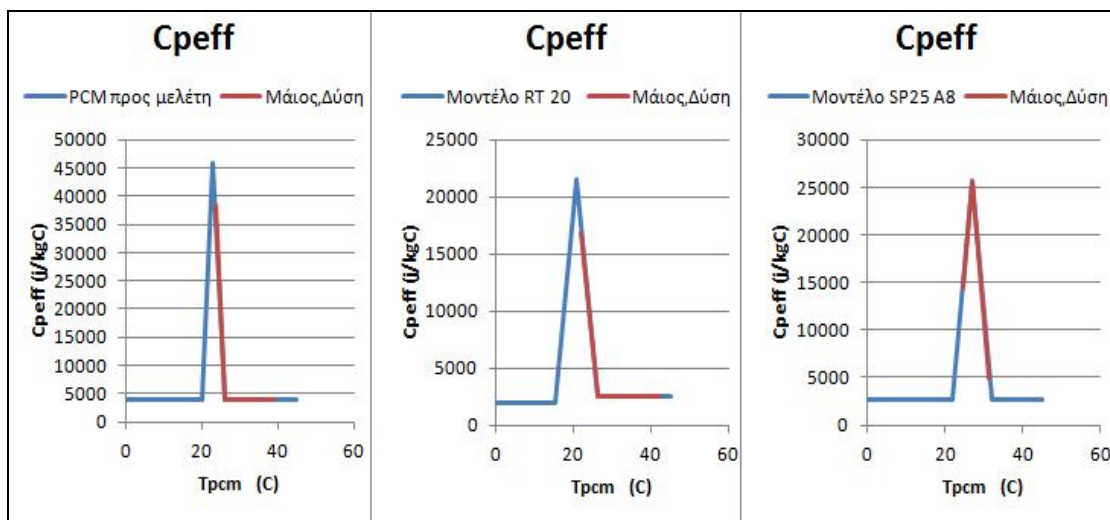
Σχήμα 6.1.34 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαΐου τοποθετημένα σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 6.1.35 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .

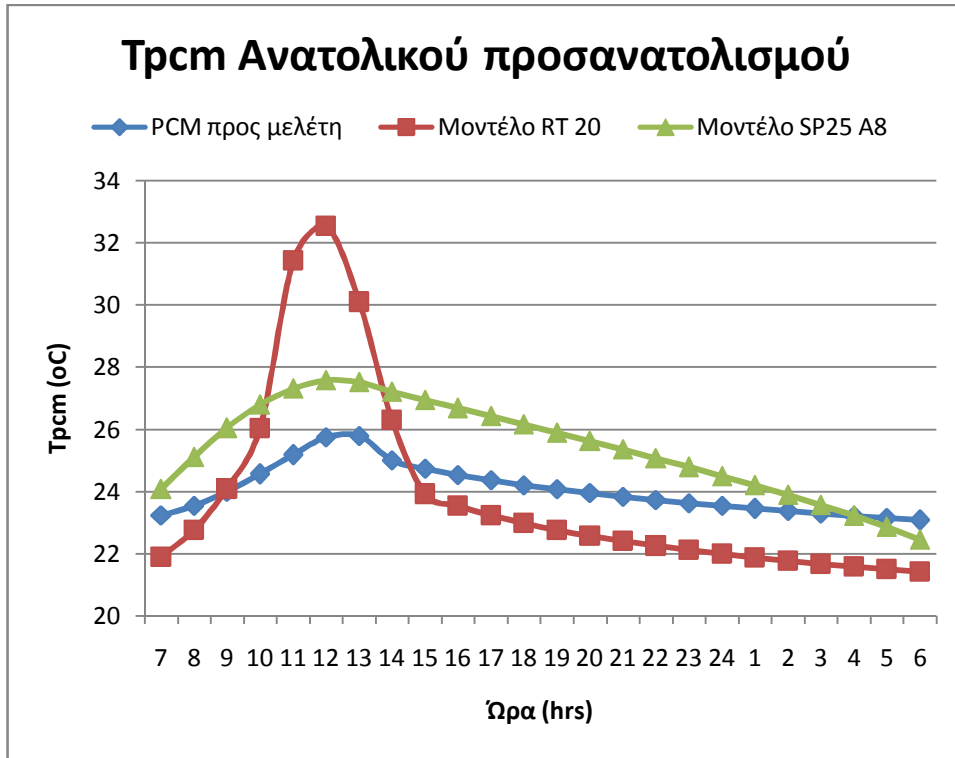


Σχήμα 6.1.36 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαΐου τοποθετημένα σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

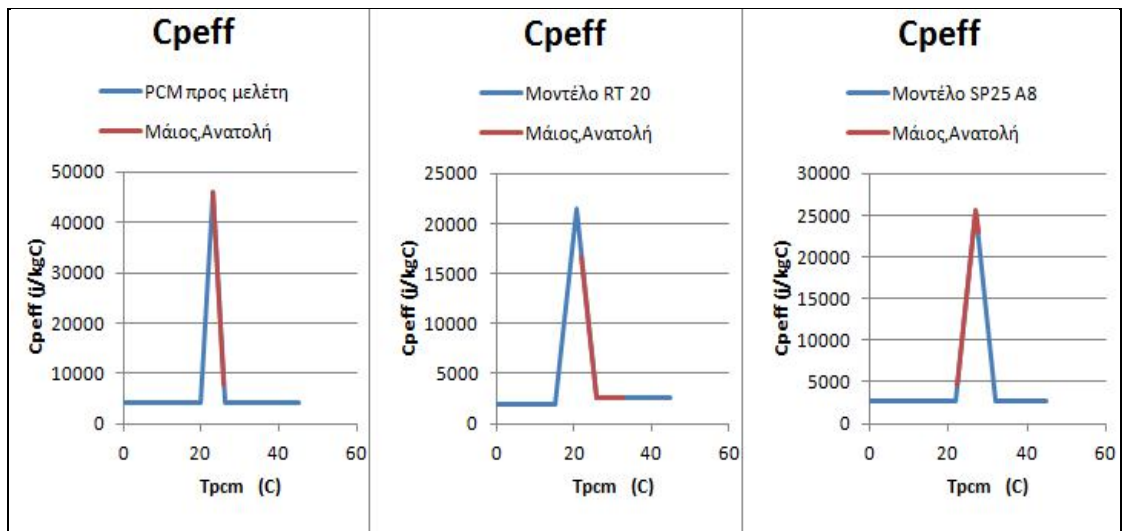


Σχήμα 6.1.37 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .



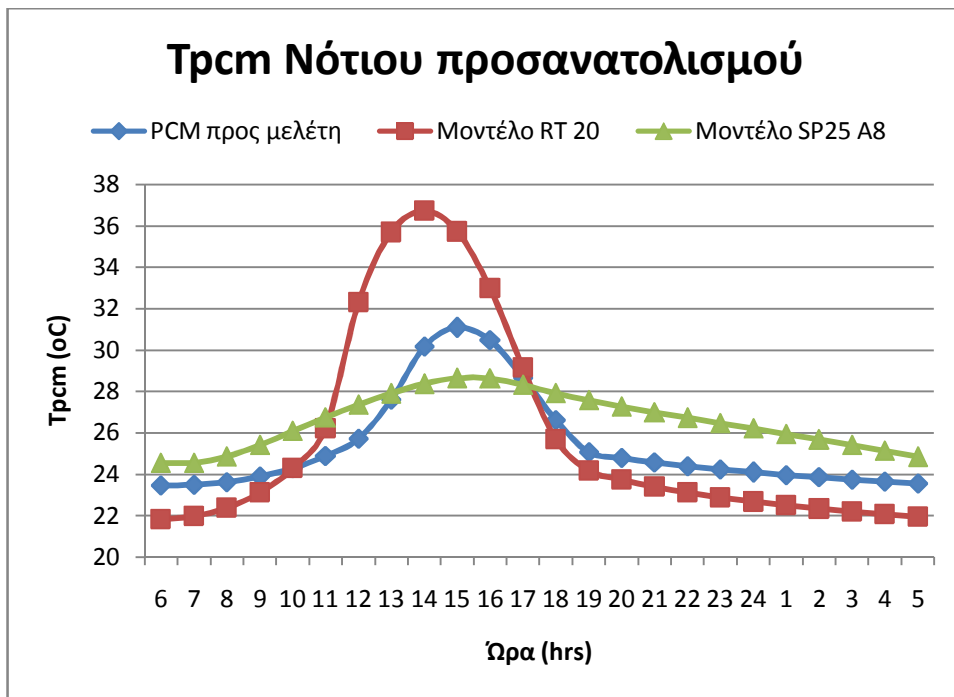


Σχήμα 6.1.38 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαΐου τοποθετημένα σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.

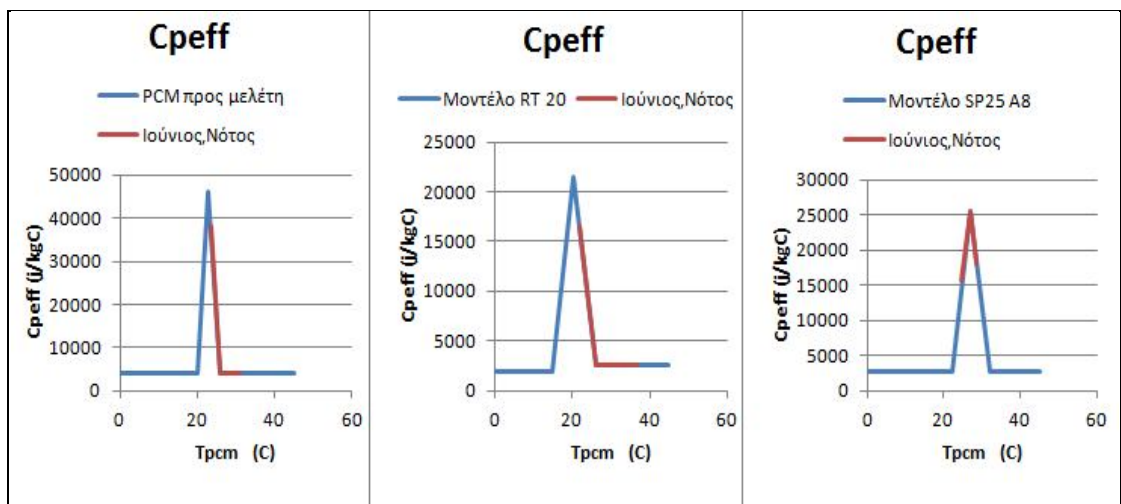


Σχήμα 6.1.39 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .

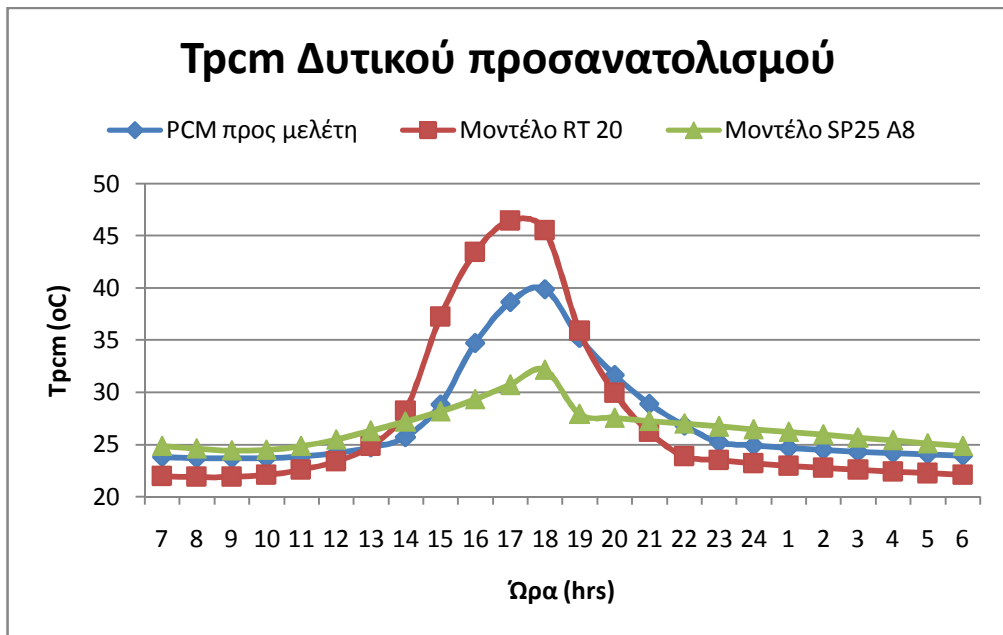
❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου



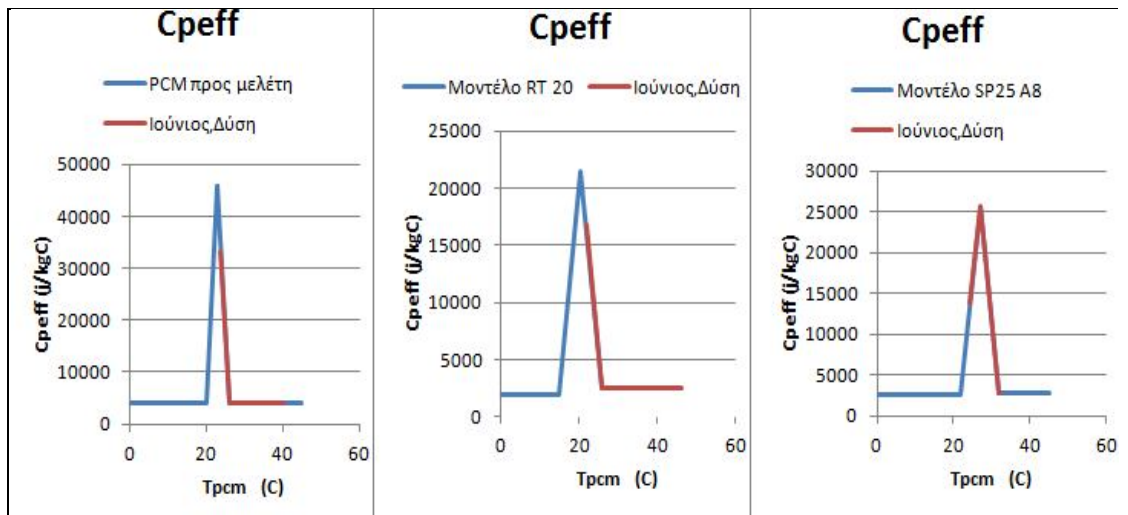
Σχήμα 6.1.40 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου τοποθετημένα σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



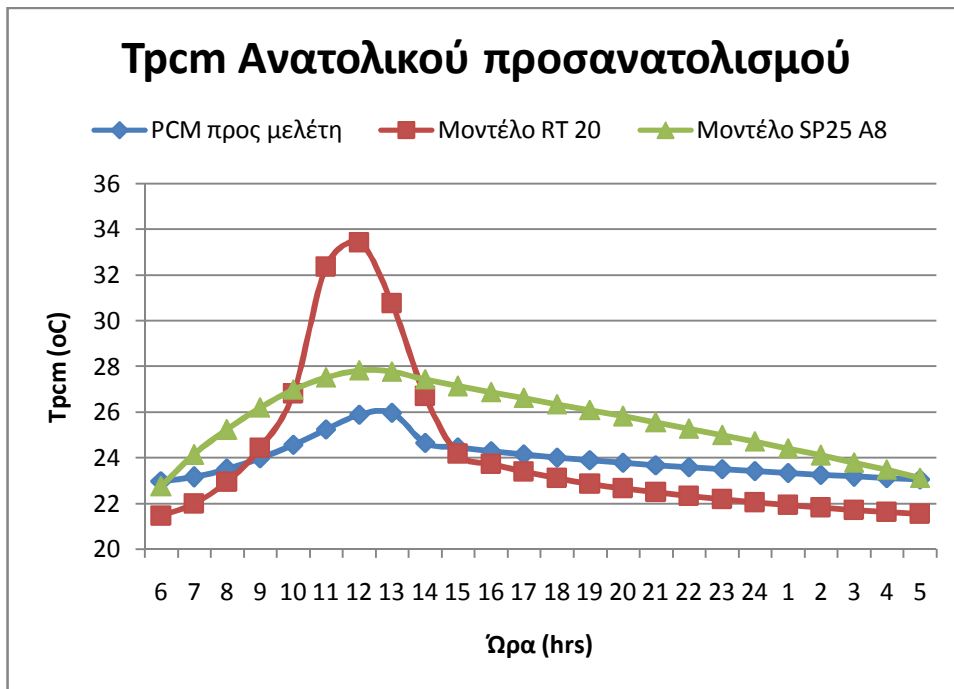
Σχήμα 6.1.41 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.



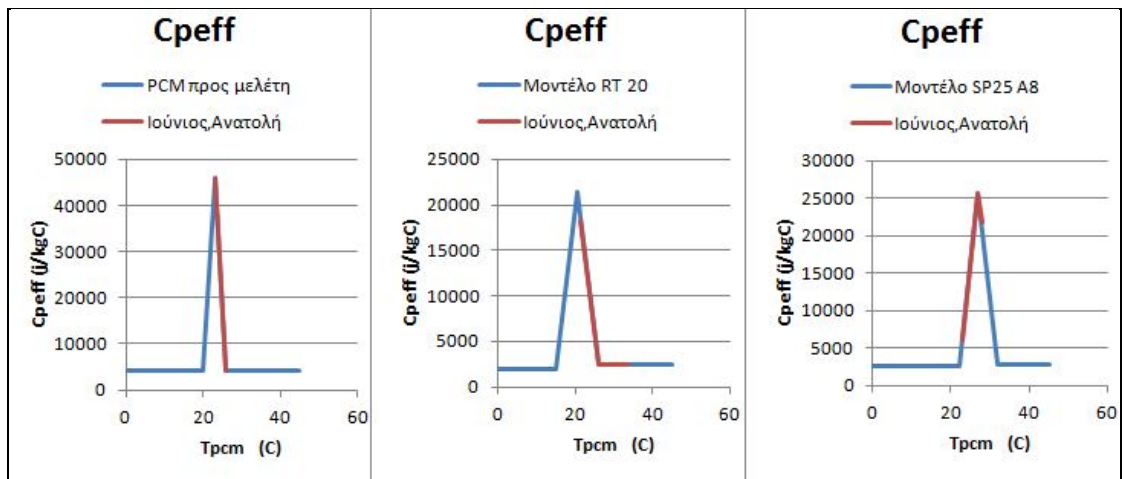
Σχήμα 6.1.42 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου τοποθετημένα σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 6.1.43 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .

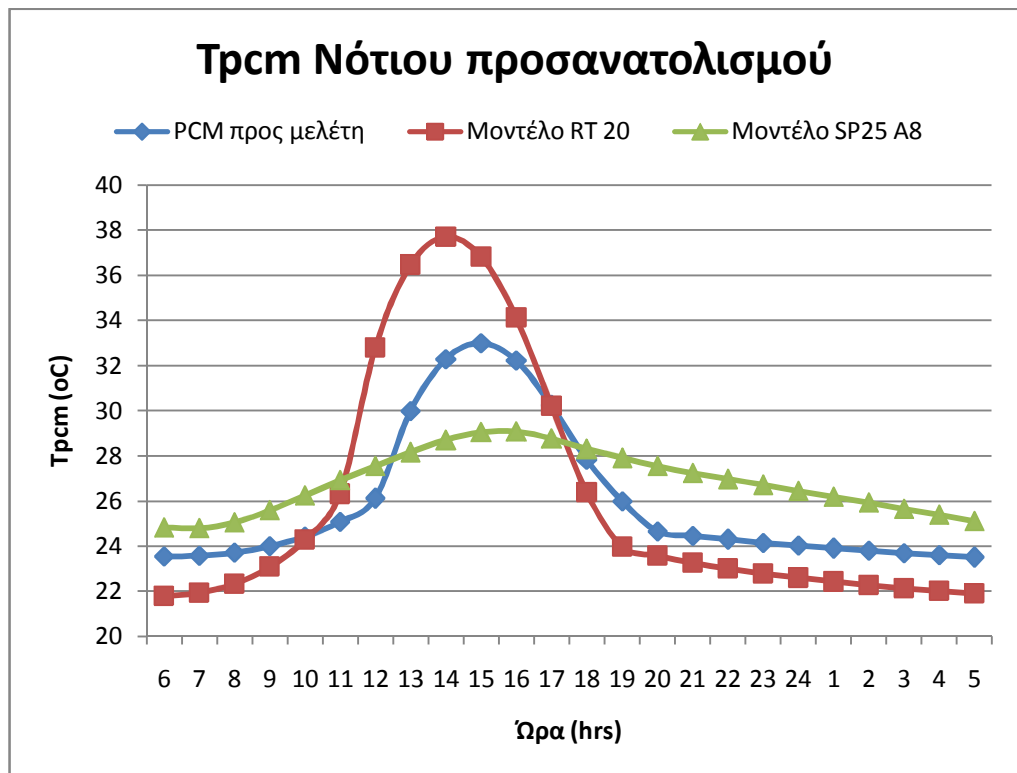


Σχήμα 6.1.44 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου τοποθετημένα σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.

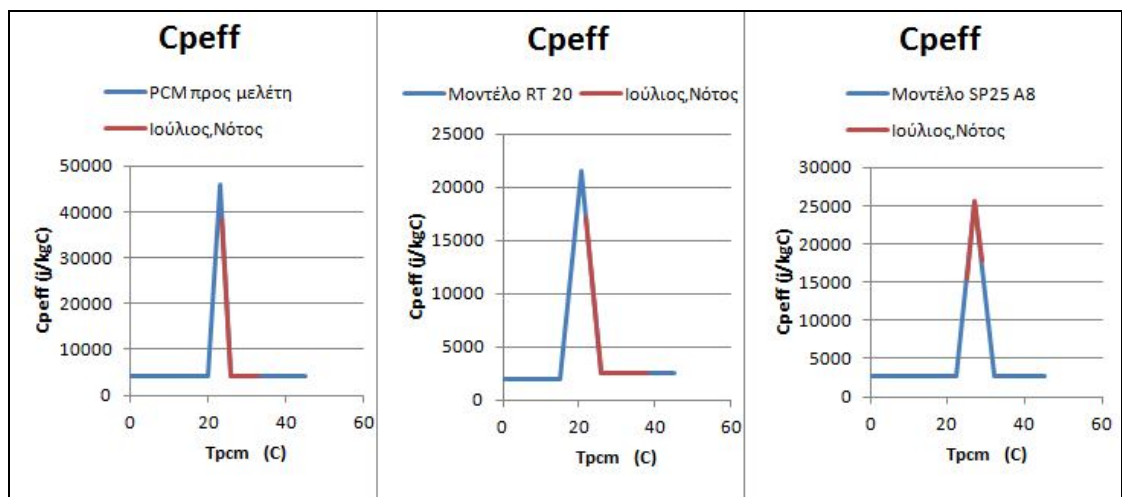


Σχήμα 6.1.45 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .

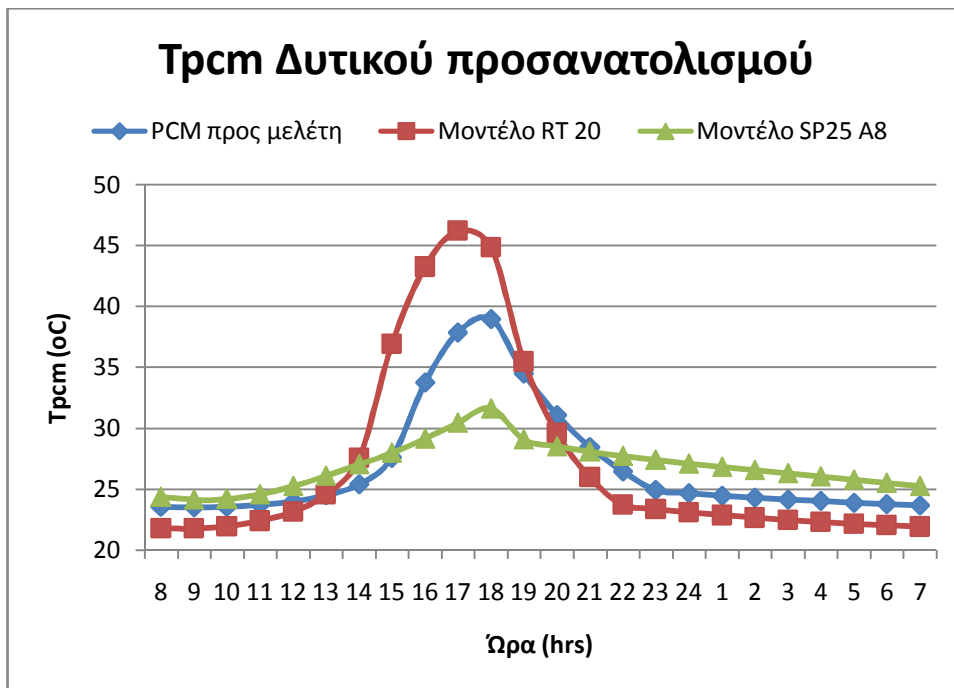
❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου :



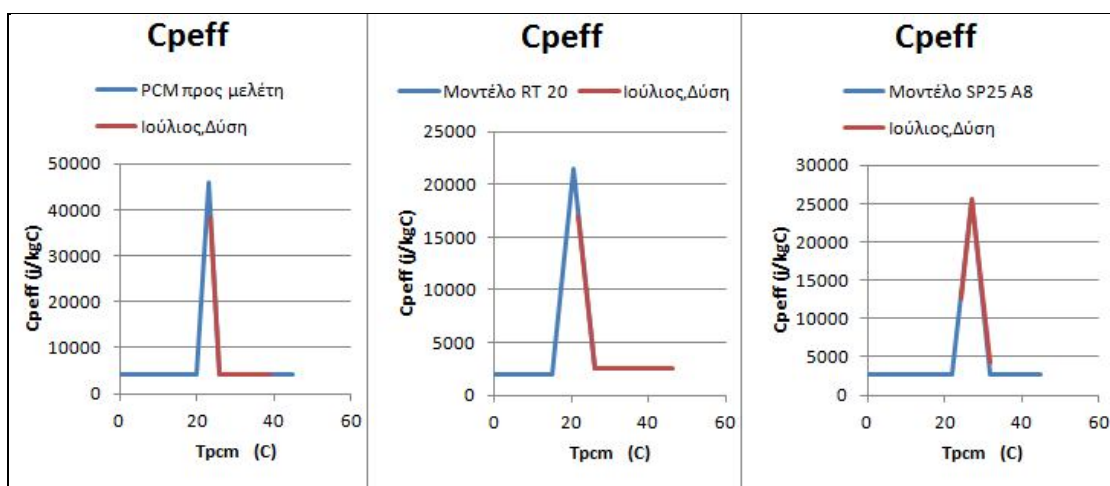
Σχήμα 6.146 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου τοποθετημένα σε τώχο νότιου προσανατολισμού.



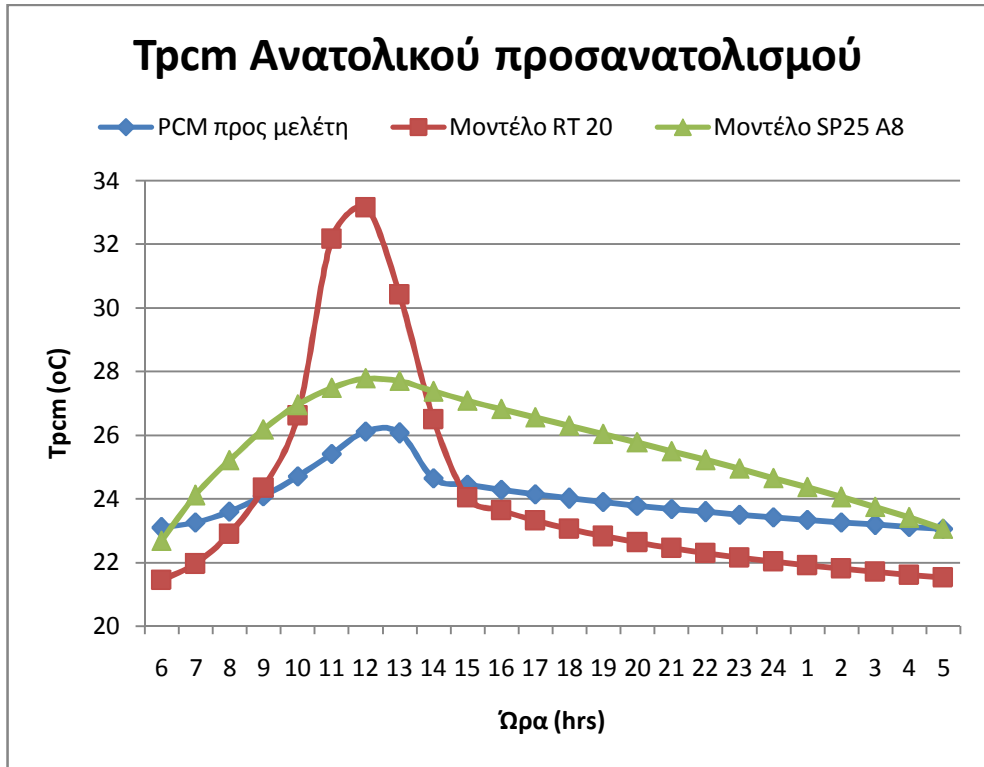
Σχήμα 6.147 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .



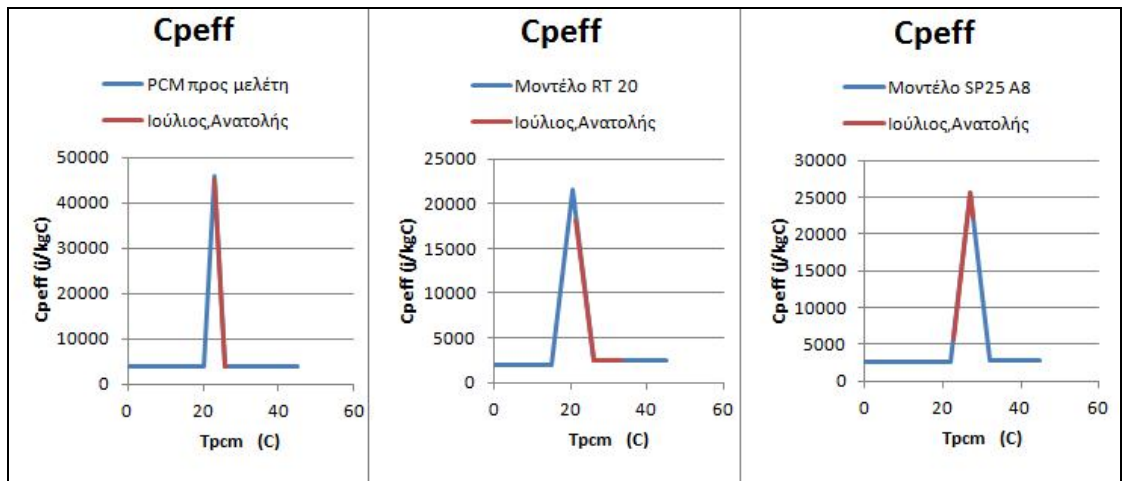
Σχήμα 6.1.48 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου τοποθετημένα σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 6.1.49 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .

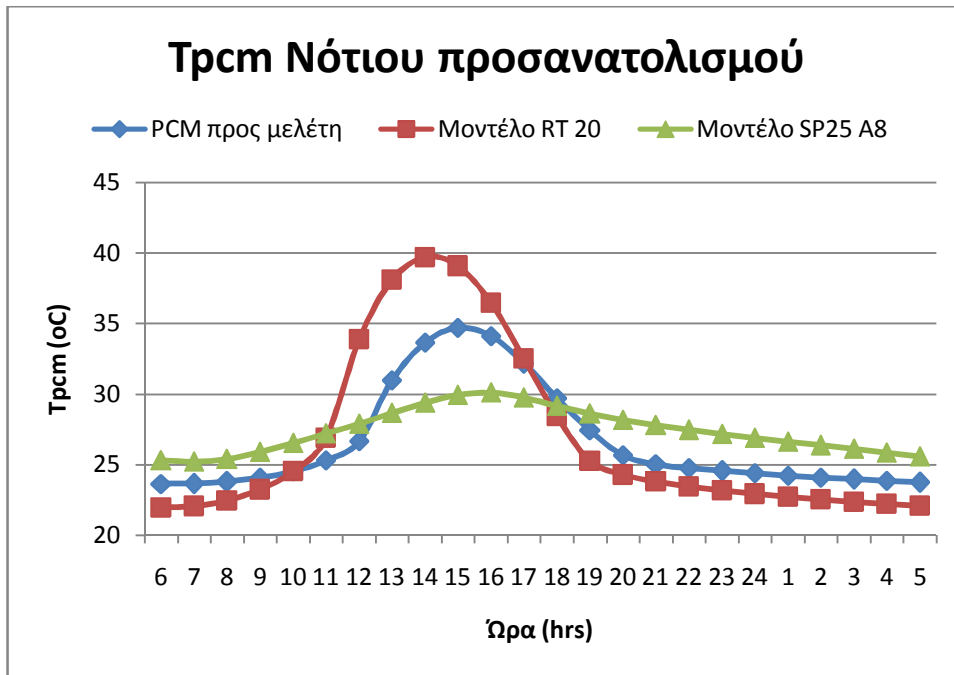


Σχήμα 6.1.50 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρης τοποθετημένα σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.

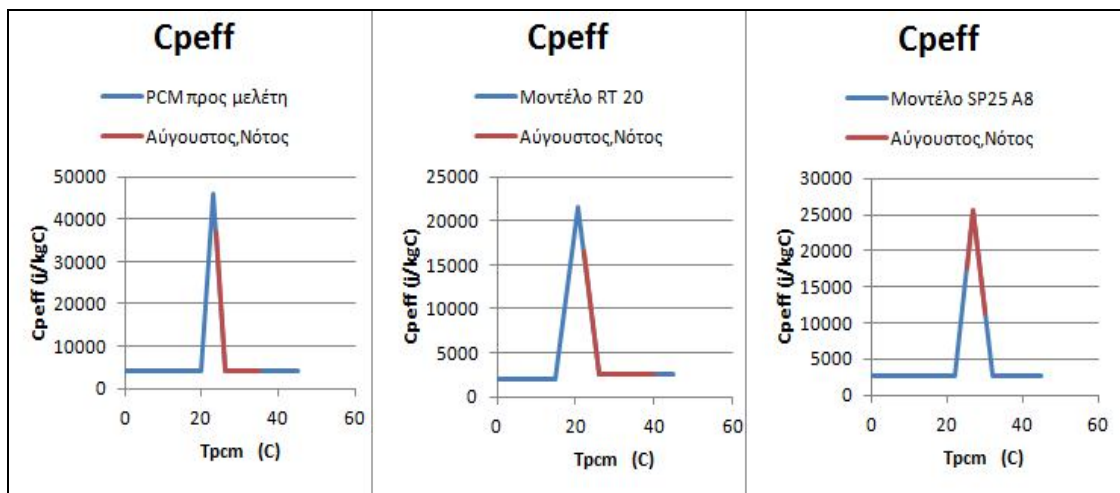


Σχήμα 6.1.51 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .

❖ Για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου

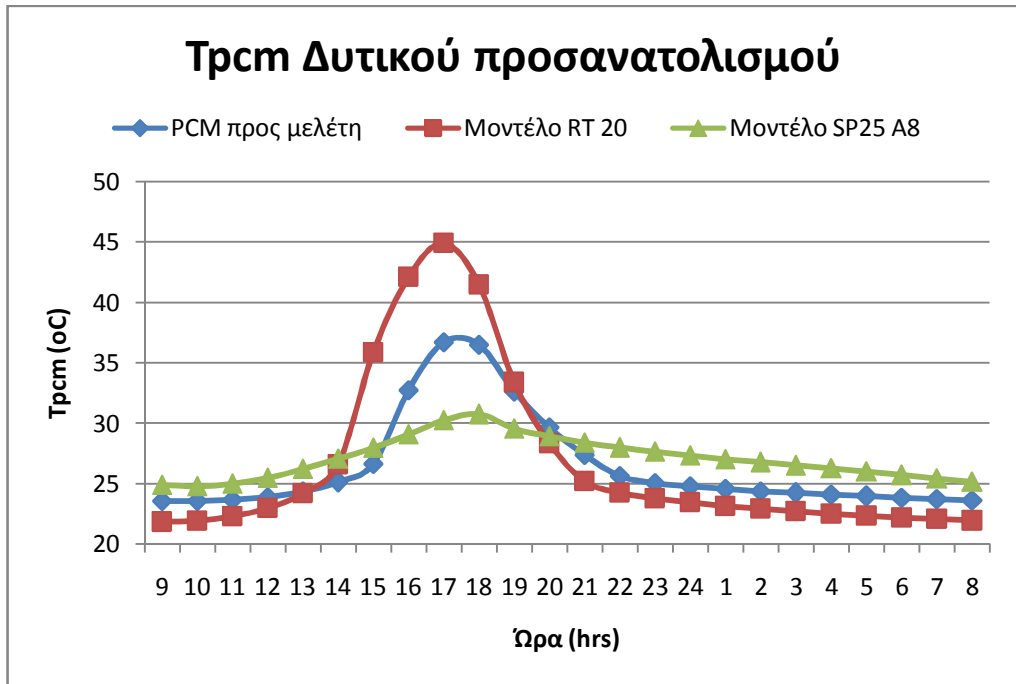


Σχήμα 6.1.52 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου τοποθετημένα σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.

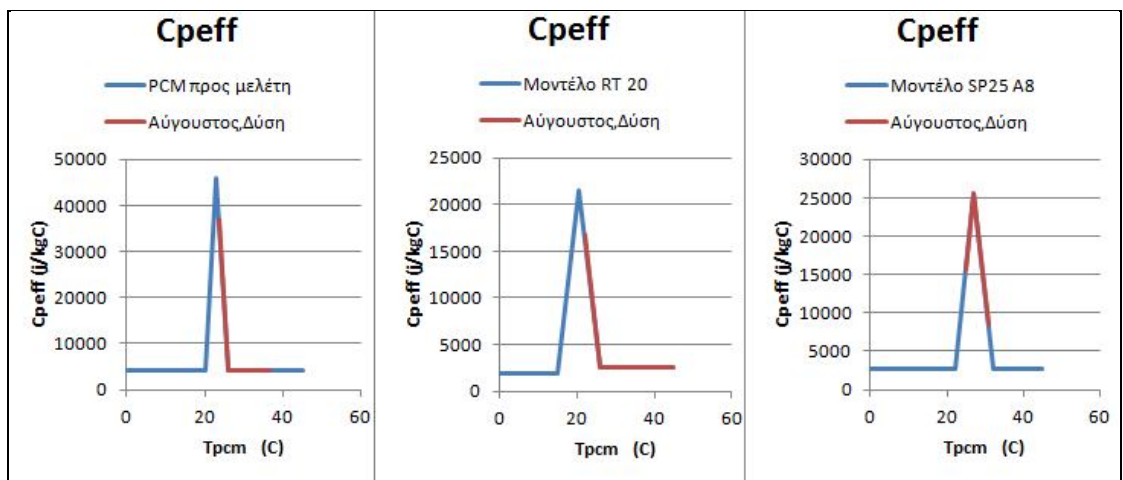


Σχήμα 6.1.53 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.

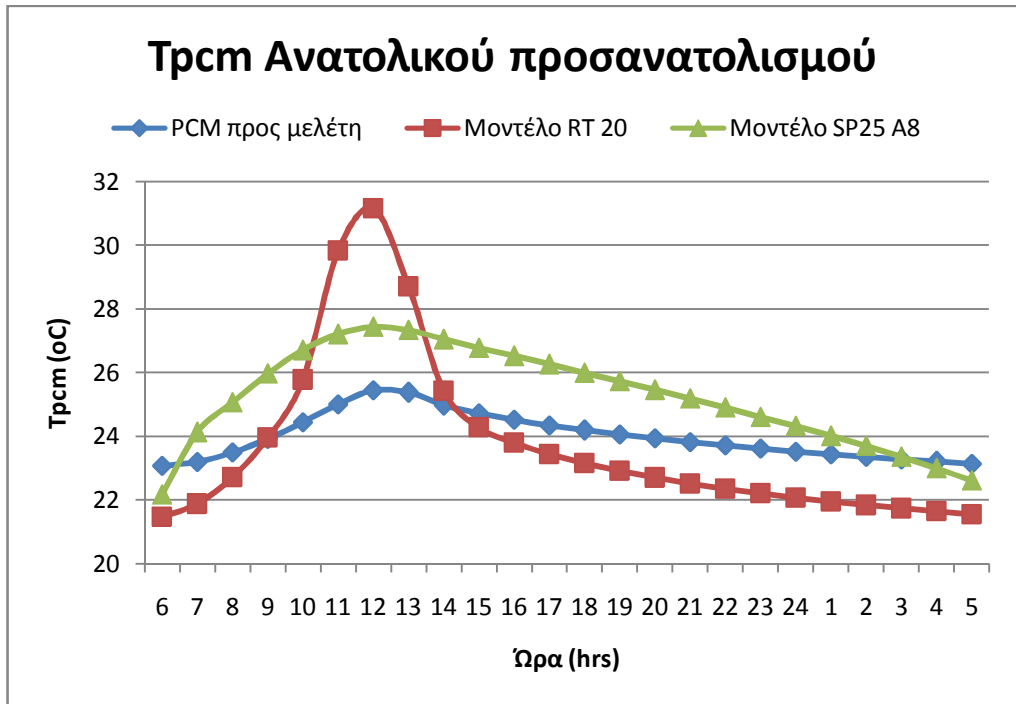




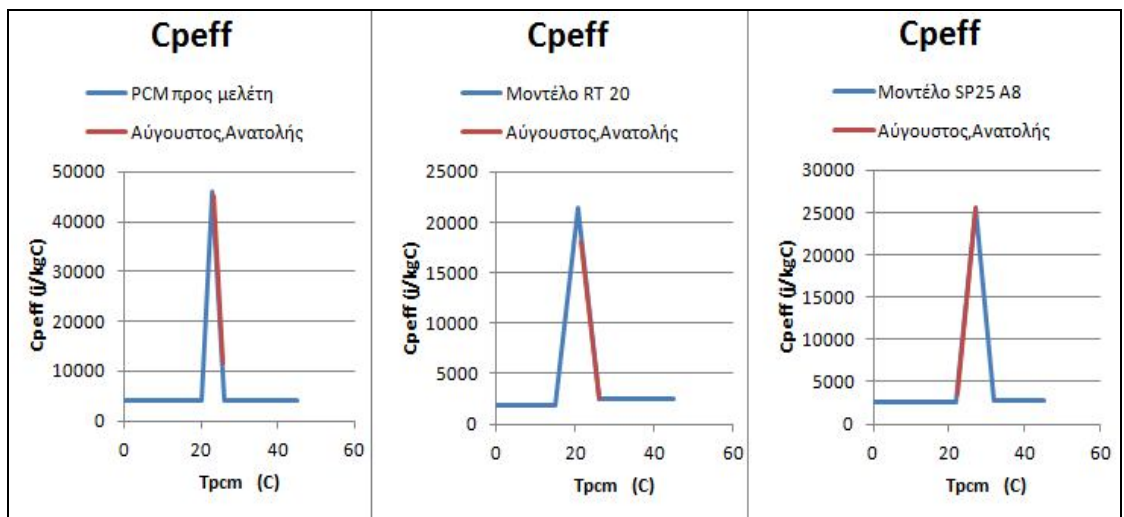
Σχήμα 6.1.54 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου τοποθετημένα σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 6.1.55 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.

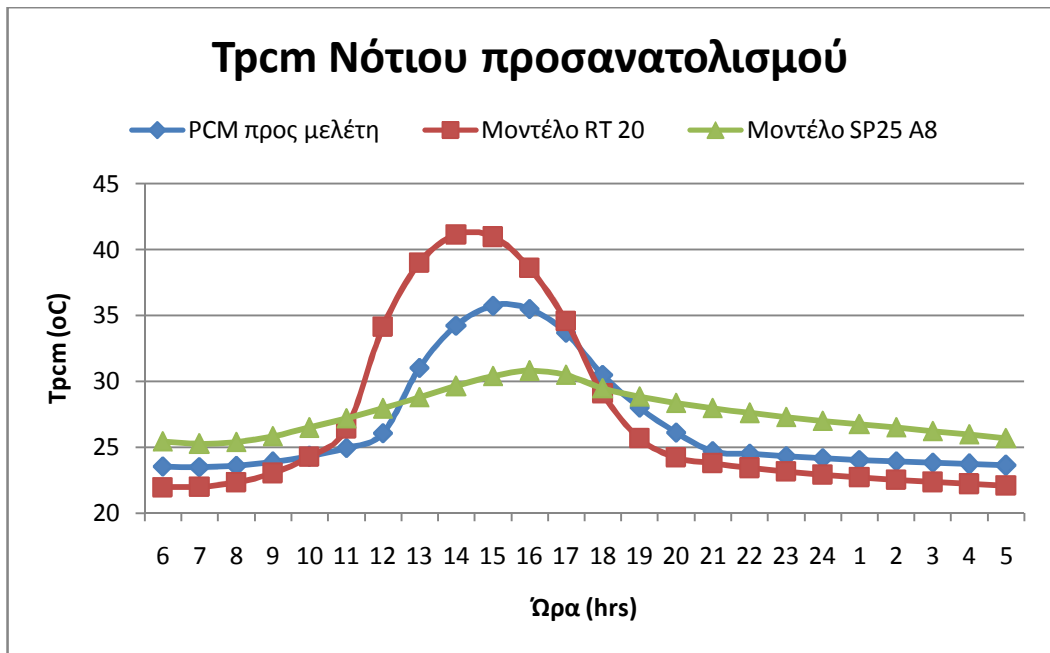


Σχήμα 6.1.56 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου τοποθετημένα σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.

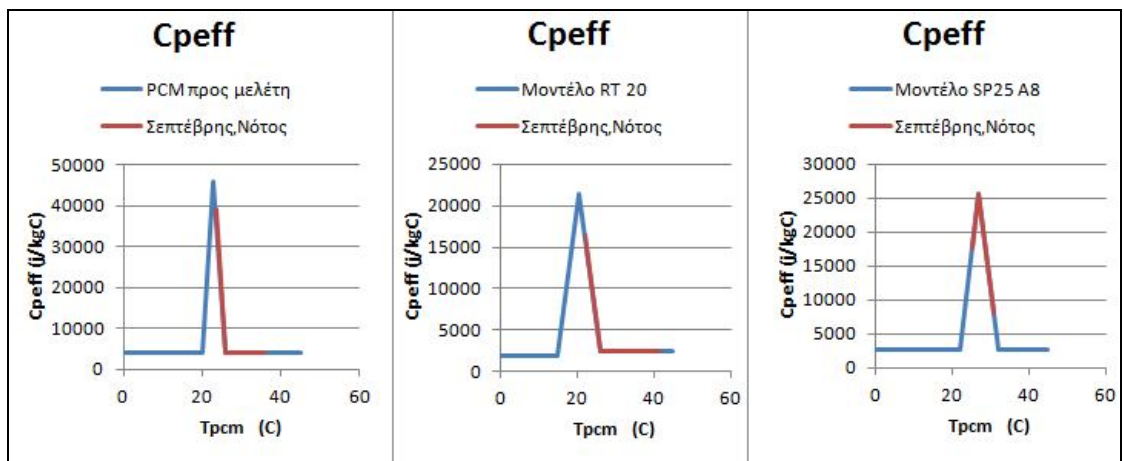


Σχήμα 6.1.57 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.

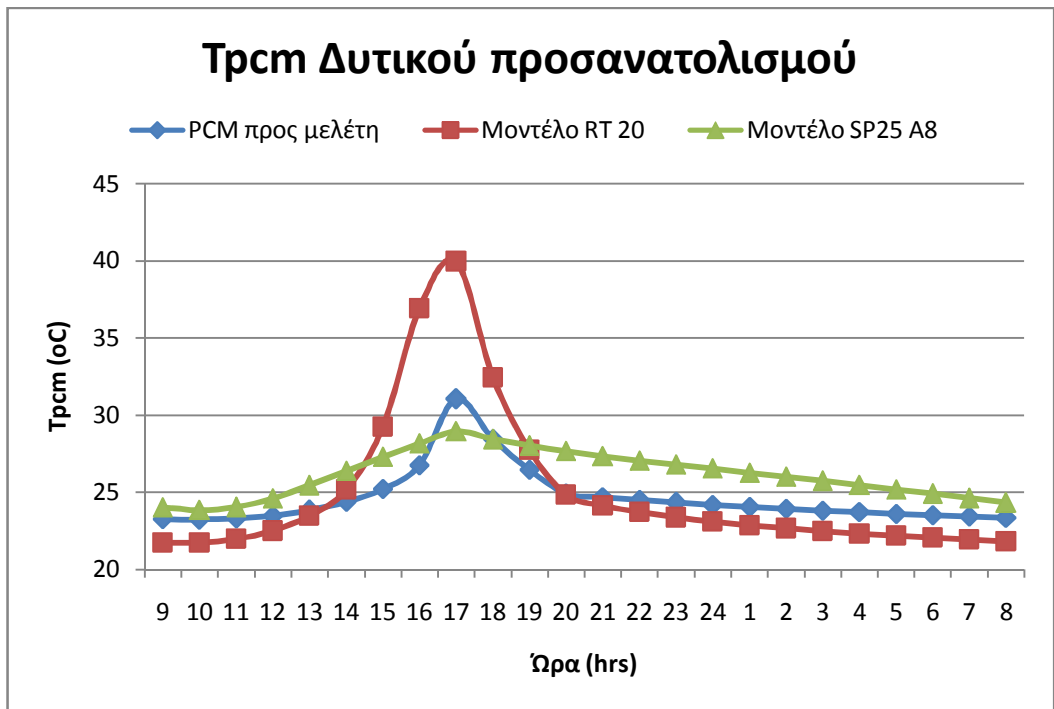
❖ Για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρη



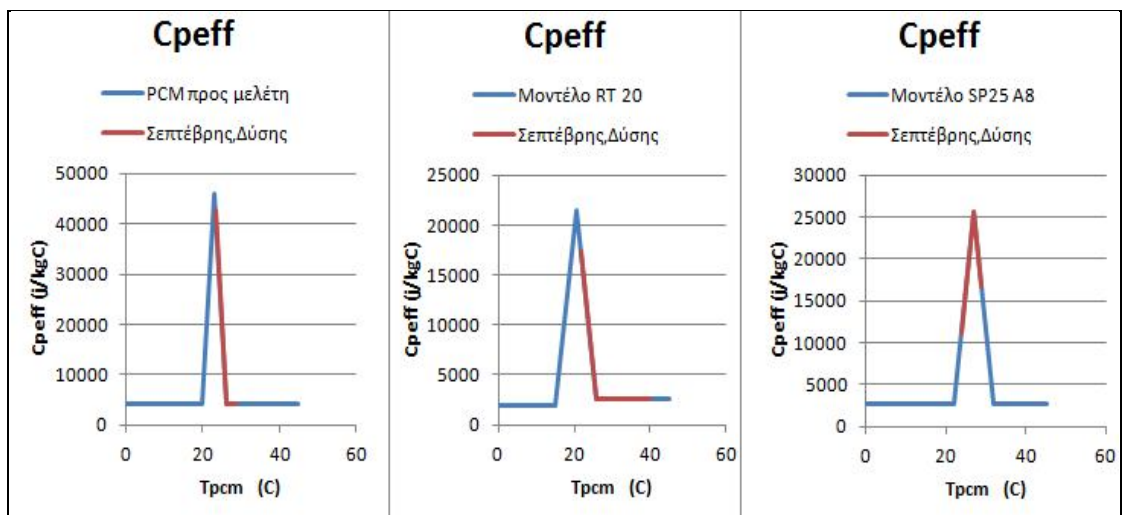
Σχήμα 6.1.58 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρης τοποθετημένα σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



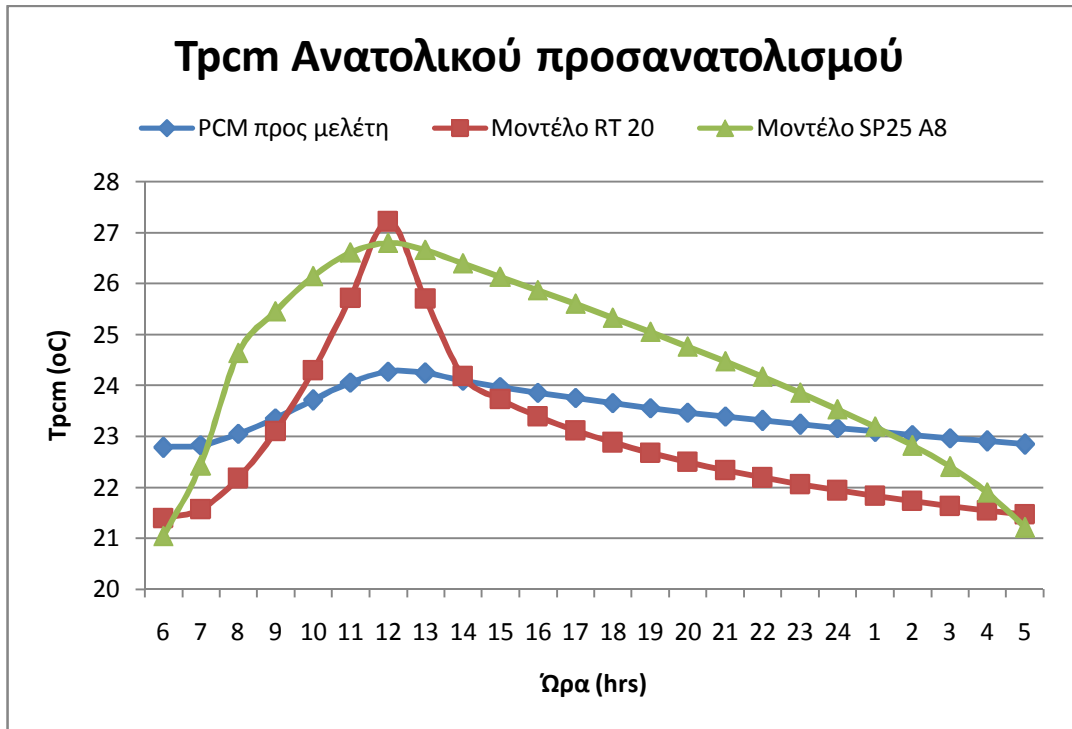
Σχήμα 6.1.59 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .



