



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

**Διπλωματική εργασία**

**«Επίδραση της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου κτιρίων στο βαθμό αξιοποίησης διαφορών εμπορικών υλικών αλλαγής φάσης (PCM) κατά τη διάρκεια ολόκληρου του τυπικού έτους της Αθήνας»**

**ΑΡΒΑΝΙΤΗ ΔΗΜΗΤΡΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**ΚΙΜΩΝ Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ 2017**



*Στον Αδελφό μου...*



## Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου είναι πραγματικότητα. Με αφορμή το γεγονός αυτό, αισθάνομαι την βαθιά ανθρώπινη ανάγκη να ευχαριστήσω από καρδιάς τον καθηγητή μου κ. Κίμωνα Α. Αντωνόπουλο, που μου ανέθεσε το αντικείμενο της εργασίας, για την καθοδήγηση και ενθάρρυνση που μου παρείχε, με την επίβλεψη του σε όλα τα στάδια της, από την αρχή μέχρι την επιτυχή και έγκαιρη ολοκλήρωση της. Με ανυπόκριτη εκτίμηση και πάλι ευχαριστώ πολύ!

Ευχαριστώ, επίσης, όλα τα αγαπημένα μου πρόσωπα, τους φίλους και τις φίλες μου, που μοιράστηκαν τις αγωνίες και τα άγχη μου όλα αυτά τα χρόνια

Τέλος, μια μεγάλη αγκαλιά αγάπης και ευγνωμοσύνης στην οικογένειά μου, καθώς οι λέξεις είναι αδύναμες να αποτυπώσουν τα συναισθήματά μου, για όσα μου προσέφεραν από τα πρώτα νηπιακά βήματα μου μέχρι σήμερα.



## Abstract

The present thesis disseminates the use of phase change materials (PCM), an alternative heat storing technology, with special focus on their application on the building sector.

The specific project consisted of two parts; reviewing the theoretical background and applying the acquired knowledge on evaluating the utilization rate of PCMs via an *in silico* modeling approach.

The first part is a theoretical approach of the main features of PCM. Their thermophysical properties, function, classification, integration are described. Additionally, means to calculate their properties are illustrated along with limitations concerning their application and the material per se.

The second part deals with the application of the aforementioned notions into a theoretical simulation. Here, I attempted to model solar charging brick masonry opposite a window pane, incorporated with a substrate of PCM, over an interval of 1 year in a building in Athens. More specifically, three different commercial PMCs were examined *in silico* and their utilization rate was defined on predefined temperatures and parameters over the period of 1 year. Finally, an analysis of the interior environment temperature was conducted, in order to indicate the influence of this parameter on the utilization rate of the PCMs simulated here.





## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το θέμα των υλικών αλλαγής φάσης, μιας εναλλακτικής τεχνολογίας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, δίνοντας έμφαση στην εφαρμογή αυτής στον κτηριακό τομέα.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται μια θεωρητική προσέγγιση των βασικότερων πτυχών που σχετίζονται με τα υλικά αλλαγής φάσης. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας τους, οι ιδιότητες, οι κατηγορίες και τα προβλήματα τους, οι μέθοδοι ενσωμάτωσής τους, καθώς και τρόποι μέτρησης των ιδιοτήτων τους. Στη συνέχεια αναλύονται οι εφαρμογές που έχουν γίνει σε κτίρια και παρουσιάζονται ανάλογα πειράματα που έχουν γίνει μέχρι σήμερα.

Στο δεύτερο μέρος, γίνεται μια θεωρητική προσομοίωση της ηλιακής φόρτισης εσωτερικής τοιχοποιίας απέναντι από υαλοπίνακα, όταν ενσωματώνεται σε αυτόν στρώμα υλικού αλλαγής φάσης, σε κτήριο στην περιοχή της Αθήνας, κατά τη διάρκεια ενός τυπικού έτους. Δοκιμάζονται τρία διαφορετικά εμπορικά υλικά αλλαγής φάσης, και προσδιορίζεται ο βαθμός αξιοποίησης τους, για δεδομένες θερμοκρασιακές συνθήκες και παραμέτρους, κατά τη διάρκεια του έτους. Τέλος, διεξάγεται παραμετρική μελέτη ως προς τη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου, με σκοπό την ανάδειξη της επίδρασης αυτής, στο βαθμό αξιοποίησης των υλικών αλλαγής φάσης.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ενέργεια.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Κατανάλωση Ενέργειας σε Κτήρια - Ελληνική Πραγματικότητα.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θερμική ενέργεια.....	3
2.1 Γενικά.....	3
2.2 Μεταφορά Θερμότητας .....	3
2.2.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή .....	4
2.2.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή .....	5
2.2.3 Μεταφορά θερμότητας με Ακτινοβολία .....	6
2.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.....	6
2.3.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας.....	7
2.3.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Υλικά Αλλαγής Φάσης (Phase Change Materials-PCM) .....	11
3.1 Γενικά.....	11
3.2 Κατηγοριοποίηση των PCM .....	14
3.2.1 Οργανικά υλικά.....	15
3.2.1.1 Παραφίνες.....	16
3.2.1.2 Μη-παραφίνες.....	16
3.2.2 Ανόργανα PCM.....	17
3.2.2.1 Ένυδρα άλατα .....	17
3.2.2.2 Μέταλλα.....	19
3.2.3 Εύτηκτα μείγματα .....	20
3.2.4 Σύγκριση των τριών βασικών κατηγοριών PCM.....	20
3.3 Κριτήρια επιλογής υλικών αλλαγής φάσης .....	21
3.4 Προβλήματα των υλικών αλλαγής φάσης και τρόποι επίλυσης τους .....	23
3.4.1 Φαινόμενο supercooling .....	23
3.4.2 Φαινόμενο διαχωρισμού φάσεων.....	24
3.4.3 Ανεπαρκής σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων των PCM σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση	25
3.5 Ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης στα δομικά υλικά.....	26
3.5.1 Άμεση ενσωμάτωση.....	26
3.5.2 Εμβάπτιση.....	27
3.5.3 Ενσωμάτωση PCM σε κάψουλες.....	27

3.5.3.1 Μακροενσωμάτωση .....	27
3.5.3.2 Μικροενσωμάτωση .....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Κτηριακές Εφαρμογές PCM .....	30
4.1 Γενικά.....	30
4.2 Ιστορική αναδρομή .....	30
4.2.1 Οι πρώτες προσπάθειες.....	31
4.2.1.1 Maria Telkes .....	31
4.2.1.2 Dr. Lawrence Gardshire .....	32
4.2.1.3 Dr J. W. Hodgins και Dr T. W. Hoffman.....	32
4.2.2 Ερευνητική δραστηριότητα.....	33
4.2.2.1 Η.Π.Α.....	33
4.2.2.5 Άπω Ανατολή (Ιαπωνία).....	35
4.3 Εφαρμογές PCM σε κτήρια .....	35
4.3.1 Γυψοσανίδα με PCM .....	36
4.3.2 Τοίχος Trombe με PCM.....	38
4.3.3 Υαλοπίνακες ενισχυμένοι με PCM .....	40
4.3.4 Παντζούρια με PCM .....	42
4.3.5 PCM σε ταβάνια/οροφές.....	42
4.3.6 PCM σε δάπεδα.....	44
4.3.7 Μπλοκ σκυροδέματος εμποτισμένα με PCM .....	45
4.3.8 Ενσωμάτωση PCM σε Τούβλα .....	46
4.3.9 Φυσική Ψύξη (Free Cooling).....	48
4.3.10 Συνδυασμένο σύστημα ψύξης και θέρμανσης με PCM.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης .....	52
5.1 Μέθοδοι Μέτρησης των ιδιοτήτων των PCM.....	52
5.1.1 Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC).....	52
5.1.2 Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA).....	55
5.1.3 Μέθοδος T-History .....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης.....	59
6.1 Μέθοδος Ενθαλπίας.....	60
6.2 Μέθοδος Ενεργού Θερμοχωρητικότητας.....	61
ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ .....	63
Εισαγωγή .....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Μοντέλο προσομοίωσης.....	65

7.1 Υπολογισμός άμεσης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας $G_b$ , διάχυτης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας $G_d$ και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου $G_T$ .....	65
7.2 Ηλιακή φόρτιση του τοίχου που φέρει στρώμα PCM.....	83
7.2.1 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM.....	83
7.2.2 Υπολογισμός της ενεργού θερμοχωρητικότητας $C_{p,eff}$ του PCM .....	85
7.2.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας PCM συναρτήσει των ωρών του 24ώρου ..... <b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>	
7.2.3.1 Υπολογισμός θερμοκρασίας του RT20 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου .....	91
7.2.3.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας του PCM RT27 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου....	105
7.2.3.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας του μείγματος οργανικού-ανόργανου SP25A8 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου .....	118
7.2.4 Βαθμός Αξιοποίησης των PCM .....	131
7.2.5 Σύγκριση μεταξύ του υλικού αλλαγής φάσης RT20 και του μπετόν ως προς τη θερμοκρασία που συναλλάσσουν κατά τη διάρκεια ενός 48ώρου τον μήνα Ιανουάριο .....	157
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Παραμετρική μελέτη ως προς τη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου .....	159
Βιβλιογραφία .....	171

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ενέργεια**

## **1.1 Γενικά**

Η ενέργεια θεωρείται ζωογόνος πηγή των σύγχρονων κοινωνιών, καθώς με κάθε μορφή της υπήρξε κρίσιμη για κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα, κατά τη διάρκεια των αιώνων. Επίσης, η ενέργεια είναι σημαντική δεδομένου ότι μας επιτρέπει να απολαμβάνουμε υπηρεσίες που συμβάλλουν στην ανθρώπινη ευημερία, όπως είναι ο φωτισμός, η θέρμανση και η ψύξη, οι επικοινωνίες, οι μεταφορές, οι κατασκευαστικές και άλλες βιομηχανικές και εμπορικές διαδικασίες.

Η αύξηση του πληθυσμού, οι αυξανόμενες προσδοκίες και οι επιστημονικές και τεχνολογικές εξελίξεις, έχουν αυξήσει εντυπωσιακά τη παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση, γεγονός που αποτελεί χαρακτηριστικό του 21ου αιώνα. Ωστόσο, η εντεινόμενη ανάγκη πρόσβασης στην ενέργεια λόγω των απαιτήσεων του σύγχρονου τρόπου ζωής έχει το ανάλογο τίμημα. Είναι σαφές ότι η ενεργειακή παραγωγή και χρήση, βασισμένες στην κατανάλωση συμβατικών καυσίμων, μπορούν να ασκήσουν επιβλαβείς επιδράσεις στο περιβάλλον και στη ανθρώπινη υγεία. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο είναι υπεύθυνο για την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Επιπλέον, η εξάρτηση από τα συμβατικά καύσιμα, έναν ενεργειακό πόρο που είναι εν γένει μη ανανεώσιμος και συγκεντρώνεται σε περιορισμένα σημεία του πλανήτη, έχει σοβαρές επιπτώσεις στην παγκόσμια οικονομική ασφάλεια και την πολιτική σταθερότητα. Αυτό που εξάγεται ως συμπέρασμα είναι ότι βρισκόμαστε παγκοσμίως στα αρχικά στάδια μιας αναπόφευκτης μετάβασης σε ένα νέο ενεργειακό σύστημα που, με το πέρασμα του χρόνου, θα είναι λιγότερο εξαρτώμενο από τις παραδοσιακές χρήσεις των συμβατικών καυσίμων και όλο και περισσότερο εξαρτώμενο από τους ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους.

## **1.2 Κατανάλωση Ενέργειας σε Κτήρια - Ελληνική Πραγματικότητα**

Ο κτηριακός τομέας συμμετέχει με υψηλό ποσοστό στην συνολική κατανάλωση ενέργειας, κυρίως στην Ευρωπαϊκή Ένωση, όπου το ποσοστό συμμετοχής του ανέρχεται στο 40%(EuroACE: Investing in Building Energy Efficiency in the Enlarged EU) [1]. Πρωταρχικός ρόλος των κτηρίων, είτε πρόκειται για χώρους κατοικίας, είτε για χώρους εργασίας, είναι η προστασία των ανθρώπων από τις ακραίες καιρικές συνθήκες και η εξασφάλιση ενός άνετου εσωτερικού θερμοκρασιακού περιβάλλοντος. Με βάση αυτή την ανάγκη αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι και συστήματα που επιτυγχάνουν την

απαραίτητη για τον άνθρωπο «θερμική άνεση», εξασφαλίζοντας δροσερές συνθήκες κατά τη θερινή περίοδο, και την απαραίτητη θέρμανση κατά την χειμερινή.

Στην Ελλάδα, χώρα μεσογειακή με μικρές σχετικά απαιτήσεις σε θέρμανση, οι ανάγκες για θέρμανση των κατοικιών ανέρχονται περίπου στο 70% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης του κτηρίου. Η κατανάλωση ενέργειας για τις οικιακές συσκευές, το φωτισμό και τον κλιματισμό ανέρχεται στο 18% του συνολικού ενεργειακού ισοζυγίου. Οι κατοικίες με κεντρικό σύστημα θέρμανσης, το οποίο χρησιμοποιεί ως καύσιμο αποκλειστικά το πετρέλαιο, αντιστοιχούν στο 35,5% του συνόλου. Το υπόλοιπο 64% είναι αυτόνομα θερμαινόμενες κατοικίες που χρησιμοποιούν σε ποσοστό 25% πετρέλαιο, 12% ηλεκτρισμό και 18% καυσόξυλα [2]. Σύμφωνα με μελέτη της Eurostat, συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά νοικοκυριό στην Ελλάδα είναι περίπου 61GJ. Η σύγκριση ανάμεσα στις μεσογειακές χώρες καταδεικνύει ότι τα ελληνικά νοικοκυριά παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη σχετική κατανάλωση, σχεδόν 30% μεγαλύτερη της Ισπανίας και περίπου διπλάσια της Πορτογαλίας. Ταυτόχρονα, είναι σχεδόν ίση με αυτή της Ολλανδίας και σημαντικά μεγαλύτερη από χώρες με ψυχρότερο κλίμα όπως το Βέλγιο και η Τσεχία. Επιπλέον, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος, οι κατοικίες στην Ελλάδα παράγουν περίπου 12-13 τόνους CO<sub>2</sub>/κάτοικο/έτος. Η τιμή αυτή είναι συγκριτικά μεγαλύτερη από όλες τις άλλες μεσογειακές χώρες και μεγαλύτερη ακόμα και από πολύ βορειότερες χώρες όπως η Νορβηγία, η Γερμανία, η Αυστρία και η Βρετανία [3].

Όλα τα παραπάνω καταδεικνύουν την ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας, ορθολογικότερη χρήση των ενεργειακών αποθεμάτων, αξιοποίηση των διαφόρων ανανεώσιμων πηγών και βιοκλιματικό σχεδιασμό των κτηρίων, τόσο σε εθνικό, όσο και σε διεθνές επίπεδο. Μάλιστα, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας ειδικότερα, προσελκύει ολοένα και πιο πολύ το ενδιαφέρον, καθώς είναι μια τεχνολογία που μπορεί να συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας, μειώνοντας σημαντικά τις απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας για θερμικές εφαρμογές σε κτίρια, όπως θέρμανση χώρων και νερού, ψύξη και κλιματισμό.

Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει μια νέα τάση στη δόμηση που αναζητεί την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης με τη χρήση ηλιακής ενέργειας και την ελαχιστοποίηση της συμβατικής. Η Ελλάδα, ως μια χώρα διεθνώς φημισμένη για τον ήλιο της τις περισσότερες μέρες του χρόνου, παρέχει πρόσφορο έδαφος για την εφαρμογή μιας τέτοιας πρακτικής.

Ένα τρόπος υλοποίησης της παραπάνω ιδέας, είναι με τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Materials - PCM). Πρόκειται για μία τεχνική αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, την οποία θα εξετάσουμε αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θερμική ενέργεια**

### **2.1 Γενικά**

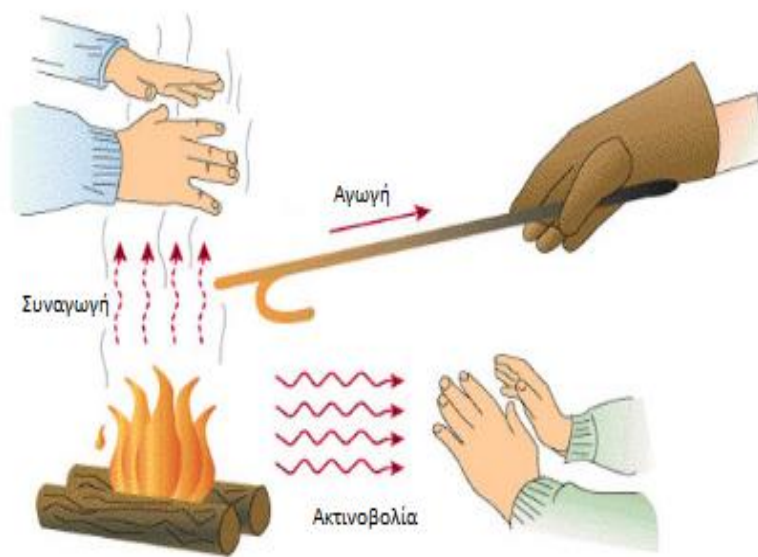
Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός ενός κτιρίου, όπως προαναφέραμε, θα πρέπει να έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση των περιβαλλοντολογικών συνθηκών στο εσωτερικό του. Οι συνθήκες αυτές οριοθετούν τη θερμική άνεση στο εσωτερικό του κτιρίου. Σύμφωνα με την Αμερικανική Επιστημονική Εταιρία Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning), ως θερμική άνεση ορίζεται η κατάσταση του μυαλού κατά την οποία ένα άτομο δεν επιθυμεί καμία θερμική αλλαγή του εσωτερικού περιβάλλοντος και εκφράζει ικανοποίηση με τις επικρατούσες θερμικές συνθήκες. Για την επίτευξη θερμικής άνεσης, απαραίτητη είναι η σωστή διαχείριση της μεταφοράς θερμότητας που συντελείται ανάμεσα στο εσωτερικό του χώρου και το εξωτερικό περιβάλλον [4]. Όλα τα δομικά υλικά όπως το ξύλο, το γυαλί, ο γύψος και γενικότερα όλες οι ουσίες, συμπεριλαμβανομένου του αέρα, υπακούουν προφανώς στους ίδιους φυσικούς νόμους μεταξύ των οποίων είναι και η μεταφορά θερμότητας.

### **2.2 Μεταφορά Θερμότητας [5]**

Η μεταφορά θερμότητας, σύμφωνα με την επιστήμη της Θερμοδυναμικής, είναι ένα φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο πραγματοποιείται μεταφορά ενέργειας όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δυο εργαζόμενων μέσων ή δυο συστημάτων. Σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα, η θερμότητα μεταφέρεται μόνη της από ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας σ' ένα χαμηλότερης και ποτέ προς την αντίθετη κατεύθυνση. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί με τους οποίους πραγματοποιείται αυτή η μεταφορά ενέργειας:

- αγωγή
- συναγωγή
- ακτινοβολία





**Εικόνα 2.2.1:** Τρόποι μεταφοράς θερμότητας στο χώρο

### **2.2.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή**

Η μεταφορά θερμότητας με θερμική αγωγή ορίζεται, ως ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας από μία περιοχή ή σύστημα υψηλής θερμοκρασίας σε μια άλλη ή άλλο χαμηλότερης θερμοκρασίας, μέσω ενός μέσου (στερεού, υγρού ή αέριου σε ηρεμία), υπό την προϋπόθεση της φυσικής επαφής [6].

Η μεταφορά αυτή επιτυγχάνεται είτε με μοριακή αλληλεπίδραση, δηλαδή μεταφορά ενέργειας από τα περισσότερο ενεργητικά μόρια στα γειτονικά τους, με χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας, είτε μέσω της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων στα, καθαρώς, μεταλλικά στερεά. Ειδικότερα, όταν τα μόρια μιας περιοχής της ύλης αποκτούν μία μέση κινητική ενέργεια, μεγαλύτερη αυτής των μορίων της γειτονικής περιοχής, αυτό εκδηλώνεται υπό τη μορφή μιας θερμοκρασιακής διαφοράς. Οπότε, η ενέργεια, ή μέρος της, μεταφέρεται στα μόρια της περιοχής της μικρότερης θερμοκρασίας, γεγονός το οποίο επαληθεύει τον ορισμό της θερμικής αγωγιμότητας [5]. Σύμφωνα με το Νόμο του Fourier, η μεταφορά θερμότητας με αγωγή εκφράζει τη ροή θερμότητας  $Q$  από ένα σώμα σε ένα άλλο μέσω επαφής και είναι ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας τους. Η σχέση Fourier δίνει την πυκνότητα παροχής θερμότητας  $q_x$  [ $W/m^2$  ]:

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

όπου ο συντελεστής  $k[\text{W/Mk}]$  είναι η ειδική θερμική αγωγιμότητα και εξαρτάται από τις ιδιότητες του σώματος. [6]

### 2.2.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή [7]

Στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, εκτός από τυχαίες κινήσεις των μορίων, τη διάχυση, μεταφέρεται θερμική ενέργεια και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία μετακινείται συλλογικά μεγάλος αριθμός μορίων. Η συναγωγή θερμότητας εμφανίζεται μεταξύ της επιφάνειας ενός σώματος και του ρευστού, όταν οι θερμοκρασίες τους διαφέρουν. Δεν μπορεί να συμβεί μεταξύ δύο στερεών, διότι εκεί η θερμότητα μεταδίδεται μέσω αγωγής. Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή διακρίνεται στην εξαναγκασμένη και στην ελεύθερη ή φυσική συναγωγή. Η εξαναγκασμένη συναγωγή εμφανίζεται, όταν η κίνηση του ρευστού επιβάλλεται από εξωτερικά αίτια, δηλαδή από έναν ανεμιστήρα, έναν στοβίλοσυμπιεστή ή μια αντλία, ενώ την ελεύθερη συναγωγή προκαλούν δυνάμεις οι οποίες δημιουργούνται από τη μεταβολή της πυκνότητας, όταν στο ρευστό υπάρχουν και θερμοκρασιακές διαφορές. Ένα παράδειγμα ελεύθερης συναγωγής είναι ένα θερμαντικό σώμα (καλοριφέρ) όταν λειτουργεί. Ο θερμαινόμενος αέρας είναι ελαφρύτερος και καταλαμβάνει τα ανώτερα στρώματα, ενώ ο ψυχρότερος αέρας παρασύρεται προς το θερμαντικό σώμα για να ακολουθήσει και αυτός στη συνέχεια την πορεία του θερμού. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας παροχής θερμότητας  $q[\text{W/m}^2]$  που είναι ανάλογη της υπάρχουσας θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ επιφάνειας  $T_s$  και ρευστού  $T_\infty$ , χρησιμοποιείται η σχέση Newton:

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

όπου ο συντελεστής  $h[\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$  είναι η ειδική συναγωγιμότητα και εξαρτάται από τη ταχύτητα του ρευστού  $u$ , το δυναμικό ιξώδες  $\eta$ , την πυκνότητα του ρευστού  $\rho$  και την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση  $C_p$ .

Με συναγωγή θερμότητας μεταφέρεται η αισθητή θερμότητα. Υπάρχουν, όμως, και περιπτώσεις συναγωγής με μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας, όταν εμφανίζεται αλλαγή της φάσης του υγρού σε ατμό κατά την ατμοποίηση, ή του ατμού σε υγρό κατά τη συμπύκνωση.

### 2.2.3 Μεταφορά θερμότητας με Ακτινοβολία

Στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, η θερμότητα μεταφέρεται μεταξύ των σωμάτων με την βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα στερεά σώματα, τα περισσότερα υγρά και αρκετά αέρια ακτινοβολούν θερμότητα, συγχρόνως όμως, απορροφούν και μέρος της ακτινοβολίας την οποία εκπέμπουν άλλα σώματα. Ενώ στην αγωγή και τη συναγωγή απαιτείται η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου για τη μεταφορά θερμότητας, στην ακτινοβολία δεν συμβαίνει αυτό. Η ακτινοβολία εμφανίζεται στο κενό και, μάλιστα, με εντονότερο ρυθμό [7]. Γνωστό παράδειγμα στη φύση είναι η θέρμανση της Γης από τον Ήλιο, όπου δεν υπάρχει μέσο διάδοσης. Η ποσότητα της ενέργειας που διαφεύγει από μία επιφάνεια, ως ακτινοβολία, εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία και τη φύση της επιφάνειας. Σε χαμηλές θερμοκρασίες η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία θεωρείται, συνήθως, αμελητέα και δε λαμβάνεται υπόψη [8].

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

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

όπου  $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ , η σταθερά ακτινοβολίας Stefan- Boltzmann του μέλανος σώματος και  $\varepsilon$  ο συντελεστής εκπομπής του πραγματικού σώματος με τιμές από 0 έως και 1 για το μέλαν σώμα [7].

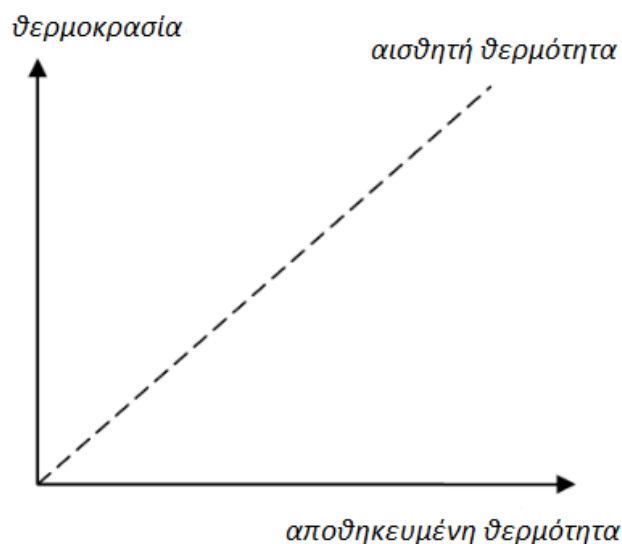
### 2.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας

Η ανάπτυξη τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας είναι υψίστης σημασίας, τόσο για την εξοικονόμηση της διαθέσιμης ενέργειας, όσο και για την βελτιστοποίηση της χρήσης της. Πιο συγκεκριμένα, η ηλιακή ενέργεια, όπως και οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές που υπάρχουν στη φύση, παρουσιάζει εποχιακές διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά της και εξαρτάται τόσο από τις μετεωρολογικές συνθήκες, όσο και από τη διάρκεια της ημέρας έναντι της νύχτας, κάθε περιοχής. Συνεπώς, παρουσιάζεται αναντιστοιχία προσφοράς και ζήτησης. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα έρχεται να δώσει η τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης, η οποία επιτρέπει την εξοικονόμηση της περισσευούμενης ενέργειας, όταν αυτή βρίσκεται σε αφθονία, με σκοπό την αξιοποίησή της, σε περιόδους που δεν είναι διαθέσιμη [9].

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι η αποθήκευση αισθητής θερμότητας και η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, με την πρώτη να βρίσκει μεγαλύτερη εφαρμογή.

### **2.3.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας**

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας είναι ο πιο κοινός τρόπος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3.1.1, η θερμότητα που μεταφέρεται στο μέσο αποθήκευσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του, η οποία μπορεί να ανιχνευθεί από έναν αισθητήρα (θερμόμετρο). Δικαιολογημένα λοιπόν, η αποθηκευμένη στο μέσο θερμότητα καλείται «αισθητή».



**Εικόνα 2.3.1.1: Αποθήκευση αισθητής θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας**

Το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται, εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση  $C_p$  [J/Kg·K] του μέσου, τη θερμοκρασιακή αλλαγή  $\Delta T$  [K] και την ποσότητα της μάζας  $m$ [Kg] του υλικού και δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.3.1.1)$$

Η ειδική θερμοχωρητικότητα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας υπό μορφή αισθητής θερμότητας. Εκφράζει το ποσό ενέργειας που απορροφάται ή αποδίδεται σε θερμοκρασιακή μεταβολή του υλικού κατά  $1^{\circ}$  Kelvin υπό σταθερή πίεση. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις, για τη μεταξύ των υλικών σύγκριση, προτιμάται το μέγεθος της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερό όγκο  $C_V$  [ $J/m^3 \cdot K$ ], που εκφράζει το ποσό ενέργειας που απορροφάται ή αποδίδεται σε θερμοκρασιακή μεταβολή του υλικού κατά  $1^{\circ}$  Kelvin υπό σταθερό όγκο.

Η ειδική θερμοχωρητικότητα αποτελεί βασικό κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου θερμοαποθηκευτικού υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσό που μπορεί να αποθηκεύσει το υλικό. Εκτός όμως, από την υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα, υπάρχει και ένα πλήθος άλλων προϋποθέσεων που πρέπει να πληρούν τα δομικά υλικά προκειμένου να επιλέγονται για την αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Αυτά είναι:

- Να έχουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα (δηλαδή μεγάλη πυκνότητα και μεγάλη ειδική θερμότητα)
- Να χαρακτηρίζονται από καλή θερμική αγωγιμότητα ( $>0.3$  W/m·K)
- Να είναι εύκολα κατασκευάσιμα και να έχουν χαμηλό κόστος
- Να διαθέτουν σταθερές χημικές ιδιότητες, να μην είναι εύφλεκτα, διαβρωτικά και τοξικά, να είναι φιλικά προς το περιβάλλον

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αισθητής θερμότητας είναι υγρά, μεταξύ των οποίων είναι το νερό, έλαια, τηγμένα άλατα και υγρά μέταλλα και στερεά, όπως η πέτρα, το τούβλο, το σκυρόδεμα, το σίδηρο, το στεγνό και το βρεγμένο χώμα κλπ [10].

### **2.3.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας**

Ένας άλλος τρόπος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι η αποθήκευση της σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Λανθάνουσα ονομάζεται η θερμότητα, η οποία επιφέρει αλλαγή φάσης στην ύλη, χωρίς τη μεταβολή της θερμοκρασίας της, δηλαδή χωρίς να γίνεται αντιληπτή από τις αισθήσεις [9].

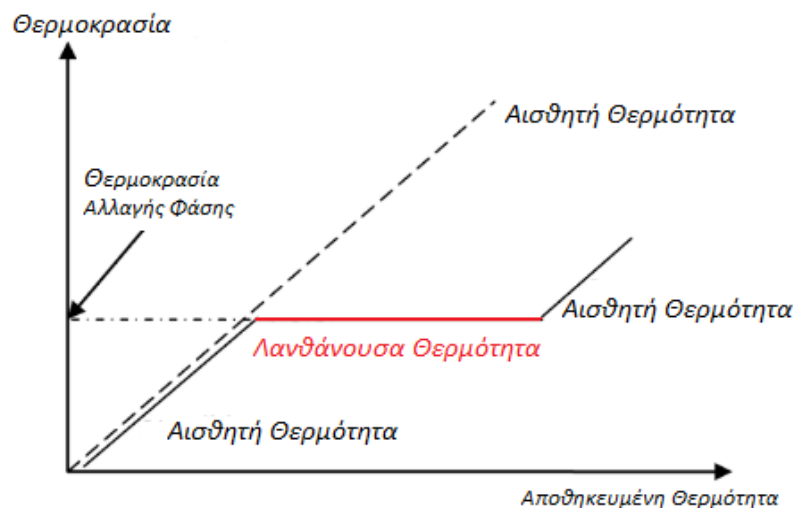
Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης παρέχει 5-14 φορές μεγαλύτερη πυκνότητα ενεργειακής αποθήκευσης από αυτή που παρέχει η μέθοδος αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, μεταβάλλοντας ελάχιστα την θερμοκρασία του αποθηκευτικού μέσου [11].

Πιο συγκεκριμένα, όταν ένα υλικό υφίσταται αλλαγή φάσης, μπορεί να αποθηκεύει ή να απελευθερώνει τεράστιες ποσότητες ενέργειας σε λανθάνουσα μορφή, χωρίς όμως να μεταβάλλεται η

θερμοκρασία του. Αυτή η μεταβολή θερμότητας προκύπτει εξαιτίας της διαφοράς των ενδομοριακών ενεργειών της κάθε φάσης.

Η μετατροπή από στερεό σε στερεό, λόγω της μικρής ποσότητας λανθάνουσας θερμότητας που εμφανίζει, δεν είναι σύνηθες να εφαρμόζεται στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας [10]. Από την άλλη μεριά, οι μετατροπές από στερεό σε αέριο, καθώς και από υγρό σε αέριο, αν και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερα ποσά λανθάνουσας θερμότητας, δεν είναι κατάλληλες για κτιριακές εφαρμογές, αφού συνδέονται με μεγάλες μεταβολές όγκου (λόγω σχηματισμού αερίου), γεγονός που καθιστά το σύστημα σύνθετο και μη πρακτικό (δοχεία υπό πίεση κλπ.). Έτσι, η πιο συνηθισμένη διεργασία σε θερμοαποθηκευτικά συστήματα κτηριακών εφαρμογών είναι η τήξη, καθώς με αυτήν μπορούν να αποθηκευτούν σχετικά μεγάλα ποσά λανθάνουσας θερμότητας μέσα σε μικρό θερμοκρασιακό εύρος και με μικρές μεταβολές όγκου(10%) [12].

Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3.2.1, κατά τη διάρκεια της τήξης, όπου το υλικό αποθήκευσης μεταβαίνει από τη στερεή κρυσταλλική του δομή στην υγρή φάση, απορροφάται θερμότητα για τη διάσπαση των διαμοριακών δεσμών του, ενώ η θερμοκρασία του διατηρείται περίπου σταθερή. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται θερμοκρασία τήξης και η θερμότητα που παρέχεται λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Κατά την αντίστροφη διαδικασία (πήξη), απελευθερώνεται θερμότητα, προκειμένου τα μόρια του υλικού να αποκτήσουν αυστηρή διάταξη [13].



**Εικόνα 2.3.2.1:** Αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους εφαρμογές ονομάζονται υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change materials-PCM) και έχουν θερμοκρασίες τήξης από 20-32°C. Η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας σε λανθάνουσα μορφή ενός PCM, το οποίο μεταβαίνει από μια θερμοκρασία  $T_1$  σε μια άλλη  $T_2$  και αλλάζει φάση, έστω από στερεό σε υγρό, σε μια ενδιάμεση θερμοκρασία  $T$ , δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Q_s = m \cdot [C_s(T-T_1) + \lambda + C_l(T_2-T)] \quad (2.3.2.1)$$

όπου  $m$ : η μάζα του υλικού,  $C_s$ ,  $C_l$ : οι ειδικές θερμοχωρητικότητες της στερεής και υγρής φάσης του υλικού αντίστοιχα και  $\lambda$ : η λανθάνουσα θερμότητα τήξης [14].

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Υλικά Αλλαγής Φάσης (Phase Change Materials-PCM)**

### **3.1 Γενικά**

Τα υλικά PCM (Phase Change Materials- Υλικά Αλλαγής Φάσης) είναι ουσίες ή μείγματα ιδιαίτερης φυσικής και χημικής σύστασης, που καθώς υφίστανται αλλαγή φάσης, έχουν την ικανότητα να απορροφούν, να αποθηκεύουν και να αποδεσμεύουν σημαντικά ποσά θερμικής ενέργειας σε λανθάνουσα μορφή. Η αλλαγή φάσης αυτών των υλικών πραγματοποιείται σε σταθερή θερμοκρασία (σημείο αλλαγής φάσης) ή σχεδόν σταθερή θερμοκρασία (ονομαστική θερμοκρασία αλλαγής φάσης), όταν πρόκειται για μείγματα πολλών συστατικών. Τα υλικά αυτά, ως εκ τούτου, χαρακτηρίζονται και ως υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Σε θερμοκρασίες ωστόσο, διαφορετικές της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης τους, συμπεριφέρονται όπως τα συμβατικά υλικά(υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας), δηλαδή αποθηκεύουν θερμότητα και ταυτόχρονα αυξάνουν τη θερμοκρασία τους [15].

Οι αλλαγές φάσης που υφίστανται, είναι στερεού-στερεού, υγρού-αερίου και στερεού-υγρού. Από αυτές, μόνο η αλλαγή από στερεό σε υγρό, και αντίστροφα, έχει πρακτική σημασία για τα υλικά αυτά. Η αλλαγή φάσης υγρού-αερίου απαιτεί μεγάλους όγκους και υψηλές πιέσεις για την αποθήκευση των υλικών στην αέρια μορφή τους, ενώ η μετατροπή στερεού-στερεού εμφανίζει μικρές τιμές λανθάνουσας θερμότητας, γεγονός που την καθιστά λιγότερο εφαρμόσιμη στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας [16].

Η αρχή λειτουργίας των PCM στερεού-υγρού είναι απλή: Όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξηθεί, οι χημικοί δεσμοί του υλικού διασπώνται και το υλικό μεταπίπτει από τη στερεή στην υγρή φάση του [12]. Αυτή η αλλαγή φάση είναι μια ενδόθερμη διαδικασία και επομένως, κατά τη διάρκεια αυτής, το PCM μπορεί να απορροφά υπέρογκα ποσά λανθάνουσας θερμότητας [17]. Επιπλέον, το PCM είναι ικανό να εξομαλύνει θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του περιβάλλοντος χώρου, αφού η αλλαγή φάσης του, που συντελείται σε σταθερή θερμοκρασία, απαιτεί κάποιο χρόνο [12]. Κατά την ανάστροφη διαδικασία, αυτή της ψύξης του PCM, η αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα απελευθερώνεται στο περιβάλλον μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας. Αυτή η εναλλαγή φάσης του υλικού από στερεό σε υγρό και από υγρό σε στερεό, μπορεί να γίνεται επαναλαμβανόμενα. Τέλος, σε θερμοκρασίες μακριά από το σημείο τήξης, το PCM λειτουργεί ακριβώς όπως και τα συμβατικά υλικά, συναλλάσσοντας αισθητή θερμότητα με το περιβάλλον [11, 16]. Στα όρια θερμικής άνεσης, μεταξύ των θερμοκρασιών 20-30°C, τα υλικά αλλαγής φάσης είναι πολύ αποτελεσματικά,

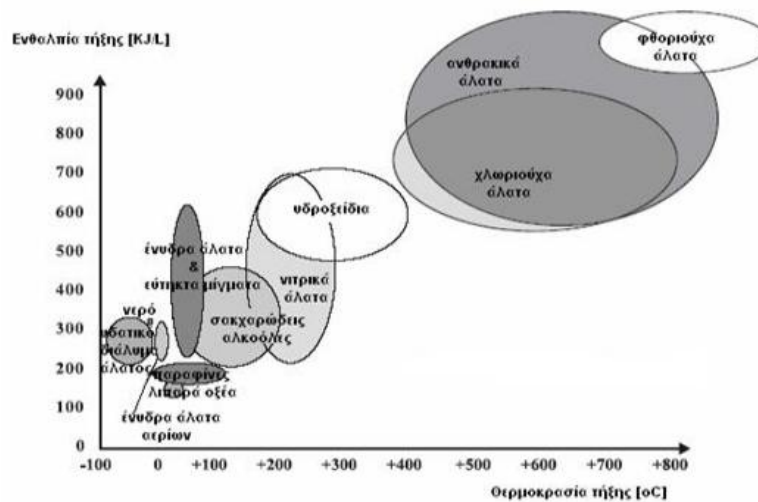


καθώς είναι ικανά να αποθηκεύουν 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου, σε σχέση με τα γνωστά δομικά υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας (τσιμέντο, τούβλα, πέτρες κλπ.) [18].



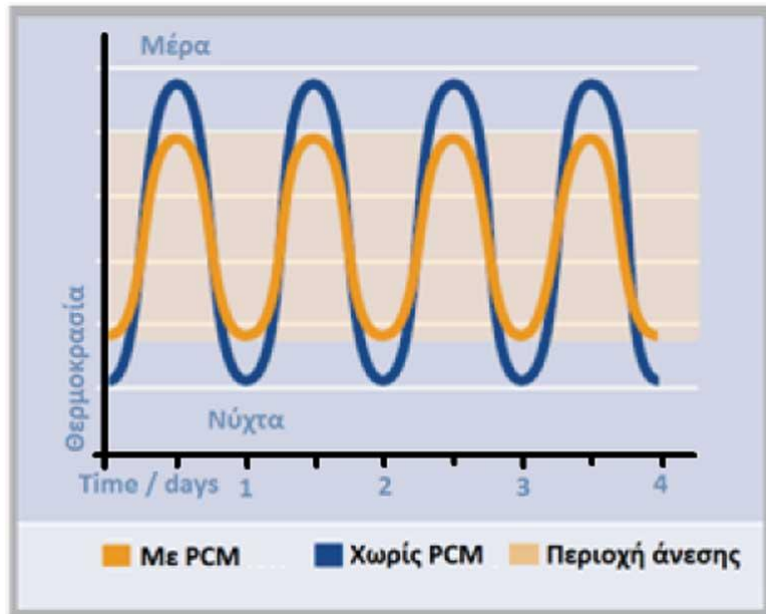
**Εικόνα 3.1.1: Αρχή λειτουργίας ενός PCM [19]**

Τα τελευταία 40 χρόνια, η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης παρουσιάζει διεθνώς έντονο ενδιαφέρον, ειδικά στον κτιριακό τομέα. Το μεγάλο εύρος των θερμοκρασιών μετάβασης φάσης που αυτά διαθέτουν, τα καθιστά κατάλληλα για ποικίλες εφαρμογές. Παραδείγματος χάρη, τα PCM, με θερμοκρασία τήξης κάτω από τους 15 °C, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές κλιματισμού, ενώ αυτά που τήκονται στους 90°C και άνω, για εφαρμογές ψύξης [20]. Στην εικόνα 3.1.3 σημειώνονται το σημείο τήξης και η ενθαλπία αλλαγής φάσης των υφιστάμενων PCM. Από το σημείο τήξης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι για την αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας στις οικοδομικές εφαρμογές, τα υποψήφια PCM είναι η παραφίνη, τα λιπαρά οξέα, τα ένυδρα άλατα, και τα εύτηκτα μείγματα [21].



**Εικόνα 3.1.3:** Τύποι υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν PCM, ανάλογα με την ενθαλπία και τη θερμοκρασία τήξης τους [21]

Η τεχνολογία αξιοποίησης των PCM σε πρακτικές εφαρμογές ακολουθεί δυο βασικές κατευθύνσεις. Η πρώτη στοχεύει στον έλεγχο της θερμοκρασίας και η δεύτερη στην αποθήκευση θερμότητας. Στις κτηριακές εγκαταστάσεις, η ρύθμιση της θερμοκρασίας ενός εσωτερικού χώρου, μέσω PCM, γίνεται κατανοητή με το ακόλουθο παράδειγμα. Θεωρούμε ένα κτίριο, στο κέλυφος του οποίου είναι ενσωματωμένες ποσότητες PCM με θερμοκρασία αλλαγής φάσης, έστω τους 25°C. Αν (και όταν) η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου υπερβεί τους 25°C, τα PCM θα αρχίσουν να τήκονται απορροφώντας παράλληλα θερμική ενέργεια από το περιβάλλον. Η απορροφούμενη, στο στάδιο αυτό, θερμότητα είναι λανθάνουσα, δηλαδή, δε συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Όμως, αφαιρούμενη από το περιβάλλον, εμποδίζει την αύξηση της θερμοκρασίας άλλων υλικών και του αέρα. Έχουμε, με άλλα λόγια, συγκράτηση της ανόδου της θερμοκρασίας περιβάλλοντος χώρου. Αν (και όταν) ολοκληρωθεί η διαδικασία αλλαγής φάσης (τήξη) του υλικού και η θερμοκρασία περιβάλλοντος εξακολουθεί να παραμένει μεγαλύτερη των 25°C, τότε το (τηγμένο πλέον) υλικό θα συνεχίσει να συμπεριφέρεται συμβατικά, δηλαδή, να απορροφά θερμότητα και να αυξάνει η θερμοκρασία του. Κατά την αντίστροφη διαδικασία, της ψύξης, όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 25°C, τα PCM αρχίζουν να στερεοποιούνται και παράλληλα να αποδίδουν την αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα στο περιβάλλον. Η αποδεσμευόμενη ποσότητα θερμικής ενέργειας συγκρατεί την πτώση της θερμοκρασίας του χώρου. Στην εικόνα 3.1.2 φαίνεται η επίδραση των PCM στην εσωτερική θερμοκρασία [18].



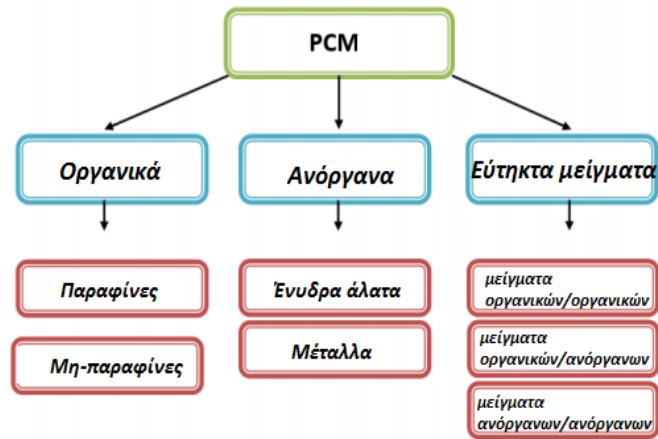
*Εικόνα 3.1.2: Η επίδραση των PCM στην εσωτερική θερμοκρασία στα κτήρια [18]*

### **3.2 Κατηγοριοποίηση των PCM**

Το πλέον γνωστό, φθινό και αποτελεσματικό PCM είναι το νερό, που κατά την αλλαγή φάσης του σε πάγο αποθηκεύει σημαντικές ποσότητες θερμότητας. Όμως, η χρήση του πάγου, ως PCM, εμφανίζει ορισμένα προβλήματα λόγω των ιδιοτήτων του νερού (θερμοκρασία πήξης  $0^{\circ}\text{C}$ , μεγάλη μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία, χαμηλή θερμοκρασία προσαγωγής στο σύστημα αποθήκευσης κλπ.) [22]. Έτσι, η αρχική ιδέα ήταν να αναπτυχθούν υλικά με βάση το νερό, ώστε να παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματά του (μεγάλη αγωγιμότητα, μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας), αλλά όχι τα υπόλοιπα προβλήματα της χρήσης του, και ιδιαίτερα αυτό της χαμηλής θερμοκρασίας τήξης του. Με βάση αυτή τη σκέψη, δημιουργήθηκαν τα πρώτα PCM, που είναι τα ένυδρα άλατα, μια κατηγορία υλικών που αναπτύσσεται και τελειοποιείται ακόμη και σήμερα [23].

Η ομαδοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης μπορεί να γίνει με γνώμονα ποικίλους παράγοντες. Ο σημαντικότερος είναι η σύστασή τους, σύμφωνα με την οποία τα υλικά χωρίζονται σε οργανικά, ανόργανα ή εύτηκτα μείγματα [17]. Κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες αποτελούνται από λεπτομερέστερες υποκατηγορίες. Για παράδειγμα, τα οργανικά PCM αποτελούνται από τις παραφίνες και από τις μη-παραφίνες, ενώ τα ανόργανα χωρίζονται σε ένυδρα άλατα και μέταλλα. Τα εύτηκτα PCM είναι μείγματα οργανικών-οργανικών, οργανικών-ανόργανων, ή ανόργανων-ανόργανων συστατικών. Κάθε κατηγορία έχει συγκεκριμένα εύρη θερμοκρασίας τήξης και ενθαλπίας τήξης, βάση

των οποίων γίνεται η τυποποίηση των διαφόρων υλικών. Αυτή η κατηγοριοποίηση τους παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2.1 [10].



***Εικόνα 3.2.1: Κατηγοριοποίηση των PCM***

Στη συνέχεια, αναφέρονται λεπτομερώς οι διάφορες κατηγορίες, μαζί με τις χημικές, κινητικές και θερμοφυσικές τους ιδιότητες.

### **3.2.1 Οργανικά υλικά**

Τα οργανικά PCM εκπροσωπούνται από δύο βασικές κατηγορίες, τις παραφίνες, οι οποίες είναι μείγματα αλκανίων, και τις μη-παραφίνες, στις οποίες ανήκουν τα λιπαρά οξέα, μερικές αλκοόλες και οι εστέρες. Αυτά τα υλικά καλύπτουν ένα θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 0°C και περίπου 200°C. Από τις παραπάνω οργανικές ενώσεις, την πρώτη θέση στις κτιριακές εφαρμογές έχουν οι παραφίνες. Έπονται τα λιπαρά οξέα και σε μικρότερο βαθμό εξετάζεται η χρήση των υπόλοιπων ενώσεων. Τα οργανικά υλικά αλλαγής φάσης είναι, σε γενικές γραμμές, χημικά αδρανή και σταθερά, και έχουν τη δυνατότητα να τήκονται και να στερεοποιούνται επανειλημμένα χωρίς να υπάρξει διαχωρισμός φάσης και συνακόλουθη υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Μπορούν, επίσης, να κρυσταλλωθούν με μικρή ή σχεδόν μηδενική εμφάνιση του φαινομένου της υπέρψυξης (supercooling- περιγράφεται αναλυτικά στην υποενότητα 3.4.1 ) και συνήθως δεν είναι καθόλου διαβρωτικά. Δυστυχώς, όμως, εμφανίζουν χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας (περίπου 0,2 W/m·°C), γεγονός που περιορίζει τις εφαρμογές τους [10, 11, 17, 24].

### **3.2.1.1 Παραφίνες**

Οι κανονικές παραφίνες τύπου  $C_nH_{2n+2}$  είναι μια οικογένεια κορεσμένων υδρογονανθράκων με παρόμοιες ιδιότητες. Οι παραφίνες μεταξύ των C5 και C15 είναι υγρής μορφής, ενώ οι υπόλοιπες είναι κηρώδη στερεά. Οι κηρώδεις παραφίνες είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα εμπορικά, οργανικά υλικά PCM για αποθήκευση θερμότητας. Συνιστανται, κυρίως, από υδρογονάνθρακες ευθείας αλυσίδας, που έχουν θερμοκρασίες τήξης μεταξύ 23 °C και 67°C. Η εμπορικής ποιότητας κηρώδης παραφίνη λαμβάνεται από απόσταξη πετρελαίου και δεν είναι καθαρή ουσία, αλλά συνδυασμός διαφορετικών υδρογονανθράκων. Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερο είναι το μέσο μήκος της υδρογονανθρακικής αλυσίδας, τόσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία τήξεως και η θερμότητα σύντηξης [12].

Οι παραφίνες θεωρούνται κατάλληλα υλικά αποθήκευσης θερμότητας λόγω της δυνατότητας αξιοποίησης τους σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, καθώς και της διαθεσιμότητάς τους στη βιομηχανία [25]. Οι παραφίνες είναι ασφαλείς, αξιόπιστες, προβλέψιμες, σχετικά φθηνές και μη διαβρωτικές. Είναι χημικά αδρανείς, σταθερές κάτω από τους 500°C και εμφανίζουν μικρές μεταβολές όγκου κατά την τήξη τους. Χάρη σε αυτές τις ιδιότητές τους, τα συστήματα που χρησιμοποιούν παραφίνες έχουν, συνήθως, πολύ μεγάλο κύκλο ψύξης-τήξης. Παρά τα πλεονεκτήματα που διαθέτουν, οι παραφίνες παρουσιάζουν κάποιες ανεπιθύμητες ιδιότητες, όπως η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η μη-συμβατότητα με πλαστικά δοχεία και η μέτρια αναφλεξιμότητα [11].

### **3.2.1.2 Μη-παραφίνες**

Οι οργανικές μη-παραφίνες αποτελούν την μεγαλύτερη ομάδα των υποψήφιων υλικών αλλαγής φάσης για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Σε αντίθεση με την ομοιομορφία που εμφανίζουν οι παραφίνες μεταξύ τους, καθένα από τα υλικά αυτά παρουσιάζει ξεχωριστές ιδιότητες. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα λιπαρά οξέα, οι εστέρες, οι αλκοόλες και οι γλυκόλες. Παρουσιάζουν άριστες ιδιότητες ψύξης και τήξης, όμως είναι τρεις φορές πιο ακριβές από τις παραφίνες. Λόγω της αναφλεξιμότητάς τους, συνίσταται προσοχή στην έκθεσή τους σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες, φλόγες ή οξειδωτικούς παράγοντες. Βασικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών είναι η υψηλή θερμότητα σύντηξης, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η ποικιλία του επιπέδου τοξικότητας, και η αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες [10, 12, 17].

Τα λιπαρά οξέα συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο επιστημονικό ενδιαφέρον, κυρίως, λόγω του χαμηλού κόστους τους, που παραμένει όμως 2 με 2,5 φορές μεγαλύτερο από της εμπορικής παραφίνης. Χαρακτηρίζονται από τον χημικό τύπο  $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$  και παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες με

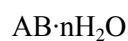
αυτές των παραφινών, προσφέροντας, όμως, υψηλότερη θερμότητα σύντηξης, γεγονός που αντισταθμίζει το υψηλό τους κόστος. Επιπλέον, τα λιπαρά οξέα ψύχονται χωρίς εμφάνιση supercooling και γενικά θεωρούνται καλά PCM. Τέλος, παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον σε εφαρμογές αποθήκευσης λανθάνουσας ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας [10, 11].

### **3.2.2 Ανόργανα PCM**

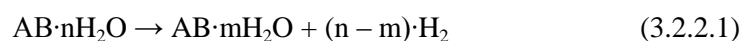
Τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή θερμότητα σύντηξης, καλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλό κόστος και μη-αναφλεξιμότητα. Ωστόσο, τα περισσότερα από αυτά είναι διαβρωτικά με τα περισσότερα μέταλλα, εμφανίζουν το φαινόμενο supercooling και υφίστανται διαχωρισμό φάσεων. Σε αυτά κατατάσσονται τα ένυδρα άλατα και τα μεταλλικά PCM [17].

#### **3.2.2.1 Ένυδρα άλατα**

Τα ένυδρα άλατα είναι κράματα ανόργανων αλάτων και νερού, τα οποία σχηματίζουν ένα κρυσταλλικό στερεό με γενικό τύπο:



Η μετατροπή φάσης στερεού-υγρού στα ένυδρα άλατα είναι, στην πραγματικότητα, η απομάκρυνση των μορίων νερού του άλατος. Αυτή η διαδικασία μοιάζει θερμοδυναμικά με τήξη ή ψύξη. Κατά την διάρκεια αλλαγής φάσης, ένα ένυδρο άλας τήκεται συνήθως σε ένυδρο άλας με λιγότερα μόρια νερού, δηλαδή:



Εκτός όμως από την πιο πάνω μορφή, το άλας μπορεί να αφυδατωθεί εντελώς (άνυδρο άλας) και να έχουμε την πιο κάτω αντίδραση :



Τα ένυδρα άλατα αποτελούν την πιο σημαντική κατηγορία PCM, η οποία έχει μελετηθεί εκτεταμένα για τη χρήση της σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμικής ενέργειας, λόγω του χαμηλού τους κόστους και της ευρείας διαθεσιμότητάς τους [11]. Οι πιο ελκυστικές ιδιότητες των ένυδρων αλάτων είναι: (1) η υψηλή λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης ανά μονάδα όγκου ( $350 \text{ MJ/m}^3$ ), (2) η σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (περίπου  $0,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ -σχεδόν διπλάσια από αυτή των παραφινών) και (3) οι μικρές μεταβολές του όγκου κατά την διάρκεια της τήξης. Επιπλέον, δεν είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά, είναι ελαφρώς τοξικά, ενώ είναι συμβατά με τα πλαστικά [10, 11].

Κατά την τήξη των αλάτων μπορούμε να παρατηρήσουμε τρεις συμπεριφορές:

- Την ομοιόμορφη τήξη: Συμβαίνει, όταν το άνυδρο άλας είναι πλήρως διαλυτό στο νερό στην θερμοκρασία τήξης.
- Την ανομοιόμορφη τήξη: Συμβαίνει, όταν το άνυδρο άλας δεν είναι εντελώς διαλυτό στο νερό στην θερμοκρασία τήξης.
- Τη μερικώς ομοιόμορφη τήξη: Συμβαίνει, όταν οι υγρές και οι στερεές φάσεις βρίσκονται σε ισορροπία κατά τη διάρκεια μιας μετάβασης φάσης [12].

Το σημαντικότερο πρόβλημα στην χρήση ένυδρων αλάτων, ως PCM, είναι ότι στην πλειοψηφία τους τήκονται ανομοιόμορφα. Καθώς τα  $n$  μόρια του νερού ενυδάτωσης δεν επαρκούν για να διαλύσουν ένα μόριο άλατος, το προκύπτον διάλειμμα είναι υπερκορεσμένο στην θερμοκρασία τήξεως. Το στερεό άλας, έχοντας μεγαλύτερη πυκνότητα, κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου αποθήκευσης και δεν μπορεί να αναμιχθεί ξανά με νερό κατά τη διάρκεια της αντίστροφης διαδικασίας της ψύξης. Αυτό οδηγεί σε μια μη αναστρέψιμη διαδικασία τήξης-ψύξης των ένυδρων αλάτων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους με κάθε κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης [10].

Το πρόβλημα της ανομοιόμορφης τήξης μπορεί να αντιμετωπιστεί με ένα από τους ακόλουθους τρόπους :

- Με μηχανική ανάδευση
- Συσκευάζοντας τα PCM, ώστε να μειωθεί το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων.
- Προσθήκη πτητικών ουσιών, οι οποίες κρατούν σε αναστολή τα στερεά άλατα.
- Χρήση πρόσθετου νερού, έτσι ώστε οι τηκόμενοι κρύσταλλοι να μην παράγουν υπερκορεσμένο διάλυμα.
- Τροποποιώντας τη χημική σύνθεση του συστήματος και κάνοντάς το από ανομοιόμορφο μείγμα, ομοιόμορφο .

Ένα άλλο μεγάλο πρόβλημα των ενυδρων αλάτων είναι ότι παρουσιάζουν υπέρψυξη (supercooling). Στη θερμοκρασία τήξης, το ποσοστό σχηματισμού πυρήνων είναι, γενικά, πολύ χαμηλό. Για να επιτευχθεί ένα λογικό ποσοστό σχηματισμού πυρήνων, το διάλυμα πρέπει να υπερψύχεται και συνεπώς, η ενέργεια αντί να αποβάλλεται στη θερμοκρασία τήξης, να αποβάλλεται σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία.

Ακόμη ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα ένυδρα άλατα είναι το χαρακτηριστικό τους να έχουν μικρότερο αριθμό μορίων νερού, κατά τη διαδικασία αποφόρτισης. Αυτή η πυρήνωση των κατώτερων ενυδρων αλάτων, μπορεί να αποφευχθεί με την προσθήκη χημικών ουσιών, η οποία αυξάνει τη διαλυτότητα των κατώτερων ενυδρων αλάτων, περισσότερο από τα αρχικά ένυδρα άλατα με μεγαλύτερο αριθμό μορίων νερού [11].

Το πιο γνωστό ένυδρο άλας είναι το άλας του Glauber, που αποτελείται από 44%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  και 56%  $\text{H}_2\text{O}$ , κατά μάζα, έχει θερμοκρασία τήξης μεταξύ 32 και 35°C και λανθάνουσα θερμότητα τήξης ίση με 254KJ/Kg. Θεωρείται ένα από τα φθηνότερα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Η χρήση του όμως, περιορίζεται εξαιτίας των φαινομένων υπέρψυξης (supercooling) και διαχωρισμού φάσης που εμφανίζει, προβλήματα που πλήττουν, άλλωστε, όλα τα ένυδρα άλατα [20].

### **3.2.2.2 Μέταλλα**

Αυτή η κατηγορία υλικών δεν έχει ληφθεί σοβαρά υπόψη στην τεχνολογία των PCM, καθώς η χρήση τους ενέχει έναν αριθμό ασυνήθιστων μηχανολογικών προβλημάτων. Το πιο σοβαρό πρόβλημα είναι το υψηλό τους βάρος, όμως, σε περιπτώσεις που ο όγκος είναι σημαντικός παράγοντας, η κατηγορία αυτή μπορεί κριθεί χρήσιμη, χάρη στην υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου που χαρακτηρίζει τα υλικά της. Επιπλέον, σημαντικά μειονεκτήματα των μεταλλικών PCM είναι η χαμηλή διαθεσιμότητά τους και το υψηλό τους κόστος.

Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των υλικών είναι η υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου που ήδη αναφέρθηκε, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα και η σχετικά χαμηλή πίεση ατμών[10, 11].



### 3.2.3 Εύτηκτα μείγματα

Εύτηκτα ονομάζονται τα μείγματα δύο ή περισσότερων οργανικών ή ανόργανων συνιστωσών, κάθε μια από τις οποίες τήκεται και στερεοποιείται ομοιόμορφα, παρουσιάζοντας την ελάχιστη θερμοκρασία τήξης, συγκριτικά με τις άλλες κατηγορίες PCM. Τέτοιου είδους μείγματα τήκονται ή στερεοποιούνται, σχεδόν πάντα, χωρίς διαχωρισμό φάσεων, καθώς η στερεοποίηση τους λαμβάνει χώρα σε ένα ισχυρό πλέγμα κρυστάλλων, το οποίο δεν επιτρέπει στα συστατικά να διαχωριστούν. Βασικό μειονέκτημα αυτού του είδους υλικών αλλαγής φάσης είναι το μεγάλο κόστος παραγωγής τους, καθώς και η έλλειψη υφιστάμενων διαθέσιμων δεδομένων δοκιμών για τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες, δεδομένου ότι η χρήση τους είναι πολύ πρόσφατη στις εφαρμογές [12, 26].

### 3.2.4 Σύγκριση των τριών βασικών κατηγοριών PCM

Όπως είναι φυσικό, και οι τρεις κατηγορίες υλικών αλλαγής φάσης διαθέτουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία όμως αποκτούν διαφορετική βαρύτητα ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται κάθε υποψήφιο PCM. Στη συνέχεια, παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων που αναφέρθηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

<b>ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ</b>	<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>
<b>ΟΡΓΑΝΙΚΑ PCM</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Χημική και θερμική σταθερότητα</li><li>• Μη διαβρωτικά με τα περισσότερα υλικά, εκτός του πλαστικού</li><li>• Ελάχιστη ή καθόλου εμφάνιση supercooling</li><li>• Χαμηλό κόστος αγοράς σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες</li><li>• Δεν υφίστανται διαχωρισμό φάσεων</li><li>• Διαθέσιμα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών</li><li>• Διαθέσιμα στην αγορά</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Χαμηλότερη λανθάνουσα θερμότητα υδροποίησης από τα ανόργανα</li><li>• Μη συμβατά με πλαστική συσκευασία</li><li>• Αναφλέξιμα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (~200°C)</li><li>• Χαμηλότερη πυκνότητα από τα ανόργανα</li><li>• Χαμηλότερος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας από τα ανόργανα</li></ul>

<b>ΑΝΟΡΓΑΝΑ PCM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μεγαλύτερη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης από τα οργανικά</li> <li>• Μεγαλύτερη πυκνότητα από τα οργανικά</li> <li>• Μη αναφλέξιμα</li> <li>• Υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα οργανικά</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Διαβρωτικά (απαραίτητη αποθήκευση των υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία)</li> <li>• Εμφάνιση supercooling</li> <li>• Διαχωρισμός των φάσεων, δυνατή δημιουργία ιζήματος</li> <li>• Αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση</li> <li>• Αρκετά μεγαλύτερο κόστος από τα οργανικά</li> <li>• Υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα τον εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου, αν μείνουν εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υγρασία</li> </ul>
<b>ΕΥΤΗΚΤΑ PCM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δεν εμφανίζουν διαχωρισμό φάσης</li> <li>• Συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα των οργανικών και ανόργανων PCM, χωρίς, όμως, να παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα αυτών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πολύ μεγάλο κόστος παραγωγής σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες</li> <li>• Χαμηλή διαθεσιμότητα</li> <li>• Έλλειψη υφισταμένων διαθέσιμων δεδομένων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες τους</li> </ul>

***Πίνακας 2.1: Σύγκριση των διαφορετικών κατηγοριών PCM***

### **3.3 Κριτήρια επιλογής υλικών αλλαγής φάσης [11, 12, 27-29]**

Έγινε κατανοητό ότι οι ιδιότητες και η συμπεριφορά των υλικών PCM ποικίλουν, γεγονός που δικαιολογεί την χρήση τους σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Είναι προφανές λοιπόν, ότι το είδος της εφαρμογής θέτει κάποιες απαιτήσεις-περιορισμούς, τα οποία είναι και τα κριτήρια επιλογής του υλικού αλλαγής φάσης, με σκοπό την επιτυχή λειτουργία του στο εκάστοτε θερμοαποθηκευτικό σύστημα. Αυτά τα κριτήρια, ουσιαστικά, είναι τόσο οι θερμοδυναμικές, κινητικές και χημικές ιδιότητες που πρέπει να επιδείξει το υποψήφιο PCM, όσο και τεχνικοί και οικονομικοί παράγοντες.

### Θερμοφυσικές ιδιότητες

- Η θερμοκρασία τήξης επιβάλλεται να είναι εντός του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας που ορίζει η εφαρμογή. Ειδικά, δεν θα επιτευχθεί η αλλαγή φάσης, και κατά συνέπεια, δε θα αξιοποιηθεί το πλεονέκτημα των PCM να απορροφούν/απελευθερώνουν θερμότητα κατά τη διάρκεια αυτής. Προκειμένου για εφαρμογές στον κτιριακό τομέα, επιλέγονται συνήθως PCM με θερμοκρασία αλλαγής φάσης 1-3°C πάνω από τη επιθυμητή θερμοκρασία άνεσης του χώρου.
- Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου πρέπει να είναι υψηλή, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα του υλικού PCM, καθώς και το μέγεθος της συσκευασίας του, που απαιτούνται για την κάλυψη των αναγκών αποθήκευσης.
- Η ειδική θερμοχωρητικότητα πρέπει, επίσης, να είναι υψηλή, έτσι ώστε να εξασφαλίζει τη δυνατότητα αποθήκευση επιπρόσθετης ποσότητας αισθητής θερμότητας.
- Η θερμική αγωγιμότητα πρέπει να είναι μεγάλη, τόσο στη στερεή, όσο και στην υγρή φάση, ώστε να εξυπηρετείται η γρήγορη φόρτιση/αποφόρτιση σε δεδομένο όγκο υλικού.
- Οι μεταβολές του όγκου πρέπει να είναι μικρές κατά την αλλαγή φάσης, όπως μικρή πρέπει να είναι και η τάση ατμών στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, προκειμένου οι απαιτήσεις σε μηχανική αντοχή του δοχείου, που πληρούται από το PCM, να είναι λιγότερες.
- Η τήξη του PCM να είναι ομοιόμορφη, ώστε το υλικό να παρουσιάζει σταθερή συμπεριφορά σε κάθε κύκλο τήξης/στερεοποίησης.

### Κινητικές ιδιότητες

- Η ταχύτητα σχηματισμού πυρήνα επιβάλλεται να είναι μεγάλη, για να αποφευχθεί το φαινόμενο της υπόψυξης της υγρής φάσης (supercooling)
- Το ποσοστό ανάπτυξης κρυστάλλων πρέπει να είναι υψηλό.

### Χημικές ιδιότητες

- Τα PCM πρέπει να χαρακτηρίζονται από μακράς διάρκειας χημική σταθερότητα.
- Πρέπει να είναι συμβατά με άλλα υλικά με τα οποία έρχονται σε επαφή (να μην αλληλεπιδρούν, να μην προκαλούν διαβρώσεις).
- Πρέπει να αποφεύγεται η χρήση εύφλεκτων και τοξικών υλικών PCM.
- Ο κύκλος τήξης/στερεοποίησης πρέπει να είναι αναστρέψιμος.
- Το PCM δεν πρέπει να υφίσταται καμία υποβάθμιση της ποιότητας του, μετά από πολλούς κύκλους τήξης/στερεοποίησης.

