



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΙΧΩΝ ΜΕ  
ΣΤΡΩΜΑ PCM ΜΕΣΩ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ  
ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΩΝ ΚΑΘΩΣ  
ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΑΥΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΣ

ΣΥΓΓΡΑΦΗ:

ΔΕΡΒΕΝΤΗ ΣΩΤΗΡΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΚΙΜΩΝ Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2016



Στους γονείς μου,  
Κώστα και Αναστασία



# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες του ανθρώπου για παραγωγή ενέργειας, η εξάντληση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων και οι περιβαλλοντικές συνέπειες που αυτά επιφέρουν, καθιστούν αναγκαία τη χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Όσον αφορά τα κτίρια εξετάζεται ένας εναλλακτικός τρόπος θέρμανσης και ψύξης, που βασίζεται στην αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας με υλικά αλλαγής φάσης (PCMs). Τα PCMs έχουν την ικανότητα, αλλάζοντας φάση, να απορροφούν και να απελευθερώνουν θερμότητα σε μια σχεδόν σταθερή θερμοκρασία, η οποία ξεπερνά το ποσό θερμότητας που απελευθερώνουν τα συμβατικά δομικά υλικά.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τόσο τη θεωρητική μελέτη των PCMs, όσο και τη πειραματική. Στο πρώτο μέρος, παρουσιάζεται η θεωρητική μελέτη των υλικών αλλαγής φάσης, αφού πρώτα αναφέρεται το ενεργειακό ζήτημα. Στο δεύτερο μέρος, πραγματοποιείται υπολογιστική μελέτη της χρήσης PCMs στους τοίχους κτιρίων. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η ηλιακή φόρτιση τοίχων με στρώμα PCM μέσω υαλοπινάκων νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, καθώς και συνδυασμού αυτών συγχρόνως. Παράλληλα, ελέγχεται η επίδραση του πάχους του PCM και της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου στις θερμοκρασίες που αυτό αναπτύσσει. Τέλος, υπολογίζεται η θερμότητα λόγω συναγωγής με τον εσωτερικό αέρα του δωματίου, ώστε να προσδιοριστεί η θερμότητα που προσδίδει το PCM στο χώρο.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον κύριο Κίμωνα Αντωνόπουλο, καθηγητή του τομέα θερμότητας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του οποίου εκπονήθηκε η παρούσα εργασία, για την ανάθεση και εποπτεία της εργασίας, τις πληροφορίες και την καθοδήγηση που μου παρείχε και τον χρόνο που μου αφιέρωσε για την ολοκλήρωσή της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη υποστήριξή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## Μέρος 1<sup>ο</sup> – Θεωρητική Μελέτη

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> -ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Εισαγωγή .....</b>	<b>15</b>
1.1.1 Ενεργειακό Ζήτημα.....	16
1.1.2 Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας .....	17
1.1.3 Ενεργειακή Κατανάλωση Κτιρίων .....	20
<b>1.2 Ηλιακή Ενέργεια .....</b>	<b>23</b>
1.2.1 Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα .....	23
1.2.2 Παθητικά Ηλιακά Συστήματα.....	25
1.2.2.1 Συστήματα Άμεσου Κέρδους.....	26
1.2.2.2 Συστήματα Έμμεσου Κέρδους .....	28
1.2.2.3 Συστήματα Απομονωμένου Κέρδους .....	33
1.2.3 Φωτοβολταϊκά Συστήματα .....	35
<b>1.3 Μέθοδοι Αποθήκευσης Ενέργειας.....</b>	<b>36</b>
1.3.1 Μηχανική Αποθήκευση Ενέργειας .....	36
1.3.2 Ηλεκτρική Αποθήκευση Ενέργειας.....	38
1.3.3 Θερμική Αποθήκευση Ενέργειας.....	38
1.3.3.1 Αισθητή Θερμότητα Αποθήκευσης.....	39
1.3.3.2 Λανθάνουσα Θερμότητα Αποθήκευσης.....	40
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1<sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....</b>	<b>41</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> -ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ .....</b>	<b>43</b>
<b>2.1 Εισαγωγή .....</b>	<b>43</b>
<b>2.2 Διαδικασία Αλλαγής Φάσης.....</b>	<b>45</b>
2.2.1 Διαγράμματα Φάσεων .....	47
2.2.1.1 Αλλαγή Φάσης Μιας Καθαρής Ουσίας.....	47
2.2.1.2 Αλλαγή Φάσης Διμερούς Μίγματος .....	51
<b>2.3 Προσομοίωση αλλαγής φάσης .....</b>	<b>53</b>
2.3.1 Μέθοδος της ενθαλπίας.....	54
2.3.2 Μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας.....	55
<b>2.4 Ορισμός PCM .....</b>	<b>56</b>
2.4.1 Ταξινόμηση PCMs .....	57

2.4.1.1	Οργανικά PCMs .....	57
2.4.1.2	Ανόργανα PCMs.....	60
2.4.1.3	Εύτηκτα οργανικά και ανόργανα PCMs.....	62
2.4.2	Κριτήρια επιλογής PCMs .....	65
<b>2.5</b>	<b>Μέτρηση ιδιοτήτων PCM.....</b>	<b>67</b>
2.5.1	Μέθοδοι μέτρησης ειδικής θερμοχωρητικότητας.....	67
2.5.1.1	Μέθοδος DSC.....	67
2.5.1.2	Μέθοδος DTA .....	70
2.5.1.3	Μέθοδος T-history .....	71
2.5.2	Μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας.....	73
2.5.2.1	Steady state methods.....	73
2.5.2.2	Non-steady state method .....	75
2.5.3	Double cell.....	76
<b>2.6</b>	<b>Συνήθη προβλήματα και τρόποι αντιμετώπισής τους .....</b>	<b>78</b>
2.6.1	Διαχωρισμός φάσεων .....	78
2.6.2	Υπέρψυξη ή υπόψυξη .....	80
2.6.3	Ανεπαρκής μεταφορά θερμότητας .....	82
2.6.4	Επιβράδυνση της φλόγας.....	84
<b>2.7</b>	<b>Εμπορικά διαθέσιμα PCMs.....</b>	<b>85</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2<sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....</b>		<b>86</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>Ο</sup> -ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ PCM ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....</b>		<b>89</b>
<b>3.1</b>	<b>Άμεση ενσωμάτωση .....</b>	<b>89</b>
<b>3.2</b>	<b>Βύθιση .....</b>	<b>89</b>
<b>3.3</b>	<b>Ενθυλάκωση .....</b>	<b>90</b>
3.3.1	Μικροενθυλάκωση .....	91
3.3.2	Μακροενθυλάκωση .....	94
<b>3.4</b>	<b>PCM Σταθερού Σχήματος .....</b>	<b>99</b>
<b>3.5</b>	<b>Σταθερής Μορφής Σύνθετο PCM .....</b>	<b>102</b>
<b>3.6</b>	<b>Πολυστρωματική Σανίδα με PCM .....</b>	<b>105</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3<sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....</b>		<b>106</b>



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο -ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ  
(PCMs).....107**

<b>4.1</b>	<b>Ιστορική αναδρομή .....</b>	<b>107</b>
4.1.1	Πρώτες εφαρμογές .....	107
4.1.2	Πρόσφατες εφαρμογές.....	109
<b>4.2</b>	<b>Εφαρμογές PCM στα κτίρια .....</b>	<b>113</b>
4.2.1	Παθητικά Συστήματα Αποθήκευσης .....	115
4.2.1.1	Ηλιακός τοίχος.....	115
4.2.1.2	Τοίχος Trombe με PCM .....	116
4.2.1.3	Παραθυρόφυλλα με PCM .....	118
4.2.1.4	Ενδοδαπέδια Θέρμανση.....	119
4.2.1.5	Στέγες PCM .....	120
4.2.1.6	Γυψοσανίδες με PCM .....	123
4.2.1.7	Σκυρόδεμα ενισχυμένο με PCM.....	128
4.2.1.8	Μείγμα ξύλου - ελαφρού σκυροδέματος με ενσωματωμένα PCMs.....	130
4.2.1.9	Τούβλο με PCM.....	131
4.2.2	Ενεργητικά Συστήματα Αποθήκευσης .....	132
4.2.2.1	Ενεργειακά Παράθυρα .....	132
4.2.2.2	Ενδοδαπέδιο Ηλεκτρικό Σύστημα Θέρμανσης με PCMs .....	133
4.2.2.3	Οροφές PCM για Ενεργή Θέρμανση και Ψύξη.....	135
4.2.2.4	Free-Cooling.....	136
<b>4.3</b>	<b>Άλλες Εφαρμογές .....</b>	<b>138</b>
4.3.1	Ηλιακά Μαγειρικά Σκεύη με PCMs.....	138
4.3.2	Ηλιακό Θερμοκήπιο.....	141
4.3.3	Ηλιακά Συστήματα Θέρμανσης Νερού με PCM.....	144
4.3.4	Ηλιακά Συστήματα Θέρμανσης Αέρα με PCM.....	148
4.3.5	PCM σε συνδυασμένα συστήματα Θέρμανσης και Ψύξης .....	149
4.3.6	Φωτοβολταϊκά Συστήματα με PCM .....	150
4.3.7	Εφαρμογές PCM σε Ευαίσθητα Προϊόντα και Υλικά για Διατήρηση της Θερμοκρασίας.....	151
4.3.7.1	Εφαρμογές στην Ιατρική.....	151
4.3.7.2	Δοχεία για Τρόφιμα Ευαίσθητα στη Θερμοκρασία .....	152
4.3.7.3	Ενσωμάτωση PCM σε υφάσματα.....	153

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4<sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ..... 155**

## Μέρος 2<sup>ο</sup>-Υπολογιστική Μελέτη

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>-ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ .....159

#### 5.1 Υπολογισμός Προσπίπτουσας Ηλιακής Ακτινοβολίας.....159

5.1.1 Μέση στιγμιαία και διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου  $G_b$  και  $G_d$   
(σε  $W/m^2$ ) .....160

5.1.2 Υπολογισμός Ολικής Ακτινοβολίας Κεκλιμένων Επιπέδων  $G_T(W/m^2)$ .....161

5.1.3 Υπολογισμός μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου  
επιπέδου  $H_T(kJ/m^2)$ .....176

#### 5.2 Σύγκριση φόρτισης μονωμένου τοίχου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού (δοκιμαστική μελέτη).....181

5.2.1 Περιγραφή εξεταζόμενης κατάστασης .....181

5.2.2 Υπολογισμός της θερμοκρασίας PCM,  $T_{PCM}$  και σύγκριση μεταξύ νότιου,  
ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού .....183

5.2.3 Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος στρώματος PCM έναντι  
υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού.....191

#### 5.3 Σύγκριση φόρτισης μονωμένου τοίχου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.....195

5.3.1 Περιγραφή εξεταζόμενης μελέτης .....195

5.3.2 Υπολογισμός της θερμοκρασίας PCM,  $T_{PCM}$  και σύγκριση μεταξύ νότιου,  
ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού .....197

5.3.3 Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος PCM, για νότιο, ανατολικό και  
δυτικό προσανατολισμό.....209

5.3.4 Παραμετρική μελέτη ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου  
για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό.....219

5.3.5 Σύγκριση της προσδιδόμενης ενέργειας  $Q_{\text{συναγωγής}}$  στο δωμάτιο από  
στρώμα PCM νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού .....225

#### 5.4 Μελέτη για συναλλαγή με 2 δωμάτια με υαλοπίνακες νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.....231

5.4.1 Περιγραφή εξεταζόμενης μελέτης .....231

5.4.2 Υπολογισμός της θερμοκρασίας PCM,  $T_{PCM}$  και σύγκριση μεταξύ νότιου  
και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού .....233

5.4.3 Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος στρώματος PCM, για νότιο και  
συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού .....242

5.4.4 Παραμετρική μελέτη ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου  
για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού .....251

5.4.5 Σύγκριση της προσδιδόμενης ενέργειας  $Q_{\text{συναγωγής}}$  στο δωμάτιο από  
στρώμα PCM νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού .....259

5.4.6	Έλεγχος της απόδοσης με βάση την καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας.....	266
5.4.7	Βαθμοί χρησιμοποίησης του PCM βασισμένοι στην αλλαγή φάσης.....	270
5.5	Μελέτη για συναλλαγή με ένα δωμάτιο με υαλοπίνακες νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.....	272
5.5.1	Περιγραφή εξεταζόμενης μελέτης .....	272
5.5.2	Υπολογισμός της θερμοκρασίας PCM, $T_{PCM}$ και σύγκριση μεταξύ νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.....	274
5.5.2.1	Σύγκριση της προσδιδόμενης ενέργειας $Q_{συναγωγής}$ στο δωμάτιο από στρώμα PCM νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.....	282
5.5.2.2	Έλεγχος της απόδοσης με βάση την καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας.....	289
5.5.2.3	Βαθμοί χρησιμοποίησης του PCM με βάση την καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας.....	293
5.5.3	Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος PCM νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού .....	296
5.5.3.1	Στρώμα PCM πάχους 30mm .....	296
5.5.3.2	Στρώμα PCM πάχους 20mm .....	303
5.5.4	Παραμετρική μελέτη ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό.....	311
5.5.4.1	Εσωτερική θερμοκρασία δωματίου $T_{in}=22^{\circ}C$ .....	311
5.5.4.2	Εσωτερική θερμοκρασία δωματίου $T_{in}=18^{\circ}C$ .....	320
5.6	ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ .....	328
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5 <sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	332



## **Μέρος 1<sup>ο</sup> – Θεωρητική Μελέτη**



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> -ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Εισαγωγή [1]

Ο άνθρωπος συνδέθηκε με την έννοια ενέργεια από την πρώτη στιγμή της ύπαρξής του πάνω στη Γη. Αρχικά όπως και οι άλλοι ζωντανοί οργανισμοί μέσω της τροφής ο πρωτόγονος άνθρωπος συσώρευε στις κατάλληλες αποθήκες του σώματός του ενέργεια, την οποία χρησιμοποιούσε για να κινηθεί, να κυνηγήσει, να αντιμετωπίσει τους εχθρούς του.

Πολύ αργότερα άρχισε να χρησιμοποιεί την ενέργεια άλλων ζωντανών οργανισμών (μυϊκή δύναμη των ζώων) αυξάνοντας σημαντικά τις δυνατότητές του και ενισχύοντας τη θέση του στο όχι και τόσο φιλικό περιβάλλον στο οποίο έπρεπε να επιβιώσει.

Η εκμετάλλευση της ενέργειας που υπήρχε άφθονη και σε διάφορες μορφές στο φυσικό περιβάλλον (ενέργεια καυσίμων, αιολική, υδραυλική ενέργεια) ήταν το όχημα που μαζί με την ανάπτυξη των ιδιαίτερων ψυχοπνευματικών του ικανοτήτων του, του έδωσαν τη δυνατότητα να ακολουθήσει την μεγαλειώδη εξελικτική του πορεία φτάνοντας στο σημερινό τεχνολογικό θαύμα. Τα ίδια αυτά στοιχεία θα καθορίσουν την πορεία και την τεχνολογική εξέλιξή του και στο μέλλον, μόνο που οι πρώτες ανησυχίες τόσο για τις επιπτώσεις στον ίδιο και στο περιβάλλον, όσο και για την τελική κατάληξη αυτής της πορείας, πολλαπλασιάζονται και ενισχύονται με ανάλογους ρυθμούς, φτάνοντας σε σημείο το ενεργειακό πρόβλημα να εμφανίζεται οξύτερο από ποτέ.

### 1.1.1 Ενεργειακό Ζήτημα [1],[2]

Η προσπάθεια του ανθρώπου για τη συνεχή άνοδο του βιοτικού του επιπέδου σε συνδυασμό με τη ραγδαία αύξηση του πληθυσμού της γης και την αλόγιστη σπατάλη και κακή χρήση των ενεργειακών αποθεμάτων του πλανήτη μας, απειλούν να οδηγήσουν σύντομα την ανθρωπότητα σ' ένα μακρύ ενεργειακό χειμώνα.

Το ενεργειακό πρόβλημα συνειδητοποιήθηκε όταν εμφανίστηκε η ενεργειακή κρίση το 1973.

Στα πλαίσια αυτά η παγκόσμια κοινότητα τα τελευταία είκοσι χρόνια συνειδητοποιώντας τον κίνδυνο του επερχομένου ενεργειακού χειμώνα, ξεκίνησε ορισμένες φιλότιμες προσπάθειες περιορισμού της κατανάλωσης και ορθολογικότερης χρήσης των ενεργειακών αποθεμάτων. Ωστόσο οι βασικότερες αιτίες συνεχούς αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας παραμένουν και συνοψίζονται ως εξής:

- Συνεχής αύξηση της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας,
- Ανομοιομορφία στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας,
- Αύξηση του πληθυσμού της γής,
- Απώλειες συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας,
- Μη ορθολογική χρήση ενέργειας,
- Αδιαφορία και σπατάλη ενέργειας.

Επίσης πρέπει να αναφερθεί, ότι τα τελευταία χρόνια η μέση ετήσια παγκόσμια αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ του 4% και 5 %, το οποίο μεταφράζεται σε διπλασιασμό της κατανάλωσης ενέργειας κάθε δέκα ή δώδεκα χρόνια. Το γεγονός αυτό από μόνο του είναι αρκετά ανησυχητικό, ιδίως εάν συνδυασθεί με την αναμενόμενη εξάντληση των βεβαιωμένων αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων.

Τα καύσιμα αυτά αποκαλούμενα και μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν όλες τις μορφές των γαιανθράκων, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο καθώς και τα σχάσιμα πυρηνικά υλικά., τα οποία με τους σημερινούς ρυθμούς εκμετάλλευσής τους σύντομα θα εξαντληθούν. Για παράδειγμα η κατανάλωση πετρελαίου αυξάνεται εκθετικά από το 1880. Επιπλέον, τα κυριότερα αποθέματα συμβατικών καυσίμων εντοπίζονται σε ορισμένες περιοχές του πλανήτη, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται έντονες πολιτικοστρατιωτικές αντιπαραθέσεις, στην προσπάθεια εκμετάλλευσής τους.



### 1.1.2 Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας [3],[5],[6],[7]

Η παγκόσμια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας προβλέπεται να επεκταθεί κατά 60% περίπου από το 2002 έως το 2030, με μια κατά μέσο όρο ετήσια αύξηση κατά 1,7%. Η ζήτηση θα φθάσει τους 16,5 δισεκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (ΤΙΠ), έναντι 10,3 δισεκατομμυρίων ΤΙΠ το 2002. Από την άλλη πλευρά τα ορυκτά καύσιμα θα εξακολουθήσουν να κυριαρχούν στην παγκόσμια χρήση ενέργειας και θα αντιπροσωπεύουν περίπου το 85% της αύξησης της παγκόσμιας πρωτογενούς ζήτησης κατά τη διάρκεια 2002-2030. Και το μερίδιό τους στη συνολική ζήτηση θα αυξηθεί ελαφρώς, από 80% το 2002 σε 82% το 2030. Το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα παραμείνει στο ίδιο επίπεδο, γύρω στο 4%, ενώ εκείνο της πυρηνικής ενέργειας θα μειωθεί από 7% σε 5%. Το πετρέλαιο θα παραμείνει το μοναδικό μεγαλύτερο καύσιμο στο παγκόσμιο πρωτογενές ενεργειακό μείγμα, μολονότι το μερίδιό του θα υποχωρήσει οριακά, από 36% το 2002 σε 35% το 2030. Η ζήτηση για πετρέλαιο αναμένεται να αυξάνεται κατά 1,6% ανά έτος, από 77ΜΒD (million barrels per day) το 2002 σε 121ΜΒD σε 2030.



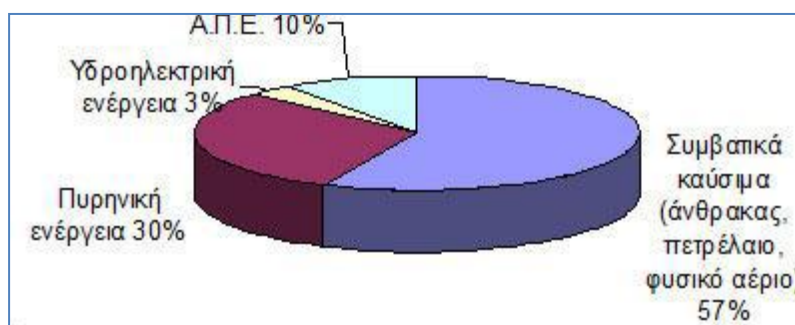
Σχήμα 1.1.2.1 : Παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο 2005[6]

Η απαίτηση για παγκόσμια οικονομική σταθερότητα και ανάπτυξη έχει οδηγήσει στην αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας με ταχύτερους ρυθμούς και έχει καταστήσει τη χρήση της ενέργειας ανάμεσα σε πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες που παράγουν αέρια θερμοκηπίου (GHGs) τη μεγαλύτερη πηγή εκπομπών.

Η ενέργεια αντιπροσωπεύει πάνω από το 80% των παγκόσμιων ανθρωπογενών αερίων του θερμοκηπίου, με τις εκπομπές να προκύπτουν από την παραγωγή, μετατροπή, χειρισμό, και κατανάλωση όλων των

ειδών των ενεργειακών προϊόντων. Ο τομέας της ενέργειας σε μεγάλο βαθμό κυριαρχείται από την άμεση καύση καυσίμων, μια διαδικασία που οδηγεί σε μεγάλες εκπομπές CO<sub>2</sub>. Ένα παραπροϊόν της καύσης των καυσίμων, το CO<sub>2</sub>, προέρχεται από την οξείδωση του άνθρακα στα καύσιμα. Κάρβουνο και πετρέλαιο είναι καύσιμα με βάση τον άνθρακα που συμβάλλουν καθοριστικά στους 7,2 δισεκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώθηκαν στην ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα των βιομηχανικών δραστηριοτήτων σε παγκόσμια κλίμακα κατά το 2004. Υπεύθυνο για το 95% των εκπομπών που σχετίζονται με την ενέργεια, το CO<sub>2</sub> από την ενέργεια αντιπροσωπεύει, επομένως, περίπου το 80% των παγκόσμιων εκπομπών ανθρωπογενών αερίων του θερμοκηπίου. Το ποσοστό αυτό ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανά χώρα, σύμφωνα με τις διαφορετικές εθνικές δομές ενέργειας και με το ισοζύγιο ενέργειας κάθε μιας.

Για παράδειγμα το μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών αναγκών των 27 χωρών μελών της Ε.Ε. καλύπτεται από συμβατικές μορφές ενέργειας, που έχουν ως αποτέλεσμα την έκλυση διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) στην ατμόσφαιρα και την παραγωγή αερίων ρύπων, που εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο του 2005, ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο καλύπτουν περίπου το 57% της πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης. Το υπόλοιπο ποσοστό καλύπτεται από την πυρηνική ενέργεια σε ποσοστό 30%, την υδροηλεκτρική σε ποσοστό 3% και τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας σε ποσοστό 10%.



Σχήμα 1.1.2.2: Ενεργειακό ισοζύγιο στην Ε.Ε (2005) [6]

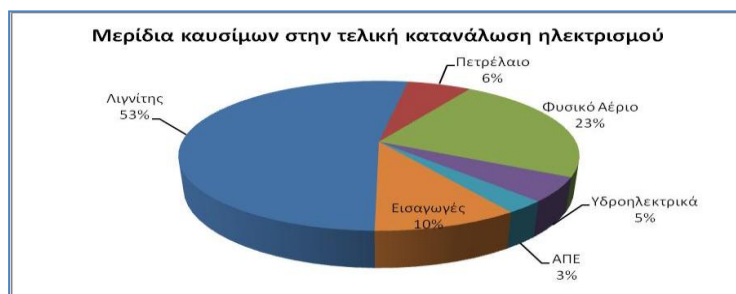
Η ενεργειακή κατανάλωση συνδέεται με την οικονομική ανάπτυξη καθώς έχει αποδειχθεί ότι οι οικονομικά ισχυρές χώρες - μέλη της Ε.Ε. (Γερμανία,

Γαλλία, Ηνωμένο Βασίλειο κ.λπ.) έχουν υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Στη χώρα μας η μόνη αξιοσημείωτη εγχώρια πηγή ορυκτών καυσίμων είναι ο λιγνίτης. Η Ελλάδα εξακολουθεί να κινείται στην πεπατημένη της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα στην παραγωγή ηλεκτρισμού, τον πιο ρυπογόνο τομέα της οικονομίας μας. Αυτό προκύπτει από τα συγκεντρωτικά στοιχεία για το 2008 του διασυνδεδεμένου ηπειρωτικού Συστήματος Ηλεκτρισμού που δημοσιοποίησε την 19-1-2009 ο Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ).

Η τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο ηπειρωτικό σύστημα αυξήθηκε το 2008 κατά 0,6%. Αξιοσημείωτο είναι πως η μικρή αυτή αύξηση προέρχεται αποκλειστικά από την κατανάλωση Μέσης και Χαμηλής Τάσης η οποία αυξήθηκε κατά 1,2% ενώ εκείνη των μεγάλων ενεργοβόρων βιομηχανικών μονάδων (καταναλωτές υψηλής τάσης) μειώθηκε κατά 3,2%.

Ταυτόχρονα, η παραγωγή ηλεκτρισμού στο ηπειρωτικό σύστημα συνέχισε να εξαρτάται σε συντριπτικό βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα και από τις εισαγωγές από τις γειτονικές χώρες. Χαρακτηριστικό είναι πως η παραγωγή των λιγνιτικών σταθμών το 2008 αποτέλεσε το 58,3% της εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής καλύπτοντας το 52,5% της κατανάλωσης. Την ίδια στιγμή, δεκάδες αιτήσεις για κατασκευή νέων μονάδων με ορυκτά καύσιμα ισχύος χιλιάδων Μεγαβάτ κατατίθενται στο Υπουργείο Ανάπτυξης. Εντυπωσιακή, τέλος, είναι και η εξάρτησή μας από τις εισαγωγές ηλεκτρισμού οι οποίες καλύπτουν πλέον το 9,9% της κατανάλωσης στο ηπειρωτικό σύστημα, έχοντας αυξηθεί κατά 28,6% σε σχέση με το 2007.



Σχήμα 1.1.2.3: Παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ελλάδα(2008)[7]

### 1.1.3 Ενεργειακή Κατανάλωση Κτιρίων [4],[8],[9]

Ο τομέας των κτιρίων αποτελεί ίσως τον σημαντικότερο οικονομικό χώρο της Ευρώπης, παρουσιάζοντας ετήσιο κύκλο εργασιών που ξεπερνά τα 400 δις Ευρώ. Ταυτόχρονα, σε ημερήσια βάση, η παγκόσμια πρωτογενής ενεργειακή κατανάλωση που σχετίζεται με τα κτίρια ξεπερνάει τα 17 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου, ποσότητα περίπου ίση με την συνολική παραγωγή των χωρών του ΟΠΕΚ.

Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ο τομέας των κτιρίων απορροφά, κατά μέση τιμή, το 40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Η ανά χώρα κύμανση ποικίλει από 20% για την Πορτογαλία, έως και 45% για την Ιρλανδία, ενώ στην Ελλάδα κυμαίνεται περίπου στο 30%.

Δεδομένου ότι ο κάτοικος των αστικών κυρίως κέντρων βιώνει το 80% της ζωής του στο εσωτερικό των κτιρίων, είναι προφανής η επίδραση της ποιότητας του εσωτερικού κλίματος τόσο στην υγεία και την άνεση όσο και την παραγωγικότητά του. Η κατά τα τελευταία χρόνια δραματική υποβάθμιση του ατμοσφαιρικού προβλήματος καθώς και χρήση υλικών και συσκευών μη φιλικών προς το περιβάλλον έχουν συντελέσει στην εμφάνιση σημαντικών, ποιοτικά και ποσοτικά, περιβαλλοντικών και ενεργειακών προβλημάτων στα κτίρια.

Ειδικότερα, η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στα μεγάλα αστικά κέντρα έχει συντελέσει στην δραματική αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για τον δροσισμό των κτιρίων κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η απαιτούμενη ενέργεια για τον δροσισμό ενός κτιρίου στο κέντρο της Αθήνας είναι σχεδόν διπλάσια από την απαιτούμενη στην περιφέρεια της πόλης.

Παράλληλα η αύξηση των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και οι υψηλές εκπομπές μέρους των σύγχρονων δομικών υλικών συντελούν στην αύξηση της συγκέντρωσης ρυπαντών στο εσωτερικό των κτιρίων, με ιδιαίτερα σημαντικές συνέπειες τόσο στην υγεία όσο και την παραγωγικότητα των ενοίκων.

Τα παραπάνω καθορίζουν το πλαίσιο εξέτασης και ανάλυσης του όλου ενεργειακού και περιβαλλοντικού προβλήματος των κτιρίων. Η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων δεν θα πρέπει να αποσυνδέεται από τα προβλήματα περιβάλλοντος και θα πρέπει να μελετάται σαν μια ενότητα μαζί με το συγκεκριμένο εξωτερικό μικροκλίμα στον χώρο του κτιρίου, καθώς και το διαμορφούμενο εσωτερικό περιβάλλον.

Τα κτίρια καταναλώνουν ενέργεια για την επίτευξη θερμικής και οπτικής άνεσης εντός των χώρων, καθώς και για την χρήση ειδικών συσκευών.

Η τελική ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι της τάξης των 350 Mtoe ανά έτος, χωρίς να υπολογίζεται η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το μεγαλύτερο μέρος της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων καλύπτεται από το φυσικό αέριο, 116 Mtoe, το πετρέλαιο 99 Mtoe, τον ηλεκτρισμό 91 Mtoe, και τα στερεά καύσιμα με 11 Mtoe.

Οι πραγματικές ενεργειακές ανάγκες των κτιρίων στην Ευρώπη καλύπτονται σε μεγάλο ποσοστό και την έμμεση χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας και των άλλων ατμοσφαιρικών πηγών. Στην περίπτωση αυτή το σύνολο της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων υπολογίζεται σε 740 Mtoe πρωτογενούς ενέργειας. Η κατανομή των διαφόρων πλέον καυσίμων είναι 43% διάφορα καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, 20% από άμεση χρήση πετρελαίου, 18% από άμεση χρήση φυσικού αερίου, 6% από άλλα στερεά καύσιμα και κατά 15% από ηλιακή ενέργεια.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι αντιστοιχεί περίπου ένας τόννος ισοδύναμου πετρελαίου ανά έτος και ανά κάτοικο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κτιρίων στην Ευρώπη. Η διαχρονική μεταβολή κατά τα τελευταία χρόνια είναι ελαφρά αυξητική και η ετήσια αύξηση του ρυθμού κατανάλωσης στα κτίρια είναι ίση με 0.7%.

Η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων στην Ελλάδα, είναι της τάξης των 4.6 Mtoe, και αντιστοιχούν 0.55 Mtoe ενέργειας ανά κάτοικο το έτος, δηλαδή περίπου το μισό της αντίστοιχης κατανάλωσης στην υπόλοιπη Ευρώπη. Η διαχρονική μεταβολή της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων στην Ελλάδα είναι καθαρά αυξητική και ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων είναι περίπου 1,8%.

Τα κτίρια αποτελούν ένα μεγάλο ενεργειακό καταναλωτή που, ταυτοχρόνως, διαθέτει υψηλό δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας. Με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών και οικονομικά αποτελεσματικών τεχνολογιών είναι δυνατή η επίτευξη σημαντικής βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων με αντίστοιχα περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη.

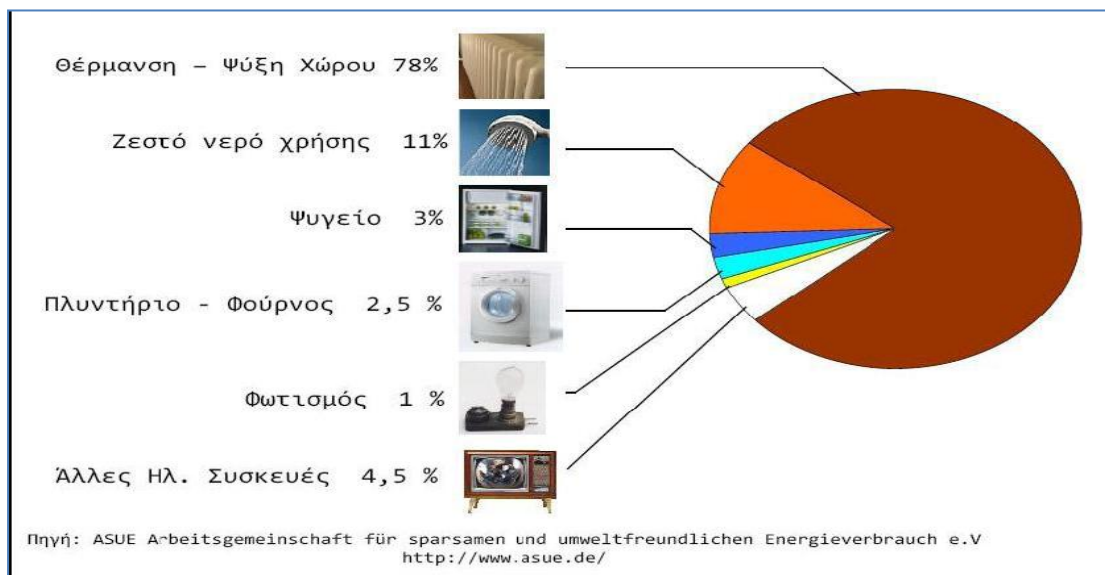
Ιδιαίτερη σημασία για την ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτιρίου έχει η χρήση τεχνικών βιοκλιματικού σχεδιασμού. Με τον όρο αυτό περιγράφεται ο σχεδιασμός, ο οποίος, λαμβάνοντας υπόψη το τοπικό

κλίμα, επιδιώκει την επίτευξη των βέλτιστων συνθηκών εσωτερικής άνεσης, με την αξιοποίηση των διαθέσιμων φυσικών πηγών και την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Βασικές τεχνικές του βιοκλιματικού σχεδιασμού αποτελούν:

- η θερμική προστασία του κτιριακού κελύφους
- τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης και δροσισμού (συστημάτων ηλιοπροστασίας και φυσικού και υβριδικού αερισμού αναλόγως των συνθηκών και της εποχής) και
- τα συστήματα φυσικού φωτισμού

Το όλο σκεπτικό της εξοικονόμησης ενέργειας βασίζεται στη προσπάθεια για εξεύρεση τρόπων ορθολογικής χρήσης της ενέργειας προκειμένου να οδηγηθούμε σε μείωση της ζήτησης ενέργειας χωρίς να επηρεασθούν αρνητικά οι παραγωγικές διαδικασίες αλλά και η άνετη διαβίωσή μας.

Η πιο πάνω προσέγγιση είναι απόλυτα συμφέρουσα, διότι αντί να παράγουμε συνεχώς περισσότερη ενέργεια, προσπαθώντας να καλύψουμε την αυξανόμενη ζήτηση, θα μειώσουμε τη ζήτηση εφαρμόζοντας συστήματα και διαδικασίες εξοικονόμησης ενέργειας. Επιπλέον η θετική επίδραση στο περιβάλλον θα είναι τεράστια, αφού οι αέριοι ρύποι θα μειωθούν αναλογικά με την εξοικονόμηση ενέργειας.



Σχήμα 1.1.3.1: Κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας ενός κτιρίου στην Ελλάδα

## 1.2 Ηλιακή Ενέργεια [10]

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας.

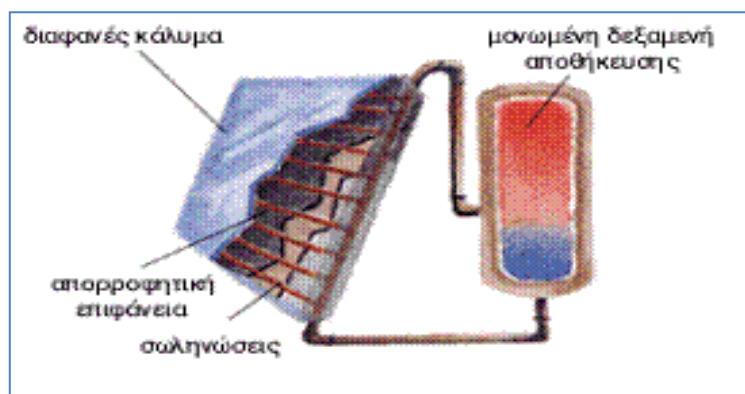
Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα ή Ηλιοθερμικά συστήματα, και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

### 1.2.1 Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα [11]

Ενεργητικά ηλιακά συστήματα είναι όσα συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία, και στη συνέχεια τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε νερό, σε αέρα ή σε κάποιο άλλο ρευστό. Η τεχνολογία που εφαρμόζεται είναι αρκετά απλή και υπάρχουν πολλές δυνατότητες εφαρμογής της σε θερμικές χρήσεις χαμηλών θερμοκρασιών. Η πλέον διαδεδομένη εφαρμογή των συστημάτων αυτών είναι η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, οι γνωστοί σε όλους ηλιακοί θερμοσίφωνες.

Η επιφάνεια ηλιακών συστημάτων που βρίσκονται σε λειτουργία στη χώρα μας είναι περίπου 2.800.000 m<sup>2</sup> (στοιχεία 2001). Ήδη, περισσότερες από 1.000.000 ελληνικές οικογένειες καλύπτουν περίπου 80% των ετησίων αναγκών τους σε ζεστό νερό χρήσης με ηλιακό θερμοσίφωνα. Η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών και η ποιότητα τους γενικά έχουν βελτιωθεί τα τελευταία χρόνια. Η Ελλάδα είναι ο μεγαλύτερος εξαγωγέας σε όλη την Ευρώπη και μάλιστα σε χώρες με ιδιαίτερη βιομηχανική παράδοση, όπως η Γερμανία.

Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής ζεστού νερού αποτελείται από επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, ένα δοχείο αποθήκευσης της θερμότητας και σωληνώσεις. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από το συλλέκτη και η συλλεγόμενη θερμότητα μεταφέρεται στο δοχείο αποθήκευσης. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως στην οροφή του κτιρίου, με νότιο προσανατολισμό και κλίση 30°-60° ως προς τον ορίζοντα, ώστε να μεγιστοποιηθεί το ποσό της ακτινοβολίας που συλλέγεται ετησίως.



Σχήμα 1.2.1.1 Ενεργητικό σύστημα [11]

Πέρα από την οικιακή χρήση, η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη σήμερα, ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε απαιτείται θερμότητα χαμηλής θερμοκρασιακής στάθμης. Έτσι, η χρήση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ψύξης, για τον κλιματισμό χώρων και άλλες εφαρμογές, εμφανίζεται ως μία από τις πολλά υποσχόμενες προοπτικές, λόγω της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας ακριβώς την εποχή που απαιτούνται τα ψυκτικά φορτία. Υπάρχουν ήδη μερικές επιτυχημένες εφαρμογές τέτοιων συστημάτων στη χώρα μας και αναμένεται να έχουν ταχεία ανάπτυξη.

Μια άλλη εφαρμογή που έχει εξαπλωθεί στην Ευρωπαϊκή αγορά είναι ο συνδυασμός παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης χώρων με ενεργητικά ηλιακά συστήματα. Η χρήση των συστημάτων αυτών στις ελληνικές κλιματικές συνθήκες για τη θέρμανση χώρων, θεωρείται τεχνικά αλλά και οικονομικά αποδοτική, αν συνδυαστεί με την κατάλληλη μελέτη/κατασκευή του κτιρίου (καλή μόνωση, εκμετάλλευση των παθητικών ηλιακών ωφελειών, κ.λπ.) και τη συνεργασία του χρήστη. Μπορεί να εξοικονομήσει συμβατική ενέργεια σε νέα ή παλιά κτίρια, στα οποία έχουν ληφθεί όλα τα εφικτά μέτρα για την ελαχιστοποίηση των απωλειών και τη μεγιστοποίηση της οικονομικότητας της εγκατάστασης. Είναι πάντως, πολύ σημαντικός ο σωστός σχεδιασμός του ηλιακού



συστήματος και η προσεκτική εξέταση της οικονομικότητας της εγκατάστασης για την αποφυγή λανθασμένων επιλογών και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης.

## 1.2.2 Παθητικά Ηλιακά Συστήματα [12],[13]

Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης ονομάζουμε τα δομικά στοιχεία του κτιρίου, που, αξιοποιώντας τις αρχές της φυσικής (τους νόμους μεταφοράς θερμότητας) συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν υπό μορφή θερμότητας και τη διανέμουν στο χώρο.

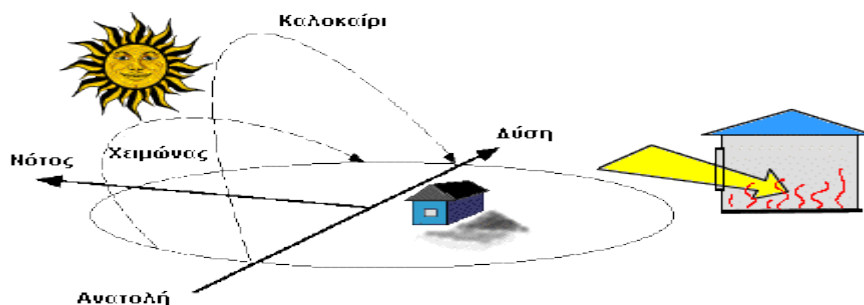
Αναγκαία προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία των παθητικών ηλιακών συστημάτων ώστε να αξιοποιήσουν όσο το δυνατό περισσότερη ηλιακή ενέργεια είναι ένας κατάλληλος σχεδιασμός του κτιρίου. Αυτό σημαίνει ότι το κέλυφος πρέπει να επιτρέπει: την μέγιστη ηλιακή συλλογή, την μέγιστη θερμοχωρητικότητα και τις ελάχιστες θερμικές απώλειες.

Η λειτουργία των παθητικών συστημάτων βασίζεται σε 3 μηχανισμούς:

- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου (συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και διατήρησή της στο εσωτερικού του κτιρίου για θέρμανση των χώρων)
- Τη θερμική υστέρηση των υλικών (θερμοχωρητικότητα)
- Τις αρχές μετάδοσης θερμότητας (την ιδιότητα της θερμότητας να μεταφέρεται από το θερμό στο κρύο αντικείμενο)

Είδη παθητικών ηλιακών συστημάτων για θέρμανση:

- Άμεσου κέρδους
- Έμμεσου κέρδους
- Απομονωμένου κέρδους



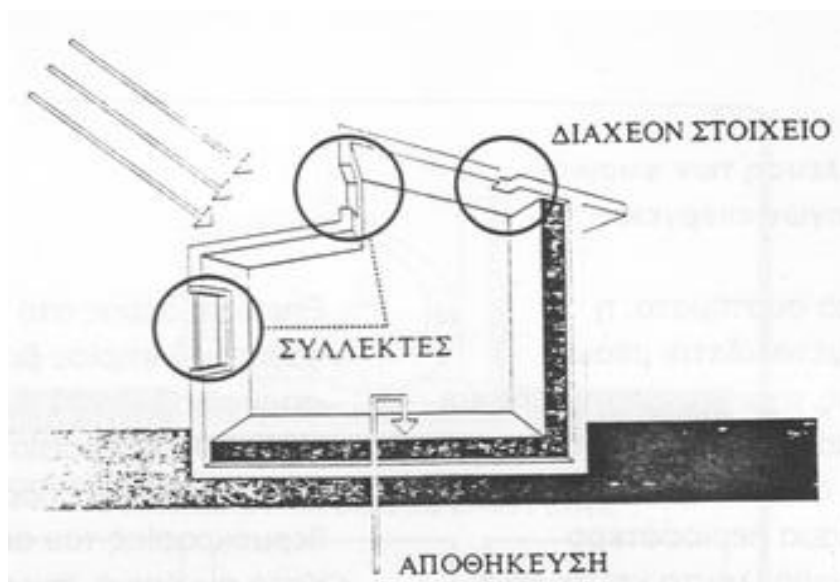
Σχήμα 1.2.2.1: Παθητικά ηλιακά συστήματα[14]

### 1.2.2.1 Συστήματα Άμεσου Κέρδους [12],[15]

Τα συστήματα άμεσου κέρδους χρησιμοποιούν τους χώρους που καταλαμβάνει το κτίριο για τη συλλογή, την αποθήκευση και τη διανομή της ηλιακής θερμότητας και εφόσον είναι σωστά σχεδιασμένα, μπορεί να αποτελέσουν μια πολύ αποτελεσματική και πρακτική λύση ενεργειακής εξοικονόμησης.

Τα συστήματα αυτά είναι τα απλούστερα, γιατί δεν απαιτούν παρά μόνο μεγάλη υαλόφρακτη επιφάνεια (παράθυρα με διπλά τζάμια), προσανατολισμένη προς τη μεσημβρία και μονωμένη εξωτερικά κατασκευή με σημαντική θερμική μάζα από μπετόν, τούβλα ή πέτρα, με τα οποία θα είναι κατασκευασμένα κυρίως το δάπεδο και οι τοίχοι.

Τα νότια ανοίγματα συμμετέχουν στο θερμικό ισοζύγιο του κτιρίου σχεδόν πάντα θετικά, ανεξάρτητα αν ο σχεδιασμός τους είναι συμβατικός ή βιοκλιματικός. Τα κτίρια αυτής της κατηγορίας συνεπώς πρέπει να είναι καλά μονωμένα με μια σχετικά μεγάλη νότια προσανατολισμένη επιφάνεια με τζάμι που θα δέχεται τις ακτίνες του χειμερινού ήλιου υπό μικρή γωνία πρόσπτωσης. Το θέρος, το μεγάλο ύψος του ήλιου περιορίζει την ακτινοβολία που μεταδίδεται από τα τζάμια και ένα σκίαστρο μπορεί να αποκλείσει τελείως τον ήλιο.



Σχήμα 1.2.2.1.1: Σχηματική αναπαράσταση παθητικού ηλιακού συστήματος άμεσου κέρδους [16]

Οι παράγοντες που καθορίζουν την λειτουργία του συστήματος με άμεσο ηλιακό κέρδος είναι:

- Οι μεγάλες γυάλινες επιφάνειες στη νότια πρόσοψη.  
Αυξάνοντας την επιφάνεια των ηλιακών υαλοπινάκων σε κτίρια άμεσου κέρδους αυξάνει αναλογικά, το ηλιακό κέρδος κατά τη διάρκεια της ημέρας το οποίο είναι επιθυμητό σε περιόδους θέρμανσης αρκεί η εσωτερική θερμοκρασία να μην υπερβεί τις συνθήκες θερμικής άνεσης το χειμώνα κατά τις ηλιόλουστες μέρες, αλλά αυξάνει επίσης και την απώλεια θερμότητας μέσω της περιοχής των υαλοπινάκων κατά τη διάρκεια των χειμωνιάτικων νυχτών και μάλιστα αναλογικά. Επίσης παρατηρείται και μια ανεπιθύμητη αύξηση της θερμότητας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού που μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υπερθέρμανσης και να οδηγήσει στην ανάγκη εγκατάστασης μηχανικού κλιματισμού. Η σχέση μεταξύ αυτών των διαφορετικών θερμικών επιδράσεων εξαρτάται από τη σχετική ένταση των χειμερινών και των καλοκαιρινών περιόδων σε μια συγκεκριμένη περιοχή, από τις ιδιότητες και τα στοιχεία των ηλιακών υαλοπινάκων, τη διαθεσιμότητα νυχτερινής μόνωσης κατά τη διάρκεια του χειμώνα, την έκθεση στον ήλιο και τη διαθεσιμότητα της ημερησίας μόνωσης (πέραν της σκίαση) κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.  
Εκτός από το μέγεθος, σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος έχει η κλίση και το είδος των υαλοπινάκων. Το κατακόρυφο υαλοστάσιο είναι προτιμότερο γιατί δέχεται την περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία το χειμώνα ενώ το θέρος τα κέρδη από ένα κατακόρυφο υαλοστάσιο είναι μικρότερα από αυτά που εξασφαλίζονται αν το υαλοστάσιο ήταν υπό άλλες γωνίες επειδή ο ήλιος είναι ψηλά στον ουρανό και η ηλιακή δέσμη έχει κατά συνέπεια υψηλή γωνία πρόσπτωσης.  
Ο τύπος του ηλιακού υαλοπίνακα επιλέγεται από σχετικά εγχειρίδια με βάση το κλάσμα της ηλιακής εξοικονόμησης (SSF), το κλίμα, το λόγο φορτίου του συλλέκτη(LCR) και τη διαθεσιμότητα της νυχτερινής μόνωσης.
- Η λειτουργική διάρθρωση των εσωτερικών χώρων του κτιρίου, με κύρια οργάνωση προς το νότο, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.
- Η μεγάλη θερμική μάζα στο εσωτερικό του κτιρίου ώστε να απορροφάται οποιαδήποτε απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας.

Η τοποθέτηση θερμικής μάζας έχει δύο σκοπούς. Ο πρώτος είναι η εξομάλυνση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κατοικίας ακόμα και όταν οι εξωτερικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είναι έντονες και ο δεύτερος είναι να δημιουργήσει την απαραίτητη χρονική καθυστέρηση στην απόδοση της θερμότητας μέσα στην κατοικία, ώστε να επιτρέπεται η θέρμανση και μετά τη δύση του ήλιου. Η θερμική μάζα είναι συνήθως υπό τη μορφή εξωτερικά μονωμένων χτισμένων τοίχων. Ο ήλιος ακτινοβολεί κατευθείαν στη θερμική μάζα και η ενέργεια αποθηκεύεται. Τα στοιχεία της θερμικής μάζας είναι κατασκευασμένα συνήθως από βαριά υλικά, δηλαδή υλικά με μεγάλη θερμοχωρητικότητα, που έχουν την ικανότητα να απελευθερώνουν την αποθηκευμένη σε αυτά θερμότητα μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα το οποίο εξαρτάται από το είδος του υλικού.

- Η θερμική προστασία στην εξωτερική πλευρά του κελύφους.

### 1.2.2.2 Συστήματα Έμμεσου Κέρδους [15],[17],[18]

Συστήματα έμμεσου κέρδους είναι τα παθητικά ηλιακά συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια και την αποδίδουν με έμμεσο τρόπο στους εσωτερικούς χώρους του κτιρίου μέσω είτε δομικών στοιχείων είτε ανοιγμάτων διαφόρων ειδών (π.χ. θυρίδων, αγωγών κ.α.). Συνήθως προσαρτώνται σε νότιες όψεις κτιρίων (συνιστάται μέχρι 30° απόκλιση από το Νότο).

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν:

- Ο τοίχος-συλλέκτης θερμικής αποθήκευσης, τοίχος Trombe
- Ηλιακός χώρος- θερμοκήπιο

## Τοίχος Trombe [15]

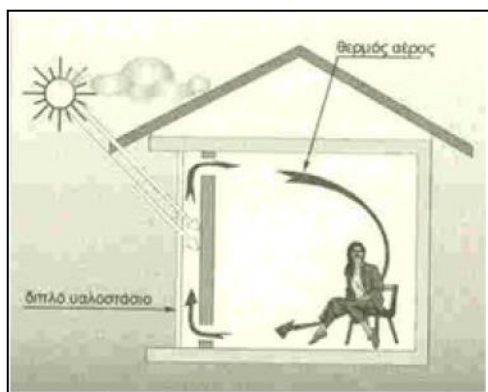
Πρόκειται για το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τοίχου θερμικής αποθήκευσης, που μελετήθηκε στην Γαλλία από τον καθηγητή F.Trombe και τον αρχιτέκτονα J.Michel.

Ο τοίχος αυτός εφαρμόστηκε στα πρώτα πειραματικά ηλιακά σπίτια στο Odeillo της Γαλλίας το 1967 και αποτελείται από :

- ο ένα συμπαγή τοίχο νοτίου προσανατολισμού, μεγάλης θερμοχωρητικότητας από σκυρόδεμα πάχους 30-40 cm και βαμμένο σε σκούρο χρώμα, στην εξωτερική πλευρά
- ο μια υάλινη επιφάνεια σε απόσταση 30cm από τον τοίχο
- ο θυρίδες στο πάνω και στο κάτω μέρος του τοίχου που διευκολύνουν την κίνηση του αέρα
- ο μια θυρίδα στο πάνω μέρος του υαλοστασίου

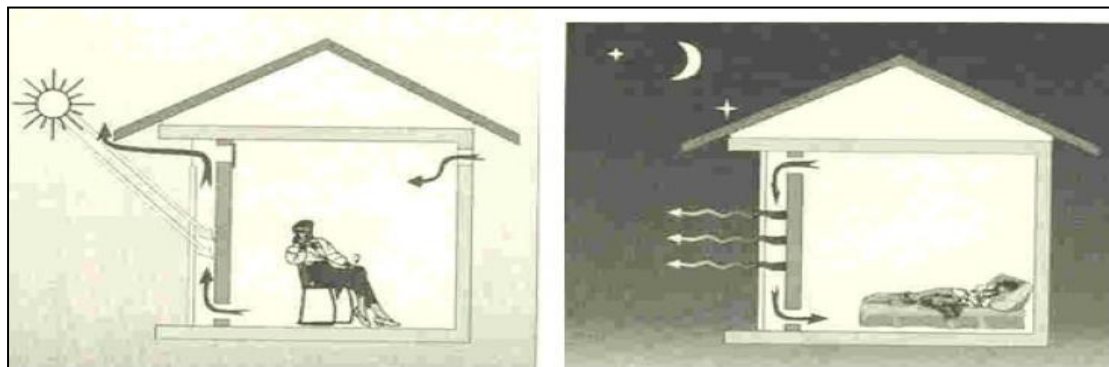
Η λειτουργία του τοίχου βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοσιφωνισμού και πραγματοποιείται με την κυκλοφορία του αέρα στο χώρο ανάμεσα στο γυαλί και τον τοίχο και μέσα από τις θυρίδες λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας.

Τον χειμώνα, κατά την διάρκεια της ημέρας, όταν ο ήλιος προσπίπτει στο γυαλί, θερμαίνει τον αέρα που βρίσκεται ανάμεσα στο τζάμι και τον τοίχο. Ο θερμός αέρας κινείται προς τα πάνω και μέσα από την θυρίδα μπαίνει στον εσωτερικό χώρο. Ταυτόχρονα ψυχρότερος αέρας από τον εσωτερικό χώρο, μπαίνει από την κάτω θυρίδα και αντικαθιστά το κενό που δημιουργήθηκε. Ενώ κατά την διάρκεια της νύχτας, η λειτουργία αντιστρέφεται. Οι δύο θυρίδες κλείνουν, πάνω και κάτω και η θέρμανση του χώρου επιτυγχάνεται με την ακτινοβολία της αποθηκευμένης θερμότητας στον τοίχο.



Σχήμα 1.2.2.1: Λειτουργία τοίχου Trombe, τον χειμώνα. [15]

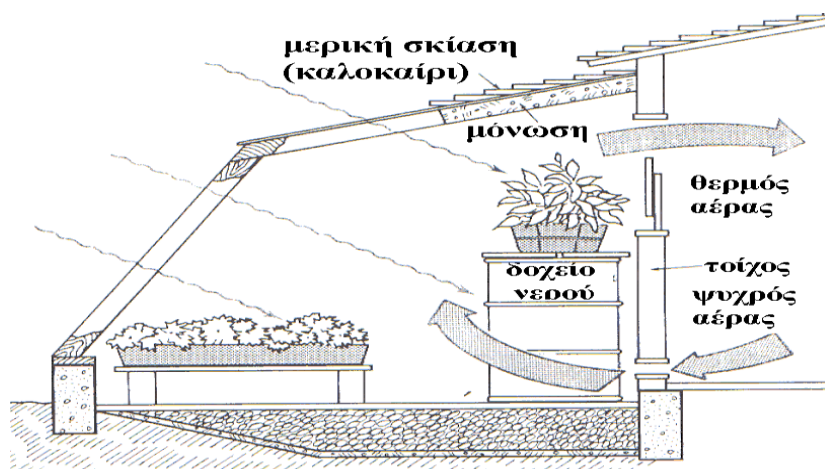
Το καλοκαίρι η λειτουργία του τοίχου αντιστρέφεται. Η επάνω θυρίδα κλείνει ενώ ταυτόχρονα ανοίγει ένα τμήμα του υαλοστασίου στο πάνω μέρος (φεγγίτης) έτσι ώστε να απομακρύνεται ο θερμός αέρας προς τα έξω. Επίσης με απλά συστήματα ηλιοπροστασίας, μιας και πρόκειται για νότιο προσανατολισμό, μπορεί να αποκλειστεί τελείως η άμεση πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 1.2.2.2: Λειτουργία τοίχου Trombe, το καλοκαίρι [15]

### Ηλιακοί χώροι-Θερμοκήπια [15,18]

Το θερμοκήπιο την ημέρα, όταν υπάρχει ηλιοφάνεια, λειτουργεί ως διαφανής επιλεκτική επιφάνεια, αφήνοντας να διέρχεται συνολικά η ηλιακή ακτινοβολία, ενώ μειώνει τις απώλειες θερμότητας. Που απορροφάται από τις επιφάνειες και την θερμική μάζα του θερμοκηπίου. Γι αυτό κατά την ημέρα το θερμικό ισοζύγιο του θερμοκηπίου είναι (θερμικό κέρδος μείον θερμικές απώλειες) είναι θετικό.



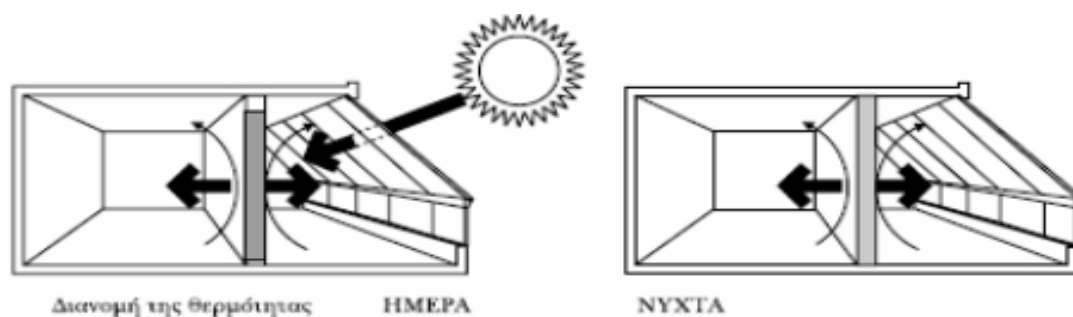
Σχήμα 1.2.2.3: Θερμοκήπιο προσαρτημένο σε νότια πρόσοψη κτιρίου [19]

Ο τρόπος εφαρμογής του παραπάνω στα παθητικά ηλιακά συστήματα είναι η κατασκευή ενός θερμοκηπίου μπροστά από ένα μεσημβρινό εξωτερικό τοίχο του κτιρίου (τοίχος θερμοκής αποταμιεύσεως). Με το σύστημα αυτό η ηλιακή ενέργεια παρέχει όλη τη θερμότητα που χρειάζεται το θερμοκήπιο και ουσιαστική ενέργεια για τη θέρμανση του σπιτιού. Το θερμοκήπιο δρα σαν κατευναστής, μειώνει τις απώλειες θερμότητας της κατοικίας το χειμώνα και την ηλιακή ενέργεια το καλοκαίρι, επίσης μετριάζει τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μέσα στο σπίτι. Η θερμοκρασία μέσα στο θερμοκήπιο δε χρειάζεται ακριβή έλεγχο, αλλά πρέπει να είναι αρκετά υψηλή, ώστε να μην παγώνουν τα φυτά.

Ο θερμός αέρας του θερμοκηπίου μπορεί να διοχετευθεί μέσα στο σπίτι, ενώ θερμότητα αποταμιεύεται στον ενδιάμεσο τοίχο. Αν το ηλιακό θερμοκήπιο γίνει ένα είδος κλειστής βεράντας, τότε παρέχει το χειμώνα ευχάριστη διαμονή και αρκετή θερμότητα για το σπίτι. Τα προσαρτημένα θερμοκήπια στα κτίρια, αποτελούν συνήθως κλειστούς χώρους με μεγάλο ποσοστό γυάλινης επικάλυψης στη νότια πλευρά και τοίχο θερμοκής αποθήκευσης ή άλλο μέσο αποθήκευσης θερμότητας για τη θέρμανση των χώρων του κυρίως κτιρίου από την ηλιακή ενέργεια.

Τη νύχτα το θερμοκήπιο αποβάλλει με ακτινοβολία προς την ατμόσφαιρα, όση θερμότητα συγκέντρωσε την ημέρα λόγω της μεγάλης γυάλινης επιφάνειας. Το θερμικό κέρδος χάνεται υπό τη μορφή θερμοκών απωλειών και το θερμικό ισοζύγιο μετατρέπεται σε αρνητικό. Ακόμη ο αέρας που βρίσκεται μέσα στο θερμοκήπιο παρέχει μεγάλη ποσότητα υδρατμών λόγω της βλάστησης. Στη διάρκεια της νύχτας η εσωτερική επιφάνεια του τζαμιού ψύχεται και η θερμοκρασία του αέρα πέφτει προσεγγίζοντας το σημείο κορεσμού, οπότε οι υδρατμοί υγροποιούνται. Έτσι αποβάλλεται και η λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών που χάνεται με αγωγή και ακτινοβολία προς τα έξω.

Το καλοκαίρι η θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου αντιστρέφεται. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας την ημέρα είναι αυξημένη και το εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου περνά από συνθήκες υπερθέρμανσης σε μία νυχτερινή ανεπαρκή ψύξη. Η εφαρμογή του συστήματος θερμοκηπίου χωρίς καμιά άλλη ρύθμιση και προστασία δεν είναι συμφέρουσα. Ωστόσο με τις κατάλληλες ρυθμίσεις, τη θερμική προστασία το χειμώνα και την ηλιοπροστασία το καλοκαίρι τα μειονεκτήματα ελαχιστοποιούνται και διατηρούνται τα πλεονεκτήματα του θερμοκηπίου.



Σχήμα 1.2.2.2.3: Θερμοκήπιο προσαρτημένο σε νότιο τοίχο νερού [15]

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

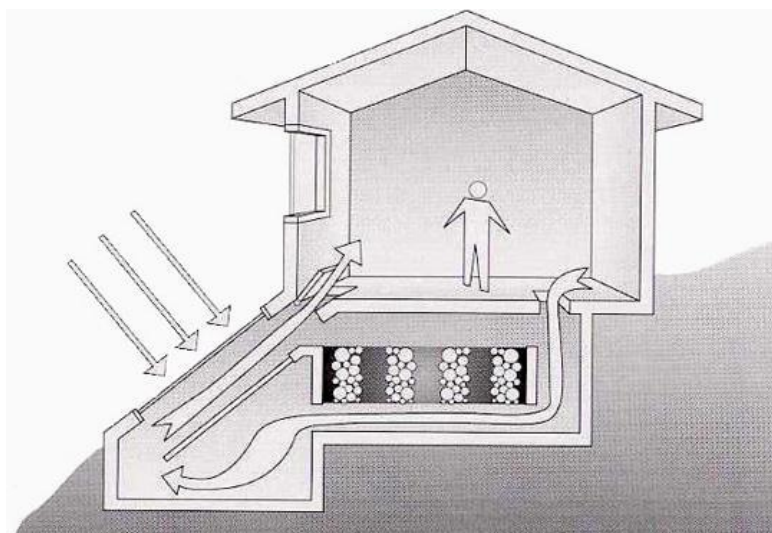
Ανάλογα με τη θερμική σύνδεση και τον επιθυμητό τρόπο μεταφοράς, αποθήκευσης και διανομής της θερμότητας, ο διαχωριστικός τοίχος και το διαχωριστικό υαλοστάσιο μεταξύ θερμοκηπίου και κατοικήσιμου χώρου, θερμομονώνεται ή όχι και εφαρμόζεται νυχτερινή μόνωση (η οποία εφαρμόζεται και τη θερινή περίοδο).



### 1.2.2.3 Συστήματα Απομονωμένου Κέρδους [12],[20],[21]

Στα συστήματα απομονωμένου κέρδους η επιφάνεια ηλιοσυλλογής δεν βρίσκεται σε επαφή με τον χώρο που επιθυμούμε να θερμάνουμε. Μεταξύ αυτής της επιφάνειας και του χώρου διαβίωσης υπάρχει ένας μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας όπως για παράδειγμα ένας ανεμιστήρας. Στα πραγματικά παθητικά ηλιακά συστήματα η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με μη μηχανικά μέσα και βασίζεται κυρίως στην άνωση, μεταγωγή και ακτινοβολία της θερμότητας.

Παράδειγμα απομονωμένου κέρδους είναι το θερμοσιφωνικό πάνελο με rock bed. Το σύστημα αυτό αποτελείται από υαλοπίνακα, διάκενο αέρα και μεταλλική σκουρόχρωμη επιφάνεια, που φέρει μόνωση εξωτερικά και τοποθετείται εν γένει χαμηλότερα από τους κύριους χώρους του κτιρίου με κλίση 40° περίπου. Η θερμότητα που συλλέγεται στο διάκενο αέρα, μεταφέρεται μέσω αγωγών με θερμοσιφωνική ροή είτε απ' ευθείας στους χώρους του κτιρίου, είτε σε αποθήκη θερμότητας (rock bed) απ' όπου αποδίδεται σταδιακά στους χώρους.



Σχήμα 1.2.2.3.1: Θερμοσιφωνικό πάνελο εκτός κτιριακού κελύφους [12]

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

Το θερμοσιφωνικό πάνελο ενδείκνυται για χώρους που χρειάζονται άμεση απόδοση θερμότητας από τα ηλιακά κέρδη, όπως χώρους γραφείων, σχολικές αίθουσες κ.ο.κ.

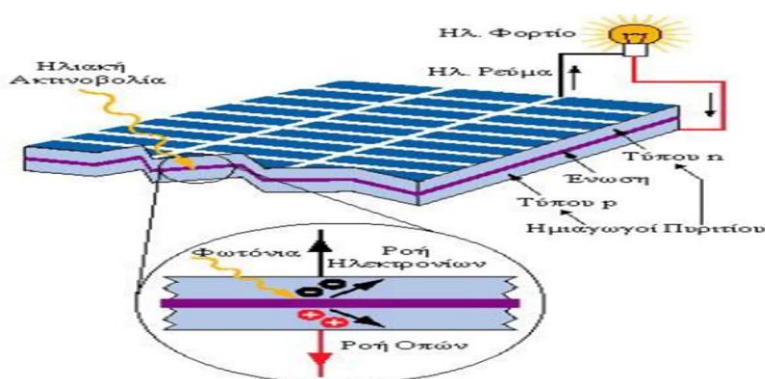
Το πλεονέκτημά του, σε σχέση με το άμεσο κέρδος που, επίσης, αποδίδει άμεσα θερμότητα στο χώρο, είναι ότι αποφεύγεται η θάμβωση από μεγάλους υαλοπίνακες, η υπερθέρμανση τη θερινή περίοδο, καθώς κι οι αυξημένες απώλειες θερμότητας τη νύχτα. Εκτός αυτού, τη θερινή περίοδο, μπορεί να αποκόπτεται θερμικώς από το κτήριο (κλείσιμο των θυρίδων, σκίαση του πανέλου, άνοιγμα του υαλοπίνακα στο ανώτατο και κατώτερο μέρος του), αποφεύγοντας έτσι την υπερθέρμανση του χώρου.

Το κλείσιμο των θυρίδων είναι επίσης πολύ σημαντικό τη νυχτερινή περίοδο, προς αποφυγή θερμικών απωλειών. Κάτι τέτοιο καθιστά την εφαρμογή συστήματος αυτοματισμών σχεδόν επιτακτική, προς αποφυγή δυσλειτουργίας του συστήματος από αμέλεια των χρηστών.

Σε περίπτωση που τοποθετείται κεκλιμένα, το θερμοσιφωνικό πάνελο έχει καλύτερη απόδοση αλλά χρειάζεται περισσότερο ελεύθερο χώρο. Προσαρτημένο κατακόρυφα στον τοίχο μπορεί να εναρμονισθεί αισθητικά με το κτήριο πιο εύκολα.

### 1.2.3 Φωτοβολταϊκά Συστήματα [4],[21]

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών ηλιακών συστημάτων στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Μερικά υλικά, όπως το πυρίτιο με πρόσμιξη άλλων στοιχείων, γίνονται ημιαγωγοί (άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα προς μια μόνο διεύθυνση), έχουν δηλαδή τη δυνατότητα να δημιουργούν διαφορά δυναμικού όταν φωτίζονται και κατά συνέπεια να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Συνδέοντας μεταξύ τους πολλά μικρά κομμάτια τέτοιων υλικών (φωτοβολταϊκές κυψέλες ή στοιχεία), τοποθετώντας τα σε μία επίπεδη επιφάνεια (φωτοβολταϊκό σύστημα) και στρέφοντάς τα προς τον ήλιο, γίνεται δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχήμα 1.2.3.1: Βασική αρχή λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος [23]

Ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 19%, ο οποίος, συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Αυτό σημαίνει ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ. Ωστόσο, η απόδοση ενός δεδομένου συστήματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών σε [ηλιοστάτη](#). Οι προϋποθέσεις αξιοποίησης των Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα είναι από τις καλύτερες στην Ευρώπη, αφού η συνολική ενέργεια που δέχεται κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας στην διάρκεια ενός έτους κυμαίνεται από 1400-1800 kWh.

### 1.3 Μέθοδοι Αποθήκευσης Ενέργειας

Η αποθήκευση ενέργειας σε μορφές κατάλληλες προς εκμετάλλευση είναι η παρούσα παγκόσμια πρόκληση για τους επιστήμονες. Η επιλογή της μεθόδου αποθήκευσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι σημαντικότεροι εκ των οποίων είναι οι εξής:

- Το χρονικό διάστημα της αποθήκευσης
- Η ποσότητα της ενέργειας που θα αποθηκευτεί
- Η μορφή της ενέργειας που πρέπει να αποθηκευτεί
- Η ποικιλία των ρυθμών κατανάλωσης

Οι διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να αποθηκευτεί η ενέργεια περιλαμβάνουν την μηχανική, την ηλεκτρική και την θερμική αποθήκευση της ενέργειας. [24]

#### 1.3.1 Μηχανική Αποθήκευση Ενέργειας [24]

Τα συστήματα μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνουν την αποθήκευση ενέργειας με βαρύτητα, με άντληση νερού, με πεπιεσμένο αέρα και με σφονδύλους.

Η αποθήκευση ενέργειας με βαρύτητα χρησιμοποιεί ένα πολύ μεγάλο πιστόνι που σχηματίζει εναιώρημα σε έναν βαθύ άξονα γεμάτο με νερό και ολισθαίνοντα σφραγίσματα για την αποτροπή διαρροής γύρω από το έμβολο και μία σωλήνα επιστροφής συνδεδεμένη με μία τουρμπίνα αντλίας στο επίπεδο του εδάφους. Το έμβολο αποτελείται από λωρίδες φτιαγμένες από μπετόν και σιδηρομέταλλευμα για υψηλή πυκνότητα και χαμηλό κόστος. Κατά την έναρξη της λειτουργίας, ο άξονας είναι γεμάτος με νερό αλλά κατόπιν σφραγίζεται και δεν απαιτείται επιπλέον νερό. Καθώς το έμβολο πέφτει σπρώχνει το νερό προς τα κάτω στον άξονα αποθήκευσης μέχρι την σωλήνα περιστροφής διαμέσου του στροβίλου και περιστρέφει μια γεννήτρια /κινητήρα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αποθήκευση ενέργειας με άντληση νερού χρησιμοποιεί δύο ταμιευτήρες σε διαφορετικά υψόμετρα για μετατροπή της αποθηκευμένης βαρυτικής δυναμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα σύστημα

άντλησης με αποθήκευση λειτουργεί με χρήση της περίσσειας της ενεργειακής παραγωγής κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης για την άντληση νερού από το χαμηλότερο ταμιευτήρα στο πάνω ταμιευτήρα που πρέπει να αποθηκευτεί ως βαρυτική δυναμική ενέργεια. Σε περιόδους φορτίου μεγάλης ζήτησης, το νερό στο πάνω ταμιευτήρα απελευθερώνεται μέσω τουρμπίνων παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια για παροχή στο δίκτυο.

Η αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα περιγράφει ένα σύστημα που αποθηκεύει δυναμική ενέργεια μέσω της αποθήκευσης του συμπιεσμένου αερίου που αντλείται σε φυσικά υπόγεια πετρώματα ή μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης. Ένα σύστημα χρησιμοποιεί ένα συμπιεστή κινούμενο από κινητήρα κατά καιρούς χαμηλών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για να αποθηκεύσει αέρα, σε κοιλότητες που απαντώνται στη φύση κάτω από το έδαφος. Κατά τη διάρκεια ωρών αυξημένων τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, ο συμπιεσμένος αέρας καίγεται με φυσικό αέριο για να λειτουργήσει μια τουρπίνα, η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

Οι σφόνδυλοι αποθηκεύουν ενέργεια επιταχύνοντας έναν ογκώδη περιστρεφόμενο κύλινδρο σε μια υψηλή ταχύτητα και διατηρώντας εκείνη την ενέργεια εντός του συστήματος ως περιστροφική ενέργεια.

Οι τεχνολογίες μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα και με άντληση νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ενέργειας ενώ οι τεχνολογίες μηχανικής αποθήκευσης με σφονδύλους είναι περισσότερο κατάλληλες για προσωρινή αποθήκευση.

### 1.3.2 Ηλεκτρική Αποθήκευση Ενέργειας [24]

Για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται μπαταρίες (οξέος μολύβδου και Ni-Cd). Μια μπαταρία φορτίζεται, συνδέοντας την με μια πηγή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος και όταν αποφορτίζεται, η αποθηκευμένη χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Πιθανές εφαρμογές των μπαταριών είναι χρήση τους σε ώρες εκτός αιχμής, για εξομάλυνση του φορτίου και αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται συνήθως από ανεμογεννήτριες ή φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις.

### 1.3.3 Θερμική Αποθήκευση Ενέργειας [25]

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με την ψύξη, την θέρμανση, την τήξη, την στερεοποίηση ή την εξατμισμό ενός υλικού, με την ενέργεια να καθίστανται διαθέσιμη ως θερμότητα όταν η διαδικασία αντιστρέφεται. Οι μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σε αισθητή θερμότητα αποθήκευσης θερμότητας ή σε λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης.

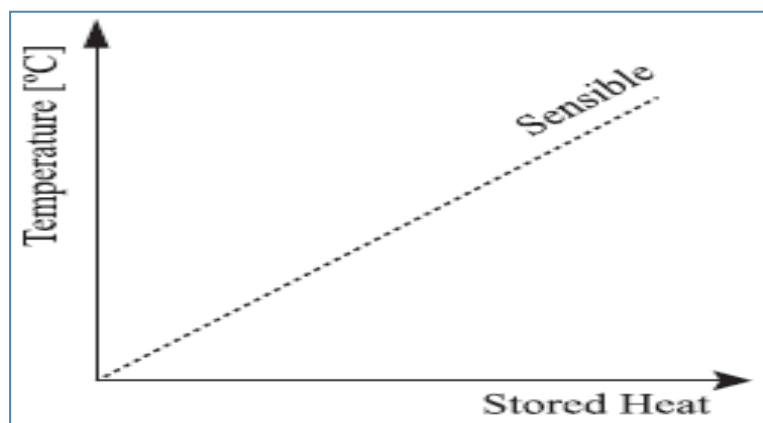
Η αισθητή θερμότητα αποθήκευσης ενέργειας λαμβάνει χώρα όταν σε ένα υλικό αυξάνεται ή μειώνεται η θερμοκρασία του. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού και, αν ο όγκος είναι μια σημαντική θεώρηση, στην πυκνότητα του υλικού.

Η λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης ενέργειας εξαρτάται από την ικανότητα του υλικού να αφομοιώνει τις ενεργειακές πυκνότητες σε σχεδόν ισοθερμοκρασιακές συνθήκες και πάνω από ένα στενό θερμοκρασιακό εύρος.

### 1.3.3.1 Αισθητή Θερμότητα Αποθήκευσης [24],[26],[28]

Στην αποθήκευση αισθητής θερμότητας, η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενός στερεού ή υγρού. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί τη θερμοχωρητικότητα και την αλλαγή στη θερμοκρασία του υλικού κατά τη διαδικασία φόρτισης και αποφόρτισης.

Το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από την ειδική θερμότητα του μέσου, την αλλαγή της θερμοκρασίας και το ποσό του υλικού αποθήκευσης. Νερό φαίνεται να είναι το καλύτερο διαθέσιμο υγρό για την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, επειδή είναι φθηνό και έχει υψηλή ειδική θερμότητα. Ωστόσο, πάνω από τους 100°C, χρησιμοποιούνται συνήθως έλαια, τετηγμένα άλατα, τήγματα, κλπ.



Σχήμα 1.3.3.1: Γραμμική σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της αποθηκευμένης θερμότητας [27]

Η ποσότητα της θερμότητας που αποθηκεύεται είναι μια συνάρτηση της ειδικής θερμότητας του μέσου, της μεταβολής της θερμοκρασίας και της μάζας του μέσου αποθήκευσης.

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m * c_p * dT = m * c_{pa} * (T_f - T_i)$$

- Q (J): η ποσότητα της θερμότητας που αποθηκεύεται
- T<sub>f</sub> (°C): τελική θερμοκρασία
- T<sub>i</sub> (°C): αρχική θερμοκρασία
- m(kg): μάζα του μέσου αποθήκευσης θερμότητας
- c<sub>p</sub> (J/kg\*K): ειδική θερμοχωρητικότητα
- c<sub>pa</sub> (J/kg\*K): μέση ειδική θερμοχωρητικότητα μεταξύ T<sub>i</sub> και T<sub>f</sub>

### 1.3.3.2 Λανθάνουσα Θερμότητα Αποθήκευσης [24],[26],[28]

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας κάνει χρήση της ενέργειας που αποθηκεύεται όταν μια ουσία αλλάζει από τη μια φάση στην άλλη π.χ. από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε αέριο κ.ο.κ..

Η αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας μπορεί να χαρακτηριστεί με βάση τη διαδικασία αλλαγής φάσης σε στερεά-στερεά, στερεά-υγρή, στερεά-αέρια και υγρή-αέρια.

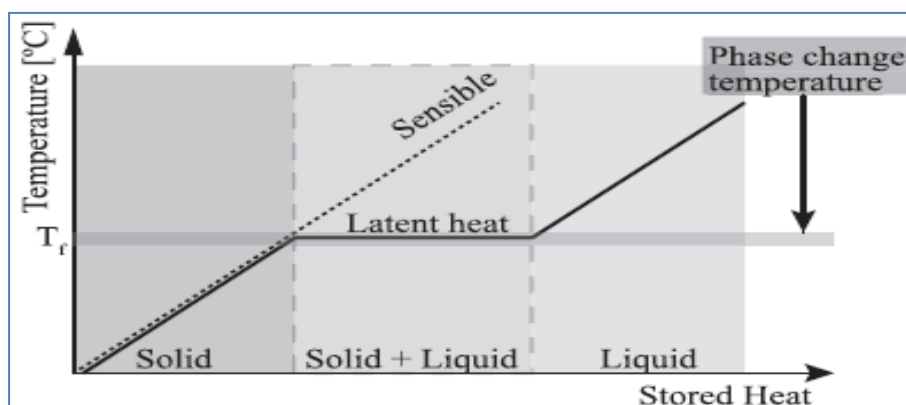
Γενικά όταν σε μια ουσία προστίθεται ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, προκύπτει αύξηση της εσωτερικής ενέργειας όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα. Η προσθήκη αυτή της θερμότητας συνεπάγεται αύξηση στη θερμοκρασία (αισθητή θέρμανση) ή αλλαγή της φάσης (λανθάνουσα θέρμανση).

Η ικανότητα αποθήκευσης ενός συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης με PCM δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$Q = \int_{T_L}^{T_m} m * c_p * dT + m * a_m * \Delta H_m + \int_{T_m}^{T_f} m * c_p * dT$$

- $a_m$  : το κλάσμα τήξης
- $\Delta H_m$ : θερμότητα τήξης ανά μονάδα μάζας (J/kg)

Σε σύγκριση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, η λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης προσφέρει υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης σε ένα στενότερο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ αποθήκευσης και απελευθέρωσης της θερμότητας.



Σχήμα 1.3.3.2.1: Γραμμική σχέση μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης μέσω ισοθερμικής αντίδρασης κατά την διάρκεια της αλλαγής φάσης[27]



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1<sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. [http://1lyk-vyron.att.sch.gr/A1b\\_kaplani.pdf](http://1lyk-vyron.att.sch.gr/A1b_kaplani.pdf)
2. [http://www.ecocrete.gr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=2500&Itemid=0](http://www.ecocrete.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=2500&Itemid=0)
3. K.H. Solangi, M.R. Islam, R. Saidur, N.A. Rahim, H. Fayaz , A review on global solar energy policy
4. <http://www.allaboutenergy.gr/>
5. S. Keleş, Fossil Energy Sources, Climate Change, and Alternative Solutions
6. <http://www.kee.gr/perivallontiki/teacher.html>
7. <http://medsos.gr/medsos/news/2008-12-16-00-12-16/2009-01-21-14-33-49/294-2009-01-20-14-26-20.html>
8. [http://www.buildings.gr/greek/aiforos/exikonomisi/m\\_santamouris.htm](http://www.buildings.gr/greek/aiforos/exikonomisi/m_santamouris.htm)
9. <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=282&language=el-GR>
10. [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE\\_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1)
11. [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_active\\_solar.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_active_solar.htm)
12. [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/thermansi/pathitika\\_iliaka\\_systimata.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/thermansi/pathitika_iliaka_systimata.htm)
13. [http://users.sch.gr/kpara/ape2009\\_10/sun\\_energy2.html](http://users.sch.gr/kpara/ape2009_10/sun_energy2.html)
14. <http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/alternative/pathitika.htm>
15. Σημειώσεις του μαθήματος “θερμική συμπεριφορά κτιρίων”
16. <http://ape1epalsyrou.weebly.com/pialphathetaetatauiotakappa940-etambdaiotaalphakappa940-sigmaupsilonsigmatau942mualphataualpha.html>
17. [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/thermansi/pathitika\\_iliaka\\_systimata\\_emmeso\\_kerdos.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/thermansi/pathitika_iliaka_systimata_emmeso_kerdos.htm)
18. [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/thermansi/pathitika\\_iliaka\\_systimata\\_emmeso\\_kerdos\\_iliakos\\_xoros.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/thermansi/pathitika_iliaka_systimata_emmeso_kerdos_iliakos_xoros.htm)
19. [http://www.digital-in.info/e-tomeas/images/stories/docs/2th345/keimena/3\\_ilios\\_kai\\_kerdi\\_sto\\_ktirio.pdf](http://www.digital-in.info/e-tomeas/images/stories/docs/2th345/keimena/3_ilios_kai_kerdi_sto_ktirio.pdf)
20. [http://www.ecoarchitects.gr/images/FINAL/Pathitika\\_Hliaka\\_Systimata.pdf](http://www.ecoarchitects.gr/images/FINAL/Pathitika_Hliaka_Systimata.pdf)
21. <http://sites.google.com/site/wildwaterwall/eliaka-spitia/3-pathitika-iliaka-systemata-thermanses>

22. <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CF%8C%CF%83%CF%8D%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B1>
23. <http://protokataskeuastiki.blogspot.gr/>
24. Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi : Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
25. Yinping Zhang, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, Hongfa Di: Application of latent heat thermal energy storage in buildings:State-of-the-art and outlook
26. Kinga Pielichowska , Krzysztof Pielichowski : Phase change materials for thermal energy storage
27. Romeu Vicente\*, Tiago Silva: Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental
28. A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> -ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

### 2.1 Εισαγωγή [1],[2],[3]

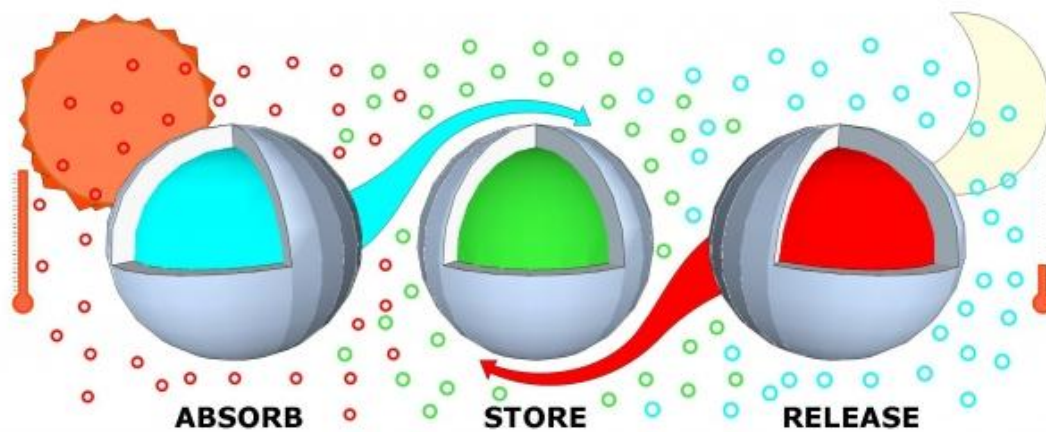
Σήμερα, τα περιορισμένα αποθέματα ορυκτών καυσίμων και οι ανησυχίες σχετικά με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου καθιστούν αναγκαία την αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας. Προς το παρόν η αποθήκευση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη του κτιρίου βασίζεται κυρίως σε υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Ένας άλλος τρόπος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που δοκιμάστηκε για την θέρμανση και ψύξη των κτιρίων βασίζεται στην ιδέα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με χρήση PCMs.

Ως υλικά αλλαγής φάσης PCMs ορίζονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Η μεταφορά θερμικής ενέργειας λαμβάνει χώρα όταν ένα υλικό μεταβαίνει από τη στερεή κατάσταση στην υγρή ή από την υγρή στη στερεή. Αυτή η μετάβαση της φυσικής του κατάστασης ονομάζεται αλλαγή φάσης. Αρχικά τα υλικά αλλαγής φάσης συμπεριφέρονται όπως τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης, δηλαδή καθώς απορροφούν θερμότητα, η θερμοκρασία τους αυξάνεται. Σε αντίθεση όμως με τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης, τα PCMs σε ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης τους, απορροφούν και απελευθερώνουν θερμότητα σε μια σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν από 5 έως 14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά. Η ελευθερία που δίνει το εύρος θερμοκρασιών που παράγονται τα υλικά δίνει την ευχέρεια εφαρμογής των PCMs σε πλήθος περιπτώσεων, έτσι ώστε η θερμοκρασία τήξης τους να είναι σύμφωνη με το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής τους.

Είναι γνωστό ότι η βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας στα κτίρια, σύμφωνα με τις τελευταίες εξελίξεις της τεχνολογίας, απαιτεί αλλαγές στον σχεδιασμό των κτιρίων, οι οποίες συχνά οδηγούν σε αμφισβητούμενες, από αισθητική και αρχιτεκτονική άποψη, κατασκευές. Εδώ τα PCMs προσφέρουν άριστες υπηρεσίες, καθώς μπορούν να είναι

‘αόρατα’ κρυμμένα μέσα στα οικοδομικά στοιχεία, από όπου απορροφούν ή αποδίδουν σημαντικά ποσά θερμότητας.

Σημαντικές είναι επίσης οι υπηρεσίες που μπορούν να προσφέρουν τα PCMs αποθηκεύοντας την περίσσεια θερμότητας χώρων και προσφέροντας την αργότερα σε άλλους ή και στους ίδιους χώρους, όταν απαιτείται. Επιπλέον, η απορρόφηση των φορτίων αιχμής εξομαλύνει την διακύμανση της θερμοκρασίας εσωτερικού περιβάλλοντος, βελτιώνοντας έτσι το επίπεδο θερμικής άνεσης. και ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα με την χρήση του είναι ότι η θερμότητα αποθήκευσης και η ανάκτησή της γίνεται ισοθερμικά γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης χώρου.



Σχήμα 2.1.1: Αρχή λειτουργίας των PCMs [4]

## 2.2 Διαδικασία Αλλαγής Φάσης [5],[6],[7]

Οι φάσεις αποτελούν «κατηγορίες» του τύπου της μοριακής κίνησης της ύλης που βρέθηκε σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή, η κίνηση των μορίων κυριαρχείται από το γεγονός ότι κολλάνε μεταξύ τους και το αποτέλεσμα είναι μια φάση της ύλης που είναι άκαμπτη και πυκνή. Όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή, η κίνηση των μορίων κυριαρχείται από την ενέργεια τους να μετακινηθούν, έτσι οι διαμοριακές δυνάμεις μπορούν σχεδόν να αγνοηθούν. Σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες, τα μόρια κινούνται αλλά εξακολουθούν να μένουν μαζί.

Η κατάσταση που θα βρεθεί ένα σώμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντος.

- **Στερεή κατάσταση**

Σε χαμηλές θερμοκρασίες οι πυρήνες των ατόμων ενός στερεού δονούνται σε σχέση με μια θέση ισορροπίας, αλλά είναι παγιδευμένοι στις θέσεις του πλέγματός τους, αδυνατούν δηλαδή να ρεύσουν ή να διαχυθούν.

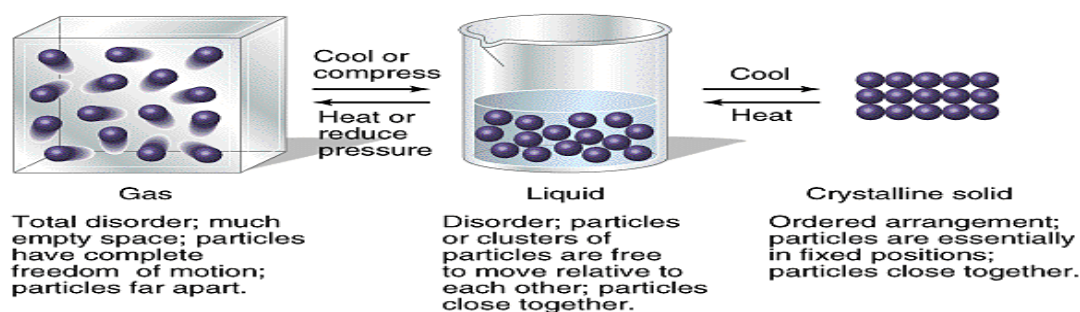
Οι διαμοριακές δυνάμεις, επίσης, είναι εντονότερες από τη μέση θερμική ενέργεια του συστήματος. Μεγάλη ποικιλία ακτινικής και γωνιακής τάξης (δομής) υπάρχει κατά κανόνα στα ενιαία κρυσταλλικά στερεά. Ακόμα και τα άμορφα στερεά έχουν σχετικά καλή χωρική διάταξη, ειδικά σε μικρές αποστάσεις, (10 – 100 μορίων).

- **Υγρή κατάσταση**

Στην υγρή κατάσταση, τα δομικά σωματίδια βρίσκονται, συγκριτικά με τη στερεά κατάσταση, σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Επίσης οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων είναι ασθενέστερες, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη κινητικότητα. Έτσι τα υγρά έχουν καθορισμένο όγκο, δεν έχουν όμως καθορισμένο σχήμα και παίρνουν κάθε φορά το σχήμα του δοχείου στο οποίο τοποθετούνται.

- **Αέρια κατάσταση**

Στην αέρια κατάσταση, τα δομικά σωματίδια κινούνται άτακτα προς όλες τις διευθύνσεις, καθώς οι δυνάμεις συνοχής είναι αμελητέες. Έτσι στα αέρια δεν έχουμε ούτε καθορισμένο σχήμα, ούτε όγκο. Μάλιστα εδώ προκύπτουν σημαντικές μεταβολές των όγκων, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία ή και η πίεση.



**Σχήμα 2.2.1:** Διάταξη των μορίων στη στερεή, στην υγρή και στην αέρια φάση[5]

Η διαδικασία αλλαγής φάσης είναι ο μετασχηματισμός ενός θερμοδυναμικού συστήματος από μία φάση ή κατάσταση της ύλης σε μια άλλη μέσω μεταφοράς θερμότητας. Ο όρος χρησιμοποιείται συνηθέστερα για να περιγράψει τις μεταβάσεις μεταξύ στερεών, υγρών και αέριων καταστάσεων της ύλης.

Η μετατροπή του στερεού σε υγρό ονομάζεται τήξη, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται πήξη. Η μετατροπή από αέριο σε υγρό ονομάζεται υγραποίηση ή συμπύκνωση, και η μετατροπή από αέριο σε στερεό ονομάζεται συμπύκνωση.

Στις παραπάνω μετατροπές δεν ενδιαφερόμαστε, αν αυτές προκλήθηκαν από την ασυμφωνία τρέχουσας και κατάλληλης κατάστασης ή λόγω μερικών πιέσεων. Όμως, στη μετατροπή υγρού σε αέριο διακρίνουμε δύο διαδικασίες το βρασμό και την εξάτμιση. Ο βρασμός οφείλεται στην ασυμφωνία τρέχουσας και κατάλληλης κατάστασης, ενώ η εξάτμιση γίνεται λόγω της μερικής πίεσης. Για αυτό ο βρασμός εμφανίζεται μόνο σε συγκεκριμένες συνθήκες και συμβαίνει σε όλη την έκταση του υγρού, ενώ η εξάτμιση μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε συνθήκες και συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια του υγρού.

Γενικά, οι αλλαγές φάσεις (που δεν οφείλονται στις μερικές πιέσεις) γίνονται σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης για την κάθε καθαρή ουσία. Για αυτό αυτές αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες του κάθε υλικού και μάλιστα αποτελούν τις συνθήκες ισορροπίας δύο διαφορετικών καταστάσεών του. Αντίθετα, στα μίγματα οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, που απαιτούνται για τις αλλαγές φάσεων, εξαρτώνται από τις αναλογίες των συστατικών τους, άρα μεταβάλλονται.

## 2.2.1 Διαγράμματα Φάσεων [8]

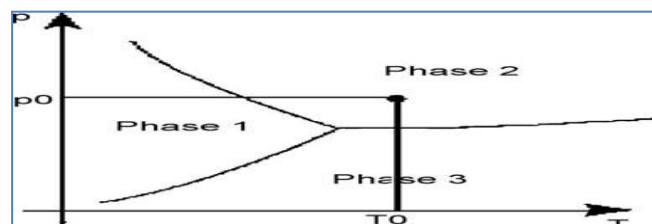
Το διάγραμμα φάσεων είναι μια γραφική παράσταση που χρησιμοποιείται στην φυσικοχημεία (χημική θερμοδυναμική) και σε άλλες επιστήμες, και απεικονίζει τις περιοχές σταθερότητας διαφόρων φάσεων ενός συστήματος (καθαρής ουσίας ή μίγματος) συναρτήσει διαφόρων χαρακτηριστικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η συγκέντρωση.

### Διάκριση διαγραμμάτων φάσεων

- ο διάγραμμα φάσεων καθαρής ουσίας ή διάγραμμα θερμοκρασίας-πίεσης: απεικονίζει τις φάσεις μιας ουσίας υπό διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης
- ο διμερές διάγραμμα φάσεων : δείχνει τις φάσεις που σχηματίζονται από δύο ουσίες
- ο τριμερές διάγραμμα φάσεων : δείχνει τις φάσεις που σχηματίζονται από τρεις ουσίες

### 2.2.1.1 Αλλαγή Φάσης Μιας Καθαρής Ουσίας [9]

Οι περιοχές που καταλαμβάνει η κάθε φάση μπορούν να απεικονιστούν σε ένα διάγραμμα πίεσης θερμοκρασίας.



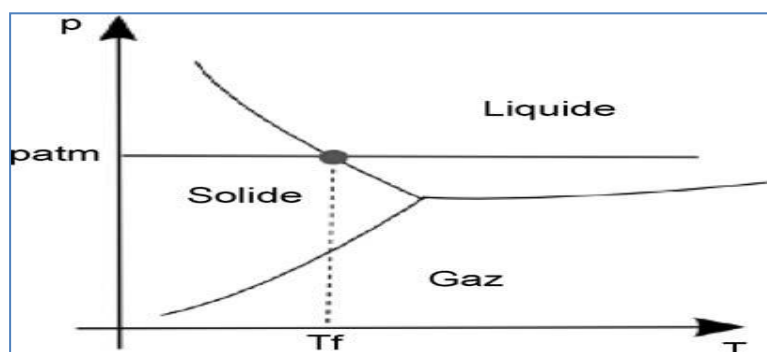
Σχήμα 2.2.1.1.1: Διάγραμμα Φάσεων [9]

Η ύλη μπορεί να βρεθεί σε αρκετές καταστάσεις. Από αυτές οι πιο συχνές είναι η στερεά, η υγρή και η αέρια κατάσταση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Όσον αφορά τα κτίρια, η αλλαγή φάσης που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας είναι μεταξύ της υγρής και της στερεάς φάσης του υλικού. Οι μετασχηματισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά την μετάβαση από την μια φάση στην άλλη είναι

- ο η στερεοποίηση : μετάβαση από την υγρή στην στερεή φάση
- ο η σύντηξη : μετάβαση από την στερεή στην υγρή φάση

Η πίεση, όσον αφορά τις κτιριακές εφαρμογές, θεωρείται σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική. Αυτή η πίεση, όταν πρόκειται για μετασχηματισμό φάσης υπό σταθερή πίεση αποτελεί το όριο μεταξύ στερεής και υγρής φάσης.



Σχήμα 2.2.1.1.2: Ζώνες ισορροπίας των υγρών και στερεών φάσεων στην ατμοσφαιρική πίεση[9]

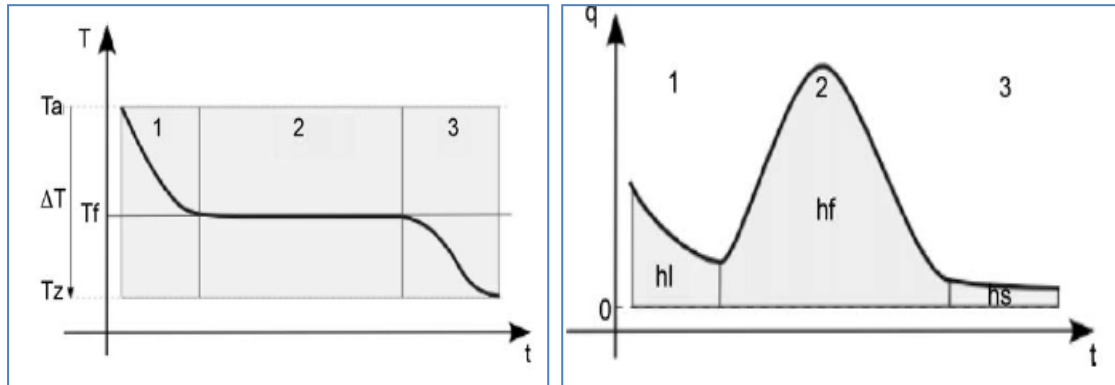
Στο παραπάνω διάγραμμα με  $T_f$  συμβολίζεται η θερμοκρασία τήξης του καθαρού σώματος. Συγκρίνοντας την τιμή της θερμοκρασίας του υλικού με την θερμοκρασία τήξης γνωρίζουμε αν το σώμα βρίσκεται στην στερεή ή την υγρή φάση.

- ο Αν  $T < T_f$   $\longrightarrow$  το υλικό βρίσκεται στην στερεά κατάσταση
- ο Αν  $T > T_f$   $\longrightarrow$  το υλικό βρίσκεται στην υγρή κατάσταση

Το καθαρό σώμα ανταλλάσει θερμότητα με το εξωτερικό περιβάλλον και υποβάλλεται σε μια θερμοκρασιακή μεταβολή. Ο χρόνος έως ότου το υλικό επέλθει σε νέα θερμοδυναμική ισορροπία, είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε να συναλλαχθεί θερμότητα και συμβολίζεται με  $\Delta t$ .



Στα διαγράμματα που ακολουθούν, απεικονίζονται τα στάδια στερεοποίησης ενός υλικού όταν αυτό ψύχεται. Τα διαγράμματα απεικονίζουν την χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας του υλικού που οφείλεται σε ένα εξωτερικό βήμα θερμοκρασίας



**Σχήμα 2.2.1.1.3:** Χρονική εξέλιξη της ροής της θερμοκρασίας και τη θερμότητας κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης ενός καθαρού σώματος που υποβάλλεται σε ένα βήμα θερμοκρασίας  $\Delta T$  [9]

### Στάδιο 1: Ψύξη του υγρού

Το καθαρό σώμα, απελευθερώνει αισθητή θερμότητα και η θερμοκρασία του μειώνεται μέχρι την θερμοκρασία τήξης. Η συνολική ποσότητα της θερμότητας που απελευθερώνεται είναι ίση με

$$h_l = c_{pl} * \int_{T_f}^{T_a} dT, \text{ όπου } c_{pl} \text{ είναι η θερμοχωρητικότητα της υγρής φάσης}$$

### Στάδιο 2: Η αλλαγή της φάσης

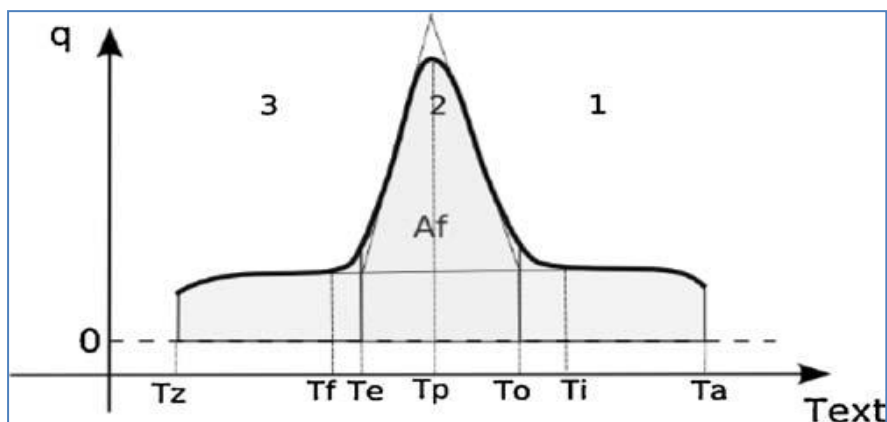
Στο στάδιο αυτό, υπό σταθερή θερμοκρασία, απελευθερώνεται η λανθάνουσα θερμότητα

### Στάδιο 3: Η ψύξη του στερεού

Το καθαρό σώμα, απελευθερώνει αισθητή θερμότητα και η θερμοκρασία του μειώνεται μέχρι την τιμή της θερμοκρασίας ισορροπίας. Η συνολική ποσότητα της θερμότητας που απελευθερώνεται είναι ίση με

$$h_s = c_{ps} * \int_{T_z}^{T_f} dT, \text{ όπου } c_{ps} \text{ είναι η θερμοχωρητικότητα της στερεάς φάσης}$$

Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται η ροή θερμότητας συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας.



Σχήμα 2.2.1.1.4: Διάγραμμα ροής θερμότητας [9]

Η λανθάνουσα θερμότητα μπορεί να βρεθεί από την περιοχή κάτω από την καμπύλη και την ταχύτητα της εξωτερικής θερμοκρασίας, η οποία είναι σταθερή. Η λανθάνουσα θερμότητα εξάγεται από τον τύπο:

$$h_f = \frac{1}{V_{\text{Text}}} * A_f, \text{ όπου } V_{\text{Text}} \text{ η ταχύτητα της εξωτερικής θερμοκρασίας}$$

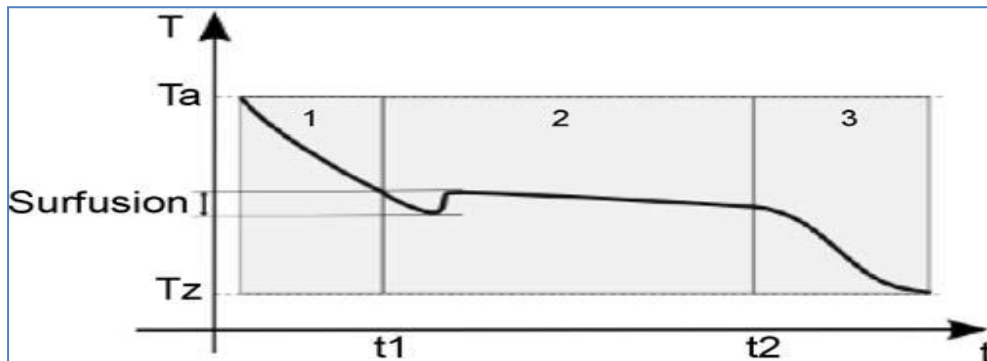
- ο  $T_i$  και  $T_f$  : οι αρχικές και τελικές θερμοκρασίες αντίστοιχα κατά τη αρχή και το τέλος της απόκλισης από την καμπύλη αισθητής μεταφοράς θερμότητας
- ο  $T_p$ : η μέγιστη θερμοκρασία της μέγιστης ροής θερμότητας
- ο  $T_o$  και  $T_e$ : Σε κάθε πλευρά του σημείου μέγιστης ροής θερμότητας, υπάρχει μια καμπή της καμπύλης. Στα σημεία καμπής μπορούν να εξαχθούν εφαπτόμενες γραμμές . Αυτές οι θερμοκρασίες είναι οι θερμοκρασίες στη διασταύρωση μεταξύ των εφαπτόμενων και της βάσης της καμπύλης, δηλαδή θερμοκρασία έναρξης  $T_o$  και τελική θερμοκρασία  $T_e$ .

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες θερμοκρασίες για να παρθούν τα χαρακτηριστικά ενός ΥΑΦ είναι οι  $T_p$ ,  $T_o$  και  $\Delta T = T_o - T_e$ , το πλάτος της κορυφής.

Η στερεοποίηση ενός PCM ξεκινά με την δράση της πυρήνωσης. Πυρήνωση είναι ο σχηματισμός αρχικών κρυστάλλων που ονομάζεται πυρήνας. Οι κρύσταλλοι διαδίδονται στο υλικό για τον σχηματισμό της στερεάς φάσης. Ο ρυθμός σχηματισμού πυρήνων ενός υλικού είναι η

ικανότητα του να παράγει πυρήνα όταν η θερμοκρασία του μειώνεται κάτω από την θερμοκρασία τήξης.

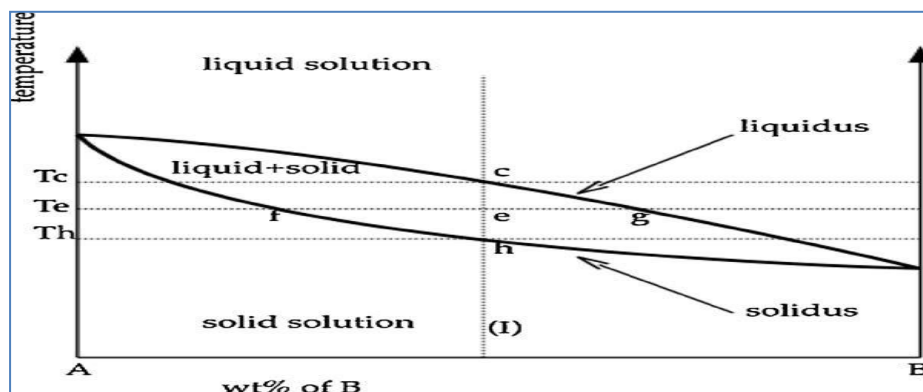
Αν ο ρυθμός σχηματισμού πυρήνων είναι πολύ χαμηλός τότε το υλικό μπορεί να παραμείνει στην υγρή φάση όταν η θερμοκρασία του μειώνεται κάτω από την θερμοκρασία τήξης. Η στερεοποίηση αρχίζει αργότερα: η θερμοκρασία του υλικού αυξάνει ξαφνικά στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης.



Σχήμα 2.2.1.1.5: Επίδραση υπέρψυξης [9]

### 2.2.1.2 Αλλαγή Φάσης Διμερούς Μίγματος [8],[9]

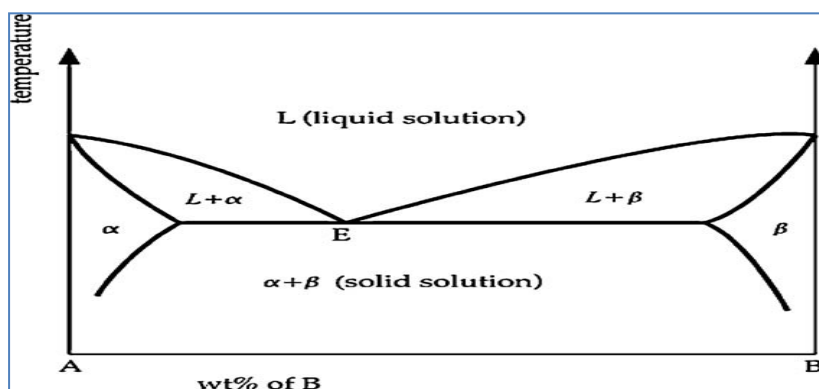
Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται η αλλαγή φάσης ενός διμερούς μίγματος. Ο όγκος και η πίεση του μίγματος είναι σταθερή. Η τετμημένη του διαγράμματος αντιστοιχεί στην αναλογία του συστατικού B στο μίγμα A + B, και η τεταγμένη αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του μίγματος.



Σχήμα 2.2.1.2.1: Διμερές διάγραμμα φάσης - ισόμορφου συστήματος[9]

Πρόκειται για το πιο απλό διάγραμμα φάσεων που παρουσιάζει δύο ουσίες που είναι πλήρως διαλυτές μεταξύ τους τόσο στην υγρή όσο και στην στερεά κατάσταση. Το διάγραμμα αυτό έχει δύο χαρακτηριστικές γραμμές: την γραμμή πλήρους τήξης, που αποκαλείται καμπύλη liquidus, και την γραμμή πλήρους στερεοποίησης, που αποκαλείται καμπύλη solidus. Επάνω από την καμπύλη liquidus το σύστημα είναι πλήρως υγρό, ενώ κάτω από την καμπύλη solidus το σύστημα είναι πλήρως στερεό. Μεταξύ των δύο γραμμών η υγρή και η στερεά φάση συνυπάρχουν σε αναλογία που προσδιορίζεται με τον κανόνα του μοχλού.

Στις περιπτώσεις ουσιών που δεν είναι πλήρως διαλυτές μεταξύ τους, τότε στο διμερές διάγραμμα φάσεων παρουσιάζεται μία αναλογία των δύο κυρίων συστατικών με σημείο τήξεως χαμηλότερο από τα σημεία τήξεως και των δύο κυρίων συστατικών. Το σημείο αυτό αποκαλείται ευτηκτικό και αποτελεί χαρακτηριστικό σημείο του συστήματος.



Σχήμα 2.2.1.2.2: Διμερές διάγραμμα φάσης - ευτηκτικό σημείο [9]

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ανάλογα με τα συστατικά, υπάρχουν διάφορα διαγράμματα φάσης ανάλογα με τη συμπεριφορά αλλαγής φάσης του μίγματος.

Φυσικά, το διάγραμμα φάσης είναι αναγκαίο ώστε να μοντελοποιήσει σωστά τη θερμότητα που αποθηκεύεται / απελευθερώνεται, αλλά, προς το παρόν, δεν έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ για κτιριακές προσομοιώσεις.

### 2.3 Προσομοίωση αλλαγής φάσης [3],[10],[11]

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

Η πιο γνωστή ακριβής αναλυτική λύση για μονοδιάστατο πρόβλημα, που ονομάζεται το πρόβλημα Stefan, προήλθε από το Neumann.

Η εξίσωση που ακολουθεί γνωστή ως συνθήκη Stefan, περιγράφει την διαδικασία:

$$\lambda * \rho * \left( \frac{ds(t)}{dt} \right) = k_s * \left( \frac{\delta T_s}{\delta t} \right) - k_l * \left( \frac{\delta T_l}{\delta t} \right) \quad (2.3.1)$$

- ο λ: η λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης
- ο ρ: η πυκνότητα
- ο s(t): η θέση της επιφάνειας
- ο k: η θερμική αγωγιμότητα
- ο t: ο χρόνος
- ο T: η θερμοκρασία

Οι δείκτες l, s αναφέρονται στην υγρή και στερεή φάση αντίστοιχα

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

### 2.3.1 Μέθοδος της ενθαλπίας [1],[3],[10]

Η μέθοδος της ενθαλπίας βασίζεται σε μία αριθμητική λύση της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς ενθαλπίας. Αναπτύσσοντας τη μέθοδο της ενθαλπίας, το πρόβλημα αλλαγής φάσης γίνεται πιο εύκολο, αφού η κύρια παραπάνω εξίσωση είναι η ίδια και για τις δύο περιπτώσεις, οι συνθήκες της διεπιφάνειας επιτυγχάνονται αυτόματα και δημιουργείται μία πολτώδης ζώνη ανάμεσα στις δύο φάσεις του στερεού και του υγρού. Με αυτή τη ζώνη αποφεύγονται κάποιες απότομες ασυνέχειες, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν αριθμητικές αστάθειες. Βέβαια, είναι εμφανές ότι το πάχος και η ποιότητα της διακριτοποίησης αυτής της ζώνης είναι καθοριστικής σημασίας για τη συμπεριφορά του μοντέλου. Η μέθοδος της ενθαλπίας μπορεί να αντιμετωπίσει και πολτώδη και ισοθερμικά προβλήματα, όμως η θερμοκρασία σε ένα συγκεκριμένο σημείο του πλέγματος μπορεί να ταλαντώνεται με το χρόνο.

Η συνάρτηση της ενθαλπίας  $h$ , ορίζεται συναρτήσει του χρόνου. Για την διαδικασία της αλλαγής φάσης η διατήρηση της ενέργειας μπορεί να εκφραστεί σε όρους της συνολικής ογκομετρικής ενθαλπίας και θερμοκρασίας για σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες, ως εξής

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k_k(\nabla T)) \quad (2.3.1.1)$$

$H$ : είναι η συνολική ογκομετρική ενθαλπία. Είναι το άθροισμα της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας του PCM

$$H(T) = h(T) + \rho_l * f(T) * \lambda, \quad (2.3.1.2)$$

$$h = \int_{T_m}^T \rho_k * c_k * dT \quad (2.3.1.3)$$

Στην ισοθερμική περίπτωση αλλαγής φάσης, το υγρό κλάσμα του τήγματος δίνεται από:

$$f = \begin{cases} 0, & \text{εάν } T < T_m \text{ (στερεή φάση)} & (2.3.1.4) \\ 0-1, & \text{εάν } T = T_m \text{ (μεικτή φάση)} & (2.3.1.5) \\ 1, & \text{εάν } T > T_m \text{ (υγρή φάση)} & (2.3.1.6) \end{cases}$$

### 2.3.2 Μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας [3],[12]

Ακολουθεί την συνήθη διαδικασία αριθμητικής επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς ενέργειας, θεωρώντας ότι η θερμοχωρητικότητα του PCM κατά την αλλαγή φάσης δίνεται από μια συνάρτηση της θερμοκρασίας γνωστή ως «συνάρτηση ενεργού θερμοχωρητικότητας»  $C_{p,eff}(T)$ .

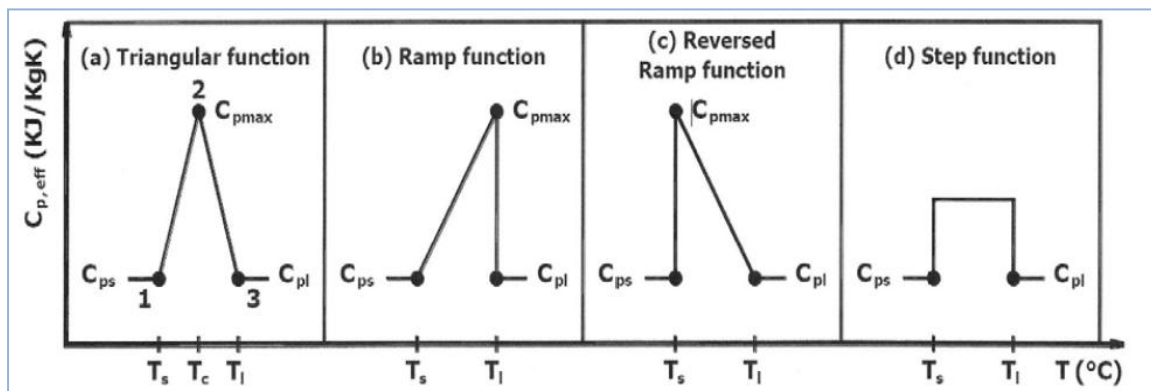
Όταν η αλλαγή φάσης ενδιαφέρει μόνο σαν μακροσκοπικό φαινόμενο, όπως συμβαίνει στις κτιριακές εφαρμογές, χωρίς την ανάγκη υπολογισμού των λεπτομερειών του μηχανισμού αλλαγής φάσης, τότε προτιμάται η μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας έναντι της μεθόδου της ενθαλπίας. Η μόνη δυσκολία έγκειται στο ότι η συνάρτηση  $C_{p,eff}(T)$  πρέπει να είναι γνωστή για το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο PCM.

Στην βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες πολύπλοκες συναρτήσεις  $C_{p,eff}(T)$  της μορφής της κατανομής Gauss, όπως η εκθετική συνάρτηση:

$$c_{p,eff}(T) = c_{ps} + H * \left[ \exp \left[ -0.5 * \left( \frac{T-T_l}{b} \right)^2 \right] \right] \quad (2.3.2.1)$$

- $C_{ps}$  : θερμοχωρητικότητα του στερεού PCM
- $H$  : η θερμότητα αλλαγής φάσης
- $T_s$  : θερμοκρασία του στερεού PCM
- $T_l$  : θερμοκρασία του υγρού PCM
- $b = (T_l - T_s)$  : εύρος θερμοκρασιών

Μετρήσεις στο Εργαστήριο Ψύξης και Κλιματισμού ΕΜΠ για διάφορα υποψήφια PCMs έδωσαν απλούστερες συναρτήσεις  $C_{p,eff}(T)$ , οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 2.3.2.1.



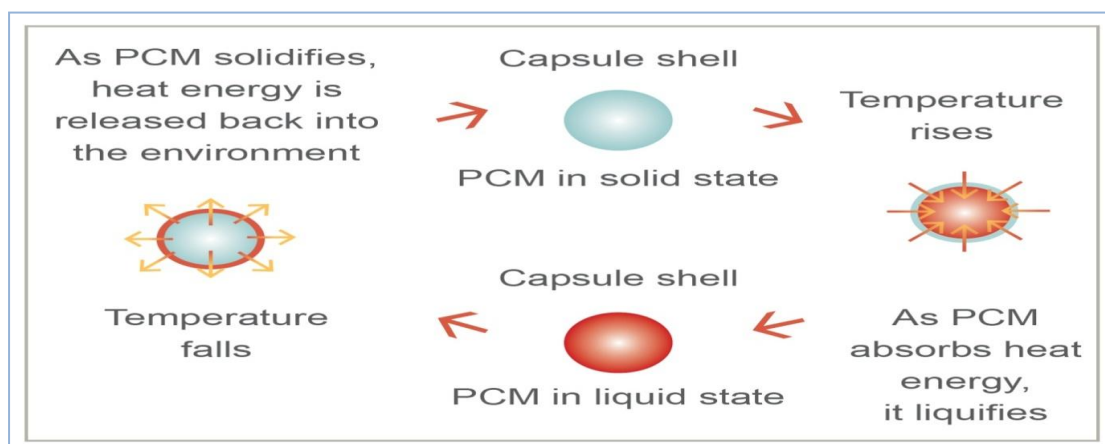
Σχήμα 2.3.2.1: Συναρτήσεις  $C_{p,eff}(T)$  [3]

Στη παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας τριγωνικής μορφής, οι εκφράσεις της οποίας θα δοθούν στο Κεφάλαιο 5.

## 2.4 Ορισμός PCM [13],[14]

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

Η ιδέα για τα υλικά αλλαγής φάσης προήλθε από το νερό, το οποίο μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλα ποσά θερμότητας κατά την αλλαγή φάσης του σε πάγο. Η λειτουργία του βασίζεται στην εξής διαδικασία: το PCM βρίσκεται σε στερεά κατάσταση μέχρι να εφαρμοστεί σε αυτό θερμότητα. Το υλικό, PCM, απορροφά την θερμότητα και μεταβαίνει στην υγρή φάση. Η θερμότητα αποθηκεύεται (συνήθως για μέρες ή ώρες) και το PCM βρίσκεται στην υγρή κατάσταση μέχρι να πέσει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Καθώς η θερμοκρασία του περιβάλλοντος πέφτει, η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται και το PCM επανέρχεται στην στερεά κατάσταση.

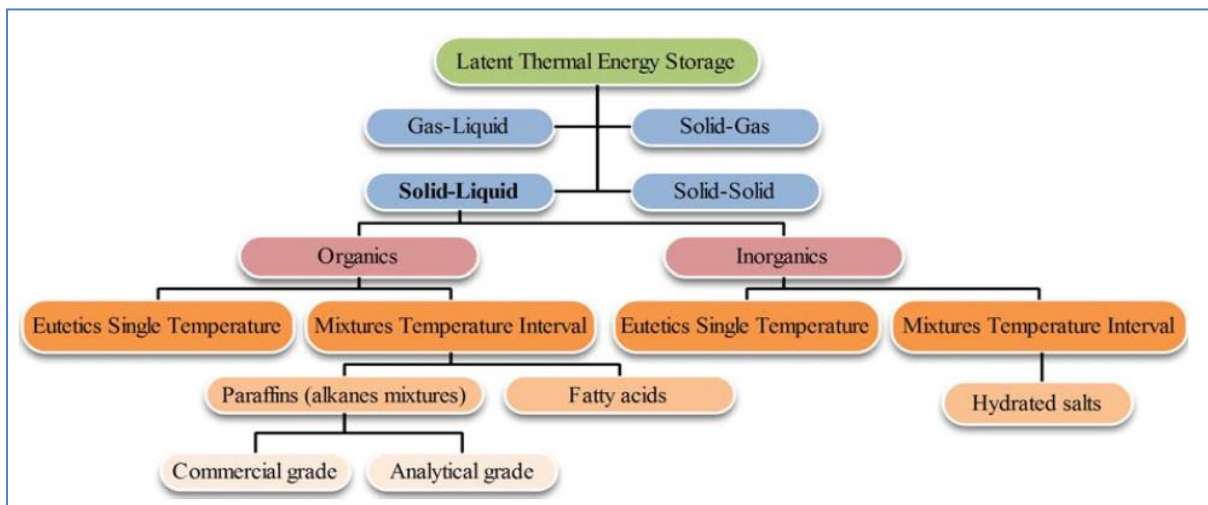


Σχήμα 2.4.1: Λειτουργία του PCM [14]



### 2.4.1 Ταξινόμηση PCMs [2]

Η ομαδοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης μπορεί να γίνει με πολλούς διαφορετικούς παράγοντες. Πρώτος και σημαντικότερος είναι η σύσταση, όπου χωρίζονται σε οργανικά και ανόργανα υλικά, όπου θα αναλυθεί παρακάτω. Άλλες κατηγορίες είναι με βάση τα θερμοκρασιακά εύρη και τον τρόπο μετάβασης φάσης.