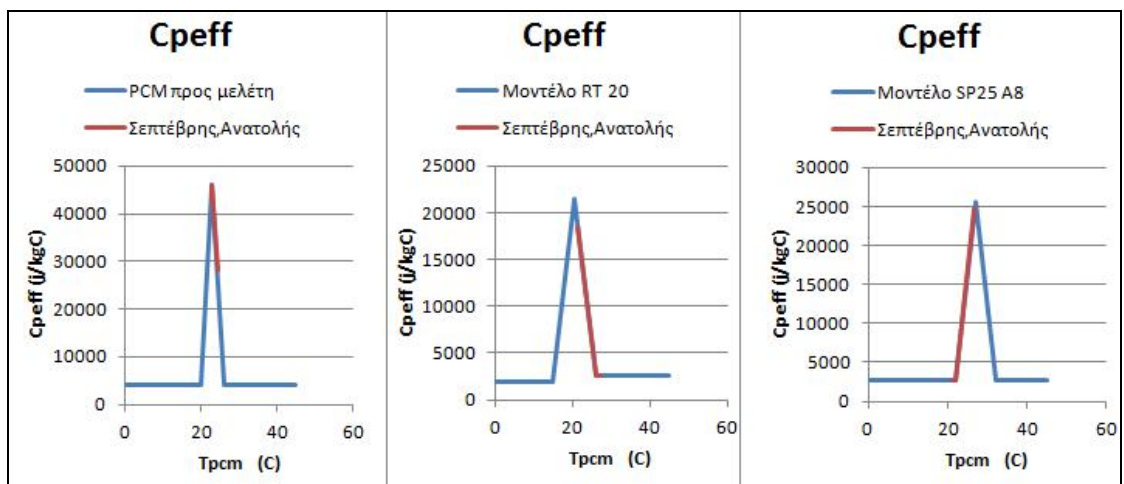
Σχήμα 6.1.60 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου τοποθετημένα σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 6.1.61 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .

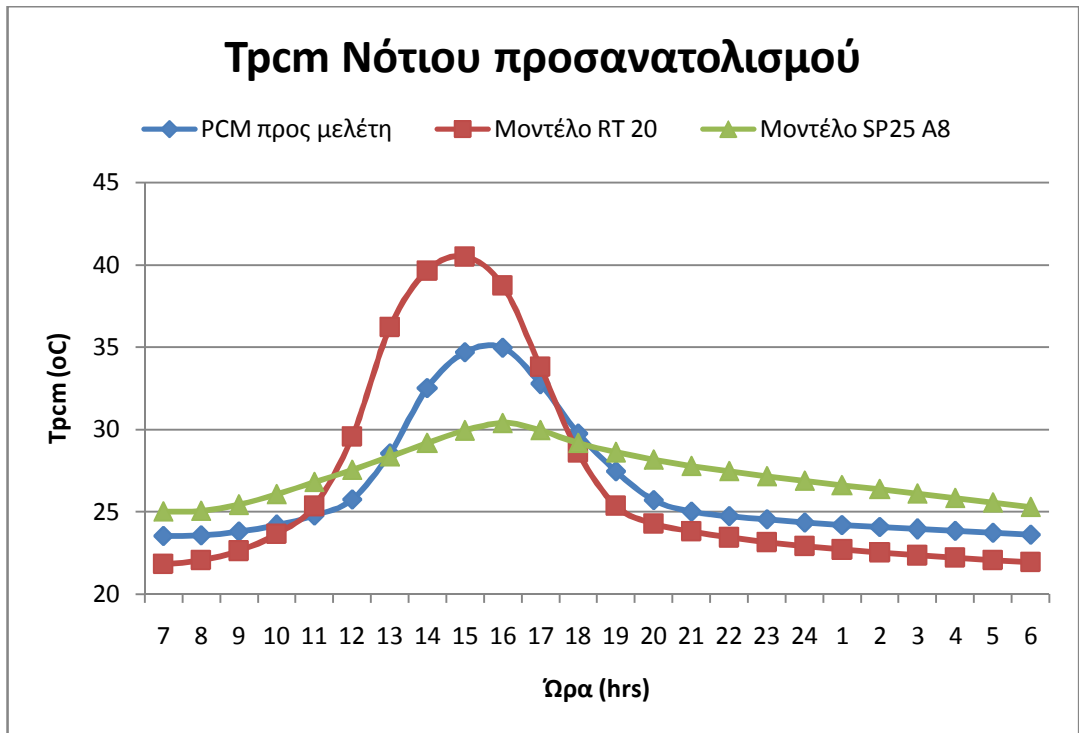


Σχήμα 6.1.62 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου τοποθετημένα σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.

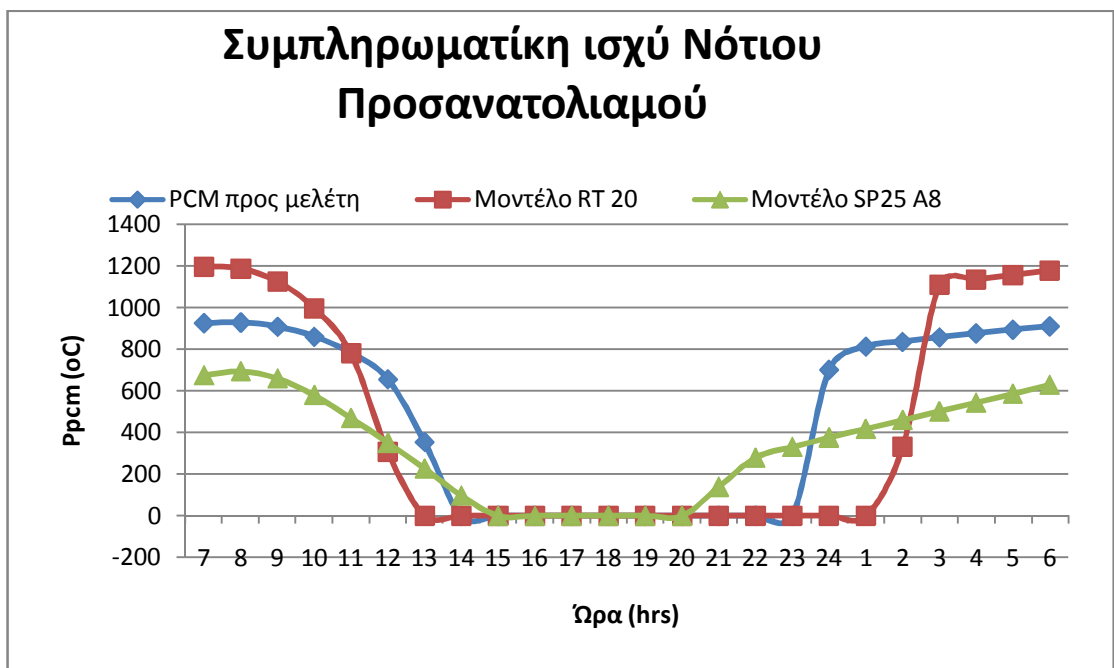


Σχήμα 6.1.63 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.

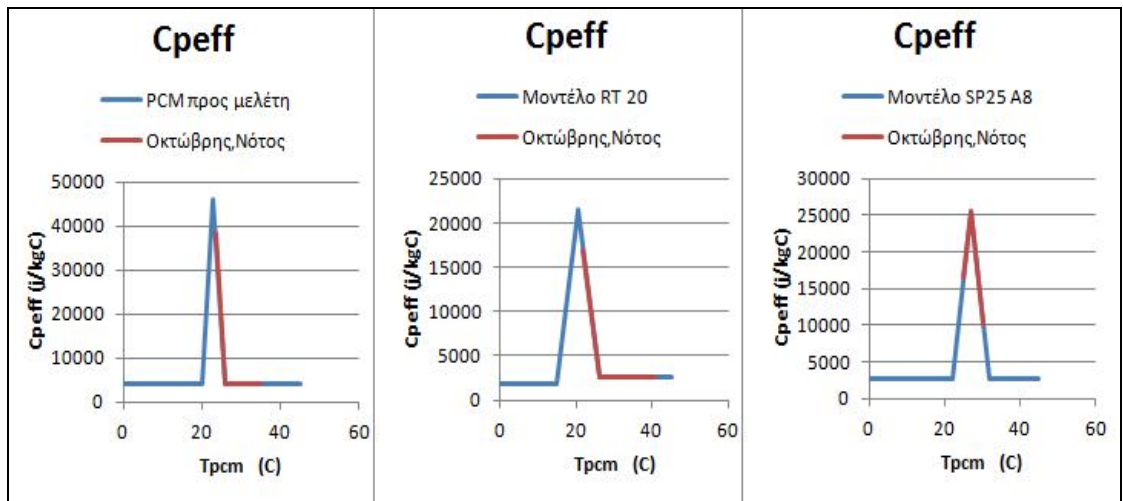
❖ Για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη



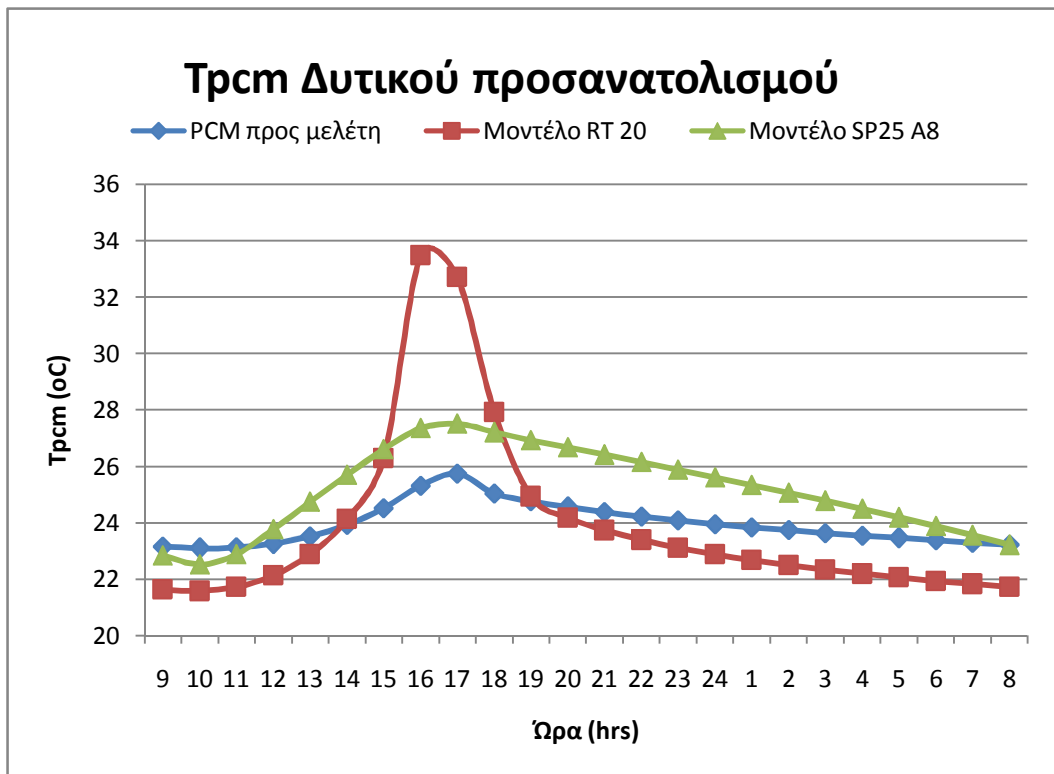
Σχήμα 6.1.64 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρης τοποθετημένα σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



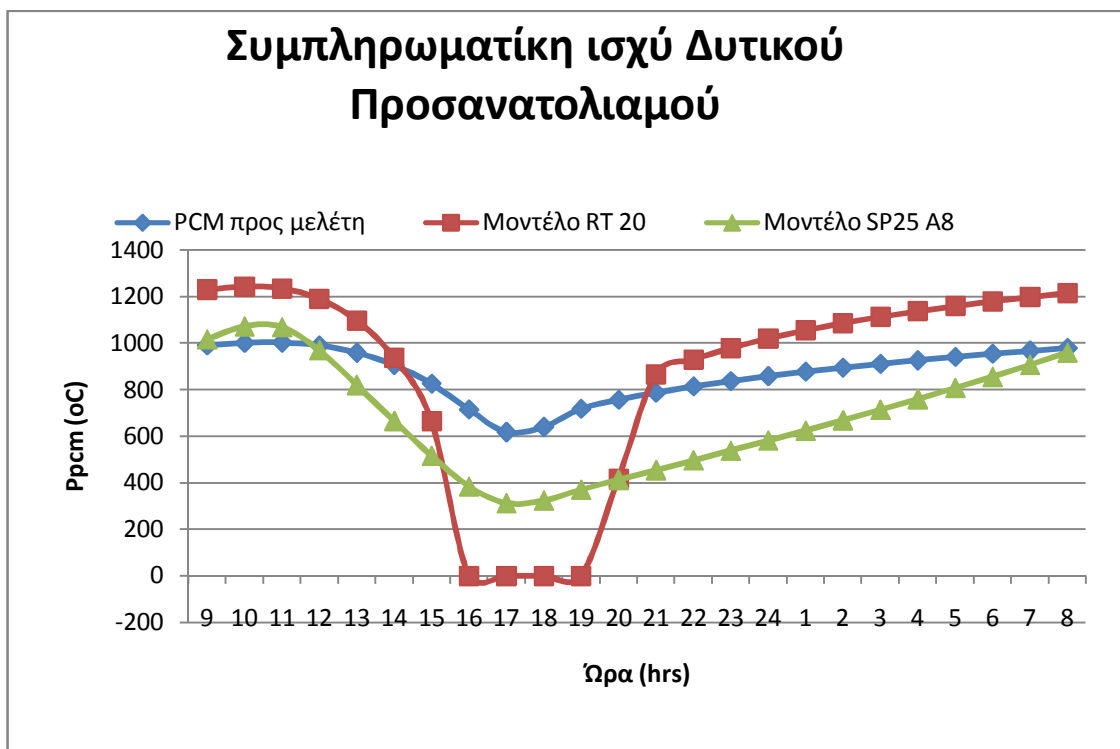
Σχήμα 6.1.65 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρης με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.



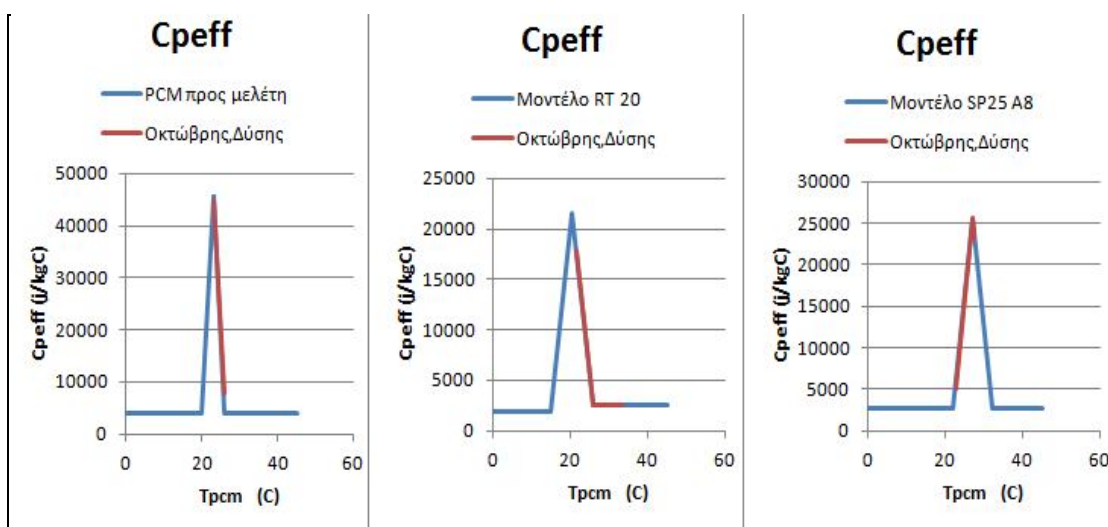
Σχήμα 6.1.66 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .



Σχήμα 6.1.67 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρης τοποθετημένα σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

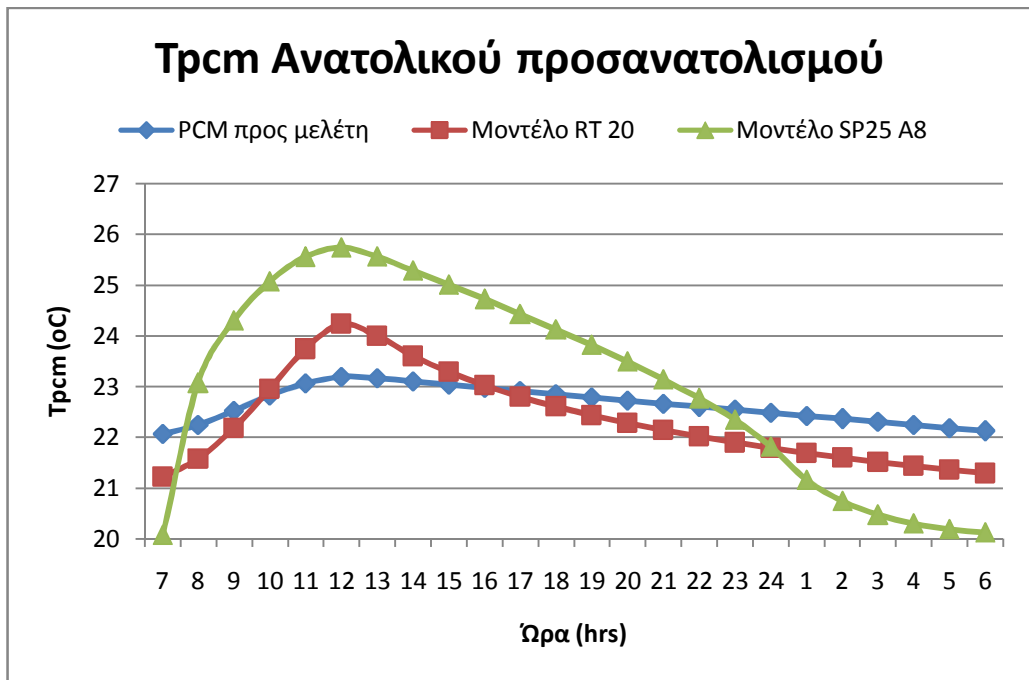


Σχήμα 6.1.68 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρης με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.

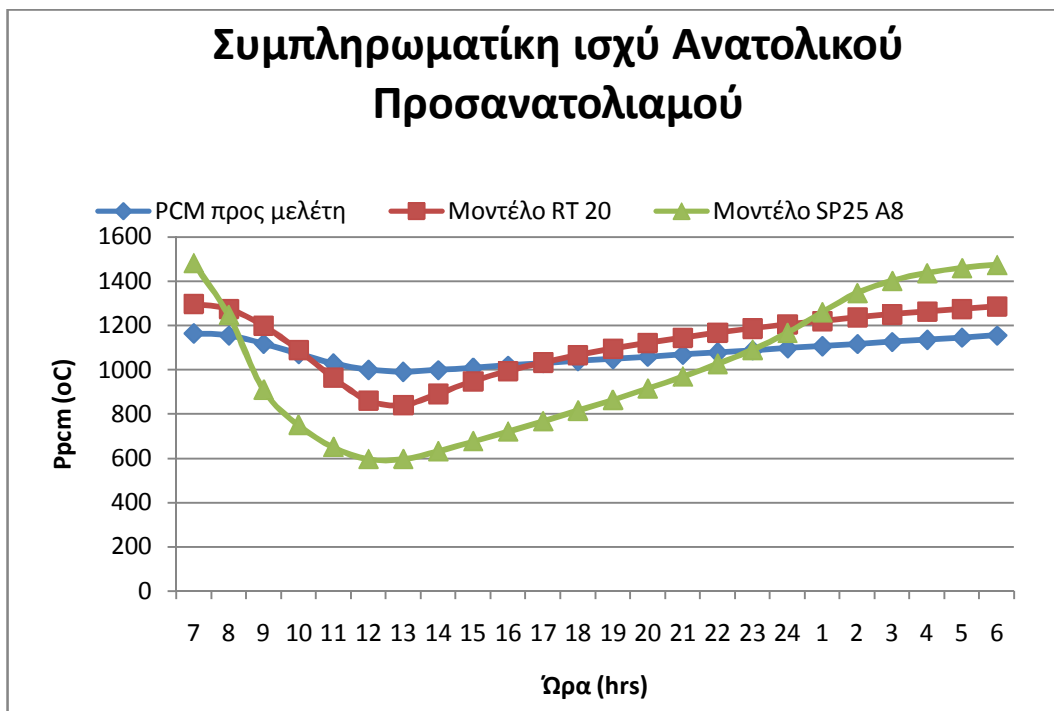


Σχήμα 6.1.69 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .

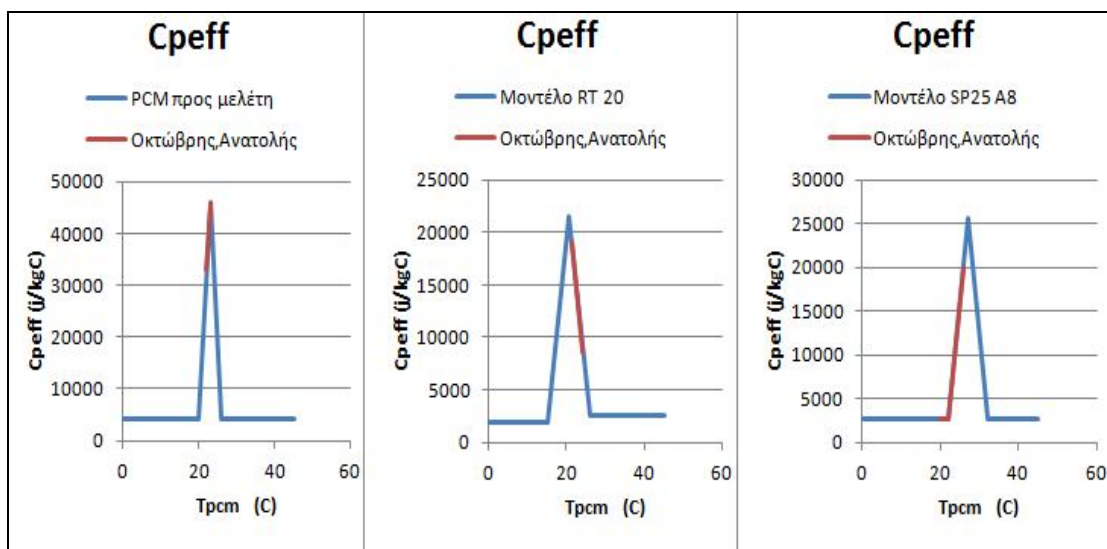




Σχήμα 6.1.70 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρης τοποθετημένα σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.

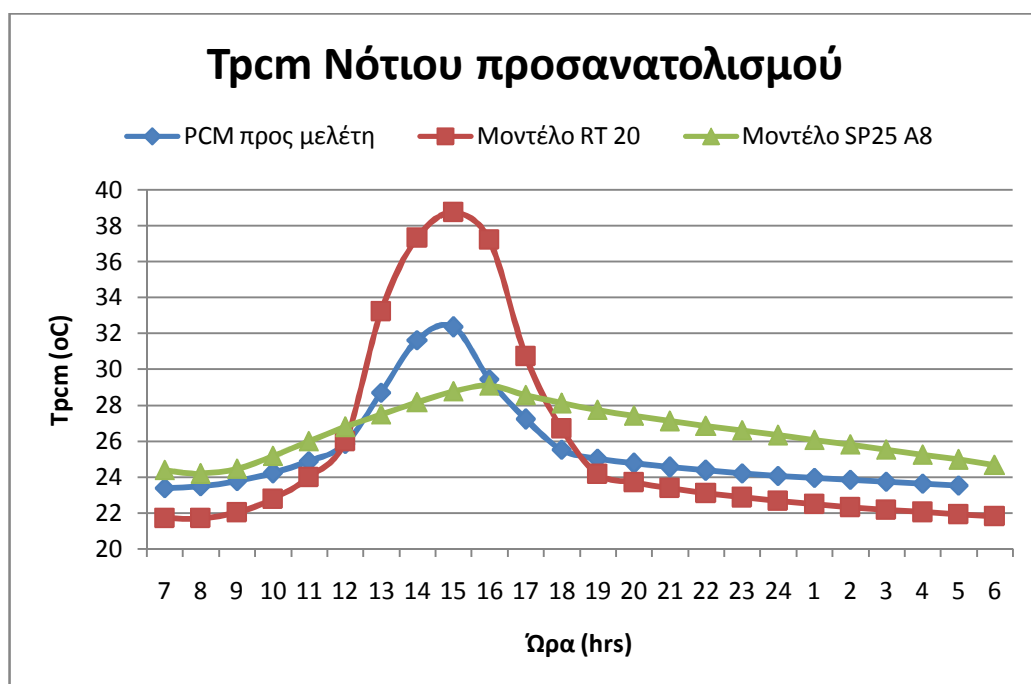


Σχήμα 6.1.71 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρης με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.

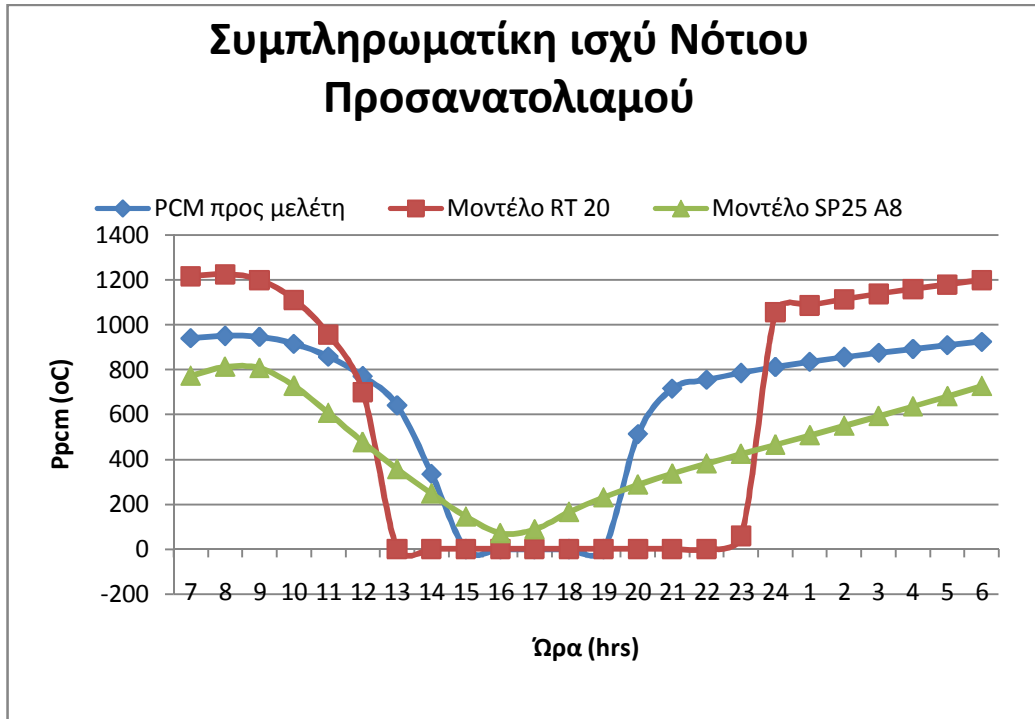


Σχήμα 6.1.72 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.

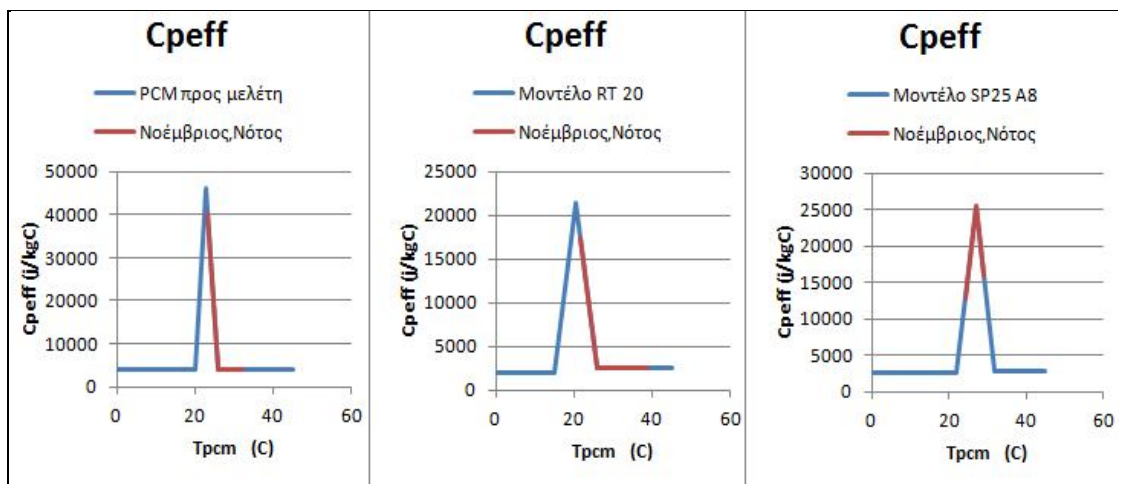
❖ Για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη



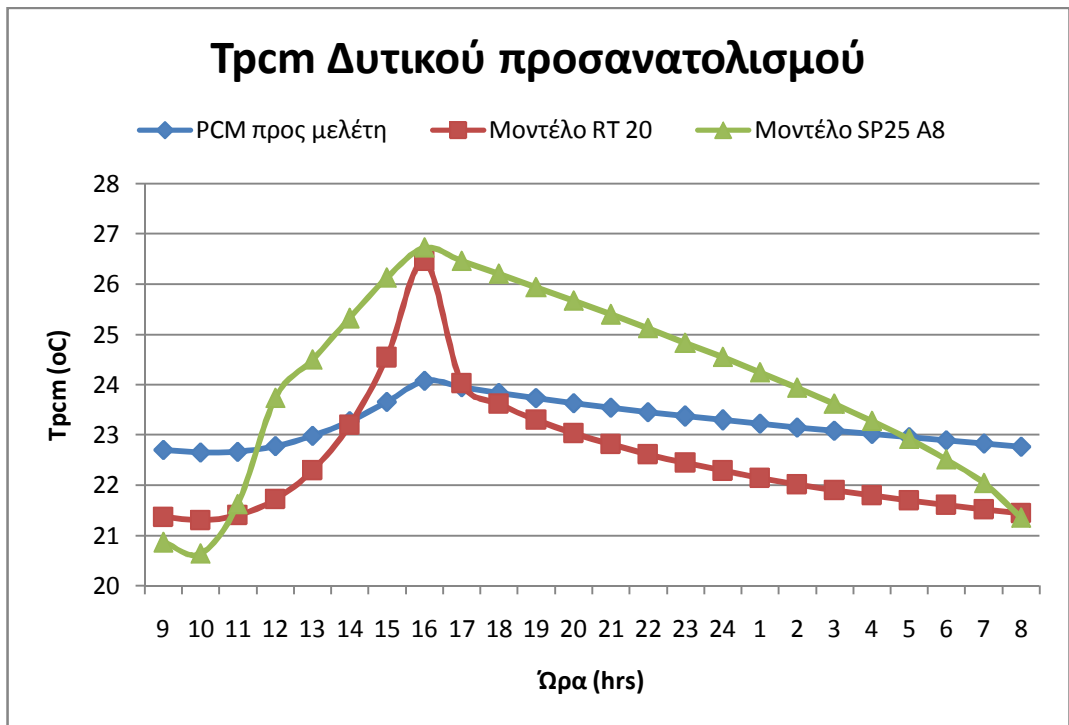
Σχήμα 6.1.73 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρης τοποθετημένα σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



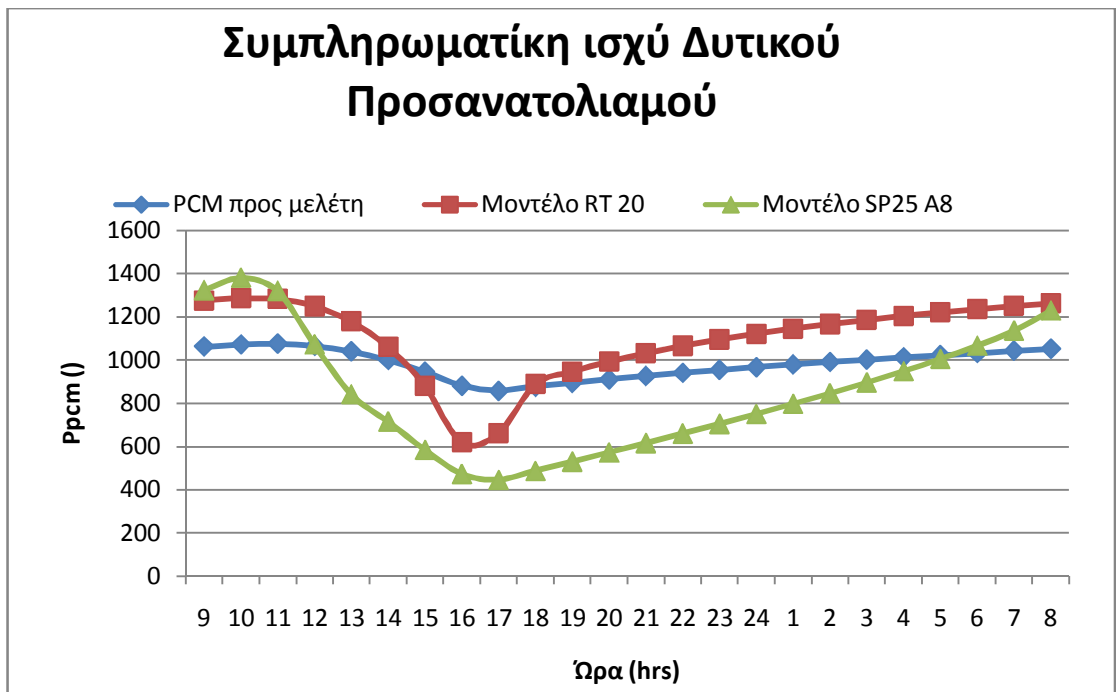
Σχήμα 6.1.74 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρης με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.



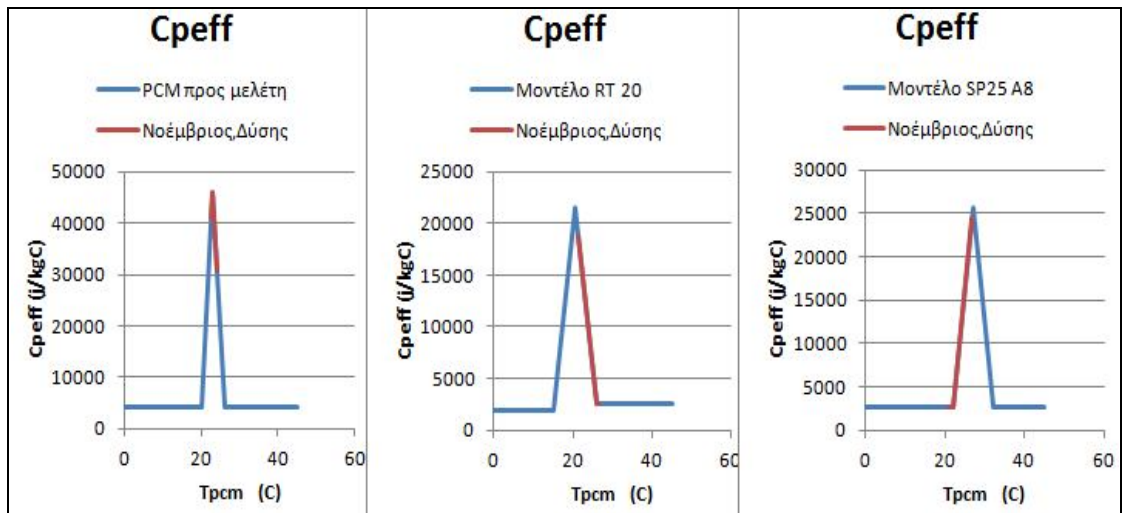
Σχήμα 6.1.75 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .



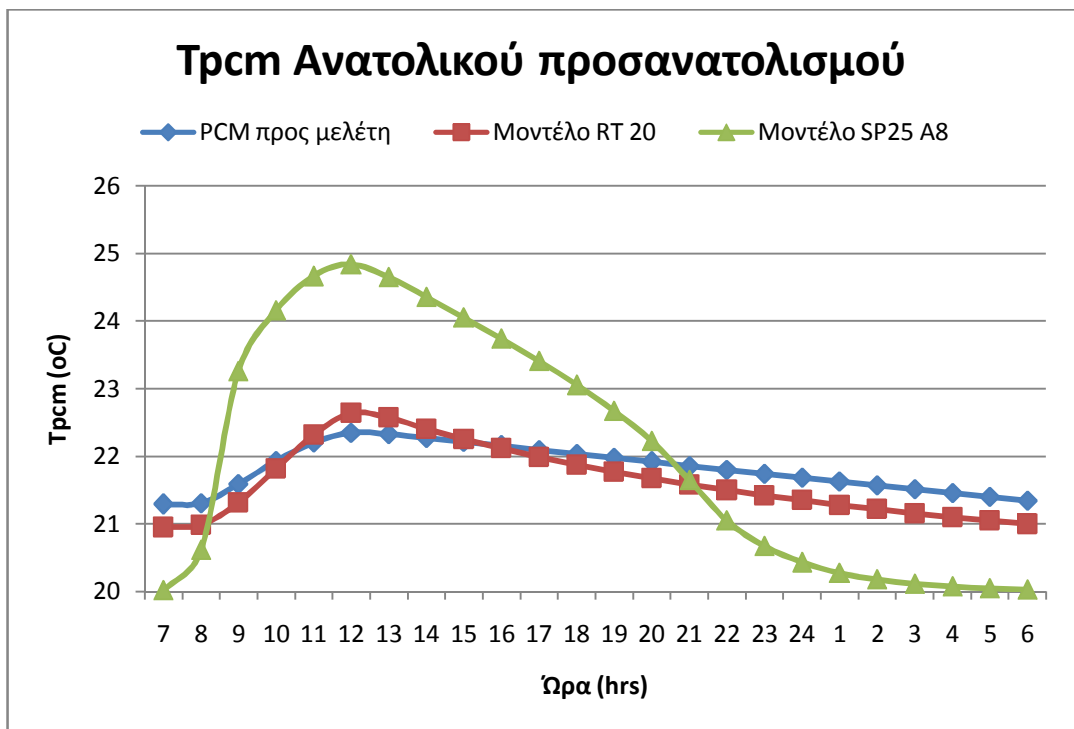
Σχήμα 6.1.76 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρης τοποθετημένα σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



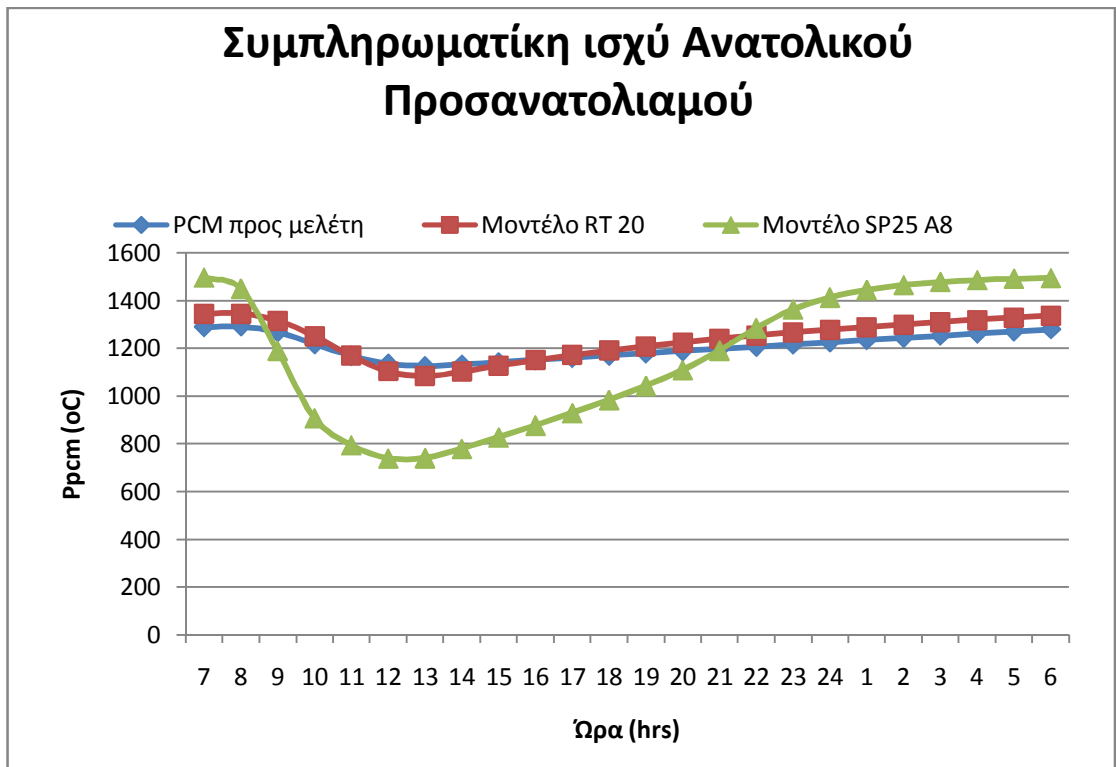
Σχήμα 6.1.77 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρης με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM



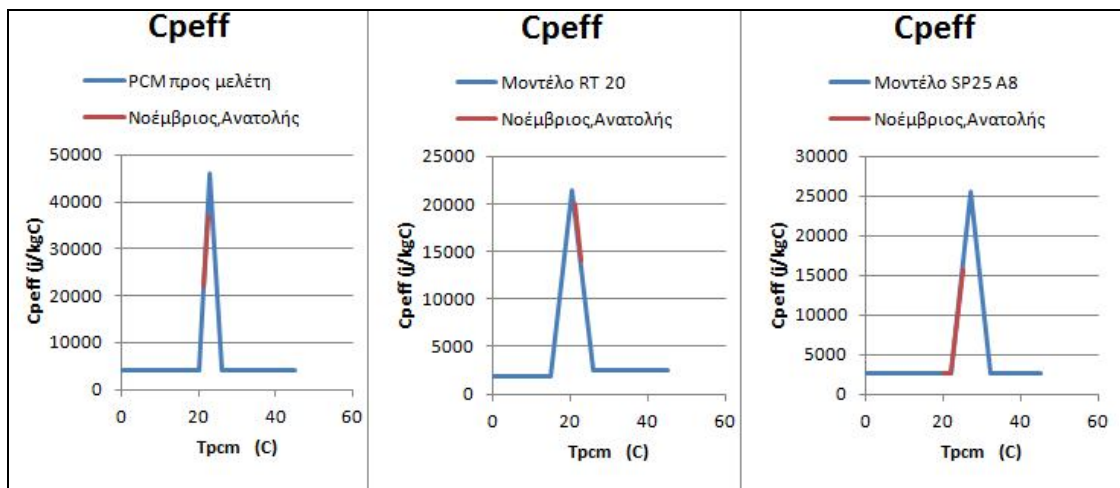
Σχήμα 6.1.78 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.



Σχήμα 6.1.79 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρης τοποθετημένα σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.

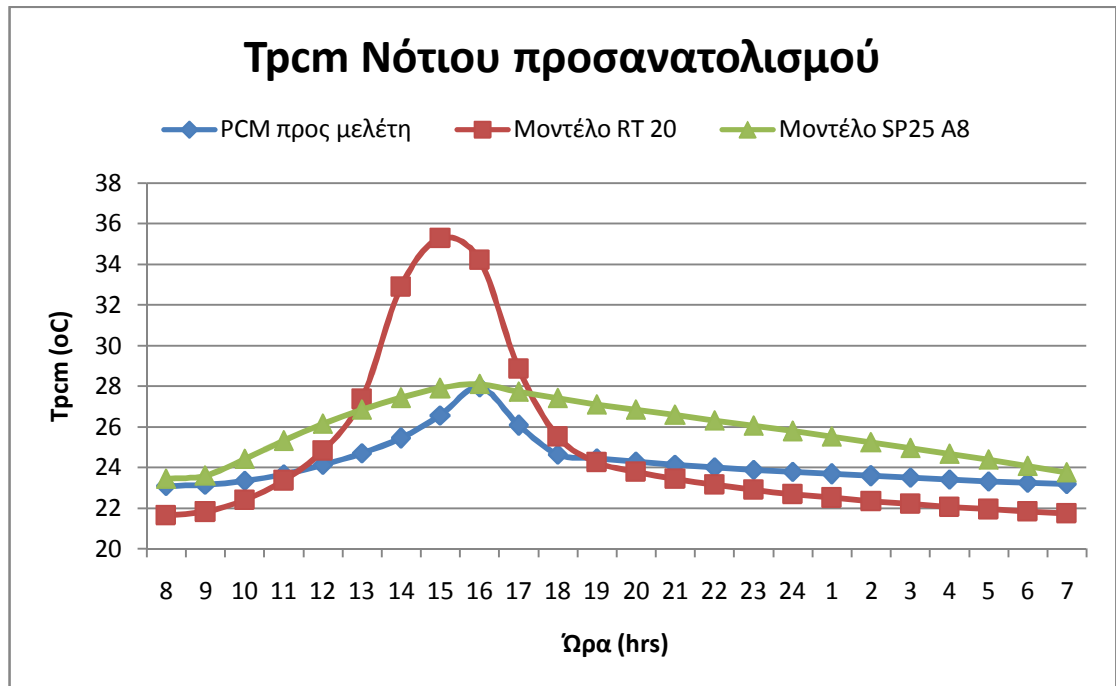


Σχήμα 6.1.80 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρης με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.

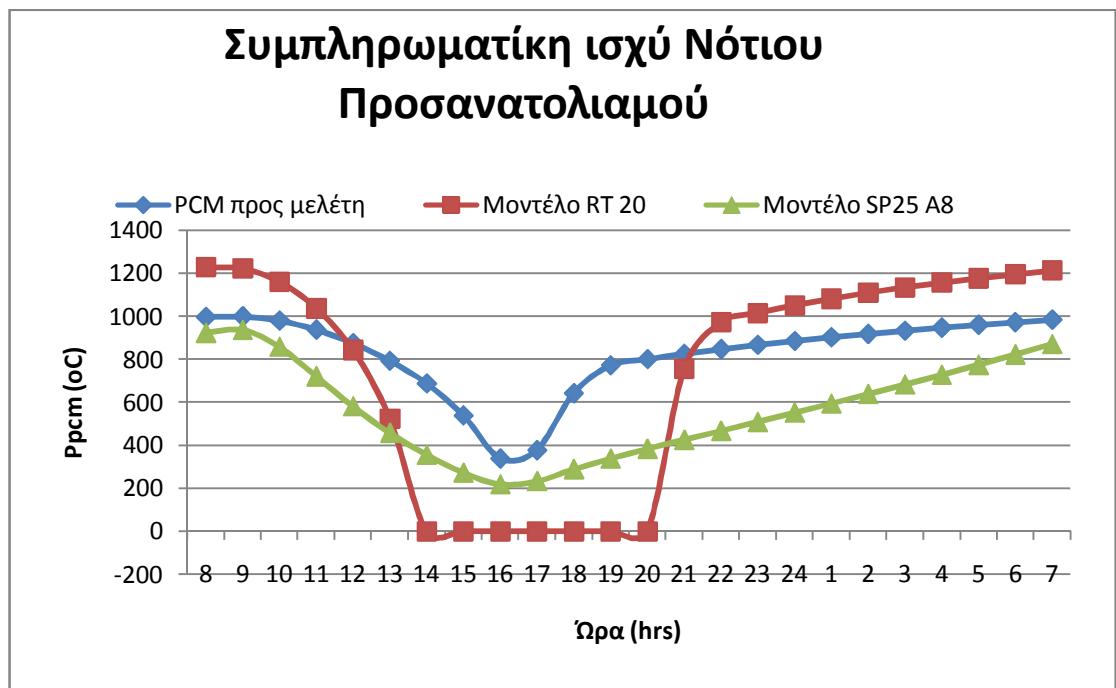


Σχήμα 6.1.81 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.

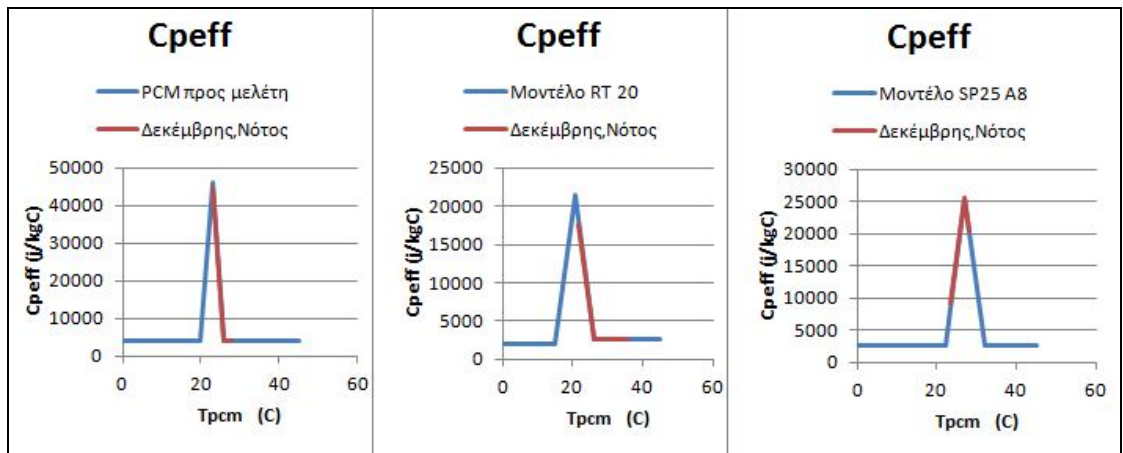
❖ Για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη:



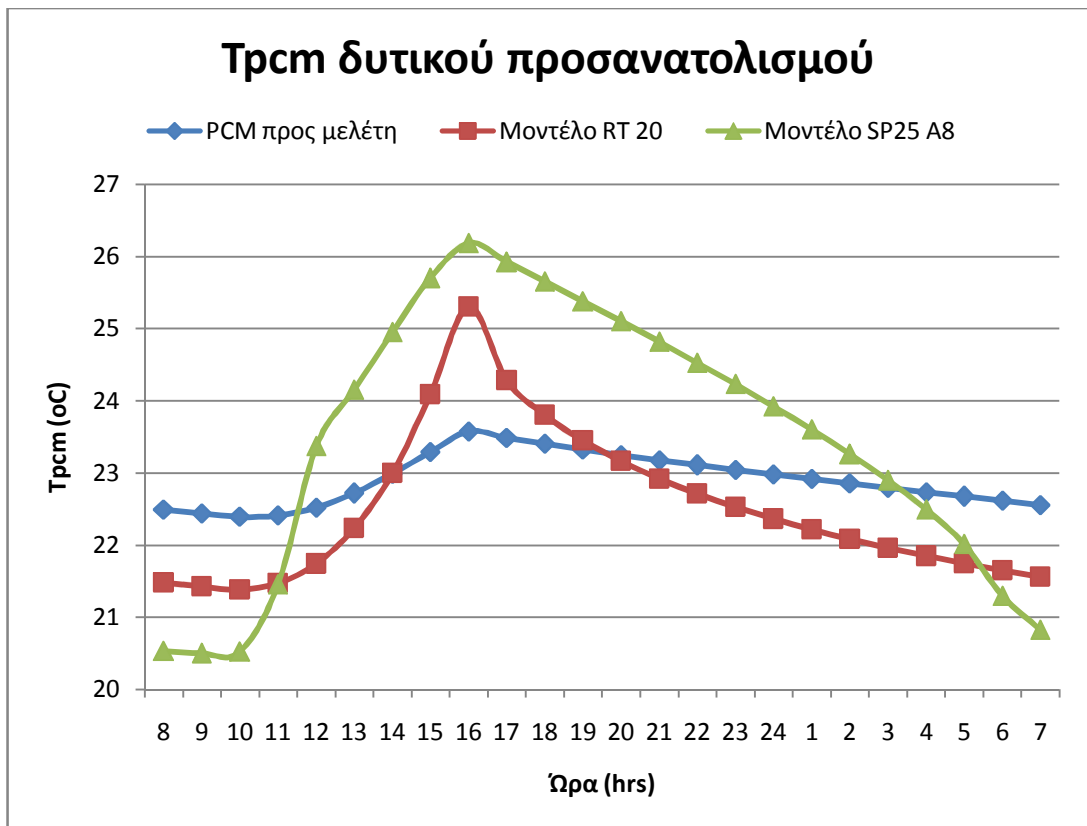
Σχήμα 6.1.82 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρης τοποθετημένα σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 6.1.83 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρης με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.

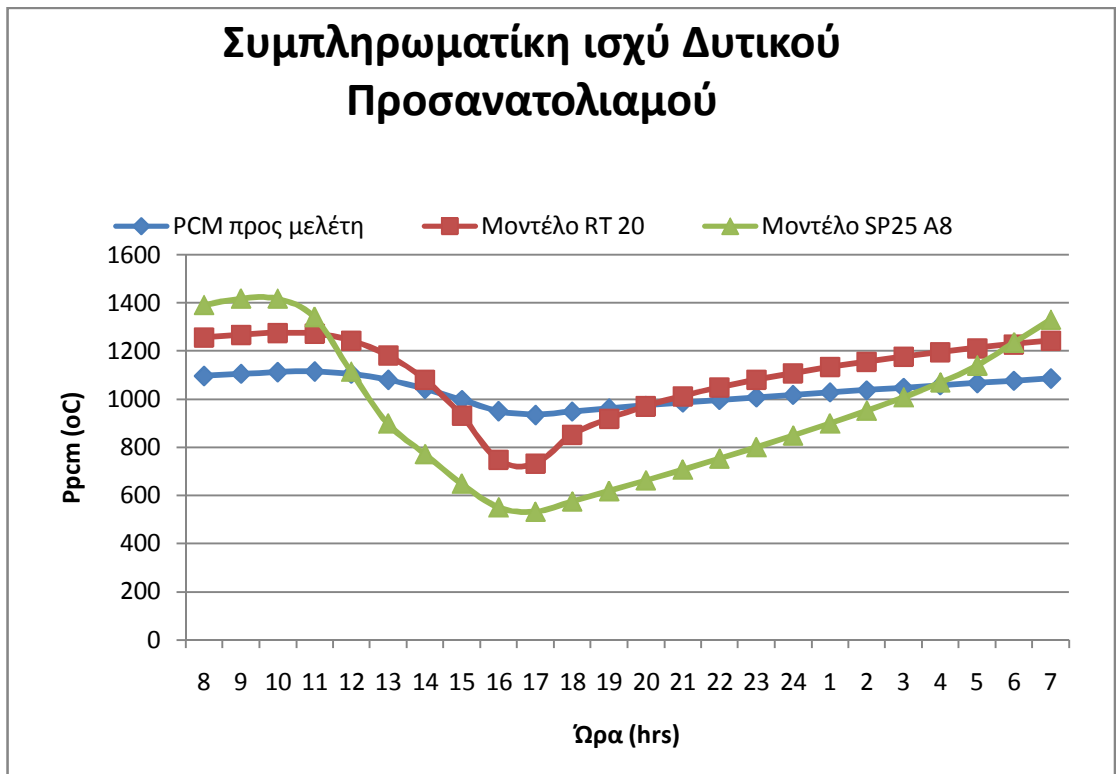


Σχήμα 6.1.84 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM.