### **Τεχνικά και οικονομικά κριτήρια**

Πέρα από τις ιδιότητες του PCM, πρέπει να δίνεται βάση και σε μία σειρά άλλων παραγόντων, προκειμένου η επιλογή του να είναι επιτυχημένη. Πιο συγκεκριμένα, το υλικό αλλαγής φάσης θα πρέπει να είναι:

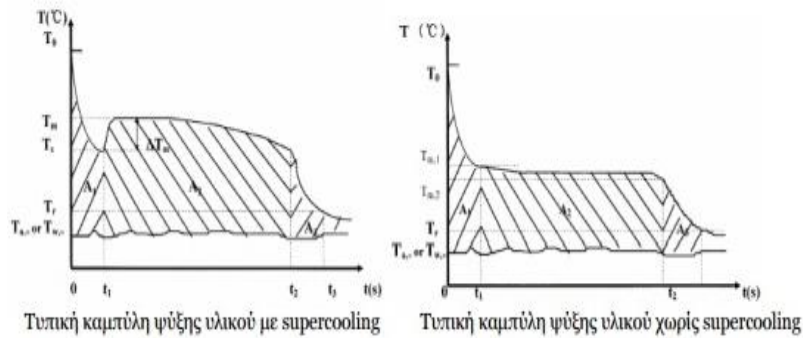
- απλό στη χρήση του
- αποτελεσματικό και αξιόπιστο
- να δίνει τη δυνατότητα να εισαχθεί σε κάψουλες
- φιλικό προς το περιβάλλον και ανακυκλώσιμο
- να έχει ευρεία διαθεσιμότητα στην αγορά
- να διαθέτει χαμηλό κόστος, προκειμένου να είναι ανταγωνιστικό έναντι των υπόλοιπων κατασκευαστικών υλικών

## **3.4 Προβλήματα των υλικών αλλαγής φάσης και τρόποι επίλυσης τους**

### **3.4.1 Φαινόμενο supercooling**

Το φαινόμενο supercooling, ή αλλιώς φαινόμενο υπέρψυξης ή υπόψυξης, είναι ένα σοβαρό πρόβλημα που αφορά το σύνολο των ανόργανων, αλλά και ένα μέρος των οργανικών PCM, το οποίο καθιστά την αξιοποίηση της αποθηκευμένης θερμότητας λιγότερο αποδοτική.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την ψύξη ενός υγρού PCM με υπέρψυξη, παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας του υγρού PCM κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης του, πριν εκκινήσει η αλλαγή φάσης. Κατά τη συνέχιση της ψύξης, η θερμοκρασία του δείγματος αυξάνεται και σταθεροποιείται, τις περισσότερες φορές για μικρό χρονικό διάστημα, στη θερμοκρασία στερεοποίησης. Το φαινόμενο γίνεται περισσότερο κατανοητό, αν παρατηρηθεί η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου που ακολουθεί.



***Εικόνα 3.4.1.1: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου Supercooling***

Η ύπαρξη supercooling οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης, συνεπώς, η λανθάνουσα θερμότητα αποδίδεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή ή σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Βασική παρατήρηση είναι, ότι, όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ψύξης του δείγματος, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός του supercooling. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο βαθμός του supercooling δεν αποτελεί φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο όγκος του δείγματος, η “καθαρότητα” του υλικού, ο ρυθμός ψύξης και η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης [23].

Η μερική ή πλήρης καταστολή του φαινομένου επιτυγχάνεται με την προσθήκη ενός μέσου πυρήνωσης στο PCM, το οποίο εξασφαλίζει το σχηματισμό της στερεής φάσης με ελάχιστη υπόψυξη. Οι πιθανοί, προς χρήση, πυρήνες μπορεί να είναι:

- Εγγενείς πυρήνες, δηλαδή σωματίδια στερεού PCM. Οι συγκεκριμένοι πυρήνες θα πρέπει να διατηρούνται ξεχωριστά από το PCM, διαφορετικά θα λιώσουν μαζί του κατά την τήξη και θα γίνουν αναποτελεσματικοί.
- Ξένοι πυρήνες, δηλαδή χημικά που έχουν παρόμοια κρυσταλλική δομή με το στερεό PCM. Αυτό σημαίνει ότι έχουν παραπλήσια θερμοκρασία τήξης μ’ εκείνο και απενεργοποιούνται σε θερμοκρασίες κοντά σε αυτήν [28].

### **3.4.2 Φαινόμενο διαχωρισμού φάσεων**

Το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσεων είναι ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα των ένυδρων αλάτων, το οποίο ευθύνεται κατά ένα μεγάλο μέρος για την υποβάθμιση των θερμικών ιδιοτήτων τους.

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, τα ένυδρα άλατα εμφανίζουν τρεις κύριους τύπους συμπεριφοράς, κατά τη μετάβασή τους από τη μία φάση στην άλλη: τον ομοιόμορφο, τον ανομοιόμορφο και τον μερικώς ομοιόμορφο. Η ομοιόμορφη τήξη, που είναι και η πιο επιθυμητή, συμβαίνει, όταν η σύσταση της στερεάς φάσης είναι ίδια με τη σύσταση της υγρής, με αποτέλεσμα να μην έχουμε διαχωρισμό φάσεων. Η μερικώς ομοιόμορφη τήξη συναντάται, όταν το PCM έχει δύο ή περισσότερες ένυδρες μορφές με διαφορετικές συστάσεις στερεού μέρους και διαφορετικά σημεία τήξης, και τέλος, η ανομοιόμορφη τήξη πραγματοποιείται, όταν κατά την τήξη του PCM εμφανίζονται δύο ξεχωριστές φάσεις, ένα κορεσμένο διάλυμα και ένα ίζημα αδιάλυτης άνυδρης ουσίας [24].

Τα ένυδρα άλατα, όμως, τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μείγματος και εξαιτίας της διαφοράς πυκνότητας των δύο αυτών φάσεων και της βαρύτητας, η στερεή φάση κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου αποθήκευσης, ενώ η υγρή κατευθύνεται προς την επιφάνεια του. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται μια μη-αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συνεχή εξασθένηση των ιδιοτήτων των υλικών αυτών, κατά την κυκλική τους φόρτιση. Αυτό συντελεί στη μείωση της μεγάλης αποθηκευτικής τους ικανότητας, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής τους [10, 23].

Μερικοί τρόποι που περιορίζουν το φαινόμενο αυτό είναι οι εξής:

- Προσθήκη επιπλέον ποσότητας νερού, έτσι ώστε όλο το άνυδρο άλας να μπορεί να διαλυθεί στο νερό στο σημείο τήξης και να μην δημιουργείται υπερκορεσμός.
- Με τη χρήση κολλοειδών προσθετικών (gelling additives), τα οποία δημιουργούν μια δομή γύρω από τις φάσεις των συστατικών του υλικού και δεν επιτρέπουν τη διέλευση φάσεων με διαφορετικές πυκνότητες διαμέσου της δομής τους.
- Με μηχανικά μέσα, όπως ανάδευση.
- Με τοποθέτηση του PCM σε κάψουλες, για να μειωθεί ο διαχωρισμός [10].

### **3.4.3 Ανεπαρκής σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων των PCM σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση**

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

- Σε μικρής σταθερότητας χημική σύνθεση του υλικού ή των υλικών που αποτελούν το PCM .
- Στο φαινόμενο της διάβρωσης, που πιθανόν να συμβεί μεταξύ του PCM και των υλικών που έρχεται σε επαφή [23].

Η ανάπτυξη των δοχείων των PCM πρέπει να στοχεύει στην επίτευξη σταθερότητας των φυσικών και θερμικών ιδιοτήτων των υλικών, προκειμένου τα PCM να μπορούν να υφίστανται επαναλαμβανόμενους κύκλους θέρμανσης και ψύξης. Η αντοχή και σταθερότητα στην κυκλική φόρτιση ενός υλικού αλλαγής φάσης πρέπει να ελέγχεται και να εξασφαλίζεται από την εταιρεία παραγωγής του. Έτσι, οι κατασκευαστές των PCM ελέγχουν τη μακροπρόθεσμη απόδοσή τους, διεξάγοντας δοκιμές κυκλικής φόρτισης, όπως για παράδειγμα κάνει η εταιρεία BASF, που, όπως ισχυρίζεται, υποβάλλει τα υλικά της σε δοκιμές 10.000 κύκλων [23, 28, 30].

Το πρόβλημα της ανεπαρκούς σταθερότητας θερμικών ιδιοτήτων αφορά, κυρίως, τα ένυδρα άλατα, λόγω των διαβρωτικών τάσεων που εμφανίζουν και συνεπώς, το μεγαλύτερο πλήθος ερευνών με αυτό το αντικείμενο, αφορά σε αυτή την ομάδα ανόργανων PCM. Συγκεκριμένα, τα ένυδρα άλατα προκαλούν διαβρώσεις, όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τα περισσότερα μέταλλα, όπως ο χαλκός, ο σίδηρος κ.α. Αντίθετα, οι παραφίνες και τα παράγωγά τους χαρακτηρίζονται από άριστη σταθερότητα των ιδιοτήτων τους και χημική αδράνεια κατά την επαφή τους με πολλά δομικά υλικά και μέταλλα [23].

### **3.5 Ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης στα δομικά υλικά**

Μετά την κατάλληλη εκλογή του PCM, το επόμενο σημαντικό βήμα είναι η σωστή ενσωμάτωσή του στα υπόλοιπα στοιχεία του θερμοαποθηκευτικού συστήματος που εφαρμόζεται. Οι πιο αποτελεσματικοί τρόποι ενσωμάτωσης των PCM στα συμβατικά δομικά υλικά είναι η άμεση ενσωμάτωση, η εμβάπτιση και η ενσωμάτωση μέσω ειδικής προστατευτικής συσκευασίας-κάψουλας [26].

#### **3.5.1 Άμεση ενσωμάτωση**

Η άμεση ενσωμάτωση αποτελεί την πιο απλή και οικονομική μέθοδο ενσωμάτωσης, καθώς δεν απαιτεί κανένα πρόσθετο εξοπλισμό. Τα PCM, σε υγρή μορφή ή σε σκόνη, ενσωματώνονται απευθείας στα συμβατικά δομικά υλικά, όπως ο γύψος, το σκυρόδεμα ή άλλα πορώδη υλικά, και έτσι σχηματίζουν σύνθετα υλικά αλλαγής φάσης, με αυξημένη αποθηκευτική ικανότητα.

Τα σοβαρότερα προβλήματα που παρατηρούνται στη μέθοδο αυτή, είναι προβλήματα διαρροής και η πιθανή αλληλεπίδραση του PCM με ορισμένα δομικά υλικά [26].

### **3.5.2 Εμβάπτιση**

Κατά την εμβάπτιση, τα πορώδη οικοδομικά υλικά, όπως ο γύψος, τα τούβλα ή το σκυρόδεμα, βυθίζονται σε θερμό και τετηγμένο PCM, το οποίο απορροφάται από τους εσωτερικούς του πόρους, με τη βοήθεια της τριχοειδούς δράσης. Ακολούθως, το πορώδες υλικό απομακρύνεται από το υγρό PCM, αφήνεται να κρυώσει και το PCM παραμένει στους πόρους του δομικού υλικού.

Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι, ακριβώς, αυτή η αμεσότητα της ενσωμάτωσης του PCM στα δομικά υλικά, καθώς μπορεί να πραγματοποιηθεί πρακτικά οποιαδήποτε ώρα και σε οποιοδήποτε δομικό στοιχείο. Ωστόσο, το πρόβλημα διαρροής, κατά την μακροχρόνια χρήση, δεν εκλείπει ούτε από αυτή τη μέθοδο [27].

### **3.5.3 Ενσωμάτωση PCM σε κάψουλες**

Η ενσωμάτωση των PCM, στις περισσότερες εφαρμογές, απαιτεί πρώτα την προστασία τους σε ειδικές συσκευασίες, με σκοπό την συγκράτηση της υγρής τους φάσης, την αποφυγή επαφής τους με το περιβάλλον, καθώς και τη διευκόλυνση στη μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας [24].

Η συσκευασία των PCM θα πρέπει να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Να πληροί τις απαιτήσεις σε δύναμη, ευελιξία, αντοχή στη διάβρωση και θερμική σταθερότητα.
- Να λειτουργεί ως «φράγμα» για την προστασία του PCM από τυχόν επιβλαβή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον.
- Να διαθέτει επαρκή επιφάνεια για τη μεταφορά θερμότητας.
- Να παρέχει δομική σταθερότητα και εύκολο χειρισμό.

Υπάρχουν δυο διαφορετικοί τρόποι συσκευασίας των PCM σε κάψουλες, οι οποίοι, ανάλογα με το μέγεθος των καψουλών, διακρίνονται σε μακροενσωμάτωση (macroencapsulation) και μικροενσωμάτωση (microencapsulation) [26].

#### **3.5.3.1 Μακροενσωμάτωση**

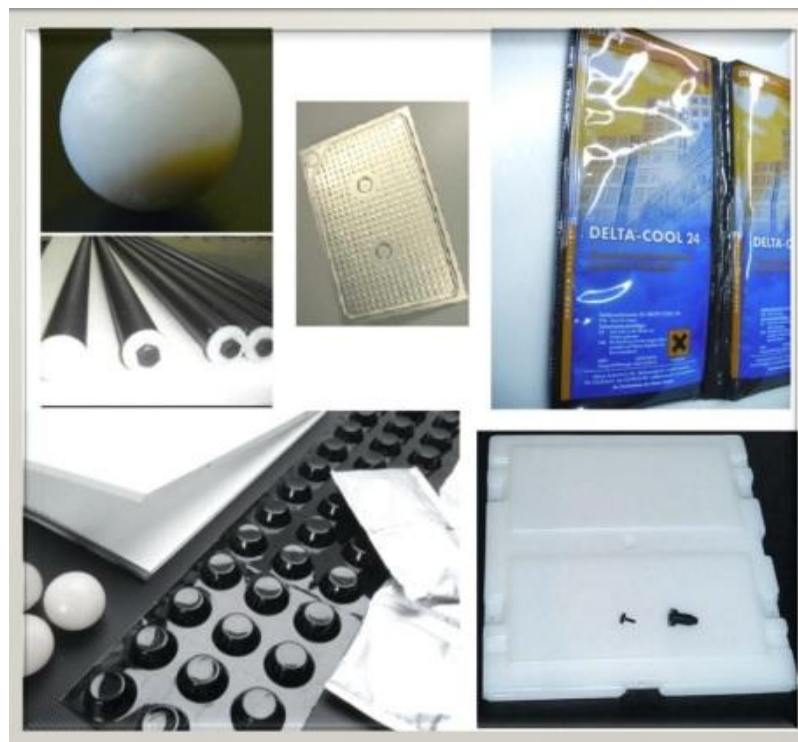
Η μακροενσωμάτωση είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος συσκευασίας των υλικών αλλαγής φάσης. Οι κάψουλες, στις οποίες ενσωματώνεται το PCM, έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 1mm και



εξασφαλίζουν την αποθήκευση μεγάλης μάζας υλικού, η οποία μπορεί να ποικίλει από μερικά γραμμάρια μέχρι ένα κιλό [31]. Το δοχείο-κάψουλα μπορεί να είναι σε μορφή σωλήνα, σακούλας, ορθογώνιου πάνελ, πλάκας, σφαίρας ή κυλίνδρου. Τα πιο οικονομικά και συνηθισμένα υλικά κατασκευής τους είναι μέταλλα, όπως κασσίτερος και χάλυβας, και πλαστικά, όπως το πολυπροπυλένιο και το πολυαιθυλένιο. Το κλειδί για τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός της μακροκάψουλας, σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Σημαντικά πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η δυνατότητα ενθυλάκωσης υλικών αλλαγής φάσης, τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια μορφή, καθώς και η ευκολία στην πλήρωση της κάψουλας και στην τελική της χρήση. Επιπλέον, συντελεί στον περιορισμό του διαχωρισμού φάσεων και στην αύξηση της αποθηκευόμενης θερμότητας, εξασφαλίζοντας μια ενισχυμένη δομή για το PCM [32].

Μερικά από τα μειονεκτήματα της μακροενσωμάτωσης είναι η δυσκολία προστασίας από τυχόν καταστροφές, το υψηλό κόστος της, που οφείλεται στη δυσκολία ενσωμάτωσής των καψουλών στην κτιριακή δομή και σε ορισμένες περιπτώσεις, η μειωμένη θερμική αγωγιμότητα που αυτές προκαλούν [27].

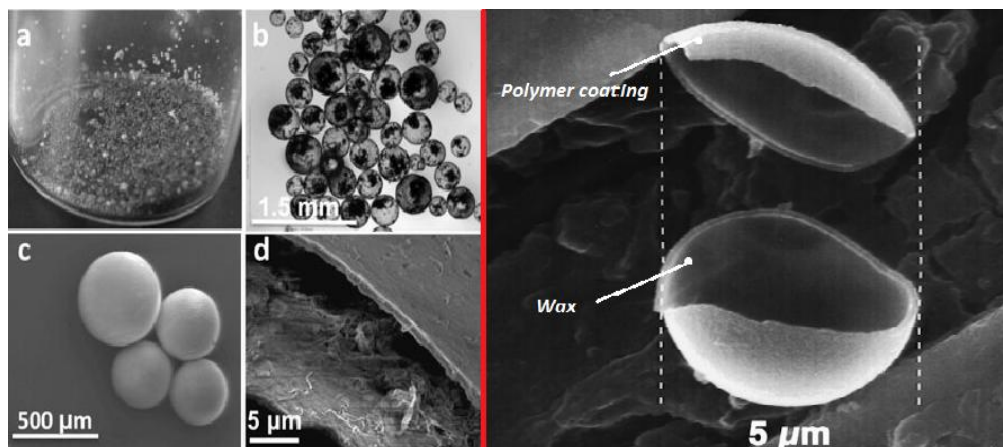


***Εικόνα 3.5.3.1.1: Παραδείγματα μακροενσωμάτωσης [33]***

### 3.5.3.2 Μικροενσωμάτωση

Η μικροενσωμάτωση είναι η τοποθέτηση μικροσκοπικών υλικών PCM (είτε υγρών, είτε στερεών) σε μορφή καψουλών, με διάμετρο μικρότερη σε μέγεθος από 1mm. Το υλικό του τοιχώματος της κάψουλας μπορεί να διαμορφωθεί, χρησιμοποιώντας μια μεγάλη ποικιλία υλικών, συμπεριλαμβανομένων φυσικών και συνθετικών πολυμερών, τα οποία είναι συμβατά, τόσο με τα υλικά αλλαγής φάσης, όσο και με τα συμβατικά οικοδομικά υλικά [31].

Οι μικροκάψουλες παρουσιάζουν αναρίθμητα πλεονεκτήματα, ανάμεσα στα οποία είναι η εύκολη εφαρμογή τους, η καλύτερη μετάδοση θερμότητας λόγω της αυξημένης επιφάνειας ανταλλαγής θερμότητας που διαθέτουν, η συγκράτηση της υγρής φάσης του PCM, ώστε να μην υπάρχει κάποιου είδους διαρροή προς το εξωτερικό περιβάλλον και ο έλεγχος των αλλαγών στον όγκο του υλικού αποθήκευσης, κατά την αλλαγή φάσης [32]. Ωστόσο, πολλοί επιστήμονες παρατηρούν ότι αυτή η τεχνική ενδέχεται να επηρεάζει την μηχανική αντοχή των δομικών υλικών, καθώς και να αυξάνει την πιθανότητα για εμφάνιση υπέρψυξης. Επιπλέον, η πιθανή χρήση των μικροενσωματωμένων PCM σε διάφορες εφαρμογές θερμικού ελέγχου περιορίζεται, λόγω του μεγάλου κόστους τους [26].



***Εικόνα 3.5.3.2.1: Μικροκάψουλες διαφόρων διαμέτρων μέσα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (αριστερά), ανοιγμένη κάψουλα (δεξιά) [34]***

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Κτηριακές Εφαρμογές PCM**

### **4.1 Γενικά**

Εδώ και αρκετά χρόνια, τα υλικά αλλαγής φάσης μονοπωλούν το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας, αποτελώντας αντικείμενο εκτεταμένων μελετών, από τις οποίες αναδείχθηκαν τόσο τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν, όσο και η τεράστια ποικιλία τους, ικανή να καλύψει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Όπως γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό, τα υλικά αυτά δε θα μπορούσαν να μείνουν ανεκμετάλλευτα. Η χρήση τους στον κτιριακό τομέα, που είναι απλώς ένα μικρό δείγμα των πολυπληθών εφαρμογών τους, προσφέρει πολλαπλά οφέλη, ανάμεσα στα οποία είναι η βελτίωση του κτιριακού κελύφους, η επίτευξη θερμικής άνεσης, η καλύτερη αποδοτικότητα των συστημάτων, η μείωση ενεργειακών απαιτήσεων και η εξοικονόμηση ενέργειας σε περιόδους εκτός αιχμής. Συγκεκριμένα, στα κτίρια, τα PCM βρίσκουν εφαρμογή σε παθητικά, αλλά και ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, όπως θα δούμε στη συνέχεια του κεφαλαίου. Εκτός, όμως από τον κτιριακό τομέα, τα PCM έχουν να επιδείξουν σημαντικές και αξιόλογες εφαρμογές στον τομέα των μεταφορών, της τηλεπικοινωνίας, στα ηλεκτρονικά, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην ένδυση, στην ιατρική-φαρμακευτική, ακόμα και σε διαστημικές αποστολές [35].

### **4.2 Ιστορική αναδρομή**

Οι πρώτες προσπάθειες για τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης σε σπίτια, με σκοπό την ουσιαστική συμβολή τους στη θερμική συμπεριφορά των κτιρίων, έγιναν μόλις από τη δεκαετία του 1920, από το 1940 έως το 1970, ενώ πραγματοποιήθηκαν ορισμένες, μεγάλης κλίμακας, πειραματικές κατασκευές σπιτιών. Παρ' ότι τα συστήματα αυτά θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν επιτυχημένα, δεν υπήρξε περαιτέρω εξέλιξη ή μελέτη, αφού δεν υπήρξε σημαντική χρηματοδότηση, εξαιτίας της έλλειψης εμπιστοσύνης στην επιτυχία του όλου εγχειρήματος. Ακολουθεί μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση των σημαντικότερων πρώιμων εφαρμογών των υλικών αλλαγής φάσης [36].

## 4.2.1 Οι πρώτες προσπάθειες

### 4.2.1.1 Maria Telkes

Η πρώτη ερευνήτρια που αποφάσισε να ασχοληθεί με την εφαρμογή των PCM σε κτίρια, ως μια μορφή παθητικής θέρμανσης, ήταν η, ουγγρικής καταγωγής, Αμερικανίδα επιστήμονας του MIT, Dr. Maria Telkes, η οποία ασχολούταν με τις δυνατότητες της ηλιακής θέρμανσης, ήδη, από το 1920. Πιο συγκεκριμένα, το 1948, υλοποίησε το πρώτο πειραματικό σπίτι, με σύστημα θέρμανσης, βασισμένο στη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης, το οποίο αποτέλεσε ορόσημο στις εφαρμογές αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Ονομάστηκε "The Dover House", καθώς κατασκευάστηκε στην περιοχή Dover Mass, 5 μίλια μακριά από την Βοστώνη των ΗΠΑ, με τη βοήθεια της συνεργάτιδάς της και αρχιτεκτόνισσας, Eleanor Raymond, και την χρηματοδότηση της Amelia Peabody.

Το σπίτι ήταν ένας όροφος, πέντε δωματίων, με εμβαδόν δαπέδου  $135 \text{ m}^2$ , από τα οποία, τα δύο ήταν υπνοδωμάτια, μήκους 23 m και βάθους ενός δωματίου. Η συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας γινόταν με τη βοήθεια 18 ηλιακών συλλεκτών, κατασκευασμένων από γαλβανισμένες, απορροφητικές πλάκες λεπτού πάχους, βαμμένες μαύρες και καλυμμένες με διπλά, γυάλινα πλαίσια, διαστάσεων  $1,2 \times 3 \text{ m}$ . Η θερμότητα που παραγόταν από αυτά τα πάνελ, περνούσε κατά μήκος ενός αγωγού, μέσω ενός ανεμιστήρα, σε τρία δοχεία αποθήκευσης θερμότητας, που είχαν τοποθετηθεί στις πλευρές των δωματίων. Τα δοχεία αυτά χρησιμοποιούσαν ως PCM, το άλας του Glauber. Συνολικά περιελάμβαναν 21 τόνους PCM, συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας 11GJ και σημείου τήξεως  $32^\circ\text{C}$ .

Η κατασκευή του "The Dover House" θεωρήθηκε ένα πολύ δαπανηρό εγχείρημα, αφού το συνολικό της κόστος ανερχόταν στα 20.000 δολάρια, εκ των οποίων τα 3.000 δολάρια αποτελούσαν το κόστος του θερμαντικού συστήματος.

Στα πρώτα δύο έτη λειτουργίας, το σύστημα θέρμανσης αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό, ακόμα και σε περιόδους με επτά ημέρες συνεχόμενης συννεφιάς. Το σύστημα λειτούργησε με επιτυχία, παρέχοντας ένα άνετο περιβάλλον γύρω στους  $21^\circ\text{C}$ , χωρίς να χρειαστεί οποιοδήποτε βοηθητικό σύστημα θέρμανσης. Τον τρίτο χρόνο όμως, το σύστημα άρχισε να εμφανίζει σοβαρά προβλήματα, καθώς το άλας του Glauber είχε διαχωριστεί σε διάλυμα και άνυδρο άλας ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), χάνοντας έτσι την αποθηκευτική του ιδιότητα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι τα δοχεία αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται δραματικά οι απώλειες του συστήματος. Δυστυχώς, αυτό σήμαινε ότι η συμβατική θέρμανση ήταν πλέον απαραίτητο να εγκατασταθεί [36, 37].

#### **4.2.1.2 Dr. Lawrence Gardshire**

Το 1953, ο Dr. Lawrence Gardshire κατασκεύασε ένα ηλιακό σπίτι με PCM, στο Νέο Μεξικό των Ηνωμένων Πολιτειών, βασισμένο στις αρχές σχεδιασμού της Dr. Maria Telkes. Το κτήριο ήταν διώροφο, κάθε όροφος είχε εμβαδόν δαπέδου 102 m<sup>2</sup> και στην οροφή ήταν τοποθετημένοι ηλιακοί συλλέκτες. Σε αντίθεση, όμως, με την Telkes, ο Gardshire εγκατέστησε τα δοχεία αποθήκευσης PCM δίπλα στους ηλιακούς συλλέκτες στην οροφή.

Επιπλέον, πρόσθεσε διφθορικό νάτριο Borex στο άλας του Glauber, σαν πηκτικό παράγοντα, για να ενισχύσει την στερεοποίηση του άλατος και να αποφευχθεί, όσο ήταν δυνατόν, ο διαχωρισμός. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη κατασκευή αντιμετώπισε τα ίδια προβλήματα με την κατασκευή της Telkes. Αυτό συνέβη με μεγαλύτερη καθυστέρηση, λόγω της αυξημένης διάρκειας ζωής του PCM, που προήλθε από την προσθήκη του διφθορικού νατρίου [36, 38].

#### **4.2.1.3 Dr J. W. Hodgins και Dr T. W. Hoffman**

Την επόμενη προσπάθεια κατασκευής ηλιακού σπιτιού με υλικά αλλαγής φάσης, επιχείρησαν το 1957, οι Καναδοί επιστήμονες J.W. Hodgins και T.W. Hoffman. Το κτήριο ήταν δύο ορόφων, συνολικής επιφάνειας 111 m<sup>2</sup>, με ενσωματωμένους 12 τόνους πυρηνωποιημένου άλατος Glauber, αναμεμιγμένο με πυριτικό νάτριο, ως παράγοντα πύκνωσης, και Chromate, ως ανασχετικό διάβρωσης. Ακολουθώντας τη φιλοσοφία της Maria Telkes, το PCM ήταν αποθηκευμένο σε κυλινδρικά δοχεία χάλυβα, διαμέτρου 100 mm και ύψους 600 mm, κατακόρυφης κατασκευής. Παρά τα θετικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τον εμπλουτισμό του άλατος Glauber, το πείραμα απέτυχε, εξαιτίας του εκφυλισμού των ιδιοτήτων του PCM.

Την δεκαετία του 1980, στις Ηνωμένες Πολιτείες, διεξήχθησαν μελέτες πάνω σε συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, με χρήση ποικίλων ένυδρων αλάτων ως PCM, οι οποίες έφεραν πολύ αισιόδοξα αποτελέσματα. Λαμπρό παράδειγμα αποτελεί το εγχείρημα του Bourdeau να κατασκευάσει ένα ηλιακό τοίχο από CaCl<sub>2</sub> x 6H<sub>2</sub>O, πάχους 8 εκατοστών, που απέδιδε αποτελεσματικότερα από ότι ένας κλασικός τοίχος 40 εκατοστών. Δυστυχώς, τα προβλήματα μηχανικής αντοχής και διάβρωσης εξακολούθησαν να υπάρχουν, γεγονός που επηρέασε σημαντικά τις μεταγενέστερες μελέτες.

Την ίδια περίοδο, στην Ευρώπη, όλο και περισσότεροι ενεργειακοί μηχανικοί και αρχιτέκτονες εστιάζουν το ενδιαφέρον τους στην κατασκευή παθητικών ηλιακών τοίχων, με πρωτοπόρους τον Γάλλο μηχανικό Félix Trombe και τον αρχιτέκτονα Jacques Michel. Από το 1980, αναπτύσσονται συνεχώς νέες τεχνικές εμβάπτισης του τσιμέντου, του γύψου και του κεραμικού, με υλικά PCM στην τοιχοποιία.

Τα PCM που βρήκαν εφαρμογή τη δεδομένη χρονική περίοδο, ήταν ανόργανα ένυδρα άλατα, οργανικά λιπαρά οξέα και εύτηκτα μείγματα, λιπαρές αλκοόλες και παραφινικοί υδρογονάνθρακες [36, 38].

#### **4.2.2 Ερευνητική δραστηριότητα**

Η αρχή της ερευνητικής δραστηριότητας στον τομέα της θερμικής αποθήκευσης με υλικά αλλαγής φάσης, σηματοδοτήθηκε από την ανάπτυξη του πρώτου συντονισμένου ερευνητικού προγράμματος, το 1971, με επικεφαλής τους κορυφαίους επιστήμονες S. Freedman, M. Telkes και M. Altman, στο Πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνιας. Στόχος ήταν η ανακάλυψη ενός συνόλου υλικών αλλαγής φάσης, τα οποία θα ήταν κατάλληλα για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, τόσο από λειτουργική, όσο και από οικονομική σκοπιά.

Στη συνέχεια, το έτος 1973 αποτέλεσε ορόσημο για την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής, εξαιτίας του αραβο-ισραηλινού πολέμου και του επακόλουθου αραβικού πετρελαϊκού εμπάργκο, που κατέστησε πολύ σαφές ότι η μελλοντική παροχή καυσίμου μπορεί εύκολα να διαταραχθεί, λόγω πολιτικών γεγονότων και εξάντλησης μιας σημαντικής πηγής καυσίμου. Από τότε ξεκινά η κυβερνητική χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων πάνω στα PCM, σε χώρες, όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, οι Η.Π.Α, η Γερμανία και η Γαλλία, όπως θα δούμε και στη συνέχεια.

##### **4.2.2.1 Η.Π.Α**

Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής πρωτοστάτησαν στην υλοποίηση του πρώτου, μεγάλου ερευνητικού προγράμματος, με επικεφαλής την ομάδα Dow Chemical, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν περίπου 20.000 δοκιμές πιθανών υλικών αλλαγής φάσης. Από αυτά, μόνο το 1% επιλέχθηκε για περαιτέρω έρευνα. Τα υλικά που επιλέχθηκαν ήταν μια σειρά ένυδρων αλάτων ομοιόμορφης τήξης και κοινά, οργανικά υλικά. Παράλληλα με τη δραστηριότητα της Dow Chemical, η Maria Telkes, στο Πανεπιστήμιο του Delaware, εστίασε τη μελέτη της στην ενίσχυση της μακροβιότητας του άλατος Glauber, κάνοντας χρήση διαφόρων πηκτικών μέσων για την πάχυνση του. Το αποτέλεσμα ήταν να αυξηθεί σημαντικά η διάρκεια ζωής των υλικών, όμως η μείωση στην αποθηκευτική τους ικανότητα εξακολουθούσε να υπάρχει μετά από περίπου 1000 κύκλους ψύξης-απόψυξης. Περαιτέρω έρευνα πραγματοποιήθηκε από τον Dr S.B Marks, από το Πανεπιστήμιο του Delaware, ο οποίος επιχείρησε να αναμείξει το άλας Glauber με ένα είδος πηλού, που θα ενεργούσε ως πηκτικό μέσο. Αυτό τελικά οδήγησε σε αυξημένους κύκλους αποθήκευσης θερμότητας. Στη συνέχεια, χρησιμοποίησε μια σειρά

από άλλες μορφές πηκτικών μέσων, όπως πολυμερές πολυκαρβοξυλικό οξύ, τα οποία αύξησαν την μακροβιότητα της θερμοαποθηκευτικής ικανότητας.

Για τη χρήση του άλατος Glauber ως υλικό PCM, ενδιαφέρθηκε και ο Dr P.G. Rueffel, ο οποίος πραγματοποίησε μια σειρά δοκιμών, χρησιμοποιώντας μια μήτρα τύρφης, ένα ιδανικό πηκτικό μέσο για την μακροβιότητα της θερμικής αποθήκευσης. Άλλες εναλλακτικές λύσεις με βάση την παραπάνω, έχουν ερευνηθεί από το Boardman Energy Systems, Η.Π.Α, όπου επιχειρήθηκε μείγμα PCM από άλας Glauber και κοινό τσιμέντο Portland, παρέχοντας μια συστολή των δύο υλικών κατά την έκχυση και σκλήρυνση. Τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν ότι πάνω από 2000 κύκλοι δεν οδήγησαν σε καμιά μείωση της θερμικής αποθήκευσης. Το σύστημα αυτό είναι χημικά σταθερό (ασφαλές) και παρέχει μεγάλες δυνατότητες, ως σύστημα θερμικής αποθήκευσης με PCM, για κτιριακές εφαρμογές. Περαιτέρω ανάλυση των φτηνών ένυδρων αλάτων συνεχίστηκε από το Πανεπιστήμιο του Delaware, στις ΗΠΑ, όπου κατασκευάστηκε ένα πειραματικό σπίτι πλήρους μεγέθους, το οποίο μελετήθηκε στη συνέχεια, από την Dow Chemical, με πρόσθετη χρηματοδότηση, το 1976 [36].

#### **4.2.2.2 Ευρώπη**

Στη Γερμανία, η έρευνα επικεντρώθηκε γύρω από τα ένυδρα άλατα, τις παραφίνες και κάποια εύτηκτα μείγματα για εφαρμογές κάτω των 100°C. Στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης, πραγματοποιήθηκαν σημαντικές έρευνες διαφόρων οργανικών και ένυδρων αλάτων, σε δοχεία σωλήνων με πτερύγια, που περιείχαν εναλλάκτες θερμότητας, σε συνδυασμό με σωλήνες θερμότητας.

Στη Σουηδία, παρατηρείται, επίσης, σημαντική πρόοδος της τεχνολογίας αποθήκευσης με PCM, που λαμβάνει χώρα στην Energiteknik Studsvik AB, με επικεφαλής τον Prof. H. Hedman. Η έρευνα εστιάζεται στην εφαρμογή ένυδρων αλάτων, με χρήση αέρα, ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας. Τα συστήματα ενσωματωμένων PCM σε μεταλλικές κάψουλες αποδείχθηκαν πιο αποτελεσματικά από τις δεξαμενές νερού και χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα για παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης σε σπίτια στη Δανία.

Επίσης, η Γαλλία έχει δείξει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σχετικά με την τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης με PCM και μέσω της έρευνας στο CNRS, στη Νίκαια, έχει κατασκευάσει πολλά κτίρια, που χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη τεχνολογία. Το CNRS αναπτύσσει, επίσης, έρευνα σχετικά με το κερύ παραφίνης ως PCM, μέσω δοκιμών, που ενσωματώνουν μείγματα μετάλλων, για να αυξήσουν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας.

Τέλος, το Ηνωμένο Βασίλειο με το Βρετανικό Κέντρο Ερευνών Garston, έχει εδώ και πολλά χρόνια πραγματοποιήσει έρευνα πάνω στην τεχνολογία αυτή. Οι A. Bromley, E. Mckey και J. Wilkins αποτελούν την ομάδα μελέτης θερμικής αποθήκευσης και έχουν διεξαγάγει έρευνα σε εφαρμογές θέρμανσης με αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας και ιδιαίτερα, με αποθήκευση σε πάγο. Μια μικρή ομάδα επιστημόνων, επίσης, στο Πανεπιστήμιο του Salford, πραγματοποίησε έρευνα για το ενυδατωμένο φωσφορικό νάτριο και το εξαένυδρο χλωριούχο ασβέστιο και μαζί με το Πανεπιστήμιο του Cardiff, στην Ουαλία, ανέπτυξε την τεχνολογία PCM με παραφίνη, ως μέσο αποθήκευσης [36].

#### **4.2.2.5 Απω Ανατολή (Ιαπωνία)**

Η Ιαπωνία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης με PCM, έχοντας ερευνητικές ομάδες μελέτης για πολλά χρόνια, με ισχυρή κυβερνητική υποστήριξη. Τα υλικά που κρίθηκαν ως τα πλέον επιτυχημένα, κατά τη διάρκεια έρευνας από την Electronics Corp. και την Tokyo Electric Power Co., ήταν τα ένυδρα νιτρικά άλατα, τα φωσφορικά άλατα, τα φθοριούχα άλατα και το χλωριούχο ασβέστιο. Η έρευνα μέχρι τη δεκαετία του 1970 επικεντρωνόταν στα συστήματα θέρμανσης με αποθήκευση θερμότητας με PCM, αν και πιο πρόσφατες εξελίξεις έχουν επέλθει και σε εφαρμογές ψύξης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, αρκετές νέες οργανώσεις, συμπεριλαμβανομένων της Nirron Pillar Packing Co., δημιούργησαν εξαένυδρο βρωμιούχο ασβέστιο ως PCM, μαζί με παράγοντες σχηματισμού πυρήνων. Άλλες, όπως η Kureha Chemical Industry Inventors, διεξήγαγαν έρευνα για το άλας του Glauber, ως PCM, για θέρμανση και ψύξη, χρησιμοποιώντας γύψο και άλλα ελαφρού βάρους, αδρανή υλικά, για τη σταθεροποίηση του [36].

### **4.3 Εφαρμογές PCM σε κτήρια**

Η εφαρμογή των PCM, στις κτηριακές εγκαταστάσεις, έχει δυο διαφορετικούς στόχους. Ο πρώτος αποσκοπεί στην αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των φυσικών πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια και ο νυχτερινός δροσισμός, ενώ ο δεύτερος στην βελτιστοποίηση της χρήσης των τεχνητών πηγών θέρμανσης ή ψύξης. Σε κάθε περίπτωση, η αποθήκευση της ενέργειας θα πρέπει να γίνεται έτσι, ώστε να ανταποκρίνεται στην υπάρχουσα ζήτηση και διαθεσιμότητα [39].

Διακρίνονται τρεις τρόποι χρήσης των PCM για θέρμανση και ψύξη:

1. χρήση στην τοιχοποιία
2. χρήση σε άλλα δομικά υλικά



### 3. χρήση σε θερμικές και ψυκτικές αποθηκευτικές μονάδες.

Οι πρώτες δύο χρήσεις αφορούν σε παθητικά συστήματα, καθώς η ζέστη ή το κρύο που έχουν αποθηκευτεί, εκλύονται αυτόματα, όταν η εξωτερική ή η εσωτερική θερμότητα αυξομειώνεται γύρω από το σημείο τήξης. Η τρίτη περίπτωση περιγράφει τα ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης, αφού η αποθηκευόμενη θερμότητα είναι θερμικά μονωμένη από το υπόλοιπο κτήριο και εκλύεται «κατά παραγγελία». Στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρουσιάζονται συγκεκριμένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με χρήση υλικών αλλαγής φάσης, που έχουν μελετηθεί και πραγματοποιηθεί στον κτιριακό τομέα [39].

#### **4.3.1 Γυψοσανίδα με PCM**

Οι γυψοσανίδες είναι φθηνές και ευρέως διαδεδομένες σε ένα πλήθος κτηριακών εφαρμογών, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ενσωμάτωση PCM μέσω καψουλών, μέσα σε αυτές. Οι γυψοσανίδες με PCM θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές γυψοσανίδες, κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή και της ανακαίνισης ενός κτιρίου. Είναι ικανές να παρέχουν στο κτίριο αποθήκευση θερμότητας, η οποία θα διανέμεται σε όλη του την έκταση, ενισχύοντας το παθητικό σύστημα και περιορίζοντας τα απαιτούμενα μέγιστα ηλεκτρικά φορτία για θέρμανση-ψύξη. Παρόλα αυτά, οι αρχές που διέπουν την αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε κατάλληλο στοιχείο. Μερικοί από τους επιστήμονες που μελέτησαν την ιδέα της ενίσχυσης της τοιχοποιίας με υλικά αλλαγής φάσης, με σκοπό την επίτευξη θερμικής άνεσης, ήταν οι Kedl, Stovall, Salyer, Sircar, Shapiro, Feldman, Tomilson, Stetiu και Feustel [11, 14, 27].

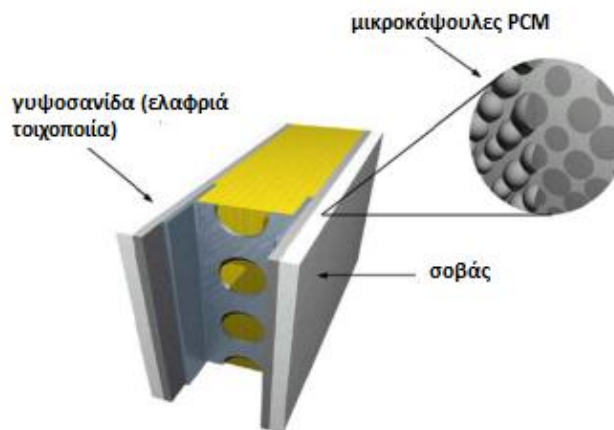
Οι Kedl, Stovall, Salyer και Sircar χρησιμοποίησαν διαποτισμένο τοίχο με κερί παραφίνης, σε εφαρμογές παθητικών ηλιακών συστημάτων. Ο Shapiro και οι συνεργάτες του, ανακάλυψαν μεθόδους για διαποτισμό γύψινου τοίχου και άλλων αρχιτεκτονικών υλικών με PCM. Μελέτησαν και ανέδειξαν διαφορετικούς τύπους PCM με τα χαρακτηριστικά τους, τις τεχνικές κατασκευής τους, τη θερμική τους απόδοση, καθώς και μερικές εφαρμογές τους σε κτηριακές εγκαταστάσεις. Ο Shapiro, επιπλέον, ανακάλυψε πολλαπλά PCM, κατάλληλα για εισαγωγή σε γύψινο τοίχο, με πιθανές εφαρμογές αυτών σε συστήματα θερμικής αποθήκευσης, στη Φλόριντα. Τα υλικά αυτά ήταν μείγματα μεθυλοεστέρων και μείγματα μικρής αλυσίδας λιπαρών οξέων. Παρά το γεγονός ότι τα υλικά αυτά είχαν σχετικά υψηλή λανθάνουσα θερμότητα, το θερμοκρασιακό εύρος, που απαιτούνταν για την επίτευξη της θερμικής αποθήκευσης, δεν ενέπιπτε επαρκώς εντός του εύρους της άνεσης, για κτίρια σε ζεστά κλίματα.

Ο Feldman και οι συνεργάτες του, διεξήγαγαν εκτενή έρευνα όσον αφορά στη χρήση και τη σταθερότητα των οργανικών συστατικών για τη αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας ,

συμπεριλαμβανομένων των λιπαρών οξέων (καπρικού, λαυρικού, παλμιτικού και στεατικού), του στεατικού και της πολυαιθυλενογλυκόλης 600. Επιπροσθέτως με τις μελέτες των ιδιοτήτων τους, διεξήχθη έρευνα στα υλικά, τα οποία συμπεριφέρονται ως απορροφητές PCM. Διάφορα υλικά εξετάστηκαν, συμπεριλαμβανομένων των διαφόρων τύπων σκυροδέματος και γύψου. Η χρήση της αποθηκευμένης λανθάνουσας θερμότητας πάνω από ένα άνετο, εσωτερικό θερμοκρασιακό , σε κτίρια, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοαποθηκευτικής ικανότητας της τάξης του 10-130%.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '80, εξετάστηκαν πολλαπλές μορφές από μεγάλες ποσότητες PCM, ενσωματωμένων σε κάψουλες, για εφαρμογές σε ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα. Ο Neepet εξέτασε το θερμικό δυναμικό μιας γυψοσανίδας, που είναι εμποτισμένη με λιπαρά οξέα και κεριά , ως PCM, και υπόκειται στην ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας του δωματίου, αλλά δεν φωτίζεται άμεσα από τον ήλιο. Οι θερμοκρασίες τήξης αυτών των PCM προσαρμόζονται με τη χρήση μείγματος διαφόρων συστατικών. Επιπλέον, ο Neepet διερεύνησε τρεις παραμέτρους της γυψοσανίδας PCM, οι οποίες είναι πιθανό να επηρεάζουν την παθητική απορρόφηση/απελευθέρωση ενέργειας, στη διάρκεια ενός ημερήσιου κύκλου: (1) τη θερμοκρασία τήξης του PCM, (2) το εύρος της θερμοκρασίας, κατά το οποίο η τήξη εμφανίζεται και (3) τη λανθάνουσα χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας της γυψοσανίδας. Η μέγιστη ημερήσια αποθήκευση ενέργειας εμφανίζεται, όταν η θερμοκρασία τήξης του PCM ισούται με την μέση θερμοκρασία της γυψοσανίδας, έχοντας παράλληλα ένα στενό εύρος μετάβασης.

Οι Stovall και Tomlinson εξέτασαν τη μετατόπιση των φορτίων θέρμανσης και ψύξης, σε ώρες χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, και έβγαλαν γενικά συμπεράσματα σχετικά με τις βέλτιστες ιδιότητες των PCM. Για γυψοσανίδες που θερμαίνονται με απορρόφηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, ο Drake έκρινε ότι η βέλτιστη θερμοκρασία τήξης είναι ανάλογη προς την απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια.

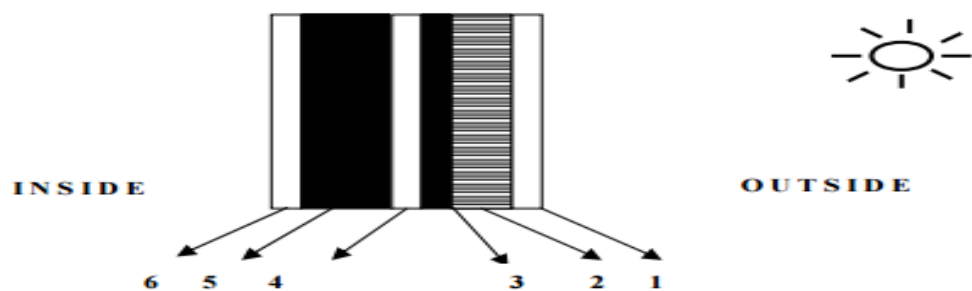


***Εικόνα 4.3.1.1: Γυψοσανίδα με ενσωματωμένες μικροκάψουλες με PCM [11]***

### 4.3.2 Τοίχος Trombe με PCM

Ο τοίχος Trombe αποτελεί θεμελιώδες παράδειγμα έμμεσου, ενεργειακού κέρδους, στις κτιριακές εφαρμογές. Πρόκειται για έναν τοίχο τοποθετημένο στην νότια πλευρά του κτηρίου, μπροστά από τον οποίο υπάρχει μια γυάλινη ή πλαστική, μονή ή διπλή, υαλοκατασκευή, σε απόσταση 4 ιντσών. Η ηλιακή ενέργεια αποθηκεύεται στο κενό που δημιουργείται ανάμεσα στον τοίχο και στην γυάλινη επιφάνεια. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου έχει μαύρο χρώμα, ώστε να απορροφά τη θερμότητα, η οποία μετέπειτα αποθηκεύεται στη μάζα του. Η θερμική συνεισφορά του τοίχου προς το χώρο που είναι εγκατεστημένος, ολοκληρώνεται μέσα σε ένα χρονικό διάστημα ωρών, ξεκινώντας τη στιγμή που η εσωτερική θερμοκρασία του τελευταίου γίνει μικρότερη αυτής στην επιφάνεια του τοίχου. Οι παραδοσιακοί τοίχοι Trombe βασίζονται στη λειτουργία τους στην εκμετάλλευση της αισθητής θερμότητας, που λαμβάνουν μέσω δέσμευσης της ηλιακής ενέργειας. Η χρήση υλικών αλλαγής φάσης σε συνεργασία με τους τοίχους Trombe, δίνει τη δυνατότητα μεγαλύτερης ενεργειακής αποθήκευσης ανά μονάδα μάζας, καθώς εκμεταλλεύεται, εκτός της αισθητής, και τη λανθάνουσα θερμότητα. Η αρχική αυτή σκέψη οδήγησε στην τροποποίηση των τοίχων Trombe, ενσωματώνοντας τα υλικά αλλαγής φάσης και δημιουργώντας τους αποκαλούμενους ηλιακούς τοίχους [14].

Οι ηλιακοί τοίχοι αποτελούνται από έξι στρώματα. Ξεκινώντας από την εξωτερική του πλευρά, ο ηλιακός τοίχος φέρει μία γυάλινη επιφάνεια, η οποία ακολουθείται από διαφανές μονωτικό υλικό. Τα δύο αυτά στρώματα επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία, μικρού μήκους κύματος, να διέλθει, αποτρέποντας, συγχρόνως, τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Το τρίτο στρώμα είναι το υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο βρίσκεται εντός ενός διαφανούς πλαστικού δοχείου από πολυεστέρα και απορροφά, κυρίως λανθάνουσα θερμότητα. Ακολουθεί ένα διάκενο από το οποίο διέρχεται και θερμαίνεται ο αέρας για τον αερισμό και οδηγείται στο χώρο. Τέλος, στην εσωτερική, πλέον, πλευρά του τοίχου, συναντάται η μόνωση και κατόπιν, ο σοβάς. Συνηθισμένα PCM για τοίχους Trombe είναι τα ένυδρα άλατα και οι υδρογονάνθρακες [39].



Εικόνα 4.3.2.1: Τα επιμέρους στοιχεία ενός ηλιακού τοίχου [39]

Πολλοί μελετητές διεξήγαγαν πειράματα, για να επιβεβαιώσουν τη θετική συμβολή των υλικών αλλαγής φάσης σε τοίχους Trombe.

Ο Bourdeau δοκίμασε δυο ηλιακούς τοίχους με χλωρίδιο του ασβεστίου (σημείου τήξης 29 °C), ως PCM. Τα αποτελέσματα των δοκιμών του έδειξαν ότι ο τοίχος Trombe με PCM, πάχους 8.1 cm, είχε ελαφρώς καλύτερες θερμικές επιδόσεις, σε σχέση με έναν κλασσικό, πάχους 40 cm.

Ο Knowler, με τη σειρά, του διεξήγαγε τις δικές του έρευνες, χρησιμοποιώντας παραφίνη εμπορίου, αναμεμιγμένη με μεταλλικά πρόσθετα, προς αύξηση της συνολικής αγωγιμότητας, άρα και απόδοσης, του τοίχου Trombe, στον οποίο ενσωματώθηκε [11].

Οι Buddhi και Sharma μελέτησαν την εκπομπή ηλιακής ακτινοβολίας μέσω PCM, για διαφορετικές θερμοκρασίες και ποικίλα πάχη. Ως υλικό αλλαγής φάσης χρησιμοποίησαν το στεατικό οξύ. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους απέδειξαν ότι η εκπομπή ακτινοβολίας είναι υψηλότερη μέσω PCM, παρά μέσω γυαλιού του ίδιου πάχους, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά, ως μονωτικά υλικά τοίχων ή ακόμη και παραθύρων [14].

Οι Stritih και Novak παρουσίασαν έναν ηλιακό τοίχο για αερισμό κτιρίων, ο οποίος απορροφούσε ηλιακή ενέργεια σε μαύρο κερί παραφίνης (σημείο τήξης 25-30°C ). Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκε για τη θέρμανση του αέρα και τον αερισμό του σπιτιού. Η αποτελεσματικότητά της απορρόφησης βρέθηκε να είναι 79%. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κατέδειξαν, τόσο την επιρροή του στρώματος PCM στο ποσό αποθηκευμένης θερμότητας αισθητής ή λανθάνουσας μορφής, όσο και την επιρροή του σημείου τήξης του υλικού αλλαγής φάσης στην τελική θερμοκρασία του αέρα. Από την ανάλυσή τους, προέκυψε ότι το βέλτιστο πάχος του στρώματος PCM, εντός του ηλιακού τοίχου, είναι 50mm, για την περίοδο θέρμανσης, και η θερμοκρασία τήξης μόλις μερικούς βαθμούς πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου [11].

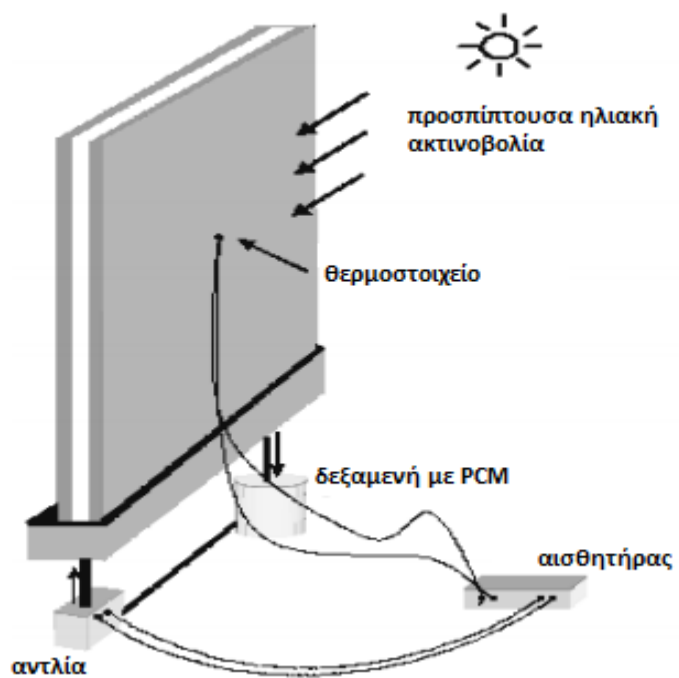
Πολλοί ήταν και οι Ιρακινοί ερευνητές που επικέντρωσαν τις μελέτες τους στους τοίχους Trombe με υλικά PCM, λόγω της ευνοϊκότητας του κλίματος, καθώς και της δυσμενούς οικονομικής κατάστασης της χώρας τους. Ένας από αυτούς ήταν ο Khalifa, ο οποίος διεξήγαγε υπολογιστική προσομοίωση ενός νότια προσανατολισμένου, τοίχου Trombe, στη Βαγδάτη. Ως υλικό αλλαγής φάσης, χρησιμοποίησε κερί παραφίνης και ένυδρα άλατα, ενσωματωμένα σε κάψουλες χαλκού. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε ήταν ότι 8cm του πειραματικού του τοίχου ήταν πιο αποδοτικά από 20cm κλασσικού τοίχου Trombe από σκυρόδεμα [40].

### 4.3.3 Υαλοπίνακες ενισχυμένοι με PCM

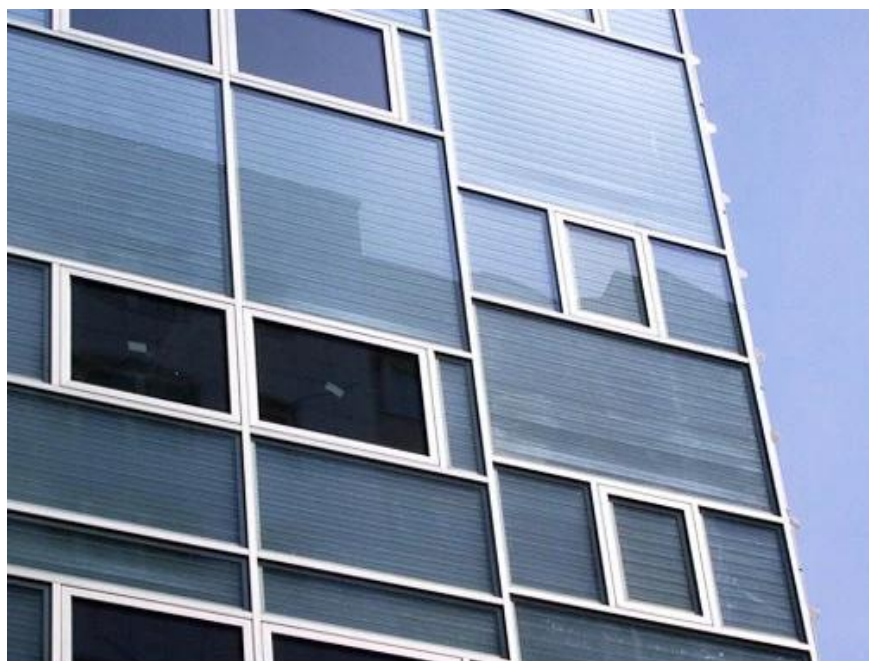
Ένα άλλο δομικό στοιχείο, στο οποίο είναι πολύ χρήσιμη η εφαρμογή των PCM, είναι τα παράθυρα. Μέσω των παραθύρων μεταφέρονται μεγάλα ποσά θερμότητας και ως εκ τούτου, συντελούν σε ένα μεγάλο ποσοστό στην ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη των χώρων. Με την ενσωμάτωση, λοιπόν, υλικών αλλαγής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

Ένα είδος ενεργειακού παραθύρου, παρουσίασε ο Weinläder, ο οποίος πρότεινε τη χρήση δύο υαλοπινάκων, με το ενδιάμεσο κενό τους πληρωμένο από υλικό PCM. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε ήταν ότι το ενεργειακό παράθυρο παρουσιάζει 30% λιγότερες θερμικές απώλειες από ένα διπλό υαλοπίνακα χωρίς PCM, όταν αυτό είναι τοποθετημένο σε πρόσοψη κτηρίου, νοτίου προσανατολισμού. Επίσης, παρατηρήθηκε 50% μείωση των θερμικών κερδών ηλιακής ενέργειας του κτιρίου, πράγμα πολύ σημαντικό για την επίτευξη θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του κτηρίου [27].

Ο Ismail, το 2001, πρότεινε ένα άλλο είδος ενεργειακού παραθύρου με μία κινούμενη «κουρτίνα» από PCM. Το συγκεκριμένο παράθυρο αποτελείται από δύο γυάλινες επιφάνειες, μεταξύ των οποίων υπάρχει κενό και από ένα αεραγωγό, στην πάνω γωνία. Τόσο η βάση, όσο και οι πλευρές του παραθύρου, είναι σφραγισμένες, με εξαίρεση δύο τρύπες στη βάση αυτού, οι οποίες συνδέονται, μέσω πλαστικού αγωγού, με μία αντλία και μία δεξαμενή γεμάτη με υλικό αλλαγής φάσης. Η αντλία συνδέεται και αυτή με τη δεξαμενή, που περιέχει το PCM σε υγρή μορφή και η λειτουργία της ελέγχεται από έναν αισθητήρα θερμοκρασίας. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας φτάσει μία προκαθορισμένη τιμή, τότε η αντλία ενεργοποιείται και μέσω αυτής ρέει υγρό PCM που γεμίζει το διάκενο μεταξύ των δύο γυάλινων επιφανειών. Λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας που επικρατεί στην εξωτερική επιφάνεια, το υλικό αλλαγής φάσης αρχίζει να στερεοποιείται και, με την πάροδο του χρόνου, το στερεό στρώμα που δημιουργεί αυξάνει σε πάχος. Μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία στερεοποίησης του PCM, η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου παραμένει σταθερή. Για να λειτουργήσει σωστά αυτό το σύστημα, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να μειωθεί η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου, θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να εξασφαλίζεται ότι η εξωτερική θερμοκρασία θα αρχίσει και πάλι να αυξάνεται, προτού στερεοποιηθεί πλήρως το υλικό αλλαγής φάσης. Το παραπάνω σύστημα θεωρείται βιώσιμο και θερμικά αποδοτικό. Η πλήρωση του διακένου με PCM συντελεί στο φιλτράρισμα της θερμικής ακτινοβολίας και μειώνει τις θερμικές απώλειες, αφού το μεγαλύτερο μέρος της μεταφερόμενης ενέργειας απορροφάται, κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Τέλος, έχει βρεθεί ότι η χρήση χρωματιστού PCM και ειδικότερα πράσινου χρώματος, μειώνει ακόμα περισσότερο τις θερμικές απώλειες [39].



**Εικόνα 4.3.3.1:** Σχηματική απεικόνιση του ενεργειακού παραθύρου με την κινούμενη «κουρτίνα» από PCM [39]



**Εικόνα 4.3.3.2:** Παράθυρο GlassX με ενσωματωμένο PCM

#### **4.3.4 Παντζούρια με PCM**

Τα παντζούρια, στα οποία ενσωματώνονται PCM, τοποθετούνται έξω από τα παράθυρα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ανοίγουν προς τα έξω και αφήνουν την εξωτερική πλευρά εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία, απορροφώντας θερμότητα, η οποία λιώνει το PCM. Τη νύχτα, τα παντζούρια και τα παράθυρα κλείνουν και η θερμότητα που έχει αποθηκευτεί στο PCM μεταφέρεται στα δωμάτια. Ο Buddhi και οι συνεργάτες του μελέτησαν τη θερμική απόδοση ενός δοκιμαστικού θαλάμου (1m x 1m x 1m) με και χωρίς υλικό αλλαγής φάσης. Ως υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το λαυρικό οξύ CG (με 68 σημείο τήξης 49°C). Με τον τρόπο αυτό, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας του θαλάμου, λόγω της παρουσίας PCM, αυξάνεται έως 4°C για 4 με 5 ώρες [11].



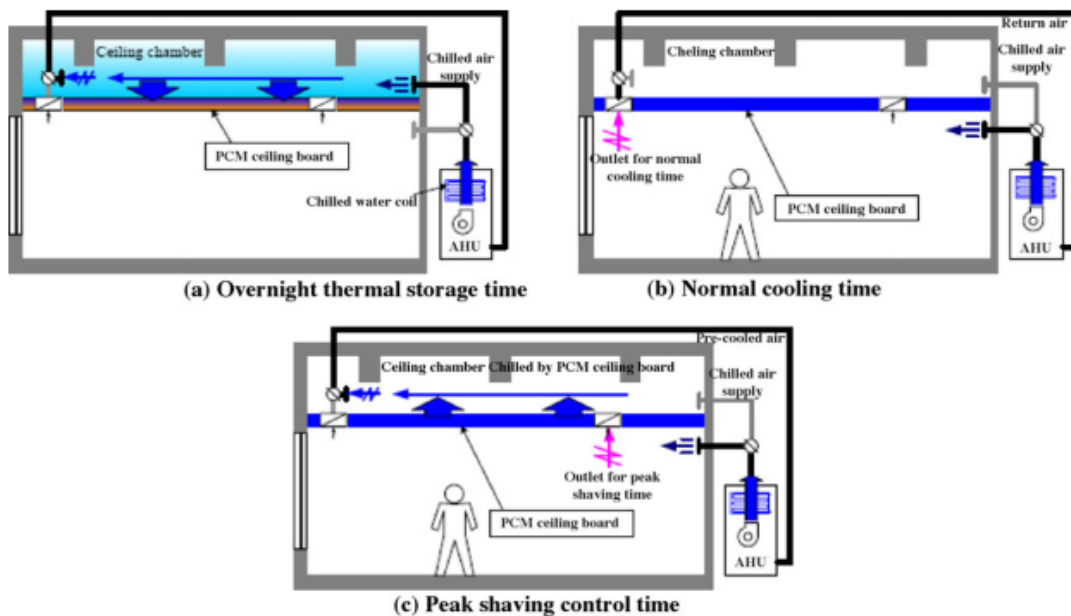
**Εικόνα 4.3.4.2: Παντζούρια με ενσωματωμένα PCM [11]**

#### **4.3.5 PCM σε ταβάνια/οροφές**

Οι σανίδες οροφής είναι το βασικό δομικό στοιχείο της στέγης, αφού είναι υπεύθυνες για την ψύξη και τη θέρμανση του κτηρίου. Η ενίσχυση τους με υλικά αλλαγής φάσης αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών.

Ένας από αυτούς ήταν ο Bruno, ο οποίος ανέπτυξε ένα σύστημα δροσισμού, κάνοντας χρήση υλικών PCM, στην οροφή ενός κτηρίου. Η αποθήκευση της ενέργειας πραγματοποιούταν σε ώρες χαμηλής ζήτησης, ενώ η αξιοποίηση της, κατά τις ώρες αιχμής. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είχε σημείο τήξης με εύρος 20-30°C, εύρος που προσφέρει την κατάλληλη θερμοκρασία θερμικής άνεσης στο συγκεκριμένο δωμάτιο.

Οι Kondo και Ibamoto σχεδίασαν σανίδες οροφής για ένα κτήριο γραφείων, μέσα στις οποίες ενσωμάτωσαν μικροκάψουλες PCM, με σημείο τήξης γύρω στους 25°C, για την εξομάλυνση των φορτίων αιχμής των συστημάτων κλιματισμού. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο ψυχρός αέρας από την κεντρική κλιματιστική μονάδα (Air-Handling Unit - AHU) ρέει στο χώρο της οροφής και ψύχει τις πλάκες PCM της οροφής. Κατά τη διάρκεια της κανονικής ψύξης, ο κρύος αέρας από την κλιματιστική συσκευή ρέει κατευθείαν στο εσωτερικό του δωματίου. Κατά τη διάρκεια των φορτίων αιχμής, ο αέρας από το δωμάτιο επιστρέφει στην κλιματιστική συσκευή, μέσω του θαλάμου της οροφής. Καθώς ο αέρας αυτός περνά μέσα από τις πλάκες PCM, ο θερμός αέρας του δωματίου προψύχεται, περνώντας πάνω από την ψυχρή σανίδα. Με αυτό τον τρόπο, διαπιστώθηκε ότι το φορτίο της κλιματιστικής συσκευής μειώνεται, κατά την περίοδο αιχμής. Το μόνο, ίσως, μειονέκτημα που παρουσιάζεται είναι ότι, εξαιτίας της αναφλεξιμότητάς τους, οι πλάκες οροφής απαιτούν βελτίωση [11]



**Εικόνα 4.3.5.1:** Απεικόνιση των διαφορετικών περιόδων λειτουργίας του συστήματος με τις σανίδες οροφής που σχεδίασαν οι Kondo και Ibamoto [11]



#### **4.3.6 PCM σε δάπεδα**

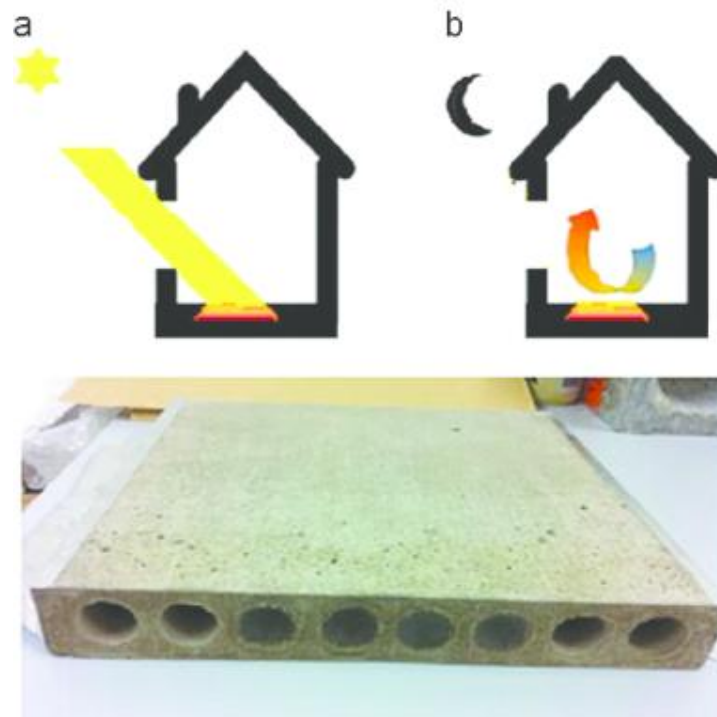
Μία άλλη εφαρμογή αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε παθητικά ηλιακά σπίτια είναι η ενσωμάτωση των υλικών αλλαγής φάσης σε σανίδες, πλακάκια και πάνελ δαπέδων. Η αποθήκευση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας στο δάπεδο, κατά τη διάρκεια της ημέρας, και η αποδέσμευση αυτής τη νύχτα, συντελεί στη μείωση της ενεργειακής ανάγκης για θερμική άνεση, ακόμη και σε σχετικά κρύα βράδια. Με κατάλληλη επιλογή υλικών, με θερμοκρασία αλλαγής φάσης κοντά σε αυτές της θερμικής άνεσης, τα PCM έχουν τη δυνατότητα να είναι αποτελεσματικά, κατά τη διάρκεια όλου του τυπικού έτους [41].