Σχήμα 2.4.1.1: Κατηγοριοποίηση των PCMs [15]

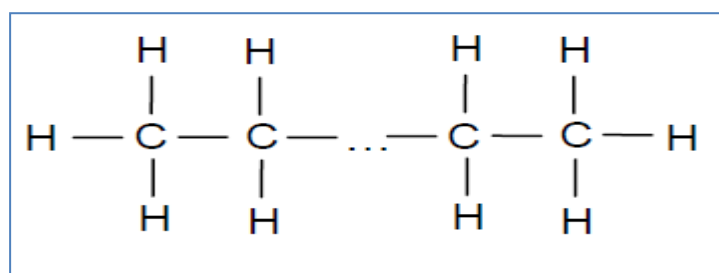
#### 2.4.1.1 Οργανικά PCMs

Τα οργανικά υλικά καλύπτουν μικρά θερμοκρασιακά εύρη, περίπου 0°C έως 150°C. Περιλαμβάνουν κυρίως τις παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και τις σακχαρώδεις αλκοόλες. Στις περισσότερες περιπτώσεις εμφανίζουν μικρές πυκνότητες, μικρότερες από 1g/cm<sup>3</sup>. Για αυτό το λόγο εμφανίζουν μικρότερες τιμές λανθάνουσας θερμότητας ανά όγκο, σε σχέση με τα ανόργανα. Ακόμη, παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και είναι εύφλεκτα. Ωστόσο, πλεονεκτούν ως προς την συμβατότητά τους σε σχέση με άλλα υλικά γιατί είναι μη τοξικά, εμφανίζουν λίγο ή καθόλου υπόψυξη, έχουν χημική και θερμική σταθερότητα, ενώ παράλληλα είναι και αρκετά οικονομικά. [16]

- **Παραφίνες**

Πρόκειται για κορεσμένους υδρογονάνθρακες γενικού τύπου  $C_nH_{2n+2}$ . Οι παραφίνες αποτελούν τα ευρέως χρησιμοποιούμενα PCMs στερεάς-υγρής μορφής, διαθέτουν υψηλές θερμοχωρητικότητες λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης σε ένα στενό θερμοκρασιακό εύρος και θεωρούνται ως μη τοξικές και οικολογικά ακίνδυνες.[2]

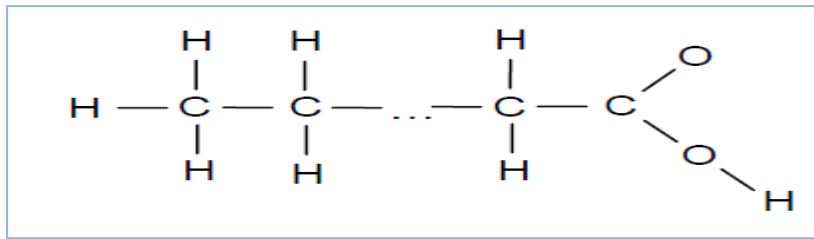
Η παραφίνη κεριού αποτελείται από ένα μίγμα n-αλκενίων και περιγράφεται από τον γενικό τύπο  $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$ . Η κρυσταλλοποίηση του  $(CH_2)_n$  της αλυσίδας απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας. Σε γενικές γραμμές όσο μεγαλύτερο είναι το μέσο μήκος της αλυσίδας υδρογονανθράκων, τόσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία τήξεως και η θερμότητα σύντηξης.[1] Η εμπορική παραφίνη κεριού, η οποία είναι ένα μείγμα διαφορετικών υδρογονανθράκων, παράγεται με απόσταξη αργού πετρελαίου. Λαμβάνοντας όμως υπόψη το κόστος, μόνο οι τεχνικού βαθμού παραφίνες μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως PCMs σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.[2]



Σχήμα 2.4.1.1.1: Χημική δομή αλκενίων στην σειρά [17]

- **Λιπαρά οξέα**

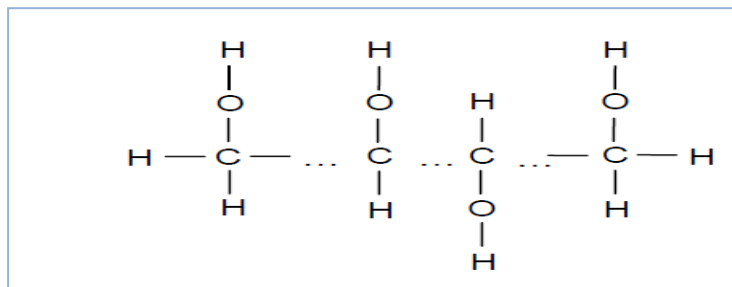
Περιγράφονται από τον γενικό τύπο  $CH_3(CH_2)_n.COOH$ . Το ενδιαφέρον στα λιπαρά οξέα ως PCMs για αποθήκευση ενέργειας έχει αυξηθεί πρόσφατα καθώς κατέχουν επιθυμητές θερμοδυναμικές και κινητικές ιδιότητες για χαμηλή θερμοκρασία λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης. Εμφανίζουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης, σε σύγκριση με τις παραφίνες, και αναπαραγωγική συμπεριφορά τήξης και στερεοποίησης με ελάχιστη ή καθόλου υπέρψυξη. Κύριο μειονέκτημά τους αποτελεί το κόστος το οποίο είναι 2-2,5 φορές υψηλότερο από του τεχνικού βαθμού παραφίνες. [2]



Σχήμα 2.4.1.1.2: Χημική δομή των λιπαρών οξέων, [17]

- **Αλκοόλες**

Οι αλκοόλες έχουν δοκιμαστεί για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας για τέσσερις δεκαετίες, αλλά πρόσφατες πρόοδοι σε τέτοια PCMs σχετίζονται με νανοϋλικά ή ειδικά σύνθετα υλικά με μοναδικές ιδιότητες, όπως η εισαγωγή ηλεκτρικής αγωγιμότητας.[2]



Σχήμα 2.4.1.1.3: Χημική δομή σακχάρων αλκοόλης, [17]

Πλεονεκτήματα οργανικών PCMs: [19]

- Μη διαβρωτικά με τα περισσότερα υλικά
- Μικρός κίνδυνος ρύπανσης του νερού
- Αμελητέα ή ανύπαρκτη εμφάνιση του φαινομένου supercooling
- Θερμική και χημική σταθερότητα
- Χαμηλό κόστος αγοράς
- Παραγωγή υλικών σε διάφορες μορφές για τις εμπορικές εφαρμογές

Μειονεκτήματα οργανικών PCMs: [19]

- Χαμηλή λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης
- Χαμηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

- Αναφλεξιμότητα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες
- Χαμηλή πυκνότητα

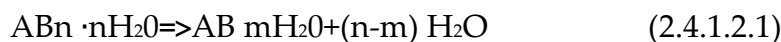
### 2.4.1.2 Ανόργανα PCMs

Τα ανόργανα υλικά καλύπτουν μία μεγάλη θερμοκρασιακή κλίμακα. Περιλαμβάνουν το νερό στους 0°C, υδατικά διαλύματα αλάτων σε θερμοκρασίες μικρότερες από 0°C, ένυδρα άλατα μεταξύ 5°C και 130°C και τέλος διάφορα άλατα από 150°C και πάνω. Τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να χωριστούν σε ένυδρα άλατα και μεταλλικά.

- Ένυδρα άλατα [2],[17],[18]

Τα ένυδρα άλατα με γενικό τύπο  $AB \cdot nH_2O$  είναι ανόργανα άλατα που περιέχουν νερό κρυσταλλώσεως. Κατά την διάρκεια της μετάβασης φάσης λαμβάνει χώρα η αφυδάτωση του άλατος σχηματίζοντας είτε ένυδρο άλας το οποίο περιέχει λιγότερα μόρια νερού είτε άνυδρο άλας.

Σχηματισμός ένυδρου άλατος με λιγότερα μόρια νερού



Σχηματισμός άνυδρου άλατος



Ανάλογα με την συμπεριφορά τήξης τα ένυδρα άλατα μπορούν να ταξινομηθούν ως ακολούθως

- ένυδρα άλατα με σύμφωνη συμπεριφορά τήξης  
στην θερμοκρασία τήξης το άλας είναι διαλυτό στο νερό ενυδάτωσης
- ένυδρα άλατα με ανάρμοστη συμπεριφορά τήξης  
στην θερμοκρασία τήξης το άλας είναι μόνο μερικώς διαλυτό στο νερό ενυδάτωσης
- ένυδρα άλατα με ημι-σύμφωνη συμπεριφορά τήξης  
κατά την διαδικασία της τήξης οι στερεές και υγρές φάσεις που είναι σε ισορροπία έχουν διαφορετικές συνθέσεις λόγω της μετατροπής του άλατος σε ένυδρο άλας με μικρότερο ποσό ενυδάτωσης

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στην οικογένεια των ένυδρων αλάτων είναι το χαμηλού κόστους εξαένυδρο χλωριούχο ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Ωστόσο, η σημαντική υπέρψυξη του και η υψηλή ευαισθησία του στην υγρασία περιορίζουν την μακροχρόνια χρήση του.

Τα ένυδρα άλατα είναι ελκυστικά για χρήση σε εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας λόγω της σχετικά υψηλής θερμικής τους αγωγιμότητας ( $\sim 0,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ), υψηλής πυκνότητας αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου ( $\sim 350 \text{ MJ/m}^3$ ) και του χαμηλού κόστους συγκριτικά με τις παραφίνες κεριού. Επιπλέον, η τιμή τους είναι συνήθως χαμηλή ( $\sim 1 - 3 \text{ €/kg}$ ), εκτός και αν αγοραστούν στην καθαρή τους μορφή.

#### ο **Μεταλλικά**

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα χαμηλής τήξεως μέταλλα και εύτηκτα μέταλλα. Δεν έχουν ληφθεί ακόμη σοβαρά υπόψη για τεχνολογίες με PCMs λόγω των εμποδίων που θέτει το βάρος τους. Ωστόσο, όταν ο όγκος αποτελεί ζήτημα, είναι πιθανά υποψήφια λόγω της υψηλής θερμότητας σύντηξης ανά μονάδα όγκου.

#### Πλεονεκτήματα ανόργανων PCMs:[19]

- ο Μεγαλύτερη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης
- ο Μη αναφλέξιμα
- ο Υψηλότερη πυκνότητα από τα οργανικά

#### Μειονεκτήματα ανόργανων PCMs:[19]

- ο Διαβρωτικά (απαραίτητη τοποθέτηση σε ενισχυμένη συσκευασία)
- ο Εμφάνιση supercooling
- ο Διαχωρισμός των φάσεων και δυνατή η εμφάνιση ιζήματος
- ο Αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση
- ο Αρκετά μεγαλύτερο κόστος αγοράς από τα οργανικά
- ο Υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου αν μείνουν εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υγρασία

### 2.4.1.3 Εύτηκτα οργανικά και ανόργανα PCMs

Ένα εύτηκτο είναι μία σύνθεση ελάχιστης-τήξης δύο ή περισσότερων συστατικών, καθένα από τα οποία τήκεται και να παγώνει σε συμφωνία σχηματίζοντας ενός μείγμα από επιμέρους κρυστάλλους κατά την κρυστάλλωση.

Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να μελετάται η ανάμιξη οργανικών και ανόργανων υλικών για τη δημιουργία εύτηκτων μιγμάτων για χρήση ως PCM με βελτιωμένες ιδιότητες. Τα μίγματα αυτά συμπεριφέρονται και αντιμετωπίζονται σαν ένυδρα άλατα και συγκεντρώνουν πολλά πλεονεκτήματα ως υλικά αλλαγής φάσης. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι το υψηλό τους κόστος, το οποίο μπορεί να είναι και τριπλάσιο σε σχέση με το κόστος των οργανικών και ανόργανων PCMs. [20]

Στους επόμενους πίνακες παρουσιάζονται οργανικά, ανόργανα και εύτηκτα PCMs που είναι κατάλληλα για κτιριακές εφαρμογές.

Πίνακας 2.4.1.3.1: Οργανικά PCMs – Παραφίνες και Μη Παραφίνες, [21]

PCM	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Θερμότητα τήξης (J/kgK)
Propyl palmitate	16–19	186
Glycerin	17.9	198.7
Hexadecane	18.1	236
Butyl stearate	19	140
Propyl palmitate	19	186
Paraffin C <sub>16</sub> ·C <sub>18</sub>	20–22	152
Heptadecane	20.8–21.7	171–172
Dimethyl sabacate	21	120–135
Octadecyl 3-mencaptopropylate	21	143
Paraffin C <sub>17</sub>	21.7	213
Polyglycol E600	22	127.2
Paraffin C <sub>13</sub> ·C <sub>24</sub>	22–24	189
Octadecyl thioglyate	26	90
Lactic acid	26	184

Πίνακας 2.4.1.3.1: Οργανικά PCMs – Παραφίνες και Μη Παραφίνες, [21]

PCM	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Θερμότητα τήξης (J/kgK)
Vinyl stearate	27–29	122
Octadecane	28–28.1	244–250.7
Paraffin C <sub>18</sub>	28	244
Methyl palmitate	29	205
Capric acid	30.1	158
Camphenilone	39	205
Docasyl bromide	40	201
Caprylone	40	259

Πίνακας 2.4.1.3.2: Ανόργανα PCMs - Ένυδρα Άλατα, [21]

PCM	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Θερμότητα τήξης (J/kgK)
KF ·4H <sub>2</sub> O	18.5	231
FeBr <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	21	105
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	25.8	125.9
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	29–30	171–192
CaCl <sub>2</sub> ·12H <sub>2</sub> O	29.8	174
LiNO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	30	296
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	31–32.4	251.1–254
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O	32	251
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O	32–36	246.5–247
CaBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	34	115.5
LiBr <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	34	124
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	35–36	265–281
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	36–36.4	146.9–147

Πίνακας 2.4.1.3.3: Εύτητα PCMs-Οργανικά και Ανόργανα, [21]

PCM	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Θερμότητα τήξης (J/kgK)
34% $C_{14}H_{28}O_2$ + 66% $C_{10}H_{20}O_2$	24	147.7
50% $CaCl_2$ + 50% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	25	95
Octadecane +docosane	25.5-27	203.8
Octadecane +heneicosane	25.8-26	173.93
50% $CH_3CONH_2$ + 50% $NH_2CONH_2$	27	163
Ga	30	80.9
47% $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ + 53% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	30	136
60% $Na(CH_3COO) \cdot 3H_2O$ + 40% $CO(NH_2)_2$	30-31.5	200.5-226

Παρατηρούμε ότι τα PCMs που παρατίθενται στους παραπάνω πίνακες και είναι κατάλληλα για κτιριακές εφαρμογές εμφανίζουν θερμοκρασιακό εύρος από 18-40°C. Το παραπάνω θερμοκρασιακό εύρος δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι θερμοκρασίες της επιφάνειας της στέγης και των εξωτερικών τοίχων ενός κτιρίου μπορούν να φτάσουν πάνω από 40°C.[21]

Όσον αφορά την θερμική άνεση, καθορίζεται από την θερμοκρασία λειτουργίας. Αξίζει να αναφερθεί ότι η ASHRAE έχει προτείνει λίστες με θερμοκρασίες και ρυθμούς ροής αέρα για διαφορετικούς τύπους κτιρίων και περιβαλλοντικών συνθηκών. Η προτεινόμενη θερμοκρασία δωματίου είναι 23.5-25.5 °C για καλοκαίρι και 21-23 °C για χειμώνα. Συνεπώς σε κτιριακές εφαρμογές προτιμώνται ΥΑΦ με θερμοκρασία αλλαγή φάσης (18-30°C) ώστε να ανταποκρίνονται στην απαίτηση για θερμική άνεση.



### 2.4.2 Κριτήρια επιλογής PCMs [1],[22]

Το ιδανικό PCM πρέπει να πληροί τις παρακάτω ιδιότητες ώστε να είναι κατάλληλο για κτιριακές εφαρμογές:

#### Θερμοδυναμικές ιδιότητες

- Θερμοκρασία τήξης μέσα στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας. Η διαδικασία επιλογής ενός PCM πρέπει να ξεκινάει ακριβώς από αυτό το σημείο. Δηλαδή θα πρέπει να μετράται το σημείο τήξης και να ελέγχεται ότι πράγματι βρίσκεται μέσα στο εύρος των θερμοκρασιών που προκαλούν θερμική άνεση.
- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα για να παρέχει πρόσθετο απόθεμα αισθητής θερμότητας.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα στερεής και υγρής φάσης για να υπάρχει αποτελεσματική φόρτιση και αποφόρτιση του συστήματος. Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας θεωρείται σταθερή σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής. Στα υλικά αλλαγής φάσης στο σύνολό τους δεν παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, γι' αυτό και επιδιώκεται να υπάρχουν μεγάλες επιφάνειες μετάδοσης θερμότητας.
- Μικρή μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης.
- Ομοιόμορφη τήξη του υλικού αλλαγής φάσης για σταθερή αποθηκευτική ικανότητα του υλικού σε κάθε κύκλο τήξης και πήξης.
- Μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας μετάβασης σε άλλη φάση. Είναι δείκτης αποδοτικότητας του υλικού αλλαγής φάσης.
- Υψηλή πυκνότητα. Και η πυκνότητα είναι δείκτης αποδοτικότητας του υλικού αλλαγής φάσης.
- Χαμηλή τάση ατμών, ώστε να υπάρχει μείωση των απαιτήσεων σταθερότητας του δοχείου που θα περιέχει το PCM.

#### Κινητικές ιδιότητες

- Υψηλός βαθμός πυρηνοποίησης για να αποφευχθεί υπέρψυξη της υγρής φάσης.
- Υψηλός βαθμός ανάπτυξης κρυστάλλων.

### Χημικές ιδιότητες

- Εντελώς αναστρέψιμος κύκλος ψύξης-τήξης.
- Απουσία χημικής αποικοδόμησης μετά από μεγάλο αριθμό κύκλων τήξης-ψύξης, δηλαδή μακροπρόθεσμη χημική σταθερότητα.
- Απουσία διαβρωτικότητας στα υλικά κατασκευής.
- Μη τοξικά, μη εύφλεκτα και μη εκρηκτικά υλικά για λόγους ασφαλείας.

### Οικονομικές ιδιότητες

- Αφθονα.
- Διαθέσιμα.
- Ανακυκλώσιμα, ώστε να είναι φιλικά προς το περιβάλλον.
- Οικονομικά προσεγγίσιμα. Το χαμηλό κόστος και η υψηλή διαθεσιμότητα των υλικών αλλαγής φάσης είναι ένας πολύ σημαντικός άξονας ανάπτυξης και διάδοσης της εφαρμογής τους.

### Περιβαλλοντικές ιδιότητες

- δυνατότητα ανακύκλωσης
- χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μη ρυπογόνο κατά την διάρκεια ζωής του

## 2.5 Μέτρηση ιδιοτήτων PCM

Η απόδοση του παθητικού συστήματος λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης συνδέεται άμεσα με τις ιδιότητες του επιλεγμένου PCM.[21] Οι Akrcar και Medved και οι Cho και Choi έδειξαν ότι η άριστη γνώση των ιδιοτήτων των PCMs είναι απαραίτητη για να αναλυθεί σωστά ένα σύστημα λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης.[1] Εάν ένα νέο σύστημα πρόκειται να αναπτυχθεί ή να βελτιστοποιηθεί πρέπει να είναι γνωστές εκ των προτέρων οι ιδιότητες του PCM. Ωστόσο, τα στοιχεία που παρέχονται από τους κατασκευαστές των PCMs μπορεί να είναι εσφαλμένα, αβέβαια και υπερβολικά αισιόδοξα. Η ασυνέπεια αυτή επισημαίνεται από πολλούς συγγραφείς.[23] Κατά συνέπεια, πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις προκειμένου να παρθούν οι σωστές τιμές των ιδιοτήτων των PCMs. Μερικές τεχνικές μέτρησης που έχουν αναπτυχθεί παρουσιάζονται στην συνέχεια.[21]

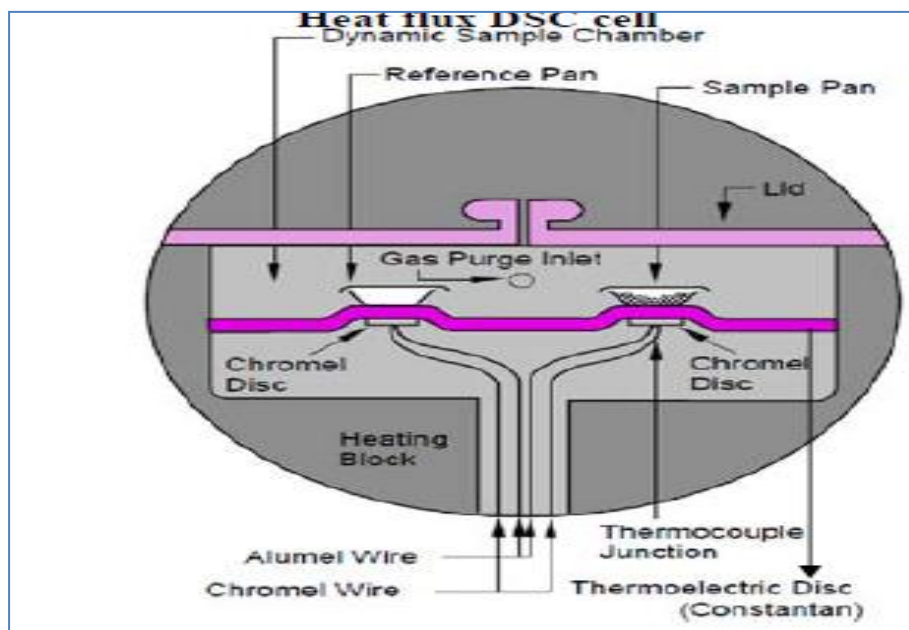
### 2.5.1 Μέθοδοι μέτρησης ειδικής θερμοχωρητικότητας

Η αλλαγή φάσης λαμβάνει χώρα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος και όχι σε μια σταθερή θερμοκρασία. Συνεπώς, η ειδική θερμοχωρητικότητα και η ενθαλπία του PCM πρέπει να είναι γνωστές συναρτήσει της θερμοκρασίας.[24]

#### 2.5.1.1 Μέθοδος DSC [21],[25]

Είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης ιδιοτήτων και αφορά τη μέτρηση θερμικής ικανότητας για πολύ μικρά δείγματα. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην ανίχνευση διαφορών στις θερμικές αντιδράσεις στις οποίες υποβάλλεται το υλικό αναφοράς που εξετάζουμε και ένα δείγμα μέσω ενός θερμοκρασιακού προγράμματος. Για τα υλικά αλλαγής φάσης η μέθοδος DSC υπολογίζει τις καμπύλες τήξης και στερεοποίησης και τις συνδεδεμένες μ' αυτές τιμές της λανθάνουσας θερμότητας. Μπορεί να αποδώσει γραφήματα θερμορροής - θερμοκρασίας, με την παρακάτω διαδικασία.

Γνωστή ποσότητα μάζας υλικού αλλαγής φάσης τοποθετείται σε κλειστό δοχείο με γνωστό όγκο. Αυτό το δοχείο, όπως και άλλο ένα ίδιο, άδειο, τοποθετούνται μέσα στη διάταξη DSC. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται με γνωστό και σταθερό ρυθμό, μετράται πόσο περισσότερη θερμότητα απαιτεί το υπό μελέτη δοχείο, ώστε να διατηρεί τη θερμοκρασία του σταθερή και ίδια μ' αυτή του άδειου δοχείου. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει συνεχώς, σε κάποιο σημείο θα φτάσει τη θερμοκρασία τήξης του υλικού αλλαγής φάσης.



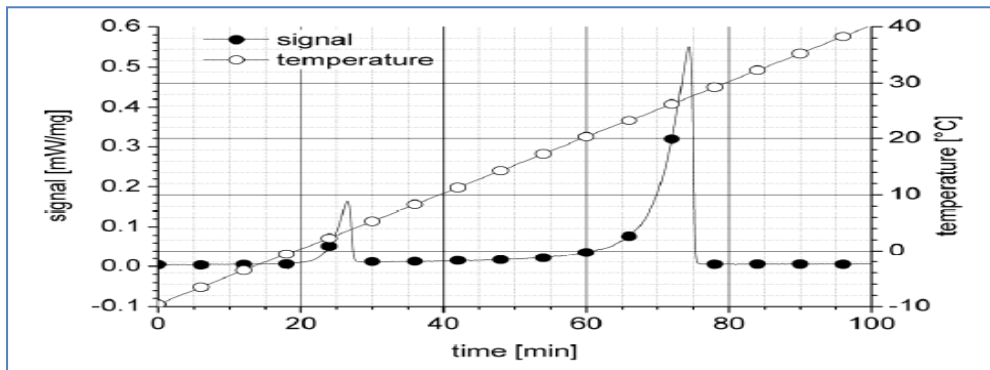
Σχήμα 2.5.1.1.1: Διάταξη μεθόδου DSC [21]

### DSC με σταθερό ρυθμό θέρμανσης και ψύξης (dynamic mode)

Ο πιο κοινός τρόπος για την θέρμανση ενός δείγματος στη μέθοδο DSC είναι η θέρμανση με σταθερό ρυθμό. Τυπικές τιμές για τη ρυθμούς θέρμανσης και ψύξης για τη μέτρηση της ειδικής θερμότητας είναι από 2 έως 10K/min. Το σήμα είναι ανάλογο της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του δείγματος και του υλικού αναφοράς. Η ειδική θερμότητα του δείγματος ( $C_p$ ) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ( $C_p(T)$ ) καθορίζεται από το υλικό αναφοράς. Από τα δεδομένα αυτά η θερμότητα που αποθηκεύεται μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωση.

Η μέθοδος DSC με σταθερό ρυθμό θέρμανσης δεν είναι η βέλτιστη για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας στα PCMs.

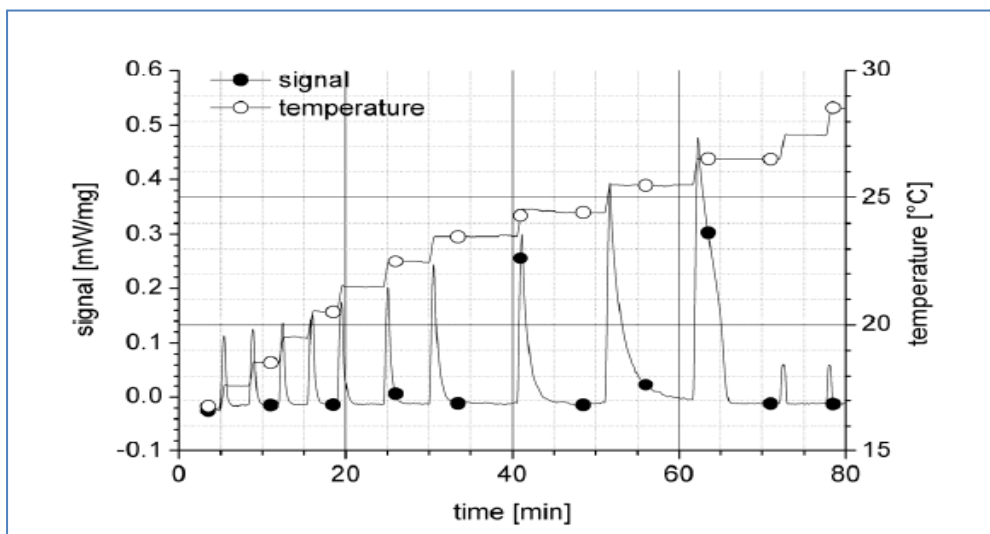
Ένα τυπικό σήμα και διάγραμμα θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια ενός κεκλιμένου επιπέδου θέρμανσης απεικονίζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.5.1.1.2: Τυπική ροή θερμότητας και εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια ενός σταθερού ρυθμού θέρμανσης δυναμικής μέτρησης DSC [25]

### Ισοθερμική θέρμανση και ψύξη

Πρόκειται για άλλη μια μέθοδο συλλογής δεδομένων για τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας σε ένα υλικό. Σε αυτή την περίπτωση το υλικό θερμαίνεται κατά βήματα σε δεδομένα θερμοκρασιακά διαστήματα. Το δείγμα ακολουθεί τα βήματα με κάποια χρονική καθυστέρηση και τότε ανιχνεύεται το σήμα. Όταν το σήμα επιστρέψει στο μηδέν, τότε το δείγμα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία. Τότε το δείγμα θερμαίνεται ξανά. Η περιοχή κάτω από κάθε κορυφή είναι ανάλογη με τη θερμότητα που απορρόφησε το δείγμα.



Σχήμα 2.5.1.1.3: Τυπική ροή θερμότητας και εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μιας βηματικής ισοθερμικής μέτρησης, [25]

Το μεγάλο πλεονέκτημα σε σύγκριση με τη δυναμική λειτουργία είναι ότι η αβεβαιότητα στη θερμοκρασία είναι επακριβώς γνωστή, καθώς περιορίζεται στο μέγεθος βήματος. Μείωση στο μέγεθος του βήματος οδηγεί σε καλύτερη ανάλυση της θερμοκρασίας.

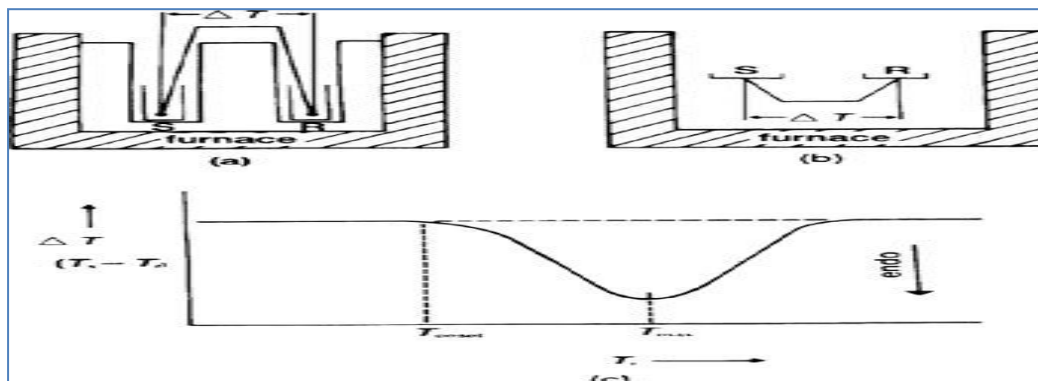
### 2.5.1.2 Μέθοδος DTA [21],[26],[27]

Η μέθοδος DTA περιλαμβάνει τη θέρμανση ή την ψύξη ενός δείγματος και ενός αδρανούς υλικού αναφοράς κάτω από όμοιες συνθήκες, καταγράφοντας ταυτόχρονα τις θερμοκρασιακές διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ τους. Η ύπαρξη του αδρανούς δείγματος συμβάλλει στον εντοπισμό των αλλαγών του δείγματος που μελετάμε, που οφείλονται στην απορρόφηση ή στην έκλυση θερμότητας.

Ο λόγος που η μέθοδος DTA μπορεί να εφαρμοστεί στη μελέτη θερμικών ιδιοτήτων και αλλαγών φάσης που δε χαρακτηρίζονται από ενθαλπικές μεταβολές, είναι ότι θερμοκρασιακές διαφορές μπορούν να προκύψουν μεταξύ δείγματος και αδρανούς υλικού αναφοράς, αλλά και μεταξύ δύο αδρανών δειγμάτων, όταν η απόκρισή τους στην προσφερόμενη θερμότητα είναι διαφορετική.

Η γενική διάταξη διεξαγωγής της μεθόδου DTA αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

- Μία συσκευή συγκράτησης δείγματος κατάλληλα συνδεδεμένη με θερμοζεύγη, δοχεία δειγμάτων και μία κεραμική ή μεταλλική κατασκευή (block)
- Την εστία
- Μία συσκευή προγραμματισμού θερμοκρασίας
- Ένα καταγραφικό σύστημα

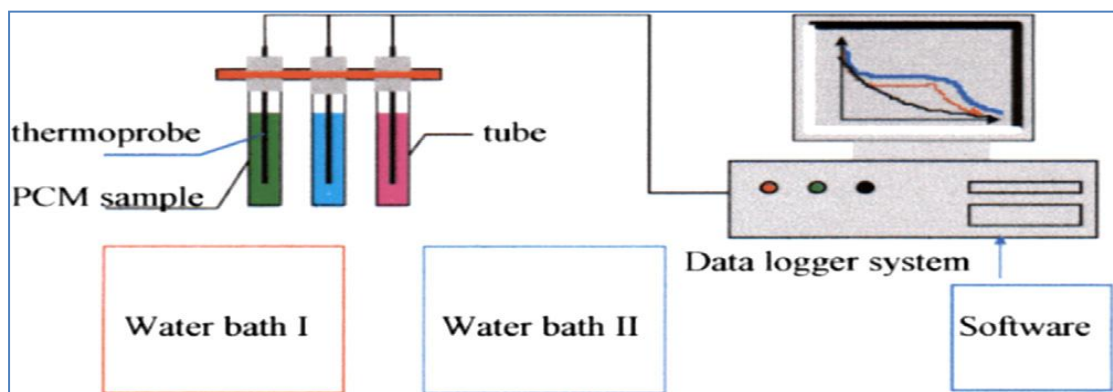


Σχήμα 2.5.1.2.1: Τυπική πειραματική διάταξη DTA, και καμπύλη DTA , [26]

### 2.5.1.3 Μέθοδος T-history [23],[28]

Η μέθοδος T-history προτάθηκε από τον Zhang ως ένας φθηνός και εύκολος τρόπος αξιολόγησης ενός υποψηφίου PCM όσο αναφορά την ενθαλπία αλλαγής φάσης του. Η μέθοδος βελτιώθηκε από διάφορους συγγραφείς ώστε να είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό του εξαρτώμενου από τη θερμοκρασία  $C_p$ .

Η μέθοδος περιλαμβάνει δύο πανομοιότυπα δοχεία που περιέχουν το δείγμα και ένα πρότυπο υλικό, τα οποία τοποθετούνται σε ένα μονωμένο δοχείο. Οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του δοχείου, του δείγματος και του πρότυπου υλικού καταγράφονται. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος μεταβάλλεται ακαριαία. Η απόκριση του δείγματος και του υλικού αναφοράς στη μεταβολή αυτή εξαρτάται από τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες. Με τη βοήθεια του υλικού αναφοράς βαθμονομείται η θερμική αντίσταση ανάμεσα στο περιβάλλον και στο δοχείο και προσδιορίζονται η θερμική αγωγιμότητα και η ενθαλπία του δείγματος συναρτήσει της θερμοκρασίας.

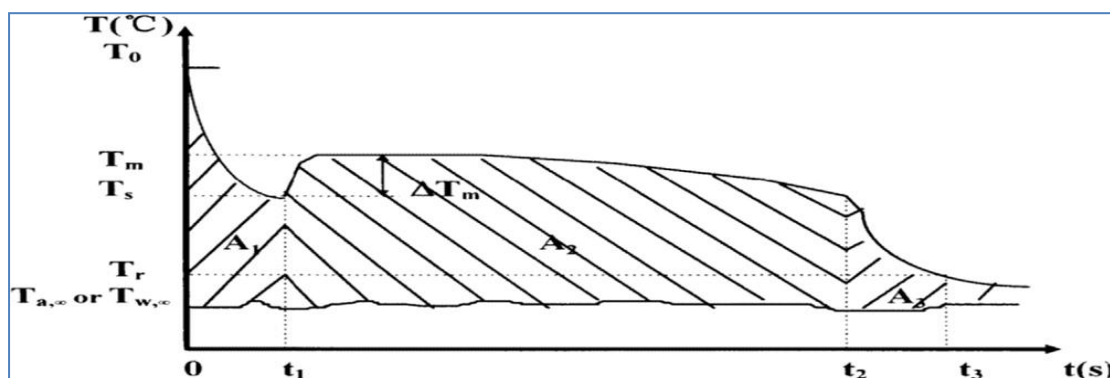


Σχήμα 2.5.1.3.1: Πρώτη πειραματική διάταξη της T-history, [28]

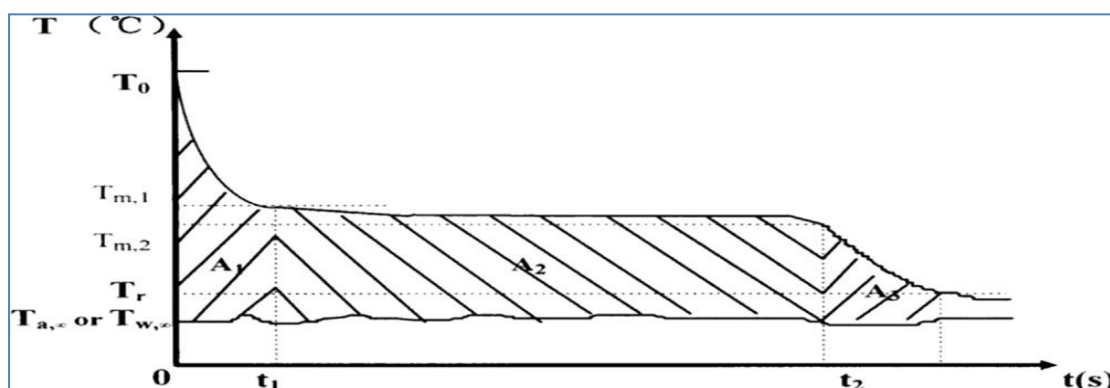
Σε αντίθεση με τη μέθοδο DSC, στη μέθοδο T-history το σήμα δεν λαμβάνεται από τη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα σε δείγμα και πρότυπο, αλλά από τις θερμοκρασιακές διαφορές σε σχέση με το περιβάλλον του δοχείου. Έτσι, ο λόγος σήμα προς θόρυβο μπορεί να κρατηθεί αρκετά υψηλός ακόμα και για πολύ αργές μετρήσεις. Για το λόγο αυτό η μέτρηση αυτή είναι κατάλληλη για την απόκτηση δεδομένων σε μεγάλα δείγματα.

Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό γιατί τα περισσότερα PCMs είναι μίγματα υλικών και μόνο μεγάλα δείγματα μπορούν να εξασφαλίσουν ότι η μέτρηση έχει γίνει επί της σωστής σύνθεσης. Ακόμα, πολλά PCMs παρουσιάζουν το πρόβλημα της υπόψυξης (subcooling), που μπορεί να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του δείγματος. Σε μια τυπική εφαρμογή, το PCM χρησιμοποιείται σε συσκευασία τουλάχιστον 100ml. Το μέγεθος του δείγματος σε μια μέτρηση θα πρέπει επομένως να είναι παρόμοιο με αυτό της εφαρμογής, έτσι ώστε τα αποτελέσματα όσο αναφορά το φαινόμενο της υπόψυξης να είναι αξιοποιήσιμα.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του δείγματος και της αναφοράς όταν υπόκεινται σε ψύξη.

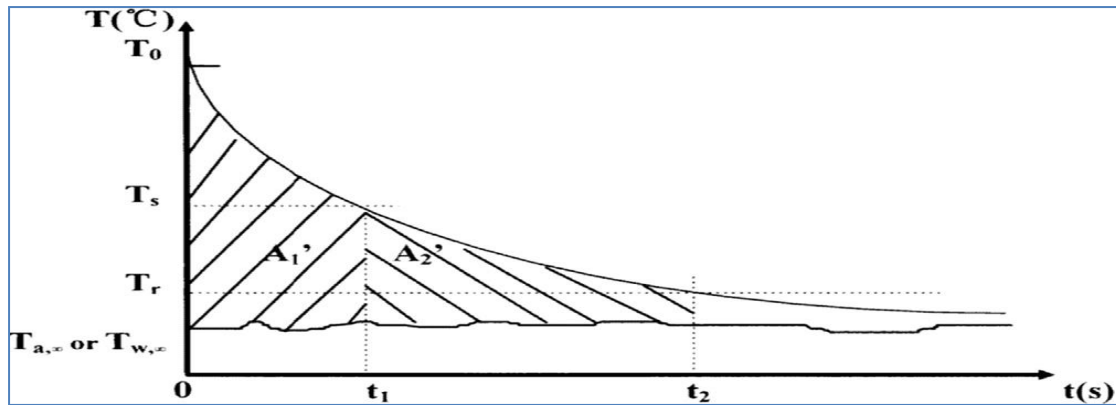


Σχήμα 2.5.1.3.2: Θερμοκρασία ψύξης συναρτήσει του χρόνου όταν το ΥΑΦ εμφανίζει υπέρψυξη,[28]



Σχήμα 2.5.1.3.3: Θερμοκρασία ψύξης συναρτήσει του χρόνου όταν το ΥΑΦ δεν εμφανίζει υπέρψυξη, [28]





Σχήμα 2.5.1.3.4: Θερμοκρασία ψύξης συναρτήσει του χρόνου του δείγματος αναφοράς (νερό), [28]

## 2.5.2 Μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας [21],[24],[29]

Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του PCM όσον αφορά την θερμική αγωγιμότητα, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί αρχικά η θερμική αγωγιμότητα του PCM ή του σύνθετου PCM.

Η θερμική αγωγιμότητα ενός δείγματος μπορεί να μετρηθεί με

- ο Μεθόδους σταθερής κατάστασης (steady state methods)
- ο Μεθόδους μη σταθερής κατάστασης (non-steady state methods)

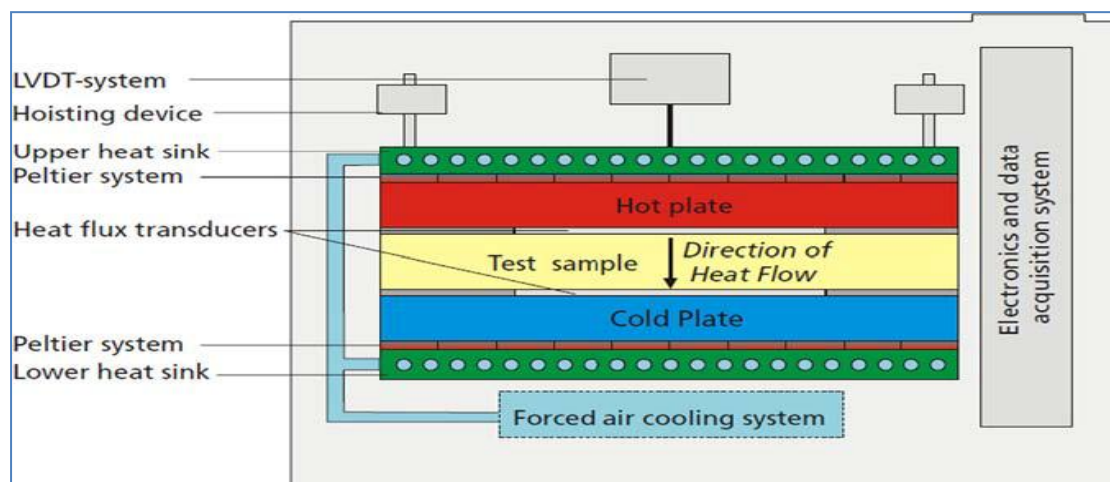
### 2.5.2.1 Steady state methods

Σε αυτή την μέθοδο, οι μετρήσεις γίνονται όταν η θερμοκρασία του PCM είναι σταθερή. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί η θερμική αγωγιμότητα σε μεθόδους steady state αναλύονται στην συνέχεια.

#### Μετρητής ροής θερμότητας (heat flow meter method)

Πρόκειται για μια μέθοδο η οποία είναι απλή στην σύλληψη, γρήγορη και κατάλληλη για ένα ευρύ φάσμα δειγμάτων.

Επιπλέον, μπορεί να εφαρμοστεί σε υλικά που έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, δηλαδή σε υλικά των οποίων η θερμική αγωγιμότητα κυμαίνεται από 0.005-0.5 W/mK, και παρέχει ακριβή αποτελέσματα εφόσον έχει βαθμονομηθεί σωστά.



Σχήμα 2.5.2.1.1: Μετρητής ροής θερμότητας, [21]

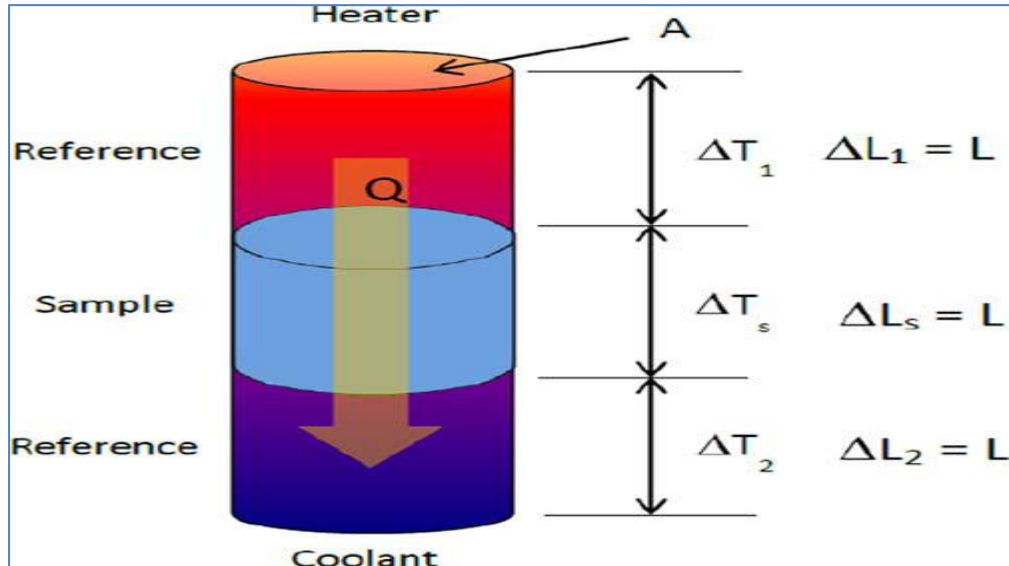
Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται ο μετρητής ροής θερμότητας. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε και από το σχήμα, το εξεταζόμενο δείγμα τοποθετείται μεταξύ δύο παράλληλων πλακών διαφορετικής θερμοκρασίας η καθεμία (η μια πλάκα είναι ψυχρή και η άλλη πλάκα είναι θερμή) και με την χρήση ενός βαθμονομημένου αισθητήρα μπορεί να μετρηθεί η ροή θερμότητας. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν επέλθει θερμική ισορροπία.

### Cut bar comparative method

Πρόκειται για μια μέθοδο μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε υλικά τα οποία έχουν θερμική αγωγιμότητα που κυμαίνεται από 0.2-200W/mK, με θερμοκρασιακός εύρος μεταξύ 90 και 1300K.

Το εξεταζόμενο δείγμα όπως μπορούμε να διακρίνουμε και από το παραπάνω σχήμα τοποθετείται μεταξύ δυο δειγμάτων αναφοράς, των οποίων οι ιδιότητες τους είναι γνωστές, και η θερμότητα μεταφέρεται από πάνω προς τα κάτω.

Στις συνθήκες ισορροπίας, η θερμική αγωγιμότητα προέρχεται συγκρίνοντας την θερμική κλίση του δείγματος δοκιμής και των δειγμάτων αναφοράς.



Σχήμα 2.5.2.1.2: Cut bar comparative method, [21]

## 2.5.2.2 Non-steady state method

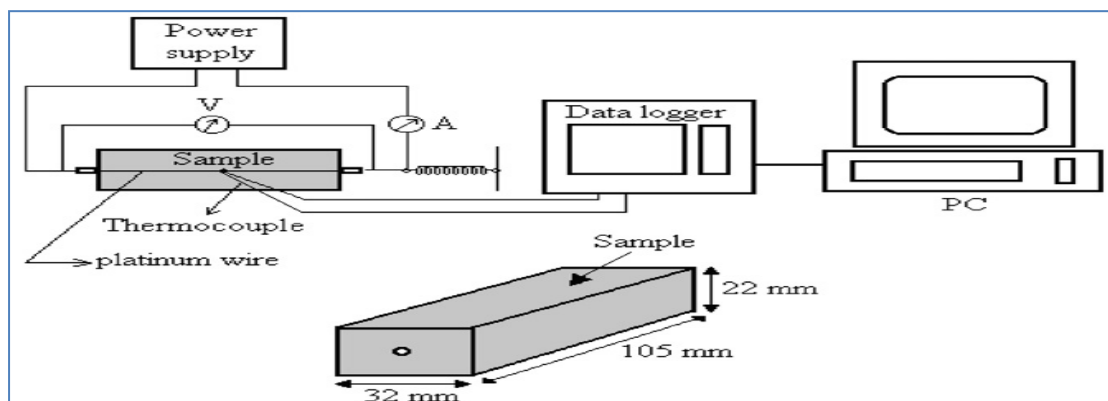
### Hot wire method

Σύμφωνα με τα Διεθνή Πρότυπα (GB/T 10297-1998) , αυτή η μέθοδος προτείνεται για μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των ισοτροπικών υλικών με θερμική αγωγιμότητα μικρότερη από 0.2 W/mK.

Αξίζει να αναφερθεί ότι αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί προκειμένου να διερευνηθεί η θερμική αγωγιμότητα καθαρού PCM και PCM με διάφορες ποσότητες ινών γραφίτη.

Σε αυτή την μέθοδο, εφαρμόζεται σταθερό ηλεκτρικό ρεύμα σε καθαρό σύρμα πλατίνας, το οποίο εφαρμόζεται στο δείγμα. Το δείγμα διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία και ο ρυθμός με τον οποίο θερμαίνεται το σύρμα εξαρτάται από το πόσο γρήγορα ρέει η θερμότητα από το σύρμα στο δείγμα. Η αύξηση της θερμοκρασίας του σύρματος μετρείται από την αύξηση της αντίστασης του.

Όσον αφορά τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να εφαρμοστεί εξίσωση Fourier.



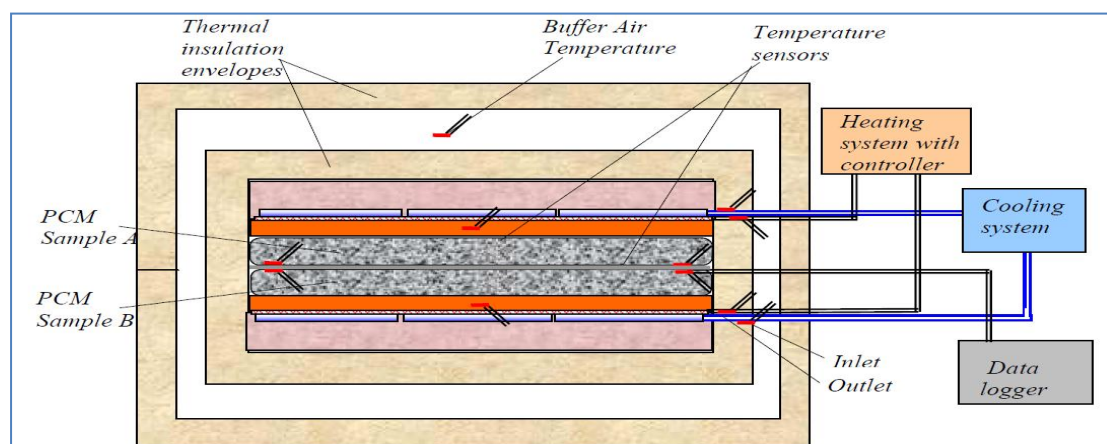
Σχήμα 2.5.2.2.1: Hot wire method, [29]

### 2.5.3 Double cell [30]

Πρόκειται για μια νέα μέθοδο θερμοδομέτρησης η οποία αναπτύχθηκε με σκοπό την μέτρηση και την σύγκριση της λανθάνουσας θερμοχωρητικότητας PCM πάνω από πολυάριθμους κύκλους.

Στην συγκεκριμένη μέθοδο η θερμοχωρητικότητα προσδιορίζεται με μέτρηση της θερμικής ενέργειας που απαιτείται μέχρι να λιώσει το δείγμα PCM κάτω από σωστά καθορισμένες συνθήκες.

Η τεχνική της δοκιμής βασίζεται σε μια εναλλακτική συμμετρική θέρμανση και ψύξη υπό ελεγχόμενες συνθήκες ενός σχετικά μεγάλου δείγματος PCM (1-2kg) το οποίο τοποθετείται σε ένα καλά μονωμένο περιβλήμα.



Σχήμα 2.5.3.1: Συσκευή Double-Cell, [30]

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε και από την εικόνα της συσκευής, το δείγμα PCM χωρίζεται σε δύο τμήματα ίσου μεγέθους, μέσα σε δύο πλαστικούς θυλάκους και τίθεται σε κατακόρυφη θέση σε καλά θερμοικά μονωμένο κουτί. Οι θύλακες διαχωρίζονται από μία λεπτή μεμβράνη μετάλλου και είναι παρεμβάλλονται μεταξύ δυο πλακών χαλκού ψύξης/θέρμανσης και είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες θερμοκρασίας που βρίσκονται και στις δύο πλευρές των θυλάκων. Οι θύλακες υποβάλλονται σε κύκλους εναλλακτικής θέρμανσης (ηλεκτρική θέρμανση) και ψύξης (ψυκτικό υγρό).

Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, ο ρυθμιστής της θερμοκρασίας προσαρμόζει αυτόματα τη θερμοκρασία των θερμοαντικών πλακών στην προκαθορισμένη θερμοκρασία (π.χ. 60 ° C για τον κύκλο θέρμανσης). Ο κύκλος θερμάνσεως διαρκεί όσο απαιτείται για την επίτευξη της προκαθορισμένης θερμοκρασίας στον εσωτερικό χώρο μεταξύ των δειγμάτων PCMs. Συνήθως αυτή η θερμοκρασία ρυθμίζεται περίπου 5 ° C πάνω από τη θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης που δοκιμάζεται. Γίνεται η παραδοχή ότι όταν όλοι οι αισθητήρες της θερμοκρασίας για το δείγμα υπερβαίνουν θερμοκρασία που έχει τεθεί το ΥΑΦ έχει λιώσει. Μετά ολοκλήρωση της τήξης του PCM το σύστημα ηλεκτρικής θέρμανσης παύει να λειτουργεί και ενεργοποιείται το σύστημα ψύξης.

Το ψυκτικό υγρό, με μια θερμοκρασία περίπου 8 ° C, κυκλοφορεί μέσω σωλήνωσης που είναι συγκολλημένη στις πλάκες χαλκού. Ο κύκλος ψύξης συνεχίζεται μέχρις ότου η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου μεταξύ των δειγμάτων PCMs μειωθεί περίπου 6°C κάτω από το επίπεδο της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης και κατά συνέπεια επιτυγχάνεται η στερεοποίηση του PCM. Μόλις το όριο χαμηλής θερμοκρασία επιτευχθεί ο κύκλος ψύξης θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί, το νερό ψύξης διακόπτεται και ενεργοποιείται το σύστημα ηλεκτρικής θέρμανσης.

Η κατανάλωση ενέργειας μετράται μόνο κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης, και καταγράφεται για τον υπολογισμό της θερμοχωρητικότητας του PCM. Οι μετρήσεις της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται για την θέρμανση είναι απλές και ακριβείς. Οι μετρήσεις της ηλεκτρικής ενέργειας, διορθωμένες για την αισθητή θερμοότητα του δείγματος PCM, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της λανθάνουσας θερμότητας. Οι μετρήσεις της λανθάνουσας θερμότητας πραγματοποιούνται ανά εκατό κύκλους και κατά μέσο όρο πάνω από 10 κύκλους για να βελτιωθεί η ακρίβεια.

## 2.6 Συνήθη προβλήματα και τρόποι αντιμετώπισής τους

Συνήθως, το υποψήφιο PCM δεν πληροί όλες τις απαιτήσεις, οι οποίες αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Παρόλα αυτά, είναι πολύ πιθανό να χρησιμοποιηθεί εάν αναπτυχθούν τεχνικές για να λυθούν ή να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα που εμφανίζονται κατά την λειτουργία του υποψήφιου PCM. [31]

Κατά την λειτουργία του PCM τα συνήθη προβλήματα που μπορεί να εμφανιστούν και καθίστανται αναγκαίο να επιλυθούν είναι τα ακόλουθα

- ο Διαχωρισμός φάσης
- ο Υπέρψυξη ή υπόψυξη
- ο Ανεπαρκής μεταφορά θερμότητας

### 2.6.1 Διαχωρισμός φάσεων [17],[32]

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

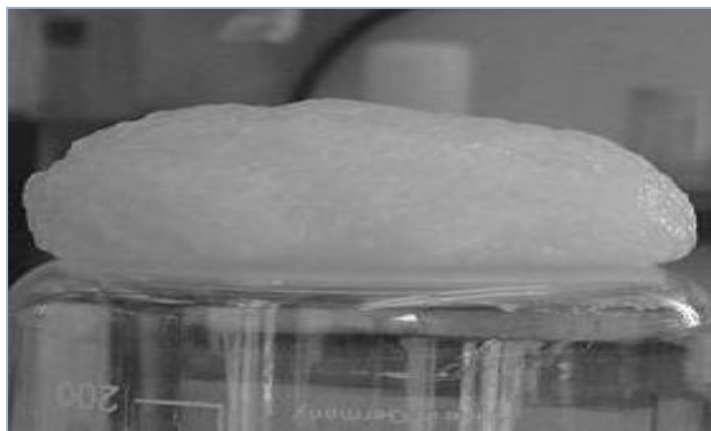
Η ημι-ομοιόμορφη τήξη συμβαίνει όταν το PCM έχει δύο ή περισσότερες ένυδρες μορφές με διαφορετικές συστάσεις στερεού μέρους και διαφορετικά σημεία τήξης. Η ανομοιόμορφη τήξη λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που κατά την τήξη του PCM εμφανίζονται δύο ξεχωριστές φάσεις: ένα κορεσμένο διάλυμα και ένα ίζημα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

μίγματος (ανομοιόμορφη τήξη), δημιουργώντας μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συχνή εξασθένιση των ιδιοτήτων τους. Προφανώς, λόγω της διαφοράς πυκνότητας των δύο αυτών φάσεων, η στερεή φάση κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου αποθήκευσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αποσύνθεση του υλικού (ή διαχωρισμός των φάσεων).

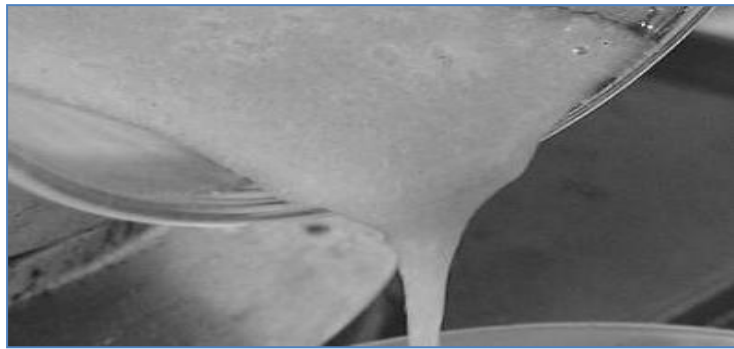
Το πρόβλημα με το διαχωρισμό των φάσεων είναι ότι μπορεί να μειώσει σημαντικά την πυκνότητα αποθήκευσης. Επειδή σε τοπικό επίπεδο η σωστή συγκέντρωση των μορίων για το σχηματισμό του PCM δεν είναι πια δεδομένη, το PCM δεν μπορεί να στερεοποιηθεί ολόκληρο. Αυτό σημαίνει ότι η λανθάνουσα θερμότητα της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

Η κύρια προσέγγιση προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα του διαχωρισμού φάσης είναι: [31]

- προσθήκη παραγόντων πύκνωσης
- χρησιμοποιώντας περίσσεια νερού
- μηχανική ανάδευση
- ενθυλακώνοντας το PCM ώστε να μειωθεί ο διαχωρισμός
- τροποποιώντας την χημική σύνθεση του συστήματος και καθιστώντας το ασύμβατο υλικό συμβατό



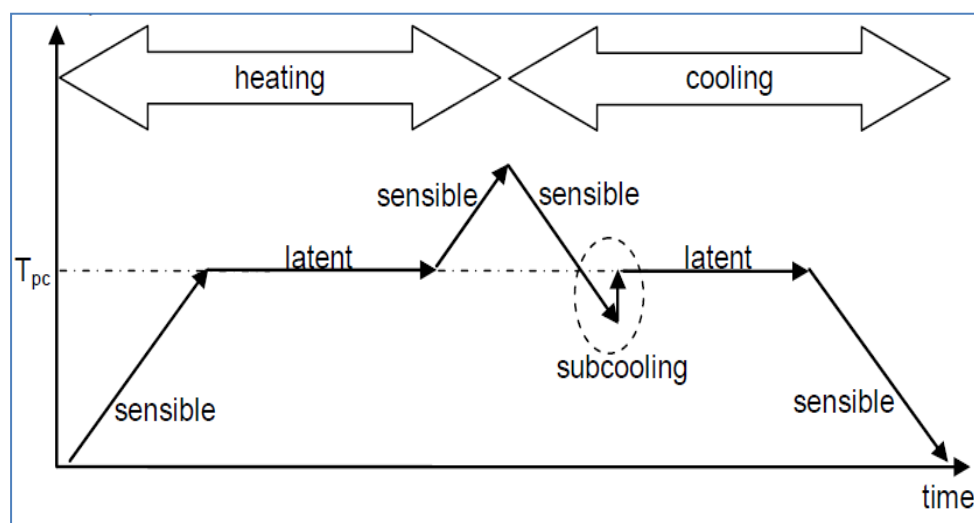
**Σχήμα 2.6.1.1:** Νερό πηκτωματοποιημένο με ένα παράγωγο κυτταρίνης, [17]



Σχήμα 2.6.1.2: Συμπυκνωμένο ένυδρο άλας, [17]

## 2.6.2 Υπέρψυξη ή υπόψυξη [17],[31]

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

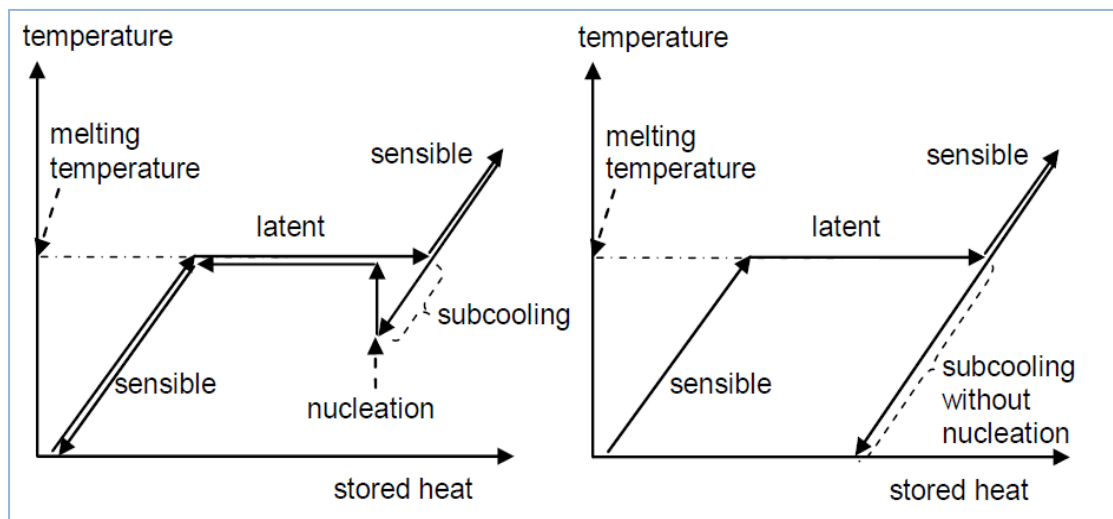


Σχήμα 2.6.2.1: Σχηματική απεικόνιση αλλαγής της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της θέρμανσης (τήξη) και της ψύξης (στερεοποίηση) ενός PCM με υπόψυξη, [17]



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

Ερμηνεύοντας την καμπύλη ψύξης του PCM με υπόψυξη, παρατηρείται σαφώς η πτώση της θερμοκρασίας του υλικού κάτω από την αντίστοιχη θερμοκρασία στερεοποίησης του, πριν ακόμη ξεκινήσει η διαδικασία αλλαγής φάσης.



**Σχήμα 2.6.2.2:** Επίδραση της υπόψυξης για την αποθήκευση θερμότητας. Αριστερά: με λίγη υπόψυξη και πυρήνωση, δεξιά: σοβαρή υπόψυξη χωρίς πυρήνωση, [17]

### Αντιμετώπιση προβλήματος [31]

Το πρόβλημα της υπόψυξης (ή υπέρψυξης) μπορεί να αντιμετωπιστεί με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Προσθήκη παράγοντα σχηματισμού πυρήνων
- Μηχανική ανάδευση
- Προσθήκη κάποιας μεθόδου πρόσμειξης
- Τεχνική ψυχρού δαχτύλου
- Ενθυλακώση του PCM ώστε να μειωθεί η υπέρψυξη

### 2.6.3 Ανεπαρκής μεταφορά θερμότητας [2],[21],[24]

Ένα κύριο θέμα που απαιτεί προσοχή είναι ότι τα περισσότερα PCM έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Όλα τα συμβατικά PCM, οργανικά και ανόργανα, παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα η οποία κυμαίνεται από 0.1 έως 0.6 W/mK.

Τέτοιες χαμηλές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας παρατείνουν τις περιόδους φόρτισης και αποφόρτισης στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Όσον αφορά τα κτίρια, οι περίοδοι φόρτισης και αποφόρτισης αφορούν το εικοσιτετράωρο. Την ημέρα λαμβάνει χώρα η φόρτιση και την νύχτα η αποφόρτιση. Με το πέρας της διαδικασίας κλείνει ένας κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης (24 ώρες). Ως επακόλουθο της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας των PCM, μπορεί να μην χρησιμοποιηθεί όλη η λανθάνουσα θερμότητα ή το PCM να μην αποφορτιστεί πλήρως και να μην είναι ικανό να απορροφήσει θερμότητα την επόμενη μέρα.

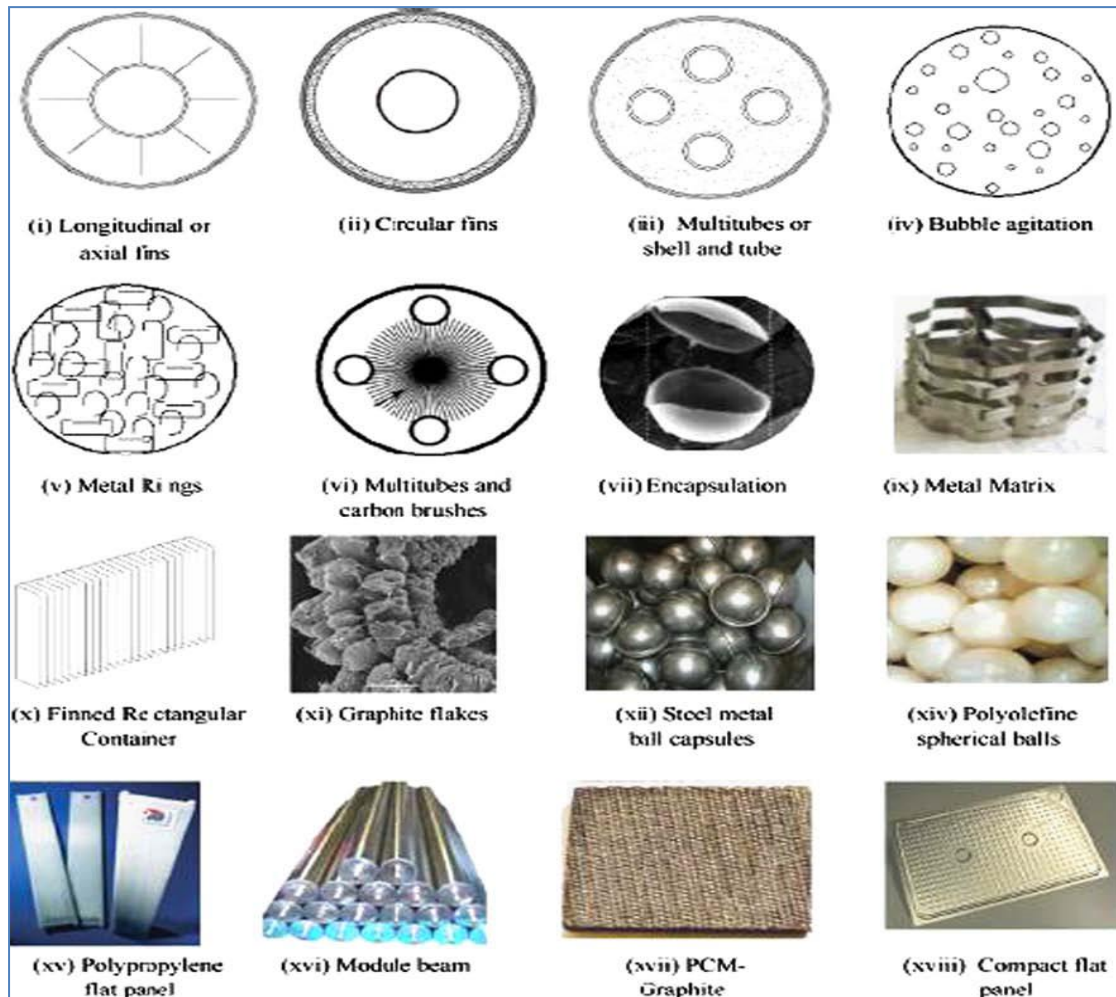
Για την αποφυγή της δυσλειτουργίας του συστήματος εξαιτίας της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του PCM απαιτείται μια στρατηγική προκειμένου να ενισχυθεί η μεταφορά θερμότητας.

Πολλές από τις μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί προκειμένου να βελτιωθεί η θερμική αγωγιμότητα των συμβατικών PCM είναι:

- Εμποτισμός του PCM με πορώδη υλικά υψηλής αγωγιμότητας (μήτρες χαλκού, αλουμινίου, γραφίτη, αφρώδη μέταλλα)
- Διασπορά εξαιρετικά αγωγίμων υλικών στο PCM (γραφίτης, αλουμίνιο, χαλκός, ασήμι)
- Τοποθέτηση μεταλλικών κατασκευών στο PCM (μικρά δαχτυλίδια, χάντρες μετάλλου, μεταλλικά πτερύγια)
- Χρήση ινώδη υλικών, δηλαδή χαμηλής πυκνότητας πολύ αγωγίμων υλικών στο PCM (ίνες άνθρακα)
- Μικροενθυλακώνοντας το PCM (μπάλες χάλυβα)

Αυτό δείχνει ότι η θερμική αγωγιμότητα του PCM μπορεί να βελτιωθεί ενσωματώνοντας υλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Ωστόσο, η προσθήκη αυτών των υλικών μπορεί να οδηγήσει στην μείωση της χωρητικότητας αποθήκευσης του καθαρού PCM. Έτσι είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το βέλτιστο κλάσμα μάζας/όγκου το οποίο θα οδηγήσει στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του PCM χωρίς να επιδράσει σημαντικά στην χωρητικότητα αποθήκευσης του καθαρού PCM.

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζονται ορισμένοι τρόποι που χρησιμοποιούνται προκειμένου να βελτιωθεί η θερμική αγωγιμότητα των PCMs.



Σχήμα 2.6.3.1: Μέθοδοι βελτίωσης της μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται στην έρευνα των PCM, [21]

## 2.6.4 Επιβράδυνση της φλόγας [2],[33]

Τα τελευταία χρόνια, αυστηροί κανόνες ασφαλείας και απαιτήσεις ευφλεκτότητας έχουν υποβληθεί στα δομικά υλικά προκειμένου να προστατεύονται τα κτίρια από κινδύνους φωτιάς.

Η χαμηλή θερμική σταθερότητα και η κακή αντίσταση στην φλόγα έχουν περιορίσει σημαντικά ευρύτερες εφαρμογές, ειδικά στην οικοδόμηση και στα αεροδιαστημικά πεδία. Συνάγεται, ότι έρευνα για την βελτίωση των θερμικών και των ιδιοτήτων αντίστασης στην φλόγα των PCM σταθερής μορφής είναι πολύ σημαντική.

Οι Salyer και Sircar μελέτησαν διάφορες τεχνολογικές προσεγγίσεις για την βελτίωση της επιβράδυνσης της φλόγας γυψοσανίδας με PCM

- ο προσθήκη εναλλακτικών μη-εύφλεκτων επιφανειών στην γυψοσανίδα (π.χ. φύλλο αλουμινίου, φιλμ χλωριδίου πολυβινυλίου)
- ο σύστημα διαδοχικής διαχείρισης για γυψοσανίδες, αρχικά PCM και έπειτα ένα αδιάλυτο υγρό επιβραδυντικό φωτιάς
- ο χρησιμοποιώντας βρωμιούχο εξαδεκανίο και οκταδεκάνιο ως PCM. Αναμένεται ότι όταν αυτές οι αλογονωμένες ενώσεις PCM συνδυάζονται με το οξείδιο του αντιμονίου σε γυψοσανίδα, το προϊόν θα είναι αυτοσβηγόμενο

Ο Banu και οι συνεργάτες του διεξήγαγαν τεστ ευφλεκτότητας σε γυψοσανίδες εμποτισμένες με 24% περίπου οργανικού PCM και αξιολόγησαν τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής καύσης. Σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών με παρόμοια δεδομένα για άλλα δομικά υλικά έδειξε την πιθανότητα μείωσης της ευφλεκτότητας των γυψοσανίδων με ενσωμάτωση επιβραδυντή φλόγας.

## 2.7 Εμπορικά διαθέσιμα PCMs

Μέχρι το 1990, μόνο περίπου 12 επιχειρήσεις, κυρίως στις ΗΠΑ, ασχολούνταν με την κατασκευή των προϊόντων αποθήκευσης της θερμότητας. [34]

Προς το παρόν, οι κύριες εταιρείες εφοδιασμού στην αγορά υλικών αλλαγής φάσης για αποθήκευση θερμότητας και κρύου είναι οι ακόλουθες [34]

- Cristopia (Γαλλία)
- TEAP Energy (Αυστραλία)
- Rubitherm GmbH (Γερμανία)
- EPS Ltd (UK)
- PCM Thermal Solutions (USA)
- Climator (Σουηδία)
- Mitsubishi Chemical (Ιαπωνία)

Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται ορισμένα εμπορικά PCMs [35]

Πίνακας 2.7.1: Εμπορικά PCMs					
PCM	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Θερμότητα τήξης (kJ/kg)	Θερμοχωρητικότητα (kJ/kgK)	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	Εταιρεία
RT 20	22	172	-	-	Rubitherm GmbH
RT 25	25	147	2.9(s) 2.1(l)	1.02(s) 0.56(l)	Rubitherm GmbH
RT 27	26-28	179	1.8(s) 2.4 (l)	0.2	Rubitherm GmbH
STL 27	27	213	-	-	Mitsubishi Chemicals
Climsel C23	23	148	-	-	Climator
Climsel C24	24	216	-	-	Climator
S 27	27	190	1.5(s) 2.22(l)	0.79(s) 0.48(l)	Cristopia
TH 29	29	188	-	-	TEAP
SP 22 A 17	22	150	-	0.6	Rubitherm GmbH
SP 25 A 8	25	180	2.5	0.6	Rubitherm GmbH
SP 29	29	157	-	0.6	Rubitherm GmbH

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2<sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi : Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
2. Kinga Pielichowska , Krzysztof Pielichowski : Phase change materials for thermal energy storage
3. <http://www.iene.gr/energy-development2010/articlefiles/PosterSession/tzivanidis.pdf>
4. <https://www.aiaaustin.org/event/phase-change-materials-pcm-high-performance-enclosures>
5. [http://itl.chem.ufl.edu/2041\\_u99/lectures/lec\\_f.html](http://itl.chem.ufl.edu/2041_u99/lectures/lec_f.html)
6. Κατάσταση της ύλης βικιπαίδεια
7. [http://en.wikipedia.org/wiki/Phase\\_transition](http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_transition)
8. Διαγράμματα των φάσεων βικιπαίδεια
9. Fre´de´ ric Kuznik, Damien David, Kevyn Johannes, Jean-Jacques Roux : A review on phase change materials integrated in building walls
10. Yvan Dutil , Daniel R. Rousse , Nizar Ben Salah , Ste´phane Lassue , Laurent Zalewski : A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations
11. Piia Lamberg, Reijo Lehtiniemi ,Anna-Maria Henell: Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage
12. <http://www.ktirio.gr/innet/UsersFiles/sa/documents/articles/2011-03-79.pdf>
13. <http://www.ktirio.gr/innet/UsersFiles/sa/documents/articles/2009-07-184.pdf>
14. <https://www.homebuilding.co.uk/advice/key-choices/green/phase-change-materials>
15. Lavinia Gabriela SOCACIU: Thermal Energy Storage with Phase Change Material
16. Harald Mehling and Luisa F. Cabeza: Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications, Chapter 2: Solid – liquid phase change materials
17. 2 Solid-liquid phase change materials
18. Mohammed M. Farid , Amar M. Khudhair , Siddique Ali K. Razack,Said Al-Hallaj : A review on phase change energy storage: materials and applications
19. V. Metivaud, L. Ventola, "Thermal Insulation of Buildings using Phase Change Materials, Energy and Buildings", Vol 36
20. [http://en.wikipedia.org/wiki/Eutectic\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Eutectic_system)

21. Shazim Ali Memon: Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review
22. Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art
23. N. Soares, J. Costab, A.R. Gasparb, P. Santosc: Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency
24. Michal Pomianowski, Per Heiselberg, Yinping Zhang: Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings
25. Eva Günther , Stefan Hiebler, Harald Mehling Robert Redlich : DETERMINATION OF THE HEAT STORAGE CAPACITY OF PCM AND PCM-OBJECTS AS A FUNCTION OF TEMPERATURE
26. [http://www.sv.vt.edu/classes/MSE2094\\_NoteBook/96ClassProj/experiment\\_al/dynamic/dynamic.html](http://www.sv.vt.edu/classes/MSE2094_NoteBook/96ClassProj/experiment_al/dynamic/dynamic.html)
27. <http://www.slideshare.net/jitenpatel13/dta-12218378>
28. Aran Solé , Laia Miró , Camila Barreneche , Ingrid Martorell , Luisa F. Cabeza : Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM)
29. Ahmet Sarı , Ali Karaipekli: Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material
30. Victor del Valle, Dale Bessette, Lisa Sopkow, John Zhou and Kaz Szymocha: Long-term Performance of the Phase Change Material Applied for Heat Storage
31. Daolin Gao and Tianlong Deng : Energy storage: Preparations and physicochemical properties of solid liquid Phase change materials for thermal energy storage
32. Lane, G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I. 1983, Florida: CRC Press, Inc.
33. Amar M. Khudhair, Mohammed M. Farid: A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials
34. Murat Kenisarin, Khamid Mahkamov : Solar energy storage using phase change materials
35. D. Zhou , C.Y. Zhao , Y. Tian : Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications

ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΙΧΩΝ ΜΕ ΣΤΡΩΜΑ PCM ΜΕΣΩ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ  
ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΩΝ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΑΥΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΣ



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> -ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ PCM ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

## 3.1 Άμεση ενσωμάτωση [1],[2]

Η μέθοδος της άμεσης ενσωμάτωσης είναι η οικονομικότερη από όλες τις μεθόδους ενσωμάτωσης αφού για να πραγματοποιηθεί χρειάζεται ελάχιστο επιπρόσθετο εξοπλισμό. Κατά τη διαδικασία παραγωγής δομικών υλικών, όπως ο γύψος και το τσιμέντο, το υλικό αλλαγής φάσης, είτε ως υγρό είτε σε σκόνη, προστίθεται και αναμειγνύεται με αυτά. Έτσι, πραγματοποιείται η ενσωμάτωσή του στα δομικά υλικά.

Για την επιτυχημένη ανάμιξη του PCM, ιδιαίτερα με υλικά που έχουν ως βάση το τσιμέντο, είναι απαραίτητο το PCM

- ο να μην έρθει σε επαφή με την διαδικασία της ενυδάτωσης και τα προϊόντα ενυδάτωσης
- ο να μην επηρεάζει τους δεσμούς μεταξύ της πάστας τσιμέντου και του συνόλου
- ο να μην επιδρά στις μηχανικές ιδιότητες
- ο να μην επιδρά στις ιδιότητες αντοχής

Ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου, που βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο, είναι η παραγωγή γυψοσανίδας που μπορεί να αποθηκεύει ενέργεια. Αυτό γίνεται με την άμεση ενσωμάτωση εμπορικού βουτυλικού εστέρα, αναλογίας 21-22% στο στάδιο ανάμιξης κατά την παραγωγή συμβατικής γυψοσανίδας.

## 3.2 Βύθιση [1],[3]

Η βύθιση ή απορρόφηση του PCM σημαίνει ενσωμάτωση αυτού σε ήδη έτοιμα συμβατικά δομικά υλικά με φυσική απορρόφηση. Δηλαδή το πορώδες οικοδομικό υλικό βυθίζεται σε ζεστό και λιωμένο PCM, το οποίο απορροφάται από τους πόρους μέσω της τριχοειδούς δράσης. Όταν το

πορώδες υλικό απομακρυνθεί από το λιωμένο PCM και αφεθεί να κρυώσει, τότε το PCM έχει παραμείνει στους πόρους του.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να γίνει μετατροπή ήδη υπαρχόντων υλικών ή κατασκευαστικών πάνελ, ώστε να ενσωματώσουν την καινούρια τεχνολογία των PCM.

Το μειονέκτημα της βύθισης και της άμεσης ενσωμάτωσης είναι ότι η ενσωματωμένη ποσότητα του PCM στα πορώδη υλικά είναι μικρή, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλό επίπεδο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Αν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος εμποτισμού κενού αέρος του PCM σε κοκκώδη πορώδη υλικά, τότε μπορούν να ενσωματωθούν μεγάλες ποσότητες PCM σε πορώδη χώρο. Αυτό καθιστά το κοκκώδες συνθετικό υψηλής ενεργειακής πυκνότητας μέσο. Τα κοκκώδη συνθετικά αλλαγής φάσης μπορούν να ενσωματωθούν σε διαφορετικά είδη κατασκευαστικών μερών, όπως στον τοίχο, στο δάπεδο και στην οροφή, ώστε να αυξήσουν την ικανότητά τους για θερμική αποθήκευση.

### 3.3 Ενθυλάκωση [4]

Σε αυτήν την τεχνική απαιτείται ενθυλάκωση του PCM προτού αυτό χρησιμοποιηθεί στα δομικά υλικά.

Έχει επισημανθεί από τον Regin και τους συνεργάτες του ότι η ενθυλάκωση του PCM πρέπει:

- να ικανοποιεί την απαίτηση μηχανικής αντοχής, αντοχής στον χρόνο, θερμικής σταθερότητας και αξιοπιστίας
- να προστατεύει το PCM, δρώντας ως εμπόδιο στις αλληλεπιδράσεις με τον περιβάλλοντα χώρο
- να έχει επαρκή επιφάνεια για την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας
- να είναι δομικά σταθερή και να παρέχει ευκολία στον χειρισμό

Γενικά στις μεθόδους ενθυλάκωσης αναφέρονται η μικροενθυλάκωση και η μακροενθυλάκωση.

### 3.3.1 Μικροενθυλάκωση [4],[5]

Μικροενθυλάκωση είναι η διαδικασία σύμφωνα με την οποία μεμονωμένα σωματίδια ή σταγονίδια του στερεού ή του υγρού υλικού του PCM (ο πυρήνας), περιβάλλονται ή επικαλύπτονται με μία συνεχή μεμβράνη πολυμερούς υλικού (το περίβλημα), ώστε να προκύψουν κάψουλες, οι οποίες στο μικρόμετρο κατατάσσονται στην τάξη των χιλιοστών, οι οποίες είναι γνωστές ως μικροκάψουλες. Οι μικροκάψουλες μπορεί να έχουν σφαιρικό σχήμα, με ένα συνεχές τείχος που περιβάλλει τον πυρήνα, ενώ μπορεί να είναι και ασύμμετρες ή να έχουν μεταβλητό σχήμα.

Και οι τρεις καταστάσεις της ύλης, δηλαδή στερεή, υγρή και αέρια, μπορούν να γίνουν μικροκάψουλες. Αυτό επιτρέπει στις μικροκάψουλες να διαχειρίζονται ακόμα και τα υγρά υλικά ως στερεά. Επίσης, οι μικροκάψουλες ανέχονται αλλαγές φάσης, συμπεριλαμβανομένων και των ογκομετρικών αλλαγών στον πυρήνα τους. Οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης μεταξύ  $-10^{\circ}\text{C}$  και  $80^{\circ}\text{C}$ , είναι αυτές οι οποίες ταιριάζουν περισσότερο με τις μικροκάψουλες.

Πολλές φυσικές και χημικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή των μικροκαψουλών. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες φυσικές μέθοδοι είναι η επίπεδη επίστρωση, η επίστρωση με παροχή πεπιεσμένου αέρα, η φυγόκεντρος εξώθηση, η δονητική μέθοδος μέσω ακροφυσίου και η ξήρανση με ψεκασμό. Ενώ οι χημικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι ο διεπιφανειακός πολυμερισμός, ο επιτόπιος πολυμερισμός και ο πλεγματοκός πολυμερισμός.

Η περιγραφή των μικροκαψουλών εξαρτάται κυρίως από το υλικό του πυρήνα και από τη διαδικασία εναπόθεσης του κελύφους. Οι μονοπύρηνες μικροκάψουλες έχουν το περίβλημα γύρω από τον πυρήνα, οι πολυπυρηνικές μικροκάψουλες έχουν πολλούς πυρήνες έγκλειστους στο εσωτερικό του κελύφους και υπάρχει και η πλεγματοκή ενσωμάτωση, στην οποία το υλικό του πυρήνα διανέμεται ομοιόμορφα μέσα στο υλικό του περιβλήματος.

#### Πλεονεκτήματα μικροενθυλακωμένου PCM

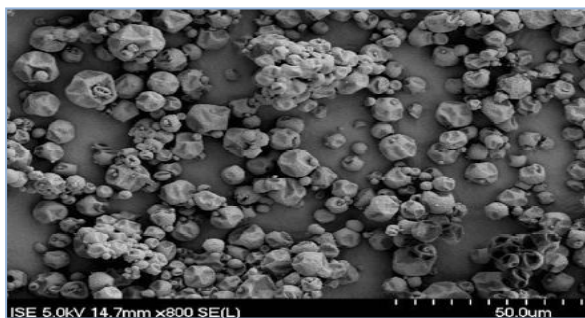
- ο εμποδίζει την διαρροή του PCM κατά την διάρκεια της αλλαγής φάσης ,δρώντας ως εμπόδιο, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο τις δυνατότητες ενσωμάτωσης του PCM σε ποικίλα δομικά υλικά

- ο παρέχει υψηλό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας μέσω της μεγαλύτερης επιφάνειας του ανά μονάδα όγκου
- ο κατά την διάρκεια της αλλαγής φάσης δεν μεταβάλλεται ο όγκος του
- ο εμφανίζει βελτιωμένη χημική σταθερότητα
- ο παρουσιάζει βελτιωμένη θερμική αξιοπιστία, εφόσον ο διαχωρισμός φάσης περιορίζεται σε μικροσκοπικές διαστάσεις
- ο είναι πιο εύκολο και πιο οικονομικό να ενσωματωθούν τα μικροενθυλακωμένα PCMs στα δομικά υλικά

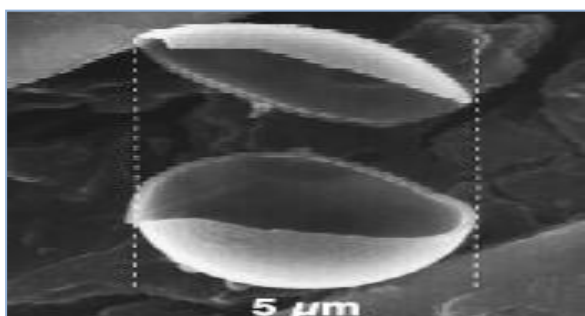
#### Μειονεκτήματα μικροενθυλακωμένου PCM

- ο η ακαμψία του κελύφους εμποδίζει την φυσική συναγωγή, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας
- ο υπάρχει πιθανότητα να επιδράσει στις μηχανικές ιδιότητες των δομικών υλικών
- ο ακριβή μέθοδος

Στην συνέχεια παρουσιάζεται μικροενθυλακωμένη παραφίνη που παράγεται από την εταιρεία BASF , με τυπική διάμετρο της μικροκάψουλας να κυμαίνεται από 2-20  $\mu\text{m}$ .

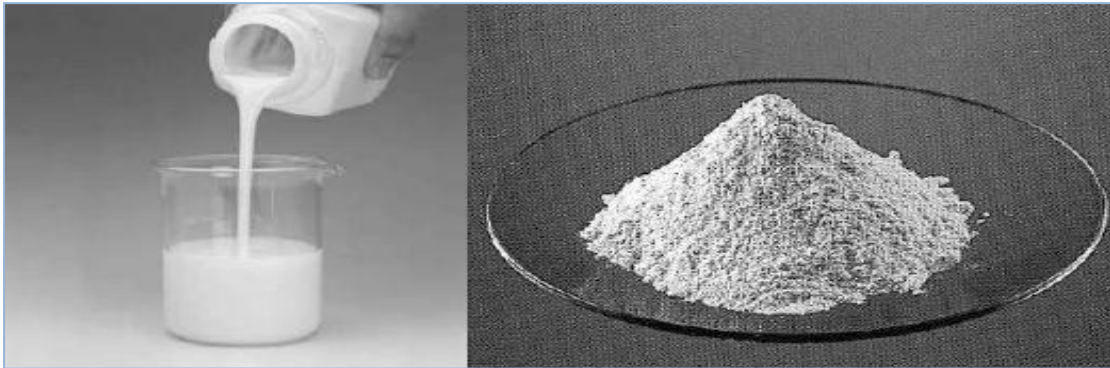


Σχήμα 3.3.1.1: Μικροσκοπική εικόνα καψουλών, [5]



Σχήμα 3.3.1.2: Ανοιχτή μικροκάψουλα, [5]

Το μικροενθλακωμένο PCM είναι διαθέσιμο σε διασπαρμένο υγρό ή σε μορφή ξηρής σκόνης όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 3.3.1.3:** Μικροενθλακωμένη παραφίνη που παράγεται από την BASF, σε μορφή διασπαρμένου υγρού αριστερά, και δεξιά σε μορφή ξηρής σκόνης, [5]

Οι μικροκάψουλες πωλούνται υπό την επωνυμία Micronal ως Micronal DS 5000 (διασπαρμένο υγρό) και 5001X (ξηρή σκόνη) με θερμοκρασία τήξης 26 °C, και ως Micronal DS 5007 (διασπαρμένο υγρό) 5008X (ξηρή σκόνη) με θερμοκρασία τήξης 23 °C.

Μια άλλη πηγή για ένα εμπορικό προϊόν είναι η εταιρεία Microtek στις ΗΠΑ, η οποία πωλεί μικροενθλακωμένο PCM με ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών τήξης.

Αξίζει να αναφερθεί μια σχετικά πρόσφατη παραγωγή γυψοσανίδας με μικροενθλακωμένο PCM (Micronal PCM, από την BASF) από την εταιρεία National Gypsum. Η γυψοσανίδα με PCM καλείται National Gypsum ThermalCORE Panel και το PCM έχει θερμοκρασία τήξης 23°C και λανθάνουσα θερμοχωρητικότητα 22 BTU/ft<sup>2</sup>.



**Σχήμα 3.3.1.4:** ThermalCORE Panel από την εταιρεία National Gypsum, [6]

### 3.3.2 Μακροενθυλάκωση [4],[5]

Η μακροενθυλάκωση είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος ενσωμάτωσης και σημαίνει πλήρωση μίας μακροσκοπικής δεξαμενής με κάψουλες που περιέχουν PCM. Η χωρητικότητα της δεξαμενής μπορεί να ποικίλλει από μερικά ml μέχρι μερικά λίτρα. Αυτές οι δεξαμενές είναι συνηθέστερα πλαστικές φιάλες (υψηλής πυκνότητας και χαμηλής πυκνότητας φιάλες πολυαιθυλενίου και φιάλες πολυπροπυλενίου), επιψευδαργυρωμένα μεταλλικά δοχεία και δοχεία μαλακού χάλυβα. Το σχήμα των μικροκάψουλων μπορεί να είναι από ορθογώνια πάνελ μέχρι σφαίρες, αλλά και σάκοι χωρίς ένα συγκεκριμένο σχήμα. Το κλειδί για τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι να σχεδιαστεί η μακροκάψουλα σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

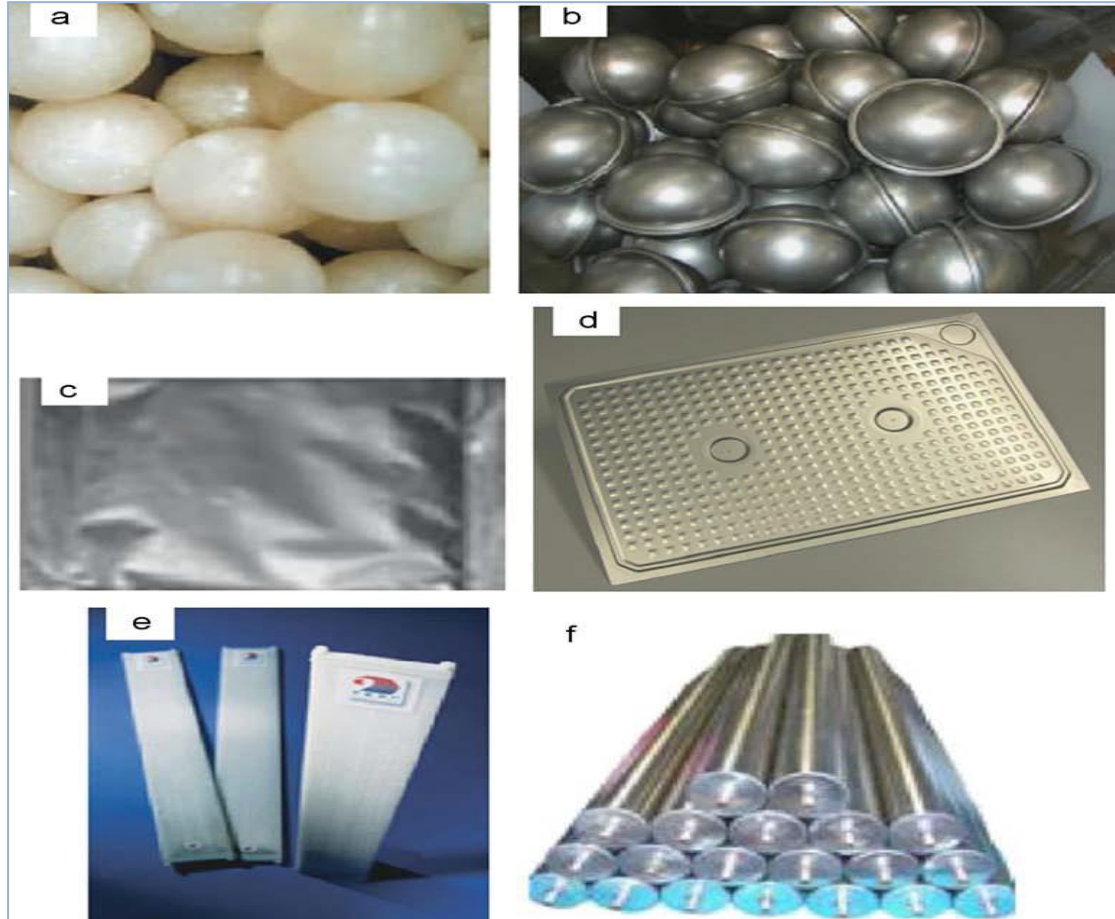
#### Πλεονεκτήματα μακροενθυλακωμένου PCM

- ο είναι ευκολότερο να μεταφερθούν και να διαχειρισθούν
- ο μπορούν να σχεδιαστούν κατάλληλα ώστε να ταιριάζουν στην εφαρμογή για την οποία προορίζονται
- ο περιέκτης δρα ως εμπόδιο και βελτιώνεται η συμβατότητα του PCM με το περιβάλλον. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να παρουσιάζει συμβατότητα ο περιέκτης με το περιβάλλον
- ο με την χρήση περιέκτη μειώνονται οι εξωτερικές μεταβολές όγκου που είναι αναγκαίες για την κτιριακή εφαρμογή

#### Μειονεκτήματα μακροενθυλακωμένου PCM

- ο παρουσιάζουν κακή θερμική αγωγιμότητα
- ο πρέπει να προστατεύονται από πιθανή καταστροφή καθώς το κτίριο είναι σε χρήση για παράδειγμα η διάνοιξη οπών στους τοίχους ή η χρήση καρφιών στους τοίχους μπορεί να τα καταστρέψει
- ο η διαδικασία της ένταξης τους στη δομή του κτιρίου είναι αρκετά χρονοβόρα
- ο πρέπει να στερεώνονται καλά στις γωνίες και στις άκρες ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας

Υπάρχουν ποικίλοι τρόποι μακροενθυλάκωσης των PCMs, όπως σε επίπεδες πλάκες, σε κυλίνδρους, σε κελύφη, σωλήνες και σφαίρες. Μερικοί τρόποι μακροενθυλάκωσης των PCMs παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί.

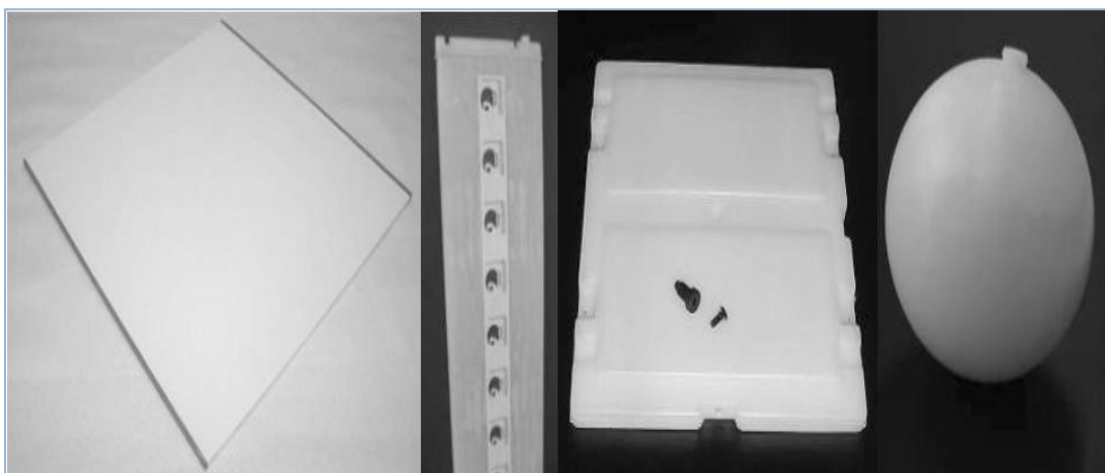


Σχήμα 3.3.2.1: Τρόποι μακροενθυλάκωσης PCM , [4]

Οι τρόποι μακροενθυλάκωσης των PCMs που απεικονίζονται στο παραπάνω σχήμα είναι κατά σειρά: μεταλλική μπάλα ενθυλάκωσης, σφαίρες ενθυλάκωσης, PCM σε φύλλο αλουμινίου, PCM σε πάνελ αλουμινίου, PCM σε επίπεδο πάνελ πολυπροπυλενίου, σωλήνας ενθυλάκωσης PCM.

Τα ένυδρα άλατα συνήθως τοποθετούνται σε πλαστικά δοχεία για λόγους συμβατότητας. Τα πλαστικά δεν διαβρώνονται από τα ένυδρα άλατα, ωστόσο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη στεγανότητα του υλικού δοχείου ώστε να εξασφαλιστεί ότι η σύνθεση του ένυδρου άλατος δεν αλλάζει με το χρόνο. Πλαστικά δοχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για οργανικά PCMs, αλλά ο συνδυασμός του PCM και του υλικού του δοχείου πρέπει να είναι επιλεγεί πολύ προσεχτικά, αφού ορισμένα οργανικά PCMs μπορούν να μαλακώσουν το πλαστικό.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει ένα πλήθος πλαστικών δοχείων από διάφορους κατασκευαστές. Εξαιτίας της ευκολίας παραγωγής πλαστικών, υπάρχουν ελάχιστοι περιορισμοί στη γεωμετρία.



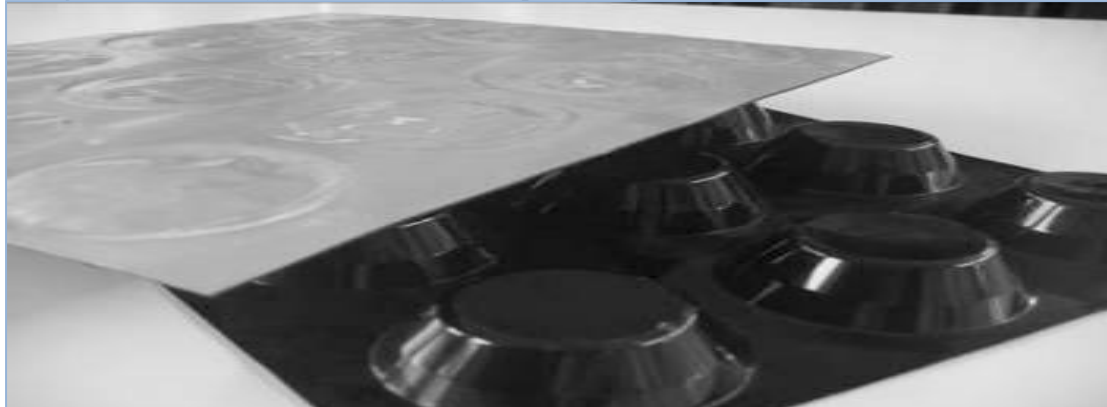
Σχήμα 3.3.2.2: Μακροενθυλάκωση σε πλαστικούς περιέκτες, [5]

Άλλη μια μορφή μακροενθυλάκωσης παρουσιάζεται στα σχήματα 3.3.2.3. Ένα φύλλο πλαστικού σχηματίζει κοιλοότητες, στις οποίες τοποθετείται το PCM πριν κλειστεί αεροστεγώς με πλαστική μεμβράνη. Τέτοιου είδους δοχεία μπορούν να παραχθούν σε μια πλήρως αυτοματοποιημένη γραμμή παραγωγής.



Προκειμένου να εξασφαλιστεί η στεγανότητα όσον αφορά το νερό, τα πλαστικά φύλλα συνδυάζονται με μεταλλικό στρώμα.

**Σχήμα 3.3.2.3:** Μακροενθυλάκωση σε 'capsule stripes' όπως παράγεται από την PCP και



την Dorken για οργανικό PCM, [5]

Αν αντί για δοχείο χρησιμοποιηθεί μόνο μεμβράνη για να περιβάλλει το PCM, το αποτέλεσμα είναι PCM τοποθετημένο σε σακούλα. Για την εξασφάλιση της στεγανότητας από το νερό, συνήθως οι πλαστικές μεμβράνες χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μεταλλικό στρώμα.



**Σχήμα 3.3.2.4:** Μακροενθυλάκωση σε σακούλες από την Climator, [5]

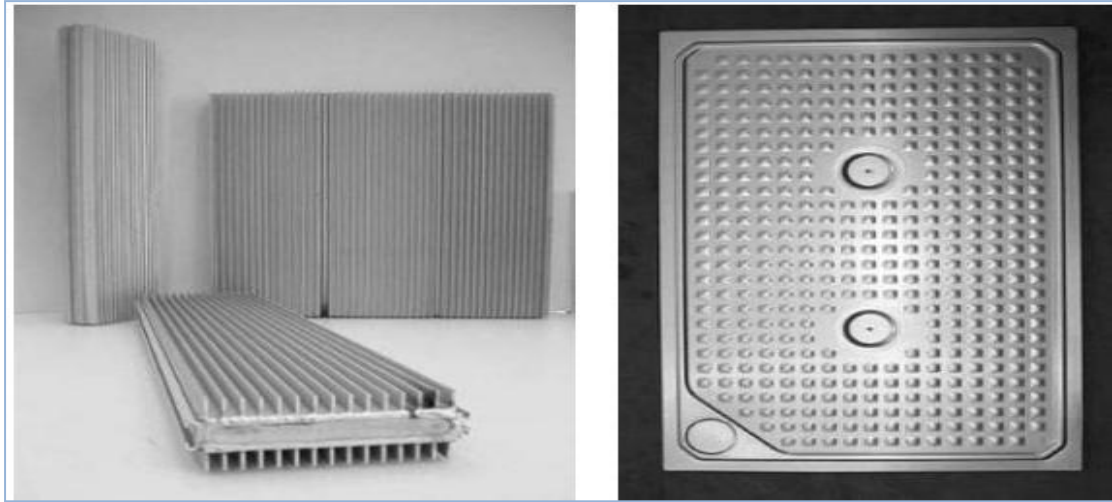
Ένα ακόμα παράδειγμα PCM τοποθετημένο σε σακούλα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.3.2.4: Μακροενθυλάκωση σε σακούλες από την Dorken, [5]

Αν στην εφαρμογή είναι σημαντικό να υπάρχει καλή μεταφορά θερμότητας, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των τοιχωμάτων ενός πλαστικού δοχείου μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα. Μια λύση είναι να επιλεγεί δοχείο με μεταλλικά τοιχώματα. Τα μεταλλικά τοιχώματα έχουν το πλεονέκτημα της υψηλής μηχανικής σταθερότητας όταν έχει επιλεγεί επαρκές πάχος τοιχώματος. Παραμένει όμως αναγκαία η επιλογή ενός κατάλληλου μετάλλου που δεν διαβρώνεται από το PCM. Αυτή η επιλογή θα πρέπει, επίσης, να λαμβάνει υπόψη τυχόν περιορισμούς στο σχήμα, τη συγκόλληση των τμημάτων του δοχείου κτλ.

Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει δύο περιπτώσεις μεταλλικών δοχείων ενθυλάκωσης PCMs.



**Σχήμα 3.3.2.5:** Μακροενθυλάκωση σε μεταλλικά δοχεία: αριστερά, προφίλ αλουμινίου με πτερύγια για βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας από την Climator, και δεξιά, πλάκα επικαλυμμένη με αλουμίνιο από την Rubitherm Technologies Gmb , [5]

### 3.4 PCM Σταθερού Σχήματος[4],[6]

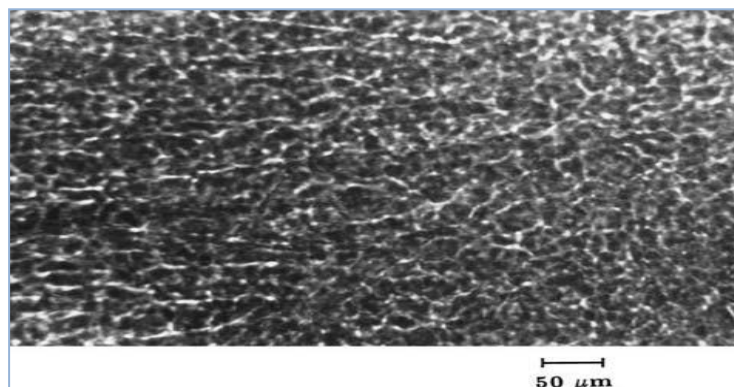
Σε αυτήν την τεχνική το PCM και το υποστηρικτικό υλικό τήκονται και αναμιγνύονται σε υψηλή θερμοκρασία. Στην συνέχεια ακολουθεί ψύξη του υποστηρικτικού υλικού έως ότου αυτό στερεοποιηθεί. Το υποστηρικτικό υλικό μπορεί να είναι υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE), στυρένιο και βουταδιένιο.

Το PCM σταθερού σχήματος παρουσιάζει τα ακόλουθα εξέχοντα χαρακτηριστικά

- μεγάλη εμφανή ειδική θερμότητα
- κατάλληλη θερμική αγωγιμότητα
- το σχήμα διατηρείται σταθεροποιημένο κατά την διάρκεια της αλλαγής φάσης
- είναι θερμικά αξιόπιστο , όσον αφορά τον κύκλο τήξης-στερεοποίησης για μεγάλη χρονική περίοδο
- δεν απαιτείται περιέκτης
- η αναλογία μάζας του PCM μπορεί να φτάσει μέχρι 80%

Στη συνέχεια αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για PCMs σταθερού σχήματος.

Οι Inaba και Tu μελέτησαν τις θερμοφυσικές ιδιότητες PCM σταθερού σχήματος. Το PCM σταθερού σχήματος αποτελείται από παραφίνη ως υλικό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και HDPE ως υποστηρικτικό υλικό. Το PCM σταθερού σχήματος περιείχε 74% κατά βάρος παραφίνη, είχε θερμοκρασία τήξης 54,8 °C και λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης 121,5 kJ/kg. Η μικρογραφία, που απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί, έδειξε ότι η παραφίνη (μαύρο μέρος) ήταν ομοιόμορφα διεσπαρμένη στην τρισδιάστατη δικτυωμένη υφή του HDPE (λευκό μέρος) και δεν υπήρχε διαρροή της παραφίνης από το σύνθετο υλικό ακόμα και όταν η παραφίνη ήταν σε τηγμένη μορφή.

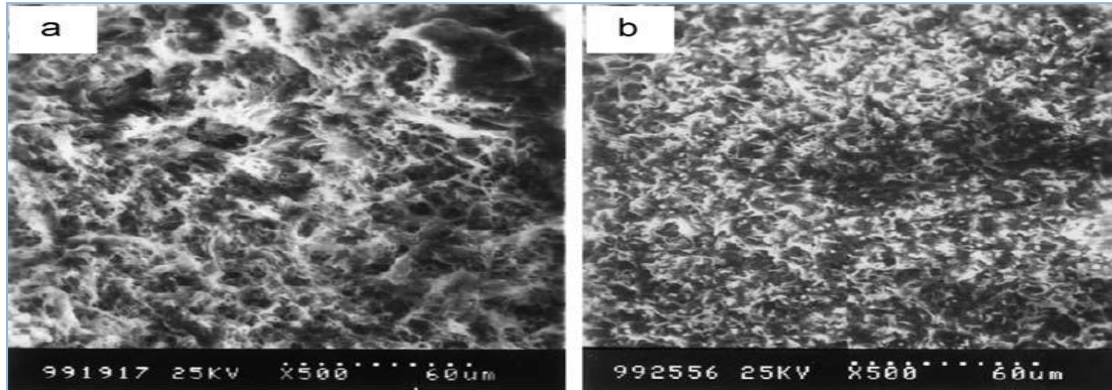


Σχήμα 3.4.1: Μικρογραφία του PCM σταθερού σχήματος, [4]

Για την παρασκευή PCM σταθερού σχήματος οι Ye και Xin-Si επέλεξαν έξι διαφορετικούς τύπου HDPE ως υποστηρικτικό υλικό και εκλεπτυσμένη/ ημί-εκλεπτυσμένη παραφίνη ως υλικό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Η επιλογή των HDPE έγινε με σκοπό το ΥΑΦ σταθερού σχήματος να παρουσιάζει υψηλή αντοχή με χρήση μικρής ποσότητας HDPE.

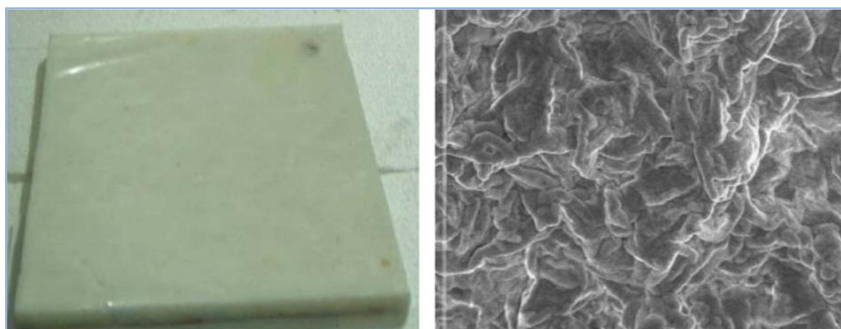
Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η υψηλή αντοχή επιτυγχάνεται με χρήση 25-30% κατά βάρος HDPE. Όσον αφορά την λανθάνουσα θερμότητα, η εκλεπτυσμένη και η ημί-εκλεπτυσμένη παραφίνη δεν παρουσίαζαν μεγάλη διαφορά (157,04 J/g και 154,73 J/g ,αντίστοιχα). Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος η ημί-εκλεπτυσμένη παραφίνη ήταν η πιο κατάλληλη επιλογή.

Το προϊόν ήταν φθινό, εύκολο στην παρασκευή και η λανθάνουσα θερμότητα συγκρίσιμη με αυτή με αυτή ενός παραδοσιακού PCM.



Σχήμα 3.4.2: Εικόνα PCM σταθερού σχήματος a) με εκλεπτυσμένη παραφίνη και b) με ημί-εκλεπτυσμένη παραφίνη, [4]

Ο Zhang και οι συνεργάτες του εξέτασαν το σταθερού σχήματος PCM που απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Διαπίστωσαν ότι μπορεί να κάνει το σύστημα αποθήκευσης θερμικής απλούστερο καθώς δεν χρειάζονται ειδικές συσκευές ή δοχεία για να ενσωματώσουν το PCM. Με βάση τα παραπάνω οφέλη του σταθερού σχήματος PCM, πρότειναν επίσης τη δυνατότητα εφαρμογής του σε αποδοτικά κτίρια με χρήση σε εσωτερικές επενδύσεις, όπως σε εσωτερικό τοίχο, την οροφή και το δάπεδο



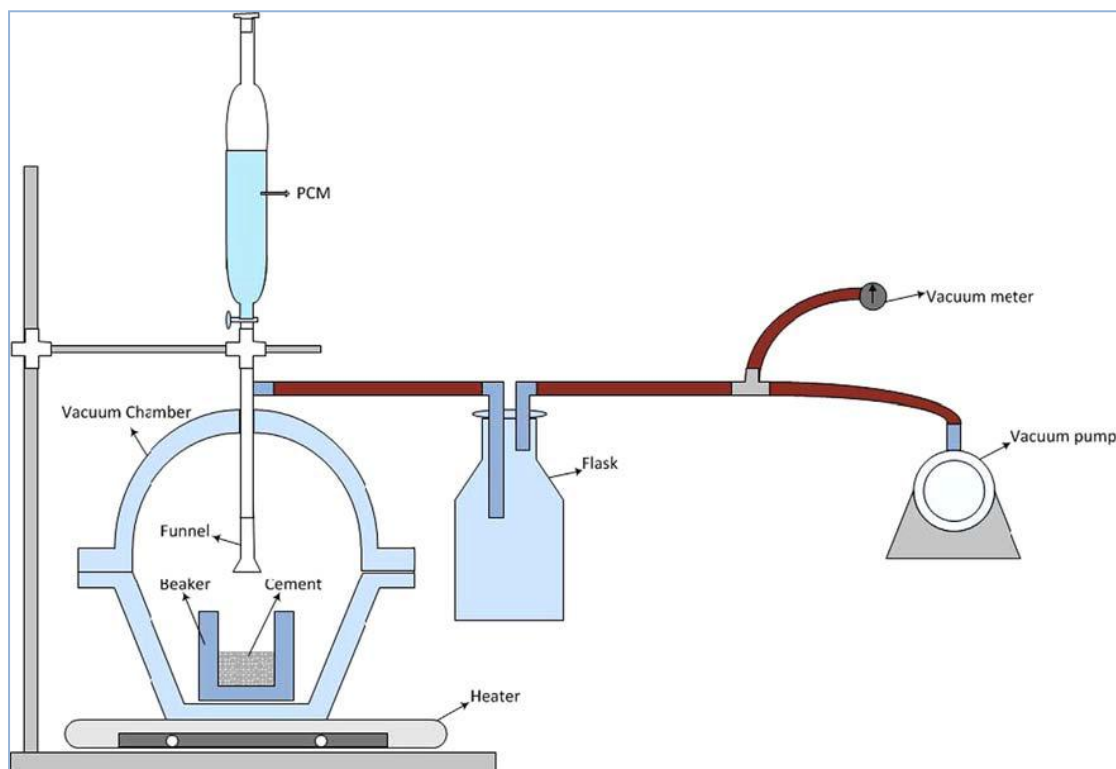
Σχήμα 3.4.3: Πλάκα PCM σταθερού σχήματος, [6]

### 3.5 Σταθερής Μορφής Σύνθετο PCM [4]

Ο όρος της σταθερής μορφής σύνθετο PCM χρησιμοποιείται για να ορίσει ένα σύνθετο PCM, το οποίο διατηρεί ένα βέλτιστο-μέγιστο ποσοστό PCM και δεν παρουσιάζει κανένα σημάδι διαρροής όταν η θερμοκρασία του σύνθετου είναι υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης του PCM. Επιπλέον, δεν είναι απαραίτητο, όπως στο PCM σταθερού σχήματος, να τηχθεί το υποστηρικτικό υλικό.

Το σταθερής μορφής σύνθετο PCM μπορεί να παραχθεί με φυσική βύθιση ή με εμποτισμό υπό κενό. Αν και η φυσική βύθιση είναι απλή και εύκολη στο χειρισμό, τα δομικά υλικά παρουσιάζουν χαμηλή ικανότητα συγκράτησης. Κατά συνέπεια, η ικανότητα συγκράτησης των δομικών υλικών μπορεί να αυξηθεί με την μέθοδο εμποτισμού υπό κενό.

Ένας από τους ποικίλους εξοπλισμούς που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία σταθερής μορφής σύνθετο PCM με εμποτισμό υπό κενό παρουσιάζεται στην συνέχεια.



Σχήμα 3.5.1: Σχηματική απεικόνιση συστήματος εμποτισμού υπό κενό, [4]

Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω μελέτες που έχουν γίνει για τη δημιουργία σταθερού σχήματος σύνθετο PCM. Ως υποστηρικτικά υλικά για το PCM έχουν χρησιμοποιηθεί διογκωμένος περλίτης, διογκωμένος γραφίτης, πυριτική παιπάλη, βερμικουλίτης, καολίνη, απόβλητα γυαλιού, κοκκώδης σκωρία υψικαμίνων, διατομίτες.

Οι διατομίτες χρησιμοποιούνται ως υποστηρικτικά υλικά για τα PCMs επειδή παρουσιάζουν εξαιρετικά πορώδη μικροδομή και υψηλή απορροφητικότητα και αδράνεια.

Οι Xu και Li αξιολόγησαν τη θερμική απόδοση αποθήκευσης ενέργειας σύνθετου τσιμέντου ενσωματώνοντας παραφίνη / διατομίτη, σταθερής μορφής σύνθετο PCM.

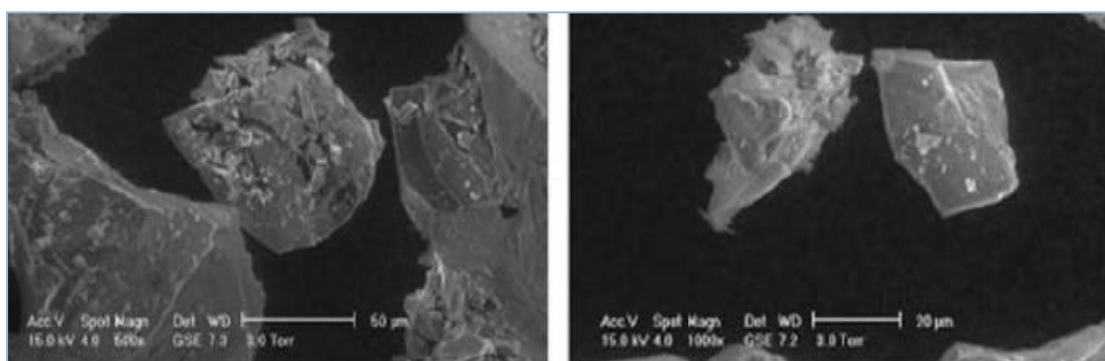


Σχήμα 3.5.2: Διατομίτης - σταθερής μορφής σύνθετο PCM παραφίνης / διατομίτη, [4]

Το μέγιστο ποσοστό της παραφίνης που συγκρατούταν από την σκόνη διατομίτη (DP) μέσω της τεχνικής της άμεσης ενσωμάτωσης βρέθηκε να είναι 47.4 κατά βάρος. Από την ανάλυση DSC, η θερμοκρασία τήξης και λανθάνουσα θερμότητα του σύνθετου PCM βρέθηκε να είναι 41,11 °C και 70.51J / g.

Ο Memon και οι συνεργάτες του διερεύννησαν τη σκοπιμότητα της χρήσης αποβλήτων υάλου για εφαρμογή αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. n-octadecane ενσωματώθηκε σε σκόνη γυαλιού (GP).

Το μέγιστο ποσοστό μάζας n-octadecane που διατηρείται στο GP βρέθηκε να είναι 8. Αποτελέσματα FT-IR έδειξαν ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των συστατικών του σύνθετου PCM είναι φυσικά. Οι θερμοκρασίες τήξης και ψύξης του σύνθετου PCM βρέθηκαν να είναι 26.93 και 25.03 °C, ενώ η λανθάνουσα θερμότητα τήξης και πήξης ήταν 18.97 J/g και 18.95 J/g. Η ανάλυση TGA και τα αποτελέσματα θερμικών κύκλων επιβεβαίωσαν ότι το σύνθετο PCM είναι θερμικά σταθερό και αξιόπιστο. Δοκιμές θερμικής απόδοσης έδειξαν ότι το πάστας τσιμέντου με σύνθετο PCM μείωσε την εσωτερική θερμοκρασία του έως 3 °C. Το συμπέρασμα ήταν ότι το σύνθετο PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θερμικές εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας σε κτίρια. Επιπλέον, η χρήση του θα προσφέρει βιώσιμη λύση για την επαναχρησιμοποίηση του γυαλιού των αποβλήτων.



Σχήμα 3.5.3: n-octadecane/ GP σύνθετο PCM, [4]

Τέλος, ο Wang και οι συνεργάτες του ενσωμάτωσαν 90% κατά βάρος πολυαιθυλενογλυκόλη σε διογκωμένο γραφίτη χρησιμοποιώντας την τεχνική του εμποτισμού υπό κενό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύνθετο PCM είναι χημικά συμβατό, η θερμοκρασία τήξης βρέθηκε 61,47 °C, η ενθαλπία 161,21 J/g και η θερμική αγωγιμότητα 1,324 W/mK. Έπειτα από 100 θερμικούς κύκλους οι αλλαγές που εμφανίστηκαν στις θερμικές ιδιότητες του PCM ήταν μικρότερες από 2,5%. Το σύνθετο PCM με την υψηλή λανθάνουσα θερμότητα και την υψηλή θερμική αγωγιμότητα βρέθηκε να είναι υποσχόμενο υποψήφιο PCM για εφαρμογές αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.



### 3.6 Πολυστρωματική Σανίδα με PCM [1]

Το PCM μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα ενιαίο στρώμα και να χρησιμοποιηθεί ως αυτόνομο στοιχείο, όπως για παράδειγμα εσωτερική επένδυση, στον εσωτερικό μέρος του κτιρίου. Από τις διάφορες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη εφαρμογή προέκυψαν πολύ θετικά αποτελέσματα.

Καταρχήν το πολυστρωματικό σύστημα πέτυχε να μειώσει το χρόνο της ανάκτησης της λανθάνουσας θερμότητας κατά 17%. Επίσης, το σύστημα αυτό αύξησε κατά 20-50% τη ροή θερμότητας και κατά 7-18% το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας.

Τα γενικά συμπεράσματα ήταν ότι η χρήση πολυστρωματικών σανιδιών έδειξαν ένα ισχυρό δυναμικό για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης στα κτίρια. Τα πιο σημαντικά είναι ότι η τοποθέτηση του PCM σε ένα τέτοιο σύστημα επιτυγχάνει πολύ καλύτερη αλλαγή φάσης που φτάνει μέχρι και το 55% σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα, οπότε πραγματοποιείται καλύτερη εκμετάλλευση του χρησιμοποιούμενου PCM.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3<sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Zhang Yinping, Zhou Guobing, Lin Kunping, Zhang Qunli, Di Hongfa, "Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of the art and outlook", Building and Environment 2007
2. D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, E. Ghanbari, "Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard", Solar energy materials 1991
3. Dong Zhang, Jianming Zhou, Keru Wu, Zongjin Li, Granular phase change composites for thermal energy storage
4. Shazim Ali Memon : Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review
5. 2 Solid-liquid phase change materials
6. D. Zhou, C.Y. Zhao ,Y. Tian : Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο -ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCMs)

## 4.1 Ιστορική αναδρομή

### 4.1.1 Πρώτες εφαρμογές

#### Δρ Maria Telkes [1],[2],[3]

Από τη διεξαγωγή σημαντικής έρευνας για τα πιθανά υλικά και συστήματα για θερμική αποθήκευση με PCM, η Δρ Maria Telkes αναγνώρισε τις δυνατότητες των PCMs για να χρησιμοποιηθούν στη θέρμανση κτιρίων. Το 1946, το προτεινόμενο δοκιμαστικό σπίτι, που ονομάζεται «The Dover House», ήταν να κατασκευαστεί σε ένα κτήμα στο Dover Mass, 5 μίλια από τη Βοστώνη των ΗΠΑ.



Σχήμα 4.1.1.1: Ηλιακό σπίτι Dover, ΗΠΑ [2]

Επρόκειτο για μια μονοκατοικία εκτάσεως 135 m<sup>2</sup>. Για την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας είχαν εγκατασταθεί 18 ηλιακοί συλλέκτες κατασκευασμένοι από πλάκες απορρόφησης μαύρου χρώματος, καλυμμένες από διπλά υάλινα πάνελ διαστάσεων 1.2 x 3.0 m. Η παραγόμενη θερμότητα μεταβιβαζόταν διαμέσου ενός αγωγού μέσω ενός ανεμιστήρα σε τρία δοχεία αποθήκευσης θερμότητας που βρίσκονται εκατέρωθεν των δωματίων και τα οποία ήταν γεμάτα με άλας του Glauber.