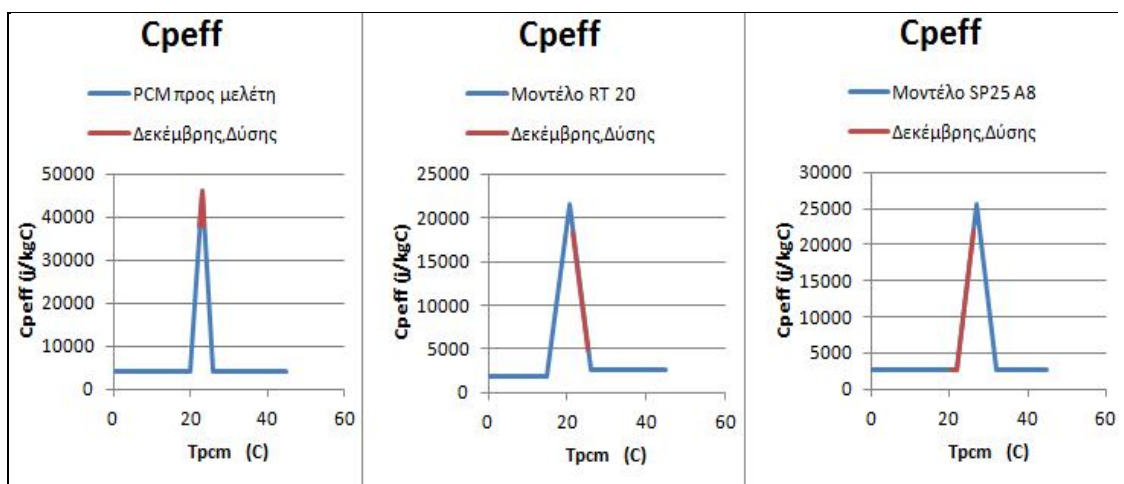


Σχήμα 6.1.85 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρης τοποθετημένα σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

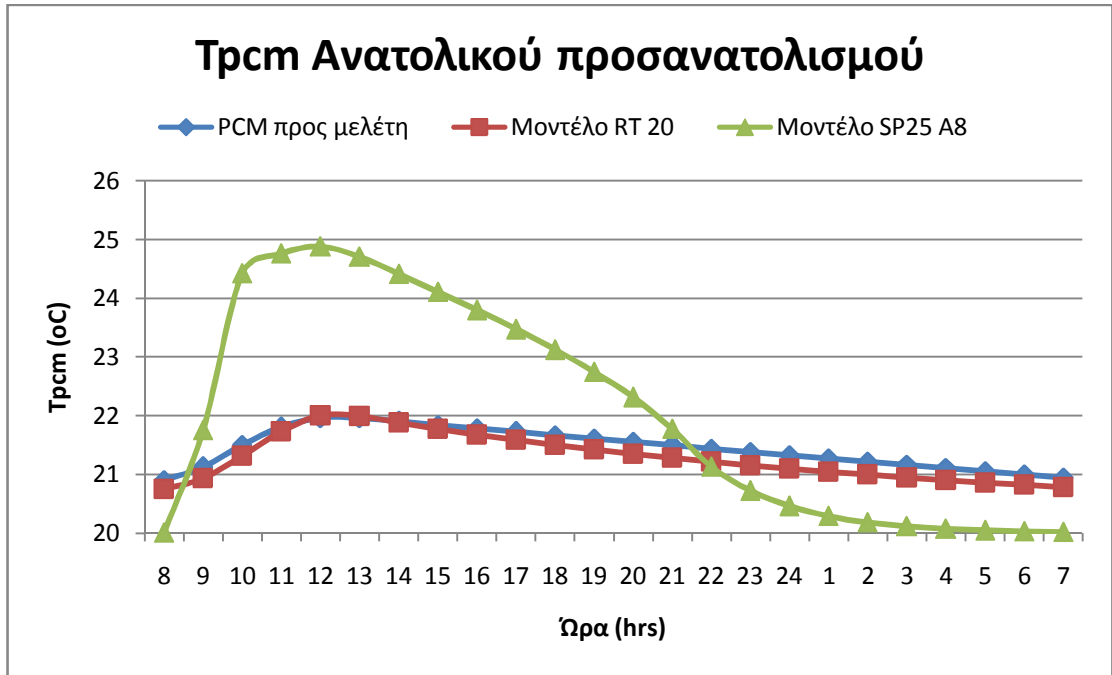




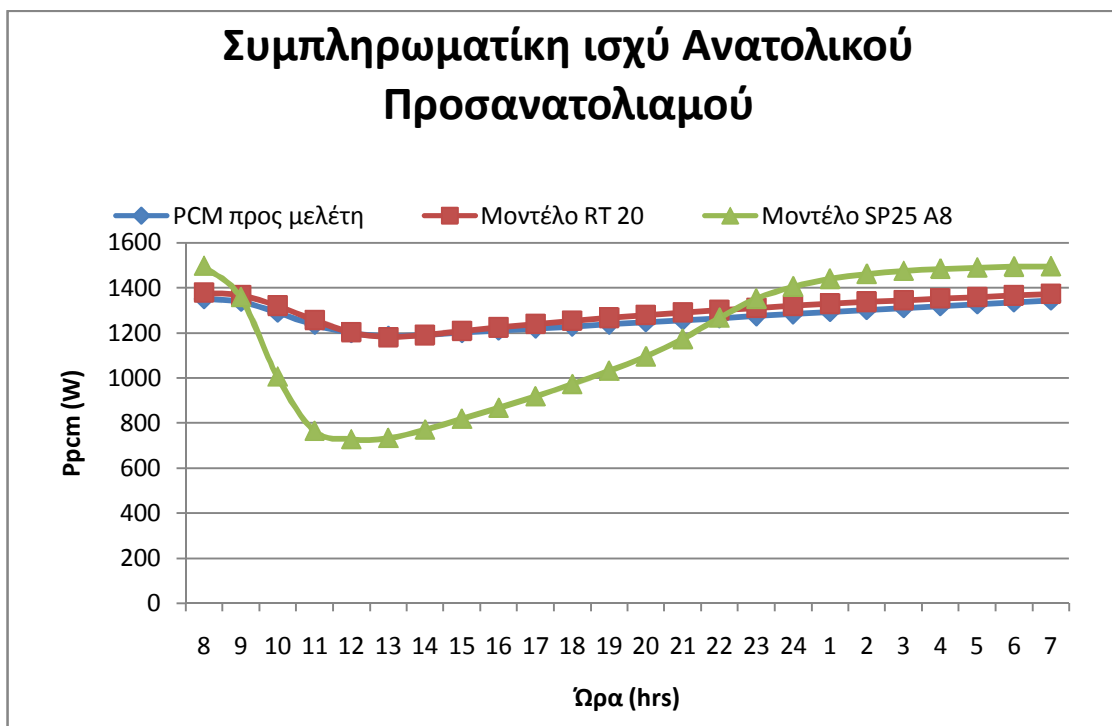
Σχήμα 6.1.86 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.



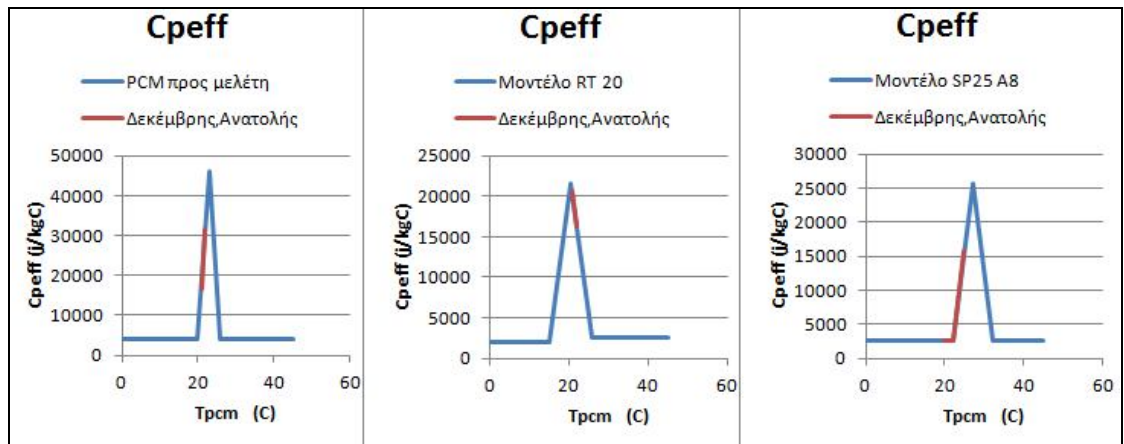
Σχήμα 6.1.87 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .



Σχήμα 6.1.88 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε 3 διαφορετικά μοντέλα PCM συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου τοποθετημένα σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



Σχήμα 6.1.89 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου με τη χρήση 3 διαφορετικών PCM.



Σχήμα 6.1.90 Καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας για τρία μοντέλα PCM .

Αρχικά από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι σε αυτήν την εφαρμογή όλα τα μοντέλα PCM χρησιμοποιούνε την ιδιότητα τους να αποθηκεύουν ενέργεια αλλάζοντας φάση.

Το ιδανικό για ένα PCM θα ήταν να αποθηκεύει θερμότητα καλύπτοντας μόνο όλη τη διαφασική περιοχή, γεγονός το οποίο θα σήμαινε πλήρης αξιοποίηση του υλικού αλλαγής φάσης. Από τις καμπύλες ενεργούς θερμοχωρητικότητας παρατηρούμε ότι το μοντέλο RT 20 της Rubitherm στην προσομοίωση μας δεν καλύπτει κάθε φορά μεγάλο μέρος της καμπύλης και κυρίως μέρος της διαφασικής περιοχής. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι δεν γίνεται αποθήκευση μόνο λανθάνουσας θερμότητας αλλά και αισθητής δηλαδή η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου του είναι περιορισμένη.

Όσον αφορά το PCM που χρησιμοποιήθηκε στην αρχική μας προσομοίωση παρατηρούμε ότι καλύπτει ένα ικανοποιητικό μέρος της καμπύλης ενεργούς θερμοχωρητικότητας βέβαια δεν έχει την καλύτερη δυνατή απόδοση ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες όπου εμφανίζεται και εδώ αποθήκευση αισθητής θερμότητας.

Ενώ το μοντέλο της Rubitherm SP25 A8 παρατηρούμε ότι καθόλη τη διάρκεια του έτους καθώς και για τους τρεις προσανατολισμούς καλύπτει μεγάλο μέρος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας του και επίσης βρίσκεται κατά κύριο λόγο μέσα στην διαφασική περιοχή δηλαδή κάθε φορά γίνεται αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα της συμπληρωματικής ισχύς βλέπουμε ότι κατά μέσω όρο σαν σύνολο όλης της μέρας προς μελέτη λιγότερη

συμπληρωματική ισχύ χρειάζεται όταν στο τοίχο είναι τοποθετημένο το μοντέλο SP25 A8 .

Άρα συμπεραίνουμε ότι για την παρούσα εφαρμογή το υλικό αλλαγής φάσης SP25 A8 είναι καταλληλότερο και αποδίδει σε πολύ ικανοποιητικότερο βαθμό από τα άλλα δύο μοντέλα PCM.

## 6.2 2<sup>η</sup> Παραμετρική μελέτη ως προς τον τύπο της ειδικής θερμοχωρητικότητας [85]

Στο κεφάλαιο αυτό θα επιχειρήσουμε να μελετήσουμε την συμπεριφορά του υλικού αλλαγής φάσης ,όταν τοποθετείται σε εσωτερικό τοίχο απέναντι από υαλοπίνακα και τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε αυτό. Η διαδικασία αυτή θα γίνει με την χρήση δύο διαφορετικών τρόπων υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας.

Το PCM που θα χρησιμοποιήσουμε σε αυτήν την εφαρμογή είναι το μοντέλο με εμπορική ονομασία SP25 A8 ( προϊόν της Rubitherm) υλικό αλλαγής φάσης που το χρησιμοποιήθηκε στην 1<sup>η</sup> παραμετρική μελέτη όπου αναφέρονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του .Αρχικά ο υπολογισμός της ενεργούς θερμοχωρητικότητας του θα γίνει με την τριγωνική κατανομή θα χρησιμοποιηθούν δηλαδή οι σχέσεις (6.1.9) – (6.1.12) και στη συνέχεια θα βρεθεί με την χρήση των πολυωνυμικών εξισώσεων.

Όπου χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εξισώσεις :

Για  $22^{\circ}\text{C} \leq T \leq 23,8^{\circ}\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = -5822,7083 + 1559,960873T - 166,178906T^2 + 8,806172538T^3 - 0,2322802438T^4 + 0,002441877714T^5 \quad (6.2.1)$$

Για  $23,8^{\circ}\text{C} < T \leq 24,5^{\circ}\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 30643,84674 - 2584,495777T + 54,51400097T^2 \quad (6.2.2)$$

Για  $24,5^{\circ}\text{C} < T \leq 27,2^{\circ}\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 2456,776607 - 177,5933256T + 3,228251256T^2 \quad (6.2.3)$$

Για  $27,2^{\circ}\text{C} < T \leq 32^{\circ}\text{C}$

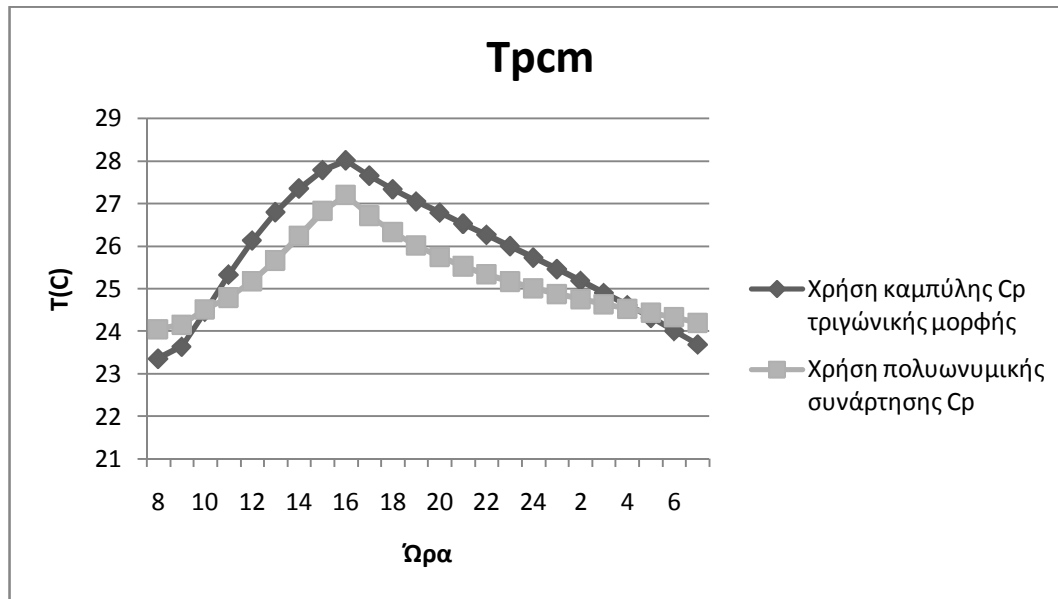
$$c_{p,eff}(T) = -3900,417315 + 553,0906948T - 28,64445051T^2 + 0,6468310842T^3 - 0,005396817351T^4 \quad (6.2.4)$$

Υπολογίζοντας το  $c_{p,eff}(T)$  σε κάθε περίπτωση η παραμετρική μελέτη θα γίνει πάνω στην προσομοίωση που έγινε στο κεφάλαιο 5.3 απλά θα χρησιμοποιηθεί ως υλικό αλλαγής φάσης το μοντέλο SP25 A8 άρα γνωρίζουμε ότι η προσομοίωση θα γίνει σε:

- Αίθουσα με διαστάσεις (μήκος)x(πλάτος αίθουσας)x(ύψος ) = (10m)x(10m)x(3m) .
- Το PCM τοποθετείται σε τοίχο απέναντι από υαλοπίνακα με διαστάσεις (ύψος ) x (μήκος ) = ( 2,5x4)
- Τοποθετούμε στρώμα υλικού αλλαγής φάσης 2cm ,άρα η συνολική μάζα PCM που θα τοποθετηθεί είναι  $m=\rho V =611,4 \text{ Kgr}$
- Η ειδική θερμική διαπερατότητα  $U=5,33 \text{ W/ m}^2$ .
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{\pi}=20^{\circ}\text{C}$
- Η ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου για τις μέρες προς μελέτη έχει υπολογισθεί λεπτομερώς σε προηγούμενο κεφάλαιο (5.2.1) .

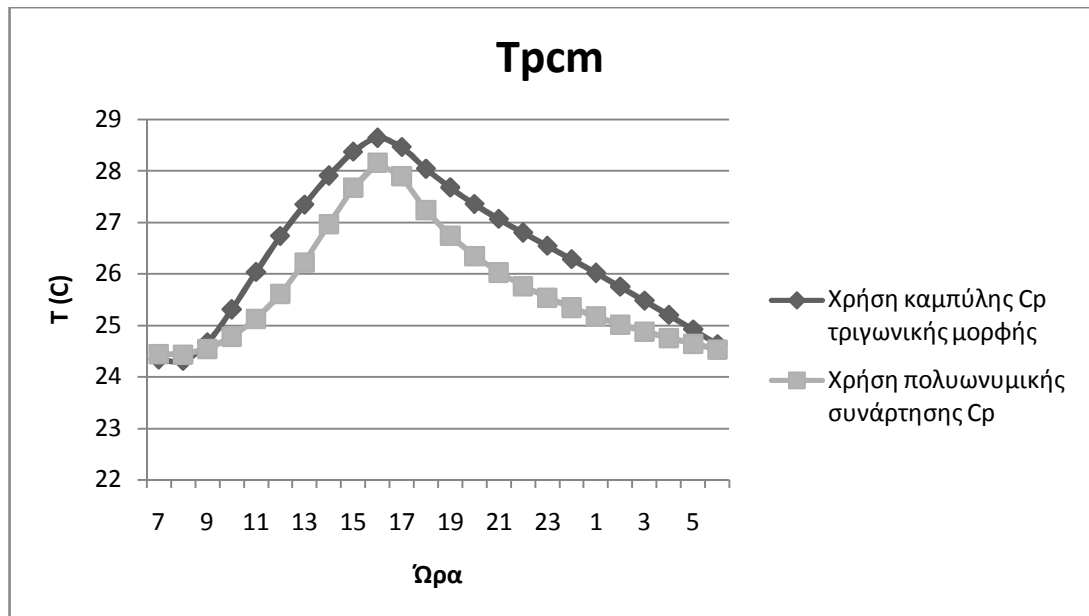
Μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο PCM για την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα του έτους από τον ισολογισμό ενέργεια του στρώματος σχέση (5.3.2.1) από τον οποίο δίνεται ο τύπος της θερμοκρασίας του PCM (5.3.3.1) για κάθε ώρα , με τη χρήση δύο τρόπων υπολογισμού της  $c_{p,eff}(T)$ . Παρακάτω παρατίθενται σε διαγράμματα τα αποτελέσματα των υπολογισμών μας.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου:



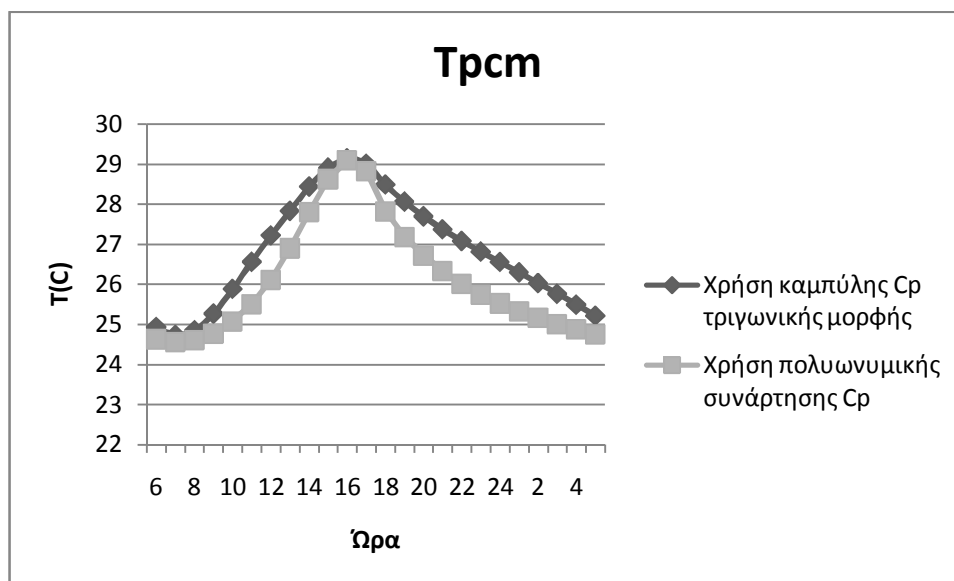
Σχήμα 6.2.1 Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου :



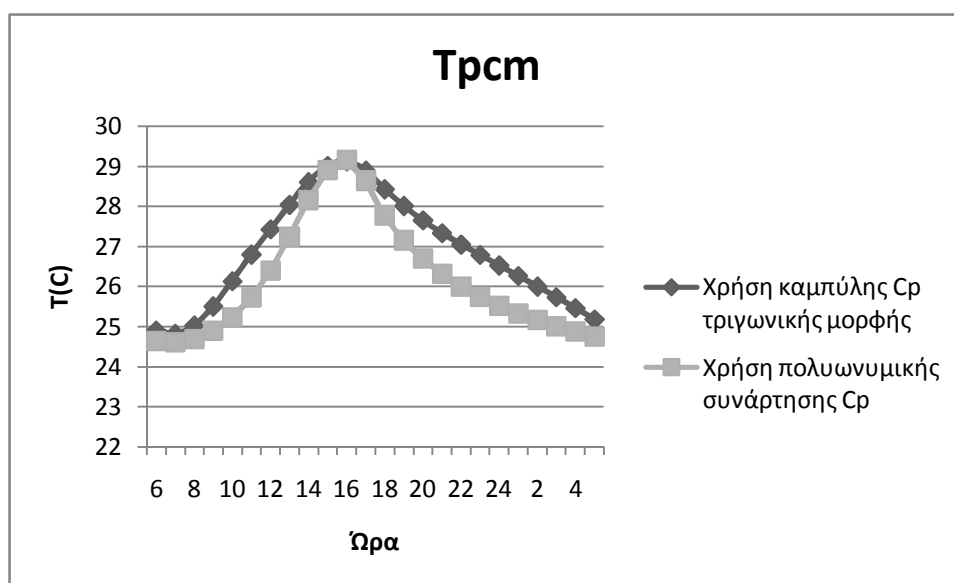
Σχήμα 6.2.2 Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου:



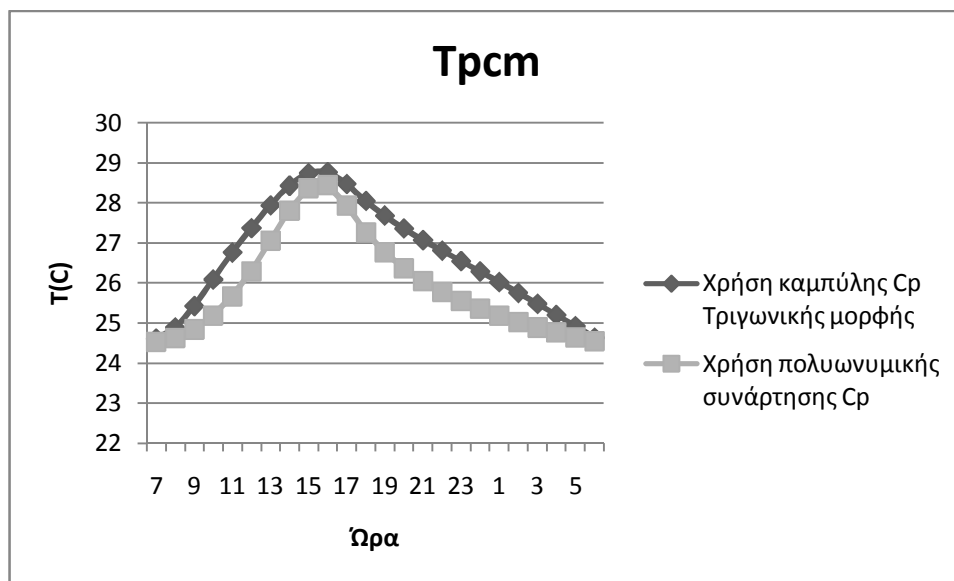
Σχήμα 6.2.3 Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Απριλίου:



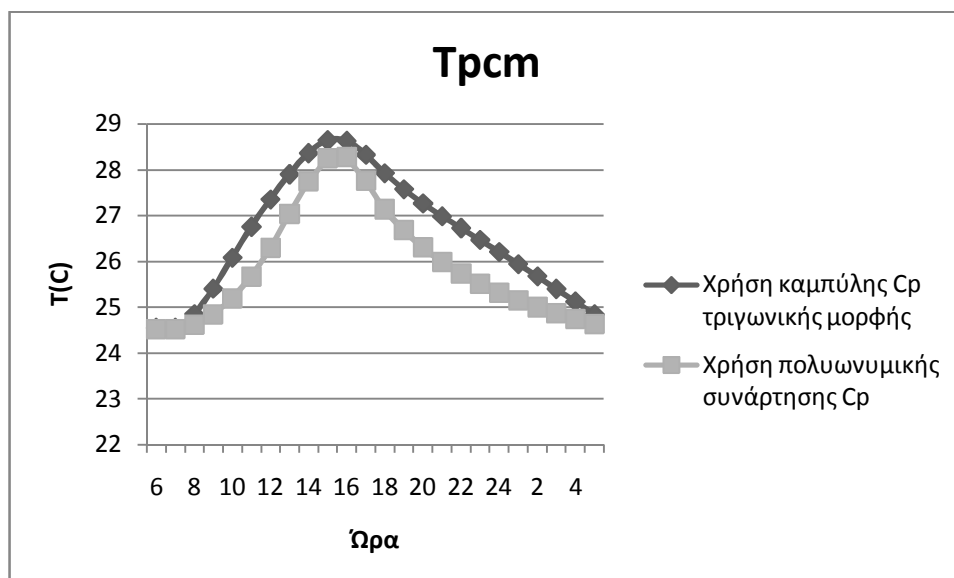
Σχήμα 6.2.4 Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την 21<sup>η</sup> Απριλίου.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαΐου :



Σχήμα 6.2.5 Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την 21<sup>η</sup> Μαΐου.

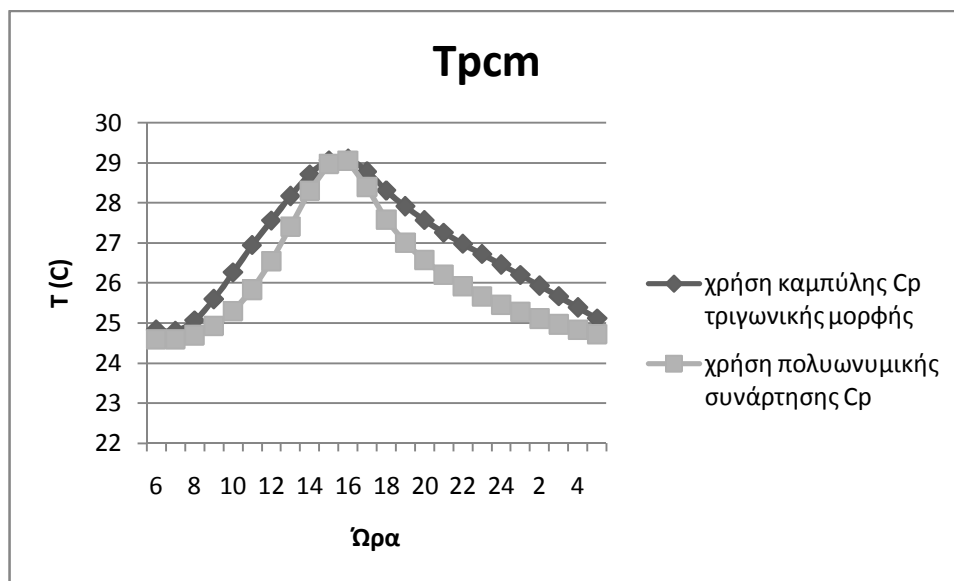
❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου :



Σχήμα 6.2.6 Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου.

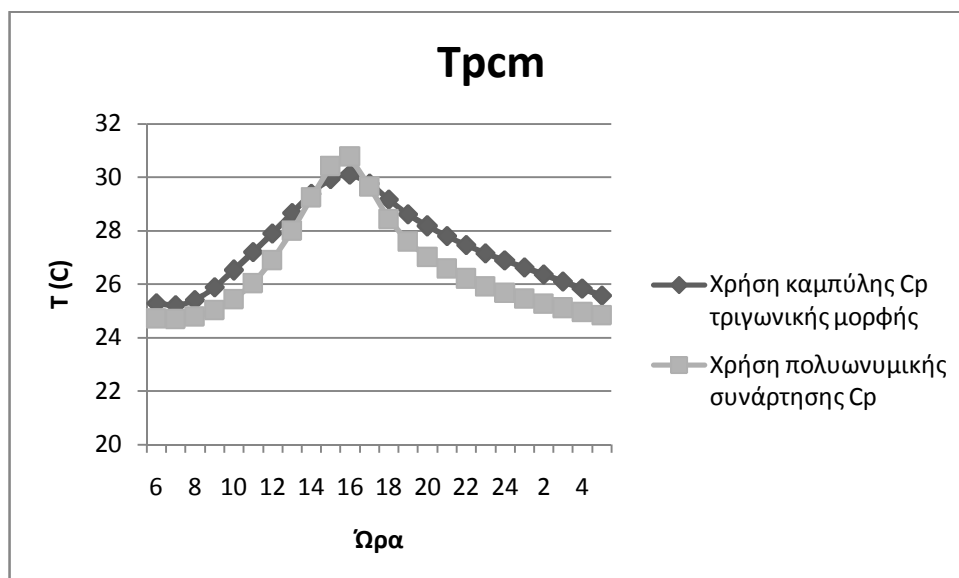


❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου :



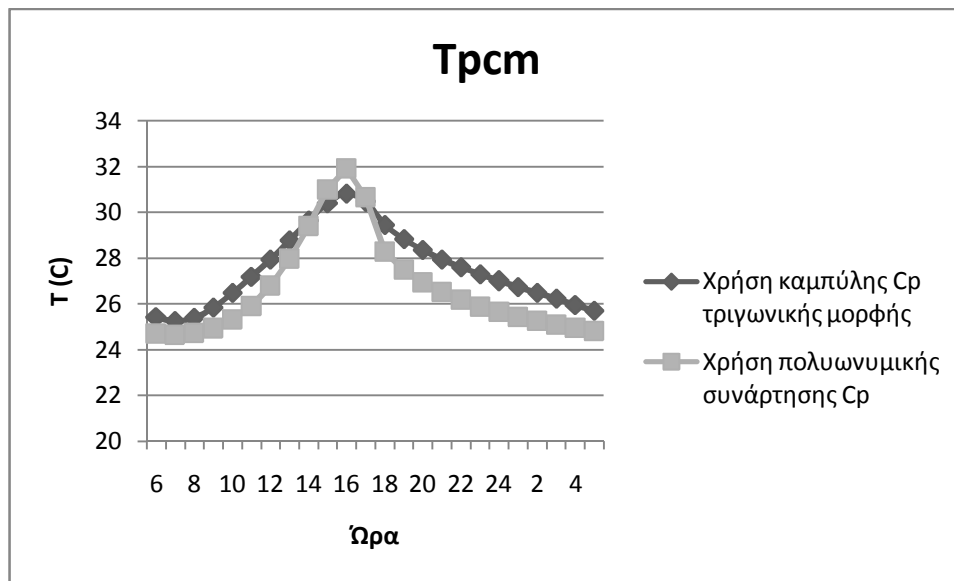
Σχήμα 6.2.7 Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου:



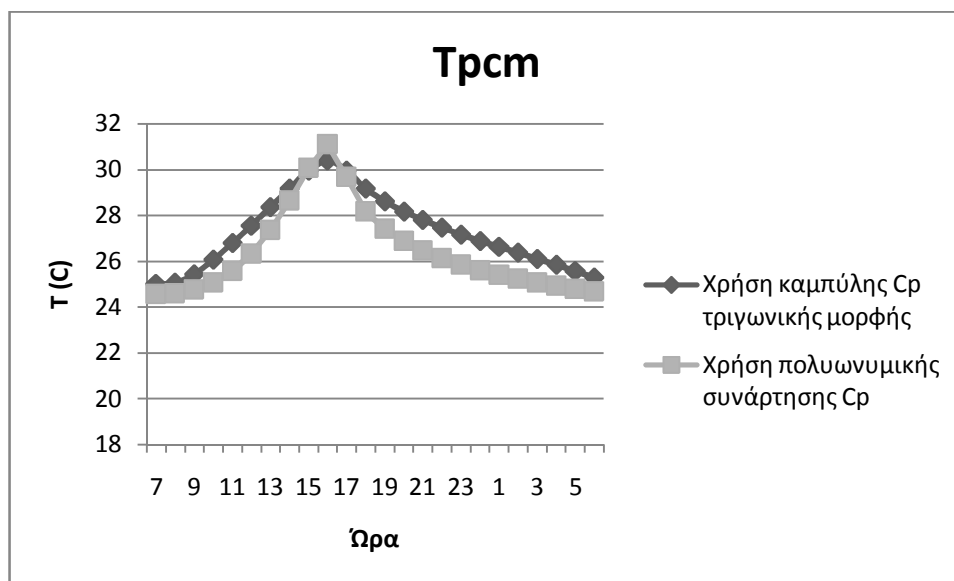
Σχήμα 6.2.8 Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρη:



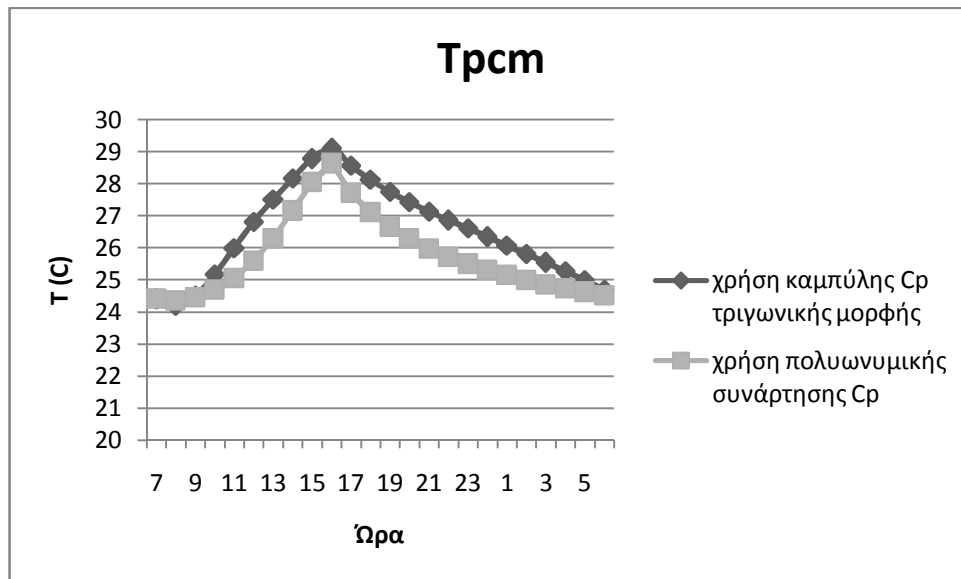
Σχήμα 6.2.9 Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρη.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη:



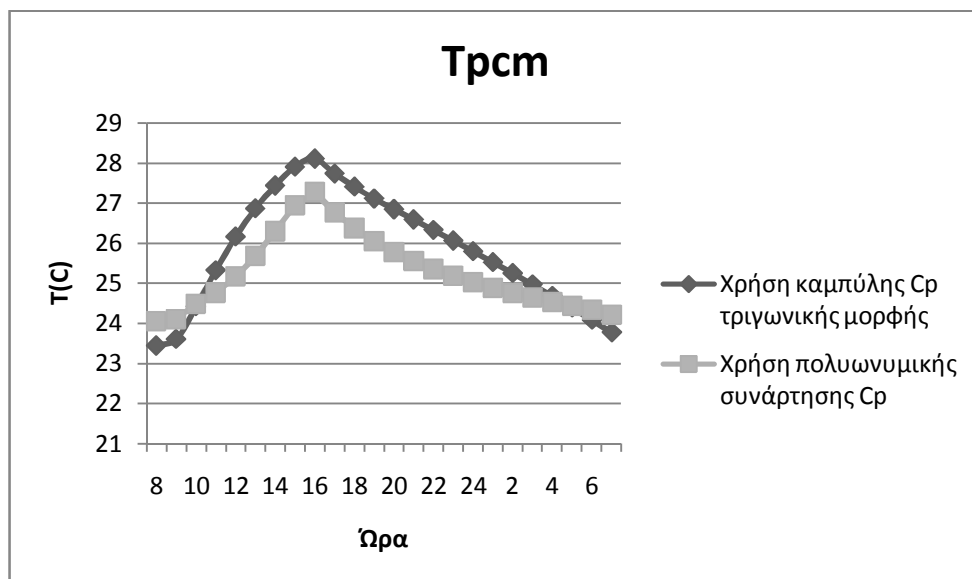
Σχήμα 6.2.10 Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη:



Σχήμα 6.2.11 Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη:



Σχήμα 6.2.12 Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργούς θερμοχωρητικότητας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη.

Εξετάζοντας τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο PCM συναρτήσει της ώρας παρατηρούμε σε μερικά σημεία μια ελάχιστη διαφορά της τάξεως έως  $1^{\circ}\text{C}$ , παρόλα αυτά βλέπουμε ότι οι καμπύλες ακολουθούν παρόμοια κατανομή και η χρήση των διαφορετικών εξισώσεων της ενεργούς θερμοχωρητικότητας μας οδηγούν σε περίπου ίδια αποτελέσματα. Άρα συμπεραίνουμε ότι η χρήση της τριγωνικής κατανομής είναι μια έγκυρη μέθοδος εύρεσης της ενεργούς θερμοχωρητικότητας. Τουλάχιστον για το συγκεκριμένο μοντέλο PCM SP25 A8 προτείνεται η χρήση της μεθόδου τριγωνικής κατανομής καθώς διευκολύνει πολύ τον υπολογισμό και παράλληλα όπως αποδείξαμε είναι έγκυρη η χρήση του.

### **Μελέτη αξιοπιστίας της τριγωνικής κατανομής της $C_{peff}$ για συγκεκριμένα υλικά αλλαγής φάσης .**

Σε αυτό το σημείο θα μελετηθούν μερικά επιπλέον προϊόντα υλικών αλλαγής φάσης της Rubitherm ως προς την αξιοπιστία της τριγωνικής κατανομής της ενεργούς θερμοχωρητικότητας .

Η μελέτη θα πραγματοποιηθεί για μερικά υλικά αλλαγής φάσης που κυκλοφορούν στην αγορά από την Rubitherm καθώς και για την παραφίνη.

Τα υλικά αυτά είναι :

- Παραφίνη
- RT 20 (RT 21)
- RT 27
- RT 58
- SP25 A8

Σε εργαστήρια στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο έχει γίνει πειραματική εκτίμηση της θερμικής ικανότητα  $C_p$  των διαφόρων PCM και μετά από εκτενείς δοκιμές διαπιστώθηκε ότι η καλύτερη αναπαράσταση του  $C_p$  επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τέσσερις διαφορετικές λειτουργίες για κάθε PCM ανάλογα με την θερμοκρασία του .Παρακάτω δίνονται για το κάθε υλικό αλλαγής φάσης οι αντίστοιχες τέσσερις αναλυτικές εξισώσεις τους καθώς και οι εξισώσεις για την τριγωνική καμπύλη.

## Παραφίνη

Χαρακτηριστικά :

$$H=136,5 \text{ kJ/kg,}$$

$$T_s=50^\circ\text{C, } T_l=58^\circ\text{C, } T_c=54^\circ\text{C, } b=8$$

$$C_{ps}=2700 \text{ J/kgK, } C_{pl}=4400 \text{ J/kgK}$$

Εξισώσεις για την τριγωνική κατανομή της ενεργούς θερμοχωρητικότητας που προέκυψαν σχέσεις(5.3.1.1.)-(5.3.1.4) :

$$\text{Για } T \leq 50^\circ\text{C} : c_{p,eff}=c_{ps}=2700 \text{ J/kgK} \quad (6.2.5)$$

Για  $50^\circ\text{C} < T \leq 54^\circ\text{C}$ :

$$C_{p,eff} = 4 \times (H - bC_{ps}) \times \frac{T-T_s}{b^2} + C_{ps} = 7181,25 \times (T - 50) + 2700 \quad (6.2.6)$$

Για  $54^\circ\text{C} < T \leq 58^\circ\text{C}$ :

$$C_{p,eff} = 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b^2} \times \left(T - T_s - \frac{b}{2}\right) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} = -6331,25 \times (T - 54) + 29725 \quad (6.2.7)$$

$$\text{Για } T > 58^\circ\text{C} : c_{p,eff}=c_{pl}=4400 \text{ J/kgK} \quad (6.2.8)$$

Πολυωνυμικές εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας :

Για  $50^\circ\text{C} \leq T \leq 54,5^\circ\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = -238826,7515 + 25234,88721T - 1066,214192T^2 + 22,51889622T^3 - 0,2377544057T^4 + 0,001003917218T^5 \quad (6.2.9)$$

Για  $54,5^\circ\text{C} < T \leq 55,1^\circ\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 474815,4706 - 17443,30321T + 160,2106051T^2 \quad (6.2.10)$$

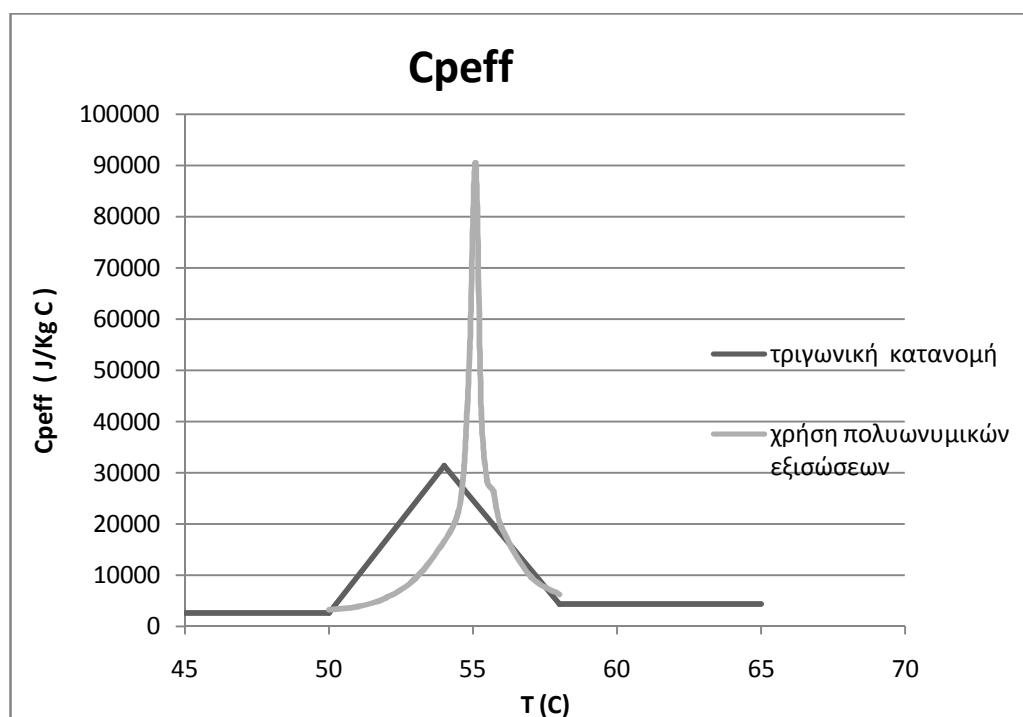
Για  $55,1^\circ\text{C} < T \leq 55,7^\circ\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 428651,7876 - 15408,60663T + 138,4803961T^2 \quad (6.2.11)$$

Για  $55,7^\circ\text{C} < T \leq 58^\circ\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 613200,0901 - 40671,49665T + 1011,420754T^2 - 11,17652292T^3 + 0,04630473077T^4 \quad (6.2.12)$$

Παρουσίαση σε σχετικό διάγραμμα.



Σχήμα 6.2.13 καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας της παραφίνης συναρτήσει της Θερμοκρασίας .

## **RT 20**

Χαρακτηριστικά:

$$H=132,1 \text{ kJ/kg}$$

$$T_s=15^\circ\text{C}, T_f=26^\circ\text{C}, T_c=20,5^\circ\text{C}, b=11$$

$$C_{ps}=1900 \text{ J/kgK}, C_{pl}=2500 \text{ J/kgK}$$

Εξισώσεις για την τριγωνική κατανομή της ενεργούς θερμοχωρητικότητας που προέκυψαν σχέσεις(5.3.1.1.)-(5.3.1.4) :

$$\text{Για } T \leq 15^\circ\text{C} : c_{p,eff}=c_{ps}=1900 \text{ J/kgK} \quad (6.2.13)$$

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

$$C_{p,eff} = 4 \times (H - bC_{ps}) \times \frac{T-T_s}{b^2} + C_{ps} = 3676,033 \times (T - 15) + 1900 \quad (6.2.14)$$

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

$$C_{p,eff} = 4 \times \frac{(b \times c_{pl} - H)}{b^2} \times \left( T - T_s - \frac{b}{2} \right) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} = -3457,85 \times (T - 20,5) + 21518,18 \quad (6.2.15)$$

Για  $T > 26^\circ\text{C}$ :  $c_{p,eff} = c_{pl} = 2500 \text{ J/kgK}$  (6.2.16)

Πολυωνυμικές εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας :

Για  $15^\circ\text{C} \leq T \leq 19,5^\circ\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 444,4711352 - 170,5210626T + 25,80658991T^2 - 1,912462169T^3 + 0,06910480624T^4 - 0,0009667426392T^5 \quad (6.2.17)$$

Για  $19,5^\circ\text{C} < T \leq 20,5^\circ\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 5529,086311 - 565,4394794T + 14,50378915T^2 \quad (6.2.18)$$

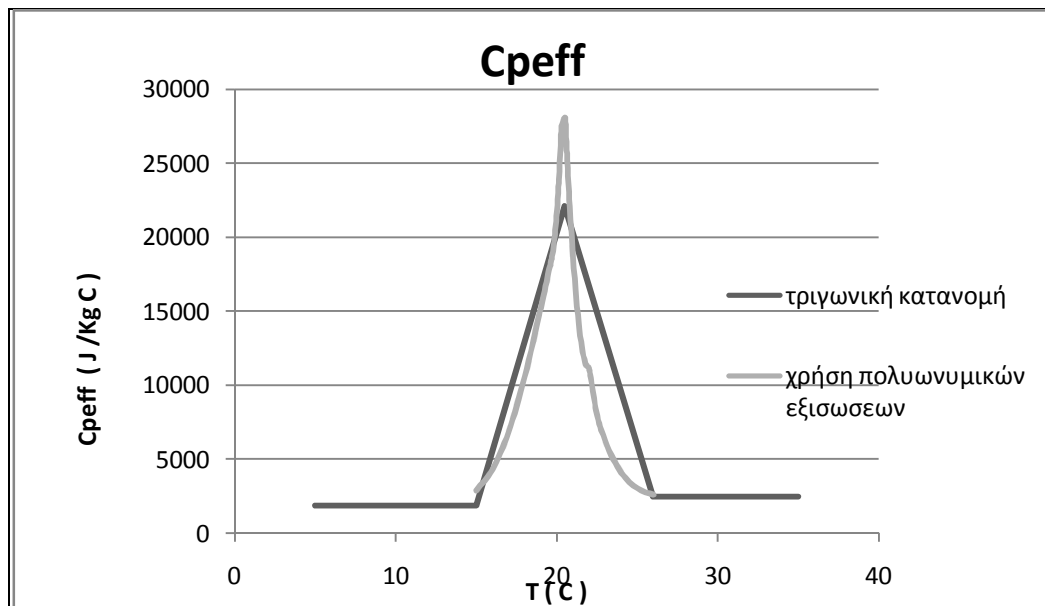
Για  $20,5^\circ\text{C} < T \leq 22^\circ\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 3780,001949 - 342,8478233T + 7,797040983T^2 \quad (6.2.19)$$

Για  $22^\circ\text{C} < T \leq 26^\circ\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 3735,906512 - 536,9879458T + 28,98735267T^2 - 0,6959772441T^3 + 0,006270432248T^4 \quad (6.2.20)$$

Παρουσίαση σε σχετικό διάγραμμα.



Σχήμα 6.2.14 καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας του RT 20 συναρτήσει της Θερμοκρασίας .

## RT 27

Χαρακτηριστικά:

$$H=167,4 \text{ kJ/kg}$$

$$T_s=22^\circ\text{C}, T_i=31^\circ\text{C}, T_c=26,5^\circ\text{C}, b=9$$

$$C_{ps}=2000 \text{ J/kgK}, C_{pl}=2300 \text{ J/kgK}$$

Εξισώσεις για την τριγωνική κατανομή της ενεργούς θερμοχωρητικότητας που προέκυψαν σχέσεις(5.3.1.1.)-(5.3.1.4) :

$$\text{Για } T \leq 22^\circ\text{C} : c_{p,eff}=C_{ps}=2000 \text{ J/kgK} \quad (6.2.21)$$

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

$$C_{p,eff} = 4 \times (H - bC_{ps}) \times \frac{T-T_s}{b^2} + C_{ps} = 7377,78 \times (T - 22) + 2000 \quad (6.2.22)$$

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

$$C_{p,eff} = 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b^2} \times \left(T - T_s - \frac{b}{2}\right) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} = -7244,44 \times (T - 26,5) + 34900 \quad (6.2.23)$$

$$\text{Για } T > 31^\circ\text{C}: c_{p,eff}=C_{pl}=2300 \text{ J/kgK} \quad (6.2.24)$$

Πολυωνυμικές εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας :

$$\text{Για } 22^\circ\text{C} \leq T \leq 25^\circ\text{C}$$

$$c_{p,eff}(T) = -329,5000062 + 106,3162953T - 13,35423683T^2 + 0,8223480772T^3 - 0,02488671396T^4 + 0,0002972388922T^5 \quad (6.2.25)$$

$$\text{Για } 25^\circ\text{C} < T \leq 26,8^\circ\text{C}$$

$$c_{p,eff}(T) = 9542,790195 - 774,7503271T + 15,74031481T^2 \quad (6.2.26)$$

$$\text{Για } 26,8^\circ\text{C} < T \leq 27,5^\circ\text{C}$$

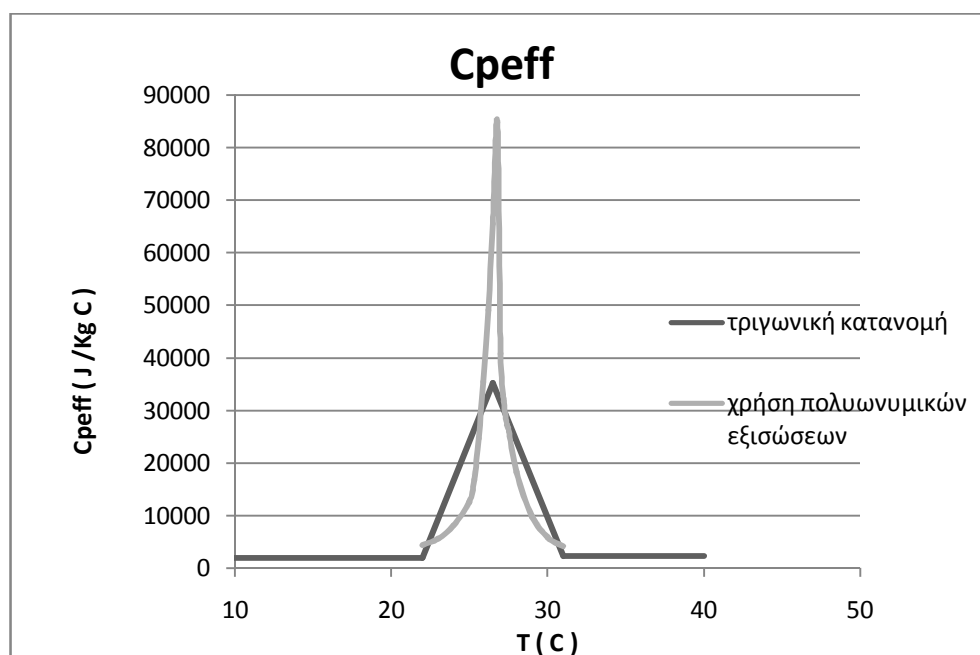
$$c_{p,eff}(T) = 41611,7679 - 3023,692869T + 54,96396748T^2 \quad (6.2.27)$$

$$\text{Για } 27,5^\circ\text{C} < T \leq 31^\circ\text{C}$$

$$c_{p,eff}(T) = 31155,44075 - 3820,483549T + 175,7678837T^2 - 3,594806096T^3 + 0,02757236338T^4 \quad (6.2.28)$$



Παρουσίαση σε σχετικό διάγραμμα.



Σχήμα 6.2.15 καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας του RT 27 συναρτήσει της Θερμοκρασίας .