Ένα παράδειγμα παθητικού ηλιακού αιθρίου, με ενσωματωμένα υλικά PCM στο δάπεδο του, μελετήθηκε από τους Κ. Αντωνόπουλο, Μ. Σταματιάδου και Μ. Φούντη, στην Αθήνα (2009). Σκοπός της εφαρμογής ήταν η ανάδειξη της δυνατότητας εξοικονόμησης ενέργειας από την τοποθέτηση μαρμάρινων πλακιδίων, με ενσωματωμένο PCM στη μάζα τους και η συνακόλουθη μείωση της ετήσιας κατανάλωσης θέρμανσης. Στην μελέτη αυτή εξετάστηκαν τρία διαφορετικά είδη πλακιδίων: ένα συμβατικό και δύο που περιείχαν 10% και 20% PCM στη μάζα τους, ενώ η ανάλυση της εξοικονόμησης ενέργειας έγινε με τη χρήση της γνωστής μεθόδου SLR (Solar Load Ratio), προσαρμοσμένη να περιλαμβάνει την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Υπολογίστηκε ότι υπάρχει μία αύξηση της ηλιακής εξοικονόμησης, λόγω της προσθήκης του υλικού αλλαγής φάσης, περίπου 1,85% για τα πλακάκια με 10% PCM, και περίπου 3,75% για τα πλακάκια με 20% PCM στη μάζα τους. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η προσθήκη αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας στα δομικά στοιχεία μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στα θερμικά φορτία [41, 42].

Οι Athienities και Chen διερεύνησαν το μεταβατικό φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας σε ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης. Στόχος της μελέτης τους ήταν η επίδραση της επένδυσης του δαπέδου και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, τόσο στην κατανομή θερμοκρασίας δαπέδου, όσο και στην ενεργειακή κατανάλωση. Εξετάστηκαν χαλιά πλήρους ή μερικής κάλυψης, καθώς, επίσης, και επένδυση δαπέδου από σκληρό ξύλο πάνω από σκυρόδεμα ή από μείγμα σκυροδέματος-γύψου, ως μέσα θερμικής αποθήκευσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα για ένα υπαίθριο θάλαμο δοκιμών, αποκαλύπτουν ότι μία δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει στην επιφάνεια πρόσπτωσης της, τοπική θερμοκρασία επιφάνειας δαπέδου 8°C μεγαλύτερη από ότι στην σκιασμένη περιοχή. Η κάλυψη με χαλιά αυξάνει περαιτέρω αυτή τη θερμοκρασιακή διαφορά στους 15°C. Επιπλέον, έχει βρεθεί ότι με την αποθήκευση θερμότητας στη θερμική μάζα του δαπέδου, μειώνεται σημαντικά η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση (30% ή περισσότερο) [11].

Μια ακόμη μελέτη ήταν αυτή του Xu και των συνεργατών του, οι οποίοι χρησιμοποίησαν δάπεδο με ενσωματωμένο PCM σε παθητικά ηλιακά κτίρια και ανέπτυξε ένα μοντέλο που αναλύει την επιρροή διαφόρων παραγόντων στην θερμική απόδοση, όπως είναι το πάχος του στρώματος PCM, η

θερμοκρασία και η θερμότητα τήξης, καθώς και η θερμική αγωγιμότητα του PCM. Απέδειξαν ότι η θερμότητα τήξης και η θερμική αγωγιμότητα των υλικών πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 120kJ/kg και 0,5W/mK, αντίστοιχα, ενώ το πάχος της πλάκας PCM δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 20mm [43, 44].



**Εικόνα 4.3.6.1:** Πάνελ δαπέδου με PCM [44]

#### **4.3.7 Μπλοκ σκυροδέματος εμποτισμένα με PCM**

Μια άλλη δυνατότητα εφαρμογής των PCM, στις κατασκευές κτιρίων, είναι το ενισχυμένο σκυρόδεμα με PCM, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγάλη θερμική αδράνεια και μικρή απαιτούμενη μάζα.

Ο Collier και ο Grimmer έδειξαν ότι ένα μακροενσωματωμένο PCM, στερεωμένο σε τοιχοποιία από σκυρόδεμα, οδηγεί σε σημαντική αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Στη συνέχεια, ο Hawes παρουσίασε τη θερμική συμπεριφορά των PCM (BS, δωδεκανόλη (DD), παραφίνη (PAR), δεκατετρανόλη (TD)) σε διάφορους τύπους μπλοκ τσιμέντου..

Ο Hadjiena εφάρμοσε την τεχνική εμποτισμού σκυροδέματος με πενταένυδρο θειικό άλας νατρίου ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), ως PCM. Ο λόγος είναι η υψηλή θερμότητα τήξης του  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (περίπου 210 kJ/kg, 1,5 φορές μεγαλύτερη από της παραφίνης) και η καλή θερμική του αγωγιμότητα (περίπου 0,57 W/mK, δηλαδή περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη), που είναι ελκυστικές ιδιότητες αποθήκευσης ενός

υλικού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε σκυρόδεμα PCM. Χρησιμοποίησε πορώδες σκυρόδεμα και κατάφερε να καλύψει τους περισσότερους πορώδεις και τριχοειδείς χώρους του μπετόν έως και 60%. Αυτή η τιμή μειώνεται κατά 10% μετά από επαναλαμβανόμενους θερμικούς κύκλους των δειγμάτων [14].

#### **4.3.8 Ενσωμάτωση PCM σε Τούβλα**

Παρά τις αναρίθμητες έρευνες που έχουν διεξαχθεί για την ενσωμάτωση των υλικών αλλαγής φάσης σε διάφορα δομικά υλικά, σχεδόν καμιά δεν αφορά στην εφαρμογή τους σε κατασκευές από τούβλο, που είναι οι πλέον διαδεδομένες στις Μεσογειακές χώρες [45].

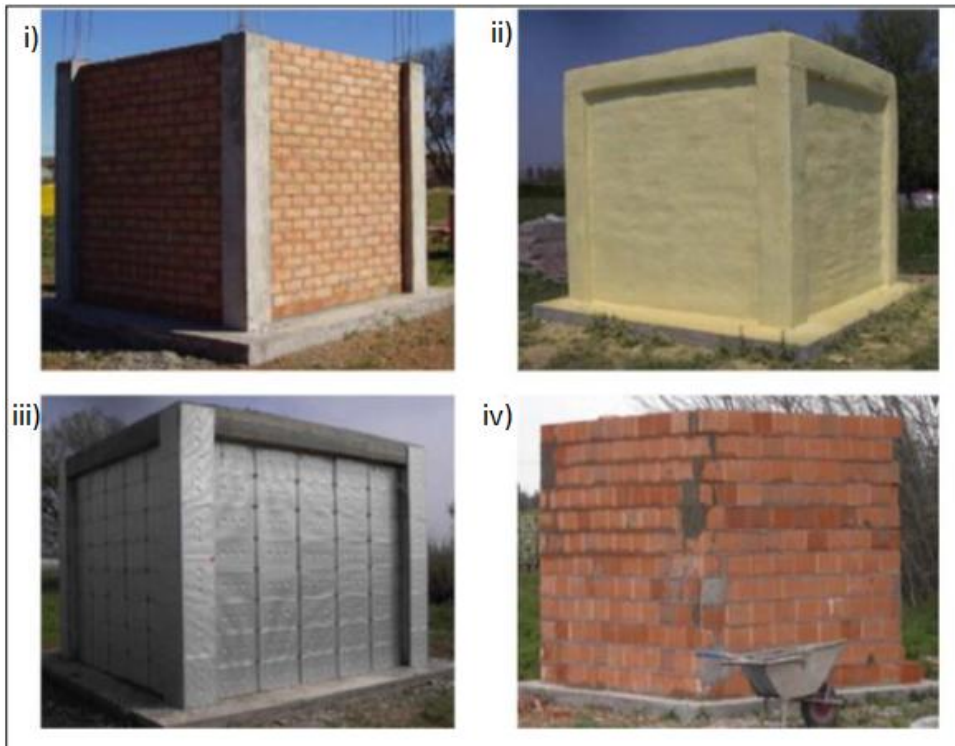
Ο Alawadhi, όμως, επιχείρησε να μελετήσει αριθμητικά την εισαγωγή των PCM στα τούβλα, σε περιοχές με θερμό κλίμα, για ψύξη. Ο στόχος του ήταν να χρησιμοποιήσει τα ενισχυμένα τούβλα, ως αποθήκες λανθάνουσας θερμότητας, προκειμένου να μειωθεί η εισερχόμενη στο χώρο θερμότητα, κατά την διάρκεια της ημέρας, και να αυξηθεί τη νύχτα, ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία. Το μοντέλο που εφάρμοσε αποτελούταν από τούβλα με κυλινδρικές οπές, πληρωμένες με υλικό PCM. Η θερμική απόδοση του παραπάνω μοντέλου εκτιμήθηκε σε σύγκριση με αυτήν τυπικού τοίχου από τούβλο. Επιπλέον, εξετάζοντας την επίδραση ποικίλων σχεδιαστικών παραμέτρων, όπως η ποσότητα, το είδος και η θέση του υλικού, κατέληξε ότι τοποθετώντας τρεις κυλίνδρους πληρωμένους με ν-εικοσαίνη στον άξονα συμμετρίας του τούβλου, επιτυγχάνεται η βέλτιστη μείωση ροής θερμότητας κατά 17.55% [46].

Ο Zhang και η ομάδα του, υλοποίησαν ένα μοντέλο θερμικής αγωγιμότητας για την αξιολόγηση της θερμικής απόκρισης ενός τοίχου από τούβλα, εμπλουτισμένα με υλικά PCM, κάτω από συνθήκες μεταβαλλόμενων εξωτερικών θερμοκρασιών. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την χρησιμότητα των PCM στην θερμομόνωση, στην υστέρηση θερμοκρασίας, αλλά και στη θερμική άνεση.

Ο Silva και οι συνεργάτες του, εξέτασαν τις προοπτικές ενσωμάτωσης παραφίνης σε μακροκάψουλες, εντός ενός τυπικού πορτογαλικού τοίχου από τούβλα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενσωμάτωση PCM συνεισφέρει στην εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων του εσωτερικού χώρου, μειώνοντας το θερμικό πλάτος από 5 σε 10°C και αυξάνοντας την χρονική καθυστέρηση περίπου σε 3 ώρες [26].



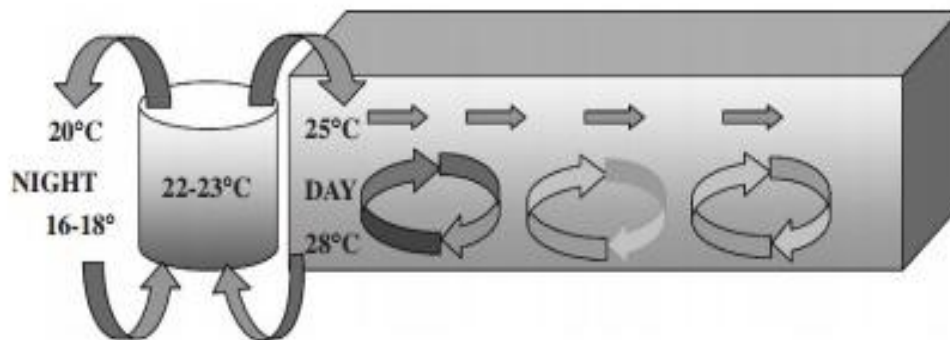
***Εικόνα 4.3.8.1: Τούβλα από πηλό με ενσωματωμένες μακροκάψουλες PCM [47]***



***Εικόνα 4.3.8.2: (i) Θάλαμος από τούβλο (ii) Θάλαμος από τούβλο με πολυουρεθάνη (iii) Θάλαμος από τούβλο με RT27 και πολυουρεθάνη (iv) θάλαμος με κυψελιδικό τούβλο [45]***

#### 4.3.9 Φυσική Ψύξη (Free Cooling)

Η τεχνική του Free Cooling, που αποτελεί μια μορφή κλιματισμού, αναπτύχθηκε πρώτη φορά από τον Zalba, στο Πανεπιστήμιο της Ζαραγόσα, στην Ισπανία. Αντικείμενο της έρευνας του αποτέλεσε ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης για τη μελέτη των υλικών αλλαγής φάσης με θερμοκρασία τήξης μεταξύ των 20 και 25°C, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3.9.1.



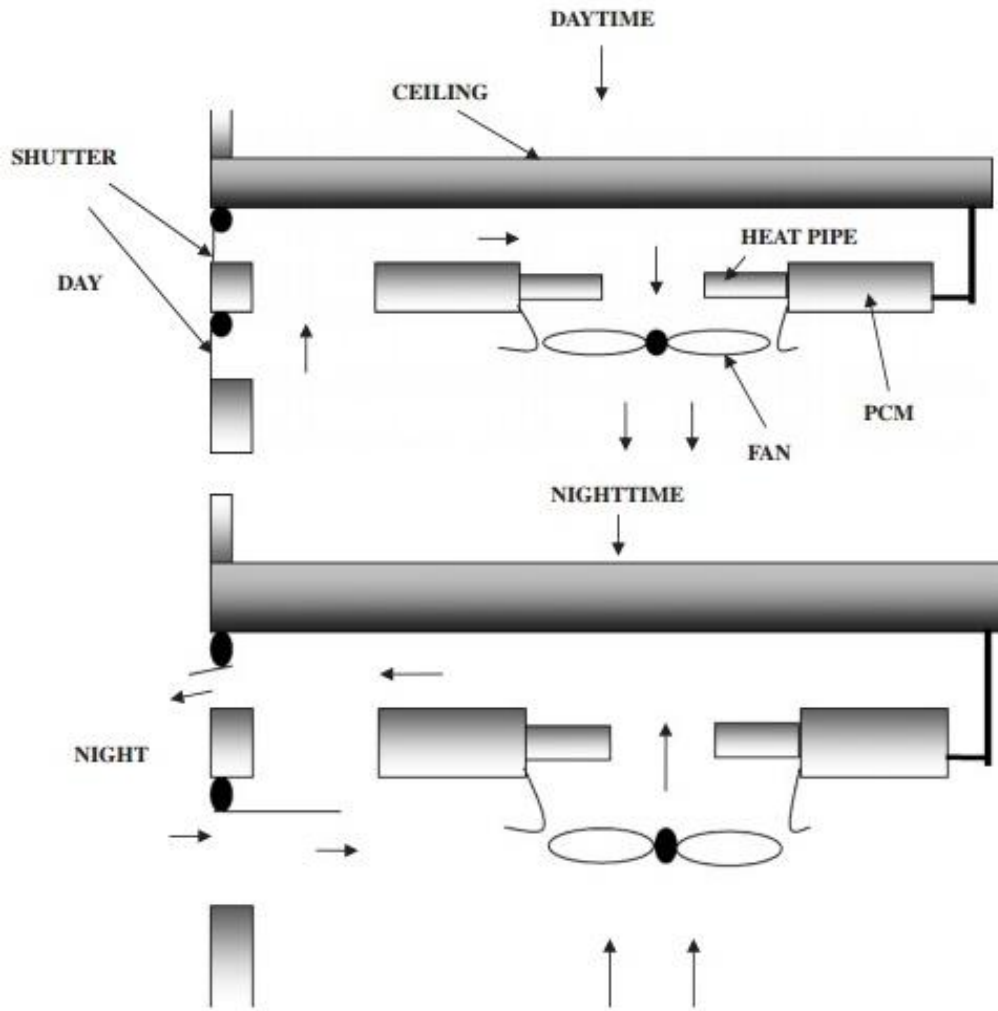
*Εικόνα 4.3.9.1: Λειτουργία του free cooling[39]*

Αυτό το θερμοκρασιακό εύρος θεωρείται το πλέον κατάλληλο για την τεχνική της φυσικής ψύξης, καθώς οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος, τη νύχτα, συνήθως πέφτουν κάτω από τους 20-25°C, και έτσι είναι ικανές να ψύχουν τον αέρα, στα κτήρια. Η εγκατάσταση του Free Cooling αποθηκεύει το κρύο, κατά την διάρκεια της νύχτας, και το αποδίδει την ημέρα. Για να λειτουργήσει όμως ικανοποιητικά απαιτεί κλίματα, όπου η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην ημέρα και την νύχτα, τους καλοκαιρινούς μήνες, να είναι μεγαλύτερη από 15°C.

Μια προσέγγιση, που έγινε στο Πανεπιστήμιο του Nottingham, ανέδειξε τη δυνατότητα αντικατάστασης ενός πλήρους συστήματος κλιματισμού με ένα νέο νυχτερινό σύστημα ψύξης. Το σύστημα αυτό, τοποθετείται στην οροφή και διαθέτει ανεμιστήρες που ρίχνουν αέρα στα εκτεθειμένα άκρα σωλήνων θέρμανσης. Το άλλο άκρο των σωλήνων αυτών, είναι ένα στοιχείο αποθήκευσης PCM. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο ζεστός αέρας, που παράγεται στο δωμάτιο, απάγεται από το PCM. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, αντιστρέφονται οι λεπίδες του ανεμιστήρα, έτσι ώστε ο κρύος αέρας από έξω να περάσει πάνω από τις σωληνώσεις θέρμανσης και να αφαιρέσει την αποθηκευμένη θερμότητα από το PCM. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται κυκλικά, κάθε μέρα.

Οι θερμοκρασίες τήξης και στερεοποίησης του PCM είναι περίπου 22 και 20°C, αντίστοιχα. Η πλήρης τήξη ολοκληρώνεται σε μία περίοδο 8 περίπου ωρών, όταν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του PCM

και του αέρα είναι 2°C και σε διάστημα 3 ωρών, όταν η διαφορά τους είναι 3,5°C. Οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας είναι 80 και 200W ανά συσκευή, αντίστοιχα, ή 800 και 2000W για ένα δωμάτιο, με 10 συσκευές [39].

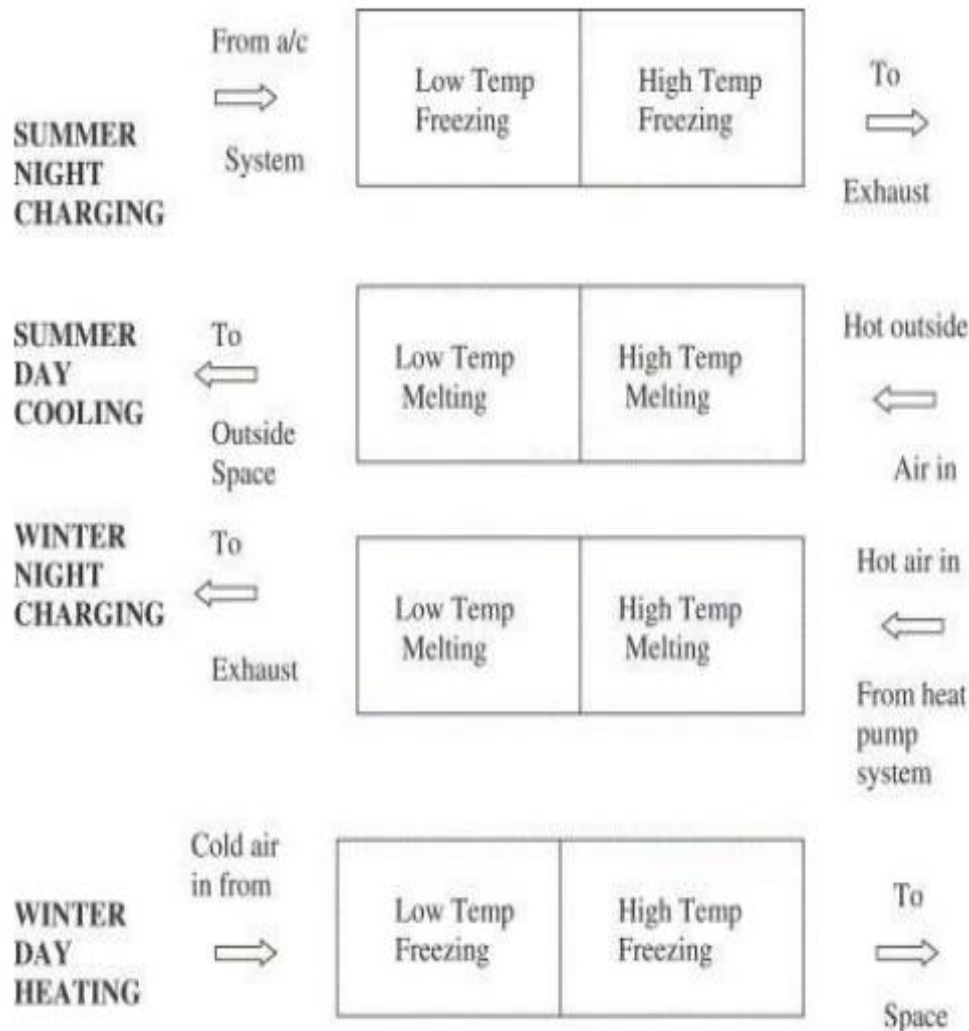


*Εικόνα 4.3.9.2: Σχεδιασμός του συστήματος free cooling όπως προτάθηκε από το πανεπιστήμιο του Nottingham [39]*

#### **4.3.10 Συνδυασμένο σύστημα ψύξης και θέρμανσης με PCM**

Το Κέντρο Ανανεώσιμης Ενέργειας (SEC), στο UniSA, άρχισε τις εργασίες με PCM, στα μέσα της δεκαετίας του 1990, με την ανάπτυξη μιας μονάδας αποθήκευσης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, τόσο για τη θέρμανση, όσο και για την ψύξη χώρων. Η μονάδα αυτή αποτελείται από δύο διαφορετικά PCM, ενσωματωμένα σε ένα σύστημα ψυκτικών αντλιών θερμότητας αντίστροφου κύκλου, που χρησιμοποιεί

ηλεκτρική ενέργεια εκτός αιχμής. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην ιδέα της φόρτισης, κατά τη διάρκεια της νύχτας, και της χρησιμοποίησής της, κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε περιόδους θέρμανσης και ψύξης, όπως φανερώνει η ακόλουθη σχηματική διάταξη της εικόνας 4.3.10.1.



**Εικόνα 4.3.10.1:** Διαδικασίες νυχτερινής φόρτισης και ημερήσιας αξιοποίησης τόσο για θερμές όσο και για ψυχρές εποχές [39]

Το σημείο τήξης/ψύξης του πρώτου υλικού είναι κάτω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης, ενώ το δεύτερο υλικό έχει σημείο τήξης/ψύξης πάνω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η ροή του αέρα ρυθμίζεται, έτσι ώστε το σύστημα θέρμανσης να αποθηκεύει θερμότητα τη νύχτα (με την τήξη και των δύο υλικών), και να την απελευθερώνει σε θερμοκρασία υψηλότερη από τις συνθήκες θερμικής άνεσης (μέσω της πήξης), κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το καλοκαίρι, η

κατεύθυνση ροής του αέρα αντιστρέφεται και το σύστημα αποθηκεύει ψυκτική ενέργεια, τη νύχτα, και απελευθερώνει το δροσερό αέρα κάτω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης, τη μέρα.

Το ποσό μείωσης της απαιτούμενης ικανότητας του κλιματιστικού, καθώς και το ποσό των θερμικών και ψυκτικών φορτίων που μεταφέρονται εκτός των ωρών αιχμής, υπολογίστηκαν με τη χρήση ενός υπολογιστικού μοντέλου για το σύστημα αποθήκευσης. Επίσης, υπολογίστηκε και η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας. Χρησιμοποιώντας ένα θερμικό σύστημα αποθήκευσης που περιέχει δύο διαφορετικά PCM μπορεί κάποιος να μειώσει την απαιτούμενη ικανότητα και το αρχικό κόστος του κλιματιστικού για μια κατοικία. Επίσης, μπορεί να μετατοπίσει ένα μέρος των θερμικών και ψυκτικών φορτίων, εκτός των ωρών αιχμής, όπου το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερο. Οι υπολογισμοί για ένα τυπικό σπίτι, στην Αδελαΐδα, έδειξαν ότι ένα σύστημα αποθήκευσης, που αποτελείται από 100 kg PCM θερμοκρασίας 29°C και 80kg PCM, θερμοκρασίας 18°C, μείωσε το ονομαστικό ποσοστό του απαιτούμενου φορτίου, για το κλιματιστικό, στο 50% του συνολικού φορτίου. Επίσης, το ετήσιο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκε κατά 32%, λόγω της μετατόπισης του φορτίου σε περίοδο εκτός αιχμής. Η εταιρεία κοινής ωφέλειας θα μπορούσε να επωφεληθεί από την μετατόπιση του 52% και 41% των φορτίων κλιματισμού, κατά τη διάρκεια των ψυχρών και θερμών εποχών, αντίστοιχα, αν το προτεινόμενο σύστημα αποθήκευσης χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα [39].



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης**

### **5.1 Μέθοδοι Μέτρησης των ιδιοτήτων των PCM**

Η διαδικασία επιλογής του κατάλληλου υλικού αλλαγής φάσης είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, αλλά και ιδιαίτερα σημαντική, για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Το υποψήφιο PCM θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από κατάλληλη θερμοκρασία τήξης και να διαθέτει την επιθυμητή θερμότητα τήξης και θερμική αγωγιμότητα, που ορίζει η εκάστοτε πρακτική εφαρμογή [48]. Συνεπώς, η δυνατότητα μέτρησης των θερμικών ιδιοτήτων των PCM είναι απαραίτητη, για τον τελικό σχεδιασμό ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας [43]. Έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι μέτρησης, αλλά οι πιο ευρέως διαδεδομένες είναι οι εξής:

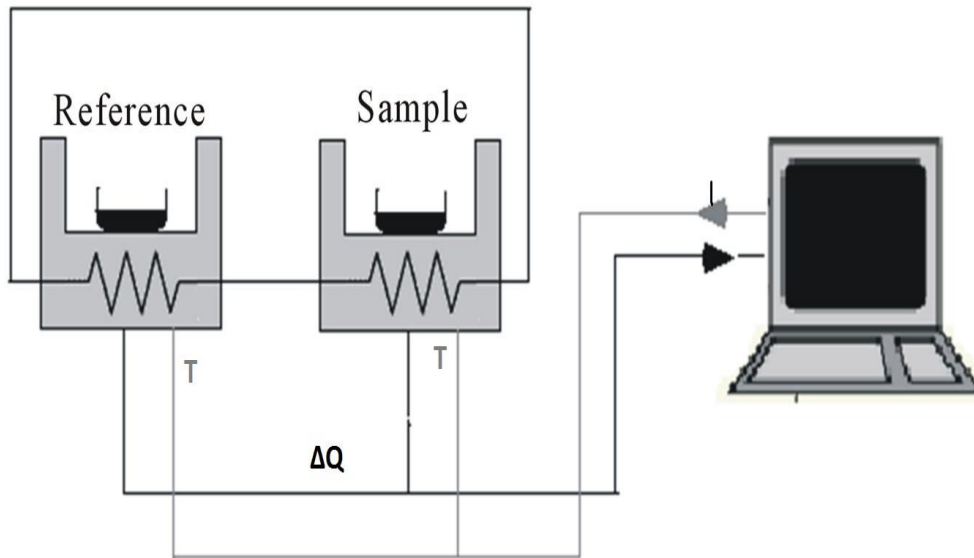
1. Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης-DSC-Differential Scanning Calorimetry
2. Διαφορική Θερμική Ανάλυση-DTA-Differential Thermal Analysis
3. Μέθοδος T-History

#### **5.1.1 Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC)**

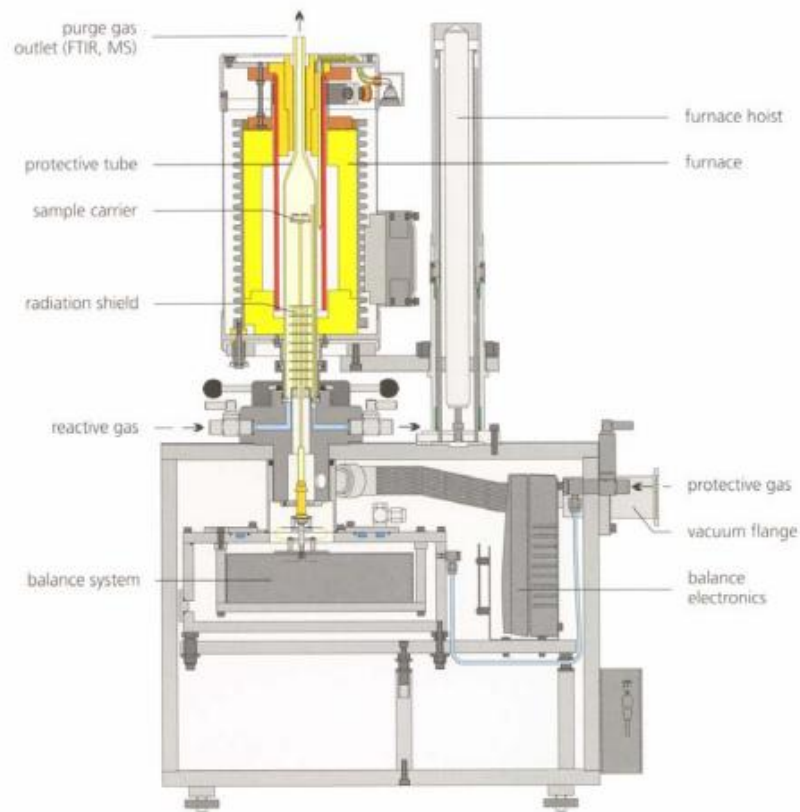
Η μέθοδος Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης (DSC) είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική, για τη θερμική ανάλυση ενός PCM, καθώς παρέχει τις ενθαλπίες τήξης/στερεοποίησης, τις θερμοκρασίες τήξης/στερεοποίησης, την ειδική θερμότητα των υπό μελέτη υλικών και άλλες θερμικές ιδιότητες. Αυτή η μέθοδος ανιχνεύει τη διαφορά του ποσού της θερμότητας, που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας ενός δείγματος PCM και ενός υλικού αναφοράς (με γνωστές θερμοφυσικές ιδιότητες), όταν αυτά υποβάλλονται σε ένα ελεγχόμενο πρόγραμμα θερμοκρασίας. Η χρήση του δείγματος αναφοράς αποσκοπεί στον υπολογισμό της ενέργειας που αποθηκεύεται στο υπό μελέτη δείγμα, κάτι που υπολογίζεται μέσω των διαφορών στα μεταξύ τους σήματα [26]. Η τεχνική DSC μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση θερμικών ιδιοτήτων PCM γυψοσανίδων, δίνοντας τη δυνατότητα υπολογισμού, όχι μόνο της θερμοκρασίας και της θερμότητας τήξης, αλλά και της κατανομής του PCM μέσα στη γυψοσανίδα και της επιρροής των πολλαπλών θερμικών κύκλων στις θερμικές ιδιότητες του PCM [43].

Υπάρχουν δυο διαφορετικά είδη θερμοκρασιακών προγραμμάτων: η δυναμική μέθοδος, κατά την οποία ο ρυθμός θέρμανσης ή ψύξης των δυο δοκιμίων είναι σταθερός και η βηματική, η οποία πραγματοποιείται σταδιακά σε ισόθερμα βήματα. Και οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και

μειονεκτήματα. Πρόσφατη έρευνα, όμως, δείχνει τη πρώτη ως την πλέον χρησιμοποιούμενη. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Castellon, η βηματική μέθοδος παρέχει υψηλότερη ακρίβεια, συγκρίνοντας τις καμπύλες θέρμανσης και ψύξης και μικρότερη ευαισθησία σε μεταβολή των παραμέτρων μέτρησης απ' ό τι η δυναμική μέθοδος. Το μειονέκτημα της βηματικής μεθόδου είναι η πολυπλοκότητα του προγραμματισμού, καθώς και οι χρονοβόρες μετρήσεις και εκτιμήσεις των καμπυλών [49, 50].



***Εικόνα 5.1.1: Σχηματική απεικόνιση κατά την εφαρμογή της μεθόδου DSC[51]***



***Εικόνα 5.1.1.2 Σχηματική απεικόνιση διάταξης DSC***

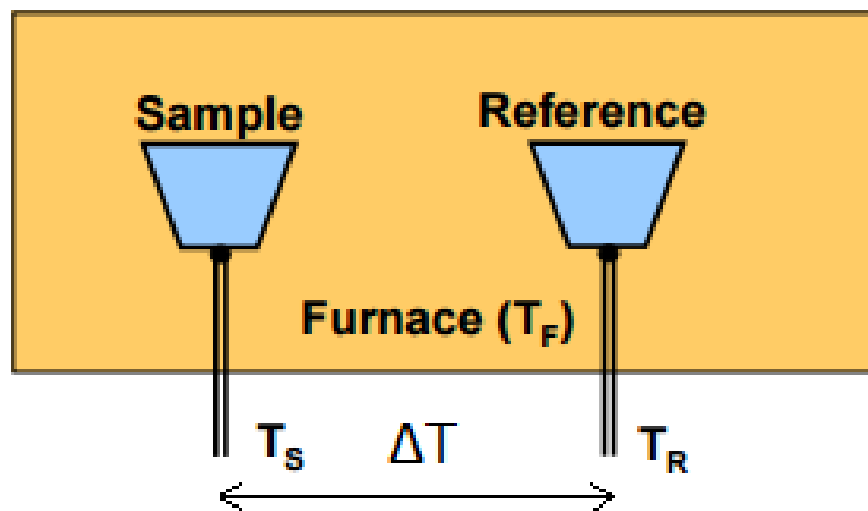


***Εικόνα 5.1.1.3: Μορφή εμπορικού θερμιδόμετρου DSC από τη ZAE Βαυερν***

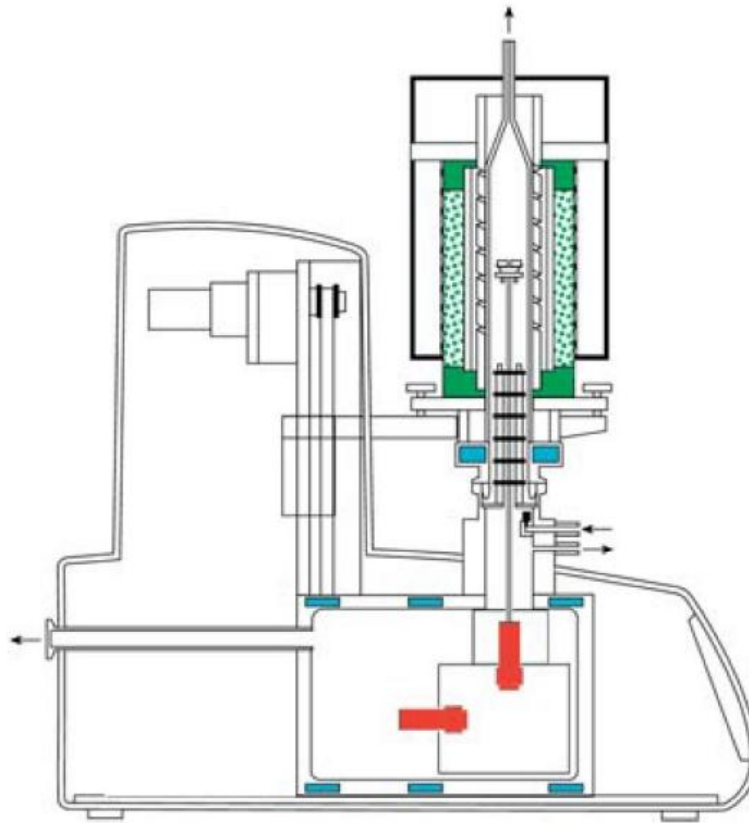
### 5.1.2 Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)

Η μέθοδος DTA είναι μία εναλλακτική τεχνική της DSC. Αντίθετα με την DSC, όπου μετράται η απαιτούμενη ενέργεια για τη διατήρηση δείγματος και υλικού αναφοράς, στην ίδια θερμοκρασία, στην DTA υπολογίζεται η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δείγματος και υλικού αναφοράς, όταν και στα δύο προστίθενται ίδια ποσά θερμότητας. Τοιουτοτρόπως, μπορούν να ελεγχθούν η αλλαγή φάσης και διάφορες θερμικές ιδιότητες [13]. Η DSC και η DTA παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά και πολλά κοινά μειονεκτήματα, με τη δεύτερη να χρησιμοποιείται, ως επί το πλείστον, για πιο ποιοτικές μετρήσεις [49].

Στη Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA), σε γενικές γραμμές, η συσκευή περιλαμβάνει δύο κοιλότητες ευρισκόμενες σε ένα φούρνο, στις οποίες τοποθετούνται το δείγμα και το υλικό αναφοράς, θερμοστοιχεία που συνδέονται με αυτά τα δύο υλικά και ανιχνεύουν τις αλλαγές αυτών και ένα σύστημα καταγραφής των αποκρίσεων [52].



*Εικόνα 5.1.2.1: Σχηματική απεικόνιση κατά την εφαρμογή της μεθόδου DTA*



***Εικόνα 5.1.2.2: Σχηματική απεικόνιση διάταξης DTA***

### **5.1.3 Μέθοδος T-History**

Παρά την ανάπτυξη και την ευρεία χρήση των παραπάνω μεθόδων, το κοινό μειονέκτημα τους, του μικρού μεγέθους του δείγματος (από 10μl έως 40μl PCM ), και της συνεπαγόμενης μη αντιπροσωπευτικότητας του υλικού από το οποίο προέρχεται, επέβαλε την ανάγκη ανάπτυξης μια νέας βελτιωμένης μεθόδου. Έτσι, το 1999, ο Zhang Yinping και η ομάδα του, ανέπτυξαν την μέθοδο T-history, η οποία επιτρέπει την θερμική ανάλυση περισσότερων, αλλά και μεγαλύτερων δειγμάτων υλικού PCM (15 ml έως 30 ml), ταυτόχρονα. Η μέθοδος αυτή, βασίζεται στην καταγραφή των καμπυλών θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, τόσο του υλικού αλλαγής φάσης, όσο και του υλικού αναφοράς, που συνήθως είναι το νερό [53]. Αποτελεί μια απλή και οικονομική διαδικασία καθορισμού μεγεθών, όπως το σημείο τήξης, η θερμότητα τήξης, η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα των υλικών αλλαγής φάσης και χαρακτηρίζεται ως η μέθοδος “επανάσταση” στον τομέα της θερμικής ανάλυσης των ιδιοτήτων των υλικών PCM [50].

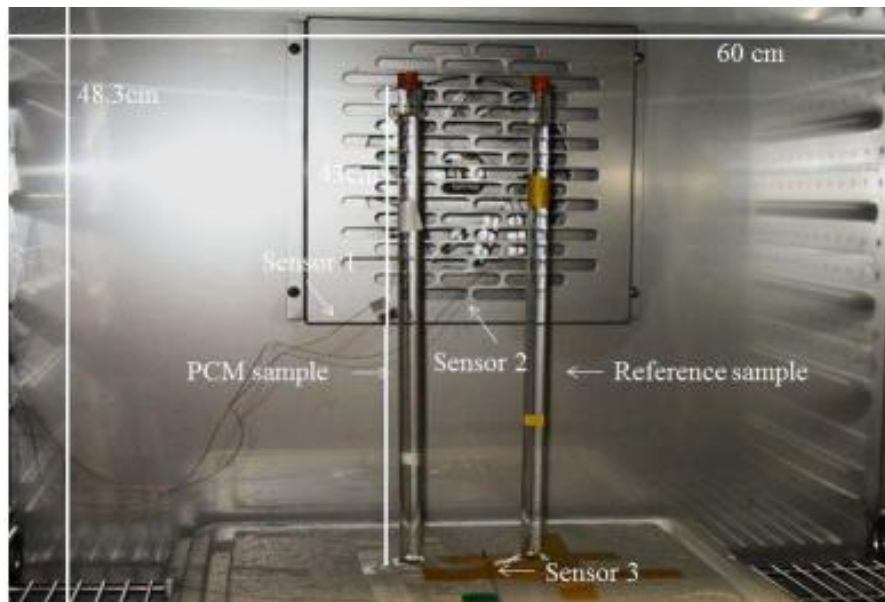
Η εφαρμογή της μεθόδου T-History, όπως προτάθηκε από τον Zhang Yinping το 1999, απαιτεί τουλάχιστον δύο δοκιμαστικούς σωλήνες, ο ένας εκ των οποίων περιέχει το εξεταζόμενο PCM και ο άλλος ένα υλικό αναφοράς, του οποίου οι θερμικές ιδιότητες και ειδικότερα, η αισθητή και λανθάνουσα θερμοχωρητικότητα,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

Ο αριθμός Biot δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{U \cdot r}{2 \cdot k} \ll 0,1 \quad (5.1.3.1)$$

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

Τα δείγματα μέσα στους σωλήνες θερμαίνονται σε μία θερμοκρασία πάνω από το σημείο τήξης του υλικού αλλαγής φάσης και κατόπιν, εκτίθενται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, που είναι μικρότερη του σημείου τήξης. Από τη στιγμή αυτή και καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας ψύξης του δείγματος, καταγράφονται σε υπολογιστή οι θερμοκρασίες των δειγμάτων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, προκύπτουν οι καμπύλες θερμοκρασίας-χρόνου για το PCM, το υλικό αναφοράς και τον αέρα του περιβάλλοντος, με βάση τις οποίες αξιολογούνται στη συνέχεια οι θερμικές ιδιότητες του PCM. Αντίστοιχα, το πείραμα μπορεί να εκτελεστεί και για θέρμανση του δείγματος [54].



*Εικόνα 5.1.3.1: Πειραματική διάταξη της μεθόδου T-history εντός του πειραματικού θαλάμου KMF 115 [54]*

Μερικά πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής ,συγκριτικά με τις προηγούμενες μεθόδους, είναι η απλότητά της, το χαμηλό κόστος της, καθώς και το γεγονός ότι μπορούμε να έχουμε δείγματα μεγάλου μεγέθους. Το μεγάλο μέγεθος δείγματος επιτρέπει να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα για ετερογενή μείγματα, τα οποία δεν θα μπορούσαν να έχουν αντιπροσωπευτική σύσταση σε πολύ μικρό μέγεθος. Επιπλέον λόγω μεγάλου δείγματος μπορούμε να έχουμε πιο αντιπροσωπευτική τιμή του βαθμού υπόψυξης [50].

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

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης**

Η ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας σε συστήματα, στα οποία λαμβάνει χώρα η διαδικασία αλλαγής φάσης, είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία, συγκρινόμενη, ειδικά, με την ανάλυση μονοφασικών συστημάτων. Αυτό οφείλεται σε μια σειρά παραγόντων που χαρακτηρίζει τα συστήματα αυτά, και δυσχεραίνει την δυνατότητα πρόβλεψη της συμπεριφορά τους, με την πάροδο του χρόνου [32]. Μερικοί από αυτούς είναι:

1. Η μη γραμμικότητα του προβλήματος, η οποία οφείλεται στην κίνηση της διεπιφάνειας στερεού-υγρού, κατά την αλλαγή φάσης
2. Οι διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM στις δύο φάσεις
3. Η ανεπαρκής γνώση της διεργασίας μεταφοράς θερμότητας στη διεπιφάνεια στερεού-υγρού
4. Η αβεβαιότητα για τη θερμική αντίσταση στη διεπιφάνεια δοχείου και στερεού PCM
5. Η μεταβολή του όγκου του υλικού αλλαγής φάσης, κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης
6. Η ύπαρξη κενών σε ένα στερεό

Η αλλαγή φάσης ενός υλικού περιγράφεται, μαθηματικά, από ένα συγκεκριμένο είδος προβλημάτων συνοριακών συνθηκών, μερικών διαφορικών εξισώσεων, όπου το όριο στερεάς και υγρής φάσης είναι «κινούμενο». Το πρόβλημα αυτό είναι γνωστό ως πρόβλημα «κινούμενου ορίου» ή πρόβλημα Stefan. Αν και το πρόβλημα αυτό μελετήθηκε για πρώτη φορά από τους Clapeyron και Lamé το 1831, το όνομά του δόθηκε από τον Σλοβένο φυσικό Josef Stefan, ο οποίος, γύρω στο 1890, έδωσε τη λύση σ' αυτό, καθώς υπολόγιζε πόσο γρήγορα μεγαλώνει ένα στρώμα πάγου πάνω στο νερό [55]. Αρχικά, το πρόβλημα Stefan προσεγγίστηκε, θεωρώντας τη μεταφορά θερμότητας μόνο μέσω αγωγής σε ένα ημι-άπειρο υλικό και αργότερα, θεωρώντας τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, κατά τη διάρκεια τήξης και στερεοποίησης του υλικού αλλαγής φάσης [11].

Για την ανάλυση του προβλήματος Stefan, δόθηκαν διάφορες αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης. Μερικές από τις προσεγγιστικές αναλυτικές τεχνικές είναι το ολοκλήρωμα της θερμικής ισορροπίας (heat balance integral), η τεχνική της μεταβολής (variation technique), η «ισοθερμική μετανάστευση» (isothermal migration), η μέθοδος της πηγής (source method) και η περιοδική λύση (periodic solution). Το βασικό μειονέκτημα των αναλυτικών μεθόδων είναι ότι βρίσκουν εφαρμογή, αποκλειστικά, σε μονοδιάστατα προβλήματα [55]. Έτσι, τη λύση στο πρόβλημα μπορεί να δώσει η άλλη κατηγορία, αυτή των αριθμητικών μεθόδων επίλυσης, στις οποίες ανήκουν οι μέθοδοι εντοπισμού του μετώπου αλλαγής φάσης ή αλλιώς μέθοδοι μεταβλητού πλέγματος (front-tracking methods/variable grid methods) και οι μέθοδοι σταθερού πλέγματος (fixed-domain methods). Οι μέθοδοι εντοπισμού του μετώπου αλλαγής φάσης εντοπίζουν, συνεχώς, τη διεπιφάνεια αλλαγής φάσης. Ωστόσο, παρουσιάζουν τα εξής μειονεκτήματα: απαιτούν πλέγμα που να αλλάζει συνεχώς, μετασχηματισμό συντεταγμένων ή



χρήση χωροχρονικού πλέγματος, που μπορεί να κοστίζει πολύ υπολογιστικά και δεν είναι κατάλληλες για αλλαγή φάσης με πεπερασμένο εύρος ψύξης. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης είναι η μέθοδος ενθαλπίας και η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας, που αναλύονται συνοπτικά παρακάτω [56].

## **6.1 Μέθοδος Ενθαλπίας**

Το πρόβλημα της αλλαγής φάσης απλοποιείται σημαντικά ,με την εισαγωγή της μεθόδου ενθαλπίας, καθώς παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα: η εξίσωση που διέπει το πρόβλημα είναι παρόμοια με αυτή της κάθε φάσης, δεν υπάρχει καμία προϋπόθεση που πρέπει να πληρείται στη διεπιφάνεια στερεού-υγρού και τέλος, η μέθοδος ενθαλπίας επιτρέπει τη θεώρηση μιας πολτώδους ζώνης μεταξύ των δύο φάσεων (mushy zone), χάρη στην οποία αποφεύγονται ασυνέχειες που μπορεί να δημιουργούν αριθμητικές αστάθειες [11]. Συνεπώς, το πάχος και η ποιότητα στη διακριτοποίηση αυτής της ζώνης είναι υψίστης σημασίας για την απόδοση του μοντέλου. Η μέθοδος αυτή, είναι κατάλληλη και για πολτώδη, αλλά και για ισοθερμικά προβλήματα, όμως, η θερμοκρασία σε ένα συγκεκριμένο σημείο του πλέγματος μπορεί να ταλαντώνεται με το χρόνο. Έχει ευρεία εφαρμογή σε ποικίλα προβλήματα αλλαγής φάσης, ενώ ο Hunter, το 1989, και ο Amdjadi, το 1990, επιβεβαίωσαν πως είναι η καταλληλότερη για τυπικές εφαρμογές, με τον περιορισμό ότι δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο αριθμητικό μοντέλο στη διεπιφάνεια [55].

Σε ένα πρόβλημα αλλαγής φάσης, η διατήρηση της ενέργειας μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της ολικής ογκομετρικής ενθαλπίας και της θερμοκρασίας, για σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla[k_k(\nabla(T))] \quad (6.1.1)$$

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

$$H(T) = h(T) + \rho_l f(T) \cdot \lambda \quad (6.1.2)$$

Και

$$h = \int_{T_m}^T \rho_k \cdot c_k \cdot dt \quad (6.1.3)$$

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

$$f = \begin{cases} 0 & \text{αν } T < T_m \text{ (στερεή φάση)} \\ [0,1] & \text{αν } T = T_m \text{ (πολτώδης φάση)} \\ 1 & \text{αν } T > T_m \text{ (υγρή φάση)} \end{cases} \quad (6.1.4)$$

## **6.2 Μέθοδος Ενεργού Θερμοχωρητικότητας**

Ιδανικά, ένα PCM, κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης του, μπορεί να αποθηκεύσει ή να αποδεσμεύσει θερμότητα σε μία σταθερή θερμοκρασία, δηλαδή, ιδανικά, έχουμε ταύτιση θερμοκρασίας τήξης και θερμοκρασίας στερεοποίησης. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται άπειρη θερμοχωρητικότητα του υλικού αλλαγής φάσης, που προφανώς δεν υφίστανται στην πραγματικότητα για κανένα PCM. Συνεπώς, η αλλαγή φάσης ενός PCM λαμβάνει χώρα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος, μεταξύ θερμοκρασίας τήξης  $T_l$  και στερεοποίησης  $T_s$ . Σύμφωνα με τη μέθοδο της ενεργού θερμοχωρητικότητας, η αποθηκευτική ικανότητα λανθάνουσας θερμότητας ενός υλικού αλλαγής φάσης θεωρείται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του, όταν αυτή βρίσκεται στο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης  $[T_l, T_s]$ . Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από την θερμοκρασία τήξης, το υλικό θεωρείται πλήρως αποφορτισμένο και μπορεί να αποθηκεύει μόνο αισθητή θερμότητα. Το ίδιο συμβαίνει και σε θερμοκρασίες ανώτερες της θερμοκρασίας στερεοποίησης, όπου το υλικό έχει φορτιστεί πλήρως. Συνεπώς, σε αυτές τις δυο περιοχές, το υλικό παύει να λειτουργεί ως PCM, και συμπεριφέρεται όπως τα συμβατικά θερμοαποθηκευτικά δομικά υλικά [57]. Κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, το μέγεθος της ενεργού θερμοχωρητικότητας  $C_{\text{peff}}(T)$  είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και είναι ανάλογο, τόσο του ποσού ενέργειας που αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται, κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, όσο και της ειδικής θερμότητας. Ωστόσο, είναι αντιστρόφως ανάλογο με το θερμοκρασιακό εύρος τήξης ή στερεοποίησης.

Για τη δημιουργία της συνάρτησης ενεργού θερμοχωρητικότητας είναι απαραίτητη η γνώση κάποιων θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του υλικού αλλαγής φάσης. Πρόκειται για τη θερμοκρασία τήξης  $T_l$  και στερεοποίησης  $T_s$  του υλικού αλλαγής φάσης, τις αντίστοιχες θερμοχωρητικότητές του,  $C_{pl}$  και  $C_{ps}$

και τη θερμότητα αλλαγής φάσης του Η. Συναντάται σε διάφορες εκδοχές, οι πιο γνώστες από τις οποίες είναι η τριγωνική συνάρτηση (Triangular function), η συνάρτηση αναβαθμού (Ramp function), η αντίστροφη συνάρτηση αναβαθμού (Reversed ramp function) και η βηματική συνάρτηση (Step function) [58].

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

## ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ

### Εισαγωγή

Στο δεύτερο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μελετάται η περίπτωση εφαρμογής υλικού αλλαγής φάσης, ενσωματωμένου σε κάψουλες, σε εσωτερικό τοίχο κτιρίου, στην περιοχή της Αθήνας, με σκοπό τη θέρμανση του εσωτερικού του χώρου, κατά τη διάρκεια ενός τυπικού έτους. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η ηλιακή φόρτιση κατακόρυφης εσωτερικής τοιχοποιίας, νοτίου προσανατολισμού, που φέρει στρώμα PCM, μέσω υαλοπίνακα, ευρισκόμενου στον απέναντι κατακόρυφο τοίχο.

Η μελέτη μας αφορά σε δωμάτιο κτηρίου, με διαστάσεις 3m(μήκος)×3m(πλάτος)×3m(ύψος), ενώ ο εσωτερικός τοίχος, που φέρει το στρώμα PCM, έχει διαστάσεις 3m×3m. Το στρώμα PCM έχει πάχος 4cm και διαχωρίζεται με τον εσωτερικό χώρο του δωματίου, μέσω γυψοσανίδας πάχους 1cm. Εξωτερικά, ο τοίχος φέρει στρώμα μόνωσης. Όλοι οι υπολογισμοί μας πραγματοποιούνται για κάθε ώρα του 24ώρου της 21ης ημέρας κάθε μήνα, του τυπικού έτους. Χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο προσομοίωσης του προβλήματός μας, υπολογίζεται η θερμοκρασία του PCM, κατά τη διάρκεια του 24ώρου, καθώς και το ποσοστό αξιοποίησής του, για όλο το χρόνο. Τα υλικά αλλαγής φάσης που χρησιμοποιούνται μεμονωμένα στην παρούσα εργασία είναι το RT20, το RT27, και το μείγμα οργανικού-ανόργανου SP25A8.

Προκειμένου να απλοποιηθεί το πρόβλημα, κάνουμε κάποιες βασικές παραδοχές. Αρχικά, θεωρούμε ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό του εξεταζόμενου δωματίου παραμένει σταθερή και ίση με 22°C, μέσω της χρήσης θερμαντικών μέσων, όπως κλιματιστικά συστήματα, θερμαντικά σώματα κλπ. Αναφορικά με το υλικό αλλαγής φάσης, υποθέτουμε ότι η θερμοκρασία που επικρατεί στο στρώμα PCM είναι σε όλη την έκταση του η ίδια. Επιπλέον, δεχόμαστε ότι η θερμοκρασία που αναπτύσσει, παραμένει σταθερή ανά βήμα μίας ώρας. Τέλος, μεταξύ του στρώματος του PCM και της μόνωσης θεωρούμε πως δεν συναλλάσσεται θερμότητα.

Αρχικά, για να μπορέσουμε να προβούμε στους υπολογισμούς μας, υπολογίσαμε, πρώτα, την ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στον νότια προσανατολισμένο τοίχο, για κάθε ώρα, της τυπικής ημέρας (21<sup>η</sup>) κάθε μήνα, για ολόκληρο το έτος. Στη συνέχεια, εφαρμόσαμε ισολογισμό ενέργειας στο στρώμα του PCM, κάνοντας χρήση του μοντέλου της ενεργού θερμοχωρητικότητας και υπολογίσαμε τις καμπύλες θερμοκρασίας του, συναρτήσεως των ωρών της εκάστοτε ημέρας. Έπειτα, προσδιόρισαμε το βαθμό αξιοποίησής του, για κάθε μήνα του έτους, ο οποίος αποτυπώθηκε σε διαγράμματα, με τη μορφή περιοχής λειτουργίας του υλικού αλλαγής φάσης. Οι υπολογισμοί αυτοί, πραγματοποιήθηκαν και για τα τρία υλικά αλλαγής φάσης.

Στη συνέχεια, διεξάγουμε παραμετρική μελέτη για την επίδραση που έχει στο σύστημα και στο βαθμό αξιοποίησης του PCM, η μεταβολή στην τιμή της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου. Πιο συγκεκριμένα, μεταβάλλοντας κάθε φορά την τιμή της θερμοκρασίας του εξεταζόμενου χώρου υπολογίζονται, όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι καμπύλες του βαθμού αξιοποίησής του PCM, στη διάρκεια του 24ώρου, για ολόκληρο το χρόνο. Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται μόνο για το RT20 και το RT27.

Τέλος, συγκρίνουμε ένα PCM με ένα συμβατικό δομικό υλικό, ως προς τη θερμοκρασία που αναπτύσσουν καθ' όλη τη διάρκεια ενός 48ώρου, όταν η κατακόρυφη, νότια τοιχοποιία στην οποία έχει ενσωματωθεί το καθένα χωριστά, δέχεται και πάλι ηλιακή ακτινοβολία διερχόμενη από υαλοπίνακα, που βρίσκεται στον απέναντι τοίχο. Συγκεκριμένα, η σύγκριση πραγματοποιείται μεταξύ του RT20 και του μπετόν, για κάθε ώρα του 48ώρου, για την 21η ημέρα του Γενάρη, με σκοπό την ανάδειξη των μεγαλύτερων ενεργειακών αποθεμάτων του υλικού αλλαγής φάσης σε βάθος χρόνου, σε σχέση με το συμβατικό δομικό υλικό.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονίσουμε ότι το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία, δε δύναται να μας παρέχει αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας, καθώς στο πρόβλημά μας δεν λαμβάνουμε υπόψη τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού αλλαγής φάσης. Επιπλέον, με την παραδοχή της σταθερότητας της θερμοκρασίας του PCM ανά ώρα, για κάθε ώρα του 24ώρου, το πρόβλημα μας προσεγγίζεται ως μόνιμης κατάστασης, γεγονός που δεν αντικατοπτρίζει με ακρίβεια την πραγματικότητα. Ωστόσο, σε επίπεδο 24ώρου, η ακρίβεια είναι πολύ καλύτερη, δεδομένου ότι τα σφάλματα αλληλοαναιρούνται και τουλάχιστον, η ποιοτική προσομοίωση της χρήσης των υλικών αλλαγής φάσης είναι ικανοποιητική. Εξάλλου, σκοπός της εργασίας (στα χρονικά πλαίσια που διατίθενται) είναι περισσότερο η ανάλυση του φαινομένου ποιοτικά και λιγότερο ποσοτικά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Μοντέλο προσομοίωσης

### 7.1 Υπολογισμός άμεσης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας $G_b$ , διάχυτης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας $G_d$ και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου $G_T$

Η στιγμιαία μέση ολική ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου,  $G_T$ , αντιπροσωπεύει την ακτινοβολία που δέχεται ο τοίχος που μελετάται, ο οποίος θεωρείται κάθετο επίπεδο, με προσανατολισμό προς το Νότο. Η στιγμιαία ολική μέση ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G_T = G_b \cdot R_b + G_d \cdot \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (G_b + G_d) \cdot \rho \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (7.1.1)$$

Για τον υπολογισμό της  $G_T$  είναι απαραίτητη η γνώση της μέσης στιγμιαίας άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου,  $G_b$  και  $G_d$  αντίστοιχα, του λόγου άμεσης ακτινοβολία  $R_b$ , της ανακλαστικότητας του εδάφους  $\rho$  και της γωνίας  $\beta$ .

Άμεση ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου  $G_b$  ονομάζεται η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, που έρχεται απευθείας από τον ήλιο και προσπίπτει στη γη, χωρίς να διασκορπιστεί μέσα στην ατμόσφαιρα.

Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία  $G_d$  είναι η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη μετά από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης, κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα.

Τέλος,  $\rho$  είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους και η τιμή της κυμαίνεται από  $\rho=0.2$ , για συνηθισμένο έδαφος, έως  $0.7$  για χιονισμένο έδαφος, θάλασσα, λεία βράχια κλπ. Στην παρούσα εργασία θεωρήσαμε συνηθισμένο έδαφος, συνεπώς, επιλέχθηκε  $\rho=0.2$ . Η γωνία  $\beta$  είναι η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια του κατακόρυφου τοίχου με το οριζόντιο επίπεδο, δηλαδή  $\beta=90^\circ$ .

Η μέση στιγμιαία άμεση και διάχυτη ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου, έχει προκύψει με στατιστική επεξεργασία μετρήσεων πολλών ετών, για κάθε ώρα της ημέρας του τυπικού έτους στην περιοχή της Αθήνας, και δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$G_b = M_t + A_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365}D - P_t\right) \quad (7.1.2)$$

$$G_d = m_t + a_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365}D - p_t\right) \quad (7.1.3)$$

Η σταθερά D παίρνει τιμές από 1÷365, ανάλογα με τη μέρα του έτους που μελετάμε, ενώ οι υπόλοιπες σταθερές  $M_t$ ,  $A_t$ ,  $P_t$ ,  $a_t$ ,  $m_t$ ,  $p_t$  λαμβάνονται από τον πίνακα 7.1.1 για τις αντίστοιχες ώρες μελέτης.

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

**Πίνακας 7.1.1:** Τιμές των συντελεστών των εξισώσεων (7.1.2) και (7.1.3)

Ο λόγος άμεσης ακτινοβολίας  $R_b$ , για κεκλιμένες επιφάνειες, που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο και είναι στραμμένες προς τον Νότο, δίνεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{\sin \delta \cdot \sin \varphi - \beta + \cos \delta \cdot \cos \varphi - \beta \cdot \cos \omega}{\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega} \quad (7.1.4)$$

Όπου:

$\gamma=0^\circ$ , το αζιμούθιο της επιφάνειας του Νότιου τοίχου

$\Phi=37,97^\circ$ , το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας

$\omega=0,25 \times (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι})$ , η ωριαία γωνία

$\delta=23,45 \cdot \sin \frac{360(284+n)}{365}$ , η ηλιακή απόκλιση και n ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους δηλαδή  $n=1 \div 365$

Στους πίνακες και στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές της άμεσης και διάχυτης στιγμιαίας προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια,  $G_b$  και  $G_d$ , καθώς και η ολική στιγμιαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου,  $G_T$ , όπως υπολογίστηκαν, για κάθε ώρα της ημέρας, από τις 7:00π.μ. μέχρι τις 18:00μ.μ. και για την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα, ενός τυπικού έτους.