Με ένα σύνολο 21 τόνων PCM, το σύστημα είχε τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας 4,7 εκατομμυρίων Btu (11MJ). Το άλας Glauber κρατώντας την ικανότητα να αποθηκεύει θερμικό φορτίο 12 ημερών θα παρείχε μια αισθητή αποθήκευση θερμότητας μεταξύ της θερμοκρασίας του χώρου και του σημείου τήξεώς του (32°C). Το σπίτι ολοκληρώθηκε το 1948 με το κόστος να υπολογίζεται στα \$20.000 με τη συσκευή ηλιακής θέρμανσης στα \$3.000. Η περιοχή επιλέχθηκε από τη Δρ. Telkes λόγω του γεγονότος ότι η ετήσια ηλιοφάνειά της είναι άνω του μέσου όρου, ώστε μ' αυτό τον τρόπο να είναι δυνατή η μέγιστη χρήση του ηλιακού συστήματος. Το σύστημα λειτούργησε επιτυχώς για δύο χρόνια, παρέχοντας θερμοκρασία άνεσης 21 °C χωρίς να απαιτείται δευτερεύον σύστημα θέρμανσης. Ωστόσο, το σύστημα απέτυχε λόγω της αποσύνθεσης του άλατος (PCM). Τα δοχεία αποθήκευσης άρχισαν να διαρρέουν λόγω διάβρωσης από το θειικό οξύ και το άλας διαχωρίστηκε σε θειικό νάτριο και νερό, καθιστώντας το άχρηστο για σκοπούς θέρμανσης.

#### **Δρ. Lawrence Gardshire [4]**

Ένα παρόμοιο κατοικημένο σπίτι αργότερα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας παρόμοιες αρχές με τον σχεδιασμό της Δρ Maria Telkes. Το σπίτι που χτίστηκε από τον Δρ. Lawrence Gardshire στο Νέο Μεξικό ήταν ένα διώροφο με εμβαδόν δαπέδου 102 m<sup>2</sup> και με τους υαλοπίνακες του συλλέκτη να τοποθετούνται στη δομή της οροφής. Σε αντίθεση με το σχεδιασμό της Δρ. Telkes που περιλαμβάνει δοχεία αποθήκευσης PCM τοποθετημένα στο επίπεδο του ισογείου, εδώ εντοπίζονται δίπλα στους συλλέκτες μέσα στο χώρο της στέγης. Η καινοτομία ήταν ότι πρόσθεσε διφθορικό νάτριο στο άλας του Glauber σαν πηκτικό παράγοντα, ώστε να βοηθά στην στερεοποίηση του άλατος και να αποφευχθεί ο διαχωρισμός.

#### **Δρ J. W. Hodgins και Δρ T. W. Hoffman [1]**

Μια άλλη εφαρμογή των PCMs για αποθήκευση θερμότητας πραγματοποιήθηκε από τους Καναδούς επιστήμονες J.W. Hodgins και T.W. Hoffman. Το διώροφο σπίτι, εκτάσεως 111 m<sup>2</sup>, ολοκληρώθηκε το 1957.

Στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν 12 τόνοι άλατος Glauber, πυκνωμένοι με πυριτικό νάτριο, και περιείχαν επιπλέον χρωμικό αναστολέα διάβρωσης. Όπως και στην πειραματική μελέτη στο Dover, το πείραμα έληξε ανεπιτυχώς, λόγω της υποβάθμισης του PCM.

## 4.1.2 Πρόσφατες εφαρμογές

### 3-Liter-house [5]

Πρόκειται για ένα διαμέρισμα, 3-Liter-house-house, στη Γερμανία το οποίο κατασκευάστηκε το 1951 και ανακατασκευάστηκε το 2001. Το διαμέρισμα πριν την ανακατασκευή κατανάλωνε για θέρμανση 25 λίτρα πετρελαίου ανά τετραγωνικό μέτρο τον χρόνο. Την ανακατασκευή ανέλαβε η εταιρεία Luwoge, θυγατρική που στεγάζεται από την BASF. Ο στόχος ήταν να μειωθεί η κατανάλωση πετρελαίου σε 7 λίτρα, αν και οι προσδοκίες ξεπεράστηκαν και επιτεύχθηκε μια δραματική πτώση στα 3 λίτρα. Η επιτυχία αυτή οφείλεται σε επτά καινοτομίες. Μια από αυτές ήταν και η χρήση της γυψοσανίδας SmartBoard από την BASF. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι αναμφισβήτητα θετικό παρόλα αυτά λόγω της πολυπλοκότητας της κατασκευής, με χρήση επτά καινοτομιών, το μέρος της επιτυχίας που οφείλεται στο PCM δεν είναι δυνατό να αξιολογηθεί ξεχωριστά.

Για το 3-Liter-house-house η ετήσια εξοικονόμηση στο κόστος θέρμανσης για κάθε ένα από τα 9 διαμερίσματα είναι € 880 ανά έτος, μια μείωση από € 1.000 σε € 120. Το συνολικό κόστος της ανακαίνισης του συγκροτήματος των 9 κατοικιών ήταν € 1.500.000, με € 400.000 να οφείλονται στον «Ενεργειακό Εκσυγχρονισμό». Το 400.000 για τον «Ενεργειακό Εκσυγχρονισμό» και μόνο ισοδυναμεί με 50 χρόνια αποπληρωμής με βάση την εξοικονόμηση του κόστους θέρμανσης. Και πάλι, η απόσβεση μόνο για τα PCMs είναι αδύνατο να καθορισθεί από τα διαθέσιμα δεδομένα.

### Βοτανικός Κήπος του Βερολίνου [6],[7]

Πρόκειται για ένα θερμοκήπιο το οποίο χτίστηκε το 1907, καλύπτει μια περιοχή 1750 m<sup>2</sup> και έχει χωρητικότητα 40000 m<sup>3</sup>. Η μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου διατηρείται στους 30 °C και η υγρασία του αέρα διατηρείται σε υψηλά επίπεδα. Το 2007 ξεκίνησε η ανακαίνιση του κτιρίου προκειμένου να διατηρηθεί η βασική ιστορική δομή του κτιρίου και να μειωθούν οι ενεργειακές του απαιτήσεις στο 50% και ολοκληρώθηκε το 2009.

Η ανακαίνιση περιλάμβανε και εγκατάσταση «πύργων» PCM. Πρόκειται για μια καινοτόμα εφαρμογή PCM με σκοπό να ρυθμιστεί η εσωτερική θερμοκρασία (εξασφάλιση της βέλτιστης κατανομής της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο) και να μειωθούν οι απαιτήσεις σε ενέργεια για θέρμανση και ψύξη.

Στο εσωτερικό των πύργων υπάρχει εγκατεστημένο πάνελ με PCM (RT12), της εταιρείας Rubitherm, θερμοκρασίας τήξεως 25 °C.



Σχήμα 4.1.2.1: Βοτανικός Κήπος Βερολίνου [6]

Κατά την διάρκεια της ημέρας, ο αέρας στην κορυφή του θερμοκηπίου θερμαίνεται λόγω των ηλιακών κερδών. Ένας ανεμιστήρας στην κορυφή του πύργου τραβά τον αέρα και τον σπρώχνει στο κάτω μέρος του πύργου. Κατά την μετάβαση του προς τα κάτω, θερμότητα απορροφάται από τον αέρα και αποθηκεύεται στο PCM παρέχοντας κατά αυτόν τον τρόπο δροσερό αέρα στα φυτά.

Κατά την διάρκεια της νύχτας, ο αέρας κρύνει στην κορυφή του πύργου. Το ΥΑΦ όμως απελευθερώνει την θερμότητα που αποθήκευσε κατά την διάρκεια της ημέρας και καθώς ο αέρας διέρχεται προς τα κάτω θερμαίνεται και φτάνει θερμός στα φυτά.

Επιπλέον, προκειμένου το PCM να αποθηκεύει και να απελευθερώνει αποτελεσματικά την ενέργεια πρέπει να εκτίθενται σε σταθερή ροή αέρα.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η εκτιμώμενη εξοικονόμηση θερμικής ενέργειας πάνω από περίπου 200 ημέρες (200 κύκλοι), υπολογίζεται περίπου σε 22.000 KWh / a.

**Κτίριο,Somerset στο Λονδίνο [8],[9]**

Το ιστορικό κτίριο υποβλήθηκε σε ανακαίνιση, η οποία ολοκληρώθηκε το 2012 από την εταιρεία BDP και κόστισε £16,7m . Κατά την φάση της ανακαίνισης διαπιστώθηκε ότι η οροφή, η οποία ήταν ελαφριάς κατασκευής, δεν ήταν καθόλου μονωμένη. Ήταν απαραίτητο να προστεθεί μάζα και το τσιμέντο δεν ήταν η καταλληλότερη επιλογή καθώς επρόκειτο για έναν αρχιτεκτονικό θησαυρό και τόσο το εσωτερικό όσο και το εξωτερικό της οροφής έπρεπε να προστατευτούν.



Σχήμα 4.1.2.2: Κτίριο,Somerset στο Λονδίνο, [8]

Το πρόβλημα λύθηκε με χρήση πλακών ,που περιέχουν PCM ,στην οροφή, της εταιρείας ECO Building Boards. Χρησιμοποιήθηκαν πλάκες της εταιρείας BASF, οι οποίες περιείχαν μικροενθυλακωμένο PCM (Micronal Phase Change Material). Το θετικό με την χρήση των πλακών ήταν ότι δεν καταλαμβάνουν πολύ χώρο και δεν είναι βαριές.

Οι πλάκες, πάχους 14mm, περιέχουν ως ΥΑΦ μικροενθυλακωμένο κερί. Έτσι όταν η θερμοκρασία ανεβαίνει πάνω από τους 23 °C,θερμοκρασία τήξης του PCM, το κερί λιώνει και απορροφάται θερμότητα. Όταν η θερμοκρασία πέφτει το κερί τήκεται και η θερμότητα απελευθερώνεται.

Οι πλάκες δρουν όπως το σκυρόδεμα, βελτιώνοντας την θερμική μάζα της οροφής, χωρίς να επηρεάζουν όμως την υπάρχουσα δομή. Η χρήση PCM αποδείχθηκε επιτυχημένη και με αυτόν τον τρόπο αποδείχθηκε η χρησιμότητα των PCMs.

### Δημαρχείο στην πόλη Takasaki [10]

Ένα νέο δημαρχείο στην πόλη Takasaki ,100 χλμ Βόρεια του Τόκιο, ολοκληρώθηκε τον Φεβρουάριο του 1998. Το κτίριο ήταν εξοπλισμένο με συσκευές θέρμανσης που χρησιμοποιούσαν PCM, οι οποίες ονομάζονταν μετρητές θερμικής αποθήκευσης (TSC).

Μια μονάδα TSC είχε 396 κάψουλες που περιείχαν PCM των οποίων η θερμοκρασία τήξης ήταν  $55^{\circ}\text{C}$ . Οι κάψουλες θερμαίνονταν κατά τη διάρκεια της νύχτας χρησιμοποιώντας το μειωμένο ηλεκτρικό τιμολόγιο. Η αποθηκευμένη θερμότητα αποβαλλόταν κατά τη διάρκεια της ημέρας με συναγωγή και ακτινοβολία.

### Αεροδρόμιο Narita [10]

Μικροενθλακωμένο PCM χρησιμοποιήθηκε για το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στο διεθνές αεροδρόμιο Narita. Τα ψυκτικά μέσα της μονάδας θέρμανσης και ψύξης έπρεπε να αλλάξουν από CFC 11 σε HCFC 123 λόγω της αποβολής HFC. Το μικροενθλακωμένο PCM εγκρίθηκε για να αντισταθμίσει την υποβάθμιση της ψυκτικής ικανότητας από την αντικατάσταση των ψυκτικών.

Δεδομένου ότι οι υπάρχουσες μηχανές ψύξης θα συνέχιζαν να χρησιμοποιούνται, ήταν αναγκαίο να βρεθεί PCM με θερμοκρασία αλλαγής φάσης που να είναι συμβατή με το υπάρχον σύστημα ψύξης. Επιπλέον, το σύστημα θα μπορούσε να σταθεροποιεί το ψυκτικό φορτίο και να χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια στην διάρκεια της νύχτας. Ως -PCMs επιλέχθηκαν n-Paraffin waxes (παραφίνες κεριού) επειδή ήταν μη-τοξικές και με ελεγχόμενη θερμοκρασία αλλαγής φάσης.

Τα κεριά παραφίνης ήταν έγκλειστα σε μικρές σφαίρες, διαμέτρου περίπου 2 μικρόμετρα, σχηματίζοντας διφασικό μείγμα. Το διφασικό μείγμα PCM είχε θερμοκρασία τήξης  $8^{\circ}\text{C}$  και λανθάνουσα θερμότητα  $75.9\text{kJ/kg}$ .

Το διφασικό PCM αντλούταν προς τον εναλλάκτη θερμότητας και ψυχόταν με παγωμένο νερό στους  $3,5^{\circ}\text{C}$  από την μηχανή ψύξης κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η αποθηκευμένη θερμότητα αποβαλλόταν κατά τη διάρκεια της ημέρας.



## 4.2 Εφαρμογές PCM στα κτίρια

Τα PCMs έχουν εξεταστεί για εφαρμογές στα κτίρια πριν το 1980. Η πρώτη έρευνα για την εφαρμογή των PCMs στα κτίρια αναλήφθηκε από την Telkes το 1975.

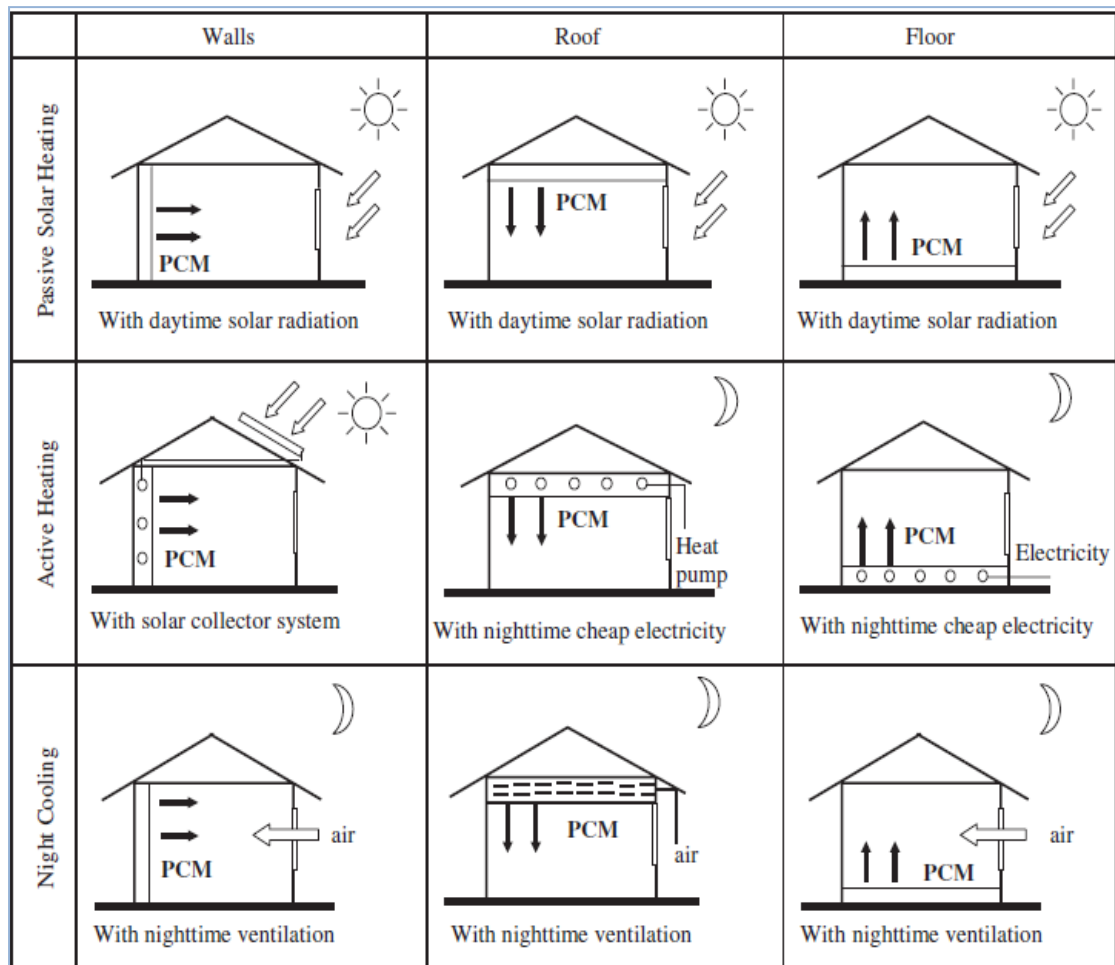
Η χρήση των PCMs σε ένα κτίριο μπορεί να έχει δυο διαφορετικούς στόχους. Πρώτον, την χρήση της φυσικής θερμότητας που είναι η ηλιακή ενέργεια για θέρμανση ή το ψύχος την νύχτα για δροσισμό. Δεύτερον, την χρήση ανθρωπογενών πηγών θερμότητας ή πηγών ψύξης. Σε οποιαδήποτε περίπτωση η αποθήκευση θερμότητας ή ψύχους θα πρέπει να ταιριάζει με την διαθεσιμότητα και την ζήτηση σε σχέση με τον χρόνο αλλά και την ισχύ. Οι τρεις διαφορετικοί τρόποι χρήσης των PCMs για θέρμανση και ψύξη στα κτίρια είναι PCMs στους τοίχους των κτιρίων, PCMs σε άλλα μέρη των κτιρίων πέρα των τοίχων και PCMs σε μονάδες αποθήκευσης θερμότητας και ψύξης

Οι δυο πρώτοι τρόποι χρήσης των PCMs είναι παθητικά συστήματα, στα οποία η αποθηκευμένη θερμότητα ή το ψύχος απελευθερώνονται αυτόματα όταν η εσωτερική ή η εξωτερική θερμοκρασία αυξάνει ή πέφτει πέρα από το σημείο τήξης. Ο τρίτος τρόπος αφορά ενεργό σύστημα όπου η αποθηκευμένη θερμότητα ή το ψύχος είναι θερμικά υπό περιορισμό διαχωρισμένο από το κτίριο με μόνωση. Η θερμότητα και το κρύο χρησιμοποιούνται μόνο σε ζήτηση και όχι αυτόματα.

Ανάλογα με το που και πως το PCM είναι ενσωματωμένο , PCMs με διαφορετικά σημεία τήξης εφαρμόζονται. Τα πιο σημαντικά PCMs είναι σε εύρος 22-25 °C , καθώς πρόκειται για το εύρος για παθητική θέρμανση και ψύξη των κτιρίων.[11]

ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΙΧΩΝ ΜΕ ΣΤΡΩΜΑ PCM ΜΕΣΩ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΩΝ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΑΥΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΣ

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι εφαρμογές του PCM στα κτίρια σε παθητικά συστήματα, ενεργητικά και στο νυχτερινό δροσισμό.



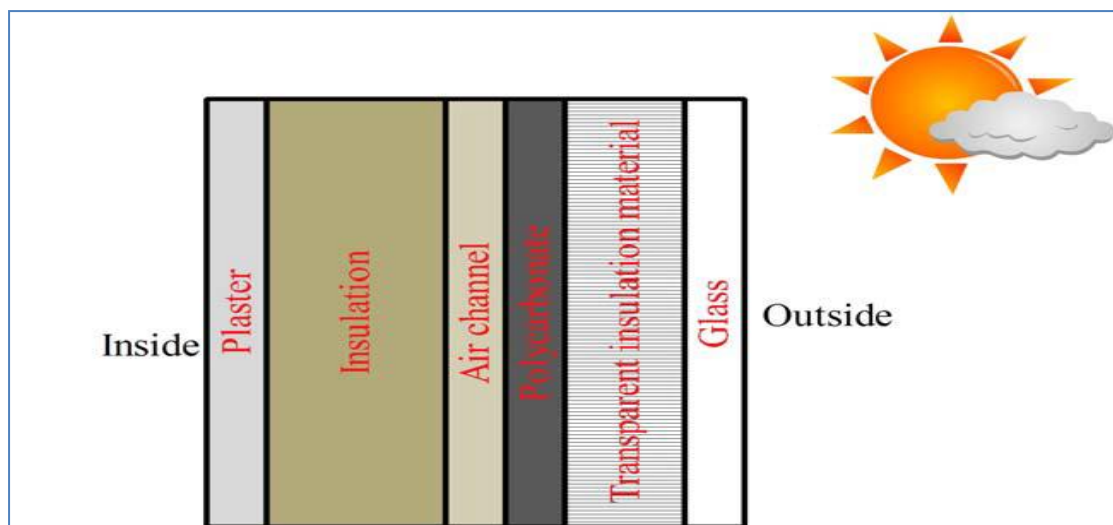
Σχήμα 4.2.1: Εφαρμογές των PCMs στο κτιριακό κέλυφος , [12]

## 4.2.1 Παθητικά Συστήματα Αποθήκευσης

### 4.2.1.1 Ηλιακός τοίχος [13],[14]

Ο τοίχος PCM αποθηκεύει μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στους τοίχους ή την οροφή του κτιρίου. Η υψηλή θερμική του μάζα συμβάλλει στην μείωση της επίδρασης των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου. Μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικός στην μετατόπιση του ψυκτικού φορτίου στην εκτός αιχμής περίοδο ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο ηλιακός τοίχος αποτελείται από έξι τμήματα. Ξεκινώντας από την εξωτερική επιφάνειά του φέρει γυάλινη επιφάνεια, ακολουθούμενη από διαφανές μονωτικό υλικό. Τα δύο αυτά υλικά επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος να τα διαπεράσει, αποτρέποντας ταυτόχρονα τη μετάδοση θερμότητας λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας. Επόμενο είναι το στρώμα PCM, τοποθετημένο σε διαφανές πλαστικό δοχείο, απορροφά και αποθηκεύει την ακτινοβολία ως επί τω πλείστον με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Ακολουθεί ένα διάκενο από το οποίο διέρχεται και θερμαίνεται ο αέρας για τον αερισμό και οδηγείται στο χώρο. Τέλος, έχοντας φτάσει στην εσωτερική πλευρά του τοίχου, είναι τοποθετημένα δύο βασικά δομικά υλικά, η μόνωση και ο σοβάς. Συχνά χρησιμοποιούμενα PCM στους ηλιακούς τοίχους είναι οι υδρογονάνθρακες και τα ένυδρα άλατα. Πολλές φορές γίνεται χρήση μεταλλικών πρόσθετων για την αύξηση της συνολικής αγωγιμότητας και απόδοσης.



Σχήμα 4.2.1.1.1: Τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ο ηλιακός τοίχος, [14]

Πλεονεκτήματα ηλιακού τοίχου:

- Καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο και είναι ελαφρύτεροι για δεδομένη ποσότητα αποθηκευμένης θερμότητας, σε σχέση με άλλους τοίχους αποθήκευσης θερμότητας, λόγω της αυξημένης θερμοχωρητικότητας του PCM
- Χαρακτηρίζονται από υψηλής αποδοτικότητας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα. Αυτό οφείλεται στη παρουσία του γυαλιού και του διάφανου μονωτικού υλικού που ακολουθεί. Το πρώτο επιτρέπει την άμεση διέλευση και απορρόφηση της ακτινοβολίας από το PCM, ενώ το δεύτερο εξασφαλίζει μηδενικές απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας στον περιβάλλοντα χώρο.
- Συντελούν στη μείωση των θερμικών απωλειών του χώρου.

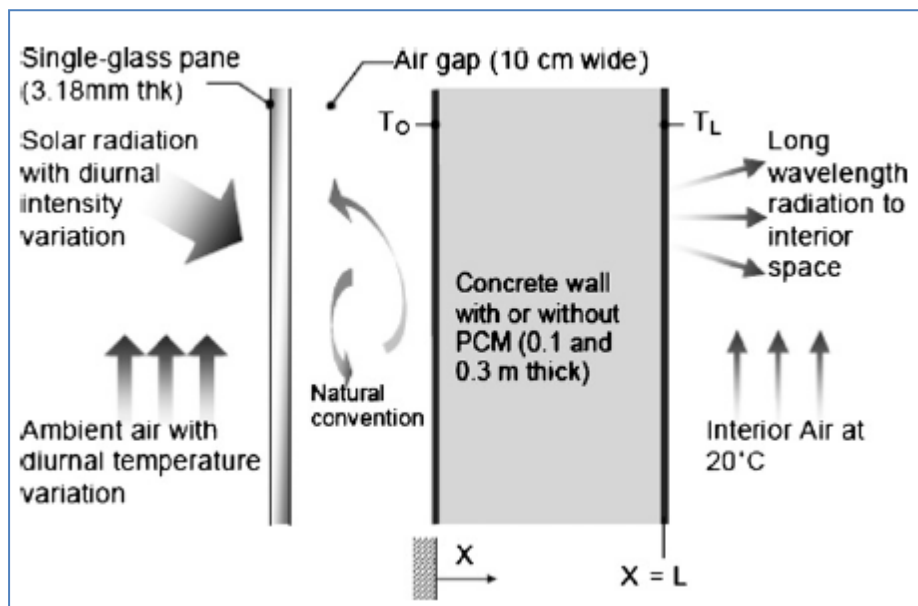
#### 4.2.1.2 Τοίχος Trombe με PCM [11],[15]

Ένας τοίχος Trombe είναι ένα πρωταρχικό παράδειγμα ενός συστήματος αποθήκευσης έμμεσου κέρδους. Οι παραδοσιακοί τοίχοι Trombe βασίζονται στην αισθητή αποθήκευση ενέργειας, αλλά λόγω της επιθυμητής αυξημένης αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα μάζας, ο τοίχος Trombe με P.C.M. είναι μία περίπτωση με αρκετό ενδιαφέρον.

Αποτελείται από ένα συνηθισμένο, αλλά παχύ τοίχο στη νότια πλευρά του κτιρίου, μ' ένα γυάλινο ή πλαστικό υαλοπίνακα τοποθετημένο σε απόσταση περίπου τεσσάρων εκατοστών από τον τοίχο. Ένας τοίχος Trombe γεμάτος με P.C.M. κατασκευάζεται πίσω από το παράθυρο της νότιας πλευράς ενός σπιτιού. Ο τοίχος θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, προκαλώντας την τήξη του P.C.M., δηλαδή προκαλεί το λιώσιμό του. Ο θερμός αέρας κινείται προς τα πάνω και μέσα από τη θυρίδα μπαίνει στον εσωτερικό χώρο. Ταυτόχρονα, ψυχρότερος αέρας από τον εσωτερικό χώρο μπαίνει από την κάτω θυρίδα και αντικαθιστά το κενό που δημιουργήθηκε. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η λειτουργία προφανώς αντιστρέφεται. Οι δύο θυρίδες κλείνουν πάνω και κάτω και η θέρμανση του χώρου πετυχαίνεται με την ακτινοβολία της αποθηκευμένης θερμότητας στον τοίχο. Τη νύχτα η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται, ώστε να θερμανθεί ο χώρος.

Το καλοκαίρι η λειτουργία του τοίχου Trombe αντιστρέφεται. Η επάνω θυρίδα κλείνει, ενώ ταυτόχρονα ανοίγει ένα τμήμα του υαλοστασίου στο επάνω μέρος, έτσι ώστε να απομακρύνεται ο ζεστός αέρας προς τα έξω.

Για μία δοσμένη ποσότητα αποθήκευσης ενέργειας, οι μονάδες με P.C.M. απαιτούν λιγότερο χώρο από τους τοίχους που είναι γεμάτοι με νερό ή από τους τοίχους της αυξημένης θερμοκικής μάζας, ενώ είναι και πιο ελαφριές σε βάρος.



Σχήμα 4.2.1.2.1: Τοίχος Trombe με PCM, [15]

### 4.2.1.3 Παραθυρόφυλλα με PCM [15],[16]

Τα εξωτερικά παραθυρόφυλλα που περιέχουν PCMs είναι κινητά δομικά στοιχεία σκίασης τοποθετημένα στις εξωτερικές επιφάνειες των παραθύρων. Το σύστημα λειτουργεί κυκλικά προκειμένου να επιτευχθεί η τήξη της μάζας του PCM κατά την διάρκεια της μέρας και η στερεοποίηση του κατά την διάρκεια της νύχτας.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι γρίλιες παραμένουν ανοιχτές, έτσι ώστε η εξωτερική τους πλευρά να είναι εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία. Το PCM απορροφά την ακτινοβολία, την αποθηκεύει ως λανθάνουσα θερμότητα και λιώνει. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι γρίλιες κλείνουν και μέσω του παραθύρου μεταφέρεται η αποθηκευμένη θερμότητα στον εσωτερικό χώρο.

Αυτό το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας παρουσιάστηκε από τον μελετητή H.Mehling, ο οποίος το εφάρμοσε και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η χρήση παραθυρόφυλλων με PCM μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία του δωματίου μέχρι και 2°C.



Σχήμα 4.2.1.3.2: Harald Mehling , παραθυρόφυλλα PCM, [16]

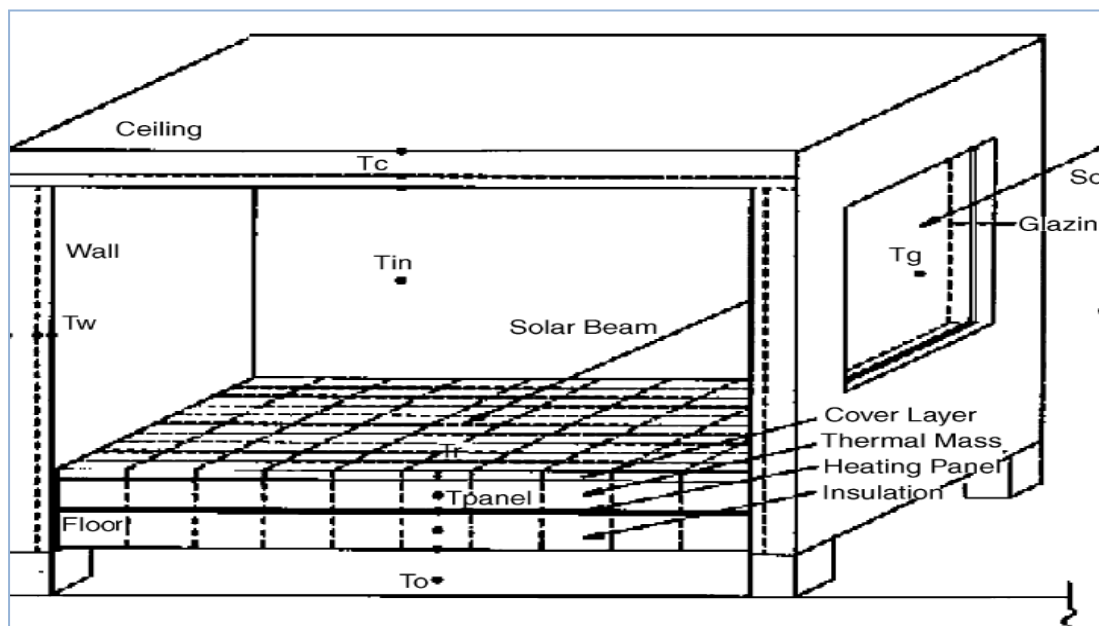
#### 4.2.1.4 Ενδοδαπέδια Θέρμανση [11]

Καθώς το δάπεδο αποτελεί ένα σημαντικό μέρος του κτιρίου, πολλές μελέτες διεξήχθησαν με χρήση του δαπέδου για θέρμανση και ψύξη των κτιρίων.

Οι Alientis και Chen μελέτησαν την παροδική μεταφορά θερμότητας σε συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Η μελέτη τους επικεντρώθηκε στην επίδραση που έχει το στρώμα που το καλύπτει και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην κατανομή της θερμοκρασίας του δαπέδου και την κατανάλωση ενέργειας.

Τα αποτελέσματα της μελέτης ήταν τα ακόλουθα:

- η δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει μια τοπική αύξηση στην επιφάνεια του δαπέδου που φωτίζεται  $8^{\circ}\text{C}$  πιο πάνω από την σκασμένη επιφάνεια
- η μερική κάλυψη με χαλί αυξάνει περαιτέρω την θερμοκρασιακή διαφορά της επιφάνειας του δαπέδου έως  $15^{\circ}\text{C}$
- η ηλιακή ενέργεια που αποθηκεύεται στην θερμική μάζα του πατώματος βρέθηκε να μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση (πάνω από 30%)
- μια αύξηση του πάχους της θερμικής μάζας από 5 σε 10 cm δεν οδηγεί σε περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας



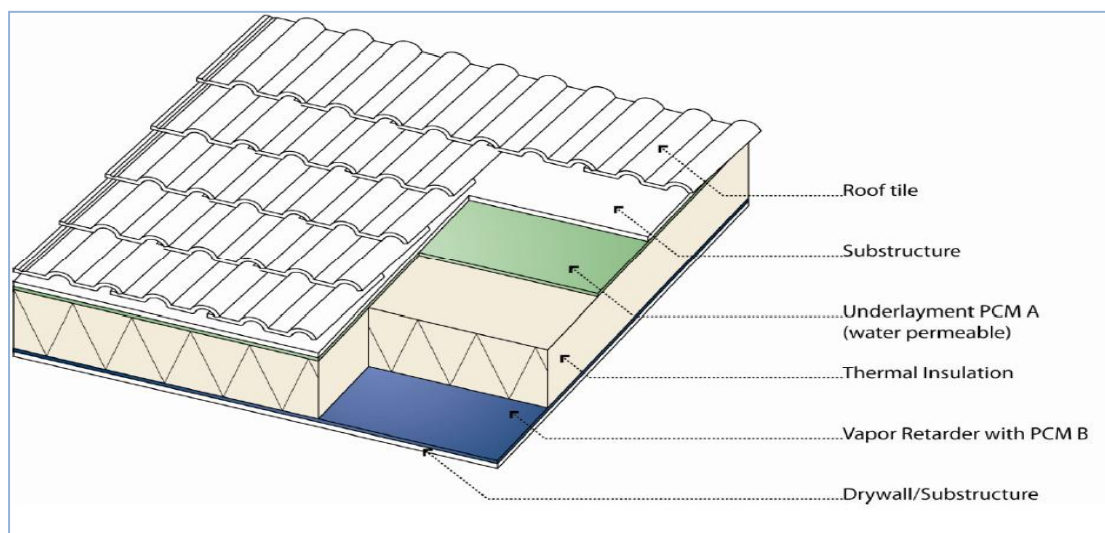
Σχήμα 4.2.1.4.1: Σχηματική αναπαράσταση παθητικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης, [11]

#### 4.2.1.5 Στέγες PCM [17]

Όσον αφορά την οροφή, το σύστημα οροφής PCM, ελέγχει την ροή θερμότητας μέσα και έξω από το κτίριο μέσω των υλικών της οροφής είτε με απορρόφηση είτε με απελευθέρωση της λανθάνουσας θερμότητας καθώς η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται ή μειώνεται πάνω από μια καθορισμένη τιμή.

Με βάση τις θερμικές δοκιμές σε μια κοινή κατασκευή οροφής και με χρήση μοντέλων υπολογιστή, το PCM μπορεί να τοποθετηθεί

- ο στο άνω μέρος της οροφής, μεταξύ των κεραμιδιών και του στρώματος θερμικής μόνωσης
- ο στο κάτω μέρος της οροφής μεταξύ του στρώματος της θερμικής μόνωσης και της γυψοσανίδας



Σχήμα 4.2.1.5.1: Τοποθεσία PCM στο σύστημα οροφής, [17]

Ο κύριος σκοπός της διάταξης PCM στο άνω μέρος της οροφής είναι η θερμική προστασία τις ζεστές μέρες. Το PCM θα απορροφήσει την θερμότητα που παρέχεται από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία έχει διεισδύσει μέσα από τα κεραμίδια, μόλις η θερμοκρασία του PCM και της περιβάλλουσας δομής φτάσει σε ένα ορισμένο όριο. Κατά την διάρκεια απορρόφησης της λανθάνουσας θερμότητας από το PCM, η θερμοκρασία του PCM και της περιβάλλουσας δομής που το συγκρατεί θα παραμείνει σχεδόν σταθερή. Ως εκ τούτου, η ροή θερμότητας προς το εσωτερικό του κτιρίου κατά την διάρκεια της ημέρας θα μειωθεί, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου να μην αυξηθεί τόσο όσο στην περίπτωση που δεν υπήρχε PCM.



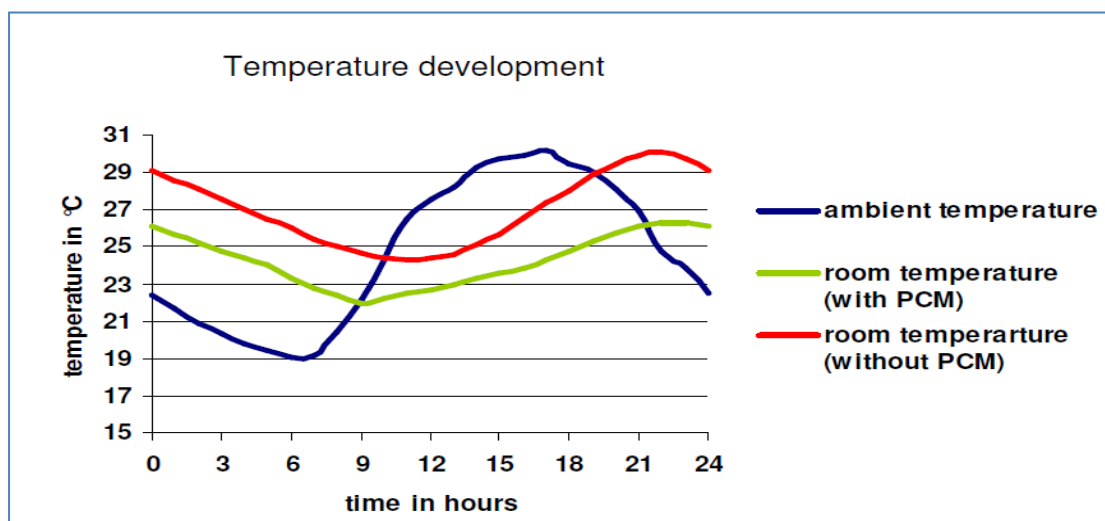
Επιπλέον η διάταξη του PCM στο άνω μέρος της στέγης αποτρέπει την θερμότητα από ηλιακή ακτινοβολία να διεισδύσει στα άλλα υλικά της στέγης, όπως το στρώμα της θερμικής μόνωσης όπου η αφαίρεση θερμότητας είναι πιο δύσκολη. Ένα άλλο πλεονέκτημα της τοποθέτησης του PCM στο άνω μέρος της στέγης είναι ότι η αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα θα μπορούσε να αφαιρεθεί πλήρως κατά την διάρκεια της νύχτας και ως εκ τούτου το PCM θα μπορούσε να επαναφορτίζεται και να είναι έτοιμο για επαναχρησιμοποίηση την επόμενη ημέρα.

Σκοπός της δεύτερης τοποθέτησης του PCM, στο χαμηλότερο επίπεδο της δομής της οροφής είναι να παρέχει μια προσωρινή, πρόσθετη μόνωση τις κρύες νύχτες του χειμώνα. Σε αυτήν την περίπτωση, το PCM θα αποθηκεύσει τη θερμότητα που παράγεται στον εσωτερικό χώρο κατά την διάρκεια της ημέρας, αφού διεισδύσει μέσω της γυψοσανίδας. Όταν η θερμοκρασία του PCM και της ευρύτερης δομής που το συγκρατεί πέσει κάτω από ένα ορισμένο όριο, η λανθάνουσα θερμότητα θα απελευθερωθεί. Επιπλέον, η συγκεκριμένη επιλογή τοποθέτησης του PCM, διασφαλίζει ότι η θερμότητα που παράγεται στο εσωτερικό του σπιτιού κατά την διάρκεια της ημέρας και συνήθως ανεβαίνει στην οροφή, διατηρείται και είναι διαθέσιμη για χρήση προκειμένου να μειωθεί η ροή θερμότητας δια μέσου της στέγης κατά την διάρκεια της νύχτας. Επιπλέον, η απορρόφηση της θερμότητας χωρίς ουσιαστική αύξηση της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της ημέρας, οδηγεί σε μείωση της κλίσης της θερμοκρασίας μεταξύ του δαπέδου και της οροφής, ενισχύοντας περαιτέρω την θερμική άνεση του κτιρίου. Ένα άλλο πλεονέκτημα της τοποθέτησης του PCM στο κάτω μέρος της στέγης είναι ότι η λανθάνουσα θερμότητα που απελευθερώνεται από το PCM θα διεισδύσει πρώτα στο στρώμα μόνωσης από το οποίο διαχέεται αργά.

Πραγματοποιήθηκαν διαδικασίες μοντελοποίησης με χρήση υπολογιστή σε ένα διώροφο σπίτι στη Γερμανία, ως μοντέλο, με συνολική επιφάνεια περίπου 160 m<sup>2</sup> και επιφάνεια οροφής 130 m<sup>2</sup>. Η ικανότητα λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης του PCM που τοποθετήθηκε στην οροφή ανήλθε στα 97.500 kJ. Το 60% χρησιμοποιούταν για προστασία από τη θερμότητα τις ζεστές καλοκαιρινές ημέρες. Το υπόλοιπο 40 % χρησιμοποιούταν για να υποστηρίξει τη λειτουργία της θερμικής μόνωσης του συστήματος οροφής κατά τη διάρκεια των κρύων νυχτών του χειμώνα.

Όταν PCM εφαρμόστηκε στο σύστημα της στέγης του κτιρίου, η αύξηση της θερμοκρασίας στο καθιστικό χώρο του δεύτερου ορόφου μειώθηκε σημαντικά.

Κατά τις βραδινές ώρες, σημειώθηκαν θερμοκρασιακές διαφορές έως 4 °C στο χώρο διαβίωσης του δεύτερου ορόφου κατά τη σύγκριση των κτιρίων με και χωρίς PCM. Επιπλέον, λόγω της πρόληψης της αύξησης ροής θερμότητας μέσω του συστήματος οροφής μέσα στο κτίριο κατά τη διάρκεια της ημέρας που προκαλείται από τη λανθάνουσα απορρόφηση θερμότητας του PCM, η θερμοκρασία δωματίου μπορεί να διατηρείται σε ένα εύρος άνεση μεταξύ 22 και 26 °C, ακόμη και σε μια πολύ ζεστή μέρα του καλοκαιριού, χωρίς την χρήση ενός εξωτερικού συστήματος κλιματισμού.



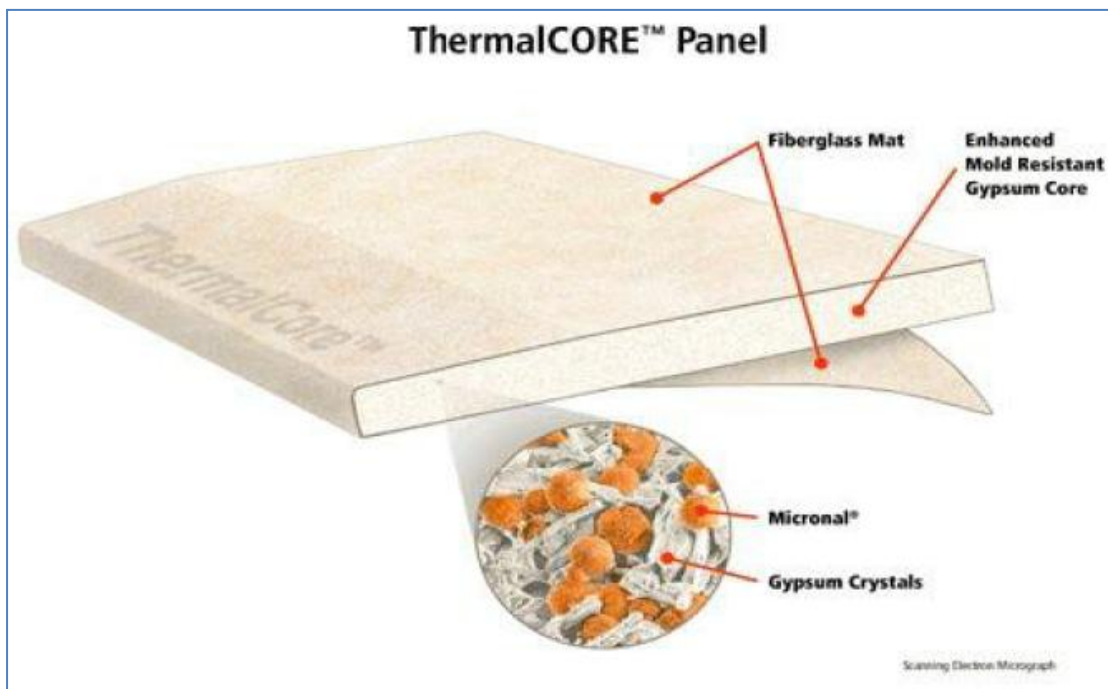
Σχήμα 4.2.1.5.2: Εξέλιξη θερμοκρασίας στο καθιστικό ενός σπιτιού μια ζεστή μέρα, [17]

Η ετήσια ζήτηση θέρμανσης του κτιρίου είναι περίπου 13.500 kWh/m<sup>2</sup> του χώρου. Με προσθήκη PCM στην οροφή, η ζήτηση της θέρμανσης μπορεί να μειωθεί κατά 25 %, περίπου 10.200 kWh/m<sup>2</sup>. Επιπλέον, εάν ένα σύστημα κλιματισμού χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας θα μπορούσε να αυξηθεί έως 40 % περίπου.

#### 4.2.1.6 Γυψοσανίδες με PCM [11],[13],[18],[19]

Οι γυψοσανίδες που είναι εμποτισμένες με PCM μπορούν να τοποθετηθούν στη θέση των συμβατικών σανίδων τοίχου κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή της ανακαίνισης ενός κτιρίου. Μπορούν να παρέχουν θερμική αποθήκευση η οποία διανέμεται σε όλο το κτίριο, κάνοντας εφικτή τη παθητική ηλιακή σχεδίαση και τη ψύξη εκτός φορτίου αιχμής.

Μία γυψοσανίδα αποθήκευσης ενέργειας κατασκευάστηκε σε εργαστηριακή κλίμακα, με άμεση ενσωμάτωση ποσοστού 21-22% εμπορικής σειράς στεατικού βουτυλίου (BS) στο στάδιο ανάμειξης της παραγωγής μίας συμβατικής γυψοσανίδας, ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση του PCM στις ιδιότητες μίας γυψοσανίδας. Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες αυτής της εργαστηριακής γυψοσανίδας μπορούσαν να συγκριθούν αρκετά ανταγωνιστικά με τις ιδιότητες της κλασικής γυψοσανίδας. Η θερμοχωρητικότητα είχε δεκαπλασιαστεί σε ικανότητα αποθήκευσης και απελευθέρωσης της θερμότητας σε σχέση με τη γυψοσανίδα χωρίς PCM.



Σχήμα 4.2.1.6.1: Γυψοσανίδα με PCM, Knauf [13]

Ο Ρεϊρρο και οι συνεργάτες του μελέτησαν μία γυψοσανίδα εμποτισμένη με PCM ως ένα στοιχείο αποθήκευσης σε ένα ελαφρού βάρους παθητικό ηλιακό σπίτι 120m<sup>2</sup>, με καλή μόνωση και μία μεγάλη επιφάνεια νότιων υαλοπινάκων στο Μάντισον. Το σπίτι μπορούσε να εξοικονομήσει μέχρι και 3GJ ή 15% του ετήσιου ενεργειακού κόστους. Επίσης, συμπέραναν ότι η βέλτιστη ημερήσια αποθήκευση θερμότητας συμβαίνει όταν το PCM έχει μία θερμοκρασία τήξης 1-3°C πάνω από τη μέση θερμοκρασία δωματίου. Αντίστοιχα, η ημερήσια αποθήκευση βρέθηκε ότι μειώνεται όταν το PCM είχε θερμοκρασία αλλαγής φάσης που κυμαινόταν σε ένα εύρος θερμοκρασιών.

Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από άλλες εφαρμογές, όπως αυτή του Neeper, ο οποίος χρησιμοποίησε λιπαρά οξέα και κεριά παραφίνης σε γυψοσανίδες, τις οποίες και εξέθεσε στην ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του δωματίου, αλλά όχι σε άμεση έκθεση στον ήλιο.

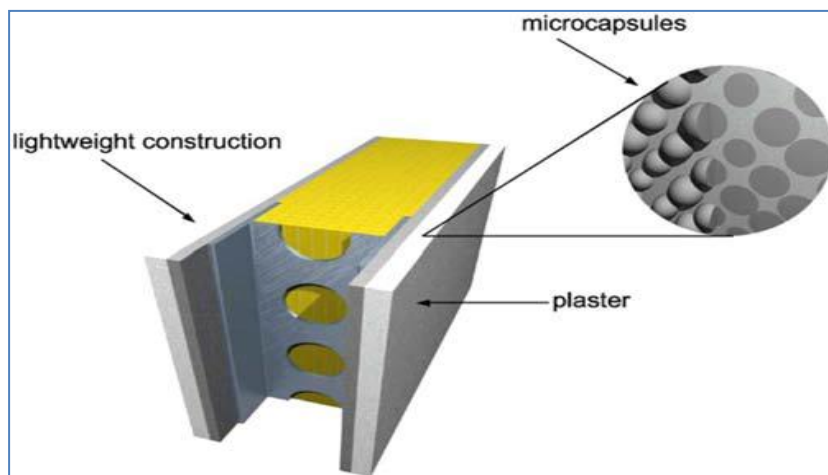
Οι Stetiu και Feustel χρησιμοποίησαν μία θερμική προσομοίωση κτιρίου βασισμένη σε μία προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών, για να εκτιμήσουν αριθμητικά τη συμπεριφορά μίας γυψοσανίδας εμποτισμένης με PCM σε ένα κτίριο όσον αφορά την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Το αποτέλεσμα έδειξε ότι αυτή η γυψοσανίδα, σε συνδυασμό μάλιστα και με μηχανικό νυχτερινό αερισμό προσφέρει τη δυνατότητα για μεγάλη μείωση των διαστάσεων του συστήματος, ειδικά σε κλίματα στα οποία η εξωτερική θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 18°C κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στην περίπτωση, μάλιστα, ενός πρωτότυπου κτιρίου στην Καλιφόρνια, εκτίμησαν ότι η εφαρμογή της γυψοσανίδας μπορούσε να μειώσει το μέγιστο φορτίο ψύξης κατά 28%.

Οι ίδιοι επιστήμονες μελέτησαν περαιτέρω τη χρήση μίας διπλής γυψοσανίδας με PCM, ώστε να αυξηθεί περισσότερο η ικανότητα αποθήκευσης του κτιρίου, για να είναι εφικτή η διατήρηση των θερμοκρασιών του δωματίου σε τιμές κοντά στο ανώτερο επίπεδο θερμικής άνεσης, ώστε να αποφευχθεί πιθανόν και η χρήση μηχανικής ψύξης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα κατοικήσιμο χώρο με υψηλά εσωτερικά φορτία στην Καλιφόρνια, έδειξαν πολύ μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα του δωματίου όταν η θερμική ενέργεια μπορούσε να αποθηκευτεί στις γυψοσανίδες με PCM.

Είναι βέβαια, απαραίτητο να αναφερθεί ότι η ψύξη του κτιριακού "φακέλου" μόνο με τη μεταφορά αέρα στο εσωτερικό του δωματίου, παρείχε ένα μη αποτελεσματικό τρόπο μεταφοράς θερμότητας.

Ως εκ τούτου, οι επιστήμονες συμπέραναν ότι πιθανή εξαναγκασμένη παροχή αέρα κατά μήκος των επιφανειών των τοίχων, θα ήταν ωφέλιμη για τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας.

Οι κτιριακές ενεργειακές προσομοιώσεις βοηθούν στην εκτίμηση των εν δυνάμει εφαρμογών των PCM στη θερμική αποθήκευση στα κτίρια. Γι' αυτό το Ινστιτούτο Fraunhofer στη Γερμανία προσομοίωσε τη θερμική συμπεριφορά των δομικών συστατικών, ώστε να συγκρίνει τη δυναμική επίδοση διαφορετικών τύπων γυψοσανίδων που περιέχουν διαφορετικές ποσότητες PCM. Ανέλυσαν την επίδραση ως μία συνάρτηση του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης, την ποσότητα του PCM και τη κατασκευή και χρήση του κτιρίου. Χρησιμοποιώντας θερμογράφους, απεικονίστηκε ποιοτικά η επίδραση των PCM στα οικοδομικά υλικά: τέσσερα δείγματα γυψοσανίδων με διαφορετικές ποσότητες PCM, τα οποία είχαν θερμανθεί σε φούρνο και μετά είχαν παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια της ψύξης. Η διακύμανση της θερμοκρασίας με το χρόνο έδειξε ξεκάθαρα την επίδραση των PCMs. Όσο μεγαλύτερη ποσότητα PCM χρησιμοποιείται, τόσο μεγαλύτερη σε διάρκεια είναι η διαδικασία ψύξης. Ως εκ τούτου, σε ένα συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, η θερμική μάζα ενός δομικού στοιχείου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά εξαιτίας της διαδικασίας αλλαγής φάσης, τόσο ώστε η θερμική άνεση η οποία είναι συνήθως συνυφασμένη με μεγάλης μάζας και βαριά κτίρια, να μπορεί να προσεγγιστεί με ελαφριά υλικά κατασκευής.



**Σχήμα 4.2.1.6.2:** Σχηματική απεικόνιση τοίχου ελαφριάς κατασκευής με μικροκάψουλες PCM που έχουν ενσωματωθεί μέσα στον εσωτερικό σοβά, [19]

Οι Kedl και Stoval χρησιμοποίησαν οκταδεκάνιο κερί παραφίνης εμποτισμένο σε γυψοσανίδα για παθητική ηλιακή εφαρμογή, ώστε να διαπιστωθεί ποιός τρόπος είναι πιο αποτελεσματικός για ενσωμάτωση των PCM στις γυψοσανίδες. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι η διαδικασία της απορρόφησης ώστε να γεμίσει η γυψοσανίδα με κερί παραφίνης κλιμακώθηκε επιτυχώς από μικρά δείγματα σε πλήρους μεγέθους φύλλα. Το σημαντικότερο στοιχείο από αυτήν την προσπάθεια ήταν ότι η διαδικασία απορρόφησης έχει το δυναμικό να πετύχει υψηλότερη χωρητικότητα αποθήκευσης από το να γίνει απλή πρόσθεση σφαιριδίων γεμάτων με κερί παραφίνης στο στάδιο της κατασκευής της γυψοσανίδας.

Όσον αφορά τον τρόπο ενσωμάτωσης, μία άλλη εφαρμογή ήταν αυτή των Salyer και Sircar, οι οποίοι όρισαν έναν χαμηλού κόστους υδρογονάνθρακα ως PCM και ανέπτυξαν μεθόδους ώστε να γίνεται η ενσωμάτωση του PCM σε γυψοσανίδες, ελαχιστοποιώντας τη διαρροή και τα προβλήματα διαστολής κατά τη τήξη και τη στερεοποίηση. Η πρώτη επιτυχής διαδικασία ενσωμάτωσης ήταν αυτή της εκ των υστέρων απορρόφησης του υγρού PCM από το πορώδες μέρος της ήδη κατασκευασμένης γυψοσανίδας. Η δεύτερη ήταν η ενσωμάτωση ενός πρόσθετου στο υγρό στάδιο κατασκευής της γυψοσανίδας.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η μελέτη των Feldman και Hawes, οι οποίοι πραγματοποίησαν εκτενή μελέτη σχετικά με τη χρήση και τη σταθερότητα οργανικών συστατικών PCM σε γυψοσανίδες. Βρήκαν ότι ο γύψος συνεργάζεται αποτελεσματικά με ένα πλήθος υλικών, ενώ μερικά από αυτά που εξέτασαν ήταν το στεατικό βουτύλιο, το μείγμα καπρικού και λαυρικού οξέος και το παλμιτικό προπύλιο. Ο πίνακας που ακολουθεί δείχνει τα θερμικά χαρακτηριστικά κάποιων από τους πιο ενδιαφέροντες συνδυασμούς γύψου και PCM.

**TABLE 3. Thermal characteristics of various gypsum-PCM combinations used**

PCM			Average latent heat of impregnated gypsum (J/g)
Nature	Melting point (°C)	Freezing point (°C)	
45–55% Capric-lauric acid plus fire retardant	17	21	28
Butyl stearate	18	21	30
Propyl palmitate	19	16	40
Dodecanol	20	21	47

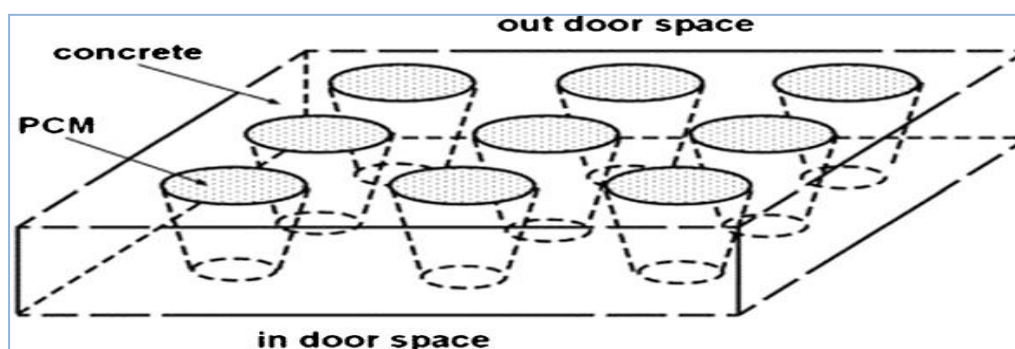
Σχήμα 4.2.1.6.3: Θερμικά χαρακτηριστικά διαφόρων συνδυασμών γύψου-PCM [18]

Τα αποτελέσματα των τεστ των διαφόρων γυψοσανίδων με PCM ήταν αρκετά ικανοποιητικά. Οι καμπτικές δυνάμεις ήταν συγκρίσιμες με αυτές της συμβατικής γυψοσανίδας, η αντοχή μετά από κύκλους ψύξης απόψυξης ήταν απολύτως ικανοποιητική, η αντίσταση σε ανάφλεξη ήταν άψογη, η συμβατότητα με τα χρώματα και τις ταπετσαρίες των γυψοσανίδων ήταν αρκετά καλή, η αντοχή σε υγρασία ήταν πιο καλή από αυτήν της συμβατικής γυψοσανίδας, η σταθερότητα των υλικών ήταν σε καλό επίπεδο, ενώ η αποθήκευση ενέργειας είχε σχεδόν δεκαπλασιαστεί. Το βάρος μίας τέτοιας γυψοσανίδας ήταν περίπου κατά 22% μεγαλύτερο από μία γυψοσανίδα χωρίς PCM, αλλά και αυτή η τιμή ήταν αποδεκτή από τα όρια βάρους της βιομηχανίας.

#### 4.2.1.7 Σκυρόδεμα ενισχυμένο με PCM [19],[20]

Κύριος στόχος ενσωμάτωσης των PCM σε υλικά βαριάς κατασκευής όπως το σκυρόδεμα είναι να αυξηθεί περαιτέρω η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας αυτών των υλικών. Ο συνδυασμός της υψηλής πυκνότητας του σκυροδέματος και της υψηλής λανθάνουσας θερμοχωρητικότητας του PCM αποτελεί μια ενδιαφέρουσα ιδέα όσον αφορά την αποθήκευση ενέργειας στα κτίρια και την εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη των κτιρίων.

Προκειμένου να βρεθεί μια μέθοδος για την μείωση των θερμικών κερδών στα κτίρια κατά την διάρκεια των ωρών λειτουργίας Alawadhi και Alqallaf μελέτησαν μια στέγη από σκυρόδεμα η οποία αποτελούνταν από τρύπες κόλουρου κώνου γεμισμένες με PCM. Τα αποτελέσματα για την καλύτερη διαμόρφωση έδειξαν ότι η ροή θερμότητας στο εσωτερικό του κτιρίου μπορεί να μειωθεί έως και 39% όταν το PCM εισάγεται στην οροφή.



Σχήμα 4.2.1.7.1: Alawadhi και Alqallaf ,Στέγη από σκυρόδεμα, [20]

Ο Castellon και οι συνεργάτες του μελέτησαν τη θερμική συμπεριφορά θαλάμων διαστάσεων 2m x 2 m x 3 m κατά τη διάρκεια του 2005 και του 2006 στην Ισπανία. Τα πάνελ (νότια, δυτικά και οροφή τοιχώματα) ήταν μικροενθυλακωμένα με 5% κ.β. PCM με σημείο τήξεως 26 °C και λανθάνουσα θερμότητα τήξης 100 kJ/kg. Τα αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των δύο καλοκαιριών ήταν πολύ καλά, αφού οι διαφορές θερμοκρασίας έως 4 °C παρατηρήθηκαν μεταξύ του θαλάμου αναφοράς και του θαλάμου με σκυρόδεμα ενισχυμένο με PCM. [20]

Η μέγιστη θερμοκρασία στους τοίχους με PCM εμφανίστηκε περίπου 2 ώρες αργότερα απ' ότι στο θάλαμο χωρίς PCM. Επιπλέον, προκειμένου να έχουμε μια πραγματική προσομοίωση ενός κτιρίου, διεξήχθησαν τα ακόλουθα πειράματα:



Περίπτωση 1: (Ελεύθερη ψύξη): Τα παράθυρα ήταν ανοιχτά τη νύχτα και κλειστά κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Περίπτωση 2: Τα παράθυρα του νότιου τοίχου ήταν ανοιχτά για ολόκληρη την ημέρα.

Περίπτωση 3: Τα παράθυρα ήταν κλειστά για όλη την ημέρα



Σχήμα 4.2.1.7.2: Πειραματικό σπίτι στην Ισπανία, [19]

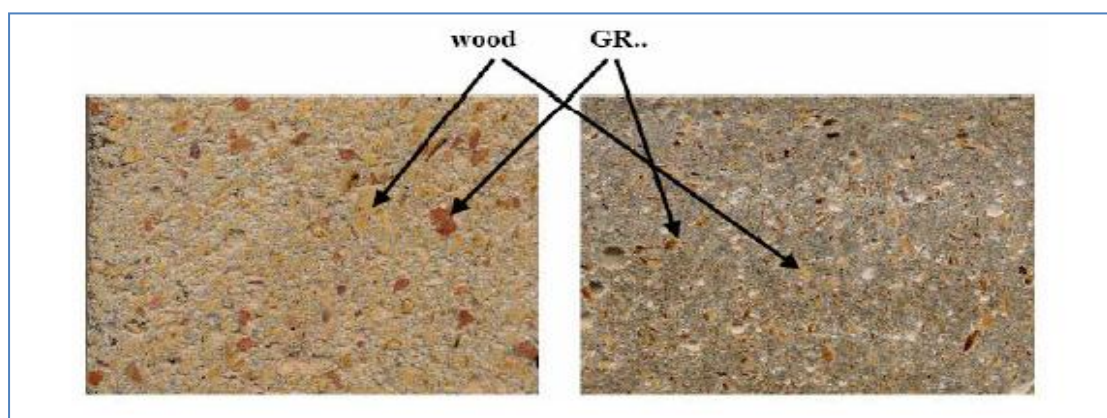
Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν ήταν διαφορετικά σε κάθε πείραμα, ωστόσο, σύμφωνα με τους συγγραφείς, η καλύτερη επιλογή ήταν η πρώτη καθώς επέτρεπε στο PCM να ολοκληρώνει τον κύκλο τήξης / στερεοποίησης.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι το σκυρόδεμα που ήταν μακροενθυλακωμένο με PCM έφτασε σε θλιπτική αντοχή πάνω από 25 MPa και αντοχή σε εφελκυσμό διάσπαση πάνω από 6MPa (μετά από 28 ημέρες).

#### 4.2.1.8 Μείγμα ξύλου - ελαφρού σκυροδέματος με ενσωματωμένα PCMs [13]

Πρόκειται για ένα μείγμα το οποίο αποτελείται από τσιμέντο, ροκανίδια ή πριονίδι, το οποίο δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 15 % κατά βάρος, νερό και πρόσθετα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή τόσο εξωτερικού τοίχου όσο και εσωτερικού. Η προσθήκη PCM στο μείγμα έχει ως σκοπό να αυξηθεί η θερμοχωρητικότητα του τοίχου και να δημιουργηθούν ελαφρότερα και λεπτότερα δομικά στοιχεία τοίχου με βελτιωμένη θερμική απόδοση.

Δύο PCM της εταιρείας Rubitherm GR40 και GR50 μελετήθηκαν από Mehling και τους συνεργάτες του. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα PCMs μπορούν να συνδυαστούν με μείγμα ξύλου-ελαφρού σκυροδέματος και οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν φαίνεται να αλλάζουν σημαντικά.



Σχήμα 4.2.1.8.1: Δείγμα ξύλου-ελαφρού σκυροδέματος με ενσωματωμένα PCMs [22]

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης PCM στο μείγμα που αναφέρονται είναι

- Θερμική αγωγιμότητα:  $\lambda=0,15 - 0,75 \text{ W / m K}$
- Μόνωση θορύβου
- πυκνότητα μεταξύ  $600 \text{ και } 1700 \text{ kg/m}^3$
- θερμοχωρητικότητα:  $c_p= 0,39 - 0,48 \text{ kJ / kg K}$  για  $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$
- Πυκνότητα περίπου 60-70% της αξίας του καθαρού σκυροδέματος ( $0,67 \text{ kJ / kg K}$  για  $\rho = 2400 \text{ kg / m}^3$ )

#### 4.2.1.9 Τούβλο με PCM [21]

Σε σχετικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στη Τεχεράνη, και συγκεκριμένα από τη Samira και τον Hadi Pashdarshahri, προέκυψε, ύστερα από σύγκριση του κλασικού τούβλου με ένα που περιέχει PCM, ότι η μέγιστη εισροή θερμότητας μπορεί να περιοριστεί σε ένα ποσοστό 32,8%, ανάλογα πάντα με την ποιότητα του PCM. Ένας ακόμα παράγοντας που επιδρά στη θερμική αποδοτικότητα του τούβλου με ενσωματωμένο PCM είναι η θέση που τοποθετείται το τελευταίο. Από την έρευνα προέκυψε ότι το PCM παρουσιάζει μεγαλύτερη αποδοτικότητα όταν τοποθετείται στην εξωτερική πλευρά του τοίχου.



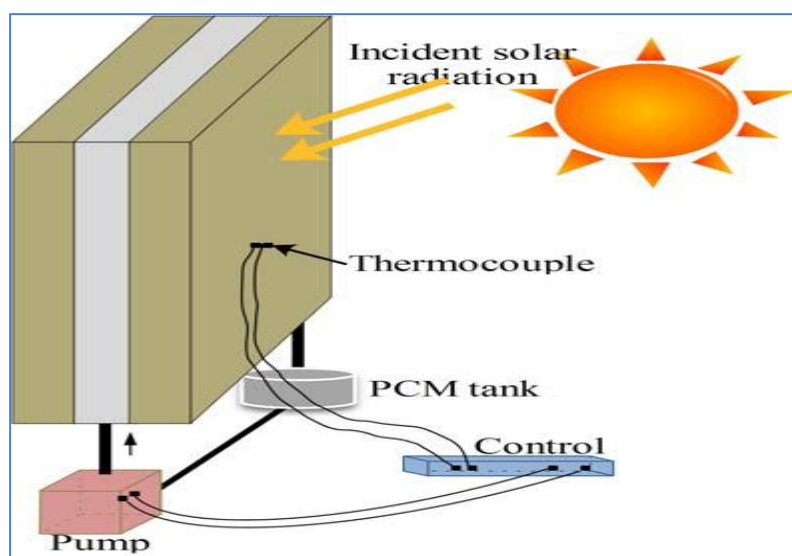
Σχήμα 4.2.1.9.1: Τούβλα με μακροκάψουλες PCM, [20]

## 4.2.2 Ενεργητικά Συστήματα Αποθήκευσης

### 4.2.2.1 Ενεργειακά Παραθύρα [23]

Η δημιουργία ενεργειακών παραθύρων προτάθηκε από τον Ismail και άλλους και αφορά τη χρήση παραθύρων που περιέχουν PCMs.

Το παράθυρο αποτελείται από δύο γυάλινες επιφάνειες, όπου ανάμεσά τους υπάρχει κενό, και από έναν αεραγωγό στην επάνω γωνία. Η βάση και οι πλευρές του παραθύρου είναι σφραγισμένες. Εξαιρούνται δύο τρύπες στη βάση, που είναι συνδεδεμένες μέσω πλαστικού αγωγού με μια αντλία και μια δεξαμενή με PCM αντίστοιχα. Η αντλία με τη σειρά της είναι και αυτή συνδεδεμένη με τη δεξαμενή που περιέχει το PCM σε υγρή μορφή. Η λειτουργία της αντλίας ελέγχεται με έναν αισθητήρα θερμοκρασίας. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας φτάσει σε μια προκαθορισμένη τιμή, τότε τίθεται σε λειτουργία η αντλία και το υγρό PCM, με τη βοήθειά της, πληρώνει τον κενό χώρο μεταξύ των δύο επιφανειών του παραθύρου. Λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας που επικρατεί στην εξωτερική επιφάνεια, το PCM αρχίζει να κρυσταλλώνεται, δημιουργώντας ένα στερεό στρώμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η εσωτερική θερμοκρασία να διατηρείται σταθερή, χωρίς να μειώνεται. Η ίδια διαδικασία συνεχίζεται έως ότου το PCM να γίνει εξ' ολοκλήρου στερεό.



Σχήμα 4.2.2.1.1: Θερμικό αποτελεσματικό παράθυρο, [14]

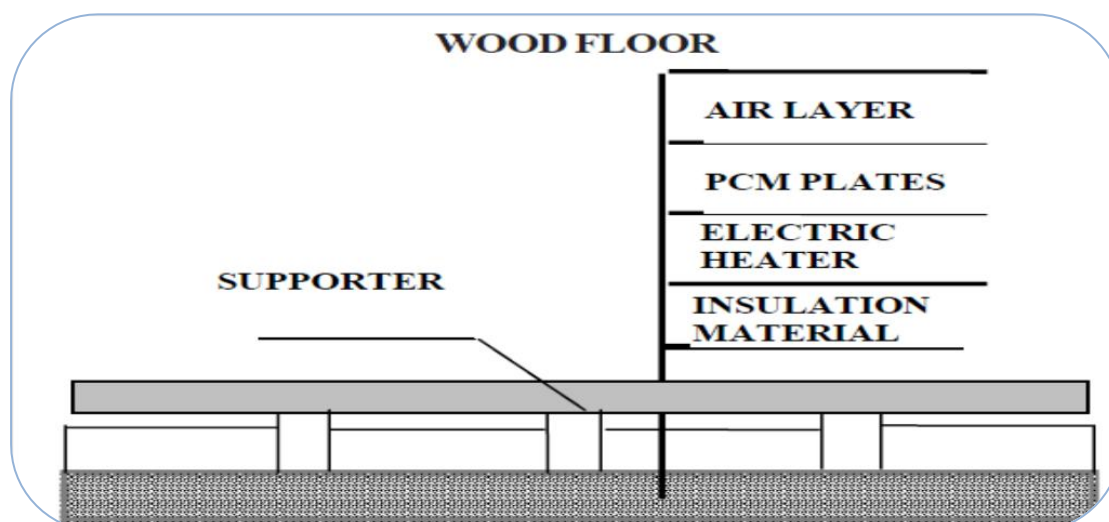
Ο καλός σχεδιασμός του συγκεκριμένου συστήματος μπορεί να εξασφαλίσει ότι η εξωτερική θερμοκρασία θα αρχίσει και πάλι να αυξάνεται, πριν την πλήρη στερεοποίηση του χρησιμοποιούμενου PCM. Διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος η εσωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος να μειωθεί, κάτι που φυσικά είναι ανεπιθύμητο. Σύμφωνα με τους μελετητές, το σύστημα αυτό είναι βιώσιμο και θερμικά πολύ αποδοτικό. Η πλήρωση του παραθύρου με PCM βοηθάει στο φιλτράρισμα της θερμικής ακτινοβολίας και τη μείωση των θερμικών απωλειών, αφού το μεγαλύτερο μέρος της μεταφερόμενης ενέργειας απορροφάται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Το διπλό παράθυρο γεμισμένο με PCM είναι πολύ πιο αποδοτικό σε σχέση με το διπλό παράθυρο με αέρα ενδιάμεσα. Επίσης, η χρήση χρωματιστού PCM, ιδίως πράσινου χρώματος, είναι πιο αποδοτική ως προς τη μείωση των ενεργειακών απωλειών.

#### 4.2.2.2 Ενδοδαπέδιο Ηλεκτρικό Σύστημα Θέρμανσης με PCMs [13]

Ένα σύστημα ενδοδαπέδιας ηλεκτρικής θέρμανσης χρησιμοποιώντας ως PCM παραφίνη κεριού (σημείο τήξης 40°C) προτάθηκε από τους Farid και Chen. Τοποθέτησαν στρώμα PCM πάχους 30mm μεταξύ της θερμαινόμενης επιφάνειας και των πλακιδίων του πατώματος. Με χρήση προσομοίωσης υπολογιστή βρέθηκε ότι η παραγόμενη θερμότητα του δαπέδου θα μπορούσε να αυξηθεί από τα 30 στα 75 W/m<sup>2</sup> στην περίπτωση χρήσης PCM.

Ο Keeping Lina και άλλοι πρότειναν ένα νέο σύστημα ενδοδαπέδιας ηλεκτρικής θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος. Προκειμένου να μελετήσουν την θερμική απόδοση του συστήματος, ένα πειραματικό σπίτι με αυτό το σύστημα θέρμανσης δημιουργήθηκε στο πανεπιστήμιο Tsinghua στο Πεκίνο. Οι διαστάσεις του πειραματικού σπιτιού ήταν 3m (βάθος) x 2m (πλάτος) x 2m (ύψος). Στην νότια πλευρά υπήρχε παράθυρο από διπλό τζάμι διαστάσεων 1,6m x 1,5m, το οποίο ήταν καλυμμένο με μαύρη κουρτίνα. Η οροφή και οι τοίχοι ήταν φτιαγμένοι με πολυστερίνη πάχους 100 mm τυλιγμένη από μεταλλικό στρώμα. Το σύστημα ενδοδαπέδιας ηλεκτρικής θέρμανσης περιλάμβανε μόνωση πολυστερίνης πάχους 120mm, ηλεκτρικές θερμάστρες, PCM πάχους 15mm, ξύλινα στηρίγματα, στρώμα αέρα πάχους 10 mm και ξύλινο πάτωμα πάχους 8 mm.

Χρησιμοποίησαν 75% κατά βάρος παραφίνη ως διεσπαρμένο PCM και 25% κατά βάρος πολυαιθυλένιο ως υποστηρικτικό υλικό. Το σύστημα αύξησε την εσωτερική θερμοκρασία χωρίς να αυξηθεί η θερμοκρασιακή διαφορά. Επίσης, η θερμοκρασία των πλακών PCM διατηρήθηκε στη θερμοκρασία αλλαγής φάσεως για μεγάλο χρονικό διάστημα αφού οι θερμάστρες σταμάτησαν να λειτουργούν. Περισσότερο από το μισό της συνολικής θερμότητας ηλεκτρικής ενέργειας είχε μετατοπιστεί από την περίοδο αιχμής στην περίοδο εκτός αιχμής, το οποίο θα μπορούσε να παρέχει σημαντικά οικονομικά οφέλη λόγω της διαφοράς τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ ημέρας και νύχτας. Κατά μήκος της κατακόρυφης κατεύθυνσης εμφανίστηκε μικρή εσωτερική θερμοκρασιακή διαφορά επειδή η ενδοδαπέδια θέρμανση μπορούσε να ζεστάνει ομοιόμορφα τον αέρα στους εσωτερικούς χώρους. Επιπλέον, το σύστημα θέρμανσης ήταν άνετο και ενεργειακά αποδοτικό.

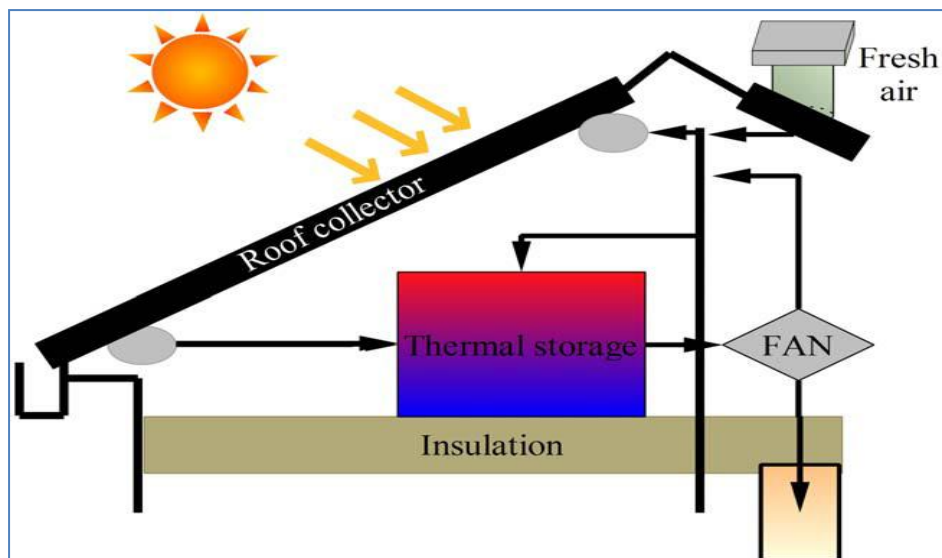


Σχήμα 4.2.2.2.1: Ενδοδαπέδιο ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης, [13]

### 4.2.2.3 Οροφές PCM για Ενεργή Θέρμανση και Ψύξη [14]

Οι σανίδες οροφής με ενσωματωμένο PCM σε συστήματα κλιματισμού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο των μέγιστων φορτίων. Μια ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου της Νότιας έχει αναπτύξει μια οροφή με συστήματα αποθήκευσης της ηλιακής θερμότητας με αέρα. Η μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, στην οποία υπάρχει μια πλάκα σιδήρου, που χρησιμεύει ως ηλιακός συλλέκτης, αποθηκεύει θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας και τη προσδίδει κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.

Το σύστημα λειτουργεί με τρεις τρόπους. Κατά την διάρκεια της ημέρας και όταν απαιτείται θερμότητα, ο αέρας περνά από τον συλλέκτη και στη συνέχεια στο σπίτι. Όταν δεν υπάρχει ανάγκη για θέρμανση ο αέρας διοχετεύεται στην μονάδα αποθήκευσης, λιώνοντας το PCM, φορτίζοντας το για μελλοντική χρήση. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι διαθέσιμη, ο αέρας του δωματίου περνάει από την μονάδα αποθήκευσης, θερμαίνεται και διοχετεύεται στο σπίτι. Όταν η εγκατάσταση αποθήκευσης έχει κρυώσει χρησιμοποιείται βοηθητικός θερμαντήρας αέρα για την θέρμανση του δωματίου. Επιπλέον, καθώς το ηλιακό σύστημα θέρμανσης μεταφέρει θερμότητα στο σπίτι, διοχετεύεται με επαρκείς ποσότητες φρέσκου αέρα.

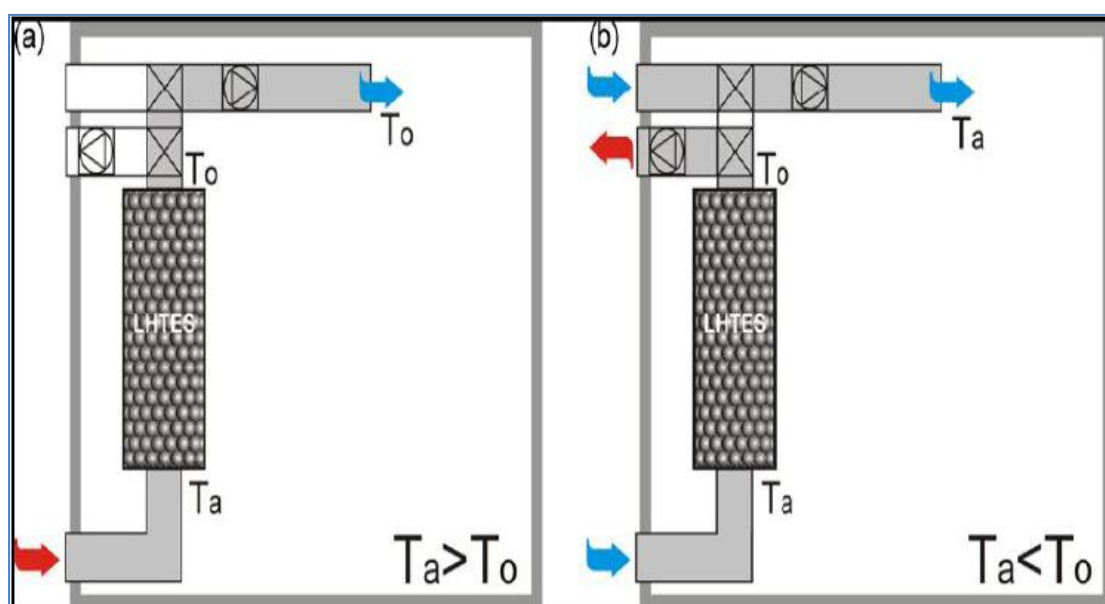


Σχήμα 4.2.2.3.2: Οροφή PCM για ενεργή θέρμανση και ψύξη, [14]

#### 4.2.2.4 Free-Cooling [13],[14]

Η μέθοδος της ελεύθερης ψύξης (free cooling) σε συνδυασμό με τα PCM μπορεί να προσφέρει μεγάλες δυνατότητες για εξοικονόμηση ενέργειας. Free-cooling ονομάζεται αυτή η ποσότητα της ψύξης, η οποία μπορεί να αποκτηθεί από υπάρχοντα, πρόσθετα ή τροποποιημένα εξαρτήματα κατά τη διάρκεια στην οποία επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες ατμοσφαιρικού αέρα, και η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει μερικώς ή ολικώς το μηχανικό φορτίο ψύξης.

Πρόκειται για μία εναλλακτική μέθοδο ψύξης και αερισμού του κτιρίου, η οποία συνδυάζει ενισχυμένη θερμική μάζα και νυχτερινό αερισμό. Η θερμική αδράνεια ενός κτιρίου προσαρμόζεται ενεργά από την ενσωμάτωση PCM στα δομικά στοιχεία του. Ο νυχτερινός ψυχρός αέρας χρησιμοποιείται για να ψύξει το εσωτερικό του κτιρίου και την αποθήκη με το PCM. Ο εξωτερικός αυτός αέρας μπορεί να εισαχθεί στον εσωτερικό χώρο μέσω παραθύρων, ανεμιστήρων τοίχου ή συστήματος κεντρικής παροχής αέρα. Ο σκοπός της χρήσης προϊόντων PCM είναι η μείωση της ενέργειας που απαιτείται για τη ψύξη ενός κτιρίου, στο οποίο υπάρχει πλεονάζουσα παραγωγή θερμότητας.

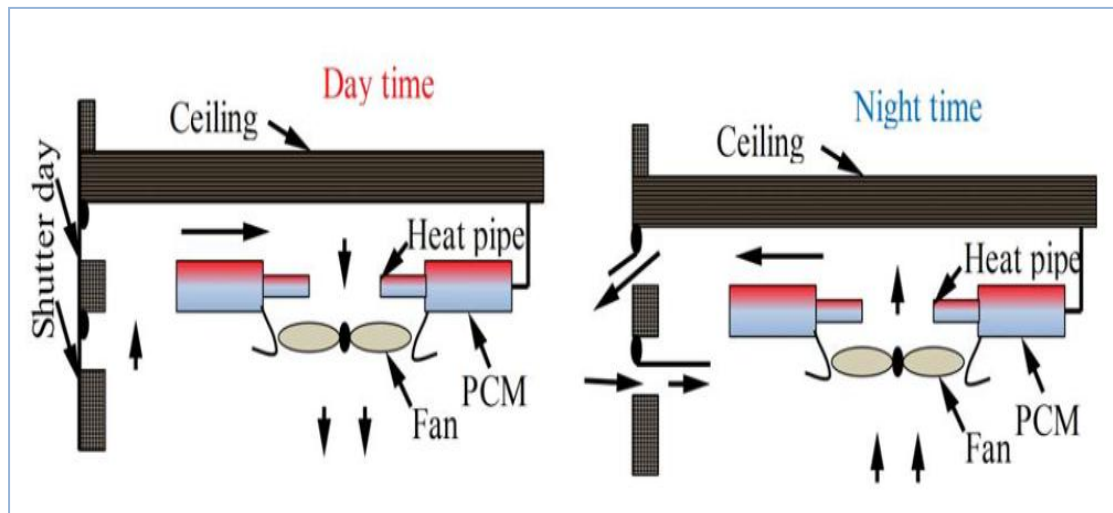


Σχήμα 4.2.2.4.1: Διάταξη του συστήματος Free-Cooling την ημέρα (a) και τη νύχτα(b) [13]



Στη βιβλιογραφία η πρώτη εφαρμογή που αναφέρεται είναι αυτή του Turnpenny και των συνεργατών του. Οι επιστήμονες αυτοί μελέτησαν ένα πρωτοποριακό σύστημα νυκτερινού αερισμού με μονάδα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας, η οποία χρησιμοποιεί αγωγούς θερμότητας ενσωματωμένους στο PCM.

Ο αέρας από το δωμάτιο διέρχεται πάνω από τα εκτεθειμένα άκρα των αγωγών θερμότητας, χρησιμοποιώντας χαμηλής ισχύος ανεμιστήρες. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η θερμότητα μεταφέρεται στο PCM, προκαλώντας την τήξη του και μειώνοντας τη θερμοκρασία του δωματίου. Κατά τη διάρκεια της νύχτας και ενώ τα παραθυρόφυλλα είναι ανοιχτά, εξωτερικός ψυχρός αέρας διέρχεται πάνω από τους αγωγούς θερμότητας, ως εκ τούτου η θερμότητα εξάγεται από το ψυχόμενο τώρα PCM.



Σχήμα4.2.2.4.2: Free-Cooling [14]

Η καινοτομία σε αυτό το σύστημα είναι ότι οι αγωγοί θερμότητας είναι αντιστρεπτοί. Με αυτούς τους αγωγούς θερμότητας αποφεύγεται η ανάγκη για σύνθετες γεωμετρίες μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια του PCM που είναι εκτεθειμένη στον αέρα.

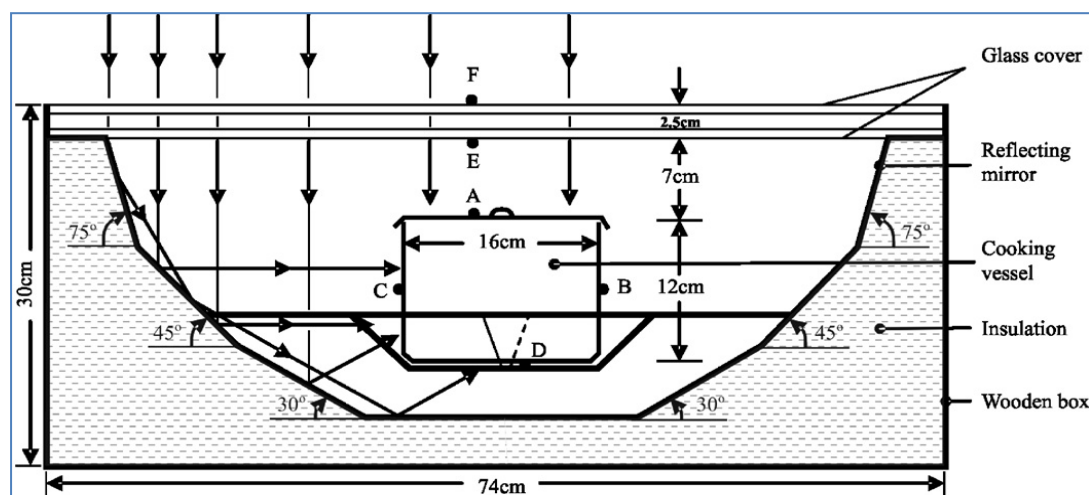
Τα πειράματα που διεξήχθησαν κάτω από τρεις διαφορετικές ροές αέρα που αναμένονται σε ένα δωμάτιο, είχαν ως αποτέλεσμα ένα ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από τον αέρα στο PCM της τάξεως των 40W σε ένα χρόνο τήξης 19 ωρών και ενώ η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και του PCM ήταν περίπου 5°C.

## 4.3 Άλλες Εφαρμογές

### 4.3.1 Ηλιακά Μαγειρικά Σκεύη με PCMs [1],[15]

Τα μαγειρικά σκεύη που χρησιμοποιούν ηλιακή ενέργεια έχουν εξαιρετικό ενεργειακό δυναμικό, ιδίως σε χώρες θερμού κλίματος και υψηλής ηλιοφάνειας. Παρόλα αυτά, η λειτουργία τους περιορίζεται, αν δεν είναι εξοπλισμένα με κάποιο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, μιας και είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν χωρίς ηλιακής ακτινοβολία, δηλαδή τα απογεύματα ή τις συννεφιασμένες μέρες. Σε αυτό ακριβώς το σημείο φαίνεται η μεγάλη σημασία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με PCM, τα οποία σε συνδυασμό με τα ηλιακή σκεύη παρέχουν τη δυνατότητα ηλιακού μαγειρέματος κάτω από οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες.

Η πρώτη πειραματική έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση έγινε από τον Domanski και άλλους. Σε αυτήν, μελέτησαν την πιθανότητα μαγειρέματος με PCM κατά τις ώρες χωρίς ηλιοφάνεια, χρησιμοποιώντας ένα μη συμβατικό ηλιακό σκεύος τύπου κουτιού, με εσωτερικά κάτοπτρα πολλών βαθμίδων.

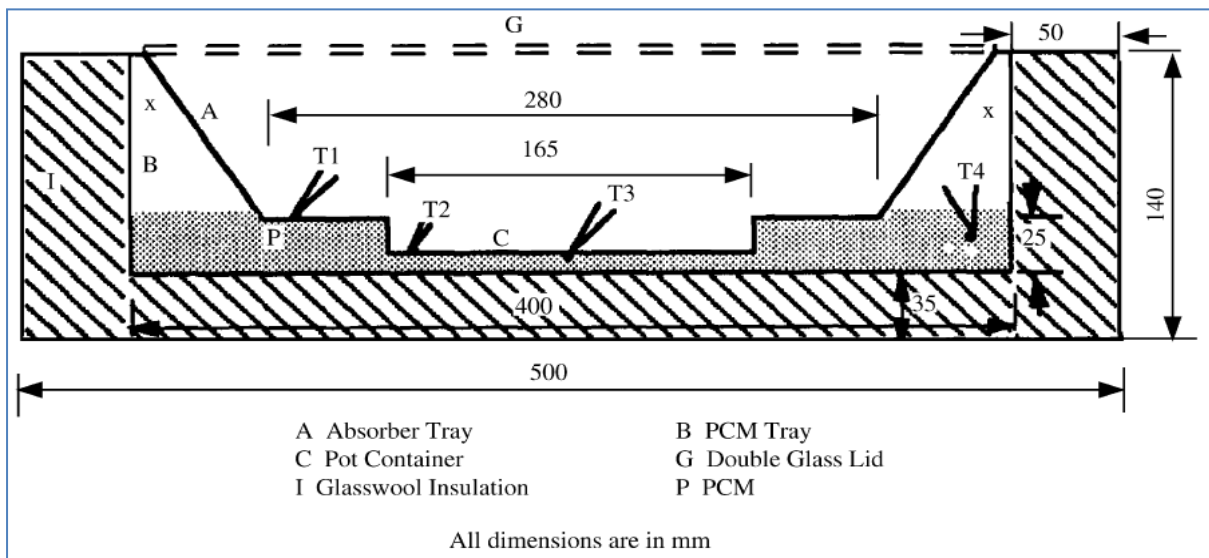


Σχήμα 4.3.1.1: Domanski, ηλιακός φούρνος, [1]

Η συγκεκριμένη μονάδα αποθήκευσης ενέργειας – μαγειρέματος αποτελείται από δύο ομόκεντρα κυλινδρικά δοχεία αλουμινίου. Το ενδιάμεσο κενό των δύο κυλίνδρων πληρώνεται με 1,1kg στεατικού οξέος και 2kg νιτρικού μαγνησίου, υλικά που αποτελούν το PCM του συστήματος.

Παρατηρήθηκε ότι ο χρόνος θερμικής αποφόρτισης του σκεύους έτεινε να αυξηθεί, όσο η αρχική του θερμοκρασία και ο βαθμός υπερθέρμανσης του PCM αυξανόταν, ενώ η αύξηση της μάζας του επέφερε αντίθετα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα της έρευνας επιβεβαίωσαν ότι η ολική απόδοση των ηλιακών σκευών με PCM είναι 3-4 φορές μεγαλύτερη από εκείνη των ηλιακών σκευών σε συνεργασία με συστήματα ατμού ή σωλήνων θέρμανσης. Μάλιστα, το συγκεκριμένο σύστημα θα μπορούσε να επιτύχει ακόμα μεγαλύτερες θερμοκρασίες, εάν αντί των PCMs που δοκιμάστηκαν, χρησιμοποιούνταν άλλα με σημεία τήξης που υπερβαίνουν τους 100°C.

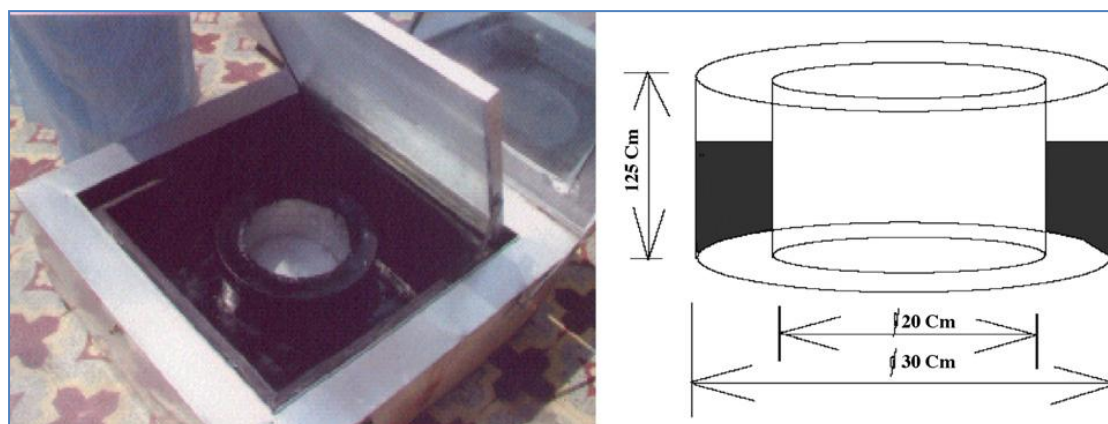
Οι Buddhi και Sahoo πρότειναν, επίσης, τη χρήση PCMs στα ηλιακά σκεύη μαγειρικής. Στο πείραμά τους χρησιμοποίησαν 3,2kg στεατικού οξέος εμπορίου με σημείο τήξης 55,1°C και θερμότητα τήξης 160kJ/kg ως PCM. Το συγκεκριμένο σύστημα παρείχε τη δυνατότητα μαγειρέματος χωρίς ηλιοφάνεια, όμως για σύντομο χρονικό διάστημα. Η ποσότητα της αποθηκευμένης σε αυτό θερμότητας ήταν ανεπαρκής για πιο εκτεταμένη χρήση και η θερμοκρασία τήξης του PCM αρκετά χαμηλή.



Σχήμα 4.3.1.2: Buddhi και Sahoo, ηλιακός φούρνος, [1]

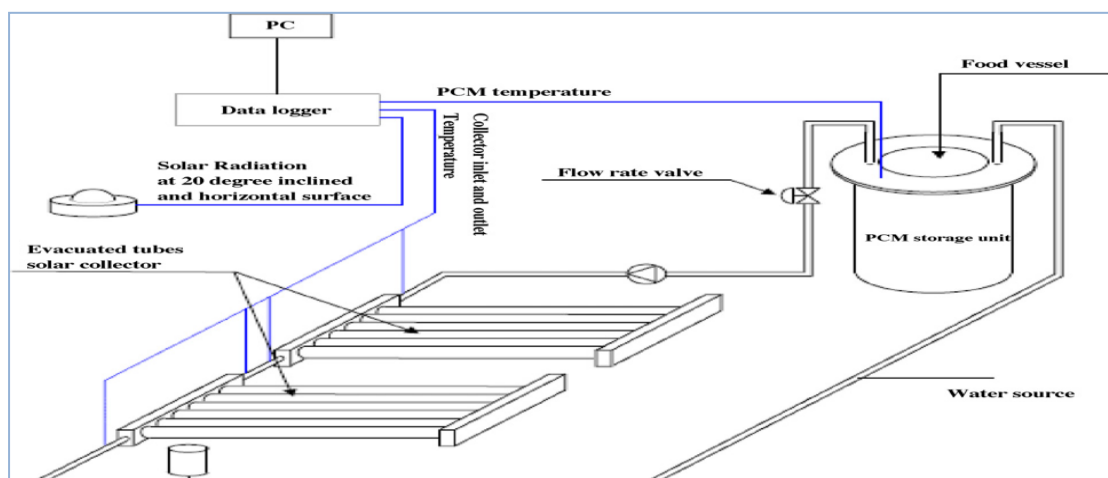
Το 2000, ο Sharma και άλλοι ανέφεραν την κατασκευή ενός βελτιωμένου ηλιακού μαγειρικού σκεύους με PCM. Χρησιμοποίησαν ακεταμίδιο με σημείο τήξης 82°C και θερμότητα τήξης 263kJ/kg. Οι ερευνητές απέδειξαν ότι το μελετώμενο σύστημα συνδυασμένης κυλινδρικής μονάδας αποθήκευσης θερμότητας και μαγειρικού σκεύους παρείχε επαρκώς τη δυνατότητα μαγειρέματος κατά τη διάρκεια του απογεύματος.

Επίσης, ακόμα πιο αποδοτική σε τέτοιου είδους συστήματα είναι η χρήση PCM με θερμοκρασία τήξης από 105 έως 110°C.



Σχήμα 4.3.1.3: Sharma, ηλιακός φούρνος, [15]

Ο Sharma και οι συνεργάτες του, ακόμα, μελέτησαν τη συνεργασία μαγειρικών σκευών αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με ηλιακούς συλλέκτες κενού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν δύο συλλέκτες κενού, καθένας από τους οποίους είχε έκταση απορρόφησης ίσης με 1,82m<sup>2</sup>. Το PCM ήταν η ερυθριτόλη με σημείο τήξης 122°C και θερμότητα τήξης 338,8kJ/kg. Τα πειράματα έδειξαν ότι η συγκεκριμένη διάταξη έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης επαρκούς θερμότητας για το μαγείρεμα τόσο την ημέρα όσο και το απόγευμα. Ο συγκεκριμένος τύπος ηλιακών μαγειρικών σκευών είναι αρκετά ακριβός, όμως παρουσιάζει υψηλό ενεργειακό δυναμικό.

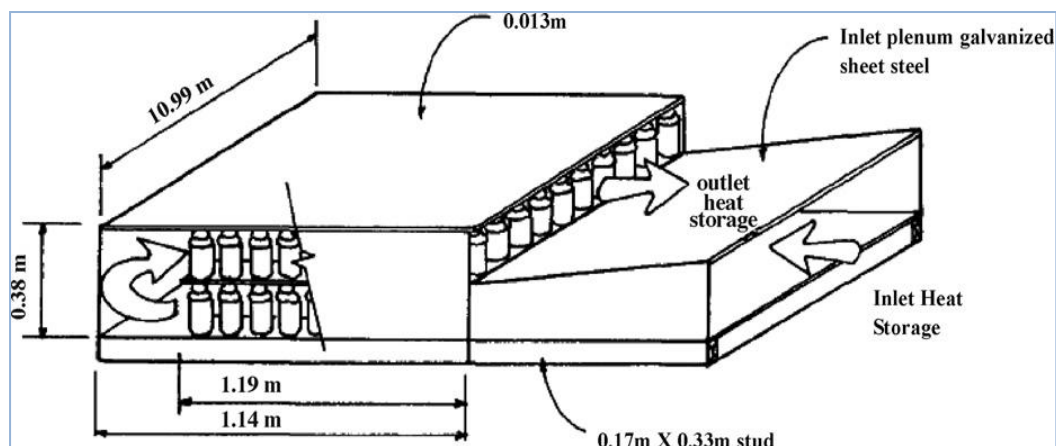


Σχήμα 4.3.1.4: Sharma, ηλιακός φούρνος, λειτουργία βασισμένη σε ηλιακό συλλέκτη με σωλήνες κενού, [15]

### 4.3.2 Ηλιακό Θερμοκήπιο [1],[15]

Οι πρώτες μελέτες αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας στα θερμοκήπια ξεκίνησαν να πραγματοποιούνται το 1980.

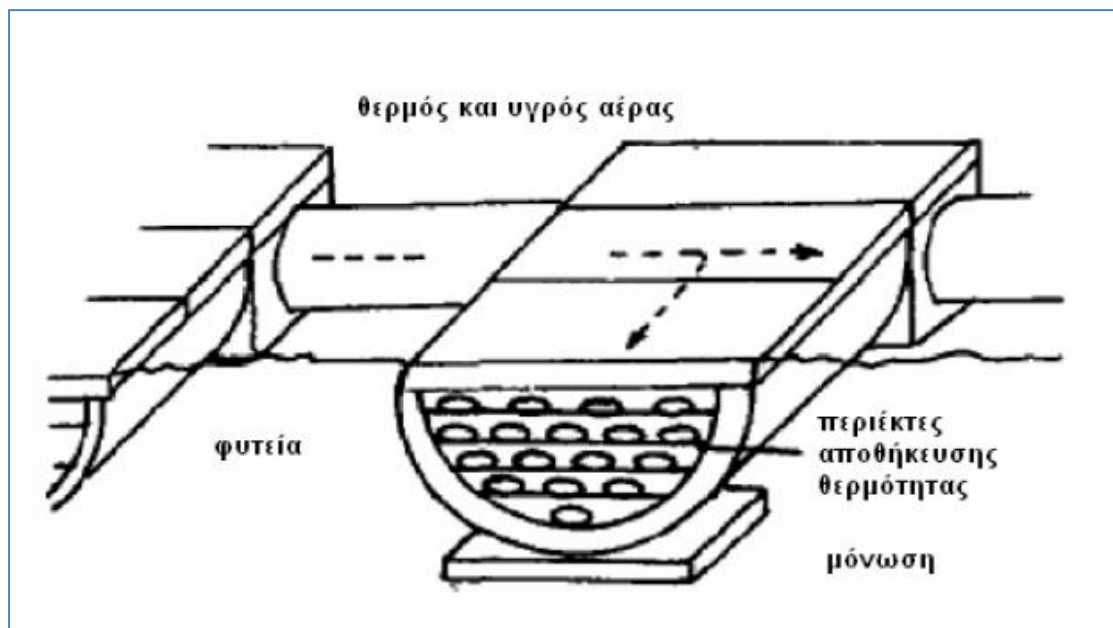
Οι Kern και Aldrich διεξήγαγαν τα πρώτα πειράματα σε αυτόν το τομέα. Χρησιμοποίησαν ως PCM 1650kg χλωριούχου ασβεστίου σε συσκευασίες ψεκασμού 0,74kg η καθεμία, για να ερευνήσουν τις πιθανότητες ενεργειακής αποθήκευσης εντός και εκτός ενός θερμοκηπίου 36m<sup>2</sup>, καλυμμένου με γυαλί ινών πολυβινυλικού φθορίου. Οι συσκευασίες ψεκασμού με το PCM τοποθετήθηκαν σε δύο χώρους αποθήκευσης, έναν εσωτερικά και έναν εξωτερικά του θερμοκηπίου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η εσωτερική μονάδα αποθήκευσης ενέργει συγκεντρώνει θερμό αέρα από τη κορυφή της στέγης του θερμοκηπίου, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας η κατεύθυνση της ροής του αέρα αντιστρέφεται απελευθερώνοντας τη θερμότητα.



Σχήμα 4.3.2.1: μονάδα αποθήκευσης στο ηλιακό θερμοκήπιο, [15]

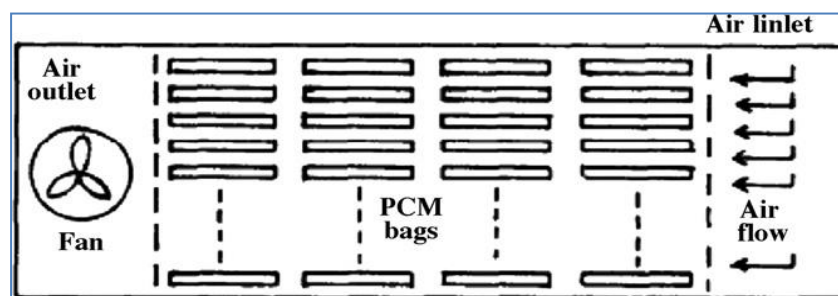
Οι Hung και Tolsoy σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με δύο διαφορετικές συσσωρεύσεις και με δυνατότητα μεταβολής της διεύθυνσης του αέρα. Το σύστημα ενσωματώθηκε στο κεντρικό ηλιακό σύστημα του θερμοκηπίου. Η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μεταδίδεται και αποθηκεύεται, ανακυκλώνοντας αέρα μέσω υπόγειων επιπέδων εναλλακτών θερμότητας γεμάτων με PCM.

Από τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι το σύστημα μπορεί να πετύχει έως και 80% εξοικονόμηση στα εκπεμπόμενα αέρια προπανίου.



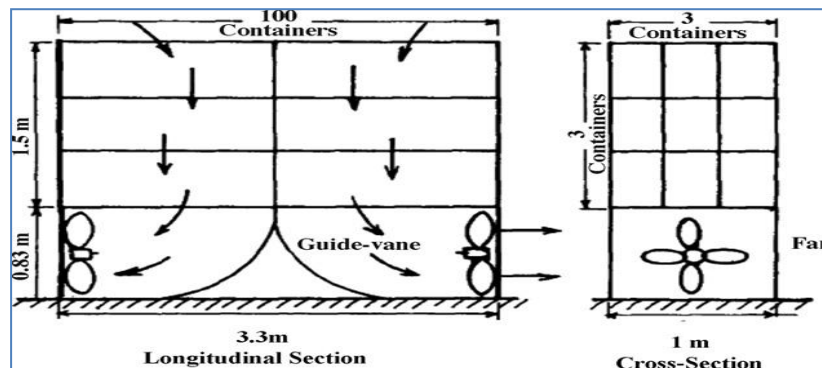
Σχήμα 4.3.2.2: Υπόγειο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με PCM [15]

Οι Nishira και Takakura χρησιμοποίησαν θειικό νάτριο ως PCM για τη θέρμανση θερμοκηπίου στην Ιαπωνία, με ορισμένα πρόσθετα για την αποφυγή των φαινομένων διαχωρισμού φάσεων και εκφυλισμού του. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους έδειξαν ότι περίπου 40-60% της αποθηκευμένης θερμότητας καταναλώθηκε από το θερμοκήπιο.



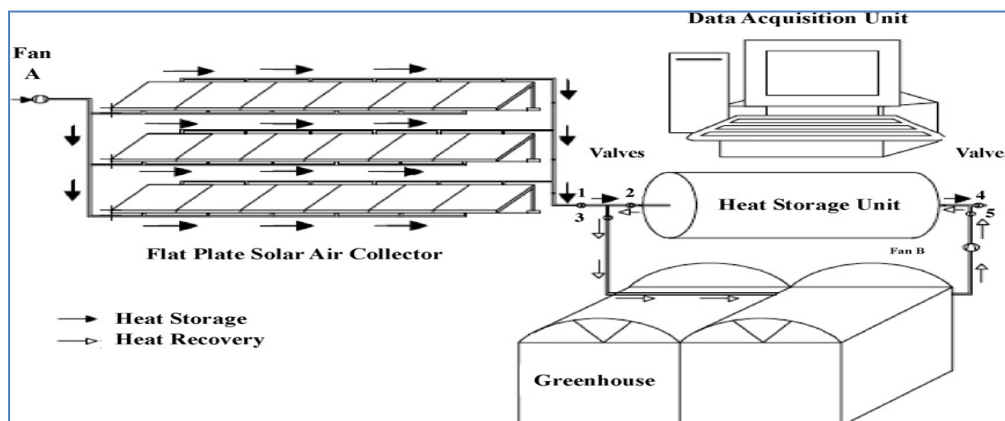
Σχήμα 4.3.2.3: Nishina και Takakura , μονάδα αποθήκευσης, [15]

Οι Baile, Boulard και άλλοι μελέτησαν πειραματικά τη χρήση του PCM  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  με σημείο τήξης  $21^\circ\text{C}$ , σε θερμοκήπιο  $176\text{m}^2$ , διπλού πολυανθρακικού καλύμματος και εξαναγκασμένου αερισμού. Με αυτή την τεχνική, το 40% της απαιτούμενης θερμικής φόρτισης προσδιόταν με τη βοήθεια του PCM, με αποτέλεσμα το σύστημα να επιτυγχάνει συνολική εξοικονόμηση ενέργειας ίση με 30%.



Σχήμα 4.3.2.4: Boulard και Baile, μονάδα αποθήκευσης, [15]

Ο Ozturk για την θέρμανση  $180\text{m}^2$  θερμοκηπίου χρησιμοποίησε ως PCM, παραφίνη κεριού. Το σύστημα αποτελείται κυρίως από πέντε μονάδες: μια επίπεδη πλάκα ηλιακών συλλεκτών (ως μονάδα συλλογής θερμότητας), μια μονάδα λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης, μια μονάδα μεταφοράς θερμότητας και μονάδα απόκτησης δεδομένων.



Σχήμα 4.3.2.5: Ozturk, διάταξη μονάδα αποθήκευσης, [15]

Η μονάδα αποθήκευσης της λανθάνουσας θερμότητας περιείχε 6000 kg παραφίνης, που αντιστοιχούν σε 33.33 kg PCM ανά τετραγωνικό μέτρο της επιφάνειας του θερμοκηπίου. Αναλύσεις ενέργειας και εξέργειας εφαρμόστηκαν προκειμένου να εκτιμηθεί η αποδοτικότητα του συστήματος. Το ποσοστό της θερμότητας που μεταφέρεται στη μονάδα λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης κυμαινόταν από 1,22 έως 2,63 kW, ενώ το ποσοστό της θερμότητας που αποθηκεύεται στη μονάδα λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης κυμαινόταν από 0,65 έως 2,1 kW. Η μέση ημερήσια τιμή της θερμικής εξέργειας που μεταφέρεται και αποθηκεύεται στη μονάδα λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης ήταν 111,2 W και 79,9 W, αντίστοιχα. Κατά την διάρκεια της πειραματικής περιόδου, διαπιστώθηκε ότι οι μέσες καθαρές αποδόσεις ενέργειας και εξέργειας ήταν 40.4% και 4.2%, αντίστοιχα. Η επίδραση της θερμοκρασιακής διαφοράς του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στην είσοδο και την έξοδο της μονάδας λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης στις υπολογιστικές τιμές της απόδοσης της ενέργειας και της εξέργειας υπολογίζεται κατά την διάρκεια της περιόδου φόρτισης.

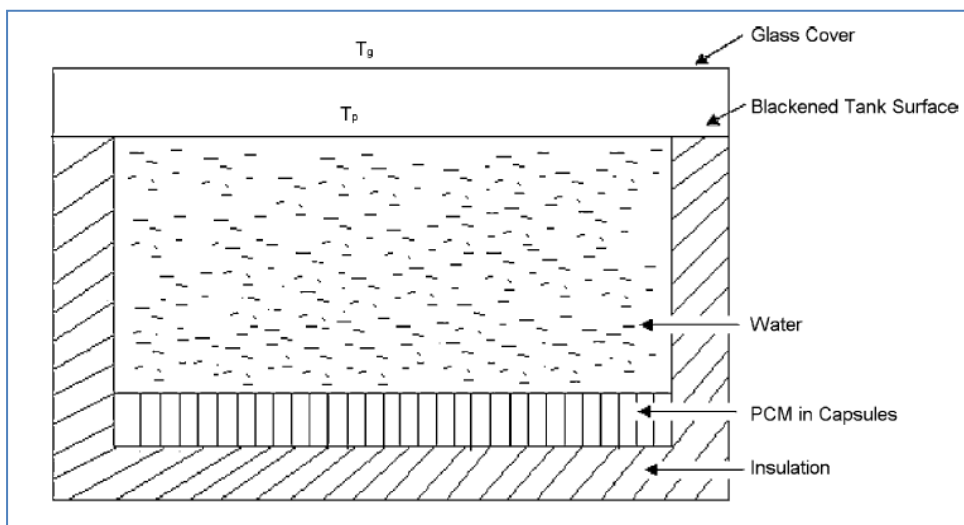
#### 4.3.3 Ηλιακά Συστήματα Θέρμανσης Νερού με PCM [1],[25]

Ο Prakesh και οι συνεργάτες του, ανέλυσαν έναν ηλιακό θερμοσίφωνα με ένα στρώμα PCM στο κάτω μέρος του, ώστε να πετύχουν και τη διατήρηση χαμηλής θερμοκρασίας του νερού στη δεξαμενή, αλλά ταυτόχρονα και μεγαλύτερη ποσότητα αποθηκευόμενης ενέργειας. Κατά τη διάρκεια των ωρών με ηλιοφάνεια, το νερό στη δεξαμενή θερμαίνεται και με τη σειρά του μεταφέρει θερμότητα στο PCM που βρίσκεται από κάτω του. Το PCM αποθηκεύει την ενέργεια στη μορφή λανθάνουσας θερμότητας και λιώνει. Κατά τη διάρκεια των ωρών χωρίς ηλιοφάνεια, το θερμό νερό αποσύρεται και αντικαθίσταται από κρύο νερό, το οποίο λαμβάνει θερμότητα από το PCM. Αυτή η ενέργεια απελευθερώνεται από το PCM, καθώς αλλάζει φάση από υγρό σε στερεό.

Ο έλεγχος της συγκεκριμένης διάταξης έγινε για δύο διαφορετικά βάθη τοποθέτησης του PCM και για σταθερή ή διακοπτόμενη ροή, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες θερμού νερού ενός οικιακού κτιρίου στην Ινδία. Επίσης, πραγματοποιήθηκε σύγκριση του ηλιακού θερμοσίφωνα με το στρώμα PCM με ένα συμβατικό ηλιακό θερμοσίφωνα.



Το συμπέρασμα αυτών των ελέγχων ήταν, καταρχήν, ότι οι ηλιακοί θερμοσίφωνες με το στρώμα PCM είναι κυρίως κατάλληλοι για παροχή ζεστού νερού κατά τη διάρκεια των ωρών χωρίς ηλιοφάνεια. Η αποθήκευση θερμότητας σε έναν ηλιακό θερμοσίφωνα με PCM χωρίς την εφαρμογή νυχτερινής μόνωσης ήταν τόσο αποτελεσματική όσο η αποθήκευση θερμότητας σε συμβατικό ηλιακό θερμοσίφωνα με εφαρμογή νυχτερινής μόνωσης. Για την παροχή νερού κατά τη διάρκεια των ωρών της ημέρας (με ηλιοφάνεια) δεν ενδείκνυται η χρησιμοποίηση ηλιακού θερμοσίφωνα με στρώμα PCM, εξαιτίας της σχετικά χαμηλής μετάδοσης θερμότητας.



Σχήμα 4.3.3.1: Ηλιακός θερμοσίφοντας, [25]

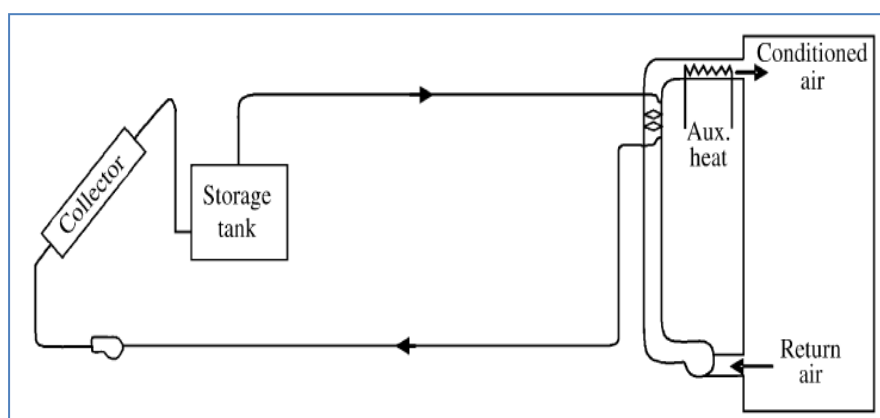
Ένα άλλο παράδειγμα πειραματικών και θεωρητικών ερευνών λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης για ένα σύστημα ηλιακής θέρμανσης νερού αποτελεί η μελέτη που εκτελέστηκε από τον Kaygusuz.

Το σύστημα σχεδιάστηκε για να θερμάνει ένα εργαστηριακό κτίριο στην Trabzon, στην Τουρκία, και αποτελούνταν από ένα ηλιακό συλλέκτη, μια δεξαμενή αποθήκευσης ενέργειας, ένα εναλλάκτη θερμότητας νερού-αέρα, μία βοηθητική ηλεκτρική θερμάστρα, μια αντλία κυκλοφορίας νερού και από εξοπλισμό για μέτρηση και έλεγχο.

Η συλλεγόμενη ηλιακή ενέργεια μεταφερόταν στη δεξαμενή αποθήκευσης η οποία περιείχε σωλήνες από χλωριούχο πολυβινύλιο με 1.500 kg εξαένυδρο χλωριούχο ασβέστιο. Η απαίτηση για φορτίο

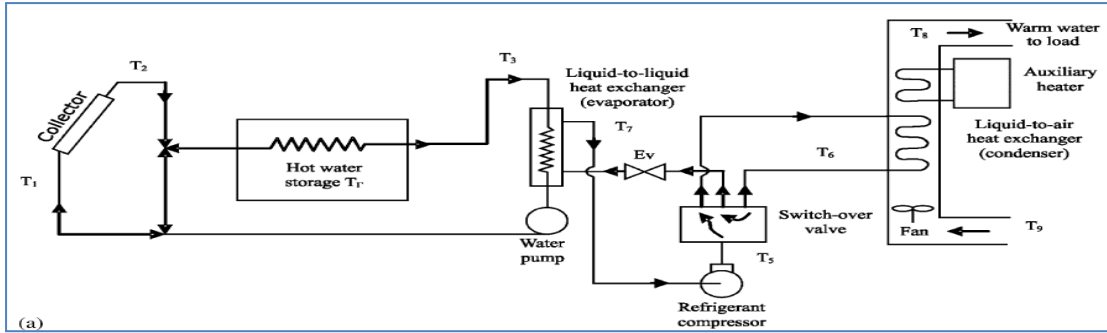
θέρμανσης χώρου, ήταν ικανοποιούταν με τη χρήση της δεξαμενής αποθήκευσης ενέργειας και τη βοηθητική πηγή ενέργειας.

Κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης, οι μετρούμενες τιμές απόδοσης των μέσων συλλογής και αποθήκευσης ήταν 0,60 και 0,70, αντίστοιχα, με την χρήση στο σύστημα 30m<sup>2</sup> ηλιακών συλλεκτών νερού. Στο συμβατικό σύστημα χωρίς PCM η μέγιστη τιμή του κλάσματος της ηλιακής ενέργειας που παρέχεται στο φορτίο ήταν περίπου 0.30-0.35, διότι υπήρχαν αρκετές μέρες με συννεφιά στην περιοχή κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

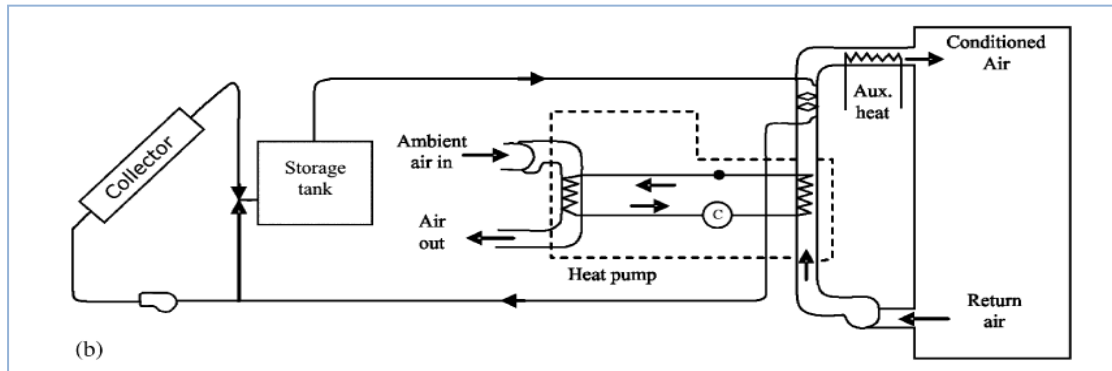


Σχήμα 4.3.3.2: Σύστημα θέρμανσης νερού, Trabzon, [1]

Ο Kaygusuz διερεύνησε, επίσης, τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά ένα σύστημα θερμικής αντλίας χρησιμοποιώντας αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας για τη θέρμανση κατοικιών. Στην πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκαν δύο πηγές θερμότητας. Όπως φαίνεται και στα σχήματα που ακολουθούν, μελετήθηκαν δύο τρόποι λειτουργίας του συστήματος: το σύστημα θερμικής αντλίας ήταν συνδεδεμένο με τη δεξαμενή αποθήκευσης σε σειρά και το σύστημα θερμικής αντλίας ήταν συνδεδεμένο με τη δεξαμενή αποθήκευσης παράλληλα.



Σχήμα 4.3.3.3: Σύστημα θερμικής αντλίας συνδεδεμένο με τη δεξαμενή αποθήκευσης σε σειρά, [1]



Σχήμα 4.3.3.4: Σύστημα θερμικής αντλίας συνδεδεμένο με τη δεξαμενή αποθήκευσης σε σειρά, [1]

Στην περίπτωση της εν σειρά λειτουργίας, τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι σχετικά υψηλή τιμή απόδοσης του συλλέκτη, 60-68% ,θα μπορούσε να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας 30m<sup>2</sup> επίπεδες πλάκες συλλεκτών θέρμανσης νερού, ενώ η αποτελεσματικότητα του συλλέκτη κυμαινόταν από 48% έως 60% στην περίπτωση της παράλληλης λειτουργίας. Και για τους δύο τρόπους λειτουργίας καταγράφηκε 62% μέση καθαρή αποτελεσματικότητα αποθήκευσης. Οι μέσες τιμές απόδοσης εποχικής θέρμανσης ήταν 4,0 και 2,5 για τον πρώτο και δεύτερο τρόπο λειτουργίας, αντίστοιχα.

#### 4.3.4 Ηλιακά Συστήματα Θέρμανσης Αέρα με PCM [16]

Ο Enible ασχολήθηκε με το σχεδιασμό, την κατασκευή και την αξιολόγηση της επίδοσης ενός παθητικού ηλιακού θερμοσίφωνα αέρα. Το σύστημα που προτάθηκε περιλάμβανε έναν ηλιακό συλλέκτη με επίπεδη πλάκα απορρόφησης ενσωματωμένο με ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, το οποίο χρησιμοποιεί παραφίνη ως PCM. Η συνολική μάζα PCM στον ηλιακό θερμοσίφωνα είναι 65kg. Ο ηλιακός θερμοσίφωνα είναι φυσικής συναγωγής, δηλαδή εισέρχεται με φυσική συναγωγή φρέσκος αέρας στο χώρο θέρμανσης, ενώ ταυτόχρονα ο θερμός αέρας μεταπίπτει στο χώρο του θερμού αέρα και από εκεί αποφορτίζεται στο περιβάλλον.

Τα πειράματα διεξήχθησαν για τη συμπεριφορά του συστήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας, για 14 διαφορετικές ημέρες τον Μάιο και τον Ιούνιο στην περιοχή Nsukka, στη Νιγηρία. Οι έλεγχοι έγιναν κάτω από συνθήκες μηδενικού φορτίου και με φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένων και των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στο εύρος 19-41°C, αλλά και των διακυμάνσεων της ολικής ημερήσιας ακτινοβολίας στο εύρος 4,9-19,96 MJ/m<sup>2</sup>.

Η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας ήταν περίπου 15K, ενώ η αθροιστική ωφέλιμη αποδοτικότητα ήταν περίπου 50%. Στο σύστημα αυτό αποδείχθηκε κατάλληλο για χρήση ως ηλιακός χώρος για ξήρανση καλλιεργείων που δεν απαιτούν άμεση έκθεση στον ήλιο.