## **RT 58**

Χαρακτηριστικά:

$$H=166,1 \text{ kJ/k}$$

$$T_s=53^\circ\text{C}, T_i=62^\circ\text{C}, T_c=57,5^\circ\text{C} \quad b=9$$

$$C_{ps}=1900 \text{ J/kgK}, C_{pl}=2600 \text{ J/kgK}$$

Εξισώσεις για την τριγωνική κατανομή της ενεργούς θερμοχωρητικότητας που προέκυψαν σχέσεις(5.3.1.1.)-(5.3.1.4) :

$$\text{Για } T \leq 53^\circ\text{C} : c_{p,eff}=c_{ps}=1900 \text{ J/kgK} \quad (6.2.29)$$

$$\text{Για } 53^\circ\text{C} < T \leq 57,5^\circ\text{C}:$$

$$C_{p,eff} = 4 \times (H - bC_{ps}) \times \frac{T-T_s}{b^2} + C_{ps} = 29432,1 \times (T - 53) + 1900 \quad (6.2.30)$$

$$\text{Για } 57,5^\circ\text{C} < T \leq 62^\circ\text{C}:$$

$$C_{p,eff} = 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b^2} \times \left(T - T_s - \frac{b}{2}\right) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} = -7046,9 \times (T - 57,5) + 34311,1$$

( 6.2.31)

Για  $T > 62^{\circ}\text{C}$ :  $c_{p,eff}=c_{pl}=2600 \text{ J/kgK}$

(6.2.32)

### Πολυωνυμικές εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας :

Για  $53^{\circ}\text{C} \leq T \leq 56,3^{\circ}\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = -791594,7437 + 79417,20492T - 3183,473369T^2 + 63,73552955T^3 - 0,6373319868T^4 + 0,002546573375T^5 \quad (6.2.33)$$

Για  $56,3^{\circ}\text{C} < T \leq 57,6^{\circ}\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 202700,389 - 7165,082407T + 63,32577145T^2 \quad (6.2.34)$$

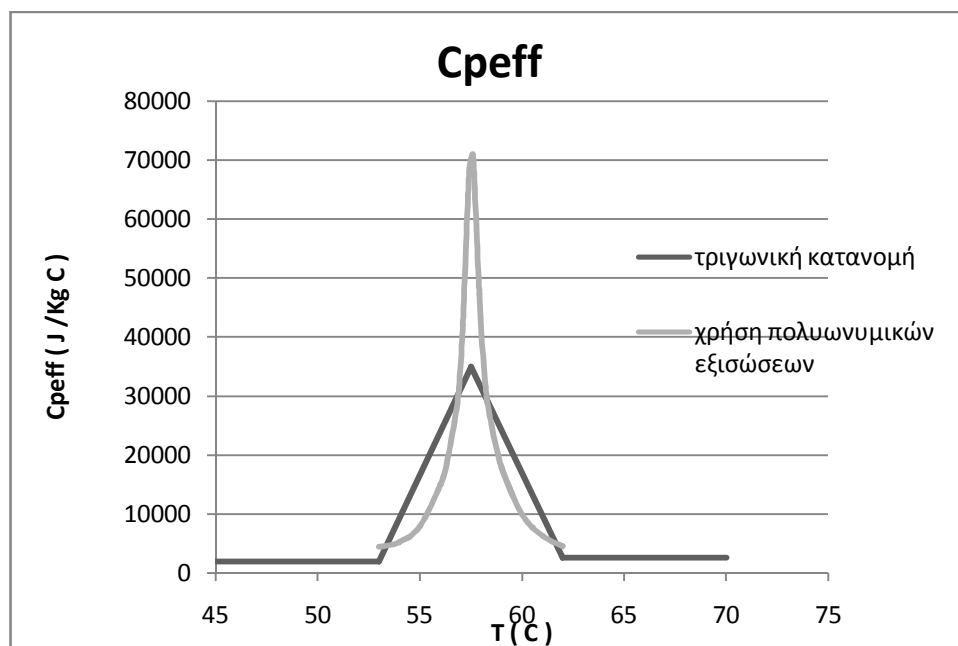
Για  $57,6^{\circ}\text{C} < T \leq 58,5^{\circ}\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 157105,6193 - 5360,640404T + 45,73510252T^2 \quad (6.2.35)$$

Για  $58,5^{\circ}\text{C} < T \leq 62^{\circ}\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 719366,1788 - 45914,34448T + 1099,127713T^2 - 11,69559203T^3 + 0,04667380471T^4 \quad (6.2.36)$$

Παρουσίαση σε σχετικό διάγραμμα.



Σχήμα 6.2.16 καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας του RT 58 συναρτήσει της Θερμοκρασίας .

## SP25 A8

Χαρακτηριστικά:

$$H=141,5 \text{ kJ/kg}$$

$$T_s=22^\circ\text{C}, T_f=32^\circ\text{C}, T_c=27^\circ\text{C}, b=10$$

$$C_{ps}=2600 \text{ J/kgK}, C_{pl}=2700 \text{ J/kgK}$$

Εξισώσεις για την τριγωνική κατανομή της ενεργούς θερμοχωρητικότητας που προέκυψαν σχέσεις(5.3.1.1.)-(5.3.1.4) :

$$\text{Για } T \leq 22^\circ\text{C} : c_{p,eff}=c_{ps}=2600 \text{ J/kgK} \quad (6.2.37)$$

Για  $22^\circ\text{C} < T \leq 27^\circ\text{C}$ :

$$c_{p,eff} = 4 \times (H - bC_{ps}) \times \frac{T-T_s}{b^2} + C_{ps} = 4620 \times (T - 22) + 2600 \quad (6.2.38)$$

Για  $27^\circ\text{C} < T \leq 32^\circ\text{C}$ :

$$c_{p,eff} = 4 \times \frac{(b \times C_{pl} - H)}{b^2} \times \left(T - T_s - \frac{b}{2}\right) + 2 \times \frac{H}{b} - C_{pl} = -4580 \times (T - 27) + 25600 \quad (6.2.39)$$

$$\text{Για } T > 32^\circ\text{C} : c_{p,eff}=c_{pl}=2700 \text{ J/kgK} \quad (6.2.40)$$

Πολυωνυμικές εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας :

Για  $22^\circ\text{C} \leq T \leq 23,8^\circ\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = -5822,7083 + 1559,960873T - 166,178906T^2 + 8,806172538T^3 - 0,2322802438T^4 + 0,002441877714T^5 \quad (6.2.41)$$

Για  $23,8^\circ\text{C} < T \leq 24,5^\circ\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 30643,84674 - 2584,495777T + 54,51400097T^2 \quad (6.2.42)$$

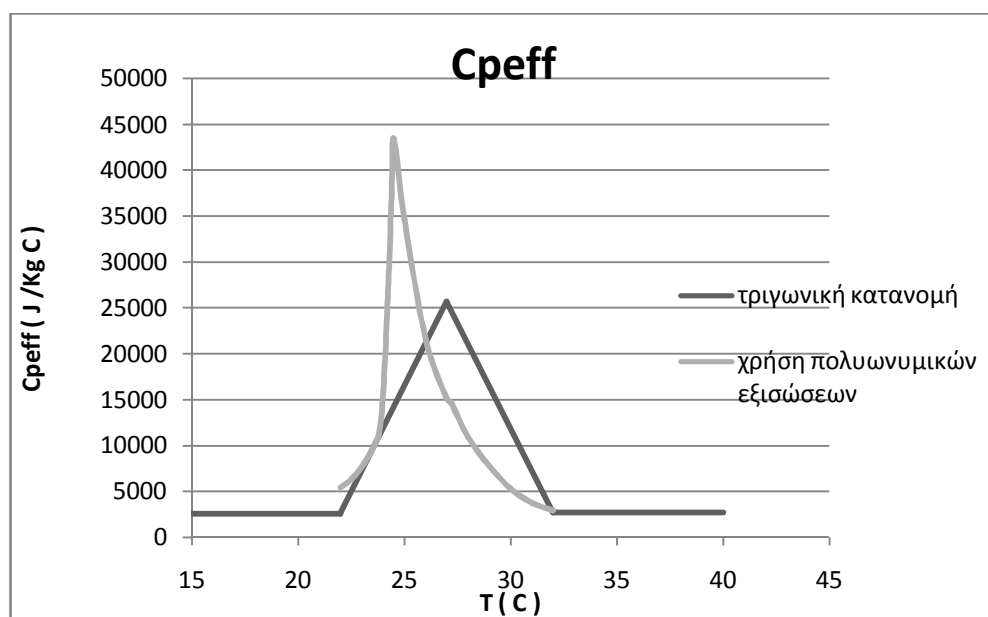
Για  $24,5^\circ\text{C} < T \leq 27,2^\circ\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = 2456,776607 - 177,5933256T + 3,228251256T^2 \quad (6.2.43)$$

Για  $27,2^\circ\text{C} < T \leq 32^\circ\text{C}$

$$c_{p,eff}(T) = -3900,417315 + 553,0906948T - 28,64445051T^2 + 0,6468310842T^3 - 0,005396817351T^4 \quad (6.2.44)$$

Παρουσίαση σε σχετικό διάγραμμα.



6.2.17 καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας του SP25 A8 συναρτήσει της Θερμοκρασίας .

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε στο μοντέλο RT 27 και την παραφίνη μεγάλες αποκλίσεις κυρίως στις τιμές όπου το  $C_{peff}$  παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του .Για αυτά τα υλικά αλλαγής φάσης θα προτείναμε την μη χρήση της τριγωνικής κατανομής αλλά των πολυωνυμικών εξισώσεων. Για τα μοντέλα RT20 και Sp25 A8 βλέπουμε ότι οι αποκλίσεις είναι μικρότερες άρα για συντομία και ευκολία στον υπολογισμό μπορεί να γίνει χρήση της τριγωνικής κατανομής.

### 6.3 3<sup>η</sup> Παραμετρική μελέτη ως προς την επιφάνεια του υαλοπίνακα

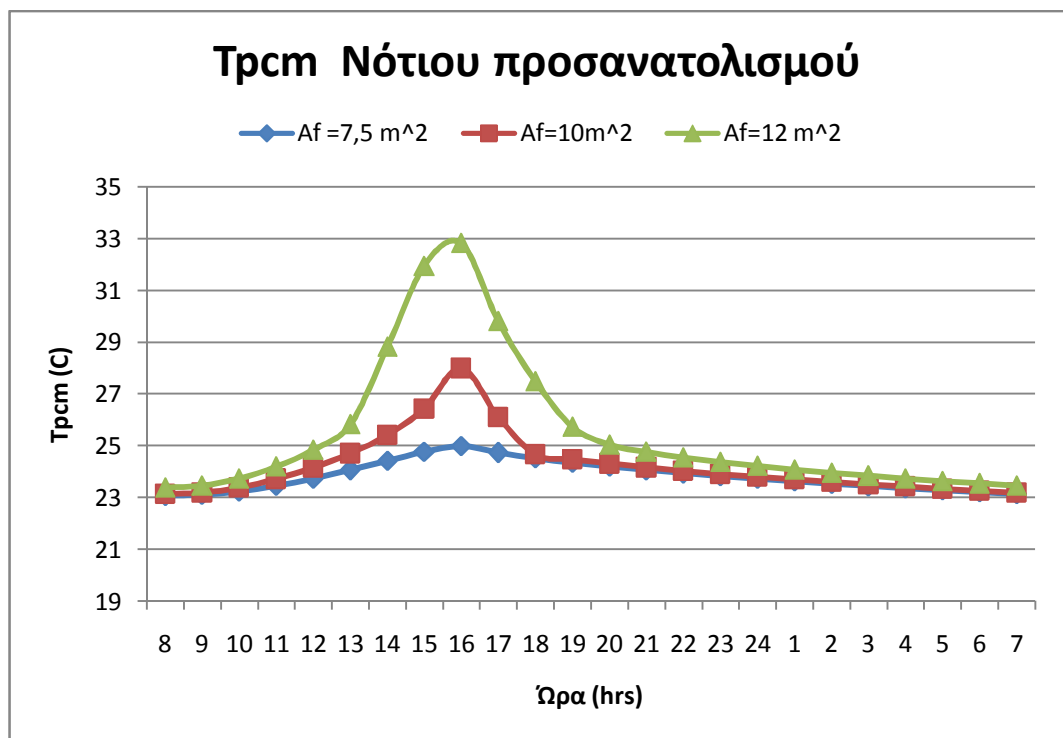
Με την παρούσα μελέτη δίνεται η δυνατότητα να εξετάσουμε την επίδραση που έχει η μεταβολή της επιφάνειας του υαλοπίνακα στη θερμοκρασιακή απόκριση και γενικά στη συμπεριφορά του στρώματος του PCM κατά τη διάρκεια μιας μέρας σε όλους τους μήνες του έτους για τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς τοποθέτησης του.

Οι διαστάσεις των υαλοπινάκων που θα χρησιμοποιηθούν είναι :

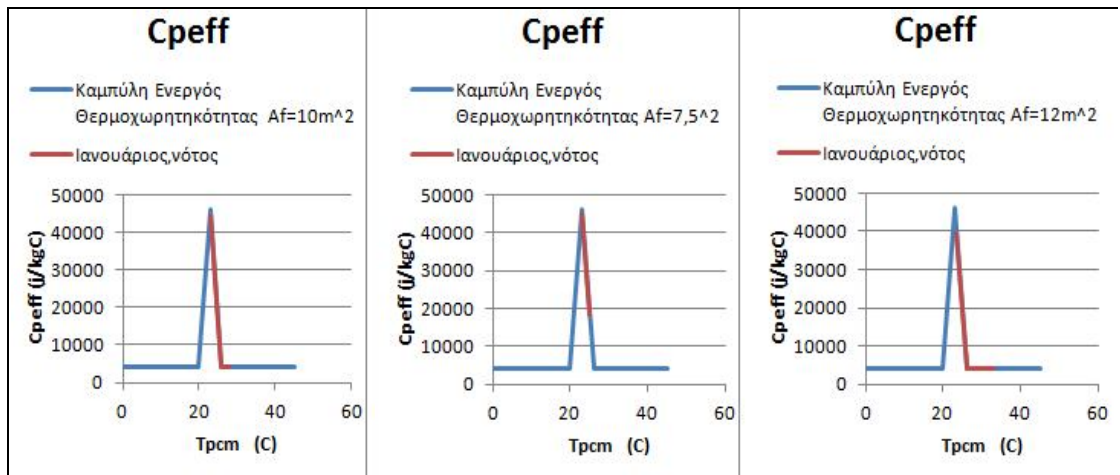
- $A_f=(2,5)\times(3)=7,5\text{ m}^2$
- $A_f=(2,5)\times(4)=10\text{m}^2$
- $A_f=(3)\times(4)=12\text{m}^2$

Η παραμετρική μελέτη θα πραγματοποιηθεί για την προσομοίωση του κεφαλαίου 5.3.3. Για κάθε περίπτωση στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM συναρτήσει της ώρας, η συμπληρωματική ισχύ που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας καθώς και το μέρος της καμπύλης ενεργούς θερμοχωρητικότητας που καλύπτεται κάθε φορά.

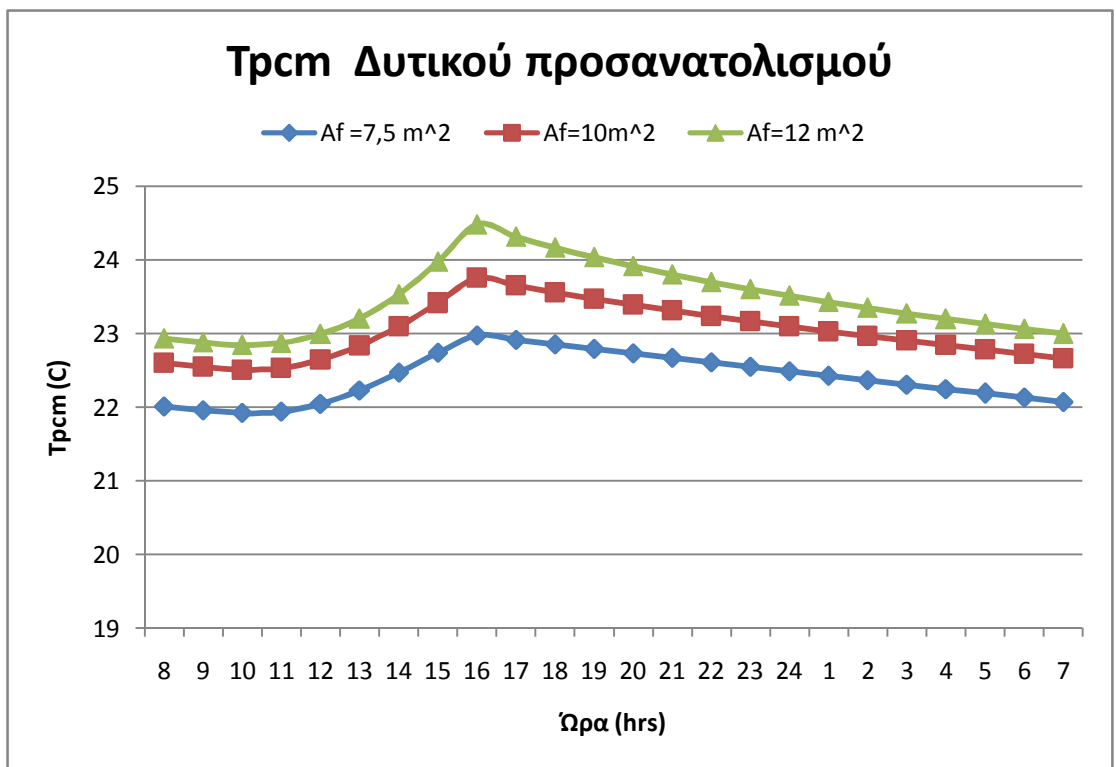
❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου:



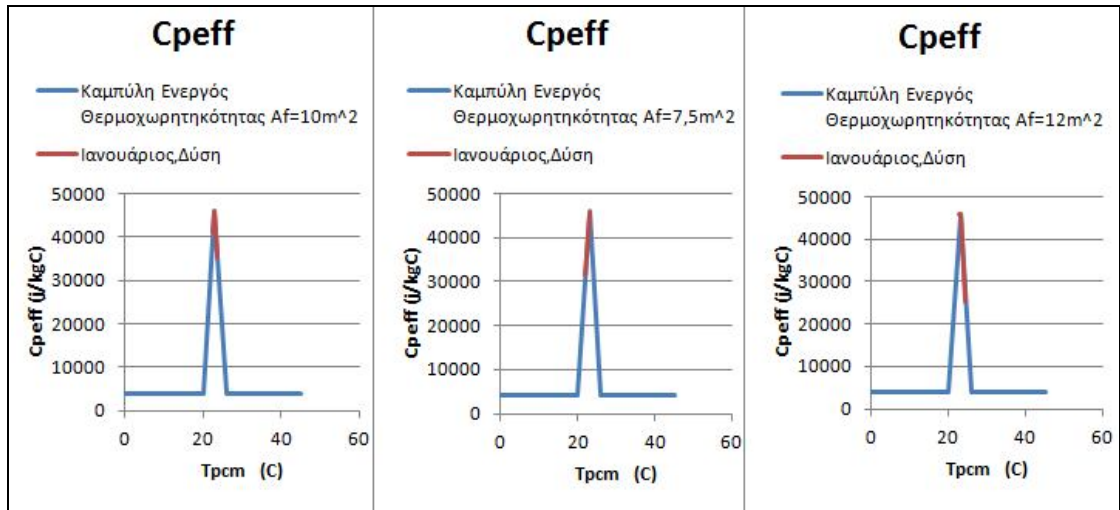
Σχήμα 6.3.1 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου.



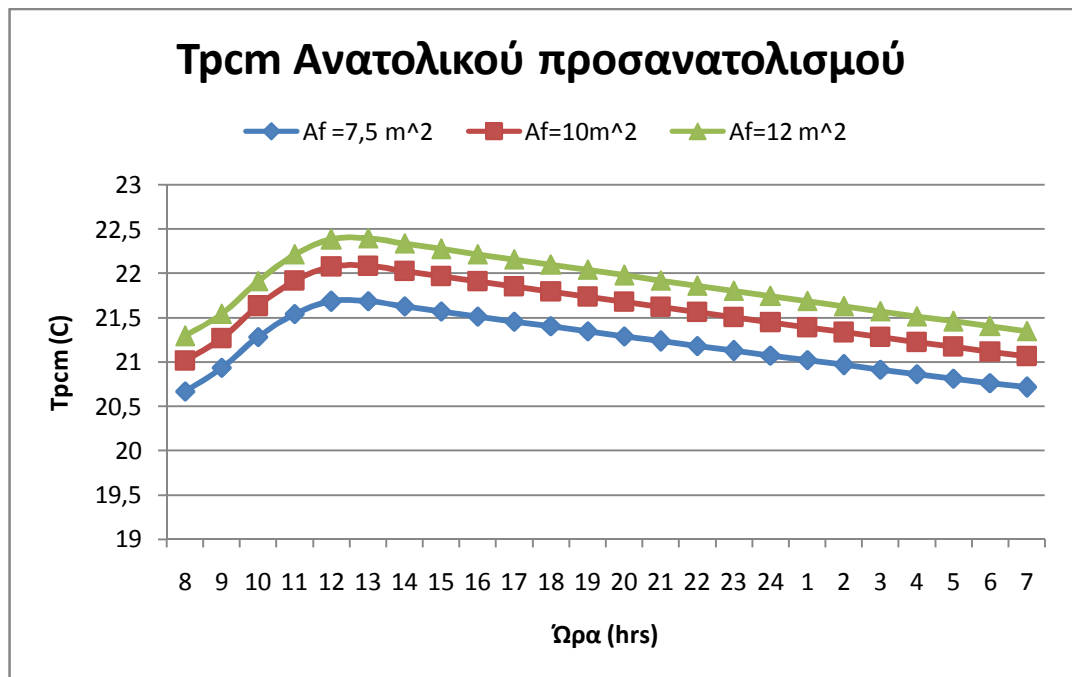
Σχήμα 6.3.2 Καμπύλη ενεργός θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων νότιου προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου.



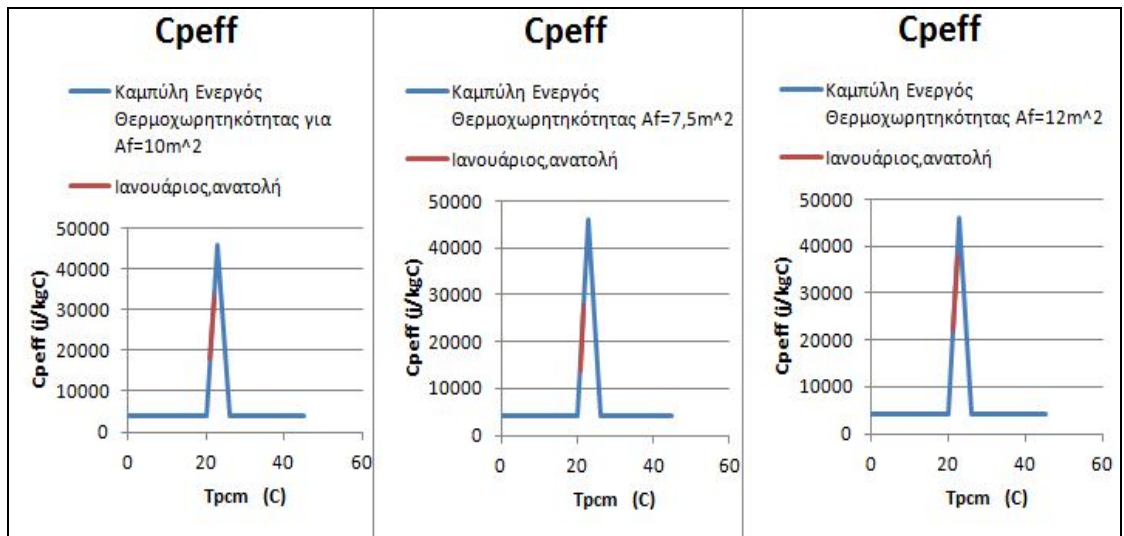
Σχήμα 6.3.3 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου.



Σχήμα 6.3.4 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων δυτικού προσανατολισμού για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου.

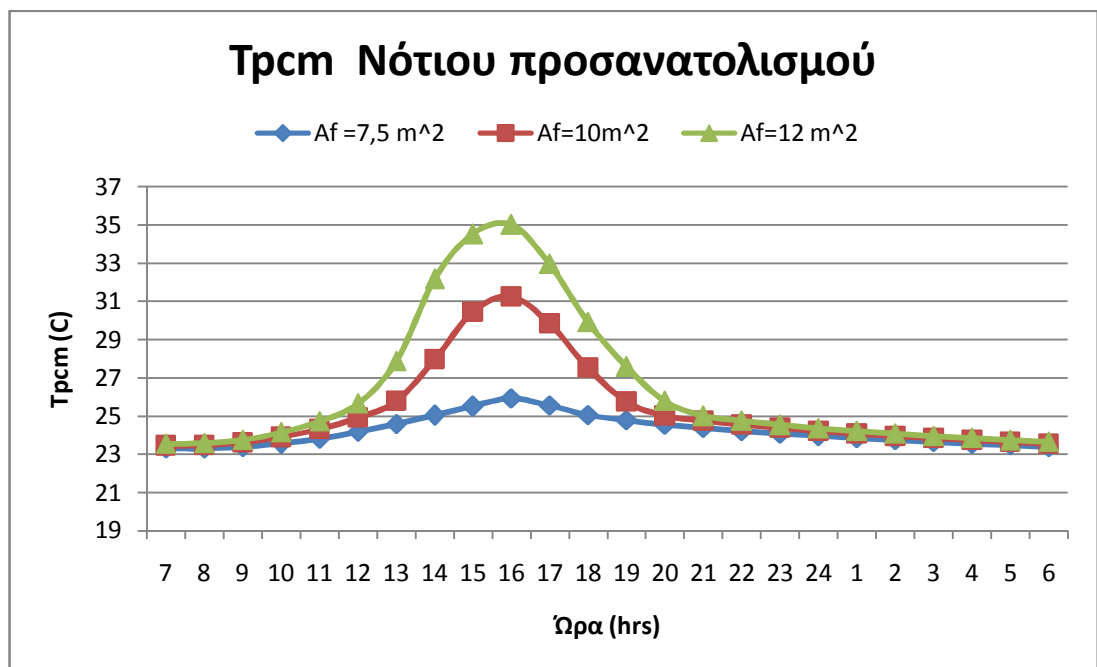


Σχήμα 6.3.5 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου .



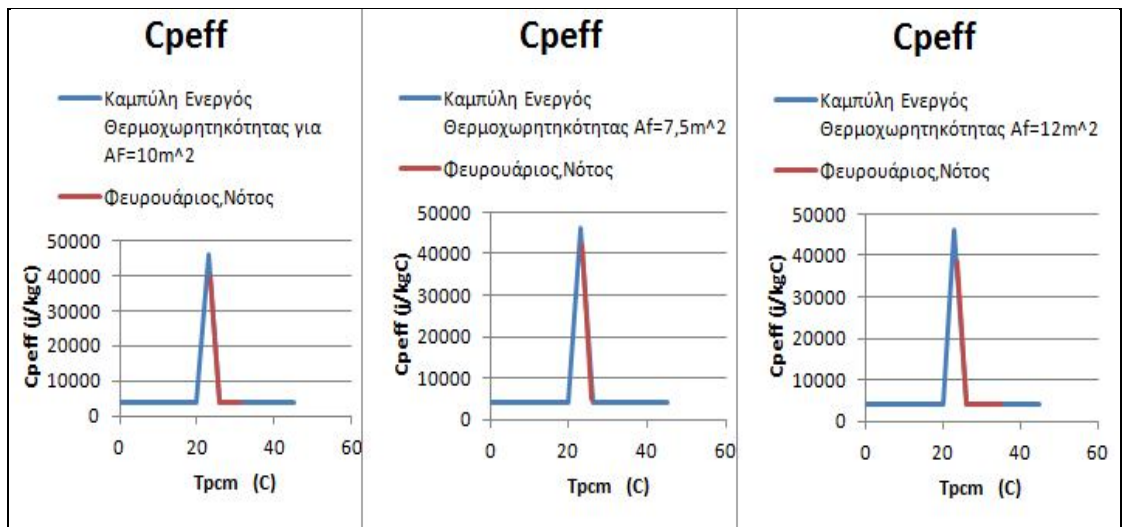
Σχήμα 6.3.6 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων ανατολικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου :

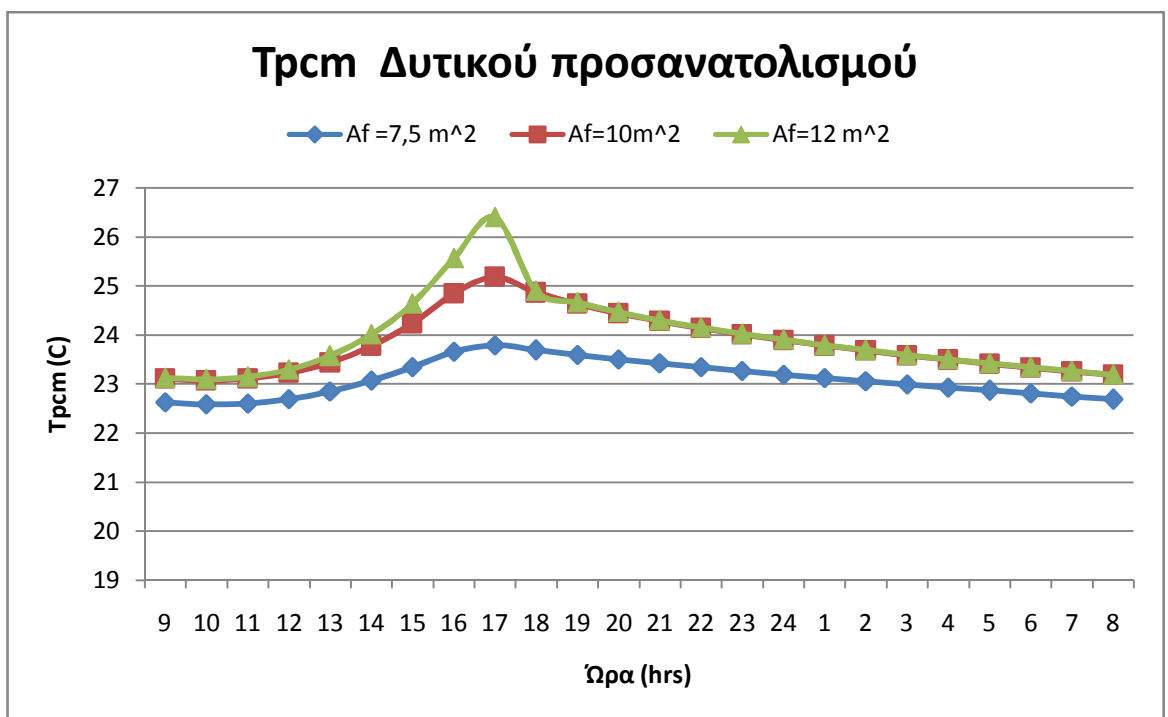


Σχήμα 6.3.7 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου.

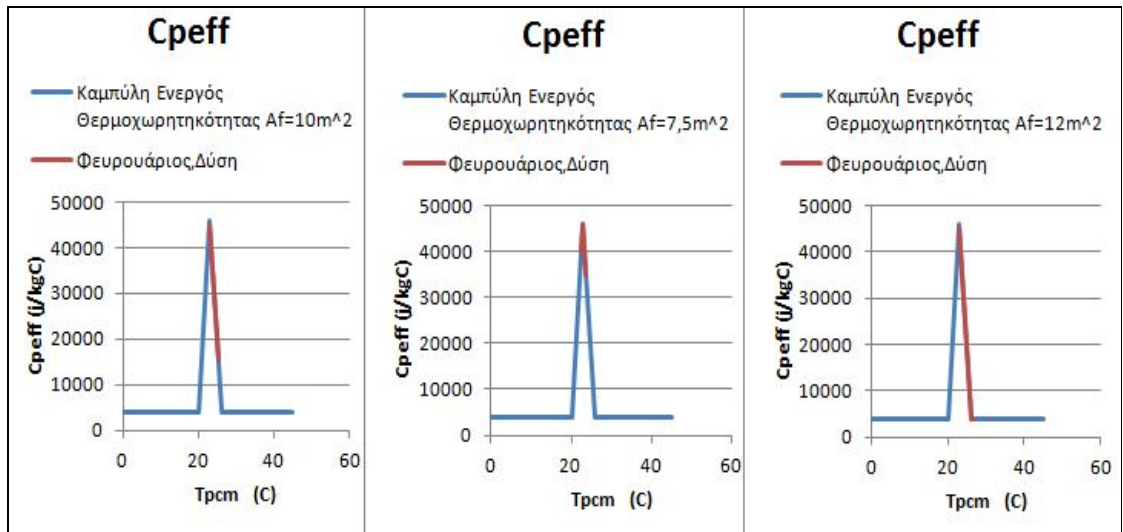




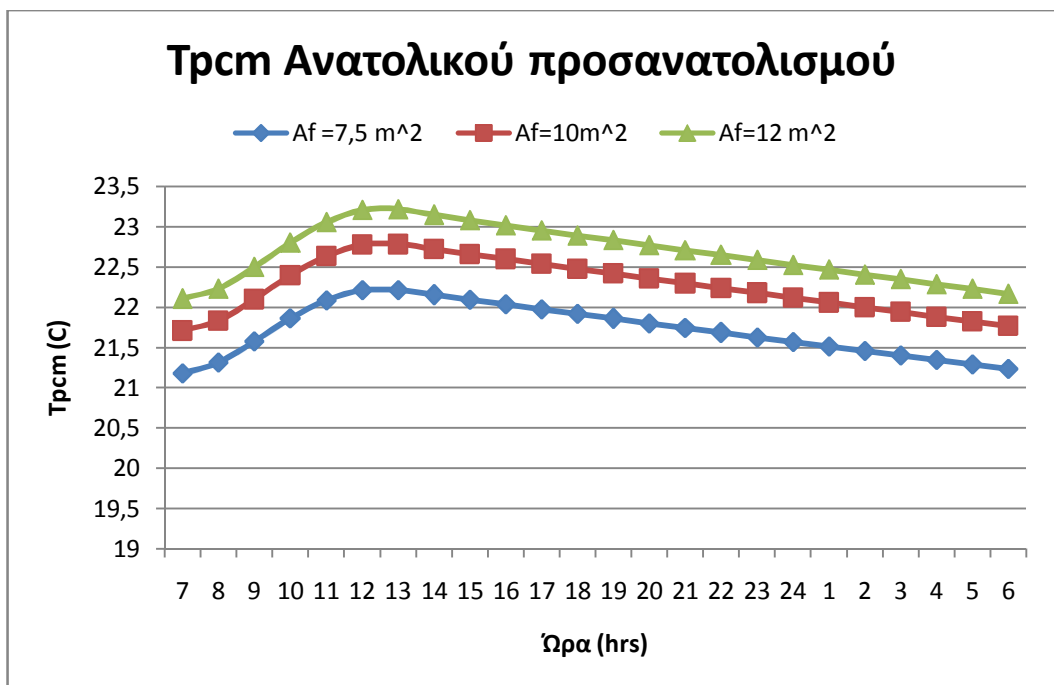
Σχήμα 6.3.8 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων νότιου προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου



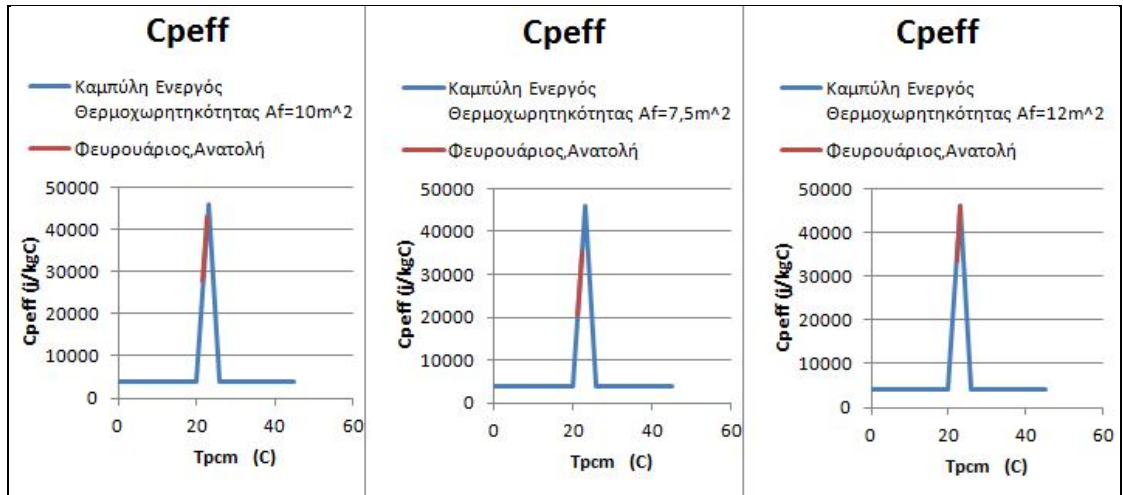
Σχήμα 6.3.9 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου.



Σχήμα 6.3.10 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων δυτικού προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου.

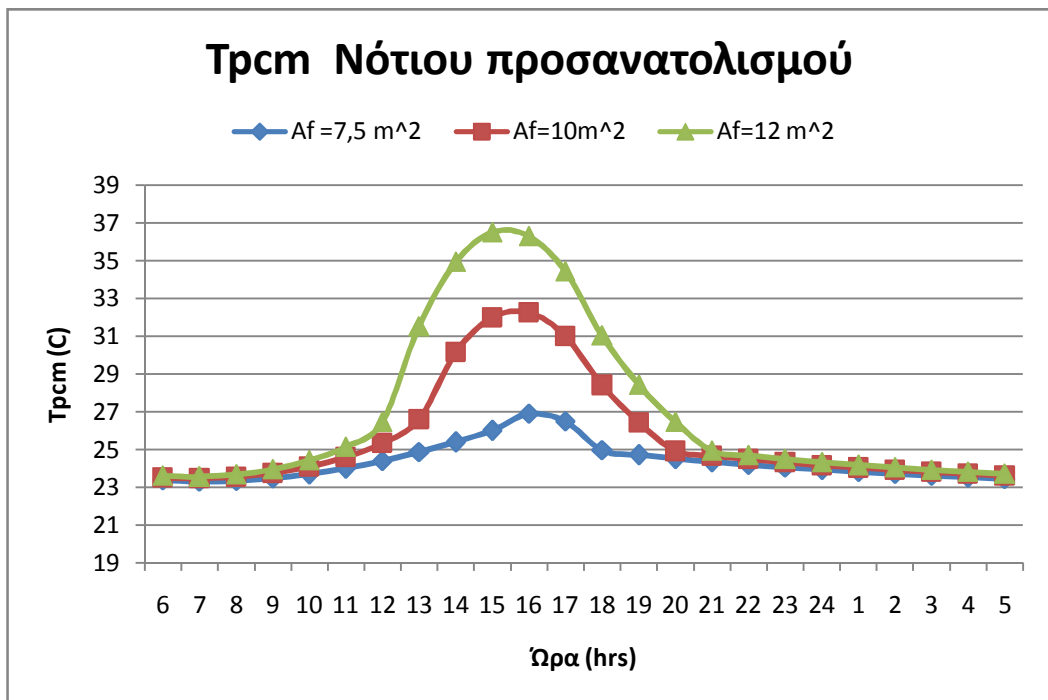


Σχήμα 6.3.11 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου.

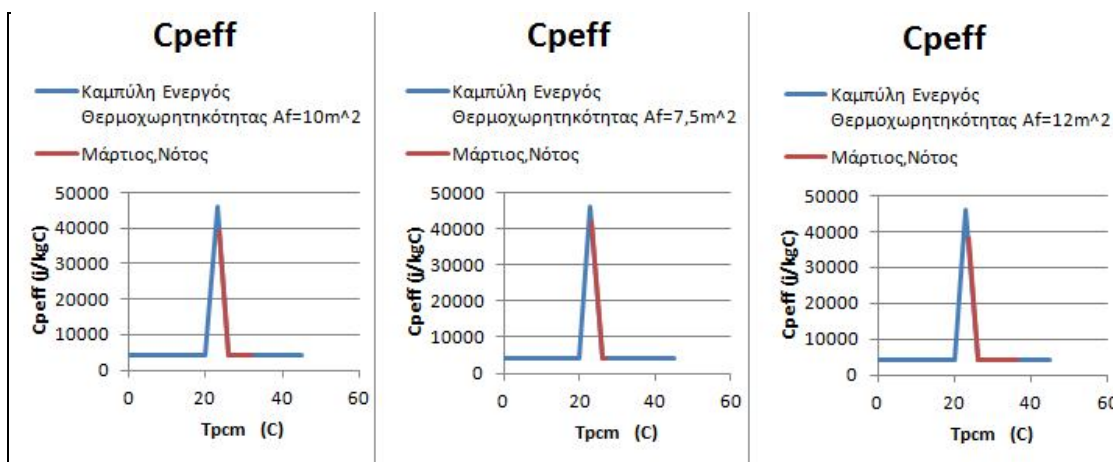


Σχήμα 6.3.12 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων ανατολικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

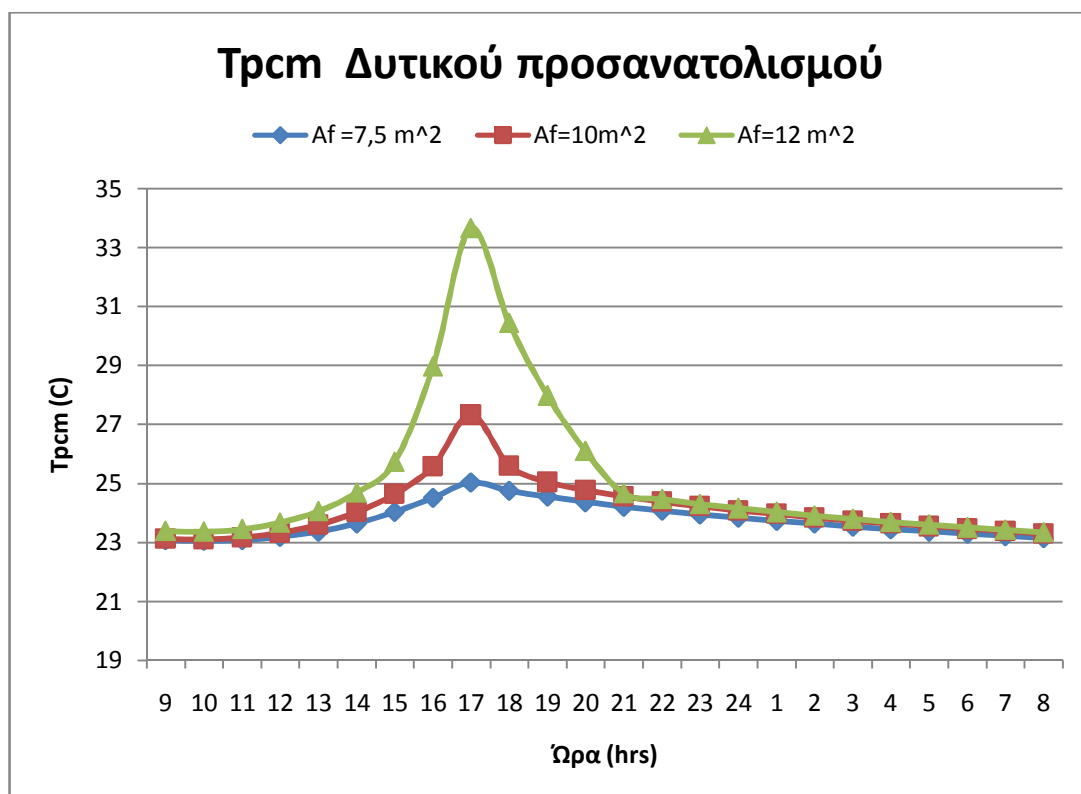
❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου:



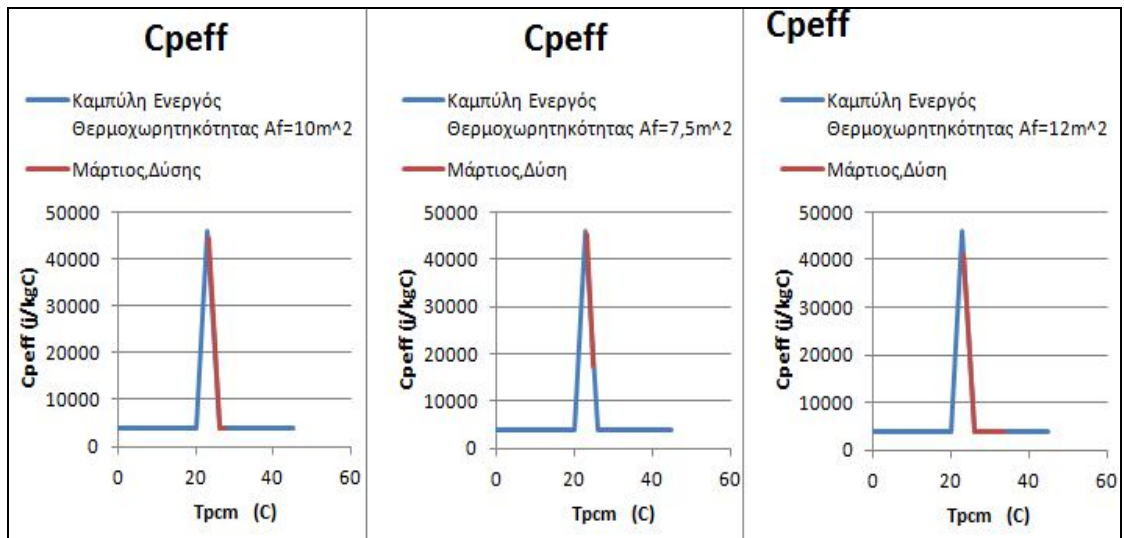
Σχήμα 6.3.13 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου.



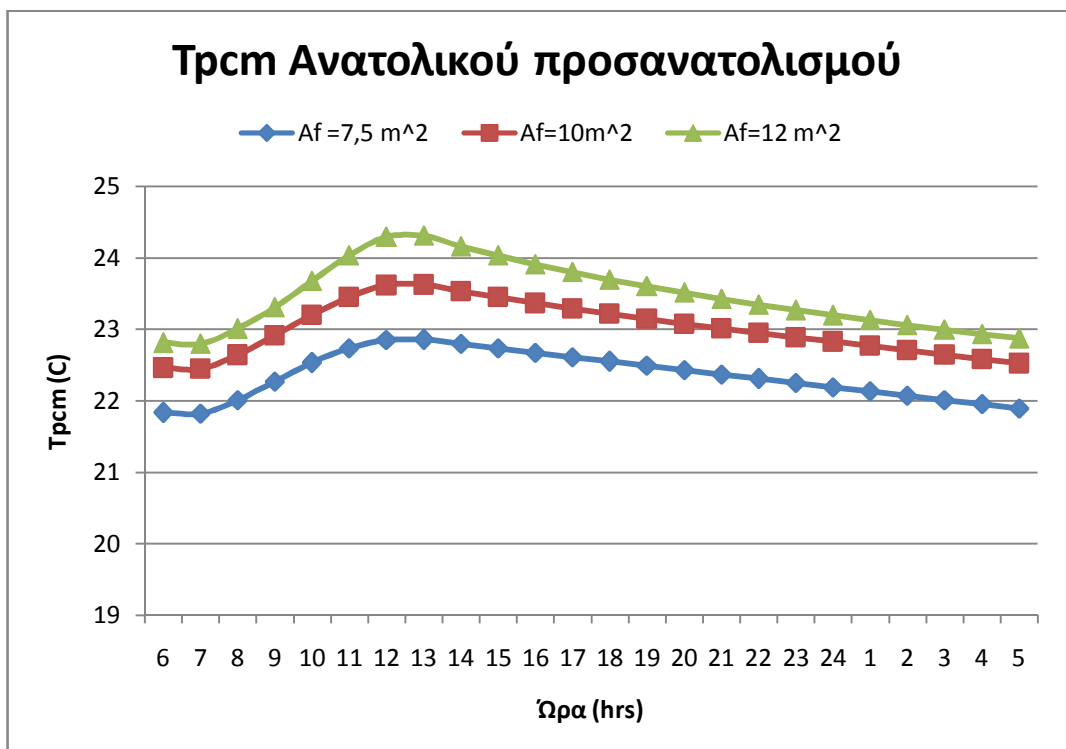
Σχήμα 6.3.14 Καμπύλη ενεργός θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων νότιου προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου



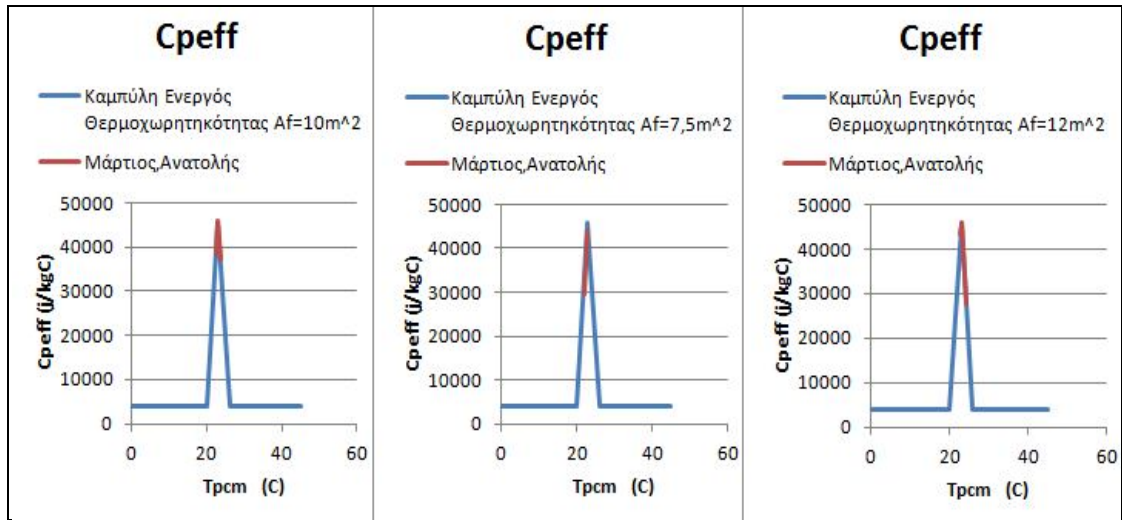
Σχήμα 6.3.15 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπινάκα δυτικού προσανατολισμού συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου.



Σχήμα 6.3.16 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων δυτικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου

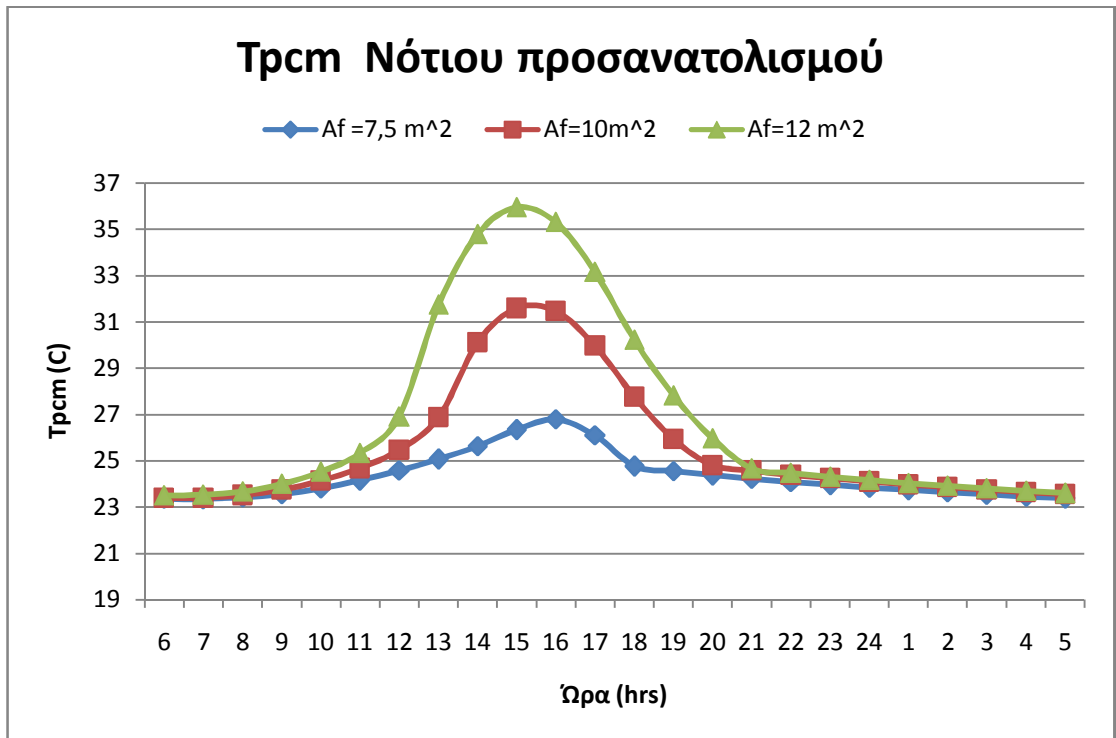


Σχήμα 6.3.17 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπινάκα ανατολικού προσανατολισμού συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου.

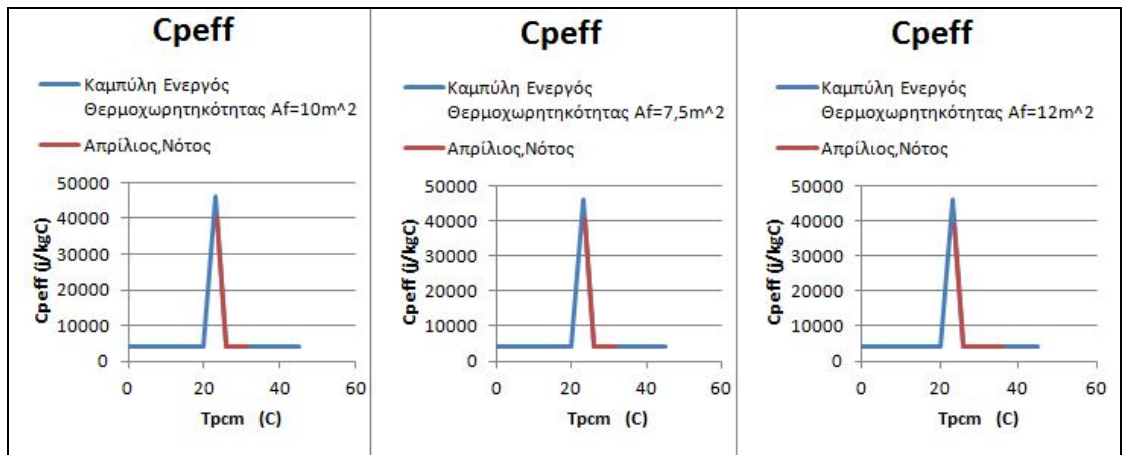


Σχήμα 6.3.18 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων ανατολικού προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου

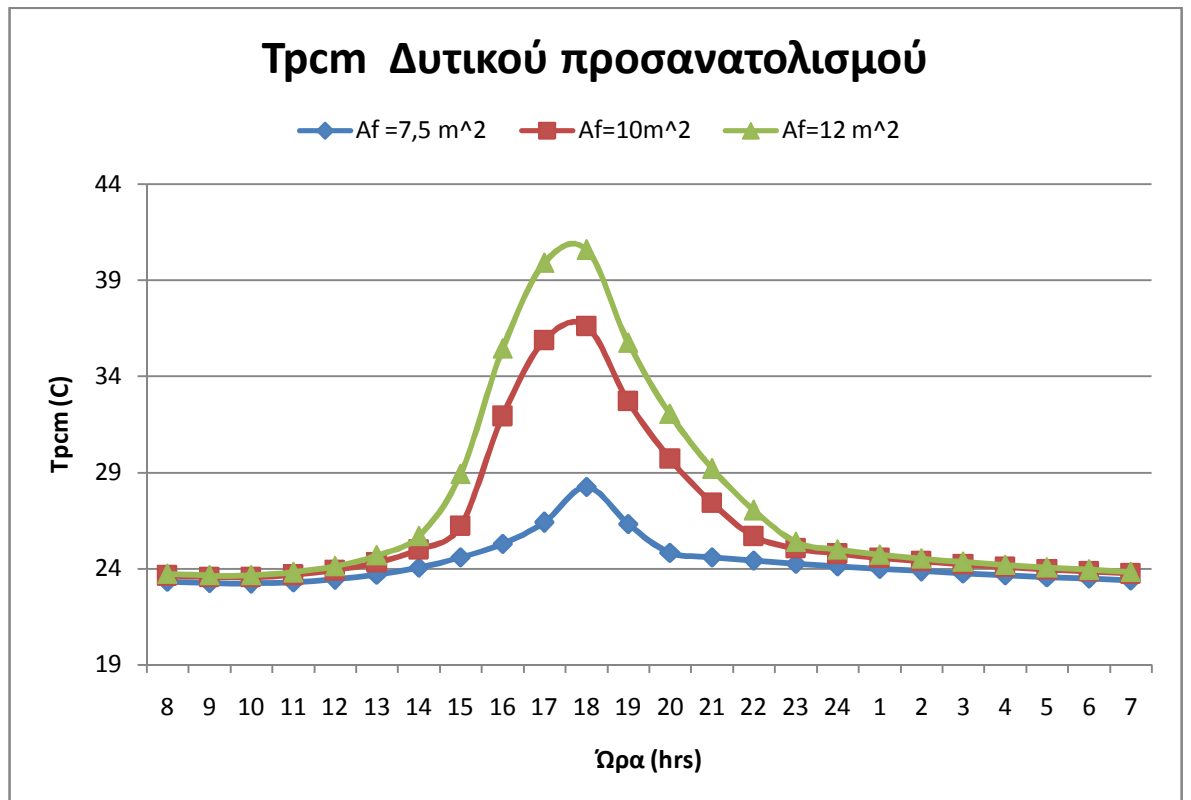
❖ Για την 21<sup>η</sup> Απριλίου:



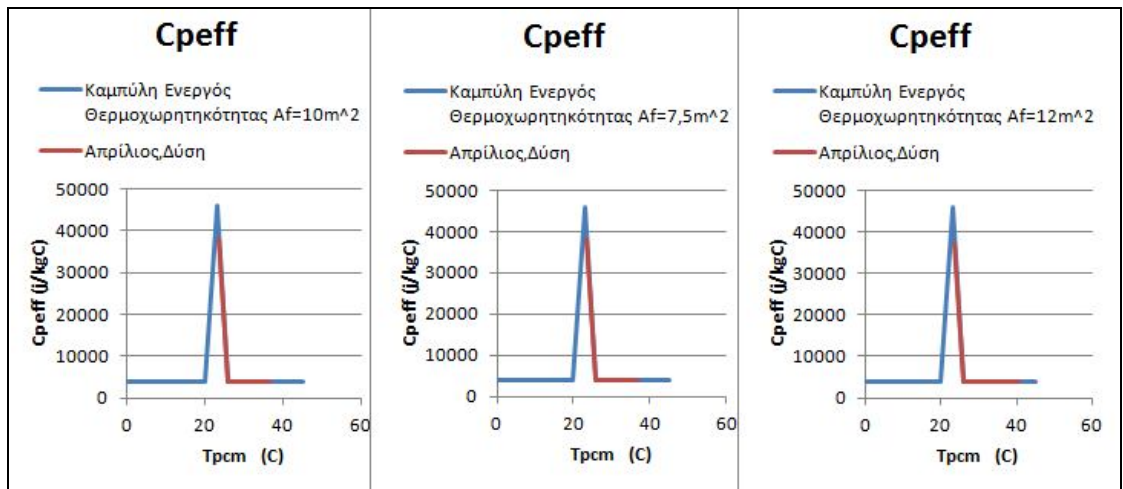
Σχήμα 6.3.19 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπινάκα νότιου προσανατολισμού συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Απριλίου.