**Για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου (D=21) και την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου (D=52)**

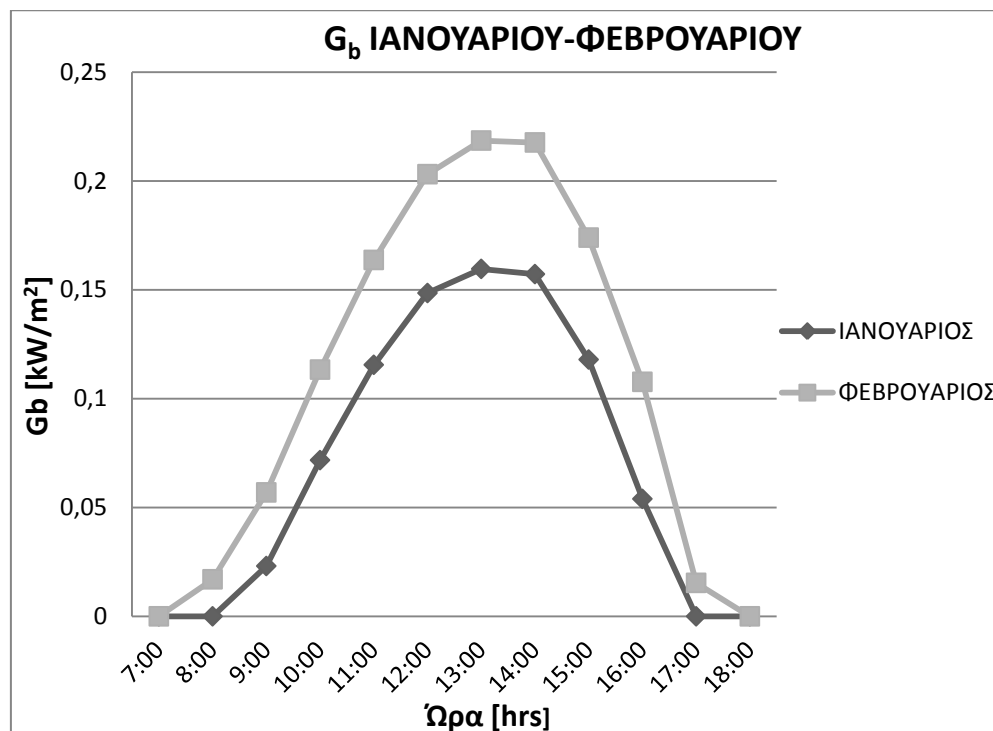
<b>Ωρα [hrs]</b>	<b><math>G_b</math> (ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ)</b>	<b><math>G_b</math> (ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ)</b>	<b><math>G_d</math> (ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ)</b>	<b><math>G_d</math> (ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ)</b>
<b>7:00</b>	0	0	0	0
<b>8:00</b>	0	0,017009	0,02214	0,068282
<b>9:00</b>	0,023107	0,056916	0,089257	0,136241
<b>10:00</b>	0,071736	0,113326	0,144193	0,188282
<b>11:00</b>	0,115512	0,163673	0,176672	0,21629
<b>12:00</b>	0,148479	0,203062	0,187122	0,221472
<b>13:00</b>	0,159575	0,218516	0,171994	0,201692
<b>14:00</b>	0,157181	0,217636	0,133874	0,161281
<b>15:00</b>	0,117937	0,173947	0,094878	0,122148
<b>16:00</b>	0,053952	0,107703	0,060584	0,085772
<b>17:00</b>	0	0,015367	0,029616	0,053492
<b>18:00</b>	0	0	0	0

**Πίνακας 7.1.2: Στιγμιαία άμεση,  $G_b$  [ $kW/m^2$ ], διάχυτη,  $G_d$  [ $kW/m^2$ ], ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου για κάθε ώρα κατά την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου και την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου**

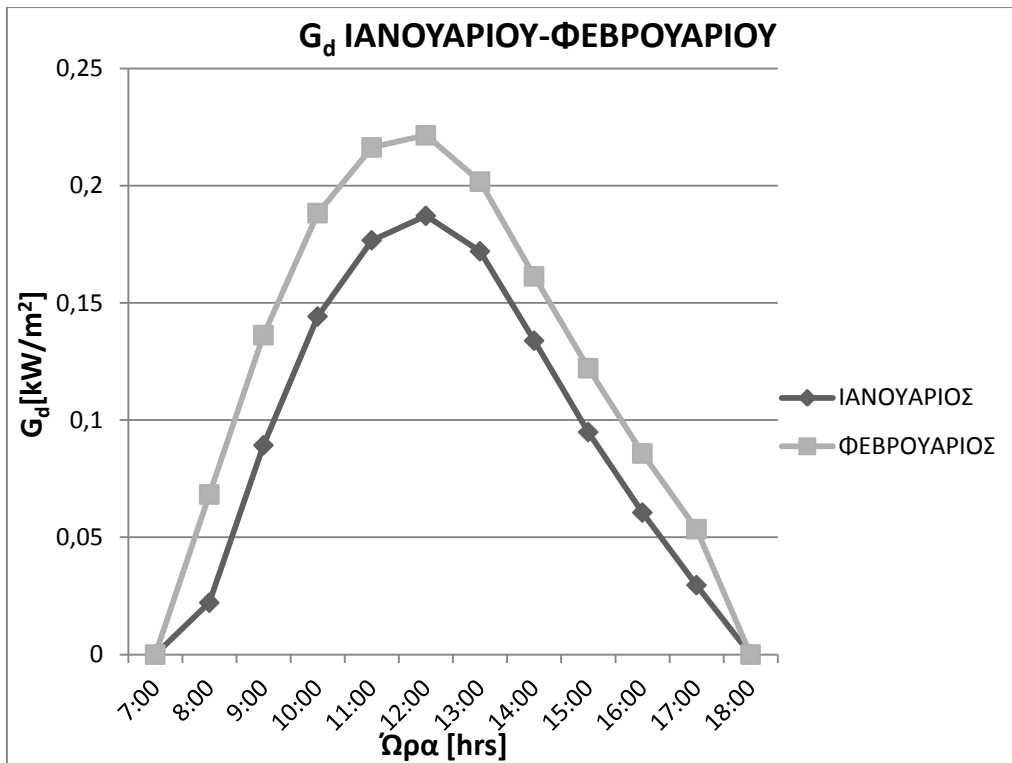


Ωρα [hrs]	G <sub>T</sub> (ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ)	G <sub>T</sub> (ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ)
7:00	0	0
8:00	0,013284	0,071686
9:00	0,10629	0,164775
10:00	0,222675	0,263643
11:00	0,307976	0,338332
12:00	0,365738	0,388408
13:00	0,382214	0,399457
14:00	0,378664	0,386129
15:00	0,326092	0,327045
16:00	0,232742	0,245965
17:00	0,017769	0,092855
18:00	0	0

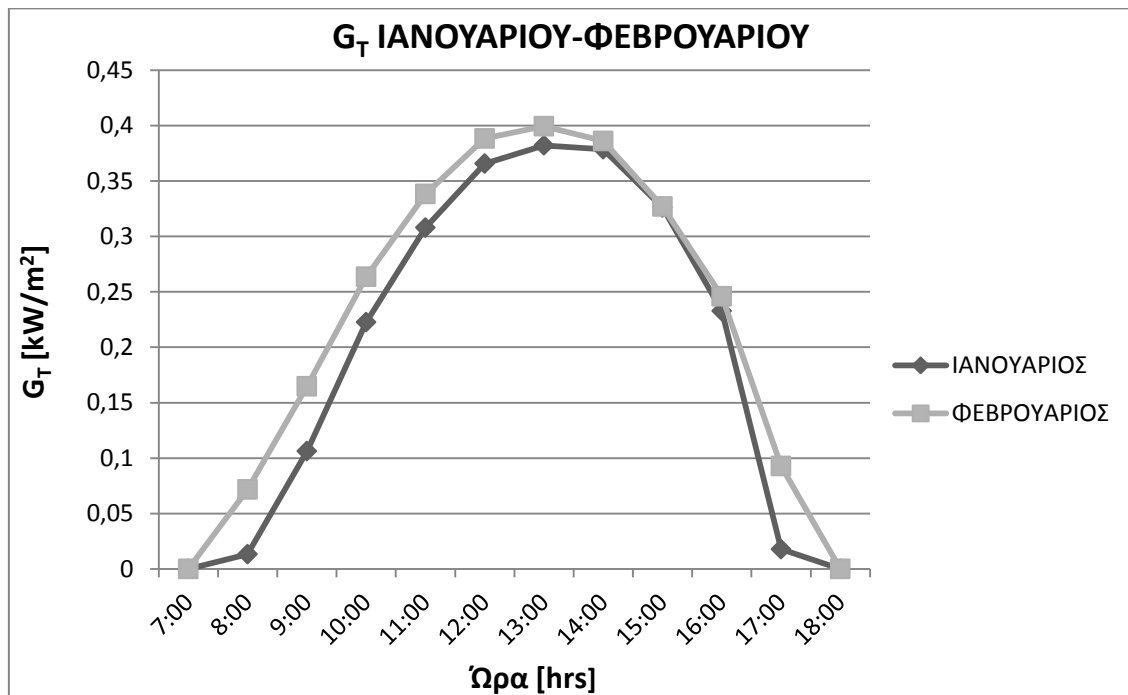
**Πίνακας 7.1.3:** Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου  $G_T$  [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ], για κάθε ώρα κατά την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου και την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου



**Σχήμα 7.1.1:** Στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου,  $G_b$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου και την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου



**Σχήμα 7.1.2:** Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου,  $G_d$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου και την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου



**Σχήμα 7.1.3:** Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου,  $G_T$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου και την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

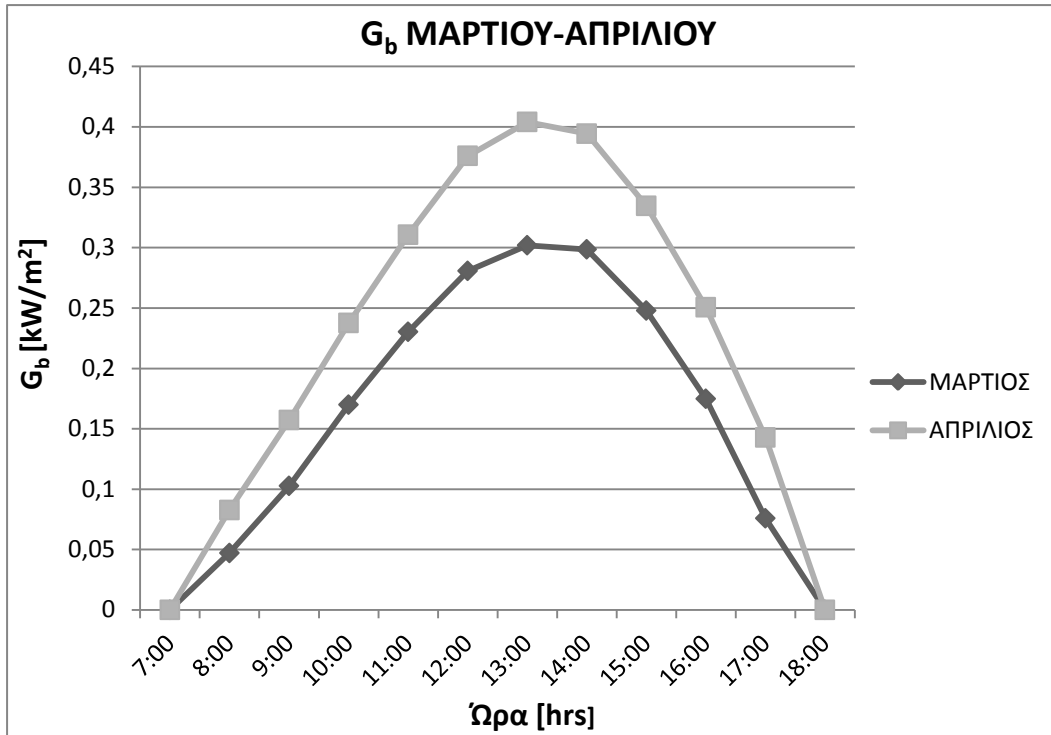
Για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου(D=80) και την 21<sup>η</sup> Απριλίου(D=111)

Ωρα [hrs]	G <sub>b</sub> (ΜΑΡΤΙΟΣ)	G <sub>b</sub> (ΑΠΡΙΛΙΟΣ)	G <sub>a</sub> (ΜΑΡΤΙΟΣ)	G <sub>a</sub> (ΑΠΡΙΛΙΟΣ)
7:00	0	0	0	0
8:00	0,047059	0,08266	0,126145	0,191715
9:00	0,102666	0,157183	0,196325	0,265341
10:00	0,169918	0,237585	0,245959	0,313221
11:00	0,23026	0,310654	0,268446	0,329521
12:00	0,280701	0,376011	0,264694	0,313788
13:00	0,301944	0,404069	0,238696	0,280439
14:00	0,298564	0,39435	0,197981	0,241427
15:00	0,247862	0,334553	0,159958	0,205684
16:00	0,174805	0,250603	0,122015	0,1668
17:00	0,075837	0,142765	0,087405	0,129001
18:00	0	0	0	0

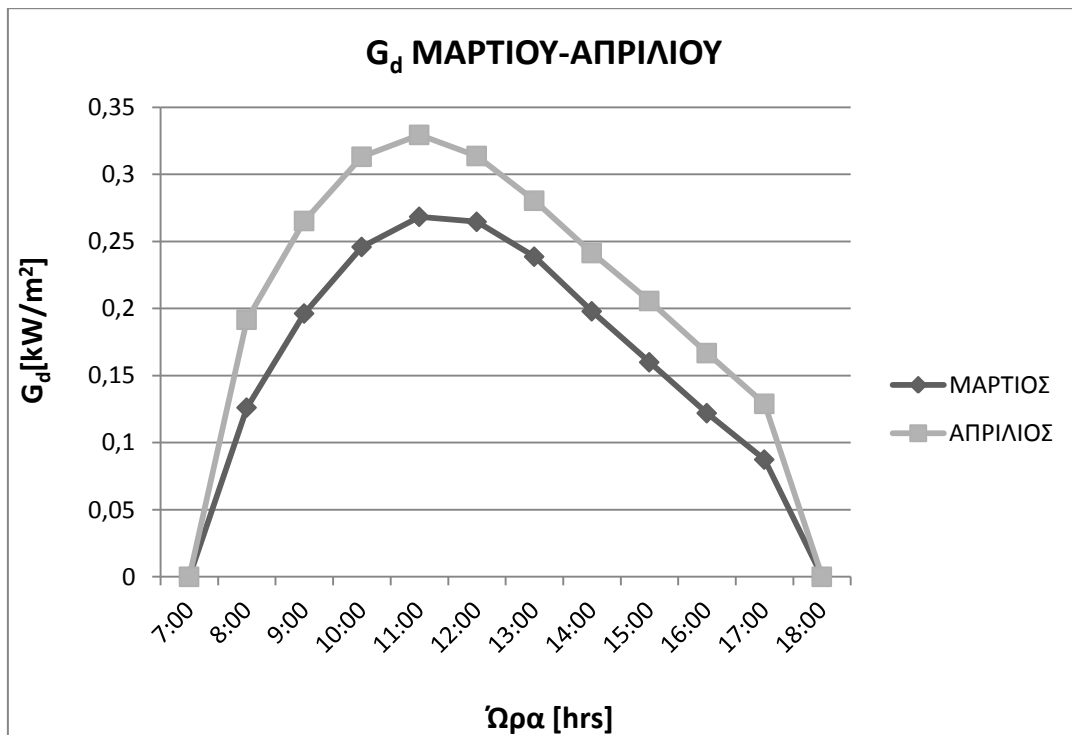
Πίνακας 7.1.4: Στιγμαία άμεση, G<sub>b</sub> [kW/m<sup>2</sup>], διάχυτη, G<sub>a</sub> [kW/m<sup>2</sup>], ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου για κάθε ώρα κατά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου και την 21<sup>η</sup> Απριλίου

Ωρα [hrs]	G <sub>T</sub> (ΜΑΡΤΙΟΣ)	G <sub>T</sub> (ΑΠΡΙΛΙΟΣ)
7:00	0	0
08:00	0,118199	0,14651
9:00	0,209846	0,237825
10:00	0,299417	0,320764
11:00	0,366516	0,380255
12:00	0,409158	0,412454
13:00	0,412626	0,405696
14:00	0,385591	0,365333
15:00	0,318207	0,290749
16:00	0,231122	0,195521
17:00	0,122607	0,09069
18:00	0	0

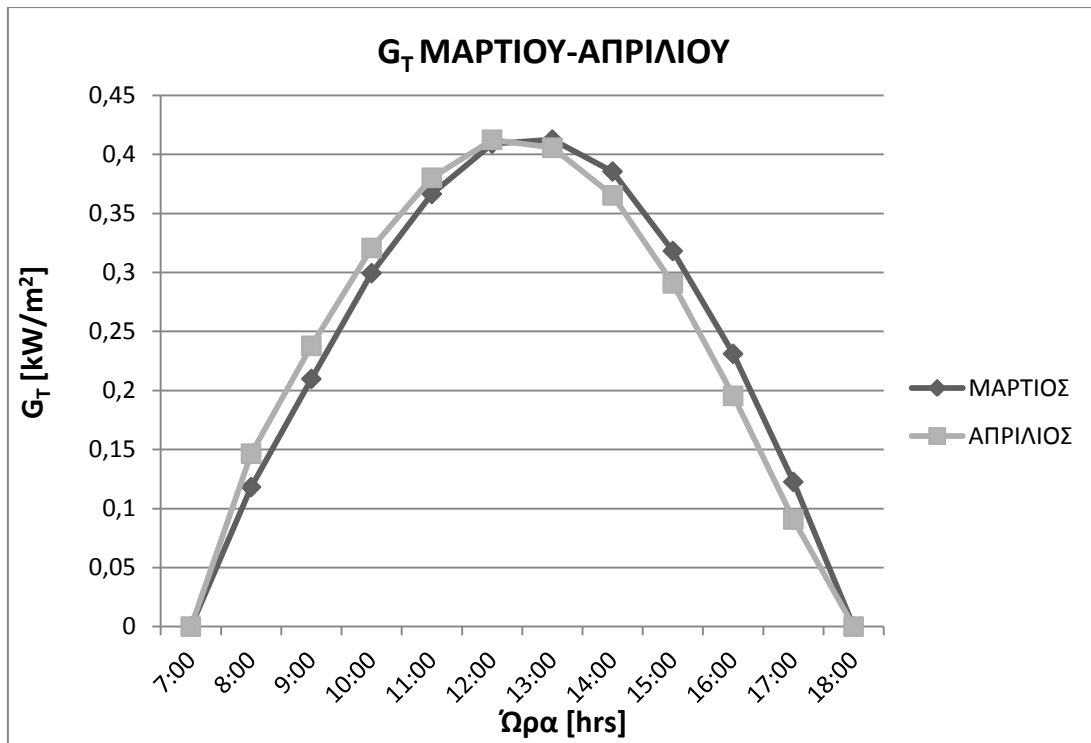
Πίνακας 7.1.5: Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G<sub>T</sub> [kW/m<sup>2</sup>], για κάθε ώρα κατά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου και την 21<sup>η</sup> Απριλίου



**Σχήμα 7.1.4:** Στιγμαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου,  $G_b$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου και την 21<sup>η</sup> Απριλίου



**Σχήμα 7.1.5:** Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου,  $G_d$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου και την 21<sup>η</sup> Απριλίου



**Σχήμα 7.1.6:** Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου,  $G_T$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου και την 21<sup>η</sup> Απριλίου

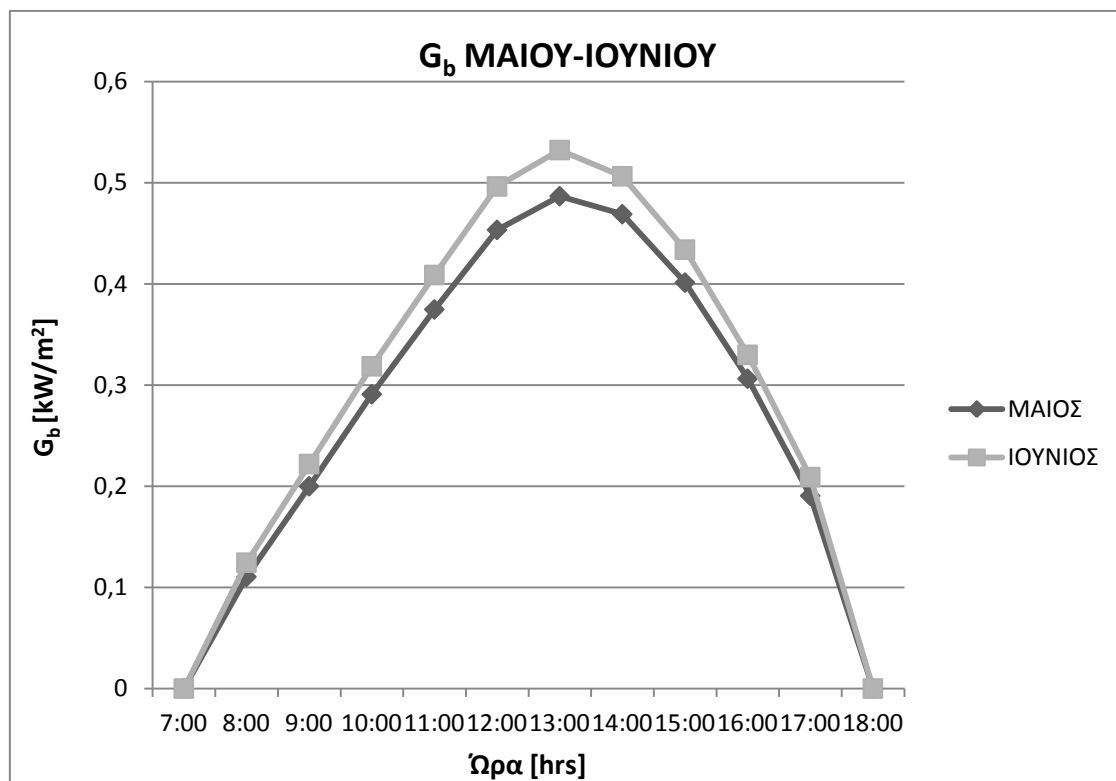
Για την 21<sup>η</sup> Μαΐου ( $D=141$ ) και την 21<sup>η</sup> Ιουνίου ( $D=172$ )

Ωρα [hrs]	$G_b$ (ΜΑΙΟΣ)	$G_b$ (ΙΟΥΝΙΟΣ)	$G_d$ (ΜΑΙΟΣ)	$G_d$ (ΙΟΥΝΙΟΣ)
7:00	0	0	0	0
8:00	0,110408	0,124392	0,240048	0,260848
9:00	0,19997	0,221912	0,317118	0,340626
10:00	0,290909	0,318527	0,364655	0,389304
11:00	0,37472	0,40881	0,376463	0,399269
12:00	0,4534	0,496381	0,350089	0,365864
13:00	0,486732	0,532321	0,311023	0,323934
14:00	0,468927	0,506407	0,275261	0,292274
15:00	0,401309	0,433908	0,242193	0,261708
16:00	0,306241	0,329865	0,203426	0,224091
17:00	0,190545	0,208999	0,162744	0,181445
18:00	0	0	0	0

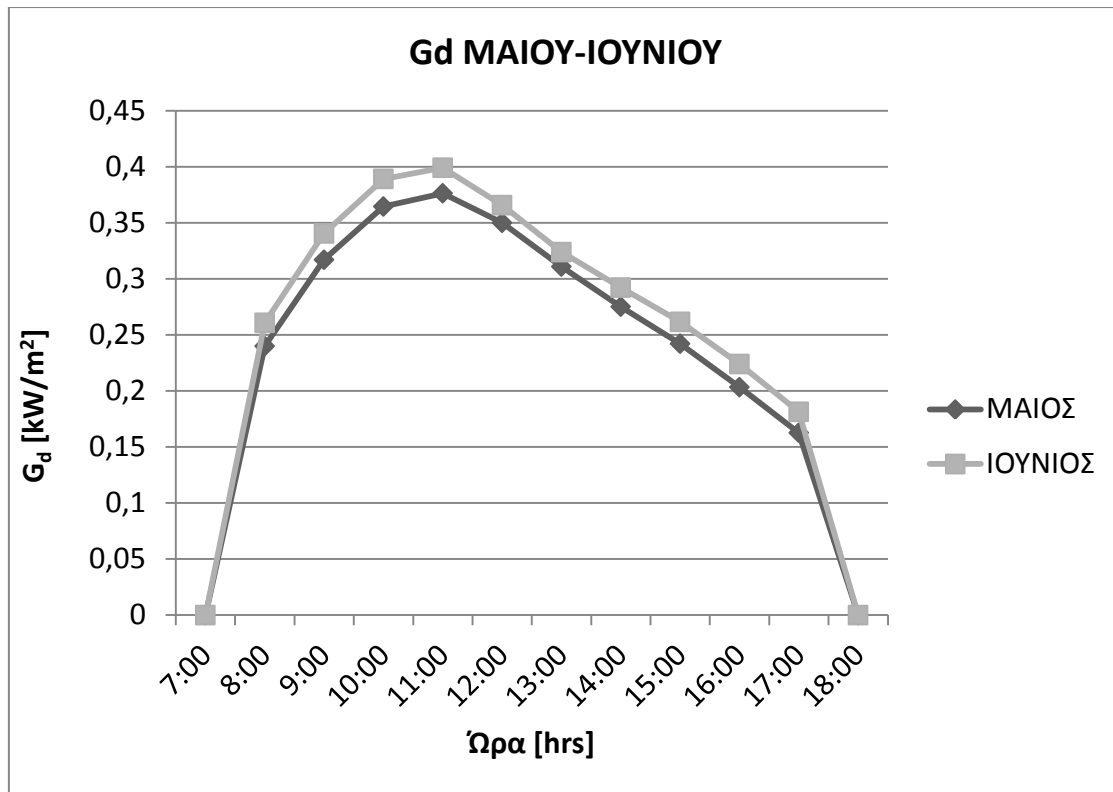
**Πίνακας 7.1.6:** Στιγμιαία άμεση,  $G_b$  [kW/m<sup>2</sup>], διάχυτη,  $G_d$  [kW/m<sup>2</sup>], ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου για κάθε ώρα κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου και την 21<sup>η</sup> Ιουνίου

Ώρα [hrs]	$G_T$ (ΜΑΙΟΣ)	$G_T$ (ΙΟΥΝΙΟΣ)
7:00	0	0
8:00	0,158373	0,162488
9:00	0,247543	0,251628
10:00	0,325946	0,329458
11:00	0,379212	0,380754
12:00	0,401244	0,397716
13:00	0,385783	0,37821
14:00	0,33788	0,327791
15:00	0,260253	0,249418
16:00	0,161842	0,15031
17:00	0,059116	0,048674
18:00	0	0

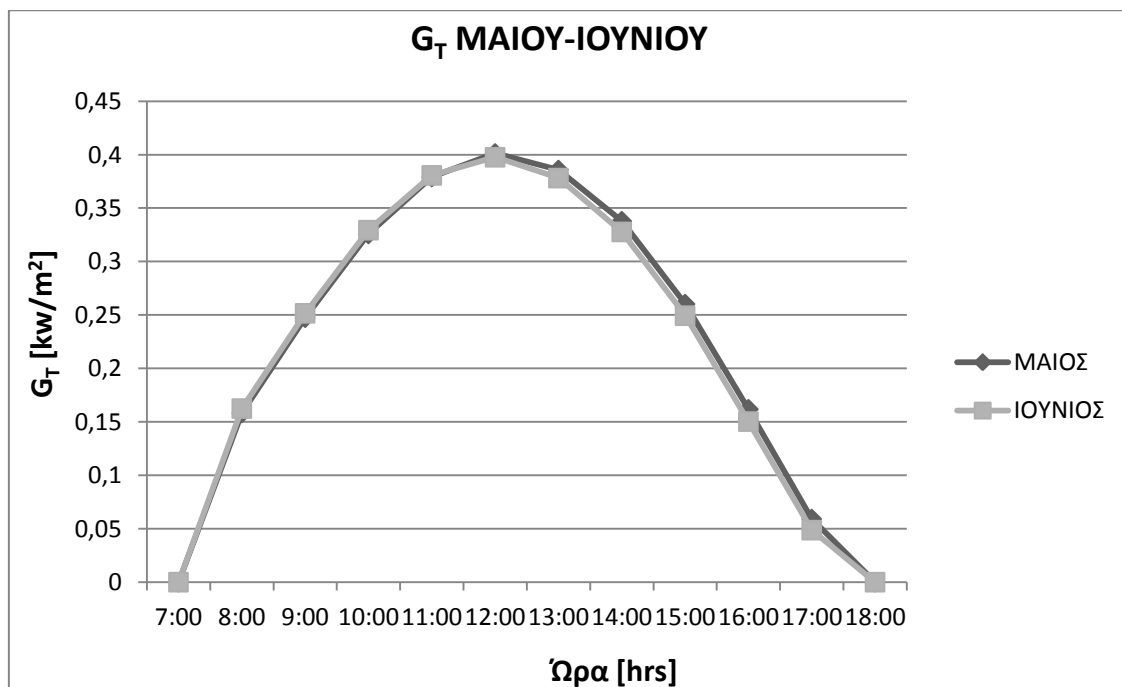
**Πίνακας 7.1.7:** Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου  $G_T$  [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ], για κάθε ώρα κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου και την 21<sup>η</sup> Ιουνίου



**Σχήμα 7.1.7:** Στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου,  $G_b$ , συναρτήσε των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου και την 21<sup>η</sup> Ιουνίου



**Σχήμα 7.1.8:** Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου,  $G_d$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου και την 21<sup>η</sup> Ιουνίου



**Σχήμα 7.1.9:** Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου,  $G_T$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου και την 21<sup>η</sup> Ιουνίου

Για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου (D=202) και την 21<sup>η</sup> Αυγούστου (D=233)

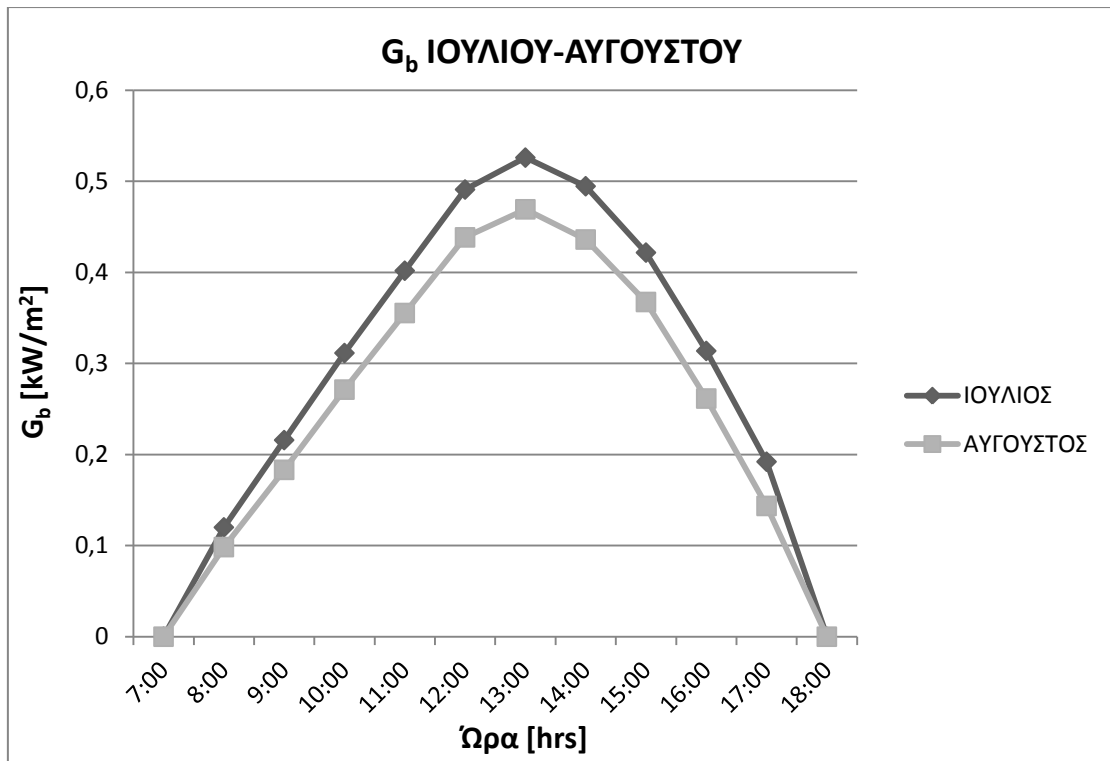
Ωρα [hrs]	G <sub>b</sub> (ΙΟΥΛΙΟΣ)	G <sub>b</sub> (ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ)	G <sub>d</sub> (ΙΟΥΛΙΟΣ)	G <sub>d</sub> (ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ)
7:00	0	0	0	0
8:00	0,120083	0,098397	0,247376	0,202502
9:00	0,215901	0,183217	0,32825	0,282626
10:00	0,311494	0,271308	0,379181	0,336445
11:00	0,40188	0,355406	0,390553	0,35217
12:00	0,491031	0,438488	0,356002	0,322604
13:00	0,526068	0,469306	0,314989	0,286093
14:00	0,494647	0,436154	0,286955	0,260437
15:00	0,421789	0,367535	0,257906	0,231598
16:00	0,313823	0,261532	0,2221	0,197878
17:00	0,192148	0,143583	0,179047	0,156059
18:00	0	0	0	0

Πίνακας 7.1.8: Στιγμαία άμεση, G<sub>b</sub> [kW/m<sup>2</sup>], διάχυτη, G<sub>d</sub> [kW/m<sup>2</sup>], ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου για κάθε ώρα κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου και την 21<sup>η</sup> Αυγούστου

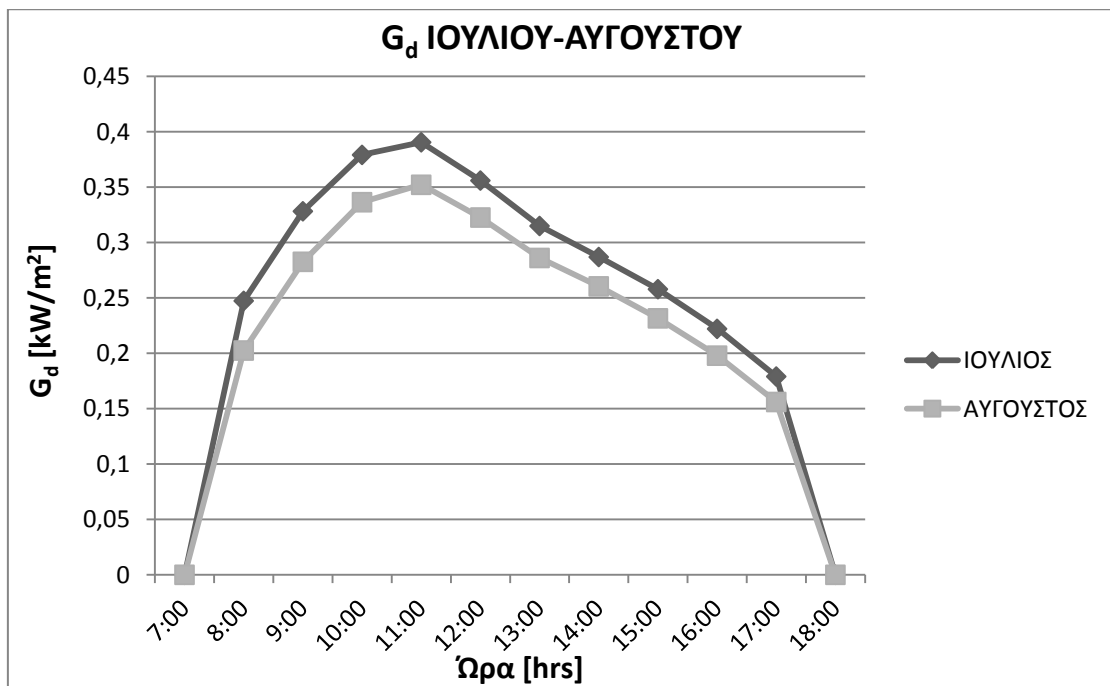
Ωρα [hrs]	G <sub>T</sub> (ΙΟΥΛΙΟΣ)	G <sub>T</sub> (ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ)
7:00	0	0
8:00	0,163091	0,158398
9:00	0,257293	0,260338
10:00	0,340283	0,35241
11:00	0,396389	0,418755
12:00	0,417794	0,453325
13:00	0,40113	0,445593
14:00	0,351257	0,398276
15:00	0,272632	0,321028
16:00	0,171586	0,216797
17:00	0,066965	0,105921
18:00	0	0

Πίνακας 7.1.9: Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G<sub>T</sub> [kW/m<sup>2</sup>], για κάθε ώρα κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου και την 21<sup>η</sup> Αυγούστου

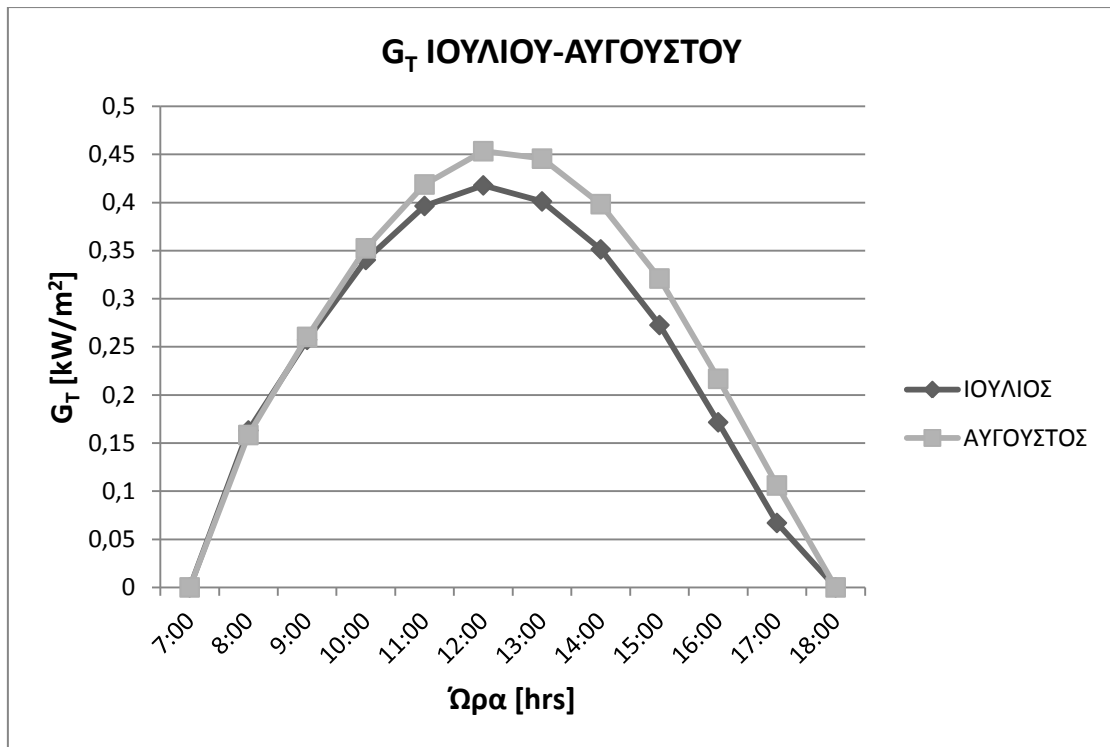




**Σχήμα 7.1.10:** Στιγμαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου,  $G_b$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου και την 21<sup>η</sup> Αυγούστου



**Σχήμα 7.1.11:** Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου,  $G_d$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου και την 21<sup>η</sup> Αυγούστου



**Σχήμα 7.1.12:** Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου,  $G_T$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου και την 21<sup>η</sup> Αυγούστου

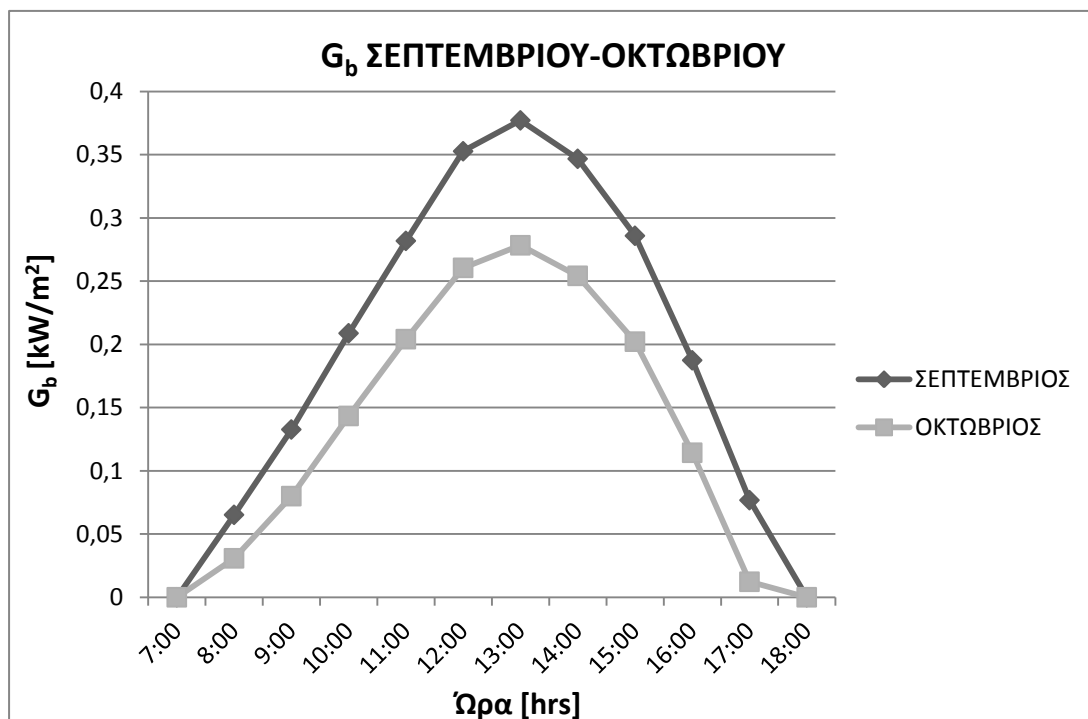
**Για την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου (D=264) και την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου (D=294)**

Ώρα [hrs]	$G_b$ (ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ)	$G_b$ (ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ)	$G_d$ (ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ)	$G_d$ (ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ)
7:00	0	0	0	0
8:00	0,0652	0,030799	0,138579	0,075313
9:00	0,132676	0,079986	0,21625	0,149629
10:00	0,208789	0,143381	0,272728	0,207766
11:00	0,281846	0,204112	0,294552	0,235556
12:00	0,352719	0,260513	0,274856	0,227483
13:00	0,377142	0,278351	0,245214	0,204945
14:00	0,346752	0,254195	0,219894	0,177913
15:00	0,28588	0,202137	0,189829	0,145614
16:00	0,187403	0,114276	0,157839	0,114504
17:00	0,07678	0,012257	0,118595	0,078355
18:00	0	0	0	0

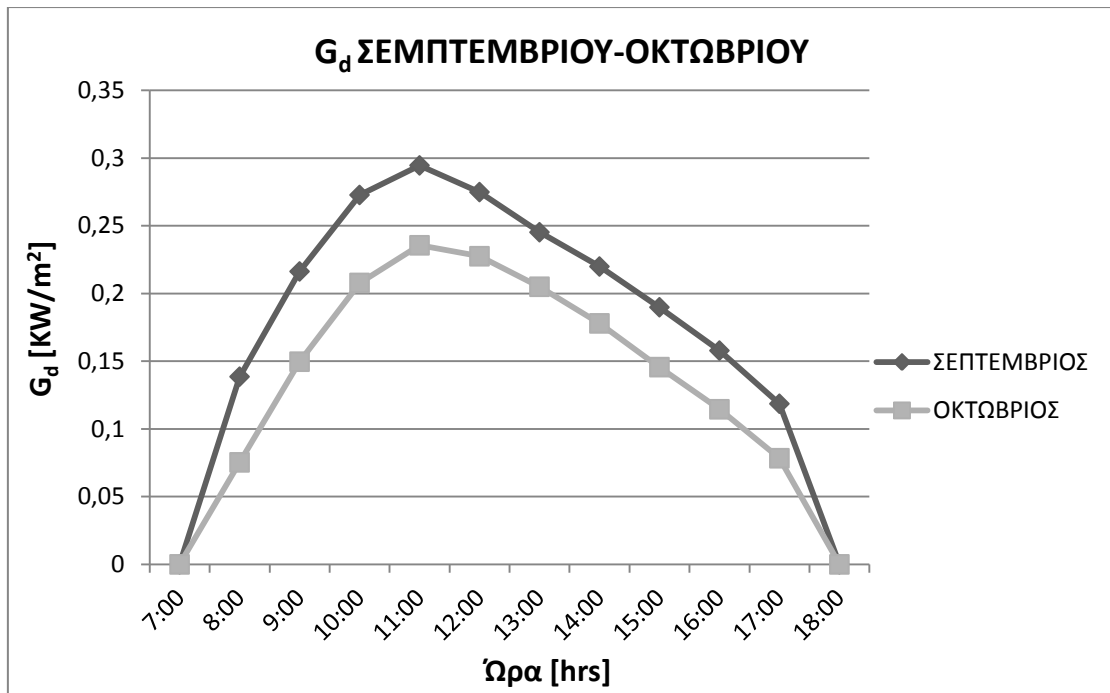
**Πίνακας 7.1.10:** Στιγμιαία άμεση,  $G_b$  [kW/m<sup>2</sup>], διάχυτη,  $G_d$  [kW/m<sup>2</sup>], ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου για κάθε ώρα κατά την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου και την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου

Ώρα [hrs]	G <sub>T</sub> (ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ)	G <sub>T</sub> (ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ)
7:00	0	0
8:00	0,141296	0,102849
9:00	0,247632	0,209364
10:00	0,348835	0,319123
11:00	0,426539	0,40609
12:00	0,477467	0,46999
13:00	0,4814	0,484021
14:00	0,439508	0,451506
15:00	0,3679	0,389583
16:00	0,261838	0,282646
17:00	0,140457	0,100364
18:00	0	0

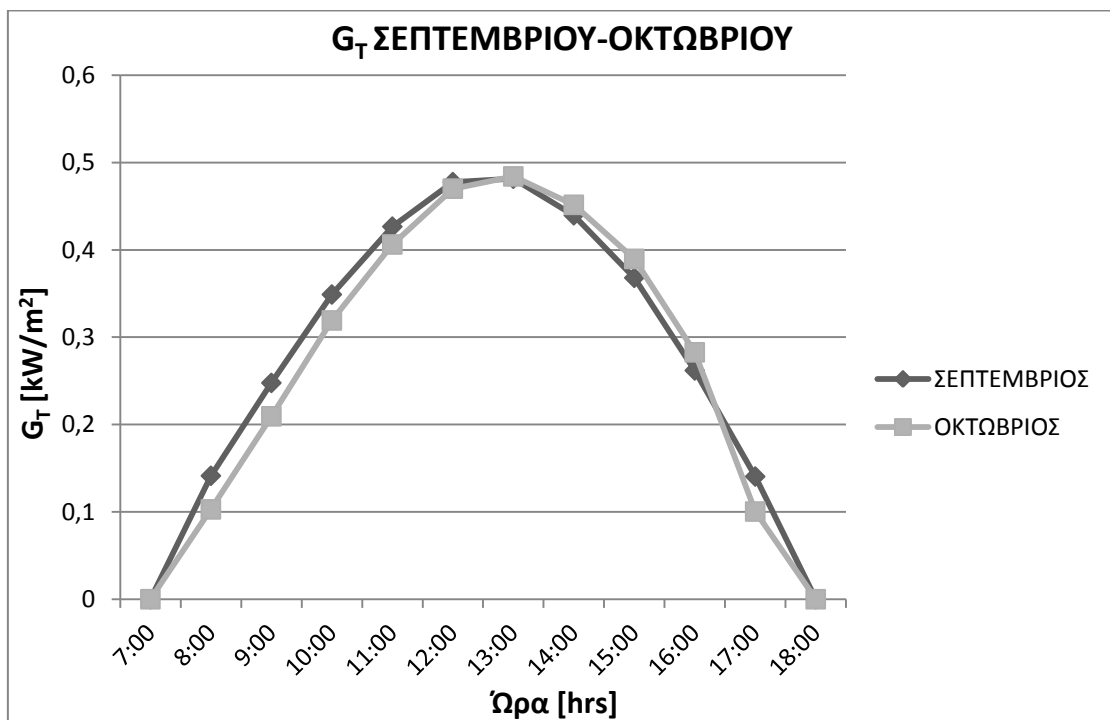
**Πίνακας 7.1.11:** Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G<sub>T</sub> [kW/m<sup>2</sup>], για κάθε ώρα κατά την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου και την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου



**Σχήμα 7.1.13:** Στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, G<sub>b</sub>, συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου και την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου



**Σχήμα 7.1.14:** Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου,  $G_d$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου και την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου



**Σχήμα 7.1.15:** Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου,  $G_T$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου και την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου

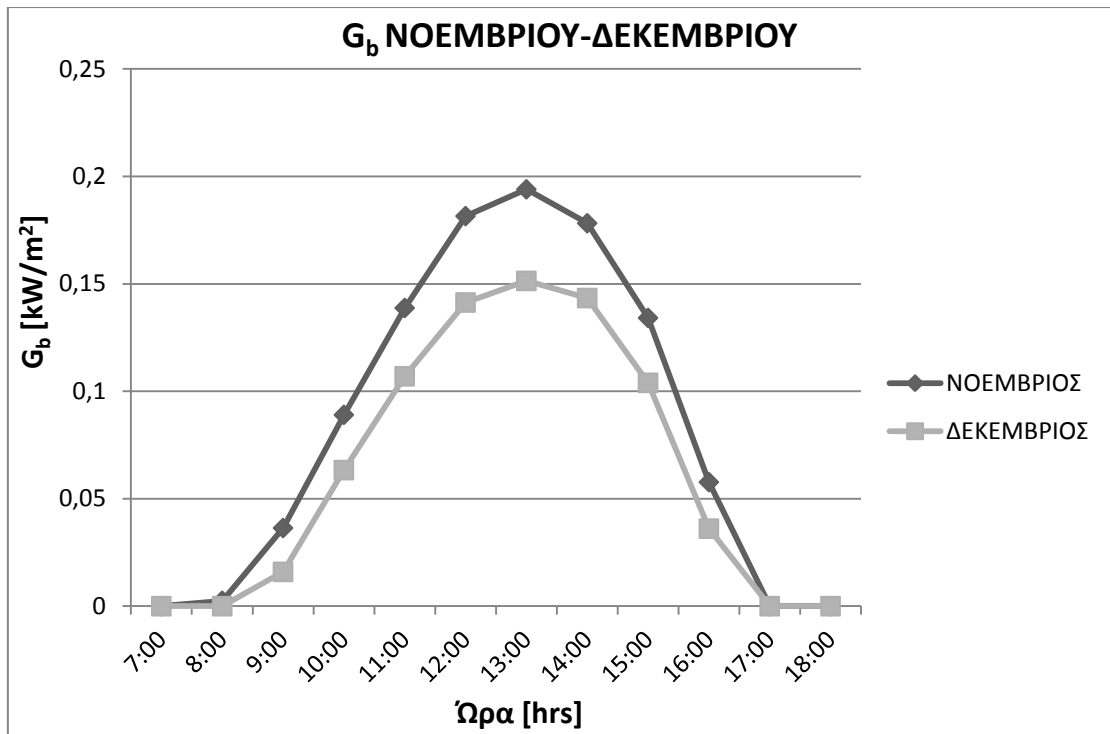
Για την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου (D=325) και την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου (D=355)

Ωρα [hrs]	G <sub>b</sub> (ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ)	G <sub>b</sub> (ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ)	G <sub>d</sub> (ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ)	G <sub>d</sub> (ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ)
7:00	0	0	0	0
8:00	0,002523	0	0,026183	0,007103
9:00	0,036372	0,015963	0,096955	0,075293
10:00	0,089018	0,06331	0,155397	0,132586
11:00	0,138765	0,106974	0,187751	0,166623
12:00	0,181514	0,141315	0,190578	0,176096
13:00	0,193981	0,151362	0,173864	0,162041
14:00	0,178203	0,143393	0,143437	0,127635
15:00	0,134147	0,103935	0,108371	0,090166
16:00	0,057732	0,036086	0,077105	0,057758
17:00	0	0	0,043912	0,026423
18:00	0	0	0	0

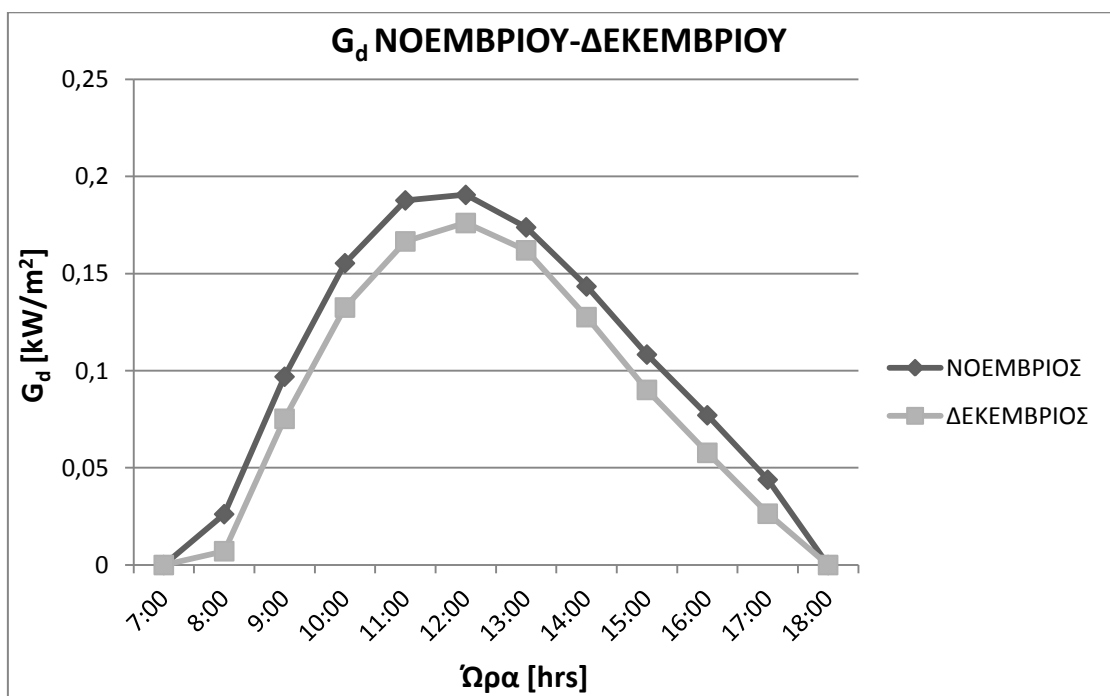
**Πίνακας 7.1.12:** Στιγμιαία άμεση, G<sub>b</sub> [kW/m<sup>2</sup>], διάχυτη, G<sub>d</sub> [kW/m<sup>2</sup>], ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου για κάθε ώρα κατά την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου και την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

Ωρα [hrs]	G <sub>T</sub> (ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ)	G <sub>T</sub> (ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ)
7:00	0	0
8:00	0,025168	0,004262
9:00	0,142606	0,08946
10:00	0,264439	0,219064
11:00	0,358112	0,313166
12:00	0,427679	0,379193
13:00	0,447452	0,398882
14:00	0,428786	0,392567
15:00	0,376428	0,342432
16:00	0,26267	0,222418
17:00	0,026347	0,015854
18:00	0	0

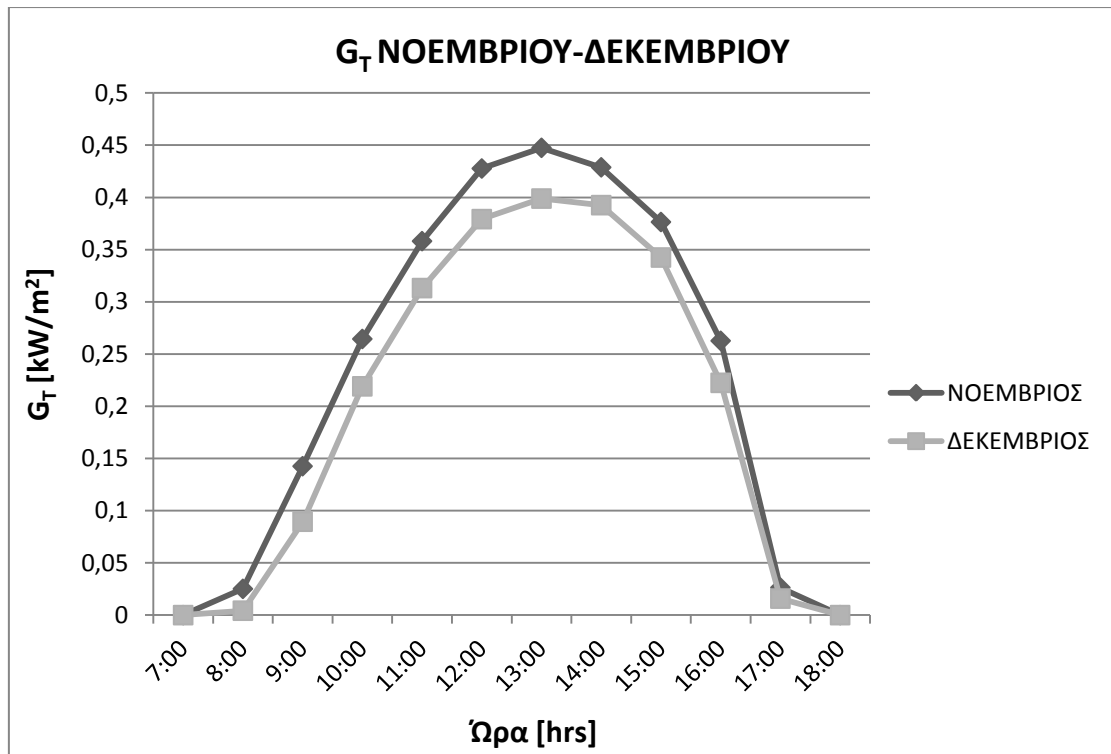
**Πίνακας 7.1.13:** Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου G<sub>T</sub> [kW/m<sup>2</sup>], για κάθε ώρα κατά την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου και την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου



**Σχήμα 7.1.16:** Στιγμαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου,  $G_b$ , συναρτήσεως των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου και την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου



**Σχήμα 7.1.17:** Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου,  $G_d$ , συναρτήσεως των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου και την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου



**Σχήμα 7.1.18:** Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου,  $G_T$ , συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου και την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

**Συγολισμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων**

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα της ολικής στιγμιαίας ακτινοβολίας,  $G_T$ , κατακόρυφου επιπέδου, προσανατολισμένου προς τον Νότο, για όλους τους μήνες του τυπικού έτους, παρατηρούμε πως η μέγιστη τιμή της μειώνεται όσο πλησιάζουμε στον Ιανουάριο, και αυξάνεται όταν απομακρυνόμαστε από αυτόν, και κυρίως κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών. Αυτή η συμπεριφορά δικαιολογείται απλά, από το γεγονός ότι όσο πλησιάζουμε στην «καρδιά» του χειμώνα, η ηλιακή ακτινοβολία είναι έντονα μειωμένη, ενώ καθώς απομακρυνόμαστε από αυτή, πόσο μάλλον πλησιάζοντας το κέντρο του καλοκαιριού, η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει σημαντικά. Η μέγιστη τιμή ολικής στιγμιαίας ακτινοβολίας για τον υπό εξέταση Νότιο τοίχο, αυξάνεται συνεχώς τους καλοκαιρινούς μήνες, και εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της, τον μήνα Οκτώβρη, ενώ στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά πλησιάζοντας στους χειμερινούς. Ο λόγος για τον οποίο, η μέγιστη τιμή της ολικής στιγμιαίας ακτινοβολίας  $G_T$  εμφανίζεται το μήνα Οκτώβριο, και όχι κάποιον καλοκαιρινό μήνα, όπως θα αναμέναμε, είναι ότι το καλοκαίρι ο ήλιος βρίσκεται πιο «ψηλά» και η ακτινοβολία του έχει μικρότερη καθετότητα με τον υπό εξέταση τοίχο, από ότι τον Οκτώβριο.

## **7.2 Ηλιακή φόρτιση του τοίχου που φέρει στρώμα PCM**

Στην ενότητα αυτή, εξετάζεται η ηλιακή φόρτιση ενός κατακόρυφου Νότια προσανατολισμένου τοίχου, ενός δωματίου διαστάσεων 3m(μήκος) × 3m(πλάτος) × 3m(ύψος), εντός της Αθήνας. Στο εσωτερικό του δωματίου, θεωρούμε ότι η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στους 22°C, με τη βοήθεια θερμαντικών μέσων (θερμοστάτες, καλοριφέρ, κλιματιστικά κλπ), και ο εξεταζόμενος τοίχος φέρει στρώμα υλικού αλλαγής φάσης. Στον απέναντι τοίχο, υπάρχει υαλοπίνακας διαστάσεων 1,5m(πλάτος) × 1,5m(ύψος), μέσα από τον οποίο διέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία, που τελικώς φορτίζει τον Νότιο τοίχο. Το στρώμα PCM έχει πάχος 4mm και διαχωρίζεται με τον εσωτερικό χώρο του δωματίου μέσω μιας γυψοσανίδας πάχους 1cm. Στόχος είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του PCM, ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου, και ο προσδιορισμός του βαθμού αξιοποίησής του. Αρχικά, παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού της θερμοκρασίας του υλικού αλλαγής φάσης, η οποία πραγματοποιείται για κάθε ώρα του 24ώρου της 21ης ημέρας κάθε μηνός του τυπικού έτους. Στη συνέχεια, προσδιορίζεται ο βαθμός αξιοποίησης του υλικού αλλαγής φάσης.

Στην παρούσα μελέτη, τα υλικά αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκαν στον εσωτερικό τοίχο είναι σε πρώτη φάση το RT20, στη συνέχεια το RT27, και τέλος το μείγμα SP25A8, οι ιδιότητες των οποίων φαίνονται στον πίνακα 7.2.1.

<b>Είδος PCM</b>	<b>RT20</b>	<b>RT27</b>	<b>SP25A8</b>
<b>H[kJ/kg]</b>	132,1	167,4	141,5
<b>T<sub>s</sub> [°C]</b>	15	22	22
<b>T<sub>L</sub> [°C]</b>	26	31	32
<b>C<sub>ps</sub> [kJ/kg·°C]</b>	1,9	2	2,6
<b>C<sub>pl</sub> [kJ/kg·°C]</b>	2,5	2,3	2,7
<b>ρ [kg/m<sup>3</sup>]</b>	825	820	1500

***Πίνακας 7.2.1: Ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη***

### **7.2.1 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM**

Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να αναφερθούν ορισμένες παραδοχές που έγιναν για την απλοποίηση του προβλήματος. Αρχικά, όπως προαναφέρθηκε, θεωρούμε ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό του εξεταζόμενου δωματίου παραμένει σταθερή και ίση με 22°C μέσω της χρήσης πηγών θερμότητας. Όσον αφορά στο υλικό αλλαγής φάσης, υποθέσαμε ότι η θερμοκρασία που επικρατεί στο στρώμα PCM είναι παντού η ίδια, ενώ μεταξύ του στρώματος του PCM και της μόνωσης θεωρήσαμε πως δεν συναλλάσσεται θερμότητα. Επιπλέον, δεχόμαστε ότι η θερμοκρασία που αναπτύσσει παραμένει σταθερή στη διάρκεια μίας ώρας, δηλαδή από την έλευση μέχρι την αποδρομή της, για κάθε



ώρα του 24ώρου, ξεχωριστά. Το στρώμα PCM έχει πάχος 4mm και διαχωρίζεται με τον εσωτερικό χώρο του δωματίου μέσω μιας γυψοσανίδας πάχους 1cm.

Η συνολική θερμότητα που λαμβάνει το PCM είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα της θερμικής ενέργειας, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που διέρχεται από τον απέναντι υαλοπίνακα και της συναλλασσόμενης θερμότητας με συναγωγή με τον εσωτερικό αέρα του δωματίου. Ο όρος της συναλλασσόμενης θερμότητας μεταξύ PCM και εσωτερικού αέρα λαμβάνει θετικό πρόσημο μέσα στην εξίσωση του ισολογισμού ενέργειας (και επομένως προσαυξάνει τη θερμότητα που λαμβάνει το PCM), εφόσον η θερμοκρασία του PCM την εκάστοτε ώρα του 24ώρου είναι μικρότερη των 22°C, δηλαδή μικρότερη της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου. Αν η θερμοκρασία του PCM είναι μεγαλύτερη των 22°C, τότε το υλικό αλλαγής φάσης χάνει θερμότητα προσφέροντάς την στο χώρο και προφανώς σε αυτήν την περίπτωση το πρόσημο του όρου θα είναι αρνητικό.

Η σχέση ισολογισμού ενέργειας που εφαρμόστηκε στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης, για κάθε ώρα κάθε μήνα του έτους, είναι η ακόλουθη:

$$0,9 \cdot G_T \cdot A_f \cdot 3600 + U \cdot A_w \cdot \left( T_{\Delta\Omega M} - \frac{T_{αρχ} + T_{τελ}}{2} \right) \cdot 3600 = m_{PCM} \cdot C_{peff} \cdot (T_{αρχ} - T_{τελ}) \quad (7.2.1.1)$$

Όπου:

$A_f = 2,25 \text{m}^2$ , η επιφάνεια του υαλοπίνακα

$A_w = 9 \text{m}^2$ , η επιφάνεια του τοίχου

$T_{αρχ}$  [°C], η θερμοκρασία του PCM στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου

$T_{τελ}$  [°C], η θερμοκρασία του PCM στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου

$T_{\Delta\Omega M}$  [°C], η θερμοκρασία εντός του εξεταζόμενου χώρου, που όπως υποθέσαμε διατηρείται σταθερή και είναι ίση με 22°C

$m_{PCM}$  [kg], η μάζα του PCM η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$m_{PCM} = \rho_{PCM} \cdot V_{PCM} = 825 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9 \text{m}^2 \cdot 0,04 \text{m} = 297 \text{ kg για το RT20}$$

$$m_{PCM} = \rho_{PCM} \cdot V_{PCM} = 820 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9 \text{m}^2 \cdot 0,04 \text{m} = 295,2 \text{ kg για το RT27}$$

$$m_{PCM} = \rho_{PCM} \cdot V_{PCM} = 1500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9 \text{m}^2 \cdot 0,04 \text{m} = 540 \text{ kg για το SP25A8}$$

U [kW/m<sup>2</sup>·°C] ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{d}{k} \quad (7.2.1.2)$$

Όπου:

$\frac{1}{h_i}$ , η θερμική αντίσταση συναγωγής και είναι ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ του τοίχου και του εσωτερικού αέρα του χώρου. Σύμφωνα με την ASHRAE είναι  $h_i = 8 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

$\frac{d}{k}$ , η θερμική αντίσταση αγωγής διαμέσου του σοβά που υφίσταται πριν το στρώμα του PCM, με το πάχος του στρώματος του σοβά και τη θερμική αγωγιμότητα του σοβά. Έτσι, είναι  $k = 1,2 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$  και  $d = 0,01m$ .

Άρα, ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας προκύπτει  $U = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ C$

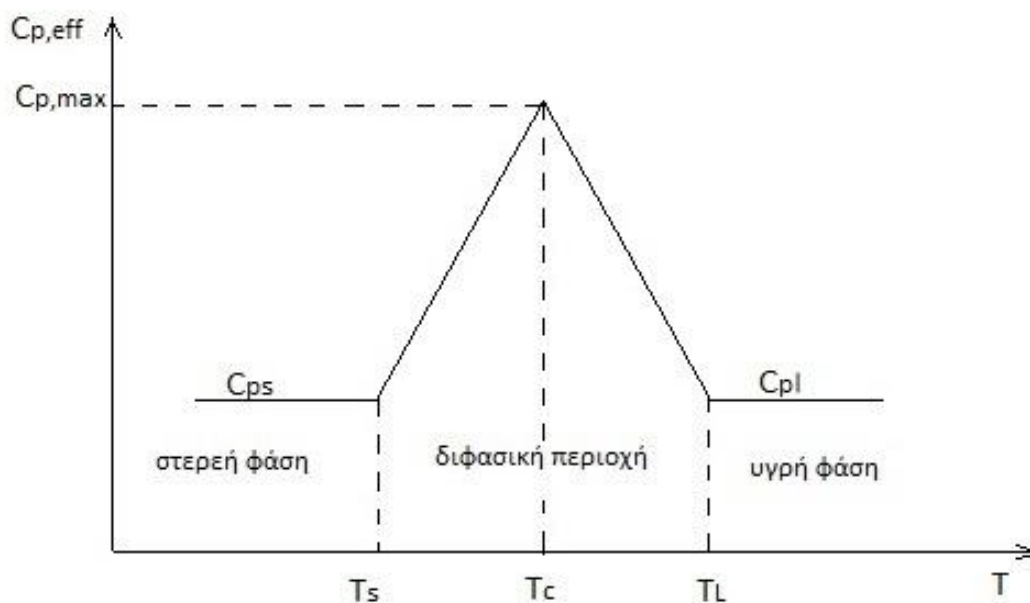
$C_{p,eff}$ , η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης και η διαδικασία υπολογισμού της θα παρουσιαστεί στην αμέσως επόμενη ενότητα.

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

## **7.2.2 Υπολογισμός της ενεργού θερμοχωρητικότητας $C_{p,eff}$ του PCM**

Στην παρούσα μελέτη, το φαινόμενο αλλαγής φάσης ενδιαφέρει μόνο σαν μακροσκοπικό φαινόμενο χωρίς την ανάγκη υπολογισμού περαιτέρω λεπτομερειών. Για τον σκοπό αυτό, θα γίνει χρήση της μεθόδου ενεργούς θερμοχωρητικότητας, και πιο συγκεκριμένη της τριγωνικής κατανομής της, για τον υπολογισμό του  $C_{p,eff}$ . Τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την εφαρμογή της, έχουν δοθεί όλα στον πίνακα των ιδιοτήτων των PCM 7.2.1.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $C_{p,eff}(T)$  τριγωνικής μορφής, παρουσιάζεται στο σχήμα 7.2.2.1 και περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:



**Σχήμα 7.2.2.1 :** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  των υλικών αλλαγής φάσης

Για  $T \leq T_s$  :

$$C_{peff} = C_{ps} \quad (7.2.2.1)$$

Για  $T_s \leq T \leq T_c$  :

$$C_{peff}(T) = 4 \cdot (H - b \cdot C_{ps}) \cdot (T - T_s) / b^2 + C_{ps} \quad (7.2.2.2)$$

Για  $T_c \leq T \leq T_l$  :

$$C_{peff}(T) = 4 \cdot (b \cdot C_{pl} - H) \cdot (T - T_s - \frac{b}{2}) / b^2 + 2 \cdot H / b - C_{pl} \quad (7.2.2.3)$$

Για  $T \geq T_l$  :

$$C_{peff} = C_{pl} \quad (7.2.2.4)$$

Όπου:

T: η θερμοκρασία του PCM

T<sub>s</sub>: η θερμοκρασία στερεοποίησης του PCM

T<sub>i</sub>: η θερμοκρασία τήξης του PCM

C<sub>ps</sub>: η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM για θερμοκρασία T<sub>s</sub>

C<sub>pi</sub>: η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM για θερμοκρασία T<sub>i</sub>

T<sub>c</sub>: η θερμοκρασία στο μέσον του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης του PCM, δηλαδή  $T_c = (T_1 + T_s)/2$

b: το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης, δηλαδή (T<sub>1</sub> - T<sub>s</sub>)

H: η θερμότητα αλλαγής φάσης του PCM

Με βάση τα παραπάνω και τον πίνακα ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης, μπορούμε να καθορίσουμε πλήρως τη συνάρτηση που δίνει την ενεργό θερμοχωρητικότητα για κάθε PCM που θα χρησιμοποιήσουμε.