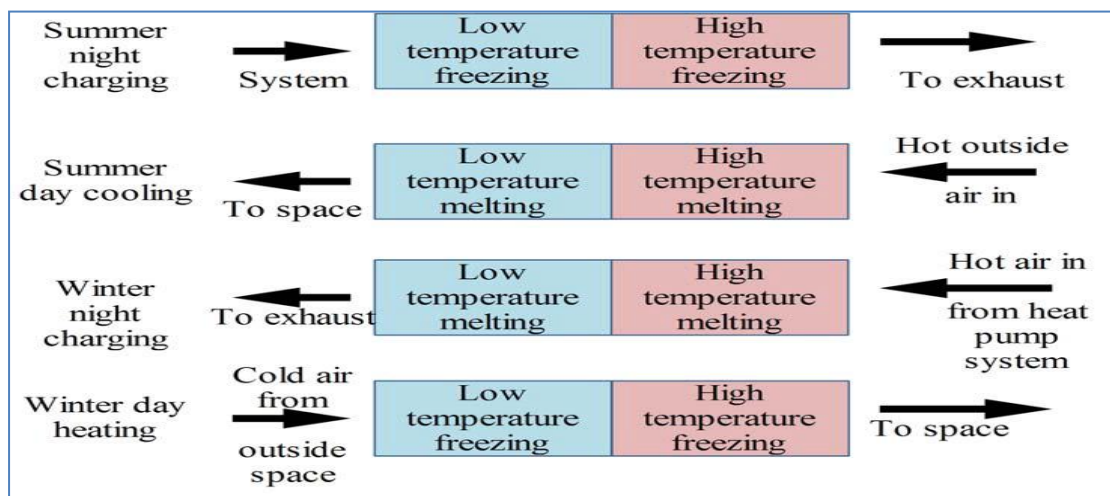
Σχήμα 4. 3.3.2: Enible , Σύστημα Θέρμανσης με Αέρα, [16]

### 4.3.5 PCM σε συνδυασμένα συστήματα Θέρμανσης και Ψύξης [14]

Το Κέντρο Ανανεώσιμης Ενέργειας του Πανεπιστημίου της Νότιας Αυστραλίας πραγματοποίησε μία μελέτη με PCM στα μέσα του 1990, για την ανάπτυξη μίας μονάδας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για θέρμανση και για ψύξη. Το σύστημα για νυχτερινή φόρτιση και χρήση του φορτίου την ημέρα και στις δύο περιόδους της ανάγκης θέρμανσης και της ανάγκης ψύξης, περιλάμβανε δύο διαφορετικά PCM ενσωματωμένα σε ένα σύστημα αντλιών θερμότητας αντίστροφου ψυκτικού κύκλου, το οποίο χρησιμοποιούσε ισχύ εκτός των περιόδων αιχμής.

Όταν ο αέρας κυκλοφορεί στο σύστημα υφίσταται μία διαδικασία θέρμανσης ή ψύξης δύο σταδίων. Αρχικά διέρχεται μέσα από το ένα PCM και στη συνέχεια μέσα από το άλλο.

Το σημείο τήξης-στερεοποίησης του πρώτου PCM είναι κάτω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης, ενώ το σημείο τήξης στερεοποίησης του δεύτερου υλικού είναι πάνω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης. Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η ροή του αέρα καθορίζεται ώστε το σύστημα να αποθηκεύει θερμότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας (μέσα από τη διαδικασία τήξης και των δύο υλικών) και να απελευθερώνει τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας (μέσω της στερεοποίησης) σε μία θερμοκρασία πάνω από τις συνθήκες θερμικής άνεσης. Κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, η κατεύθυνση του αέρα αντιστρέφεται και το σύστημα αποθηκεύει ψυκτική ενέργεια κατά τη διάρκεια της νύχτας και απελευθερώνει αυτόν τον ψυχρό αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας σε μία θερμοκρασία κάτω από τις συνθήκες θερμικής άνεσης.

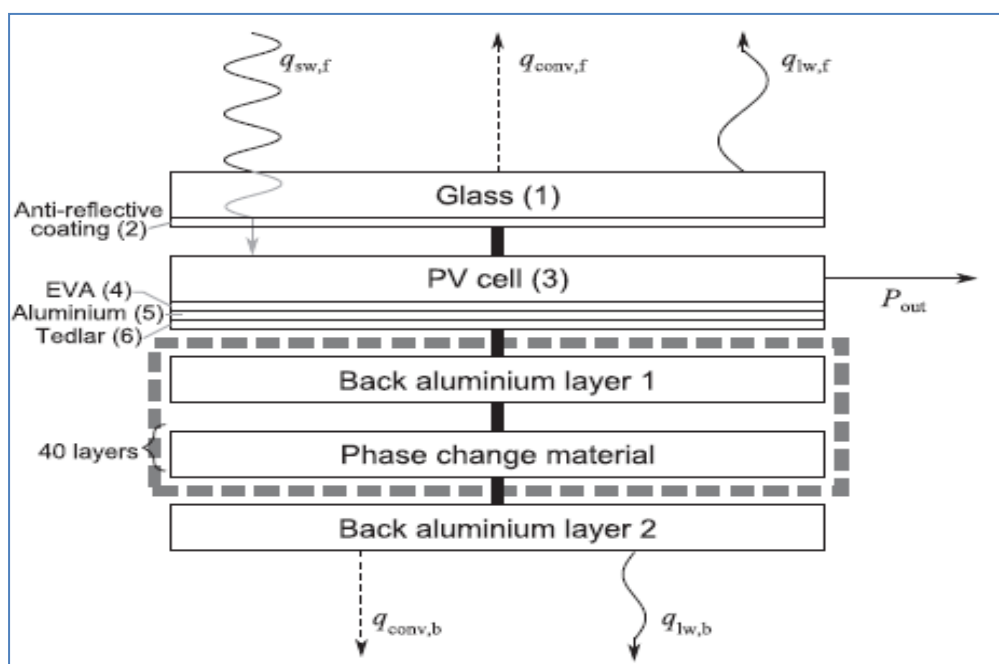


Σχήμα 4.3.5.1: Σύστημα PCM για θέρμανση και ψύξη χώρων, [14]

### 4.3.6 Φωτοβολταϊκά Συστήματα με PCM [26]

Είναι γνωστό ότι η αποδοτικότητα ενός ηλιακού κυττάρου εξαρτάται από την θερμοκρασία του κυττάρου. Κατά συνέπεια, η χρήση ενός μηχανισμού που μειώνει την θερμοκρασία του κυττάρου, ιδιαίτερα σε περιόδους υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας, θα αυξήσει την αποτελεσματικότητα του κυττάρου.

Προκειμένου να αυξηθεί η ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια και να διατηρηθεί η θερμοκρασία του κυττάρου έχει προταθεί η προσθήκη PCM στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, το οποίο λόγω της υψηλής λανθάνουσας θερμοχωρητικότητας του θα δρα ως θερμοδοχείο, απορροφώντας την θερμότητα που μεταφέρεται από το φωτοβολταϊκό κύτταρο.



Σχήμα 4.3.6.1: Φωτοβολταϊκό σύστημα PCM, [26]

### 4.3.7 Εφαρμογές PCM σε Ευαίσθητα Προϊόντα και Υλικά για Διατήρηση της Θερμοκρασίας

Τα PCMs παρέχουν την δυνατότητα θερμικής προστασίας λόγω της υψηλής θερμικής τους αδράνειας. Αυτή η προστασία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ενάντια στην θερμότητα και το κρύο κατά την μεταφορά ή την αποθήκευση.[26]

Με την χρήση PCM είναι δυνατή η θερμική προστασία στερεών τροφίμων, ποτών, ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, παραγώγων του αίματος, μαγειρεμένων φαγητών, βιοϊατρικών προϊόντων κ.α.[27]

#### 4.3.7.1 Εφαρμογές στην Ιατρική

Η μεταφορά του αίματος και των υποπροϊόντων του αίματος από το νοσοκομείο στο όχημα μεταφοράς και έπειτα από το όχημα μεταφοράς στον τελικό προορισμό είναι πολύ κρίσιμη από την άποψη της θερμοκρασίας, καθώς αν αυτά τα προϊόντα βρεθούν σε θερμοκρασίες μη επιθυμητές θα αλλοιωθούν και θα απαγορευτεί η μετέπειτα χρήση τους. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης για την μεταφορά αυτών των προϊόντων είναι υψίστης σημασίας.[27]



Σχήμα 4.3.7.1.1: Δοχεία PCM για μεταφορά αίματος και οργάνων, [27]

#### 4.3.7.2 Δοχεία για Τρόφιμα Ευαίσθητα στη Θερμοκρασία [27]

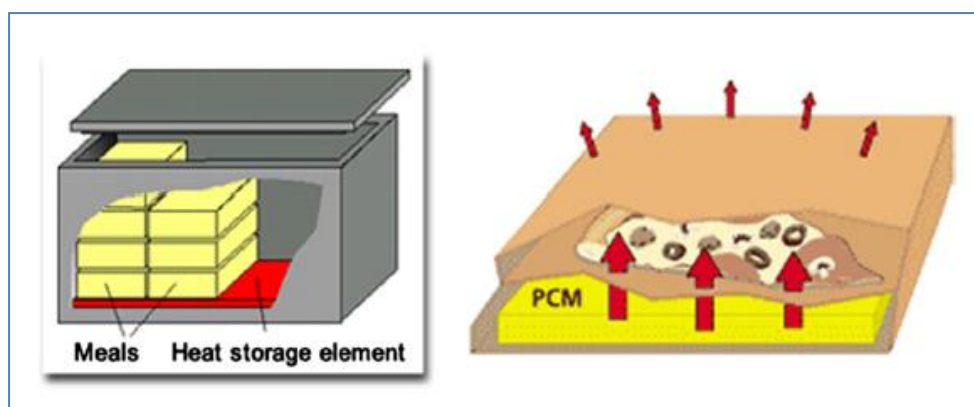
Έχουν κατασκευαστεί διαφόρων ειδών κιβώτια με αφαιρούμενα μέρη, τα οποία περιέχουν κάποιο PCM (συνηθέστερα το νερό, αλλά σήμερα και άλλα πολλά υλικά που έχουν αναπτυχθεί), το οποίο πρέπει να διατηρείται στο ψύκτη πριν τη χρήση και το οποίο κρατάει μία χαμηλή θερμοκρασία στο κιβώτιο για ένα χρονικό διάστημα.

Ένα τέτοιο προϊόν είναι και το «ισοθερμικό μπουκάλι νερού». Πρόκειται για ένα διπλού τοιχώματος μπουκάλι, στο οποίο έχει ενσωματωθεί ένα PCM. Το μπουκάλι έχει χωρητικότητα περίπου 0,5l και πρέπει να διατηρηθεί στο ψύκτη μέχρις ότου να στερεοποιηθεί το PCM και μετά το μπουκάλι θα κρατήσει το αφέψημα κρύο.



Σχήμα 4.3.7.2.1: «ισοθερμικό μπουκάλι νερού», [27]

Φυσικά αυτά τα προϊόντα χρησιμοποιούνται και για τον αντίθετο σκοπό την διατήρηση των προϊόντων μεταφοράς σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως για τη μεταφορά τροφίμων σε εφαρμογές catering.



Σχήμα 4. 3.7.3: εφαρμογές catering, [27]



### 4.3.7.3 Ενσωμάτωση PCM σε υφάσματα [28]

Πριν την χρήση των PCMs στην κλωστοϋφαντουργία, τα PCMs ενθυλακώνονται σε πολύ μικρές σφαίρες ώστε να αποφεύγεται η διαρροή τους κατά την υγρή φάση. Οι μικροκάψουλες έχουν κατά προσέγγιση διάμετρο 1μm έως 3 μm και είναι ανθεκτικές στην μηχανική δράση, την θερμότητα και τα διάφορα είδη χημικών ουσιών

Καθώς η θερμοκρασία ανεβαίνει λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, οι μικροκάψουλες αντιδρούν απορροφώντας θερμότητα. Τα PCM στις μικροκάψουλες λιώνουν. Αντλούν την θερμότητα από το περιβάλλον τους και αποθηκεύουν την πλεονάζουσα ενέργεια. Όταν η θερμοκρασία πέφτει λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας του περιβάλλοντος απελευθερώνουν την αποθηκευμένη θερμότητα.

#### εφαρμογές των PCMs σε υφάσματα

- ο Διάστημα

Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε διαστημικές στολές και γάντια προκειμένου να προστατευθούν οι αστροναύτες από το κρύο καθώς εργάζονται στο διάστημα. Τα PCMs διατηρούν τους αστροναύτες σε θερμική άνεση στο διάστημα.

- ο Αθλητικός εξοπλισμός

Στις μέρες μας τα PCMs πέρα από τις εφαρμογές τους για διαστημικές στολές και γάντια χρησιμοποιούνται επιπλέον και σε είδη αθλητικής ένδυσης προκειμένου να βελτιωθεί η θερμική απόδοση των αθλητικών ενδυμάτων. Με την εφαρμογή των PCM στον αθλητικό εξοπλισμό αυτός εμφανίζει θερμο-ρυθμιστικές ιδιότητες. Μερικά παραδείγματα εφαρμογών των PCM σε είδη αθλητικής ένδυσης είναι: γάντια σνούμπορτ, εξοπλισμός για ποδηλασία, τρέξιμο κ.α

Είναι γνωστό, ότι η ενέργεια που παράγεται από το σώμα κατά την διάρκεια της άσκησης δεν απελευθερώνεται συχνά στην επιθυμητή ποσότητα, με χρήση συμβατικών αθλητικών ενδυμάτων, οδηγώντας σε θερμική δυσφορία το άτομο που αθλείται .

Με την ενσωμάτωση των PCMs σε αθλητικά ενδύματα, κατά την διάρκεια της φυσικής δραστηριότητας, η θερμότητα του σώματος αυξάνεται, απορροφάται από τα μικροενθυλακωμένα PCMs και απελευθερώνεται όταν είναι απαραίτητο.

ο Κλινοσκεπάσματα και αξεσουάρ

Ενσωματωμένες μικροκάψουλες σε μαξιλάρια ,παπλώματα και καλύμματα στρωμάτων εξασφαλίζουν την ενεργό ρύθμιση της θερμοκρασίας στο κρεβάτι. Όταν η θερμοκρασία του σώματος ανεβαίνει, η πλεονάζουσα θερμική ενέργεια απορροφάται , ενώ όταν η θερμοκρασία του σώματος πέφτει, η αποθηκευμένη ενέργεια απελευθερώνεται και το σώμα διατηρείται ζεστό.

Όσον αφορά τα υφάσματα, τα PCMs χρησιμοποιούνται επίσης στα καθίσματα του αυτοκινήτου, σε κράνη, σε στολές πυροσβεστών και σε πολλές άλλες εφαρμογές.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4<sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Murat Kenisarin, Khamid Mahkamov : Solar energy storage using phase change materials
2. <http://bwaf.org/built-by-women-dover-sun-house-eleanor-raymond-and-maria-telkes/>
3. <http://www.technologyreview.com/article/419445/the-house-of-the-day-after-tomorrow/>
4. [http://freespace.virgin.net/m.eckert/carl\\_vener's\\_dissertation.htm](http://freespace.virgin.net/m.eckert/carl_vener's_dissertation.htm)
5. ALICE HARLAND, CHRISTINA MACKAY, BRENDA VALE : PHASE CHANGE MATERIALS IN ARCHITECTURE
6. <http://www.rubitherm.de/english/>
7. [http://issuu.com/gale-snowden/docs/pcm\\_tower\\_botanical\\_garden\\_berlin\\_study\\_tour\\_notes](http://issuu.com/gale-snowden/docs/pcm_tower_botanical_garden_berlin_study_tour_notes)
8. [http://www.building4change.com/article.jsp?id=2089#.U\\_Btj1\\_vHQ](http://www.building4change.com/article.jsp?id=2089#.U_Btj1_vHQ)
9. <http://ecobuildingboards.weebly.com/news.html>
10. [http://www.celsius.co.kr/phase\\_change\\_materials/download/energy/Advanced\\_Thermal\\_Energy\\_Storage\\_through\\_application\\_of\\_PCms.pdf](http://www.celsius.co.kr/phase_change_materials/download/energy/Advanced_Thermal_Energy_Storage_through_application_of_PCms.pdf)
11. Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi: PCM thermal storage in buildings: A state of art
12. Yinping Zhang, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, Hongfa Di: Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook
13. A. Pasupathy and R. Velraj: Phase Change Material Based Thermal Storage for Energy Conservation in Building Architecture
14. Lavinia Gabriela SOCACIU: Thermal Energy Storage with Phase Change Material
15. Atul Sharma a,\* , V.V. Tyagi b, C.R. Chen a, D. Buddhi : Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
16. D. Zhou a, C.Y. Zhao b,†, Y. Tian: Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications
17. Barbara Pause: NEW ENERGY EFFICIENT ROOFING MATERIALS WITH PHASE CHANGE MATERIAL (PCM) TREATMENT
18. D.W.Hawes, D.Feldman, D.Banu, Latent heat storage in building materials
19. Shazim AliMemon: Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review
20. N. Soares,J.J. Costa, A.R. Gaspar, P. Santos: Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency
21. Samira Haghshenaskashani, Department of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Teheran and Hadi Pasdarsahri, Department of Mechanical Engineering, tarbiat Modares University

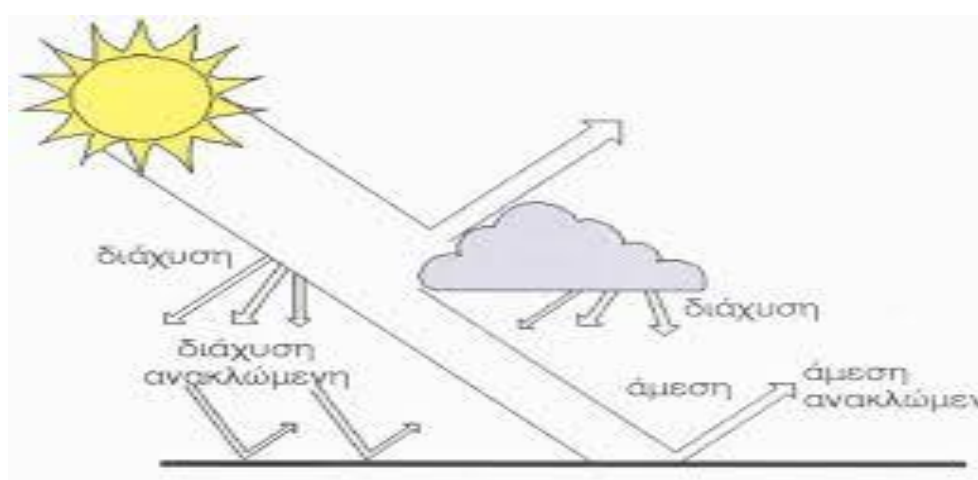
22. Pablo Arce Maldonado: Application of passive thermal energy storage in buildings using PCM and awnings
23. KAR Ismail, JR Henriquez, "Thermally effective windows with moving phase change curtains", Appl. Thermal Engineering 2001; 21: 1909-1923.
24. Belen Zalba, Jose M.Marin, Luisa F.Cabeza, Harald Mehling, Free-cooling of buildings with phase change materials
25. Atul Sharma, C. R. Chen: Solar Water Heating System with Phase Change Materials
26. Christopher J. Smith ,Piers M. Forster, Rolf Crook : Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling
27. E.Oro, A.de Gracia, A. Castell, M.M Farid, L.F. Cabeza: Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications
28. Mondal: Phase change materials for smart textiles-An overview

## **Μέρος 2<sup>ο</sup>-Υπολογιστική Μελέτη**



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>-ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

## 5.1 Υπολογισμός Προσπίπτουσας Ηλιακής Ακτινοβολίας



Σχήμα 5.1.1. : Συνιστώσες τις ηλιακής ακτινοβολίας [1]

Μια συγκεκριμένη επιφάνεια στη Γη δέχεται: [1]

- Άμεση ηλιακή ακτινοβολία από τον ήλιο
- Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία από τον ουράνιο θόλο
- Ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από το έδαφος και τα γύρω κτίρια.

Το άθροισμα αυτών είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Συγκεκριμένα:

- Η ακτινοβολία που δέχεται μια επιφάνεια εξαρτάται από το μέγεθος του ουράνιου θόλου που "βλέπει" αυτή την επιφάνεια (π.χ. οριζόντιες επιφάνειες "βλέπουν" μεγαλύτερο ποσοστό ουράνιου θόλου από ότι οι κατακόρυφες)
- Το ποσό που δέχονται οι κατακόρυφες επιφάνειες εξαρτάται από τον προσανατολισμό τους σε σχέση με τη θέση του ήλιου

- Η ένταση της άμεσης ακτινοβολίας μεγιστοποιείται σε καθαρή ατμόσφαιρα
- Η ένταση της διάχυτης μεγιστοποιείται σε θολή ατμόσφαιρα
- Η ανακλώμενη ακτινοβολία εξαρτάται από την ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία και την ανακλαστικότητα του εδάφους (κατακόρυφες επιφάνειες δέχονται το μεγαλύτερο ποσοστό, ενώ οι οριζόντιες καθόλου).

### 5.1.1 Μέση στιγμιαία και διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου $G_b$ και $G_d$ (σε $W/m^2$ ) [2]

Η μέση στιγμιαία και διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου προέκυψαν με λογιστική ανάλυση των μετρήσεων της ολικής ακτινοβολίας και προσεγγίζονται στην περιοχή της Αθήνας για κάθε ώρα,  $t=7:00\div 18:00$ , της ζητούμενης ημέρας του αντίστοιχου μήνα από τις παρακάτω συσχετίσεις:

$$G_b = M_t + A_t * \sin\left(\frac{360}{365} * D - P_t\right) \quad (5.1.1.1)$$

$$G_d = m_t + a_t * \sin\left(\frac{360}{365} * D - p_t\right) \quad (5.1.1.2)$$

Όπου

- $D=1\div 365$  ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους που υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία. Στην παρούσα εργασία μελετάται η 21<sup>η</sup> ημέρα των ζητούμενων μηνών.
- Οι συντελεστές  $M_t, A_t, P_t, m_t, a_t, p_t$  δίνονται για κάθε ώρα,  $t=7:00\div 18:00$ , στον Πίνακα 5.1.1.1



Πίνακας 5.1.1.1. Τιμές των συντελεστών των  $G_b$  και  $G_d$

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

### 5.1.2 Υπολογισμός Ολικής Ακτινοβολίας Κεκλιμένων Επιπέδων $G_T(W/m^2)$ [2]

Η ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου υπολογίζεται με βάση το μοντέλο των Liu και Jordan (1963) θεωρώντας ότι η ακτινοβολία που δέχεται μια κεκλιμένη επιφάνεια αποτελείται από τις παρακάτω συνιστώσες:

1. Άμεση ακτινοβολία:  $G_b \cdot R_b$
2. Διάχυτη ακτινοβολία (προερχόμενη από τον ουρανό):

$$G_d * \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right)$$

3. Διάχυτη ακτινοβολία που προέρχεται από ανάκλαση της ολικής στο έδαφος:

$$(G_b + G_d) * \rho * \left( \frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

Προσθέτοντας τις παραπάνω τρεις συνιστώσες, προκύπτει η ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου:

$$G_T = G_b * R_b + G_d * \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + (G_b + G_d) * \rho * \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (5.1.2.1)$$

Όπου:

- $G_b$ : μέση στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου
- $G_d$ : μέση στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου
- $R_b$ : λόγος της άμεσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο οριζοντίου επιπέδου
- $\beta$ : κλίση επιπέδου, είναι η γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Για το κατακόρυφο επίπεδο είναι  $\beta=90^\circ$ .
- $\rho$ : είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους. Θεωρείται συνηθισμένο έδαφος οπότε λαμβάνεται  $\rho=0.2$

Για να υπολογίσουμε την ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου, προηγείται ο υπολογισμός της μέσης στιγμιαίας άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου  $G_b$  και  $G_d$  (σε  $W/m^2$ ), οι οποίες υπολογίζονται με τη βοήθεια των σχέσεων (5.1.1.1) και (5.1.1.2) του Κεφαλαίου 5.1.1, καθώς και του λόγου  $R_b$ .

## Υπολογισμός του λόγου $R_d$

Ο λόγος  $R_d$ , της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (5.1.2.2)$$

Όπου:

$$\cos\theta = \sin\delta * \sin\varphi * \cos\beta - \sin\delta * \cos\varphi * \sin\beta * \cos\gamma \quad (5.1.2.3)$$

$$+ \cos\delta * \cos\varphi * \cos\beta * \cos\omega + \cos\delta * \sin\beta * \sin\gamma * \sin\omega$$

$$\cos\theta_z = -\sin\delta * \sin\varphi + \cos\delta * \cos\varphi * \cos\omega \quad (5.1.2.4)$$

- $\theta$ : γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια, είναι η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτινών και της κάθετου στην επιφάνεια
- $\theta_z$ : γωνία ζενίθ, είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ήλιου
- $\varphi$ : γεωγραφικό πλάτος του τόπου, για την Αθήνα  $\varphi=37.97^\circ$
- $\gamma$ : το αζιμούθιο της επιφάνειας, είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της κάθετης στη επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και την νότια κατεύθυνση  
για τοίχο νοτίου προσανατολισμού :  $\gamma=0^\circ$   
για τοίχο ανατολικού προσανατολισμού :  $\gamma=-90^\circ$   
για τοίχο δυτικού προσανατολισμού:  $\gamma=90^\circ$
- $\omega$  : ωριαία γωνία, είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω περιστροφής της γης περί τον άξονα της με ρυθμό  $0,25^\circ/\text{min}$ .

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

λαμβάνεται :  $\omega > 0$  για μ.μ. και  $\omega < 0$  για π.μ.

- $\delta$ : η ηλιακή απόκλιση, είναι η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\delta = 23,45 * \sin \frac{360*(284+n)}{365} \quad (5.1.2.6)$$

όπου με  $n$  συμβολίζεται ο αύξων αριθμός της ημέρας.

Με βάση τις σχέσεις (5.1.2.3) και (5.1.2.4), ο λόγος  $R_b$  (5.1.2.2), για τοίχο νότιου προσανατολισμού, γίνεται:

$$R_b = \frac{\sin \delta * \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta * \cos(\varphi - \beta) * \cos \omega}{\sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega} \quad (5.1.2.7)$$

Στον Πίνακα 5.1.2.1 δίνεται ο αύξων αριθμός της ημέρας  $n$  καθώς και οι τιμές της ηλιακής απόκλισης  $\delta(^{\circ})$  υπολογισμένες την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα.

Πίνακας 5.1.2.1: Αύξων αριθμός ημέρας του έτους  $n$  για την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα και αντίστοιχη τιμή της ηλιακής απόκλισης  $\delta$

Μήνας	D/n	$\delta(^{\circ})$
Ιανουάριος	21	-20,1380
Φεβρουάριος	52	-11,2263
Μάρτιος	80	-0,4037
Απρίλιος	111	11,5790
Μάιος	141	20,1380
Ιούνιος	172	23,4498
Ιούλιος	202	20,4415
Αύγουστος	233	11,7541
Σεπτέμβριος	264	-0,2018
Οκτώβριος	294	-11,7541
Νοέμβριος	325	-20,4415
Δεκέμβριος	355	-23,4498

### Υπολογισμός διάρκειας της ημέρας και ωρών ανατολής και δύσης

Η ηλιακή ακτινοβολία υπάρχει μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, δηλαδή πριν την ανατολή του ήλιου και μετά τη δύση λαμβάνεται ίση με μηδέν. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαίος ο υπολογισμός της ώρας δύσης και ανατολής αντίστοιχα, ο οποίος θα πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\text{ώρα δύσης} = 12 + N/2 \quad (5.1.2.8)$$

$$\text{ώρα ανατολής} = 12 - N/2 \quad (5.1.2.9)$$

όπου N είναι η διάρκεια της ημέρας σε ώρες και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (5.1.2.10)$$

Στον Πίνακα 5.1.2.2 παρουσιάζονται τα παραπάνω για την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα του έτους:

Πίνακας 5.1.2.2: Τιμές της διάρκειας της ημέρας ,N(hours), και των ωρών ανατολής και δύσης			
21 <sup>η</sup> ημέρα	N (hours)	Ώρα ανατολής	Ώρα δύσης
Ιανουαρίου	9.7827	7,1086	16,8913
Φεβρουαρίου	10.8118	6,5941	17,4059
Μαρτίου	11.9580	6,0210	17,9790
Απριλίου	13.2268	5,3866	18,6134
Μαΐου	14.2173	4,8913	19,1087
Ιουνίου	14.6383	4,6808	19,3192
Ιουλίου	14.2548	4,8726	19,1274
Αυγούστου	13.2461	5,3770	18,6230
Σεπτεμβρίου	11.9790	6,0105	17,9895
Οκτωβρίου	10.7539	6,6230	17,3770
Νοεμβρίου	9.7452	7,1274	16,8726
Δεκεμβρίου	9.3617	7,3192	16,6808

Στους παρακάτω πίνακες (5.1.2.3 - 5.1.2.14) παρουσιάζονται η μέση στιγμιαία άμεση και διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου  $G_b$  και  $G_d$ , καθώς και η ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου  $G_T$  για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό. Αναφέρονται επίσης και ο λόγος  $R_a$  και η ωριαία γωνία  $\omega$ , που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των παραπάνω. Όλα τα στοιχεία αναφέρονται στην 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα του έτους.

Παρατηρείται σε ορισμένους μήνες μηδενική τιμή της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_T$ . Αυτό εξηγείται αν λάβουμε υπόψη τις ώρες ανατολής και δύσης του ηλίου, όπως αναφέρονται στον Πίνακα 5.1.2.2.

Πίνακας 5.1.2.3 : G<sub>b</sub>, G<sub>d</sub>, G<sub>T</sub> για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου

t(hours)				Νότος		Ανατολή		Δύση	
	G <sub>b</sub> (W/m <sup>2</sup> )	G <sub>d</sub> (W/m <sup>2</sup> )	ω(°)	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )
7:00	0	0	-75	0	0	0	0	44.7675	0
8:00	0	22.1398	-60	3.5401	13.2839	5.1380	13.2839	0	13.2839
9:00	23.1068	89.2571	-45	2.1823	106.2902	2.1310	105.1049	0	55.8650
10:00	71.7356	144.1934	-30	1.7981	222.6748	1.0938	172.1570	0	93.6896
11:00	115.5118	176.6724	-15	1.6485	307.9765	0.4830	173.3466	0	117.5546
12:00	148.4795	187.1218	0	1.6071	365.7377	0	127.1210	0	127.1210
13:00	159.5753	171.9935	15	1.6485	382.2144	0	119.1536	0.4830	196.2282
14:00	157.1810	133.8738	30	1.7981	378.6640	0	96.0424	1.0938	267.9736
15:00	117.9372	94.8781	45	2.1823	326.0915	0	68.7206	2.1310	320.0415
16:00	53.9516	60.5839	60	3.5401	232.7419	0	41.7455	5.1380	318.9467
17:00	0	29.6156	75	0	17.7694	44.7675	17.7694	0	17.7694
18:00	0	0	90	0	0	4.4324	0	0	0

Πίνακας 5.1.2.4: G<sub>b</sub>, G<sub>d</sub>, G<sub>T</sub> για την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

t(hours)				Νότος		Ανατολή		Δύση	
	G <sub>b</sub> (W/m <sup>2</sup> )	G <sub>d</sub> (W/m <sup>2</sup> )	ω(°)	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )
7:00	0	0	-75	3.8539	0	11.7912	0	0	0
8:00	17.0092	68.2820	-60	1.7059	71.6863	3.1833	96.8159	0	42.6701
9:00	56.9164	136.2412	-45	1.3588	164.7750	1.6243	179.8879	0	87.4363
10:00	113.3257	188.2822	-30	1.2296	263.6426	0.8919	225.3772	0	124.3019
11:00	163.6727	216.2897	-15	1.1742	338.3318	0.4048	212.3979	0	146.1411
12:00	203.0617	221.4725	0	1.1584	388.4083	0	153.1897	0	153.1897
13:00	218.5164	201.6918	15	1.1742	399.4570	0	142.8667	0.4048	231.3249
14:00	217.6361	161.2814	30	1.2296	386.1290	0	118.5325	0.8919	312.6424
15:00	173.9470	122.1480	45	1.3588	327.0446	0	90.6835	1.6243	373.2325
16:00	107.7025	85.7717	60	1.7059	245.9646	0	62.2333	3.1833	405.0857
17:00	15.3670	53.4925	75	3.8539	92.8549	0	33.6322	11.7912	214.8270
18:00	0	0	90	0	0	8.1889	0	0	0

Πίνακας 5.1.2.5 : G<sub>b</sub>, G<sub>d</sub>, G<sub>T</sub> για την 21<sup>η</sup> Μαρτίου

t(hours)	Νότος					Ανατολή		Δύση	
	G <sub>b</sub> (W/m <sup>2</sup> )	G <sub>d</sub> (W/m <sup>2</sup> )	ω(°)	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )
7:00	1.1742	43.4953	-75	0.8252	27.1835	4.8369	31.8942	0	26.2146
8:00	47.0594	126.1453	-60	0.8034	118.1992	2.2215	184.9373	0	80.3931
9:00	102.6665	196.3253	-45	0.7966	209.8460	1.2784	259.3148	0	128.0618
10:00	169.9179	245.9587	-30	0.7936	299.4166	0.7370	289.8046	0	164.5670
11:00	230.2600	268.4456	-15	0.7922	366.5160	0.3418	262.8053	0	184.0934
12:00	280.7011	264.6942	0	0.7918	409.1576	0	186.8867	0	186.8867
13:00	301.9437	238.6960	15	0.7922	412.6258	0	173.4120	0.3418	276.6282
14:00	298.5642	197.9813	30	0.7936	385.5907	0	148.6452	0.7370	368.7014
15:00	247.8616	159.9576	45	0.7966	318.2074	0	120.7607	1.2784	437.6370
16:00	174.8048	122.0152	60	0.8034	231.1221	0	90.6896	2.2215	479.0245
17:00	75.8374	87.4052	75	0.8252	122.6075	0	60.0269	4.8369	426.8419
18:00	0	38.5147	90	0	23.1088	230.7046	23.1088	0	23.1088

Πίνακας 5.1.2.6 : G<sub>b</sub>, G<sub>d</sub>, G<sub>T</sub> για την 21<sup>η</sup> Απριλίου

t(hours)	Νότος					Ανατολή		Δύση	
	G <sub>b</sub> (W/m <sup>2</sup> )	G <sub>d</sub> (W/m <sup>2</sup> )	ω(°)	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )
7:00	25.1947	100.5375	-75	0	62.8420	2.9262	136.5672	0	62.8420
8:00	82.6596	191.7150	-60	0.2808	146.5096	1.6647	260.8996	0	123.2949
9:00	157.1827	265.3406	-45	0.4002	237.8252	1.0345	337.5357	0	174.9226
10:00	237.5854	313.2210	-30	0.4591	320.7642	0.6182	358.5711	0	211.6911
11:00	310.6538	329.5215	-15	0.4876	380.2547	0.2916	319.3704	0	228.7783
12:00	376.0109	313.7882	0	0.4962	412.4535	0	225.8740	0	225.8740
13:00	404.0689	280.4386	15	0.4876	405.6961	0	208.6700	0.2916	326.5036
14:00	394.3502	241.4271	30	0.4591	365.3335	0	184.2913	0.6182	428.0862
15:00	334.5526	205.6836	45	0.4002	290.7493	0	156.8654	1.0345	502.9762
16:00	250.6026	166.7996	60	0.2808	195.5210	0	125.1400	1.6647	542.3219
17:00	142.7649	129.0010	75	0	91.6771	0	91.6771	2.9262	509.4385
18:00	35.6122	86.1020	90	0	55.2224	0	55.2224	7.9329	337.7294

Πίνακας 5.1.2.7 :  $G_b$ ,  $G_d$ ,  $G_T$  για την 21<sup>η</sup> Μαΐου

t(hours)	Νότος					Ανατολή		Δύση	
	$G_b(W/m^2)$	$G_d(W/m^2)$	$\omega(^{\circ})$	Rb	$G_T(W/m^2)$	Rb	$G_T(W/m^2)$	Rb	$G_T(W/m^2)$
7:00	43.6833	141.9672	-75	0	89.5486	2.2482	187.7566	0	89.5486
8:00	110.4078	240.0482	-60	0.0299	158.3729	1.3973	309.3441	0	155.0697
9:00	199.9698	317.1180	-45	0.1864	247.5433	0.9030	390.8442	0	210.2678
10:00	290.9087	364.6553	-30	0.2683	325.9459	0.5505	408.0182	0	247.8841
11:00	374.7202	376.4631	-15	0.3092	379.2120	0.2622	361.6037	0	263.3499
12:00	453.4003	350.0894	0	0.3217	401.2438	0	255.3937	0	255.3937
13:00	486.7317	311.0234	15	0.3092	385.7829	0	235.2872	0.2622	362.9111
14:00	468.9273	275.2606	30	0.2683	337.8800	0	212.0491	0.5505	470.1756
15:00	401.3089	242.1933	45	0.1864	260.2530	0	185.4468	0.9030	547.8363
16:00	306.2405	203.4260	60	0.0299	161.8416	0	152.6796	1.3973	580.5939
17:00	190.5454	162.7439	75	0	116.7009	0	116.7009	2.2482	545.0815
18:00	75.3824	122.9804	90	0	81.3265	0	81.3265	4.4324	415.4506

Πίνακας 5.1.2.8 :  $G_b$ ,  $G_d$ ,  $G_T$  για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου

t(hours)	Νότος					Ανατολή		Δύση	
	$G_b(W/m^2)$	$G_d(W/m^2)$	$\omega(^{\circ})$	Rb	$G_T(W/m^2)$	Rb	$G_T(W/m^2)$	Rb	$G_T(W/m^2)$
7:00	52.7010	158.9575	-75	0	100.6446	2.0512	208.7438	0	100.6446
8:00	124.3922	260.8477	-60	0	168.9478	1.3101	331.9127	0	168.9478
9:00	221.9117	340.6263	-45	0.1129	251.6278	0.8578	416.9259	0	226.5669
10:00	318.5272	389.3036	-30	0.2010	329.4579	0.5265	433.1526	0	265.4349
11:00	408.8099	399.2694	-15	0.2454	380.7536	0.2517	383.3337	0	280.4427
12:00	496.3814	365.8640	0	0.2590	397.7164	0	269.1565	0	269.1565
13:00	532.3210	323.9344	15	0.2454	378.2100	0	247.5927	0.2517	381.5696
14:00	506.4067	292.2735	30	0.2010	327.7910	0	226.0048	0.5265	492.6488
15:00	433.9078	261.7081	45	0.1129	249.4175	0	200.4157	0.8578	572.6278
16:00	329.8650	224.0909	60	0	167.4411	0	167.4411	1.3101	599.5934
17:00	208.9992	181.4452	75	0	129.7670	0	129.7670	2.0512	558.4618
18:00	88.9094	141.2931	90	0	93.6668	0	93.6668	3.7470	426.8147



Πίνακας 5.1.2.9 : G<sub>b</sub>, G<sub>d</sub>, G<sub>T</sub> για την 21<sup>η</sup> Ιουλίου

t(hours)	G <sub>b</sub> (W/m <sup>2</sup> )	G <sub>d</sub> (W/m <sup>2</sup> )	ω(°)	Νότος		Ανατολή		Δύση	
				R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )
7:00	49.3266	146.0046	-75	0	92.5354	2.2290	202.4826	0	92.5354
8:00	120.0827	247.3755	-60	0.0221	163.0906	1.3890	327.2299	0	160.4336
9:00	215.9006	328.2500	-45	0.1795	257.2931	0.8988	412.5844	0	218.5401
10:00	311.4940	379.1811	-30	0.2620	340.2831	0.5482	429.4271	0	258.6581
11:00	401.8796	390.5526	-15	0.3032	396.3893	0.2612	379.5007	0	274.5195
12:00	491.0307	356.0018	0	0.3158	417.7940	0	262.7042	0	262.7042
13:00	526.0682	314.9891	15	0.3032	401.1302	0	241.6003	0.2612	379.0227
14:00	494.6473	286.9547	30	0.2620	351.2566	0	221.6375	0.5482	492.8159
15:00	421.7892	257.9065	45	0.1795	272.6317	0	196.9228	0.8988	576.0130
16:00	313.8228	222.1003	60	0.0221	171.5863	0	164.6424	1.3890	600.5461
17:00	192.1482	179.0466	75	0	126.6428	0	126.6428	2.2290	554.9340
18:00	71.8113	135.1077	90	0	88.2458	0	88.2458	4.3608	401.3993

Πίνακας 5.1.2.10 : G<sub>b</sub>, G<sub>d</sub>, G<sub>T</sub> για την 21<sup>η</sup> Αυγούστου

t(hours)	G <sub>b</sub> (W/m <sup>2</sup> )	G <sub>d</sub> (W/m <sup>2</sup> )	ω(°)	Νότος		Ανατολή		Δύση	
				R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )
7:00	34.2790	105.8681	-75	0	66.9488	2.9089	166.6646	0	66.9488
8:00	98.3975	202.5019	-60	0.2750	158.3985	1.6585	294.5297	0	131.3409
9:00	183.2171	282.6261	-45	0.3954	260.3375	1.0316	376.9022	0	187.8973
10:00	271.3075	336.4445	-30	0.4549	352.4103	0.6167	396.3195	0	228.9975
11:00	355.4060	352.1697	-15	0.4837	418.7547	0.2910	350.2566	0	246.8424
12:00	438.4883	322.6041	0	0.4924	453.3252	0	237.4113	0	237.4113
13:00	469.3056	286.0933	15	0.4837	445.5928	0	218.5865	0.2910	355.1427
14:00	436.1543	260.4373	30	0.4549	398.2765	0	199.8778	0.6167	468.8649
15:00	367.5350	231.5982	45	0.3954	321.0280	0	175.7124	1.0316	554.8577
16:00	261.5320	197.8781	60	0.2750	216.7968	0	144.8800	1.6585	578.6219
17:00	143.5827	156.0591	75	0	107.9937	0	107.9937	2.9089	525.6679
18:00	27.7307	105.7421	90	0	66.2183	0	66.2183	7.8114	282.8338

Πίνακας 5.1.2.11:  $G_b$ ,  $G_d$ ,  $G_T$  για την 21<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου

t(hours)	Νότος			Ανατολή		Δύση			
	$G_b$ (W/m <sup>2</sup> )	$G_d$ (W/m <sup>2</sup> )	$\omega$ (°)	Rb	$G_T$ (W/m <sup>2</sup> )	Rb	$G_T$ (W/m <sup>2</sup> )	Rb	$G_T$ (W/m <sup>2</sup> )
7:00	11.6457	49.6398	-75	0.8026	40.2951	4.7849	86.6725	0	30.9484
8:00	65.2005	138.5794	-60	0.7918	141.2962	2.2093	233.7120	0	89.6677
9:00	132.6763	216.2502	-45	0.7885	247.6317	1.2735	311.9745	0	143.0178
10:00	208.7893	272.7285	-30	0.7870	348.8350	0.7347	337.9137	0	184.5160
11:00	281.8460	294.5522	-15	0.7863	426.5392	0.3409	300.9869	0	204.9159
12:00	352.7188	274.8563	0	0.7861	477.4673	0	200.1857	0	200.1857
13:00	377.1421	245.2142	15	0.7863	481.4000	0	184.8427	0.3409	313.3967
14:00	346.7518	219.8943	30	0.7870	439.5085	0	166.6118	0.7347	421.3706
15:00	285.8804	189.8294	45	0.7885	367.8996	0	142.4857	1.2735	506.5402
16:00	187.4031	157.8393	60	0.7918	261.8376	0	113.4439	2.2093	527.4648
17:00	76.7801	118.5951	75	0.8026	140.4571	0	78.8351	4.7849	446.2225
18:00	0	61.1538	90	0	36.6923	461.3979	36.6923	0	36.6923

Πίνακας 5.1.2.12:  $G_b$ ,  $G_d$ ,  $G_T$  για την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου

t(hours)	Νότος			Ανατολή		Δύση			
	$G_b$ (W/m <sup>2</sup> )	$G_d$ (W/m <sup>2</sup> )	$\omega$ (°)	Rb	$G_T$ (W/m <sup>2</sup> )	Rb	$G_T$ (W/m <sup>2</sup> )	Rb	$G_T$ (W/m <sup>2</sup> )
7:00	0	0	-75	4.2526	0	12.7066	0	0	0
8:00	30.7993	75.3135	-60	1.7722	102.8493	3.2539	148.4866	0	48.2680
9:00	79.9861	149.6286	-45	1.3951	209.3641	1.6467	229.4860	0	97.7758
10:00	143.3809	207.7657	-30	1.2563	319.1234	0.9014	268.2398	0	138.9975
11:00	204.1117	235.5562	-15	1.1971	406.0905	0.4086	245.1418	0	161.7449
12:00	260.5126	227.4834	0	1.1802	469.9895	0	162.5413	0	162.5413
13:00	278.3514	204.9446	15	1.1971	484.0211	0	150.8019	0.4086	264.5320
14:00	254.1948	177.9129	30	1.2563	451.5058	0	132.1672	0.9014	361.2961
15:00	202.1371	145.6136	45	1.3951	389.5829	0	107.5819	1.6467	440.4340
16:00	114.2764	114.5042	60	1.7722	282.6461	0	80.1302	3.2539	451.9765
17:00	12.2574	78.3550	75	4.2526	100.3643	0	48.2387	12.7066	203.9887
18:00	0	15.1767	90	0	9.1060	7.8114	9.1060	0	9.1060

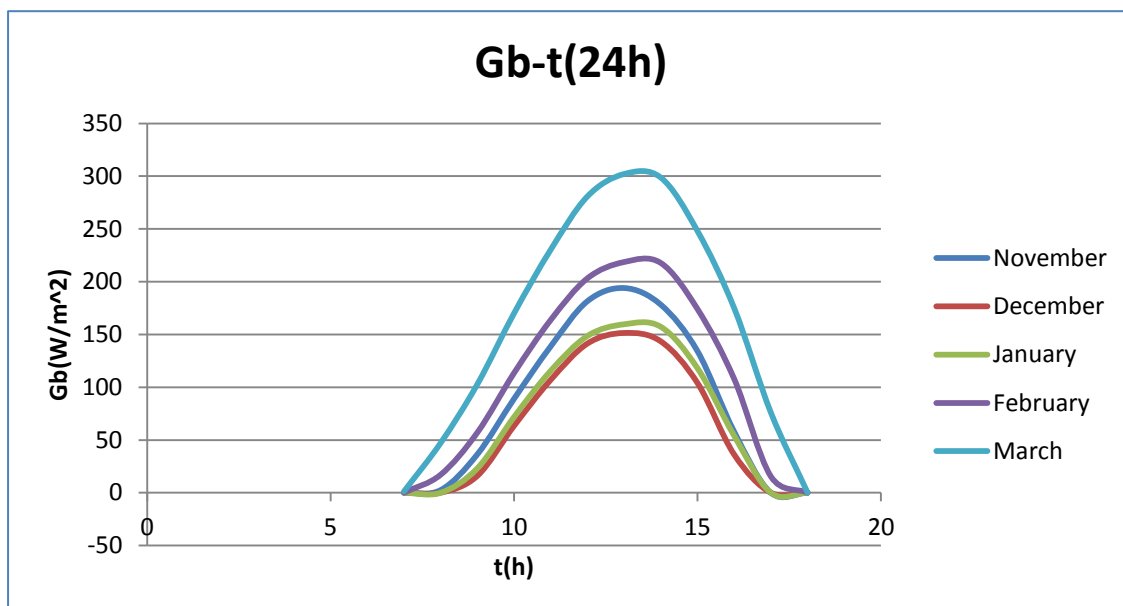
Πίνακας 5.1.2.13: G<sub>b</sub>, G<sub>d</sub>, G<sub>T</sub> για την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου

t(hours)				Νότος		Ανατολή		Δύση	
	G <sub>b</sub> (W/m <sup>2</sup> )	G <sub>d</sub> (W/m <sup>2</sup> )	ω(°)	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )
7:00	0	0	-75	0	0	0	0	38.2077	0
8:00	2.5233	26.1830	-60	3.6485	25.1684	5.2534	29.2181	0	15.9621
9:00	36.3721	96.9551	-45	2.2214	142.6064	2.1550	140.1933	0	61.8103
10:00	89.0177	155.3967	-30	1.8232	264.4390	1.1028	200.3066	0	102.1398
11:00	138.7647	187.7509	-15	1.6689	358.1116	0.4864	194.0167	0	126.5270
12:00	181.5145	190.5781	0	1.6262	427.6788	0	132.4983	0	132.4983
13:00	193.9812	173.8639	15	1.6689	447.4518	0	123.7165	0.4864	218.0612
14:00	178.2027	143.4371	30	1.8232	428.7860	0	103.8825	1.1028	300.4007
15:00	134.1469	108.3712	45	2.2214	376.4279	0	78.4374	2.1550	367.5281
16:00	57.7317	77.1054	60	3.6485	262.6700	0	52.0364	5.2534	355.3252
17:00	0	43.9119	75	0	26.3471	38.2077	26.3471	0	26.3471
18:00	0	0	90	0	0	4.3608	0	0	0

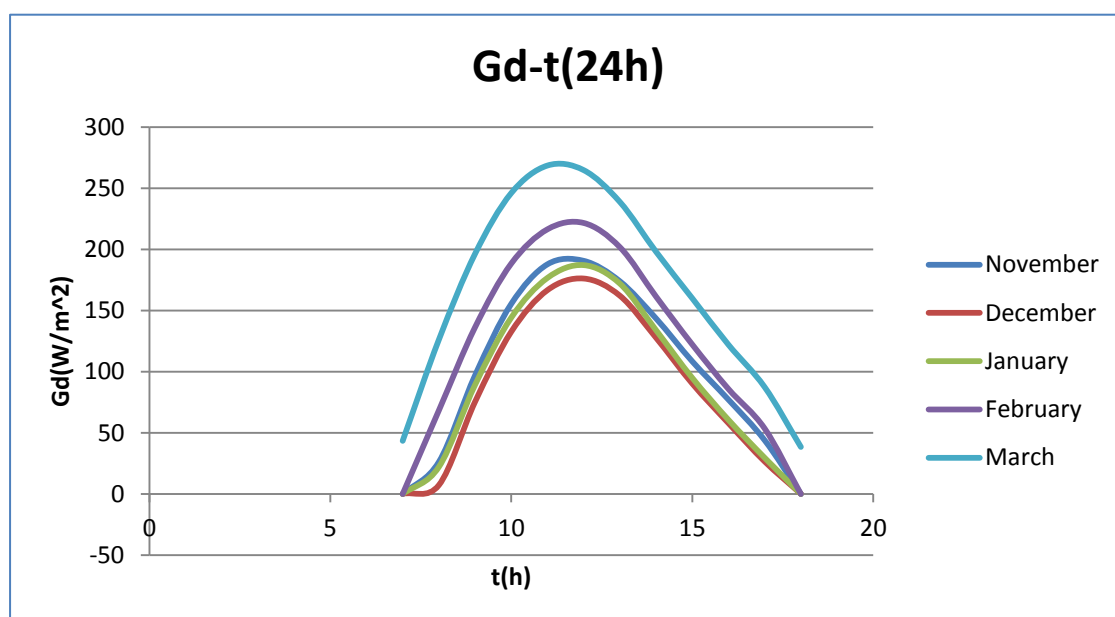
Πίνακας 5.1.2.14: G<sub>b</sub>, G<sub>d</sub>, G<sub>T</sub> για την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

t(hours)				Νότος		Ανατολή		Δύση	
	G <sub>b</sub> (W/m <sup>2</sup> )	G <sub>d</sub> (W/m <sup>2</sup> )	ω(°)	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>b</sub>	G <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )
7:00	0	0	-75	0	0	0	0	15.3709	0
8:00	0	7.1035	-60	5.1032	4.2621	6.8036	4.2621	0	4.2621
9:00	15.9630	75.2929	-45	2.6742	89.4596	2.4336	85.6197	0	46.7720
10:00	63.3102	132.5859	-30	2.1036	219.0645	1.2024	162.0059	0	85.8826
11:00	106.9737	166.6225	-15	1.8929	313.1663	0.5233	166.6497	0	110.6709
12:00	141.3152	176.0958	0	1.8356	379.1926	0	119.7890	0	119.7890
13:00	151.3624	162.0405	15	1.8929	398.8815	0	112.3606	0.5233	191.5679
14:00	143.3926	127.6352	30	2.1036	392.5668	0	90.9204	1.2024	263.3338
15:00	103.9347	90.1665	45	2.6742	342.4319	0	64.4934	2.4336	317.4299
16:00	36.0863	57.7580	60	5.1032	222.4176	0	38.2634	6.8036	283.7792
17:00	0	26.4234	75	0	15.8541	15.3709	15.8541	0	15.8541
18:00	0	0	90	0	0	3.7470	0	0	0

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των  $G_b$ ,  $G_d$  και  $G_T$  για τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο, όπως οι συγκεκριμένοι μήνες επιλέχθηκαν να μελετηθούν και στη συνέχεια της εργασίας. Οι γραφικές παραστάσεις αναφέρονται σε νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό.

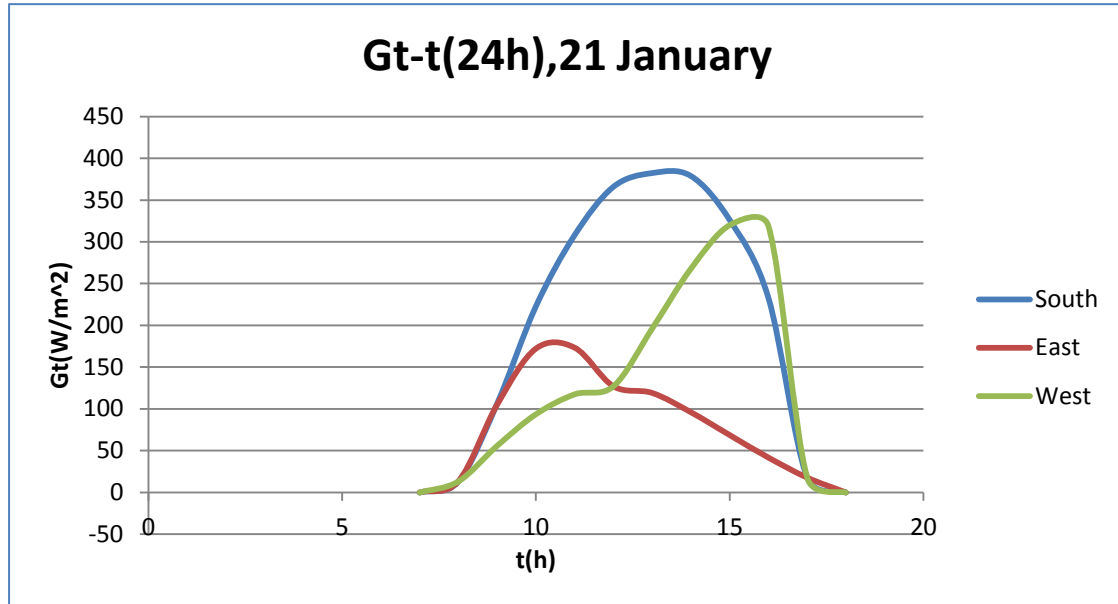


Σχήμα 5.1.2.1: Μεταβολή της μέσης στιγμιαίας άμεσης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου  $G_b$ , συναρτήσεις των ωρών  $t$  της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα.

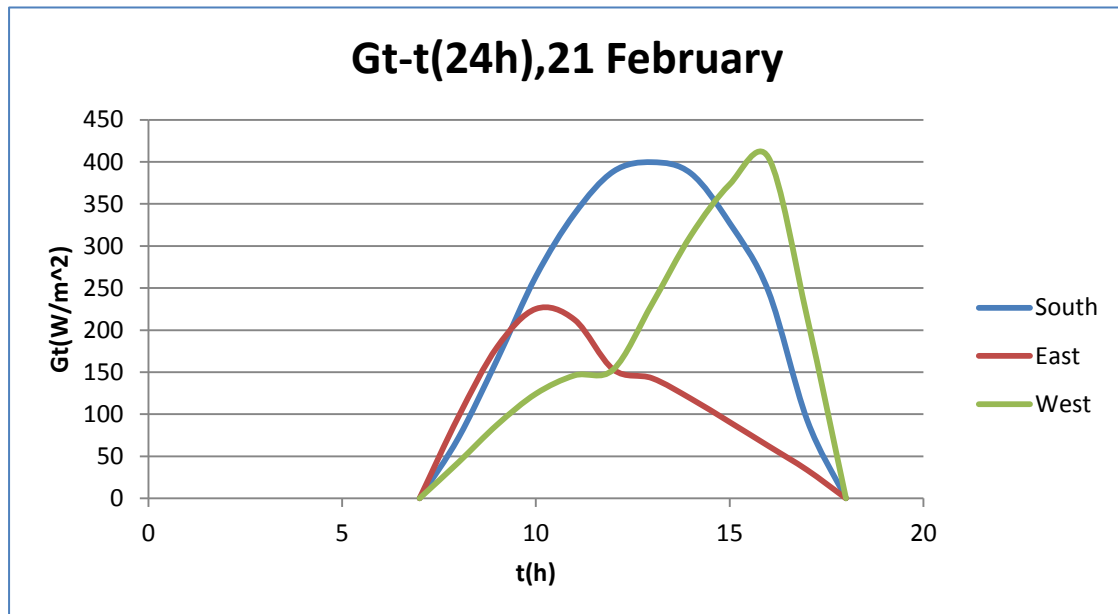


Σχήμα 5.1.2.2: Μεταβολή της μέσης στιγμιαίας διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου  $G_d$ , συναρτήσει των ωρών  $t$  της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα.

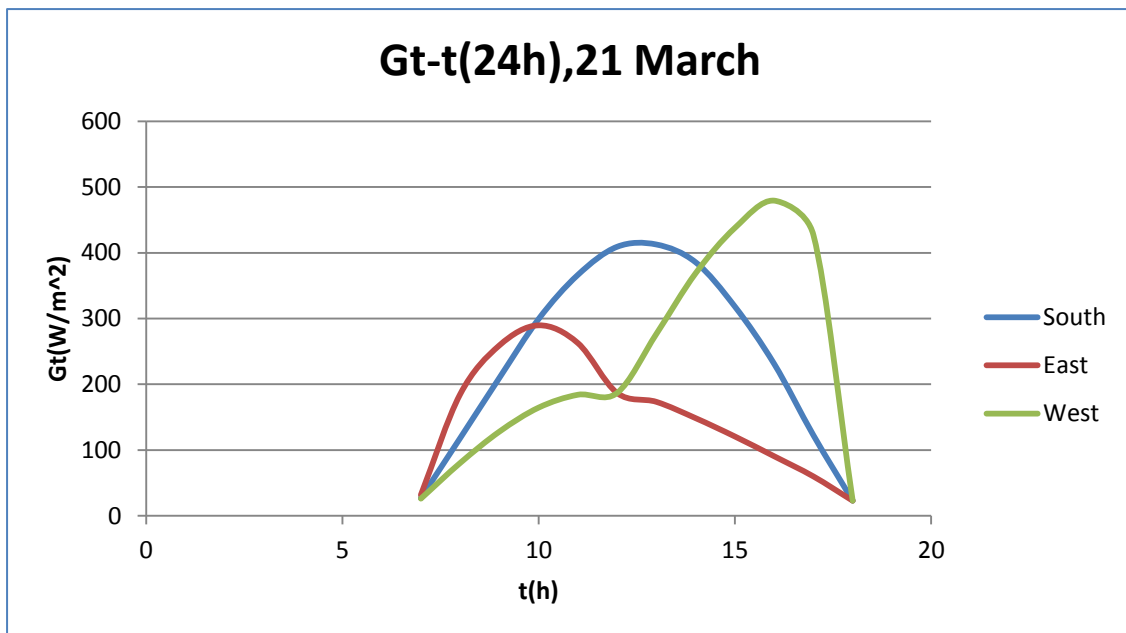
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ολικής ακτινοβολίας για την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα και για τους τρεις (νότιο, ανατολικό, δυτικό) προσανατολισμούς.



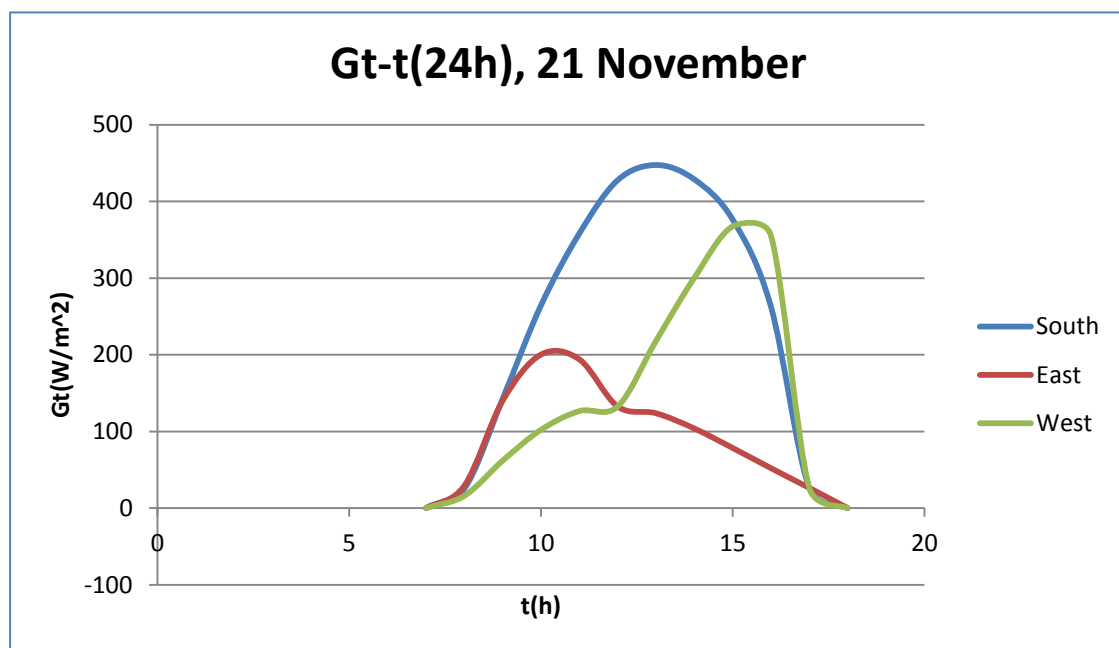
Σχήμα 5.1.2.3: Μεταβολή της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$ , συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> Ιανουαρίου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.



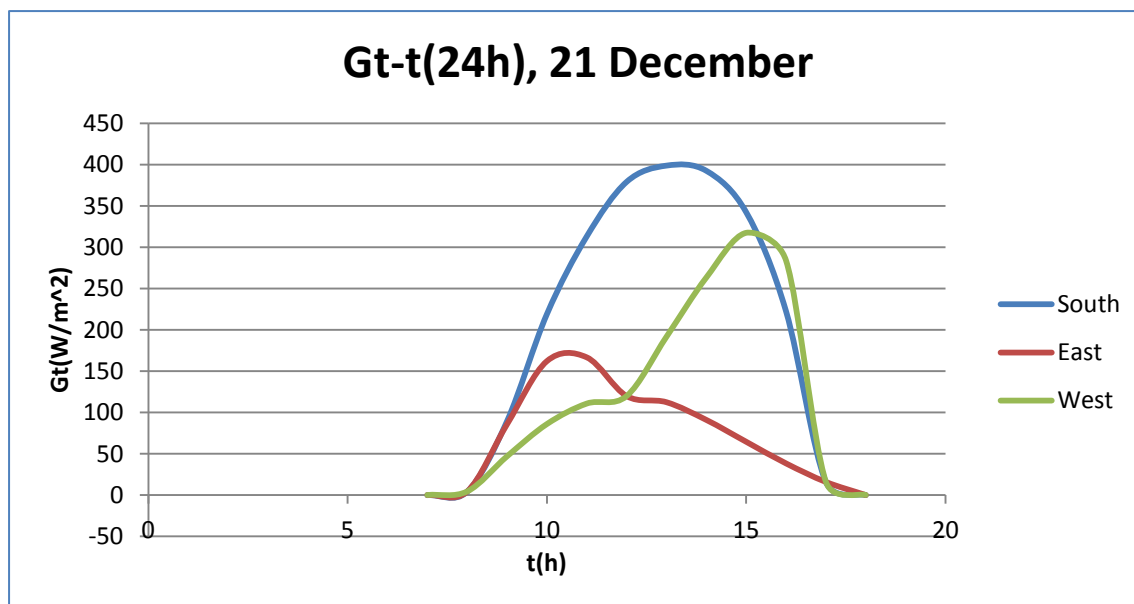
Σχήμα 5.1.2.4: Μεταβολή της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$ , συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 5.1.2.5: Μεταβολή της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$ , συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> Μαρτίου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 5.1.2.6: Μεταβολή της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$ , συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> Νοεμβρίου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 5.1.2.7: Μεταβολή της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$ , συναρτήσει των ωρών της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν παρατηρείται ότι ο τοίχος με νότιο προσανατολισμό δέχεται τους χειμερινούς μήνες μεγαλύτερη ολική ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τον ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό. Αυτό οφείλεται διότι ο ήλιος κινείται χαμηλά στο στερέωμα στην περιοχή του νότου και βλέπει τον τοίχο σχεδόν κάθετα, τις περισσότερες ώρες της ημέρας.

Αντίθετα, τους θερινούς μήνες, όπως προκύπτει από το διάγραμμα του Μαρτίου, ο ήλιος βλέπει τον τοίχο νότιου προσανατολισμού από ψηλά και πλάγια, το οποίο σημαίνει ότι δέχεται λιγότερη ακτινοβολία. Σε αυτή τη περίπτωση αυξάνεται η ακτινοβολία του ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, αφού ο ήλιος βλέπει τον ανατολικό τοίχο κάθετα τις πρωινές ώρες και από το μεσημέρι και μετά τον δυτικό τοίχο.

Τέλος, αίσθηση προκαλούν οι χαμηλές τιμές ολικής ακτινοβολίας στον ανατολικό προσανατολισμό, σε σχέση με τους άλλους δύο. Αυτό οφείλεται στο ότι τις πρωινές ώρες, που ο ήλιος βλέπει τον ανατολικό τοίχο, η ατμόσφαιρα έχει αυξημένη περιεκτικότητα σε υδρατμούς, οι οποίοι απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας.

### 5.1.3 Υπολογισμός μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου $H_T$ (kJ/m<sup>2</sup>) [2]

#### A. Υπολογισμός της $H_T$ με βάση την στιγμιαία ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου $G_T$

Σε αυτή τη περίπτωση η μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου προσεγγίζεται με το άθροισμα της μέσης στιγμιαίας ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου για την 21<sup>η</sup> μέρα του εκάστοτε μήνα του έτους από τη σχέση:

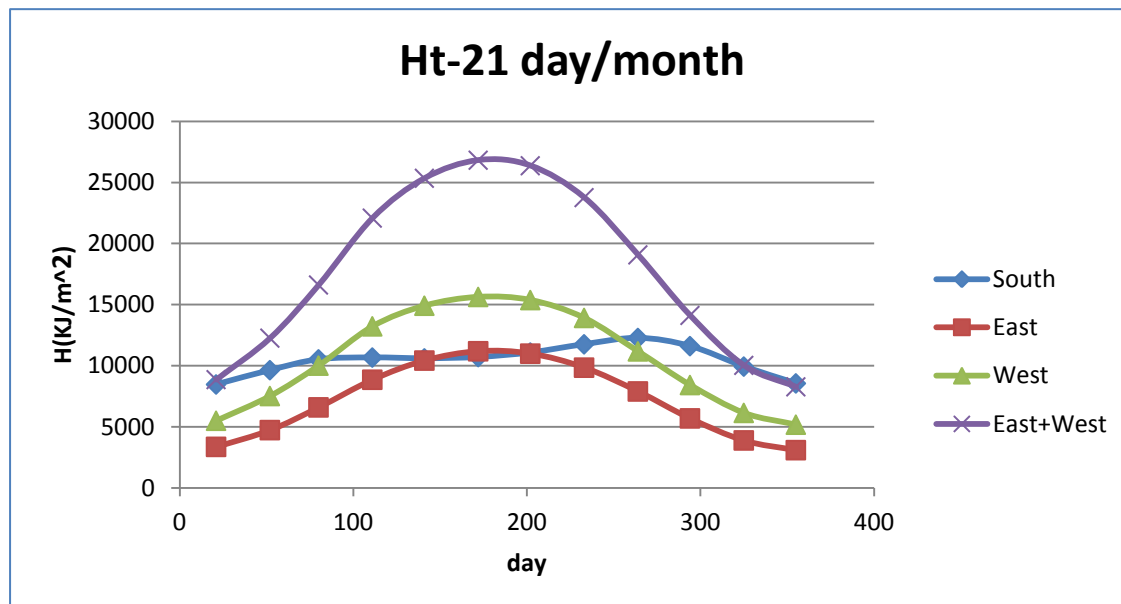
$$H_T \left( \frac{kJ}{m^2} \right) = \frac{\sum G_T \left( \frac{W}{m^2} \right) * 3600}{1000} \quad (5.1.3.1)$$

Στον Πίνακα 5.1.3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τις ημερήσιες τιμές της ολικής ακτινοβολίας, όπως υπολογίστηκαν με τη σχέση (5.1.3.1) για νότιο, ανατολικό, δυτικό και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, καθώς αυτοί οι τύποι προσανατολισμών θα μελετηθούν στα παρακάτω κεφάλαια.

Πίνακας 5.1.3.1: Μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία $H_T$ (kJ/m <sup>2</sup> ) για την 21 <sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα του έτους					
	D	South	East	West	East+West
Ιανουάριος	21	8472,39	3364,00	5502,50	8866,50
Φεβρουάριος	52	9641,85	4736,22	7527,06	12263,28
Μάρτιος	80	10524,89	6596,22	10015,77	16612,00
Απρίλιος	111	10673,45	8858,46	13228,05	22086,51
Μάιος	141	10604,34	10427,22	14916,82	25344,04
Ιούνιος	172	10711,58	11189,20	15634,47	26823,68
Ιούλιος	202	11083,96	10993,03	15379,63	26372,67
Αύγουστος	233	11757,89	9847,26	13915,53	23762,80
Σεπτέμβριος	264	12275,49	7899,68	11177,77	19077,46
Οκτώβριος	294	11608,71	5694,91	8426,37	14121,29
Νοέμβριος	325	9934,87	3890,35	6143,75	10034,11
Δεκέμβριος	355	8558,26	3096,78	5181,62	8278,41



Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα της μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου, όπως προέκυψε από τις μετρήσεις του Πίνακα 5.1.3.1.



Σχήμα 5.1.3.1: Μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου  $H_T$ , συναρτήσει της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα του έτους για διάφορους προσανατολισμούς.

## B. Υπολογισμός της $H_T$ , με βάση συντελεστών

Για την επαλήθευση των παραπάνω τιμών της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, πραγματοποιείται ο υπολογισμός για νότιο και δυτικό προσανατολισμό με βάση την παρακάτω σχέση.

Για την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα του τυπικού έτους, η μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$H_T \left( \frac{kJ}{m^2} \right) = (c_0 + c_1 * \cos\left(\frac{360}{365} * D\right) + c_2 * \cos\left(2 * \frac{360}{365} * D\right) + c_3 * \sin\left(\frac{360}{365} * D\right) + c_4 * \sin\left(2 * \frac{360}{365} * D\right)) * 3600$$

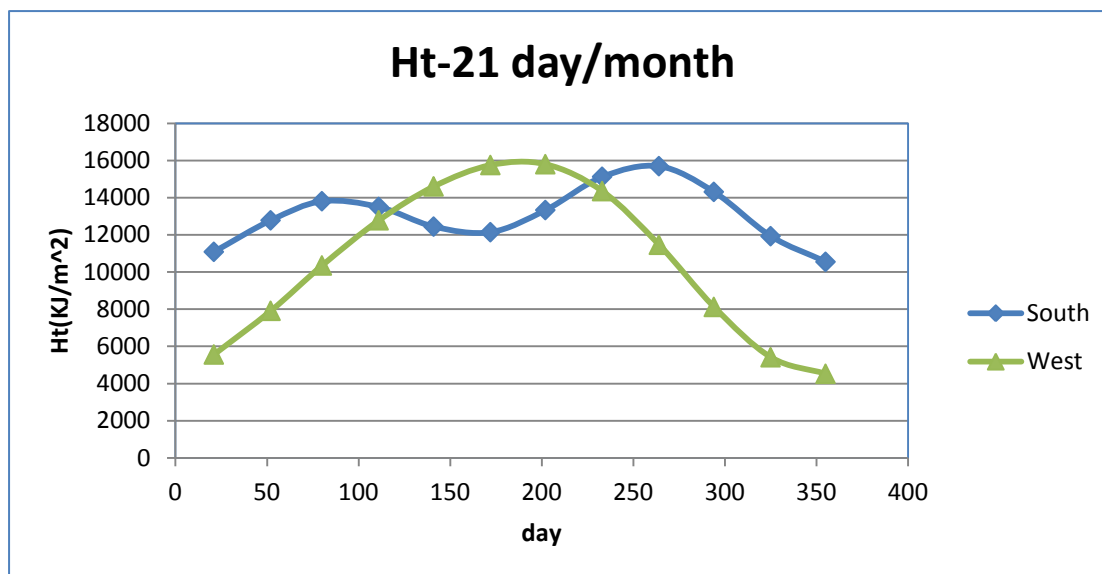
(5.1.3.2)

Όπου οι συντελεστές  $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4$  δίνονται στον Πίνακα 5.1.3.2 για τιμές αζιμουθίου κεκλιμένου επιπέδου  $\gamma=0^\circ$  (νότος),  $90^\circ$  (ανατολή),  $-90^\circ$  (δύση) και κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο  $\beta=90^\circ$ .

Πίνακας 5.1.3.2: Τιμές των συντελεστών της εξίσωσης (5.1.3.2)					
	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
<b>South</b>	3,627	-0,264	-0,444	-0,218	0,166
<b>West</b>	2,934	-1,563	-0,076	0,126	0,13

Στον Πίνακα 5.1.3.3 παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου, όπως προέκυψαν από τη σχέση (5.1.3.2) για την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα του τυπικού έτους. Στη συνέχεια η παραπάνω συσχέτιση δίνεται υπό μορφή διαγράμματος.

Πίνακας 5.1.3.3: Μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία HT(kJ/m <sup>2</sup> ) για την 21 <sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα του έτους			
	<b>D</b>	<b>South</b>	<b>West</b>
<b>Ιανουάριος</b>	21	11087,53	5564,192
<b>Φεβρουάριος</b>	52	12781,71	7913,624
<b>Μάρτιος</b>	80	13809,88	10354,73
<b>Απρίλιος</b>	111	13501,41	12784,89
<b>Μάιος</b>	141	12443,23	14608,57
<b>Ιούνιος</b>	172	12144,59	15757,64
<b>Ιούλιος</b>	202	13333,3	15802,63
<b>Αύγουστος</b>	233	15126,26	14354,27
<b>Σεπτέμβριος</b>	264	15695,78	11467,63
<b>Οκτώβριος</b>	294	14311,91	8123,407
<b>Νοέμβριος</b>	325	11927,99	5417,491
<b>Δεκέμβριος</b>	355	10548,97	4525,56



Σχήμα 5.1.3.2: Μέση ημερήσια ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου ΗΤ, συναρτήσει της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα του έτους για διάφορους προσανατολισμούς.

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τα παραπάνω διαγράμματα και των δύο περιπτώσεων Α και Β παρατηρείται ότι η ημερήσια ακτινοβολία του νότιου προσανατολισμού είναι υψηλότερη κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ παρουσιάζει μια καμπή τους θερινούς. Αυτό οφείλεται, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, στο ότι ο ήλιος τον χειμώνα βλέπει τον τοίχο νότιου προσανατολισμού κάθετα, ενώ το θέρος πλάγια και ελάχιστα. Το αντίθετο συμβαίνει στον ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό, όπου ο ήλιος βλέπει κάθετα τον τοίχο τους θερινούς μήνες.

Για τον συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, σε σχέση με τον νότιο, παρατηρείται ότι σχεδόν ταυτίζονται τους χειμερινούς μήνες (εφόσον η ακτινοβολία ανατολής και δύσης κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα), ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες η διαφορά τους είναι ιδιαίτερα αισθητή, αφού η ακτινοβολία μεταξύ ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού αυξάνεται αρκετά, ενώ του νότιου μειώνεται.

Οι διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των δύο περιπτώσεων μπορεί να οφείλονται στις διάφορες προσεγγίσεις που έγιναν, τόσο για την μέτρηση των στιγμιαίων ολικών ακτινοβολιών για την πρώτη περίπτωση, όσο και

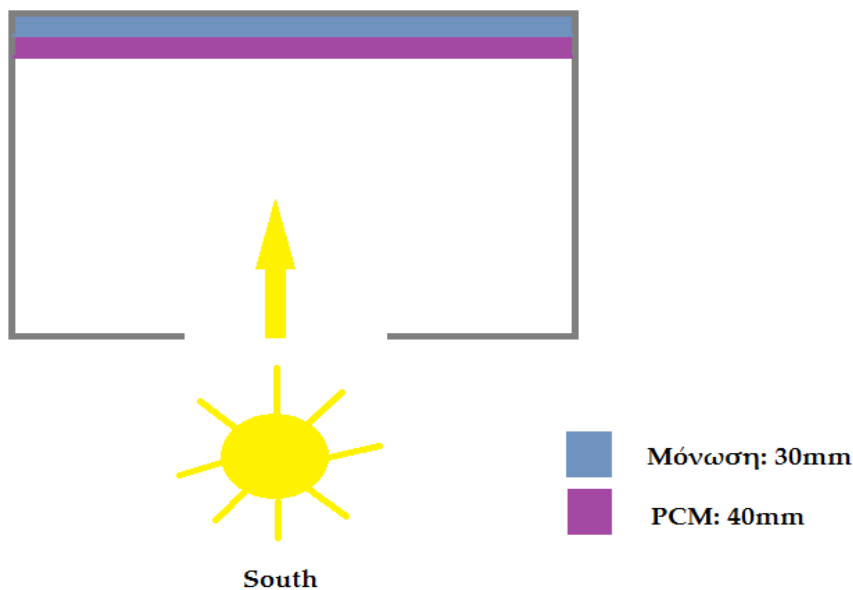
για την προσέγγιση της ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας με βάση τη σχέση (5.1.3.2).

Παρόλα αυτά και στις δύο περιπτώσεις υπολογισμού της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, τα διαγράμματα νότιου και δυτικού προσανατολισμού παρουσιάζουν ίδια μορφή και τιμές με μικρές διαφορές, ώστε να μπορεί να ειπωθεί ότι ταυτίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό.

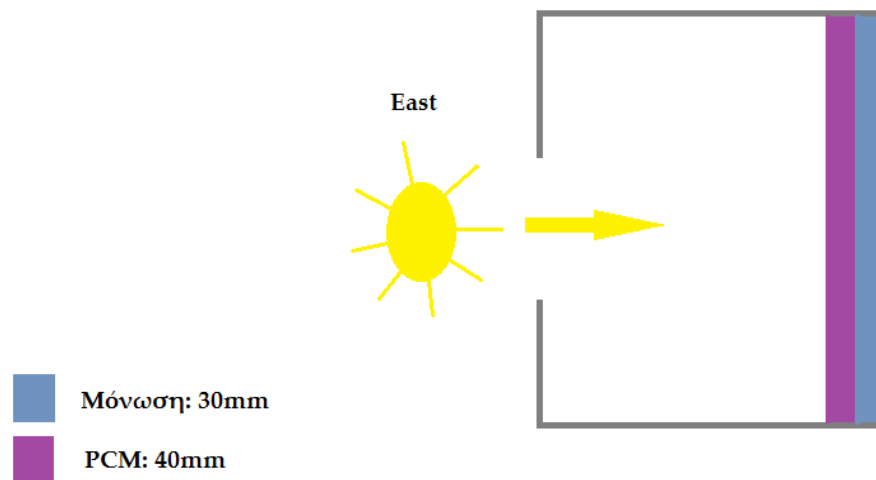
## 5.2 Σύγκριση φόρτισης μονωμένου τοίχου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού (δοκιμαστική μελέτη)

### 5.2.1 Περιγραφή εξεταζόμενης κατάστασης

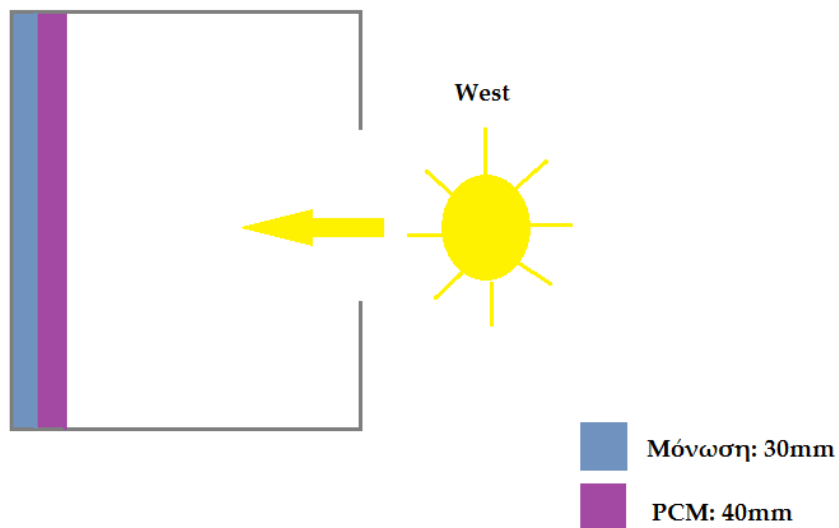
Τα εξεταζόμενα δωμάτια νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού που φαίνονται παρακάτω βρίσκονται στην περιοχή της Αθήνας και έχουν διαστάσεις 4m x 3m x 3m. Απέναντι από τον τοίχο με το PCM υπάρχει υαλοπίνακας διαστάσεων 1.5m x 2m, από τον οποίο εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 5.2.1.1: Εξεταζόμενο δωμάτιο με PCM, νότιου προσανατολισμού



Σχήμα 5.2.1.2: Εξεταζόμενο δωμάτιο με PCM, ανατολικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.2.1.3: Εξεταζόμενο δωμάτιο με PCM, δυτικού προσανατολισμού

Για την σύγκριση των παραπάνω εξεταζόμενων δωματίων πραγματοποιούνται οι εξής παραδοχές:

- Στο εξωτερικό σημείο της μόνωσης υπάρχει αδιαβατικό όριο, που δεν επιτρέπει την συναλλαγή θερμότητας με το εξωτερικό περιβάλλον
- Η εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου θεωρείται σταθερή και ομοιόμορφη
- Η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης θεωρείται ομοιόμορφη
- Η κατάσταση θεωρείται μόνιμη, δηλαδή δεν υπάρχει περαιτέρω αλληλεπίδραση με εξωτερικούς παράγοντες και η συναλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται μεταξύ του εσωτερικού αέρα και του PCM, το οποίο φορτίζεται αποκλειστικά από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά του.

### 5.2.2 Υπολογισμός της θερμοκρασίας PCM, $T_{PCM}$ και σύγκριση μεταξύ νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια δοκιμαστική μελέτη της συμπεριφοράς του PCM σε σχέση με τον προσανατολισμό του υαλοπίνακα από τον οποίο φορτίζεται. Για τη μελέτη γίνεται επιλογή ενός δοκιμαστικού PCM, το οποίο μπορεί να προκύψει με κατάλληλους συνδυασμούς. Το πάχος που επιλέχθηκε είναι 40mm. Εξετάζεται η θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM σε ακτινοβολία που εισέρχεται από υαλοπίνακα νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού και πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ τους. Και για τις τρεις περιπτώσεις, η λειτουργία του PCM μελετάται για την 21<sup>η</sup> ημέρα Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου, Μαρτίου, Νοεμβρίου και Δεκεμβρίου, με σκοπό τη διερεύνηση της αποδοτικότητας του PCM την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα και του εκάστοτε προσανατολισμού.

Το PCM είναι τοποθετημένο στον τοίχο με τη μορφή πλακιδίων, ώστε να στέκεται χωρίς την περαιτέρω υποστήριξη άλλου δομικού υλικού και είναι σε απευθείας επαφή με τον εσωτερικό αέρα του δωματίου.

Τα χαρακτηριστικά του επιλεγμένου PCM παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.2.1.

Πίνακας 5.2.2.1:Χαρακτηριστικά PCM	
H (kJ/kg)	130
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	900
T <sub>s</sub> (°C)	20
T <sub>i</sub> (°C)	26
T <sub>c</sub> (°C)	23
B	6
c <sub>p<sub>s</sub></sub> (kJ/kg°C)	3000
c <sub>p<sub>i</sub></sub> (kJ/kg°C)	4000

### A. Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM

Ο ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM αποδίδεται από τη σχέση:

$$Q_{\text{απορροφούμενη}} = Q_{\text{ακτινοβολίας}} + Q_{\text{συναγωγής,αγωγής}} \quad (5.2.2.1)$$

Η μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM σε σχέση με το χρόνο στο 24ωρο, εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται από τον υαλοπίνακα, τη συναλλαγή θερμότητας με συναγωγή με τον εσωτερικό αέρα και τη γυψοσανίδα, καθώς επίσης με τη μάζα και τη θερμοχωρητικότητα του PCM.

- Υπολογισμός απορροφούμενης ενέργειας

Απορροφούμενη ενέργεια είναι η ενέργεια που απορροφάται από το στρώμα PCM και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{\text{απορροφούμενη}} = M_{\text{PCM}} * c_{p\text{eff}} * (T_{\text{PCM}} - T_{\text{PCM}}^0) \quad (5.2.2.2)$$

- $T_{\text{PCM}}^0$  : η θερμοκρασία του PCM την χρονική στιγμή t
- $T_{\text{PCM}}$  : η θερμοκρασία του PCM την χρονική στιγμή t+Δt
- $M_{\text{PCM}}$  : η μάζα του επιλεγμένου PCM
- $c_{p\text{eff}}$  : η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM



• **Υπολογισμός της μάζας PCM**

Η μάζα του PCM,  $M_{PCM}$ , θεωρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της μελέτης και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας και μπορεί να προσεγγιστεί με την εξής σχέση:

$$M_{PCM} = \rho_{PCM} * V_{PCM} \quad (5.2.2.3)$$

- $\rho_{PCM}$ : η πυκνότητα του PCM
- $V_{PCM}$ : ο όγκος του PCM

$$V_{PCM} = (\text{ύψος τοίχου}) * (\text{πλάτος τοίχου}) * (\text{πάχος PCM}) \quad (5.2.2.4)$$

• **Υπολογισμός ενεργού θερμοχωρητικότητας,  $C_{p,eff}$**

Για τον υπολογισμό της ενεργού θερμοχωρητικότητας θα χρησιμοποιηθεί η τριγωνική συνάρτηση ως εξής: [3]

$$C_{p,eff}(T) = \frac{4 * (H - b * C_{ps}) * (T - T_s)}{b^2} + C_{ps}, \quad \text{για } T_s \leq T \leq T_c \quad (5.2.2.5)$$

$$C_{p,eff}(T) = \frac{4 * (b * C_{pl} - H) * (T - T_s - \frac{b}{2})}{b^2} + \frac{2 * H}{b} - C_{pl}, \quad \text{για } T_c \leq T \leq T_l \quad (5.2.2.6)$$

- $C_{pl}$ : θερμοχωρητικότητα του υγρού PCM
- $C_{ps}$ : θερμοχωρητικότητα του στερεού PCM
- $T_s$ : θερμοκρασία του στερεού PCM
- $T_l$ : θερμοκρασία του υγρού PCM
- $b = (T_l - T_s)$ : εύρος θερμοκρασιών
- $T_c = \frac{T_l + T_s}{2}$ : το μέσον του εύρους θερμοκρασιών
- $H$ : η θερμότητα αλλαγής φάσης

• **Υπολογισμός ενέργειας λόγω συναγωγής και αγωγής**

Πρόκειται για την θερμότητα που προσφέρει το σώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου και στο στρώμα της γυψοσανίδας και αποδίδεται με την παρακάτω σχέση:

$$Q_{\text{συναγωγής,αγωγής}} = 3600 * A_{\text{τοίχου}} * h_{in} * (T_{in} - T_{PCM}^0) \quad (5.2.2.7)$$

- $h_{in}=8 \text{ W/m}^2\text{C}$  ,συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω συναγωγής με τον εσωτερικό αέρα
- $A_{\text{τοίχου}} = (\text{πλάτος τοίχου}) \times (\text{ύψος τοίχου})$
- $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$

- Υπολογισμός ενέργειας λόγω ακτινοβολίας

Πρόκειται για την θερμότητα που δέχεται το στρώμα PCM λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας.

$$Q_{\text{ακτινοβολίας}} = 0.9 \cdot 3600 \cdot G_T \cdot A_{\text{υαλοπίνακα}} \quad (5.2.2.8)$$

- $A_{\text{υαλοπίνακα}} = (\text{πλάτος υαλοπίνακα}) \times (\text{ύψος υαλοπίνακα})$
- $G_T$ : η προσπίπτουσα στον τοίχο μέση στιγμιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία, όπως προέκυψε από την ενότητα 5.1

Λόγω του ότι ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από τον υαλοπίνακα και από τον εσωτερικό αέρα του δωματίου, έχει ως αποτέλεσμα να λαμβάνεται ένα ποσοστό της τάξης του 90% ότι προσπίπτει στον τοίχο μελέτης και κατ' επέκταση στο στρώμα του PCM.

## B. Υπολογισμός της θερμοκρασίας του PCM

Με βάση τον ισολογισμό ενέργειας που πραγματοποιήθηκε παραπάνω (σχέσεις 5.2.2.1-5.2.2.8), η θερμοκρασία που αναπτύσσει το στρώμα PCM για τους τρεις προσανατολισμούς προκύπτει ως εξής:

$$T_{\text{PCM}} = T_{\text{PCM}}^0 + \frac{3600 \cdot 0,9 \cdot G_T \cdot A_{\text{υαλοπίνακα}} + 3600 \cdot A_{\text{τοίχου}} \cdot h_{in} \cdot (T_{in} - T_{\text{PCM}}^0)}{M_{\text{PCM}} \cdot c_{p,\text{eff}}(T)} \quad (5.2.2.9)$$

Η διαφορά μεταξύ των τριών προσανατολισμών έγκειται στη διαφορετική ολική ηλιακή ακτινοβολία  $G_T$  για τον κάθε έναν (ενότητα 5.1), οπότε και προκύπτει η θερμοκρασία του PCM.

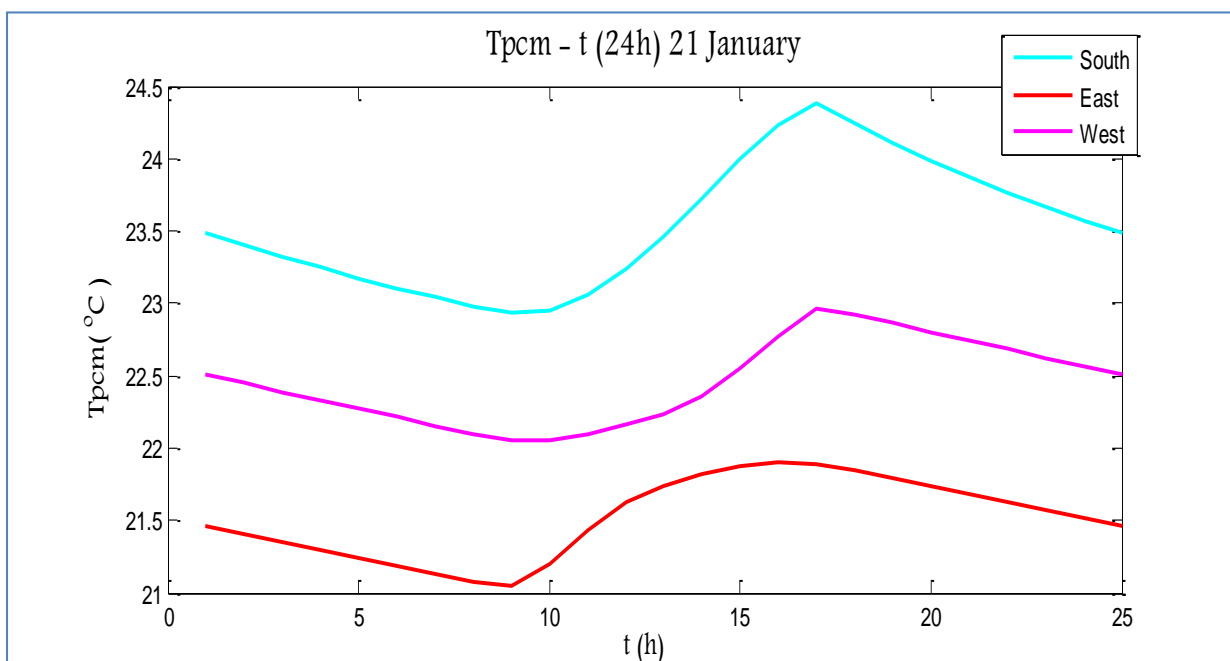
Η θερμοκρασία του PCM υπολογίζεται για ένα 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα, από τη 1:00 έως τις 00:00, με βήμα μίας ώρας.

Καθώς η θερμοκρασία του PCM στην αρχή των υπολογισμών είναι άγνωστη, λαμβάνεται αυθαίρετα μια τιμή και στη συνέχεια ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία έως ότου οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται το 24ωρο να συγκλίνουν με εκείνες της προηγούμενης επανάληψης.

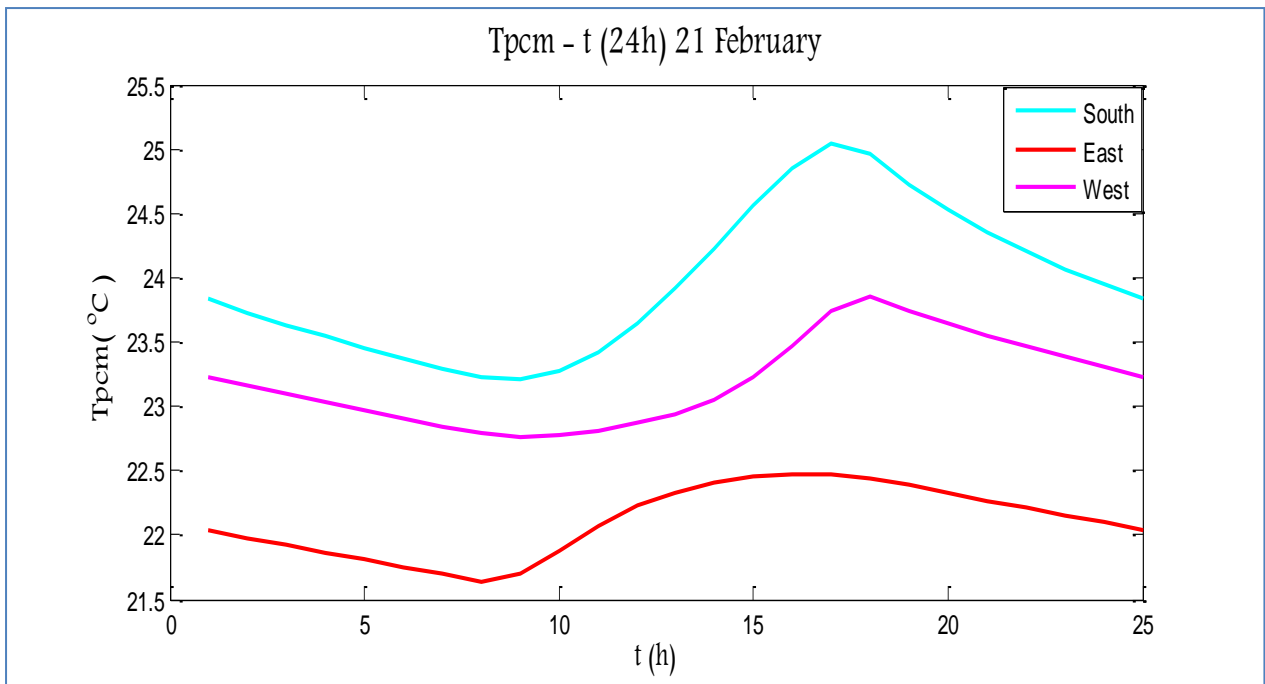
Η επανάληψη σε κάθε μήνα ξεκινάει με την τιμή  $T_{PCM}=22^{\circ}\text{C}$  στη 1:00 και υπολογίζεται η θερμοκρασία του PCM όλο το 24ωρο. Η διαδικασία συνεχίζεται λαμβάνοντας στη νέα επανάληψη την τιμή της  $T_{PCM}$  που υπολογίστηκε στις 00:00 από την προηγούμενη. Καταλήγοντας στο σημείο όπου οι θερμοκρασίες της προηγούμενης επανάληψης συγκλίνουν με αυτές της επόμενης.

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η θερμοκρασία του PCM συναρτήσει του χρόνου που υπολογίστηκε το 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας των μηνών Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό σε κοινό διάγραμμα, ώστε να είναι περισσότερο εφικτή η σύγκρισή τους.

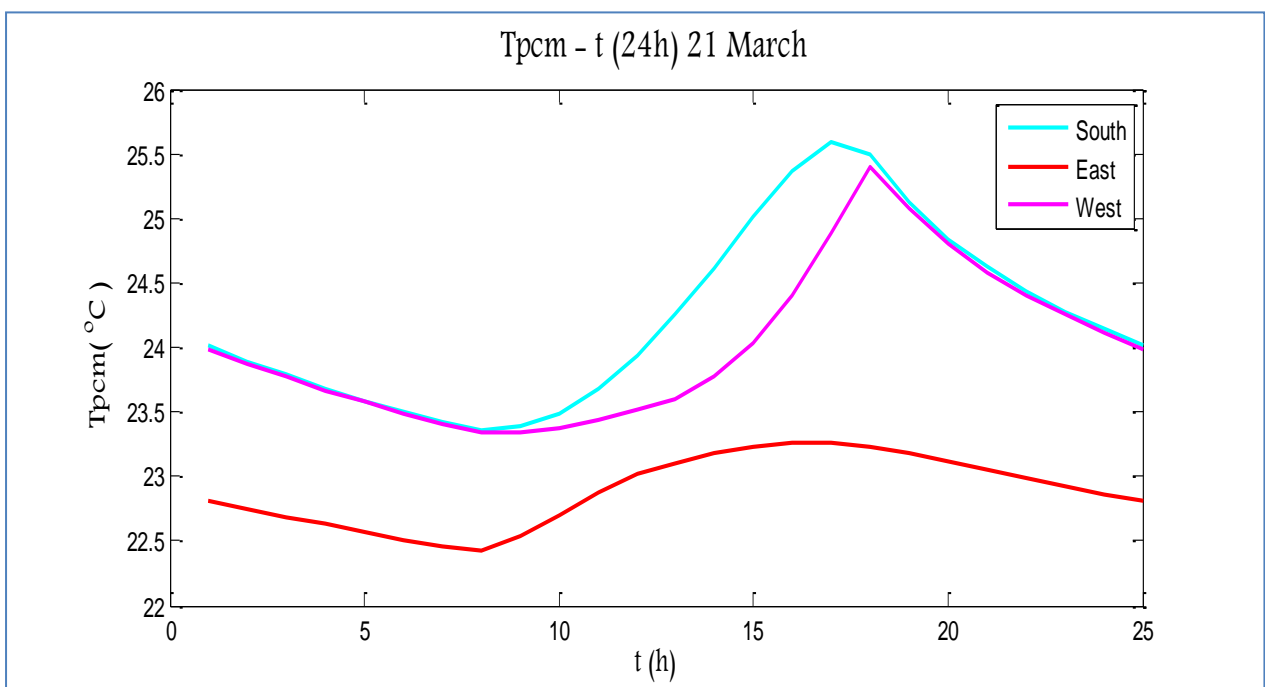
Το πάχος του PCM στη συγκεκριμένη μελέτη είναι 40mm.



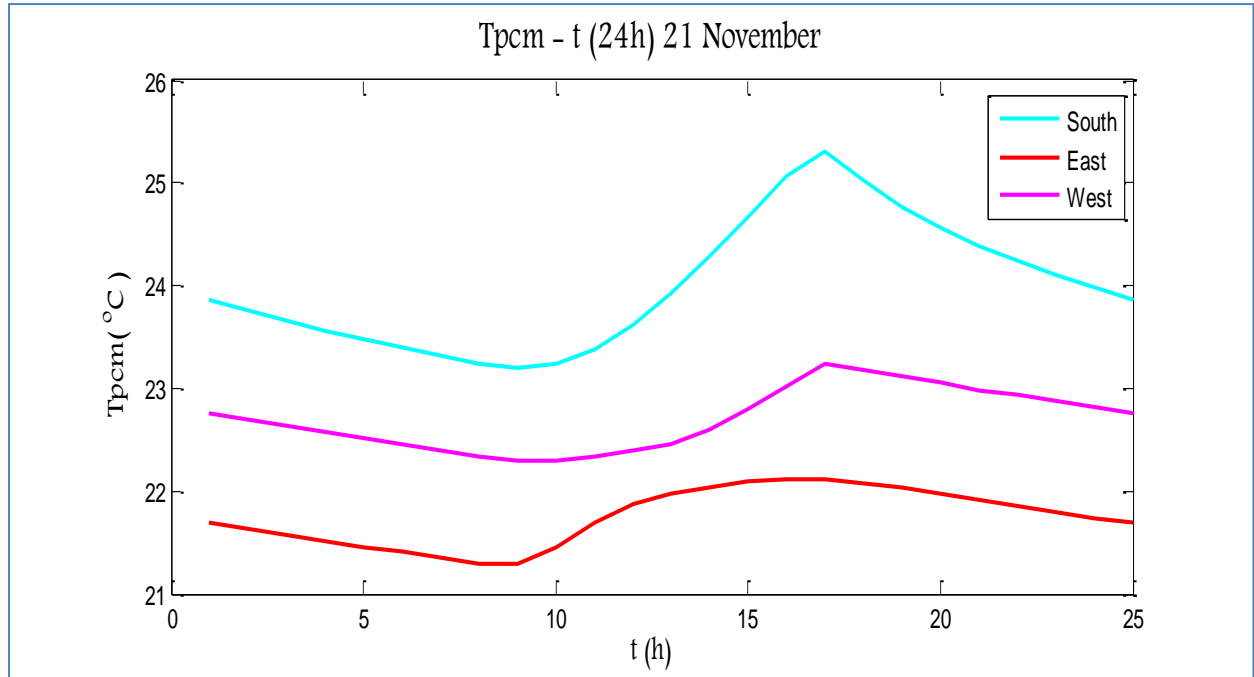
**Σχήμα 5.2.2.1:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου



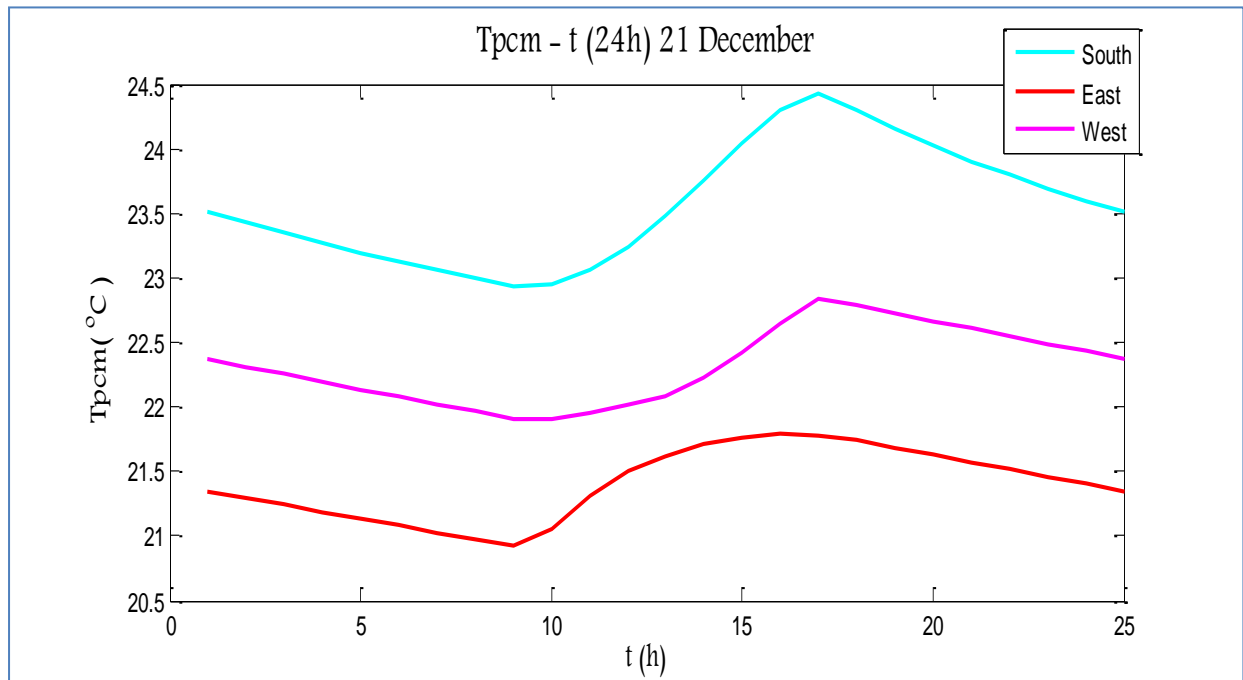
Σχήμα 5.2.2.2: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου



Σχήμα 5.2.2.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου



Σχήμα 5.2.2.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου



Σχήμα 5.2.2.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Το PCM, από τη θερμότητα που δέχεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, χρησιμοποιεί μέρος της για να αλλάξει φάση. Αυτό σημαίνει ότι το PCM θα εμφανίζει χαμηλότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας από ένα σύνηθες δομικό υλικό.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το PCM δέχεται την προσπίπτουσα ακτινοβολία αυξάνοντας τη θερμοκρασία του και αλλάζοντας φάση, ενώ αντίθετα κατά τη διάρκεια της νύχτας η θερμοκρασία του μειώνεται, εφόσον προσδίδει τη θερμότητά του στο δωμάτιο. Τους χειμερινούς μήνες που μελετήθηκε η απόδοση του PCM, διαπιστώνεται ότι αλλάζει φάση απ' το γεγονός ότι η θερμοκρασία του είναι υψηλότερη της  $T_c=20.5^{\circ}\text{C}$ , η οποία είναι το μέσο του εύρους θερμοκρασιών της υγρής και στερεής φάσης.

Από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν παρατηρείται ότι το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού αναπτύσσει υψηλότερες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε σχέση με το στρώμα έναντι υαλοπίνακα ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού. Το παραπάνω συμπέρασμα μπορεί να εξηγηθεί αν ληφθεί υπόψη η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στους τρεις προσανατολισμούς (Κεφάλαιο 5.1). Η ηλιακή ακτινοβολία στο νότο είναι εντονότερη σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις, γι' αυτό το λόγο το στρώμα PCM νοτίου προσανατολισμού εμφανίζει υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες. Αντίθετα, τα στρώματα έναντι υαλοπίνακα ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού αναπτύσσουν χαμηλότερες ελάχιστες θερμοκρασίες. Καθώς φορτίζονται λιγότερο κατά τη διάρκεια της ημέρας, τη νύχτα έχουν μεγαλύτερο περιθώριο να προσδώσουν τη θερμότητά τους στο δωμάτιο.

Η διαφορά μεταξύ του στρώματος PCM έναντι υαλοπίνακα ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, με αυτό του δυτικού να εμφανίζει υψηλότερες θερμοκρασίες, έγκειται στο γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία στην ανατολή είναι χαμηλότερη σε σχέση με τη δύση, γιατί η ατμόσφαιρα τις πρωινές ώρες περιέχει υψηλό ποσοστό υδρατμών που απορροφούν την ακτινοβολία.

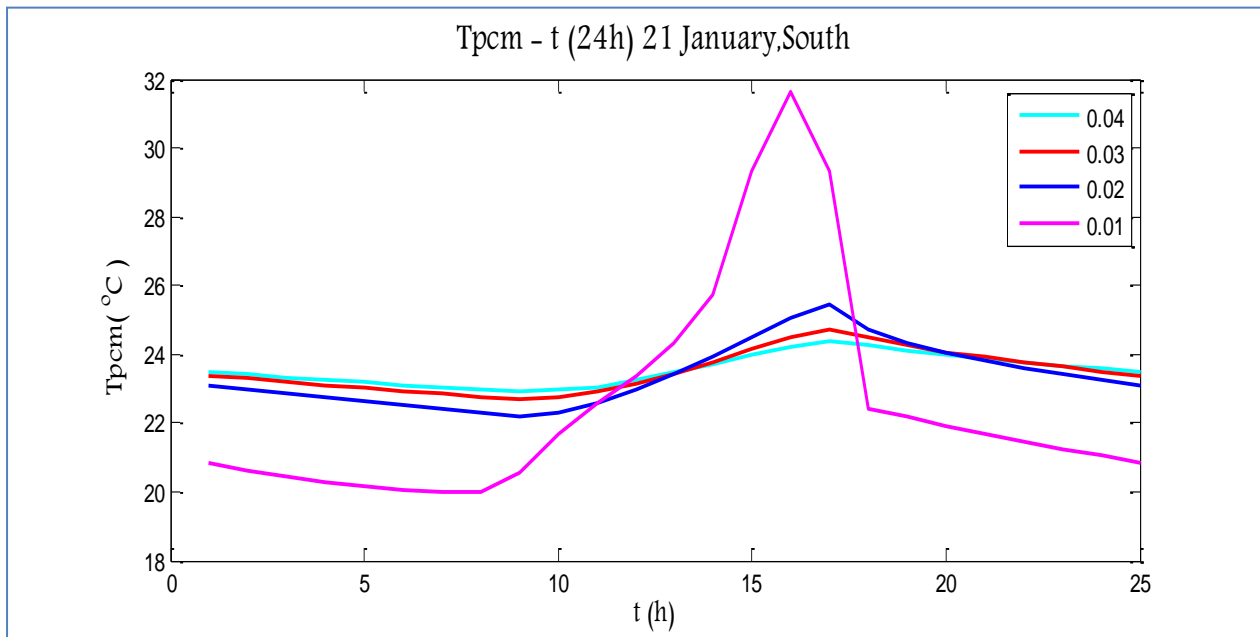
Τέλος, παρατηρείται μετατόπιση της εμφάνισης των μεγίστων θερμοκρασιών στις τρεις περιπτώσεις, με το PCM έναντι ανατολικού υαλοπίνακα να προηγείται, να ακολουθεί ο νότιος προσανατολισμός και στη συνέχεια ο δυτικός. Αυτό συμβαίνει διότι η εντονότερη ηλιακή ακτινοβολία στην ανατολή είναι τις πρωινές ώρες, στον νότο γίνεται μέγιστη κατά τη 13:00, ενώ στη δύση στις 16:00, όπως προκύπτει από το Κεφάλαιο 5.1.

### **5.2.3 Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος στρώματος PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού**

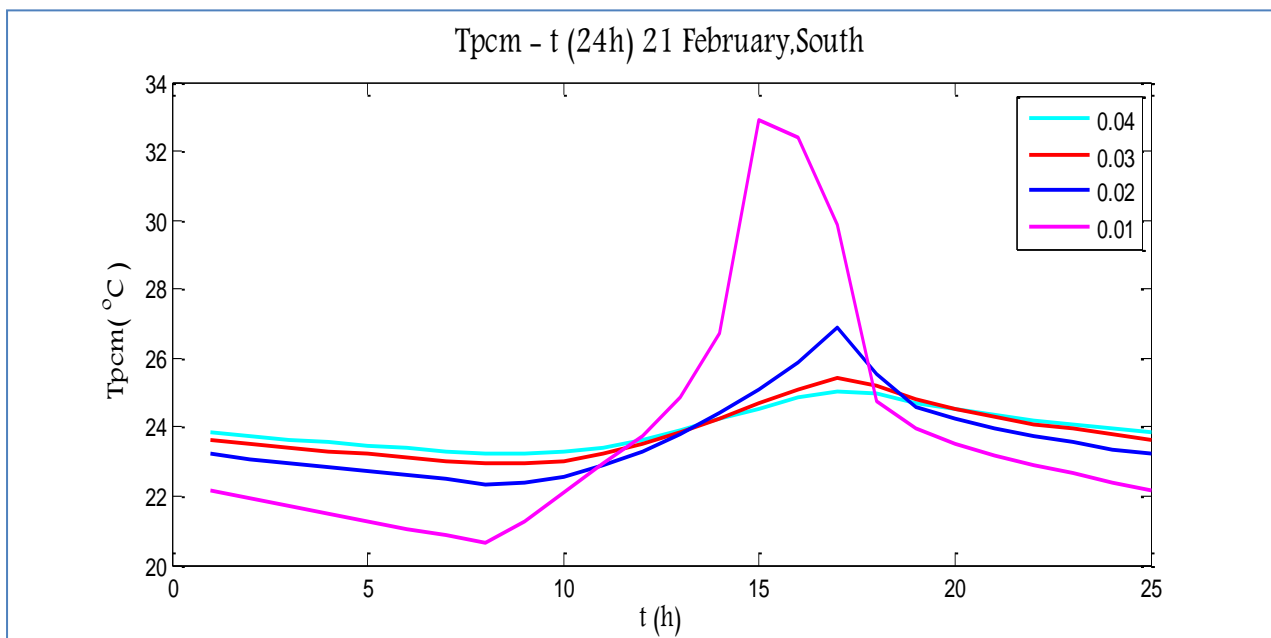
Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ διαφορετικών παχών του στρώματος PCM, με τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στον Πίνακα 5.2.2.1, και τις θερμοκρασίες που αναπτύσσει σε κάθε περίπτωση. Τα πάχη που επιλέχθηκαν να μελετηθούν είναι 30mm, 20mm και 10mm, τα οποία συγκρίνονται με στρώμα πάχους 40mm.

Η μελέτη αναφέρεται στην 21<sup>η</sup> ημέρα των μηνών Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο για ένα 24ωρο. Η θερμοκρασία υπολογίζεται από τη 1:00 ως τις 00:00, με βήμα μιας ώρας και ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία, όπως ακριβώς παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5.2.2.

Ακολουθούν τα διαγράμματα με τη θερμοκρασία που αναπτύσσει το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού, συναρτήσει των ωρών  $t(h)$ , για τα πάχη που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα διάφορα πάχη αναφέρονται σε μέτρα, όπως ακριβώς χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς.

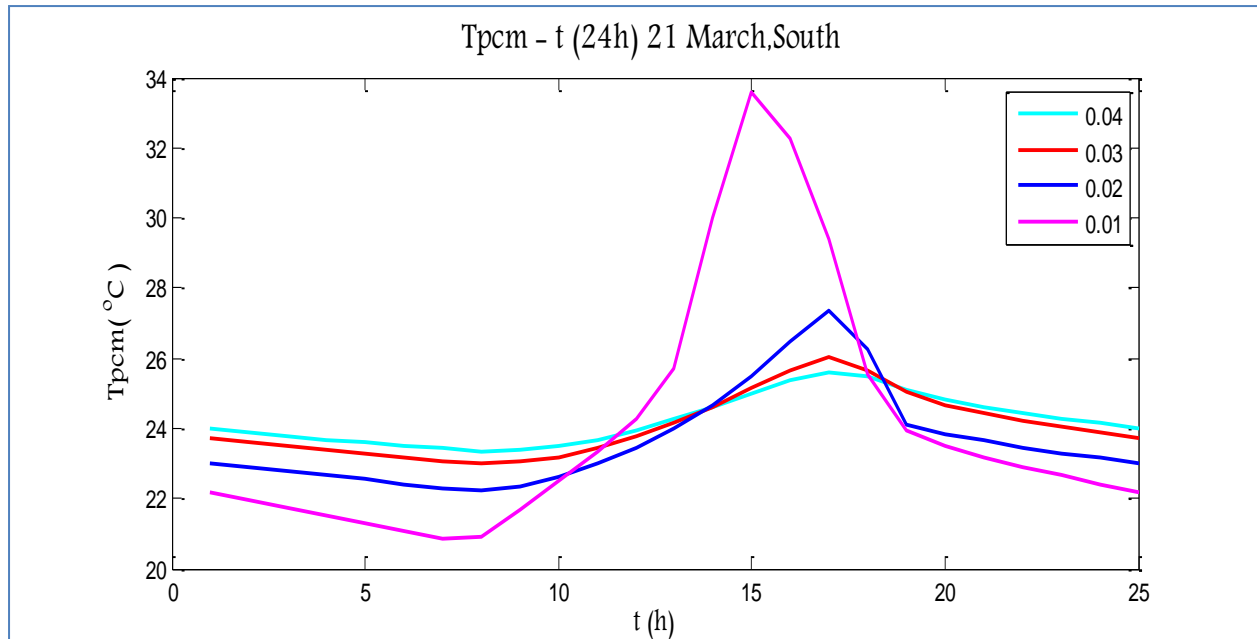


Σχήμα 5.2.3.1: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, για ένα 24ωρο, για νότιο προσανατολισμό

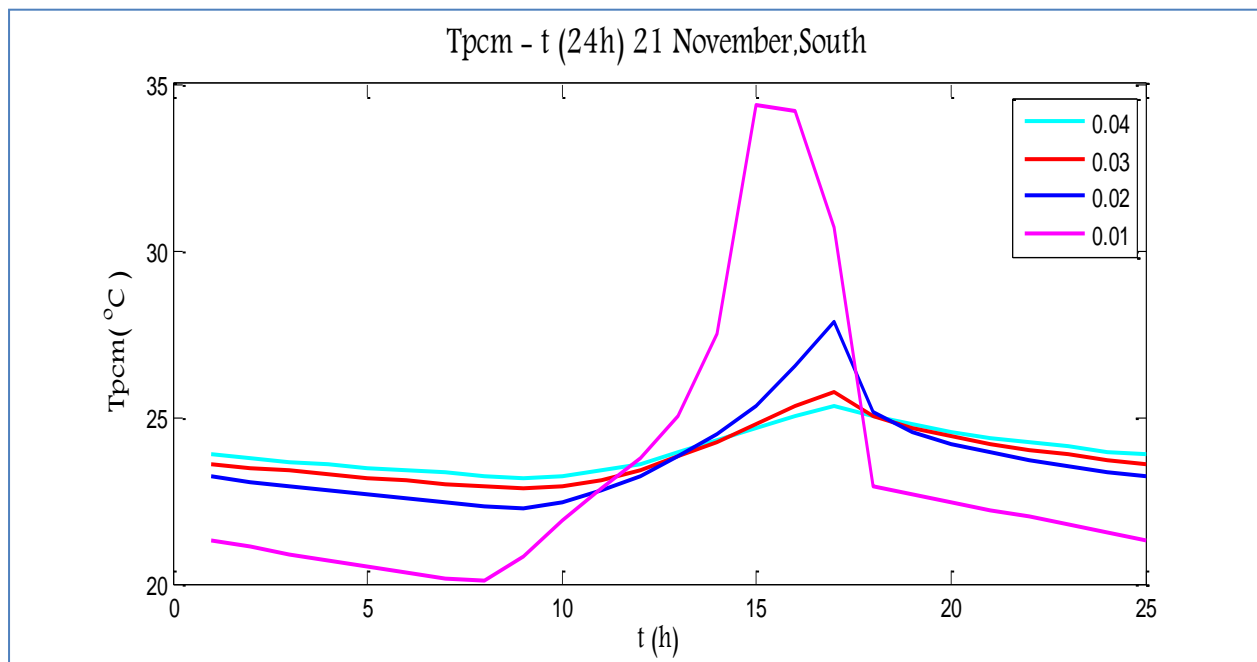


Σχήμα 5.2.3.2: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου, για ένα 24ωρο, για νότιο προσανατολισμό

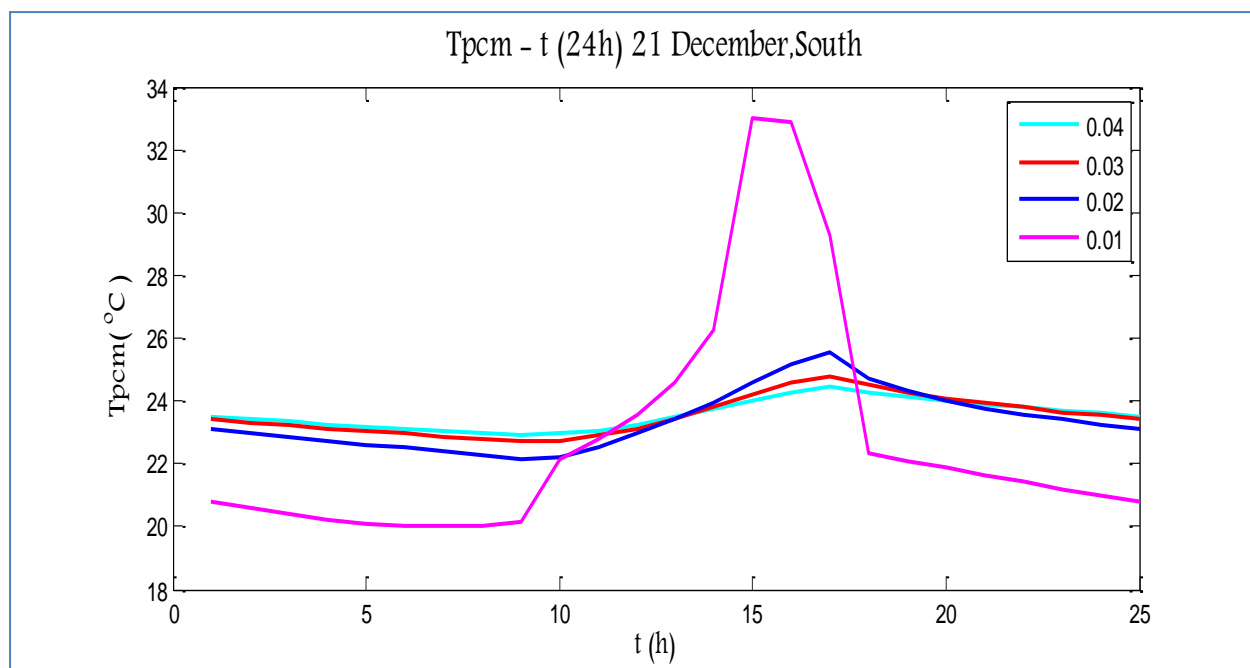




Σχήμα 5.2.3.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου, για ένα 24ωρο, για νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 5.2.3.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου, για ένα 24ωρο, για νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 5.2.3.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου, για ένα 24ωρο, για νότιο προσανατολισμό

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν παρατηρείται η επίδραση της αλλαγής πάχους του στρώματος PCM στη θερμοκρασία που αναπτύσσει. Έτσι, όσο μικρότερο είναι το πάχος του PCM τόσο υψηλότερες θερμοκρασίες αναπτύσσει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό αιτιολογείται, αν ληφθεί υπόψη η σχέση (5.2.2.9), όπου όσο αυξάνεται το πάχος του PCM και κατά συνέπεια η μάζα του, τόσο μειώνεται η θερμοκρασία που αναπτύσσει.

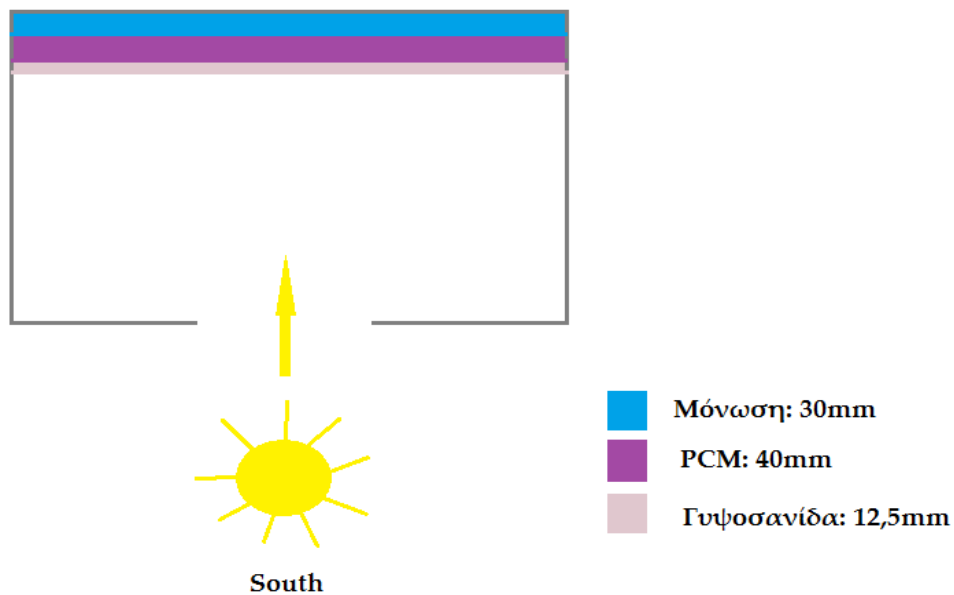
Το γεγονός ότι όσο μειώνεται το πάχος του PCM μειώνονται και οι ελάχιστες θερμοκρασίες, εξηγείται στο ότι το PCM με μειωμένο πάχος αποθηκεύει λιγότερη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας, με συνέπεια να εξαντλείται περισσότερο κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Τέλος, όσο μειώνεται το πάχος του PCM τόσο πιο άμεσα αποκτά τη μέγιστη θερμοκρασία του. Όσο αυξάνεται το πάχος, το PCM έχει μεγαλύτερα περιθώρια αποθήκευσης θερμότητας, με αποτέλεσμα η μέγιστη θερμοκρασία να καθυστερεί κατά τη διάρκεια της ημέρας.