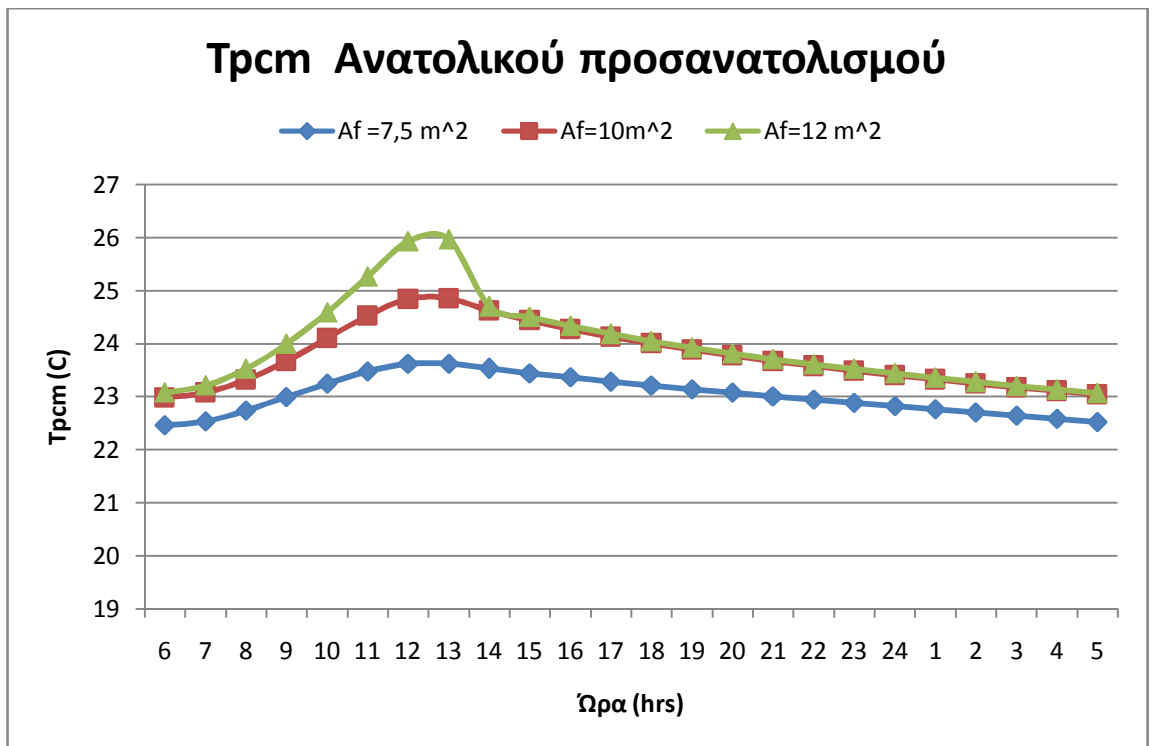
Σχήμα 6.3.20 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων νότιου προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Απριλίου



Σχήμα 6.3.21 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Απριλίου.

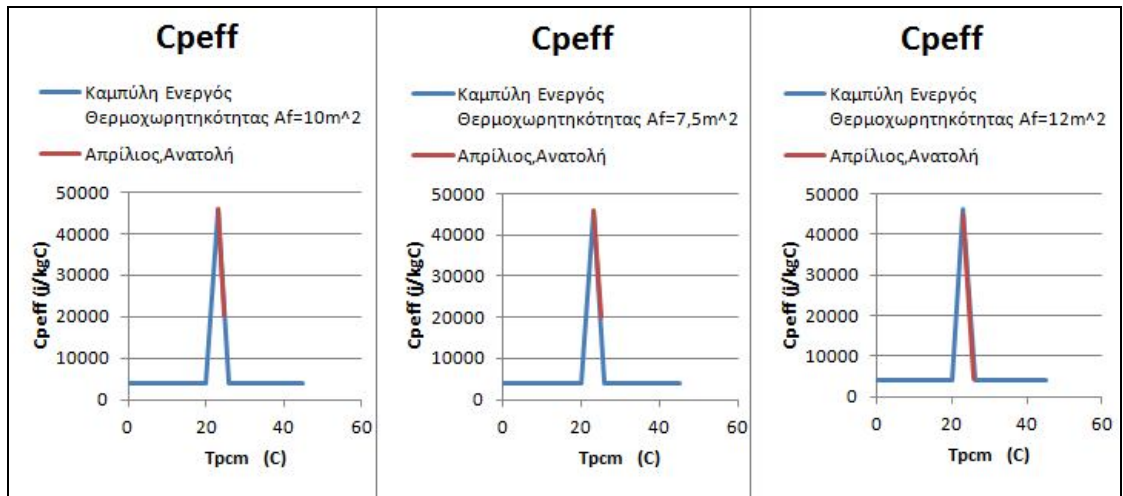


Σχήμα 6.3.22 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων δυτικού προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Απριλίου



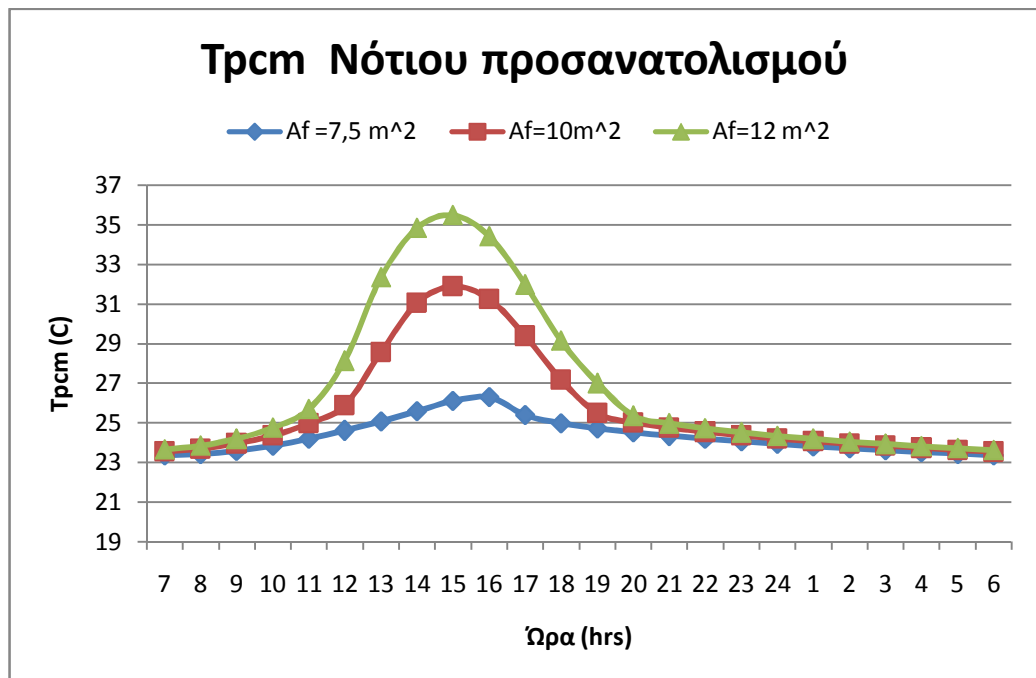
Σχήμα 6.3.23 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Απριλίου.



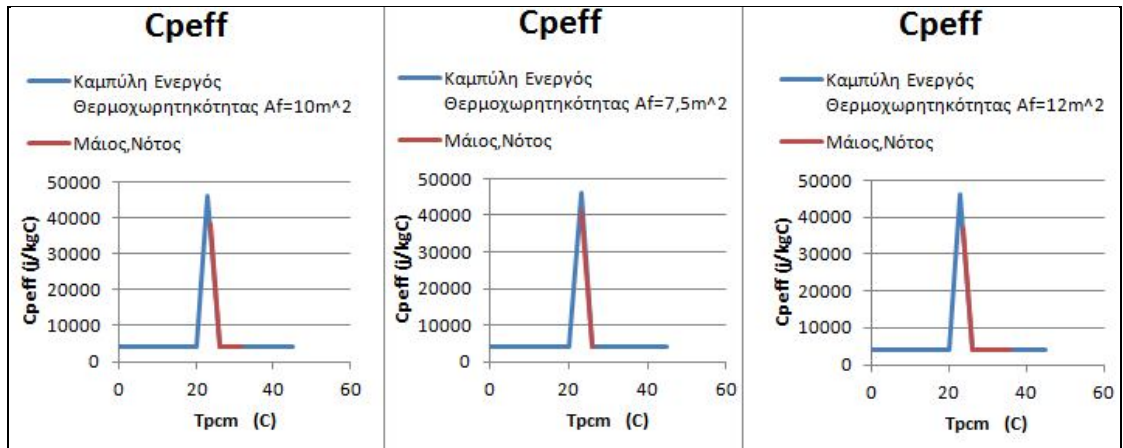


Σχήμα 6.3.24 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων ανατολικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Απριλίου

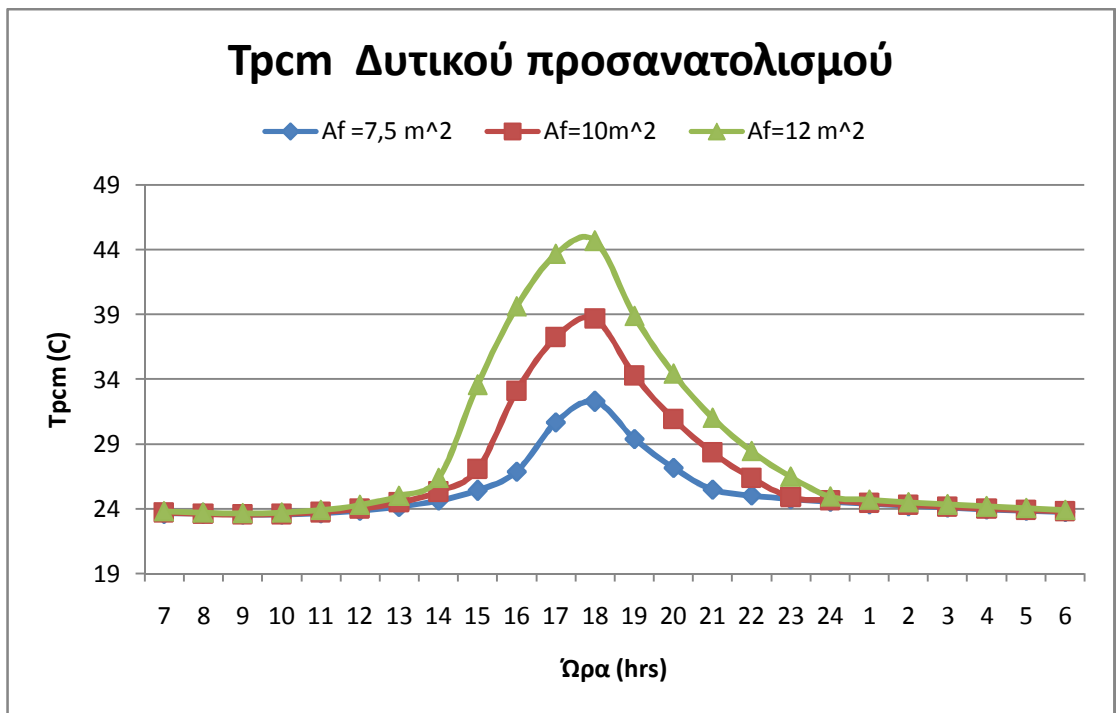
❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαΐου :



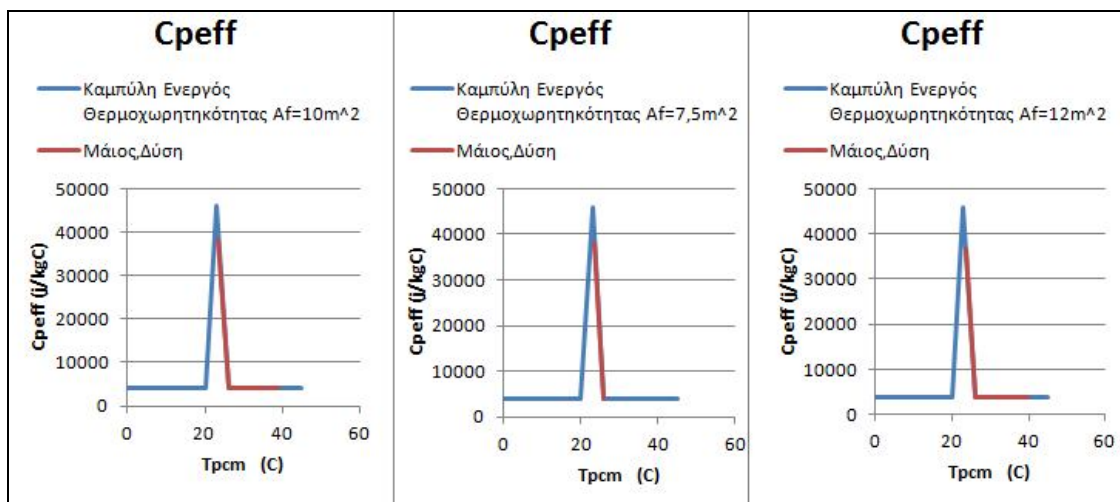
Σχήμα 6.3.25 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαΐου.



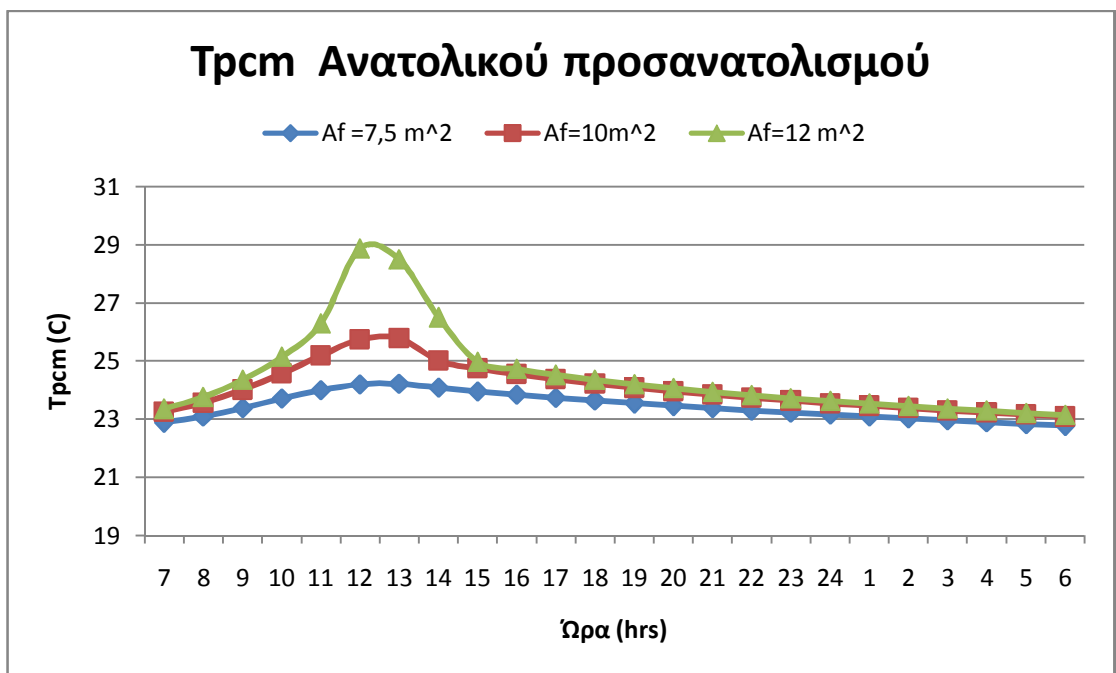
Σχήμα 6.3.26 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων νότιου προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Μαΐου.



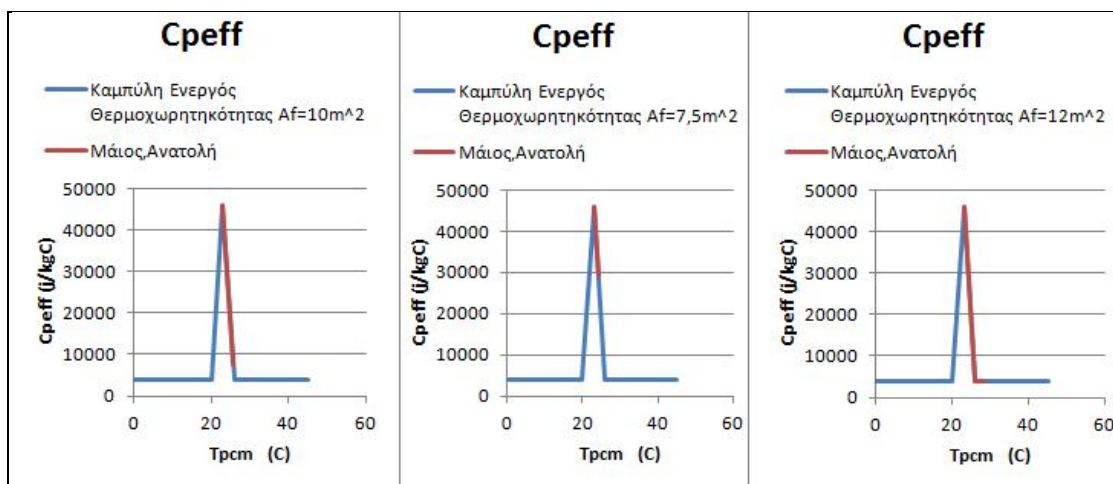
Σχήμα 6.3.27 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαΐου.



Σχήμα 6.3.28 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων δυτικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Μαΐου

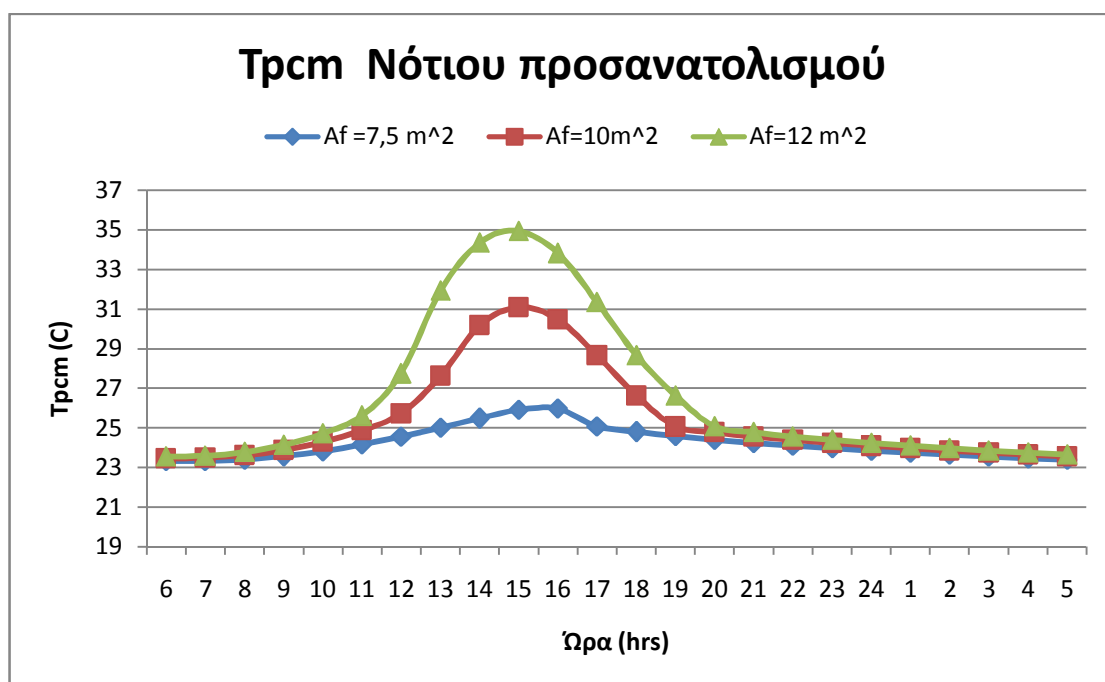


Σχήμα 6.3.29 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαΐου.

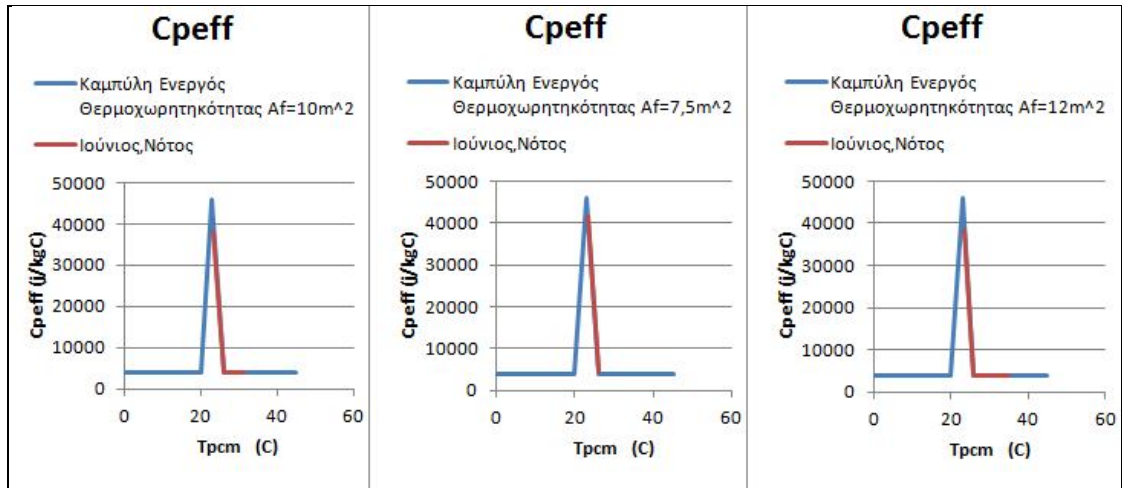


Σχήμα 6.3.30 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων ανατολικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Μαΐου

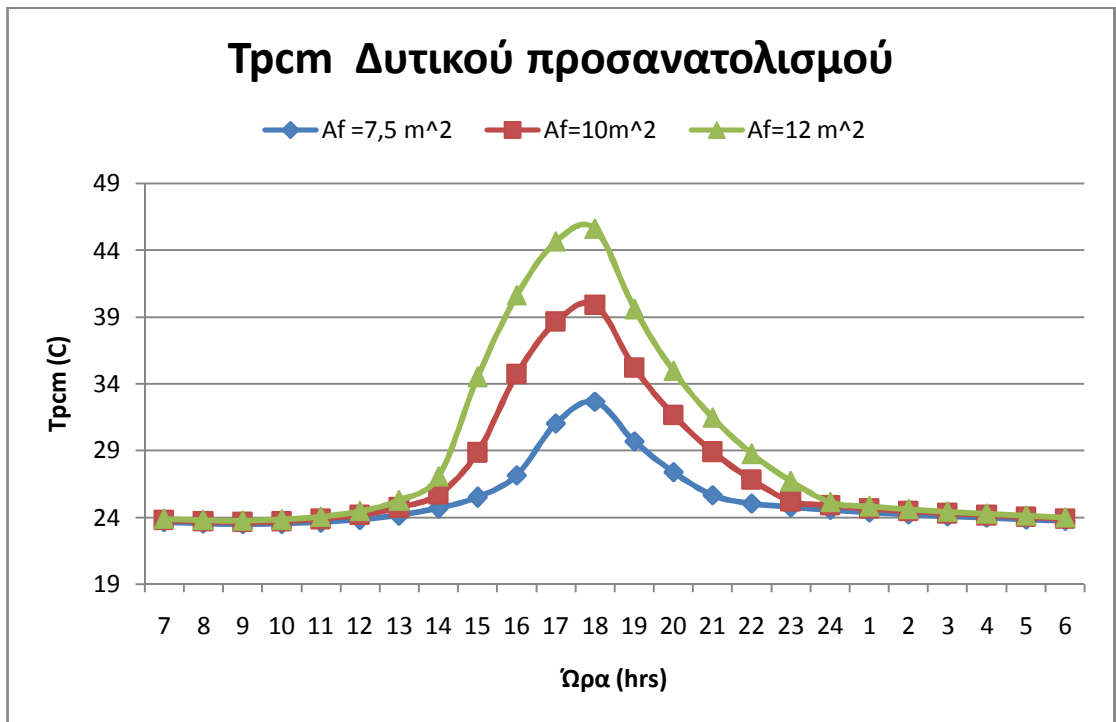
❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου :



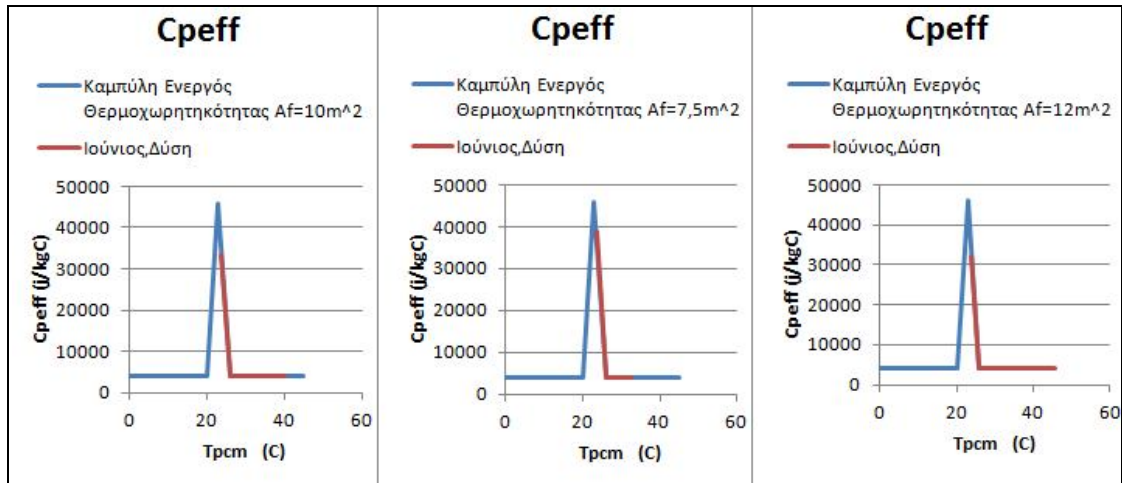
Σχήμα 6.3.31 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου.



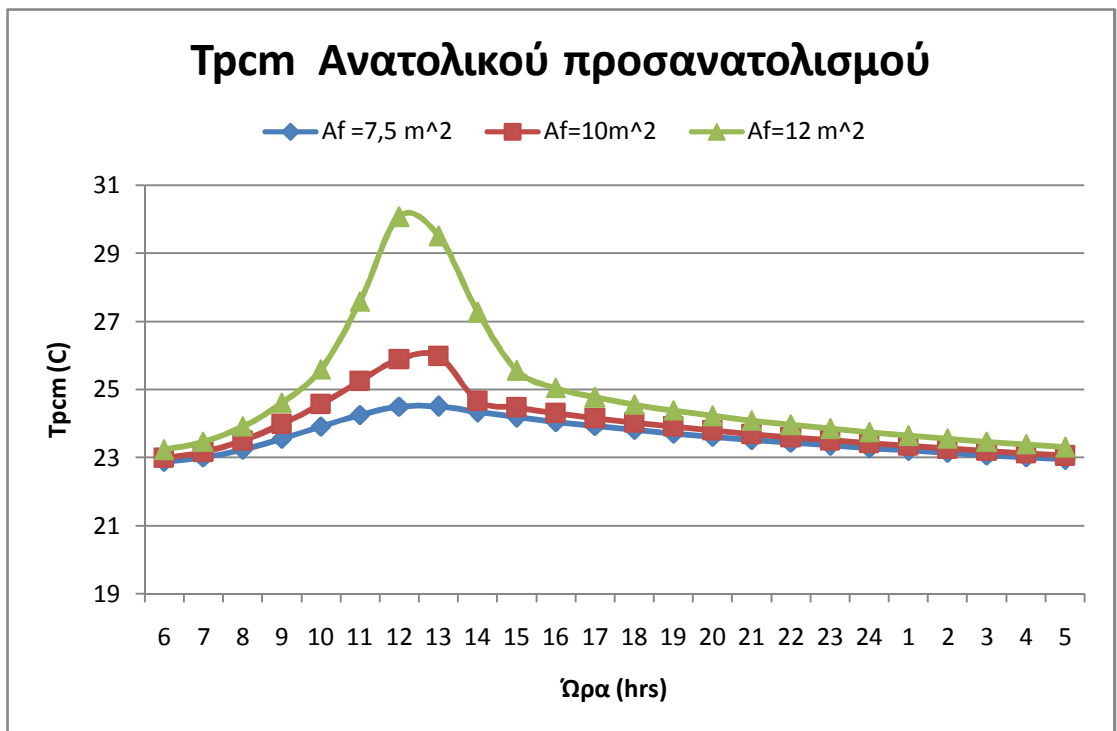
Σχήμα 6.3.32 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων νότιου προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου



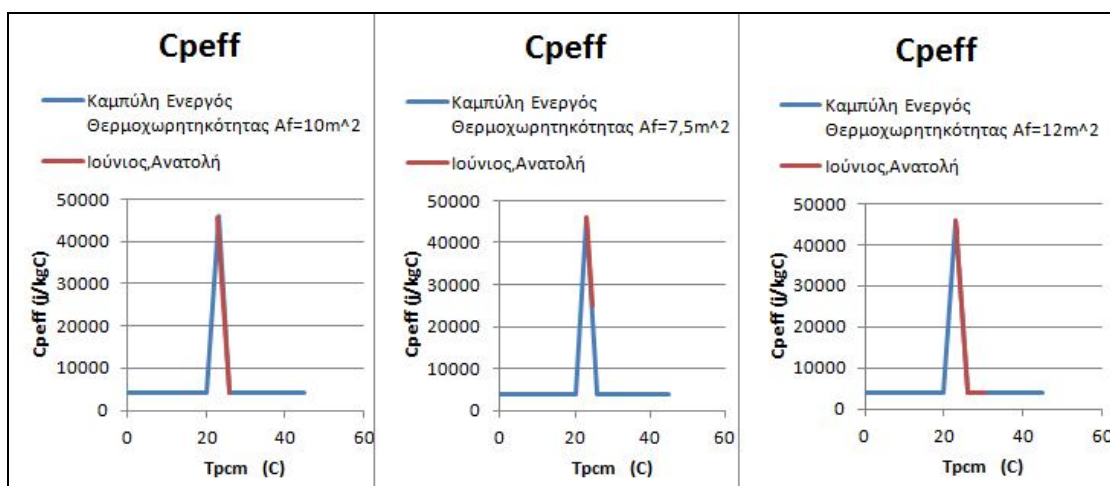
Σχήμα 6.3.33 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου.



Σχήμα 6.3.34 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων δυτικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου

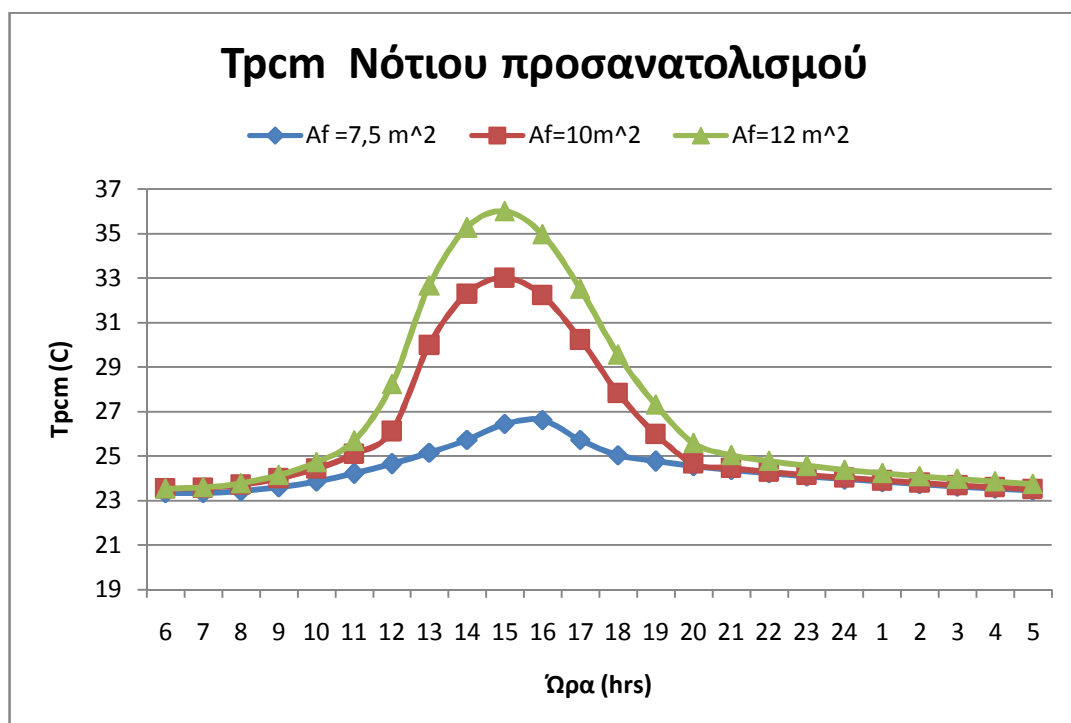


Σχήμα 6.3.35 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου.

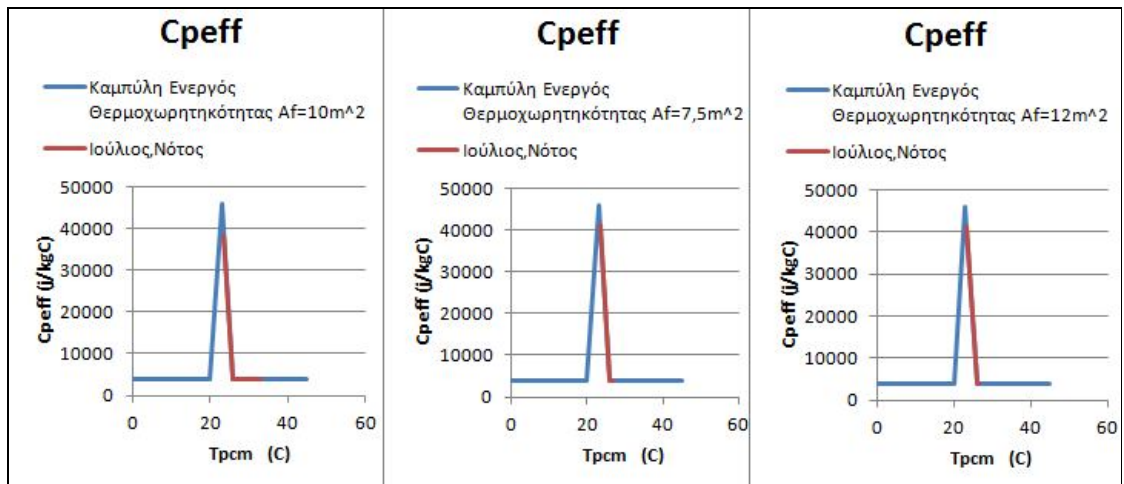


Σχήμα 6.3.36 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων ανατολικού προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου

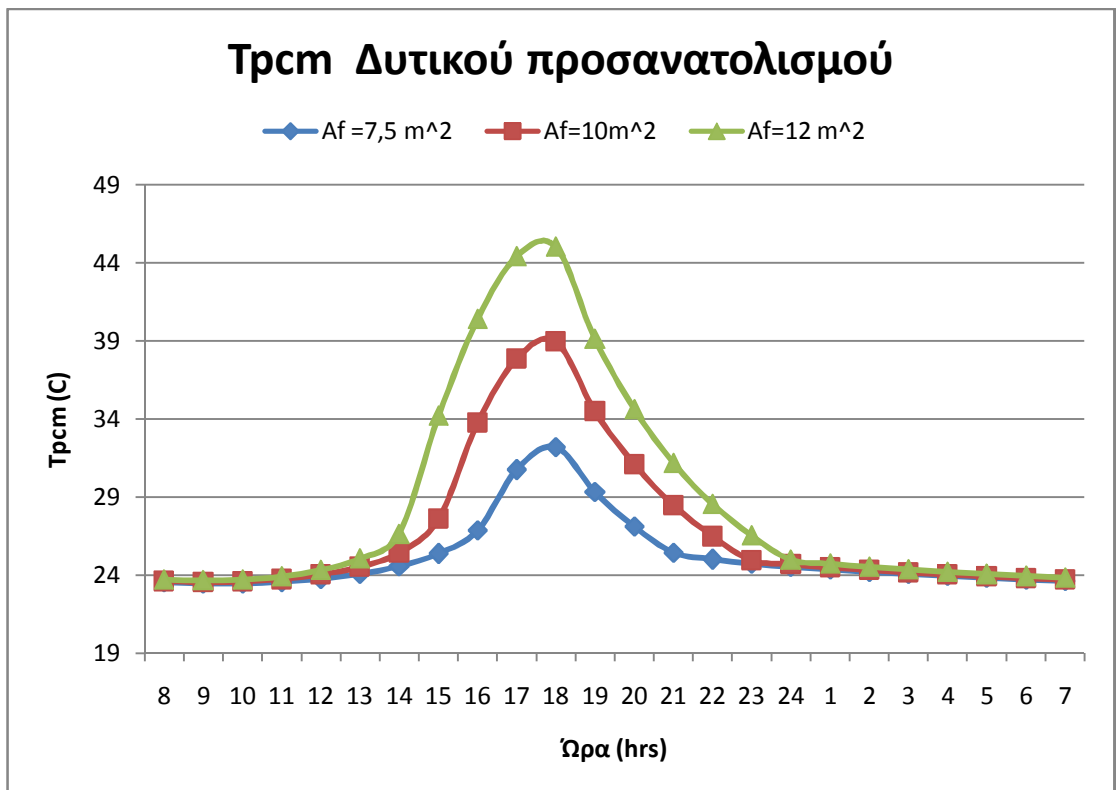
❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου :



Σχήμα 6.3.37 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου.

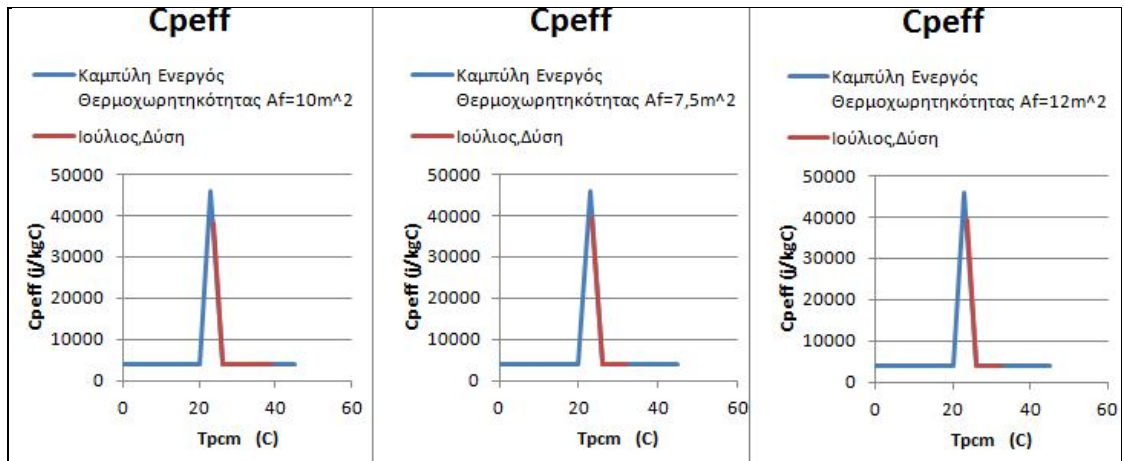


Σχήμα 6.3.38 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων νότιου προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

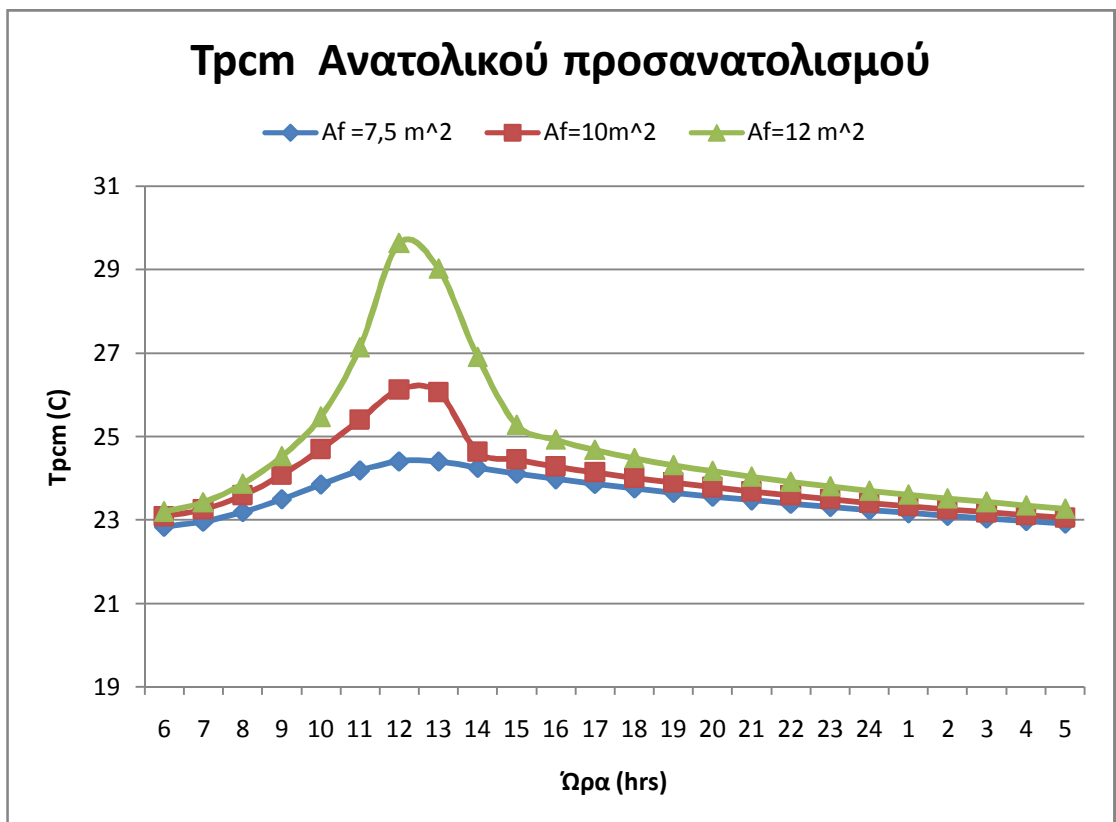


Σχήμα 6.3.39 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου.

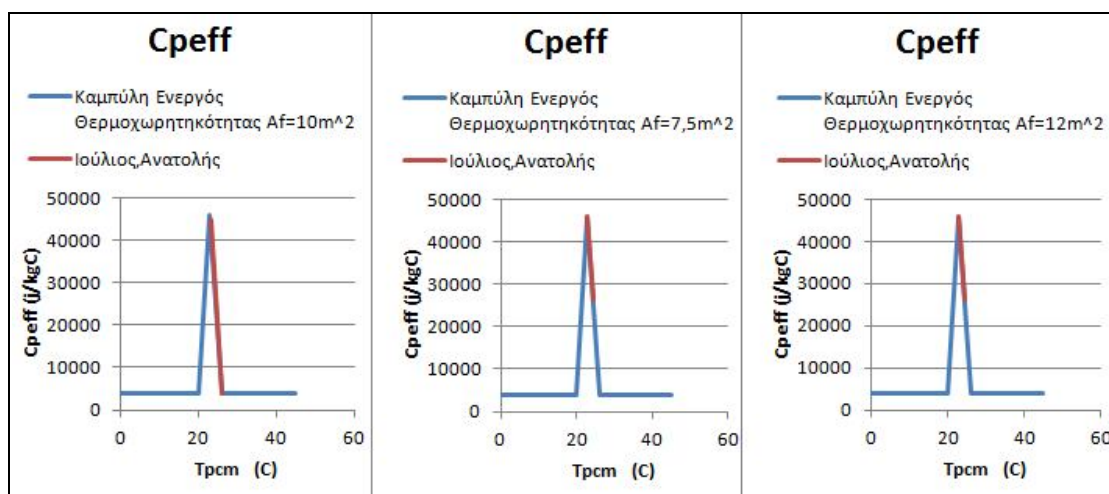




Σχήμα 6.3.40 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων δυτικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

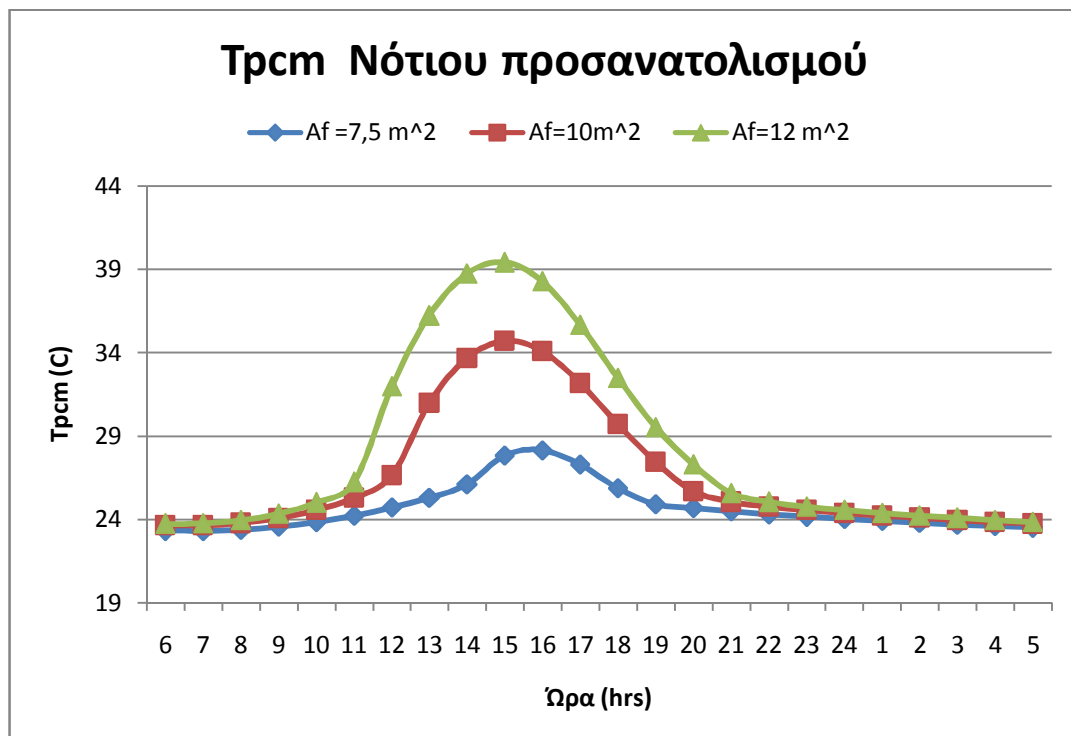


Σχήμα 6.3.41 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπινάκα ανατολικού προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου.

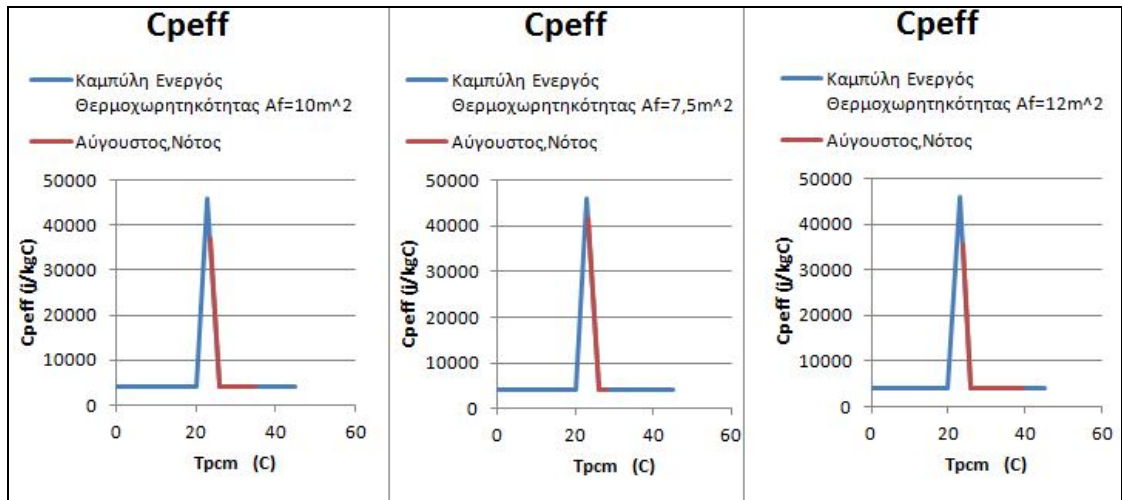


Σχήμα 6.3.42 Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων ανατολικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου.

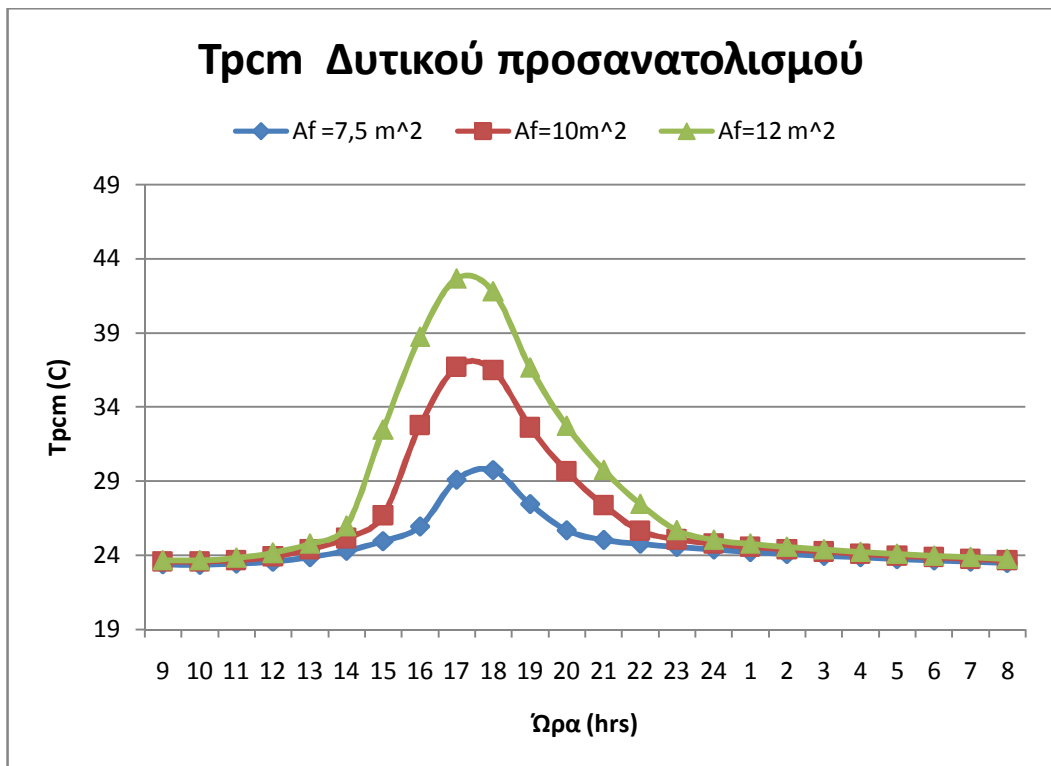
❖ Για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου:



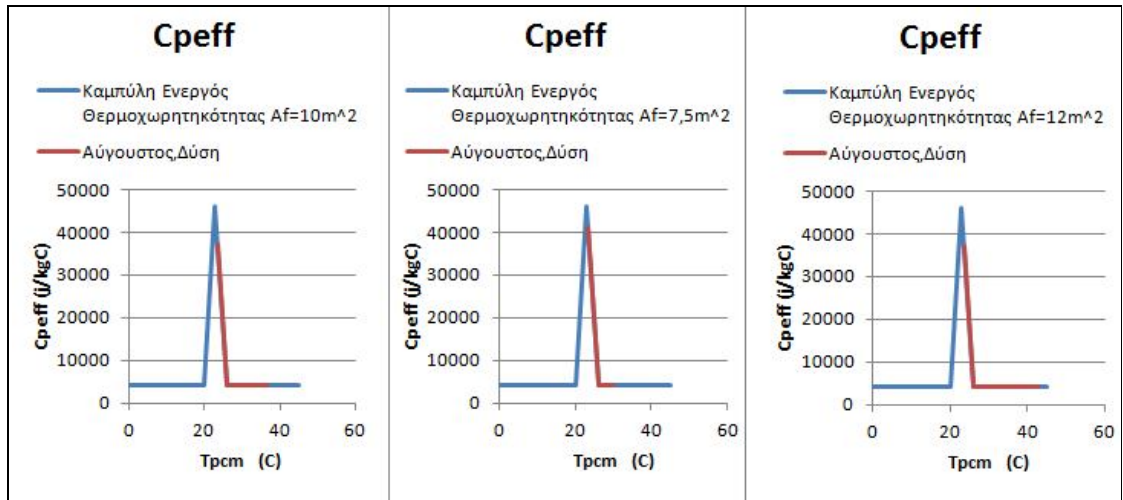
Σχήμα 6.3.43 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπινάκα νότιου προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου.