Για το RT20

Για  $T \leq 15^\circ\text{C}$ :

$$C_{\text{peff}} = C_{\text{ps}} = 1,9 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \quad (7.2.2.5)$$

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

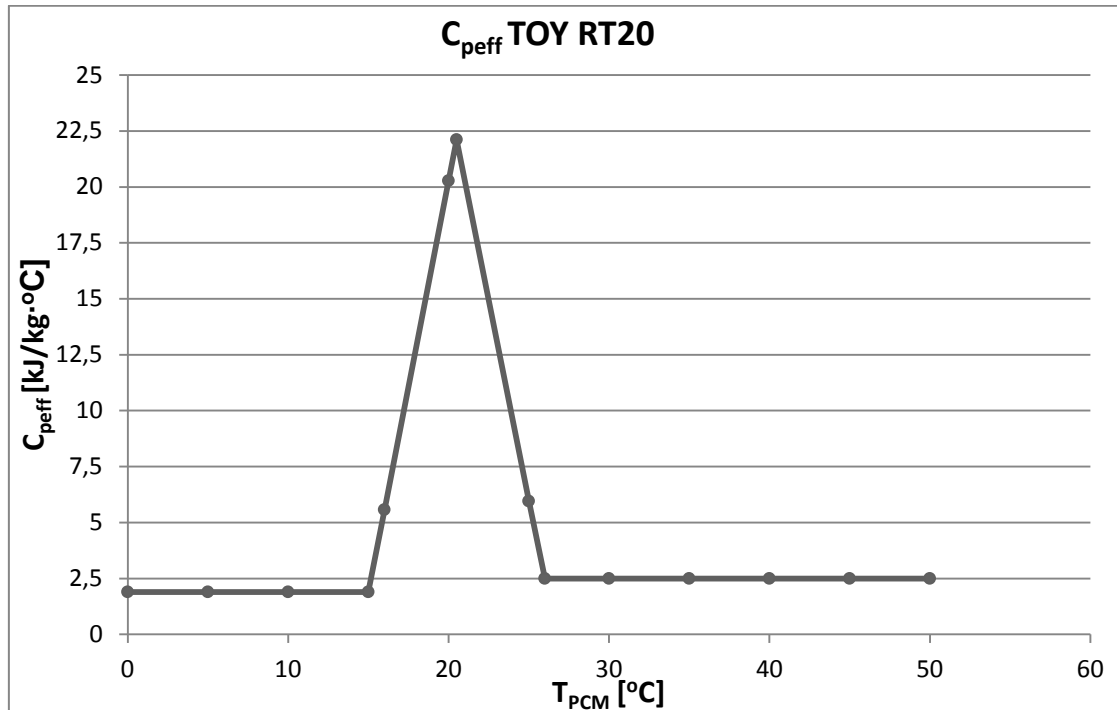
$$C_{\text{peff}}(T) = 3,676 \cdot T - 53,24 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \quad (7.2.2.6)$$

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

$$C_{\text{peff}}(T) = -3,458 \cdot T + 92,41 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \quad (7.2.2.7)$$

Για  $T > 26^\circ\text{C}$ :

$$C_{\text{peff}} = C_{\text{pl}} = 2,5 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \quad (7.2.2.8)$$



**Σχήμα 7.2.2.2.:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{\text{peff}}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20

Για το RT27

Για  $T \leq 22^\circ\text{C}$  :

$$C_{\text{peff}} = C_{\text{ps}} = 2 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \quad (7.2.2.9)$$

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

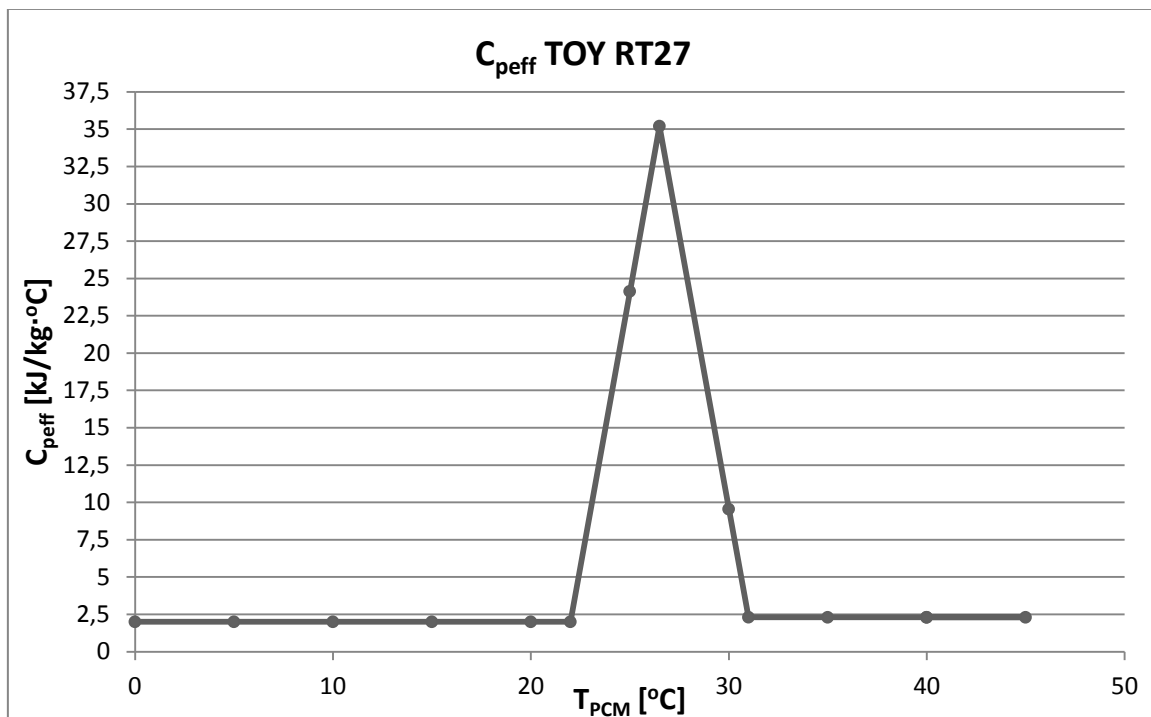
$$C_{\text{peff}}(T) = 7,378 \cdot T - 160,316 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \quad (7.2.2.10)$$

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

$$C_{\text{peff}}(T) = -7,244 \cdot T + 226,87 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \quad (7.2.2.11)$$

Για  $T > 31^{\circ}\text{C}$ :

$$C_{\text{peff}} = C_{\text{pl}} = 2,3 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \quad (7.2.2.12)$$



Σχήμα 7.2.2.3 : Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{\text{peff}}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27

Για το SP25A8

Για  $T \leq 22^{\circ}\text{C}$  :

$$C_{\text{peff}} = C_{\text{ps}} = 2,6 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \quad (7.2.2.13)$$

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

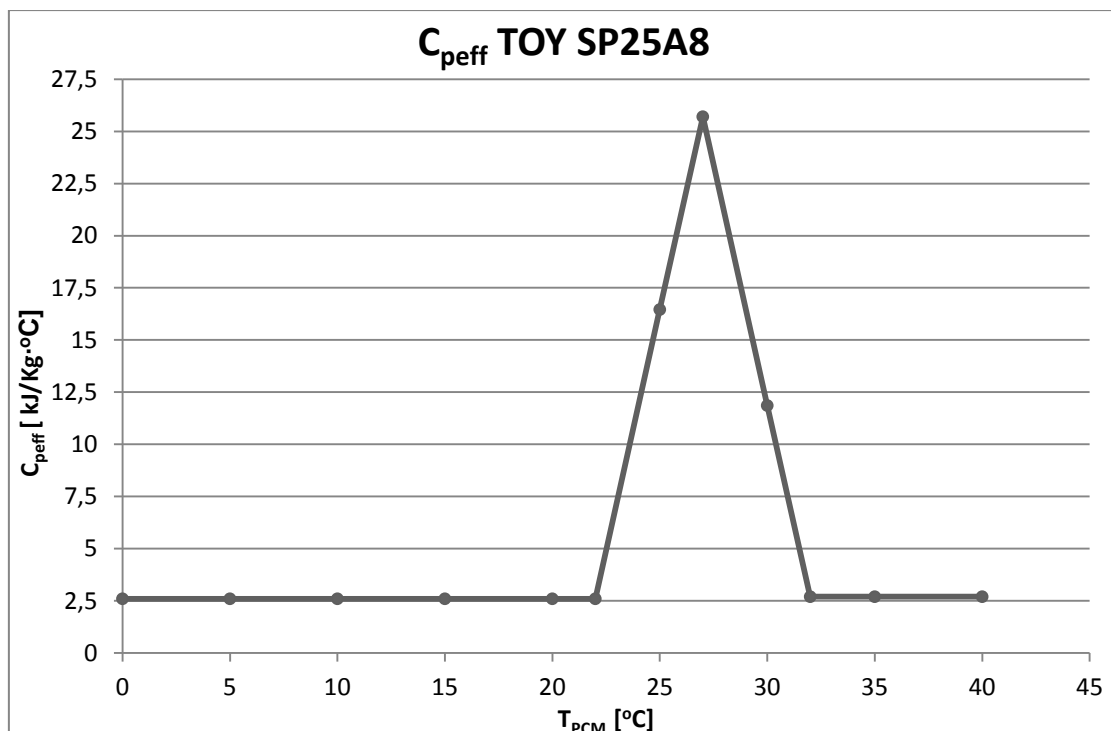
$$C_{\text{peff}}(T) = 4,62 \cdot T - 99,04 \text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C} \quad (7.2.2.14)$$

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

$$C_{\text{peff}}(T) = -4,58 \cdot T + 149,26 \text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C} \quad (7.2.2.15)$$

Για  $T > 32^{\circ}\text{C}$ :

$$C_{\text{peff}} = C_{\text{pl}} = 2,7 \text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C} \quad (7.2.2.16)$$



**Σχήμα 7.2.2.4 :** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{\text{peff}}$  συνάρτησε της θερμοκρασίας του SP25A8

### 7.2.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας PCM συναρτήσει των ωρών του 24ώρου

Με γνωστή πλέον την συνάρτηση που δίνει τις τιμές της ενεργού θερμοχωρητικότητας και με γνωστά όλα τα απαραίτητα μεγέθη, μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό της θερμοκρασίας του υλικού αλλαγής φάσης, στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου, εφαρμόζοντας τη σχέση του ισολογισμού ενέργειας. Η διαδικασία αυτή, θα πραγματοποιηθεί για όλους τους μήνες του τυπικού έτους και για τα τρία PCM.

Η εξίσωση του ισολογισμού ενέργειας γράφεται στη μορφή:

$$T_{\text{τελ}} = \frac{0,9 \cdot 3600 \cdot A_f \cdot G_T + T_{\Delta\Omega M} \cdot 3600 \cdot U \cdot A_w - 1800 \cdot U \cdot A_w \cdot T_{\text{αρχ}} + m_{\text{PCM}} \cdot c_{\text{peff}} \cdot T_{\text{αρχ}}}{m_{\text{PCM}} \cdot c_{\text{peff}} + U \cdot A_w \cdot 1800} \quad (7.2.3.1)$$

Στην παραπάνω σχέση υπολογισμού, εκτός από τον άγνωστο  $T_{\text{τελ}}$ , δηλαδή τη θερμοκρασία PCM στο τέλος κάθε ώρας, άγνωστο αποτελεί και η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου, δηλαδή η  $T_{\text{αρχ}}$ . Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την ακόλουθη επαναληπτική διαδικασία.

Αρχικά, θεωρούμε αυθαίρετα γνωστή την  $T_{\text{αρχ}}$ , δίνοντας της μια τυχαία τιμή, έστω  $T_{\text{αρχ}}=17^\circ\text{C}$ , για τις 7:00 το πρωί. Με γνωστούς πλέον όλους τους απαιτούμενους όρους της σχέσης ισολογισμού, υπολογίζουμε την  $T_{\text{τελ}}$ , στο τέλος των 7:00, η οποία θα αποτελέσει την αρχική θερμοκρασία  $T_{\text{αρχ}}$  στις 8:00, προκειμένου να ευρεθεί η τελική τιμή της θερμοκρασίας  $T_{\text{τελ}}$ , στις 8:00. Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για όλες τις ώρες του 24ώρου, προσδιορίζεται η  $T_{\text{τελ}}$  στο τέλος κάθε ώρας του 24ώρου. Για να πετύχουμε ανεξαρτησία των τιμών από την αρχική υπόθεση της  $T_{\text{αρχ}}$  στις 7:00 που κάναμε, επαναλαμβάνουμε ολόκληρη την παραπάνω διαδικασία, θέτοντας αυτή τη φορά ως αρχική θερμοκρασία των 7:00, την τελική θερμοκρασία των 6:00, έτσι όπως αυτή προέκυψε από την πρώτη δοκιμή. Οι επαναλήψεις για το ίδιο 24ωρο συνεχίζονται, έως ότου οι τιμές του της ίδιας ώρας να συγκλίνουν μεταξύ δύο διαδοχικών δοκιμών. Στην παρούσα εργασία θεωρούμε σύγκλιση στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο.

Με βάση όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως και τους κατάλληλους υπολογισμούς βάσει των ιδιοτήτων του συγκεκριμένου PCM, η σχέση υπολογισμού της  $T_{\text{τελ}}$  (7.2.3.1) παίρνει τη μορφή:

$$T_{\text{τελ}} = \frac{7290 \cdot G_T + 243 \cdot T_{\Delta\Omega M} - 121,5 \cdot T_{\text{αρχ}} + m_{\text{PCM}} \cdot c_{\text{peff}} \cdot T_{\text{αρχ}}}{121,5 + m_{\text{PCM}} \cdot c_{\text{peff}}} \quad (7.2.3.2)$$



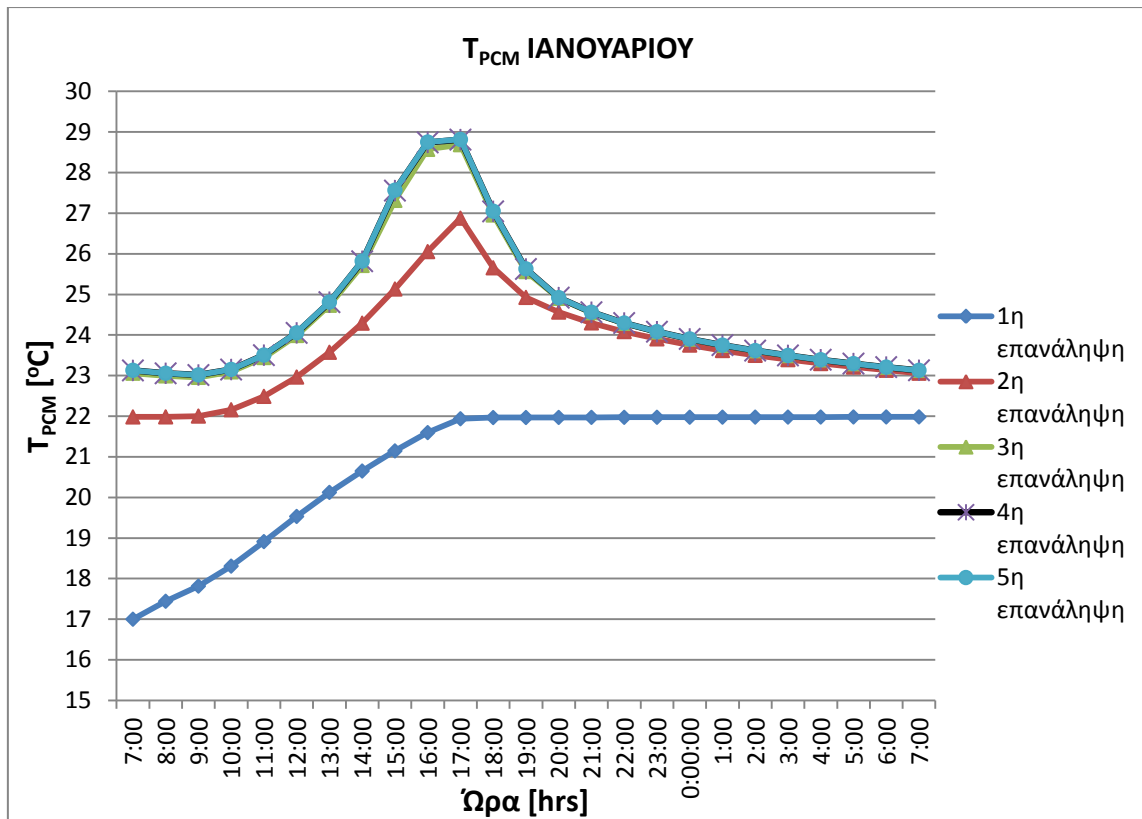
### 7.2.3.1 Υπολογισμός θερμοκρασίας του RT20 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου

Υποθέτοντας αρχική θερμοκρασία του RT20, στις 7:00,  $T_{αρχ} = 17^{\circ}\text{C}$ , ακολουθήσαμε βήμα-βήμα την παραπάνω επαναληπτική διαδικασία, μέχρις ότου οι τιμές της ίδιας ώρας κάθε 24ώρου να συγκλίνουν. Η σύγκλιση αυτή επετεύχθη μετά από 5 δοκιμές, όπως αποτυπώνεται ενδεικτικά και στο διάγραμμα που αφορά στο μήνα Γενάρη. Στη συνέχεια, ακολουθούν συγκεντρωτικοί πίνακες και τα αντίστοιχα διαγράμματα με τις θερμοκρασίες, που επικρατούν στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης, συναρτήσει των ωρών της εκάστοτε ημέρας.

#### Για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου

Ωρα [hrs]	$T_{PCM} [^{\circ}\text{C}]$
7:00	23,13
8:00	23,06
9:00	23,02
10:00	23,15
11:00	23,51
12:00	24,06
13:00	24,81
14:00	25,82
15:00	27,57
16:00	28,75
17:00	28,82
18:00	27,05
19:00	25,63
20:00	24,92
21:00	24,56
22:00	24,30
23:00	24,08
00:00	23,90
1:00	23,75
2:00	23,62
3:00	23,50
4:00	23,39
5:00	23,30
6:00	23,21

**Πίνακας 7.2.3.1.1:** Θερμοκρασία  $T_{τελ}$  του RT20 για κάθε ώρα της 21ης Ιανουαρίου

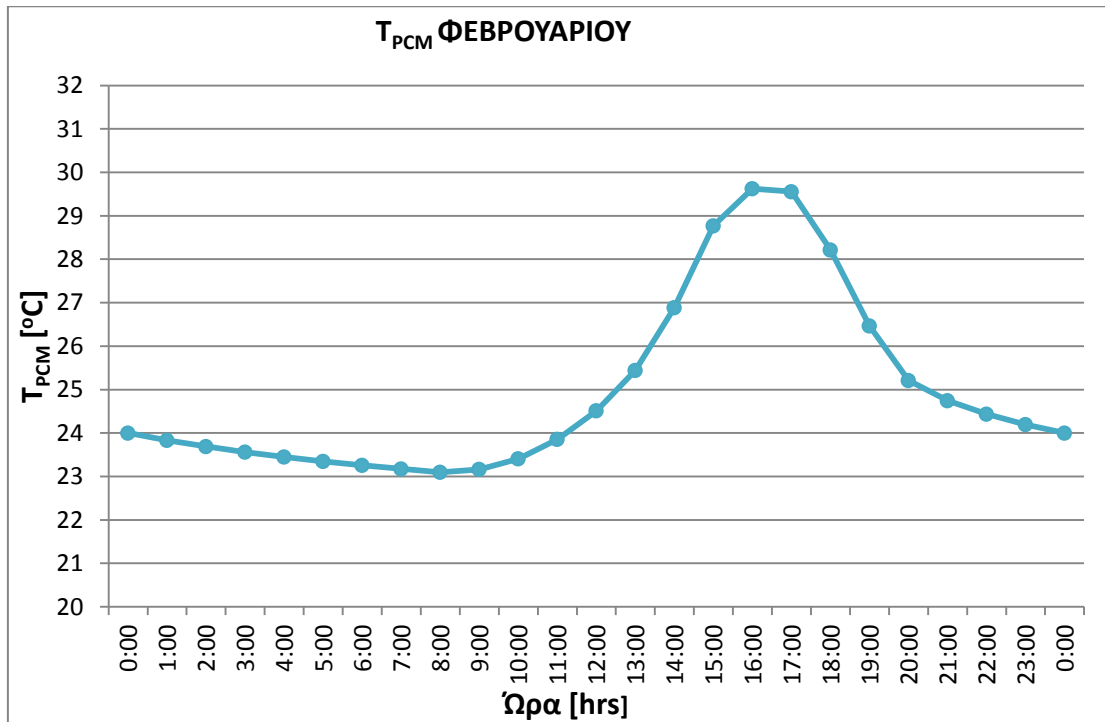


**Σχήμα 7.2.3.1.1:** Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, η οποία προέκυψε μέσω επαναληπτικής διαδικασίας

Για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	23,17
8:00	23,10
9:00	23,16
10:00	23,41
11:00	23,86
12:00	24,51
13:00	25,44
14:00	26,89
15:00	28,77
16:00	29,62
17:00	29,55
18:00	28,21
19:00	26,47
20:00	25,21
21:00	24,74
22:00	24,44
23:00	24,20
00:00	24,00
1:00	23,83
2:00	23,69
3:00	23,56
4:00	23,45
5:00	23,35
6:00	23,26

Πίνακας 7.2.3.1.2: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT20 για κάθε ώρα της 21ης Φεβρουαρίου

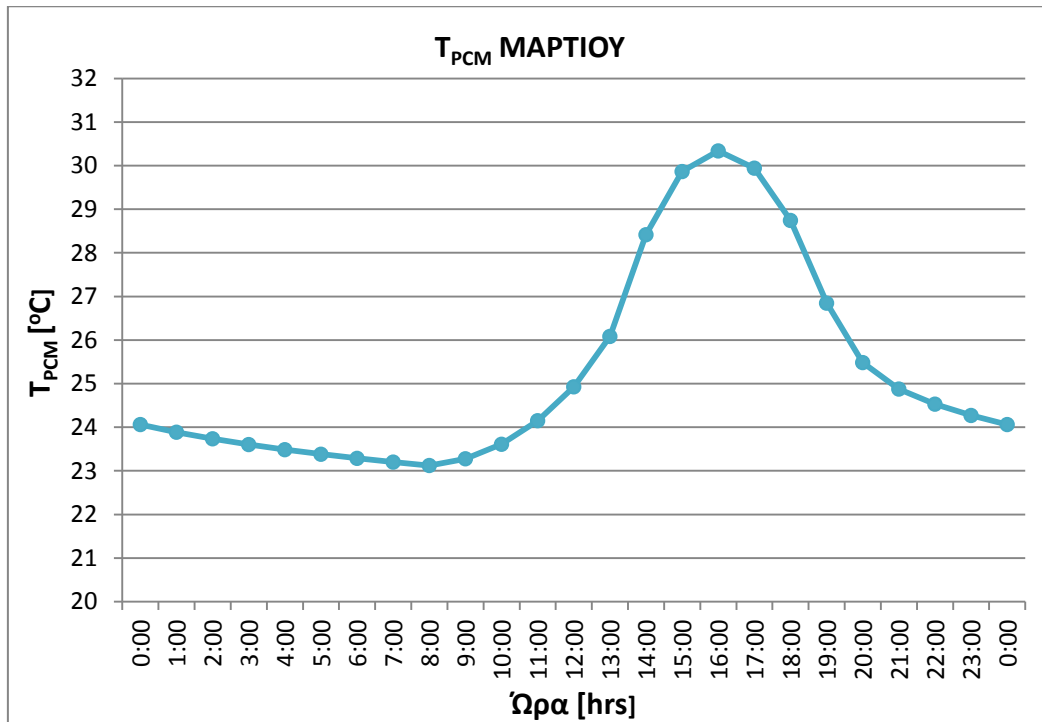


Σχήμα 7.2.3.1.2 : Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσεως των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

Για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	23,20
8:00	23,12
9:00	23,28
10:00	23,61
11:00	24,15
12:00	24,93
13:00	26,08
14:00	28,42
15:00	29,87
16:00	30,34
17:00	29,94
18:00	28,74
19:00	26,85
20:00	25,48
21:00	24,88
22:00	24,53
23:00	24,27
00:00	24,06
1:00	23,89
2:00	23,73
3:00	23,60
4:00	23,49
5:00	23,38
6:00	23,29

**Πίνακας 7.2.3.1.3:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT20 για κάθε ώρα της 21<sup>ης</sup> Μαρτίου

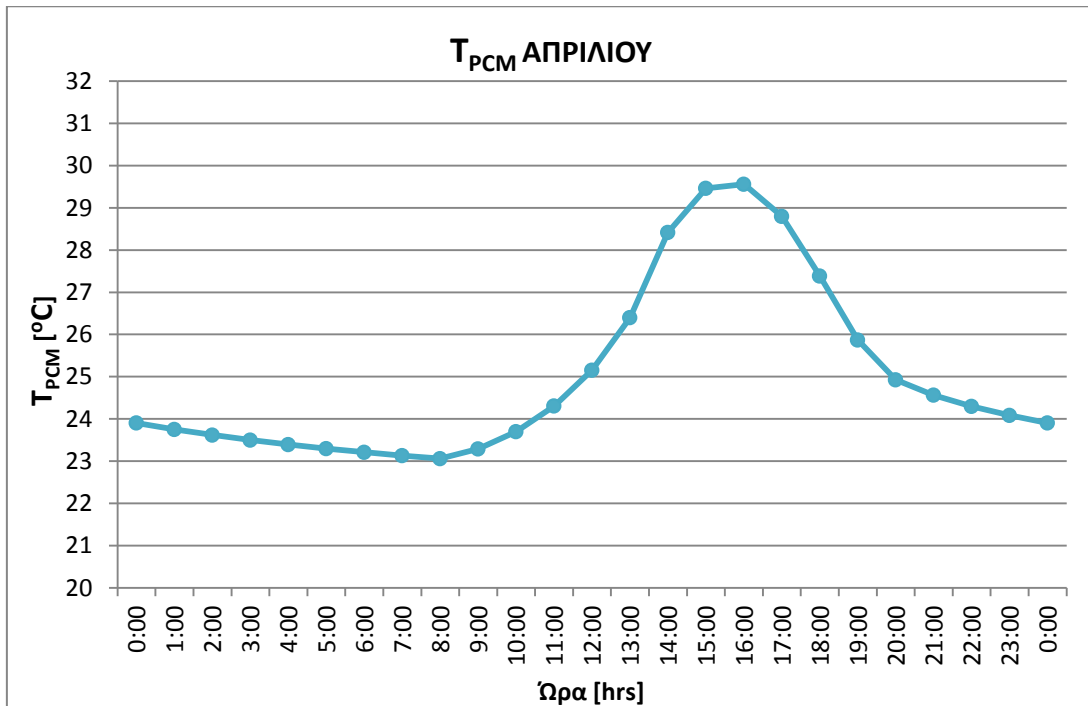


**Σχήμα 7.2.3.1.3 :** Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου

Για την 21<sup>η</sup> Απριλίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	23,17
8:00	23,09
9:00	23,30
10:00	23,69
11:00	24,29
12:00	25,13
13:00	26,41
14:00	28,59
15:00	29,82
16:00	30,07
17:00	29,45
18:00	28,12
19:00	26,40
20:00	25,16
21:00	24,72
22:00	24,41
23:00	24,18
00:00	23,98
1:00	23,82
2:00	23,67
3:00	23,55
4:00	23,44
5:00	23,34
6:00	23,25

**Πίνακας 7.2.3.1.4:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT20 για κάθε ώρα της 21ης Απριλίου

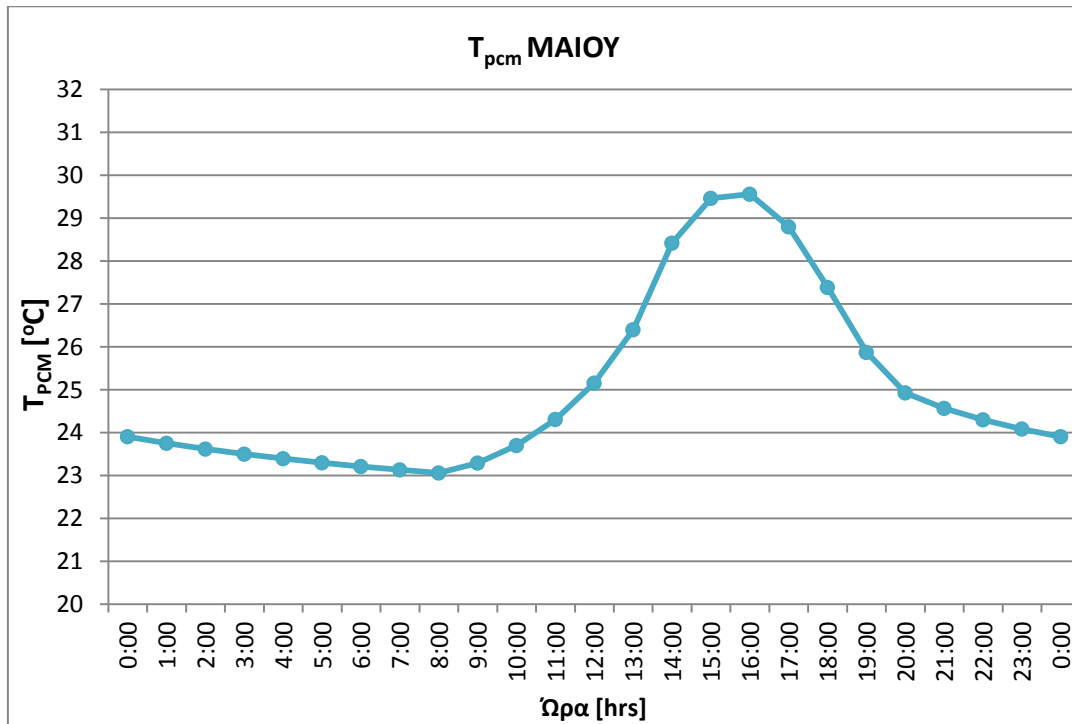


**Σχήμα 7.2.3.1.4:** Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Απριλίου

Για την 21<sup>η</sup> Μαΐου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	23,13
8:00	23,06
9:00	23,29
10:00	23,70
11:00	24,31
12:00	25,15
13:00	26,40
14:00	28,42
15:00	29,46
16:00	29,56
17:00	28,80
18:00	27,39
19:00	25,87
20:00	24,93
21:00	24,57
22:00	24,30
23:00	24,09
00:00	23,91
1:00	23,75
2:00	23,62
3:00	23,50
4:00	23,39
5:00	23,30
6:00	23,21

**Πίνακας 7.2.3.1.5:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT20 για κάθε ώρα της 21ης Μαΐου

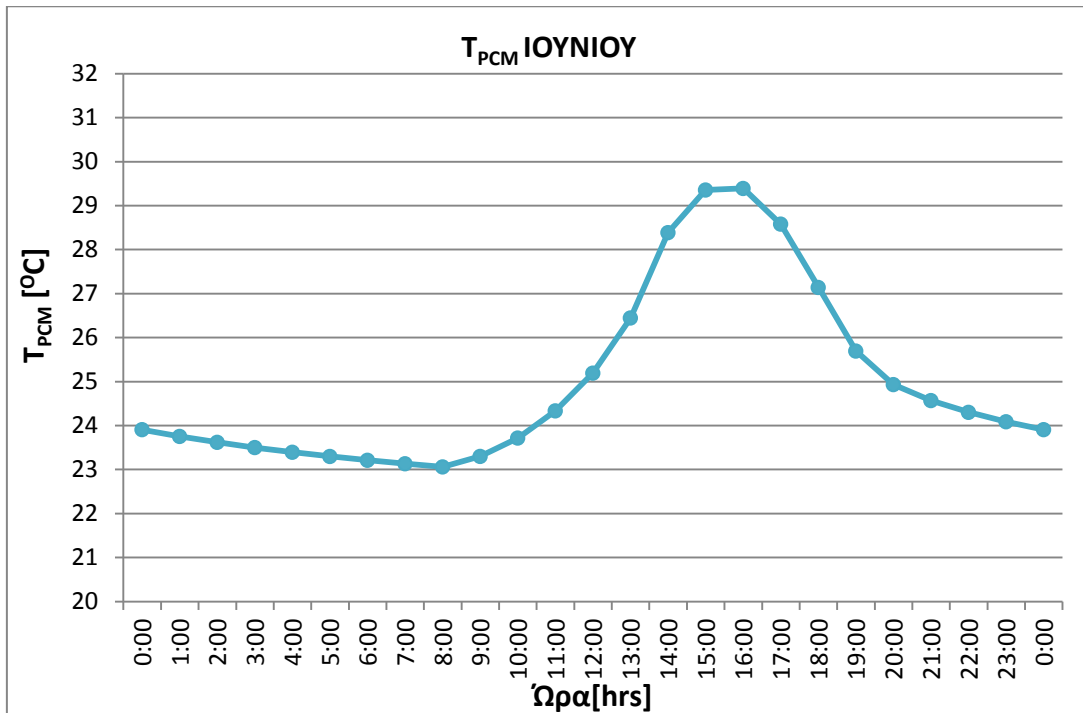


**Σχήμα 7.2.3.1.5:** Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου

Για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	23,13
8:00	23,06
9:00	23,30
10:00	23,72
11:00	24,34
12:00	25,19
13:00	26,45
14:00	28,39
15:00	29,36
16:00	29,39
17:00	28,58
18:00	27,14
19:00	25,70
20:00	24,93
21:00	24,57
22:00	24,30
23:00	24,09
00:00	23,91
1:00	23,75
2:00	23,62
3:00	23,50
4:00	23,39
5:00	23,30
6:00	23,21

Πίνακας 7.2.3.1.6: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT20 για κάθε ώρα της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου

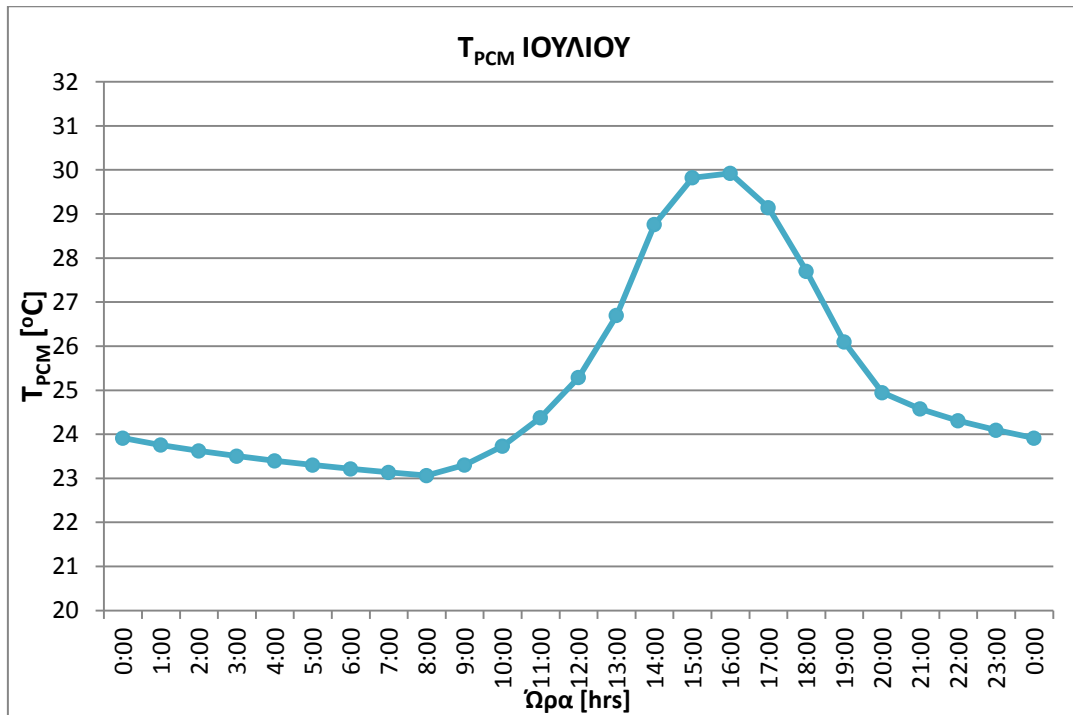


Σχήμα 7.2.3.1.6 : Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιουνίου

Για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	23,13
8:00	23,06
9:00	23,30
10:00	23,73
11:00	24,38
12:00	25,29
13:00	26,70
14:00	28,76
15:00	29,82
16:00	29,92
17:00	29,14
18:00	27,70
19:00	26,10
20:00	24,94
21:00	24,58
22:00	24,31
23:00	24,09
00:00	23,91
1:00	23,76
2:00	23,62
3:00	23,50
4:00	23,40
5:00	23,30
6:00	23,21

Πίνακας 7.2.3.1.7: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT20 για κάθε ώρα της 21ης Ιουλίου



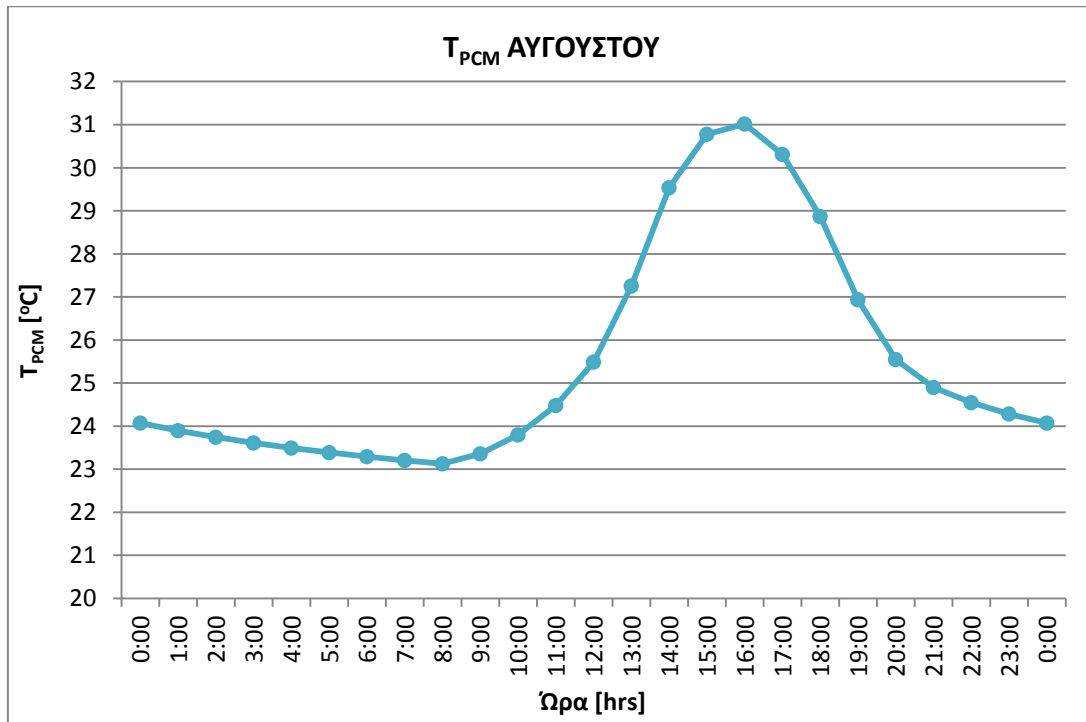
Σχήμα 7.2.3.1.7: Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου



Για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	23,21
8:00	23,13
9:00	23,36
10:00	23,80
11:00	24,48
12:00	25,49
13:00	27,25
14:00	29,54
15:00	30,78
16:00	31,02
17:00	30,31
18:00	28,87
19:00	26,94
20:00	25,55
21:00	24,90
22:00	24,54
23:00	24,28
00:00	24,07
1:00	23,89
2:00	23,74
3:00	23,61
4:00	23,49
5:00	23,39
6:00	23,29

**Πίνακας 7.2.3.1.8:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT20 για κάθε ώρα της 21ης Αυγούστου

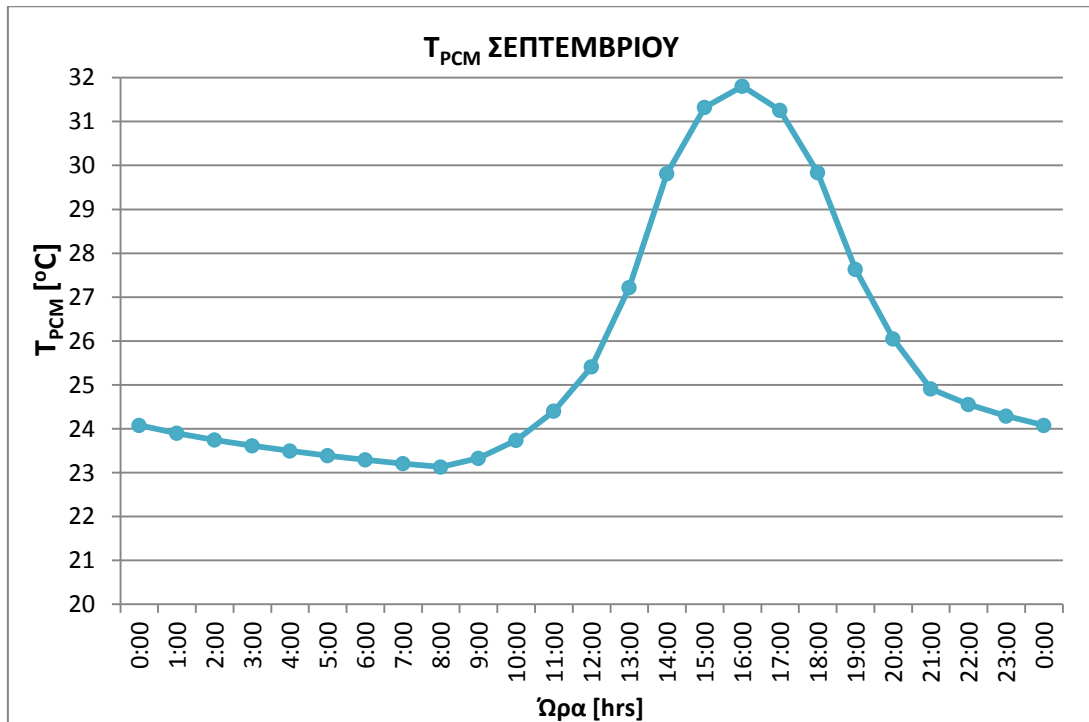


**Σχήμα 7.2.3.1.8 :** Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Αυγούστου

Για την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	23,21
8:00	23,13
9:00	23,33
10:00	23,74
11:00	24,40
12:00	25,41
13:00	27,22
14:00	29,81
15:00	31,32
16:00	31,80
17:00	31,26
18:00	29,84
19:00	27,63
20:00	26,05
21:00	24,91
22:00	24,55
23:00	24,29
00:00	24,08
1:00	23,90
2:00	23,75
3:00	23,61
4:00	23,49
5:00	23,39
6:00	23,29

Πίνακας 7.2.3.1.9: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT20 για κάθε ώρα της 21ης Σεπτεμβρίου

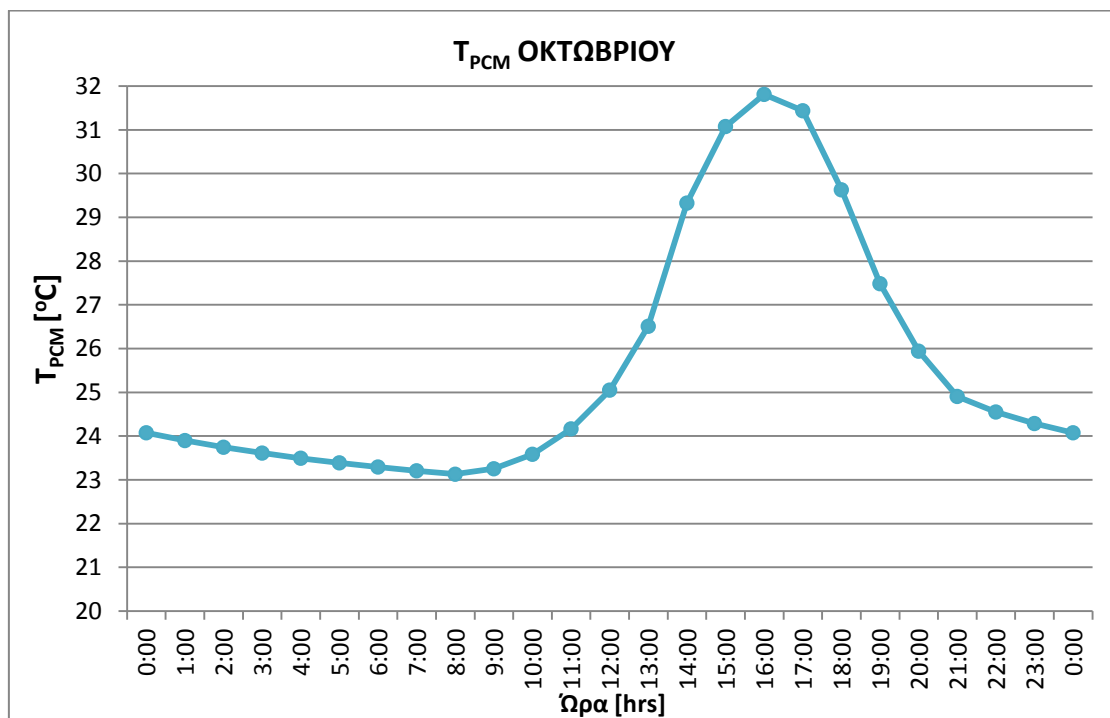


Σχήμα 7.2.3.1.9: Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσεως των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου

Για την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	23,21
8:00	23,13
9:00	23,25
10:00	23,58
11:00	24,16
12:00	25,05
13:00	26,51
14:00	29,32
15:00	31,07
16:00	31,81
17:00	31,44
18:00	29,63
19:00	27,48
20:00	25,94
21:00	24,90
22:00	24,55
23:00	24,29
00:00	24,08
1:00	23,90
2:00	23,75
3:00	23,61
4:00	23,49
5:00	23,39
6:00	23,29

Πίνακας 7.2.3.1.10: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT20 για κάθε ώρα της 21<sup>ης</sup> Οκτωβρίου

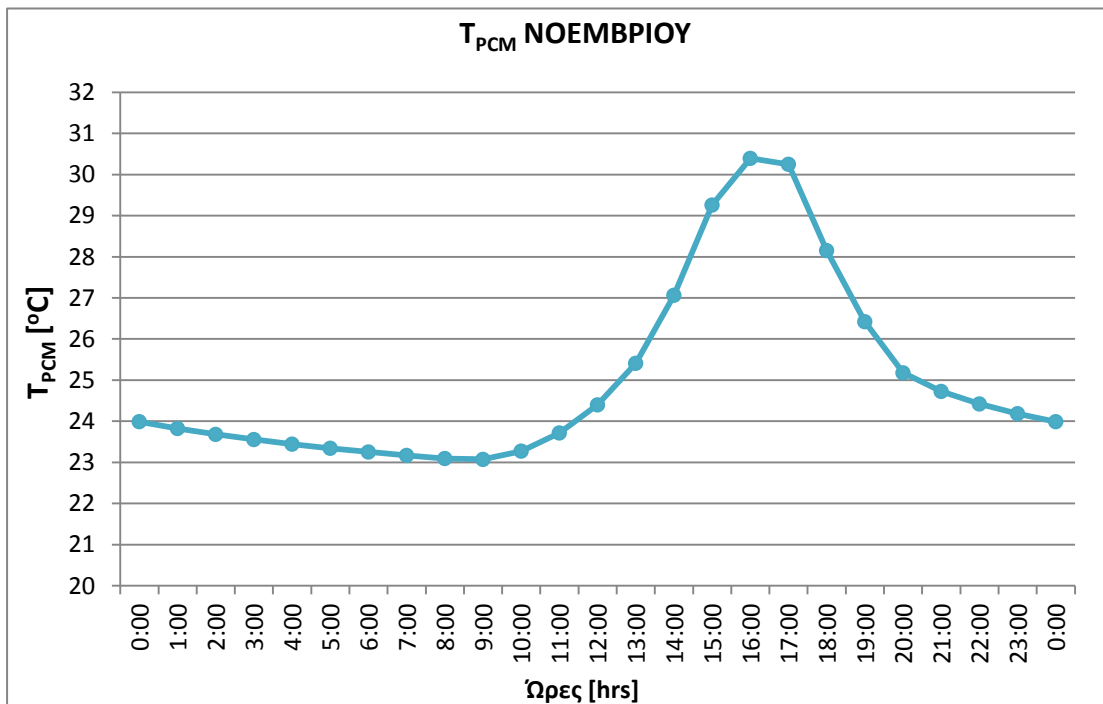


Σχήμα 7.2.3.1.10: Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου

Για την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	23,17
8:00	23,09
9:00	23,07
10:00	23,27
11:00	23,72
12:00	24,40
13:00	25,41
14:00	27,06
15:00	29,26
16:00	30,39
17:00	30,25
18:00	28,15
19:00	26,42
20:00	25,18
21:00	24,73
22:00	24,42
23:00	24,18
00:00	24,00
1:00	23,82
2:00	23,68
3:00	23,55
4:00	23,44
5:00	23,34
6:00	23,25

Πίνακας 7.2.3.1.11: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT20 για κάθε ώρα της 21ης Νοεμβρίου

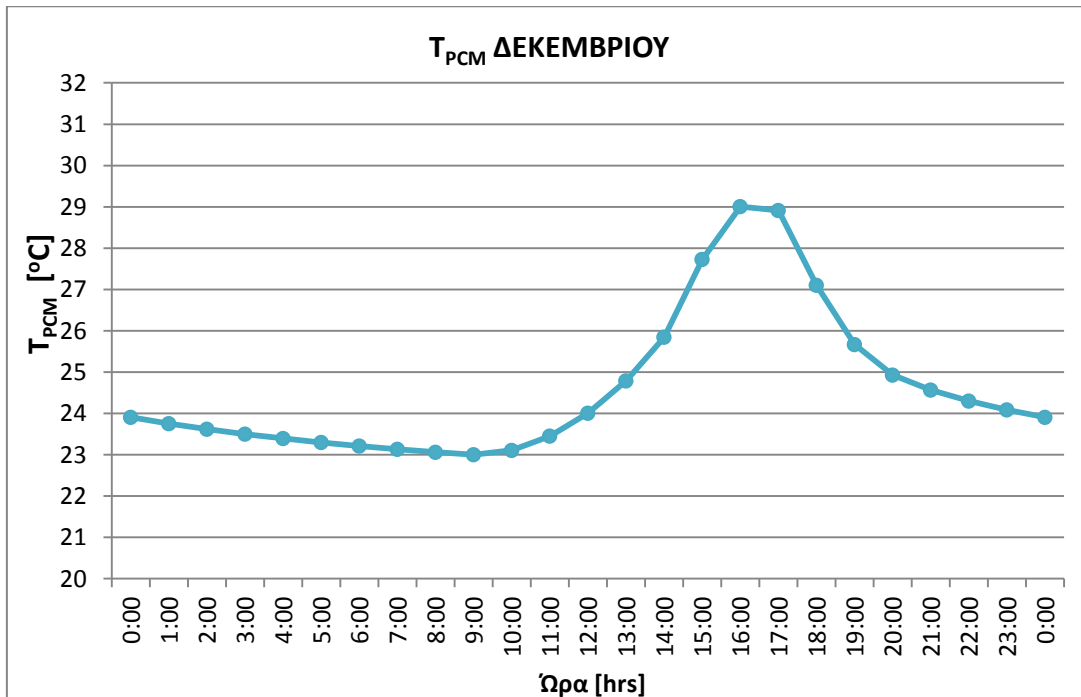


Σχήμα 7.2.3.1.11: Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου

Για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	23,13
8:00	23,06
9:00	23,00
10:00	23,11
11:00	23,45
12:00	24,01
13:00	24,79
14:00	25,84
15:00	27,73
16:00	29,01
17:00	28,91
18:00	27,10
19:00	25,67
20:00	24,93
21:00	24,57
22:00	24,30
23:00	24,08
00:00	23,91
1:00	23,75
2:00	23,62
3:00	23,50
4:00	23,39
5:00	23,30
6:00	23,21

Πίνακας 7.2.3.1.12: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT20 για κάθε ώρα της 21ης Δεκεμβρίου



Σχήμα 7.2.3.1.12: Θερμοκρασία του RT20 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

### Συγολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των θερμοκρασιών κάθε μήνα, διαπιστώνουμε ότι η πρώτη και η τελευταία τιμή της θερμοκρασίας, είναι σχεδόν ίδιες, γεγονός που αποδεικνύει και την ορθότητα των διαγραμμάτων. Επιπλέον, βλέπουμε ότι όλες οι καμπύλες όλων των διαγραμμάτων εκκινούν από θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτήν που επικρατεί στο χώρο ( $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$ ). Αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι, πέραν από την φόρτιση του από τον εσωτερικό αέρα του χώρου, το PCM φορτίζεται επιπρόσθετα από τον ήλιο. Επομένως, όπως είναι λογικό, το υλικό αλλαγής φάσης προσφέρει θερμότητα στο δωμάτιο και για το λόγο αυτό, η θερμοκρασία του φθίνει από τις 12 το βράδυ, που εκκινεί κάθε διάγραμμα, έως τις 8 περίπου το πρωί. Από τις 8 το πρωί και έπειτα, επειδή έχει βγει ο ήλιος και ο τοίχος υφίσταται ολική ακτινοβολία, το υλικό αλλαγής φάσης, ενώ εξακολουθεί να δίνει θερμότητα στο χώρο, αφού η θερμοκρασία του είναι και πάλι μεγαλύτερη από αυτήν του δωματίου, προσαυξάνει τη θερμοκρασία του μέχρι τις 16:00-17:00. Αυτό οφείλεται στο ότι σε αυτό το χρονικό διάστημα, λόγω ύπαρξης ολικής ακτινοβολίας  $G_T$ , το υλικό αλλαγής φάσης λαμβάνει πολύ μεγαλύτερα ποσά θερμότητας από αυτά που χάνει. Από τις 16:00-17:00 το απόγευμα και μέχρι την ολοκλήρωση του 24ώρου, παύει πλέον να υφίσταται ολική ακτινοβολία  $G_T$  και η θερμοκρασία του PCM αρχίζει να φθίνει, διότι συνεχίζει να προσδίδει θερμότητα στο χώρο.

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα και για τους 12 μήνες του χρόνου, για τον υπό εξέταση νότιο τοίχο, παρατηρούμε πως η καμπύλη του  $T$  πέφτει κατακόρυφα, δηλαδή, αποκτά μικρότερη μέγιστη αλλά και μικρότερη ελάχιστη τιμή, καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται ξανά οι τιμές της  $T$  και κατ' επέκταση η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της. Το αντίθετο συμβαίνει με τους καλοκαιρινούς μήνες, που καθώς πλησιάζουμε σε αυτούς η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της καμπύλης  $T$  αυξάνουν, ενώ όταν απομακρυνόμαστε από αυτούς, παρατηρείται πτώση. Αυτό είναι λογικό, δεδομένου ότι όσο οδεύουμε χρονικά προς το κέντρο του χειμώνα, η διέγερση ( $G_T$ ), όπως προαναφέρθηκε, μειώνεται και αρχίζει πάλι να αυξάνει, όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν. Η συμπεριφορά της καμπύλης  $T$ , το καλοκαίρι, είναι και αυτή αντίστοιχη της διέγερσης  $G_T$ . Όπως είναι αναμενόμενο, η καμπύλη  $T$  παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της το μήνα Οκτώβριο.

#### 7.2.3.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας του PCM RT27 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου

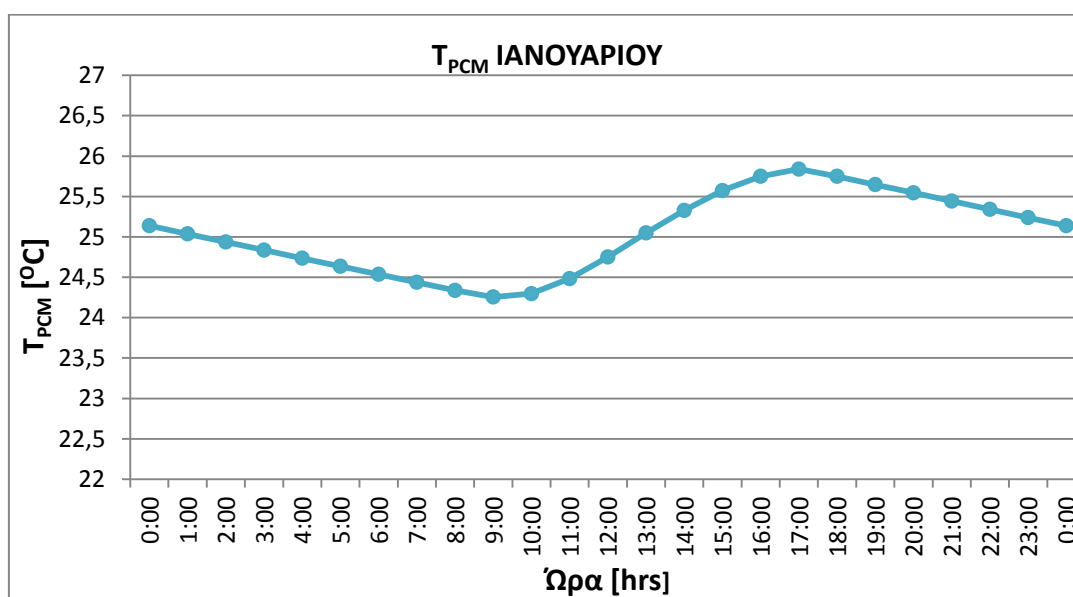
Ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθείται και για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του RT27. Εδώ, η σύγκλιση των τιμών επετεύχθη μετά από 6-7 δοκιμές. Οι θερμοκρασίες που επικρατούν στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης συναρτήσει των ωρών της εκάστοτε ημέρας παρουσιάζονται στους

παρακάτω συγκεντρωτικούς πίνακες και διαγράμματα (τα οποία έχουν οργανωθεί με βάση το μήνα) και έχουν προκύψει για κάθε ώρα.

**Για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου**

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,43
8:00	24,34
9:00	24,26
10:00	24,30
11:00	24,48
12:00	24,75
13:00	25,05
14:00	25,33
15:00	25,57
16:00	25,75
17:00	25,84
18:00	25,75
19:00	25,65
20:00	25,55
21:00	25,44
22:00	25,34
23:00	25,24
00:00	25,14
1:00	25,04
2:00	24,94
3:00	24,84
4:00	24,74
5:00	24,64
6:00	24,54

**Πίνακας 7.2.3.2.1: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT27 για κάθε ώρα της 21ης Ιανουαρίου**

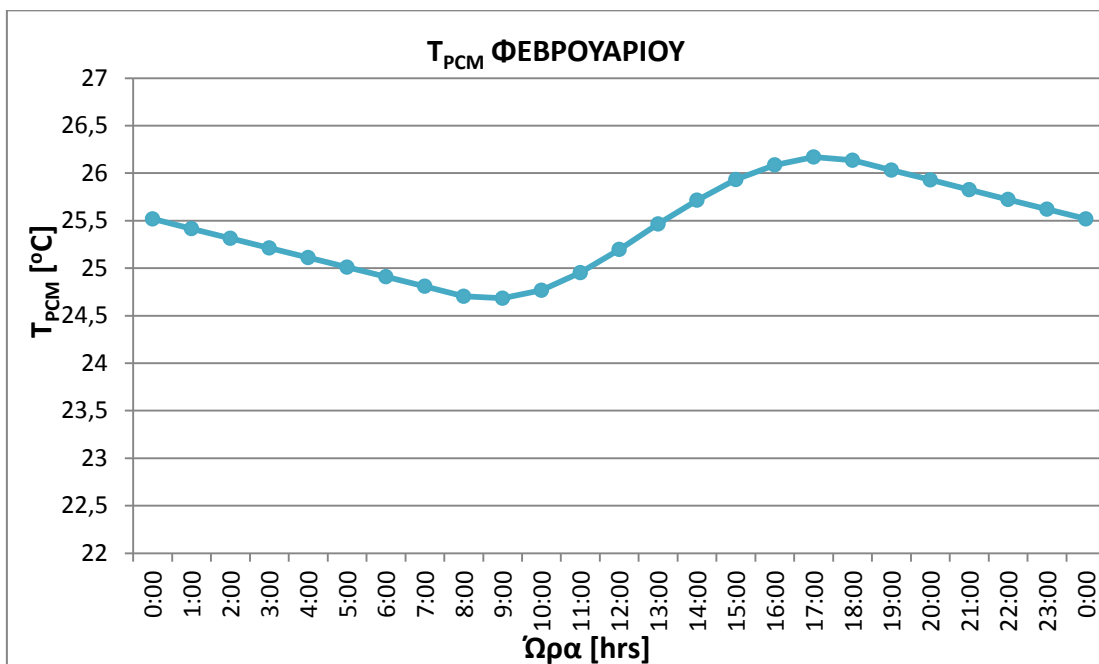


**Σχήμα 7.2.3.2.1 : Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου**

Για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,81
8:00	24,70
9:00	24,68
10:00	24,77
11:00	24,95
12:00	25,20
13:00	25,47
14:00	25,71
15:00	25,93
16:00	26,09
17:00	26,17
18:00	26,13
19:00	26,03
20:00	25,93
21:00	25,83
22:00	25,72
23:00	25,62
00:00	25,52
1:00	25,42
2:00	25,31
3:00	25,21
4:00	25,11
5:00	25,01
6:00	24,91

Πίνακας 7.2.3.2.2: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT27 για κάθε ώρα της 21ης Φεβρουαρίου



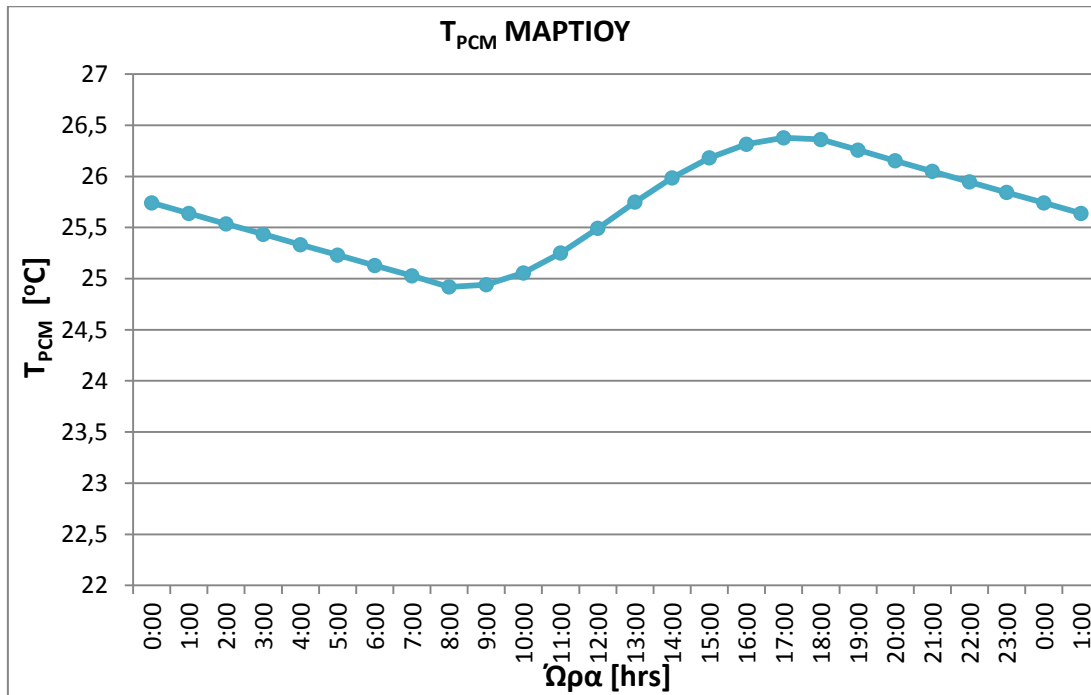
Σχήμα 7.2.3.2.2: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου



Για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	25,02
8:00	24,92
9:00	24,94
10:00	25,05
11:00	25,25
12:00	25,49
13:00	25,75
14:00	25,99
15:00	26,18
16:00	26,31
17:00	26,38
18:00	26,36
19:00	26,26
20:00	26,15
21:00	26,05
22:00	25,95
23:00	25,84
00:00	25,74
1:00	25,64
2:00	25,53
3:00	25,43
4:00	25,33
5:00	25,23
6:00	25,13

**Πίνακας 7.2.3.2.3:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT27 για κάθε ώρα της 21ης Μαρτίου

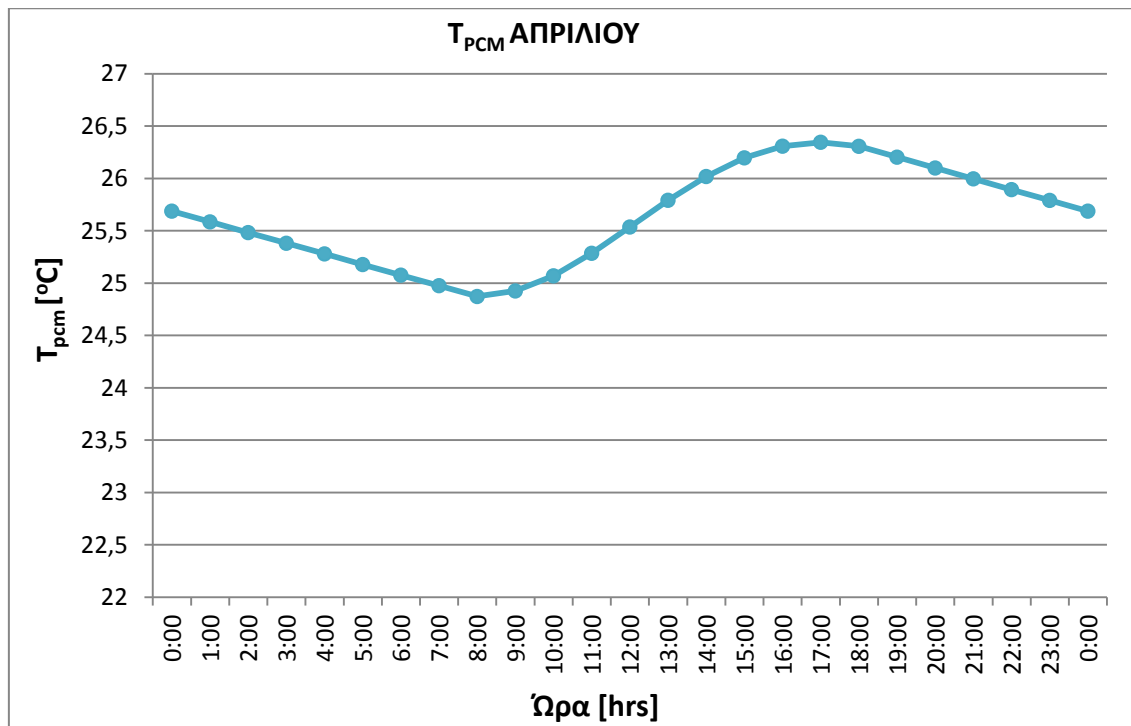


**Σχήμα 7.2.3.2.3:** Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου

Για την 21<sup>η</sup> Απριλίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,97
8:00	24,87
9:00	24,92
10:00	25,07
11:00	25,28
12:00	25,53
13:00	25,79
14:00	26,02
15:00	26,20
16:00	26,31
17:00	26,35
18:00	26,31
19:00	26,20
20:00	26,10
21:00	26,00
22:00	25,89
23:00	25,79
00:00	25,69
1:00	25,58
2:00	25,48
3:00	25,38
4:00	25,28
5:00	25,18
6:00	25,08

**Πίνακας 7.2.3.2.4:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT27 για κάθε ώρα της 21ης Απριλίου

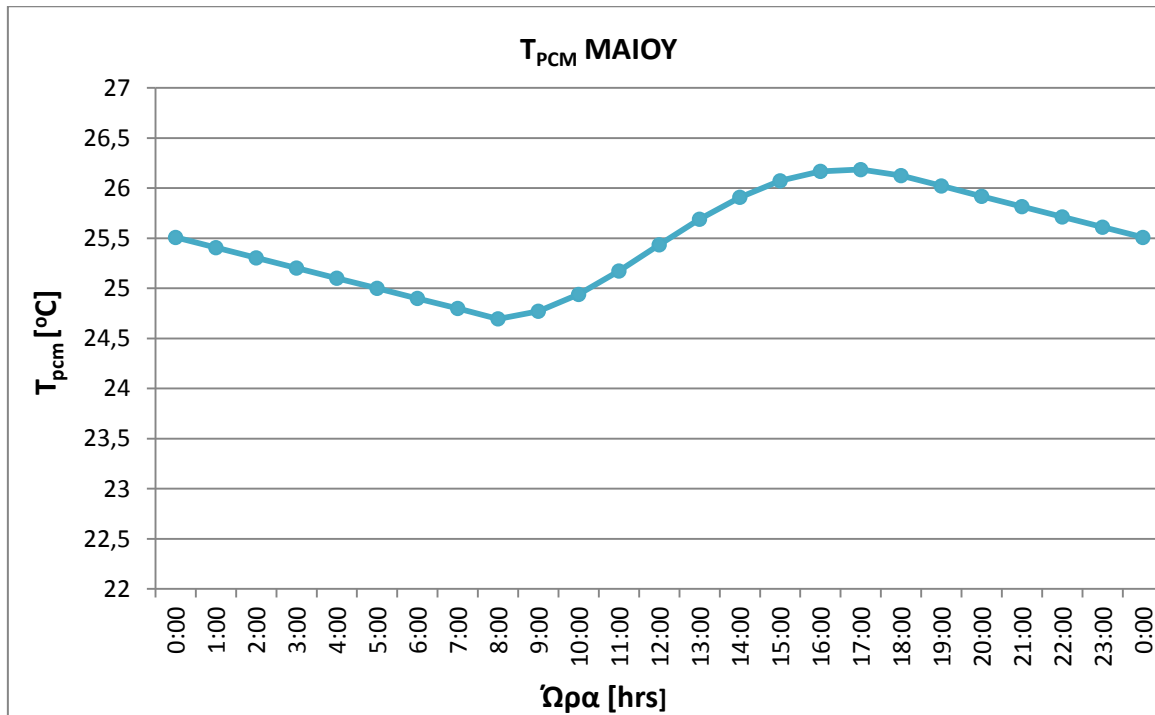


**Σχήμα 7.2.3.2.4:** Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσεως των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Απριλίου

Για την 21<sup>η</sup> Μαΐου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,795
8:00	24,69
9:00	24,77
10:00	24,94
11:00	25,17
12:00	25,43
13:00	25,69
14:00	25,91
15:00	26,07
16:00	26,17
17:00	26,18
18:00	26,12
19:00	26,02
20:00	25,92
21:00	25,81
22:00	25,71
23:00	25,61
00:00	25,51
1:00	25,41
2:00	25,30
3:00	25,20
4:00	25,10
5:00	25,00
6:00	24,90