### 5.3 Σύγκριση φόρτισης μονωμένου τοίχου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

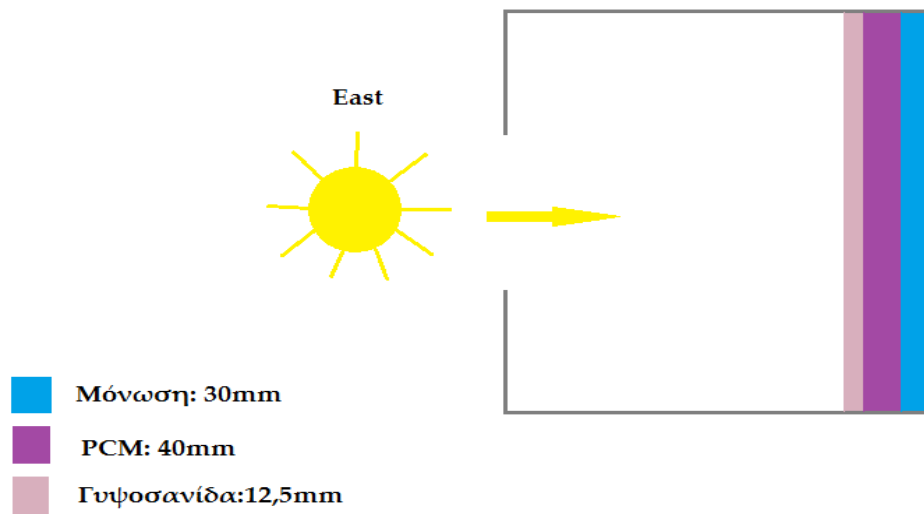
#### 5.3.1 Περιγραφή εξεταζόμενης μελέτης

Τα εξεταζόμενα δωμάτια νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού που φαίνονται παρακάτω βρίσκονται στην περιοχή της Αθήνας και έχουν διαστάσεις 4m x 3m x 3m. Απέναντι από τον τοίχο με το PCM υπάρχει υαλοπίνακας διαστάσεων 1.5m x 2m, από τον οποίο εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία.

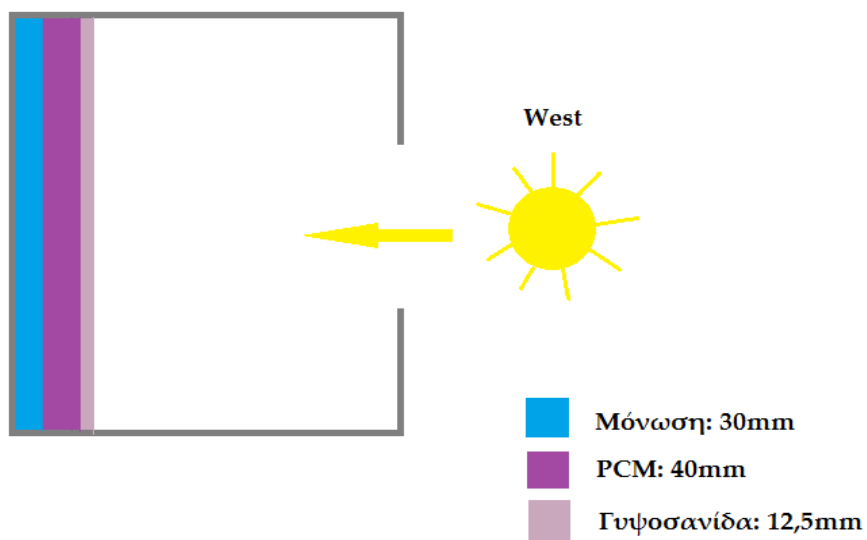


Σχήμα 5.3.1.1: Εξεταζόμενο δωμάτιο με PCM, νότιου προσανατολισμού

ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΙΧΩΝ ΜΕ ΣΤΡΩΜΑ PCM ΜΕΣΩ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ  
ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΩΝ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΑΥΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΣ



Σχήμα 5.3.1.2: Εξεταζόμενο δωμάτιο με PCM, ανατολικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.3.1.3: Εξεταζόμενο δωμάτιο με PCM, δυτικού προσανατολισμού

Για την σύγκριση των παραπάνω εξεταζόμενων δωματίων πραγματοποιούνται οι εξής παραδοχές:

- Στο εξωτερικό σημείο της μόνωσης υπάρχει αδιαβατικό όριο, που δεν επιτρέπει την συναλλαγή θερμότητας με το εξωτερικό περιβάλλον
- Η εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου θεωρείται σταθερή και ομοιόμορφη
- Η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης θεωρείται ομοιόμορφη
- Η κατάσταση θεωρείται μόνιμη, δηλαδή δεν υπάρχει περαιτέρω αλληλεπίδραση του στρώματος PCM με εξωτερικούς παράγοντες και η συναλλαγή θερμότητας υφίσταται αποκλειστικά μεταξύ του εσωτερικού αέρα και του στρώματος PCM, το οποίο φορτίζεται μέσω του υαλοπίνακα.

### **5.3.2 Υπολογισμός της θερμοκρασίας PCM, $T_{PCM}$ και σύγκριση μεταξύ νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού**

Για τη μελέτη γίνεται επιλογή ενός εμπορικού PCM, του RT20 της Rubitherm. Το πάχος που επιλέχθηκε είναι 40mm. Εξετάζεται η θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM σε ακτινοβολία που εισέρχεται από υαλοπίνακα νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού και πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ τους. Και για τις τρεις περιπτώσεις, η λειτουργία του PCM μελετάται για την 21<sup>η</sup> ημέρα Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου, Μαρτίου, Νοεμβρίου και Δεκεμβρίου, με σκοπό τη διερεύνηση της αποδοτικότητας του PCM την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα και του εκάστοτε προσανατολισμού.

Στον Πίνακα 5.3.2.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του RT20.

Πίνακας 5.3.2.1:Χαρακτηριστικά PCM	
H (kJ/kg)	132.1
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	820
T <sub>s</sub> (°C)	15
T <sub>l</sub> (°C)	26
T <sub>c</sub> (°C)	20,5
B	11
c <sub>p</sub> s (kJ/kg°C)	1900
c <sub>p</sub> l (kJ/kg°C)	2500

### Α. Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM

Ο ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM αποδίδεται από τη σχέση:

$$Q_{\text{απορροφούμενη}} = Q_{\text{ακτινοβολίας}} + Q_{\text{συναγωγής,αγωγής}} \quad (5.3.2.1)$$

Η μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM σε σχέση με το χρόνο στο 24ωρο, εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται από τον υαλοπίνακα, τη συναλλαγή θερμότητας με συναγωγή με τον εσωτερικό αέρα και τη γυψοσανίδα, καθώς επίσης με τη μάζα και τη θερμοχωρητικότητα του PCM.

- Υπολογισμός απορροφούμενης ενέργειας

Απορροφούμενη ενέργεια είναι η ενέργεια που απορροφάται από το στρώμα PCM και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{\text{απορροφούμενη}} = M_{\text{PCM}} * c_{p\text{eff}} * (T_{\text{PCM}} - T_{\text{PCM}}^0) \quad (5.3.2.2)$$

- $T_{\text{PCM}}^0$  : η θερμοκρασία του PCM την χρονική στιγμή t
- $T_{\text{PCM}}$  : η θερμοκρασία του PCM την χρονική στιγμή t+Δt
- $M_{\text{PCM}}$  : η μάζα του επιλεγμένου PCM
- $c_{p\text{eff}}$  : η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM

• **Υπολογισμός της μάζας PCM**

Η μάζα του PCM,  $M_{PCM}$ , θεωρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της μελέτης και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας και μπορεί να προσεγγιστεί με την εξής σχέση:

$$M_{PCM} = \rho_{PCM} * V_{PCM} \quad (5.3.2.3)$$

- $\rho_{PCM}$ : η πυκνότητα του PCM
- $V_{PCM}$ : ο όγκος του PCM

$$V_{PCM} = (\text{ύψος τοίχου}) * (\text{πλάτος τοίχου}) * (\text{πάχος PCM}) \quad (5.3.2.4)$$

• **Υπολογισμός ενεργού θερμοχωρητικότητας,  $C_{p,eff}$**

Για τον υπολογισμό της ενεργού θερμοχωρητικότητας θα χρησιμοποιηθεί η τριγωνική συνάρτηση ως εξής: [3]

$$C_{p,eff}(T) = \frac{4 * (H - b * C_{ps}) * (T - T_s)}{b^2} + C_{ps}, \quad \text{για } T_s \leq T \leq T_c \quad (5.3.2.5)$$

$$C_{p,eff}(T) = \frac{4 * (b * C_{pl} - H) * (T - T_s - \frac{b}{2})}{b^2} + \frac{2 * H}{b} - C_{pl}, \quad \text{για } T_c \leq T \leq T_l \quad (5.3.2.6)$$

- $C_{pl}$ : θερμοχωρητικότητα του υγρού PCM
- $C_{ps}$ : θερμοχωρητικότητα του στερεού PCM
- $T_s$ : θερμοκρασία του στερεού PCM
- $T_l$ : θερμοκρασία του υγρού PCM
- $b = (T_l - T_s)$ : εύρος θερμοκρασιών
- $T_c = \frac{T_l + T_s}{2}$ : το μέσον του εύρους θερμοκρασιών
- $H$ : η θερμότητα αλλαγής φάσης

• **Υπολογισμός ενέργειας λόγω συναγωγής και αγωγής**

Πρόκειται για την θερμότητα που προσφέρει το σώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου και στο στρώμα της γυψοσανίδας και αποδίδεται με την παρακάτω σχέση:

$$Q_{\text{συναγωγής,αγωγής}} = 3600 * A_{\text{τοίχου}} * U_1 * (T_{in} - T_{PCM}^0) \quad (5.3.2.7)$$

- $U_1 = \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{l_f}{k_f}\right)^{-1}$ , συντελεστής διαπερατότητας
- $h_{in}=8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω συναγωγής με τον εσωτερικό αέρα
- $l_f=12,5\text{mm}$ , πάχος γυψοσανίδας
- $k_f = \frac{0,21\text{W}}{\text{m}}\text{°C}$ , συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας γυψοσανίδας
- $A_{\text{τοίχου}} = (\text{πλάτος τοίχου}) \times (\text{ύψος τοίχου})$
- $T_{in}=20\text{°C}$

- Υπολογισμός ενέργειας λόγω ακτινοβολίας

Πρόκειται για την θερμότητα που δέχεται το στρώμα PCM λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας.

$$Q_{\text{ακτινοβολίας}} = 0,9 \cdot 3600 \cdot G_T \cdot A_{\text{υαλοπίνακα}} \quad (5.3.2.8)$$

- $A_{\text{υαλοπίνακα}} = (\text{πλάτος υαλοπίνακα}) \times (\text{ύψος υαλοπίνακα})$
- $G_T$ : η προσπίπτουσα στον τοίχο μέση στιγμιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία, όπως προέκυψε από την ενότητα 5.1

Λόγω του ότι ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από τον υαλοπίνακα και από τον εσωτερικό αέρα του δωματίου, έχει ως αποτέλεσμα να λαμβάνεται ένα ποσοστό της τάξης του 90% ότι προσπίπτει στον τοίχο μελέτης και κατ' επέκταση στο στρώμα του PCM.

## B. Υπολογισμός της θερμοκρασίας του PCM

Με βάση τον ισολογισμό ενέργειας που πραγματοποιήθηκε παραπάνω (σχέσεις 5.3.2.1-5.3.2.8), η θερμοκρασία που αναπτύσσει το στρώμα PCM για τους τρεις προσανατολισμούς προκύπτει ως εξής:

$$T_{\text{PCM}} = T_{\text{PCM}}^0 + \frac{3600 \cdot 0,9 \cdot G_T \cdot A_{\text{υαλοπίνακα}} + 3600 \cdot A_{\text{τοίχου}} \cdot U_1 \cdot (T_{in} - T_{\text{PCM}}^0)}{M_{\text{PCM}} \cdot c_{p,\text{eff}}(T)} \quad (5.3.2.9)$$

Η διαφορά μεταξύ των τριών προσανατολισμών έγκειται στη διαφορετική ολική ηλιακή ακτινοβολία  $G_T$  για τον κάθε έναν (ενότητα 5.1), οπότε και προκύπτει η θερμοκρασία του PCM.



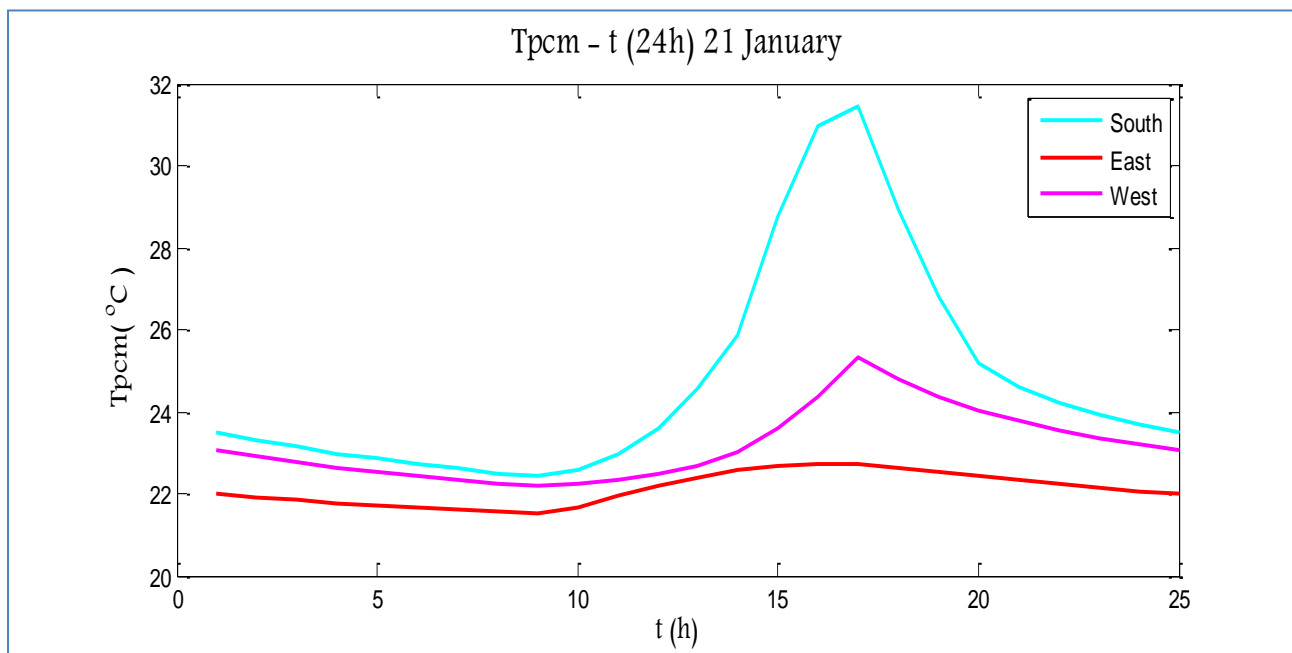
Η θερμοκρασία του PCM υπολογίζεται για ένα 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα, από τη 1:00 έως τις 00:00, με βήμα μίας ώρας.

Καθώς η θερμοκρασία του PCM στην αρχή των υπολογισμών είναι άγνωστη, λαμβάνεται αυθαίρετα μια τιμή και στη συνέχεια ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία έως ότου οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται το 24ωρο να συγκλίνουν με εκείνες της προηγούμενης επανάληψης.

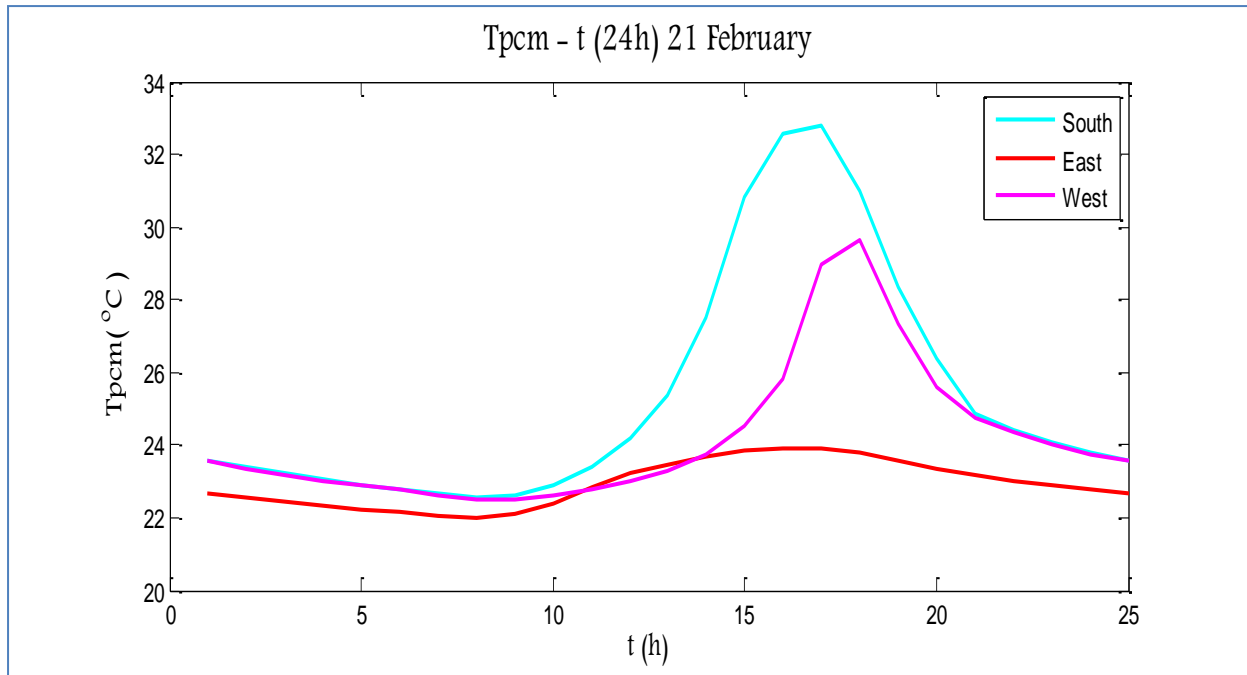
Η επανάληψη σε κάθε μήνα ξεκινάει με την τιμή  $T_{PCM}=22^{\circ}\text{C}$  στη 1:00 και υπολογίζεται η θερμοκρασία του PCM όλο το 24ωρο. Η διαδικασία συνεχίζεται λαμβάνοντας στη νέα επανάληψη την τιμή της  $T_{PCM}$  που υπολογίστηκε στις 00:00 από την προηγούμενη. Καταλήγοντας στο σημείο όπου οι θερμοκρασίες της προηγούμενης επανάληψης συγκλίνουν με αυτές της επόμενης.

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η θερμοκρασία του PCM συναρτήσει του χρόνου που υπολογίστηκε το 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας των μηνών Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό σε κοινό διάγραμμα, ώστε να είναι περισσότερο εφικτή η σύγκρισή τους.

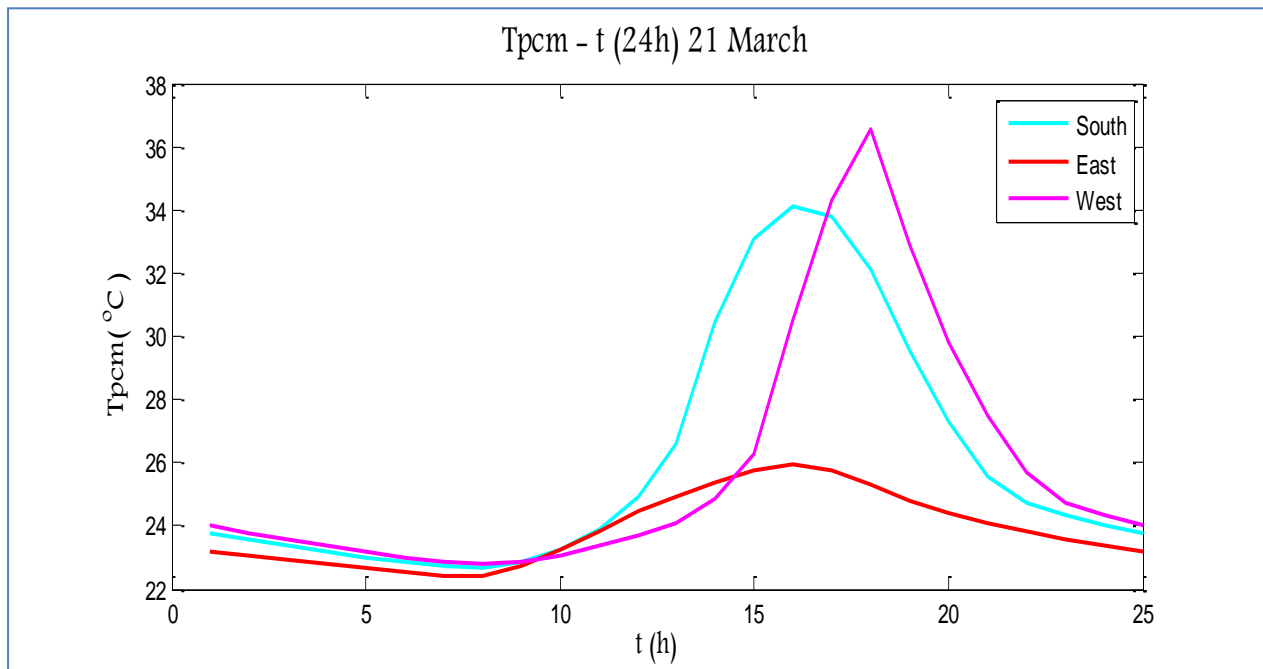
Το πάχος του PCM στη συγκεκριμένη μελέτη είναι 40mm.



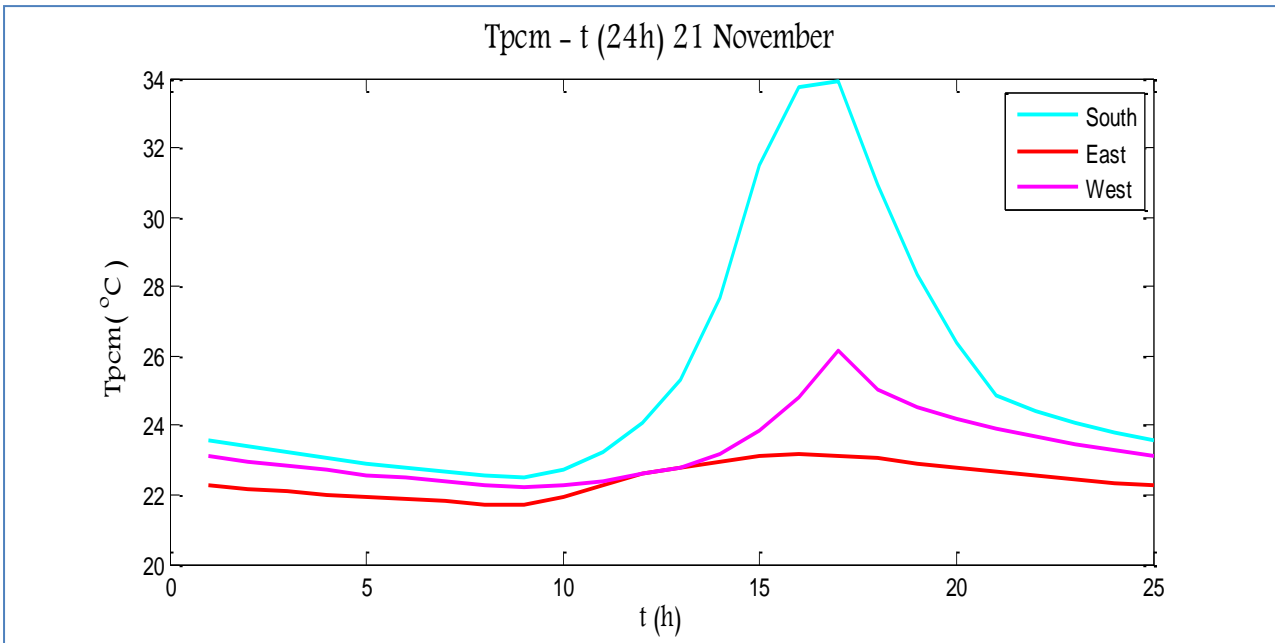
**Σχήμα 5.3.2.1:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου



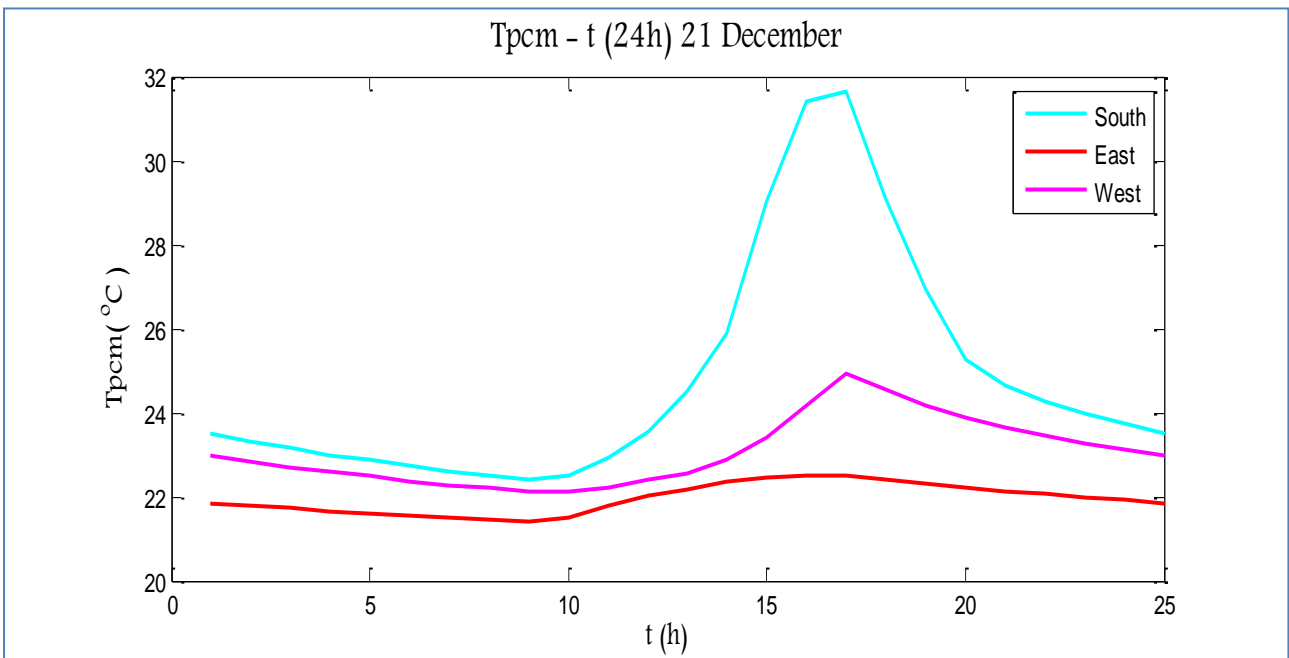
Σχήμα 5.3.2.2: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου



Σχήμα 5.3.2.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου



Σχήμα 5.3.2.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου



Σχήμα 5.3.2.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Το PCM, από τη θερμότητα που δέχεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, χρησιμοποιεί μέρος της για να αλλάξει φάση. Αυτό σημαίνει ότι το PCM θα εμφανίζει χαμηλότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας από ένα σύνηθες δομικό υλικό, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5.2.2.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το PCM δέχεται την προσπίπτουσα ακτινοβολία αυξάνοντας τη θερμοκρασία του και αλλάζοντας φάση, ενώ αντίθετα κατά τη διάρκεια της νύχτας η θερμοκρασία του μειώνεται, εφόσον προσδίδει τη θερμότητά του στο δωμάτιο. Τους χειμερινούς μήνες που μελετήθηκε η απόδοση του PCM, διαπιστώνεται ότι αλλάζει φάση απ' το γεγονός ότι η θερμοκρασία του είναι υψηλότερη της  $T_c=20.5^{\circ}\text{C}$ , η οποία είναι το μέσο του εύρος θερμοκρασιών της υγρής και στερεής φάσης.

Από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν, διαπιστώνεται ότι το στρώμα PCM απέναντι από υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού παρουσιάζει υψηλότερες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες, από ότι δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι πιο έντονη στο νότο, σε σχέση με τους άλλους δύο προσανατολισμούς, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.1. Το ίδιο ισχύει και μεταξύ ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, με το στρώμα του PCM έναντι υαλοπίνακα τοποθετημένο στη δύση να εμφανίζει υψηλότερες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες σε σχέση με τον ανατολικό προσανατολισμό, εφόσον η ακτινοβολία στη δύση είναι υψηλότερη.

Παρατηρείται, επίσης, και μεταβολή στην ώρα των μεγίστων θερμοκρασιών μεταξύ των τριών προσανατολισμών, με τον ανατολικό να προηγείται και να ακολουθεί του νότιου και έπειτα του δυτικού. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με το γεγονός ότι η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ανατολή είναι τις πρωινές ώρες, στις 10:00 περίπου, στο νότο είναι κοντά στη 13:00, ενώ στη δύση παρουσιάζεται περίπου στις 16:00, όπως προκύπτουν από τους πίνακες της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου.

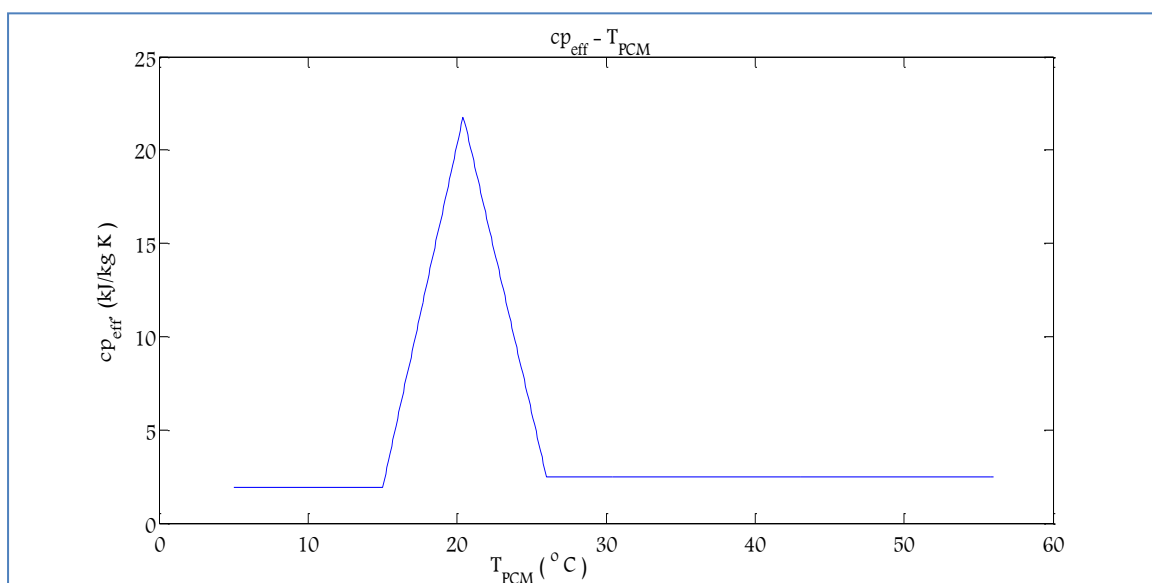
Τέλος, το μήνα Μάρτιο, το στρώμα PCM έναντι δυτικού υαλοπίνακα παρουσιάζει υψηλότερη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία έναντι του στρώματος νότιου υαλοπίνακα. Αυτό συμβαίνει διότι, καθώς

καλοκαιριάζει η ηλιακή ακτινοβολία στη δύση είναι εντονότερη σε σχέση με τον νότο, στον οποίο παρουσιάζει καμπή.

### Κ. Προσομοίωση της αλλαγής φάσης

Η ειδική θερμοχωρητικότητα του PCM, κατά την διάρκεια αλλαγής φάσης, μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας που αναπτύσσει το PCM. Για την προσομοίωση της αλλαγής φάσης, επιλέγεται η τριγωνική μορφή της μεθόδου της ενεργούς θερμοχωρητικότητας.

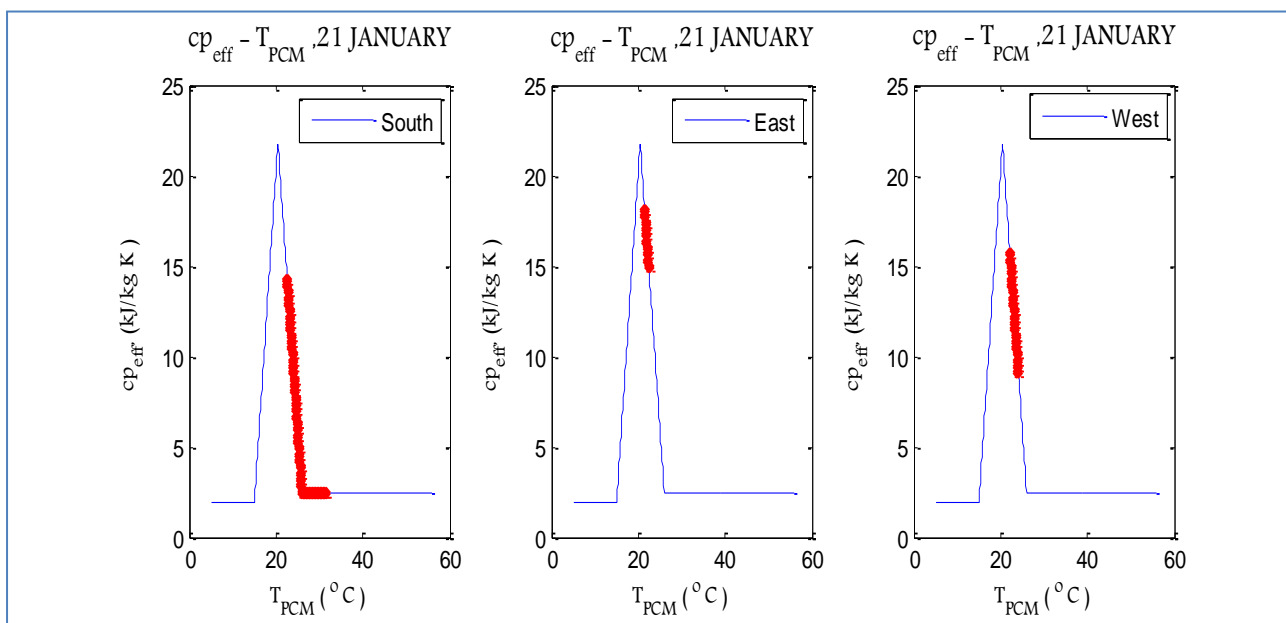
Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (5.3.2.5) και (5.3.2.6) καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά του PCM, RT20, τα οποία παρουσιάστηκαν στον πίνακα (5.3.2.1) προκύπτει η καμπύλη της ειδικής θερμοχωρητικότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.



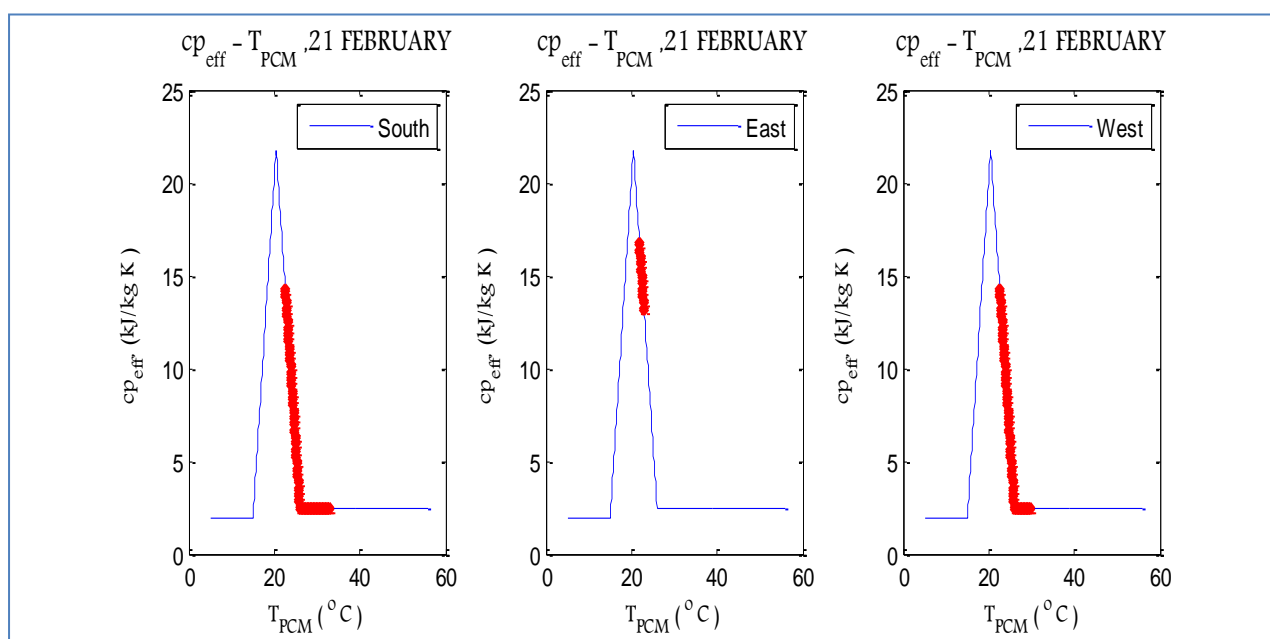
**Σχήμα 5.3.2.6:** Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM, συναρτήσει της θερμοκρασίας

Για να είναι το PCM αποδοτικό, θα πρέπει να καλύπτει το εύρος της διφασικής περιοχής. Κάτι τέτοιο είναι δύσκολο να επιτευχθεί, καθώς χρειάζεται συνδυασμός πολλών παραμέτρων για να είναι αποδοτικό το PCM κάποιους μήνες, πόσο μάλλον καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

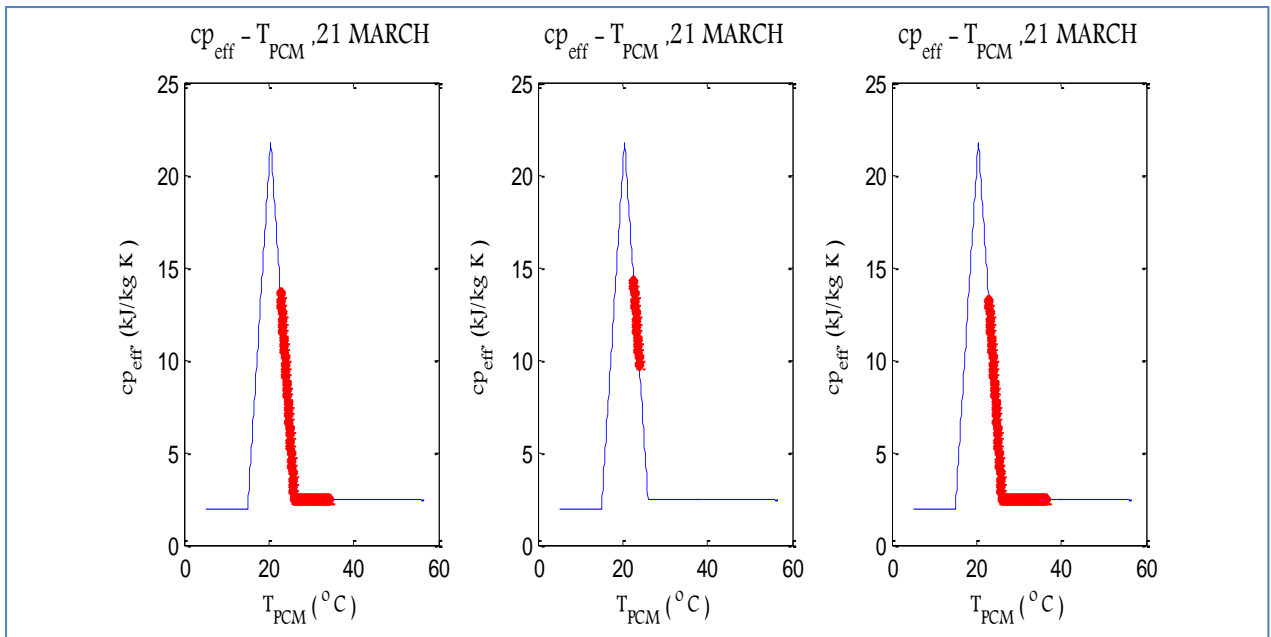
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται το τμήμα της καμπύλης ενεργού θερμοχωρητικότητας που καταλαμβάνει το PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό, την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών, λαμβάνοντας υπόψη το εύρος θερμοκρασιών που αναπτύσσει το PCM και τις τιμές της ενεργού θερμοχωρητικότητας.



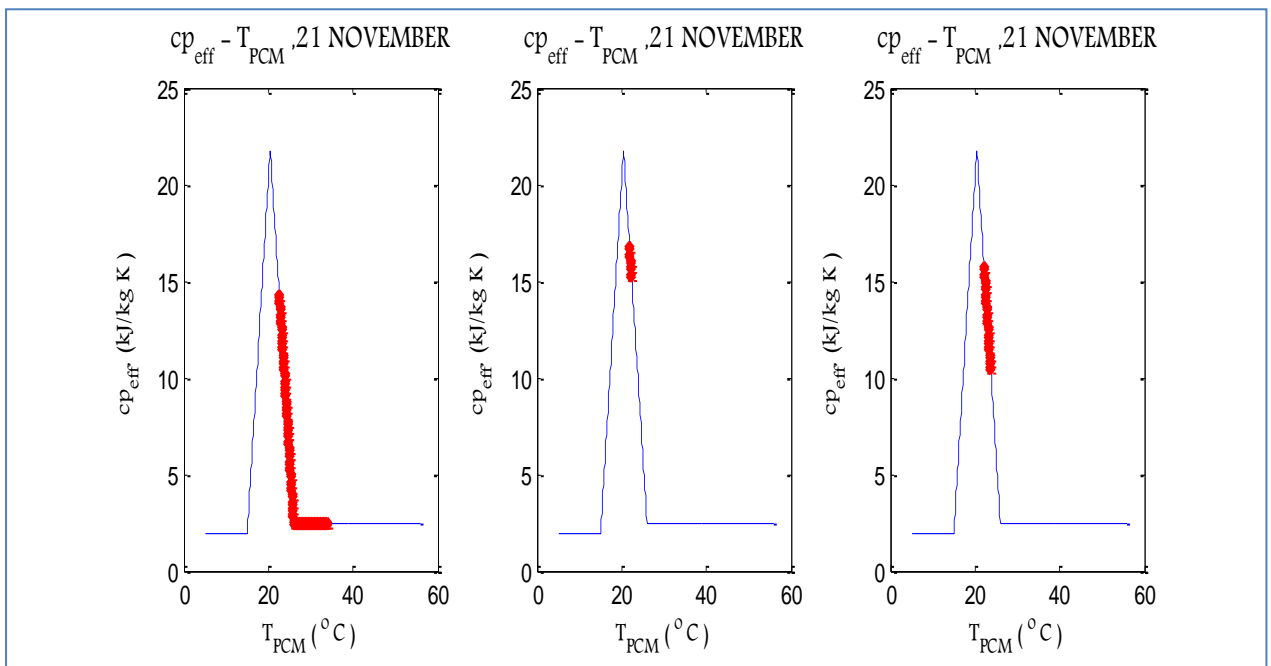
**Σχήμα 5.3.2.7:** Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό



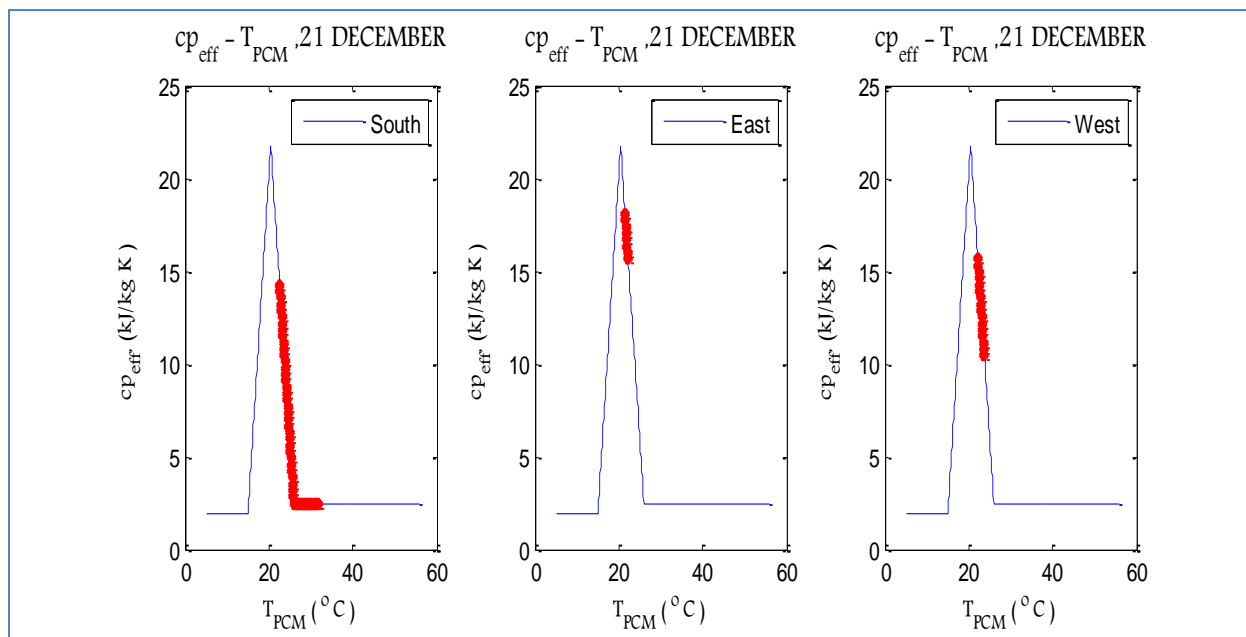
**Σχήμα 5.3.2.8:** Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.3.2.9: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.3.2.10: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.3.2.11: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τα διαγράμματα της ενεργού θερμοχωρητικότητας συμπεραίνεται ότι το PCM, στους εξεταζόμενους μήνες, αλλάζει φάση καθώς οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει βρίσκονται στη διφασική περιοχή.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα μεταξύ των τριών προσανατολισμών διαπιστώνεται ότι το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού καλύπτει μεγαλύτερο τμήμα της καμπύλης ενεργού θερμοχωρητικότητας, σε σχέση με ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό. Ακολουθεί το στρώμα PCM έναντι δυτικού υαλοπίνακα και τέλος αυτό έναντι ανατολικού. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το εμβαδόν κάτω από τη καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας δίνει τη θερμότητα που αποθηκεύεται στο PCM, προκύπτει ότι το PCM έναντι νότιου υαλοπίνακα είναι περισσότερο αποδοτικό, σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις.

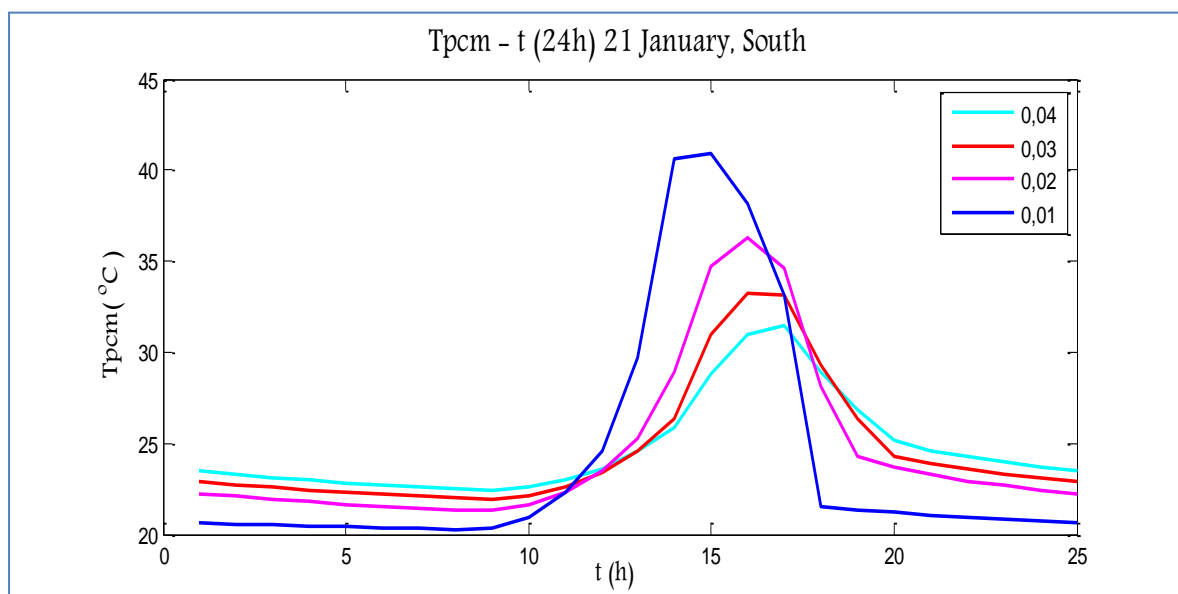


### 5.3.3 Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος PCM, για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό

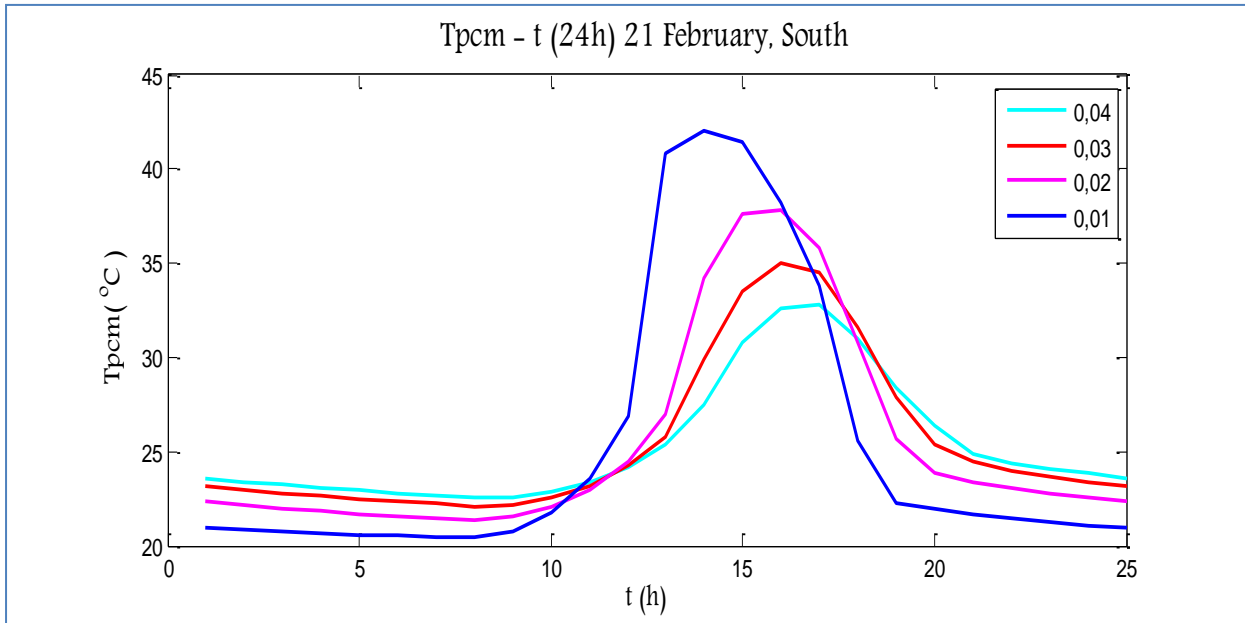
Προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά του PCM όσο αναφορά το πάχος του, πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη μελέτη. Οι εξεταζόμενες περιπτώσεις αφορούν το αρχικό πάχος των 40mm, το οποίο συγκρίνεται με στρώματα PCM πάχους 30mm, 20mm και 10mm για την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό.

Τα εξεταζόμενα πάχη στα παρακάτω διαγράμματα αναφέρονται σε μέτρα, όπως έχουν δοθεί και στις εξισώσεις. Η διαδικασία που ακολουθείται για κάθε πάχος είναι ίδια όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.3.2.

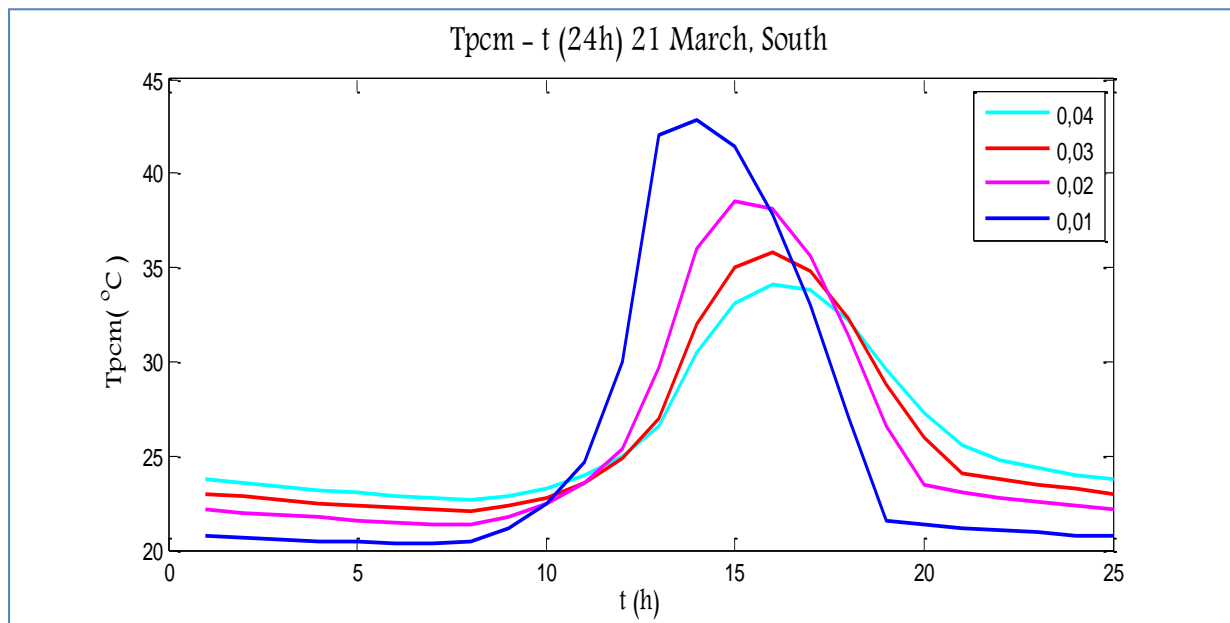
#### Α. Στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού



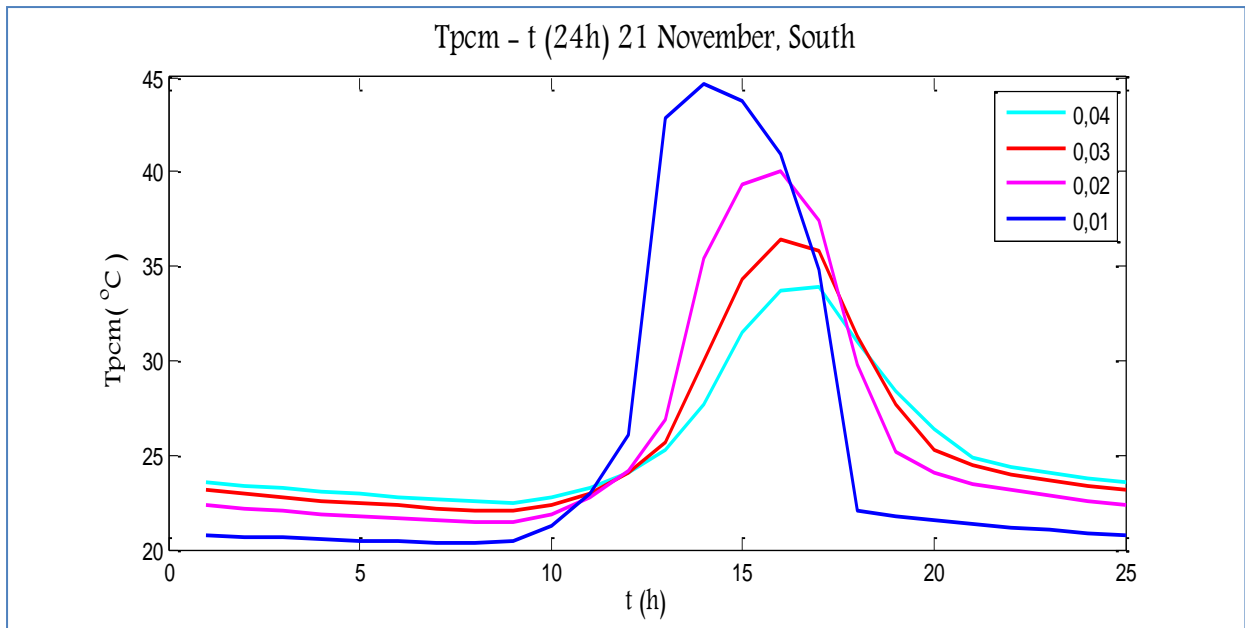
**Σχήμα 5.3.3.1:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, για ένα 24ωρο, για νότιο προσανατολισμό



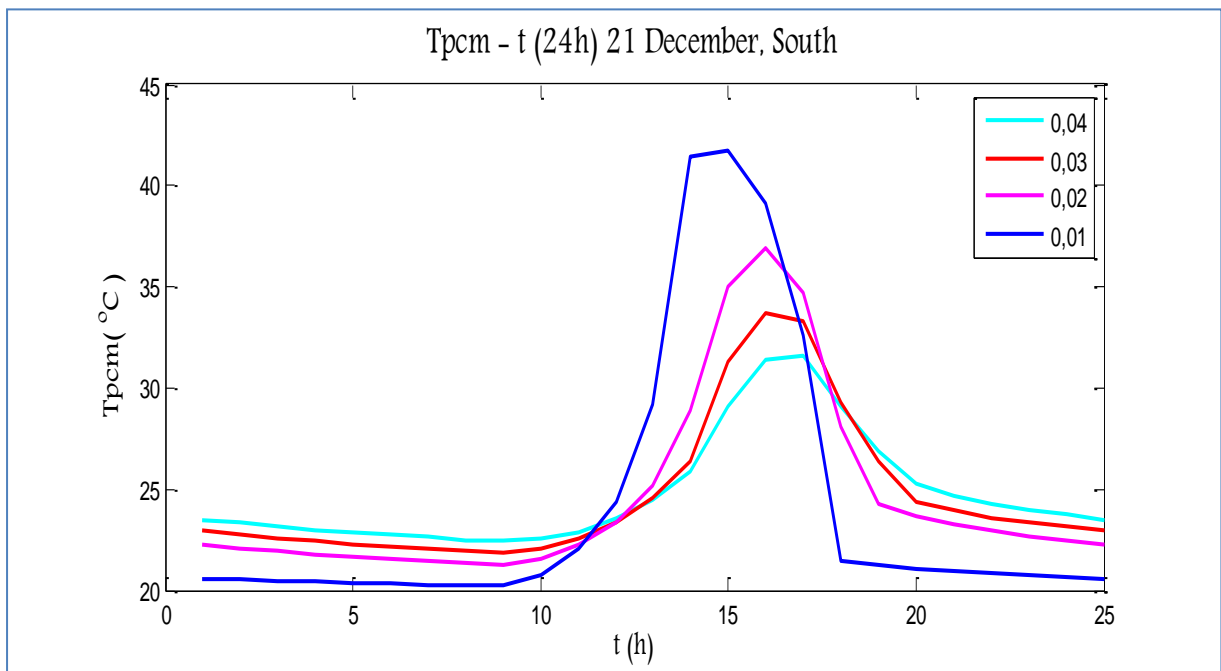
Σχήμα 5.3.3.2: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου, για ένα 24ωρο, για νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 5.3.3.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου, για ένα 24ωρο, για νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 5.3.3.4:Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου, για ένα 24ωρο, για νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 5.3.3.5:Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου, για ένα 24ωρο, για νότιο προσανατολισμό

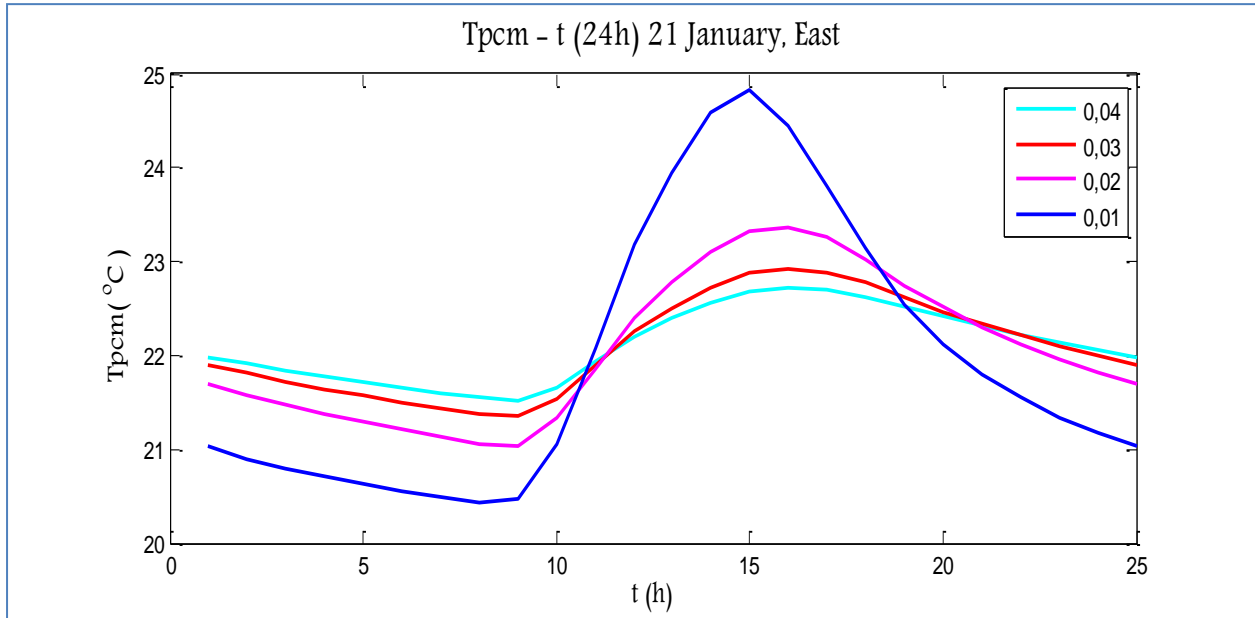
## **ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ**

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5.2.3, από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν παρατηρείται η επίδραση της αλλαγής πάχους του στρώματος PCM στη θερμοκρασία που αναπτύσσει. Έτσι, όσο μικρότερο είναι το πάχος του PCM τόσο υψηλότερες θερμοκρασίες αναπτύσσει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό αιτιολογείται, αν ληφθεί υπόψη η σχέση (5.3.2.9), όπου όσο αυξάνεται το πάχος του PCM και κατά συνέπεια η μάζα του, τόσο μειώνεται η θερμοκρασία που αναπτύσσει.

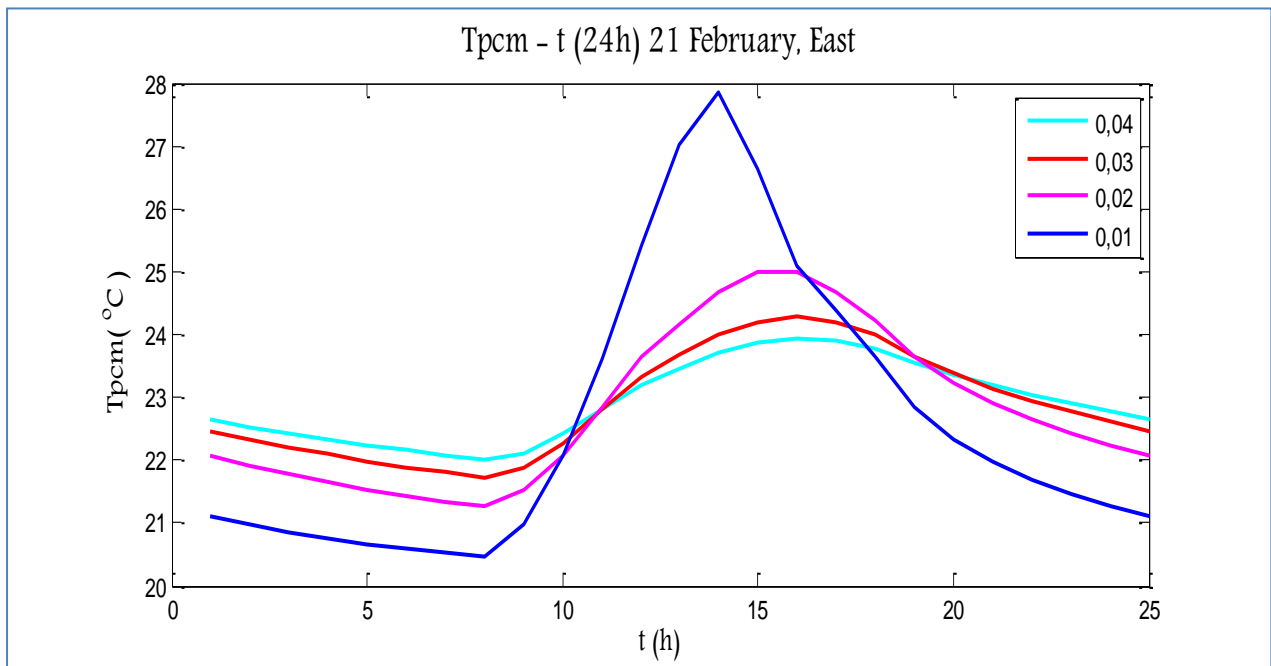
Το γεγονός ότι όσο μειώνεται το πάχος του PCM μειώνονται και οι ελάχιστες θερμοκρασίες, εξηγείται στο ότι το PCM με μειωμένο πάχος αποθηκεύει λιγότερη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας, με συνέπεια να εξαντλείται περισσότερο κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Τέλος, όσο μειώνεται το πάχος του PCM τόσο πιο άμεσα αποκτά τη μέγιστη θερμοκρασία του. Αυτό συμβαίνει διότι όσο αυξάνεται το πάχος, το PCM έχει μεγαλύτερα περιθώρια αποθήκευσης θερμότητας, με αποτέλεσμα η μέγιστη θερμοκρασία να καθυστερεί κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι, υπάρχουν και οι ακραίες μεταβολές θερμοκρασίας όσο μικρότερο είναι το πάχος του PCM, τόσο στην αρχή της φόρτισής του, όσο και κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης.

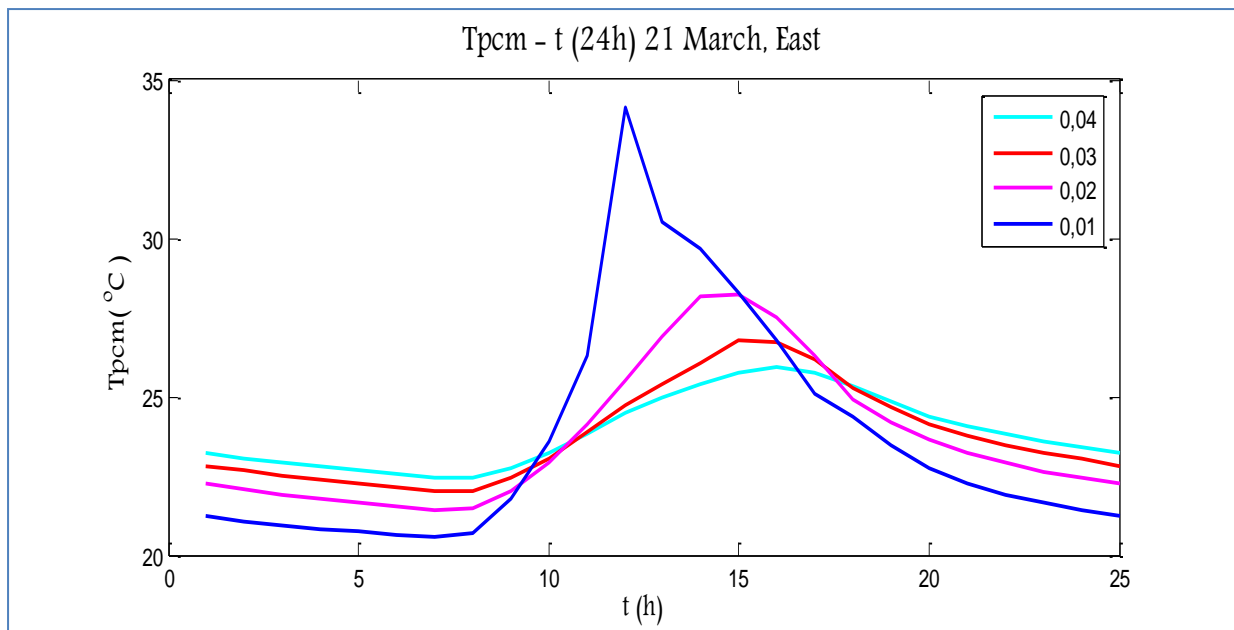
**Β. Στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού**



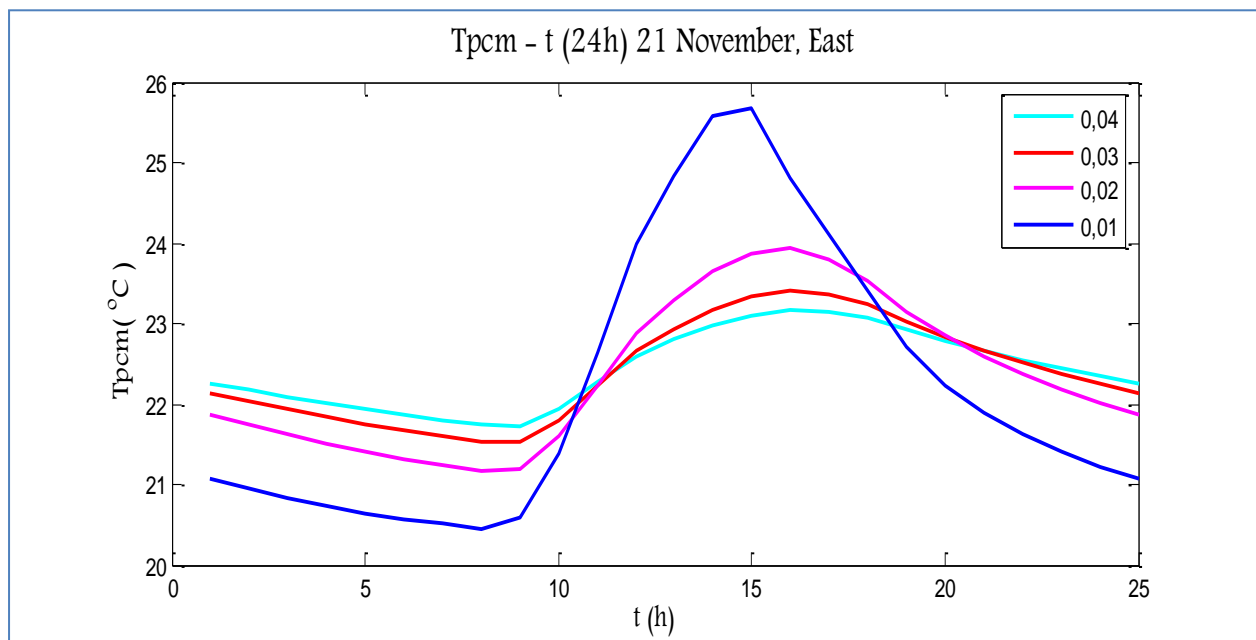
**Σχήμα 5.3.3.6:**Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, της 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, για το 24ωρο, για ανατολικό προσανατολισμό



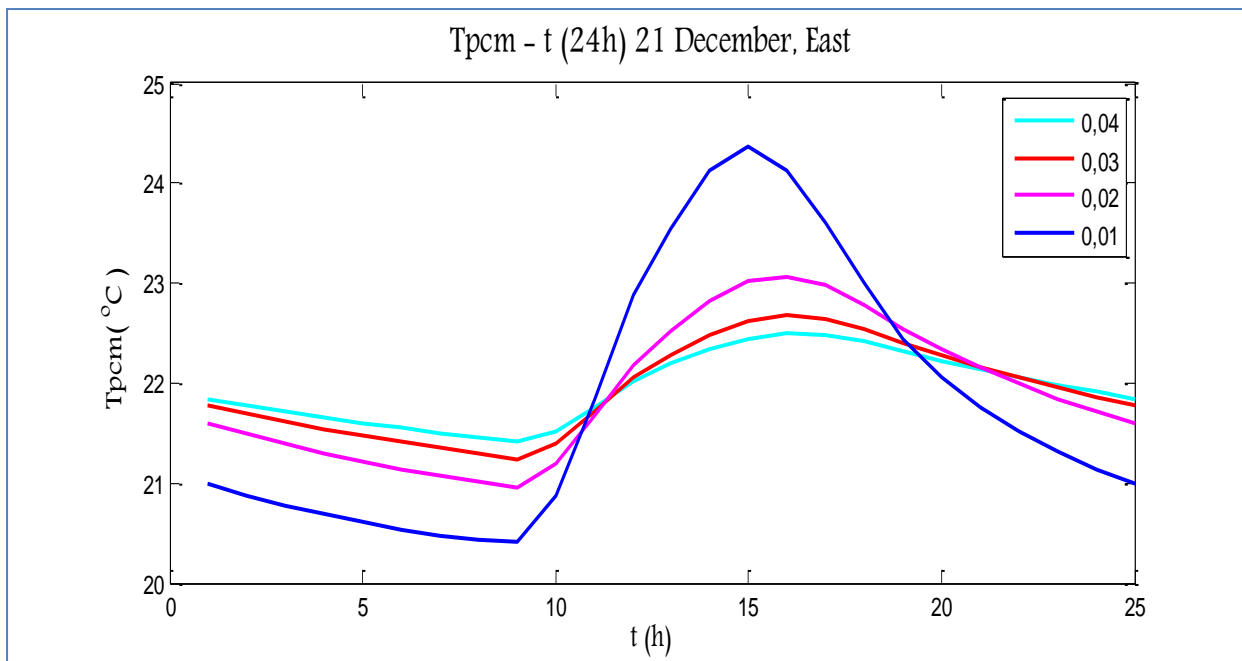
**Σχήμα 5.3.3.7:**Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, της 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου, για το 24ωρο, για ανατολικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.3.3.8:Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, της 21<sup>η</sup> Μαρτίου, για το 24ωρο, για ανατολικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.3.3.9:Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, της 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου, για το 24ωρο, για ανατολικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.3.3.10: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, της 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου, για το 24ωρο, για ανατολικό προσανατολισμό

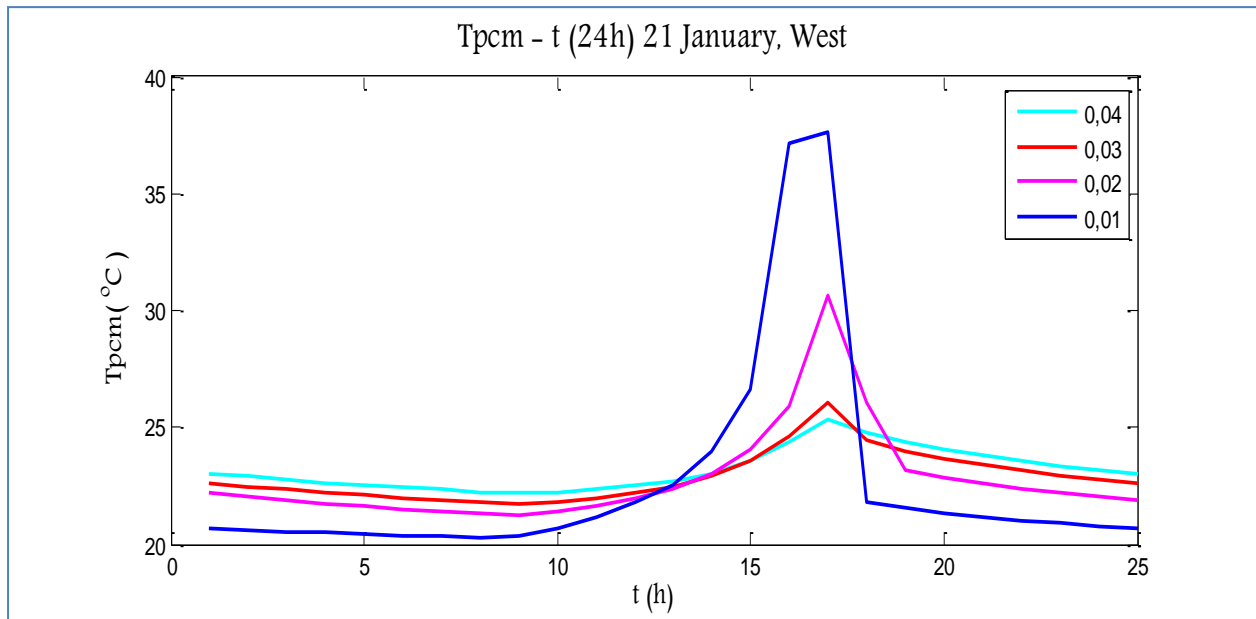
## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Όσον αφορά την επίδραση του πάχους στρώματος PCM έναντι υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού ισχύει ότι και στην περίπτωση νότιου προσανατολισμού. Δηλαδή όσο μειώνεται το πάχος του PCM τόσο αυξάνονται οι μέγιστες και μειώνονται οι ελάχιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσει κατά τη διάρκεια του 24ωρου.

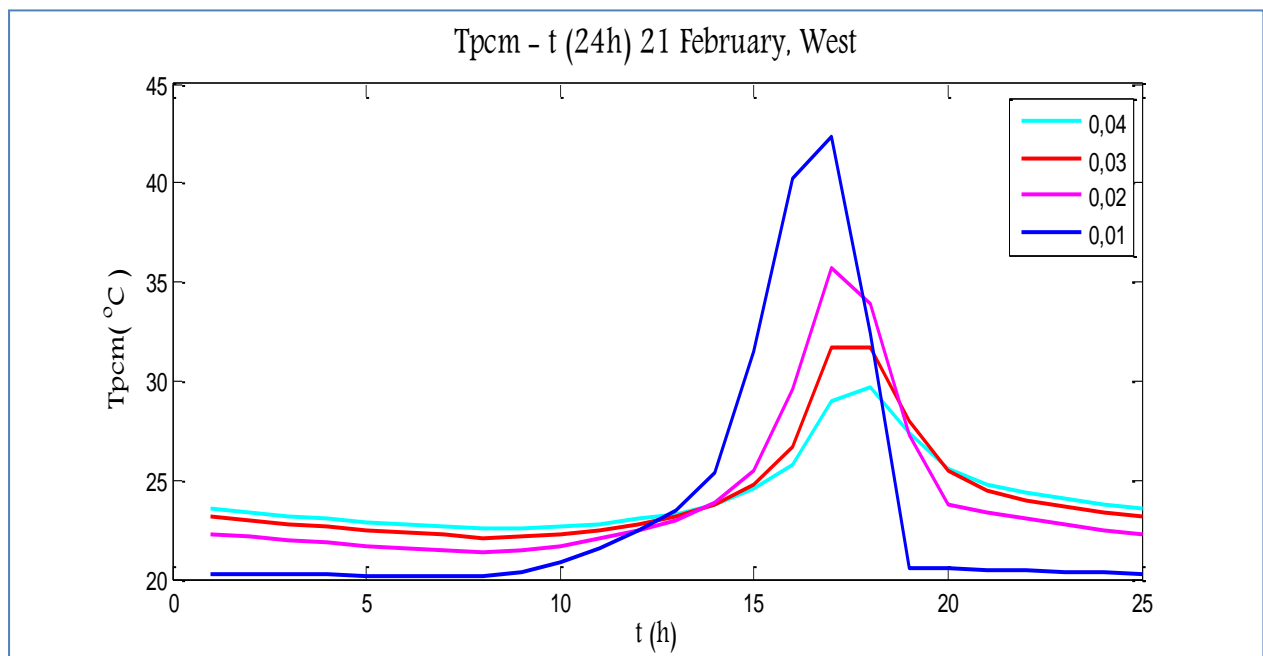
Σε σχέση με τα διαγράμματα του νότιου προσανατολισμού, οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στη παρούσα μελέτη είναι αισθητά μικρότερες. Αυτό συμβαίνει διότι η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην ανατολή είναι μικρότερη σε σχέση με του νότου (ενότητα 5.1).

Επισημαίνεται, επίσης, ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες στην περίπτωση ανατολικού προσανατολισμού εμφανίζονται νωρίτερα στη διάρκεια της ημέρας, σε σχέση με αυτές του νότιου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η έντονη ηλιακή ακτινοβολία στην ανατολή είναι εντονότερη τις πρωινές ώρες, ενώ του νότιου προσανατολισμού υπολογίζεται περίπου στη 13:00 και για αυτό το λόγο παρατηρείται αυτή η διαφορά.

### Κ. Στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού

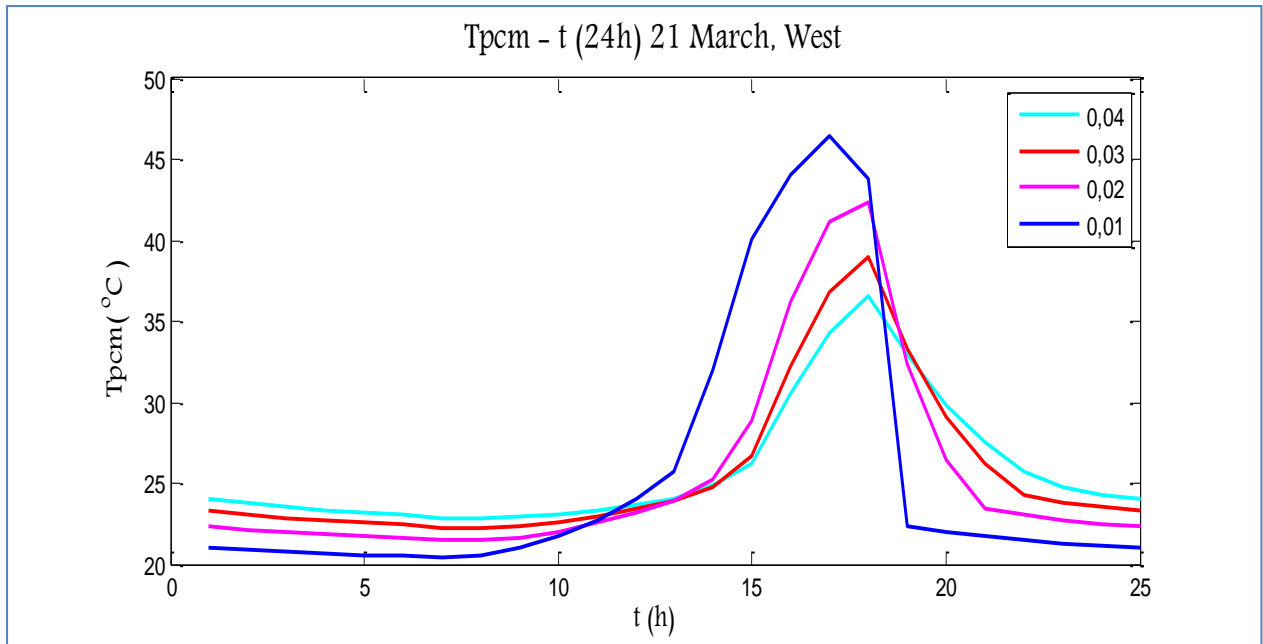


Σχήμα 5.3.3.11: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, της 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, για το 24ωρο, για δυτικό προσανατολισμό

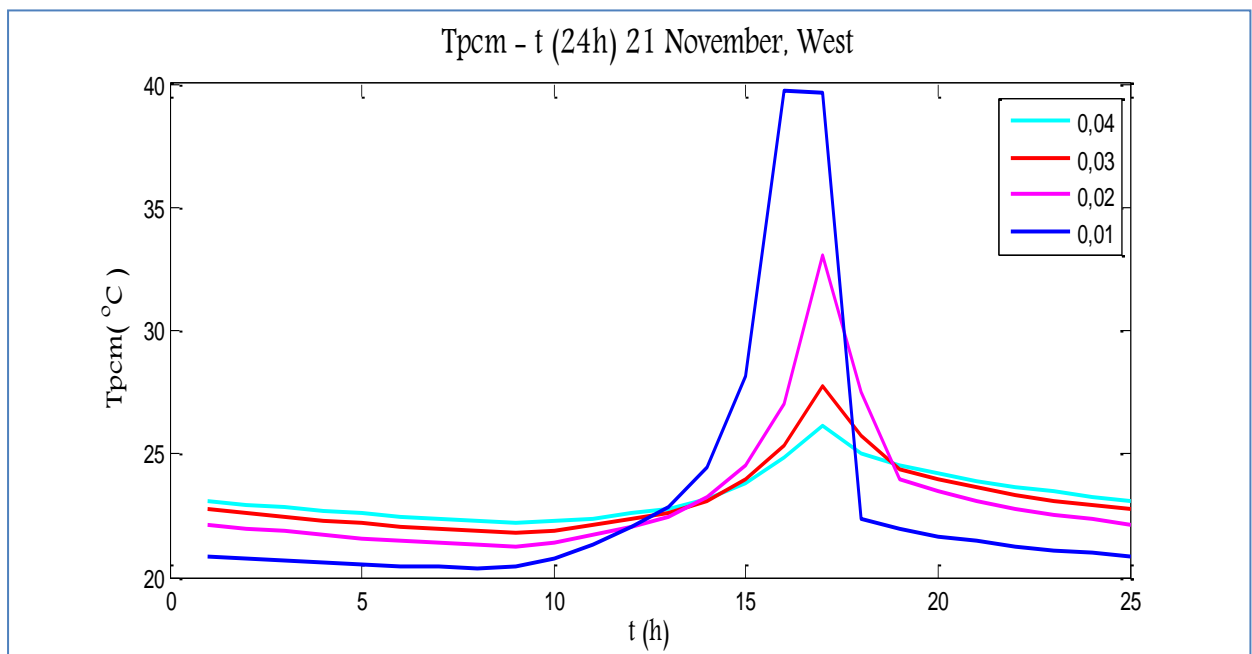


Σχήμα 5.3.3.12: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, της 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου, για το 24ωρο, για δυτικό προσανατολισμό

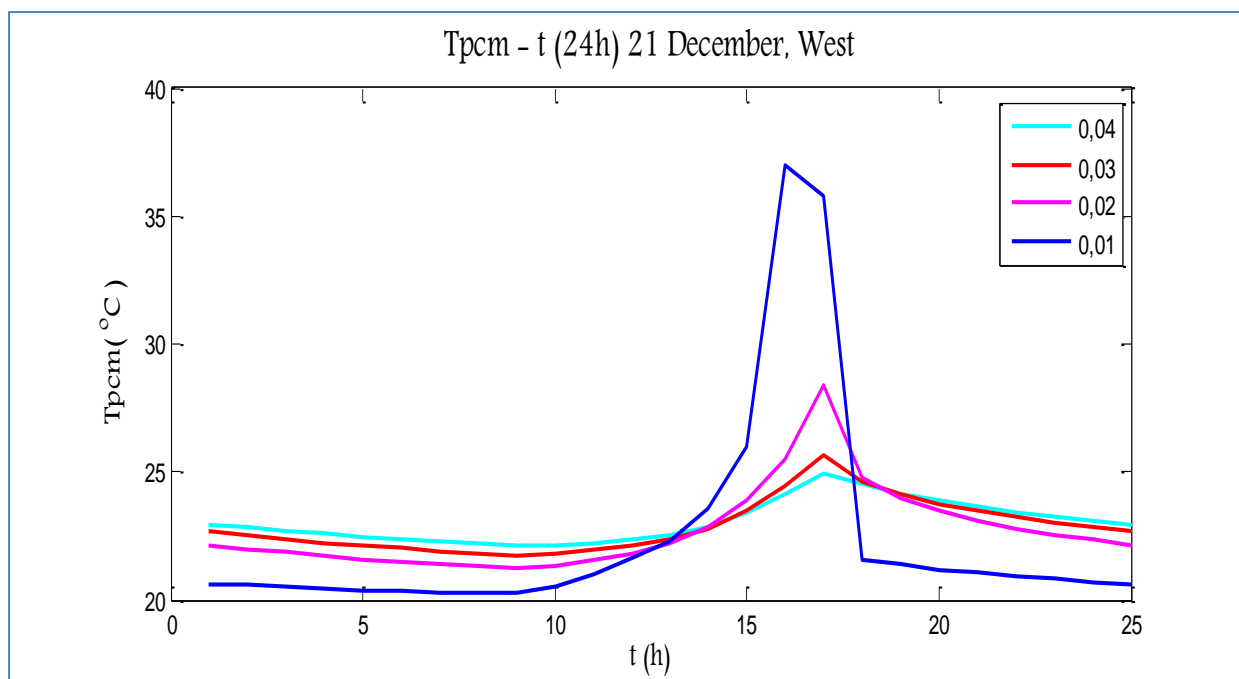




Σχήμα 5.3.3.13:Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, της 21<sup>η</sup> Μαρτίου, για το 24ωρο, για δυτικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.3.3.14:Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, της 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου, για το 24ωρο, για δυτικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.3.3.15: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, ανάλογα με το πάχος, της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου, για το 24ωρο, για δυτικό προσανατολισμό

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις (5.3.3-A και 5.3.3-B) παρατηρείται ότι η επίδραση του πάχους του στρώματος PCM δυτικού προσανατολισμού έχει αποτέλεσμα με τη μείωση του πάχους να αυξάνονται οι μέγιστες θερμοκρασίες και να μειώνονται οι ελάχιστες.

Σε σχέση με τους άλλους δύο προσανατολισμούς, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο δυτικό προσανατολισμό είναι μικρότερες από ότι στο νότιο, εκτός από τον Μάρτιο, και υψηλότερες από ότι στον ανατολικό. Αυτό οφείλεται στο ότι η ηλιακή ακτινοβολία στη δύση είναι χαμηλότερη σε σχέση με αυτή του νότου, εκτός απ' τον Μάρτιο στον οποίο είναι εντονότερη, ενώ είναι υψηλότερη σε σχέση με την ανατολή.

Τέλος, παρατηρείται καθυστέρηση στην εμφάνιση των μέγιστων θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της ημέρας στη παρούσα μελέτη σε σχέση με τους άλλους δύο προσανατολισμούς. Σ' αυτό συμβάλλει η εμφάνιση της έντονης ηλιακής ακτινοβολίας στη δύση κατά τις 16:00, που μετατοπίζει τις μέγιστες θερμοκρασίες στο δυτικό προσανατολισμό αργότερα σε σχέση με τις προηγούμενες μελέτες.

### 5.3.4 Παραμετρική μελέτη ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό

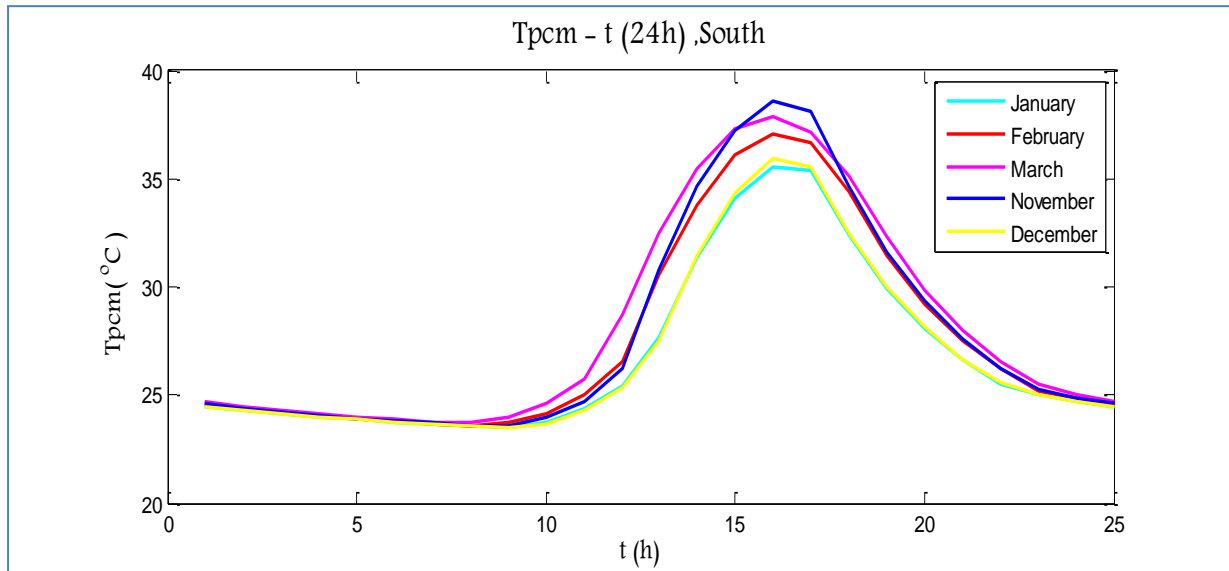
Στη παρούσα μελέτη θα γίνει έλεγχος της επίδρασης της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου στις θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM. Πραγματοποιείται αλλάζοντας τη εσωτερική θερμοκρασία, η οποία είναι  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  στις προηγούμενες μελέτες, αρχικά αυξάνοντάς την σε  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$  και στη συνέχεια μειώνοντάς την σε  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ . Οι θερμοκρασίες του PCM προκύπτουν και στις δύο περιπτώσεις για την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια με αυτή της μελέτης στην ενότητα 5.3.2, με αλλαγή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου στη σχέση (5.3.2.9) και πραγματοποίηση επαναληπτικής διαδικασίας, ώστε να προκύψουν οι νέες θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM κατά τη διάρκεια του 24ωρου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό.

Το πάχος του εξεταζόμενου PCM είναι 40mm και οι μήνες μελέτης είναι Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος, Νοέμβριος και Δεκέμβριος όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

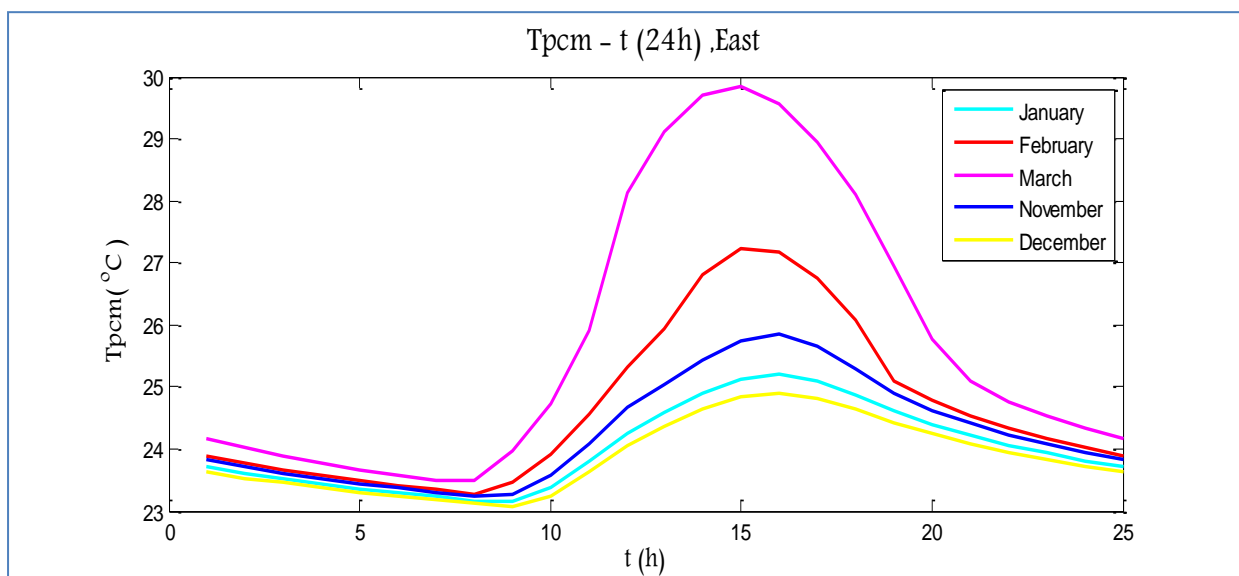
**A. Εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό**

• Νότιος προσανατολισμός



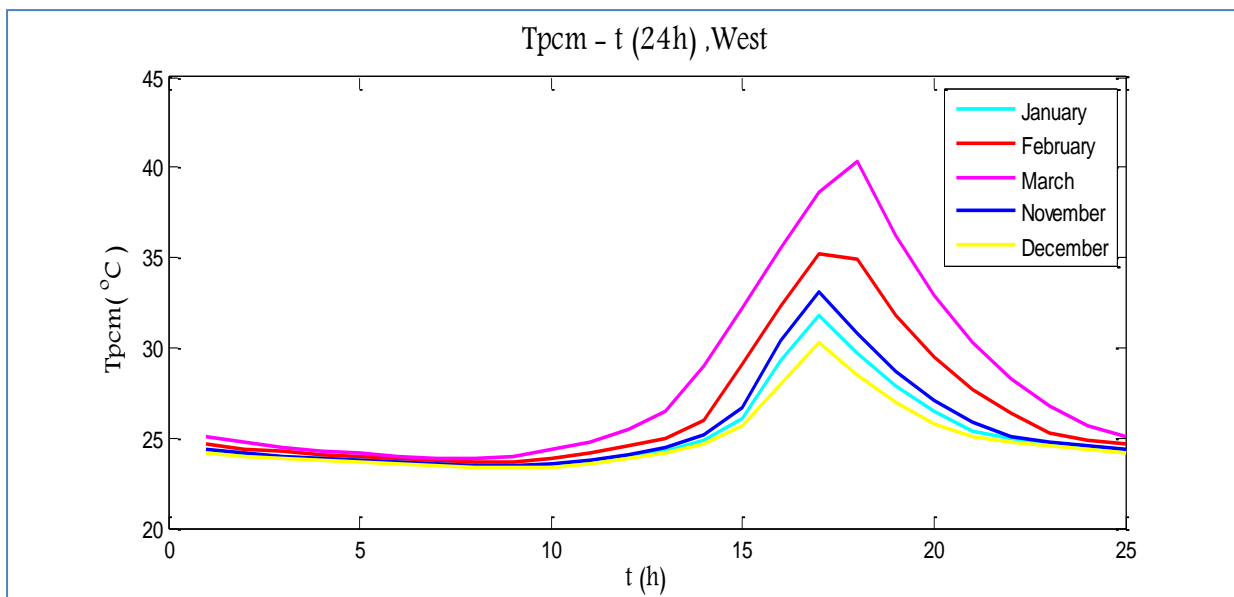
**Σχήμα 5.3.4.1:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, με εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών, για νότιο προσανατολισμό

• Ανατολικός προσανατολισμός



**Σχήμα 5.3.4.2:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, με εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών, για ανατολικό προσανατολισμό

- Δυτικός προσανατολισμός



**Σχήμα 5.3.4.3:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, με εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών, για δυτικό προσανατολισμό

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

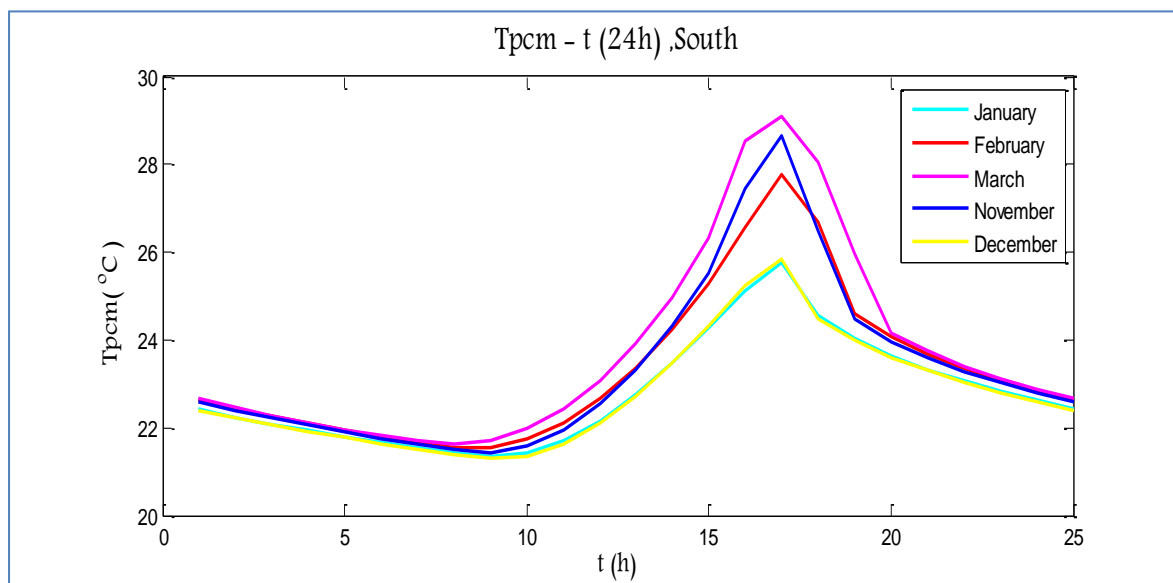
Αυξάνοντας της εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου σε  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , αυξάνεται και η θερμοκρασία του PCM σε όλους τους εξεταζόμενους μήνες και των τριών προσανατολισμών, σε σχέση με τις θερμοκρασίες που αναπτύσσει όταν η εσωτερική θερμοκρασία που επικρατεί στο δωμάτιο είναι  $20^{\circ}\text{C}$ . Παράλληλα με την αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του PCM, παρατηρείται και αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας που αναπτύσσει, σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση σε όλους τους προσανατολισμούς.

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (5.3.2.9) για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του PCM, συμπεραίνεται ότι αυξάνοντας την εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}$ , αυξάνεται και η θερμοκρασία του PCM. Η αύξηση των ελάχιστων θερμοκρασιών οφείλεται στο ότι, λόγω της αύξησης της σταθερής θερμοκρασίας που επικρατεί στο δωμάτιο, το PCM της βραδινές ώρες δεν μπορεί να προσδώσει περισσότερη θερμότητα στο δωμάτιο και να αποκτήσει θερμοκρασία μικρότερη των  $22^{\circ}\text{C}$ .

Τα παραπάνω ισχύουν εξίσου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό. Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των διάφορων προσανατολισμών παραμένουν ίδιες σε σχέση με τη μελέτη για εσωτερική θερμοκρασία 20°C. Αναπτύσσονται, δηλαδή, υψηλότερες θερμοκρασίες στον νότιο προσανατολισμό, ακολουθεί ο δυτικός και τέλος ο ανατολικός προσανατολισμός, λόγω του ποσοστού ηλιακής ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στον κάθε ένα. Τέλος, και σε αυτή την περίπτωση ισχύει η διαφορά μεταξύ της εμφάνισης των μέγιστων θερμοκρασιών, με τον ανατολικό προσανατολισμό να προηγείται και να ακολουθεί ο νότιος και έπειτα ο δυτικός, λόγω της διαφοράς ώρας της εμφάνισης έντονης ηλιακής ακτινοβολίας.

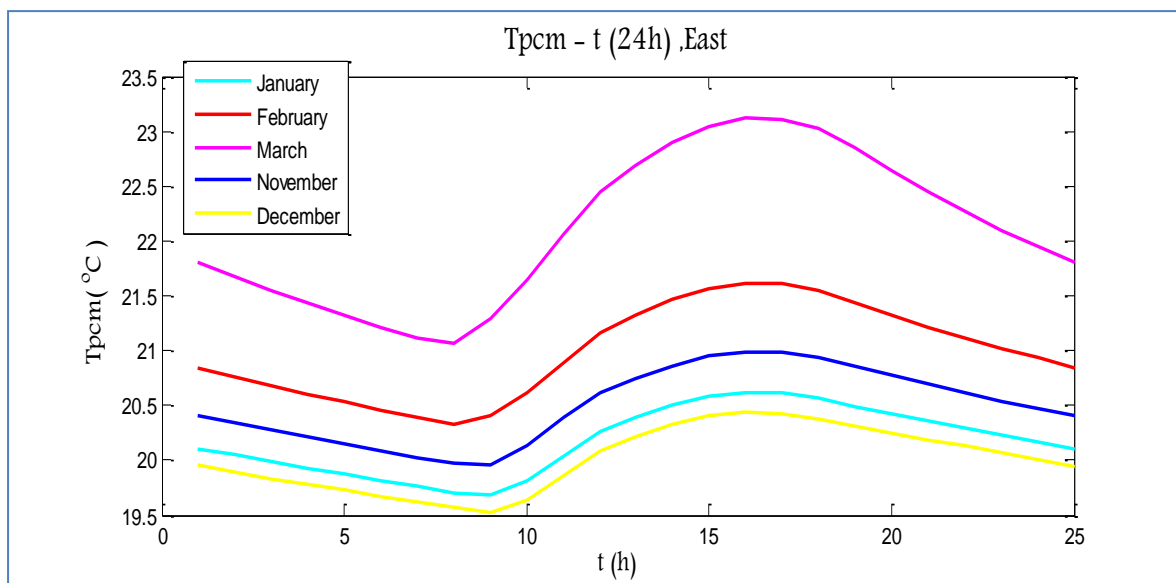
### **B. Εσωτερική θερμοκρασία δωματίου $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό**

- Νότιος προσανατολισμός



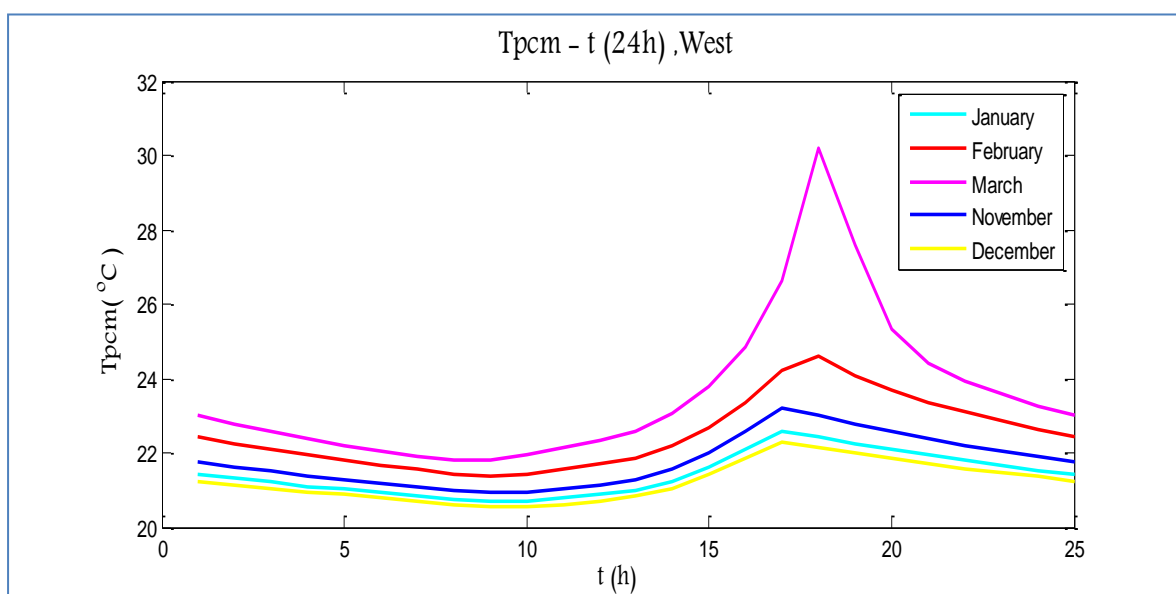
**Σχήμα 5.3.4.4:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, με εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ , την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών, για νότιο προσανατολισμό

- Ανατολικός προσανατολισμός



Σχήμα 5.3.4.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, με εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=18^{\circ}C$ , την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών, για ανατολικό προσανατολισμό

- Δυτικός προσανατολισμός



Σχήμα 5.3.4.6: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, με εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=18^{\circ}C$ , την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών, για δυτικό προσανατολισμό

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα με αυτά που προέκυψαν από τη μελέτη για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου 20°C, προκύπτει ότι με την μείωση της  $T_{in}$ , μειώνονται και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM κατά τη διάρκεια της ημέρας σε όλους τους μήνες και για τους τρεις προσανατολισμούς. Παράλληλα, εμφανίζονται και μειωμένες ελάχιστες θερμοκρασίες του PCM στο 24ωρο, σε σχέση με την αρχική περίπτωση της ενότητας 5.3.2.

Αυτό συμβαίνει διότι, λόγω της σχέσης (5.3.2.9), μειώνοντας την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου στους 18°C, μειώνεται και η θερμοκρασία του στρώματος PCM σε όλη τη διάρκεια του 24ωρου. Από την άλλη, η μείωση των ελάχιστων τιμών της θερμοκρασίας του οφείλεται στο γεγονός ότι η ελάττωση της σταθερής εσωτερικής θερμοκρασίας δωματίου, δίνει περιθώριο στο PCM να προσδώσει θερμότητα στο δωμάτιο, χαμηλότερη των 20°C, μέχρι το όριο των 18°C που επικρατούν στο εσωτερικό.

Τα παραπάνω ισχύουν σε όλους τους εξεταζόμενους μήνες και για τους τρεις προσανατολισμούς, χωρίς να μεταβάλλονται οι διαφορές που υπάρχουν μεταξύ τους, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις εσωτερικών θερμοκρασιών 20°C και 22°C. Δηλαδή εξακολουθεί να εμφανίζονται υψηλότερες θερμοκρασίες στο νότιο προσανατολισμό σε σχέση με τους άλλους δύο και να μεταβάλλεται η εμφάνιση των μεγίστων θερμοκρασιών ανά προσανατολισμό με αρχή την ανατολή και έπειτα νότιου και δυτικού προσανατολισμού.



### 5.3.5 Σύγκριση της προσδιδόμενης ενέργειας $Q_{\text{συναγωγής}}$ στο δωμάτιο από στρώμα PCM νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Στη συγκεκριμένη μελέτη γίνεται σύγκριση, όσο αναφορά την ενέργεια που προσδίδεται στον εσωτερικό αέρα του δωματίου από το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, ώστε να υπάρξει μια σαφέστερη εικόνα της απόδοσής του.

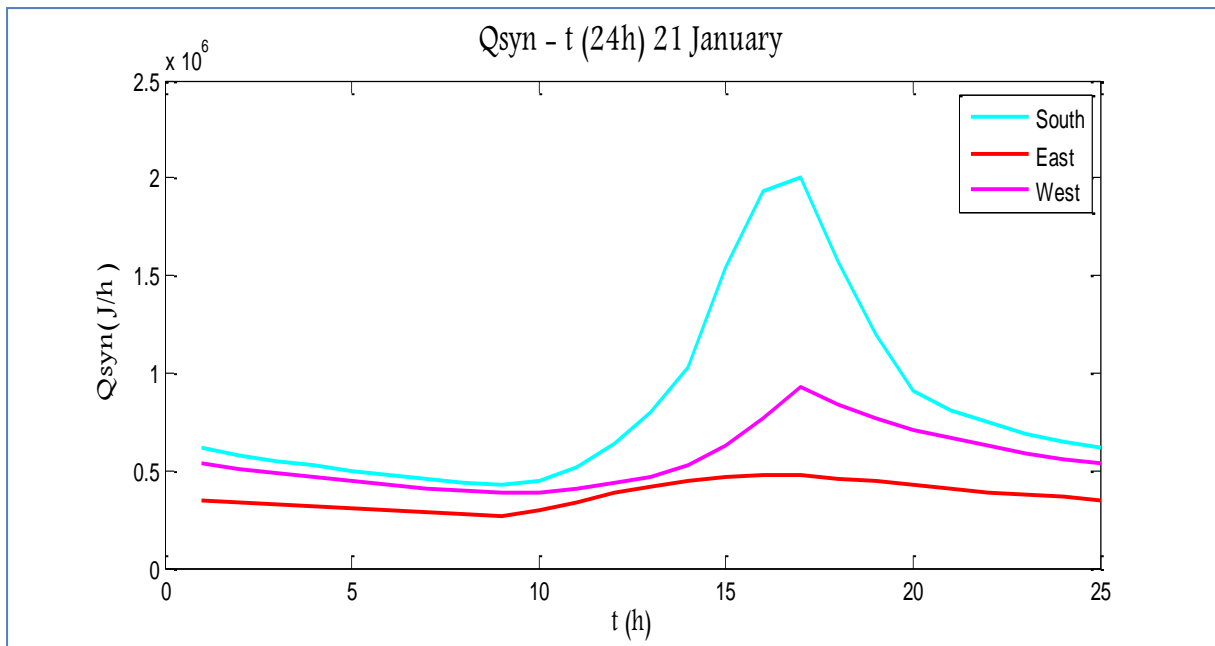
Λαμβάνοντας υπόψη τις θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM, πάχους 40mm, όπως έχουν υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 5.3.2, υπολογίζεται η θερμότητα που προσδίδει το στρώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου ως εξής:

$$Q_{\text{συναγωγής,αγωγής}} = 3600 * A_{\text{τοιχίου}} * U_1 * (T_{\text{PCM}} - T_{\text{in}}) \quad (5.3.5.1)$$

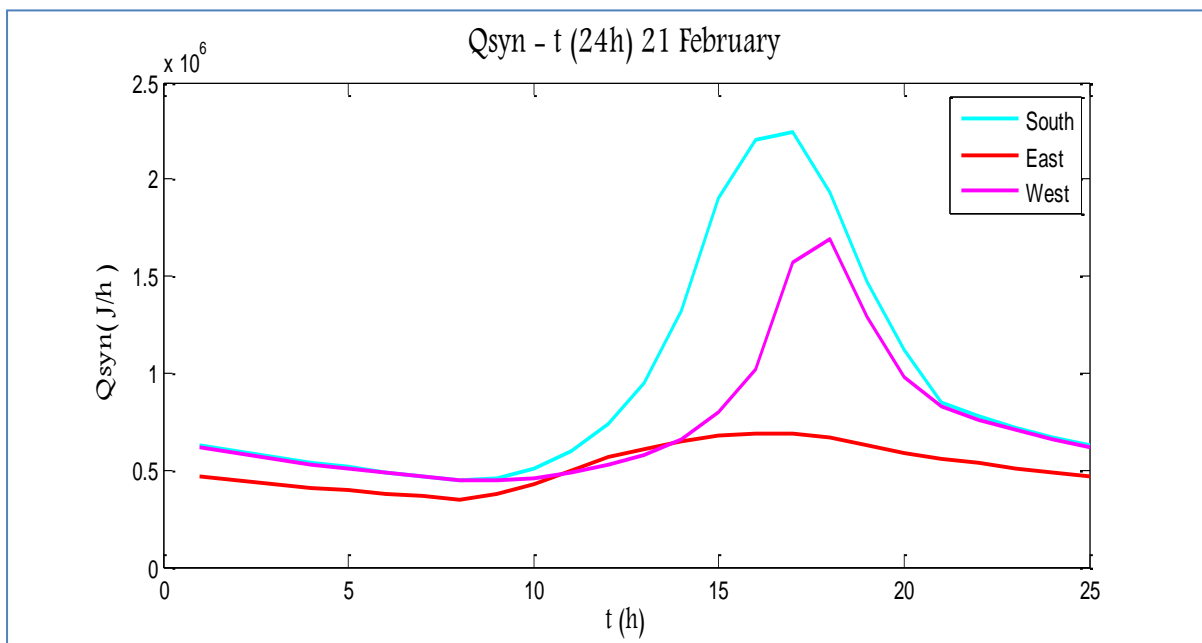
- $U_1 = \left(\frac{1}{h_{\text{in}}} + \frac{l_{\Gamma}}{k_{\Gamma}}\right)^{-1}$ , συντελεστής διαπερατότητας
- $h_{\text{in}} = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω συναγωγής με τον εσωτερικό αέρα
- $l_{\Gamma} = 12,5\text{mm}$ , πάχος γυψοσανίδας
- $k_{\Gamma} = \frac{0,21\text{W}}{\text{m}}\text{°C}$ , συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας γυψοσανίδας
- $A_{\text{τοιχίου}} = (\text{πλάτος τοίχου}) \times (\text{ύψος τοίχου})$
- $T_{\text{in}} = 20\text{°C}$

Η μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{\text{συναγωγής}}$  υπολογίζεται σε (J/h) με βάση τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του PCM ( $T_{\text{PCM}}$ ), ο οποίος πραγματοποιήθηκε για ένα 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα, με επαναληπτική διαδικασία από τη 1:00 έως τις 00:00, με βήμα μιας ώρας.

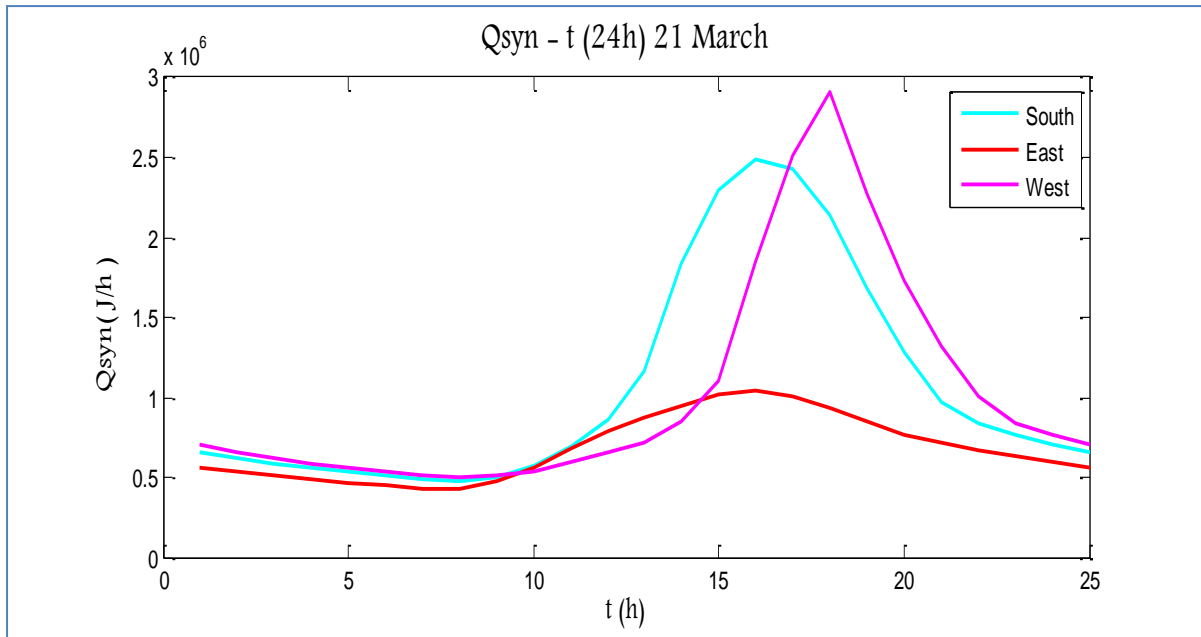
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι τιμές της  $Q_{\text{συναγωγής}}$  (J/h), στρώματος PCM νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.