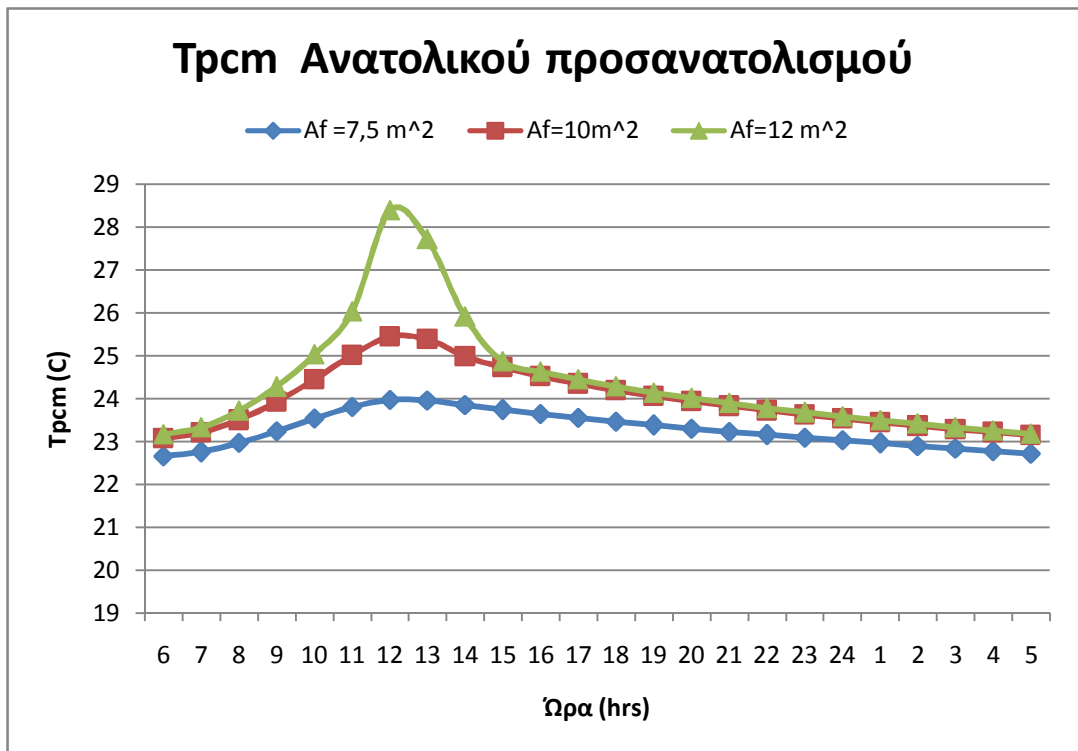
Σχήμα 6.3.44 Καμπύλη ενεργός θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων νότιου προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου



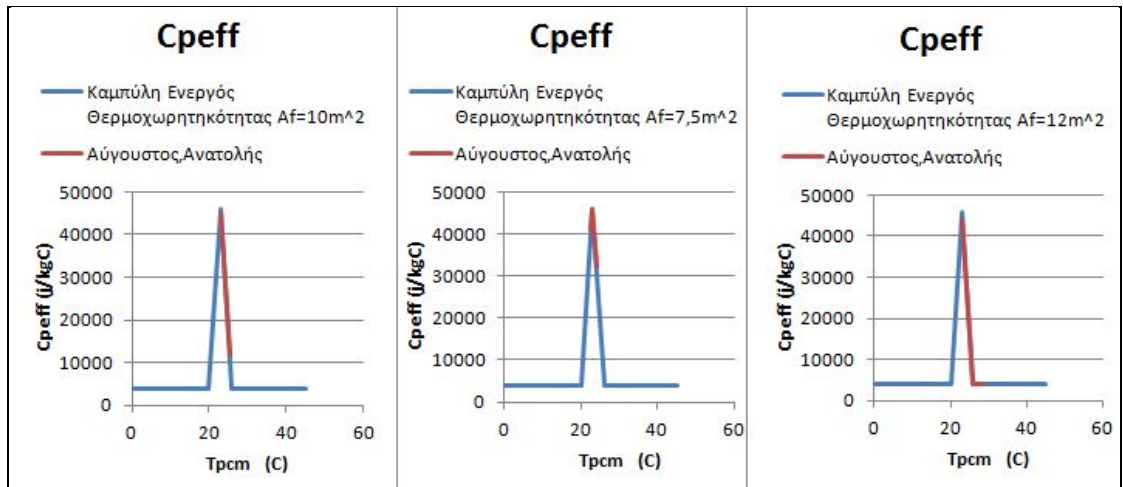
Σχήμα 6.3.45 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου.



Σχήμα 6.3.46 Καμπύλη ενεργός θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων δυτικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου

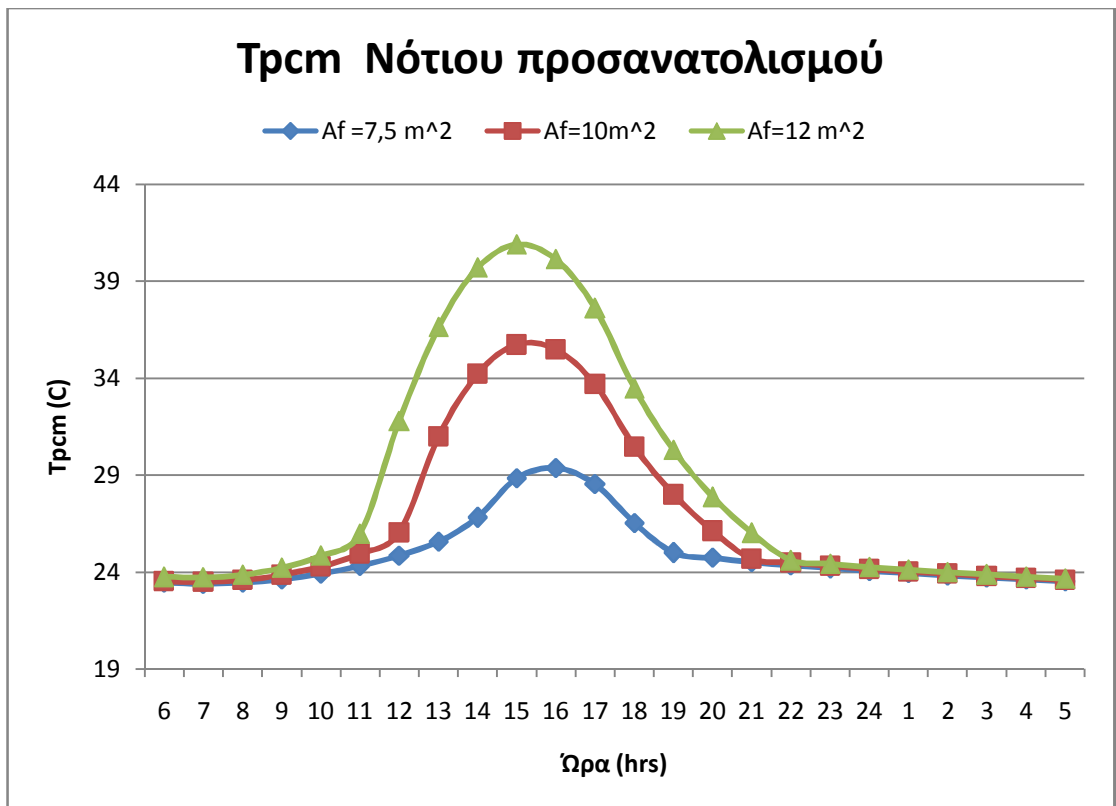


Σχήμα 6.3.47 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου.

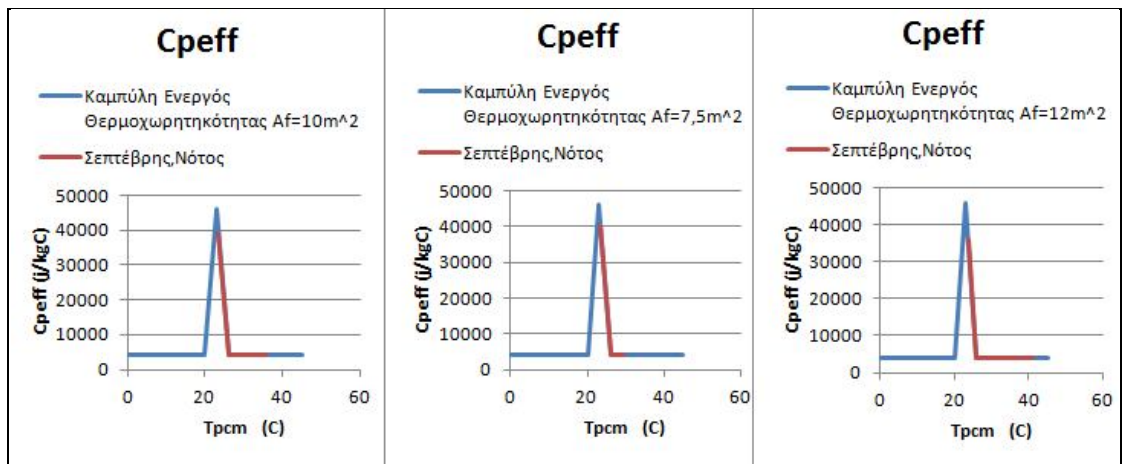


Σχήμα 6.3.48 Καμπύλη ενεργός θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων ανατολικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου.

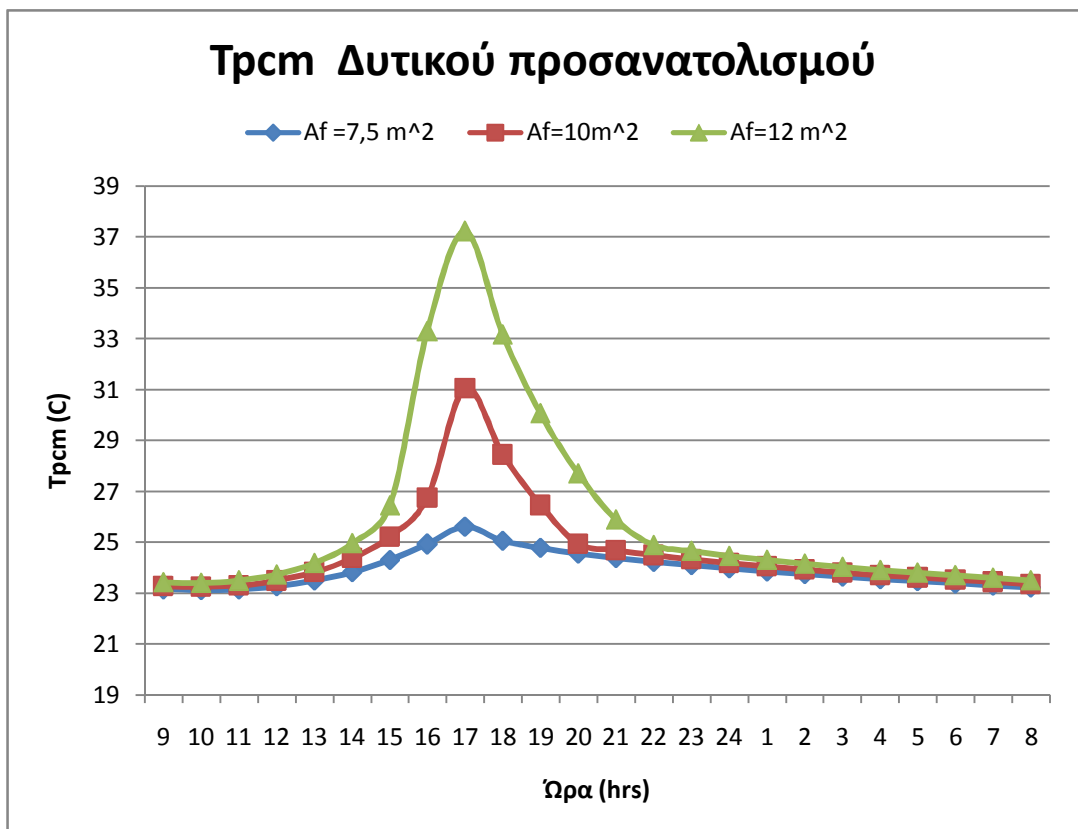
❖ Για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρη:



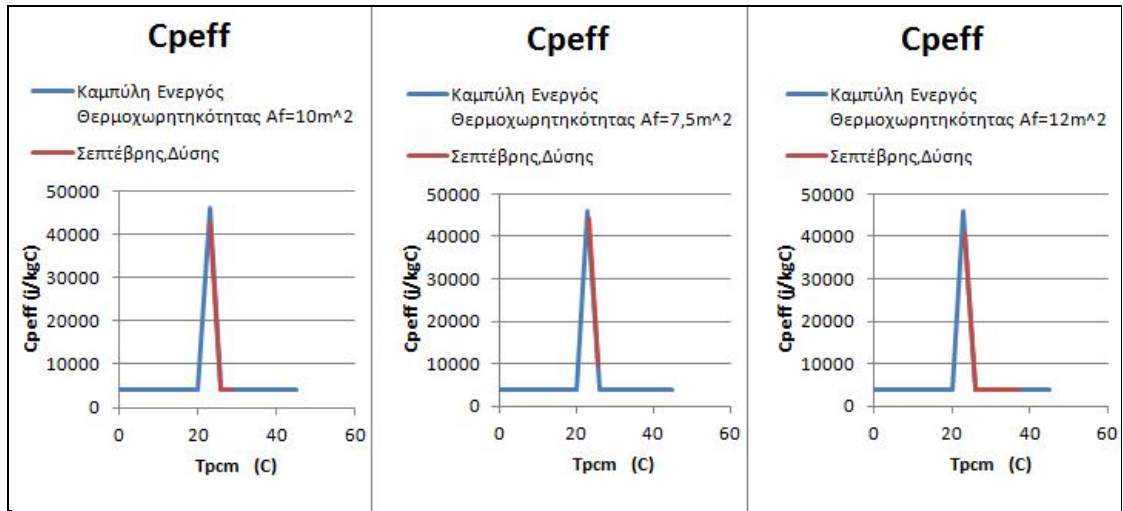
Σχήμα 6.3.49 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρη.



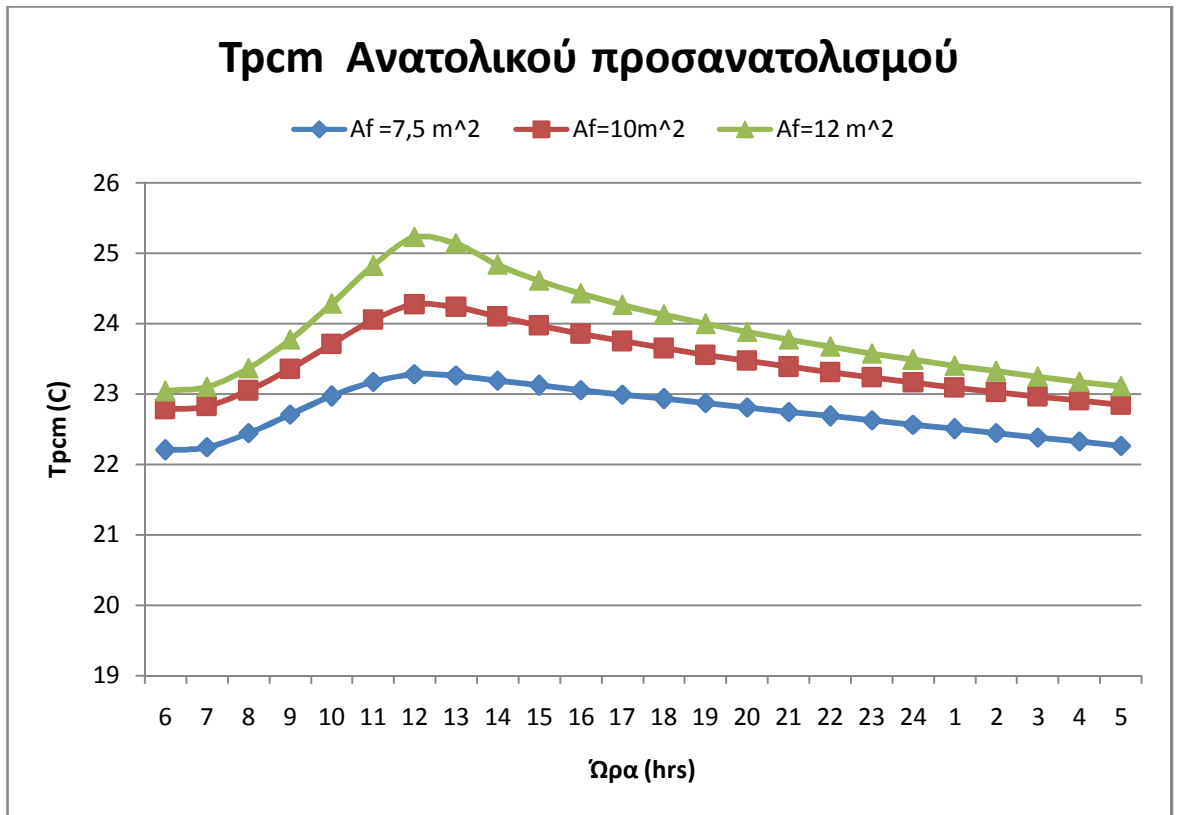
Σχήμα 6.3.50 Καμπύλη ενεργός θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων νότιου προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου.



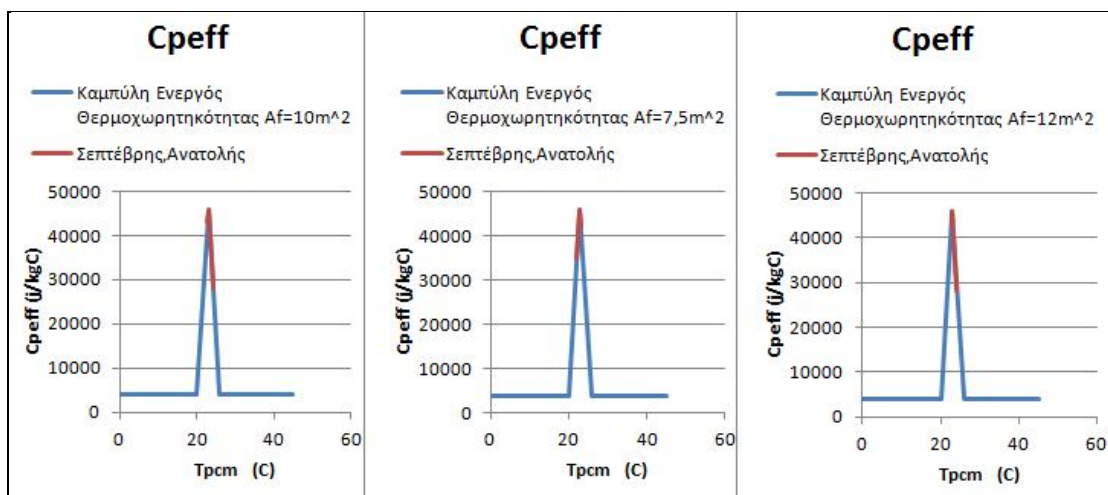
Σχήμα 6.3.51 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρη.



Σχήμα 6.3.52 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων δυτικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου

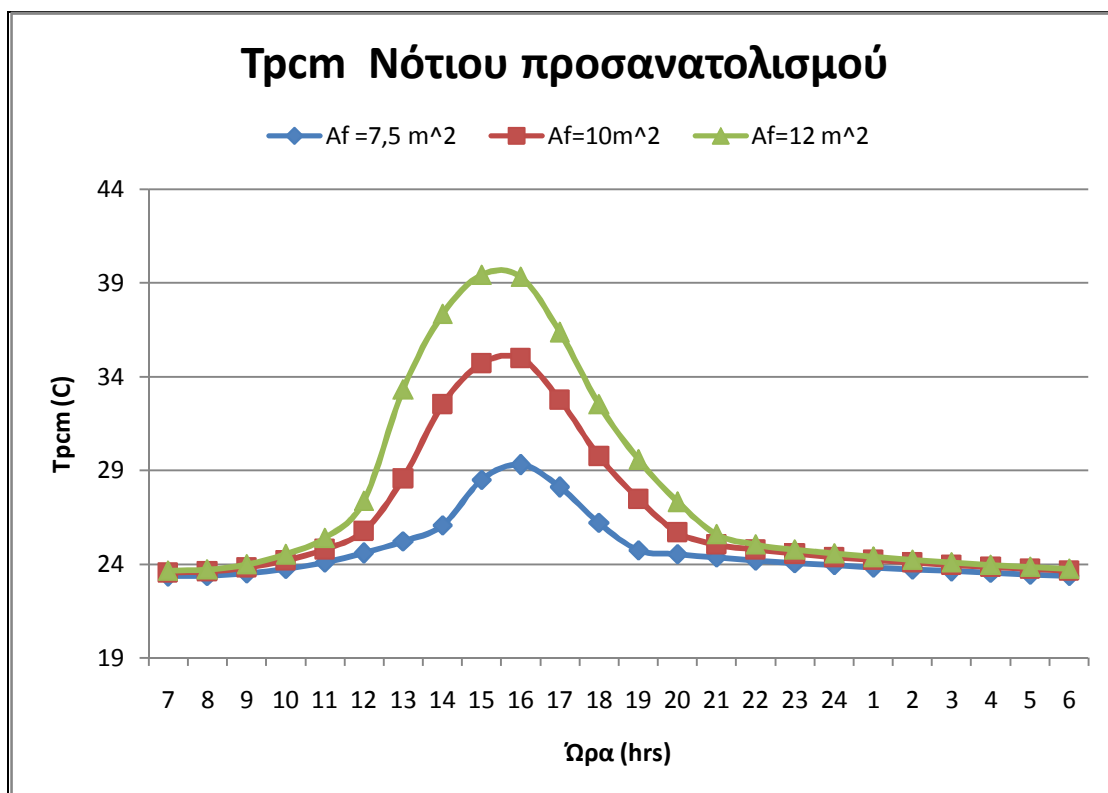


Σχήμα 6.3.53 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρη.



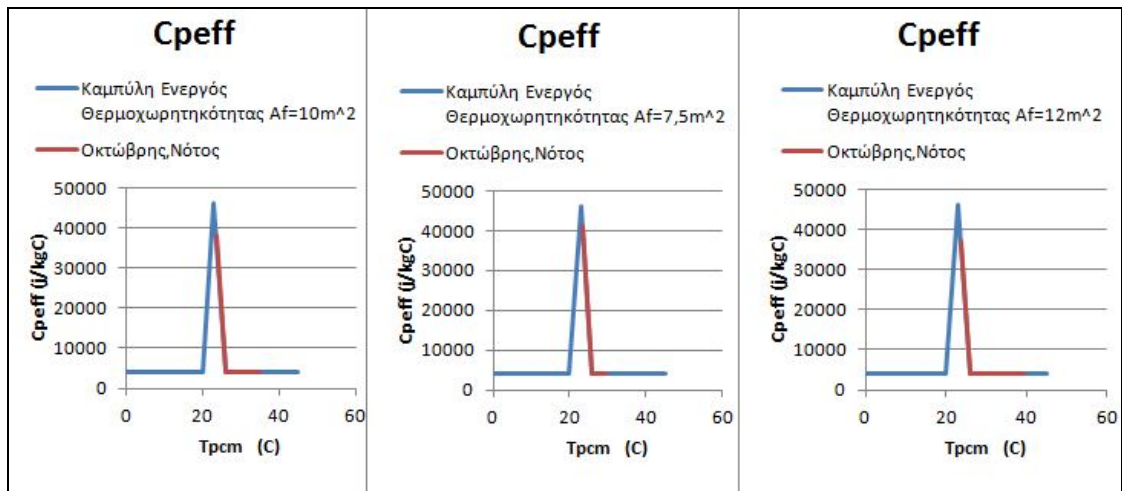
Σχήμα 6.3.54 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων ανατολικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη:

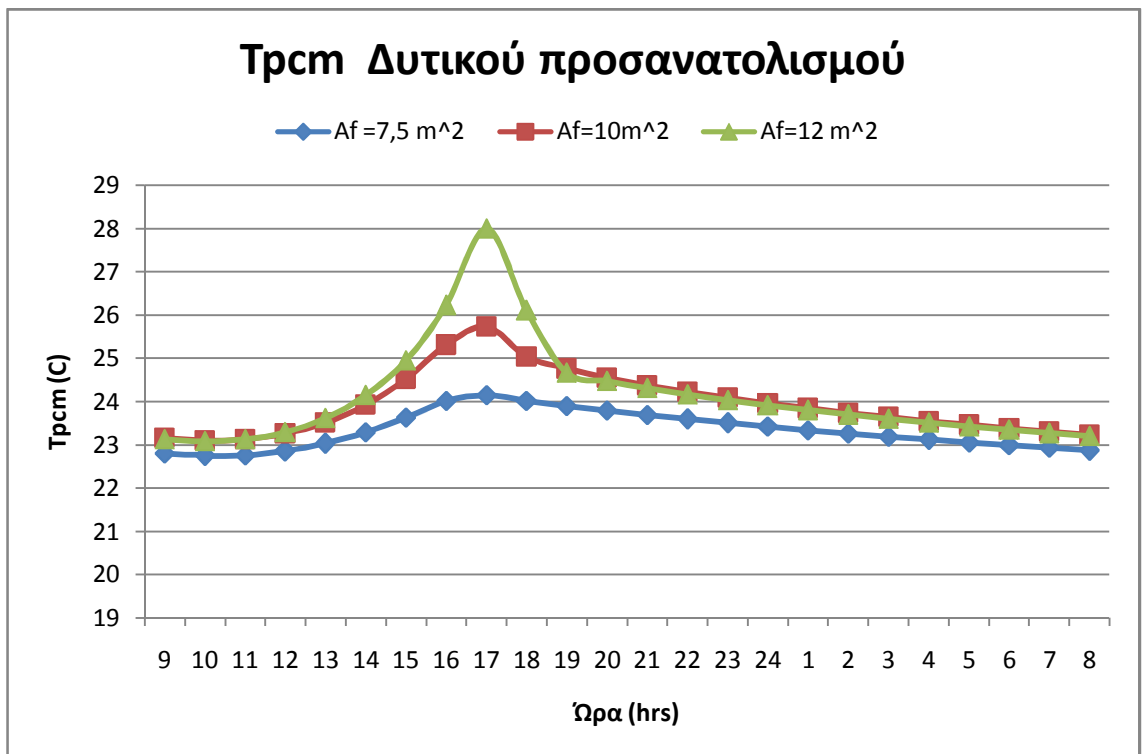


Σχήμα 6.3.55 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη

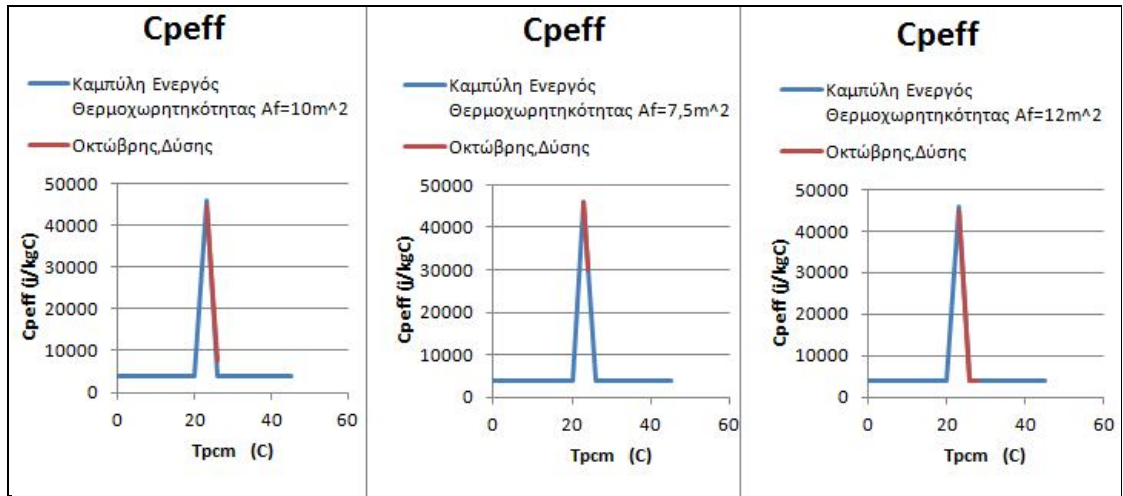




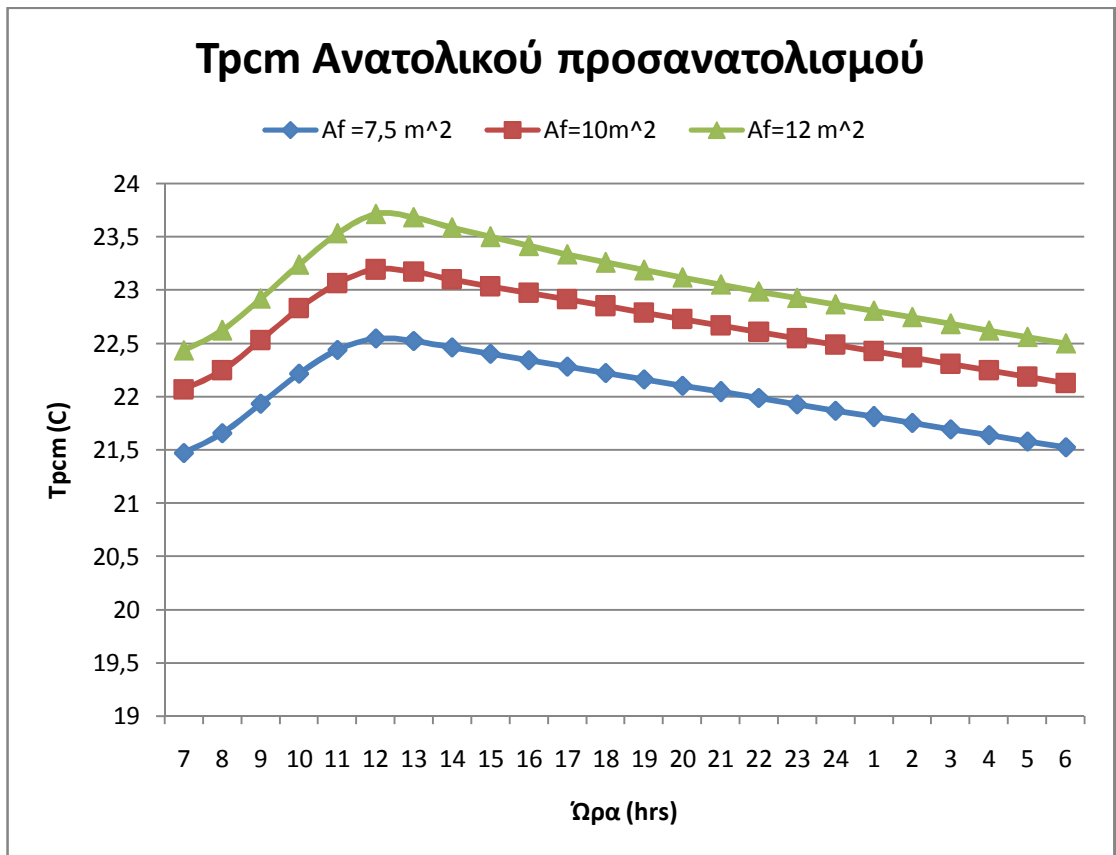
Σχήμα 6.3.56 Καμπύλη ενεργός διαστάσεις θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές υαλοπινάκων νότιου προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη.



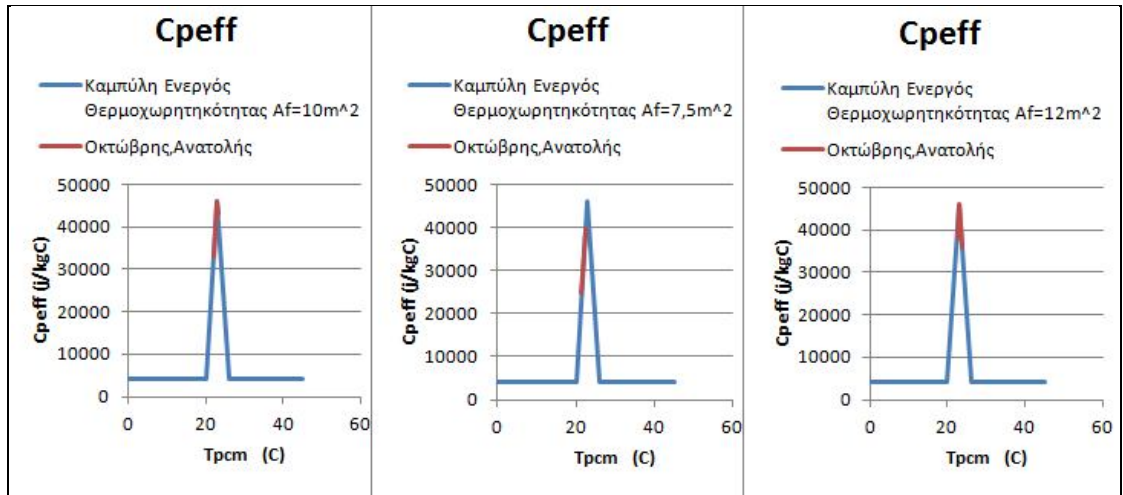
Σχήμα 6.3.57 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπινάκα δυτικού προσανατολισμού συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη.



Σχήμα 6.3.58 Καμπύλη ενεργός θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων δυτικού προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη.

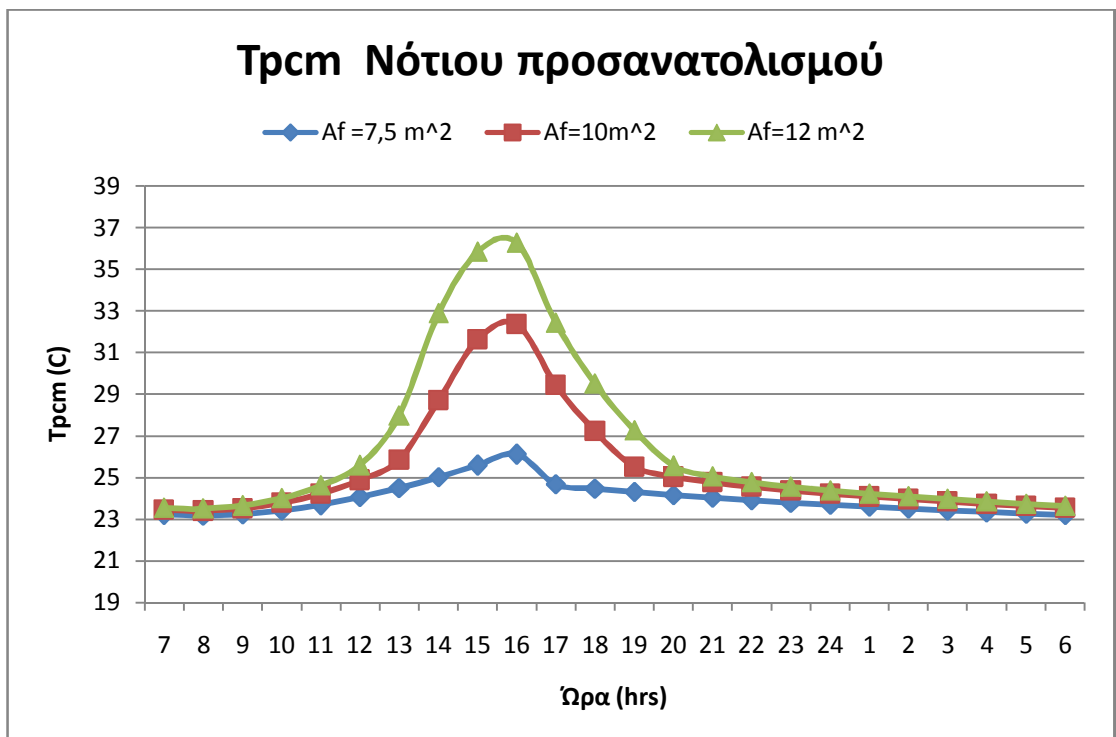


Σχήμα 6.3.59 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπινάκα ανατολικού προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη.

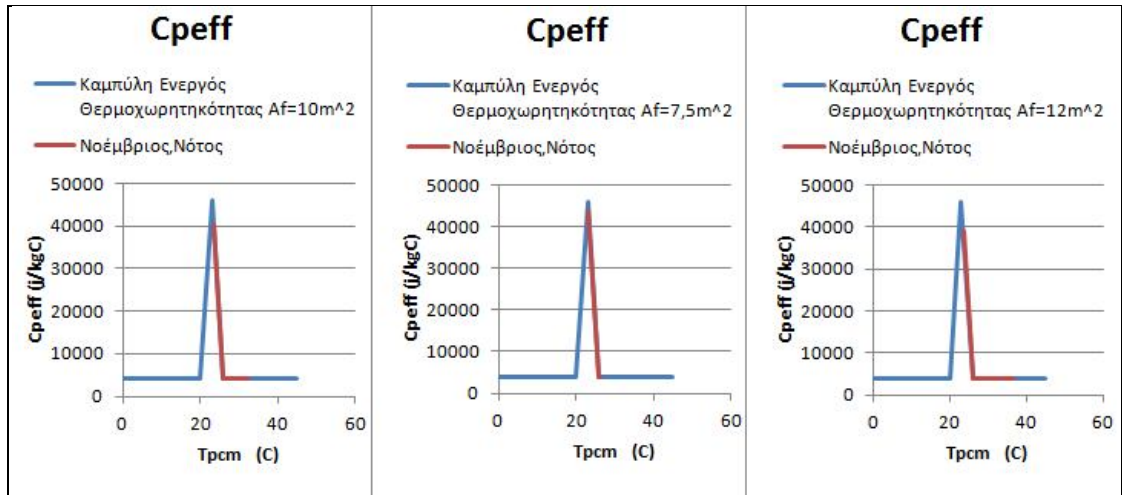


Σχήμα 6.3.60 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων ανατολικού προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη

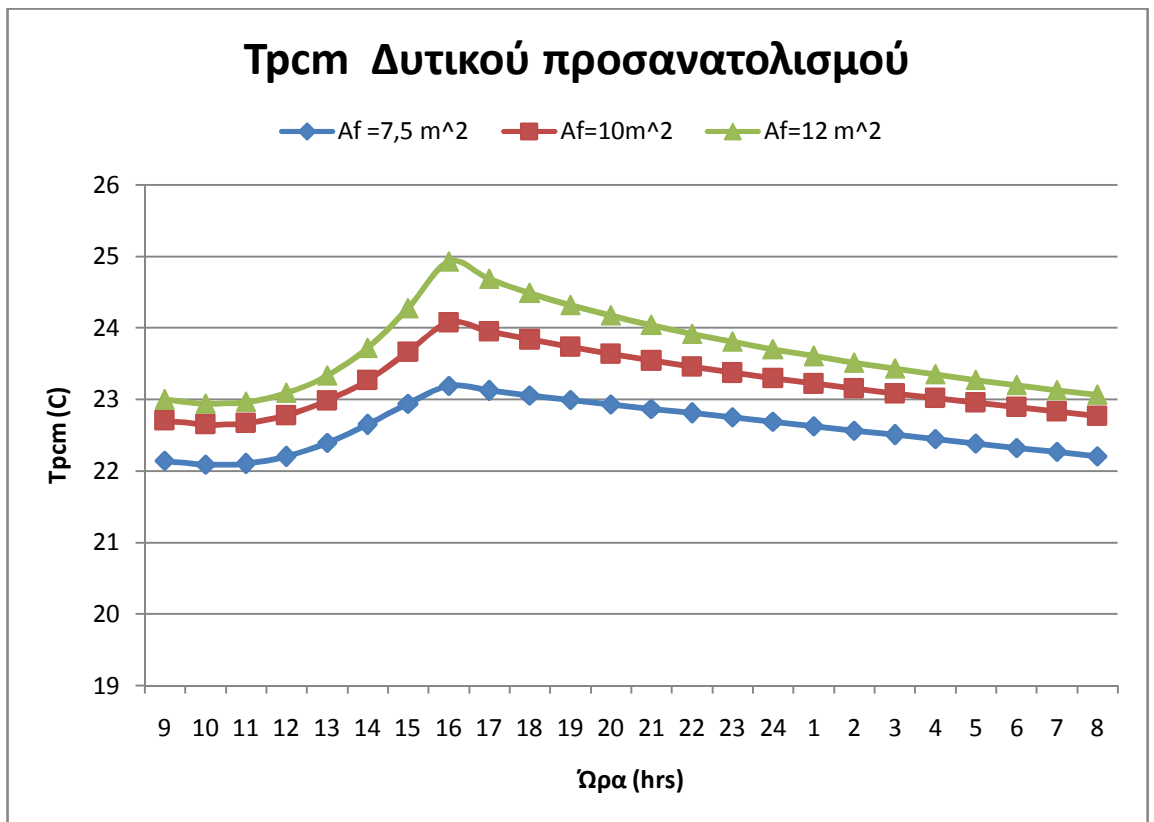
❖ Για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη:



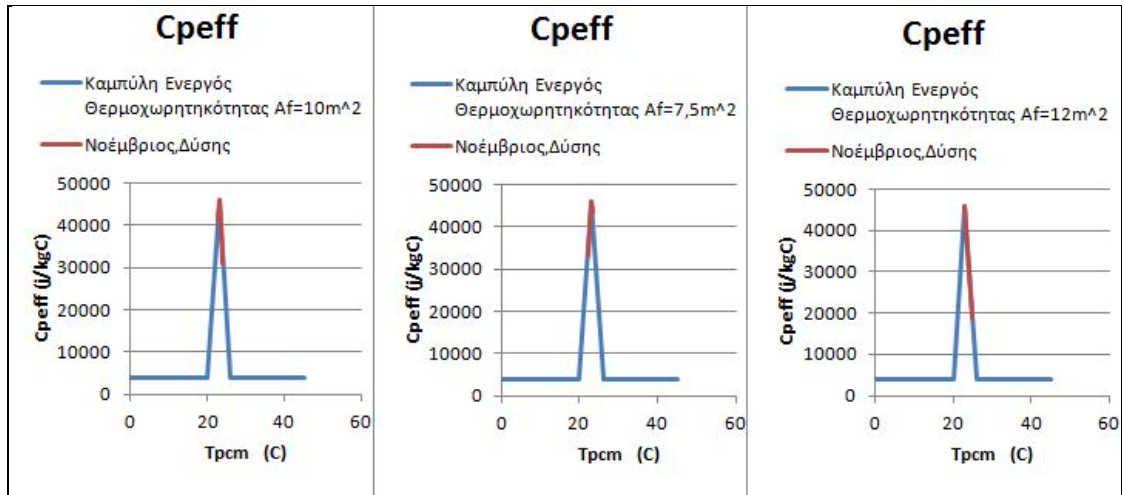
Σχήμα 6.3.61 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπινάκα νότιου προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη.



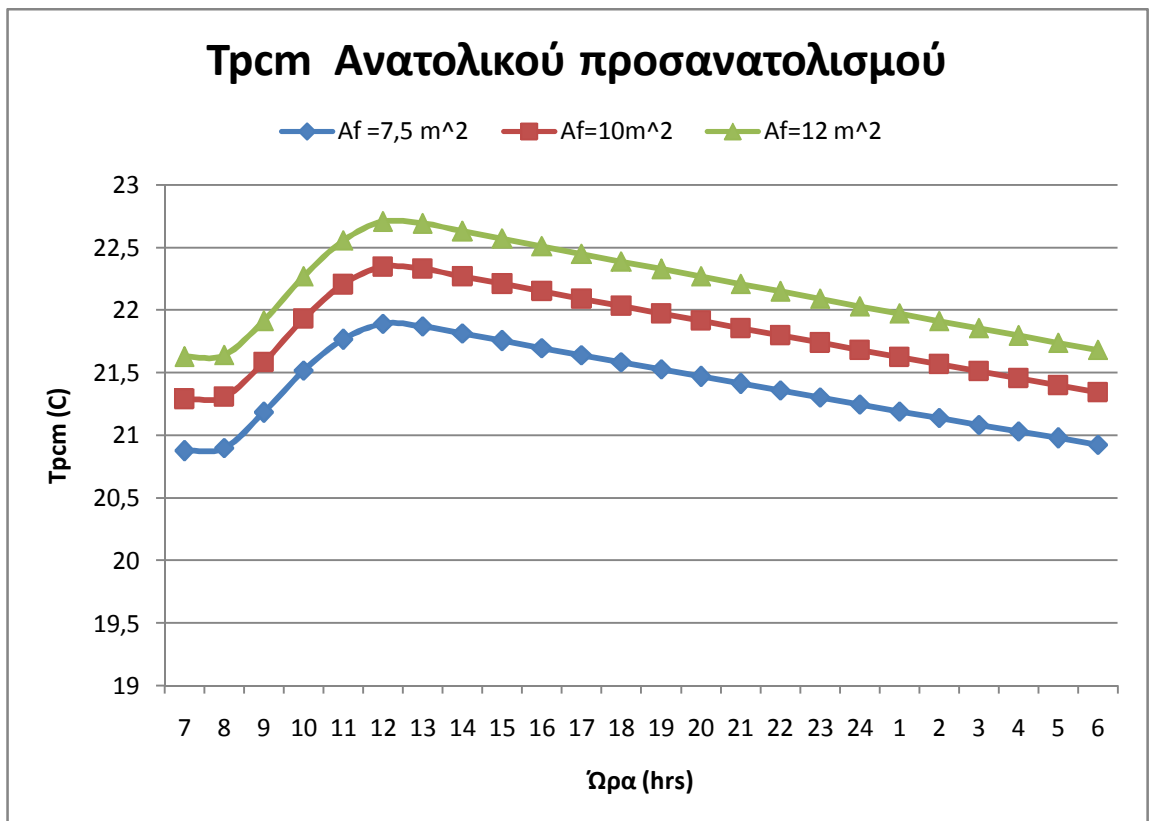
Σχήμα 6.3.62 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων νότιου προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη



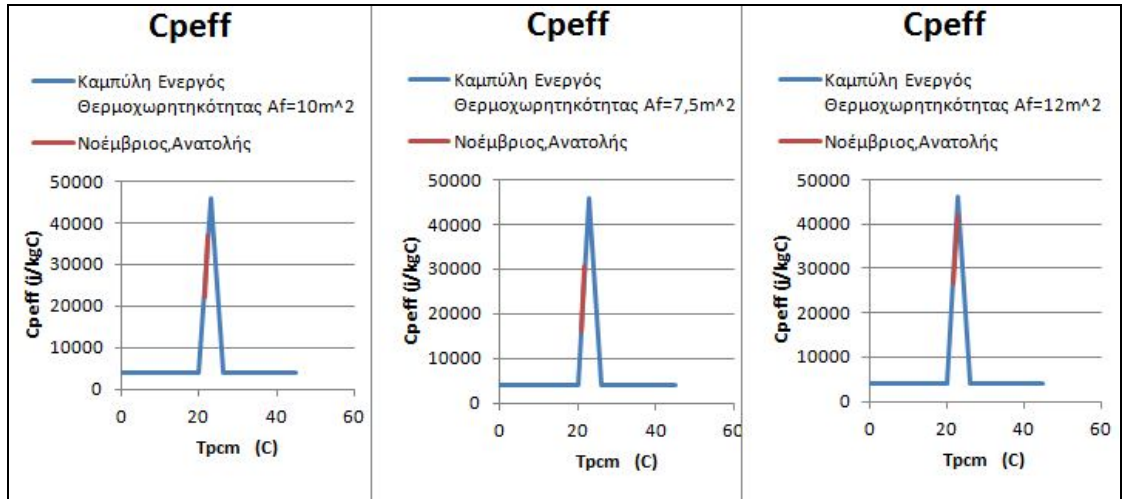
Σχήμα 6.3.63 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη.



Σχήμα 6.3.64 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων δυτικού προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη

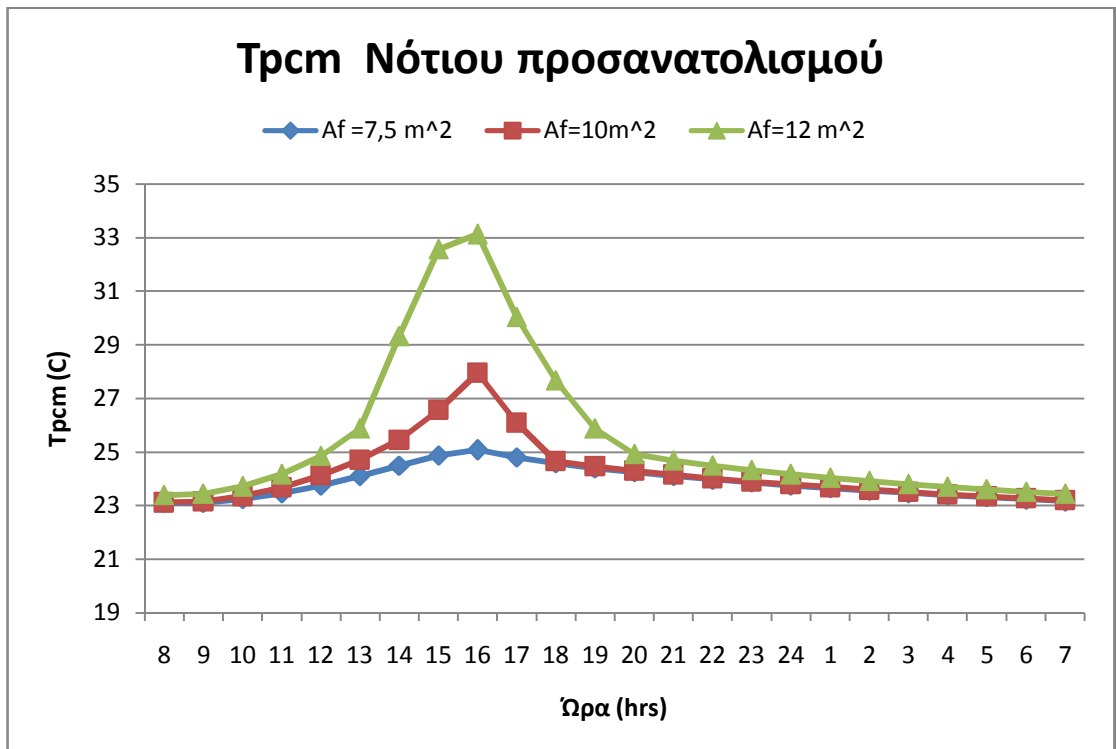


Σχήμα 6.3.65 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπινάκα ανατολικού προσανατολισμού συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη.