**Πίνακας 7.2.3.2.5:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT27 για κάθε ώρα της 21ης Μαΐου

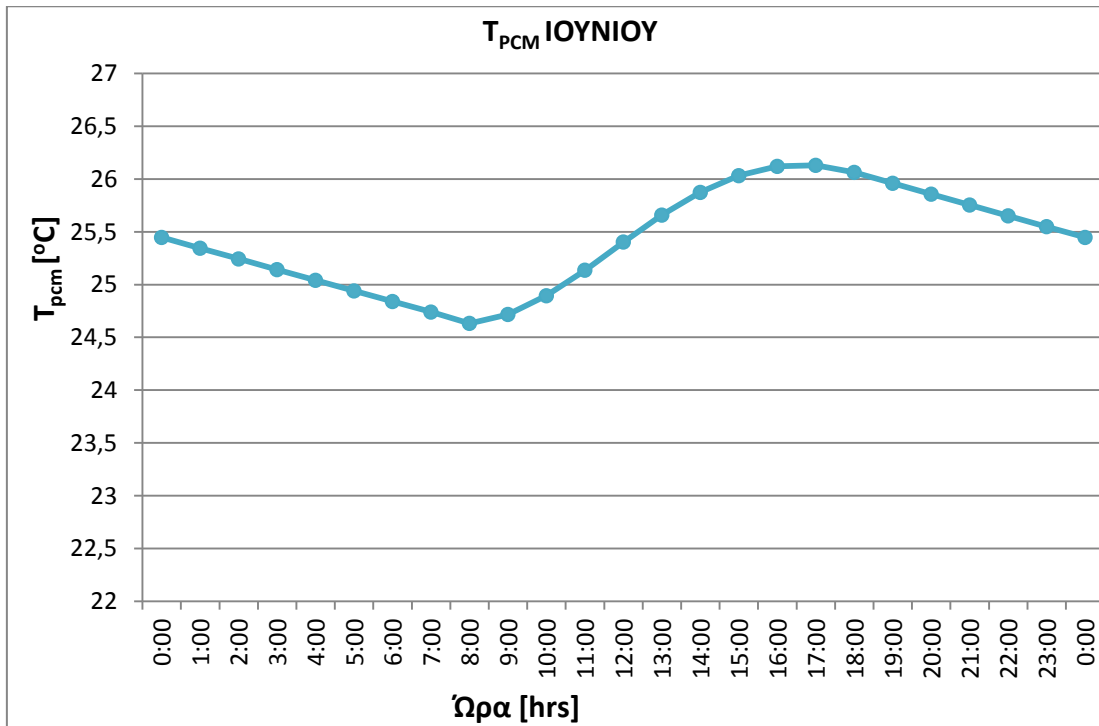


**Σχήμα 7.2.3.2.5:** Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου

Για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,73
8:00	24,63
9:00	24,72
10:00	24,89
11:00	25,14
12:00	25,40
13:00	25,66
14:00	25,87
15:00	26,03
16:00	26,12
17:00	26,13
18:00	26,06
19:00	25,96
20:00	25,86
21:00	25,75
22:00	25,65
23:00	25,55
00:00	25,45
1:00	25,35
2:00	25,24
3:00	25,14
4:00	25,04
5:00	24,94
6:00	24,84

Πίνακας 7.2.3.2.6: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT27 για κάθε ώρα της 21ης Ιουνίου

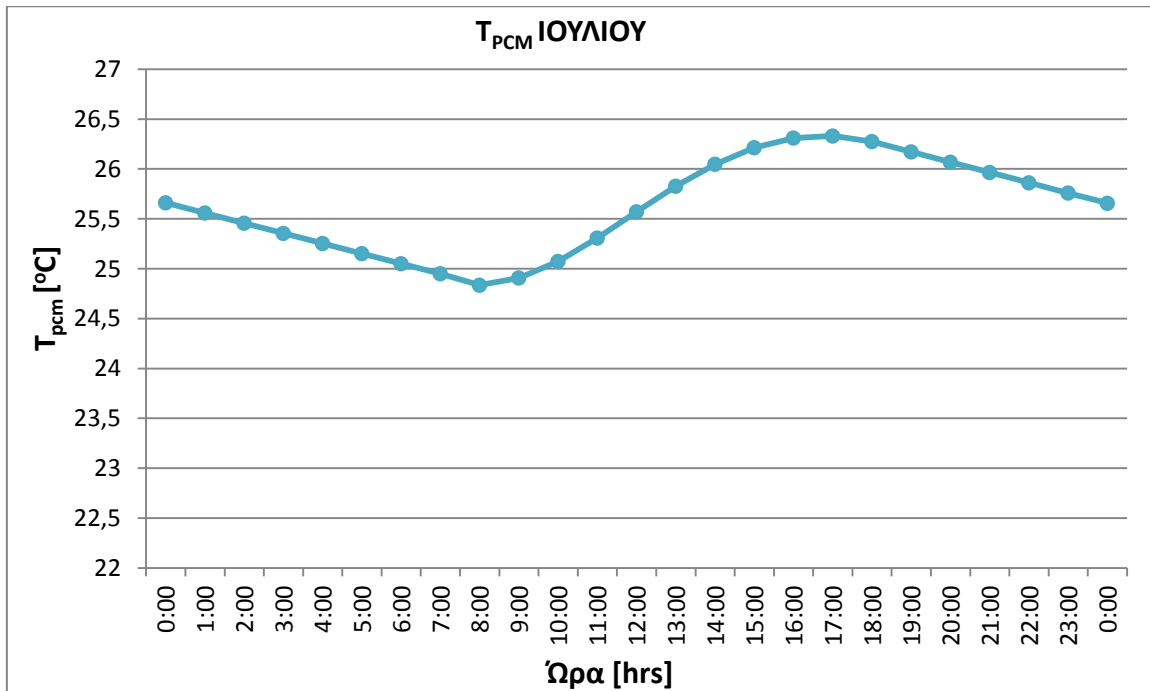


Σχήμα 7.2.3.2.6: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιουνίου

Για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,95
8:00	24,84
9:00	24,92
10:00	25,08
11:00	25,31
12:00	25,58
13:00	25,83
14:00	26,05
15:00	26,22
16:00	26,32
17:00	26,34
18:00	26,28
19:00	26,18
20:00	26,07
21:00	25,97
22:00	25,87
23:00	25,76
00:00	25,66
1:00	25,56
2:00	25,46
3:00	25,35
4:00	25,25
5:00	25,15
6:00	25,05

**Πίνακας 7.2.3.2.7:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT27 για κάθε ώρα της 21ης Ιουλίου

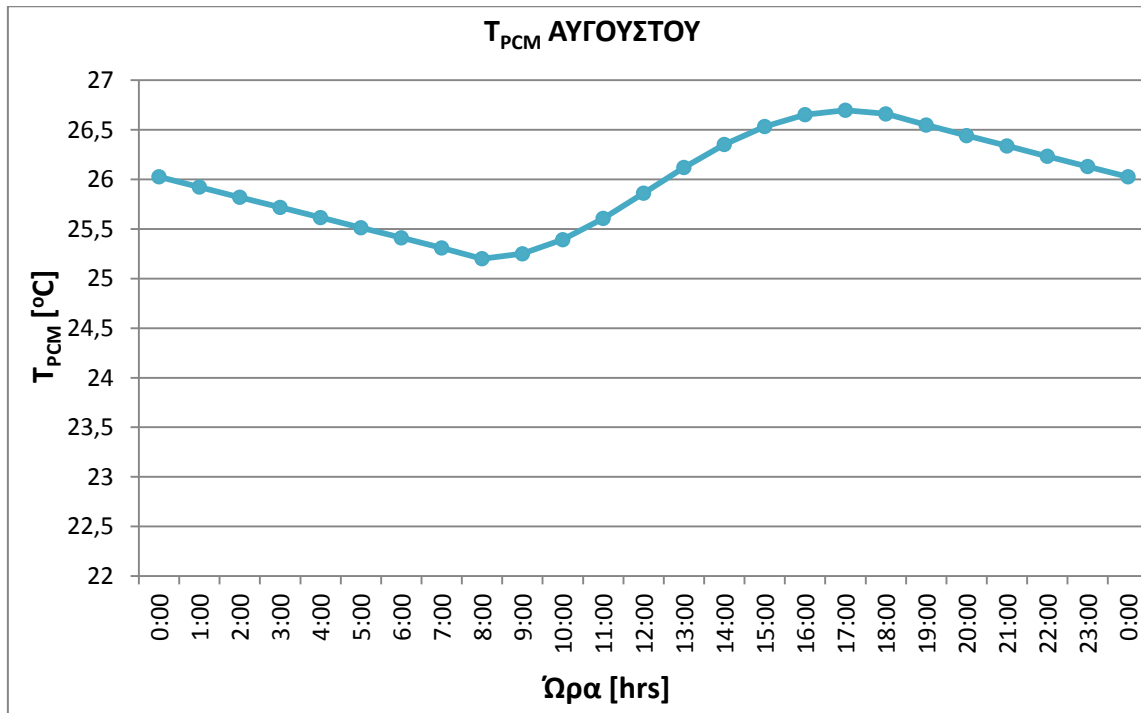


**Σχήμα 7.2.3.2.7:** Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσεως των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

Για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	25,30
8:00	25,20
9:00	25,25
10:00	25,39
11:00	25,61
12:00	25,86
13:00	26,12
14:00	26,35
15:00	26,53
16:00	26,65
17:00	26,70
18:00	26,66
19:00	26,55
20:00	26,44
21:00	26,34
22:00	26,23
23:00	26,13
00:00	26,03
1:00	25,92
2:00	25,82
3:00	25,72
4:00	25,61
5:00	25,51
6:00	25,41

**Πίνακας 7.2.3.2.8:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT27 για κάθε ώρα της 21ης Αυγούστου

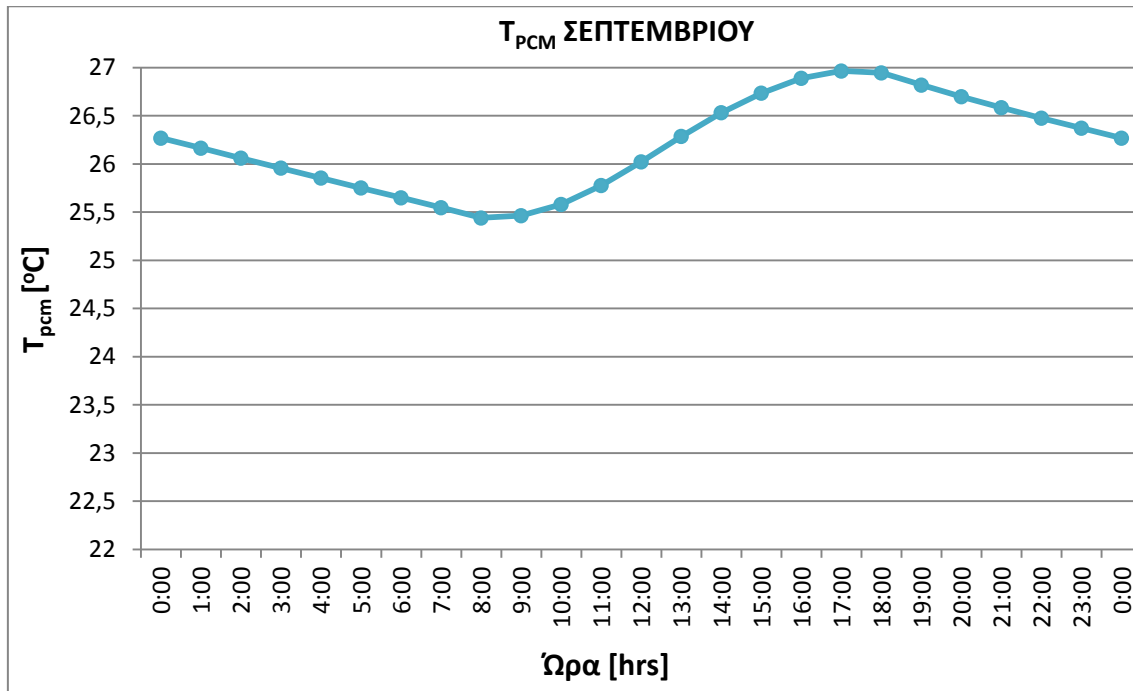


**Σχήμα 7.2.3.2.8:** Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Αυγούστου

Για την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	25,54
8:00	25,44
9:00	25,46
10:00	25,58
11:00	25,77
12:00	26,02
13:00	26,29
14:00	26,53
15:00	26,73
16:00	26,89
17:00	26,96
18:00	26,94
19:00	26,82
20:00	26,70
21:00	26,58
22:00	26,47
23:00	26,37
00:00	26,27
1:00	26,16
2:00	26,06
3:00	25,96
4:00	25,85
5:00	25,75
6:00	25,65

**Πίνακας 7.2.3.2.9:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT27 για κάθε ώρα της 21ης Σεπτεμβρίου

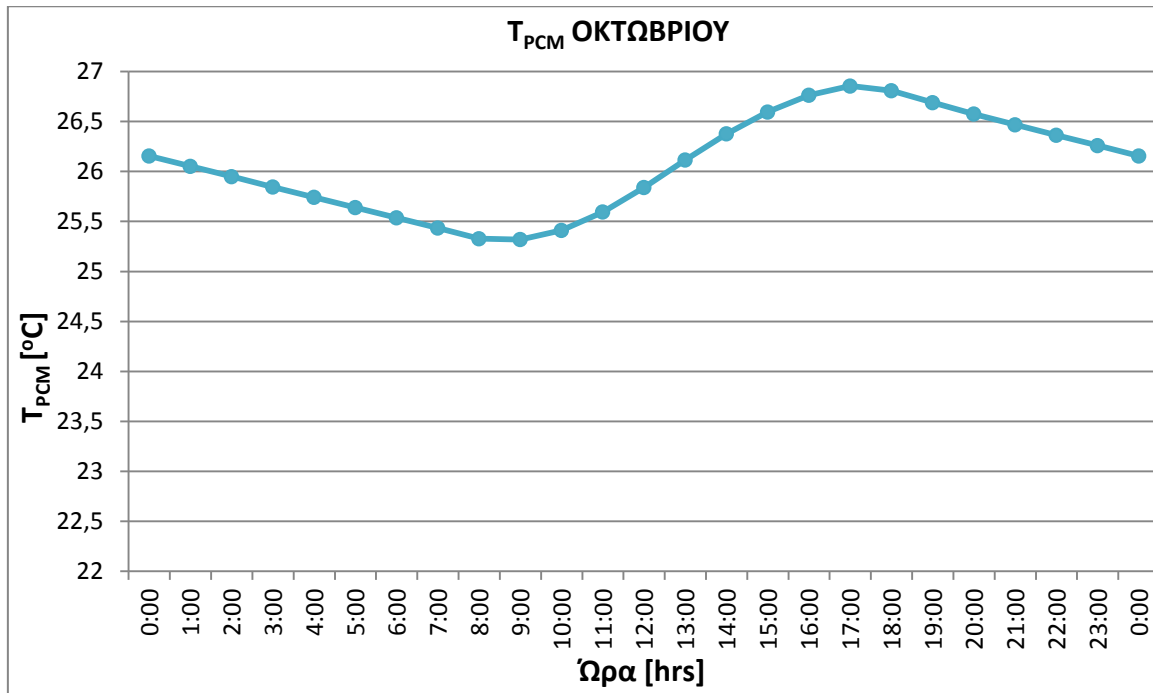


**Σχήμα 7.2.3.2.9:** Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου

Για την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	25,43
8:00	25,33
9:00	25,32
10:00	25,41
11:00	25,59
12:00	25,84
13:00	26,11
14:00	26,38
15:00	26,59
16:00	26,76
17:00	26,85
18:00	26,81
19:00	26,69
20:00	26,58
21:00	26,47
22:00	26,36
23:00	26,26
00:00	26,15
1:00	26,05
2:00	25,95
3:00	25,85
4:00	25,74
5:00	25,64
6:00	25,54

Πίνακας 7.2.3.2.10: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT27 για κάθε ώρα της 21ης Οκτωβρίου



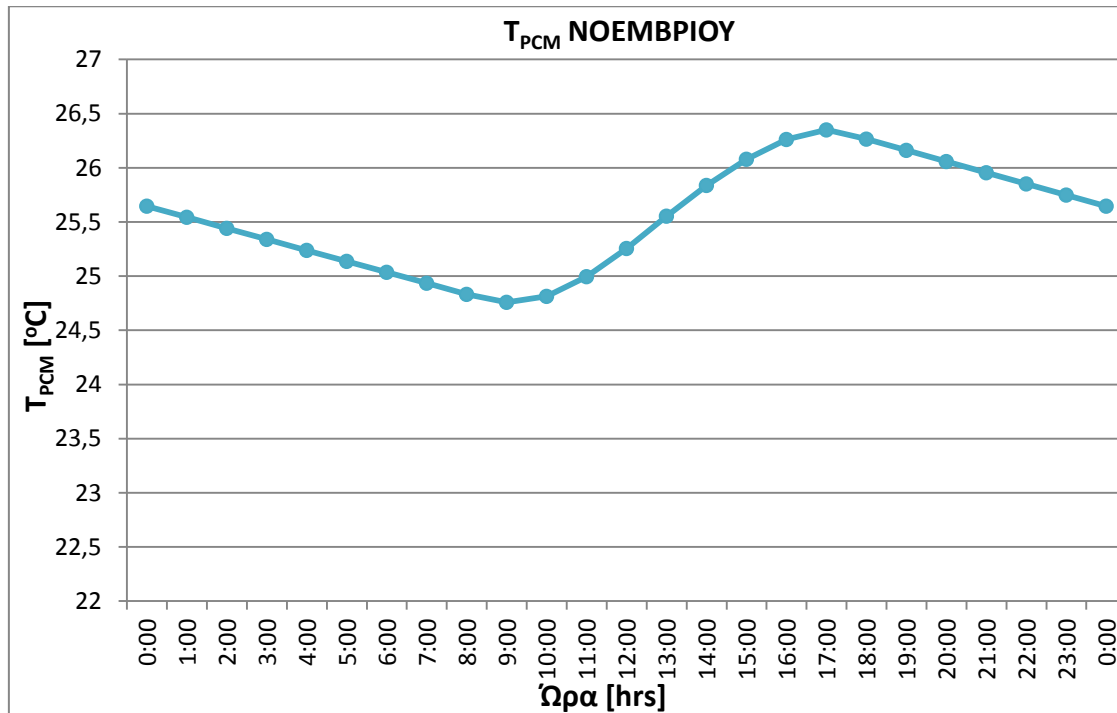
Σχήμα 7.2.3.2.10: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσεως των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου



Για την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,93
8:00	24,83
9:00	24,76
10:00	24,81
11:00	24,99
12:00	25,25
13:00	25,55
14:00	25,84
15:00	26,08
16:00	26,26
17:00	26,35
18:00	26,27
19:00	26,16
20:00	26,06
21:00	25,95
22:00	25,85
23:00	25,75
00:00	25,65
1:00	25,54
2:00	25,44
3:00	25,34
4:00	25,24
5:00	25,14
6:00	25,03

Πίνακας 7.2.3.2.11: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT27 για κάθε ώρα της 21ης Νοεμβρίου

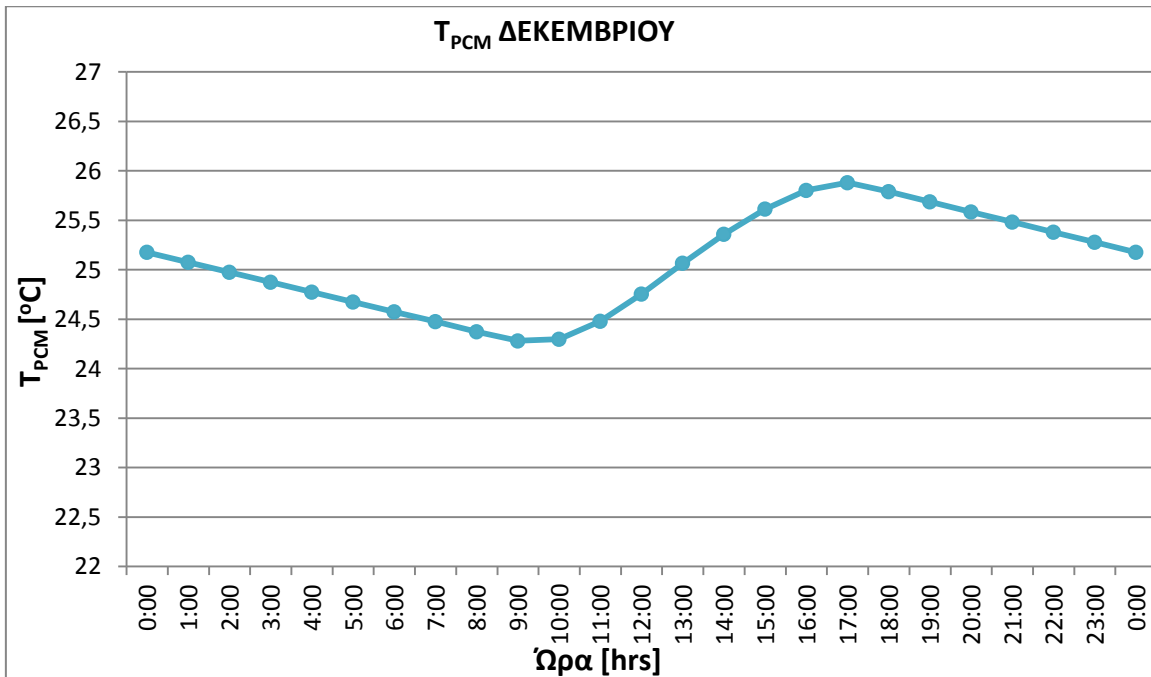


Σχήμα 7.2.3.2.11: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου

Για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,47
8:00	24,37
9:00	24,28
10:00	24,30
11:00	24,48
12:00	24,75
13:00	25,07
14:00	25,36
15:00	25,61
16:00	25,80
17:00	25,88
18:00	25,79
19:00	25,69
20:00	25,58
21:00	25,48
22:00	25,38
23:00	25,28
00:00	25,18
1:00	25,08
2:00	24,97
3:00	24,87
4:00	24,77
5:00	24,67
6:00	24,57

Πίνακας 7.2.3.2.12: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του RT27 για κάθε ώρα της 21ης Δεκεμβρίου



Σχήμα 7.2.3.2.12: Θερμοκρασία του RT27 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

### **Σχολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων**

Παρόμοια με την ανάλυση του RT20, και σε αυτά τα διαγράμματα των θερμοκρασιών κάθε μήνα, η πρώτη τιμή της θερμοκρασίας και η τελευταία, είναι σχεδόν ίδιες, όπως απαιτείται για την ορθότητα των διαγραμμάτων. Επιπλέον, βλέπουμε ότι όλες οι καμπύλες όλων των διαγραμμάτων ξεκινούν από θερμοκρασία του RT27 μεγαλύτερη από αυτήν που επικρατεί στο χώρο ( $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$ ). Επομένως, όπως είναι λογικό, το υλικό αλλαγής φάσης προσφέρει μονίμως θερμότητα στο εσωτερικό του χώρου. Όπως και στο RT20, η θερμοκρασία του φθίνει από τις 12 το βράδυ, έως τις 8 περίπου το πρωί. Από τις 8 το πρωί μέχρι τις 17:00, η θερμοκρασία αυξάνει, λόγω του ότι το υλικό αλλαγής φάσης φορτίζεται από τον ήλιο. Από τις 17:00 το απόγευμα και μέχρι την ολοκλήρωση του 24ώρου, παύει πλέον να υφίσταται ολική ακτινοβολία  $G_T$  και η θερμοκρασία του PCM αρχίζει να φθίνει.

Τέλος, συγκρίνοντας τα διαγράμματα και για τους 12 μήνες του χρόνου, παρατηρούμε πως η καμπύλη του  $T$  πέφτει καθώς προχωράμε από το Νοέμβριο μέχρι και τον Ιανουάριο, ενώ κατά το Φεβρουάριο και ακόμα περισσότερο το Μάρτιο αυξάνονται ξανά οι τιμές της  $T$ . Το αντίθετο συμβαίνει με τους καλοκαιρινούς μήνες, κατά τους οποίους οι τιμές της καμπύλης  $T$  αυξάνουν, ενώ όταν απομακρυνόμαστε από αυτούς, παρατηρείται πτώση. Αυτό είναι λογικό δεδομένου ότι όσο οδεύουμε χρονικά προς το κέντρο του χειμώνα, η διέγερση ( $G_T$ ), όπως προαναφέρθηκε, μειώνεται και αρχίζει πάλι να αυξάνει όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν. Αντίστοιχη της διέγερσης  $G_T$  είναι και η συμπεριφορά της καμπύλης  $T$ , για το καλοκαίρι. Όπως είναι αναμενόμενο, η καμπύλη  $T$  παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή το μήνα Οκτώβριο.

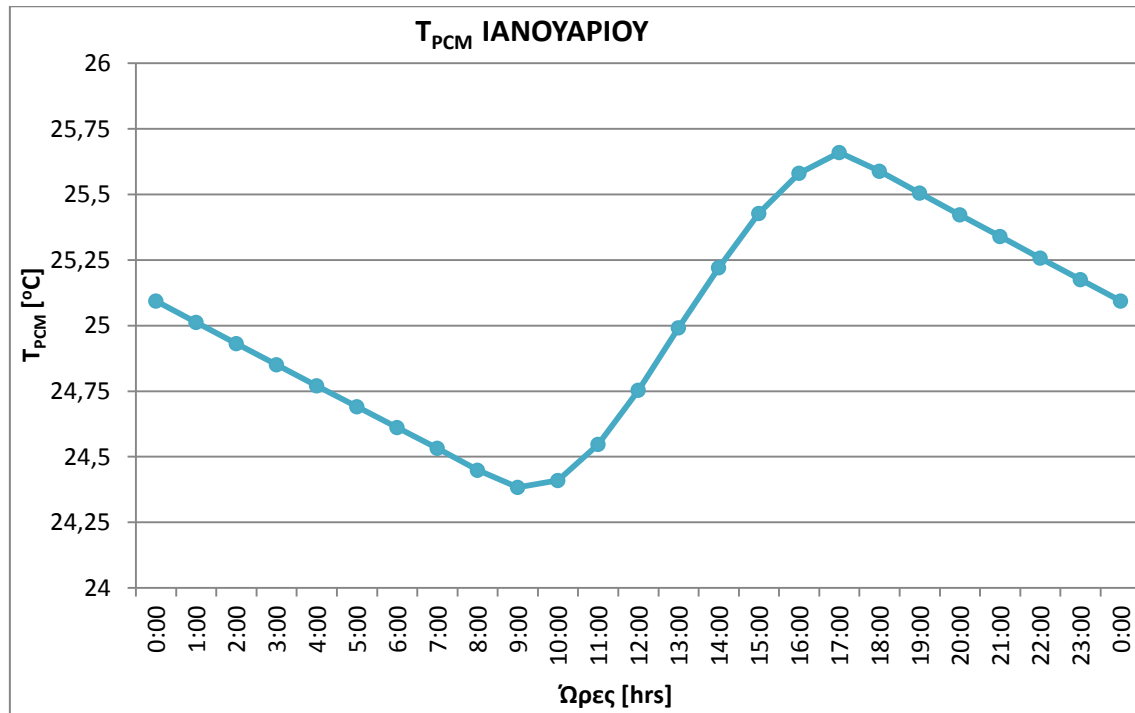
#### **7.2.3.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας του μείγματος οργανικού-ανόργανου SP25A8 συναρτήσει των ωρών του 24ώρου**

Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία και για το μείγμα SP25A8. Η σύγκλιση των τιμών για το υλικό αυτό επετεύχθη μετά από 7-8 δοκιμές. Ακολουθούν οι συγκεντρωτικοί πίνακες και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,53
8:00	24,45
9:00	24,38
10:00	24,41
11:00	24,55
12:00	24,75
13:00	24,99
14:00	25,22
15:00	25,43
16:00	25,58
17:00	25,66
18:00	25,59
19:00	25,51
20:00	25,42
21:00	25,34
22:00	25,26
23:00	25,17
00:00	25,09
1:00	25,01
2:00	24,93
3:00	24,85
4:00	24,77
5:00	24,69
6:00	24,61

**Πίνακας 7.2.3.3.1:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του SP25A8 για κάθε ώρα της 21ης Ιανουαρίου

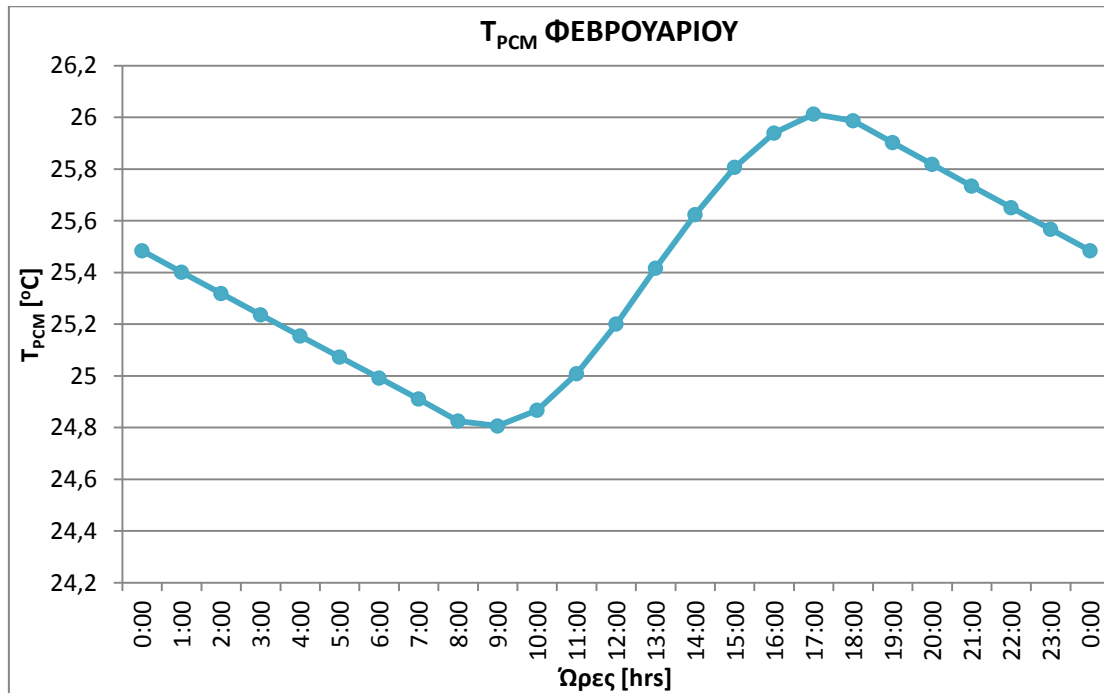


**Σχήμα 7.2.3.3.1:** Θερμοκρασία του SP25A8 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου,

Για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,91
8:00	24,83
9:00	24,81
10:00	24,87
11:00	25,01
12:00	25,20
13:00	25,41
14:00	25,62
15:00	25,81
16:00	25,94
17:00	26,01
18:00	25,99
19:00	25,90
20:00	25,82
21:00	25,73
22:00	25,65
23:00	25,57
00:00	25,48
1:00	25,40
2:00	25,32
3:00	25,24
4:00	25,15
5:00	25,07
6:00	24,99

Πίνακας 7.2.3.3.2: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του SP25A8 για κάθε ώρα της 21ης Φεβρουαρίου

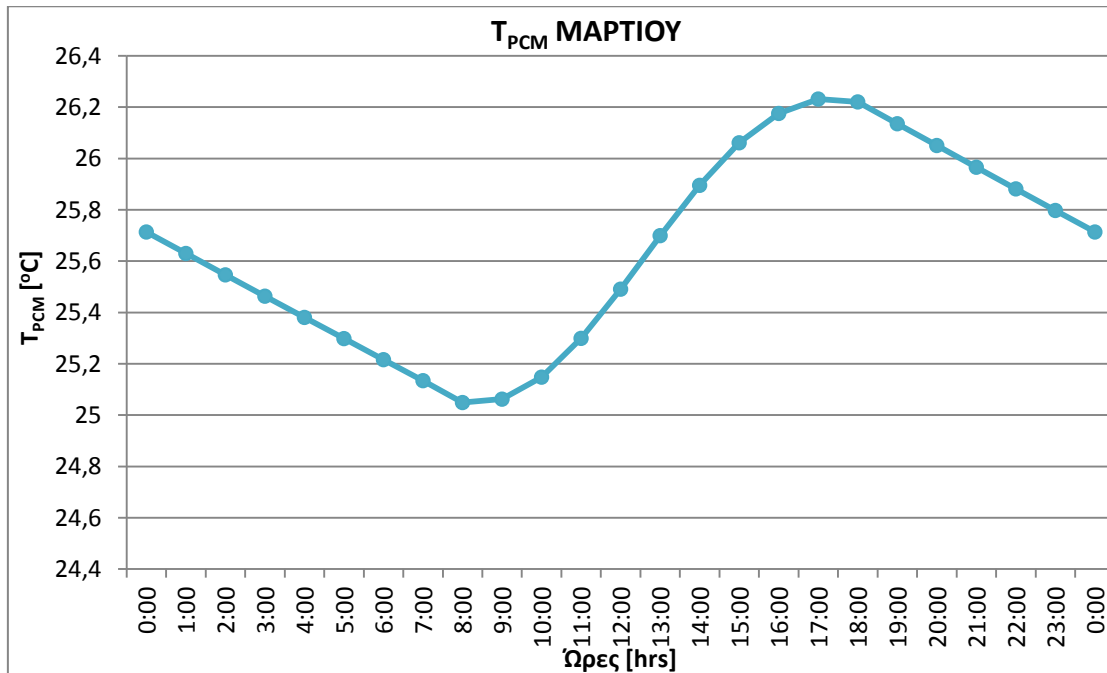


Σχήμα 7.2.3.3.2 : Θερμοκρασία του SP25A8 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

Για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	25,13
8:00	25,05
9:00	25,06
10:00	25,15
11:00	25,30
12:00	25,49
13:00	25,70
14:00	25,89
15:00	26,06
16:00	26,17
17:00	26,23
18:00	26,22
19:00	26,13
20:00	26,05
21:00	25,97
22:00	25,88
23:00	25,80
00:00	25,71
1:00	25,63
2:00	25,55
3:00	25,46
4:00	25,38
5:00	25,30
6:00	25,22

Πίνακας 7.2.3.3.3: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του SP25A8 για κάθε ώρα της 21<sup>ης</sup> Μαρτίου

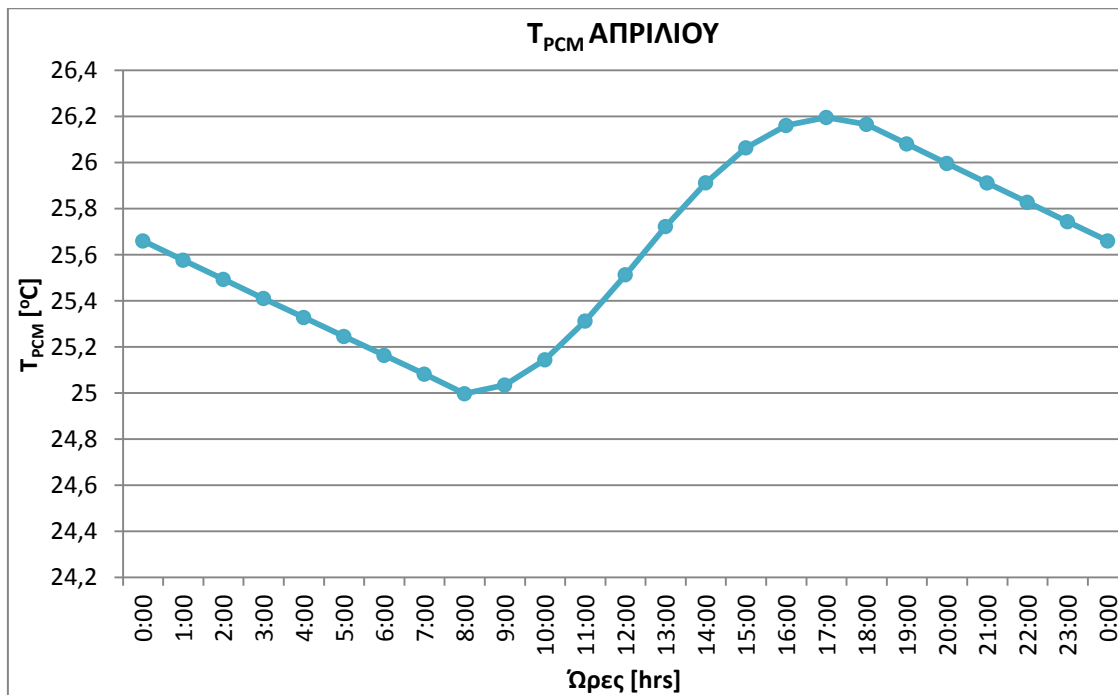


Σχήμα 7.2.3.3.3 : Θερμοκρασία του SP25A8 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου

Για την 21<sup>η</sup> Απριλίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	25,08
8:00	25,00
9:00	25,03
10:00	25,14
11:00	25,31
12:00	25,51
13:00	25,72
14:00	25,91
15:00	26,06
16:00	26,16
17:00	26,20
18:00	26,17
19:00	26,08
20:00	26,00
21:00	25,91
22:00	25,83
23:00	25,74
00:00	25,66
1:00	25,58
2:00	25,49
3:00	25,41
4:00	25,33
5:00	25,25
6:00	25,16

**Πίνακας 7.2.3.3.4:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του SP25A8 για κάθε ώρα της 21ης Απριλίου

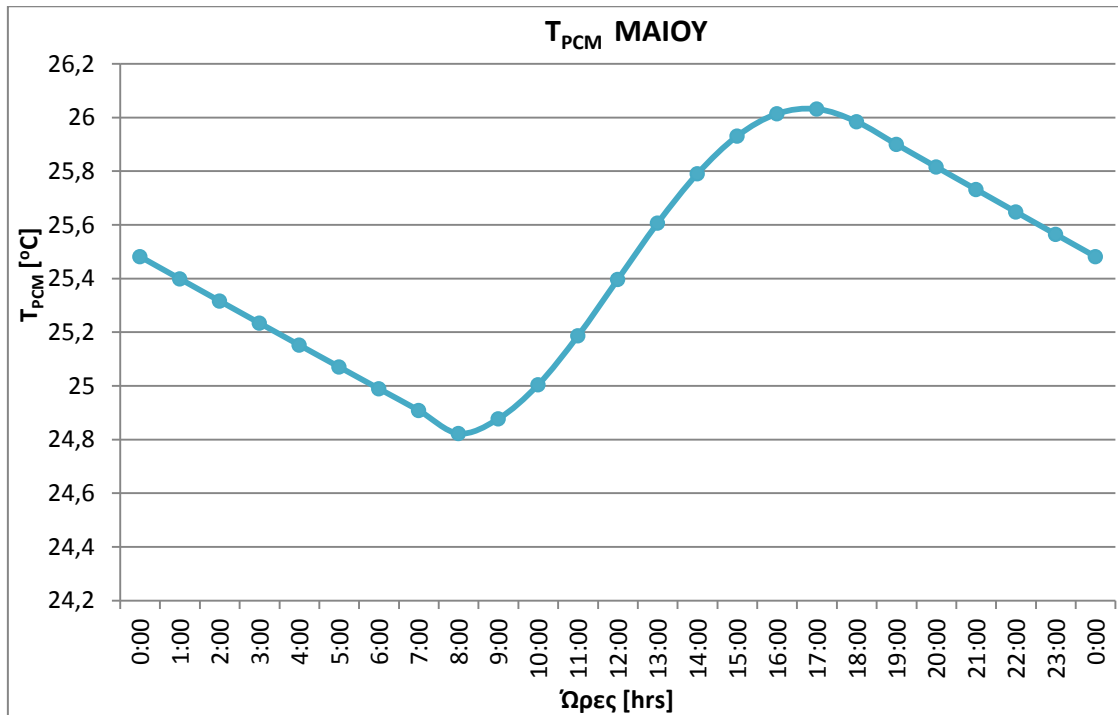


**Σχήμα 7.2.3.3.4:** Θερμοκρασία του SP25A8 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Απριλίου

Για την 21<sup>η</sup> Μαΐου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,90
8:00	24,82
9:00	24,88
10:00	25,00
11:00	25,19
12:00	25,40
13:00	25,61
14:00	25,79
15:00	25,93
16:00	26,01
17:00	26,03
18:00	25,98
19:00	25,90
20:00	25,83
21:00	25,73
22:00	25,65
23:00	25,56
00:00	25,48
1:00	25,40
2:00	25,32
3:00	25,23
4:00	25,15
5:00	25,07
6:00	24,99

**Πίνακας 7.2.3.3.5:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του SP25A8 για κάθε ώρα της 21ης Μαΐου



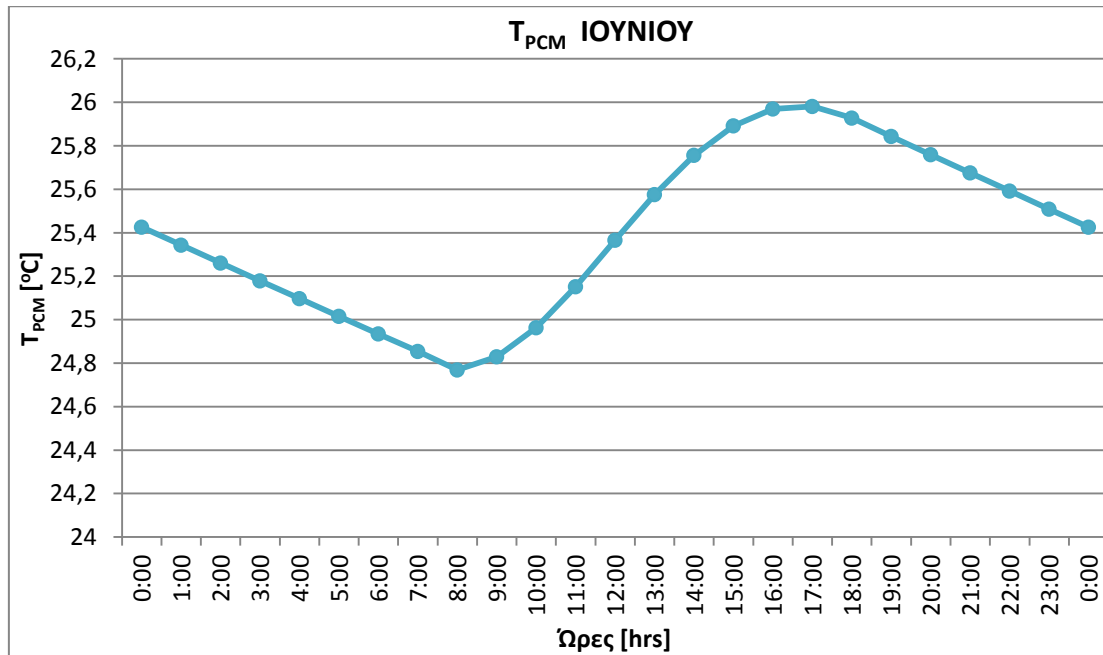
**Σχήμα 7.2.3.3.6:** Θερμοκρασία του SP25A8 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου



Για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,85
8:00	24,77
9:00	24,83
10:00	24,96
11:00	25,15
12:00	25,37
13:00	25,57
14:00	25,76
15:00	25,89
16:00	25,97
17:00	25,98
18:00	25,93
19:00	25,84
20:00	25,76
21:00	25,67
22:00	25,59
23:00	25,51
00:00	25,42
1:00	25,34
2:00	25,26
3:00	25,18
4:00	25,10
5:00	25,01
6:00	24,93

**Πίνακας 7.2.3.3.6:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του SP25A8 για κάθε ώρα της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου

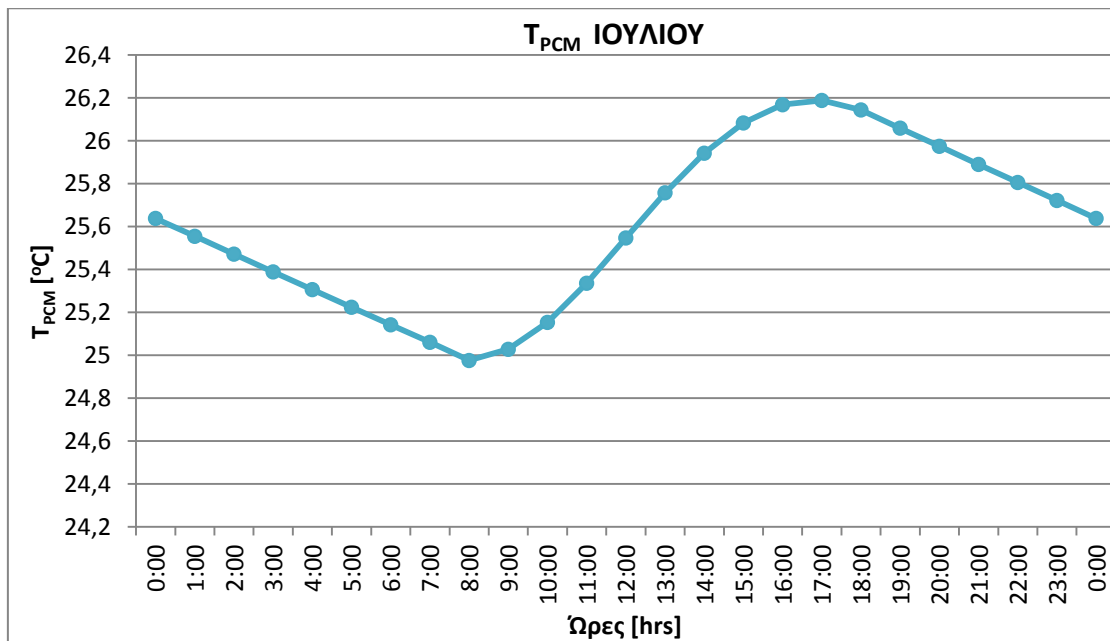


**Σχήμα 7.2.3.3.6:** Θερμοκρασία του SP25A8 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιουνίου

Για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

Ώρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	25,06
8:00	24,98
9:00	25,03
10:00	25,15
11:00	25,34
12:00	25,55
13:00	25,76
14:00	25,94
15:00	26,08
16:00	26,17
17:00	26,19
18:00	26,14
19:00	26,06
20:00	25,97
21:00	25,89
22:00	25,81
23:00	25,72
00:00	25,64
1:00	25,55
2:00	25,47
3:00	25,39
4:00	25,31
5:00	25,22
6:00	25,14

Πίνακας 7.2.3.3.7: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του SP25A8 για κάθε ώρα της 21ης Ιουλίου

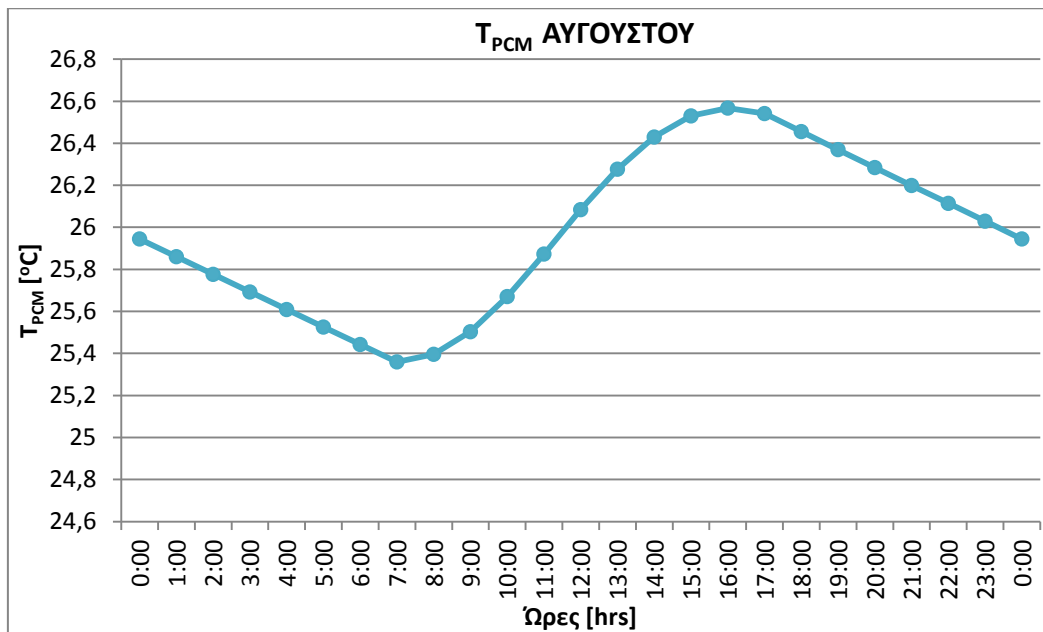


Σχήμα 7.2.3.3.7: Θερμοκρασία του SP25A8 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

Για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	25,36
8:00	25,40
9:00	25,50
10:00	25,67
11:00	25,87
12:00	26,08
13:00	26,28
14:00	26,43
15:00	26,53
16:00	26,57
17:00	26,54
18:00	26,45
19:00	26,37
20:00	26,28
21:00	26,20
22:00	26,11
23:00	26,03
00:00	25,94
1:00	25,86
2:00	25,78
3:00	25,69
4:00	25,61
5:00	25,53
6:00	25,44

Πίνακας 7.2.3.3.8: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του SP25A8 για κάθε ώρα της 21ης Αυγούστου

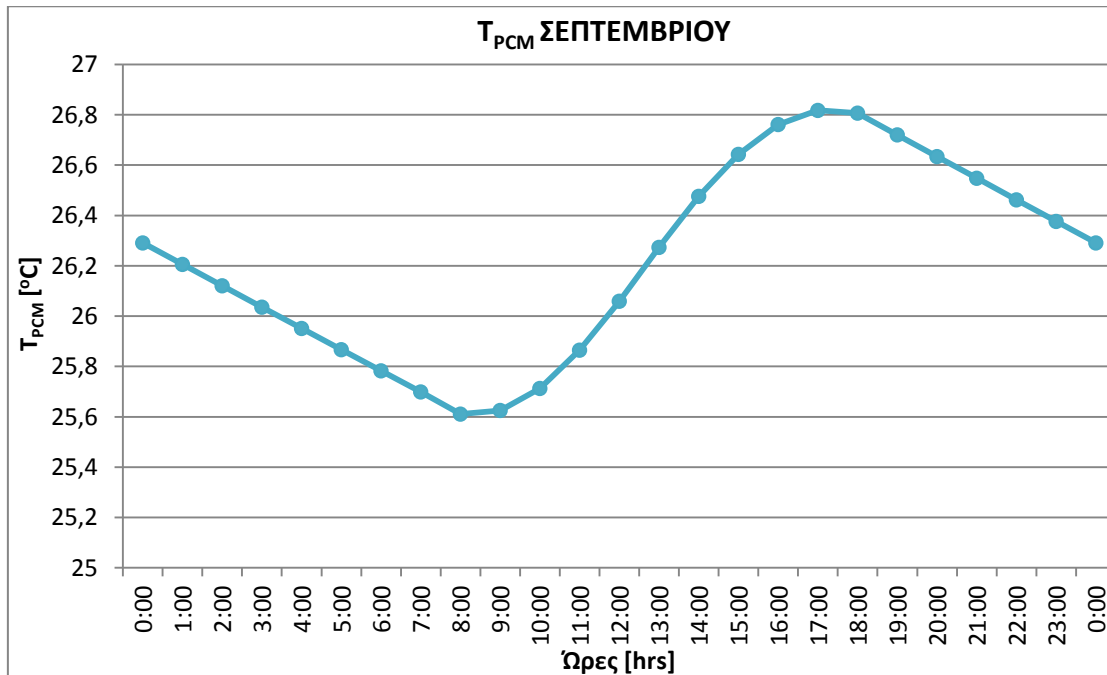


Σχήμα 7.2.3.3.8 : Θερμοκρασία του SP26A8 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Αυγούστου

Για την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	25,69
8:00	25,61
9:00	25,63
10:00	25,71
11:00	25,86
12:00	26,06
13:00	26,27
14:00	26,48
15:00	26,64
16:00	26,76
17:00	26,82
18:00	26,81
19:00	26,72
20:00	26,63
21:00	26,55
22:00	26,46
23:00	26,38
00:00	26,29
1:00	26,21
2:00	26,12
3:00	26,03
4:00	25,95
5:00	25,87
6:00	25,78

**Πίνακας 7.2.3.3.9:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του SP25A8 για κάθε ώρα της 21ης Σεπτεμβρίου

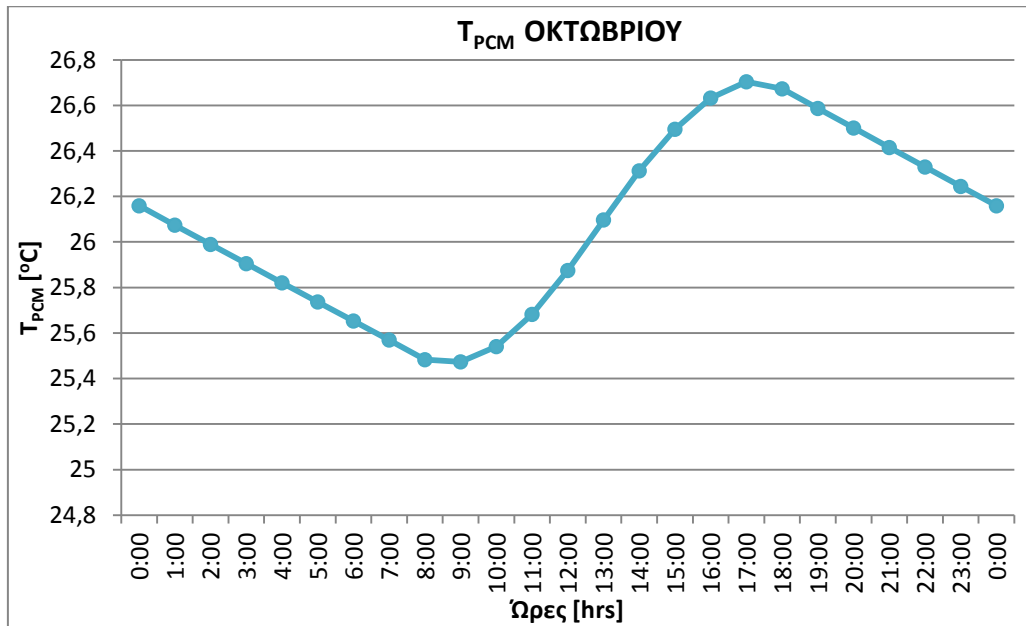


**Σχήμα 7.2.3.3.9:** Θερμοκρασία του SP25A8 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου

Για την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	25,57
8:00	25,48
9:00	25,47
10:00	25,54
11:00	25,68
12:00	25,87
13:00	26,10
14:00	26,31
15:00	26,49
16:00	26,63
17:00	26,70
18:00	26,67
19:00	26,59
20:00	26,50
21:00	26,41
22:00	26,33
23:00	26,24
00:00	26,16
1:00	26,07
2:00	25,99
3:00	25,90
4:00	25,82
5:00	25,74
6:00	25,65

**Πίνακας 7.2.3.3.10:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του SP25A8 για κάθε ώρα της 21<sup>ης</sup> Οκτωβρίου

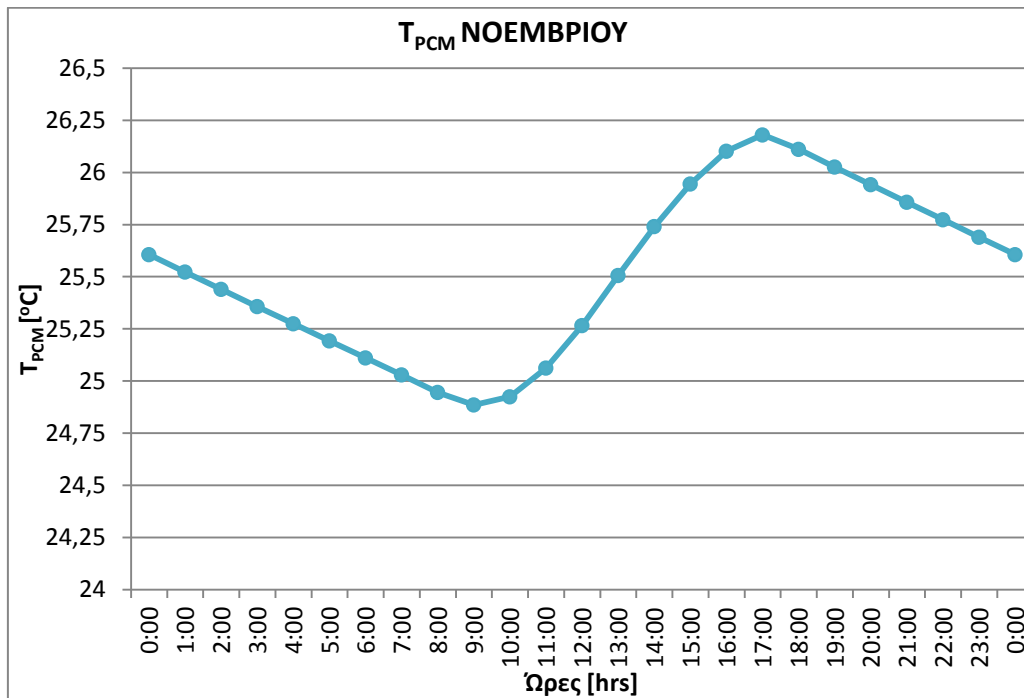


**Σχήμα 7.2.3.3.10:** Θερμοκρασία του SP25A8 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου

Για την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	25,03
8:00	24,95
9:00	24,89
10:00	24,92
11:00	25,06
12:00	25,27
13:00	25,51
14:00	25,74
15:00	25,94
16:00	26,10
17:00	26,18
18:00	26,11
19:00	26,03
20:00	25,94
21:00	25,86
22:00	25,77
23:00	25,69
00:00	25,61
1:00	25,52
2:00	25,44
3:00	25,36
4:00	25,27
5:00	25,19
6:00	25,11

Πίνακας 7.2.3.3.11: Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του SP25A8 για κάθε ώρα της 21ης Νοεμβρίου

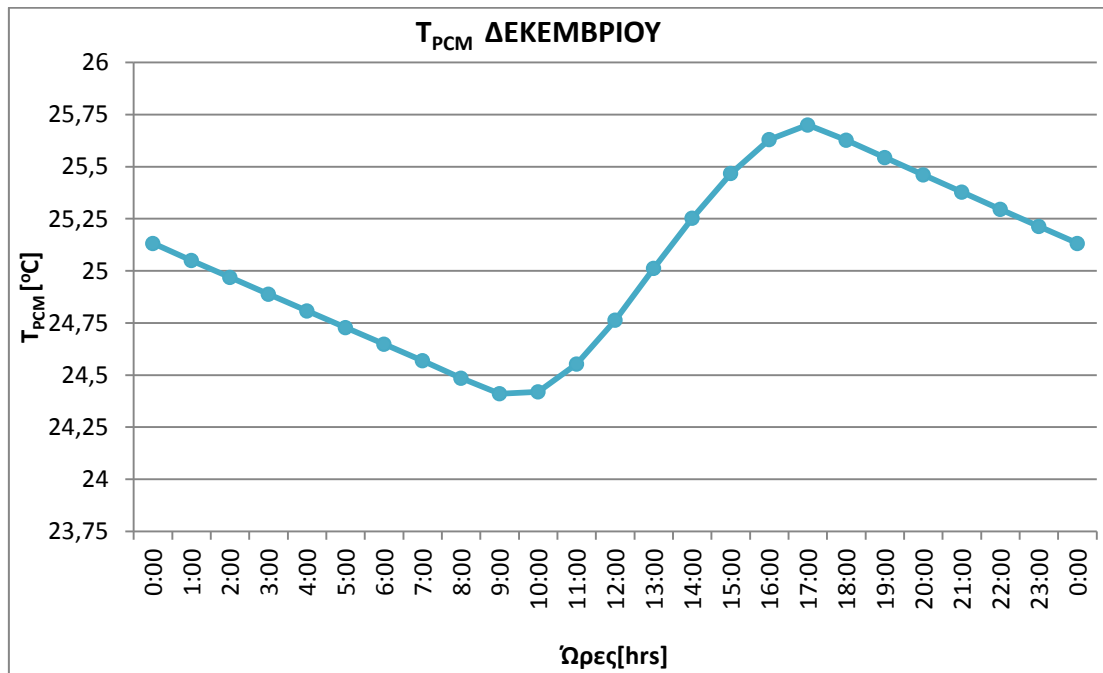


Σχήμα 7.2.3.3.11: Θερμοκρασία του SP25A8 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου

Για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

Ωρα [hrs]	T <sub>PCM</sub> [°C]
7:00	24,57
8:00	24,49
9:00	24,42
10:00	24,42
11:00	24,56
12:00	24,77
13:00	25,02
14:00	25,26
15:00	25,47
16:00	25,63
17:00	25,70
18:00	25,63
19:00	25,55
20:00	25,46
21:00	25,38
22:00	25,30
23:00	25,22
00:00	25,13
1:00	25,05
2:00	24,97
3:00	24,89
4:00	24,81
5:00	24,73
6:00	24,65

**Πίνακας 7.2.3.3.12:** Θερμοκρασία T<sub>τελ</sub> του SP25A8 για κάθε ώρα της 21ης Δεκεμβρίου



**Σχήμα 7.2.3.3.12:** Θερμοκρασία του SP25A8 συναρτήσει των ωρών κατά την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

## **Συγολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων**

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν για το μείγμα SP25A8 είναι πανομοιότυπα με αυτά των RT20 και RT27, για αυτό αποφεύγεται να αναφερθούν ξανά.

### **Σύγκριση διαγραμμάτων των RT20, RT27 και SP25A8 (υποενότητες 7.2.3.1, 7.2.3.2, 7.2.3.3)**

Στο σημείο αυτό, θα συγκρίνουμε τις κατανομές θερμοκρασίας που εμφανίζουν τα τρία υλικά αλλαγής φάσης, οι οποίες παρουσιάζουν έντονες διαφορές. Η θερμοκρασία του υλικού RT20 εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις για κάθε μήνα, σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά, με τις διαφορές ελάχιστης και μέγιστης τιμής να φτάνουν μέχρι και τους 7°C. Αντίθετα, για το RT27 και το μείγμα SP25A8, η διαφορά ελάχιστης και μέγιστης τιμής για κάθε μήνα, είναι πάντα μικρότερη από 2°C. Αυτό οφείλεται στο συνδυασμό της περιοχής λειτουργίας του κάθε υλικού, και της ενεργού θερμοχωρητικότητας του. Η περιοχή λειτουργίας του υλικού RT20 βρίσκεται θερμοκρασιακά πολύ κοντά στα όρια της «υγρής περιοχής» του, με αποτέλεσμα, όταν εισέλθει σε αυτήν, παύει να λειτουργεί ως PCM, και η θερμοκρασία του ανεβαίνει κατακόρυφα. Η θερμότητα που απορροφά από τον ήλιο, δεν χρησιμοποιείται για την αλλαγή φάσης του υλικού, αλλά προσδίδεται εξολοκλήρου στο υλικό, θερμαίνοντας το. Οι καμπύλες του RT27 και του μείγματος SP25A8 είναι πιο ομαλές, καθώς η περιοχή λειτουργίας και των δυο υλικών βρίσκεται μέσα στη «διφασική περιοχή», για κάθε μήνα του έτους. Επομένως, ένα μεγάλο μέρος της θερμότητας που απορροφούν από τον ήλιο, χρησιμοποιείται μονίμως για τη διαδικασία αλλαγής φάσης τους. Ως εκ τούτου, η θέρμανση των δύο αυτών υλικών είναι σημαντικά μικρότερη.

### **7.2.4 Βαθμός Αξιοποίησης των PCM**

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο βαθμός αξιοποίησης των τριών PCM που χρησιμοποιήσαμε στη μελέτη, ο οποίος αποτυπώνεται στα ακόλουθα διαγράμματα για κάθε μήνα και κάθε PCM, με τη μορφή περιοχής λειτουργίας του υλικού αλλαγής φάσης, δηλαδή με τη μορφή του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης που καλύπτει το εκάστοτε PCM. Ιδανικά, θα επιθυμούσαμε την κάλυψη ολόκληρης της διφασικής περιοχής, προκειμένου το ποσό θερμότητας που θα αποθηκευτεί στο υλικό αλλαγής φάσης (και στη συνέχεια θα προσφερθεί στο χώρο), να είναι το μέγιστο δυνατό. Ωστόσο, αυτό είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί. Όπως θα διαπιστώσουμε και στα διαγράμματα που έπονται, το υλικό μας (είτε



RT20, είτε RT27, είτε SP25A8) δεν καταφέρνει σε καμία από τις περιπτώσεις να μεταβεί από την πλήρη στερεή κατάσταση στην πλήρη υγρή κατάσταση.

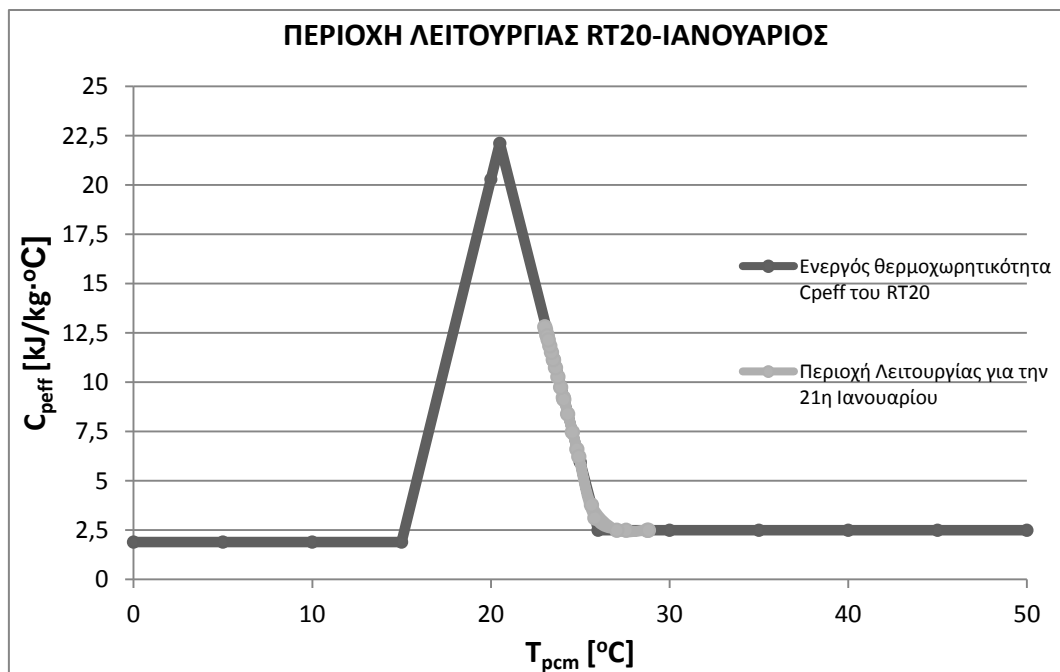
Ο υπολογισμός του ποσοστού/βαθμού αξιοποίησης γίνεται από το λόγο:

$$\eta = \frac{E}{E_o} \quad (7.2.5)$$

όπου:  $E_o$ : το ποσό θερμότητας που θα αποθηκευόταν, ιδανικά, στο υλικό αλλαγής φάσης, αν αυτό μετέβαινε από την πλήρη στερεή κατάσταση στην πλήρη υγρή κατάσταση. Αυτό το ποσό εκφράζεται ως το εμβαδόν που περικλείεται από το τμήμα της καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας (σκούρα γκρι γραμμή) της διφασικής περιοχής και τον άξονα x.

και  $E$ : το ποσό θερμότητας που αποθηκεύεται στην πραγματικότητα στο PCM. Αυτό εκφράζεται από το εμβαδόν που περικλείεται από το τμήμα της καμπύλης περιοχής λειτουργίας (ανοιχτή γκρι γραμμή) που βρίσκεται στη διφασική περιοχή και τον άξονα x.