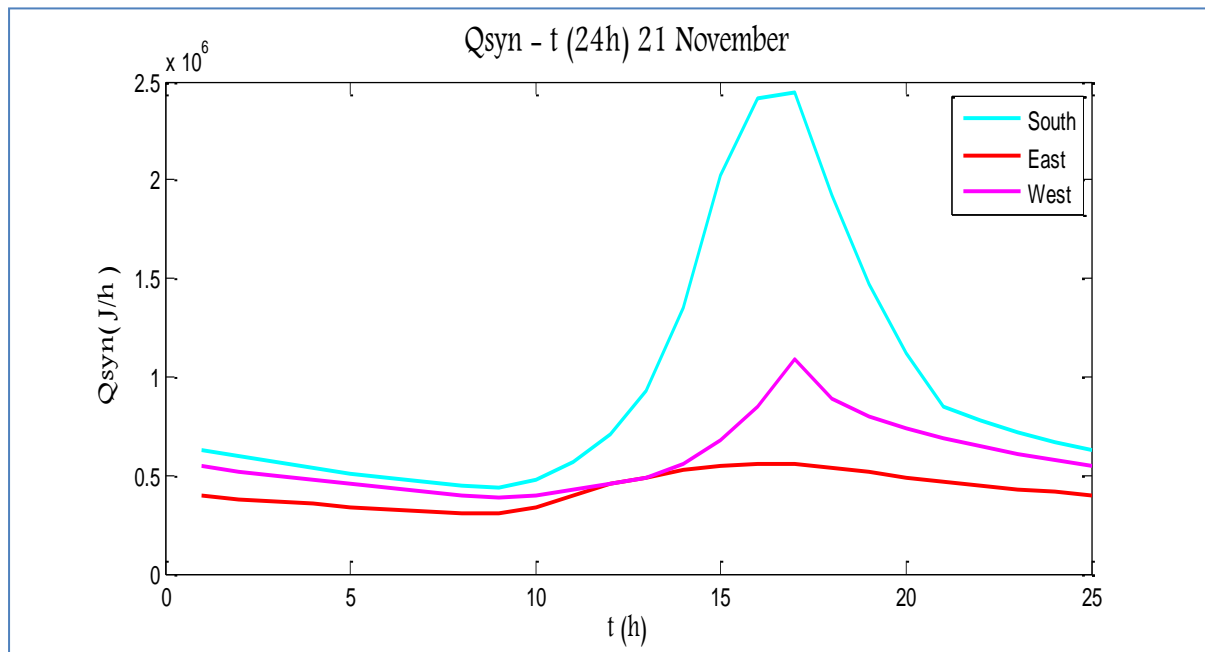
Σχήμα 5.3.5.1: Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



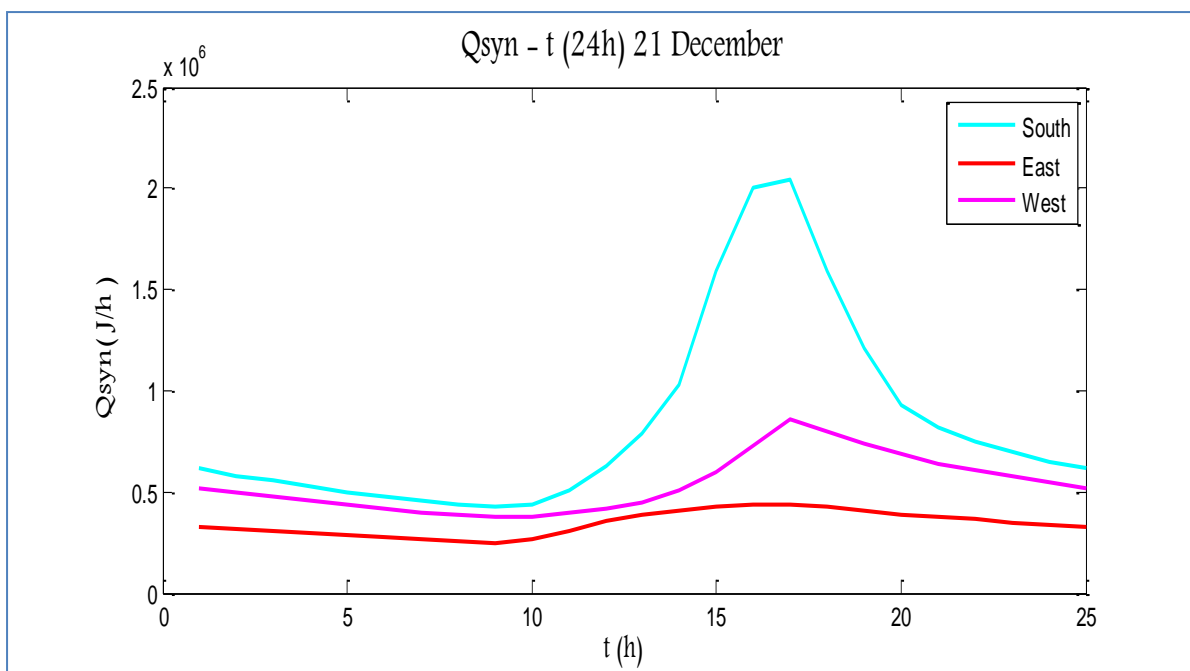
Σχήμα 5.3.5.2: Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.3.5.3: Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}$ (J/h) στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Μαρτίου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.3.5.4: Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}$ (J/h) στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.3.5.5: Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

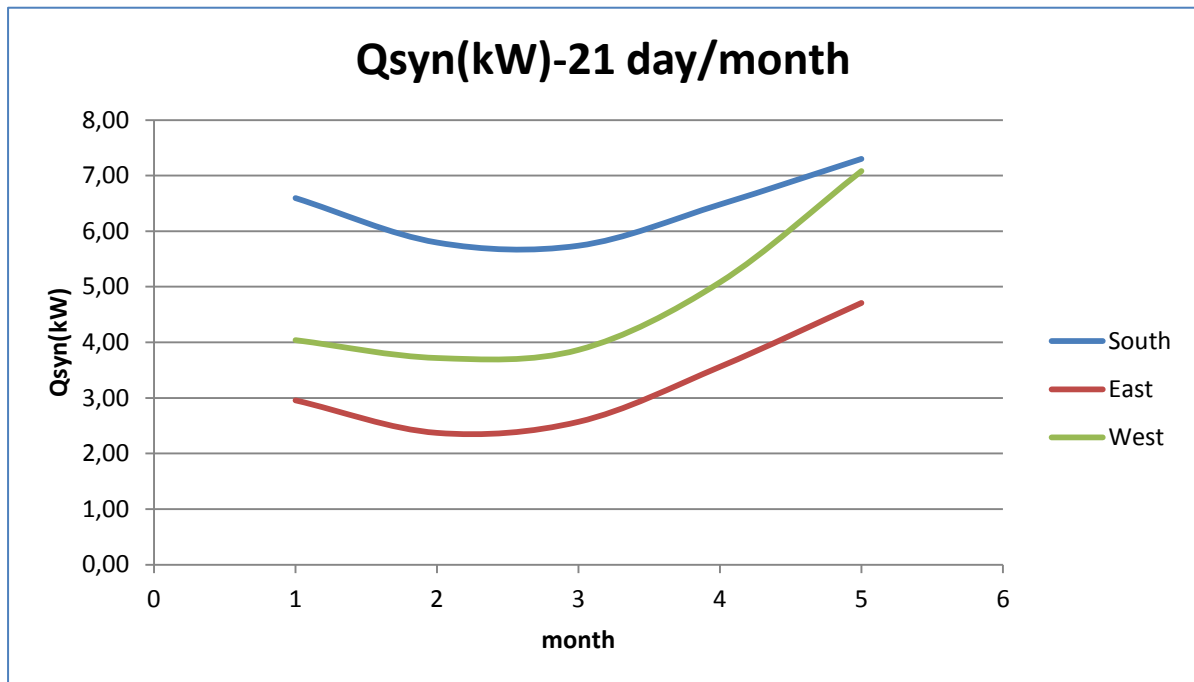
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συνολικό ποσό της θερμότητας που προσδίδει το στρώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου για όλο το 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.5.1 και απεικονίζονται στο Σχήμα 5.3.5.6. Η συνολική θερμότητα συναγωγής υπολογίζεται ως εξής:

$$Q_{syn}(kW) = \sum \frac{Q_{syn,i}(J)}{3600 \cdot 1000} \quad (5.3.5.2)$$

Για την απεικόνιση του διαγράμματος δόθηκαν αύξοντες αριθμοί που αντιστοιχούν στην 21<sup>η</sup> ημέρα του κάθε μήνα. Έτσι όπου:

- 1=21<sup>η</sup> Νοεμβρίου
- 2=21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου
- 3=21<sup>η</sup> Ιανουαρίου
- 4=21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου
- 5=21<sup>η</sup> Μαρτίου

Πίνακας 5.3.5.1: Q συναγωγής (kW), (24h)				
		South	East	West
21 <sup>η</sup> Νοεμβρίου	1	6,59	2,96	4,04
21 <sup>η</sup> Δεκεμβρίου	2	5,80	2,37	3,72
21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου	3	5,74	2,57	3,86
21 <sup>η</sup> Φεβρουαρίου	4	6,48	3,56	5,08
21 <sup>η</sup> Μαρτίου	5	7,30	4,71	7,08



Σχήμα 5.3.5.6: Μεταβολή της θερμότητας συναγωγής  $Q_{syn}(kW)$ , την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα, για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό.

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τα διαγράμματα (Σχήματα 5.3.5.1-5.3.5.5) παρατηρείται ότι το στρώμα PCM και των τριών προσανατολισμών προσδίδει θερμότητα στο δωμάτιο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, αφού η θερμοκρασία του είναι μεγαλύτερη από την σταθερή εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου ( $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$ ). Η μέγιστη θερμότητα συναγωγής εμφανίζεται τις απογευματινές ώρες, διότι εκείνες τις ώρες αναπτύσσονται και οι μέγιστες θερμοκρασίες του στρώματος PCM και υπάρχει υψηλότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ PCM και δωματίου.

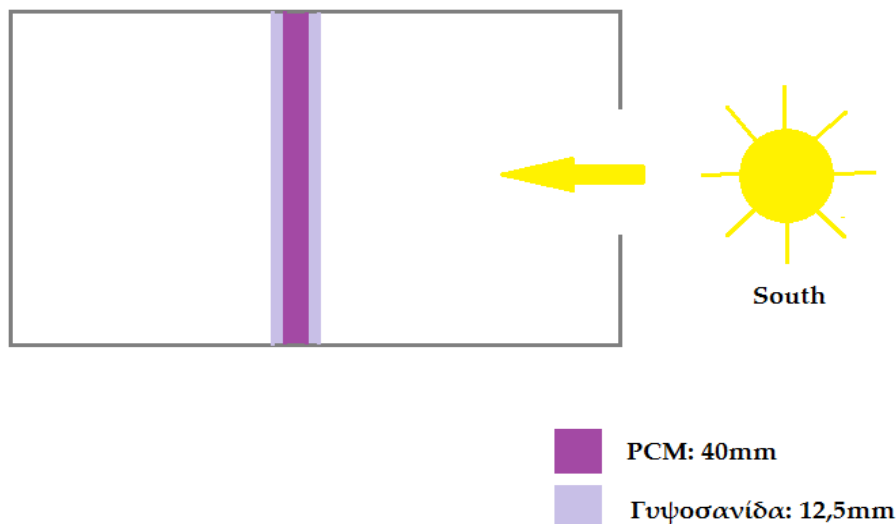
Προκύπτει, επίσης, ότι το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού προσδίδει υψηλότερο ποσό θερμότητας στο δωμάτιο, αφού και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει είναι υψηλότερες. Ακολουθεί το στρώμα δυτικού προσανατολισμού και έπειτα του ανατολικού. Υπάρχει και διαφορά στην εμφάνιση του μέγιστου προσδιδόμενης θερμότητας, το οποίο εξηγείται αν ληφθεί υπόψη η μελέτη της θερμοκρασίας του PCM (Κεφάλαιο 5.3.2).

Η μελέτη της συνολικής θερμότητας συναγωγής δείχνει ότι τον Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο παρουσιάζει καμπή και στους τρεις προσανατολισμούς σε σχέση με τον Νοέμβριο, ενώ εκτοξεύεται τον Φεβρουάριο και τον Μάρτιο. Συνολικά περισσότερο αποδοτικό είναι το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού, όπως ήταν φυσικό εφόσον οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει είναι μεγαλύτερες. Ακολουθεί το στρώμα δυτικού προσανατολισμού που πλησιάζει αυτό του νότιου τον Μάρτιο, καθώς σε αυτόν τον μήνα αναπτύσσει υψηλότερες θερμοκρασίες και τέλος, το στρώμα PCM ανατολικού προσανατολισμού προσδίδει μικρά ποσά θερμότητας σε σχέση με τα άλλα δύο, αφού η πρωινή θαμπή ατμόσφαιρα δεν αφήνει περιθώριο ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών.

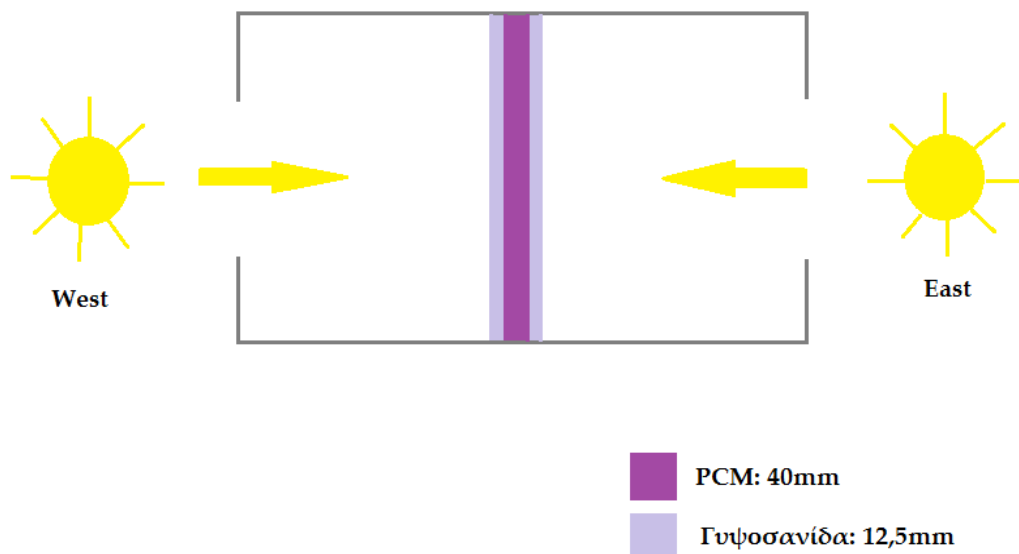
## 5.4 Μελέτη για συναλλαγή με 2 δωμάτια με υαλοπίνακες νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

### 5.4.1 Περιγραφή εξεταζόμενης μελέτης

Τα εξεταζόμενα δωμάτια βρίσκονται στην περιοχή της Αθήνας, με κοινές διαστάσεις 4 m x 3 m x 3 m. Απέναντι από τον εσωτερικό τοίχο, υπάρχει ένας υαλοπίνακας διαστάσεων 1.5 m x 2m νότιου προσανατολισμού στην πρώτη περίπτωση και δύο υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού στη δεύτερη περίπτωση.



**Σχήμα 5.4.1.1:** Εξεταζόμενα δωμάτια με στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού



**Σχήμα 5.4.1.2:** Εξεταζόμενα δωμάτια με στρώμα PCM έναντι υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Για την σύγκριση των παραπάνω εξεταζόμενων δωματίων πραγματοποιούνται οι εξής παραδοχές:

- Στο εξωτερικό σημείο των εξεταζόμενων δωματίων υπάρχει αδιαβατικό όριο, που δεν επιτρέπει την συναλλαγή θερμότητας με το εξωτερικό περιβάλλον
- Η εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου θεωρείται σταθερή και ομοιόμορφη
- Η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης θεωρείται ομοιόμορφη
- Η κατάσταση θεωρείται μόνιμη, δηλαδή δεν υπάρχει περαιτέρω αλληλεπίδραση με εξωτερικούς παράγοντες και η συναλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται μεταξύ του εσωτερικού αέρα και του PCM, το οποίο φορτίζεται αποκλειστικά από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά του.



### 5.4.2 Υπολογισμός της θερμοκρασίας PCM, $T_{PCM}$ και σύγκριση μεταξύ νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Για τη μελέτη γίνεται επιλογή του εμπορικού PCM, RT20 της Rubitherm, τα χαρακτηριστικά του οποίου αναφέρονται στον Πίνακα 5.3.2.1. Το πάχος που επιλέχθηκε είναι 40mm. Εξετάζεται η θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM σε ακτινοβολία που εισέρχεται από υαλοπίνακα νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού και πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ τους. Και για τις δύο περιπτώσεις, η λειτουργία του PCM μελετάται για την 21<sup>η</sup> ημέρα Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου, Μαρτίου, Νοεμβρίου και Δεκεμβρίου, με σκοπό τη διερεύνηση της αποδοτικότητας του PCM την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα και του εκάστοτε προσανατολισμού.

#### A. Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM

Ο ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM αποδίδεται από τη σχέση:

$$Q_{\text{απορροφούμενη}} = Q_{\text{ακτινοβολίας}} + Q_{\text{συναγωγής,αγωγής}} \quad (5.4.2.1)$$

Η μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM σε σχέση με το χρόνο στο 24ωρο, εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται από τον υαλοπίνακα, τη συναλλαγή θερμότητας με συναγωγή με τον εσωτερικό αέρα και τη γυψοσανίδα, καθώς επίσης με τη μάζα και τη θερμοχωρητικότητα του PCM.

- Υπολογισμός απορροφούμενης ενέργειας

Απορροφούμενη ενέργεια είναι η ενέργεια που απορροφάται από το στρώμα PCM και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{\text{απορροφούμενη}} = M_{PCM} * c_{p\text{eff}} * (T_{PCM} - T_{PCM}^0) \quad (5.4.2.2)$$

- $T_{PCM}^0$  : η θερμοκρασία του PCM την χρονική στιγμή  $t$
- $T_{PCM}$  : η θερμοκρασία του PCM την χρονική στιγμή  $t+\Delta t$
- $M_{PCM}$  : η μάζα του επιλεγμένου PCM
- $c_{p,eff}$  : η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM

- **Υπολογισμός της μάζας PCM**

Η μάζα του PCM,  $M_{PCM}$ , θεωρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της μελέτης και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας και μπορεί να προσεγγιστεί με την εξής σχέση:

$$M_{PCM} = \rho_{PCM} * V_{PCM} \quad (5.4.2.3)$$

- $\rho_{PCM}$  : η πυκνότητα του PCM
- $V_{PCM}$  : ο όγκος του PCM

$$V_{PCM} = (\text{ύψος τοίχου}) * (\text{πλάτος τοίχου}) * (\text{πάχος PCM}) \quad (5.4.2.4)$$

- **Υπολογισμός ενεργού θερμοχωρητικότητας,  $C_{p,eff}$**

Για τον υπολογισμό της ενεργού θερμοχωρητικότητας θα χρησιμοποιηθεί η τριγωνική συνάρτηση ως εξής: [3]

$$C_{p,eff}(T) = \frac{4 * (H - b * C_{ps}) * (T - T_s)}{b^2} + C_{ps}, \quad \text{για } T_s \leq T \leq T_c \quad (5.4.2.5)$$

$$C_{p,eff}(T) = \frac{4 * (b * C_{pl} - H) * (T - T_s - \frac{b}{2})}{b^2} + \frac{2 * H}{b} - C_{pl}, \quad \text{για } T_c \leq T \leq T_i \quad (5.4.2.6)$$

- $C_{pl}$  : θερμοχωρητικότητα του υγρού PCM
- $C_{ps}$  : θερμοχωρητικότητα του στερεού PCM
- $T_s$  : θερμοκρασία του στερεού PCM
- $T_i$  : θερμοκρασία του υγρού PCM
- $b = (T_i - T_s)$  : εύρος θερμοκρασιών
- $T_c = \frac{T_i + T_s}{2}$  : το μέσον του εύρους θερμοκρασιών
- $H$  : η θερμότητα αλλαγής φάσης

• Υπολογισμός ενέργειας λόγω συναγωγής και αγωγής

Πρόκειται για την θερμότητα που προσφέρει το σώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου και στο στρώμα της γυψοσανίδας και αποδίδεται με την παρακάτω σχέση:

$$Q_{\text{συναγωγής,αγωγής}} = 3600 * A_{\text{τοιχίου}} * U_1 * (T_{\text{in}} - T_{\text{PCM}}^0) + 3600 * A_{\text{τοιχίου}} * U_2 * (T_{\text{in}} - T_{\text{PCM}}^0) \quad (5.4.2.7)$$

- $U_1 = \left(\frac{1}{h_{\text{in}}} + \frac{l_{\Gamma}}{k_{\Gamma}}\right)^{-1}$ , συντελεστής διαπερατότητας
- $U_2 = \left(\frac{1}{h_{\text{in}}} + \frac{l_{\Gamma}}{k_{\Gamma}}\right)^{-1}$ , συντελεστής διαπερατότητας
- $h_{\text{in}}=8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω συναγωγής με τον εσωτερικό αέρα
- $l_{\Gamma}=12,5\text{mm}$ , πάχος γυψοσανίδας
- $k_{\Gamma} = \frac{0.21\text{W}}{\text{m}}\text{°C}$ , συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας γυψοσανίδας
- $A_{\text{τοιχίου}} = (\text{πλάτος τοίχου}) \times (\text{ύψος τοίχου})$
- $T_{\text{in}}=20\text{°C}$

• Υπολογισμός ενέργειας λόγω ακτινοβολίας

Πρόκειται για την θερμότητα που δέχεται το στρώμα PCM λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας.

- Εξεταζόμενα δωμάτια με 1 υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού:

$$Q_{\text{ακτινοβολίας}} = 0.9 * 3600 * G_{\text{T}} * A_{\text{υαλοπίνακα}} \quad (5.4.2.8)$$

- $A_{\text{υαλοπίνακα}} = (\text{πλάτος υαλοπίνακα}) \times (\text{ύψος υαλοπίνακα})$
- $G_{\text{T}}$ : η προσπίπτουσα στον τοίχο μέση στιγμιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία νότιου προσανατολισμού, όπως προέκυψε από την ενότητα 5.1

- Εξεταζόμενα δωμάτια με 2 υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού:

$$Q_{\text{ακτινοβολίας}} = 0.9 \cdot 3600 \cdot (G_{T,\alpha} + G_{T,\delta}) \cdot A_{\text{υαλοπίνακα}} \quad (5.4.2.9)$$

- $A_{\text{υαλοπίνακα}} = (\text{πλάτος υαλοπίνακα}) \times (\text{ύψος υαλοπίνακα})$
- $G_{T,\alpha}$ : η προσπίπτουσα στον τοίχο μέση στιγμιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία ανατολικού προσανατολισμού, όπως προέκυψε από την ενότητα 5.1
- $G_{T,\delta}$ : η προσπίπτουσα στον τοίχο μέση στιγμιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία δυτικού προσανατολισμού, όπως προέκυψε από την ενότητα 5.1

Λόγω του ότι ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από τον υαλοπίνακα και από τον εσωτερικό αέρα του δωματίου, έχει ως αποτέλεσμα να λαμβάνεται ένα ποσοστό της τάξης του 90% ότι προσπίπτει στον τοίχο μελέτης και κατ' επέκταση στο στρώμα του PCM.

## B. Υπολογισμός της θερμοκρασίας του PCM

Με βάση τον ισολογισμό ενέργειας που πραγματοποιήθηκε παραπάνω (σχέσεις 5.4.2.1-5.4.2.9), η θερμοκρασία που αναπτύσσει το στρώμα PCM για τις δύο περιπτώσεις προκύπτει ως εξής:

- Εξεταζόμενα δωμάτια με 1 υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού

$$T_{\text{PCM}} = T_{\text{PCM}}^0 + \frac{3600 \cdot 0,9 \cdot G_T \cdot A_{\text{υαλοπίνακα}} + 3600 \cdot A_{\text{τοιχου}} \cdot U_1 \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{PCM}}^0) + 3600 \cdot U_2 \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{PCM}}^0)}{M_{\text{PCM}} \cdot c_{p,\text{eff}}(T)} \quad (5.4.2.10)$$

- Εξεταζόμενα δωμάτια με 2 υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

$$T_{PCM} = T_{PCM}^0 + \frac{3600 \cdot 0,9 \cdot (G_{T,\alpha} + G_{T,\delta}) \cdot A_{υαλοπίνακα} + 3600 \cdot A_{τοιχου} \cdot U_1 \cdot (T_{in} - T_{PCM}^0) + 3600 \cdot U_2 \cdot (T_{in} - T_{PCM}^0)}{M_{PCM} \cdot c_{p,eff}(T)}$$

(5.4.2.11)

Η διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων έγκειται στη διαφορετική ολική ηλιακή ακτινοβολία  $G_T$  για τον κάθε μία (ενότητα 5.1), οπότε και προκύπτει η θερμοκρασία του PCM.

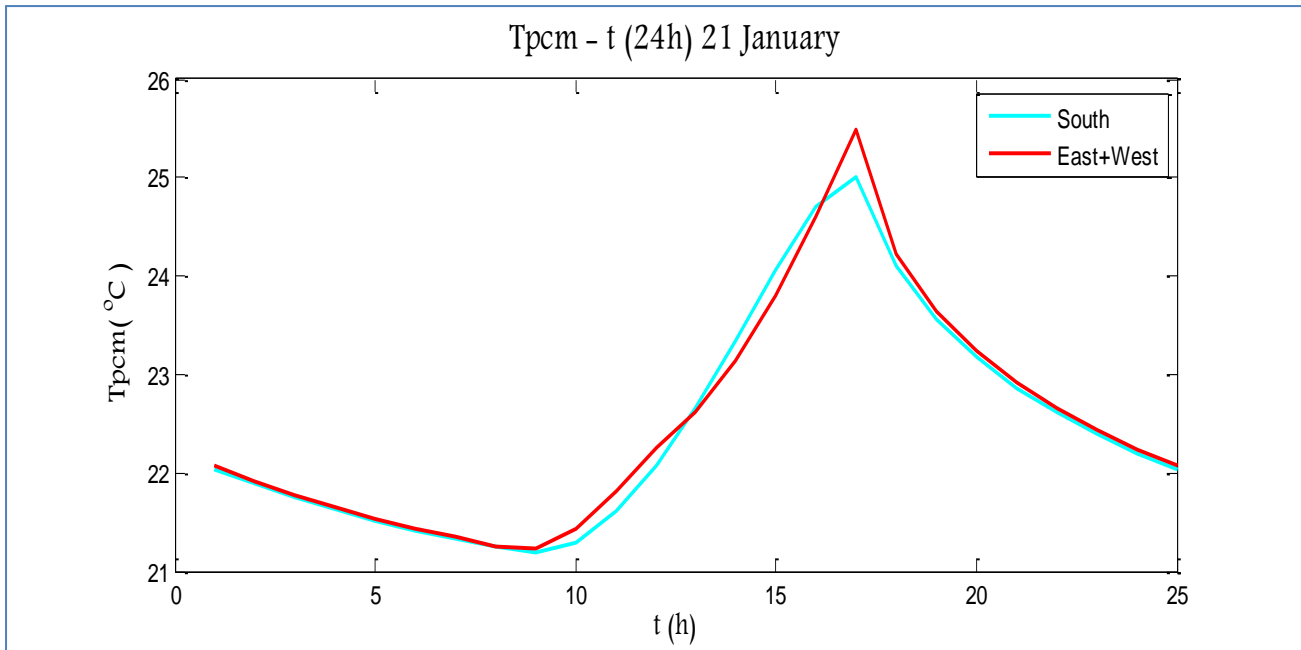
Η θερμοκρασία του PCM υπολογίζεται για ένα 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα, από τη 1:00 έως τις 00:00, με βήμα μίας ώρας.

Καθώς η θερμοκρασία του PCM στην αρχή των υπολογισμών είναι άγνωστη, λαμβάνεται αυθαίρετα μια τιμή και στη συνέχεια ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία έως ότου οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται το 24ωρο να συγκλίνουν με εκείνες της προηγούμενης επανάληψης.

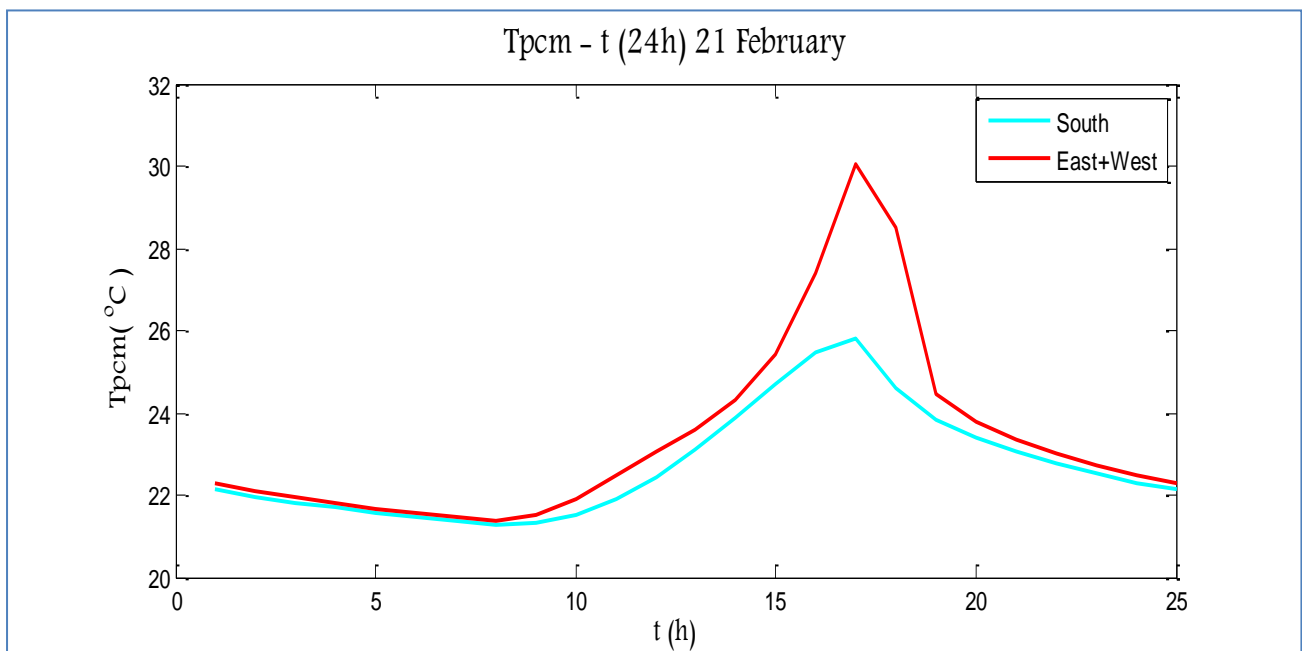
Η επανάληψη σε κάθε μήνα ξεκινάει με την τιμή  $T_{PCM}=22^\circ\text{C}$  στη 1:00 και υπολογίζεται η θερμοκρασία του PCM όλο το 24ωρο. Η διαδικασία συνεχίζεται λαμβάνοντας στη νέα επανάληψη την τιμή της  $T_{PCM}$  που υπολογίστηκε στις 00:00 από την προηγούμενη. Καταλήγοντας στο σημείο όπου οι θερμοκρασίες της προηγούμενης επανάληψης συγκλίνουν με αυτές της επόμενης.

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η θερμοκρασία του PCM συναρτήσει του χρόνου που υπολογίστηκε το 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας των μηνών Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού σε κοινό διάγραμμα, ώστε να είναι περισσότερο εφικτή η σύγκρισή τους.

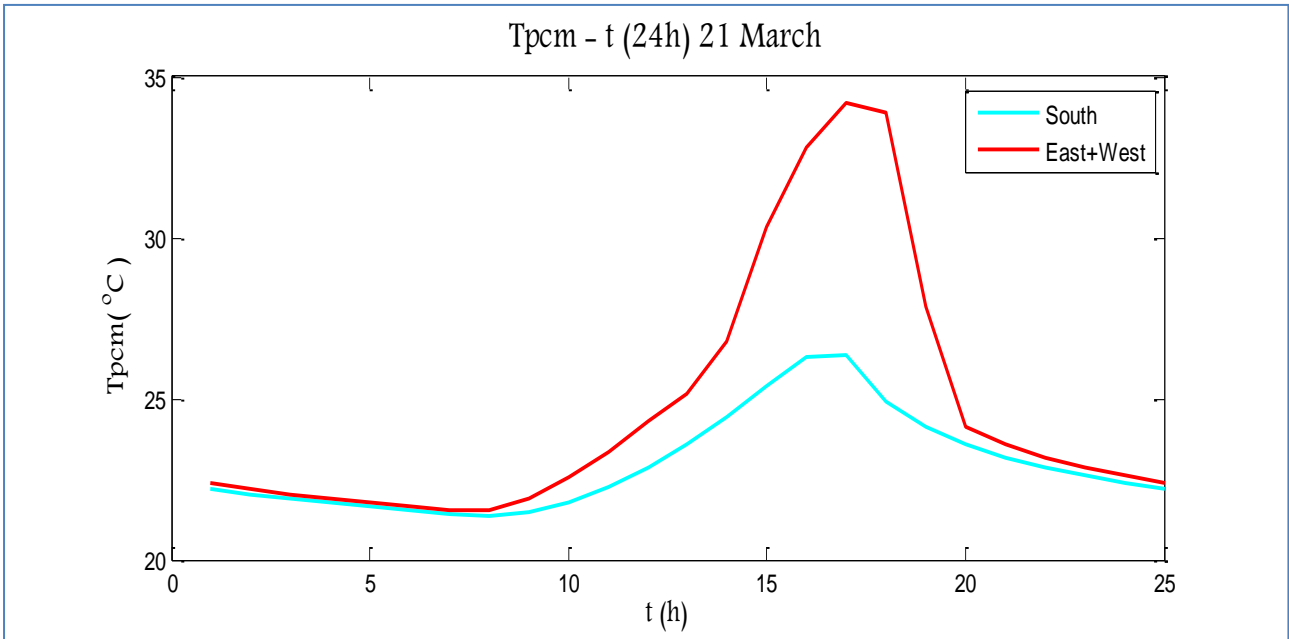
Το πάχος του PCM στη συγκεκριμένη μελέτη είναι 40mm.



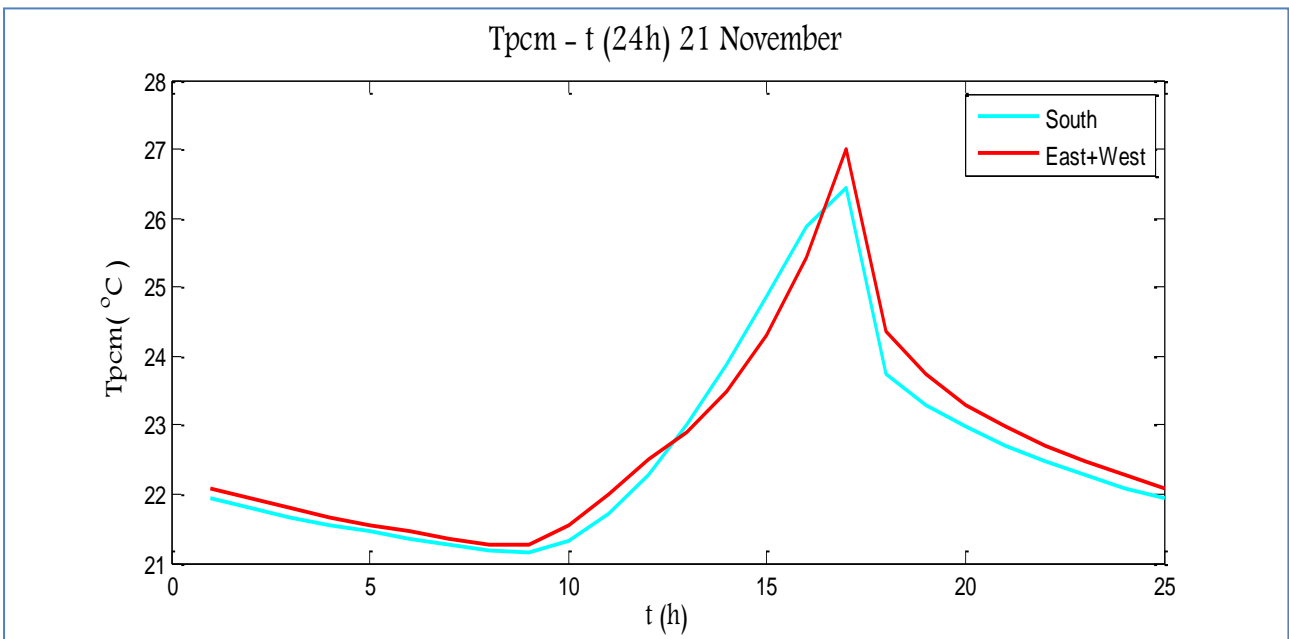
Σχήμα 5.4.2.1: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου



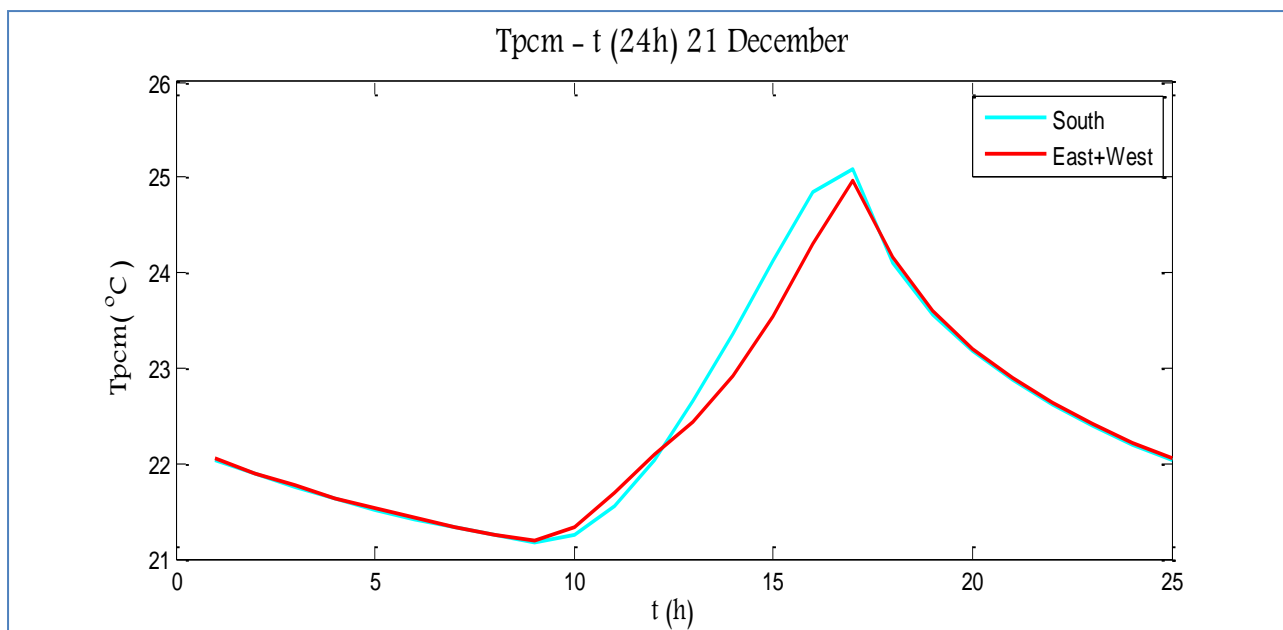
Σχήμα 5.4.2.2: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου



Σχήμα 5.4.2.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου



Σχήμα 5.4.2.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου



Σχήμα 5.4.2.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν διαπιστώνεται ότι το στρώμα PCM και στις 2 περιπτώσεις σε όλους τους εξεταζόμενους μήνες χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνειά του για να αλλάξει φάση. Η θερμοκρασία που αναπτύσσει είναι μεγαλύτερη από την  $T_c=20,5^{\circ}\text{C}$ , την μέση θερμοκρασία μεταξύ στερεής και υγρής φάσης.

Τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο το στρώμα PCM των εξεταζόμενων δωματίων με 1 υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού αναπτύσσει μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε σχέση με το στρώμα PCM των εξεταζόμενων δωματίων με 2 υαλοπίνακες δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού. Η ηλιακή ενέργεια νότιου προσανατολισμού είναι εντονότερη σε σχέση με αυτή ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού και για αυτό το λόγο παρατηρείται αυτή η διαφορά μεταξύ των μέγιστων θερμοκρασιών του PCM. (Κεφάλαιο 5.1)



Αντίθετα, τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο, το στρώμα PCM των εξεταζόμενων δωματίων με 2 υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού αναπτύσσει μεγαλύτερες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες σε σχέση με την πρώτη περίπτωση. Όσο επέρχεται ο χειμώνας, τόσο αυξάνεται και η ηλιακή ακτινοβολία ανατολής και πολύ περισσότερο της δύσης σε σχέση με τον νότιο προσανατολισμό, όπου εμφανίζεται μια μικρή καμπή. (Κεφάλαιο 5.1)

Διαφορά εμφανίζεται και στην ώρα εμφάνισης των μεγίστων θερμοκρασιών. Στην πρώτη περίπτωση (υαλοπίνακας νότιου προσανατολισμού) η μέγιστη θερμοκρασία εμφανίζεται νωρίτερα μέσα στην ημέρα, εφόσον και η εντονότερη ηλιακή ακτινοβολία εμφανίζεται στο νότο κατά τη 13:00. Στη δεύτερη περίπτωση (υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού) η εμφάνιση των μεγίστων θερμοκρασιών παρατηρείται αργότερα μέσα στην ημέρα, αφού η ηλιακή ακτινοβολία δυτικού προσανατολισμού, που είναι η εντονότερη σ' αυτή την περίπτωση, μεγιστοποιείται γύρω στις 16:00.

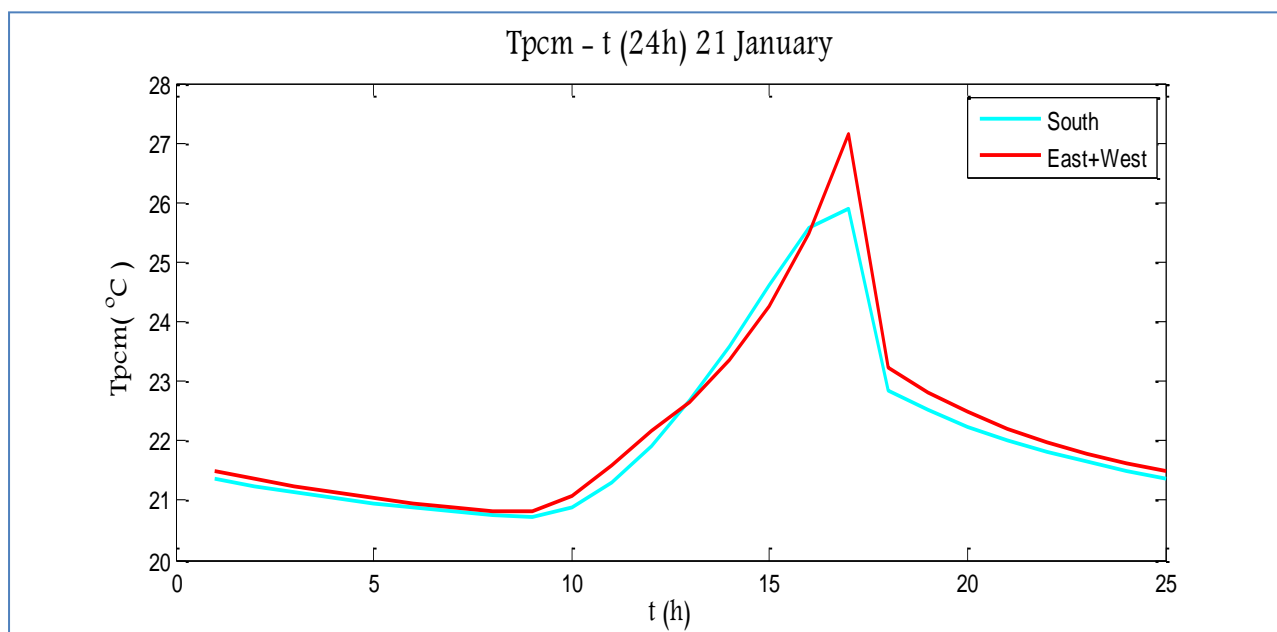
Τέλος, παρατηρείται ότι το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού αρχίζει να αναπτύσσει θερμοκρασία νωρίτερα μέσα στη διάρκεια της ημέρας, σε αντίθεση με τη δεύτερη περίπτωση (υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού). Αυτό συμβαίνει διότι το στρώμα PCM έναντι υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού δέχεται ακτινοβολία τις πρωινές ώρες, από την ανατολή, και έπειτα τις απογευματινές ώρες, από τη δύση, η οποία είναι και εντονότερη. Έτσι, παρόλο που αρχίζει να αναπτύσσει θερμοκρασίες τις πρωινές ώρες, δεν είναι αρκετή η ακτινοβολία ανατολικού προσανατολισμού για να ξεπεράσει αυτή του νότου, και παρουσιάζει μια καμπή τις ώρες που ο ήλιος βλέπει τον τοίχο νότιου προσανατολισμού. Καθυστερεί, λοιπόν, η εμφάνιση των μεγίστων θερμοκρασιών, οι οποίες εμφανίζονται τις απογευματινές ώρες, όπου υπάρχει έντονη ηλιακή ακτινοβολία στη δύση.

### 5.4.3 Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος στρώματος PCM, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

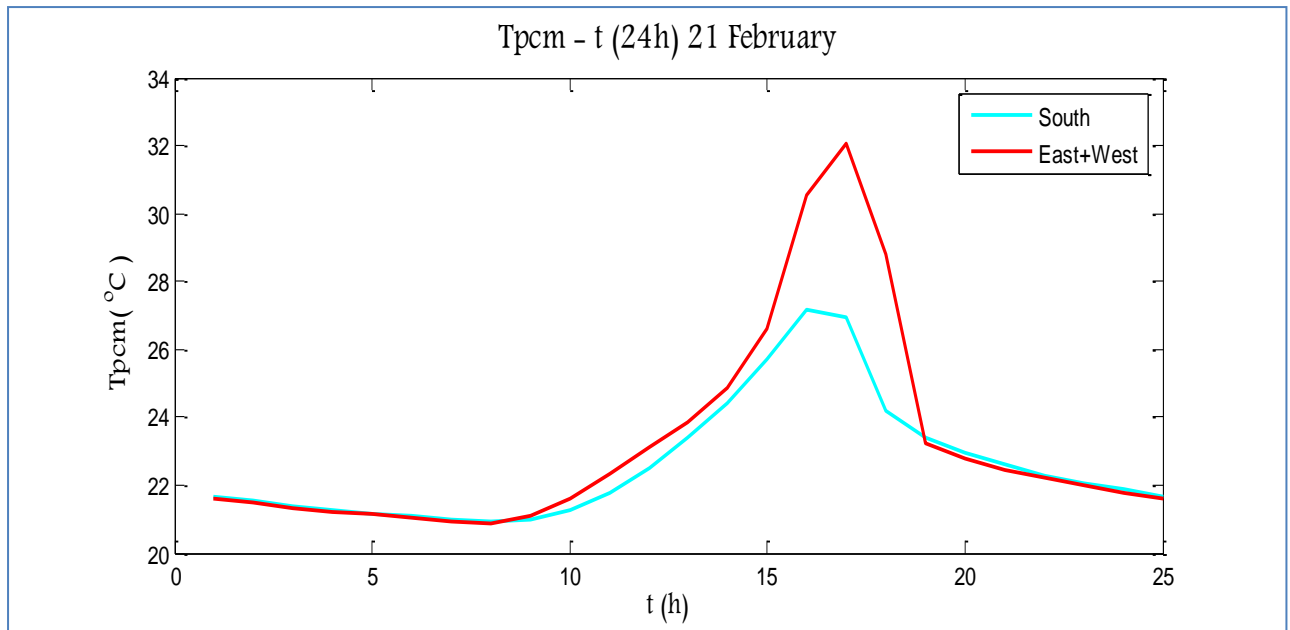
Προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά του PCM όσο αναφορά το πάχος του, πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη μελέτη. Θα γίνει ξεχωριστή μελέτη για πάχη 30mm και 20mm για την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού. Τέλος, τα παραπάνω αποτελέσματα θα παρουσιαστούν σε κοινά διαγράμματα, ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση της μεταβολής του πάχους στις θερμοκρασίες που μπορεί να αναπτύξει το στρώμα PCM.

Τα εξεταζόμενα πάχη στα παρακάτω διαγράμματα αναφέρονται σε μέτρα, όπως έχουν δοθεί και στις εξισώσεις. Η διαδικασία που ακολουθείται για κάθε πάχος είναι ίδια όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.4.2 με αλλαγή κάθε φορά του πάχους στη Σχέση (5.4.2.3), όπου υπολογίζεται η μάζα του PCM.

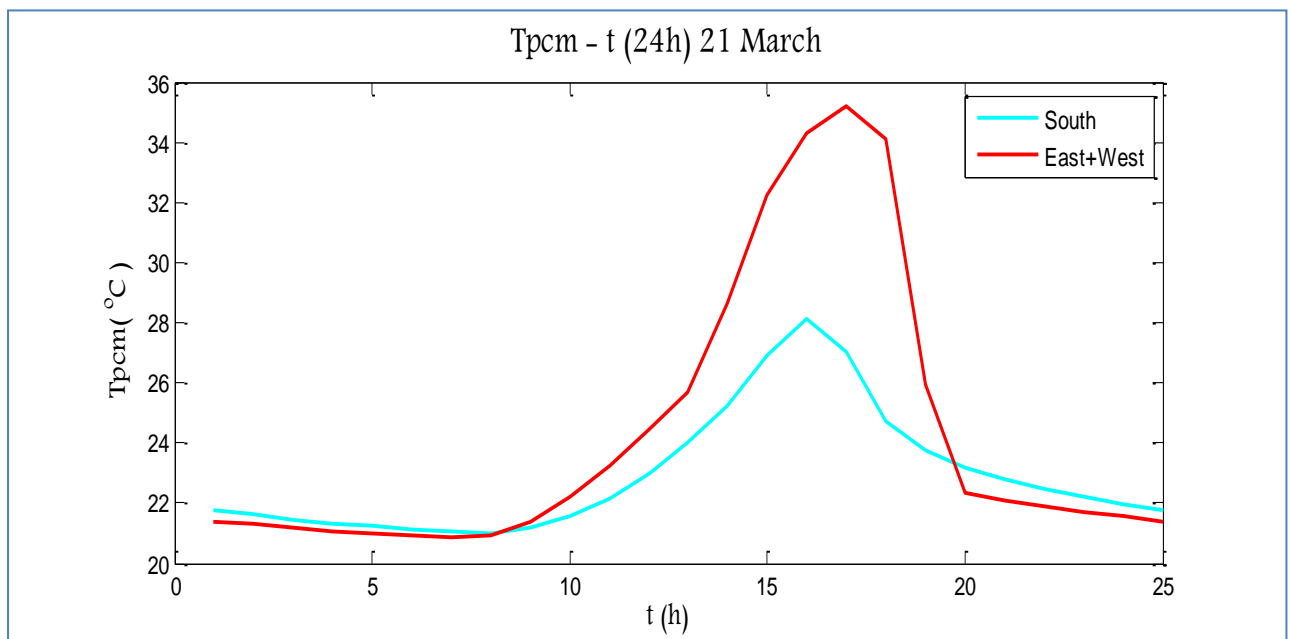
- Στρώμα PCM πάχους 30mm



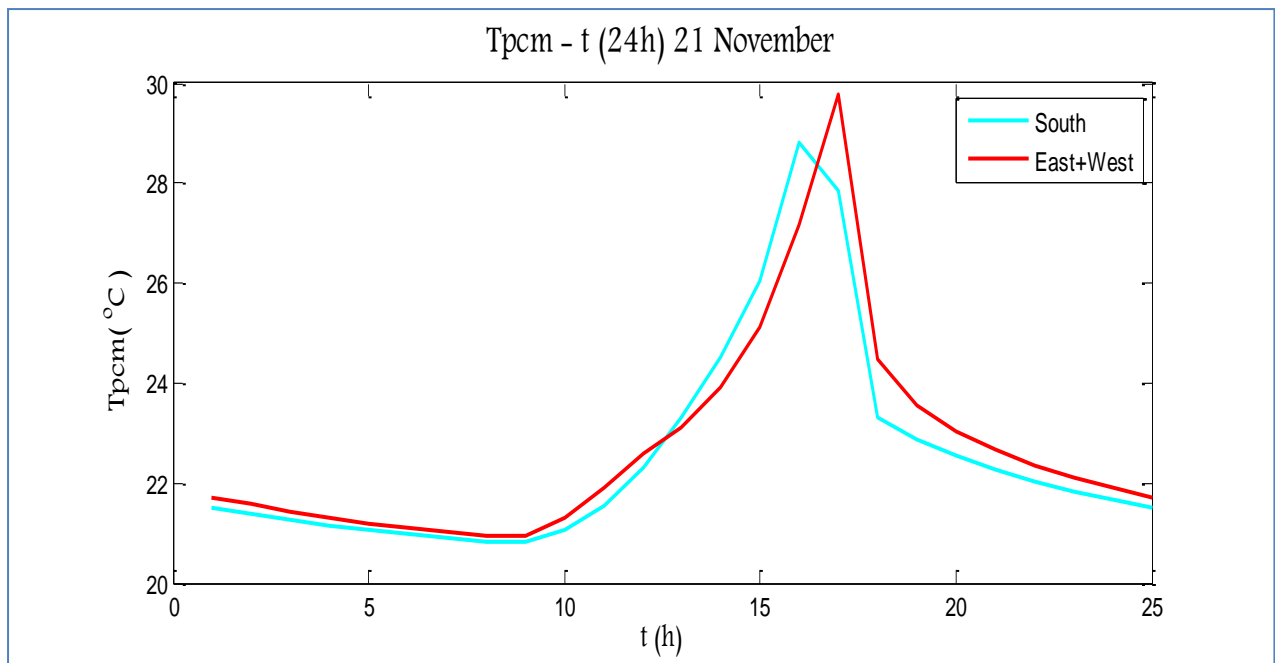
Σχήμα 5.4.3.1: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 30mm, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



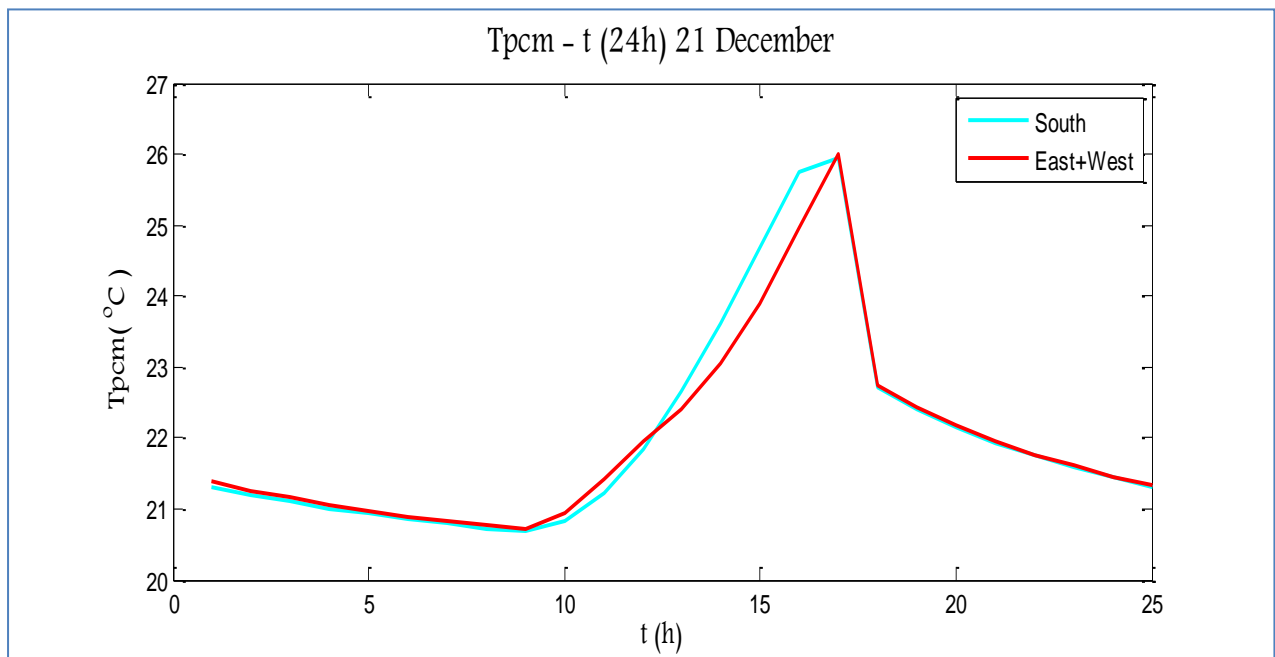
Σχήμα 5.4.3.2: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 30mm, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.4.3.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 30mm, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

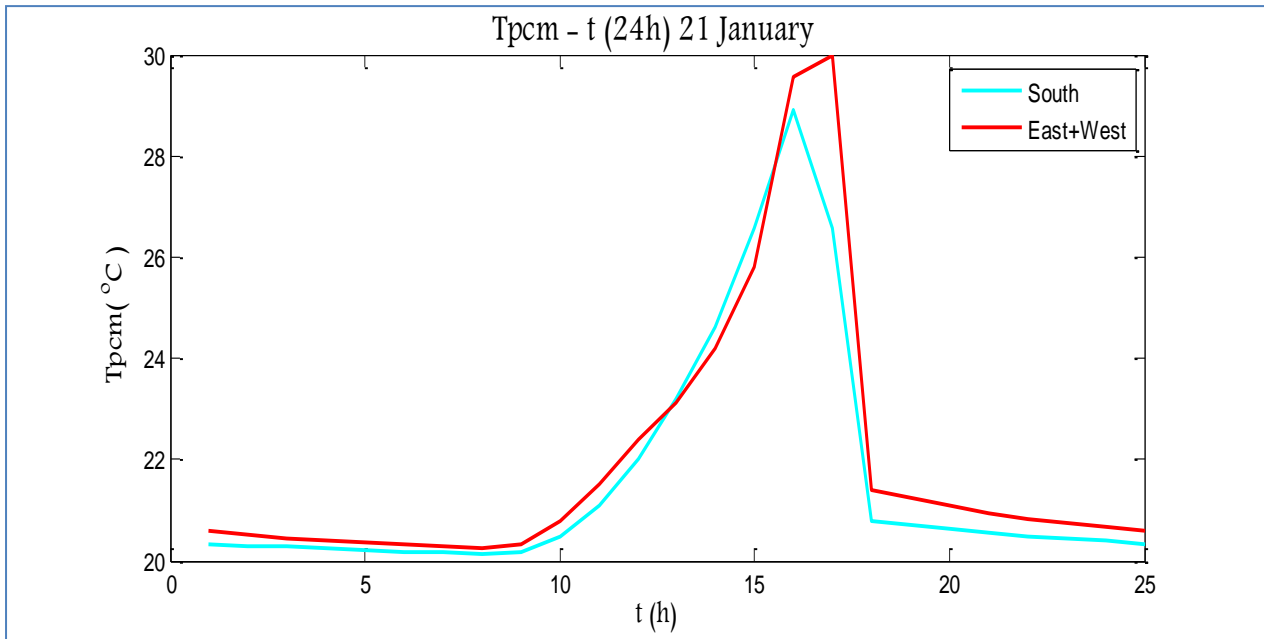


Σχήμα 5.4.3.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 30mm, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

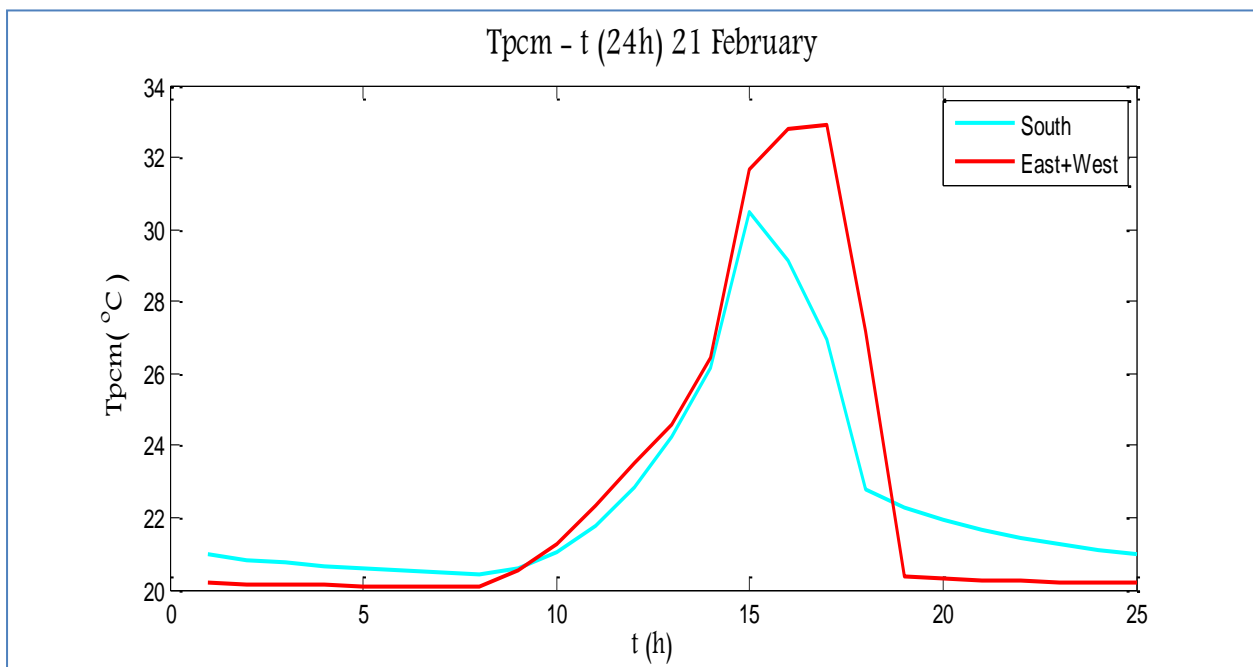


Σχήμα 5.4.3.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 30mm, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

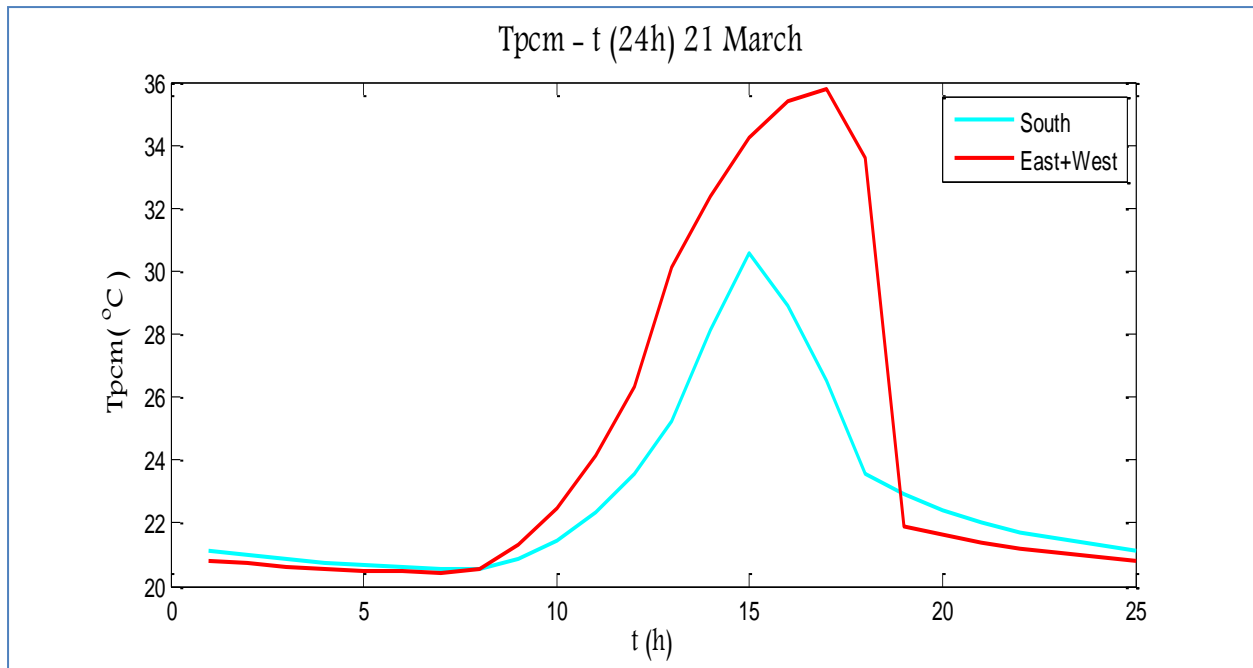
- Στρώμα PCM πάχους 20mm



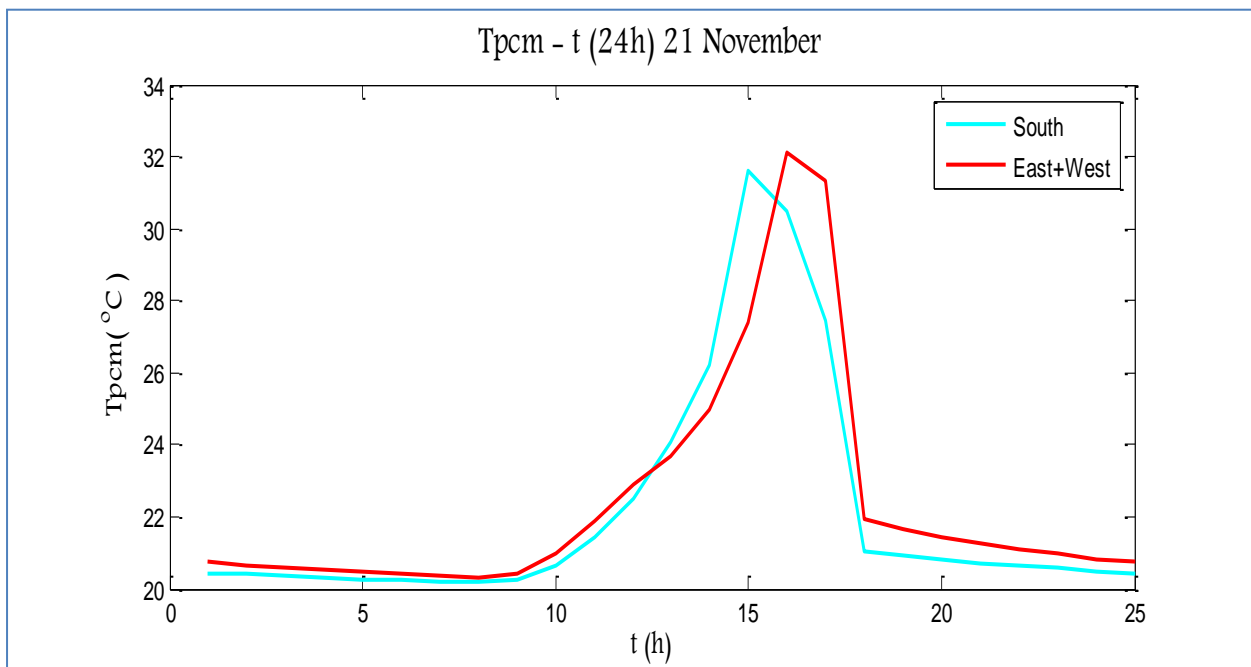
Σχήμα 5.4.3.6: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 20mm, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



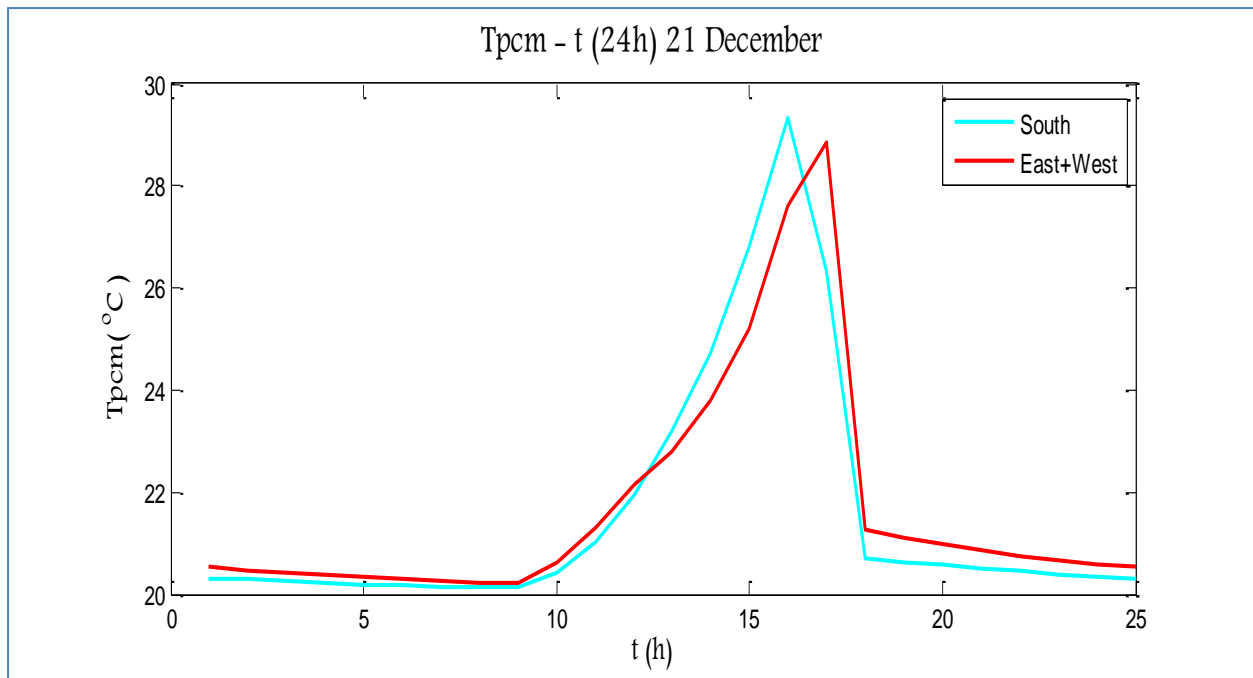
Σχήμα 5.4.3.7: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 20mm, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.4.3.8: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 20mm, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

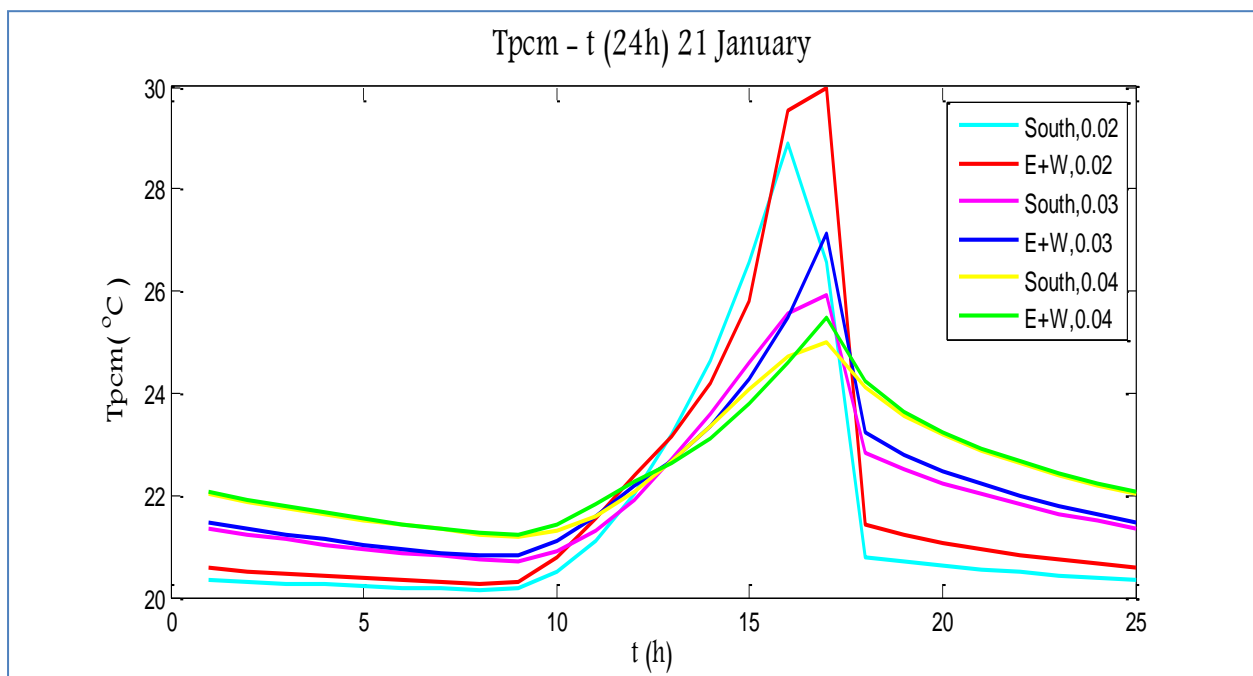


Σχήμα 5.4.3.9: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 20mm, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

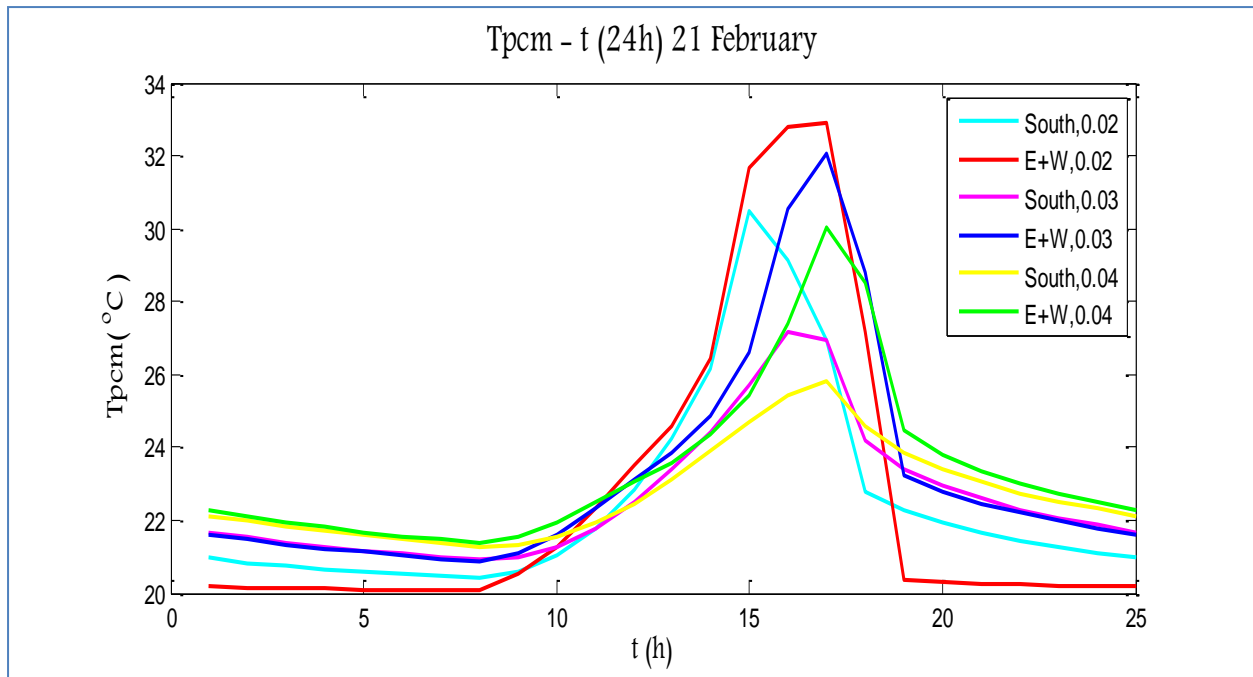


Σχήμα 5.4.3.10: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 20mm, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

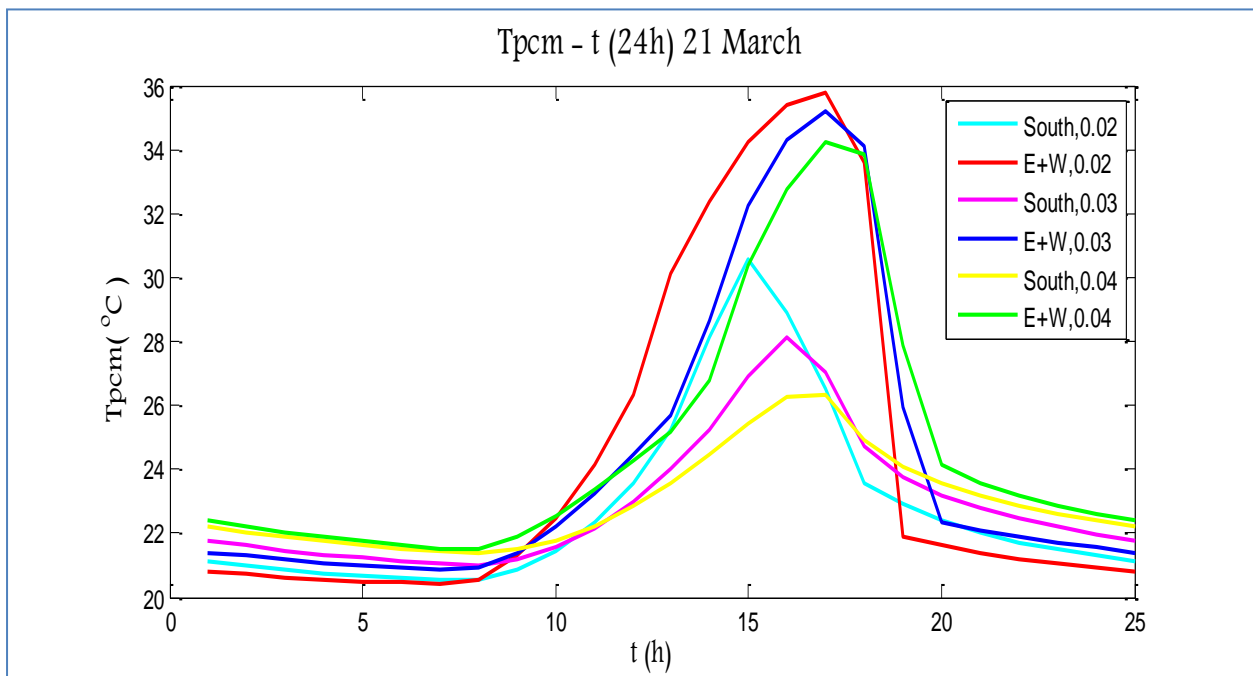
- Στρώμα PCM διαφορετικών παχών (40mm,30mm,20mm) σε κοινά διαγράμματα



Σχήμα 5.4.3.11: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

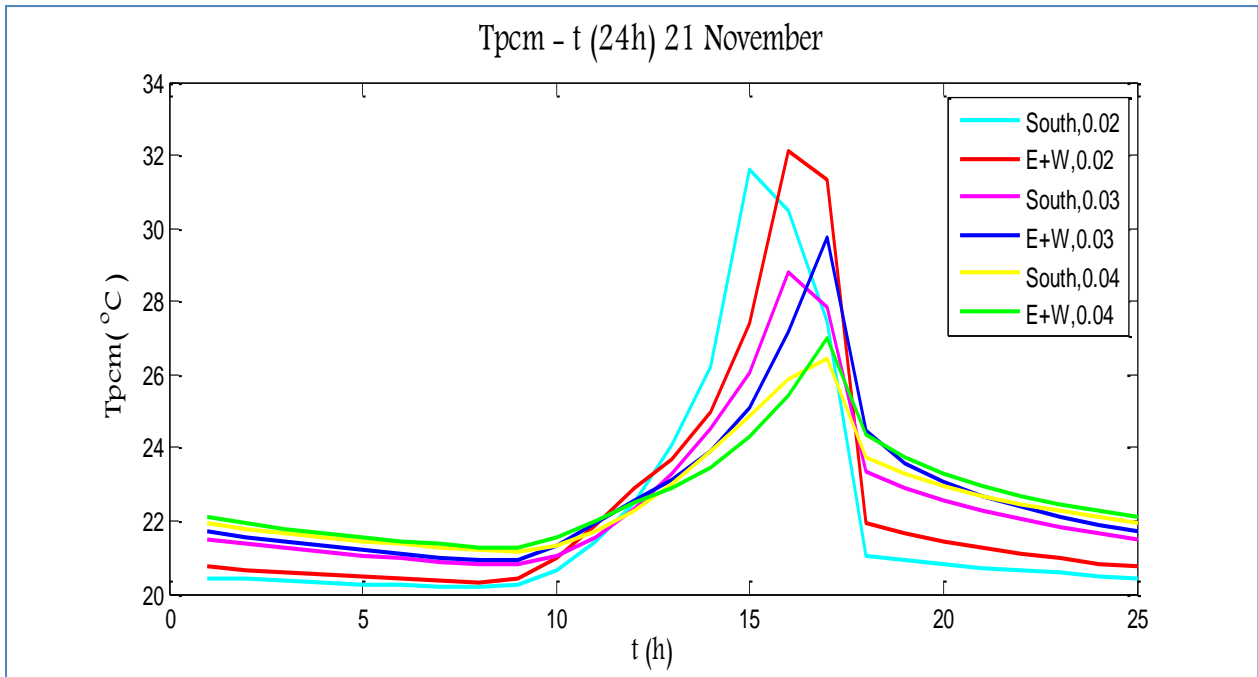


Σχήμα 5.4.3.12: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

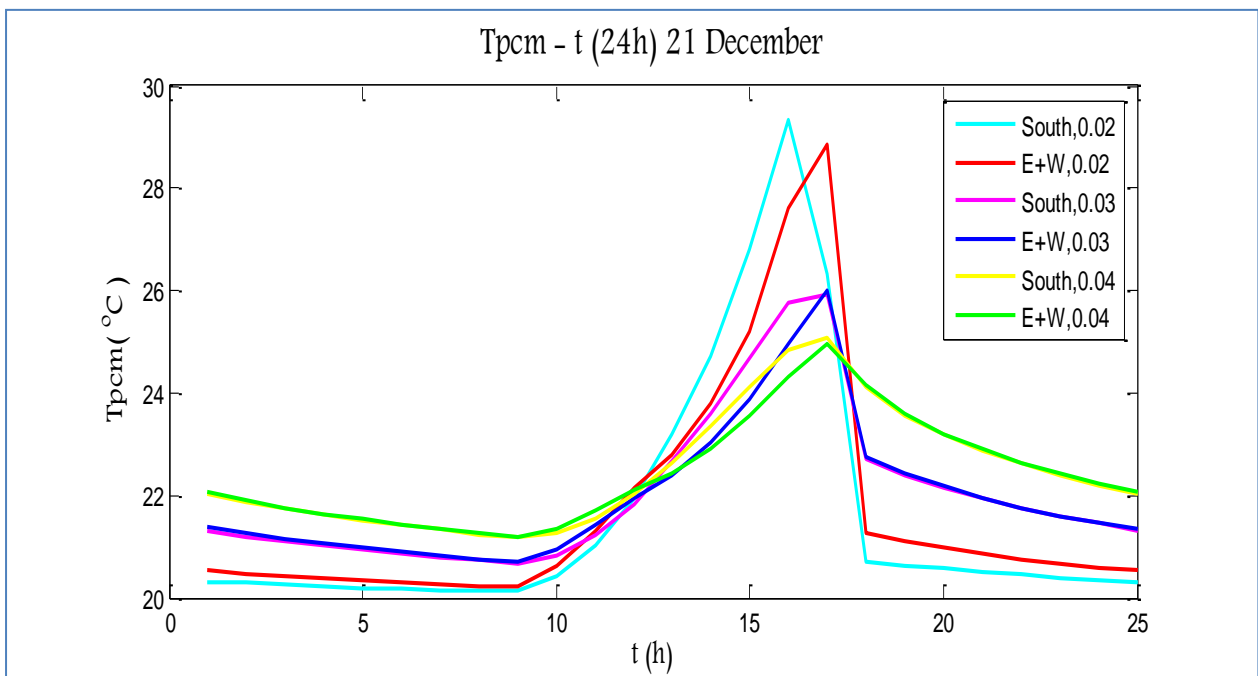


Σχήμα 5.4.3.13: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού





Σχήμα 5.4.3.14: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.4.3.15: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM ανάλογα με το πάχος, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Η επίδραση του πάχους του PCM στη μεταβολή της θερμοκρασίας του είναι ίδια όπως και στις περιπτώσεις μονωμένου τοίχου. Δηλαδή, όσο μειώνεται το πάχος τόσο αυξάνονται οι μέγιστες και μειώνονται οι ελάχιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσει. Αυτό συμβαίνει διότι όσο μειώνεται το πάχος, και κατά συνέπεια η μάζα του PCM, τόσο περισσότερο μπορεί να εκμεταλλευτεί την ηλιακή ακτινοβολία και να αναπτύξει μεγαλύτερες θερμοκρασίες, κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της νύχτας, το στρώμα PCM με το μικρότερο πάχος μειώνεται περισσότερο η θερμοκρασία του αφού εξαντλείται περισσότερο.

Από τα κοινά διαγράμματα παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις, όσο μειώνεται το πάχος, η εμφάνιση των μέγιστων θερμοκρασιών πραγματοποιείται νωρίτερα στη διάρκεια της ημέρας. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η μικρότερη μάζα PCM μπορεί να απορροφήσει την ηλιακή ακτινοβολία πιο άμεσα και να αυξήσει τη θερμοκρασία του, αλλάζοντας φάση.

Όσον αφορά τους διαφορετικούς προσανατολισμούς, το PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο σε σχέση με το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού. Τον Νοέμβριο κινούνται στα ίδια επίπεδα, ενώ το Φεβρουάριο και τον Μάρτιο, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην δεύτερη περίπτωση παρουσιάζουν περισσότερη αύξηση. Αυτό συμβαίνει για όλα τα πάχη που μελετήθηκαν.

Τέλος, και στα παραπάνω διαγράμματα για όλες τις περιπτώσεις παχών υπάρχει μια διαφοροποίηση στην εμφάνιση των μέγιστων θερμοκρασιών. Αρχικά φαίνεται ότι το στρώμα PCM της δεύτερης περίπτωσης (2 υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού) αρχίζει να αναπτύσσει θερμοκρασίες τις πρωινές ώρες, οι οποίες όμως κινούνται σε χαμηλά επίπεδα λόγω της ασθενούς ηλιακής ακτινοβολίας ανατολικού προσανατολισμού. Στη συνέχεια παρουσιάζει μια καμπή, καθώς τις ώρες 11:00-15:00 περίπου ο ήλιος βλέπει τον τοίχο νότιου προσανατολισμού και τελικά, αναπτύσσει τις μέγιστες θερμοκρασίες τις απογευματινές ώρες, όπου υπάρχει έντονη ηλιακή ακτινοβολία στον δυτικό προσανατολισμό.

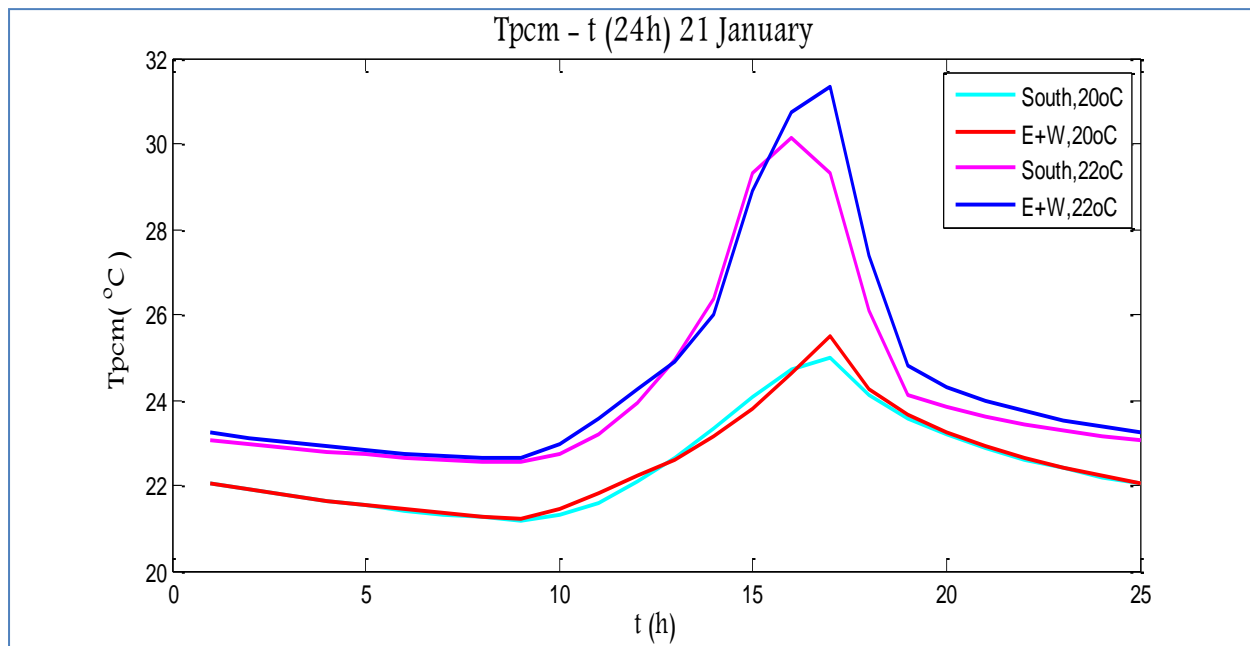
#### 5.4.4 Παραμετρική μελέτη ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Στη παρούσα μελέτη θα γίνει έλεγχος της επίδρασης της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου στις θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM. Πραγματοποιείται αλλάζοντας τη εσωτερική θερμοκρασία, η οποία είναι  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  στις προηγούμενες μελέτες, αρχικά αυξάνοντάς την σε  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$  και στη συνέχεια μειώνοντάς την σε  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ . Οι θερμοκρασίες του PCM προκύπτουν και στις δύο περιπτώσεις για την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα.

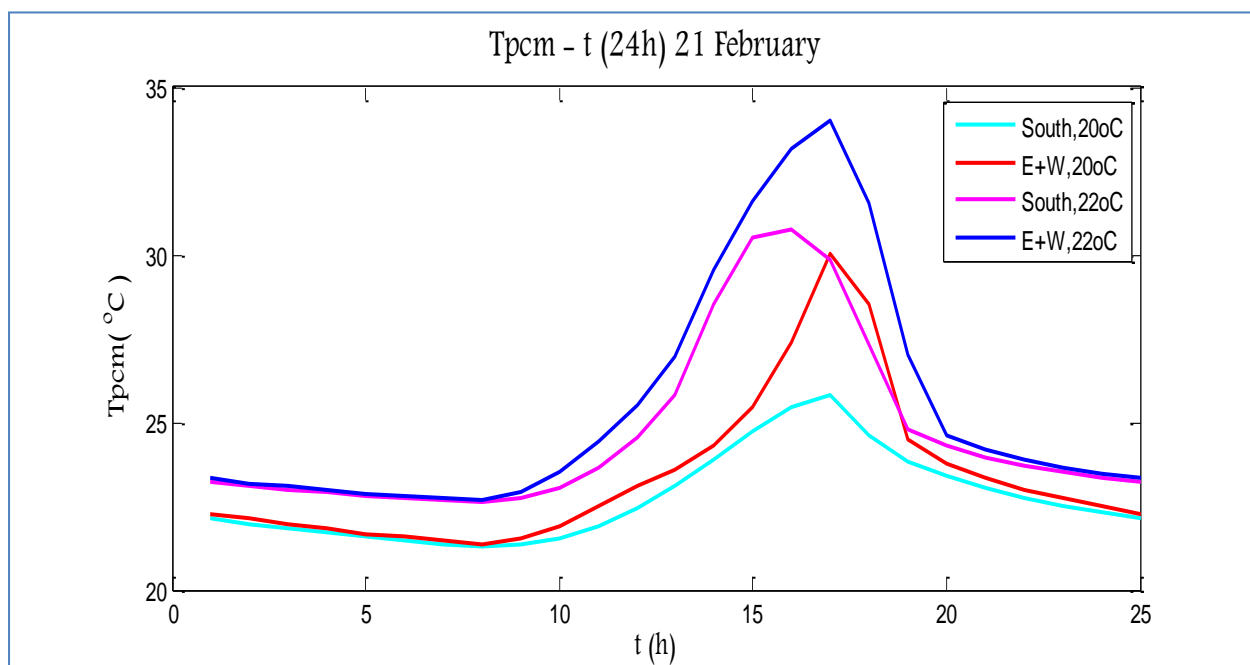
Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια με αυτή της μελέτης στην ενότητα 5.4.2, με αλλαγή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου στις σχέσεις (5.4.2.10 και 5.4.2.11) και πραγματοποίηση επαναληπτικής διαδικασίας, ώστε να προκύψουν οι νέες θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM κατά τη διάρκεια του 24ωρου για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.

Το πάχος του εξεταζόμενου PCM είναι 40mm και οι μήνες μελέτης είναι Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος, Νοέμβριος και Δεκέμβριος όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

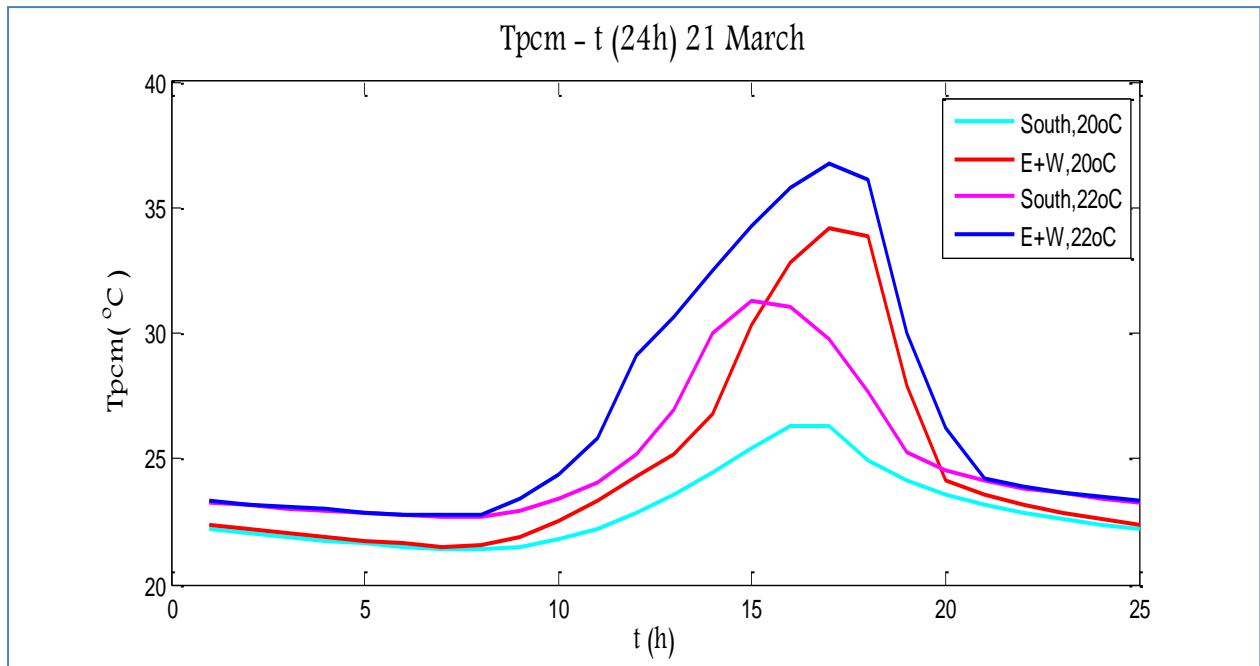
**Α. Εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$  για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού**



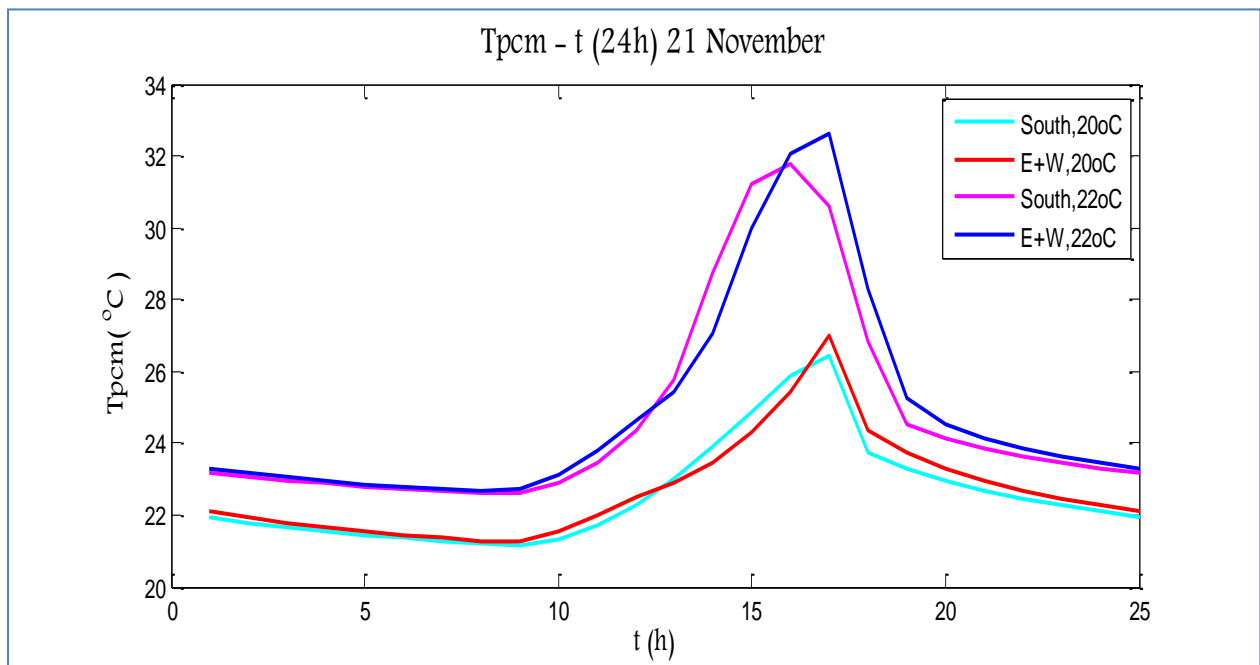
**Σχήμα 5.4.4.1:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου



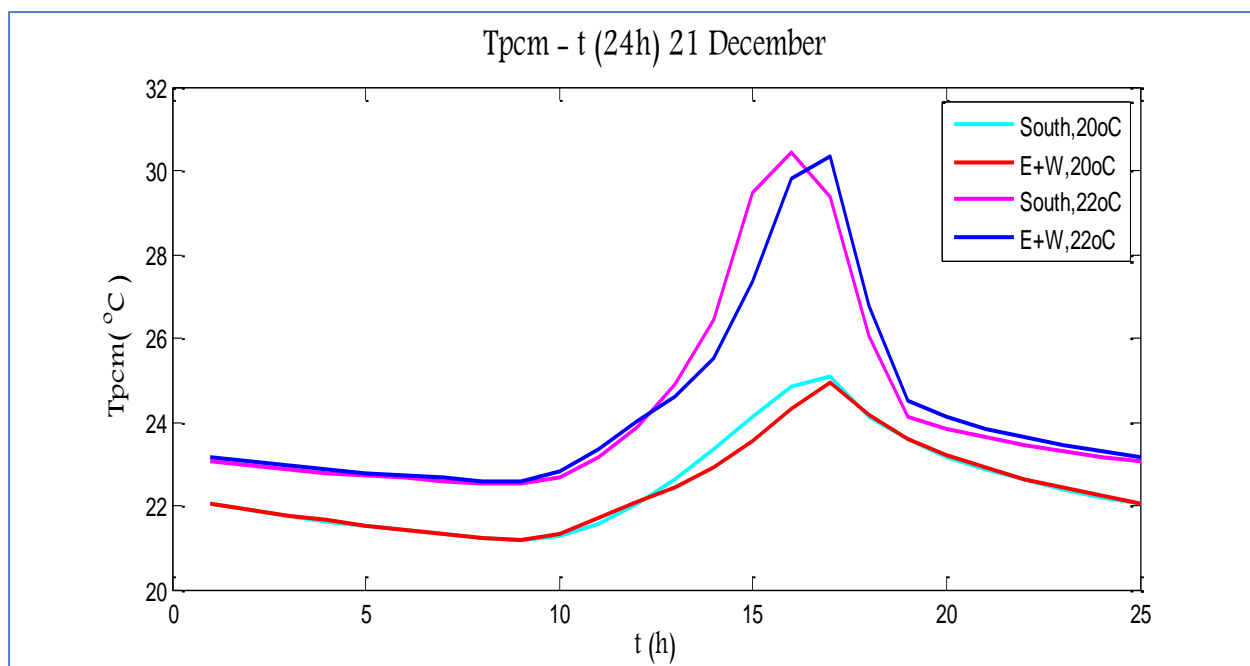
**Σχήμα 5.4.4.2:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου



**Σχήμα 5.4.4.3:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού την 21<sup>η</sup> Μαρτίου



**Σχήμα 5.4.4.4:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου



Σχήμα 5.4.4.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

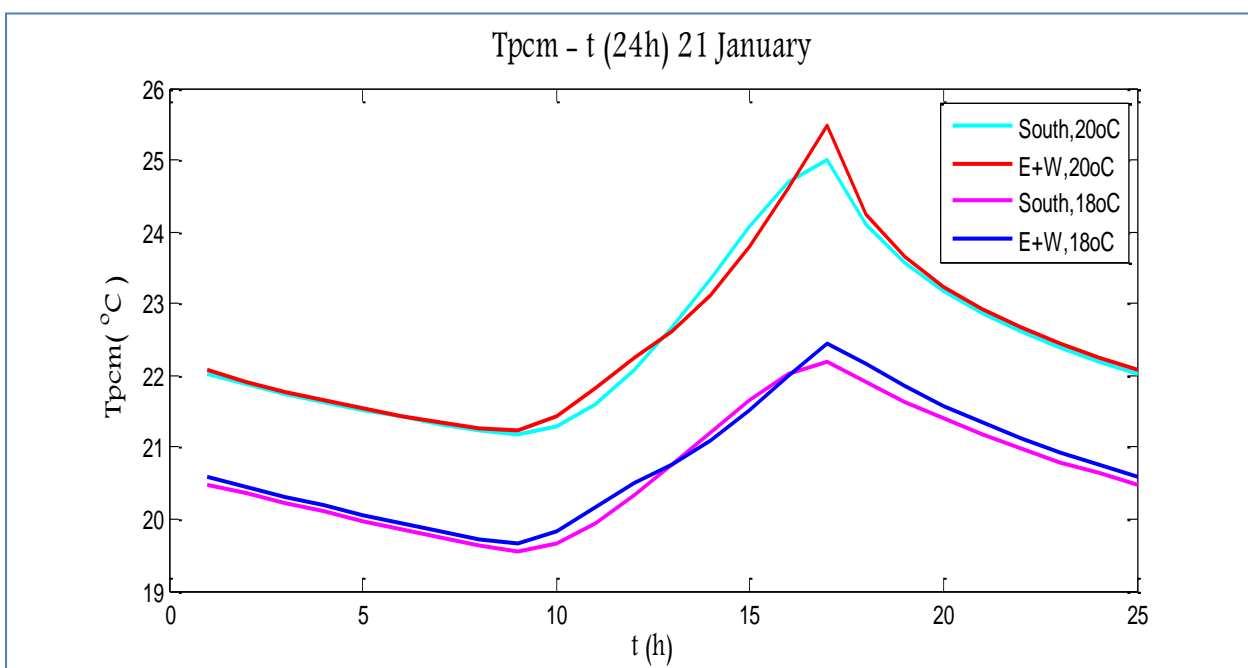
## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Αυξάνοντας της εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου σε  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , αυξάνεται και η θερμοκρασία του PCM σε όλους τους εξεταζόμενους μήνες και των δύο περιπτώσεων, σε σχέση με τις θερμοκρασίες που αναπτύσσει όταν η εσωτερική θερμοκρασία που επικρατεί στο δωμάτιο είναι  $20^{\circ}\text{C}$ . Παράλληλα με την αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του PCM, παρατηρείται και αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας που αναπτύσσει, σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση σε όλους τους προσανατολισμούς.

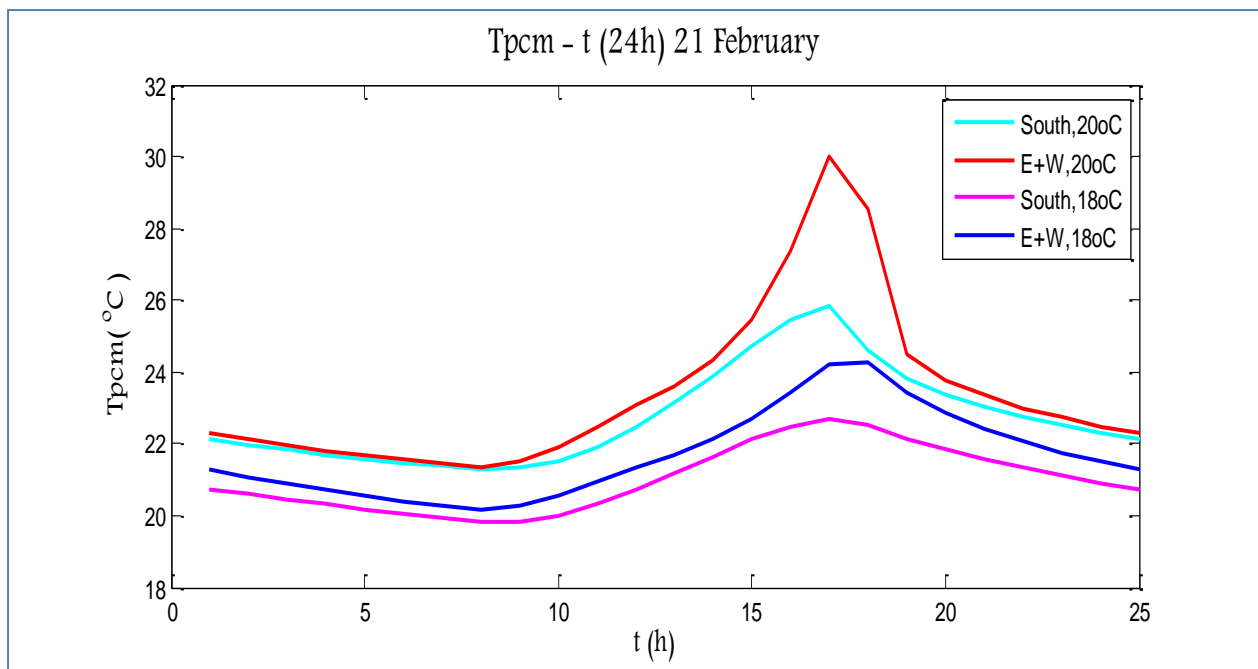
Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (5.4.2.10) και (5.4.2.11) για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του PCM, συμπεραίνεται ότι αυξάνοντας την εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}$ , αυξάνεται και η θερμοκρασία του PCM. Η αύξηση των ελάχιστων θερμοκρασιών οφείλεται στο ότι, λόγω της αύξησης της σταθερής θερμοκρασίας που επικρατεί στο δωμάτιο, το PCM της βραδινές ώρες δεν μπορεί να προσδώσει περισσότερη θερμότητα στο δωμάτιο και να αποκτήσει θερμοκρασία μικρότερη των  $22^{\circ}\text{C}$ .

Τα παραπάνω ισχύουν εξίσου και στις δύο περιπτώσεις εξεταζόμενων δωματίων και οι διαφορές που παρατηρούνται για εσωτερική θερμοκρασία 22°C είναι ίδιες με αυτές για εσωτερική θερμοκρασία 20°C. Δηλαδή το στρώμα PCM των εξεταζόμενων δωματίων με υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού είναι περισσότερο αποδοτικό τον Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο, τον Νοέμβριο κινείται στις ίδιες τιμές με το στρώμα PCM των εξεταζόμενων δωματίων με 2 υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, ενώ Φεβρουάριο και Μάρτιο περισσότερο αποδοτικό είναι το στρώμα PCM της δεύτερης περίπτωσης. Η μετατόπιση των μέγιστων θερμοκρασιών που παρατηρείται και σε αυτήν τη μελέτη οφείλεται στη διαφορετική ώρα εμφάνισης έντονης ακτινοβολίας στον νότιο και δυτικό προσανατολισμό, αφού στην ανατολή είναι ασθενέστερη.

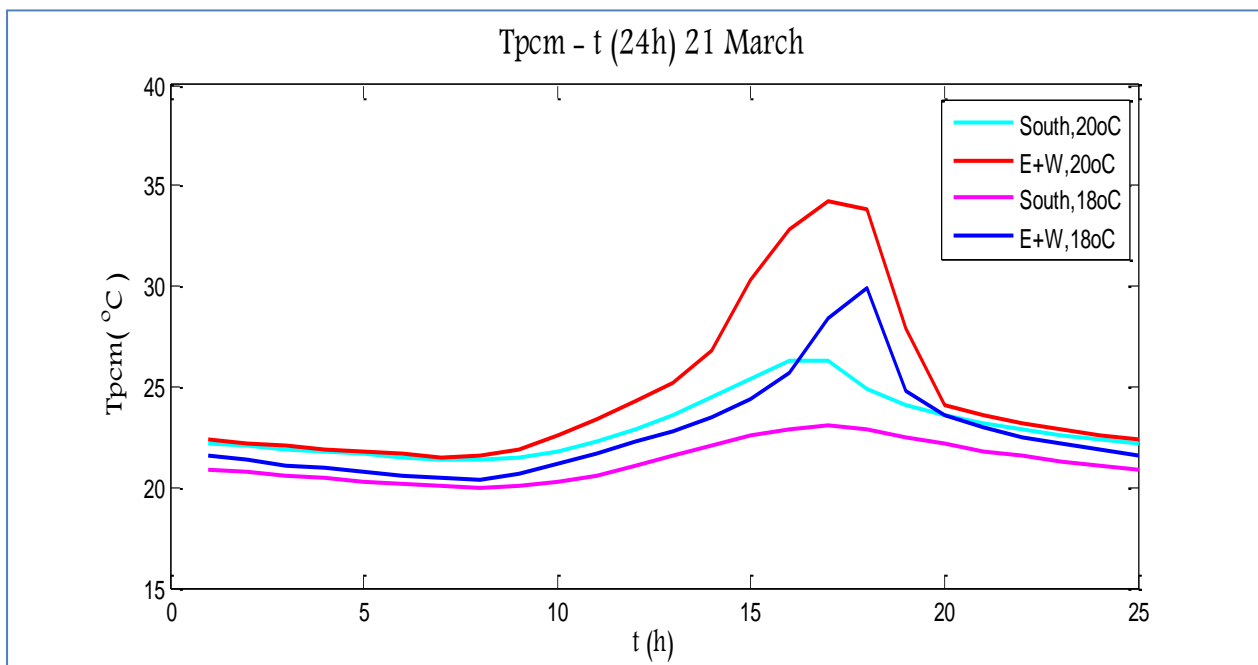
**B. Εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$  για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού**



**Σχήμα 5.4.4.6:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ , για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου

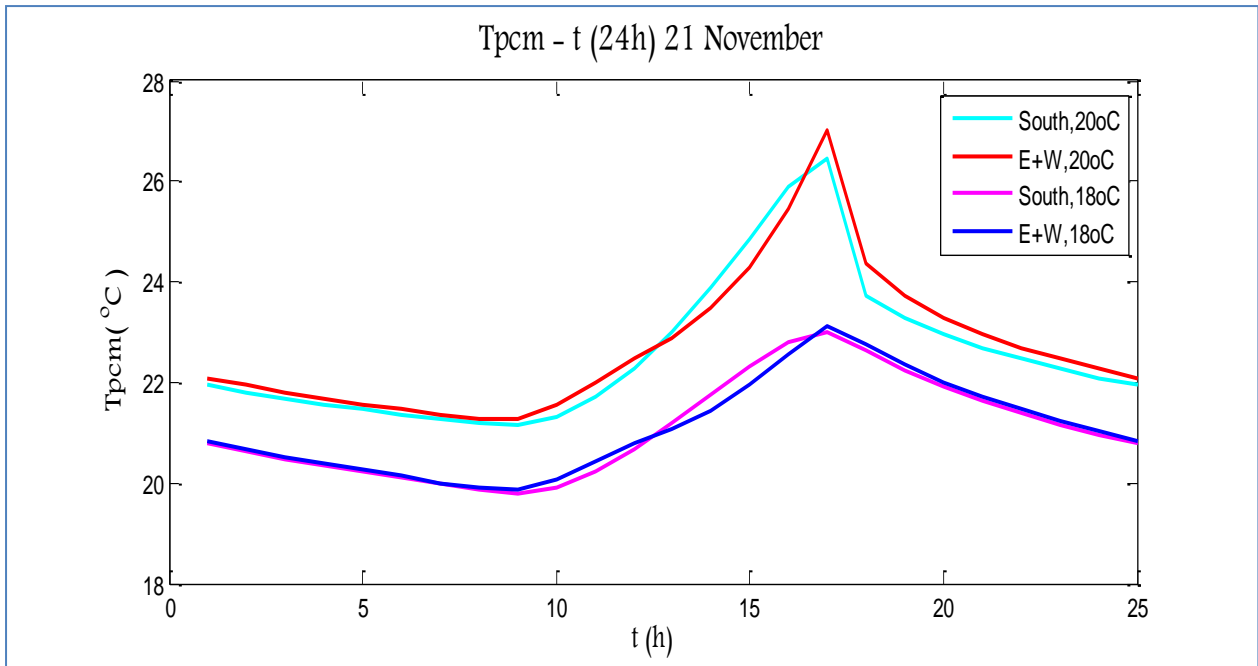


Σχήμα 5.4.4.7: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ , για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

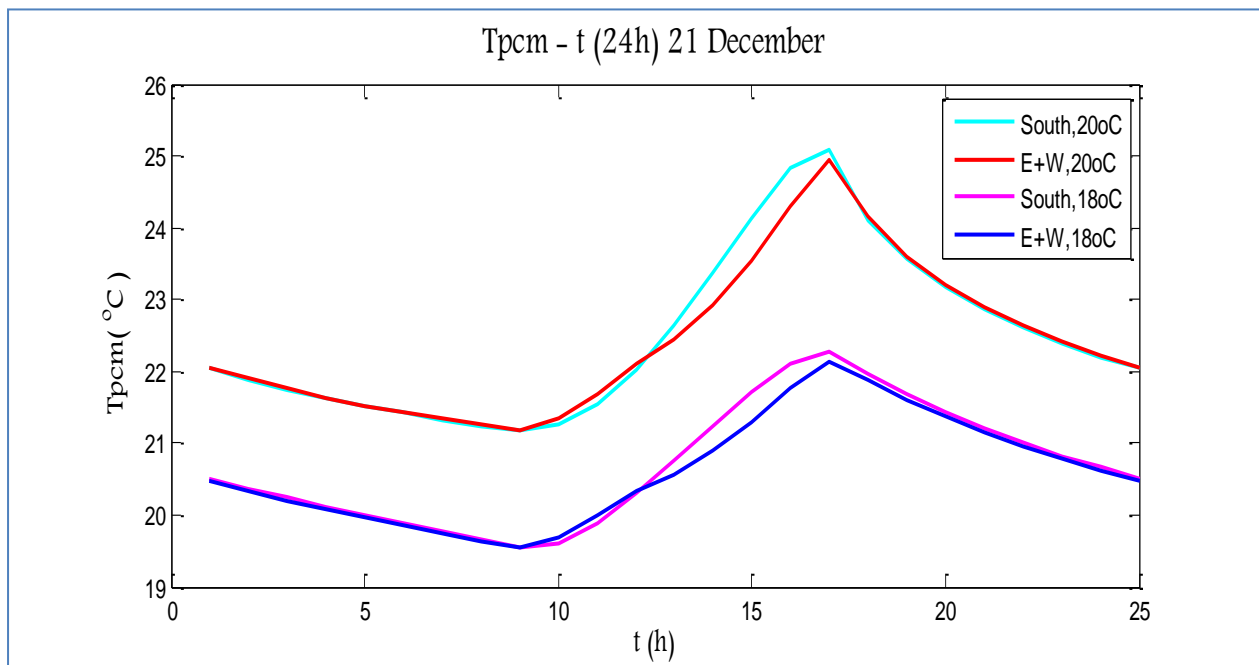


Σχήμα 5.4.4.8: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ , για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού την 21<sup>η</sup> Μαρτίου





**Σχήμα 5.4.4.9:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ , για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου



**Σχήμα 5.4.4.10:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ , για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα με αυτά που προέκυψαν από τη μελέτη για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου 20°C, προκύπτει ότι με την μείωση της  $T_{in}$ , μειώνονται και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM κατά τη διάρκεια της ημέρας σε όλους τους μήνες και για τις δύο περιπτώσεις. Παράλληλα, εμφανίζονται και μειωμένες ελάχιστες θερμοκρασίες του PCM στο 24ωρο, σε σχέση με την αρχική περίπτωση της ενότητας 5.4.2.

Αυτό συμβαίνει διότι, λόγω των σχέσεων (5.4.2.10) και (5.4.2.11), μειώνοντας την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου στους 18°C, μειώνεται και η θερμοκρασία του στρώματος PCM σε όλη τη διάρκεια του 24ωρου. Από την άλλη, η μείωση των ελάχιστων τιμών της θερμοκρασίας του οφείλεται στο γεγονός ότι η ελάττωση της σταθερής εσωτερικής θερμοκρασίας δωματίου, δίνει περιθώριο στο PCM να προσδώσει θερμότητα στο δωμάτιο, χαμηλότερη των 20°C, μέχρι το όριο των 18°C που επικρατούν στο εσωτερικό.

Τα παραπάνω ισχύουν εξίσου και για τις δύο περιπτώσεις νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού. Οι διαφορές που παρατηρούνται είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές των προηγούμενων μελετών για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου 20°C και 22°C.

### 5.4.5 Σύγκριση της προσδιδόμενης ενέργειας $Q_{\text{συναγωγής}}$ στο δωμάτιο από στρώμα PCM νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Στη συγκεκριμένη μελέτη γίνεται σύγκριση, όσο αναφορά την ενέργεια που προσδίδεται στον εσωτερικό αέρα του δωματίου από το στρώμα PCM έναντι ενός υαλοπίνακα νότιου και δύο υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, ώστε να υπάρξει μια σαφέστερη εικόνα της απόδοσής του.

Λαμβάνοντας υπόψη τις θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM, πάχους 40mm, όπως έχουν υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 5.4.2, από τις σχέσεις (5.4.2.10) και (5.4.2.11) υπολογίζεται η θερμότητα που προσδίδει το στρώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου ως εξής:

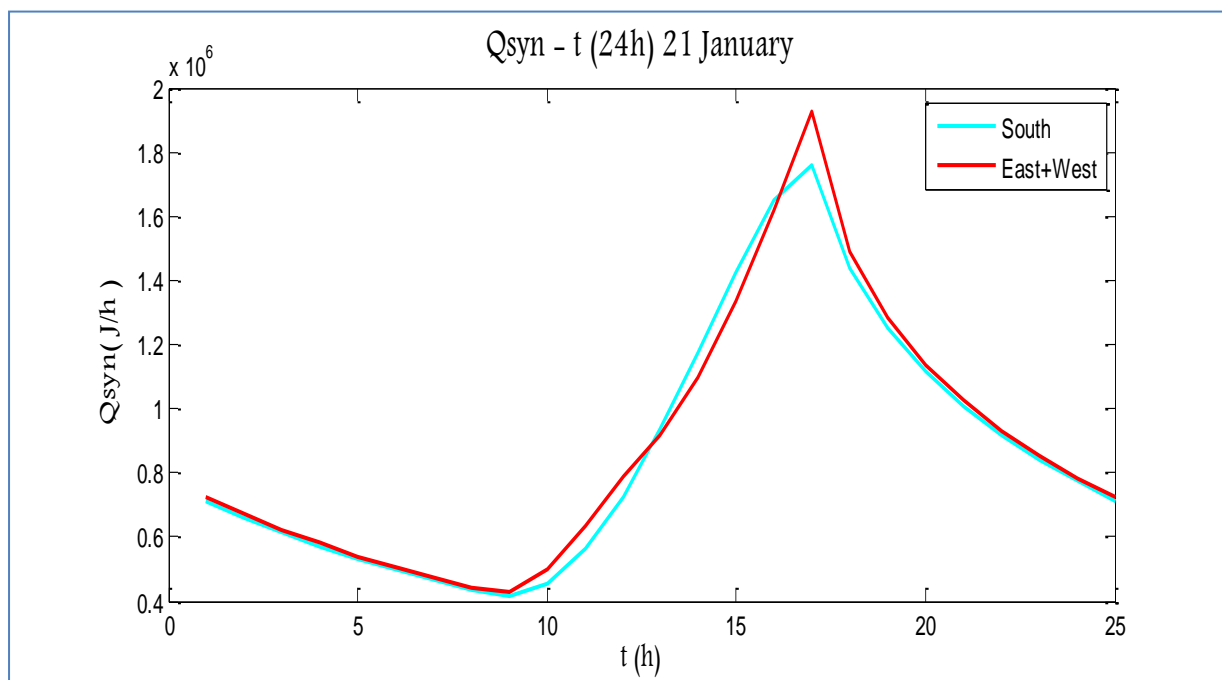
$$Q_{\text{συναγωγής,αγωγής}} = 3600 * A_{\text{τοίχου}} * U_1 * (T_{\text{PCM}} - T_{\text{in}}) + 3600 * A_{\text{τοίχου}} * U_2 * (T_{\text{PCM}} - T_{\text{in}}) \quad (5.4.5.1)$$

- $U_1 = \left(\frac{1}{h_{\text{in}}} + \frac{l_{\Gamma}}{k_{\Gamma}}\right)^{-1}$ , συντελεστής διαπερατότητας
- $U_2 = \left(\frac{1}{h_{\text{in}}} + \frac{l_{\Gamma}}{k_{\Gamma}}\right)^{-1}$ , συντελεστής διαπερατότητας
- $h_{\text{in}} = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω συναγωγής με τον εσωτερικό αέρα
- $l_{\Gamma} = 12,5\text{mm}$ , πάχος γυψοσανίδας
- $k_{\Gamma} = \frac{0,21\text{W}}{\text{m}}\text{°C}$ , συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας γυψοσανίδας
- $A_{\text{τοίχου}} = (\text{πλάτος τοίχου}) \times (\text{ύψος τοίχου})$
- $T_{\text{in}} = 20\text{°C}$

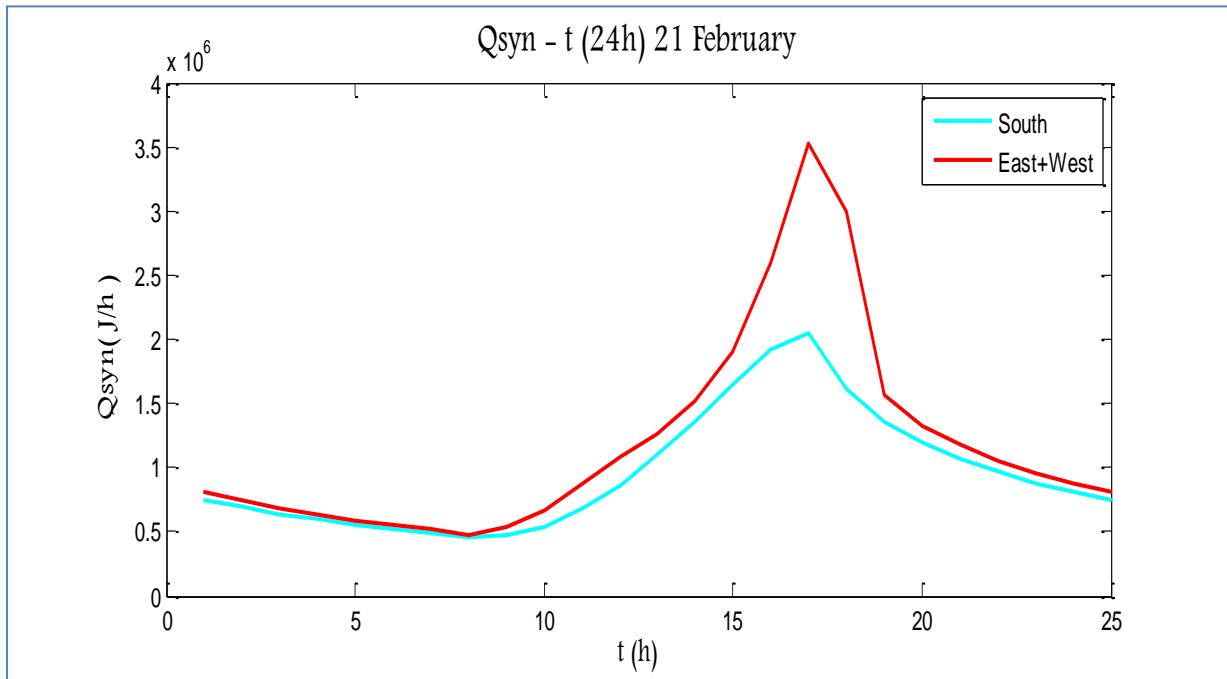
Η μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{\text{συναγωγής}}$  υπολογίζεται σε (J/h) με βάση τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του PCM ( $T_{\text{PCM}}$ ), ο οποίος πραγματοποιήθηκε για ένα 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα, με επαναληπτική διαδικασία από τη 1:00 έως τις 00:00, με βήμα μιας ώρας.

Η σχέση (5.4.5.1) ισχύει εξίσου και στις δύο περιπτώσεις, αλλάζοντας κάθε φορά οι θερμοκρασίες του PCM που έχουν ήδη υπολογιστεί (Κεφάλαιο 5.4.2).

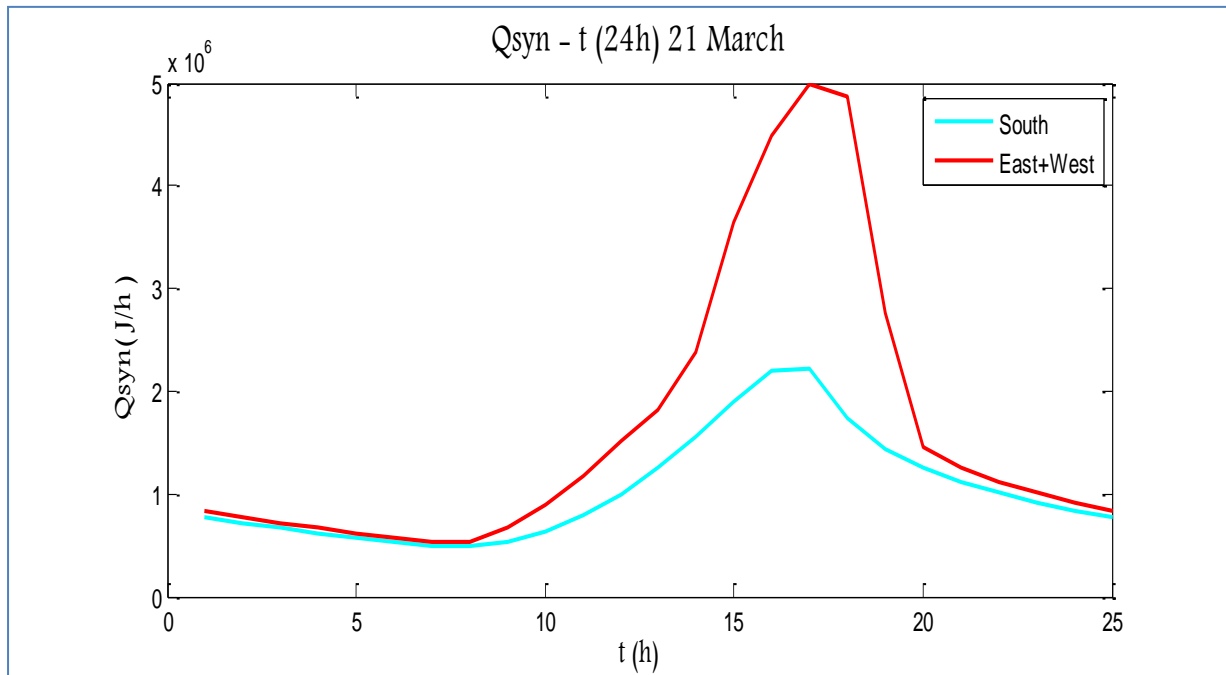
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι τιμές της  $Q_{\text{συναγωγής}}$  (J/h), στρώματος PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού και δύο υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.