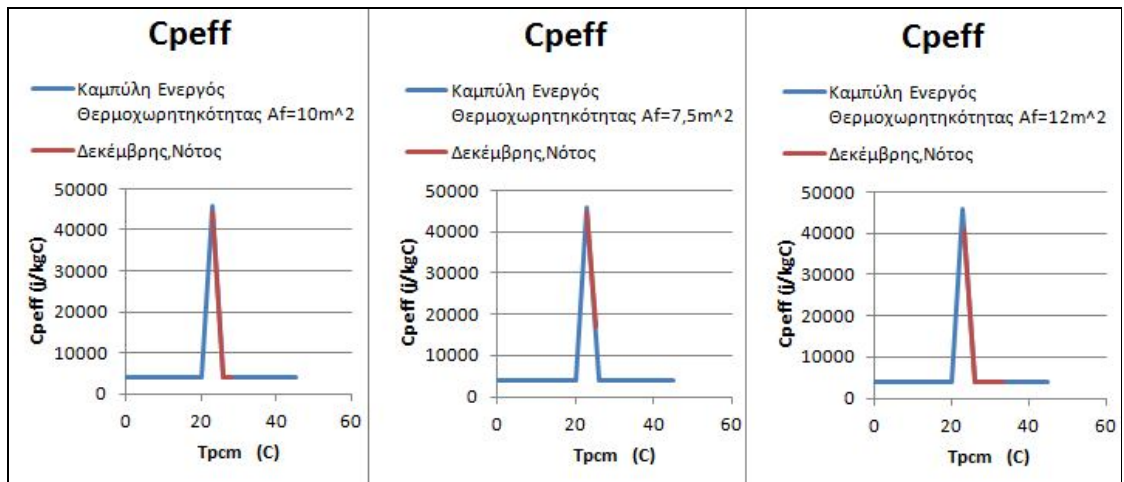


Σχήμα 6.3.66 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων ανατολικού προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη

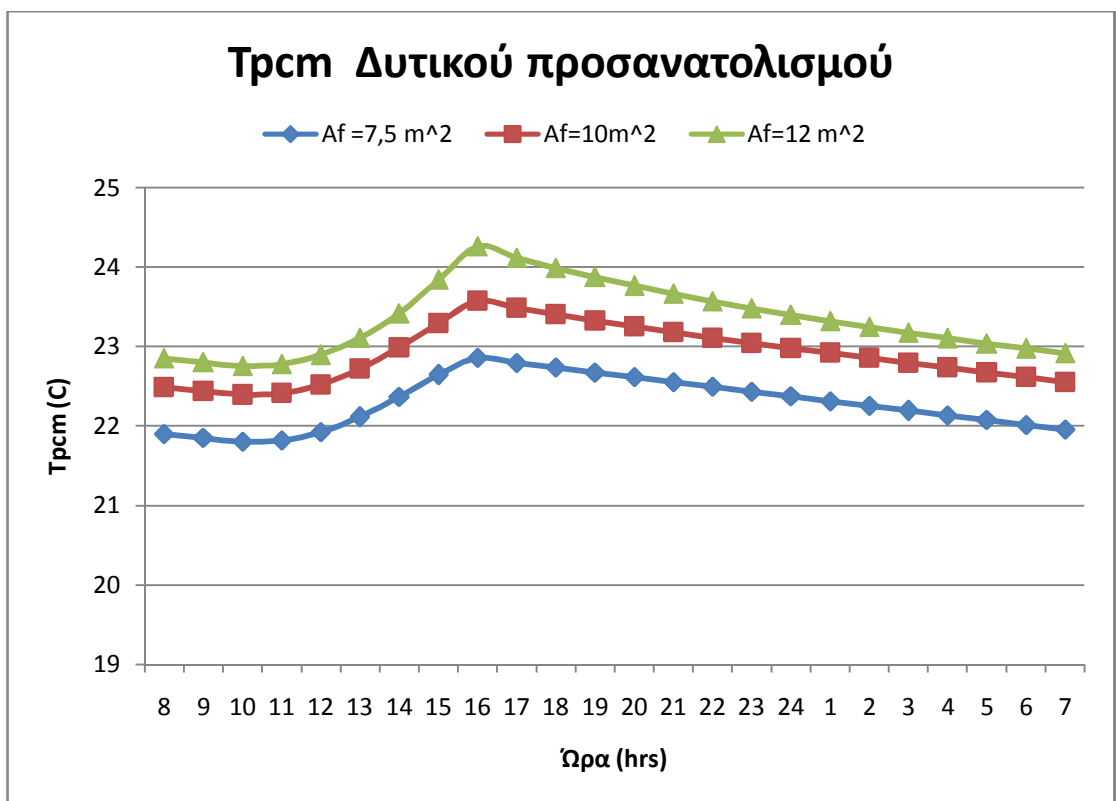
❖ Για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη:



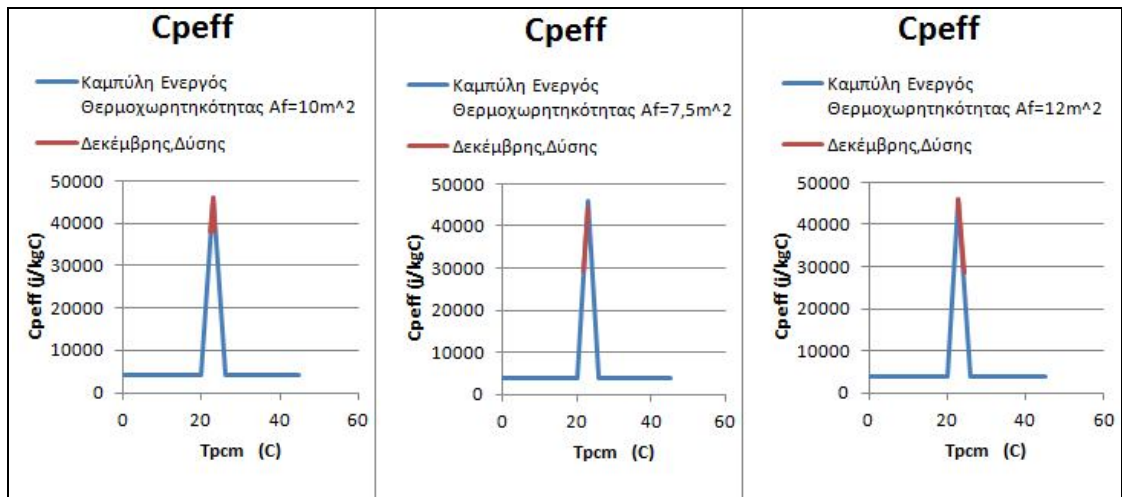
Σχήμα 6.3.67 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη.



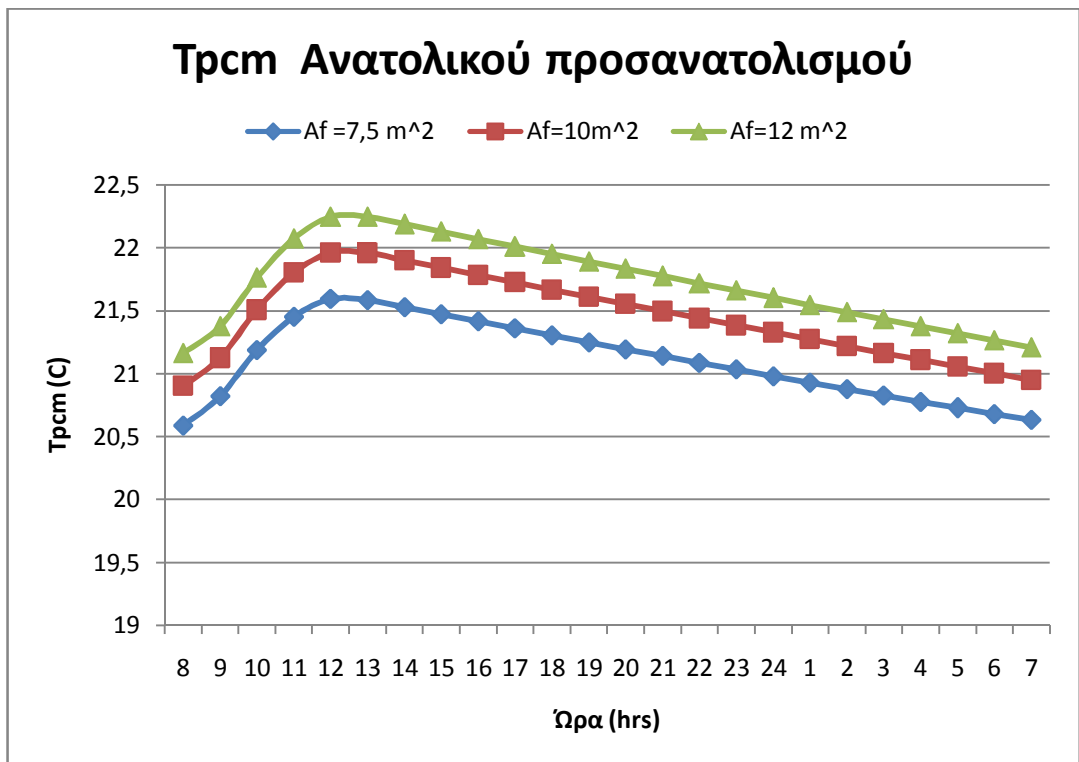
Σχήμα 6.3.68 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων νότιου προσανατολισμού ,για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη



Σχήμα 6.3.69 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM ,για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού ,συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη.

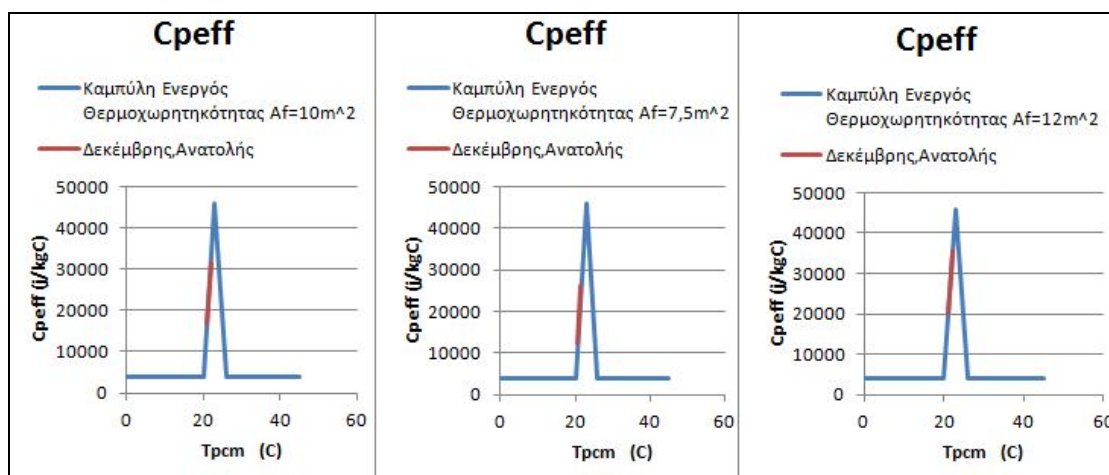


Σχήμα 6.3.70 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές διαστάσεις υαλοπινάκων δυτικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη



Σχήμα 6.3.71 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM, για τρεις διαφορετικές επιφάνειες υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού, συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη.





Σχήμα 6.3.72 Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας για τρεις διαφορετικές υαλοπινάκων ανατολικού προσανατολισμού, για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα των θερμοκρασιών όσο μεγαλώνει η επιφάνεια του υαλοπίνακα τόσο μεγαλύτερες θερμοκρασίες αναπτύσσονται στο PCM το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται πιο έντονα τις μεσημεριανές ώρες όπου οι θερμοκρασίες αποκλίνουν πολύ περισσότερο από τις άλλες ώρες της κάθε μέρας .

Όσον αφορά τις καμπύλες ενεργούς θερμοχωρητικότητας παρατηρούμε ότι και στις τρεις περιπτώσεις καλύπτεται μεγάλο μέρος της καμπύλης κυρίως όταν πρόκειται για νότιο προσανατολισμό. Δηλαδή και στις τρεις περιπτώσεις το υλικό αλλαγής φάσης αναπτύσσει θερμοκρασίες ώστε να καλύπτει μεγάλο μέρος από το θερμοκρασιακό του εύρος ,χρησιμοποιεί επομένως την ιδιότητα του να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση.

## 6.4 4<sup>η</sup> Παραμετρική μελέτη ως προς τους μήνες και τον προσανατολισμό του τοίχου για το 48ώρο.

Η παραμετρική μελέτη αυτή γίνεται με σκοπό την εξέταση της συμπεριφοράς και της θερμοκρασιακής απόκρισης του στρώματος PCM καθώς και την εύρεση της συμπληρωματικής ισχύς για να καλυφθούν οι απαιτήσεις της αίθουσας σε ισχύ κατά τη διάρκεια ενός 48ώρου. Επίσης θα ελεγχθεί η λειτουργία του υλικού αλλαγής φάσης σε περιόδους συννεφιάς ή μειωμένης ηλιοφάνειας.

Στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάζουμε το PCM στη διάρκεια του 48ώρου έτσι θεωρούμε την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα του έτους ως το πρώτο 24ώρο και ως δεύτερο 24ώρο πάλι την ίδια μέρα κάθε μήνα(αφού για τη

συγκεκριμένη ημέρα γνωρίζουμε από προηγούμενο κεφάλαιο την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ) αλλά με τη μισή ακτινοβολία. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται για κάθε μήνα και προσανατολισμό η ηλιακή ακτινοβολία, που έχει υπολογιστεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.2.1, για το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> 24ώρο .

Πίνακας 6.4.1: Τιμές της ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου για κάθε μήνα και προσανατολισμό τις ώρες t=7 ÷ 18 και των δύο 24ώρων.

Ιανουάριος						
Ώρα	Νότιο προσανατολισμό		Δυτικό προσανατολισμό		Ανατολικό προσανατολισμό	
	1 <sup>ο</sup> 24ώρο	2 <sup>ο</sup> 24ώρο	1 <sup>ο</sup> 24ώρο	2 <sup>ο</sup> 24ώρο	1 <sup>ο</sup> 24ώρο	2 <sup>ο</sup> 24ώρο
8	0	0	0	0	0	0
9	0,106381	0,053191	0,006686	0,003343	0,105169	0,052585
10	0,222816	0,111408	0,015371	0,007686	0,172258	0,086129
11	0,308162	0,154081	0,061952	0,030976	0,173501	0,086751
12	0,365793	0,182897	0,12732	0,06366	0,12732	0,06366
13	0,382266	0,191133	0,196366	0,098183	0,042372	0,021186
14	0,378902	0,189451	0,268139	0,13407	0	0
15	0,326274	0,163137	0,320095	0,160048	0	0
16	0,23275	0,116375	0,318707	0,159354	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
Φεβρουάριος						
Ώρα	Νότιο προσανατολισμό		Δυτικό προσανατολισμό		Ανατολικό προσανατολισμό	
	1 <sup>ο</sup> 24ώρο	2 <sup>ο</sup> 24ώρο	1 <sup>ο</sup> 24ώρο	2 <sup>ο</sup> 24ώρο	1 <sup>ο</sup> 24ώρο	2 <sup>ο</sup> 24ώρο
7	0	0	0	0	0	0
8	0,07182	0,03591	0	0	0,096916	0,048458
9	0,165018	0,082509	0	0	0,180019	0,09001
10	0,264001	0,132001	0,023328	0,011664	0,225544	0,112772
11	0,338781	0,169391	0,080042	0,040021	0,212591	0,106296
12	0,38866	0,19433	0,153373	0,076687	0,153373	0,076687
13	0,399738	0,199869	0,231449	0,115725	0,054679	0,02734
14	0,38677	0,193385	0,312921	0,156461	0	0
15	0,327684	0,163842	0,373517	0,186759	0	0
16	0,246511	0,123256	0,405307	0,202654	0	0
17	0,093151	0,046576	0,215138	0,107569	0	0
18	0	0	0	0	0	0
Μάρτιος						
Ώρα	Νότιο προσανατολισμό		Δυτικό προσανατολισμό		Ανατολικό προσανατολισμό	
	1 <sup>ο</sup> 24ώρο	2 <sup>ο</sup> 24ώρο	1 <sup>ο</sup> 24ώρο	2 <sup>ο</sup> 24ώρο	1 <sup>ο</sup> 24ώρο	2 <sup>ο</sup> 24ώρο

7	0,027198	0,013599	0	0	0,031917	0,015959
8	0,118417	0,059209	0	0	0,185038	0,092519
9	0,210189	0,105095	0	0	0,259444	0,129722
10	0,299887	0,149944	0,039398	0,019699	0,289962	0,144981
11	0,367093	0,183547	0,105508	0,052754	0,262982	0,131491
12	0,409587	0,204794	0,187039	0,09352	0,187039	0,09352
13	0,413109	0,206555	0,276722	0,138361	0,07043	0,035215
14	0,386408	0,193204	0,36897	0,184485	0	0
15	0,319024	0,159512	0,437933	0,218967	0	0
16	0,231837	0,115919	0,479282	0,239641	0	0
17	0,123187	0,061594	0,427197	0,213599	0	0
18	0	0	0	0	0	0

### Απρίλιος

Ώρα	Νότιο προσανατολισμό		Δυτικό προσανατολισμό		Ανατολικό προσανατολισμό	
	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο
7	0,062777	0,031389	0	0	0,136591	0,068296
8	0,146765	0,073383	0	0	0,260955	0,130478
9	0,238213	0,119107	0,012298	0,006149	0,337612	0,168806
10	0,321275	0,160638	0,064849	0,032425	0,358673	0,179337
11	0,380875	0,190438	0,138274	0,069137	0,319492	0,159746
12	0,413026	0,206513	0,225981	0,112991	0,225981	0,112991
13	0,406339	0,20317	0,326556	0,163278	0,091013	0,045507
14	0,366199	0,1831	0,428273	0,214137	0	0
15	0,291604	0,145802	0,503174	0,251587	0	0
16	0,196262	0,098131	0,542463	0,271232	0	0
17	0,091316	0,045658	0,509634	0,254817	0	0
18	0,009977	0,004989	0,338087	0,169044	0	0

### Μάιος

Ώρα	Νότιο προσανατολισμό		Δυτικό προσανατολισμό		Ανατολικό προσανατολισμό	
	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο
7	0,076473	0,038237	0	0	0,187727	0,093864
8	0,158605	0,079303	0,000775	0,000388	0,309324	0,154662
9	0,247887	0,123944	0,029703	0,014852	0,390842	0,195421
10	0,326386	0,163193	0,087796	0,043898	0,408046	0,204023
11	0,379743	0,189872	0,165171	0,082586	0,361666	0,180833
12	0,401797	0,200899	0,25547	0,127735	0,25547	0,127735
13	0,386401	0,193201	0,36293	0,181465	0,107806	0,053903
14	0,338614	0,169307	0,470246	0,235123	0	0
15	0,260975	0,130488	0,547874	0,273937	0	0
16	0,162475	0,081238	0,580547	0,290274	0	0
17	0,059674	0,029837	0,545019	0,27251	0	0

18	0	0	0,415428	0,207714	0	0
<b>Ιούνιος</b>						
	Νότιο προσανατολισμό		Δυτικό προσανατολισμό		Ανατολικό προσανατολισμό	
Ώρα	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο
7	0,080299	0,04015	0	0	0,208633	0,104317
8	0,162635	0,081318	0,00608	0,00304	0,331798	0,165899
9	0,251822	0,125911	0,036329	0,018165	0,416833	0,208417
10	0,329689	0,164845	0,097847	0,048924	0,43311	0,216555
11	0,381024	0,190512	0,177675	0,088838	0,383355	0,191678
12	0,398017	0,199009	0,269248	0,134624	0,269248	0,134624
13	0,378546	0,189273	0,381581	0,190791	0,113792	0,056896
14	0,328165	0,164083	0,492589	0,246295	0	0
15	0,249801	0,124901	0,572456	0,286228	0	0
16	0,150684	0,075342	0,59929	0,299645	0	0
17	0,049063	0,024532	0,558039	0,27902	0	0
18	0	0	0,426292	0,213146	0	0
<b>Ιούλιος</b>						
	Νότιο προσανατολισμό		Δυτικό προσανατολισμό		Ανατολικό προσανατολισμό	
Ώρα	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο
7	0,077277	0,038639	0	0	0,202291	0,101146
8	0,16312	0,08156	0	0	0,327031	0,163516
9	0,257285	0,128643	0,02479	0,012395	0,412428	0,206214
10	0,340239	0,17012	0,088165	0,044083	0,429352	0,214676
11	0,396315	0,198158	0,16977	0,084885	0,379528	0,189764
12	0,41773	0,208865	0,262868	0,131434	0,262868	0,131434
13	0,401056	0,200528	0,379078	0,189539	0,104453	0,052227
14	0,351155	0,175578	0,492663	0,246332	0	0
15	0,272563	0,136282	0,575649	0,287825	0	0
16	0,17161	0,085805	0,599978	0,299989	0	0
17	0,067114	0,033557	0,554091	0,277046	0	0
18	0	0	0,400281	0,200141	0	0
<b>Αύγουστος</b>						
	Νότιο προσανατολισμό		Δυτικό προσανατολισμό		Ανατολικό προσανατολισμό	
Ώρα	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο
7	0,066465	0,033233	0	0	0,166425	0,083213
8	0,158305	0,079153	0	0	0,294278	0,147139
9	0,260143	0,130072	0	0	0,376736	0,188368
10	0,352122	0,176061	0,062109	0,031055	0,396267	0,198134
11	0,418377	0,209189	0,143791	0,071896	0,35034	0,17517
12	0,452968	0,226484	0,237683	0,118842	0,237683	0,118842
13	0,44518	0,22259	0,355297	0,177649	0,082426	0,041213

14	0,397724	0,198862	0,468687	0,234344	0	0
15	0,320498	0,160249	0,554362	0,277181	0	0
16	0,216425	0,108213	0,577804	0,288902	0	0
17	0,10575	0,052875	0,524313	0,262157	0	0
18	0,030856	0,015428	0,281368	0,140684	0	0

### Σεπτέμβρης

Ώρα	Νότιο προσανατολισμό		Δυτικό προσανατολισμό		Ανατολικό προσανατολισμό	
	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο
7	0,040322	0,020161	0	0	0,086634	0,043317
8	0,14111	0,070555	0	0	0,233455	0,116728
9	0,247334	0,123667	0	0	0,311853	0,155927
10	0,348416	0,174208	0,03165	0,015825	0,33792	0,16896
11	0,425997	0,212999	0,109302	0,054651	0,301143	0,150572
12	0,477016	0,238508	0,20055	0,100275	0,20055	0,100275
13	0,480858	0,240429	0,313663	0,156832	0,056765	0,028383
14	0,438651	0,219326	0,421221	0,210611	0	0
15	0,366994	0,183497	0,505972	0,252986	0	0
16	0,261053	0,130527	0,526385	0,263193	0	0
17	0,139856	0,069928	0,444181	0,222091	0	0
18	0	0	0	0	0	0

### Οκτώβρης

Ώρα	Νότιο προσανατολισμό		Δυτικό προσανατολισμό		Ανατολικό προσανατολισμό	
	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο
7	0	0	0	0	0	0
8	0,102697	0,051349	0	0	0,148349	0,074175
9	0,209108	0,104554	0	0	0,229453	0,114727
10	0,318723	0,159362	0,010275	0,005138	0,268304	0,134152
11	0,40556	0,20278	0,078817	0,039409	0,245343	0,122672
12	0,469637	0,234819	0,162936	0,081468	0,162936	0,081468
13	0,483566	0,241783	0,264864	0,132432	0,037551	0,018776
14	0,450549	0,225275	0,36119	0,180595	0	0
15	0,388451	0,194226	0,439825	0,219913	0	0
16	0,28145	0,140725	0,450574	0,225287	0	0
17	0,100007	0,050004	0,203132	0,101566	0	0
18	0	0	0	0	0	0

### Νοέμβρης

Ώρα	Νότιο προσανατολισμό		Δυτικό προσανατολισμό		Ανατολικό προσανατολισμό	
	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο
7	0	0	0	0	0	0
8	0,025474	0,012737	0	0	0,029638	0,014819

9	0,142582	0,071291	0	0	0,140291	0,070146
10	0,264231	0,132116	0,004349	0,002175	0,200406	0,100203
11	0,357799	0,1789	0,059416	0,029708	0,194215	0,097108
12	0,427576	0,213788	0,13284	0,06642	0,13284	0,06642
13	0,447269	0,223635	0,21838	0,10919	0,029766	0,014883
14	0,428056	0,214028	0,300357	0,150179	0	0
15	0,375421	0,187711	0,36699	0,183495	0	0
16	0,261307	0,130654	0,353758	0,176879	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0

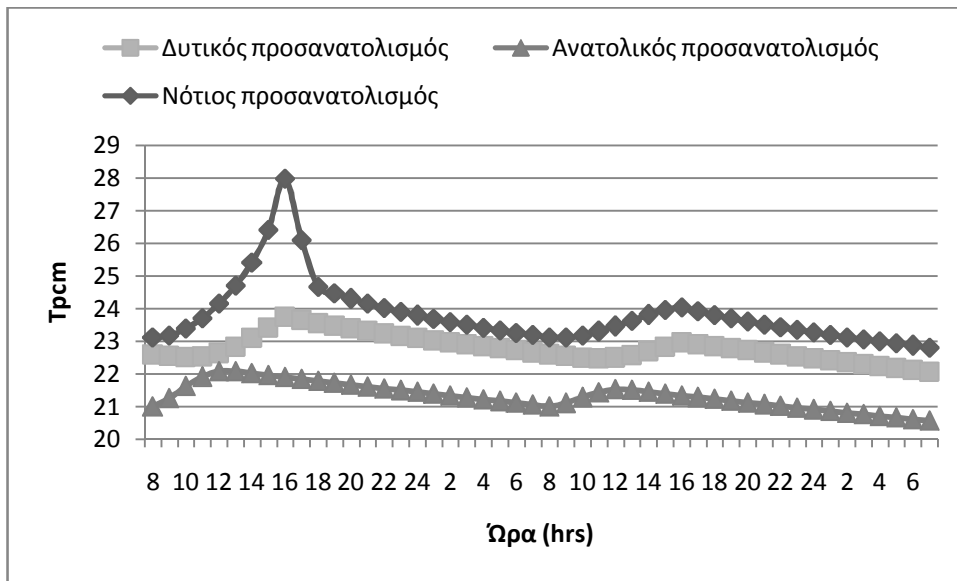
### Δεκέμβρης

Ώρα	Νότιο προσανατολισμό		Δυτικό προσανατολισμό		Ανατολικό προσανατολισμό	
	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο	1° 24ώρο	2° 24ώρο
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0,089478	0,044739	0,007994	0,003997	0,08565	0,042825
10	0,219014	0,109507	0,009971	0,004986	0,16205	0,081025
11	0,313109	0,156555	0,054929	0,027465	0,16678	0,08339
12	0,37924	0,18962	0,120015	0,060008	0,120015	0,060008
13	0,3989	0,19945	0,19177	0,095885	0,033443	0,016722
14	0,39233	0,196165	0,263351	0,131676	0	0
15	0,342005	0,171003	0,317126	0,158563	0	0
16	0,221515	0,110758	0,282576	0,141288	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0

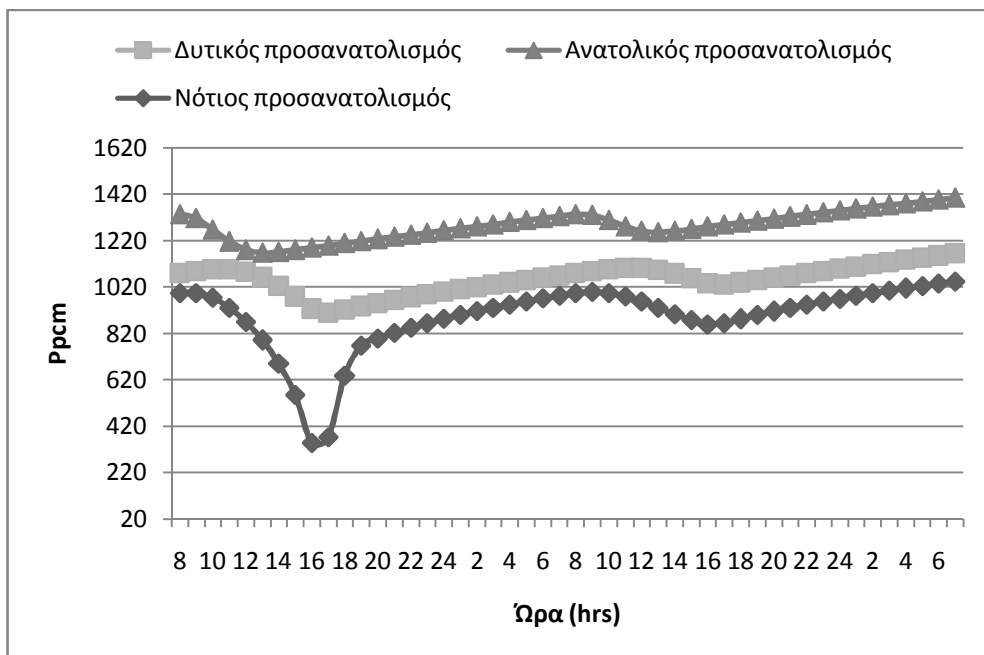
Τις ώρες που δεν παρουσιάζονται στους πίνακες η ακτινοβολία είναι ίση με μηδέν. Για την εφαρμογή αυτής της μελέτης θα χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα της προσομοίωσης του κεφαλαίου 5.3.3, όπου εκεί αναφέρονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιηθέντος PCM και οι εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας του, οι διαστάσεις τις αίθουσας και του έναντι από το τοίχο υαλοπίνακα.

Η θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο PCM υπολογίζονται κάθε φορά με τον ισολογισμό ενέργειας στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης. Ενώ στη συνέχεια θεωρώντας τις απώλειες της αίθουσας σταθερές και ίσες με  $P_{\text{απαιτούμ}}=1500\text{W}$  βρίσκουμε και παρουσιάζουμε σε διαγράμματα τη συμπληρωματική ισχύ που χρειάζεται για να καλυφθούν οι απαιτούμενες ανάγκες της αίθουσας.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου:

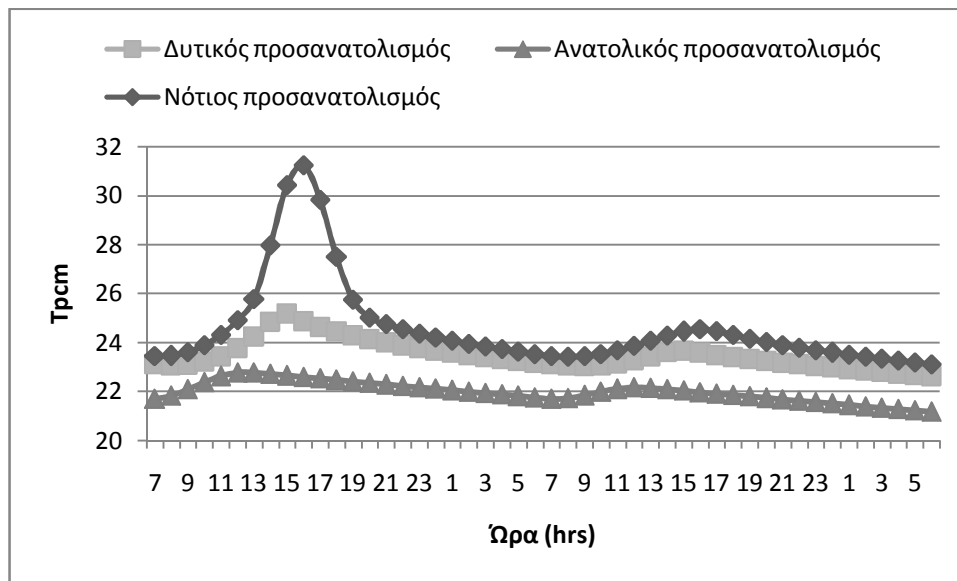


Σχήμα 6.4.1 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 48ωρό ,όπου η 2<sup>η</sup>μέρα είναι νεφώδης, συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου ,για τρείς προσανατολισμούς.

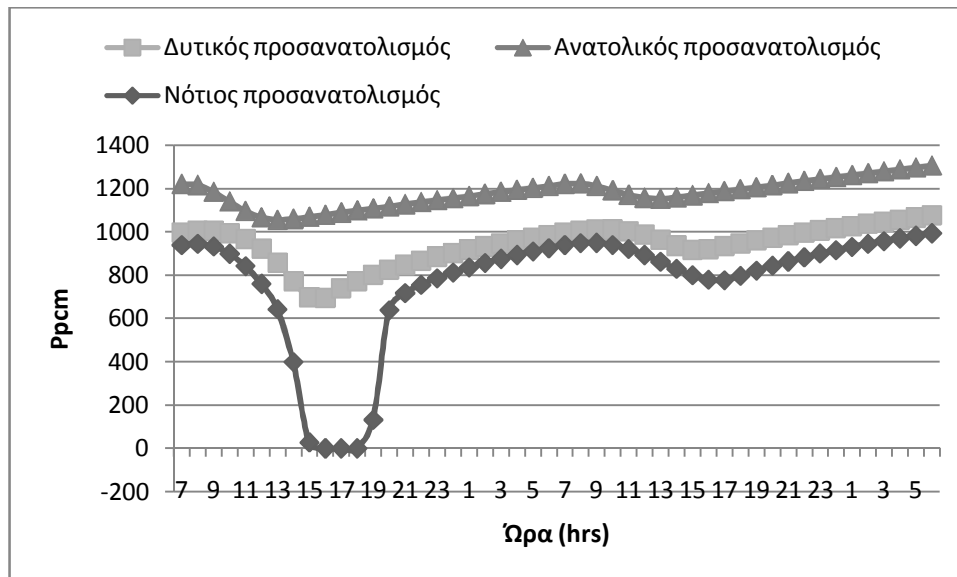


Σχήμα 6.4.2 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου για ένα 48ωρό όπου η 2<sup>η</sup> μέρα είναι νεφώδης , για τρείς διαφορετικούς προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου :



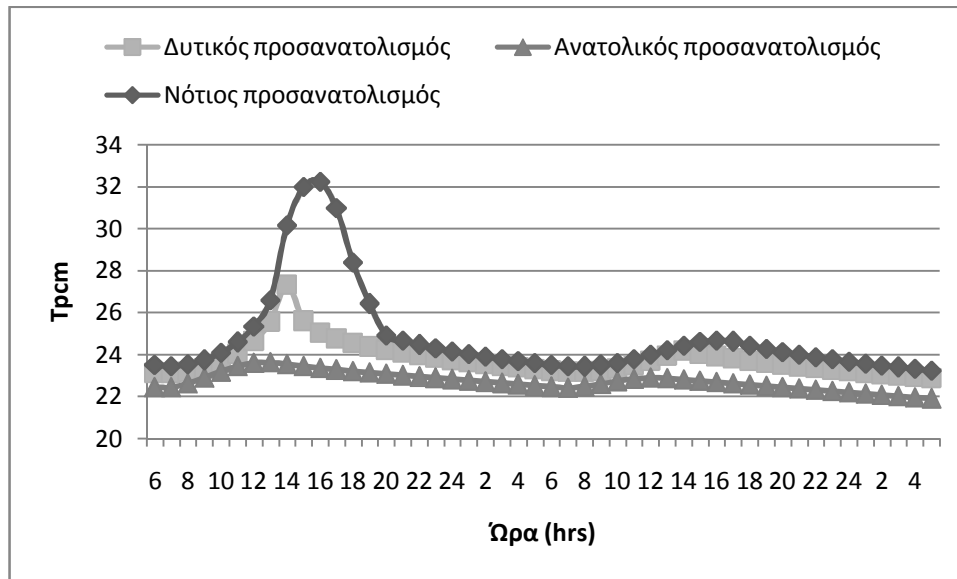
Σχήμα 6.4.3 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 48ωρό ,όπου η 2<sup>η</sup>μέρα είναι νεφώδης, συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου, για τρεις προσανατολισμούς.



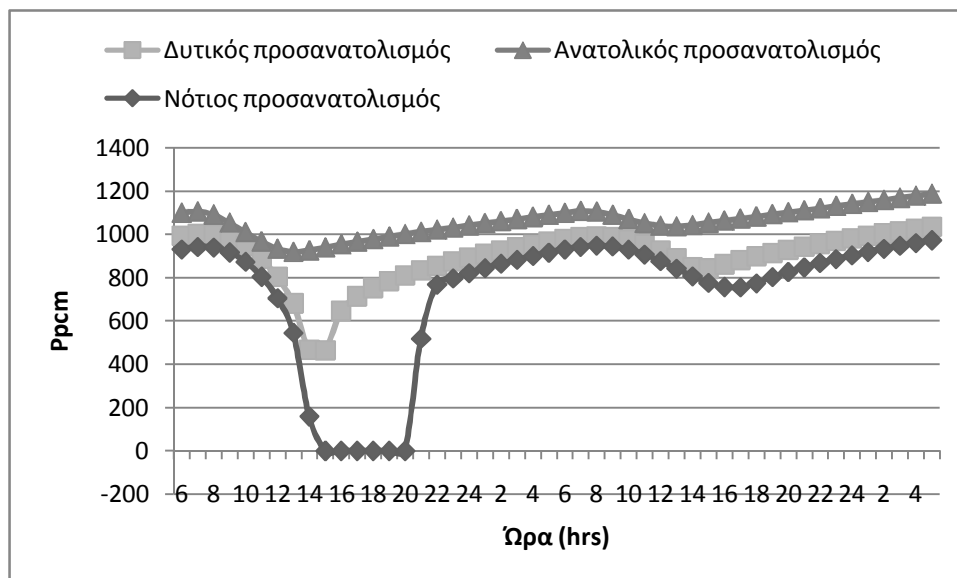
Σχήμα 6.4.4 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου για ένα 48ωρό όπου η 2<sup>η</sup>μέρα είναι νεφώδης , για τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς.



❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου:

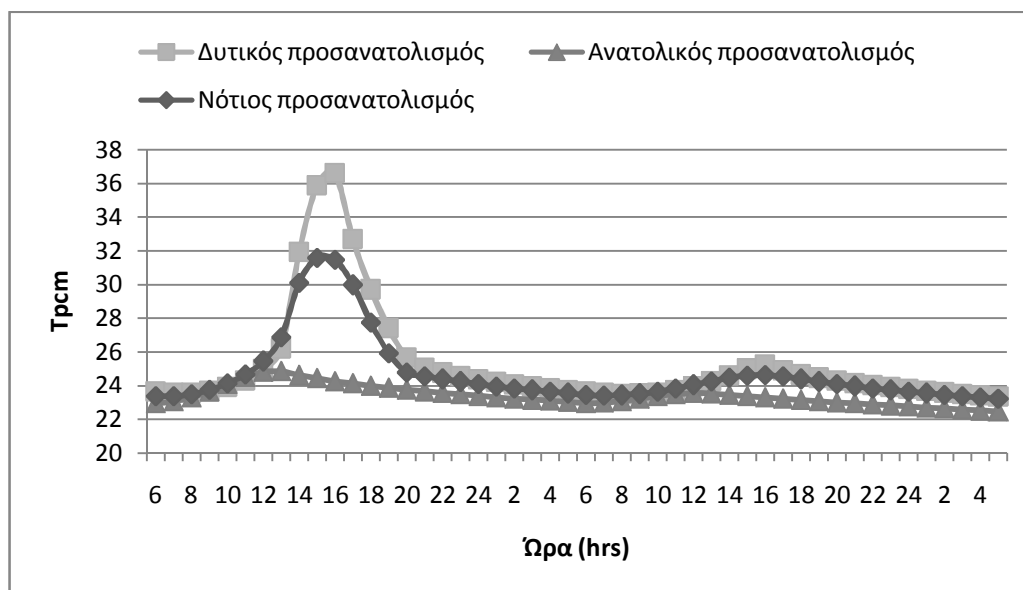


Σχήμα 6.4.5 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 48ωρό ,όπου η 2<sup>η</sup>μέρα είναι νεφώδης, συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου, για τρεις προσανατολισμούς.



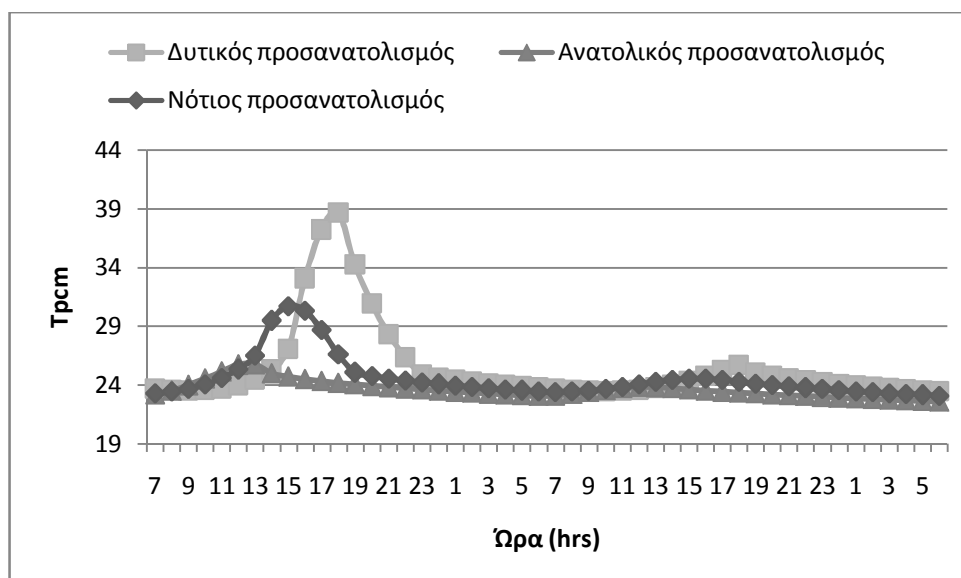
Σχήμα 6.4.6 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαΐου για ένα 48ωρό όπου η 2<sup>η</sup> μέρα είναι νεφώδης, για τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Απριλίου:



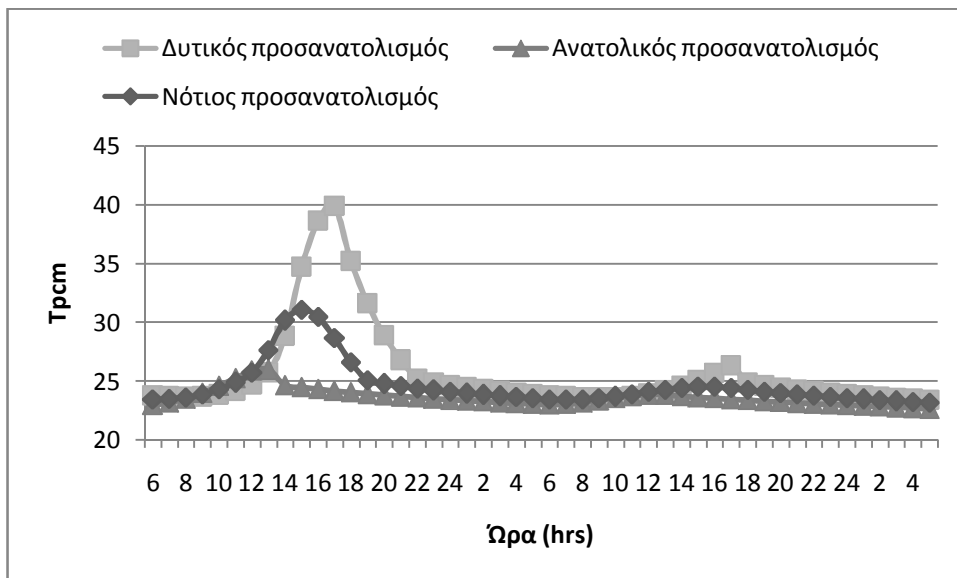
Σχήμα 6.4.7 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 48ωρό ,όπου η 2<sup>η</sup>μέρα είναι νεφώδης, συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Απριλίου ,για τρεις προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαΐου :



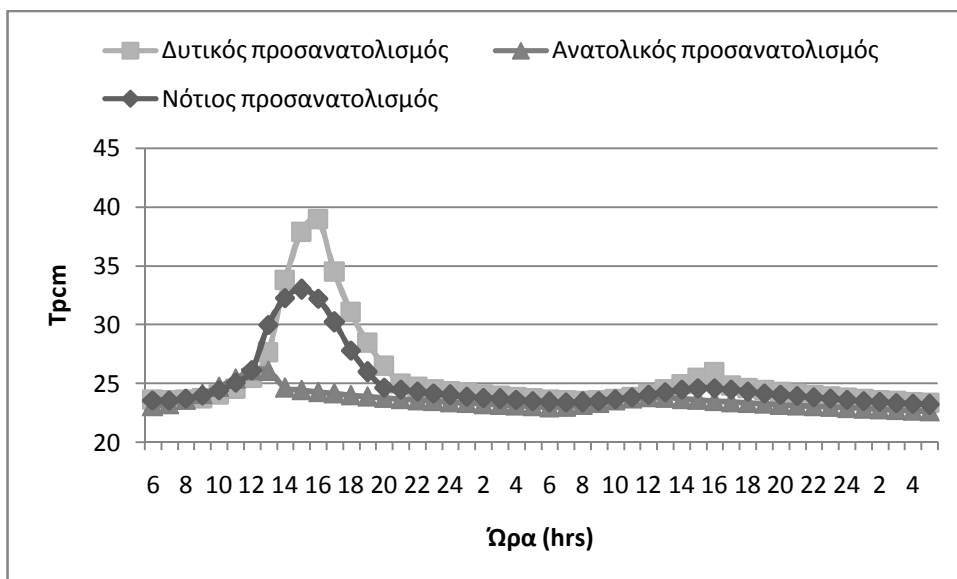
Σχήμα 6.4.8 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 48ωρό ,όπου η 2<sup>η</sup>μέρα είναι νεφώδης, συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαΐου, για τρεις προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου :



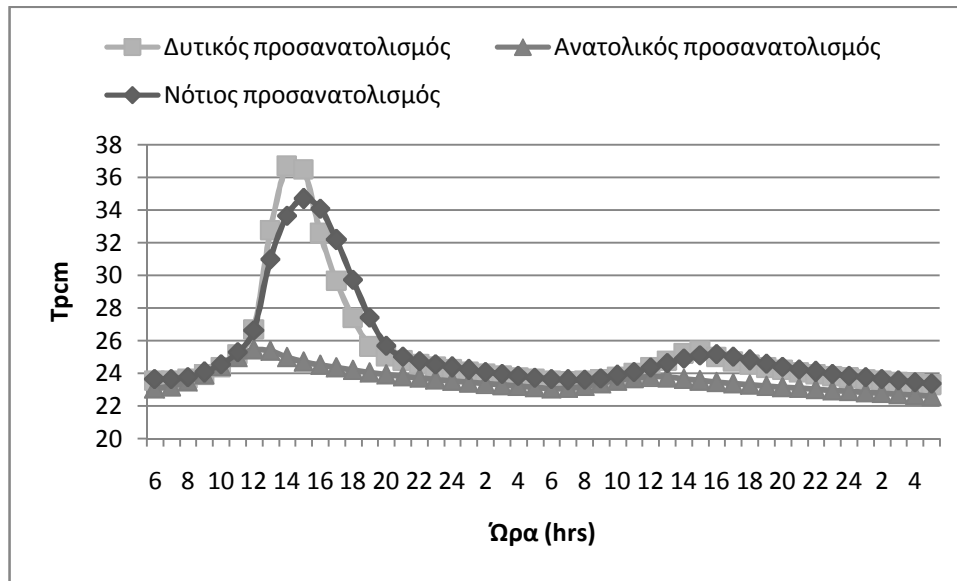
Σχήμα 6.4.9 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 48ωρό ,όπου η 2<sup>η</sup>μέρα είναι νεφώδης, συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου ,για τρεις προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου :



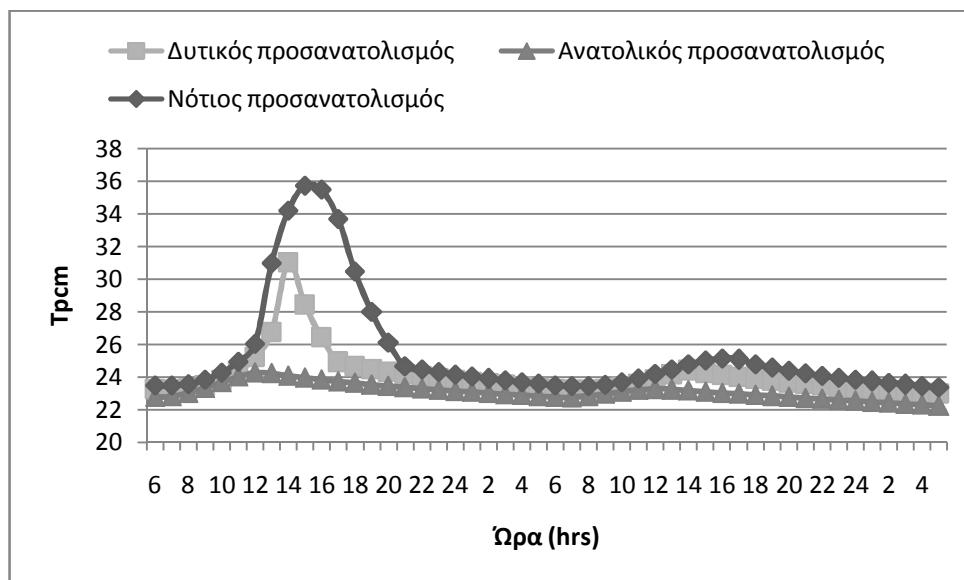
Σχήμα 6.4.10 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 48ωρό ,όπου η 2<sup>η</sup>μέρα είναι νεφώδης, συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου, για τρεις προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου:



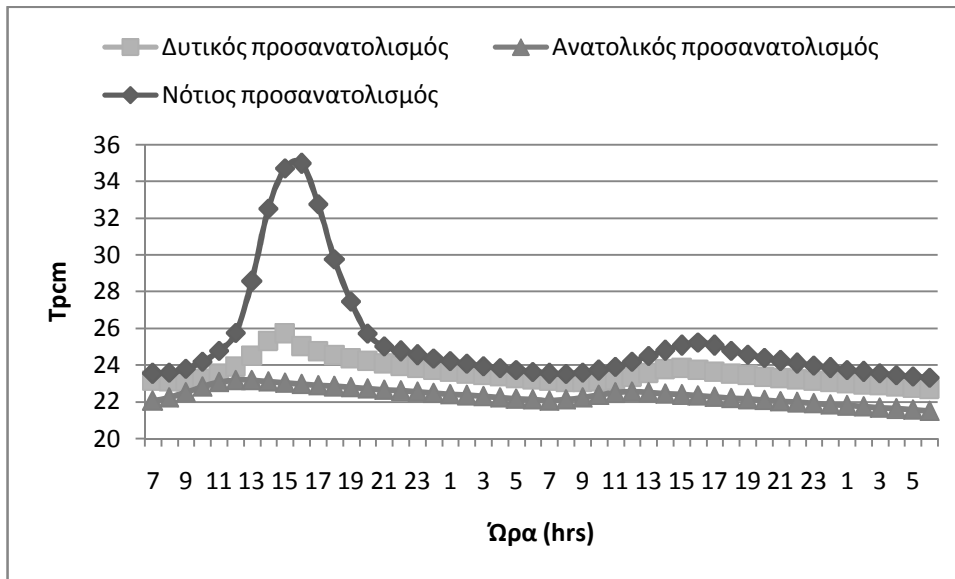
Σχήμα 6.4.11 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 48ωρό ,όπου η 2<sup>η</sup>μέρα είναι νεφώδης, συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου ,για τρείς προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρη:

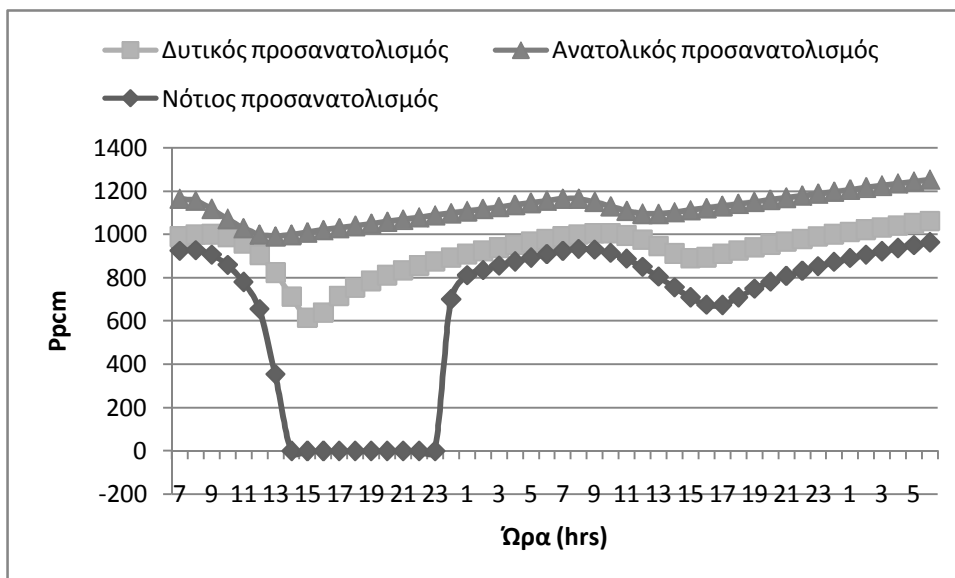


Σχήμα 6.4.12 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 48ωρό ,όπου η 2<sup>η</sup>μέρα είναι νεφώδης, συναρτήσε της ώρας για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρη, για τρείς προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη:

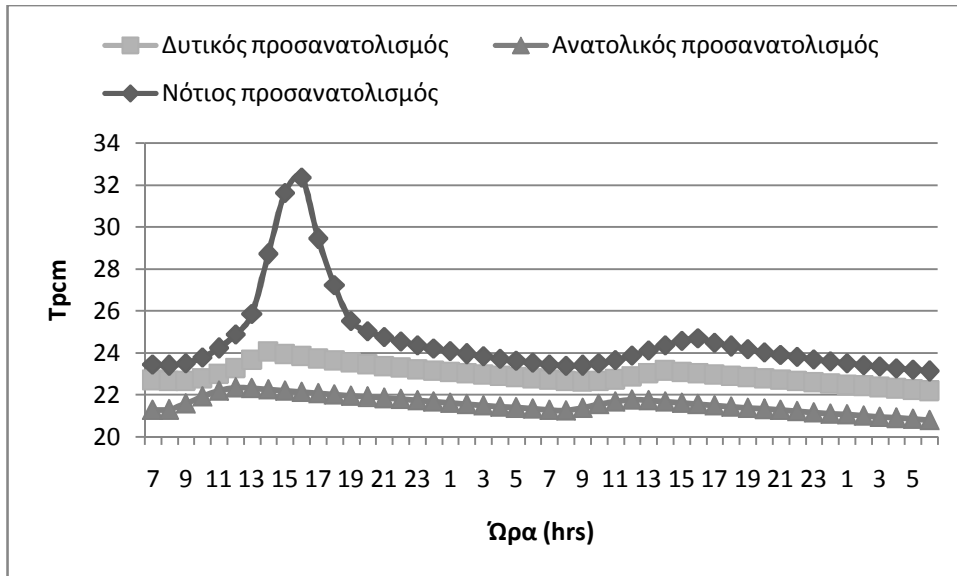


Σχήμα 6.4.13 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 48ωρό ,όπου η 2<sup>η</sup>μέρα είναι νεφώδης, συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη, για τρεις προσανατολισμούς.

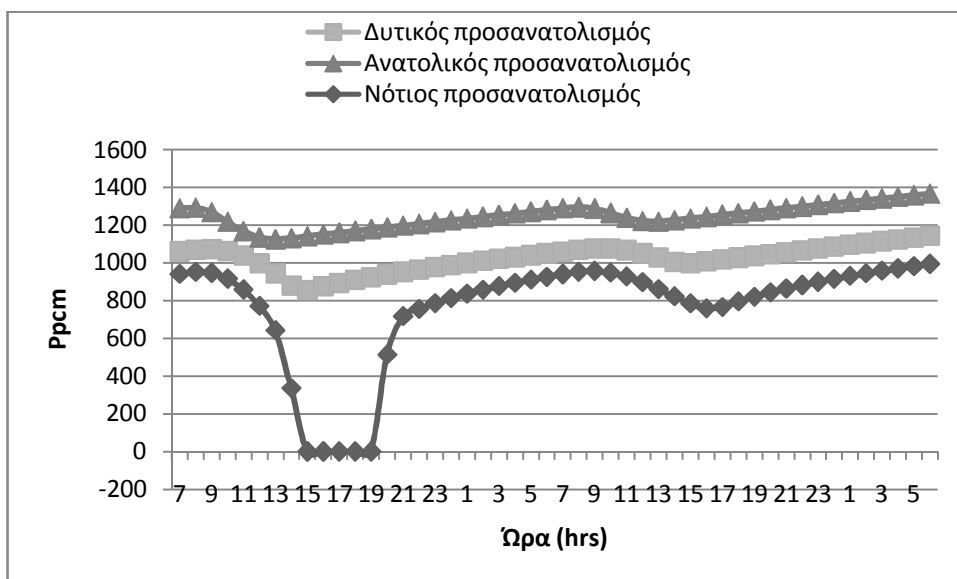


Σχήμα 6.4.14 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη για ένα 48ωρό όπου η 2<sup>η</sup> μέρα είναι νεφώδης, για τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη:

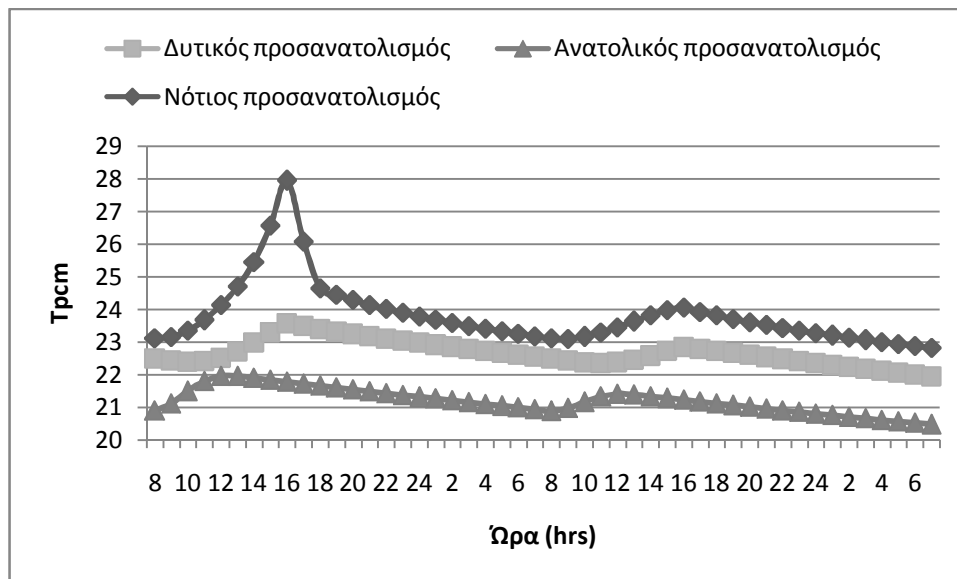


Σχήμα 6.4.15 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 48ωρό ,όπου η 2<sup>η</sup>μέρα είναι νεφώδης, συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρης , για τρεις προσανατολισμούς.