Για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου



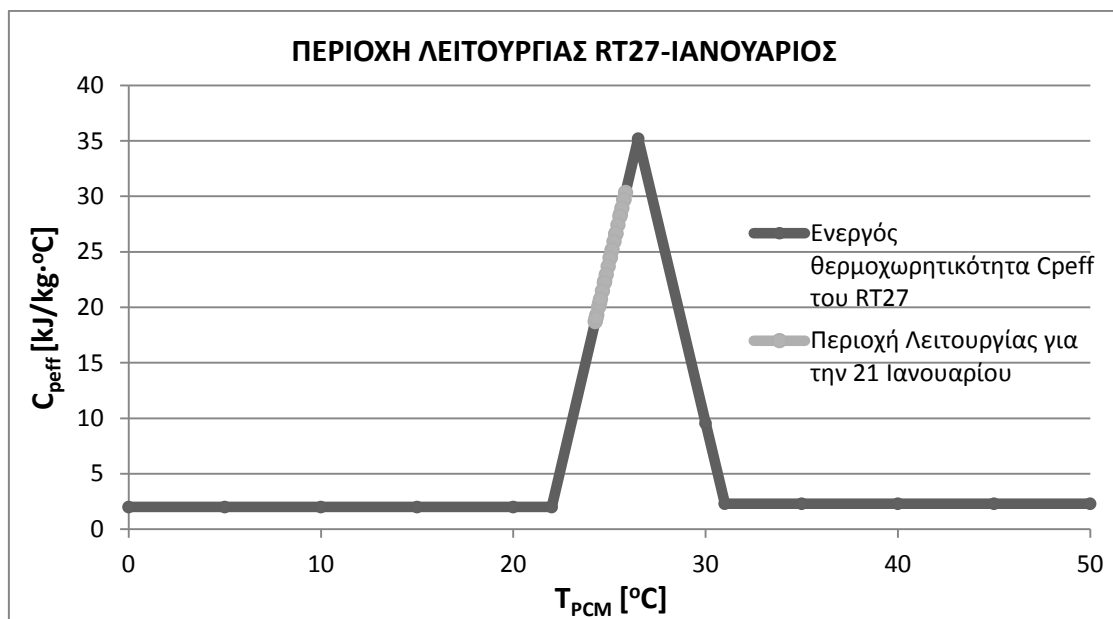
**Σχήμα 7.2.5.1:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσεως της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=22,819 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta=17,1\%$$



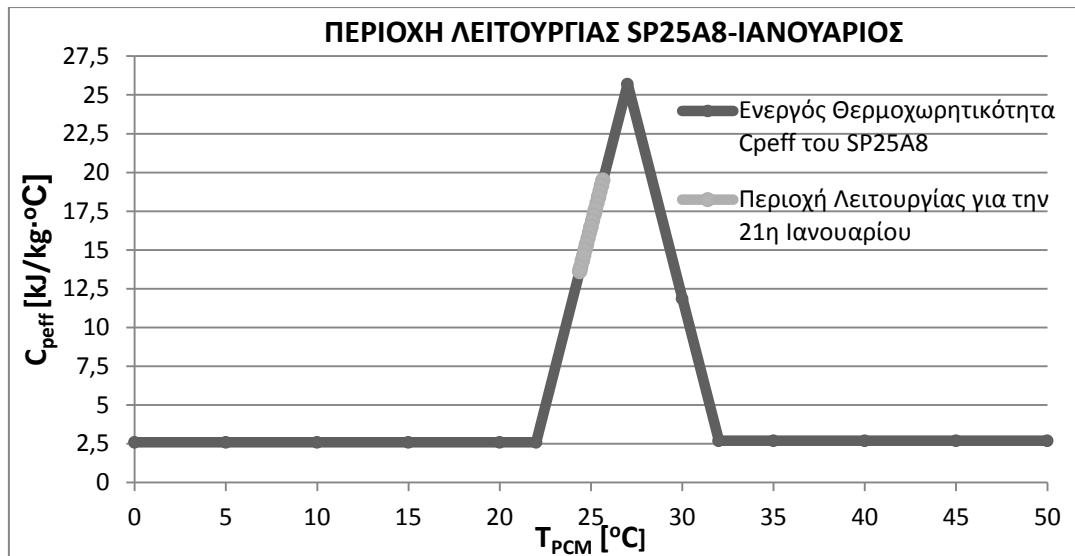
**Σχήμα 7.2.5.2:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=38,757 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta=23,1\%$$



**Σχήμα 7.2.5.3:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του SP25A8, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του SP25A8, κατά την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου

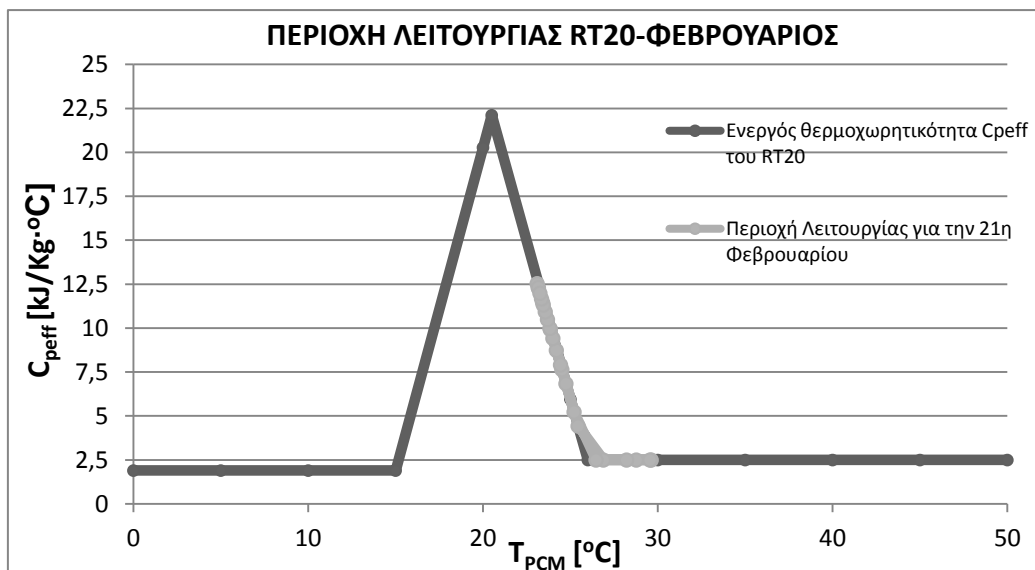
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 141,769 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 20,785 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 14,7\%$$

Για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου



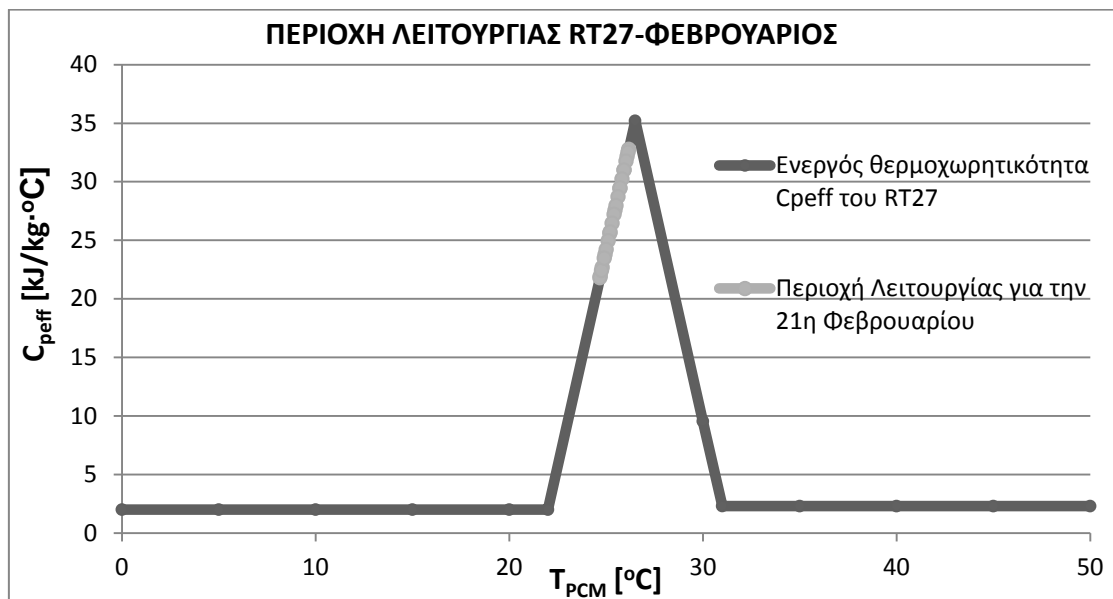
**Σχήμα 7.2.5.4:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 21,802 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 16,3\%$$



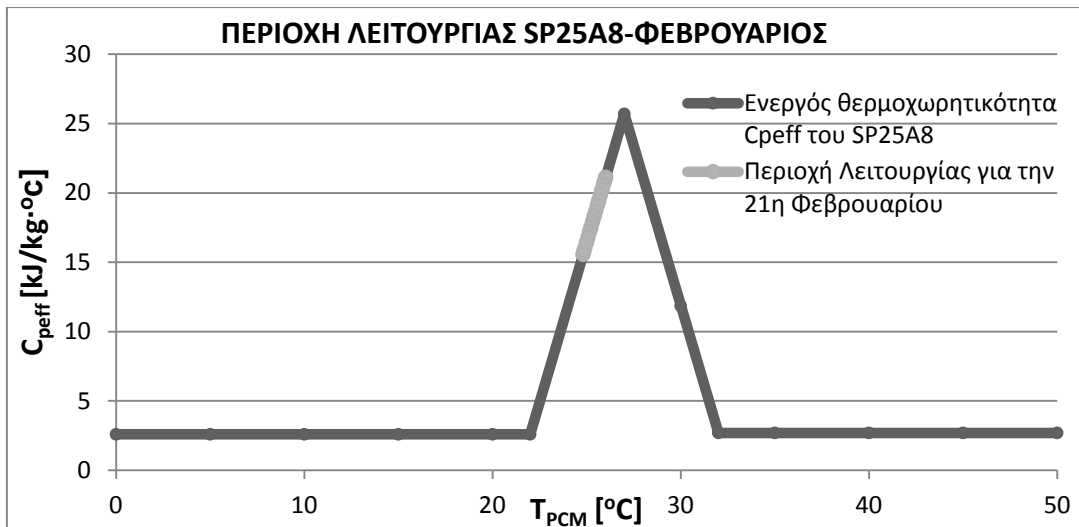
**Σχήμα 7.2.5.5:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 39,648 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 23,6\%$$



**Σχήμα 7.2.5.6:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p\text{eff}}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του SP25A8, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του SP25A8, κατά την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

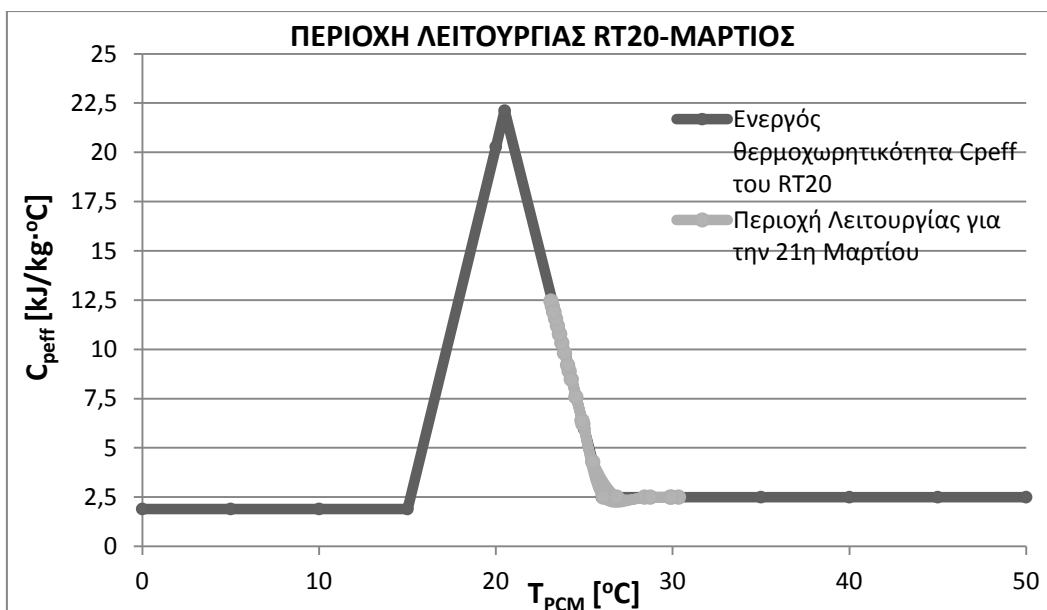
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_0 = 141,769 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$E = 22,119 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\eta = 15,6\%$$

**Για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου**



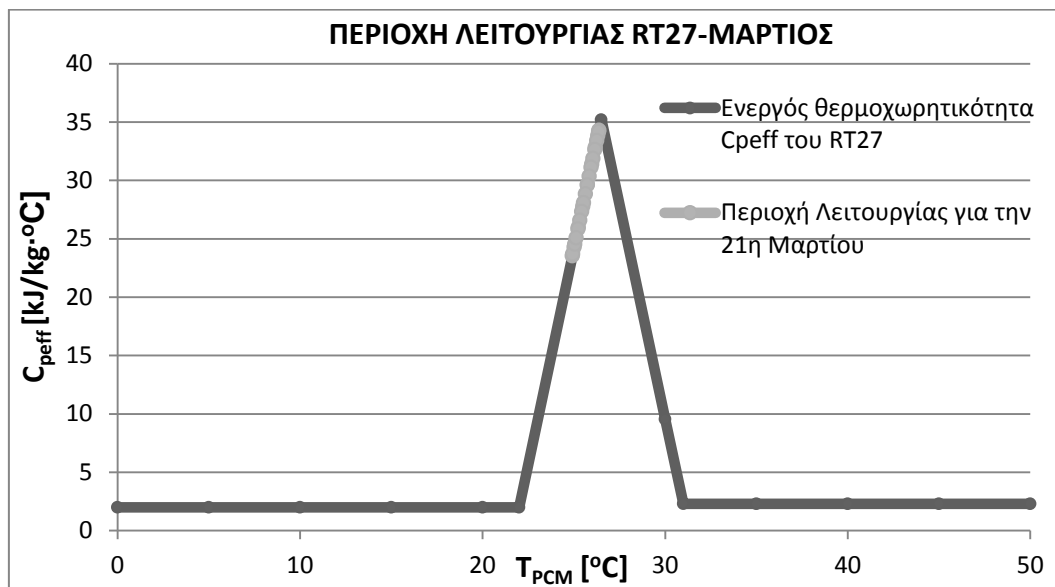
**Σχήμα 7.2.5.7:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p\text{eff}}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 20,93 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 15,6\%$$



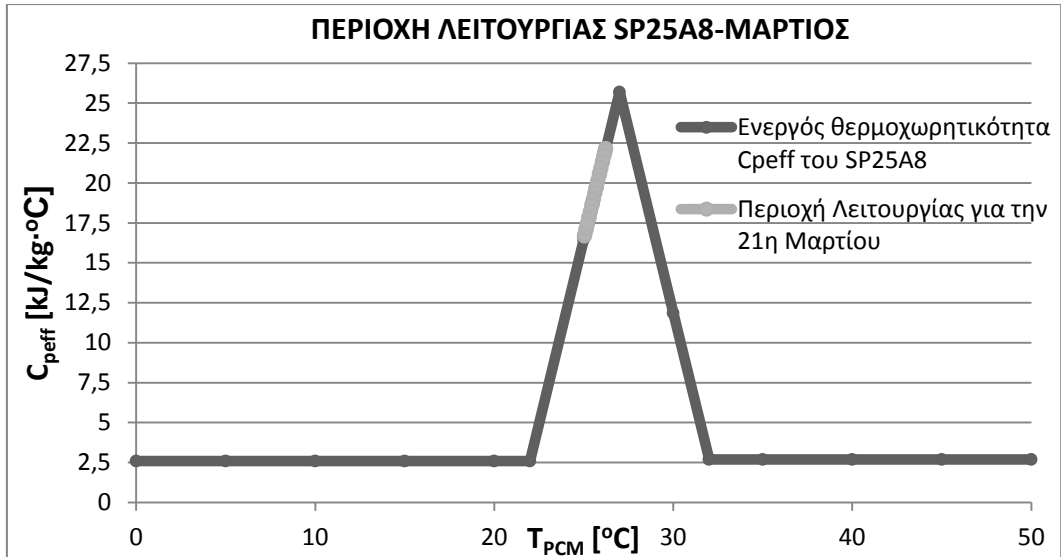
**Σχήμα 7.2.5.8:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 41,871 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 24,9\%$$



**Σχήμα 7.2.5.9:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p\text{eff}}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του SP25A8, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του SP25A8, κατά την 21<sup>η</sup> Μαρτίου

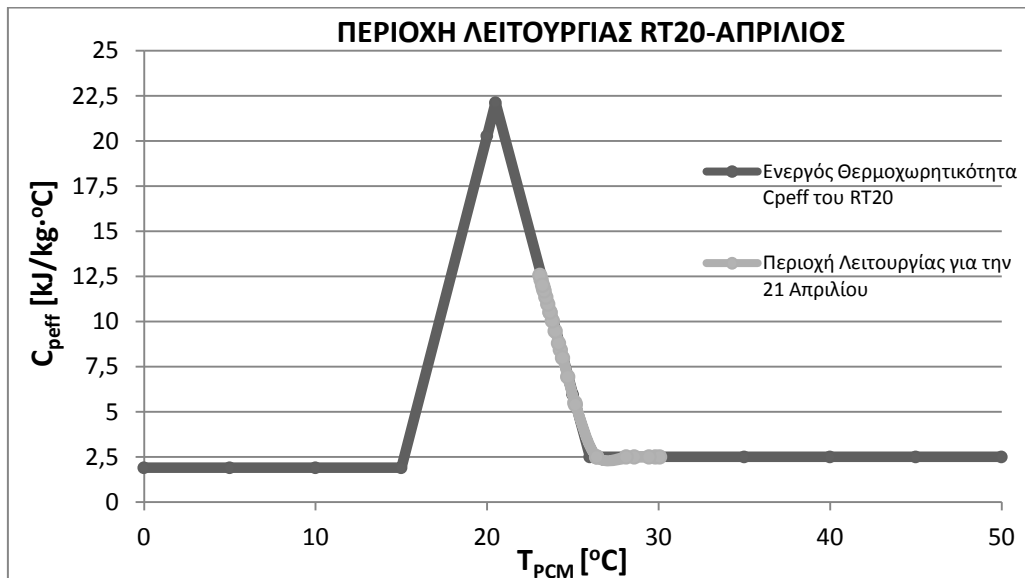
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_0 = 141,769 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$E = 22,756 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\eta = 16,1\%$$

**Για την 21<sup>η</sup> Απριλίου**



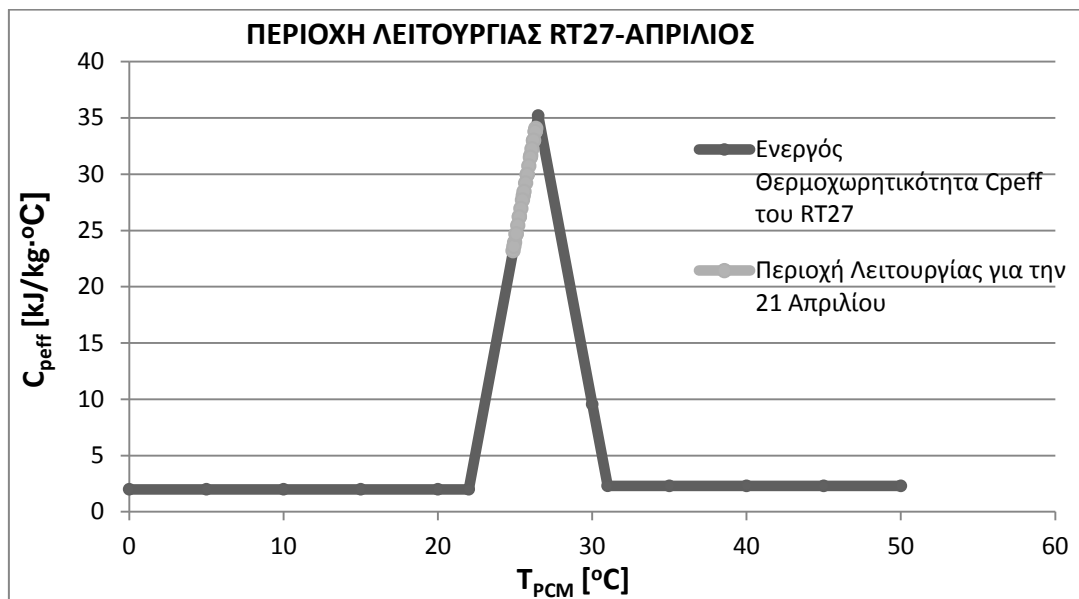
**Σχήμα 7.2.5.10:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p\text{eff}}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21η Απριλίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 21,905 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 16,4\%$$



**Σχήμα 7.2.5.11:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21η Απριλίου=

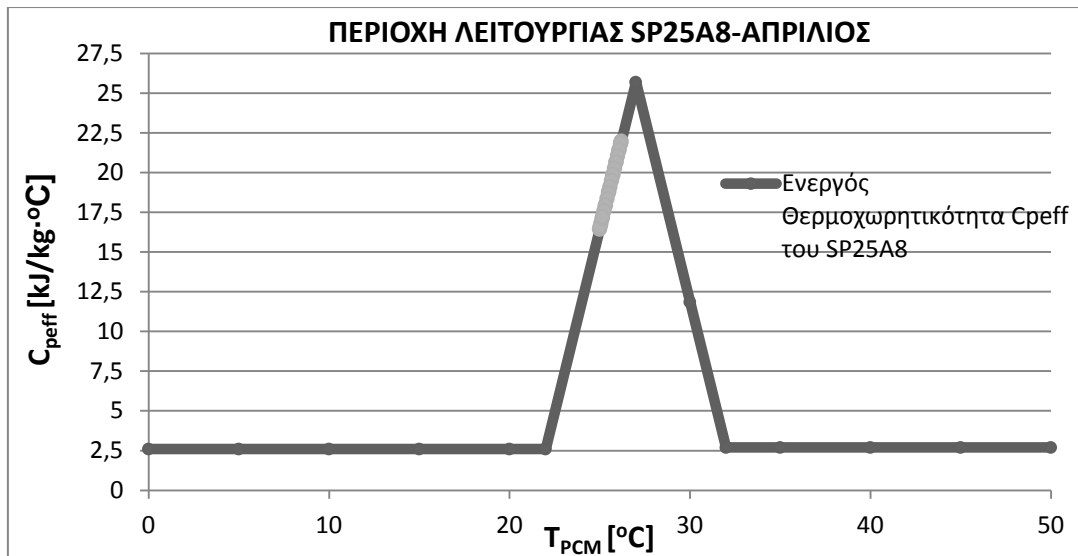
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 42,079 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 25\%$$





**Σχήμα 7.2.5.12:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του SP25A8, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του SP25A8, κατά την 21η Απριλίου

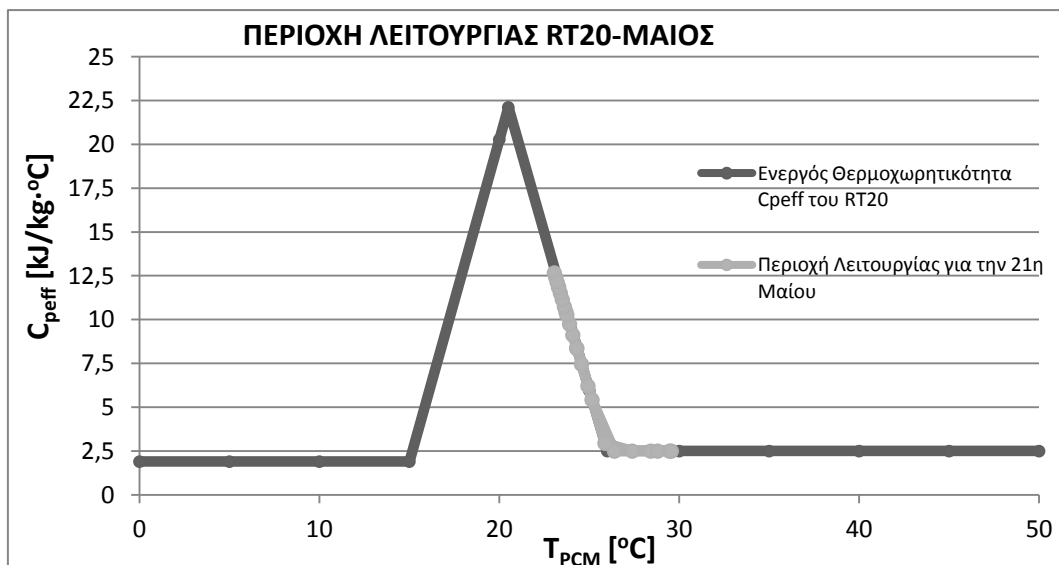
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 141,769 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 23,059 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 16,3\%$$

**Για την 21<sup>η</sup> Μαΐου**



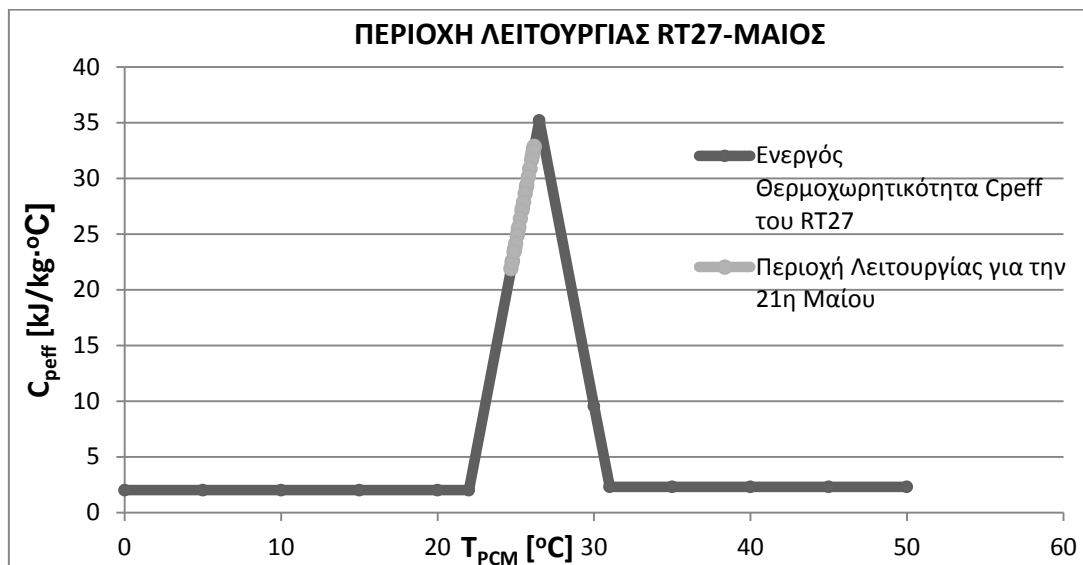
**Σχήμα 7.2.5.13:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21η Μαΐου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 22,298 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 16,7\%$$



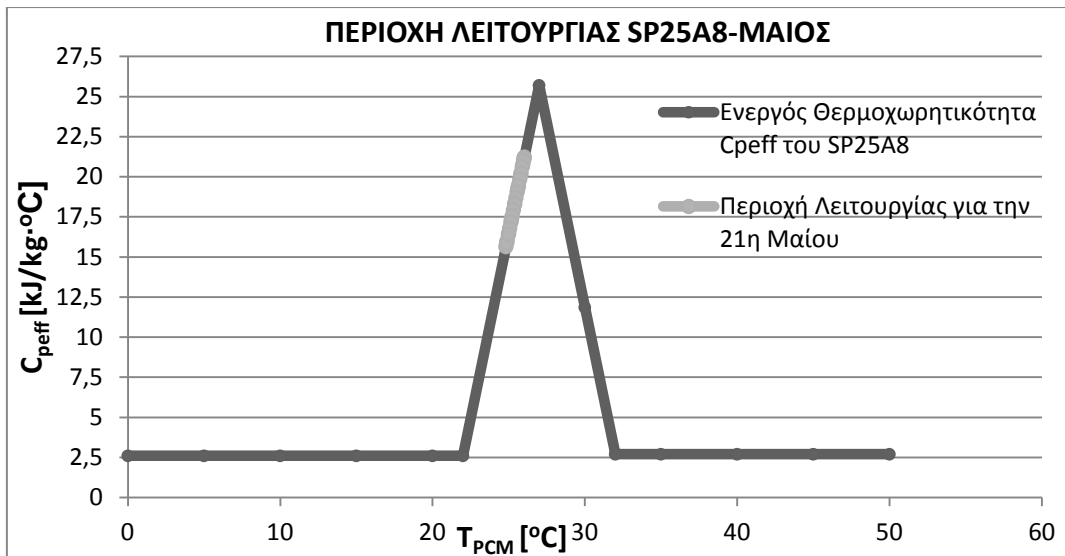
**Σχήμα 7.2.5.14:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21η Μαΐου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 40,518 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 24,1\%$$



**Σχήμα 7.2.5.15:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του SP25A8, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του SP25A8, κατά την 21η Μαΐου

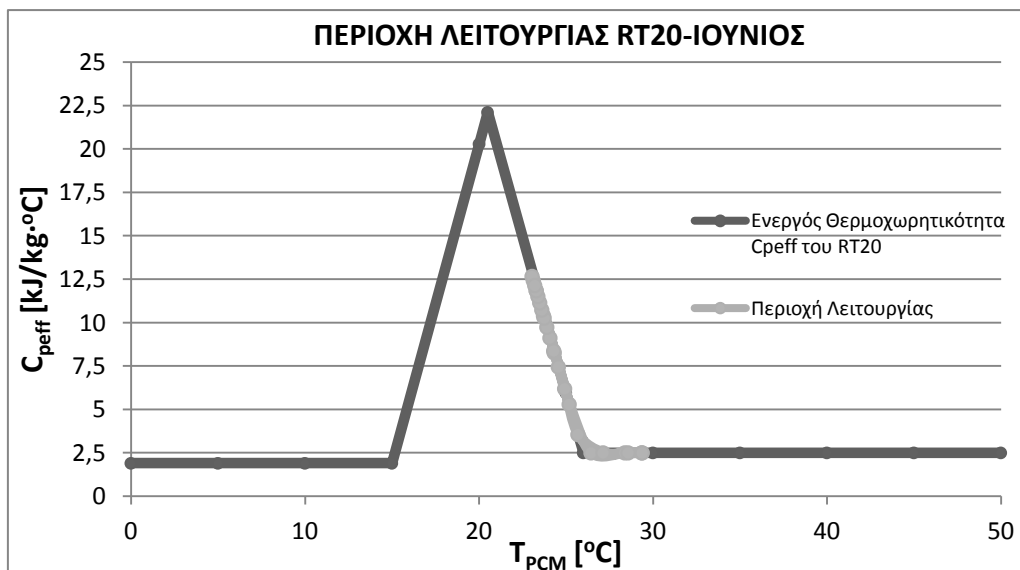
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 141,769 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 22,306 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 15,7\%$$

**Για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου**



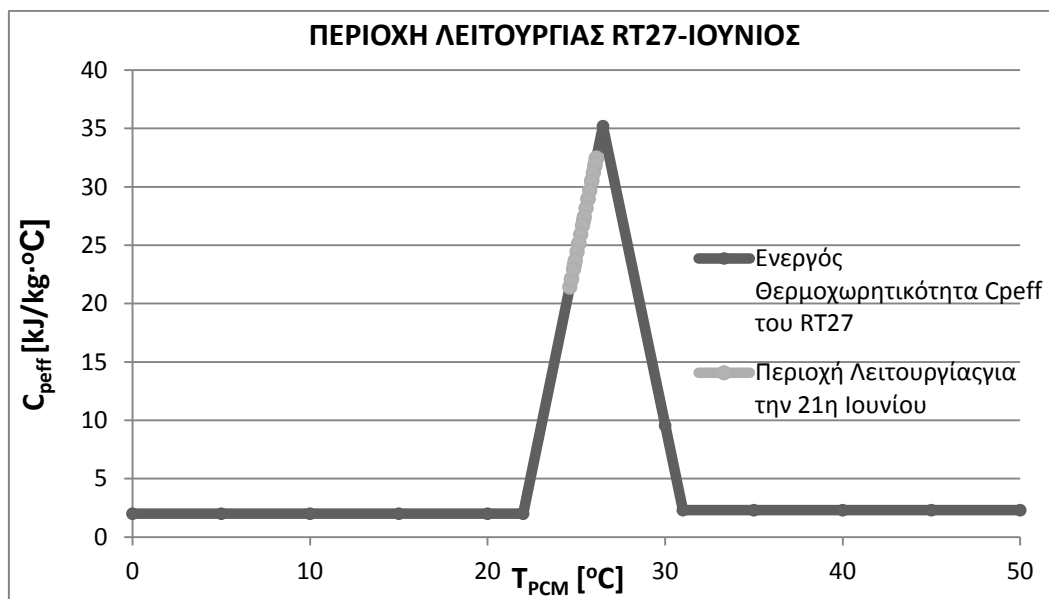
**Σχήμα 7.2.5.16:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21η Ιουνίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=22,294 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta=16,7\%$$



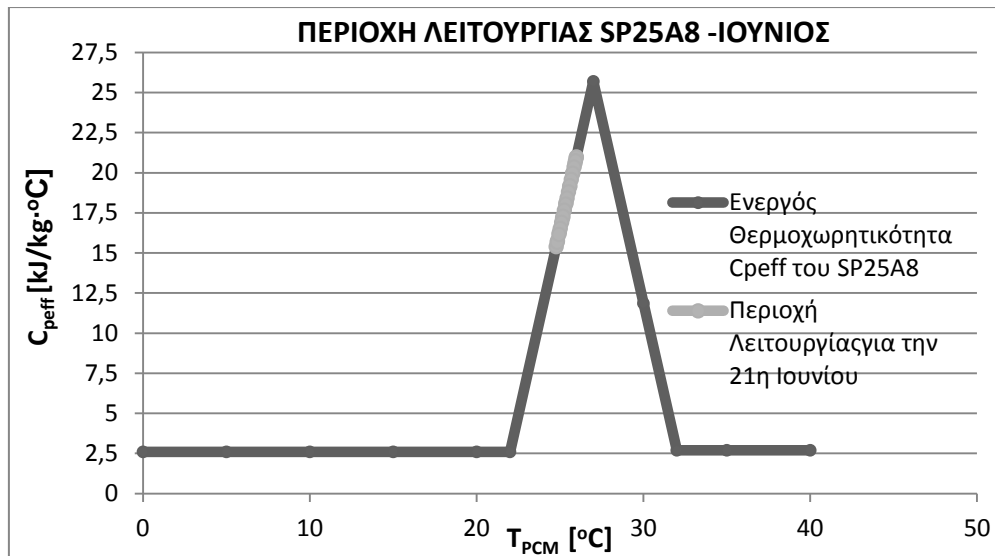
**Σχήμα 7.2.5.17:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21η Ιουνίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=40,422 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta=24\%$$



**Σχήμα 7.2.5.18:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του SP25A8, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του SP25A8, κατά την 21η Ιουνίου

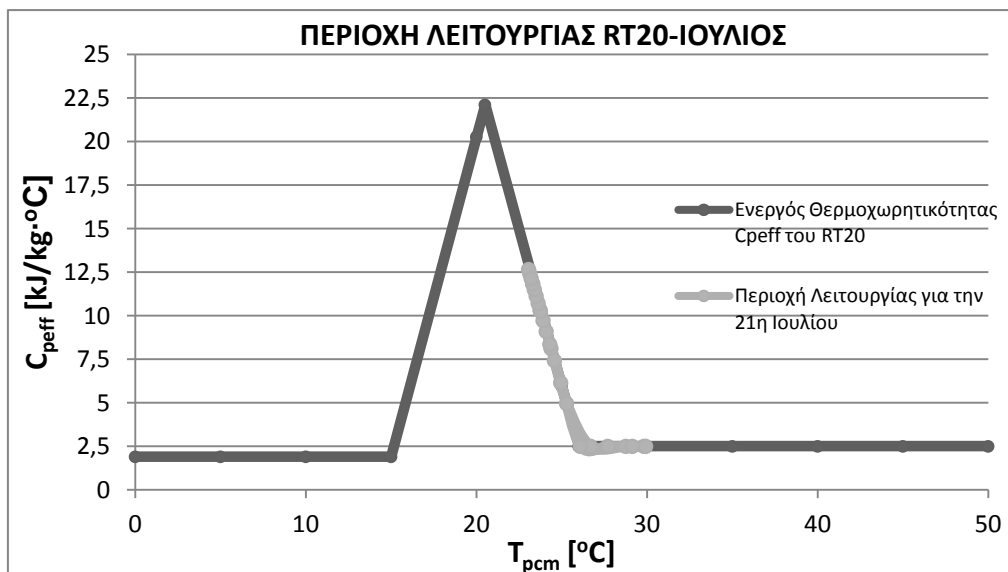
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 141,769 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 22,012 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 15,5\%$$

**Για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου**



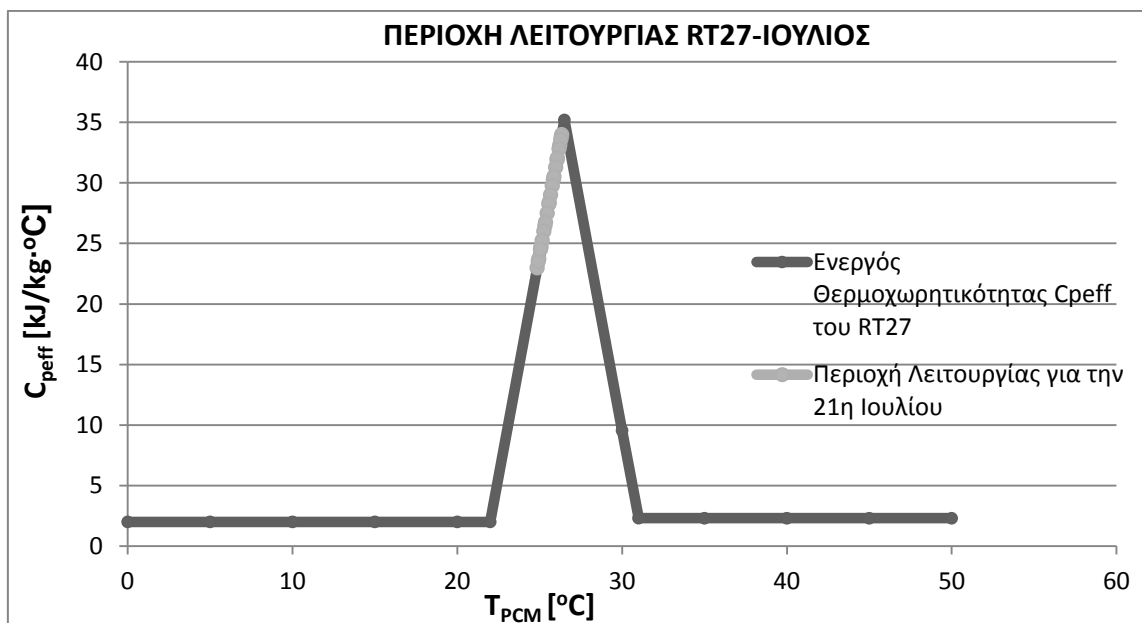
**Σχήμα 7.2.5.19:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21η Ιουλίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=22,285 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta=16,7\%$$



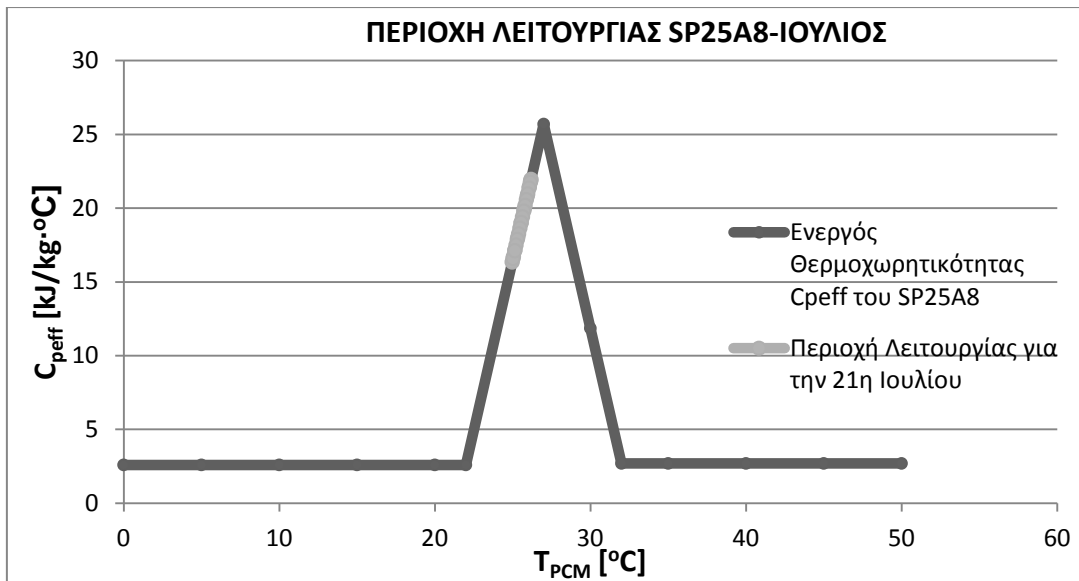
**Σχήμα 7.2.5.20:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21η Ιουλίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=40,832 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta=24,3\%$$



**Σχήμα 7.2.5.21:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του SP25A8, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του SP25A8, κατά την 21η Ιουλίου

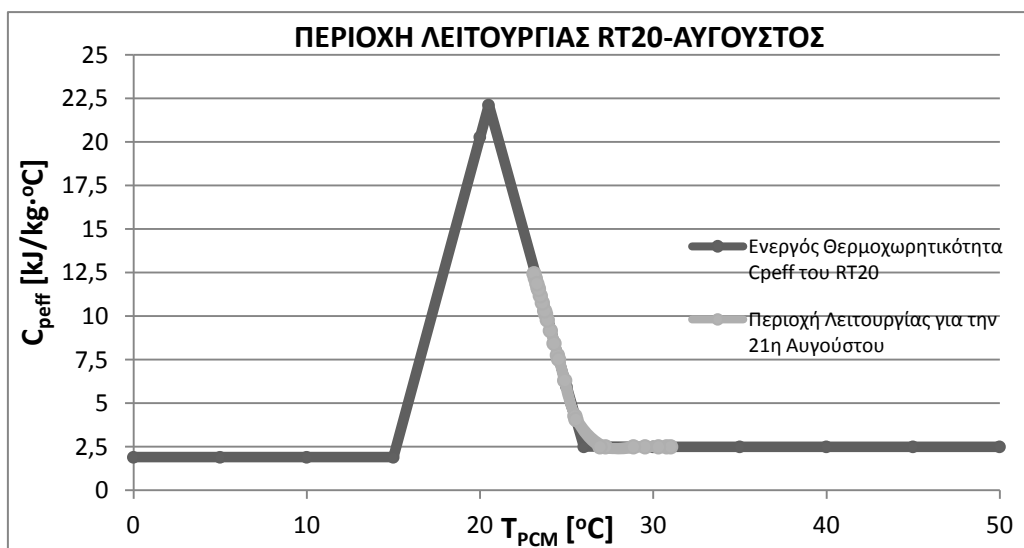
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 141,769 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 23,171 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 16,3\%$$

**Για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου**



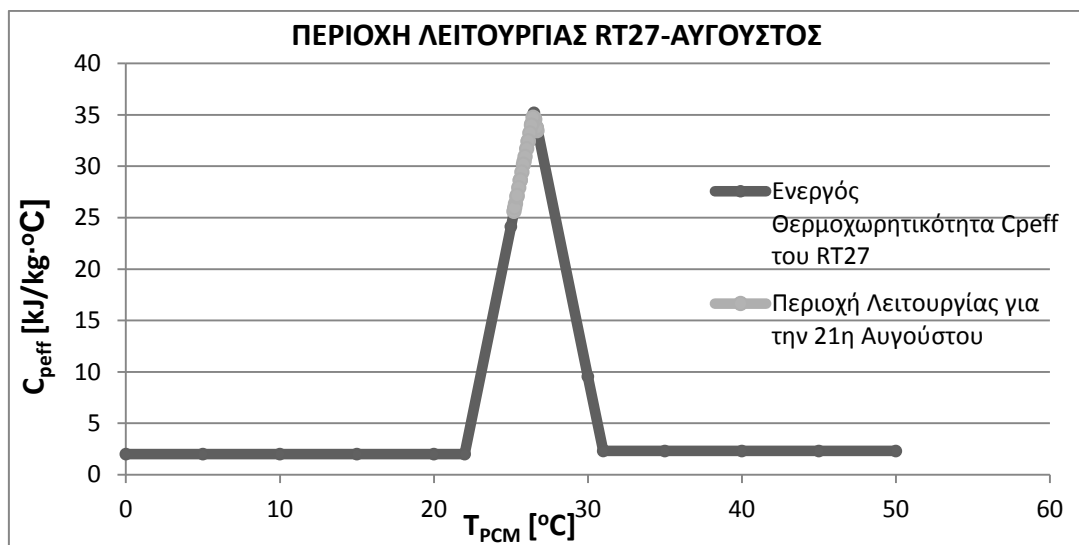
**Σχήμα 7.2.5.22:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21η Αυγούστου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=21,433 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$\eta=16\%$



**Σχήμα 7.2.5.23:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21η Αυγούστου

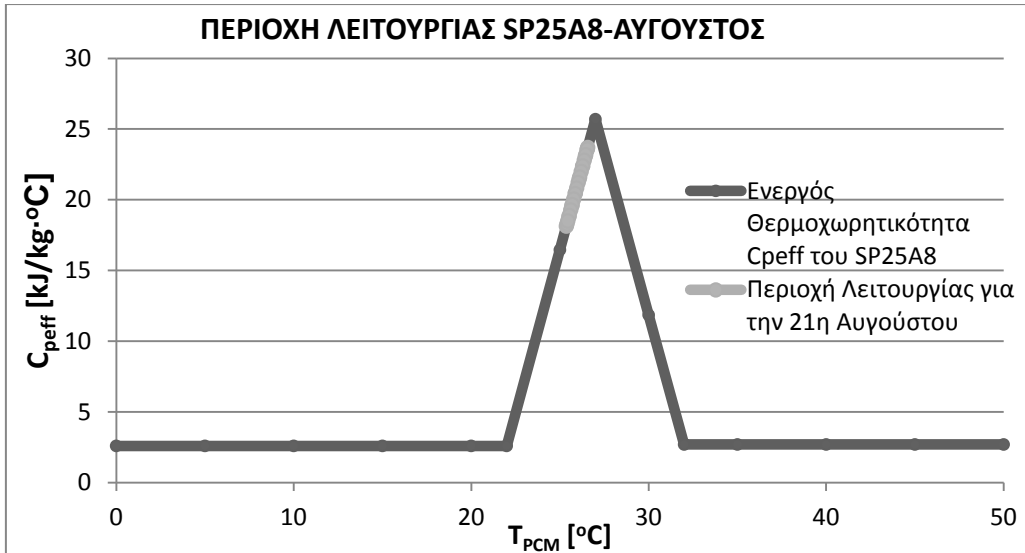
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=46,424 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$\eta=27,6\%$





**Σχήμα 7.2.5.24:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του SP25A8, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του SP25A8, κατά την 21η Αυγούστου

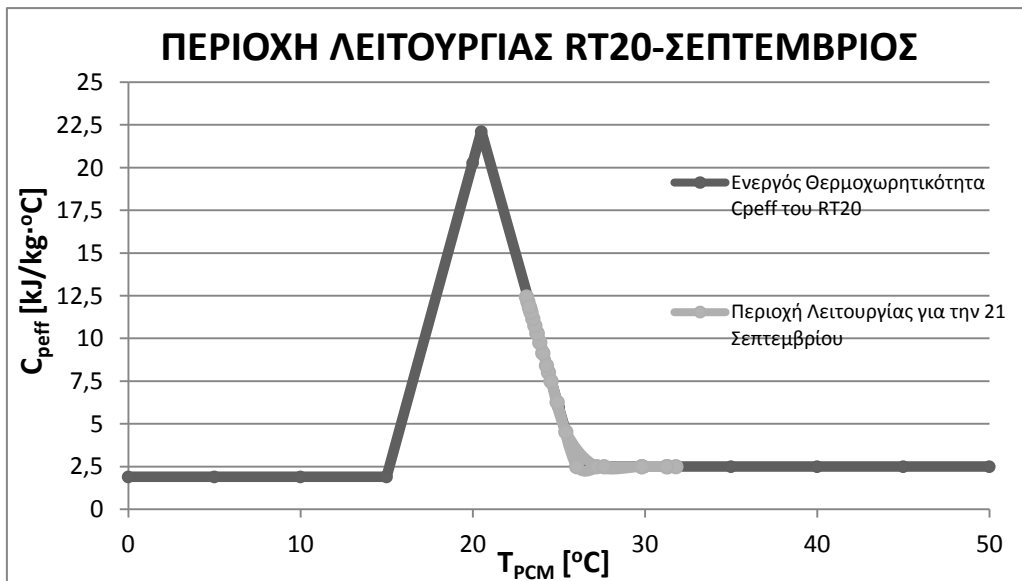
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 141,769 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 25,311 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 17,8\%$$

**Για την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου**



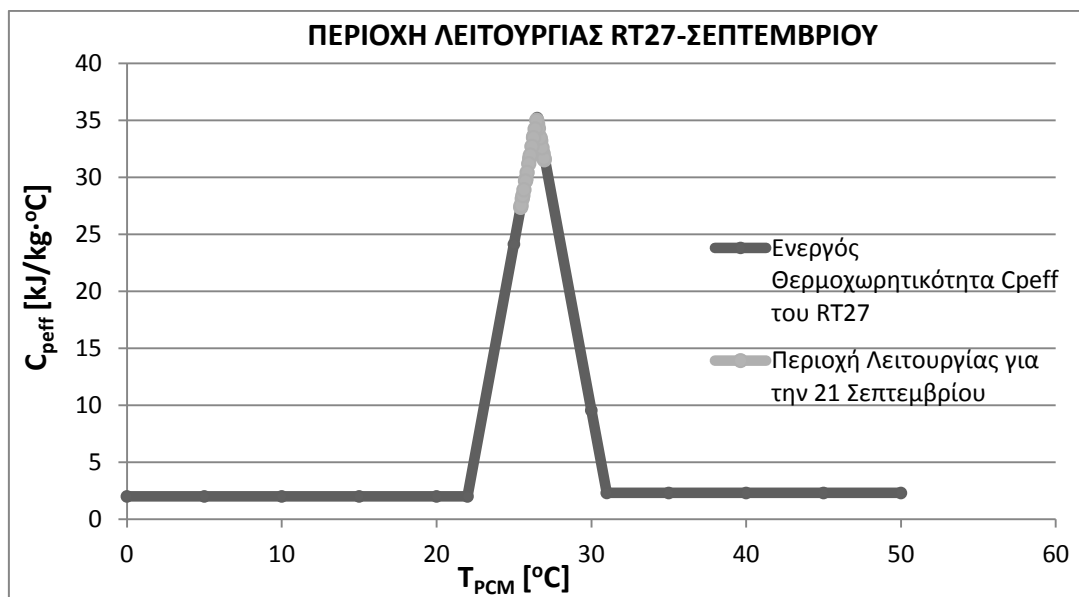
**Σχήμα 7.2.5.25:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21η Σεπτεμβρίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=21,423 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta=16\%$$



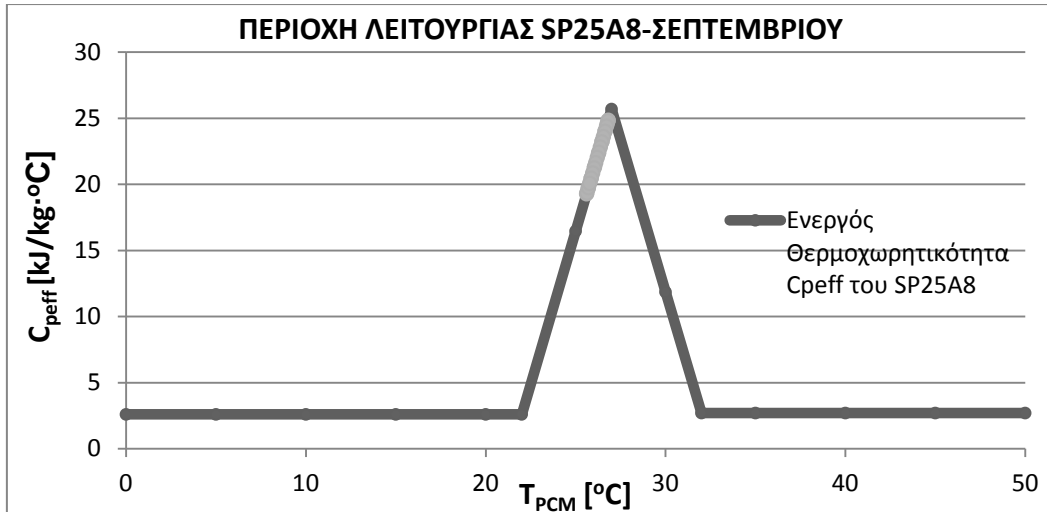
**Σχήμα 7.2.5.26:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21η Σεπτεμβρίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=48,534 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta=28,9\%$$



**Σχήμα 7.2.5.27:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του SP25A8, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του SP25A8, κατά την 21η Σεπτεμβρίου

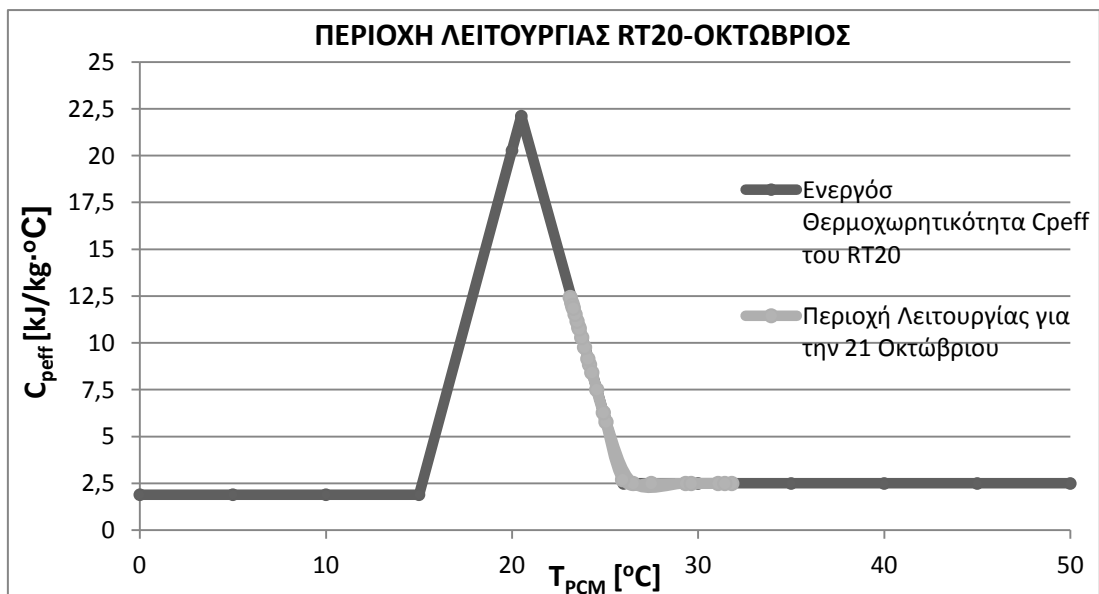
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 141,769 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 26,925 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 19\%$$

**Για την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου**



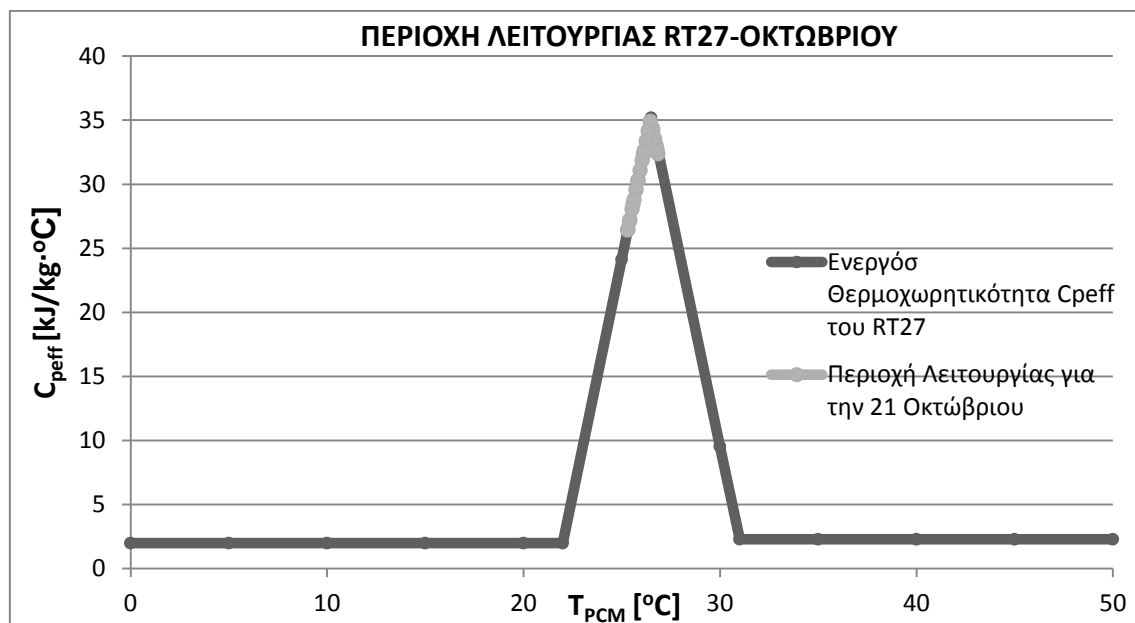
**Σχήμα 7.2.5.28:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21η Οκτωβρίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=21,427 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta=16\%$$



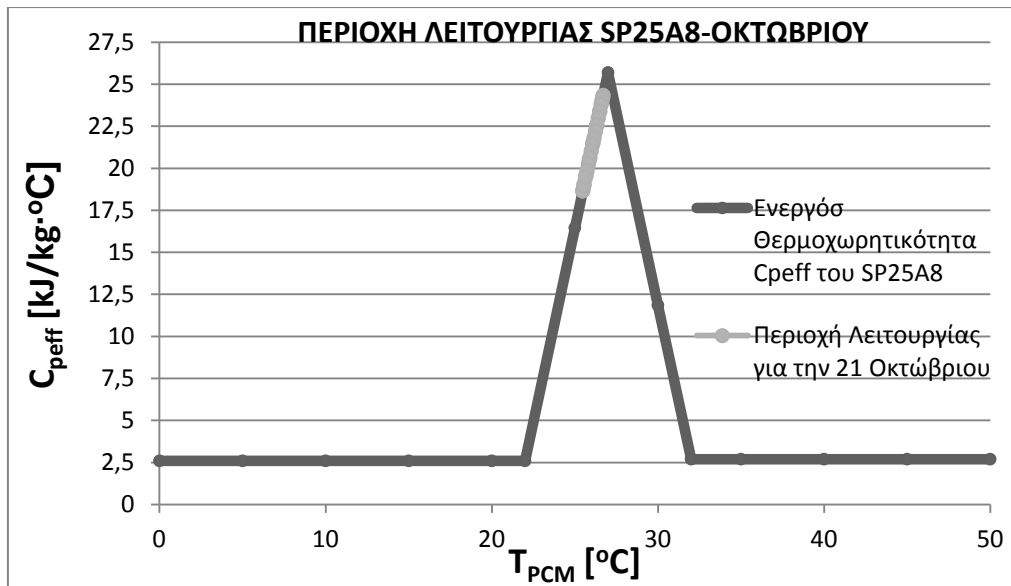
**Σχήμα 7.2.5.29:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21η Οκτωβρίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=48,490 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta=28,8\%$$



**Σχήμα 7.2.5.30:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του SP25A8, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του SP25A8, κατά την 21η Οκτωβρίου

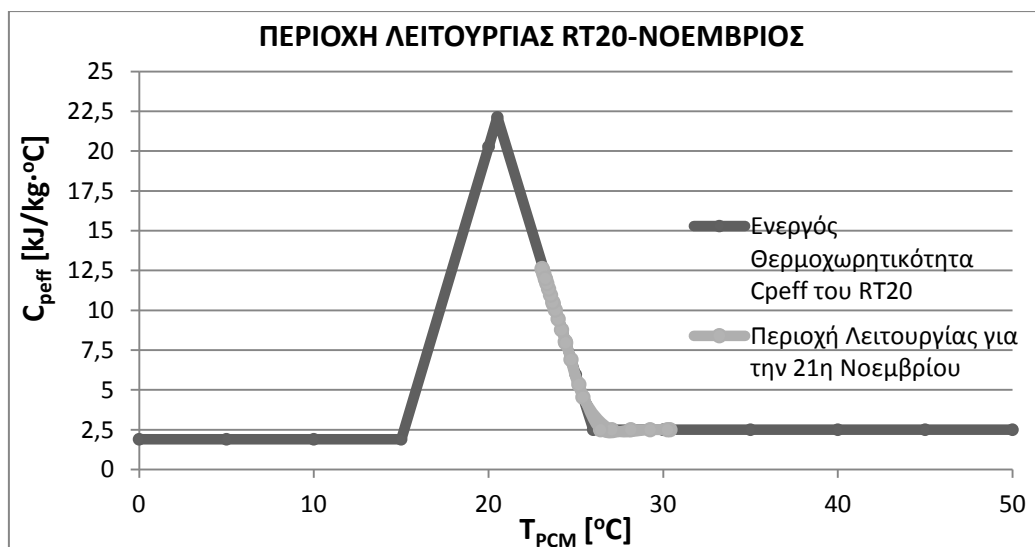
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 141,769 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 26,429 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 18,6\%$$

**Για την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου**



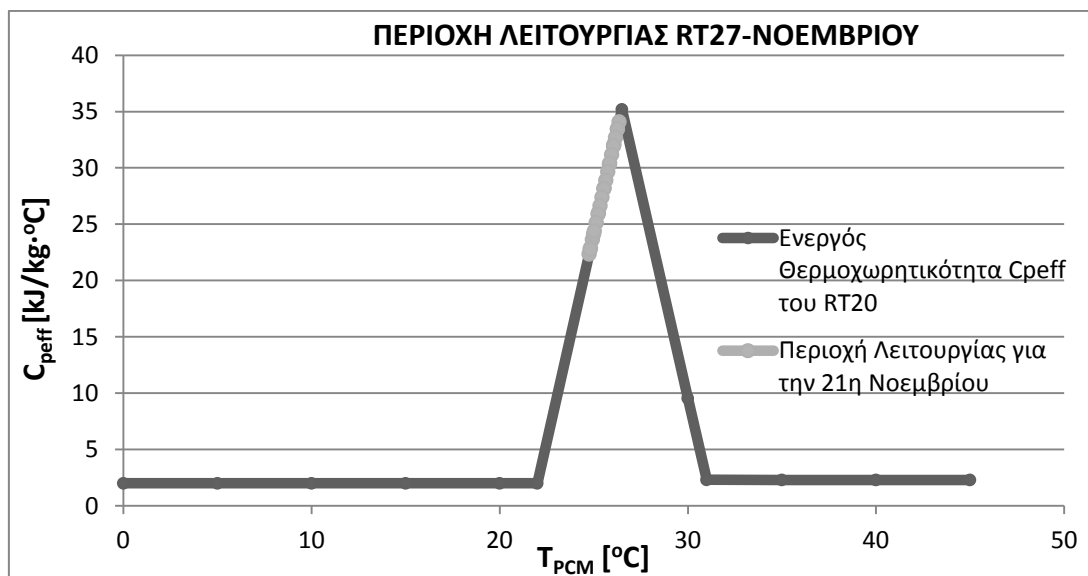
**Σχήμα 7.2.5.31:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21η Νοεμβρίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=22,157 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta=16,6\%$$



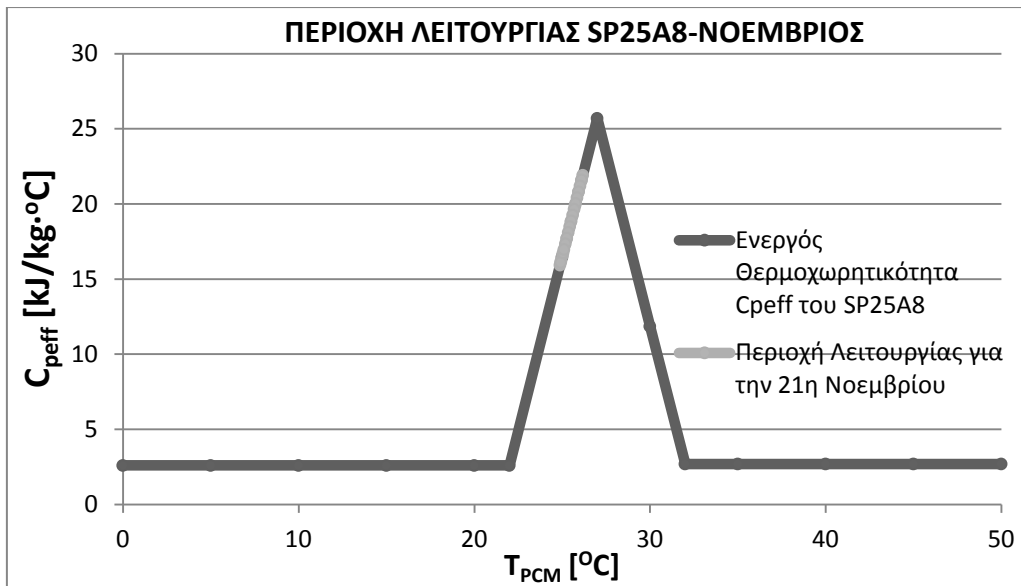
**Σχήμα 7.2.5.32:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21η Νοεμβρίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o=168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E=44,877 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta=26,7\%$$



**Σχήμα 7.2.5.33:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του SP25A8, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του SP25A8, κατά την 21η Νοεμβρίου

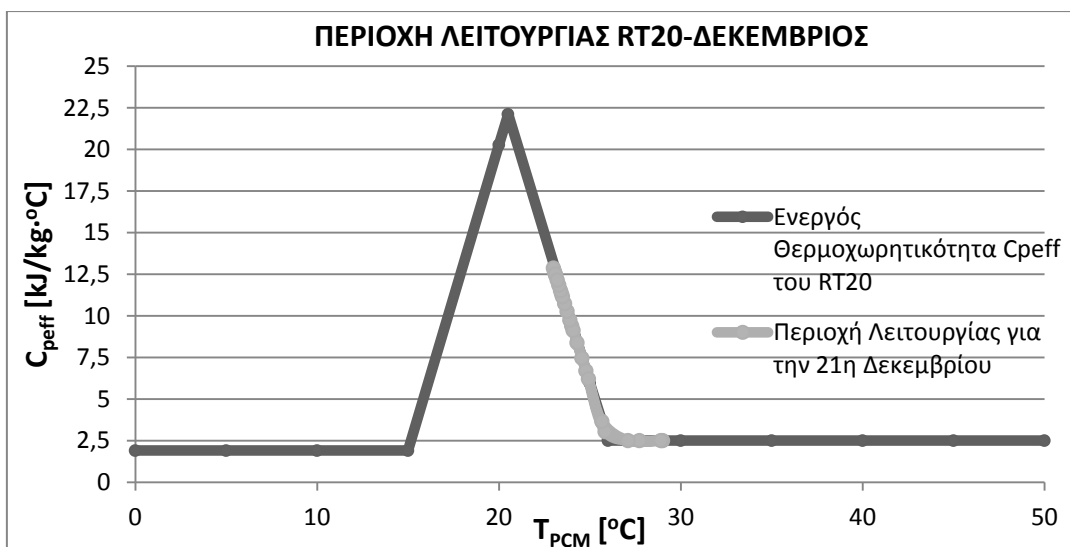
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_o = 141,769 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 24,409 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 17,2 \%$$

**Για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου**



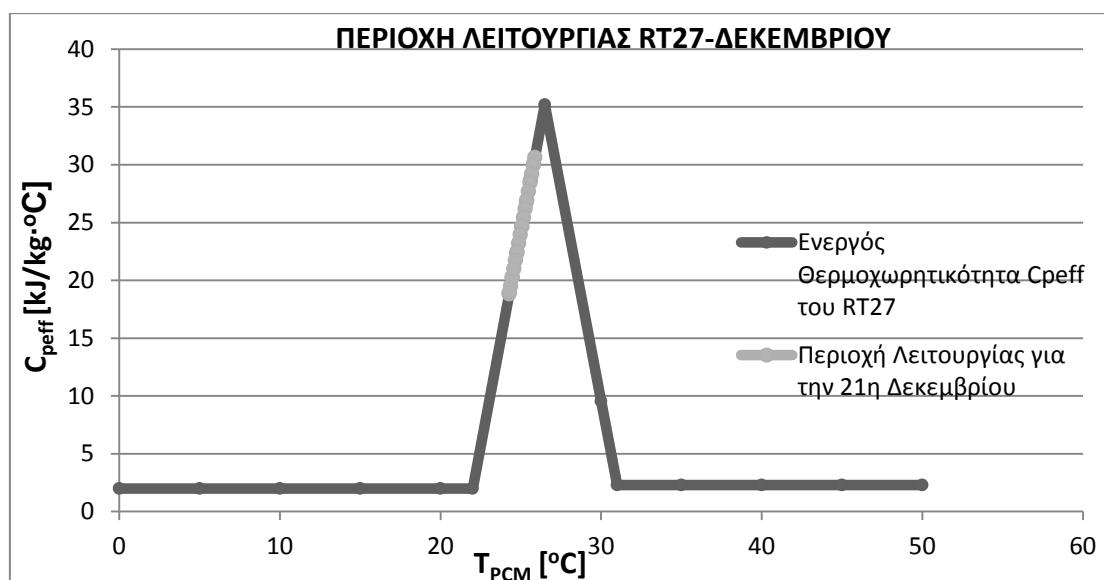
**Σχήμα 7.2.5.34:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, κατά την 21η Δεκεμβρίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_0 = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 23,055 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 17,2\%$$



**Σχήμα 7.2.5.35:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27, κατά την 21η Δεκεμβρίου

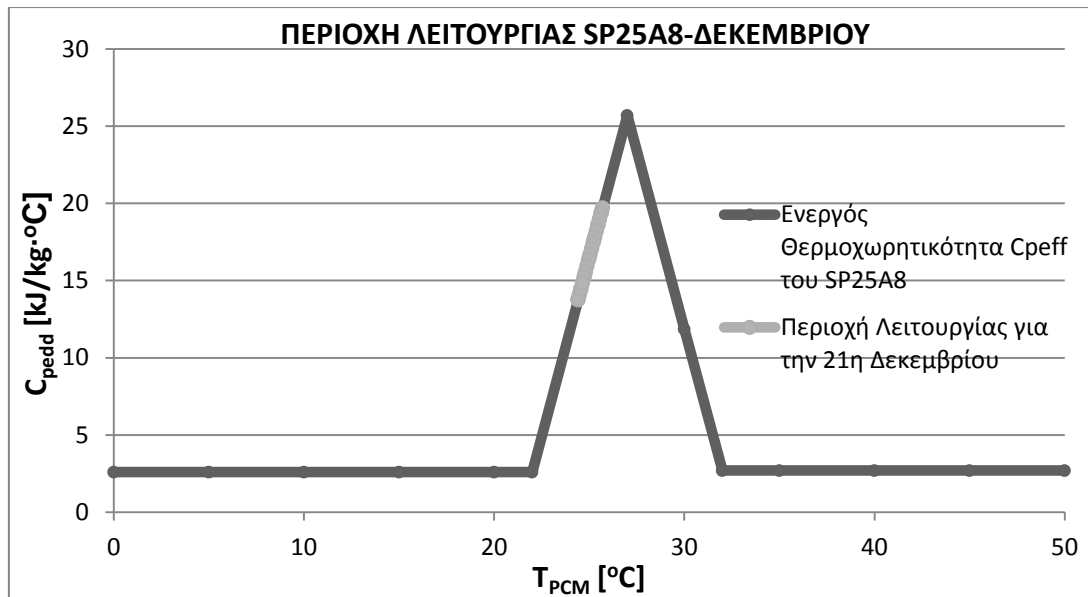
Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_0 = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 39,526 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 23,5\%$$





**Σχήμα 7.2.4.36:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του SP25A8, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του SP25A8, κατά την 21η Δεκεμβρίου

Προέκυψαν οι τιμές:

$$E_0 = 141,769 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E = 21,222 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta = 15\%$$

### Συγολιασμός-παρατηρήσεις των διαγραμμάτων

Όσον αφορά στο υλικό RT20, η περιοχή λειτουργίας του για κάθε μήνα του έτους, ξεκινά από τη «διφασική περιοχή», με μικρές τιμές ενεργού θερμοχωρητικότητας, και καταλήγει στην «υγρή περιοχή». Για τον λόγο αυτό, είναι φανερό ότι δεν αναμένουμε καλή απόδοση του RT20, και άρα αξιόλογους βαθμούς αξιοποίησης του υλικού, αφού στην «υγρή περιοχή» παύει να αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα. Επίσης, παρατηρείται ελάχιστα καλύτερη αξιοποίηση του υλικού RT20, για τις δεδομένες θερμοκρασιακές συνθήκες εσωτερικού χώρου, τους χειμερινούς μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο.