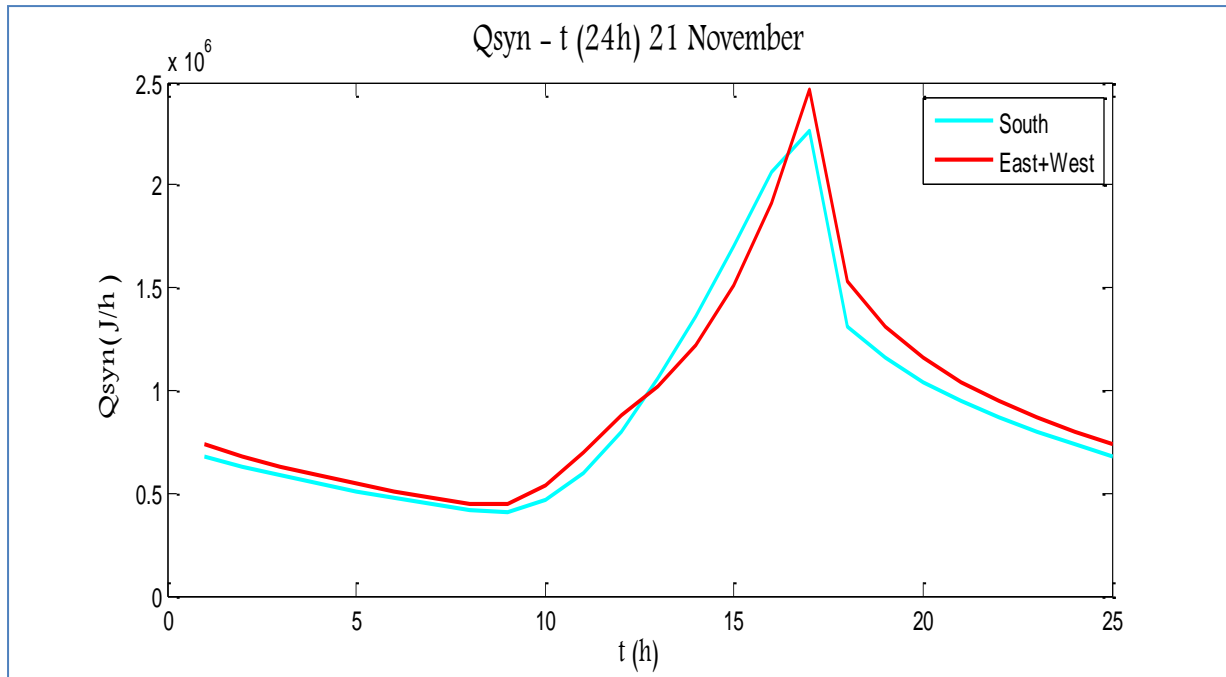
**Σχήμα 5.4.5.1:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{\text{syn}}$ (J/h) στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



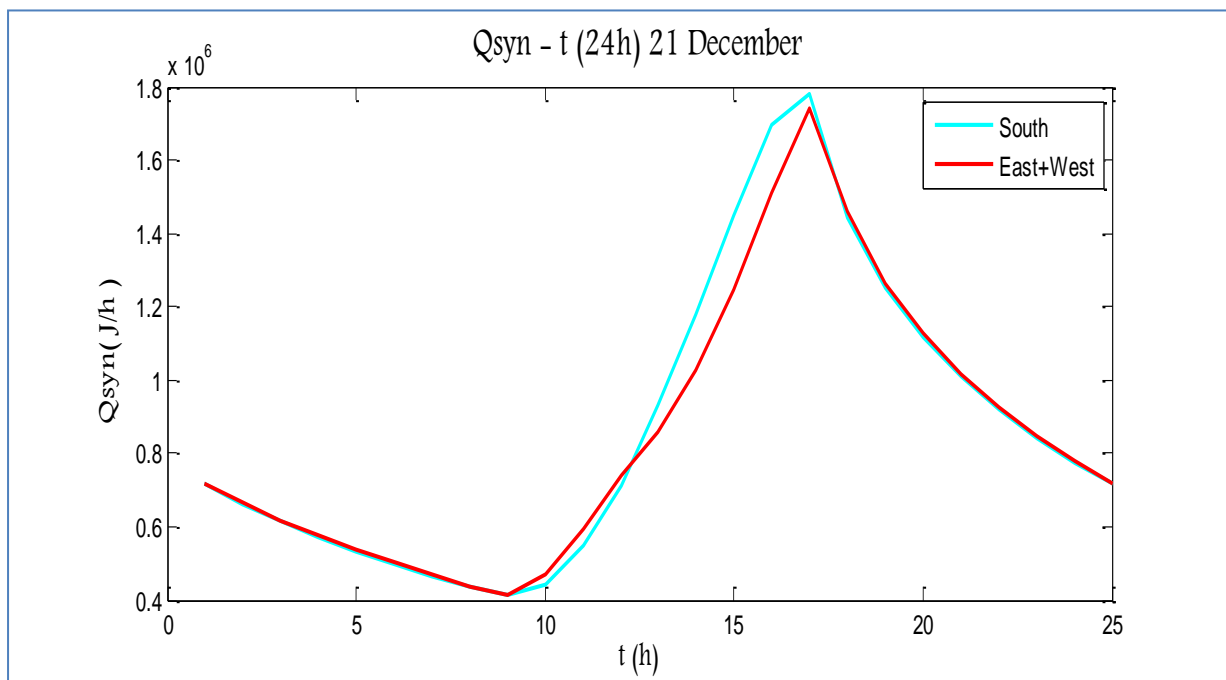
**Σχήμα 5.4.5.2:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



**Σχήμα 5.4.5.3:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Μαρτίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.4.5.4: Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου νότιο, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.4.5.5: Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου νότιο, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

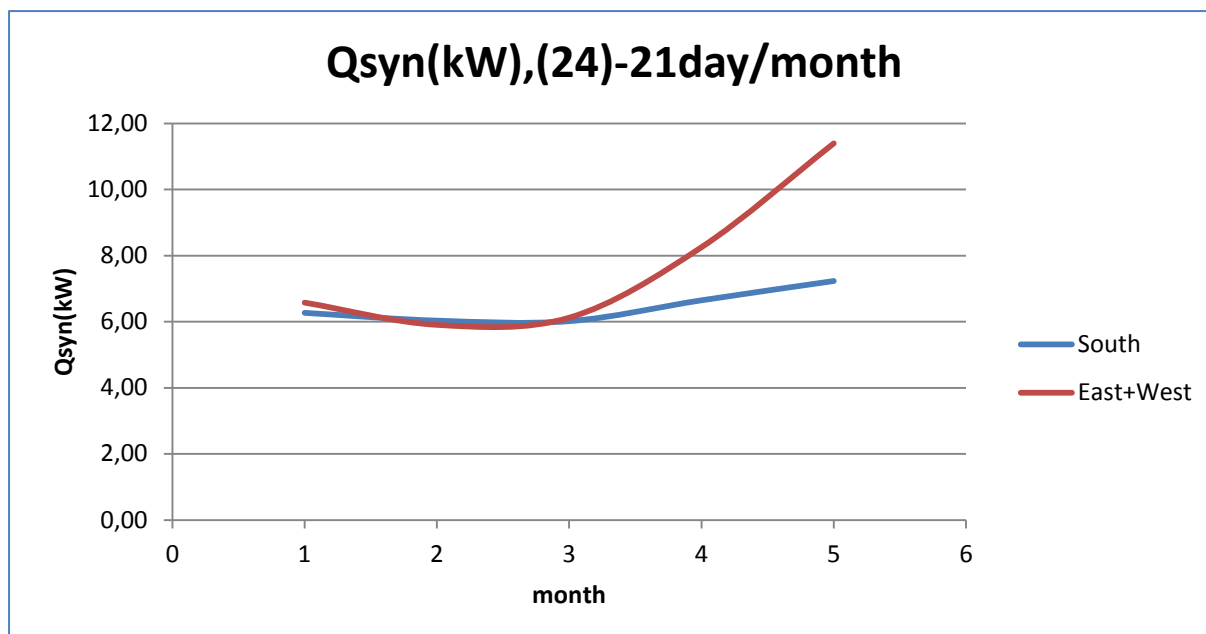
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συνολικό ποσό της θερμότητας που προσδίδει το στρώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου για όλο το 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.5.1 και απεικονίζονται στο Σχήμα 5.4.5.6. Η συνολική θερμότητα συναγωγής υπολογίζεται ως εξής:

$$Q_{syn}(kW) = \sum \frac{Q_{syn,i}(J)}{3600*1000} \quad (5.4.5.2)$$

Για την απεικόνιση του διαγράμματος δόθηκαν αύξοντες αριθμοί που αντιστοιχούν στην 21<sup>η</sup> ημέρα του κάθε μήνα. Έτσι όπου:

- 1=21<sup>η</sup> Νοεμβρίου
- 2=21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου
- 3=21<sup>η</sup> Ιανουαρίου
- 4=21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου
- 5=21<sup>η</sup> Μαρτίου

Πίνακας 5.4.5.1: Qσυναγωγής (kW),(24h)			
		Νότος	Ανατολή-Δύση
21 <sup>η</sup> Νοεμβρίου	1	6,27	6,58
21 <sup>η</sup> Δεκεμβρίου	2	6,03	5,91
21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου	3	6,02	6,12
21 <sup>η</sup> Φεβρουαρίου	4	6,65	8,26
21 <sup>η</sup> Μαρτίου	5	7,23	11,40



Σχήμα 5.4.5.6: Μεταβολή της θερμότητας συναγωγής  $Q_{syn}(kW)$ , την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα, για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τα διαγράμματα (Σχήματα 5.4.5.1-5.4.5.5) παρατηρείται ότι το στρώμα PCM και των δύο περιπτώσεων προσδίδει θερμότητα στο δωμάτιο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, αφού η θερμοκρασία του είναι μεγαλύτερη από την σταθερή εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου ( $T_{in}=20^{\circ}C$ ). Η μέγιστη θερμότητα συναγωγής εμφανίζεται τις απογευματινές ώρες, διότι εκείνες τις ώρες αναπτύσσονται και οι μέγιστες θερμοκρασίες του στρώματος PCM και υπάρχει υψηλότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ PCM και δωματίου.

Προκύπτει, επίσης, ότι το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού προσδίδει υψηλότερο ποσό θερμότητας στο δωμάτιο τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο αφού σε εκείνους τους μήνες αναπτύσσει μεγαλύτερες θερμοκρασίες, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου οι δύο περιπτώσεις στρωμάτων PCM κινούνται στα ίδια επίπεδα και προσδίδουν ίδια περίπου ποσά θερμότητας στο δωμάτιο, ενώ το αντίθετο συμβαίνει τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο, όπου το στρώμα PCM έναντι δύο υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού είναι περισσότερο εκμεταλλεύσιμο ως προς το ποσό της θερμότητας που δίνει,



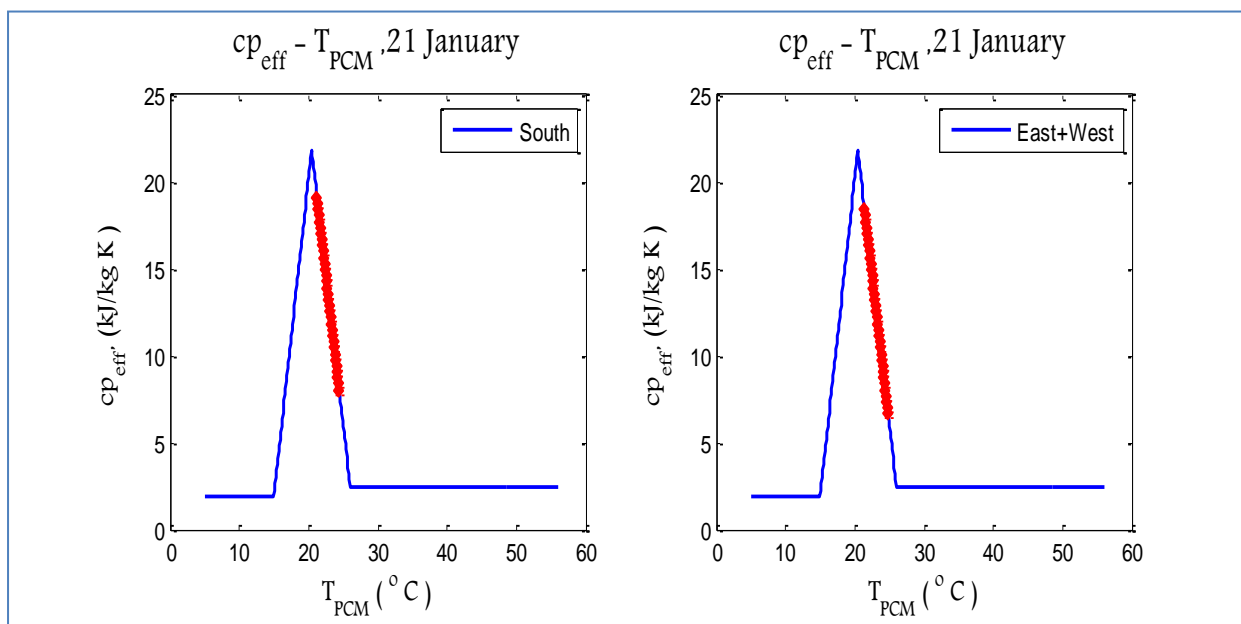
αφού και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει είναι υψηλότερες (Κεφάλαιο 5.4.2).

Από τη μορφή των διαγραμμάτων συμπεραίνεται ότι το στρώμα PCM έναντι 2 υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού αρχίζει να προσδίδει θερμότητα στο δωμάτιο τις πρωινές ώρες, αφού έχει φορτιστεί από την ανατολή. Στη συνέχεια σημειώνει μια μικρή πτώση το ποσό της προσδιδόμενης θερμότητας, αφού ο ήλιος βλέπει τον τοίχο από νότιο προσανατολισμό. Το υψηλότερο ποσό θερμότητας που δίνει στο δωμάτιο σημειώνεται τις απογευματινές ώρες, αφού πρώτα έχει φορτιστεί και από την ηλιακή ακτινοβολία δυτικού προσανατολισμού. Η μέγιστη τιμή προσδιδόμενης θερμότητας του στρώματος PCM νότιου προσανατολισμού προηγείται, καθώς φορτίζεται νωρίτερα σε σχέση με το δυτικό προσανατολισμό.

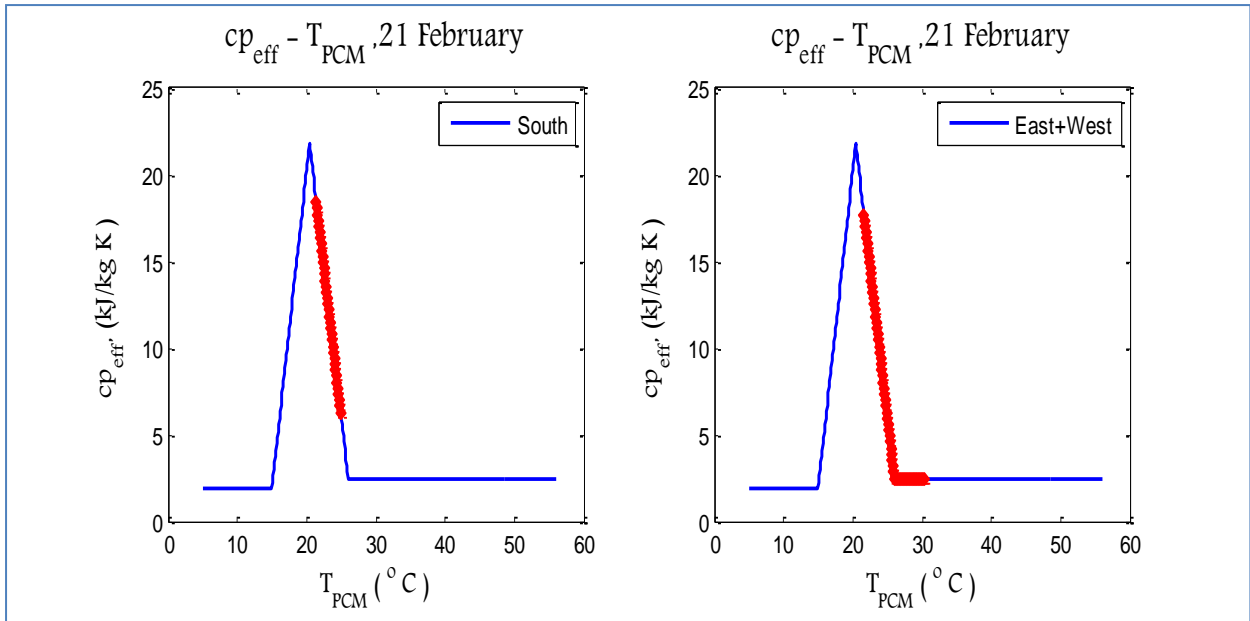
Η μελέτη της συνολικής θερμότητας συναγωγής δείχνει ότι τον Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο παρουσιάζει καμπή κυρίως στο στρώμα έναντι 2 υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού σε σχέση με τον Νοέμβριο, ενώ εκτοξεύεται τον Φεβρουάριο και τον Μάρτιο. Η περίπτωση εξεταζόμενων δωματίων με ένα υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού είναι περισσότερο αποδοτική τον Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο. Συνολικά το στρώμα PCM της δεύτερης περίπτωσης προσδίδει υψηλότερα ποσά θερμότητας στο δωμάτιο.

### 5.4.6 Έλεγχος της απόδοσης με βάση την καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας

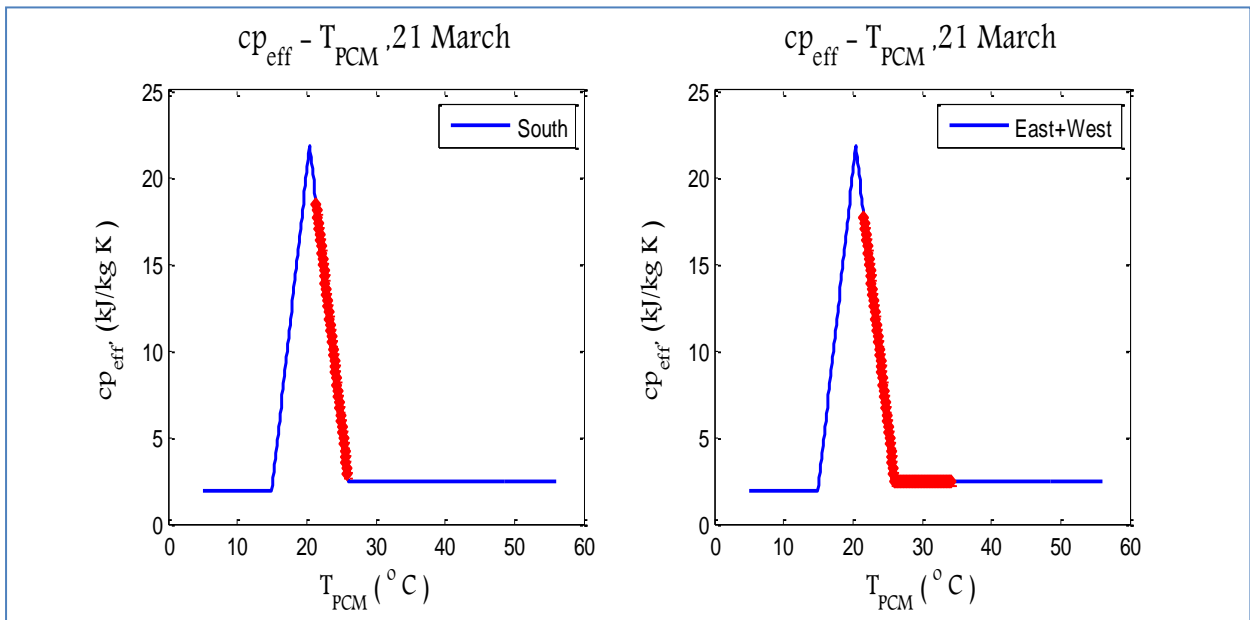
Λαμβάνοντας υπόψη το εύρος θερμοκρασιών που αναπτύσσει το PCM των δύο περιπτώσεων και τις αντίστοιχες τιμές της ενεργού θερμοχωρητικότητας, απεικονίζεται στα παρακάτω διαγράμματα το τμήμα της καμπύλης ενεργού θερμοχωρητικότητας που καταλαμβάνει το PCM (πάχους 40mm) για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών, ώστε να ελεγχθεί η απόδοσή του.



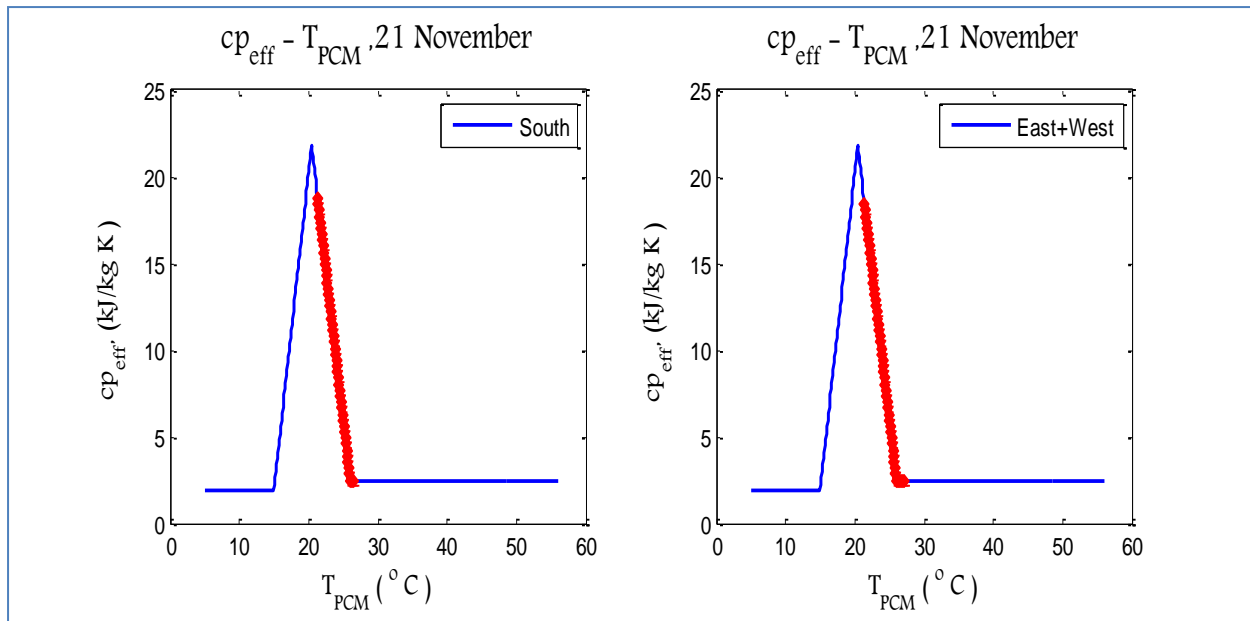
Σχήμα 5.4.6.1: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



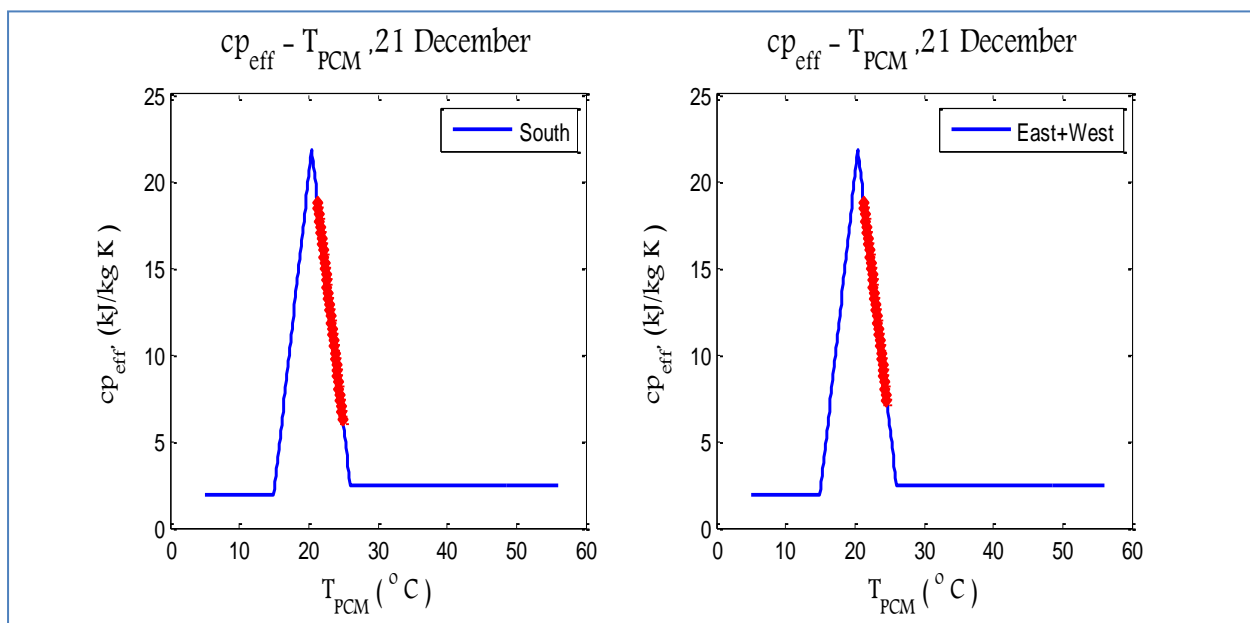
Σχήμα 5.4.6.2: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.4.6.3: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.4.6.4: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.4.6.5: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

## **ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ**

Από τα ανωτέρω διαγράμματα διαπιστώνεται ότι το στρώμα PCM και των δύο περιπτώσεων όλων των εξεταζόμενων μηνών χρησιμοποιεί τη ηλιακή ενέργεια που δέχεται και αλλάζει φάση, καθώς καλύπτει μέρος της διφασικής περιοχής της καμπύλης ενεργού θερμοχωρητικότητας.

Από το τμήμα της καμπύλης που καταλαμβάνει το στρώμα PCM, φαίνεται ότι αυτό της περίπτωσης εξεταζόμενων δωματίων με 2 υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού είναι περισσότερο αποδοτικό σε σχέση με το PCM των εξεταζόμενων δωματίων με ένα υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού κυρίως τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο, όπου και αναπτύσσει υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες. Τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο η περίπτωση νότιου προσανατολισμού είναι κατά ένα μικρό ποσοστό αποδοτικότερο, αφού οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσει είναι μεγαλύτερες, ενώ τον Νοέμβριο και οι δύο περιπτώσεις κινούνται στα ίδια επίπεδα. Λαμβάνονται, δε, περισσότερο υπόψη οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσει το στρώμα PCM στις δύο περιπτώσεις, καθώς οι ελάχιστες θερμοκρασίες δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές.

### 5.4.7 Βαθμοί χρησιμοποίησης του PCM βασισμένοι στην αλλαγή φάσης

Προκειμένου να έχουμε ένα ποσοτικό έλεγχο της απόδοσης του PCM (RT20-πάχους 40mm) για την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών, κρίθηκε αναγκαίος ο υπολογισμός του βαθμού χρησιμοποίησης του PCM, ο οποίος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$n = \frac{A_{\text{προσδιδόμενο}}}{A_{\text{theoretical}}} \quad (5.4.7.1)$$

- $A_{\text{προσδιδόμενο}}$ : είναι η θερμότητα που αποθηκεύει το PCM, η οποία υπολογίζεται από το εμβαδόν του τμήματος της καμπύλης ενεργού θερμοχωρητικότητας που καταλαμβάνει το PCM. Για τον υπολογισμό λαμβάνονται υπόψη οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM και οι αντίστοιχες τιμές της ενεργού θερμοχωρητικότητας.
- $A_{\text{theoretical}}$ : η θερμότητα αλλαγής φάσης

$$A_{\text{theoretical}} = H = 132,1 \text{kJ/kg}, \text{ (Πίνακας 5.3.2.1)}$$

Πίνακας 5.4.7.1: Θερμότητα που αποθηκεύει το PCM και ο βαθμός χρησιμοποίησης του, νότιου προσανατολισμού

	$T_{\text{PCM}}$ <b>max</b> (°C)	$T_{\text{PCM}}$ <b>min</b> (°C)	$C_{\text{p eff}}$ <b>max</b> (kJ/kg*K)	$C_{\text{p eff}}$ <b>min</b> (kJ/kg*K)	$A_{\text{προσδιδόμενο}}$ (kJ/kg)	<b>n</b> (%)
<b>Ιανουάριος</b>	25	21,19	19,1	5,95	47,72025	36,12
<b>Φεβρουάριος</b>	25,82	21,29	18,75	3,19	49,6941	37,62
<b>Μάρτιος</b>	26,34	21,38	18,41	2,5	49,1521	37,21
<b>Νοέμβριος</b>	26,45	21,16	19,1	2,5	53,397	40,42
<b>Δεκέμβριος</b>	25,08	21,17	19,1	5,6	48,2885	36,55

**Πίνακας 5.4.7.2: Θερμότητα που αποθηκεύει το PCM και ο βαθμός χρησιμοποίησης του, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού**

	$T_{PCM}$ <b>max</b> (°C)	$T_{PCM}$ <b>min</b> (°C)	$C_{p\text{eff}}$ <b>max</b> (kJ/kg*K)	$C_{p\text{eff}}$ <b>min</b> (kJ/kg*K)	$A_{\text{προσδιδόμενο}}$ (kJ/kg)	<b>n</b> (%)
<b>Ιανουάριος</b>	25,49	21,23	19,1	4,23	49,6929	37,62
<b>Φεβρουάριος</b>	30,03	21,37	18,41	2,5	58,48165	44,27
<b>Μάρτιος</b>	34,2	21,52	18,06	2,5	66,5544	50,38
<b>Νοέμβριος</b>	27,01	21,27	18,75	2,5	52,78125	39,96
<b>Δεκέμβριος</b>	24,96	21,19	19,1	5,95	47,21925	35,75

### ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

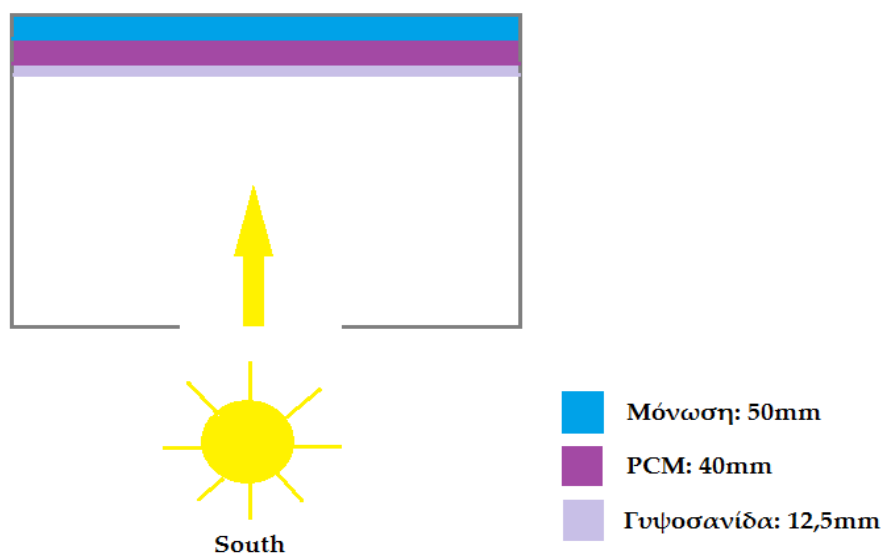
Με βάση το βαθμό χρησιμοποίησης του στρώματος PCM που υπολογίστηκε παραπάνω, συμπεραίνεται ότι το PCM των εξεταζόμενων δωματίων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού είναι περισσότερο αποδοτικό τους μήνες Ιανουάριο κατά ένα μικρό ποσοστό, Φεβρουάριο και Μάρτιο, όπου και σημειώνει μεγαλύτερο ποσοστό εκμετάλλευσης. Αντίθετα, τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο είναι αποδοτικότερο το PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού με μεγαλύτερο βαθμό χρησιμοποίησης.

Τα ανωτέρω είναι λογικά αν ληφθεί υπόψη η μελέτη της θερμοκρασίας που αναπτύσσει το στρώμα PCM εξεταζόμενων δωματίων με ένα υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού και δύο υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, που εξετάστηκε στο Κεφάλαιο 5.4.2.

## 5.5 Μελέτη για συναλλαγή με ένα δωμάτιο με υαλοπίνακες νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

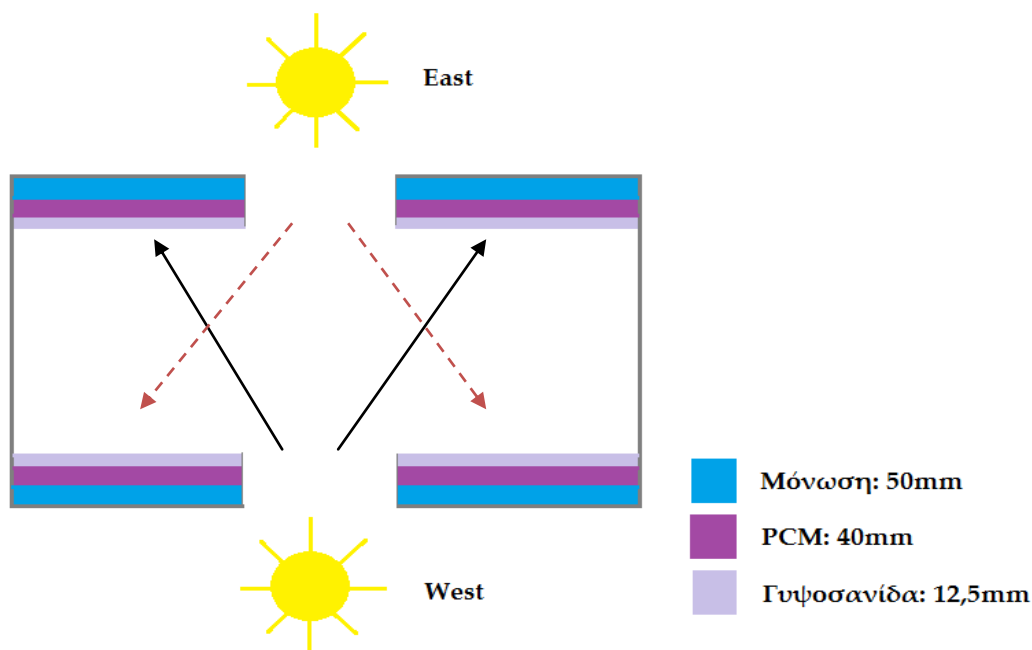
### 5.5.1 Περιγραφή εξεταζόμενης μελέτης

Τα εξεταζόμενα δωμάτια βρίσκονται στην περιοχή της Αθήνας, με κοινές διαστάσεις 4 m x 3 m x 3 m. Απέναντι από τον μονωμένο τοίχο, υπάρχει ένας υαλοπίνακας διαστάσεων 1.5 m x 2m νότιου προσανατολισμού στην πρώτη περίπτωση και στη δεύτερη περίπτωση υπάρχουν δύο υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, τοποθετημένοι στους εξεταζόμενους τοίχους.



Σχήμα 5.5.1.1: Εξεταζόμενο δωμάτιο με στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού





Σχήμα 5.5.1.2: Εξεταζόμενο δωμάτιο με στρώμα PCM έναντι υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Για την σύγκριση των παραπάνω εξεταζόμενων δωματίων πραγματοποιούνται οι εξής παραδοχές:

- Στο εξωτερικό σημείο των εξεταζόμενων δωματίων υπάρχει αδιαβατικό όριο, που δεν επιτρέπει την συναλλαγή θερμότητας με το εξωτερικό περιβάλλον
- Η εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου θεωρείται σταθερή και ομοιόμορφη
- Η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης θεωρείται ομοιόμορφη
- Η κατάσταση θεωρείται μόνιμη, δηλαδή δεν υπάρχει περαιτέρω αλληλεπίδραση με εξωτερικούς παράγοντες και η συναλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται μεταξύ του εσωτερικού αέρα και του PCM, το οποίο φορτίζεται αποκλειστικά από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά του.

Η θερμοκρασία του στρώματος PCM στην περίπτωση ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού υπολογίζεται ξεχωριστά για ανατολή και δύση. Η μελέτη μεταξύ των δύο δωματίων για τον προσδιορισμό της απόδοσής του πραγματοποιείται με σύγκριση της θερμότητας συναγωγής  $Q_{syn}$ , που είναι πραγματικά τι προσφέρει το κάθε στρώμα στο δωμάτιο.

### 5.5.2 Υπολογισμός της θερμοκρασίας PCM, $T_{PCM}$ και σύγκριση μεταξύ νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Για τη μελέτη γίνεται επιλογή του εμπορικού PCM, του RT20 της Rubitherm. Το πάχος που επιλέχθηκε είναι 40mm και τα χαρακτηριστικά του αναφέρονται στον Πίνακα 5.3.2.1. Εξετάζεται η θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM σε ακτινοβολία που εισέρχεται από υαλοπίνακα νότιου για την πρώτη περίπτωση μονωμένου δωματίου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού για την δεύτερη περίπτωση, όπου οι δύο τοίχοι του δωματίου φορτίζονται από ανατολή και δύση και πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ τους. Και για τις δύο περιπτώσεις, η λειτουργία του PCM μελετάται για την 21<sup>η</sup> ημέρα Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου, Μαρτίου, Νοεμβρίου και Δεκεμβρίου, με σκοπό τη διερεύνηση της αποδοτικότητας του PCM την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα και του εκάστοτε προσανατολισμού.

#### A. Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM

Ο ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM αποδίδεται από τη σχέση:

$$Q_{\text{απορροφούμενη}} = Q_{\text{ακτινοβολίας}} + Q_{\text{συναγωγής,αγωγής}} \quad (5.5.2.1)$$

Η μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM σε σχέση με το χρόνο στο 24ωρο, εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται από τον υαλοπίνακα, τη συναλλαγή θερμότητας με συναγωγή με τον εσωτερικό αέρα και τη γυψοσανίδα, καθώς επίσης με τη μάζα και τη θερμοχωρητικότητα του PCM.

- Υπολογισμός απορροφούμενης ενέργειας

Απορροφούμενη ενέργεια είναι η ενέργεια που απορροφάται από το στρώμα PCM και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{\text{απορροφούμενη}} = M_{\text{PCM}} * c_{\text{p eff}} * (T_{\text{PCM}} - T_{\text{PCM}}^0) \quad (5.5.2.2)$$

- $T_{\text{PCM}}^0$  : η θερμοκρασία του PCM την χρονική στιγμή t
- $T_{\text{PCM}}$  : η θερμοκρασία του PCM την χρονική στιγμή t+Δt
- $M_{\text{PCM}}$  : η μάζα του επιλεγμένου PCM
- $c_{\text{p eff}}$  : η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM

- Υπολογισμός της μάζας PCM

Η μάζα του PCM,  $M_{\text{PCM}}$ , θεωρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της μελέτης και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας και μπορεί να προσεγγιστεί με την εξής σχέση για την περίπτωση νότιου προσανατολισμού:

$$M_{\text{PCM}}^S = \rho_{\text{PCM}} * V_{\text{PCM}}^S \quad (5.5.2.3)$$

- $\rho_{\text{PCM}}$  : η πυκνότητα του PCM
- $V_{\text{PCM}}^S$  : ο όγκος του PCM

$$V_{\text{PCM}}^S = (\text{ύψος τοίχου}) * (\text{πλάτος τοίχου}) * (\text{πάχος PCM}) \quad (5.5.2.4)$$

Για την περίπτωση εξεταζόμενου δωματίου με δύο τοίχους με PCM έναντι ανατολικού και δυτικού υαλοπίνακα, η μάζα του κάθε στρώματος θα είναι μικρότερη από αυτήν της περίπτωσης PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού, καθώς μεταβάλλεται το εμβαδόν του τοίχου που καταλαμβάνει το PCM. Σε αυτή την περίπτωση η μάζα του PCM δίνεται από την εξής σχέση:

$$M_{\text{PCM}}^{E+W} = \rho_{\text{PCM}} * V_{\text{PCM}}^{E+W} \quad (5.5.2.5)$$

- $\rho_{\text{PCM}}$  : η πυκνότητα του PCM
- $V_{\text{PCM}}^{E+W}$  : ο όγκος του PCM

$$V_{\text{PCM}}^{E+W} = ((\text{ύψος τοίχου}) * (\text{πλάτος τοίχου}) - (\text{ύψος υαλοπίνακα}) * (\text{πλάτος υαλοπίνακα})) * (\text{πάχος PCM})$$

(5.5.2.6)

• Υπολογισμός ενεργού θερμοχωρητικότητας,  $C_{p,eff}$

Για τον υπολογισμό της ενεργού θερμοχωρητικότητας θα χρησιμοποιηθεί η τριγωνική συνάρτηση ως εξής: [3]

$$C_{p,eff}(T) = \frac{4*(H-b*C_{ps})*(T-T_s)}{b^2} + C_{ps}, \quad \text{για } T_s \leq T \leq T_c \quad (5.5.2.7)$$

$$C_{p,eff}(T) = \frac{4*(b*C_{pl}-H)*(T-T_s-\frac{b}{2})}{b^2} + \frac{2*H}{b} - C_{pl}, \quad \text{για } T_c \leq T \leq T_1 \quad (5.5.2.8)$$

- $C_{pl}$ : θερμοχωρητικότητα του υγρού PCM
- $C_{ps}$ : θερμοχωρητικότητα του στερεού PCM
- $T_s$ : θερμοκρασία του στερεού PCM
- $T_1$ : θερμοκρασία του υγρού PCM
- $b = (T_1 - T_s)$ : εύρος θερμοκρασιών
- $T_c = \frac{T_1+T_s}{2}$ : το μέσον του εύρους θερμοκρασιών
- $H$ : η θερμότητα αλλαγής φάσης

• Υπολογισμός ενέργειας λόγω συναγωγής και αγωγής

Πρόκειται για την θερμότητα που προσφέρει το σώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου και στο στρώμα της γυψοσανίδας και αποδίδεται με την παρακάτω σχέση:

$$Q_{\text{συναγωγής,αγωγής}} = 3600 * A_{\text{τοίχου}} * U_1 * (T_{in} - T_{PCM}^0) \quad (5.5.2.9)$$

- $U_1 = (\frac{1}{h_{in}} + \frac{l_{\Gamma}}{k_{\Gamma}})^{-1}$ , συντελεστής διαπερατότητας
- $h_{in} = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω συναγωγής με τον εσωτερικό αέρα
- $l_{\Gamma} = 12,5 \text{ mm}$ , πάχος γυψοσανίδας
- $k_{\Gamma} = \frac{0,21 \text{ W}}{\text{m}} \text{°C}$ , συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας γυψοσανίδας
- $A_{\text{τοίχου}}^S = (\text{πλάτος τοίχου}) \times (\text{ύψος τοίχου})$ , για την περίπτωση νότιου προσανατολισμού
- $A_{\text{τοίχου}}^{E+W} = (\text{πλάτος τοίχου}) \times (\text{ύψος τοίχου}) - (\text{πλάτος υαλοπίνακα}) \times (\text{ύψος υαλοπίνακα})$ , για την περίπτωση δύο τοίχων με PCM ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού
- $T_{in} = 20 \text{°C}$

- Υπολογισμός ενέργειας λόγω ακτινοβολίας

Πρόκειται για την θερμότητα που δέχεται το στρώμα PCM λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας.

Για το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού:

$$Q_{\text{ακτινοβολίας}}^S = 0.9 \cdot 3600 \cdot G_T \cdot A_{\text{υαλοπίνακα}} \quad (5.5.2.10)$$

- $A_{\text{υαλοπίνακα}} = (\text{πλάτος υαλοπίνακα}) \times (\text{ύψος υαλοπίνακα})$
- $G_T$ : η προσπίπτουσα στον τοίχο μέση στιγμιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία, όπως προέκυψε από την ενότητα 5.1

Λόγω του ότι ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από τον υαλοπίνακα και από τον εσωτερικό αέρα του δωματίου, έχει ως αποτέλεσμα να λαμβάνεται ένα ποσοστό της τάξης του 90% ότι προσπίπτει στον τοίχο μελέτης και κατ' επέκταση στο στρώμα του PCM.

Για τα στρώματα PCM έναντι υαλοπίνακα ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού:

$$Q_{\text{ακτινοβολίας}}^{E,W} = 0.8 \cdot 3600 \cdot G_T \cdot A_{\text{υαλοπίνακα}} \quad (5.5.2.11)$$

- $A_{\text{υαλοπίνακα}} = (\text{πλάτος υαλοπίνακα}) \times (\text{ύψος υαλοπίνακα})$
- $G_T$ : η προσπίπτουσα στον τοίχο μέση στιγμιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία, όπως προέκυψε από την ενότητα 5.1

Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται ένα ποσοστό της τάξης του 80% ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κάθε τοίχο, καθώς εκτός από το ποσοστό που απορροφάται από τον υαλοπίνακα, από τον οποίο εισέρχεται η ακτινοβολία και από τον εσωτερικό αέρα, ένα μικρό μέρος χάνεται και από τον υαλοπίνακα που είναι τοποθετημένος στον εξεταζόμενο τοίχο.

## B. Υπολογισμός της θερμοκρασίας του PCM

Με βάση τον ισολογισμό ενέργειας που πραγματοποιήθηκε παραπάνω (σχέσεις 5.5.2.1-5.5.2.11), η θερμοκρασία που αναπτύσσει το στρώμα PCM για τους τρεις προσανατολισμούς προκύπτει ως εξής:

Για στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού:

$$T_{PCM}^S = T_{PCM}^0 + \frac{3600 \cdot 0,9 \cdot G_T \cdot A_{\text{υαλοπίνακα}} + 3600 \cdot A_{\text{τοίχου}} \cdot U_1 \cdot (T_{in} - T_{PCM}^0)}{M_{PCM} \cdot c_{p,eff}(T)} \quad (5.5.2.12)$$

Για στρώματα PCM έναντι ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού:

$$T_{PCM}^{E,W} = T_{PCM}^0 + \frac{3600 \cdot 0,8 \cdot G_T \cdot A_{\text{υαλοπίνακα}} + 3600 \cdot A_{\text{τοίχου}} \cdot U_1 \cdot (T_{in} - T_{PCM}^0)}{M_{PCM} \cdot c_{p,eff}(T)} \quad (5.5.2.13)$$

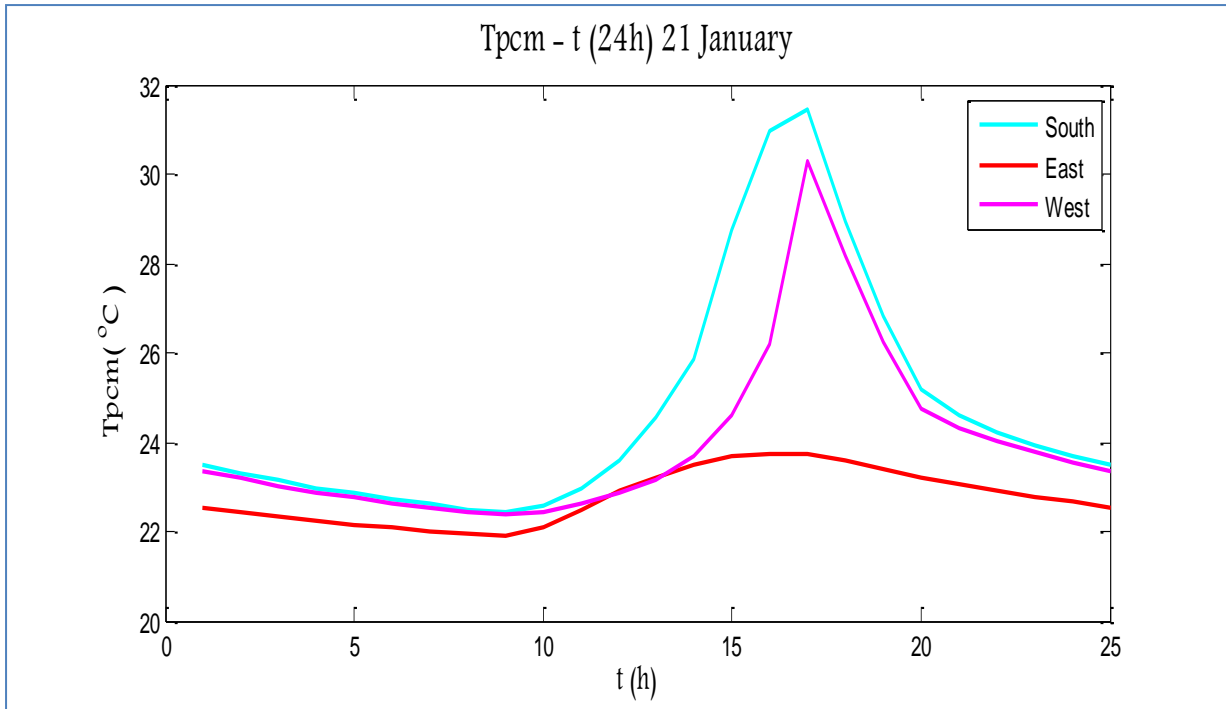
Η διαφορά μεταξύ των τριών προσανατολισμών έγκειται στη διαφορετική ολική ηλιακή ακτινοβολία  $G_T$  για τον κάθε έναν (ενότητα 5.1), οπότε και προκύπτει η θερμοκρασία του PCM, από τη διαφορά της μάζας του PCM μεταξύ των δύο περιπτώσεων και το εμβαδόν του τοίχου που καταλαμβάνει το PCM.

Η θερμοκρασία του PCM υπολογίζεται για ένα 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα, από τη 1:00 έως τις 00:00, με βήμα μίας ώρας.

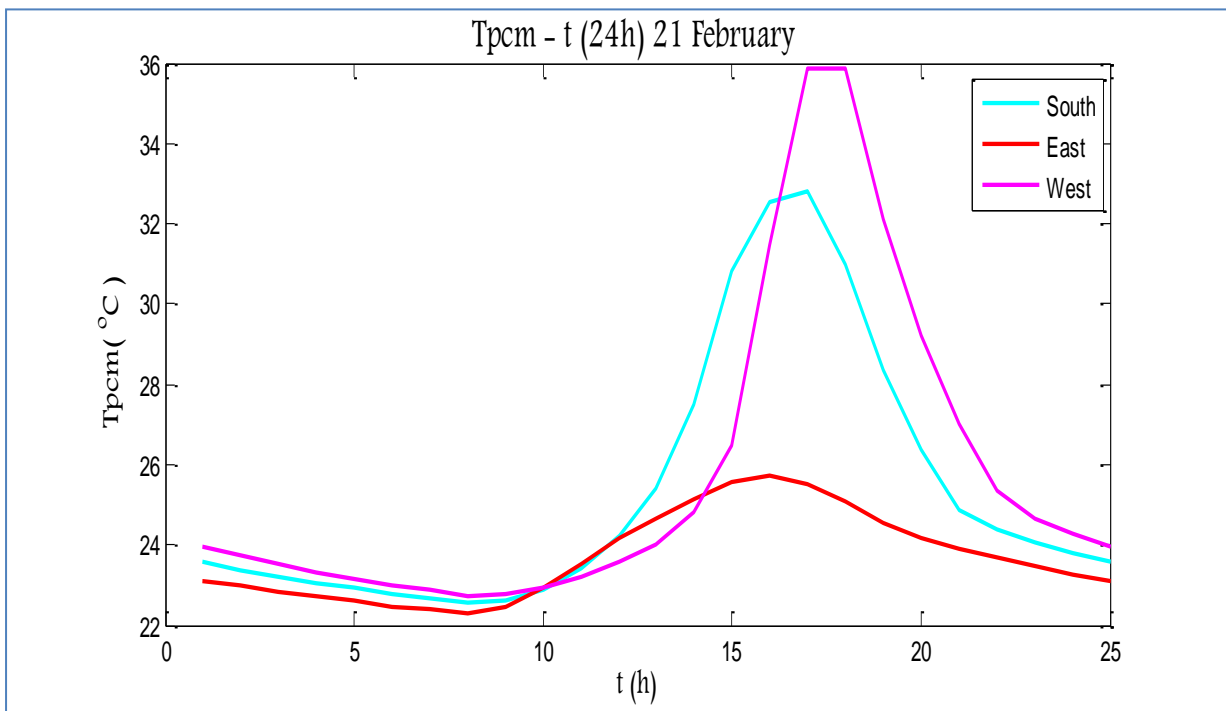
Καθώς η θερμοκρασία του PCM στην αρχή των υπολογισμών είναι άγνωστη, λαμβάνεται αυθαίρετα μια τιμή και στη συνέχεια ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία έως ότου οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται το 24ωρο να συγκλίνουν με εκείνες της προηγούμενης επανάληψης.

Η επανάληψη σε κάθε μήνα ξεκινάει με την τιμή  $T_{PCM}=22^\circ\text{C}$  στη 1:00 και υπολογίζεται η θερμοκρασία του PCM όλο το 24ωρο. Η διαδικασία συνεχίζεται λαμβάνοντας στη νέα επανάληψη την τιμή της  $T_{PCM}$  που υπολογίστηκε στις 00:00 από την προηγούμενη. Καταλήγοντας στο σημείο όπου οι θερμοκρασίες της προηγούμενης επανάληψης συγκλίνουν με αυτές της επόμενης.

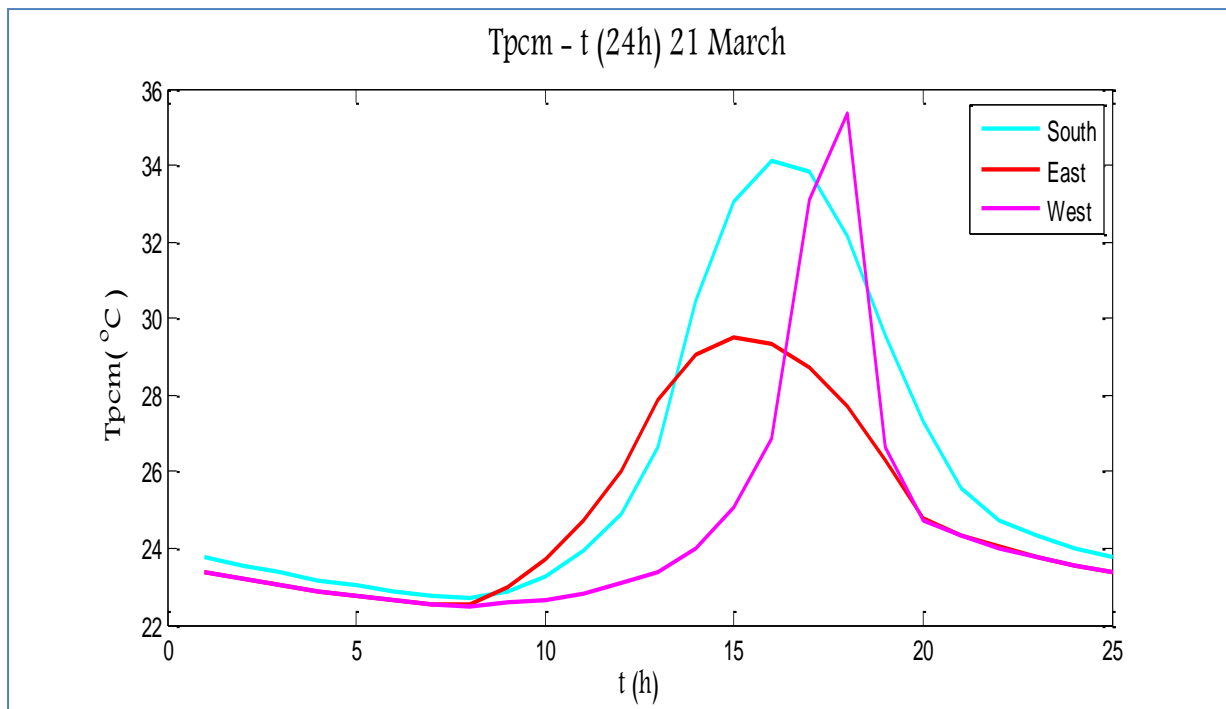
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η θερμοκρασία του PCM συναρτήσει του χρόνου που υπολογίστηκε το 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας των μηνών Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό σε κοινό διάγραμμα, ώστε να είναι περισσότερο εφικτή η σύγκρισή τους.



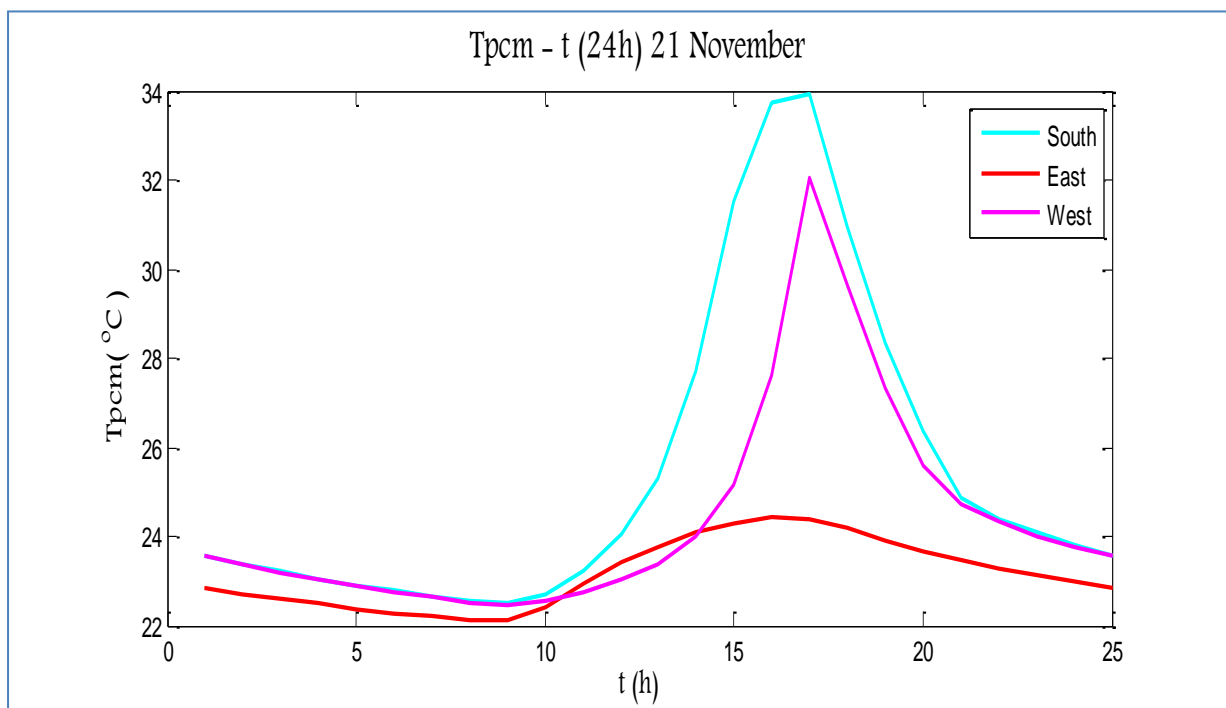
Σχήμα 5.5.2.1: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου



Σχήμα 5.5.2.2: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

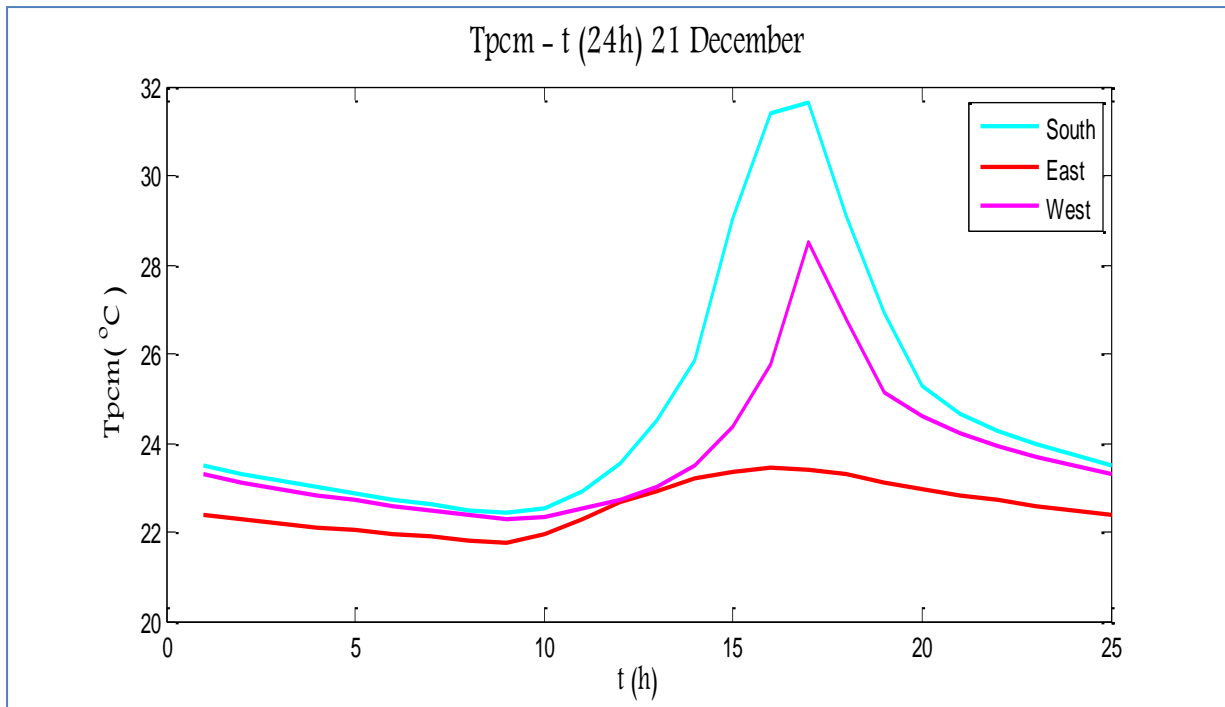


Σχήμα 5.5.2.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου



Σχήμα 5.5.2.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου





Σχήμα 5.5.2.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό για το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι το PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού αναπτύσσει τους περισσότερους μήνες μεγαλύτερες θερμοκρασίες από τις άλλες δύο περιπτώσεις, όπως είναι φυσικό και έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 5.3.2. Η ηλιακή ακτινοβολία του νότιου προσανατολισμού είναι εντονότερη σε σχέση με ανατολή και δύση και σε αυτό οφείλονται τα παραπάνω αποτελέσματα.

Όσον αφορά την περίπτωση του στρώματος PCM έναντι υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού διαπιστώνετε ότι αναπτύσσει μεγαλύτερες θερμοκρασίες από τον νότιο προσανατολισμό τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο, διότι η μάζα του είναι μικρότερη από το στρώμα νότιου προσανατολισμού. Κατά τη διάρκεια της ημέρας που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει περισσότερο τη θερμοκρασία του, σε σχέση με την περίπτωση της ίσης μάζας με τον νότιο προσανατολισμό. Το ίδιο συμβαίνει και στο PCM ανατολικού προσανατολισμού, το οποίο αναπτύσσει μεγαλύτερες μέγιστες και μικρότερες ελάχιστες θερμοκρασίες, σε σχέση με την περίπτωση του Κεφαλαίου 5.3.2 εξαιτίας της μειωμένης μάζας του.

Τέλος, και σε αυτή την μελέτη παρατηρείται διαφορά της ώρας εμφάνισης των μεγίστων θερμοκρασιών των διαφόρων προσανατολισμών. Αρχικά αναπτύσσονται μέγιστες θερμοκρασίες στο στρώμα έναντι ανατολικού υαλοπίνακα, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον ανατολικό προσανατολισμό τις πρωινές ώρες. Ακολουθεί το στρώμα νότιου προσανατολισμού, όπου η εντονότερη ηλιακή ακτινοβολία προκύπτει στη 13:00, και τέλος οι μέγιστες θερμοκρασίες του στρώματος δυτικού προσανατολισμού εμφανίζονται αργότερα κατά τη διάρκεια της ημέρας, εφόσον ο ήλιος βλέπει περισσότερο τον δυτικό προσανατολισμό περίπου στις 16:00.

### 5.5.2.1 Σύγκριση της προσδιδόμενης ενέργειας $Q_{\text{συναγωγής}}$ στο δωμάτιο από στρώμα PCM νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Για να διαπιστωθεί η απόδοση των στρωμάτων PCM των δύο περιπτώσεων, θα πραγματοποιηθεί σύγκριση της θερμότητας συναγωγής, δηλαδή της θερμότητας που προσδίδει το PCM στο δωμάτιο.

Λαμβάνοντας υπόψη τις θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM, πάχους 40mm, όπως έχουν υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 5.5.2, από τις σχέσεις (5.5.2.12) και (5.5.2.13) υπολογίζεται η θερμότητα που προσδίδει το στρώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου ως εξής:

Για το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού:

$$Q_{\text{συναγωγής,αγωγής}}^S = 3600 * A_{\text{τοιχίου}} * U_1 * (T_{\text{PCM}} - T_{in}) \quad (5.5.2.1.1)$$

- $U_1 = \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{l_r}{k_r}\right)^{-1}$ , συντελεστής διαπερατότητας
- $h_{in}=8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω συναγωγής με τον εσωτερικό αέρα
- $l_r=12,5\text{mm}$ , πάχος γυψοσανίδας

- $k_{\Gamma} = \frac{0.21W}{m}^{\circ}C$  , συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας γυψοσανίδας
- $A_{\text{τοίχου}} = (\text{πλάτος τοίχου}) \times (\text{ύψος τοίχου})$
- $T_{in}=20^{\circ}C$

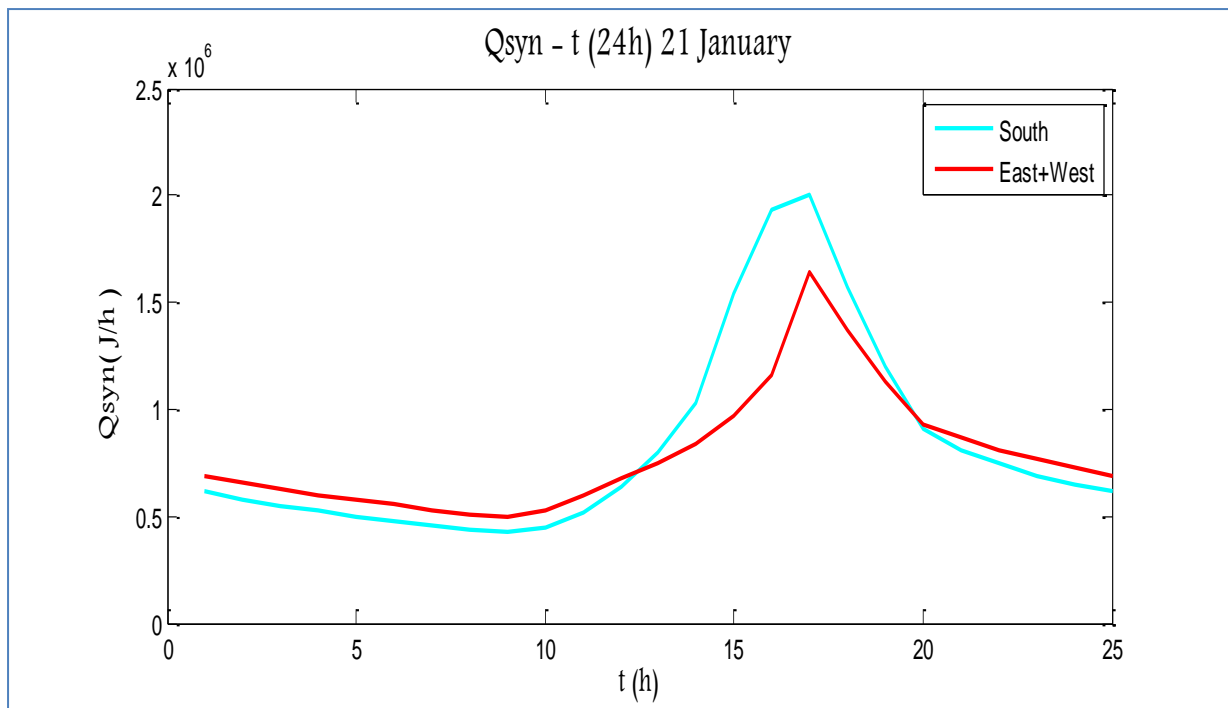
Για τα PCMs έναντι υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού:

$$Q_{\text{συναγωγής,αγωγής}}^{E+W} = 3600 * A_{\text{τοίχου}} * U_1 * (T_{PCM}^E - T_{in}) + 3600 * A_{\text{τοίχου}} * U_1 * (T_{PCM}^W - T_{in}) \quad (5.5.2.1.2)$$

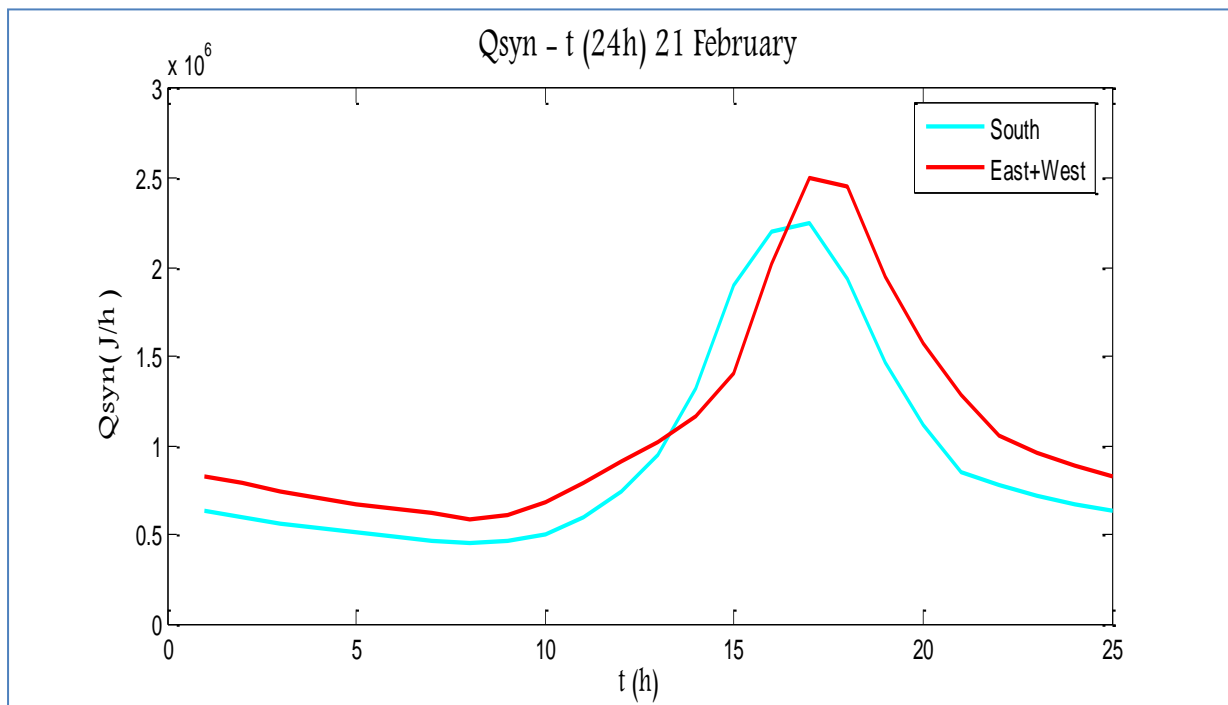
- $U_1 = (\frac{1}{h_{in}} + \frac{l_{\Gamma}}{k_{\Gamma}})^{-1}$  ,συντελεστής διαπερατότητας
- $h_{in}=8 \text{ W/m}^2\text{^{\circ}C}$  ,συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω συναγωγής με τον εσωτερικό αέρα
- $l_{\Gamma}=12,5\text{mm}$ , πάχος γυψοσανίδας
- $k_{\Gamma} = \frac{0.21W}{m}^{\circ}C$  , συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας γυψοσανίδας
- $A_{\text{τοίχου}} = (\text{πλάτος τοίχου}) \times (\text{ύψος τοίχου}) - (\text{πλάτος υαλοπίνακα}) \times (\text{ύψος υαλοπίνακα})$
- $T_{in}=20^{\circ}C$
- $T_{PCM}^E$ : η θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM έναντι υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού
- $T_{PCM}^W$ : η θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM έναντι υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού

Η μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{\text{συναγωγής}}$  υπολογίζεται σε (J/h) με βάση τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του PCM ( $T_{PCM}$ ), ο οποίος πραγματοποιήθηκε για ένα 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα, με επαναληπτική διαδικασία από τη 1:00 έως τις 00:00, με βήμα μιας ώρας.

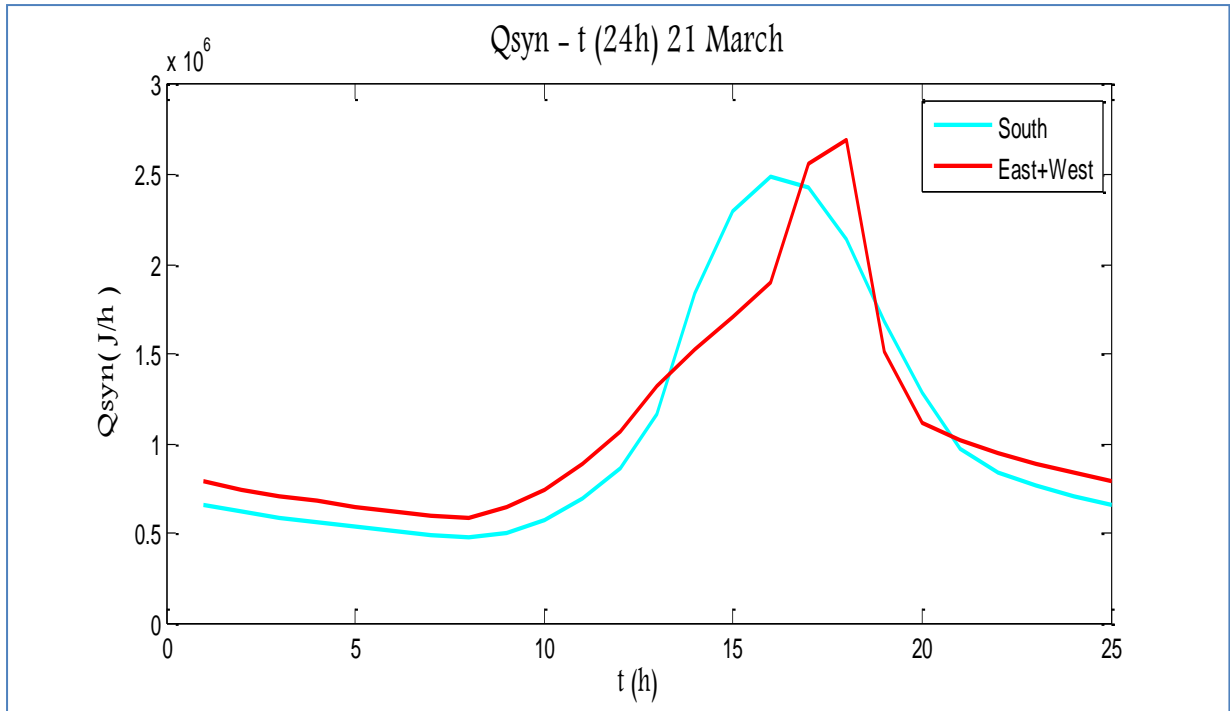
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι τιμές της  $Q_{\text{συναγωγής}}$  (J/h), στρώματος PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού και δύο υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.



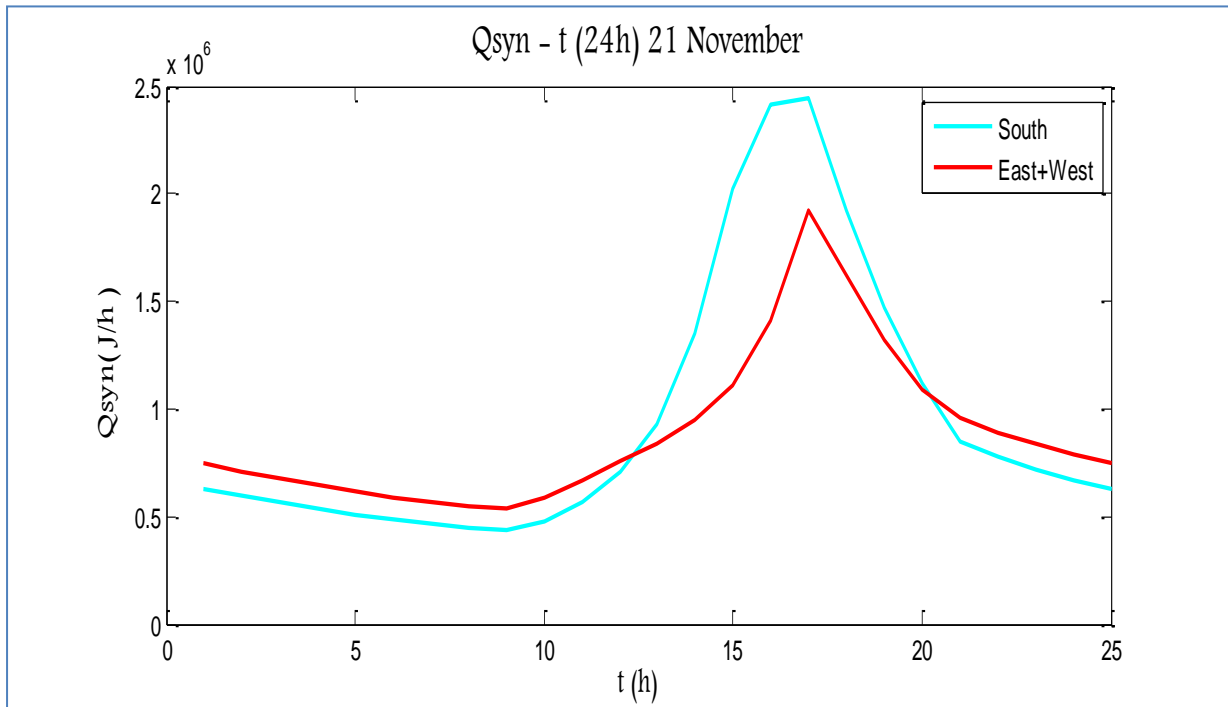
**Σχήμα 5.5.2.1.1:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



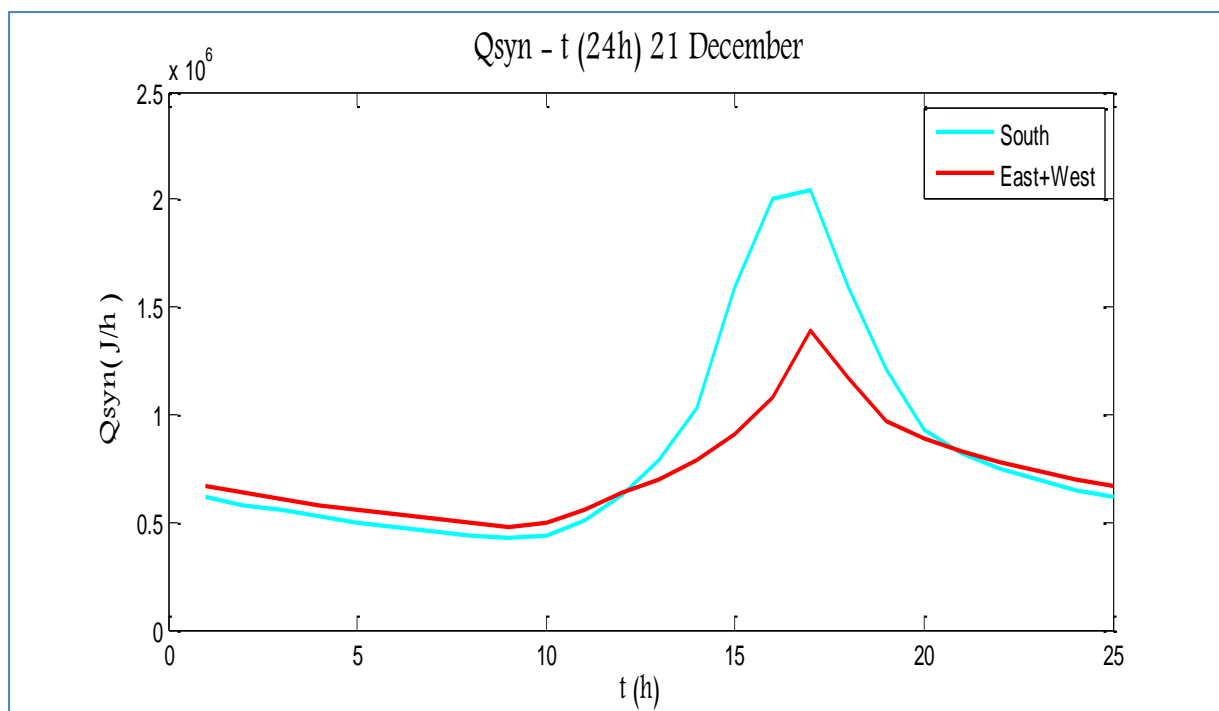
**Σχήμα 5.5.2.1.2:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



**Σχήμα 5.5.2.1.3:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



**Σχήμα 5.5.2.1.4:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



**Σχήμα 5.5.2.1.5:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

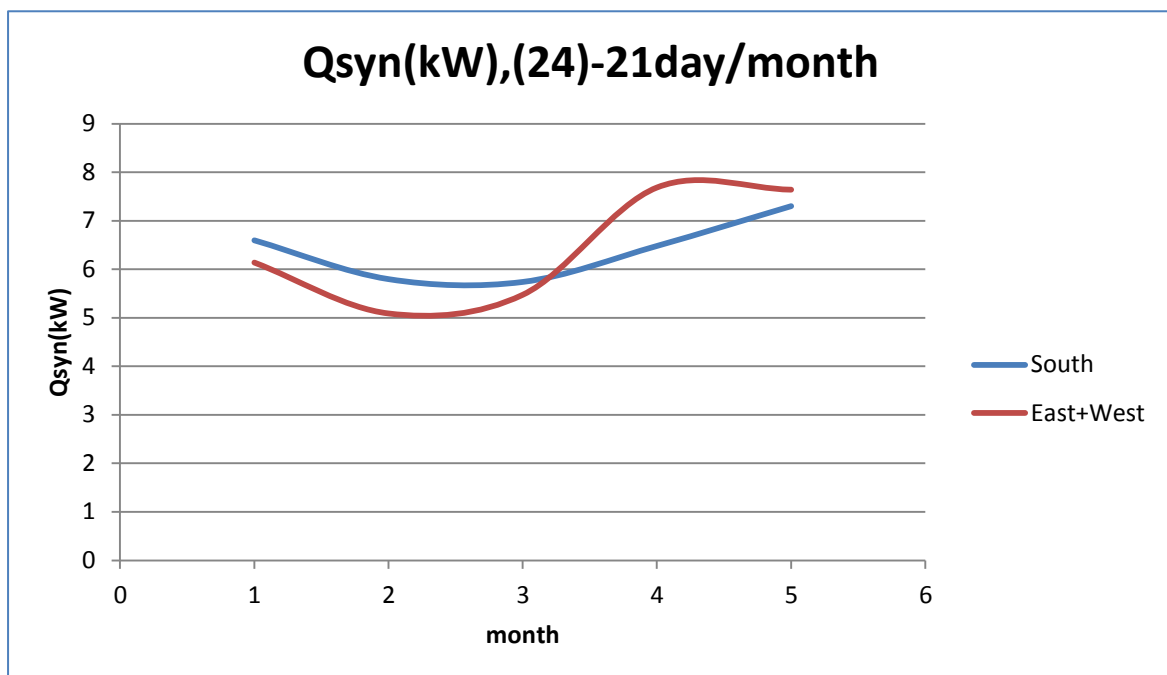
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συνολικό ποσό της θερμότητας που προσδίδει το στρώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου για όλο το 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.2.1.1 και απεικονίζονται στο Σχήμα 5.5.2.1.6. Η συνολική θερμότητα συναγωγής υπολογίζεται ως εξής:

$$Q_{syn}(kW) = \sum \frac{Q_{syn,i}(J)}{3600 \cdot 1000} \quad (5.5.2.1.3)$$

Για την απεικόνιση του διαγράμματος δόθηκαν αύξοντες αριθμοί που αντιστοιχούν στην 21<sup>η</sup> ημέρα του κάθε μήνα. Έτσι όπου:

- 1=21<sup>η</sup> Νοεμβρίου
- 2=21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου
- 3=21<sup>η</sup> Ιανουαρίου
- 4=21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου
- 5=21<sup>η</sup> Μαρτίου

Πίνακας 5.5.2.1.1: Q συναγωγής (kW),(24h)			
		Νότος	Ανατολή-Δύση
21 <sup>η</sup> Νοεμβρίου	1	6,59	6,14
21 <sup>η</sup> Δεκεμβρίου	2	5,79	5,09
21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου	3	5,74	5,47
21 <sup>η</sup> Φεβρουαρίου	4	6,48	7,68
21 <sup>η</sup> Μαρτίου	5	7,30	7,64



Σχήμα 5.5.2.1.6: Μεταβολή της συνολικής προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα

### ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τα διαγράμματα (Σχήματα 5.5.2.1.1-5.5.2.1.5) παρατηρείται ότι το στρώμα PCM και των δύο περιπτώσεων προσδίδει θερμότητα στο δωμάτιο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, αφού η θερμοκρασία του είναι μεγαλύτερη από την σταθερή εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου ( $T_{in}=20^{\circ}C$ ).

Η μέγιστη θερμότητα συναγωγής εμφανίζεται τις απογευματινές ώρες, διότι εκείνες τις ώρες αναπτύσσονται και οι μέγιστες θερμοκρασίες του στρώματος PCM και υπάρχει υψηλότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ PCM και δωματίου.

Προκύπτει, επίσης, ότι το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού προσδίδει υψηλότερο ποσό θερμότητας στο δωμάτιο τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο αφού σε εκείνους τους μήνες αναπτύσσει μεγαλύτερες θερμοκρασίες, ενώ το αντίθετο συμβαίνει τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο, όπου το στρώμα PCM έναντι δύο υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού είναι περισσότερο εκμεταλλεύσιμο ως προς το ποσό της θερμότητας που δίνει, αφού και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει είναι υψηλότερες, κυρίως όσο αναφορά τη δύση (Κεφάλαιο 5.52).

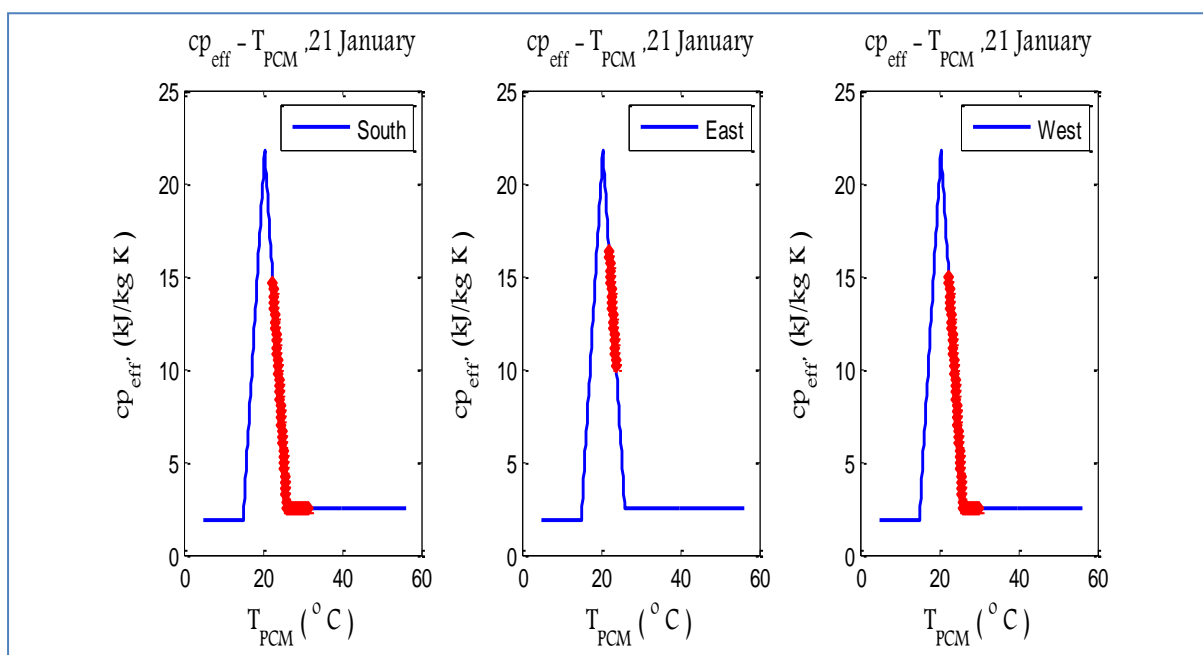
Από τη μορφή των διαγραμμάτων συμπεραίνεται ότι τα στρώματα PCM έναντι 2 υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού αρχίζει να προσδίδει θερμότητα στο δωμάτιο τις πρωινές ώρες, αφού έχει φορτιστεί το PCM από την ανατολή. Στη συνέχεια σημειώνει μια μικρή πτώση το ποσό της προσδιδόμενης θερμότητας, αφού ο ήλιος βλέπει τον τοίχο από νότιο προσανατολισμό. Το υψηλότερο ποσό θερμότητας που δίνει στο δωμάτιο σημειώνεται τις απογευματινές ώρες, αφού πρώτα φορτίζεται και το PCM δυτικού προσανατολισμού. Η μέγιστη τιμή προσδιδόμενης θερμότητας του στρώματος PCM νότιου προσανατολισμού προηγείται, καθώς φορτίζεται νωρίτερα σε σχέση με το δυτικό προσανατολισμό.

Η μελέτη της συνολικής θερμότητας συναγωγής δείχνει ότι τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο προηγείται, στο ποσό της θερμότητας που προσδίδει στο δωμάτιο, το στρώμα PCM νότιου προσανατολισμού, ενώ τους υπόλοιπους μήνες τα PCMs ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, καθώς αυξάνονται και οι θερμοκρασίες τους, λόγω της εντονότερης ηλιακής ακτινοβολίας, κυρίως όσο αναφορά τον δυτικό προσανατολισμό και λόγω της μειωμένης μάζας κάθε στρώματος σε σχέση με το PCM νότιου προσανατολισμού.

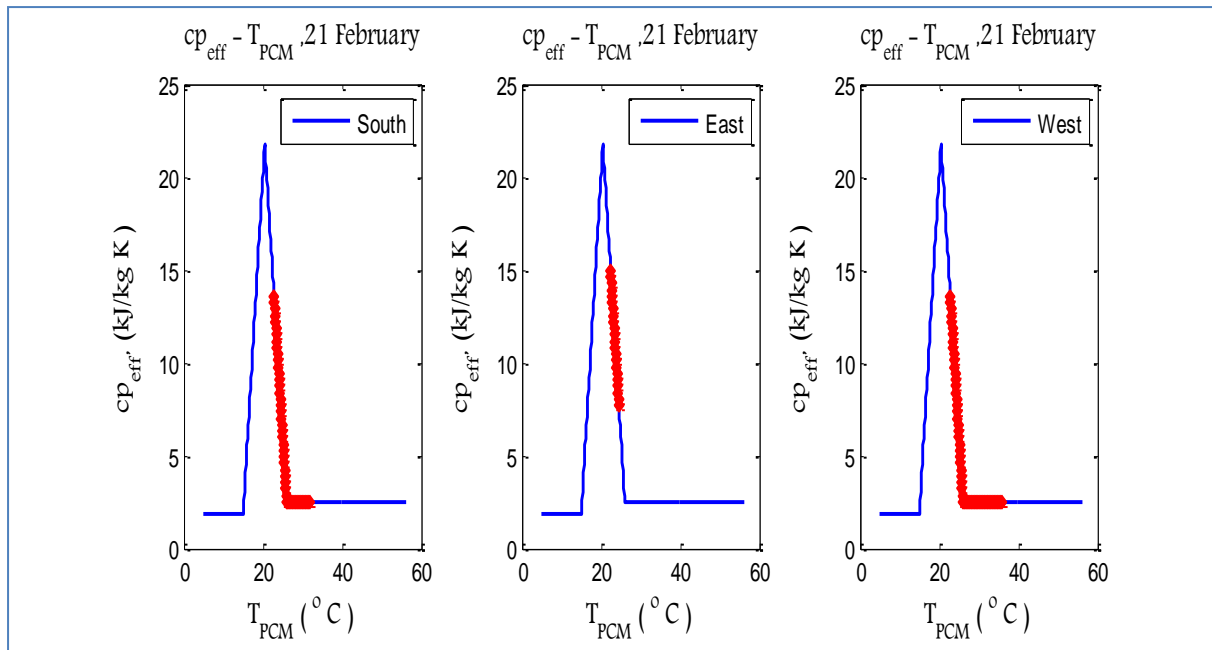


### 5.5.2.2 Έλεγχος της απόδοσης με βάση την καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας

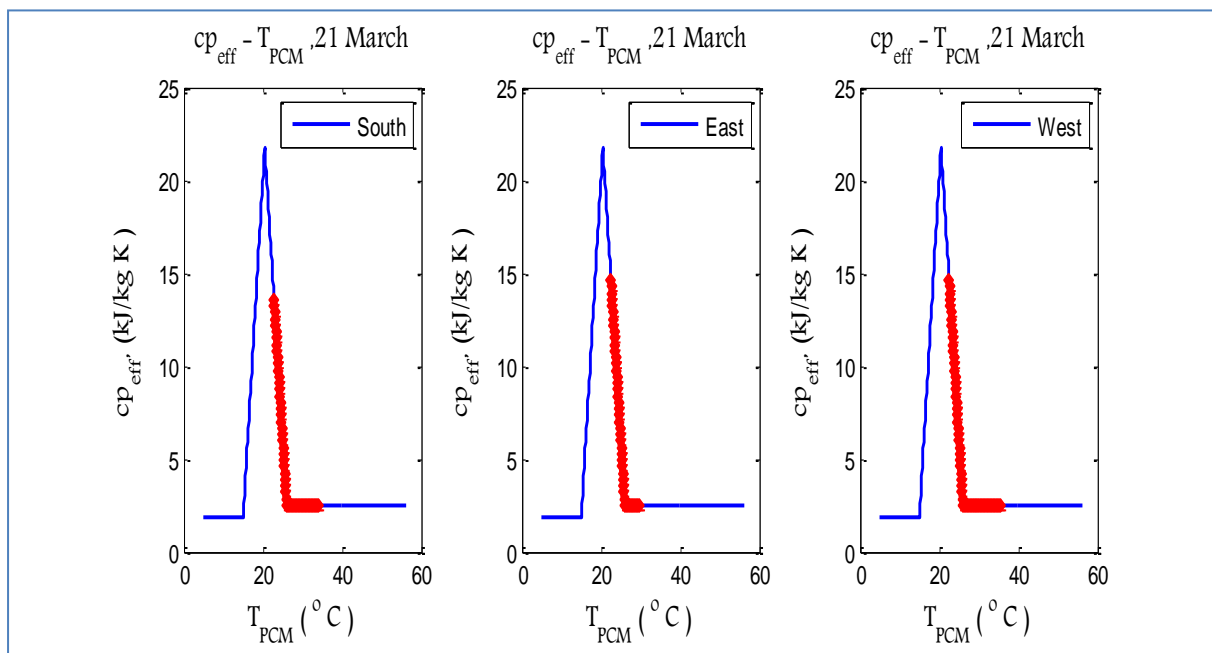
Λαμβάνοντας υπόψη το εύρος θερμοκρασιών που αναπτύσσει το PCM των δύο περιπτώσεων και τις αντίστοιχες τιμές της ενεργού θερμοχωρητικότητας, απεικονίζεται στα παρακάτω διαγράμματα το τμήμα της καμπύλης ενεργού θερμοχωρητικότητας που καταλαμβάνει το PCM (πάχους 40mm) για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό, την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών, ώστε να ελεγχθεί η απόδοσή του.



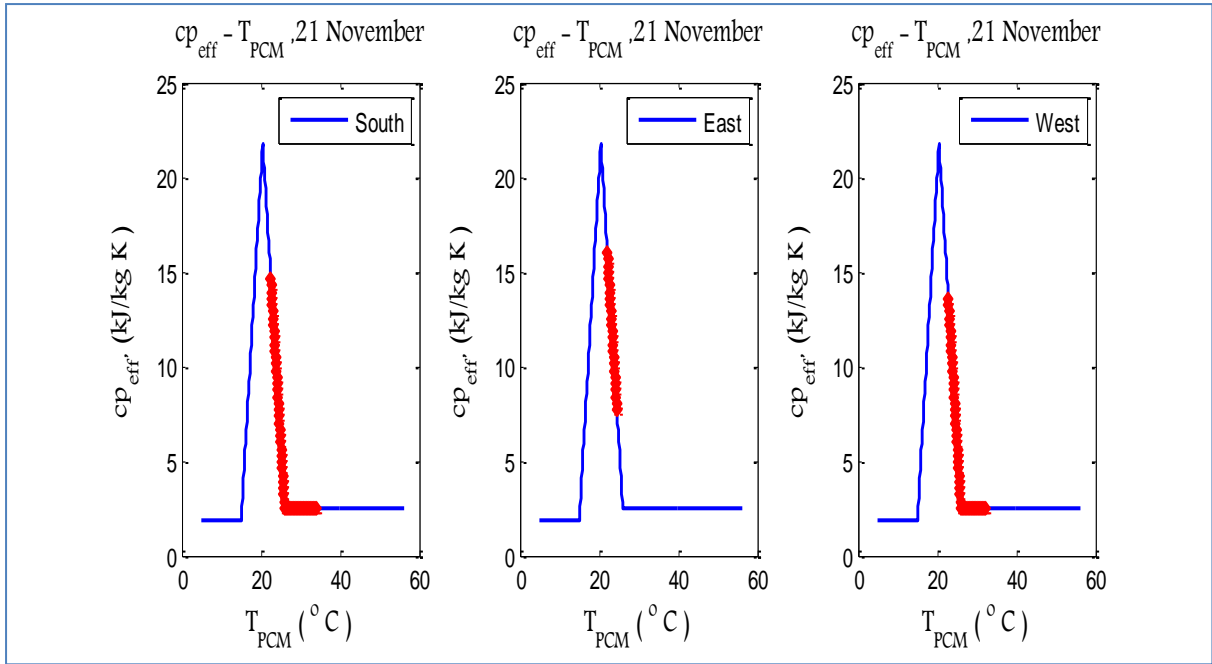
**Σχήμα 5.5.2.2.1:** Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό



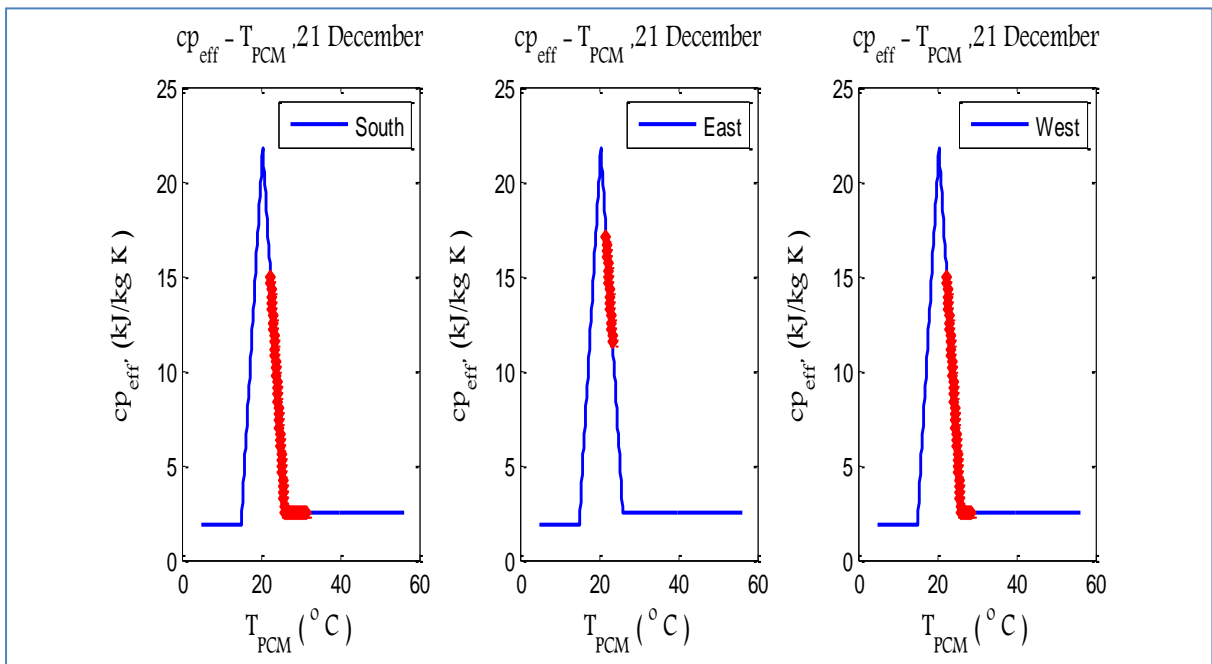
Σχήμα 5.5.2.2.2: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.5.2.2.3: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.5.2.2.4: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.5.2.2.5: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM,  $c_{p,eff}(T)$ , το 24ωρο, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό

## **ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ**

Από τα διαγράμματα ενεργού θερμοχωρητικότητας που προηγήθηκαν παρατηρείται ότι το στρώμα PCM και των τριών προσανατολισμών χρησιμοποιεί μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνει για να αλλάξει φάση, εφόσον καλύπτει τμήμα της διφασικής περιοχής της καμπύλης.

Το PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού φαίνεται να καλύπτει τις περισσότερες φορές μεγαλύτερο τμήμα της καμπύλης ενεργού θερμοχωρητικότητας, το οποίο συνεπάγεται και καλύτερη απόδοση. Ακολουθεί, με μικρή διαφορά, το στρώμα έναντι υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού, αφού οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει πλησιάζουν και σε μερικούς μήνες ξεπερνούν αυτές του νότιου προσανατολισμού, λόγω της μειωμένης μάζας του PCM. Τέλος, μειωμένη απόδοση παρουσιάζει το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού καλύπτοντας μικρότερο τμήμα της καμπύλης, εφόσον η ηλιακή ακτινοβολία στην ανατολή είναι ασθενέστερη.

### 5.5.2.3 Βαθμοί χρησιμοποίησης του PCM με βάση την καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5.4.7 προκειμένου να έχουμε ένα ποσοτικό έλεγχο της απόδοσης του PCM (RT20-πάχους 40mm) για την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών, κρίθηκε αναγκαίος ο υπολογισμός του βαθμού χρησιμοποίησης του PCM, ο οποίος δίνεται από την σχέση (5.4.7.1).

**Πίνακας 5.5.2.3.1: Θερμότητα που αποθηκεύει το PCM και ο βαθμός χρησιμοποίησης του, νότιου προσανατολισμού**

	$T_{PCM}$ <b>max</b> (°C)	$T_{PCM}$ <b>min</b> (°C)	$C_{p^{eff}}$ <b>max</b> (kJ/kg*K)	$C_{p^{eff}}$ <b>min</b> (kJ/kg*K)	$A_{προσδιδόμενο}$ (kJ/kg)	<b>n</b> (%)
<b>Ιανουάριος</b>	31,43	22,42	14,95	2,5	44,8105	33,92
<b>Φεβρουάριος</b>	32,81	22,55	14,6	2,5	46,5225	35,22
<b>Μάρτιος</b>	34,14	22,7	13,91	2,5	47,4265	35,90
<b>Νοέμβριος</b>	33,92	22,5	14,6	2,5	49,725	37,64
<b>Δεκέμβριος</b>	31,62	22,41	14,95	2,5	45,37275	34,35

Πίνακας 5.5.2.3.2: Θερμότητα που αποθηκεύει το PCM και ο βαθμός χρησιμοποίησής του, ανατολικού προσανατολισμού

	$T_{PCM}$ <b>max</b> (°C)	$T_{PCM}$ <b>min</b> (°C)	$C_{p^{eff}}$ <b>max</b> (kJ/kg*K)	$C_{p^{eff}}$ <b>min</b> (kJ/kg*K)	$A_{προσδιδόμενο}$ (kJ/kg)	<b>n</b> (%)
Ιανουάριος	23,76	21,89	16,68	9	24,0108	18,18
Φεβρουάριος	25,72	22,28	15,29	7,5	39,1988	29,67
Μάρτιος	29,49	22,53	14,6	2,5	38,3935	29,06
Νοέμβριος	24,42	22,12	16	7	26,45	20,02
Δεκέμβριος	23,42	21,77	17,02	9	21,4665	16,25

Πίνακας 5.5.2.3.3: Θερμότητα που αποθηκεύει το PCM και ο βαθμός χρησιμοποίησής του, δυτικού προσανατολισμού

	$T_{PCM}$ <b>max</b> (°C)	$T_{PCM}$ <b>min</b> (°C)	$C_{p^{eff}}$ <b>max</b> (kJ/kg*K)	$C_{p^{eff}}$ <b>min</b> (kJ/kg*K)	$A_{προσδιδόμενο}$ (kJ/kg)	<b>n</b> (%)
Ιανουάριος	30,31	22,37	14,95	2,5	42,44675	32,13
Φεβρουάριος	35,86	22,74	13,91	2,5	51,3983	38,91
Μάρτιος	35,35	22,5	14,6	2,5	53,3	40,35
Νοέμβριος	32,03	22,47	14,26	2,5	44,6564	33,81
Δεκέμβριος	28,49	22,51	15,29	2,5	37,26855	28,21

**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ**

Ο βαθμός χρησιμοποίησης του PCM προκύπτει από το εμβαδόν της καμπύλης ενεργού θερμοχωρητικότητας που καλύπτει. Από τους πίνακες που προηγήθηκαν συμπεραίνεται ότι το PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού παρουσιάζει υψηλότερο βαθμό χρησιμοποίησης τους περισσότερους εξεταζόμενους μήνες, ειδικότερα τους Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο. Αυτό οφείλεται στις αυξημένες τιμές της θερμοκρασίας που αναπτύσσει σε σχέση με τους άλλους προσανατολισμούς, εμφανίζει μεγαλύτερα θερμοκρασιακά εύρη και καλύπτει μεγαλύτερο τμήμα της καμπύλης ενεργού θερμοχωρητικότητας.

Το PCM έναντι υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού αποκτά βαθμό χρησιμοποίησης μεγαλύτερο από αυτό του νότιου προσανατολισμού τον Φεβρουάριο και Μάρτιο, καθώς σε αυτούς τους μήνες εμφανίζει μεγαλύτερα θερμοκρασιακή εύρη, λόγω της εντονότερης ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες, αλλά και της μειωμένης μάζας του σε σχέση με το PCM του νότιου προσανατολισμού.

Αντίθετα, το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού, παρουσιάζει μικρότερο βαθμό χρησιμοποίησης, αφού καλύπτει μικρότερο τμήμα της καμπύλης ενεργού θερμοχωρητικότητας. Η πρωινή θαμπή ατμόσφαιρα, λόγω συσσώρευσης υδρατμών, δεν αφήνει περιθώρια ανάπτυξης υψηλότερων θερμοκρασιών.

Αν μπορούν να ληφθούν συνολικά συμπεράσματα βαθμού χρησιμοποίησης του PCM στο εξεταζόμενο δωμάτιο με δύο υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, όσο αναφορά τη γενικότερη απόδοσή των δύο στρωμάτων στο δωμάτιο, θα προκύψει ότι ουσιαστικά αποδίδουν περισσότερο τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο, όπου ο βαθμός χρησιμοποίησης του PCM δυτικού προσανατολισμού είναι μεγαλύτερος και όπως αναφέρθηκε και στη μελέτη της θερμότητας συναγωγής. Η πρόσθεση των βαθμών χρησιμοποίησης δεν θα ήταν ορθή, καθώς αναφέρονται σε διαφορετικά στρώματα PCM, τοποθετημένα σε διαφορετικό τοίχο του ίδιου δωματίου.

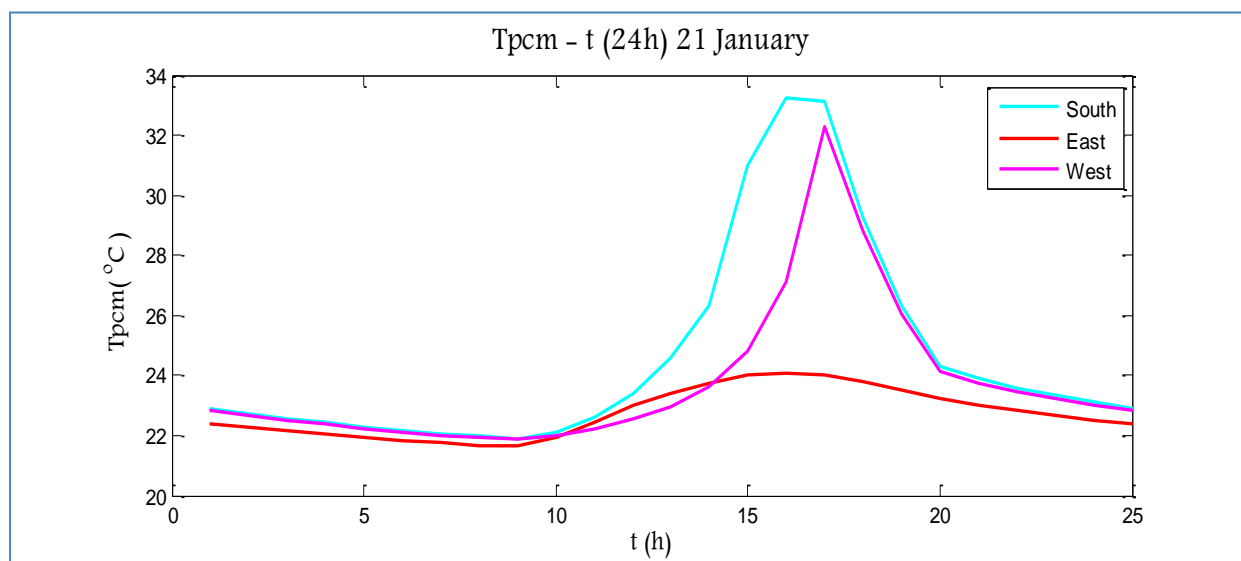
### 5.5.3 Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος PCM νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση του πάχους στη συγκεκριμένη μελέτη υπολογίζεται η θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού πάχους 30mm και 20mm. Η διαδικασία υπολογισμού είναι ακριβώς ίδια με αυτή στο Κεφάλαιο 5.5.2, μεταβάλλοντας το πάχος του PCM και συνεπώς τη μάζα του στο υπολογισμό της θερμοκρασίας (σχέσεις 5.5.2.12 και 5.5.2.13).

Η παραμετρική μελέτη θα πραγματοποιηθεί ξεχωριστά για κάθε στρώμα PCM, αφού είναι τοποθετημένα σε διαφορετικούς τοίχους. Η συνολική επίδραση των δύο στρωμάτων του εξεταζόμενου δωματίου με δύο υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού παρουσιάζεται με υπολογισμό της θερμότητας συναγωγής για κάθε εξεταζόμενο πάχος.

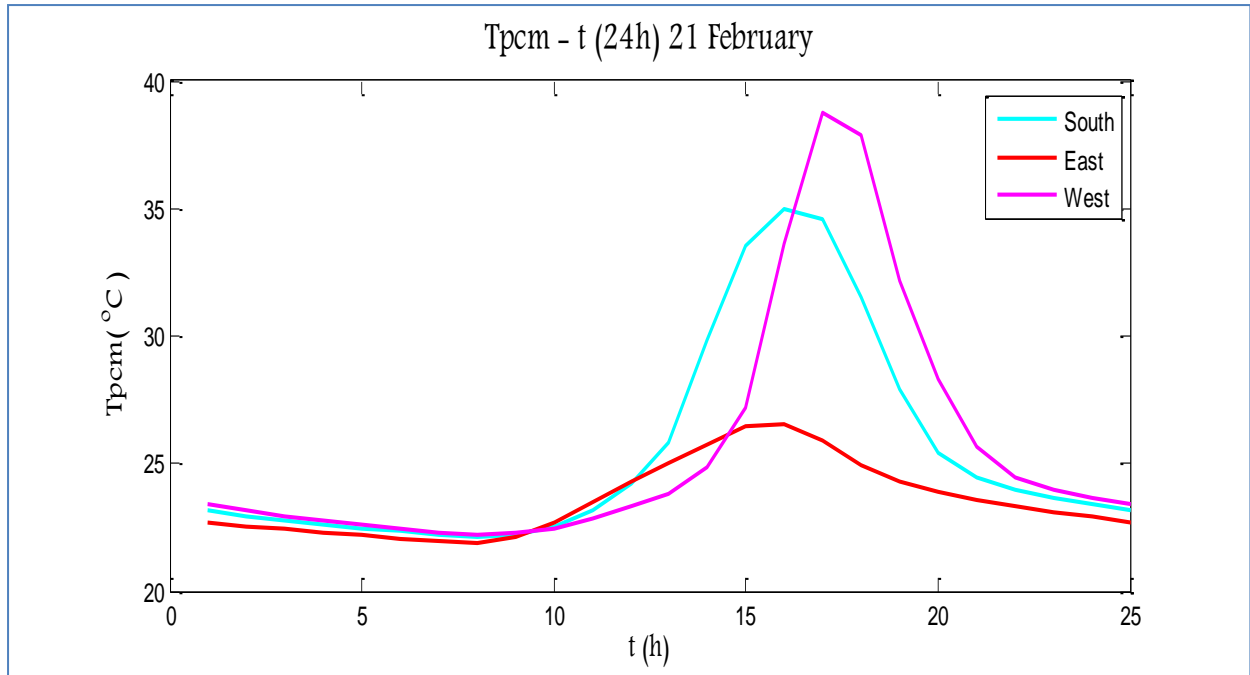
#### 5.5.3.1 Στρώμα PCM πάχους 30mm

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM, πάχους 30mm, νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών.

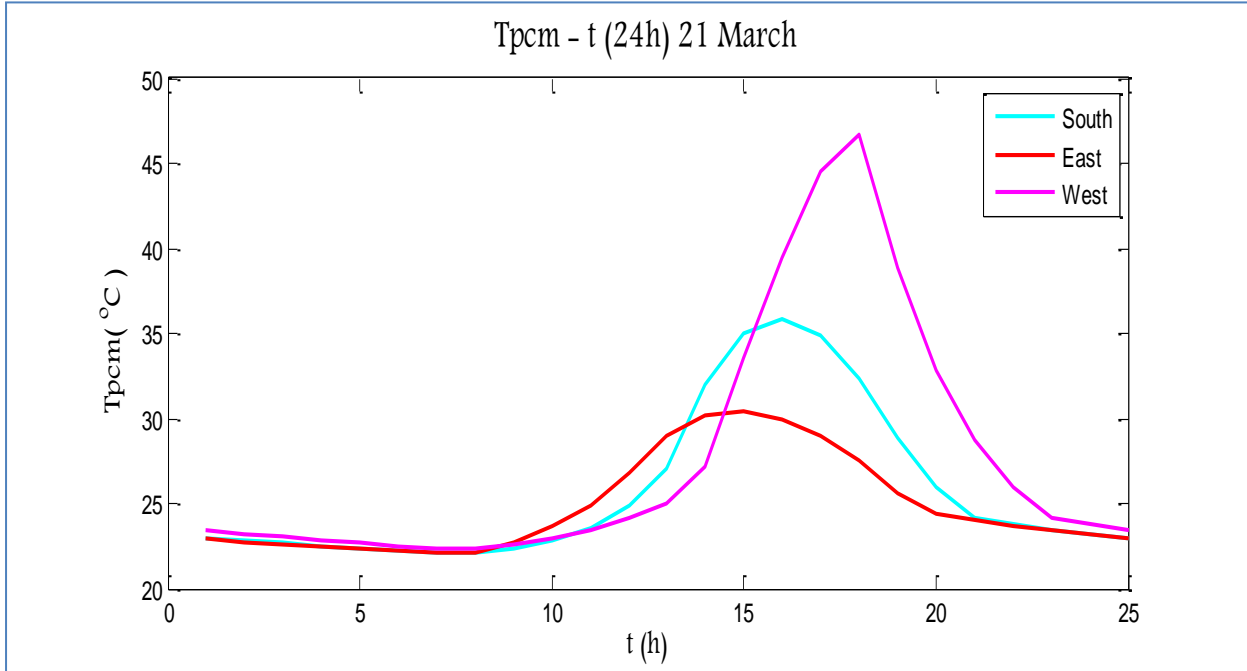


Σχήμα 5.5.3.1.1: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 30mm, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό

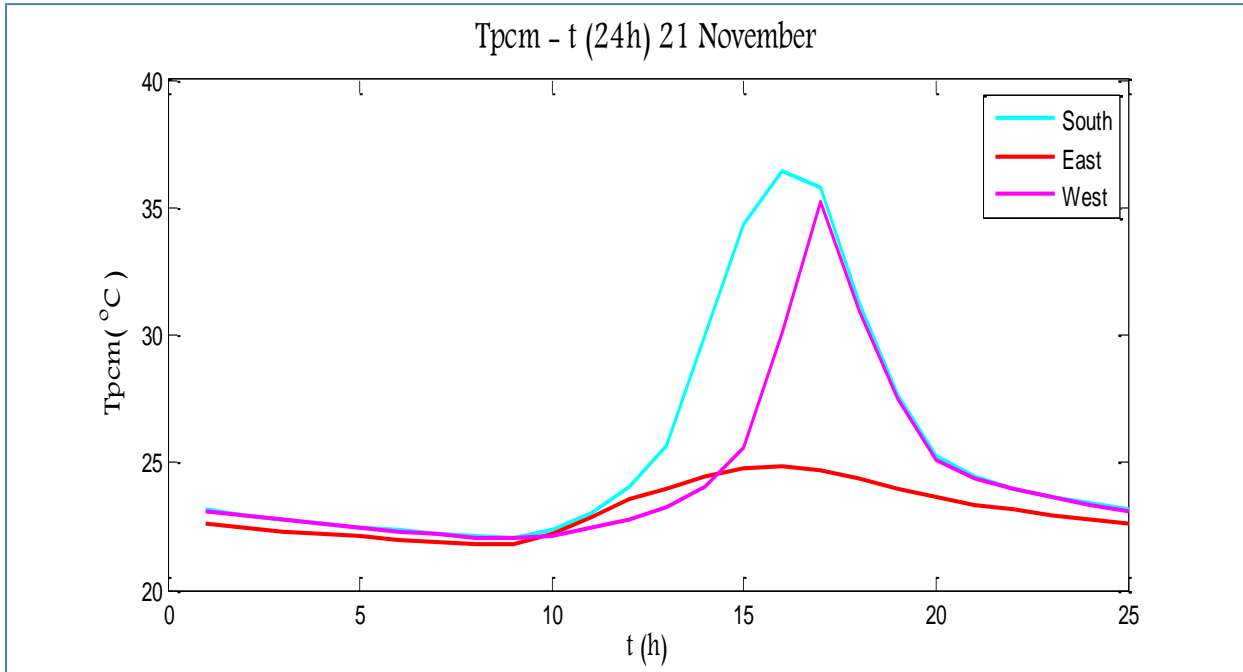




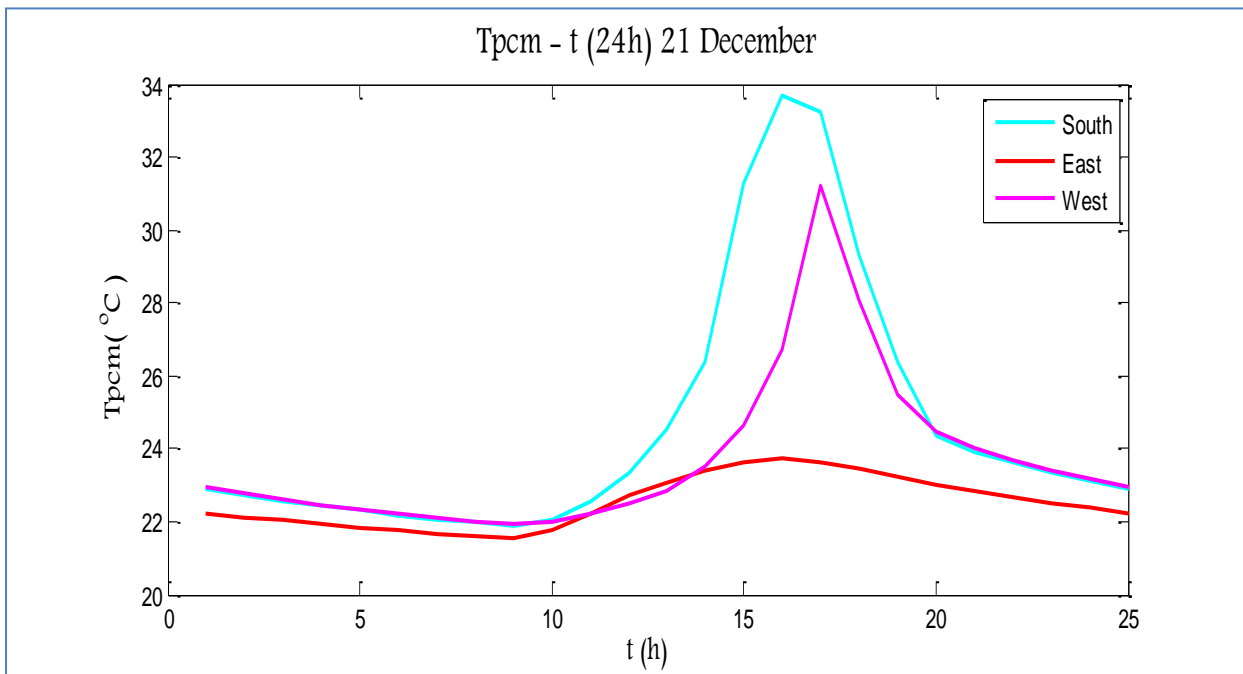
Σχήμα 5.5.3.1.2: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 30mm, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου, για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.5.3.1.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 30mm, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου, για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό



Σχήμα 5.5.3.1.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 30mm, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου, για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό



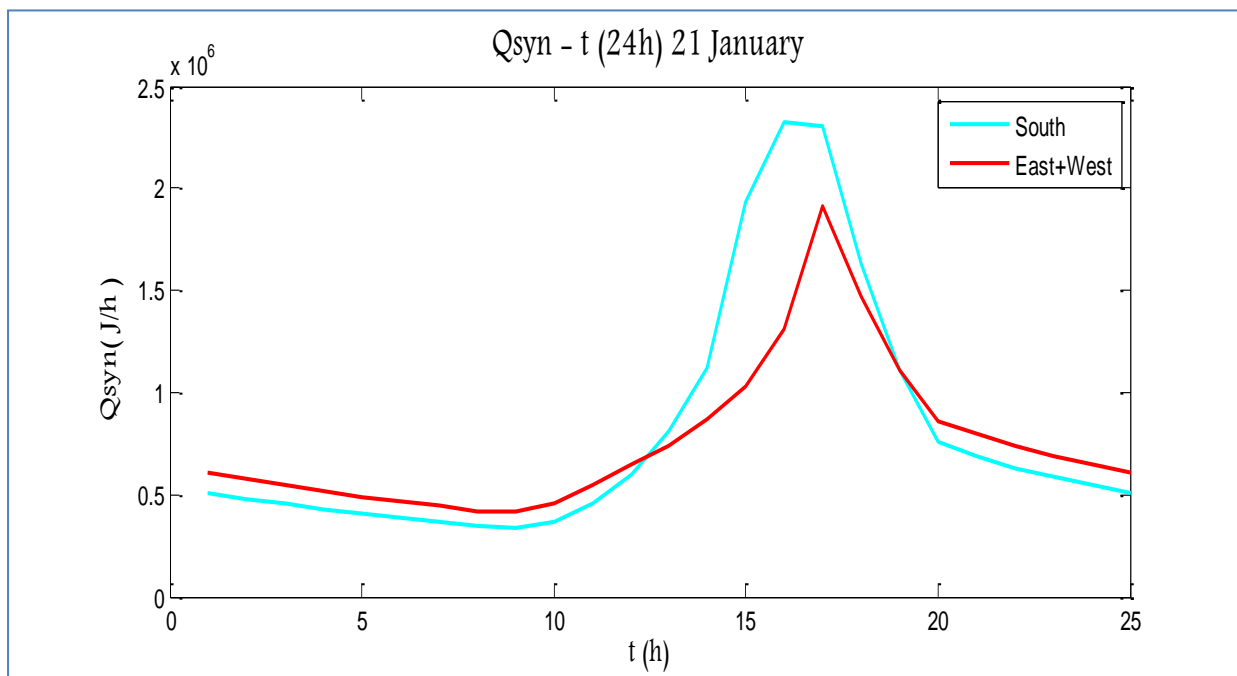
Σχήμα 5.5.3.1.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 30mm, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου, για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό

➤ Σύγκριση της προσδιδόμενης ενέργειας  $Q_{\text{συναγωγής}}$  στο δωμάτιο από στρώμα PCM νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

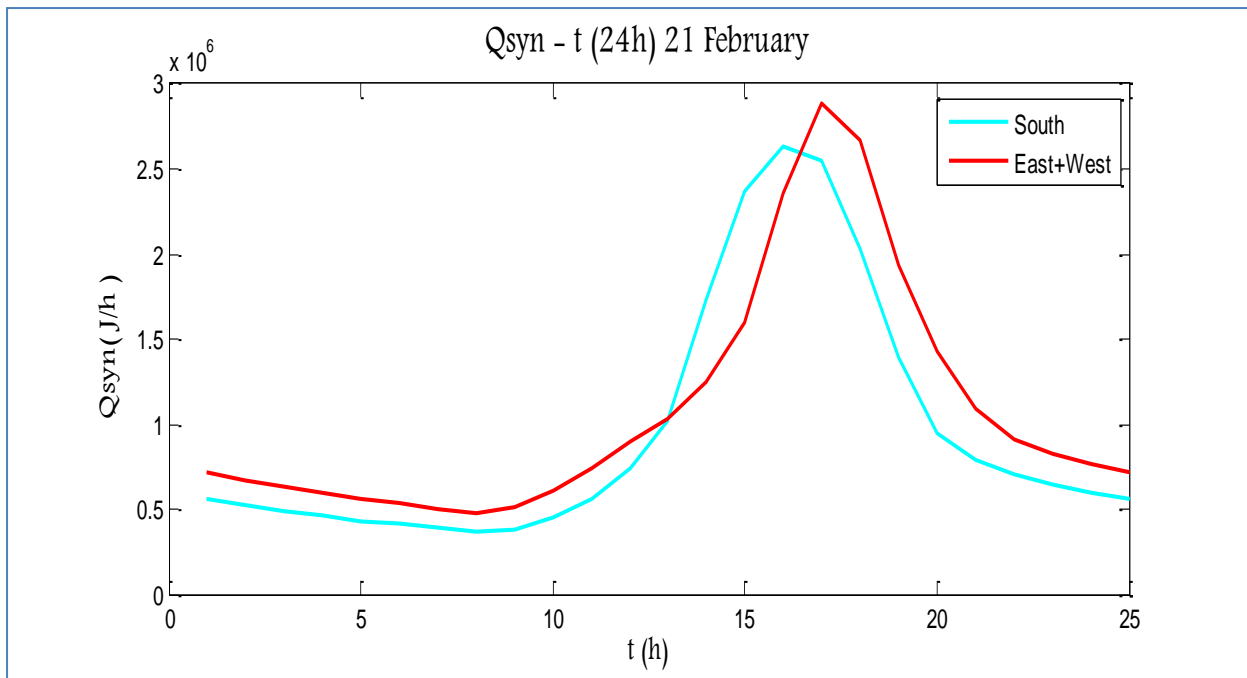
Ο υπολογισμός της θερμότητας που προσδίδει το PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου είναι απαραίτητος προκειμένου να διαπιστωθεί η απόδοσή του στις δύο περιπτώσεις εξεταζόμενων δωματίων, αφού έχει μεταβληθεί το πάχος του.