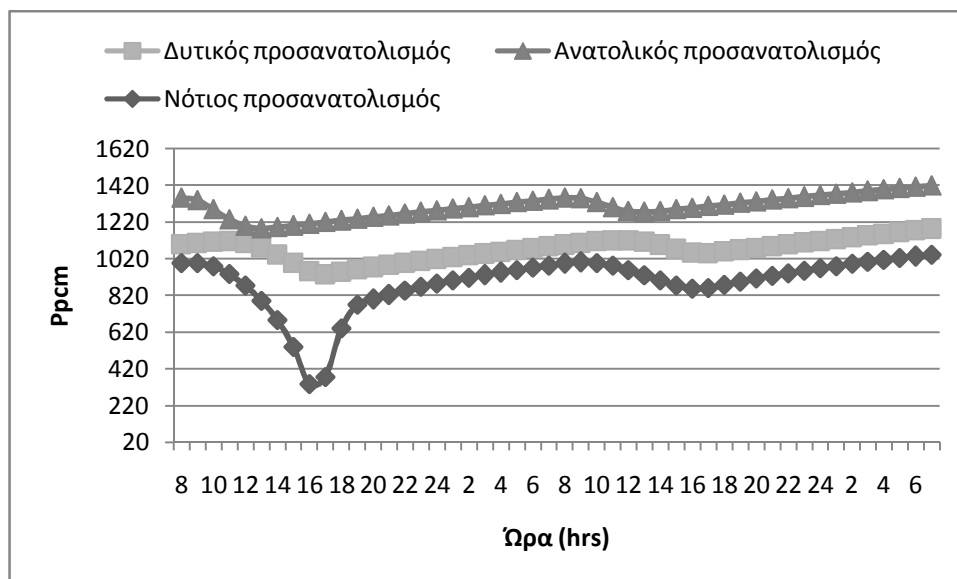


Σχήμα 6.4.16 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρης για ένα 48ωρό όπου η 2<sup>η</sup> μέρα είναι νεφώδης ,για τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς

❖ Για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη:



Σχήμα 6.4.17 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 48ωρό, όπου η 2<sup>η</sup> μέρα είναι νεφώδης, συναρτηθεί της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη, για τρεις προσανατολισμούς.



Σχήμα 6.4.18 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτηθεί της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη για ένα 48ωρό όπου η 2<sup>η</sup> μέρα είναι νεφώδης, για τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς.

Οι παρατηρήσεις σχετικά με τη συμπεριφορά του στρώματος του υλικού αλλαγής φάσης κατά τη διάρκεια του πρώτου εικοσιτετραώρου έχουν αναφερθεί στην αρχική μας προσομοίωση (5.3) οπότε δεν θα επαναληφθούν εδώ. Όσον αφορά τώρα την περίπτωση του δεύτερου 24ώρου τα συμπεράσματα που είχαν προκύψει για το πρώτο 24ώρο βλέπουμε ότι επεκτείνονται. Αυτό που έχει σημασία είναι να συγκριθεί καταρχήν το πρώτο με το δεύτερο εικοσιτετράωρο. Όπως αναμενόταν, τα μέγιστα της θερμοκρασίας για όλα τα ποσοστά PCM μειώθηκαν το δεύτερο εικοσιτετράωρο ενώ η συμπληρωματική ισχύ που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας αυξήθηκαν, αφού η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει είναι τώρα το 50% της αρχικής. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπήρξε αξιόλογη μεταβολή στα ελάχιστα των θερμοκρασιών μεταξύ πρώτου και δεύτερου εικοσιτετραώρου, ωστόσο παρατηρήθηκε μία μικρή πτώση στο τέλος του δεύτερου εικοσιτετράωρου το οποίο είναι λογικό εφόσον δεν έχουν αποθηκευτεί μεγάλα ποσά θερμότητας στο PCM λόγω της μειωμένης ακτινοβολίας.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι το υλικό αλλαγής φάσης μας αρχικά στο τέλος του πρώτου 24ώρου διατηρεί ακόμα ποσά αποθηκευμένης θερμότητας τα οποία δίνει το δεύτερο 24ωρο και επιπλέον ότι αποδίδει ακόμα και με μειωμένη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

## **6.5 5<sup>η</sup> Παραμετρική μελέτη ως προς το μήνα μελέτης και το προσανατολισμό για συνεχείς συνεφιασμένες μέρες.**

Βασική επιδίωξη της μελέτης αυτής είναι η εξέταση της συμπεριφοράς και της θερμοκρασιακής απόκρισης του στρώματος PCM κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου για όλους τους μήνες του έτους σε περιόδους συνεφιάς η μειωμένης ηλιοφάνειας.

Η παρούσα παραμετρική μελέτη θα εφαρμοστεί στην προσομοίωση ηλιακής φόρτισης τοιχοποιίας που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 5.3, αλλάζοντας την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται το στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης. Για τη μελέτη μας θεωρούμε ότι για συνεχόμενες μέρες επικρατεί συνεφιά δηλαδή η προσπίπτουσα ηλιακή



ακτινοβολία αυτές τις μέρες λαμβάνεται ίση με τη μισή από την ακτινοβολία που έχει βρεθεί στο κεφάλαιο 5.2.1 .

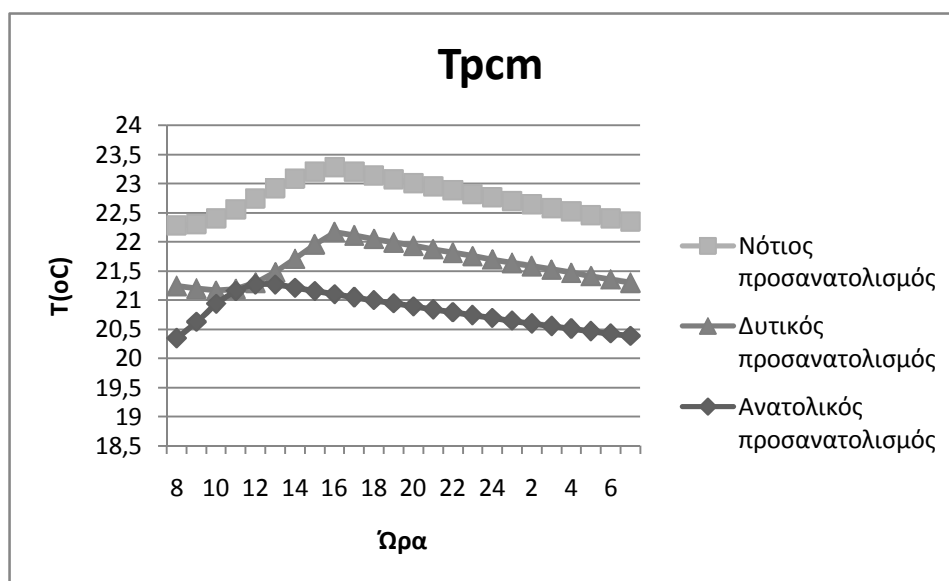
Άρα για την ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$  λαμβάνονται οι τιμές του πίνακα 6.4.1 του δεύτερου 24ώρου .

Για κάθε 21<sup>η</sup> των μηνών του έτους και για κάθε προσανατολισμό θα βρεθεί από τον ισολογισμό του στρώματος του PCM η θερμοκρασιακή απόκριση του. Ενώ στη συνέχεια θεωρώντας τις απώλειες της αίθουσας σταθερές και ίσες με  $P_{\text{απαιτούμ}}=1500\text{W}$  βρίσκουμε και παρουσιάζουμε σε διαγράμματα τη συμπληρωματική ισχύ που χρειάζεται για να καλυφθούν οι απαιτούμενες ανάγκες της αίθουσας.

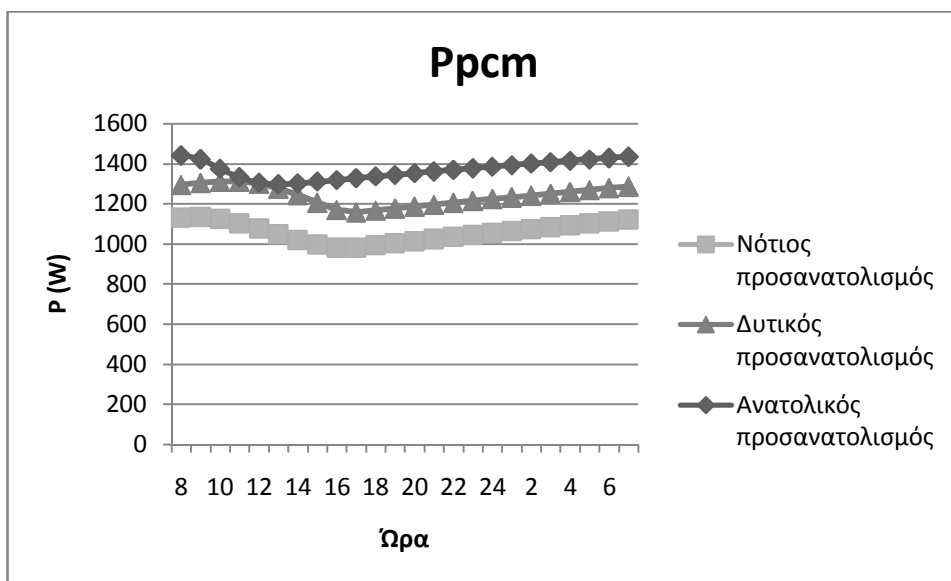
Βέβαια εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι στη διαδικασία εύρεσης της ανά ώρα θερμοκρασίας του PCM που έχουμε περιγράψει αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.3.3 στις επαναλήψεις για την εύρεση των θερμοκρασιών μιας τυπικής μέρας θα λαμβάνεται εξαρχής το 50% της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή οι επαναλήψεις θα γίνουν όλες με την μίση ακτινοβολία καθώς θέλουμε να μελετήσουμε το φαινόμενο για συνεχείς νεφώδης μέρες.

Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα:

❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου:

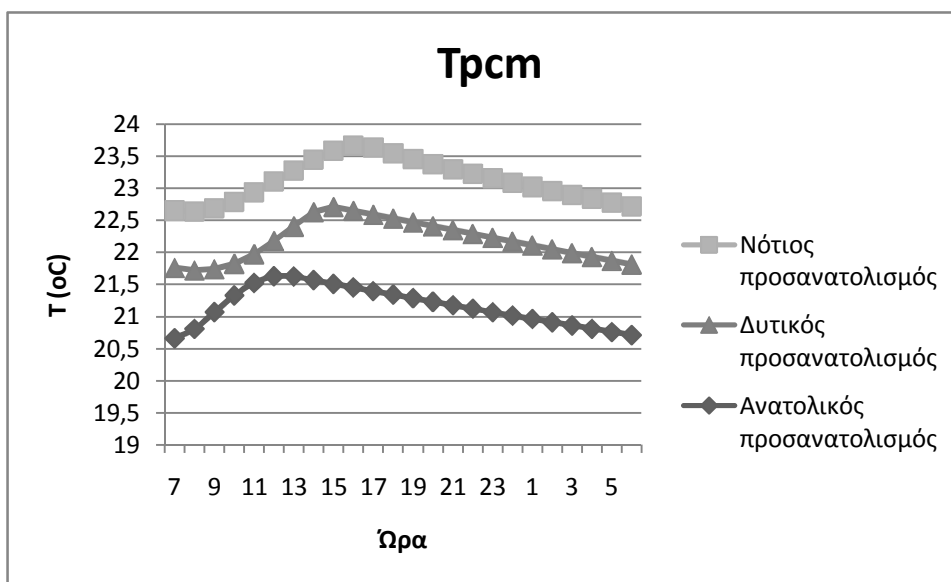


Σχήμα 6.5.1 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, για τρεις προσανατολισμούς

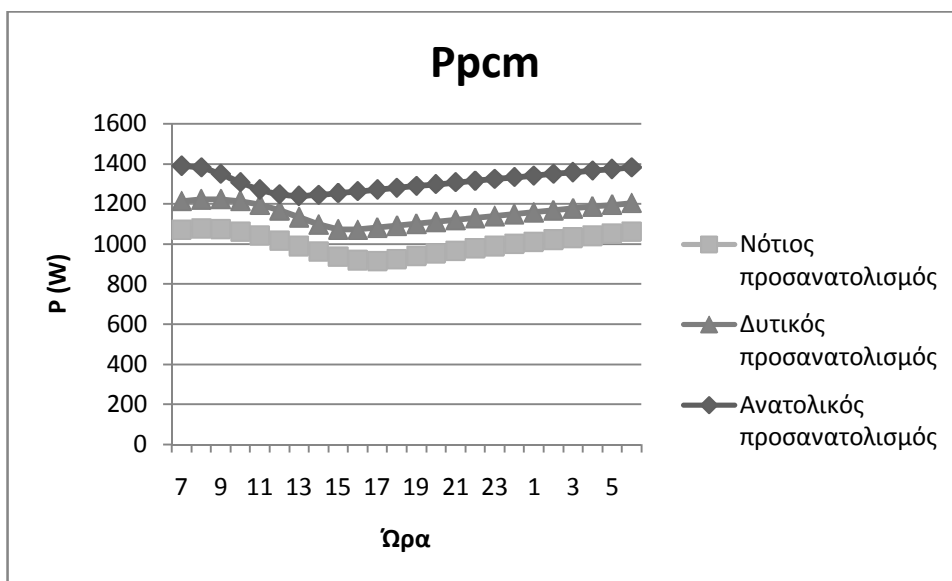


Σχήμα 6.5.2 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου για ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες σε τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου :

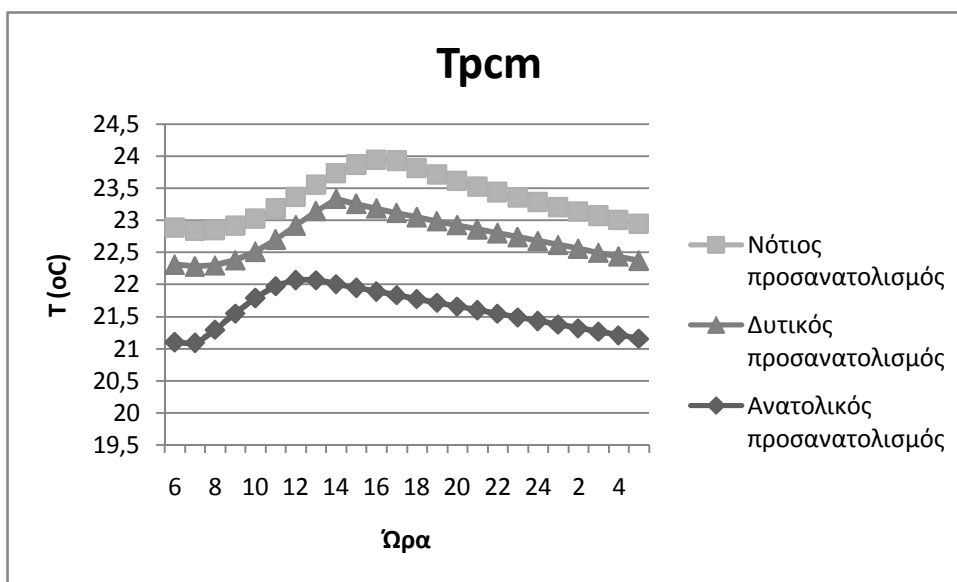


Σχήμα 6.5.3 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου ,για τρεις προσανατολισμούς.

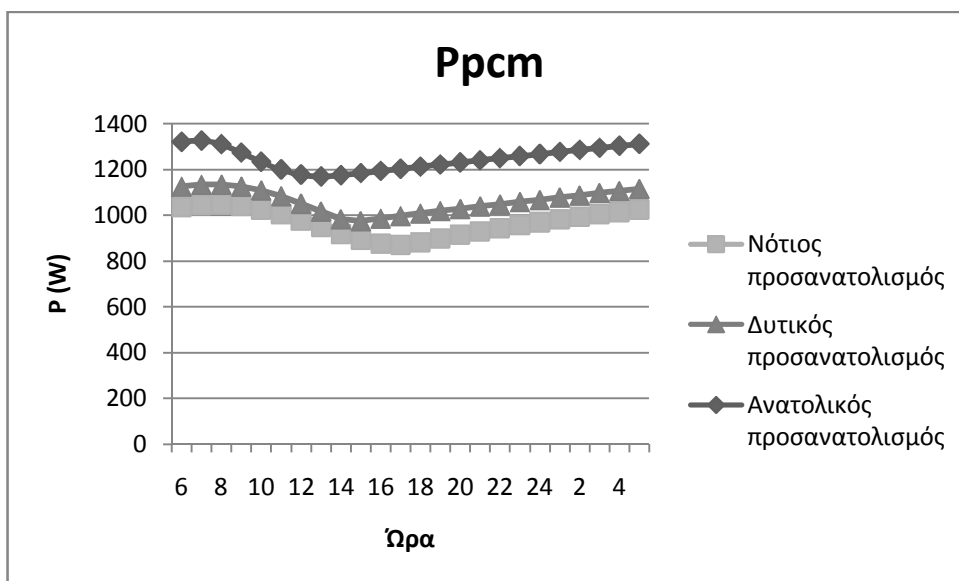


Σχήμα 6.5.4 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου για ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες σε τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου:

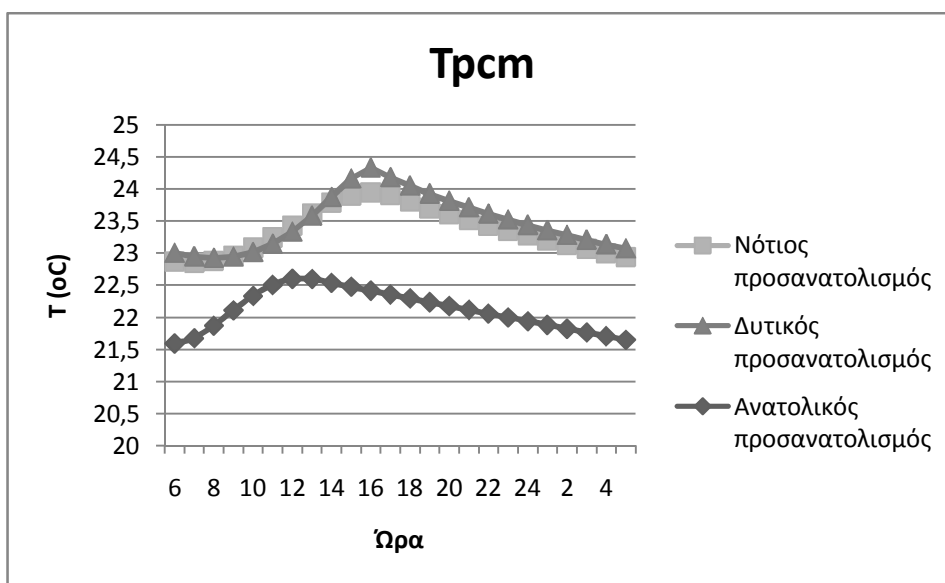


Σχήμα 6.5.5 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου, για τρεις προσανατολισμούς.



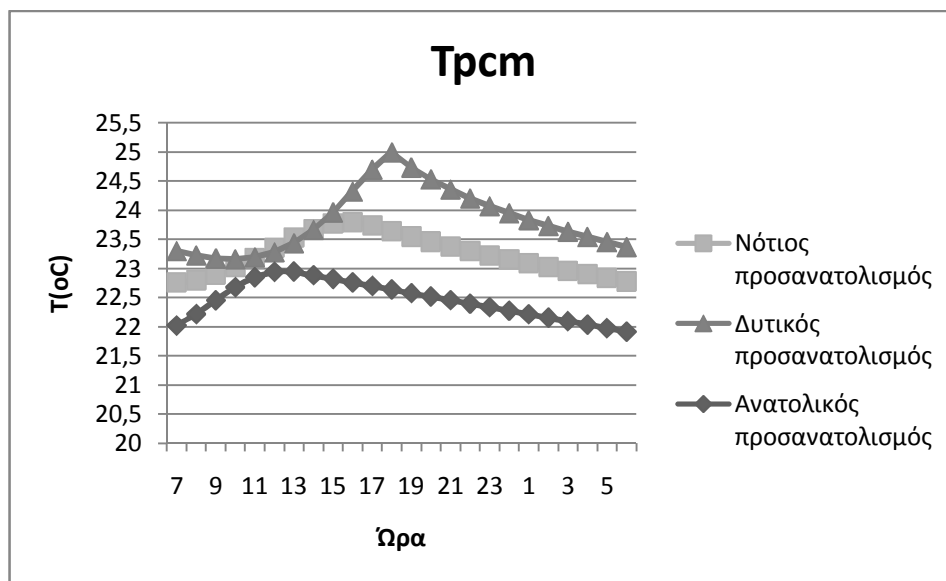
Σχήμα 6.5.6 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου για ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες σε τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Απριλίου:



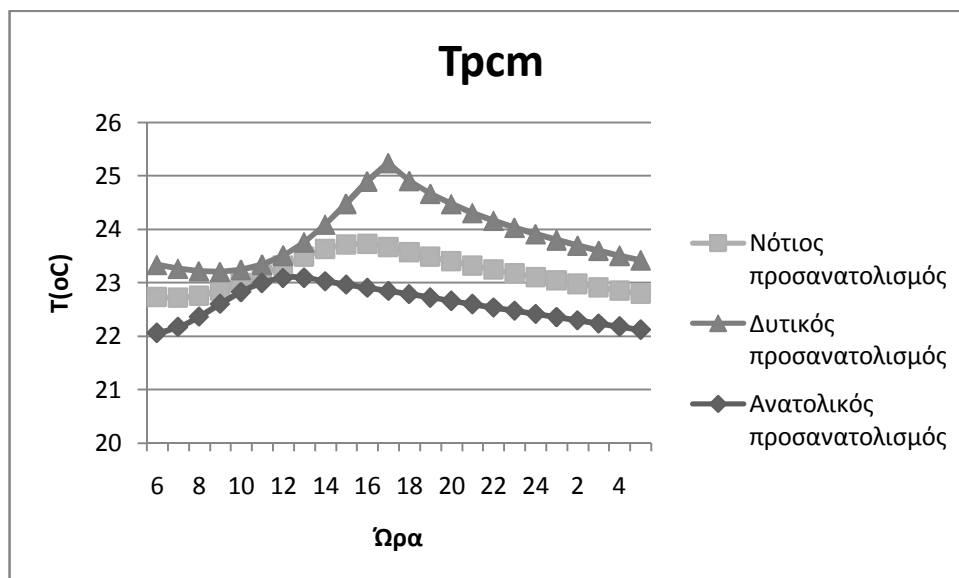
Σχήμα 6.5.7 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Απριλίου για τρεις προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Μαΐου :



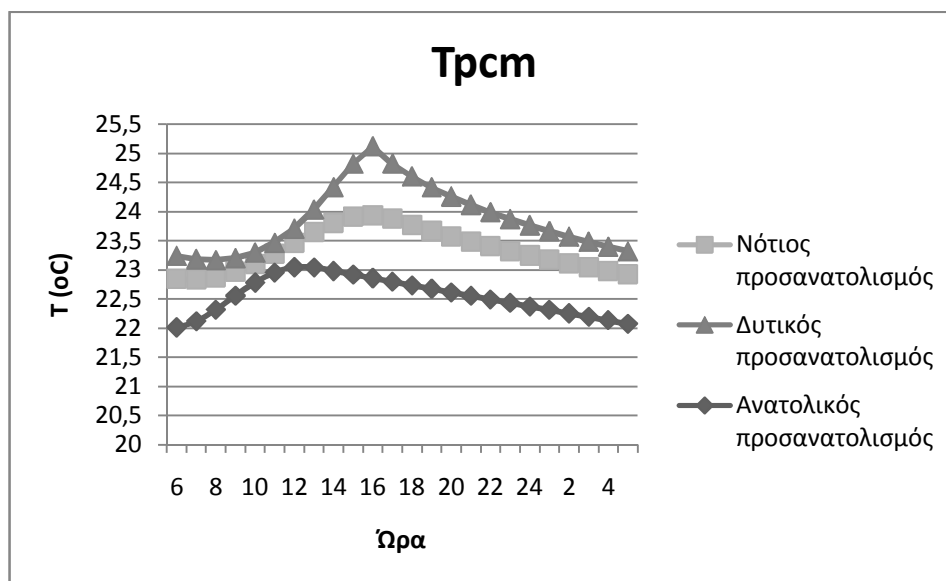
Σχήμα 6.5.8 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Μαΐου, για τρεις προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου :



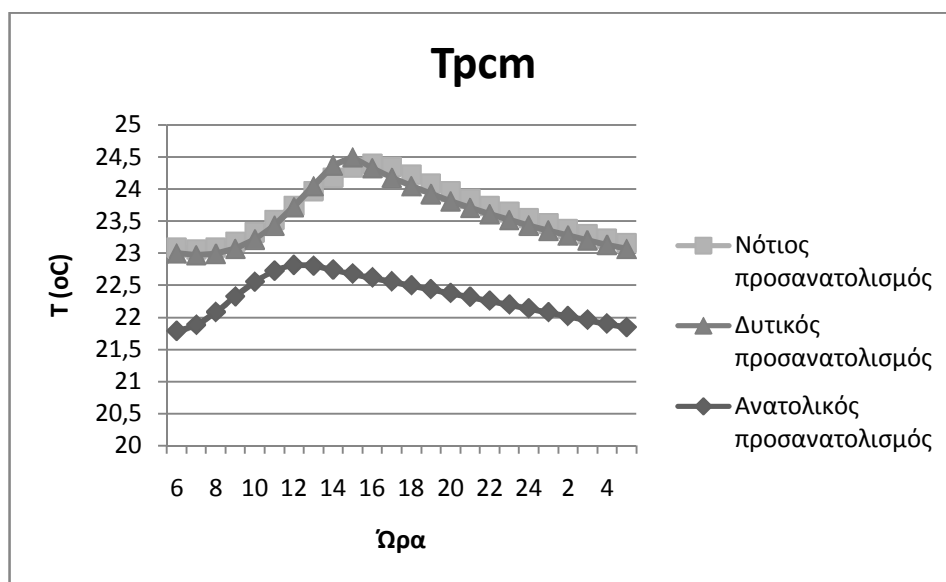
Σχήμα 6.5.9 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου, για τρεις προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου :



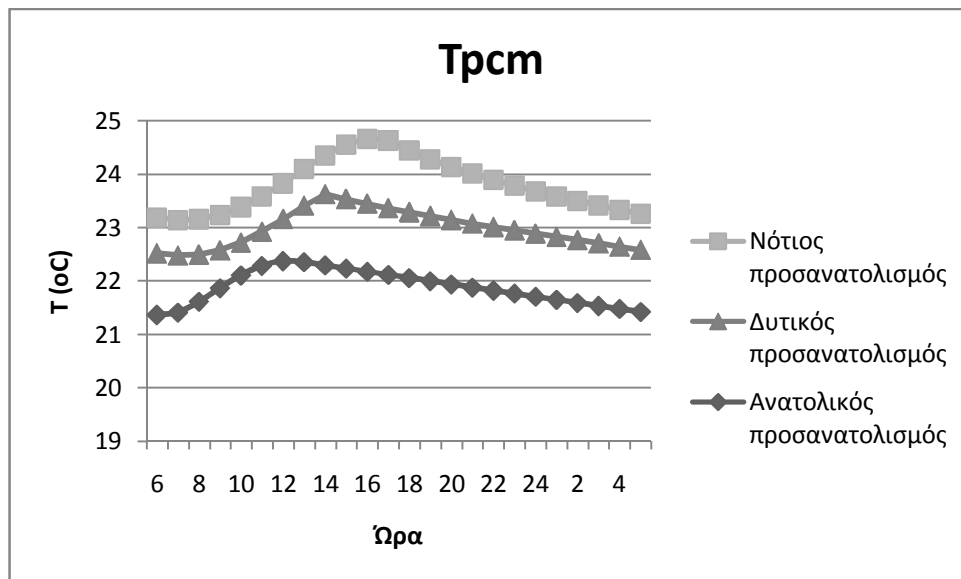
Σχήμα 6.5.10 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες συναρτήσσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου, για τρεις προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου:



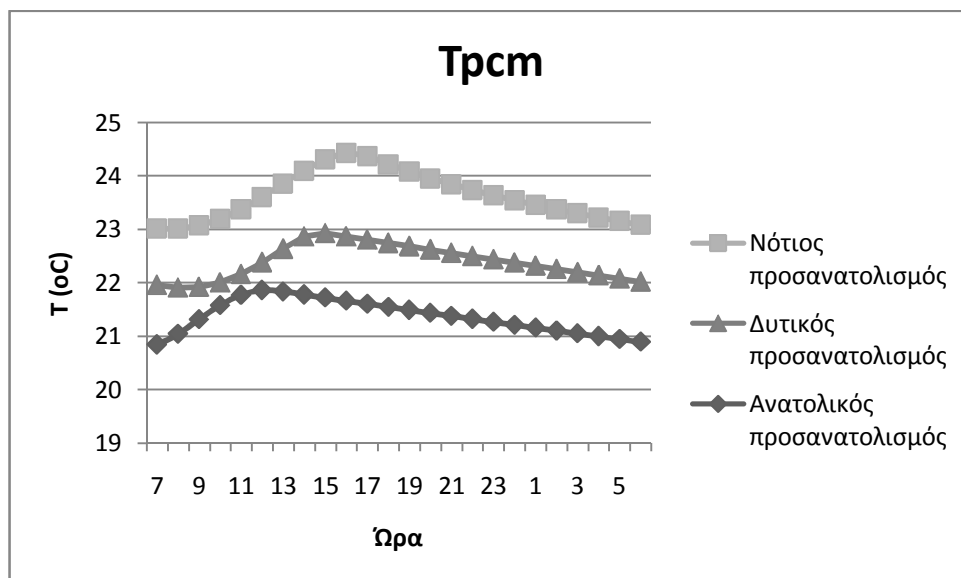
Σχήμα 6.5.11 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες συναρτήσσει της ώρας για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου, για τρεις προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρη:

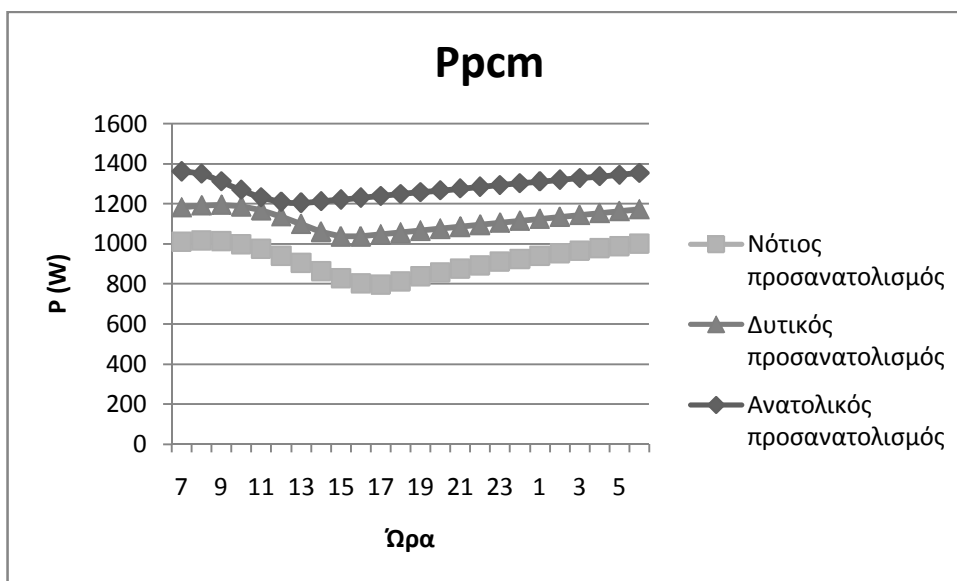


Σχήμα 6.5.12 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Σεπτέμβρη, για τρεις προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη:

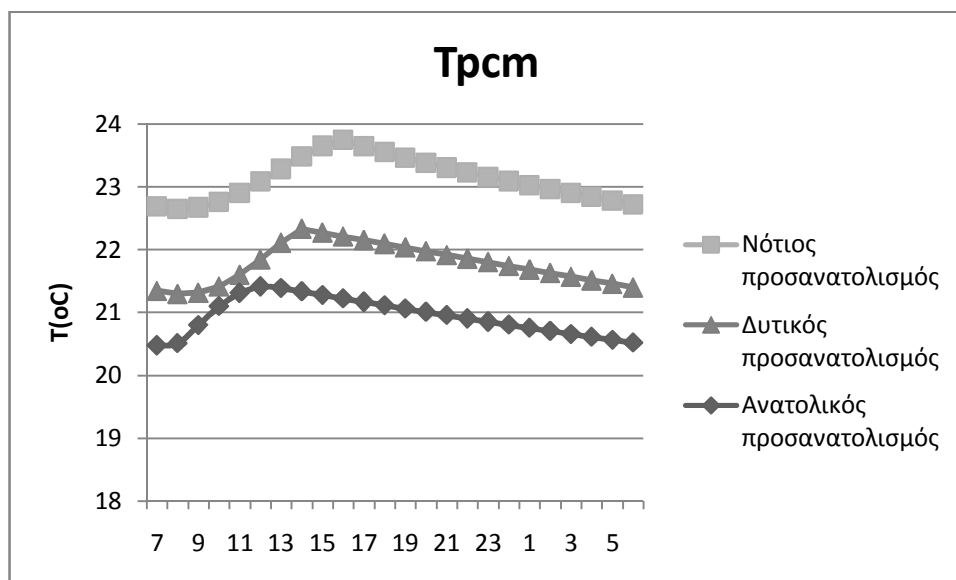


Σχήμα 6.5.13 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη, για τρεις προσανατολισμούς.



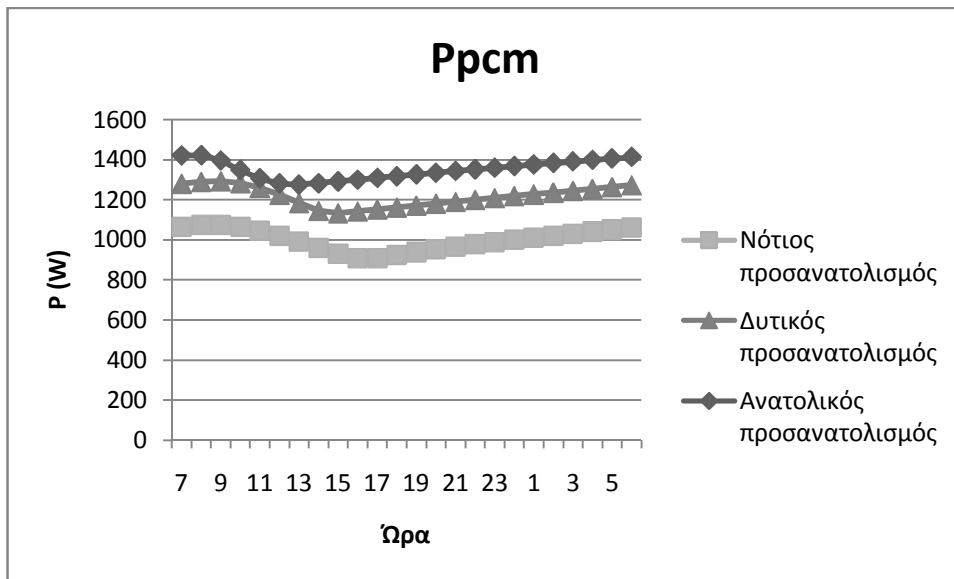
Σχήμα 6.5.14 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Οκτώβρη για ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες σε τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη:



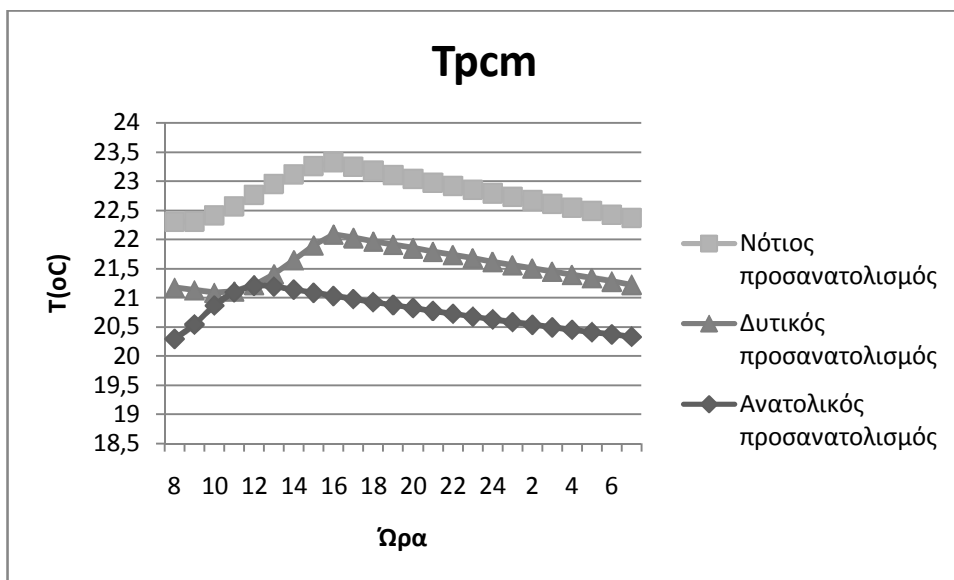
Σχήμα 6.5.15 Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη, για τρεις προσανατολισμούς.



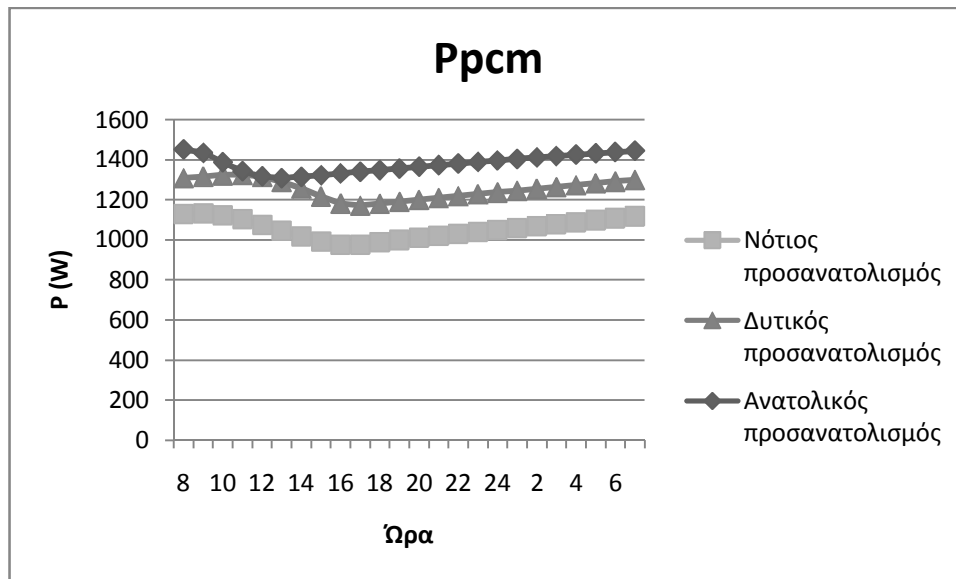


Σχήμα 6.5.16 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύς για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Νοέμβρη για ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες σε τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς.

❖ Για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη:



Σχήμα 6.5.17. Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο PCM σε ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη ,για τρεις προσανατολισμούς.



Σχήμα 6.5.18 Μεταβολή της απαιτούμενης συμπληρωματικής Ισχύος για την κάλυψη των αναγκών της αίθουσας συναρτήσεως της ώρας για την 21<sup>η</sup> Δεκέμβρη για ένα 24ωρό για συνεχείς νεφώδεις μέρες, σε τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς.

Από τα διαγράμματα εύκολα παρατηρούμε ότι το υλικό αλλαγής φάσης παρόλη την έλλειψη υψηλής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιεί την ιδιότητα του να αποθηκεύει θερμότητα και έπειτα να την προσδίδει στην αίθουσα.

Παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα των θερμοκρασιών ακολουθούν παρόμοια κατανομή με της αρχικής προσομοίωσης με την μόνη διαφορά ότι δεν παρουσιάζεται τόσο υψηλές σε μέτρο θερμοκρασίες γεγονός το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς έχει μειωθεί η ηλιακή ακτινοβολία. Δηλαδή βλέπουμε σε σύγκριση με τον προσανατολισμό ότι το PCM που είναι τοποθετημένο σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό αναπτύσσει μεγαλύτερες θερμοκρασίες έναντι των άλλων δυο προσανατολισμών, με εξαίρεση τρεις καλοκαιρινούς μήνες τον Μάιο, τον Ιούλιο και τον Ιούνιο όπου το υλικό μας εμφανίζει ψηλότερες θερμοκρασίες όταν βρίσκεται σε τοίχο με δυτικό προσανατολισμό. Αντίθετα το υλικό αλλαγής φάσης όταν τοποθετείται σε τοίχο με ανατολικό προσανατολισμό δεν αναπτύσσει ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες.

Επίσης μια άλλη παρατήρηση που προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι στο υλικό αλλαγής φάσης που είναι τοποθετημένο

σε τοίχο με δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό η θερμοκρασία τη θερινή περίοδο παρουσιάζει αύξηση σε σύγκριση με την χειμερινή ,φαινόμενο το οποίο δεν εμφανίζεται σε νότιο προσανατολισμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο (από την οποία εξαρτάται η θερμοκρασία του PCM) νότιου προσανατολισμού δεν παρουσιάζει αύξηση τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω της μεγαλύτερης κλίσης του ήλιου με τον κατακόρυφο τοίχο.

Από τα διαγράμματα της συμπληρωματικής ισχύς που χρειάζεται κάθε φόρα η αίθουσα παρατηρούμε ότι παρόλη τη μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία το PCM καλύπτει ένα μέρος της απαιτούμενης ισχύς ακόμα και τις ώρες που δεν υπάρχει φορτίζεται καθόλου από τον ήλιο. Όσον αφορά τους μήνες προκύπτει ότι τη θερινή περίοδο το PCM δίνει περισσότερη ισχύ άρα χρειαζόμαστε λιγότερη ενέργεια από εξωτερικούς παράγοντες. Ενώ άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι το PCM που βρίσκεται σε τοίχο με νότιο προσανατολισμό ακόμα και την χειμερινή περίοδο δίνει ποσά ισχύος σε αντίθεση με τους άλλους δύο προσανατολισμούς όπου τους χειμερινούς μήνες η ένταση της ισχύος είναι χαμηλότερη. Ειδικά το PCM που έχει τοποθετηθεί σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού παρατηρούμε ότι καθ'όλη τη διάρκεια του έτους δεν δίνει μεγάλα ποσά ισχύος.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι το PCM μπορεί να είναι ωφέλιμο κυρίως όταν τοποθετείται σε τοίχο νότιου προσανατολισμού (και στους υπόλοιπους προσανατολισμούς υπάρχει όφελος αλλά χαμηλότερο), ακόμα και σε περιπτώσεις όπου λόγω νεφοσκεπούς ημέρας , η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά μειωμένη.

## Βιβλιογραφία

- [1] (<http://www.ktirio.gr/innet/UsersFiles/sa/documents/articles/2009-07-184.pdf>)
- [2] A. Shanmuga Sundaram, R.V. Seeniraj, R. Velraj: An experimental investigation on passive cooling system comprising phase change material and two-phase closed thermosyphon for telecom shelters in tropical and desert regions
- [3] <http://www.fibre2fashion.com/industry-article/9/884/phase-change-materials-overview2.asp>
- [4] <http://gearjunkie.com/everest-gear>
- [5] <http://www.outlast.com/index.php?id=70&L=0>
- [6] [http://www.sierrabmwonline.com/index.php/bmw-riders-apparel-2011-bmw-functional-underwear-c-169\\_80](http://www.sierrabmwonline.com/index.php/bmw-riders-apparel-2011-bmw-functional-underwear-c-169_80)
- [7] [http://www.econ3.gr/readmore.php?article\\_id=51771295788153](http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153)
- [8] Abhat, 'Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, *Solar Energy* '30 (4) (1981)
- [9] D. Buddhi and R.L. Sawhney, '*Proceedings on thermal energy storage and energy conversion School of Energy and Environmental Studies*', Devi Ahilya University, Indore, India (1994).
- [10] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431102001928>
- [11] D. Zhou<sup>a</sup>, C.Y. Zhao<sup>b</sup> 'Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications'.
- [12] Χρήστος Τζιβανίδης, Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων, Υλικά Αλλαγής Φάσης
- [13] Zhang Yinping, Jiang Yi, A simple method, the T –history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials
- [14] E. Günther, S. Hiebler, H. Mehling, Determination of the heat storage capacity of PCM and PCM-objects as a function of temperature
- [15] [en.wikipedia.org/wiki/Differential\\_thermal\\_analysis](http://en.wikipedia.org/wiki/Differential_thermal_analysis)

- [16] [http://www.matersci.upatras.gr/courses/public/yk/Parartima\\_5.pdf](http://www.matersci.upatras.gr/courses/public/yk/Parartima_5.pdf)
- [17] <http://www.nobadscience.com/therm3.htm>
- [18] Zhang Yinping, Jiang Yi and Jiang Yi,  
A simple method, the T –history method, of determining the heat of fusion,  
specific heat and thermal conductivity of phase-change materials,  
Measurement and Science Technology, 10, 1999, p. 201-205.
- [19] Donald Pitts, Leighton Sissom,  
Heat Transfer, McGraw-Hill international editions
- [20] A.F. MILLS,  
Heat and Mass Transfer
- [21] Ξενοφών Κακάτσιος,  
Μετάδοση Θερμότητας, εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2002
- [22] Hiki Hong , Sun Kuk Kim, Yong-Shik Kim  
Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of  
various materials,  
International Journal of Refrigeration, 27, 2004, p. 360-366
- [23] Jong Hyeon Peck, Jae-Jun Kim, Chaedong Kang, Hiki Hong,  
A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting  
temperature using T-history method,  
International Journal of Refrigeration, 29, 2006, p. 1225-1232
- [24] Ana Lazaro, Eva Gunther, Harald Mehling, Stefan Hiebler,  
Jose M Marin and Belen Zalba  
Verification of a T-history installation to measure enthalpy versus  
temperature  
curves of phase change materials,  
Measurement and Science Technology, 17, 2006, p. 2168-2174.
- [25] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112005643#>
- [26] Piia Lamberg, Reijo Lehtiniemi, Anna-Maria Henell, Numerical and  
experimental investigation of melting and freezing processes in phase  
change material storage

- [27] Yvan Dutil, Daniel R.Rousse, Nizar Ben Salah, Stephane Lassue, Laurent Zalewski, A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations
- [28] Eleftherios Dimitrios Kravvaritis, Kimon Antonopoulos, Christos Tzivanidis, Solar energy management using PCM passive systems in the Athens area buildings
- [29] Haitian Yang, Yiqian He, Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods
- [30] <http://physicsgg.me/2012/01/12/%CE%B2%CE%AF%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BF-%CF%85%CF%80%CE%B5%CF%81%CF%88%CF%8D%CE%BE%CE%B7/>
- [31] <http://en.wikipedia.org/wiki/Supercooling>
- [32] Halime O. Paksoy, “Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption – Fundamentals, Case Studies and Design”, NATO Science Series, Springer publications (2007).
- [33] Lane, G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I. 1983, Florida: CRC Press, Inc.
- [34] Ghoneim.A.A. & Klein.S.A, Phase Change Materials Analysis, Solar Energy, No.3., 1991
- [35] V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, T.
- [36] [http://www.econ3.gr/readmore.php?article\\_id=51771295788153](http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153)
- [37] Akiyama, Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review
- [38] A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review
- [39] H.Mehling, L.F.Cabeza, Heat and cold storage with PCM:An up to date introduction into basics and applications, Solid-liquid phase change materials
- [40] Luisa F.Cabeza, Harald Mehling, Temperature control with phase change materials

- [41] Yonggang Lv, Yang Zou, Li Yang, Feasibility study for thermal protection by microencapsulated phase change micro/nanoparticles during cryosurgery
- [42] S. Mondal, Phase change materials for smart textiles – An overview
- [43 ] A.Izzo Renzi, C.Carfagna, P.Persico, Thermoregulated natural leather using
- [44]. Zhang Yinping, Zhou Guobing, Lin Kunping, Zhang Qunli, Di Hongfa, “Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook”, Building and Environment 2007.
- [45].A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009.
- [46]. D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, E. Ghanbari, “Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard”, Solar energy materials 1991.
- [47]. M. Zhang, A.M. Mario, B.K. Jennifer, “Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings”, International Journal of Energy Research 2005.
- [48]. P. Schossig, H. M. Henning, S. Gschwander, T. Hausmann, “Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials”, Solar Energy Materials and Solar Cells 2005.
- [49]. KAR Ismail, JR Henriquez, “Thermally effective windows with moving phase change curtains”, Appl. Thermal Engineering 2001.
- [50]. AK Athienities, Y. Chen, “The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems”, Solar Energy 2000.
- [51]. K. Nagano, T. Mochida, K. Iwata, H. Hiroyoshi, R. Domanski, M. Rebow, “Development of new PCM for TES of the cooling system, Terrastock”, In: M.Benner, Hahne EWP, editors. 8th International Conference on Thermal Energy Storage 2000.
- [52]. M. Farid, WJ Kong, “Underfloor heating with latent heat storage”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A 2001

- [53]. Bruno Frank, "Phase change material for space heating and cooling", Sustainable Energy Centre: University of South Australia; Presentation 2002.
- [54]. JM Gutherz, ME Schiler, "A passive solar heating system for the perimeter zone of office buildings", Energy Sources 1991
- [55]. T. Kodo, T. Ibamoto, "Research on using the PCM for ceiling board", IEAECESIA, Annex 17, 3rd workshop, Tokyo, Japan. October 1-2, 2002.
- [56]. M. Telkes, E. Raymond, "Storing solar heat in chemicals - a report on theDover house", Heat Vent 1949
- [57]. GA Lane, "Solar heat storage: latent heat materials", vol. 1, Background and scientific principles. 1983.
- [58]. JJ Jurinak, SI Abdel-Khalik, "Sizing phase change energy storage units for air-based solar heating systems", Sol Energy 1979
- [59]. J. Prakash, HP Garg, G. Datta, "A solar water heater with a built-in latent heat storage", Energy Convers Manage 1985.
- [60]. K. Kaygusuz, "Performance of solar-assisted heat-pump system", Appl.Energy 1995
- [61]. PBL. Chaurasia, "Phase change material in solar water heater storage system", In: Proceedings of the 8th international conference on thermal energy storage; 2000.
- [62]. Ghonein,A.A, Building Walls Using Phase Change Materials,Solar Energy 1991
- [63]. Hawes, D.W., Feldman, D., Banu, D., "Latent Heat Storage in Building Materials," Energy and Building 1993.
- [64]. Hawes, D.W., Banu, D., Feldman, D., "Latent Heat Storage in Concrete," Solar Energy Materials 1989.
- [65]. Hawes, D.W., Banu, D., Feldman, D., "The stability of Phase ChangeMaterials in Concrete," Solar Energy Materials and Solar Cells, 1989.



- [66]. Feldman, D., Banu, D., Hawes, D.W., “Development and Application of Organic Phase Change Mixtures in Thermal Storage Gypsum Wallboard,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1995.
- [67]. Kedl, R.J, Stovall, T.K, Activities to support of the Wax-Impregnated Wallboard Concept, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA, 1989.
- [68]. Neeper, D.A., “Thermal Dynamics of Wallboard with Latent Heat Storage,” *Solar Energy*, No. 5, 2000.
- [69] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj: Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments.
- [70]. T. Knowler, “Proportioning composites for efficient-TSWs”, *Solar Energy* 1983.
- [71]. U. Stritih, P. Novak, “Solar heat storage wall for building ventilation”, *Worldrenewable energy congress (WREC)* 1996.
- [72]. K. Peippo, P. Kauranen, PD. Lund, “Multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating”, *Energy and Buildings* 1991.
- [73]. AK. Athienities, C. Liu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman, “Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage”, *Building and Environment* 1997.
- [74]. M. Kalousck, J. Hirs, “Simulation of the summer indoor thermal comfort by using wallboard with phase change material”, *Eurosun*, Bologna 2002.
- [75] Amar M. Khudhair, Mohammed M. Farid: A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials.
- [76] D. A. Neeper: Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage.
- [77] Meng Zhang, Mario A. Medina and Jennifer B. King: Development of a thermally enhanced frame wall with phase change materials for on-

peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings.

[78] Pablo Arce Maldonado: Application of passive thermal energy storage in buildings using PCM and awnings.

[79] P. Schossig, H.-M. Henning, S. Gschwander, T. Hausmann: Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials.

[80] K. Darkwa, P.W. O’Callaghan: Simulation of phase change drywalls in a passive solar building .

[81] Jin-Soo Kim, Jo Darkwa: Enhanced performance of laminated PCM wallboard for thermal energy storage in buildings.

[82] Amar M. Khudhair, Mohammed M. Farid: A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials .

[83] Κίμων Α. Αντωνόπουλος: Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα, Μέρος Πρώτο.

[84] <http://www.rubitherm.de/>

[85] E.D. Kravvaritis, Kimon Antonopoulos, Christos Tzivanidis: ‘Experimental determination of the effective thermal capacity function and other thermal properties for various phase change materials using the thermal delay method’ Applied Energy (under publication) .