Το υλικό αλλαγής φάσης RT27, λειτουργεί για κάθε μήνα τους έτους, εντός της «διφασικής περιοχής», και μάλιστα, αρκετά ψηλά στο «τρίγωνο της ενεργού θερμοχωρητικότητας», εμφανίζοντας με αυτόν τον τρόπο ιδιαίτερα υψηλές τιμές θερμοχωρητικότητας και κατά συνέπεια, καλές αποδόσεις. Ο βαθμός

αξιοποίησης του RT27, εμφανίζει μέγιστες τιμές τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο, κατά την διάρκεια των οποίων η ενεργός θερμοχωρητικότητα του υλικού φθάνει τις μέγιστες δυνατές τιμές της.

Αντίστοιχα με το RT27, το μείγμα SP25A8 λειτουργεί κι αυτό εντός της «διφασικής περιοχής» καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Οι τιμές της θερμοχωρητικότητας του, όμως, είναι χαμηλότερες από αυτές του RT27, με αποτέλεσμα το μείγμα να εμφανίζει μικρότερους βαθμούς αξιοποίησης (άρα και χειρότερη απόδοση από το RT27) και παρόμοιους με αυτούς του RT20. Τέλος, μείγμα αποδίδει καλύτερα τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο, κατά τους οποίους έχει μεγαλύτερες τιμές θερμοχωρητικότητας.

### **7.2.5 Σύγκριση μεταξύ του υλικού αλλαγής φάσης RT20 και του μπετόν ως προς τη θερμοκρασία που συναλλάσσουν κατά τη διάρκεια ενός 48ώρου τον μήνα Ιανουάριο**

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει μια ποιοτική σύγκριση στη θερμοκρασία του τοίχου, όταν αυτός περιέχει το PCM, RT20, που υπολογίσαμε στο 7.2.3, και όταν έχει απλό μπετόν, κατά την 21<sup>η</sup> και την 22<sup>η</sup> μέρα του Ιανουαρίου, δηλαδή σε διάρκεια ενός 48ώρου. Θεωρήσαμε ότι το πρώτο 24ωρο, η μέρα είχε 100% ηλιοφάνεια, ενώ το δεύτερο είχε έντονη συννεφιά, και στον τοίχο έφτανε μόνο το 10% της Ηλιακής ακτινοβολίας.

Κατά τα γνωστά, η σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας του μπετόν, στο τέλος κάθε ώρας του πρώτου 24ώρου, παίρνει τη μορφή:

$$T_{\text{τελ}} = \frac{7290 \cdot G_T + 5346 - 121,5 \cdot T_{\text{αρχ}} + m_{\text{μπετόν}} \cdot C_p \cdot T_{\text{αρχ}}}{121,5 + m_{\text{μπετόν}} \cdot C_p} \quad (7.2.5.1)$$

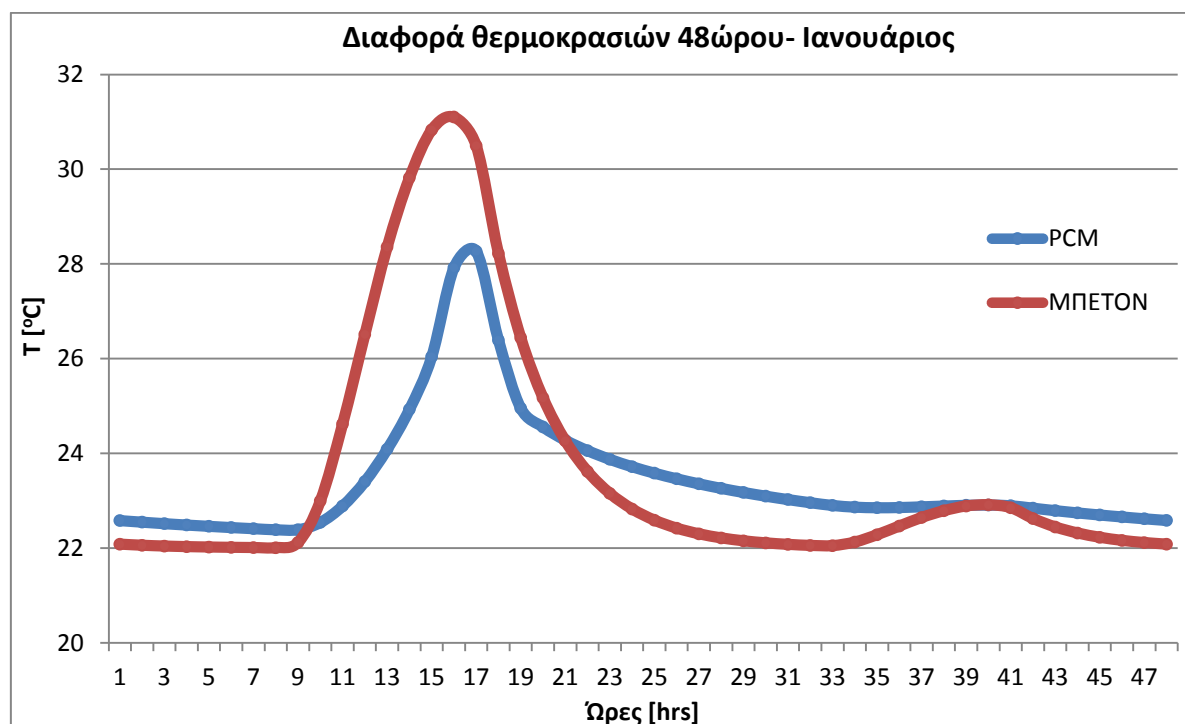
Ενώ για το δεύτερο 24ωρο θα ισχύει η σχέση:

$$T_{\text{τελ}} = \frac{7290 \cdot 0,1 \cdot G_T + 5346 - 121,5 \cdot T_{\text{αρχ}} + m_{\text{μπετόν}} \cdot C_p \cdot T_{\text{αρχ}}}{121,5 + m_{\text{μπετόν}} \cdot C_p} \quad (7.2.5.2)$$

Όπου  $m_{\text{μπετόν}} = \rho_{\text{μπετόν}} \cdot V_{\text{μπετόν}}$  και  $\rho_{\text{μπετόν}} = 2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , άρα  $m_{\text{μπετόν}} = 2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9\text{m}^2 \cdot 0,04\text{m} = 828\text{kg}$

και  $C_p = 0,88 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

Το διάγραμμα (7.2.5.1) θα μας κάνει πιο εμφανή αυτή τη διαφορά.



**Σχήμα 7.2.5.1:** Σύγκριση θερμοκρασίας 48ώρου, μεταξύ μπετόν και RT20

#### Σχολιασμός-παρατηρήσεις διαγράμματος

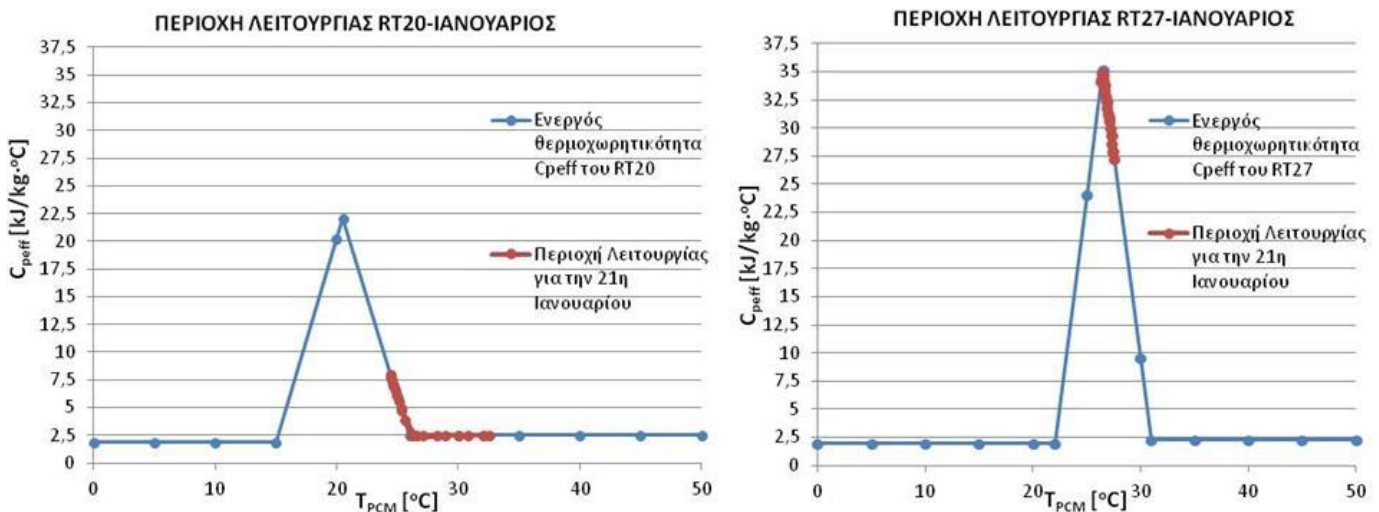
Παρατηρούμε ότι το μπετόν παρουσιάζει μεγαλύτερη μέγιστη θερμοκρασία από το RT20 στο πρώτο 24ωρο, που υπάρχει ηλιοφάνεια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μπετόν έχει την ιδιότητα, όταν παίρνει θερμότητα, να αυξάνει την θερμοκρασία του. Αντίθετα, το PCM εκμεταλλεύεται τη θερμότητα που του δίνεται για να αλλάξει φάση (από στερεό σε υγρό, όσο αφορά στις πρωινές ώρες). Το βράδυ βλέπουμε μια γρήγορη πτώση θερμοκρασίας του μπετόν σε σχέση με το PCM, το οποίο χρησιμοποιεί τη θερμότητα που του έχει δοθεί όλο το πρωί για να αλλάξει φάση (από υγρό γίνεται στερεό αυτή τη φορά). Το μπετόν χάνει πολύ πιο γρήγορα τη θερμοκρασία του γιατί δεν έχει την ιδιότητα να την κρατάει και να την χρησιμοποιήσει κάπου. Στο δεύτερο 24ωρο, που η ηλιοφάνεια είναι μικρή (10%), το PCM παρουσιάζει μεγαλύτερη θερμοκρασία από το μπετόν, αφού πέραν της μικρής διέγερσης  $G_T$  που δέχονται και τα δυο υλικά τις πρωινές ώρες, το PCM διαθέτει ακόμα κάποια «φόρτιση» από το προηγούμενο 24ωρο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Παραμετρική μελέτη ως προς τη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, μελετήθηκε η συμπεριφορά των τριών PCM, για μονίμως σταθερή θερμοκρασία δωματίου  $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$ , καθ'όλη τη διάρκεια του τυπικού έτους. Στην παρούσα ενότητα, διεξάγουμε παραμετρική μελέτη προκειμένου να εξετάσουμε τη συμπεριφορά των RT20 και RT27, για την περίπτωση που η θερμοκρασία δωματίου παραμένει σταθερή στους  $T_{\Delta\Omega M}=24^{\circ}\text{C}$ , για ολόκληρο το έτος. Στη συνέχεια, εξετάζεται η περίπτωση, κατά την οποία η θερμοκρασία του δωματίου είναι ίση με  $22^{\circ}\text{C}$ , κατά τη διάρκεια του χειμώνα (Νοέμβριος έως Απρίλιος), και  $26^{\circ}\text{C}$ , το καλοκαίρι (Μάιος έως Οκτώβριος). Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η μελέτη της επίδρασης της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου στο βαθμό αξιοποίησης των υλικών αλλαγής φάσης.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι ίδια με την περίπτωση των  $22^{\circ}\text{C}$ , και για εξοικονόμηση χώρου, παρατίθενται μόνο τα διαγράμματα της περιοχής λειτουργίας των δύο υλικών αλλαγής φάσης, καθώς και ο βαθμός αξιοποίησής τους, για κάθε μια από τις δύο νέες περιπτώσεις που εξετάζονται.

- Περίπτωση εσωτερικής θερμοκρασίας δωματίου :  $24^{\circ}\text{C}$ , ολόκληρο το τυπικό έτος



**Σχήμα 8.1:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Ιανουαρίου

$$E_{o,RT20}=133,781 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}}$$

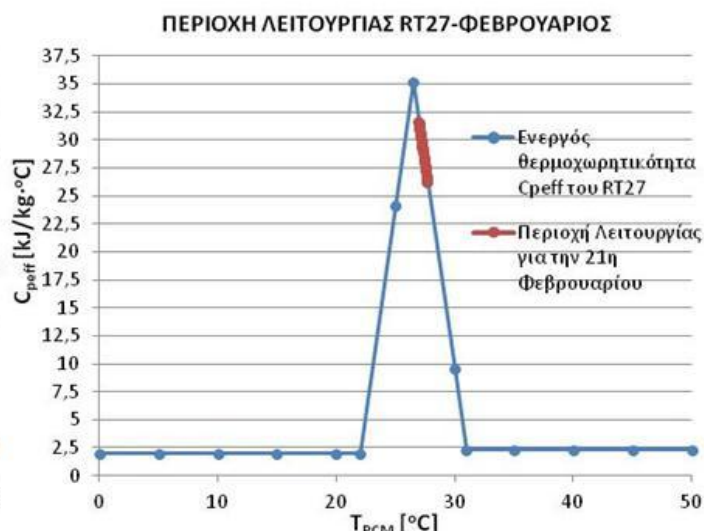
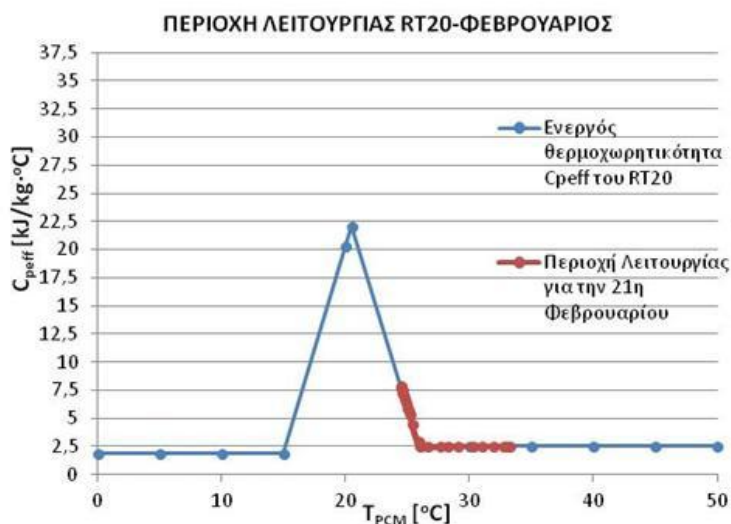
$$E_{RT20}=8,275 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}}$$

$$\eta_{RT20}=6,2\%$$

$$E_{o,RT27}=168,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}}$$

$$E_{RT27}=37,957 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}}$$

$$\eta_{RT27}=22,6\%$$



**Σχήμα 8.2:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27 με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Φεβρουαρίου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

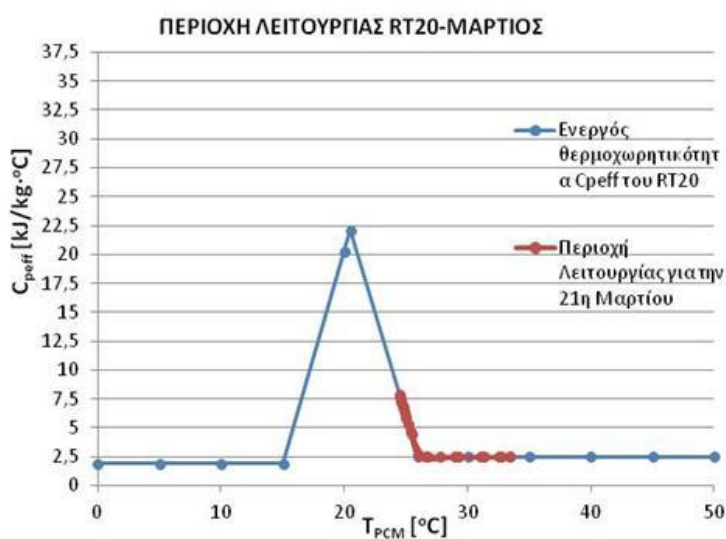
$$E_{RT20} = 8,107 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT20} = 6,1\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 21,709 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 12,9\%$$



**Σχήμα 8.3:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Μαρτίου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT20} = 8,1 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

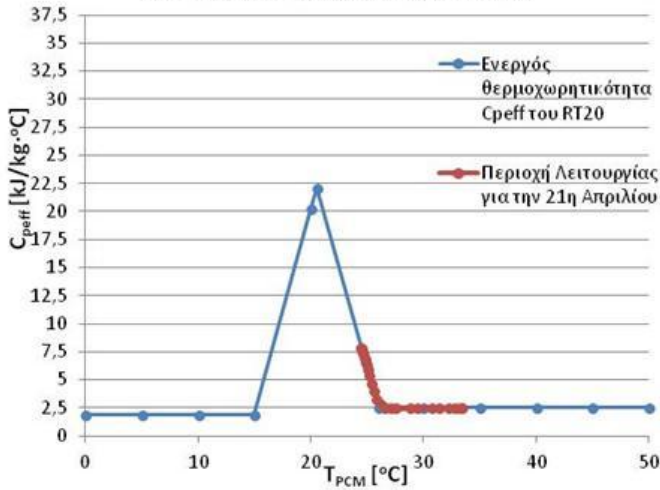
$$\eta_{RT20} = 6,1\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

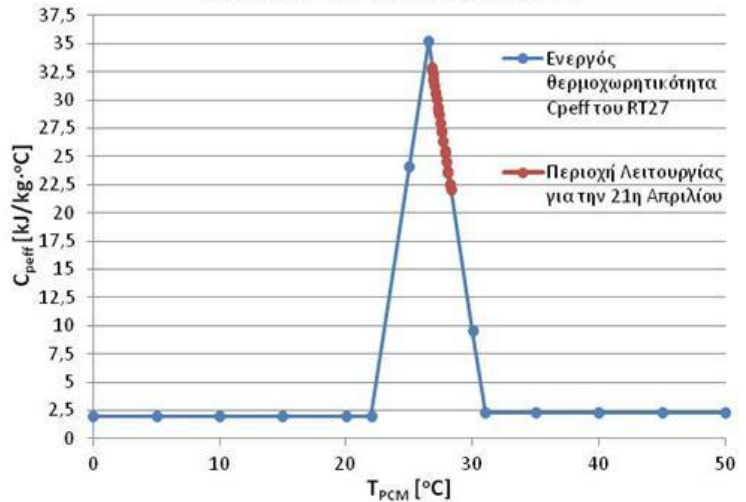
$$E_{RT27} = 41,026 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 24,4\%$$

ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ RT20-ΑΠΡΙΛΙΟΣ



ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ RT27-ΑΠΡΙΛΙΟΣ



Σχήμα 8.4: Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Απριλίου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT20} = 8,205 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

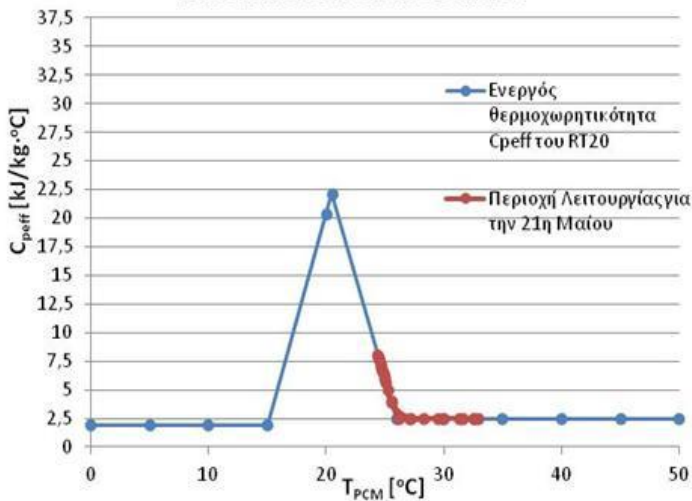
$$\eta_{RT20} = 6,1\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

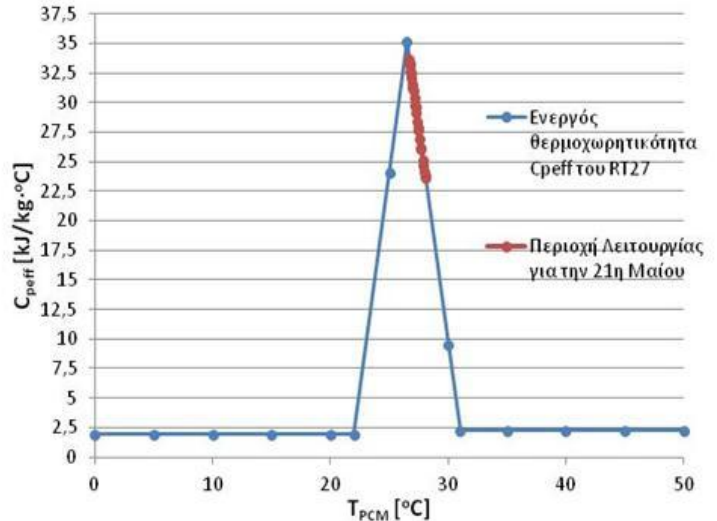
$$E_{RT27} = 41,193 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 24,5\%$$

ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ RT20-ΜΑΙΟΣ



ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ RT27-ΜΑΙΟΣ



Σχήμα 8.5: Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{peff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Μαΐου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT20} = 8,272 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

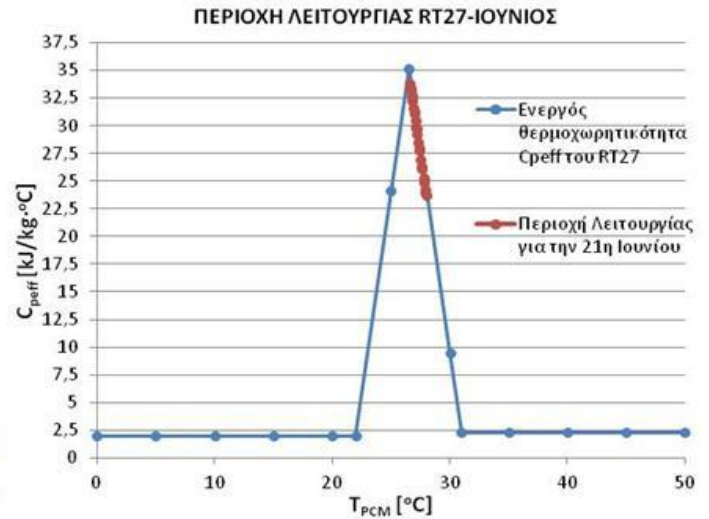
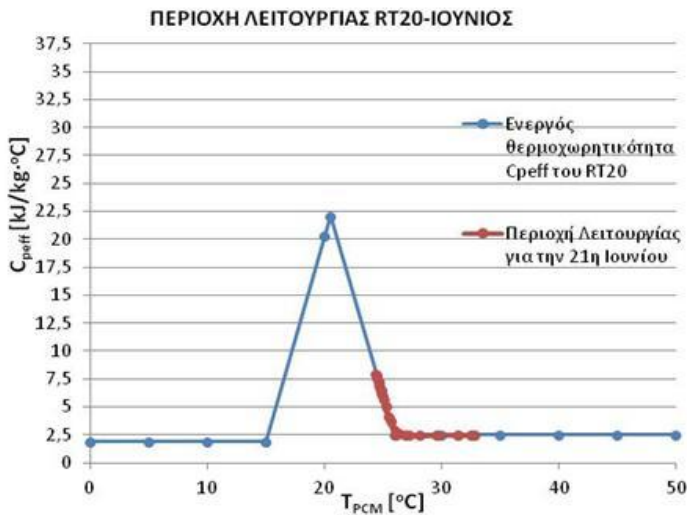
$$\eta_{RT20} = 6,2\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 40,174 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 23,9\%$$





Σχήμα 8.6: Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Ιουνίου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

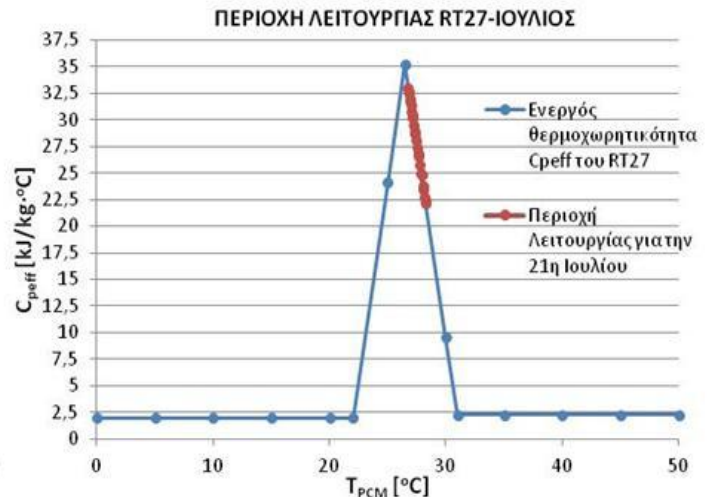
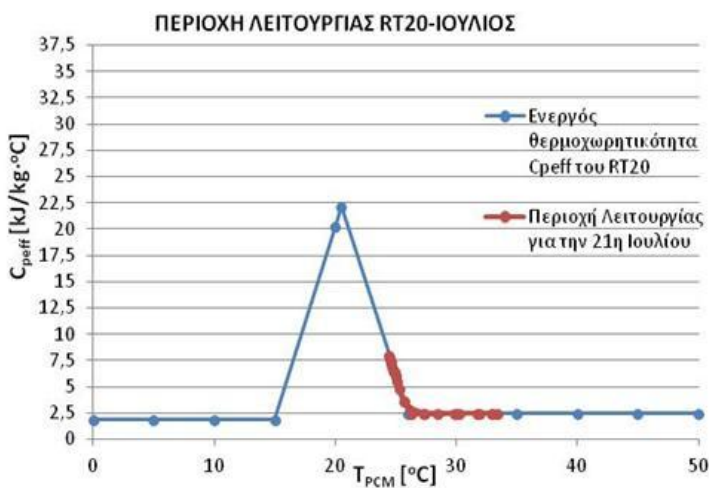
$$E_{RT20} = 8,345 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT20} = 6,2\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 39,261 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 23,3\%$$



Σχήμα 8.7: Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Ιουλίου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

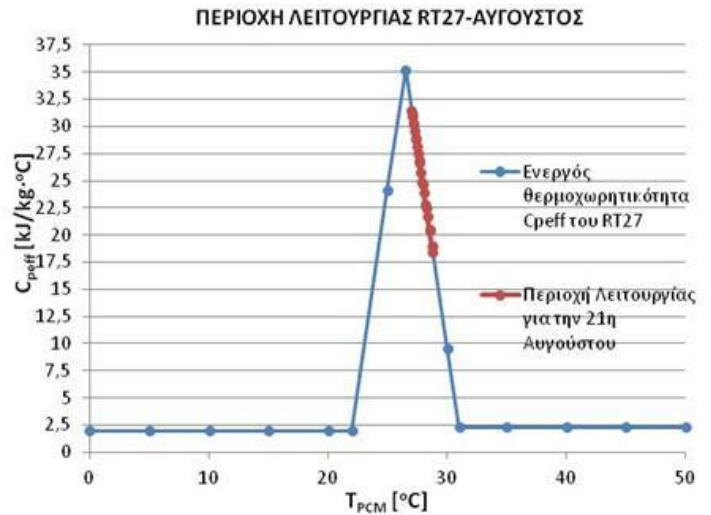
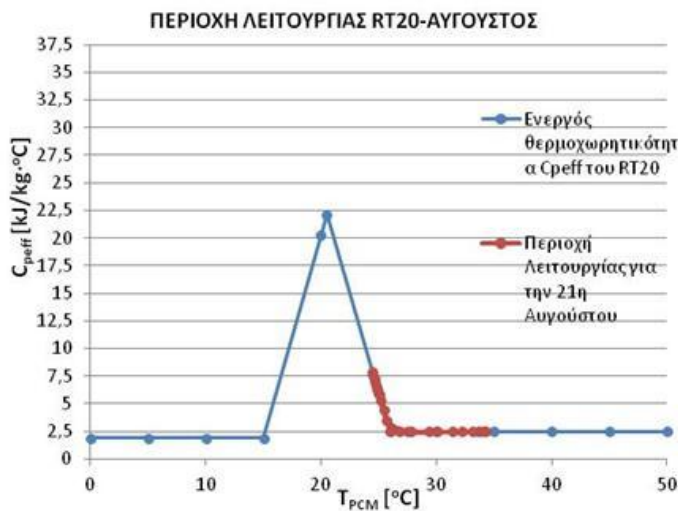
$$E_{RT20} = 8,196 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT20} = 6,1\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 41,381 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 24,6\%$$



**Σχήμα 8.8:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Αυγούστου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

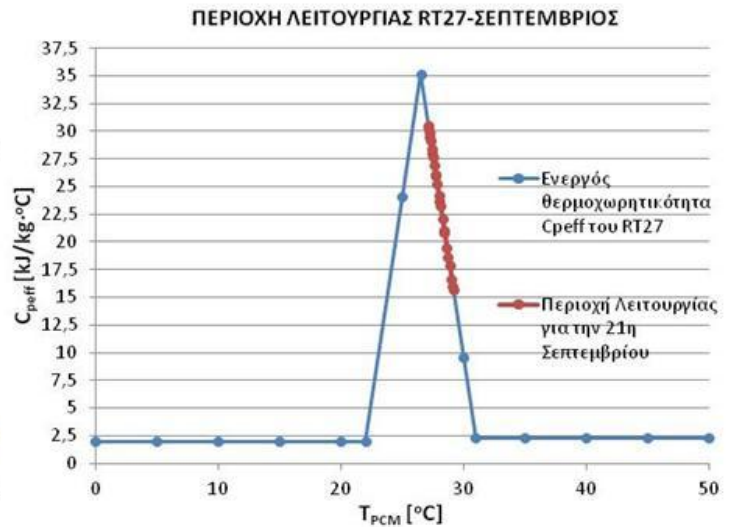
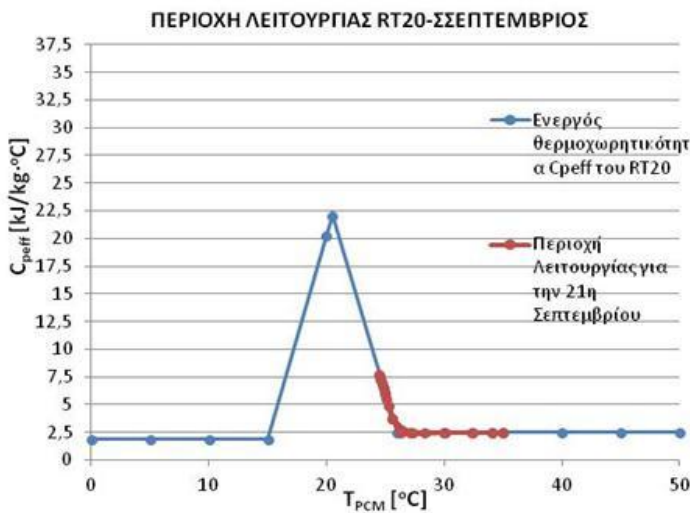
$$E_{RT20} = 8,099 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT20} = 6,1\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 44,911 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 26,7\%$$



**Σχήμα 8.9:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Σεπτεμβρίου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT20} = 7,878 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

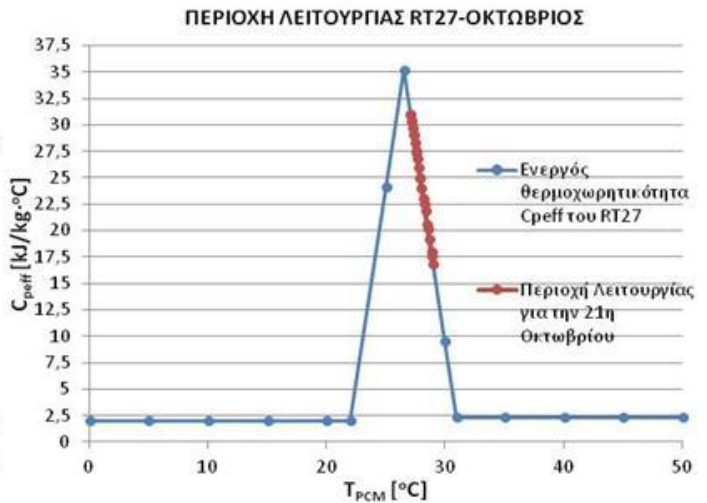
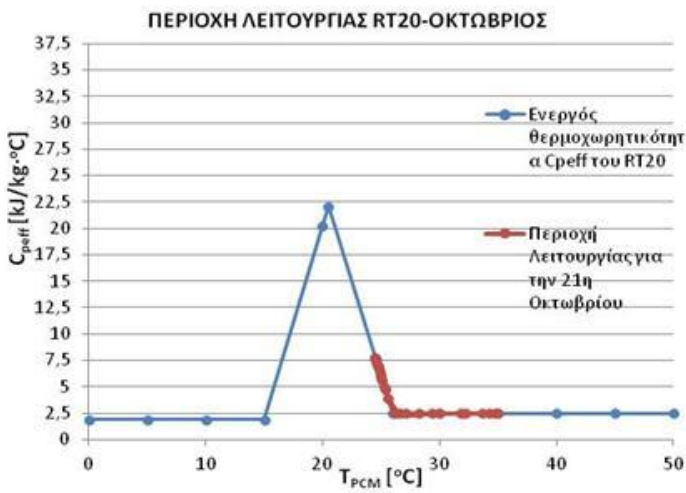
$$\eta_{RT20} = 5,9\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 47,151 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 28,1\%$$





**Σχήμα 8.10:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Οκτωβρίου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

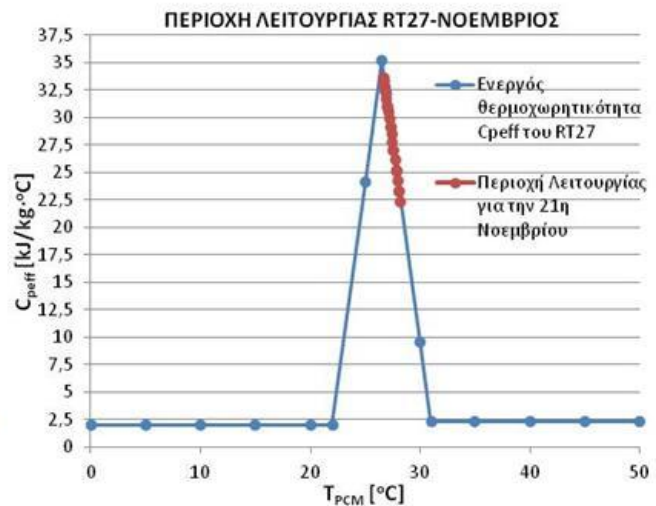
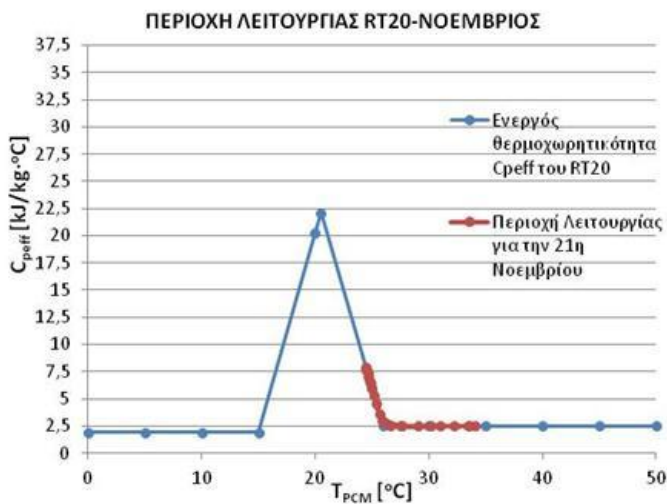
$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT20} = 7,94 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 46,624 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT20} = 5,9\%$$

$$\eta_{RT27} = 27,7\%$$



**Σχήμα 8.11:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Νοεμβρίου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

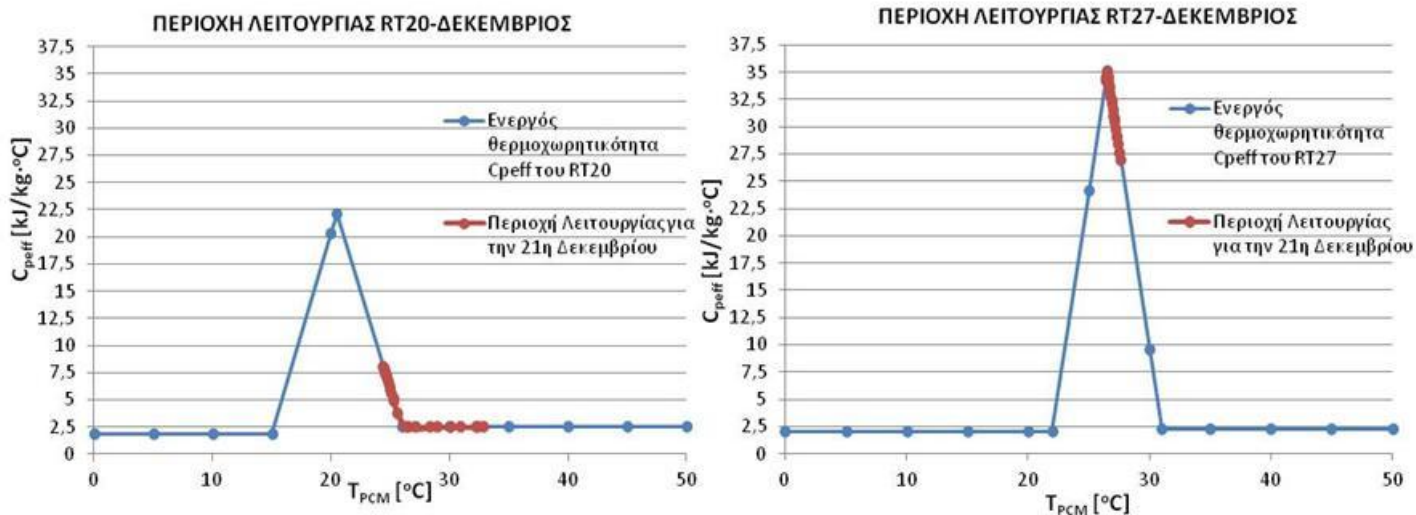
$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT20} = 8,108 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 43,398 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT20} = 6,1\%$$

$$\eta_{RT27} = 25,8\%$$



*Σχήμα 8.12: Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Δεκεμβρίου*

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT20} = 8,5 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT20} = 6,3\%$$

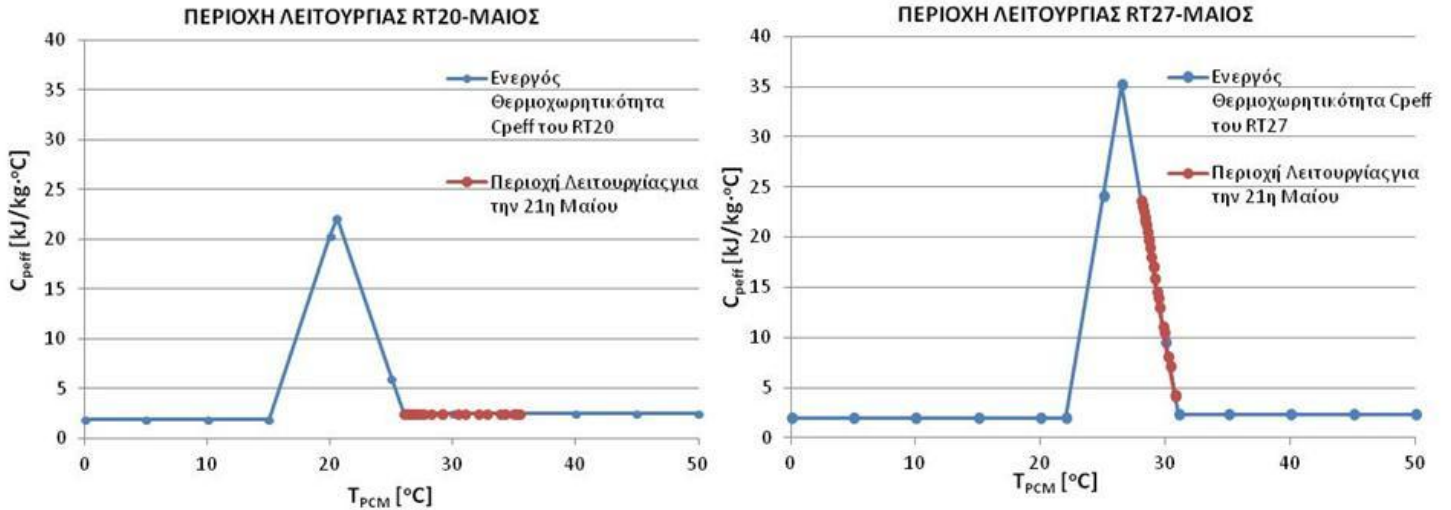
$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 38,406 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 22,8\%$$

- Περίπτωση εσωτερικής θερμοκρασίας δωματίου : 22°C, το Χειμώνα / 26°C, το Καλοκαίρι

Στην περίπτωση αυτή, παρατίθενται μόνο τα διαγράμματα που αφορούν στους καλοκαιρινούς μήνες, καθώς τα διαγράμματα των χειμερινών μηνών, για τους 22°C, υπάρχουν ήδη στην υποενότητα 7.2.5, και για τα δύο υλικά αλλαγής φάσης.



**Σχήμα 8.13:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{preff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{preff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21<sup>η</sup> Μαΐου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

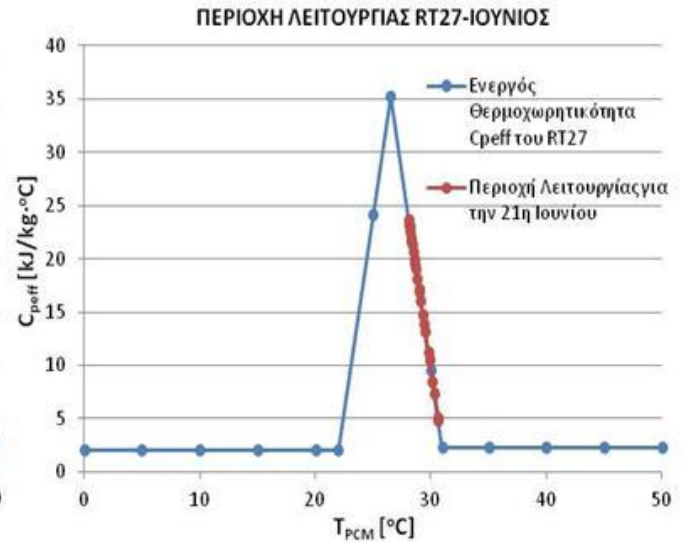
$$E_{RT20} = 0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\eta_{RT20} = 0\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$E_{RT27} = 37,474 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\eta_{RT27} = 22,3\%$$



**Σχήμα 8.14:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Ιουνίου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

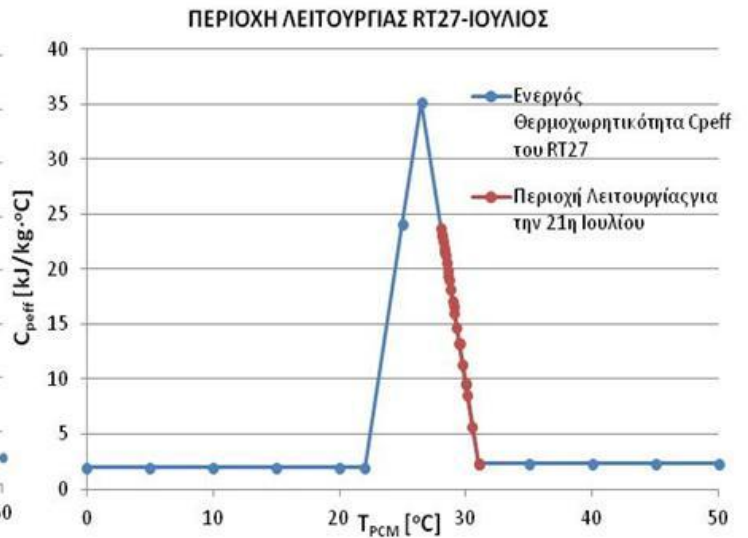
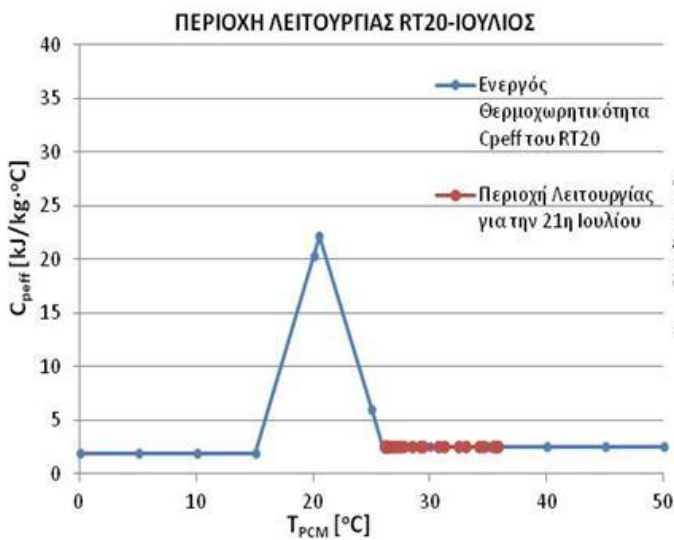
$$E_{RT20} = 0 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT20} = 0\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 37,136 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 22,1\%$$



**Σχήμα 8.15:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Ιουλίου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT20} = 0 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

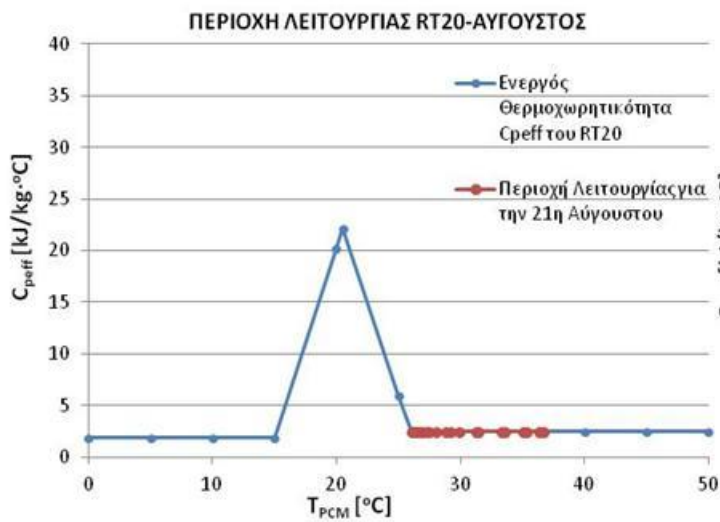
$$\eta_{RT20} = 0\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 38,501 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 22,9\%$$





Σχήμα 8.16: Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Αυγούστου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

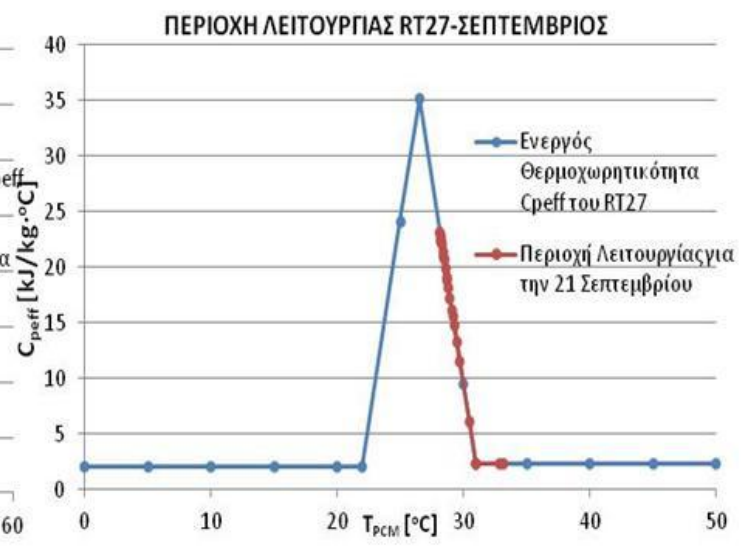
$$E_{RT20} = 0 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT20} = 0\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 38,767 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 23,1\%$$



Σχήμα 8.17: Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Σεπτεμβρίου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

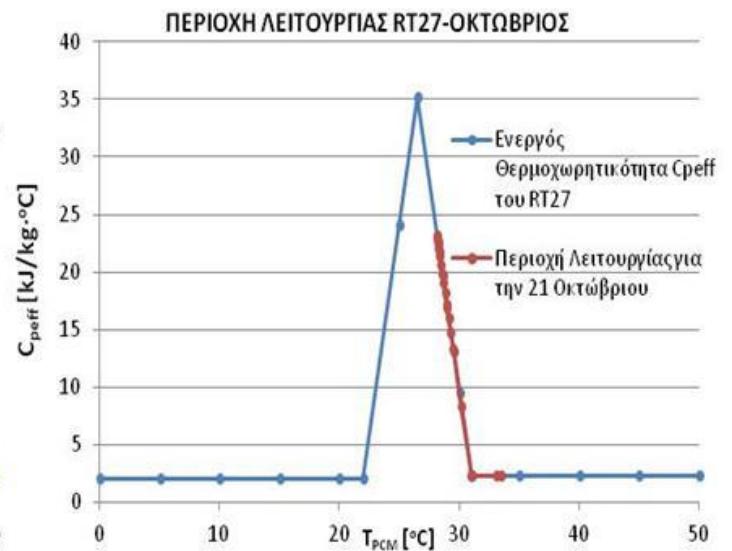
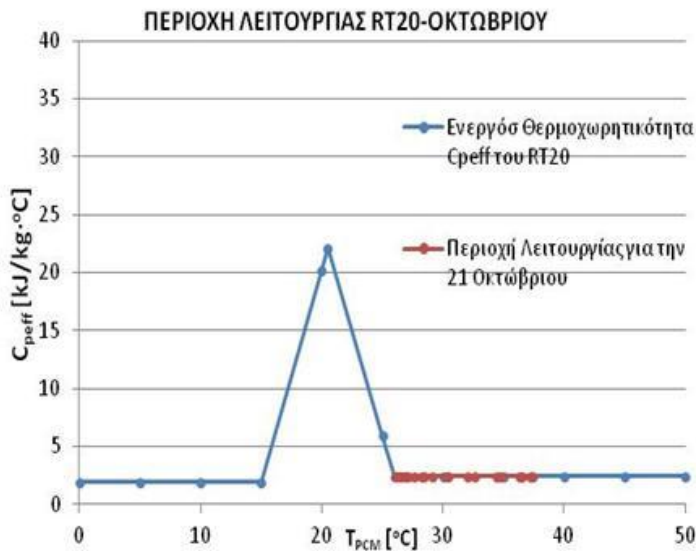
$$E_{RT20} = 0 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT20} = 0\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 35,923 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 21,4\%$$



Σχήμα 8.18: Ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT20, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT20, (δεξιά), και ενεργός θερμοχωρητικότητα  $C_{p,eff}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας του RT27, με ένδειξη της περιοχής λειτουργίας του RT27 (αριστερά) κατά την 21η Οκτωβρίου

$$E_{o,RT20} = 133,781 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT20} = 0 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT20} = 0\%$$

$$E_{o,RT27} = 168,09 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$E_{RT27} = 36,222 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\eta_{RT27} = 21,5\%$$

Τέλος, παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας με όλους τους βαθμούς αξιοποίησης των υλικών, για κάθε περίπτωση εσωτερικών θερμοκρασιακών συνθηκών.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ	PCM	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
		PCM	PCM	PCM	PCM	PCM	PCM	PCM	PCM	PCM	PCM	PCM	PCM
22°C	RT20	17,1	16,3	15,6	16,4	16,7	16,7	16,7	16	16	16	16,6	17,2
	RT27	23,1	23,6	24,9	25	24,1	24	24,3	27,6	28,9	28,8	26,7	23,5
	SP25	14,7	15,6	16,1	16,3	15,7	15,5	16,3	17,8	19	18,6	17,2	15
24°C	RT20	6,2	6,1	6,1	6,1	6,2	6,1	6,1	6,1	5,9	5,9	6,1	6,3
	RT27	22,6	12,9	24,4	24,5	23,9	23,3	24,6	26,7	28,1	27,7	25,8	22,8
22°C/26°C	RT20	17,1	16,3	15,6	16,4	0	0	0	0	0	0	16,6	17,2
	RT27	23,1	23,6	24,9	25	22,3	22,1	22,9	23,1	21,4	21,5	26,7	23,5

Πίνακας 8.1: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

### Σχολιασμός-Σύγκριση των βαθμών αξιοποίησης του RT20 και του RT27 για τις τρεις περιπτώσεις θερμοκρασιακών συνθηκών

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων θα πραγματοποιηθεί ξεχωριστά για την χειμερινή και την καλοκαιρινή περίοδο, καθώς κατά τη διάρκεια της πρώτης, τα υλικά αλλαγής φάσης εξετάζονται για δύο διαφορετικές περιπτώσεις θερμοκρασιακών συνθηκών (22°C, 24°C), ενώ κατά τη διάρκεια της τελευταίας, για τρεις (22°C, 24°C, 26°C).

Κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών (Νοέμβριος έως Απρίλιος), ο σχολιασμός προκύπτει από την παρατήρηση των διαγραμμάτων της υποενότητας 7.2.5 ( $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$ ) και της 1<sup>ης</sup> περίπτωσης του 8<sup>ου</sup> κεφαλαίου ( $T_{\Delta\Omega M}=24^{\circ}\text{C}$ ). Από τις δύο εξεταζόμενες θερμοκρασίες δωματίου, αυτή για την οποία φαίνεται να καλύπτεται μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης και των δύο υλικών και να εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές ενεργού θερμοχωρητικότητας, είναι η χαμηλότερη, δηλαδή  $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$ . Αυτό σημαίνει ότι σε αυτή τη θερμοκρασία δωματίου αξιοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό η ιδιότητα του PCM να αποθηκεύει θερμότητα, αλλάζοντας φάση. Όσον αφορά στο RT27, η επίδραση της αύξησης της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου στο βαθμό αξιοποίησής του, είναι μικρή, καθώς, στην χειρίστη περίπτωση  $T_{\Delta\Omega M}=24^{\circ}\text{C}$ , η περιοχή λειτουργίας του υλικού παραμένει εντός της «διφασικής περιοχής», αλλά σε χαμηλότερα επίπεδα ενεργού θερμοχωρητικότητας από ότι στην περίπτωση  $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$ . Στην περίπτωση του RT20, η μείωση του βαθμού αξιοποίησης είναι πολύ εντονότερη, καθώς η περιοχή λειτουργίας του μετατοπίζεται πιο δεξιά στο διάγραμμα της ενεργού θερμοχωρητικότητας, καλύπτοντας, πια, πολύ μικρή περιοχή της «διφασικής περιοχής» και μεγαλύτερο μέρος της «υγρής» από ότι στην περίπτωση  $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$ . Σε αυτή τη θερμοκρασία, λοιπόν, το RT20 έχει ελάχιστη θερμοαποθηκευτική ικανότητα και δεν αξιοποιούνται ικανοποιητικά οι δυνατότητές του ως υλικό αλλαγής φάσης.

Για την καλοκαιρινή περίοδο (Μάιος έως Οκτώβριος), πραγματοποιείται σύγκριση των διαγραμμάτων της υποενότητας 7.2.5 ( $T_{\Delta\Omega M}=22^{\circ}\text{C}$ ) και των δύο περιπτώσεων θερμοκρασιακών συνθηκών του 8<sup>ου</sup> κεφαλαίου ( $T_{\Delta\Omega M}=24^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\Delta\Omega M}=26^{\circ}\text{C}$ ). Όπως είναι αναμενόμενο, το συμπέρασμα που προκύπτει και για αυτήν την περίοδο είναι ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου προκαλεί μείωση του βαθμού αξιοποίησης των δύο υλικών. Αναφορικά με το RT27, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία στο δωμάτιο, η περιοχή λειτουργίας μετατοπίζεται δεξιότερα στο διάγραμμα και χαμηλότερα στο «τρίγωνο» της ενεργού θερμοχωρητικότητας, παραμένοντας, όμως, πάντα εντός της διφασικής περιοχής. Συνεπώς, η μεταβολή της θερμοκρασίας του δωματίου προκαλεί μικρή μείωση της θερμοχωρητικότητας του υλικού και συνακόλουθη μείωση της αποθηκευτικής του ικανότητας. Ο βαθμός αξιοποίησης του RT20, παρουσιάζει το ίδιο έντονη μείωση με το χειμώνα, με κορύφωση αυτής της πτώσης για  $T_{\Delta\Omega M}=26^{\circ}\text{C}$ , όπου είναι μηδενικός. Στην περίπτωση αυτή, το υλικό έχει μεταβεί πλήρως στην «υγρή περιοχή» του, στην οποία παύει να λειτουργεί και να αξιοποιείται ως PCM.

## **Βιβλιογραφία**

1. Pérez-Lombard, L., J. Ortiz, and C. Pout, A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 2008
2. Τεχνολογίες Εξοικονόμησης Ενέργειας, Τ.ε.κ.φ. πόρων, Υπουργείο Ανάπτυξης.
3. Σανταμούρης, Μ., Πράσινα κτήρια, μια ευκαιρία για ανάπτυξη. ΤΑΣΕΙΣ, 2011.
4. Παπαδόπουλος, Α.Μ., Θερμική άνεση στα κτίρια, νέα πρότυπα και βελτίωση θερμικής άνεσης στα κτίρια. 2006.
5. "<http://site.heatshieldsolution.com/main/3024/index.asp?pageid=64233&>" [Ηλεκτρονικό]
6. Νίκας, Κ.-Σ.Π., Αρχές της Μετάδοσης θερμότητας για Μηχανικούς, 2010, Αθήνα.
7. Κακάτσιος, Ξ., Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης. Εκδόσεις Συμμεών. 2006, Αθήνα.
8. "[https://el.wikipedia.org/wiki/θερμική\\_ακτινοβολία](https://el.wikipedia.org/wiki/θερμική_ακτινοβολία)
9. "<http://www.bine.info/en/publications/themeninfos/publikation/latentwaermespeicher-ingebaeuden/phasenuebergang-puffert-waerme/>" [Ηλεκτρονικό]
10. Parfait Tatsidjodoung, N.L.P., Lingai Luo, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.
11. Sharma, A., et al., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009.
12. Sharma, S.D., Latent heat storage materials and systems: a review. *International Journal of Green Energy*, 2005
13. Whiffen, T.R. and S.B. Riffat, A review of PCM technology for thermal energy storage in the built environment: Part I. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2012.
14. Vineet Veer Tyagi, D.B., PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007..
15. Cerón, I., J. Neila, and M. Khayet, Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use. *Energy and Buildings*, 2011.
16. "[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Phase-change\\_material&oldid=754371257](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Phase-change_material&oldid=754371257)" [Ηλεκτρονικό]
17. Baetens, R., B.P. Jelle, and A. Gustavsen, Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 2010.
18. "[http://www.econ3.gr/readmore.php?article\\_id=51771295788153](http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153)" [Ηλεκτρονικό]
19. "[https://www.tatasteelconstruction.com/en\\_GB/sustainability/sustainable-building-envelope-centre-sbec/sbec-technologies/phase-change-materials/Phase-change-material-%28PCM%29-for-thermal-buffering?languageSelected=en\\_GB](https://www.tatasteelconstruction.com/en_GB/sustainability/sustainable-building-envelope-centre-sbec/sbec-technologies/phase-change-materials/Phase-change-material-%28PCM%29-for-thermal-buffering?languageSelected=en_GB)" [Ηλεκτρονικό]



20. Farid, M.M., et al., A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 2004.
21. H. Mehling, L.F.C., Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. *Heat and Mass Transfer*. 2008.
22. "<http://www.pcmproducts.net/>" [Ηλεκτρονικό]
23. Τζιβανίδης, Χ., "Σημειώσεις μαθήματος: Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων' 2006: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
24. Mehling, H. and L.F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM. 2008
25. "<http://www.puretemp.com/stories/understanding-pcms>" [Ηλεκτρονικό]
26. Soares, N., et al., Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, 2013.
27. Zhang, Y., et al., Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, 2007.
28. Cabeza, L.F., et al., Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011.
29. Pasupathy, A. and R. Velraj, Phase change material based thermal storage for energy conservation in building architecture. *International Energy Journal*, 2006.
30. BASF, T.c.C. Phase Change Materials –latent heat storage for interior climate control. 2007.
31. Pendyala, S., Macroencapsulation of phase change materials for thermal energy storage. 2012.
32. Regin, A.F., S.C. Solanki, and J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008.
33. "<http://www.bine.info/en/publications/publikation/latentwaermespeicher-in-gebaeuden/phasenuebergang-puffert-waerme-forts/>" [Ηλεκτρονικό]
34. Chemicals On Demand with Phototriggerable Microcapsules. *Journal of the American Chemical Society*, 2009.
35. Rodriguez-Ubinas, E., et al., Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses. *Energy and Buildings*, 2012.
36. "[http://freespace.virgin.net/m.eckert/carl\\_vener's\\_dissertation.htm](http://freespace.virgin.net/m.eckert/carl_vener's_dissertation.htm)" [Ηλεκτρονικό]
37. Barber, D.A., The World Solar Energy Project, ca. 1954. *MIT Press Journals*, 2013.
38. Lane, G.A., *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*. Vol. I. Florida, USA, 1983: RC Press Inc.
39. Pasupathy, A., R. Velraj, and R.V. Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008.

40. Chaichan, M.T. and K.I. Abaas, Performance amelioration of a Trombe wall by using Phase Change Material (PCM). *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 2015.
41. Kosny, J., *PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures*. 2015
42. M.Stamatiadou, K.A., M. Founti, Energy savings using floor tiles with phase change materials in a s. European country, n.t.u.o. Athens, 2009.
43. Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. , Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 2012.
44. Akeiber, H., et al., A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016.
45. Castell, A., et al., Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings*, 2010.
46. Alawadhi, E.M., Thermal analysis of a building brick containing phase change material. *Energy and Buildings*, 2008.
47. de Gracia, A. and L.F. Cabeza, Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, 2015.
48. Solé, A., et al., Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.
49. Barreneche, C., et al., Study on differential scanning calorimetry analysis with two operation modes and organic and inorganic phase change material (PCM). *Thermochimica Acta*, 2013.
50. Günther, E., S. Hiebler, and H. Mehling. Determination of the heat storage capacity of PCM and PCM-objects as a function of temperature. in *Proceedings of the Tenth International Conference of Thermal Energy Storage*, Ecstock. 2006.
51. Ghandi, K., A Review of Ionic Liquids, Their Limits and Applications. *Green and Sustainable Chemistry*, 2014. **4**.
52. "[https://en.wikipedia.org/wiki/Differential\\_thermal\\_analysis](https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_thermal_analysis)" [Ηλεκτρονικό]
53. Luke Haun, M.E., Thermal characterization of phase change material using the t-history method. *PURE TEMP*, 2014.
54. Stanković, S.B. and P.A. Kyriacou, Improved measurement technique for the characterization of organic and inorganic phase change materials using the T-history method. *Applied Energy*, 2013.
55. Dutil, Y., et al., A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011.

56. Yang, H. and Y. He, Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010.
57. Heim, D. Two solution methods of heat transfer with phase change within whole building dynamic simulation. in 9th International IBPSA Conference, Montréal, Canada. 2005.
58. Lamberg, P., R. Lehtiniemi, and A.-M. Henell, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 2004.