Η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό της προσδιδόμενης ενέργειας είναι ίδια με αυτή του Κεφαλαίου 5.5.2.1, και προκύπτει από τις σχέσεις (5.5.2.1.1) και (5.5.2.1.2), χρησιμοποιώντας τις θερμοκρασίες που υπολογίστηκαν από την παραπάνω μελέτη για πάχος 30mm.

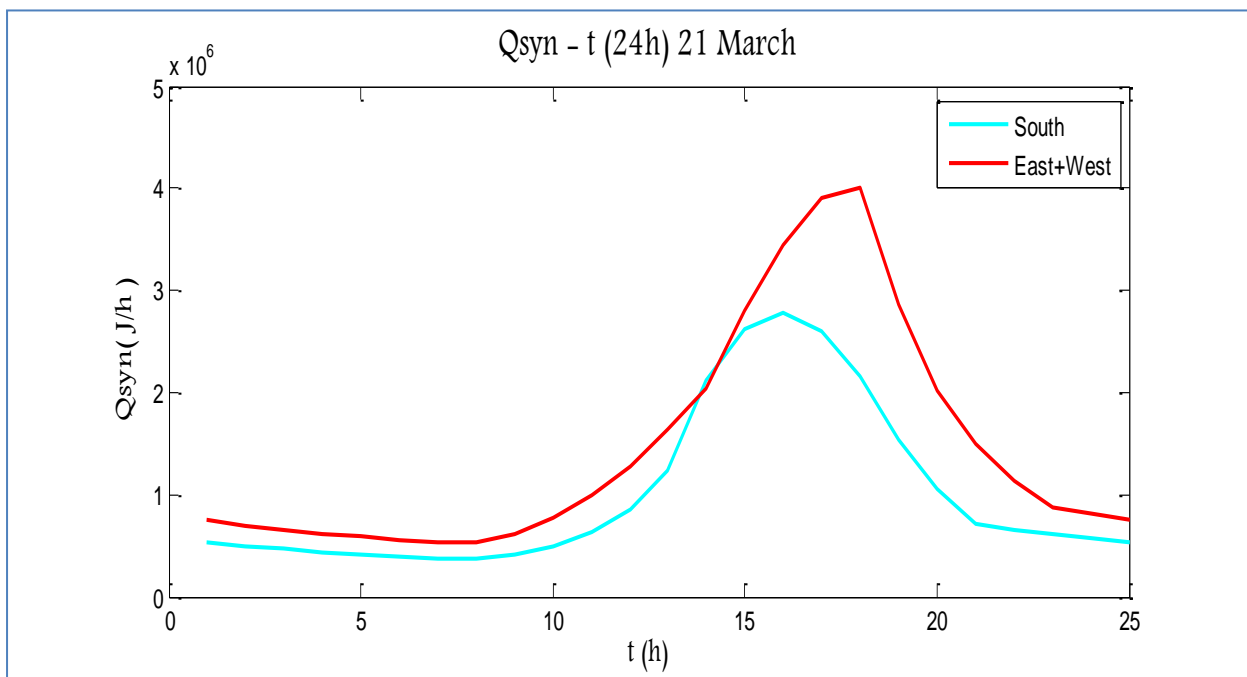
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η θερμότητα συναγωγής PCM νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, όπως υπολογίστηκε για την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών.



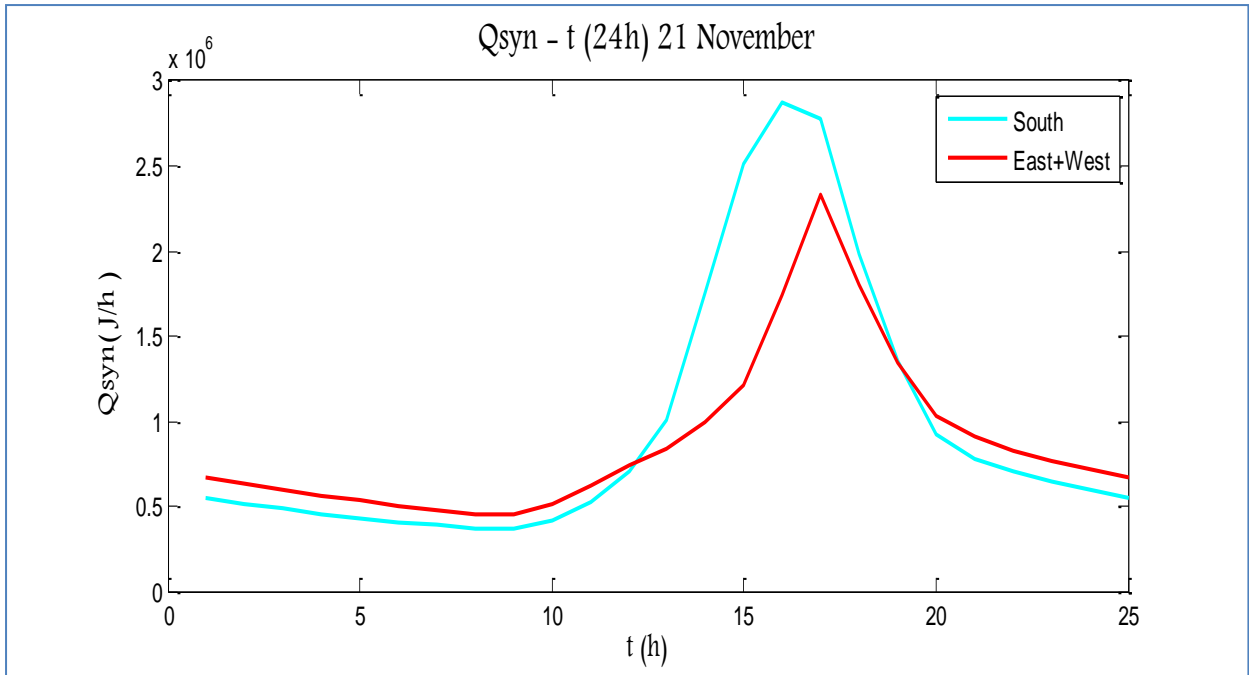
**Σχήμα 5.5.3.1.6:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{\text{syn}}(\text{J/h})$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



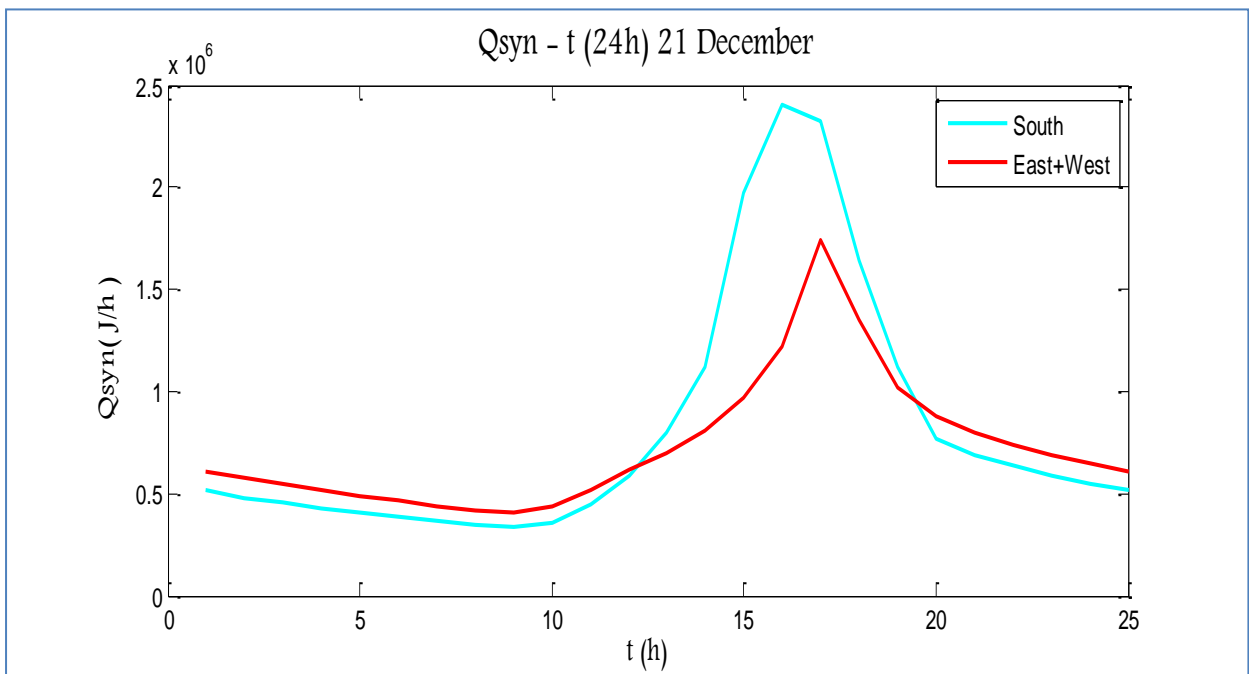
Σχήμα 5.5.3.1.7: Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 5.5.3.1.8: Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Μαρτίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



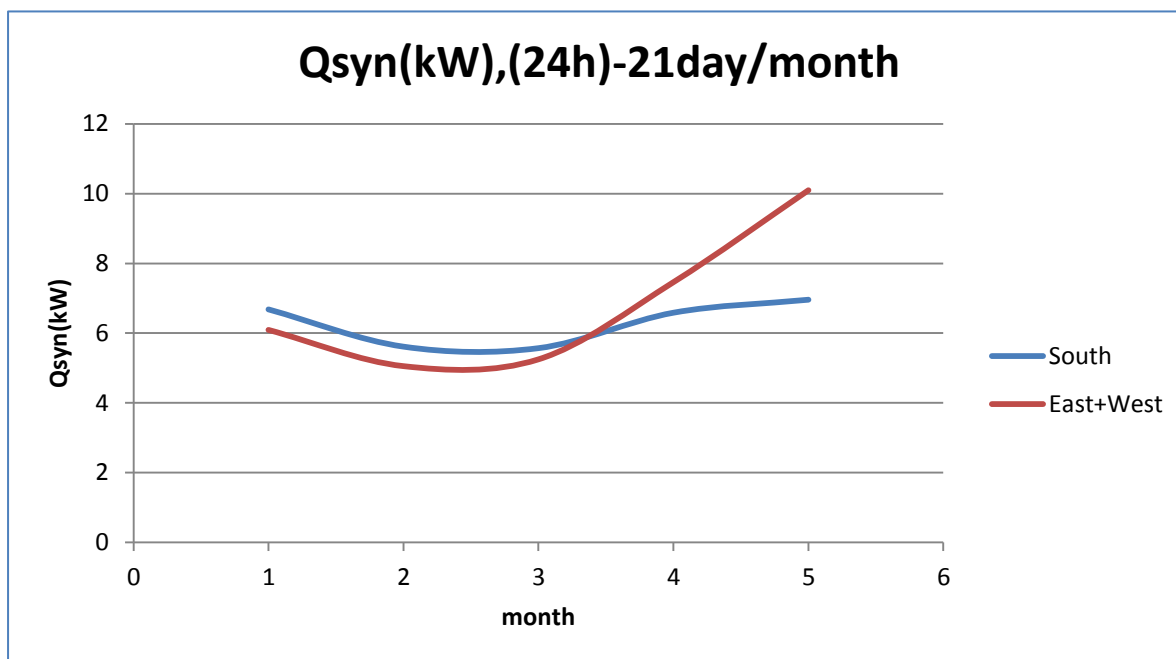
**Σχήμα 5.5.3.1.9:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}$ (J/h) στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



**Σχήμα 5.5.3.1.10:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}$ (J/h) στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συνολικό ποσό της θερμότητας που προσδίδει το στρώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου για όλο το 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.3.1.1 και απεικονίζονται στο Σχήμα 5.5.3.1.11. Η συνολική θερμότητα συναγωγής υπολογίζεται με βάση τη σχέση (5.5.2.1.3).

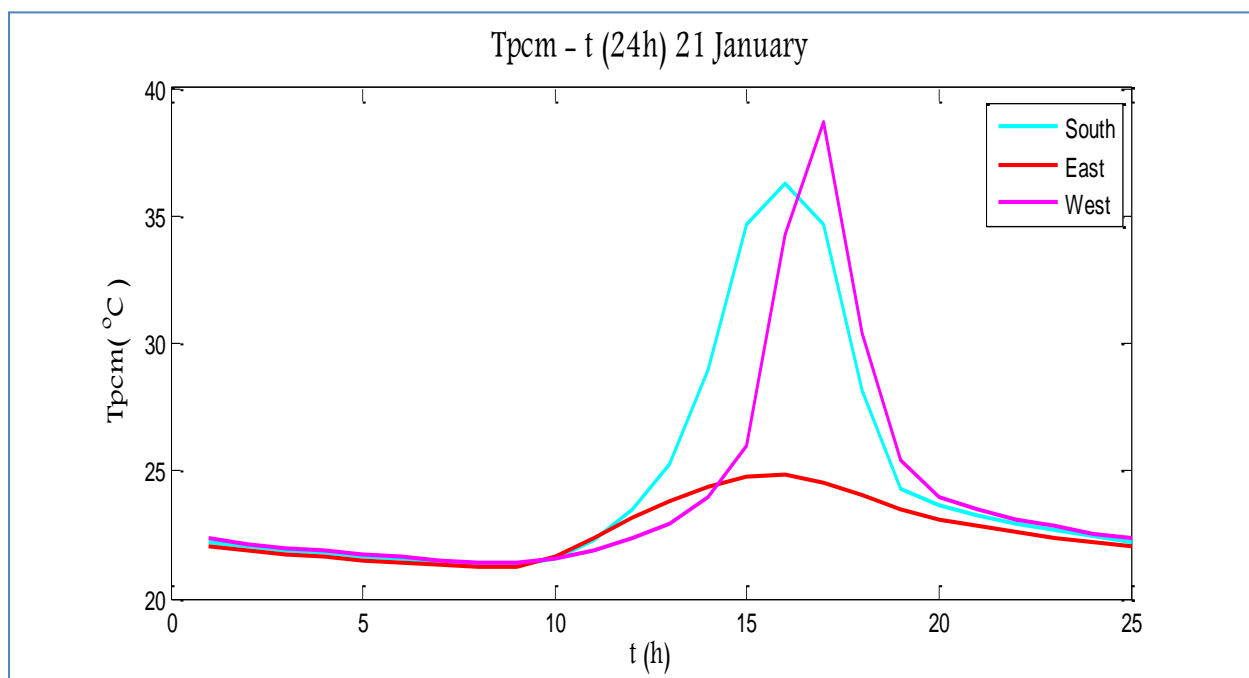
Πίνακας 5.5.3.1.1: Qσυναγωγής (kW),(24h)			
		Νότος	Ανατολή-Δύση
21 <sup>η</sup> Νοεμβρίου	1	6,68	6,09
21 <sup>η</sup> Δεκεμβρίου	2	5,61	5,06
21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου	3	5,57	5,25
21 <sup>η</sup> Φεβρουαρίου	4	6,59	7,47
21 <sup>η</sup> Μαρτίου	5	6,96	10,10



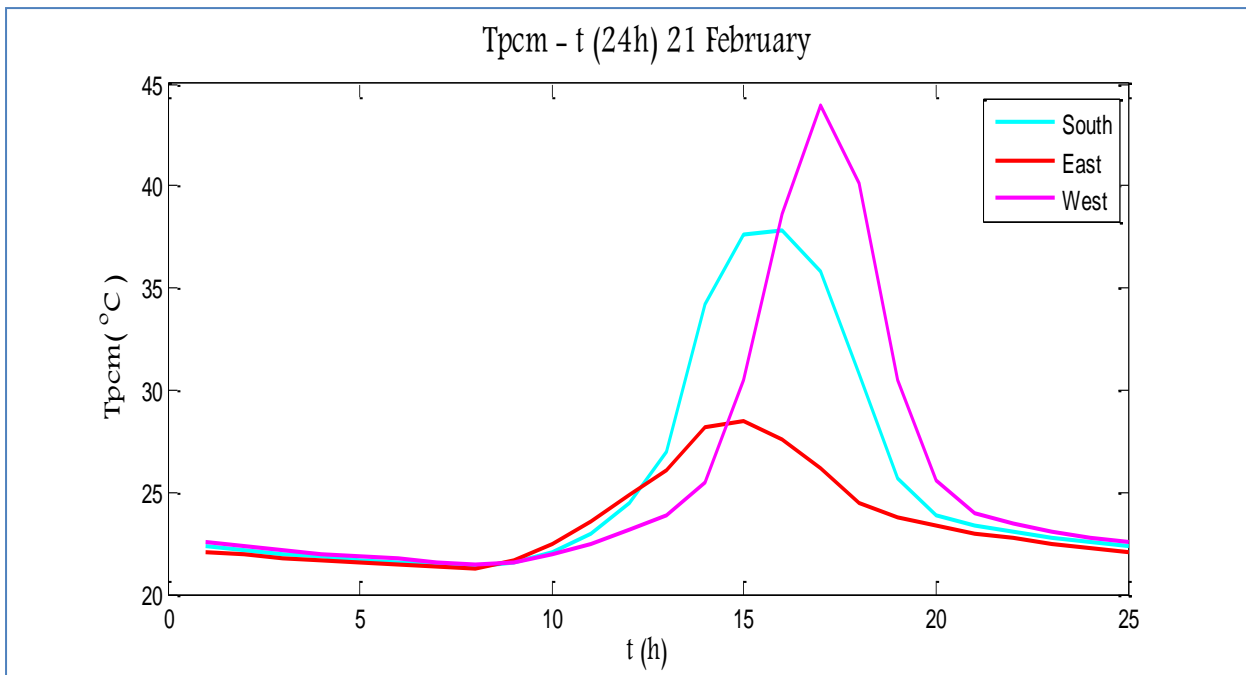
**Σχήμα 5.5.3.1.11:** Μεταβολή της συνολικής προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM, πάχους 30mm νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα

### 5.5.3.2 Στρώμα PCM πάχους 20mm

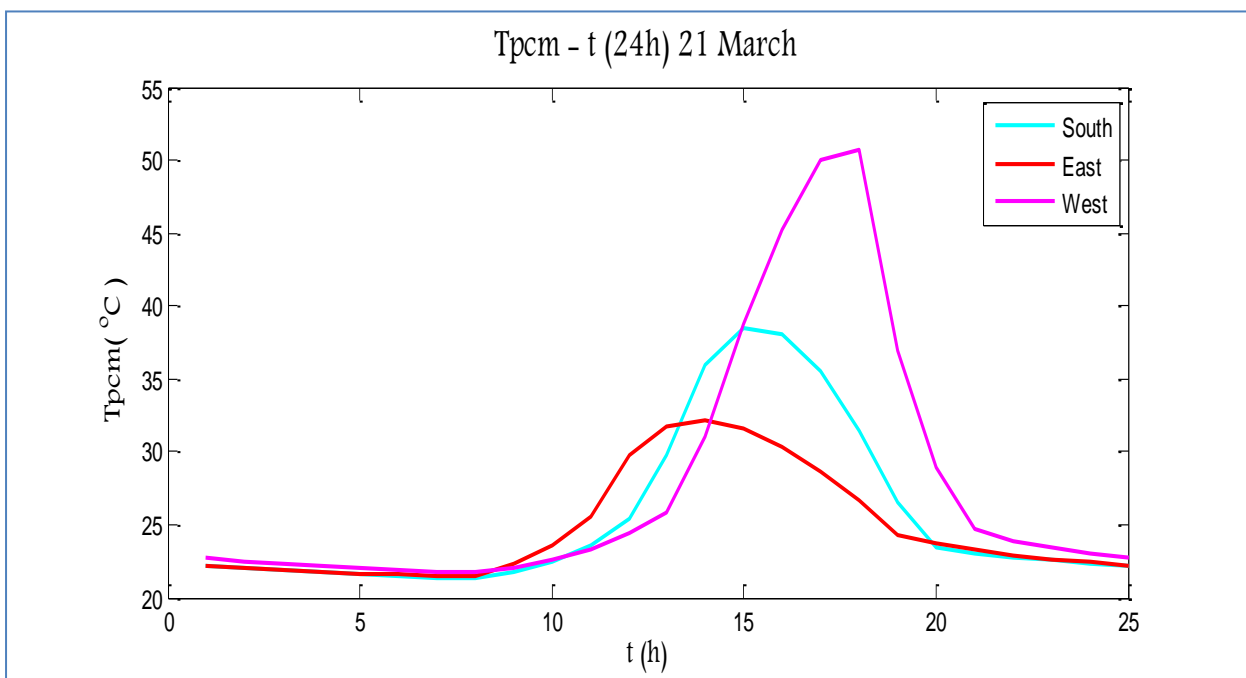
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM, πάχους 20mm, νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών.



**Σχήμα 5.5.3.2.1:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 20mm, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό

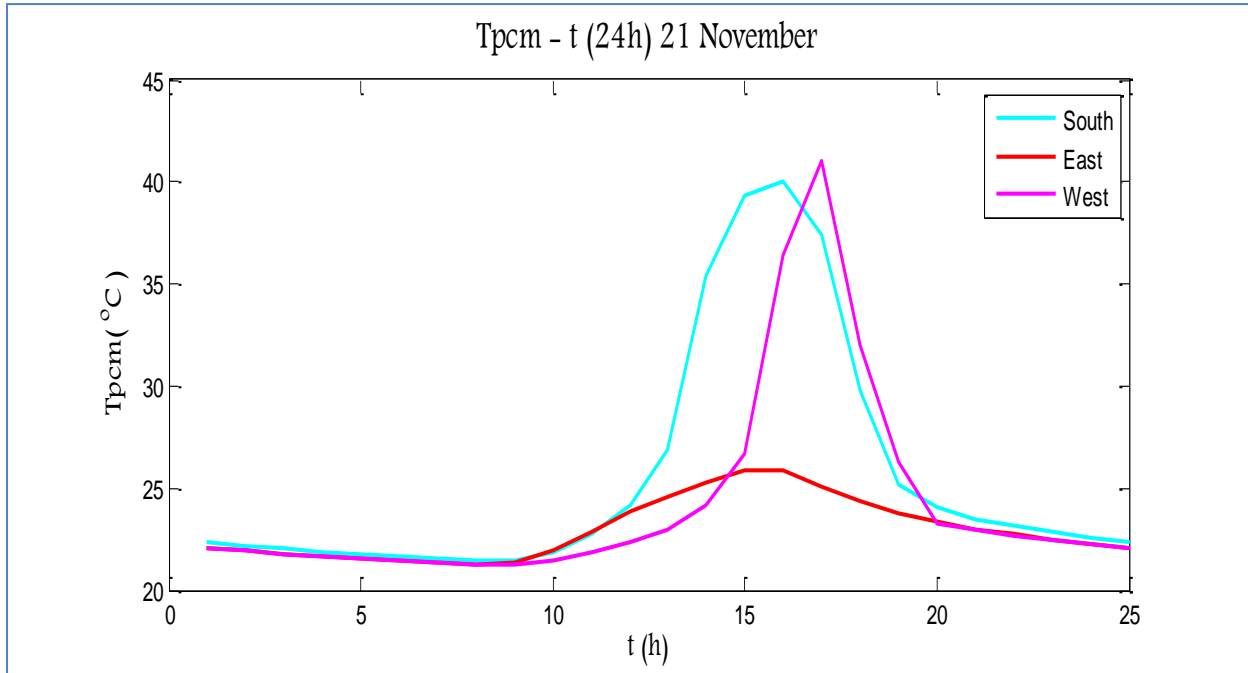


Σχήμα 5.5.3.2.2: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 20mm, την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου, για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό

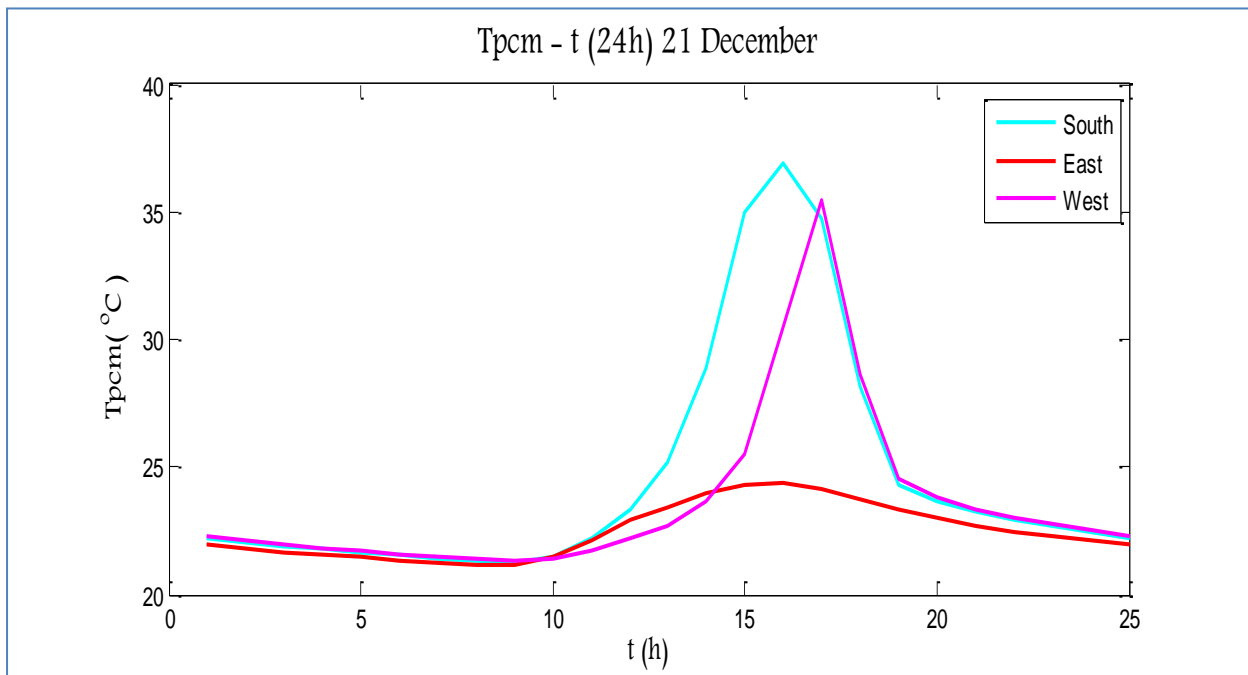


Σχήμα 5.5.3.2.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 20mm, την 21<sup>η</sup> Μαρτίου, για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό





Σχήμα 5.5.3.2.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 20mm, την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου, για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό

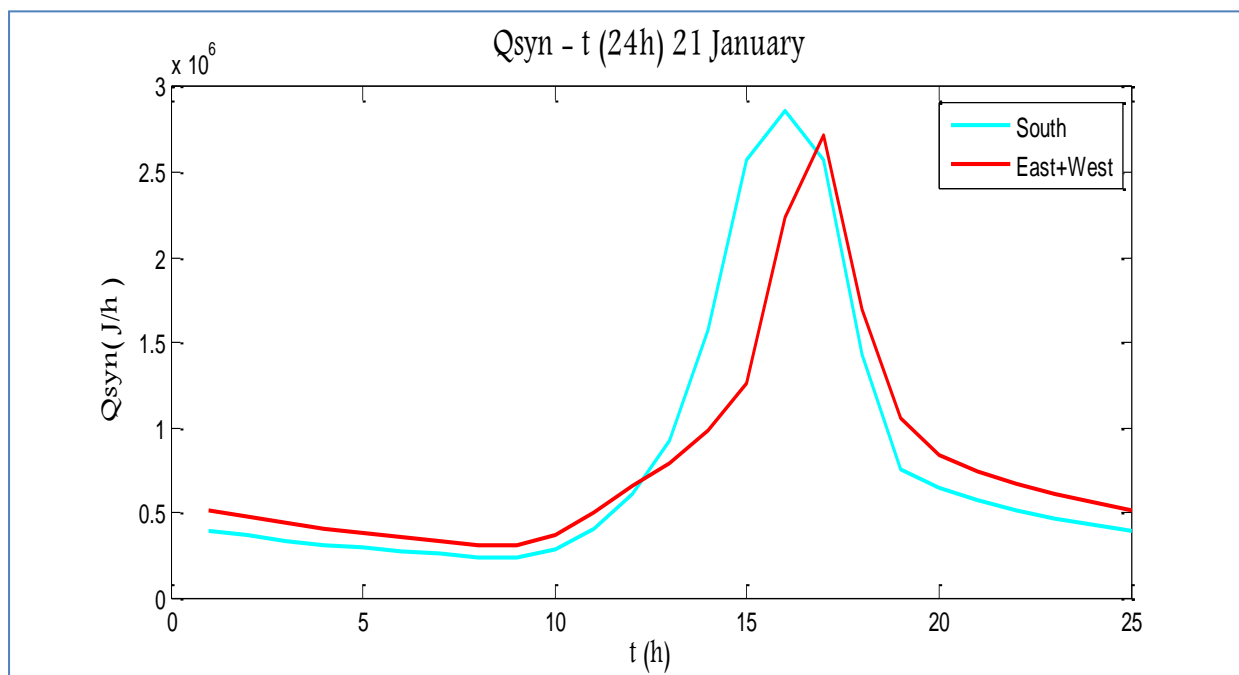


Σχήμα 5.5.3.2.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM, πάχους 20mm, την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου, για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό

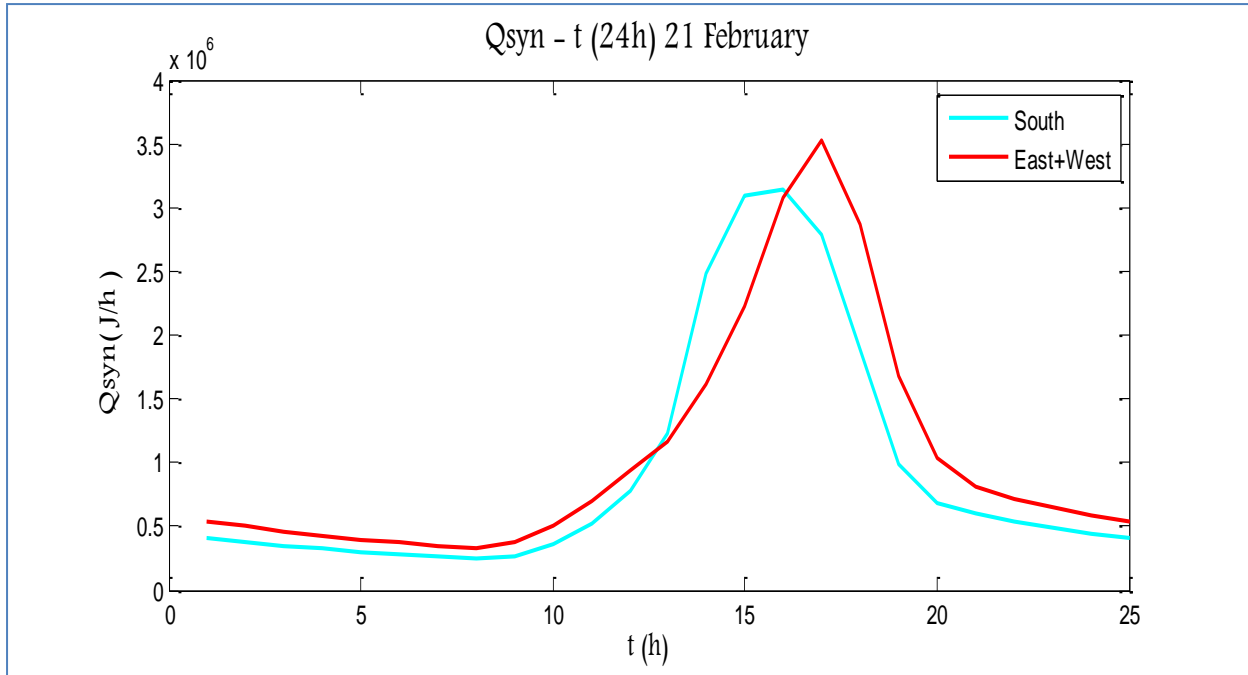
➤ Σύγκριση της προσδιδόμενης ενέργειας  $Q_{\text{συναγωγής}}$  στο δωμάτιο από στρώμα PCM νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό της προσδιδόμενης ενέργειας είναι ίδια με αυτή του Κεφαλαίου 5.5.2.1, και προκύπτει από τις σχέσεις (5.5.2.1.1) και (5.5.2.1.2), χρησιμοποιώντας τις θερμοκρασίες που υπολογίστηκαν από την παραπάνω μελέτη για πάχος 20mm.

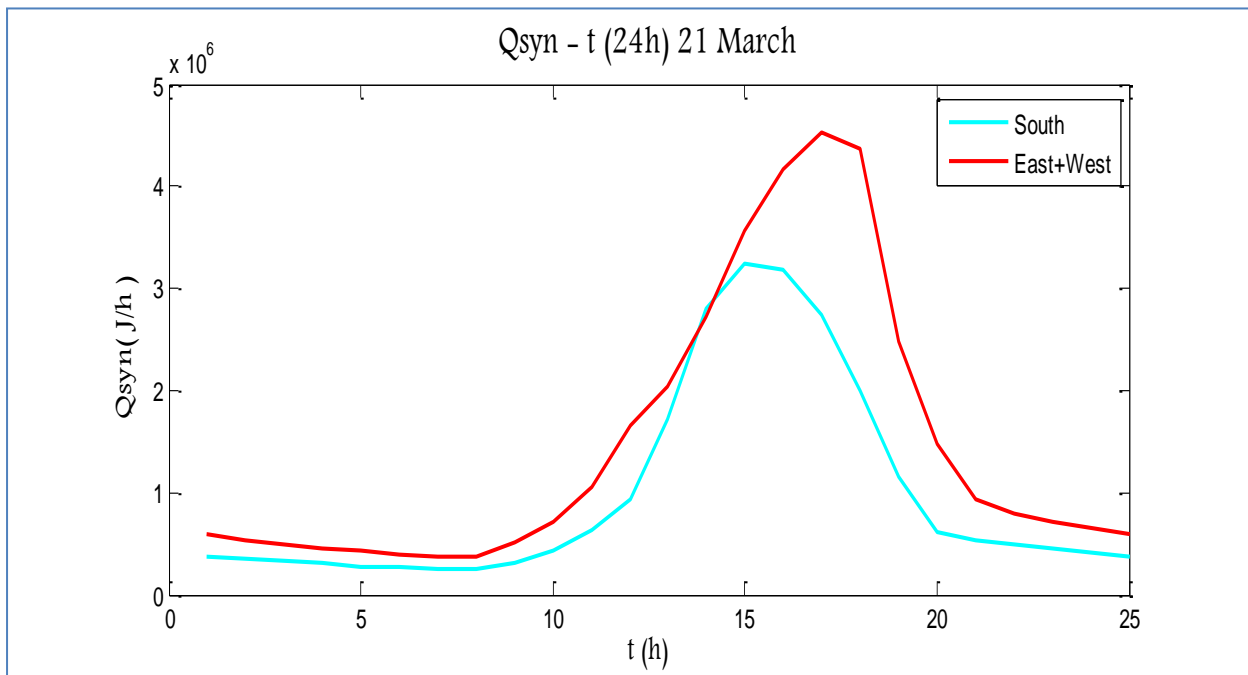
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η θερμότητα συναγωγής PCM νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, όπως υπολογίστηκε για την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών.



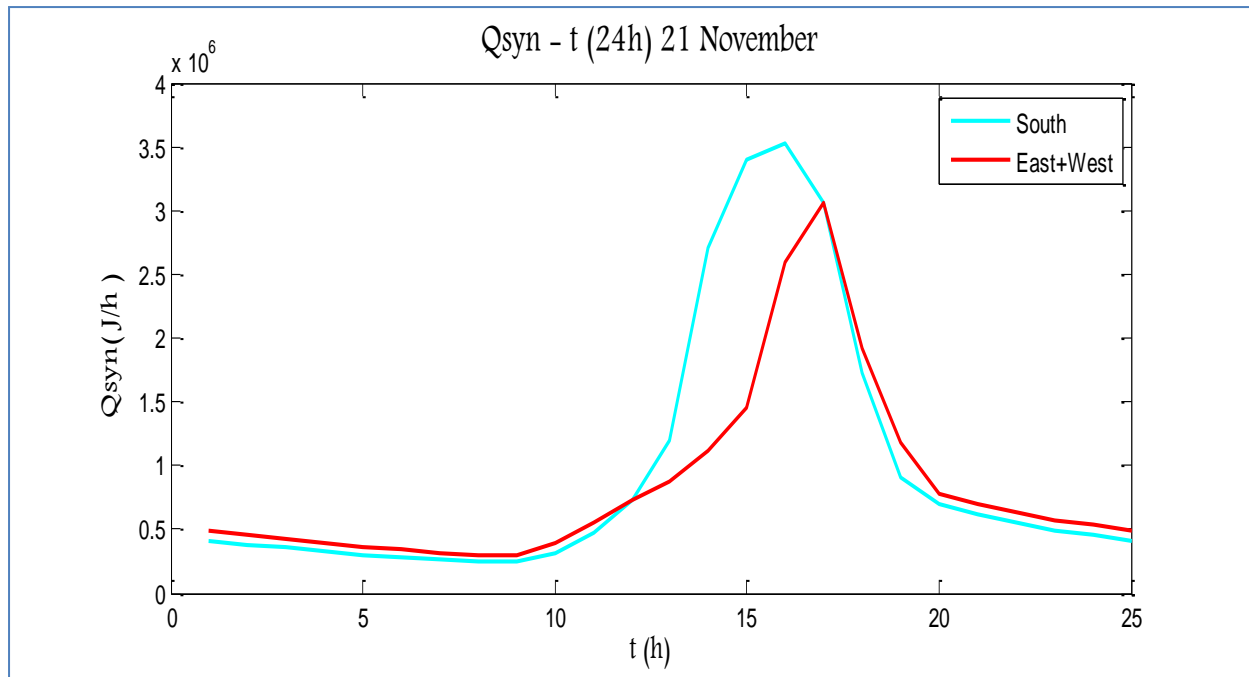
Σχήμα 5.5.3.2.6: Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{\text{syn}}(\text{J/h})$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



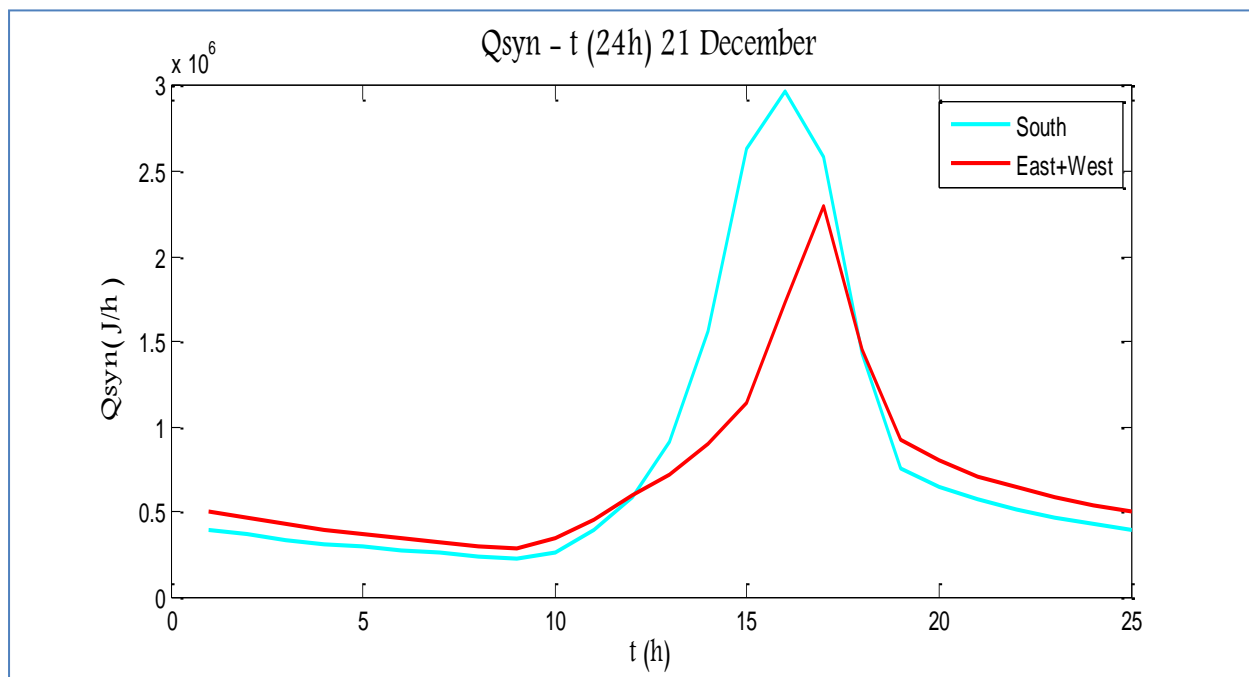
**Σχήμα 5.5.3.2.7:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



**Σχήμα 5.5.3.2.8:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Μαρτίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



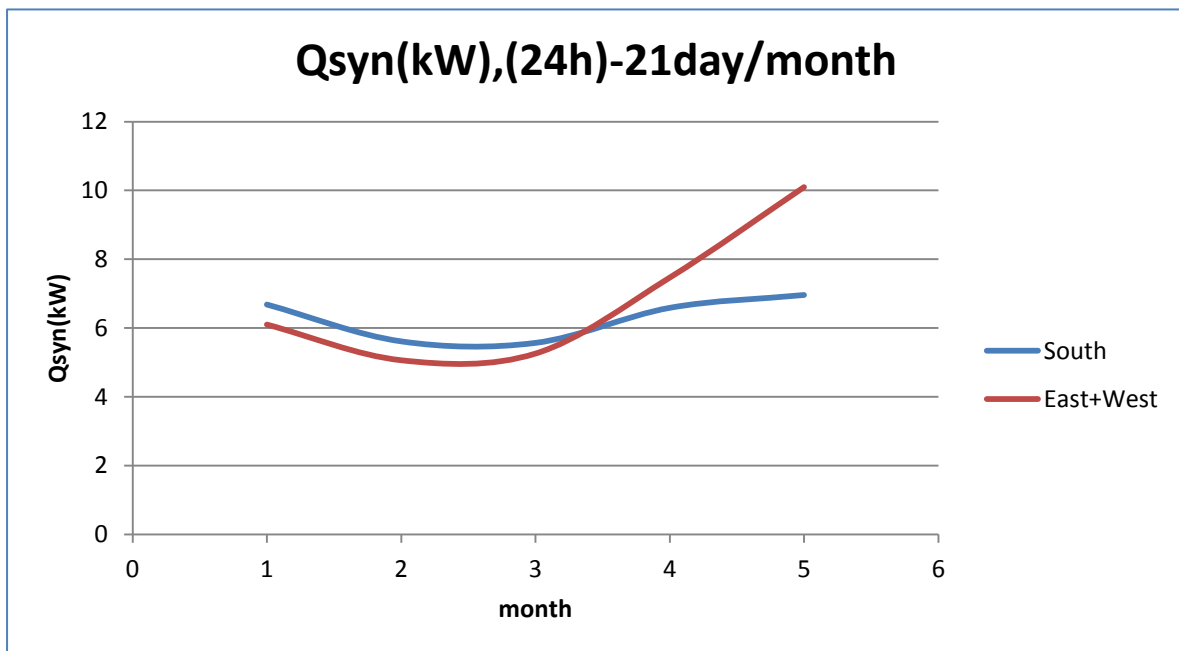
**Σχήμα 5.5.3.2.9:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού



**Σχήμα 5.5.3.2.10:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συνολικό ποσό της θερμότητας που προσδίδει το στρώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου για όλο το 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.3.2.1 και απεικονίζονται στο Σχήμα 5.5.3.2.11. Η συνολική θερμότητα συναγωγής υπολογίζεται με βάση τη σχέση (5.5.2.1.3).

Πίνακας 5.5.3.1.1: Qσυναγωγής (kW),(24h)			
		Νότος	Ανατολή-Δύση
21 <sup>η</sup> Νοεμβρίου	1	6,70	5,82
21 <sup>η</sup> Δεκεμβρίου	2	5,49	4,92
21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου	3	5,47	5,46
21 <sup>η</sup> Φεβρουαρίου	4	6,44	7,34
21 <sup>η</sup> Μαρτίου	5	6,77	10,16



**Σχήμα 5.5.3.2.11:** Μεταβολή της συνολικής προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM, πάχους 20mm νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Η επίδραση του πάχους του στρώματος PCM νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού είναι ίδια με τις προηγούμενες μελέτες. Όσο μειώνεται το πάχος, τόσο το PCM αναπτύσσει μεγαλύτερες μέγιστες και μικρότερες ελάχιστες θερμοκρασίες. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το PCM έχοντας μειωμένο πάχος, και κατά συνέπεια μειωμένη μάζα, αυξάνει περισσότερο τη θερμοκρασία του απορροφώντας ηλιακή ακτινοβολία. Τις νυχτερινές ώρες το PCM προσδίδει το μεγαλύτερο ποσό θερμότητας και λόγω μειωμένου πάχους εξαντλείται περισσότερο.

Οι διαφορές μεταξύ των διαφόρων προσανατολισμών για τα δύο εξεταζόμενα πάχη συμπίπτουν με τη μελέτη πάχους PCM 40mm. Δηλαδή το στρώμα έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες, εκτός από τις περιπτώσεις Φεβρουαρίου και Μαρτίου όπου επικρατεί αυτό του δυτικού προσανατολισμού, εφόσον αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία στη δύση και έχει σε όλες τις μελέτες μειωμένη μάζα σε σχέση με το PCM νότιου προσανατολισμού. Τις μικρότερες δυνατές θερμοκρασίες αναπτύσσει το στρώμα έναντι υαλοπίνακα ανατολικού προσανατολισμού.

Η θερμότητα που μεταφέρεται στο δωμάτιο στις δύο περιπτώσεις αυξάνεται όσο μειώνεται το πάχος, λόγω των αυξημένων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Για τις δύο περιπτώσεις εξεταζόμενων δωματίων, τόσο για πάχος 30mm όσο και για αυτό των 20mm, ισχύουν αυτά που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 5.5.2.1. Τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού προσφέρει μεγαλύτερο ποσό θερμότητας στο δωμάτιο και για τα δύο εξεταζόμενα πάχη. Τους υπόλοιπες μήνες (Φεβρουάριο και Μάρτιο), είναι περισσότερο αποδοτικό το συνολικό PCM του εξεταζόμενου δωματίου με δύο υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, αφού αναπτύσσει υψηλότερες θερμοκρασίες.

#### 5.5.4 Παραμετρική μελέτη ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό

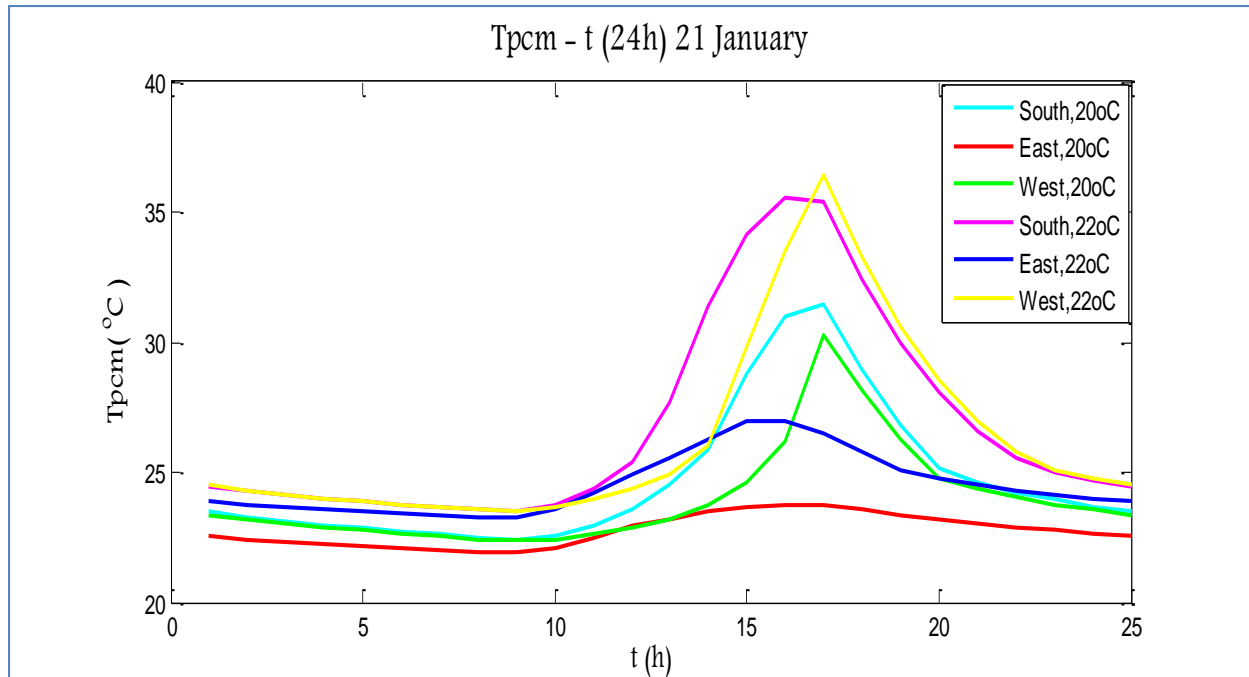
Στη παρούσα μελέτη θα γίνει έλεγχος της επίδρασης της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου στις θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM. Πραγματοποιείται αλλάζοντας τη εσωτερική θερμοκρασία, η οποία είναι  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  στις προηγούμενες μελέτες, αρχικά αυξάνοντάς την σε  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$  και στη συνέχεια μειώνοντάς την σε  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ . Οι θερμοκρασίες του PCM προκύπτουν και στις δύο περιπτώσεις για την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια με αυτή της μελέτης στην ενότητα 5.5.2, με αλλαγή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου στις σχέσεις (5.5.2.12 και 5.5.2.13) και πραγματοποίηση επαναληπτικής διαδικασίας, ώστε να προκύψουν οι νέες θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM κατά τη διάρκεια του 24ωρου για νότιο και συνδυασμό ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού.

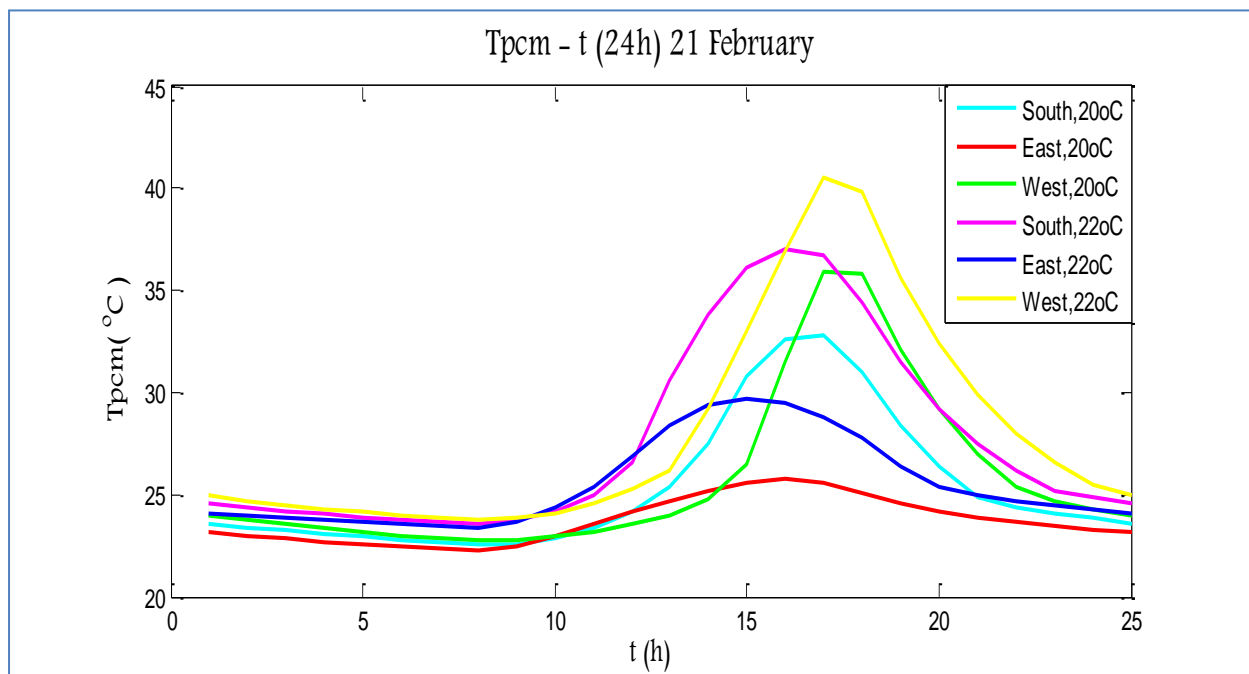
Το πάχος του εξεταζόμενου PCM είναι 40mm και οι μήνες μελέτης είναι Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος, Νοέμβριος και Δεκέμβριος όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

##### 5.5.4.1 Εσωτερική θερμοκρασία δωματίου $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του στρώματος PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού για εσωτερική θερμοκρασία  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ .

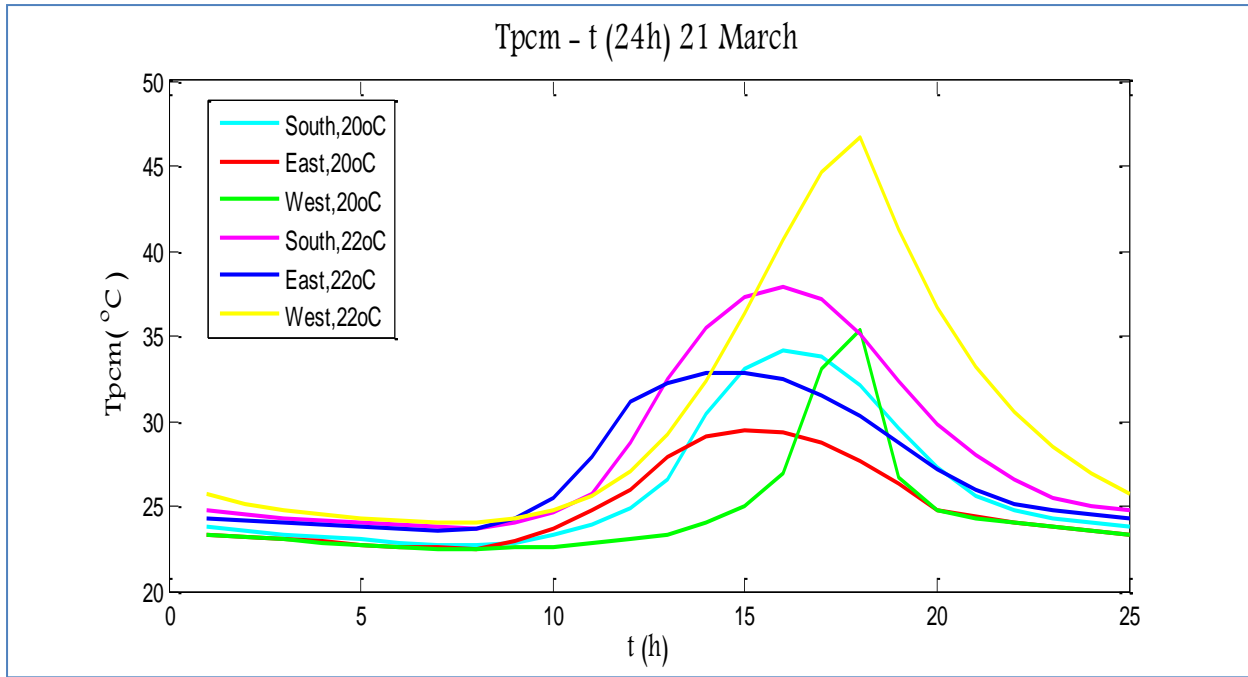


Σχήμα 5.5.4.1.1: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου

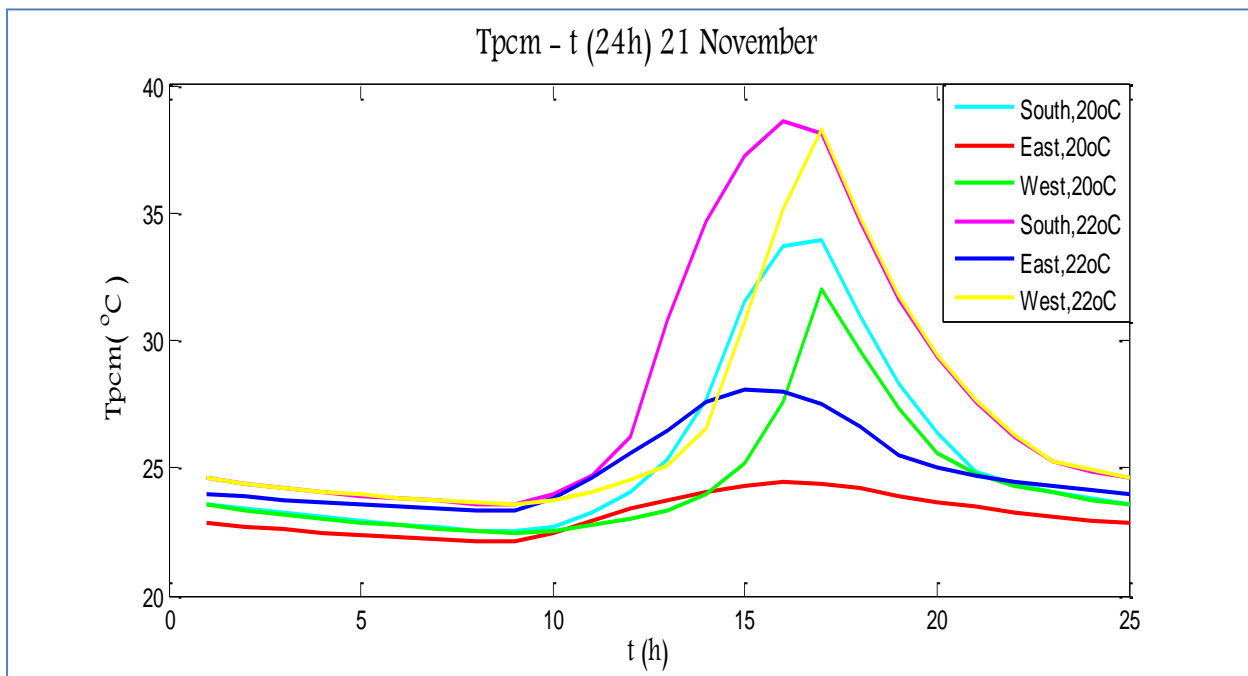


Σχήμα 5.5.4.1.2: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου

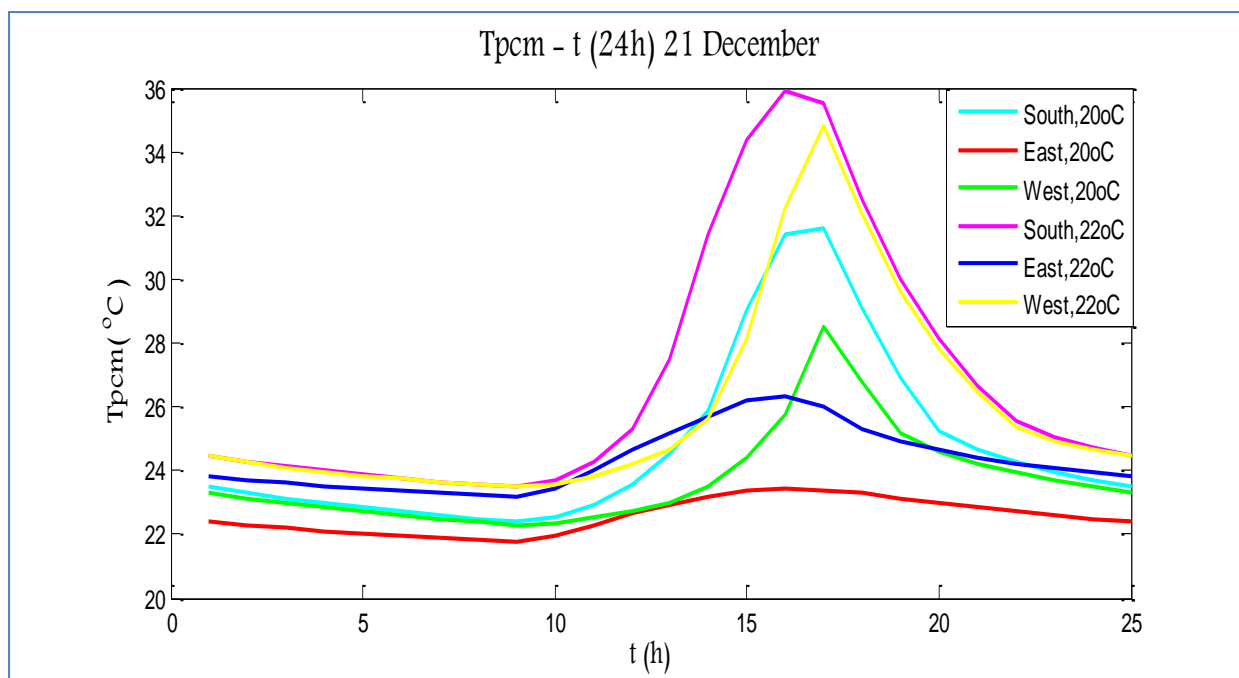




Σχήμα 5.5.4.1.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό την 21<sup>η</sup> Μαρτίου



Σχήμα 5.5.4.1.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου

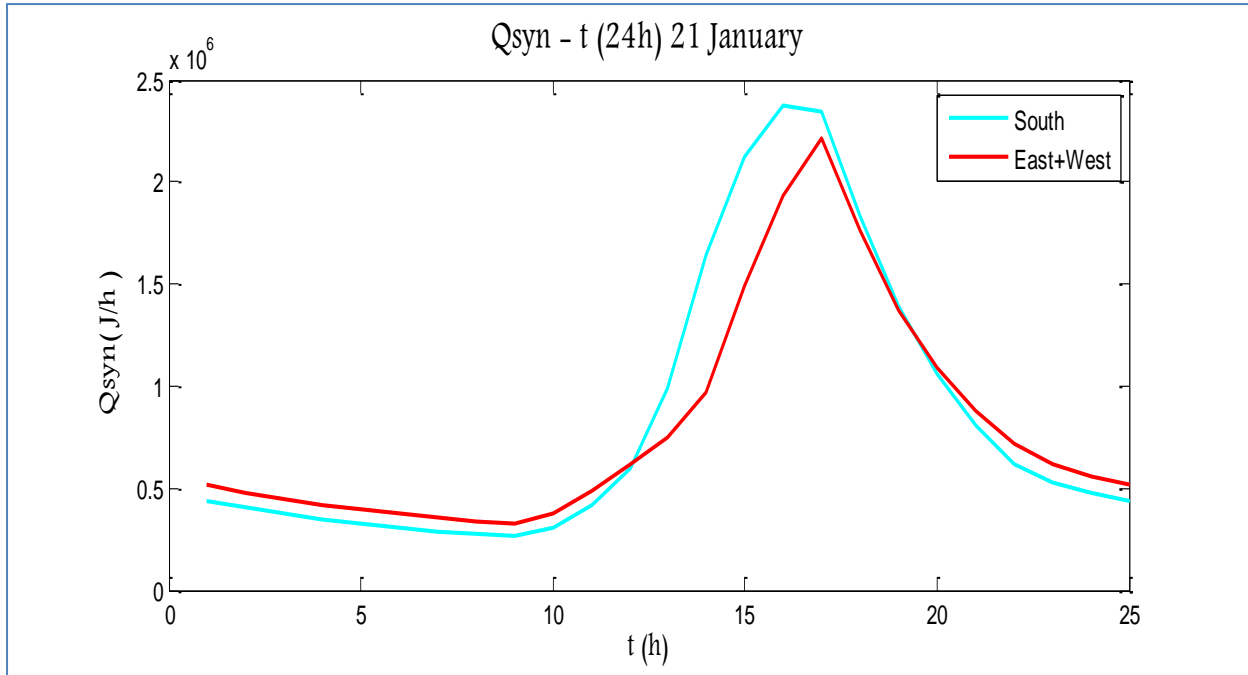


Σχήμα 5.5.4.1.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ , για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

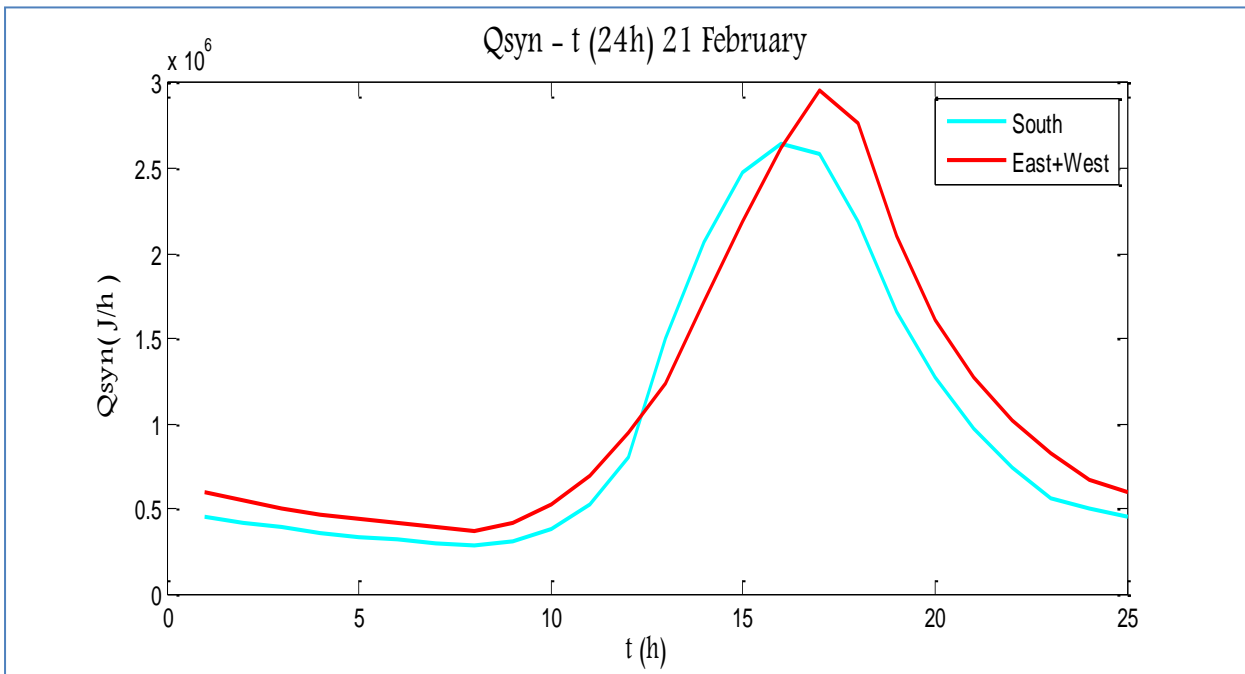
➤ Σύγκριση της προσδιδόμενης ενέργειας  $Q_{\text{συναγωγής}}$  στο δωμάτιο από στρώμα PCM νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό της προσδιδόμενης ενέργειας είναι ίδια με αυτή του Κεφαλαίου 5.5.2.1, και προκύπτει από τις σχέσεις (5.5.2.1.1) και (5.5.2.1.2), χρησιμοποιώντας τις θερμοκρασίες που υπολογίστηκαν από την παραπάνω μελέτη για πάχος 40mm και εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ .

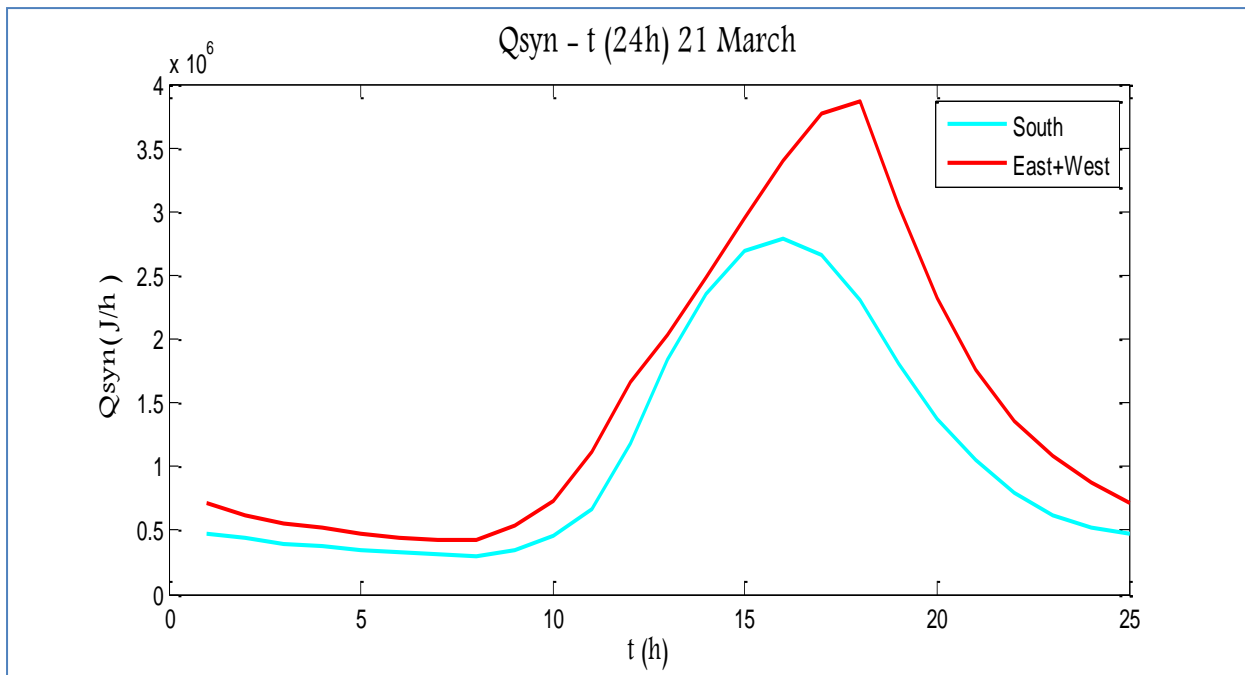
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η θερμότητα συναγωγής PCM νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, όπως υπολογίστηκε για την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών.



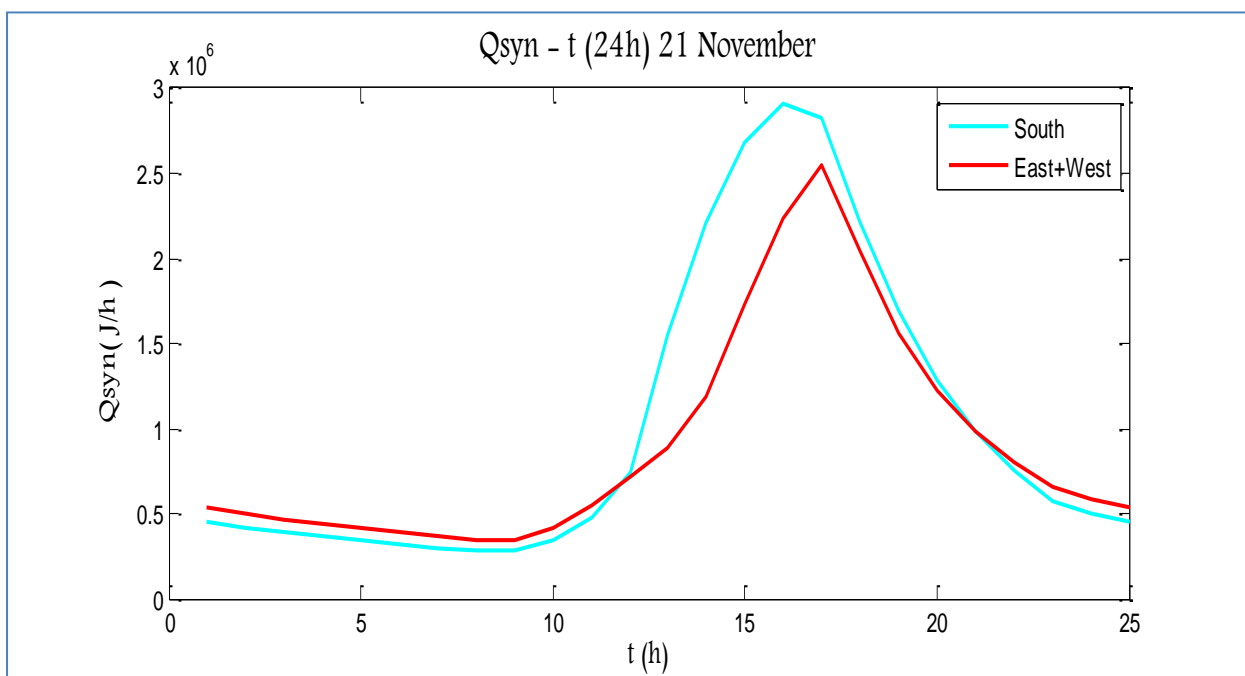
**Σχήμα 5.5.4.1.6:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, για  $T_{in}=22^{\circ}C$



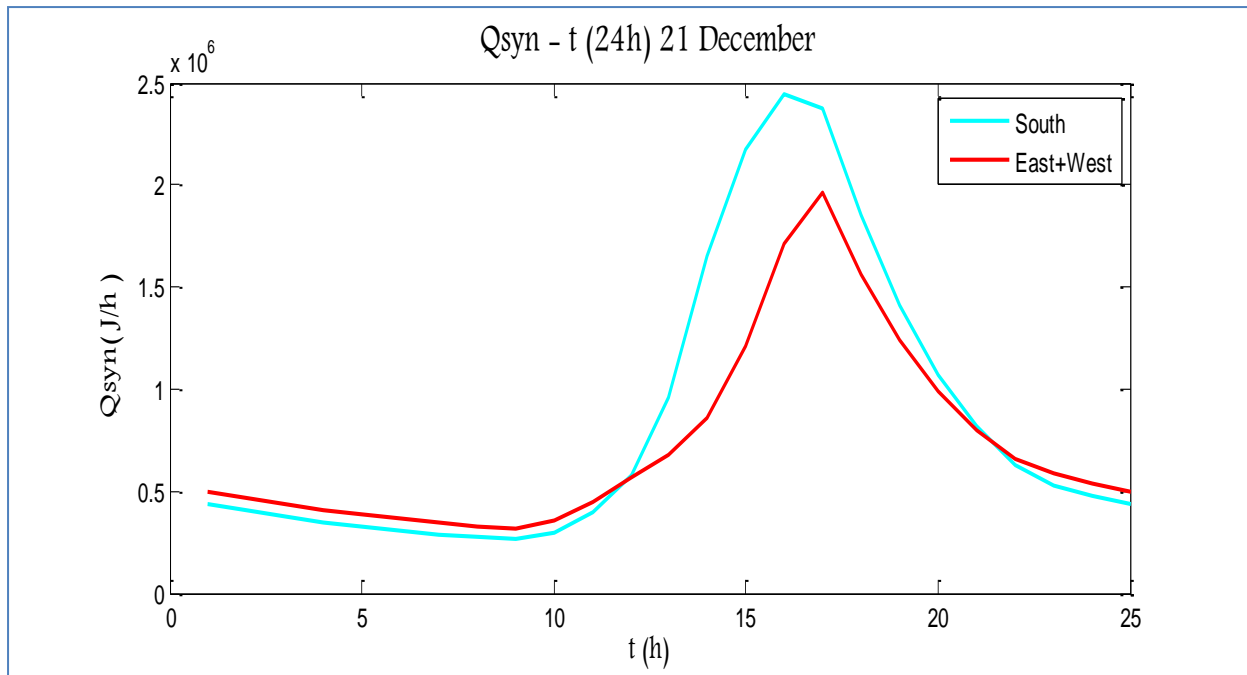
**Σχήμα 5.5.4.1.7:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, για  $T_{in}=22^{\circ}C$



**Σχήμα 5.5.4.1.8:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Μαρτίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, για  $T_{in}=22^{\circ}C$



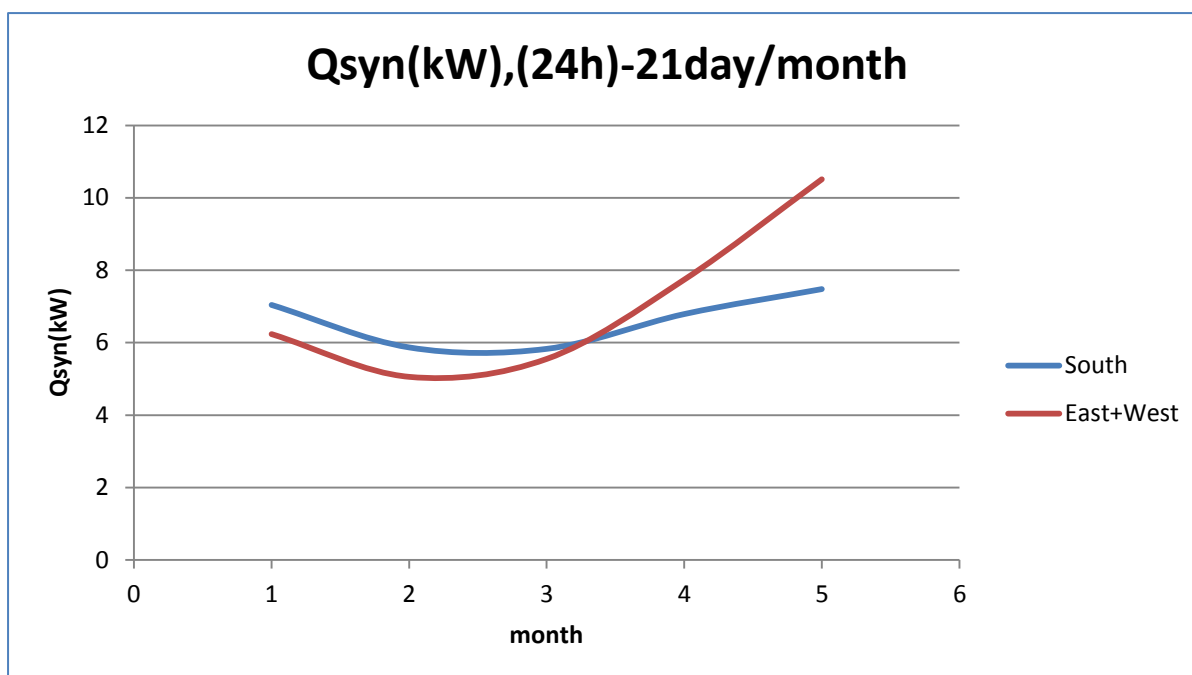
**Σχήμα 5.5.4.1.9:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, για  $T_{in}=22^{\circ}C$



**Σχήμα 5.5.4.1.10:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, για  $T_{in}=22^{\circ}C$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συνολικό ποσό της θερμότητας που προσδίδει το στρώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου για όλο το 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.4.1.1 και απεικονίζονται στο Σχήμα 5.5.4.1.11. Η συνολική θερμότητα συναγωγής υπολογίζεται με βάση τη σχέση (5.5.2.1.3).

Πίνακας 5.5.4.1.1: Qσυναγωγής (kW),(24h)			
		Νότος	Ανατολή-Δύση
21 <sup>η</sup> Νοεμβρίου	1	7,04	6,24
21 <sup>η</sup> Δεκεμβρίου	2	5,87	5,06
21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου	3	5,83	5,55
21 <sup>η</sup> Φεβρουαρίου	4	6,79	7,74
21 <sup>η</sup> Μαρτίου	5	7,48	10,51



Σχήμα 5.5.4.1.11: Μεταβολή της συνολικής προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM, πάχους 40mm, για  $T_{in}=22^{\circ}C$ , νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τα διαγράμματα μεταβολής της θερμοκρασίας (Σχήματα 5.5.4.1.1-5.5.4.1.5) παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου, τόσο αυξάνονται οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες του PCM όλων των προσανατολισμών ανεξαιρέτως σε όλους τους εξεταζόμενους μήνες.

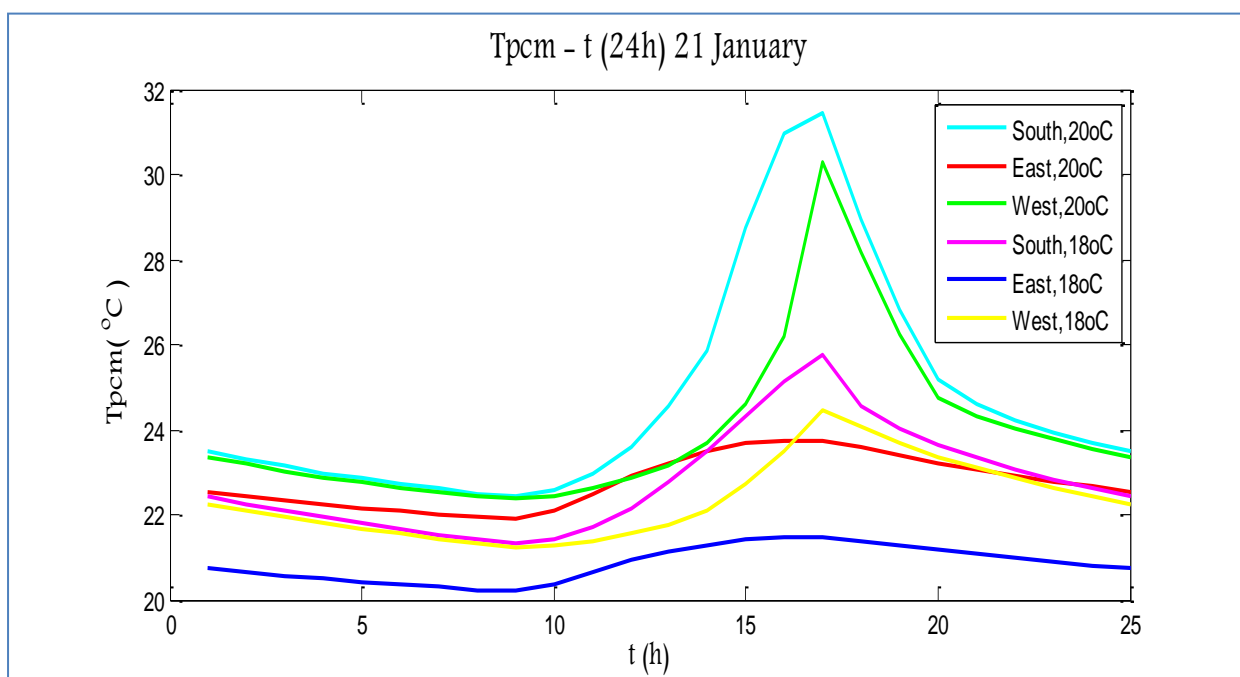
Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (5.5.2.12) και (5.5.2.13) για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του PCM, συμπεραίνεται ότι αυξάνοντας την εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}$ , αυξάνεται και η θερμοκρασία του PCM. Η αύξηση των ελάχιστων θερμοκρασιών οφείλεται στο ότι, λόγω της αύξησης της σταθερής θερμοκρασίας που επικρατεί στο δωμάτιο, το PCM της βραδινές ώρες δεν μπορεί να προσδώσει περισσότερη θερμότητα στο δωμάτιο και να αποκτήσει θερμοκρασία μικρότερη των  $22^{\circ}C$ .

Παράλληλα οι διαφορές που επικρατούν μεταξύ των διαφορετικών προσανατολισμών ισχύουν και στην περίπτωση σταθερής εσωτερικής θερμοκρασίας δωματίου  $T_{in}=22^{\circ}\text{C}$ . Δηλαδή το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού εμφανίζει μεγαλύτερες θερμοκρασίες τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο, λόγω της εντονότερης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον νότο σε σχέση με τους άλλους δύο προσανατολισμούς. Στις περιπτώσεις Φεβρουαρίου και Μαρτίου το στρώμα PCM έναντι υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού παρουσιάζει αυξανόμενες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτό του νότιου προσανατολισμού, λόγω της μειωμένης μάζας του, παρόλο που η ηλιακή ακτινοβολία δυτικού προσανατολισμού είναι χαμηλότερη από του νότου. Το στρώμα PCM έναντι ανατολικού προσανατολισμού αναπτύσσει τις χαμηλότερες θερμοκρασίες, λόγω της μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σ' αυτό. Διαφορά παρατηρείται και στην εμφάνιση των μεγίστων θερμοκρασιών, λόγω της διαφοράς εμφάνισης έντονης ακτινοβολίας στον κάθε προσανατολισμό.

Όσον αφορά τη θερμότητα που τα PCMs στα εξεταζόμενα δωμάτια, δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές στη μεταβολή και στη συνολική τιμή της θερμότητας της συγκεκριμένης μελέτης με την μελέτη για εσωτερική θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C}$ . Η θερμότητα συναγωγής ουσιαστικά οφείλεται στην θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του στρώματος PCM και του εσωτερικού αέρα στο δωμάτιο. Έτσι, παρόλο που οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM των εξεταζόμενων δωματίων είναι μεγαλύτερες, η θερμοκρασιακή διαφορά με τον εσωτερικό αέρα κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα, λόγω της αύξησης της εσωτερικής θερμοκρασίας. Επομένως ισχύουν και εδώ οι παρατηρήσεις που ειπώθηκαν στο Κεφάλαιο 5.5.2.1 για την προσδιδόμενη θερμότητα των δύο περιπτώσεων στο δωμάτιο.

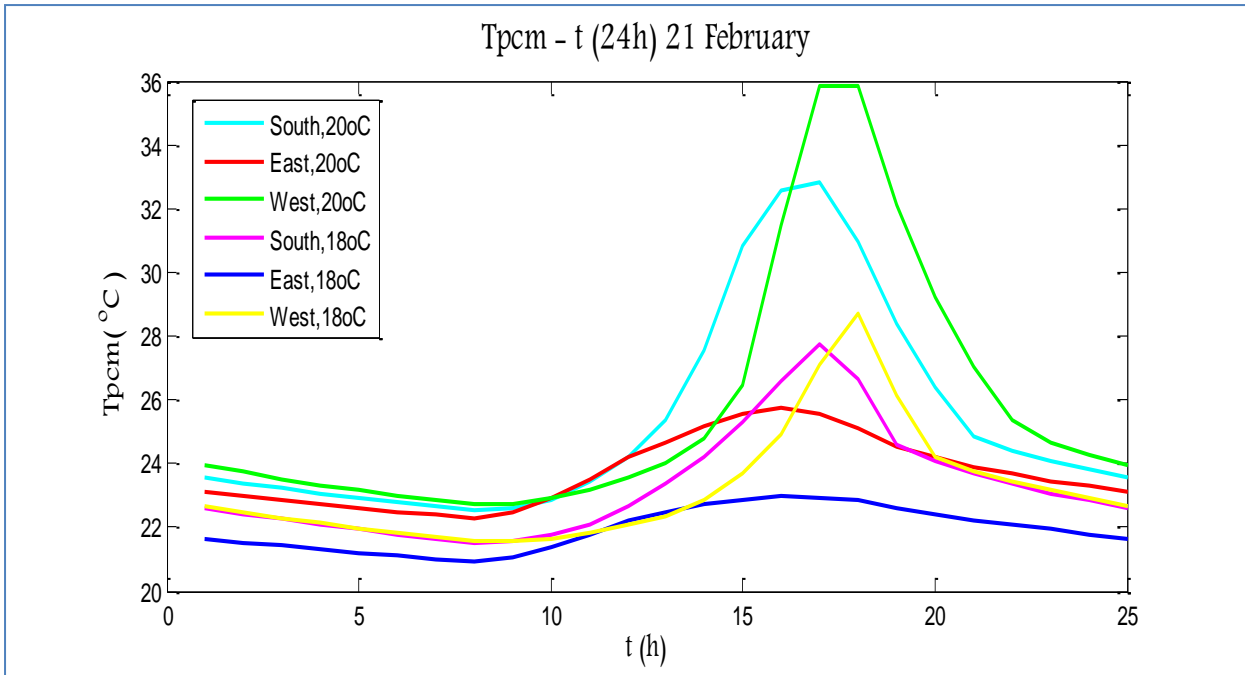
### 5.5.4.2 Εσωτερική θερμοκρασία δωματίου $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του στρώματος PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού για εσωτερική θερμοκρασία  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ .

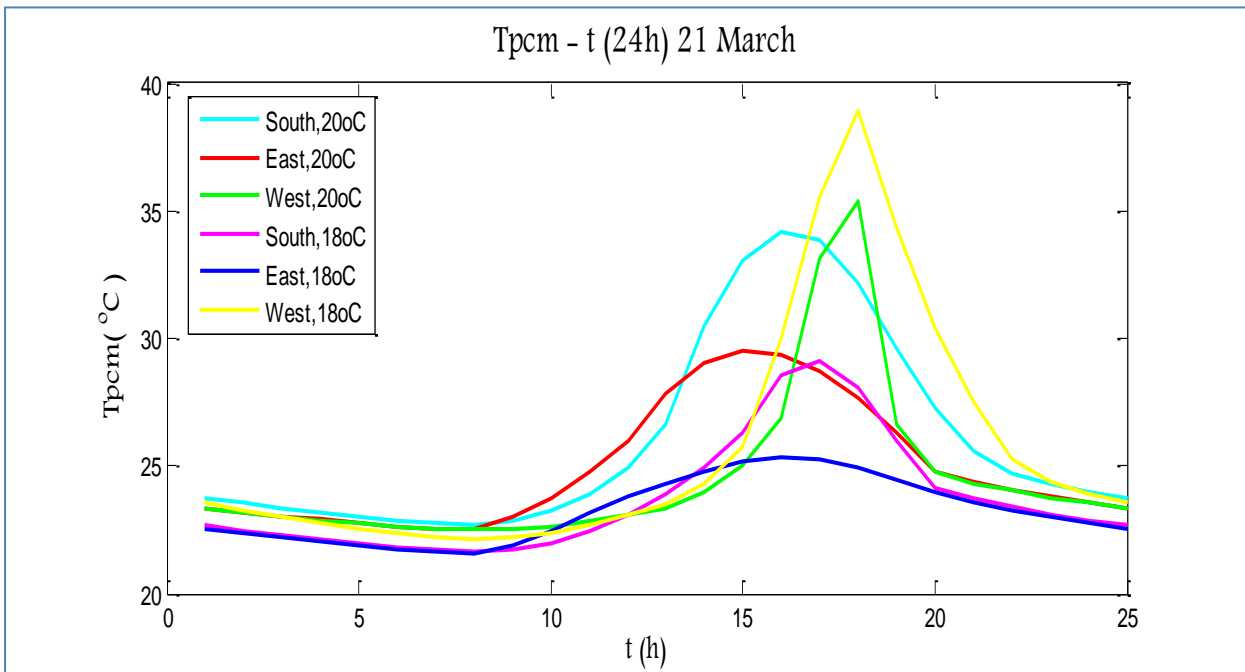


**Σχήμα 5.5.4.2.1:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ , για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου

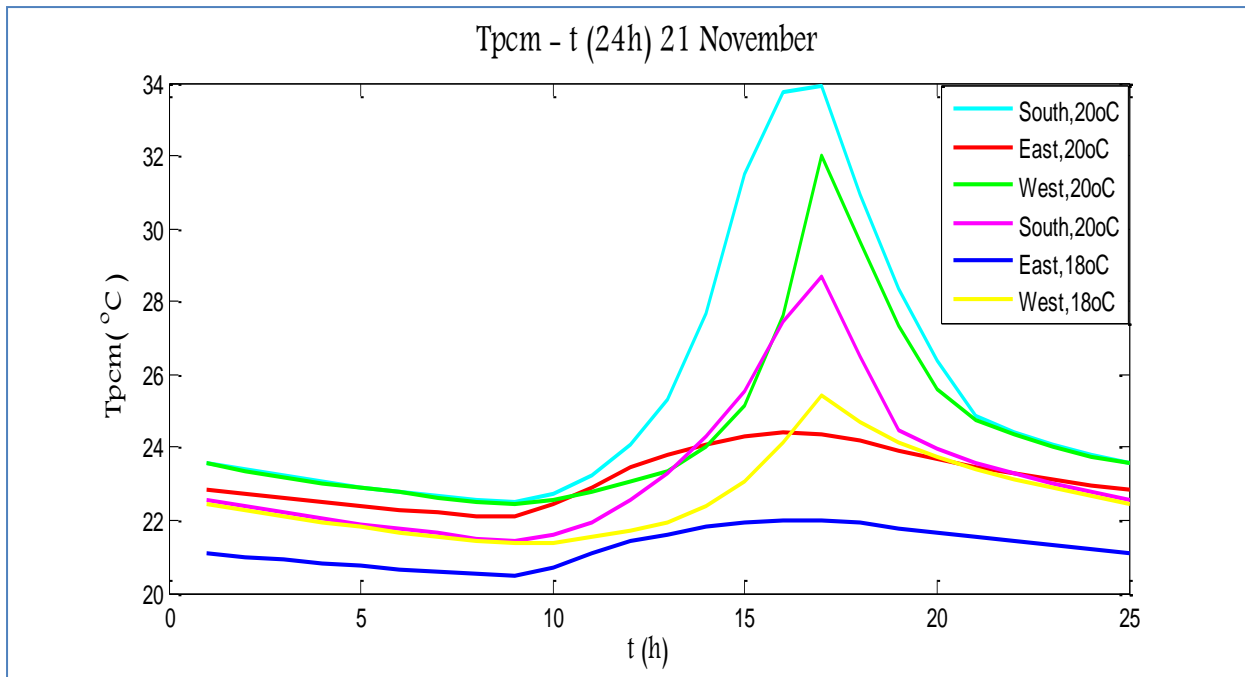




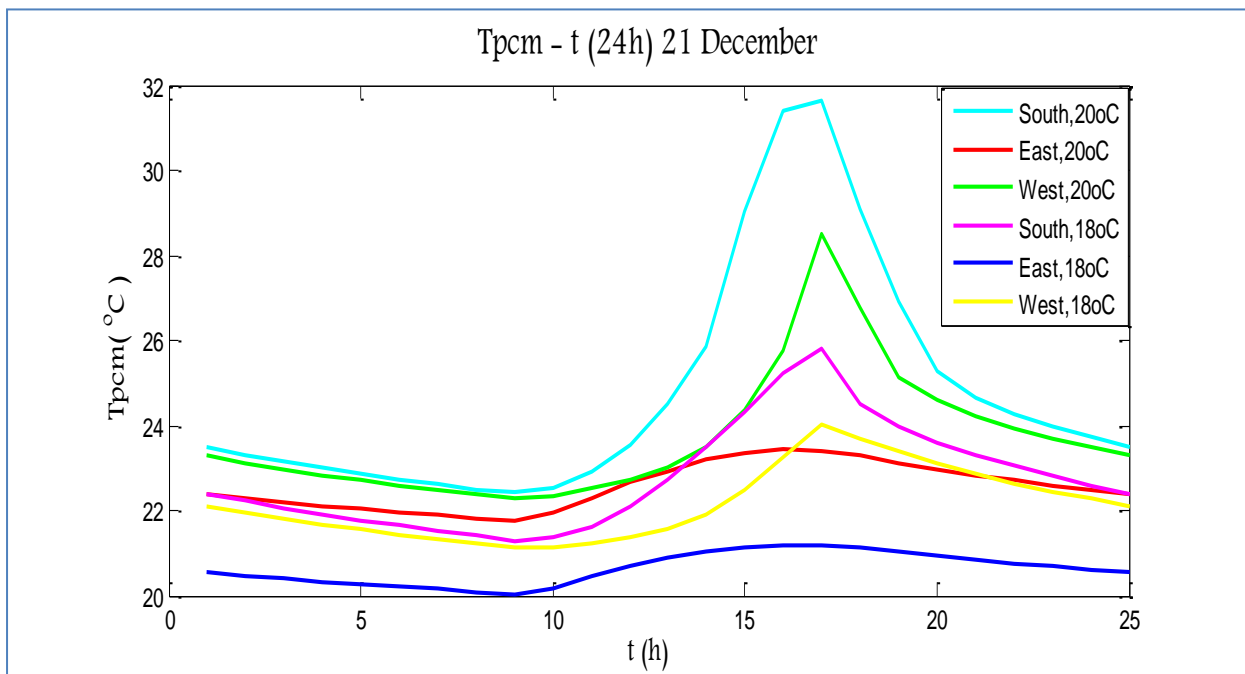
**Σχήμα 5.5.4.2.2:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}C$  και  $T_{in}=18^{\circ}C$ , για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου



**Σχήμα 5.5.4.2.3:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}C$  και  $T_{in}=18^{\circ}C$ , για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό την 21<sup>η</sup> Μαρτίου



**Σχήμα 5.5.4.2.4:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ , για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου

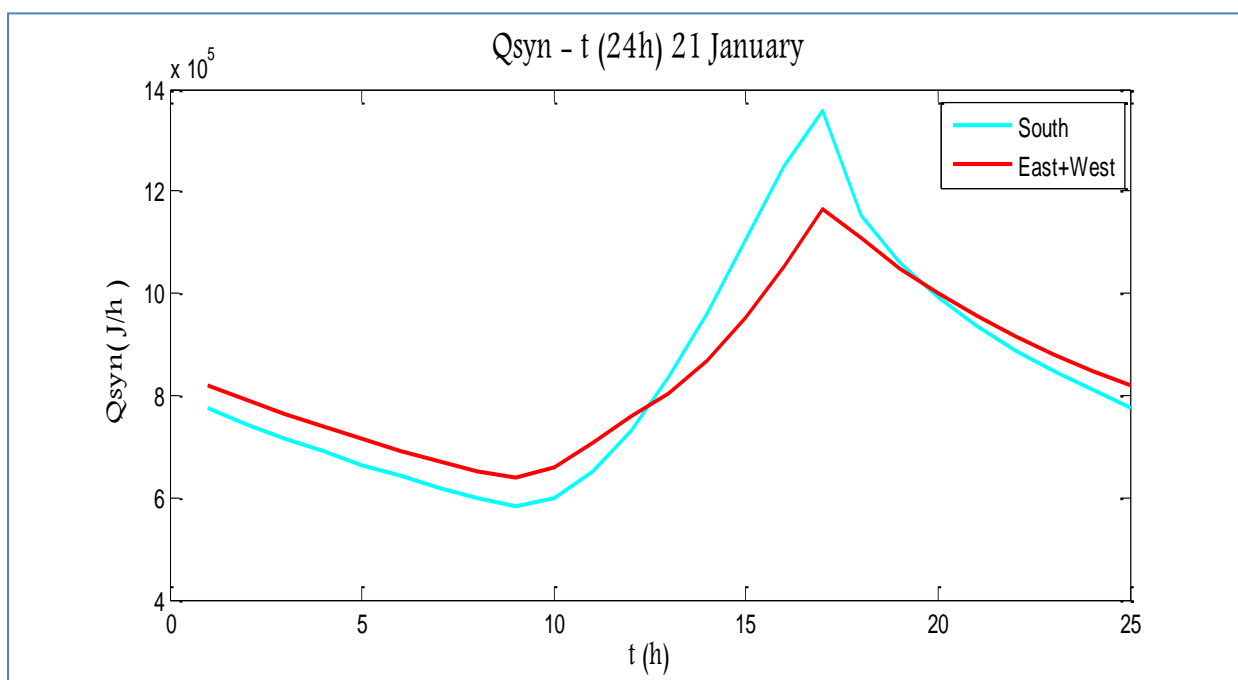


**Σχήμα 5.5.4.2.5:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  και  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$ , για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου

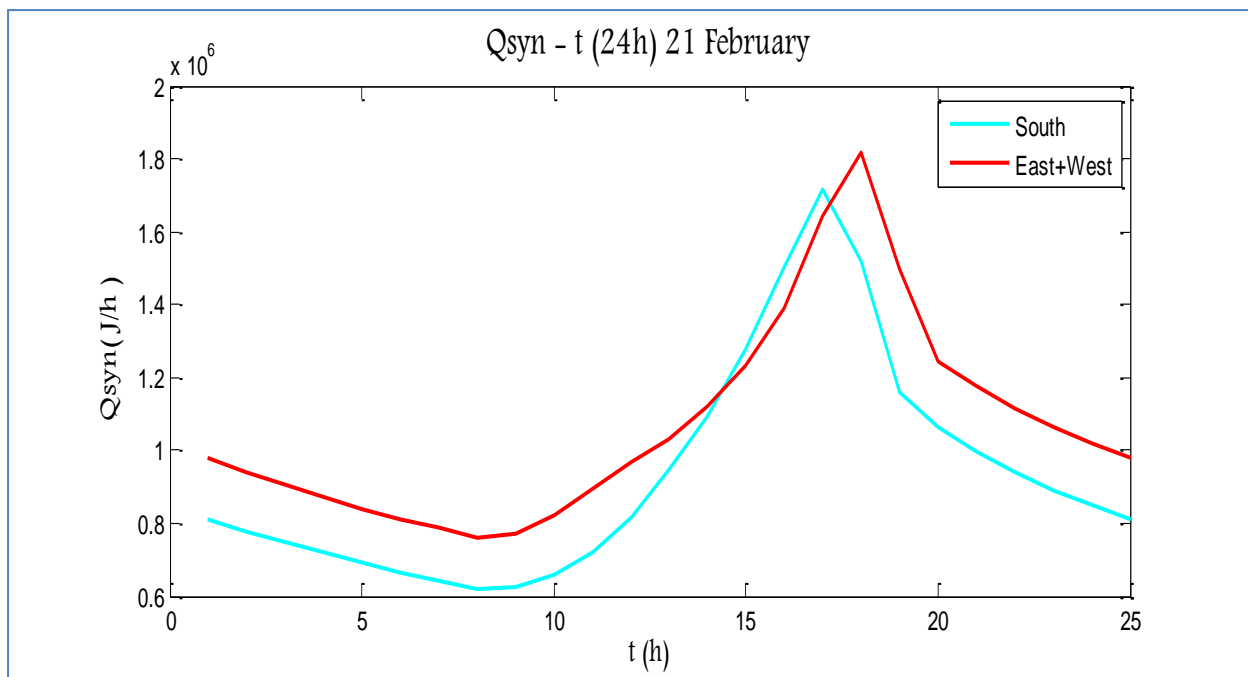
➤ Σύγκριση της προσδιδόμενης ενέργειας  $Q_{\text{συναγωγής}}$  στο δωμάτιο από στρώμα PCM νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού

Η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό της προσδιδόμενης ενέργειας είναι ίδια με αυτή του Κεφαλαίου 5.5.2.1, και προκύπτει από τις σχέσεις (5.5.2.1.1) και (5.5.2.1.2), χρησιμοποιώντας τις θερμοκρασίες που υπολογίστηκαν από την παραπάνω μελέτη για πάχος 40mm και εσωτερική θερμοκρασία δωματίου  $T_{\text{in}}=18^{\circ}\text{C}$ .

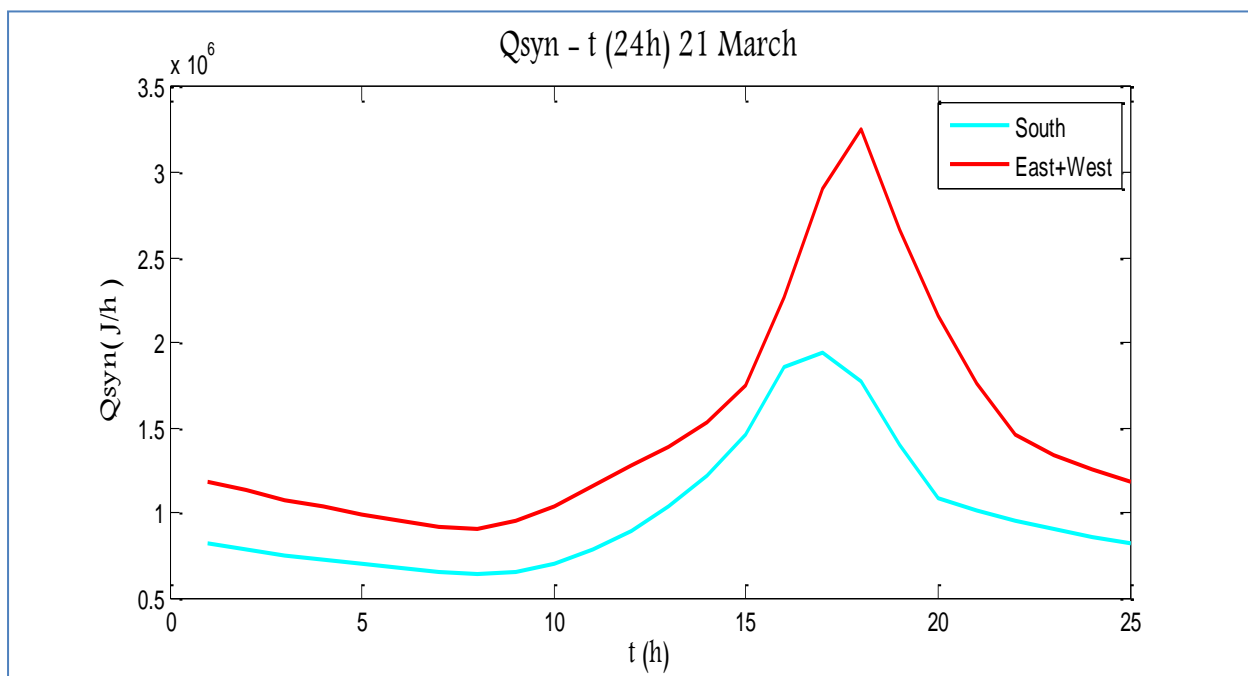
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η θερμότητα συναγωγής PCM νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, όπως υπολογίστηκε για την 21<sup>η</sup> ημέρα των εξεταζόμενων μηνών.



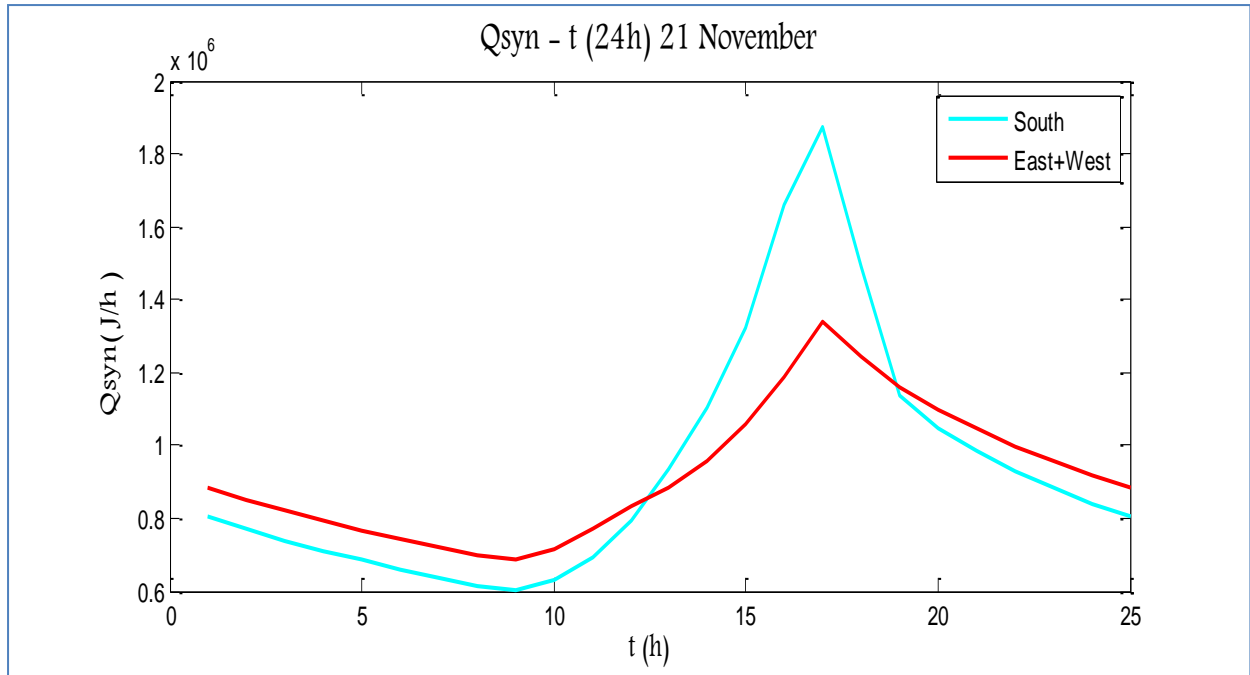
**Σχήμα 5.5.4.2.6:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{\text{syn}}(\text{J/h})$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM, την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, για  $T_{\text{in}}=18^{\circ}\text{C}$



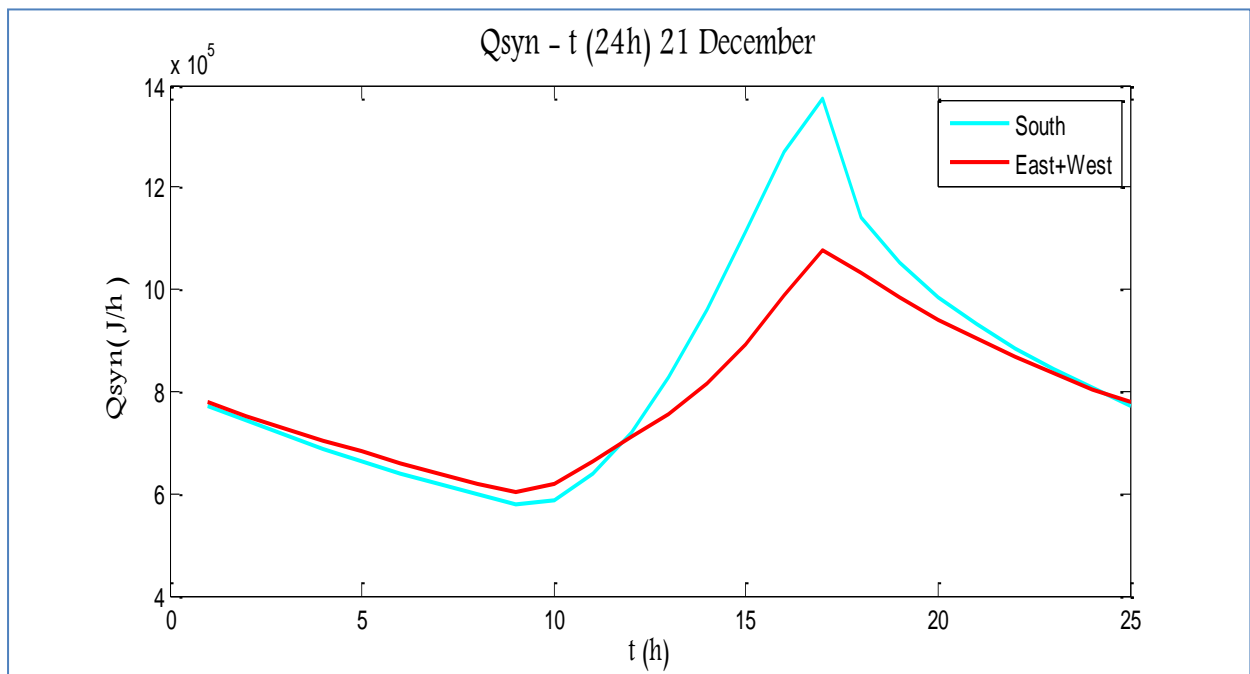
**Σχήμα 5.5.4.2.7:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}$ (J/h) στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, για  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$



**Σχήμα 5.5.4.2.8:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}$ (J/h) στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Μαρτίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, για  $T_{in}=18^{\circ}\text{C}$



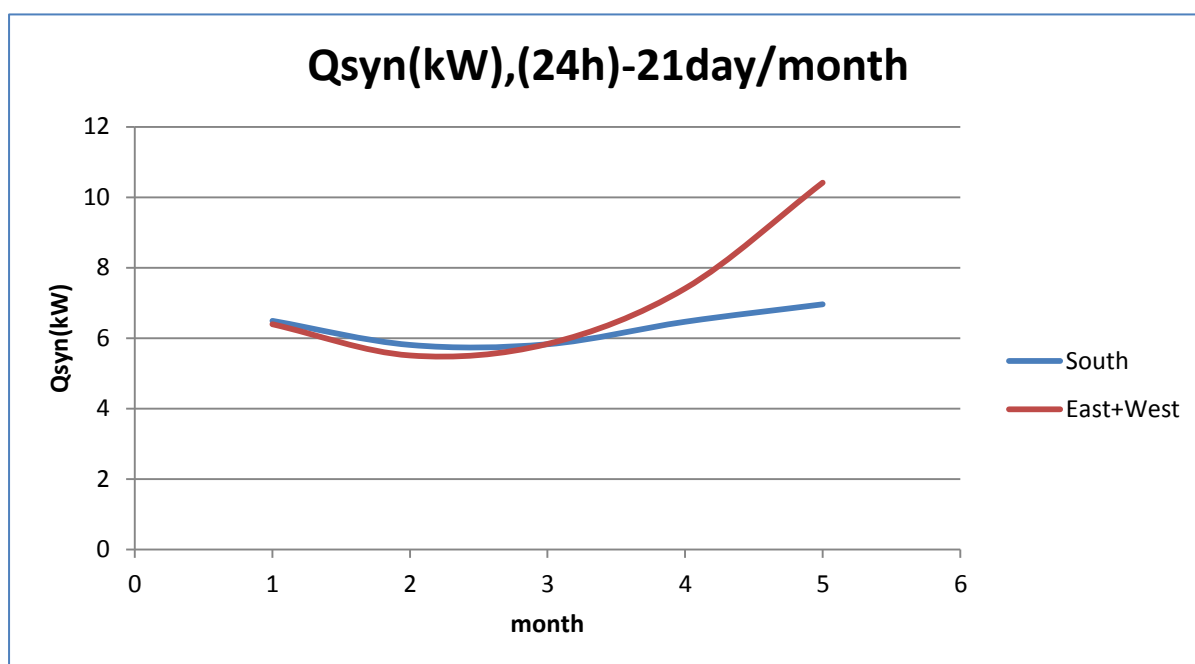
**Σχήμα 5.5.4.2.9:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}$ (J/h) στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, για  $T_{in}=18^{\circ}C$



**Σχήμα 5.5.4.2.10:** Μεταβολή της προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}$ (J/h) στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM , την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου νότιου, και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, για  $T_{in}=18^{\circ}C$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συνολικό ποσό της θερμότητας που προσδίδει το στρώμα PCM στον εσωτερικό αέρα του δωματίου για όλο το 24ωρο της 21<sup>ης</sup> ημέρας του εκάστοτε μήνα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.4.2.1 και απεικονίζονται στο Σχήμα 5.5.4.2.11. Η συνολική θερμότητα συναγωγής υπολογίζεται με βάση τη σχέση (5.5.2.1.3).

Πίνακας 5.5.4.2.1: Qσυναγωγής (kW),(24h)			
		Νότος	Ανατολή-Δύση
21 <sup>η</sup> Νοεμβρίου	1	6,49	6,40
21 <sup>η</sup> Δεκεμβρίου	2	5,81	5,51
21 <sup>η</sup> Ιανουαρίου	3	5,83	5,84
21 <sup>η</sup> Φεβρουαρίου	4	6,47	7,41
21 <sup>η</sup> Μαρτίου	5	6,96	10,41



**Σχήμα 5.5.4.2.11:** Μεταβολή της συνολικής προσδιδόμενης θερμότητας  $Q_{syn}(J/h)$  στον εσωτερικό αέρα από στρώμα PCM, πάχους 40mm, για  $T_{in}=18^{\circ}C$ , νότιου και συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, την 21<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα

**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ**

Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα με αυτά που προέκυψαν από τη μελέτη για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου 20°C, προκύπτει ότι με την μείωση της  $T_{in}$ , μειώνονται και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM κατά τη διάρκεια της ημέρας σε όλους τους μήνες και για τους τρεις προσανατολισμούς. Παράλληλα, εμφανίζονται και μειωμένες ελάχιστες θερμοκρασίες του PCM στο 24ωρο.

Αυτό συμβαίνει διότι, λόγω των σχέσεων (5.5.2.12) και (5.5.2.13), μειώνοντας την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου στους 18°C, μειώνεται και η θερμοκρασία του στρώματος PCM σε όλη τη διάρκεια του 24ωρου. Από την άλλη, η μείωση των ελάχιστων τιμών της θερμοκρασίας του οφείλεται στο γεγονός ότι η ελάττωση της σταθερής εσωτερικής θερμοκρασίας δωματίου, δίνει περιθώριο στο PCM να προσδώσει θερμότητα στο δωμάτιο, χαμηλότερη των 20°C, μέχρι το όριο των 18°C που επικρατούν στο εσωτερικό.

Για τους τρεις προσανατολισμούς ισχύουν ό, τι έχει αναφερθεί στις προηγούμενες μελέτες για εσωτερική θερμοκρασία δωματίου 20°C και 22°C. Περισσότερο αποδοτικό, δηλαδή, είναι το PCM έναντι νότιου υαλοπίνακα, εκτός από τους Φεβρουάριο και Μάρτιο όπου αναπτύσσει μεγαλύτερες θερμοκρασίες εκείνο που είναι τοποθετημένο έναντι δυτικού υαλοπίνακα. Χαμηλότερες θερμοκρασίες αναπτύσσει, όπως είναι φυσικό, το στρώμα PCM ανατολικού προσανατολισμού.

Η μελέτη της θερμότητας συναγωγής που προσδίδεται στο δωμάτιο από το PCM κάθε περίπτωσης δείχνει ότι δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις από την περίπτωση εσωτερικής θερμοκρασίας δωματίου 20°C. Παρόλο, δηλαδή, που αναπτύσσονται μικρότερες θερμοκρασίες σε όλα τα στρώματα PCM, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ PCM και εσωτερικού αέρα κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα. Αυτό σημαίνει, όπως παρατηρείται και από το Σχήμα 5.5.4.2.11, τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο το PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού προσφέρει περισσότερη θερμότητα στο δωμάτιο, εφόσον οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει είναι αυξημένες σε σχέση με την περίπτωση δωματίου με 2 υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού. Το αντίθετο συμβαίνει τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο, όπου η προσδιδόμενη θερμότητα του δεύτερου δωματίου αυξάνεται αισθητά.

## 5.6 ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Προκειμένου να υπάρξει μια σφαιρική εικόνα ως προς την απόδοση του PCM ανάλογα με τον προσανατολισμό, αλλά και τη μορφή του δωματίου, είναι αναγκαία μια μελέτη και σύγκριση κυρίως μεταξύ των περιπτώσεων που περιγράφονται στα Κεφάλαια 5.4.1 και 5.5.1. Οι περιπτώσεις αυτές αποτελούνται από δύο δωμάτια με ένα υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού (Σχήμα 5.4.1.1), δύο δωμάτια με δύο υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού (Σχήμα 5.4.1.2), ένα δωμάτιο με ένα υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού (Σχήμα 5.5.1.1) και ένα δωμάτιο με PCM σε δύο τοίχους έναντι υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού (Σχήμα 5.5.1.2).

Οι προηγούμενες των παραπάνω περιπτώσεις, δηλαδή δωμάτια με ένα υαλοπίνακα νότιου, ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού ξεχωριστά (Κεφάλαια 5.2 και 5.3) δεν έχει νόημα να μελετηθούν περαιτέρω ως προς την απόδοσή τους σε σχέση με τις παραπάνω περιπτώσεις, διότι είναι προφανές ότι υπερτερεί ως προς την απόδοση το PCM που είναι τοποθετημένο έναντι νότιου προσανατολισμού, λόγω της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας αυτής της κατεύθυνσης, στις μεμονωμένες αυτές μελέτες.

Η μελέτη ως προς την απόδοση του PCM των τεσσάρων περιπτώσεις θα πραγματοποιηθεί με σύγκριση της συνολικής θερμότητας συναγωγής που προσδίδεται στο δωμάτιο. Υπενθυμίζεται ότι η θερμότητα συναγωγής υπολογίστηκε για PCM πάχους 40mm και εσωτερικής θερμοκρασία δωματίου  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$ , για την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Μαρτίου.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες με τις συνολικές τιμές της θερμότητας συναγωγής, όπως αυτές υπολογίστηκαν παραπάνω για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάζονται.



Για τα εξεταζόμενα δωμάτια του Κεφαλαίου 5.4 (Σχήματα 5.4.1.1 και 5.4.1.2), η συνολική θερμότητα συναγωγής παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

<b>Πίνακας 5.6.1: Qσυναγωγής (kW),(24h)</b>			
		<b>Νότος</b>	<b>Ανατολή-Δύση</b>
<b>21<sup>η</sup> Νοεμβρίου</b>	<b>1</b>	6,27	6,58
<b>21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου</b>	<b>2</b>	6,03	5,91
<b>21<sup>η</sup> Ιανουαρίου</b>	<b>3</b>	6,02	6,12
<b>21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου</b>	<b>4</b>	6,65	8,26
<b>21<sup>η</sup> Μαρτίου</b>	<b>5</b>	7,23	11,40

Ενώ για τα εξεταζόμενα δωμάτια του Κεφαλαίου 5.5 (Σχήματα 5.5.1.1 και 5.5.1.2) παρουσιάζονται παρακάτω:

<b>Πίνακας 5.6.2: Qσυναγωγής (kW),(24h)</b>			
		<b>Νότος</b>	<b>Ανατολή-Δύση</b>
<b>21<sup>η</sup> Νοεμβρίου</b>	<b>1</b>	6,59	6,14
<b>21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου</b>	<b>2</b>	5,79	5,09
<b>21<sup>η</sup> Ιανουαρίου</b>	<b>3</b>	5,74	5,47
<b>21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου</b>	<b>4</b>	6,48	7,68
<b>21<sup>η</sup> Μαρτίου</b>	<b>5</b>	7,30	7,64

Ως μια συνολική άποψη των αποτελεσμάτων που δόθηκαν στους παραπάνω πίνακες, μπορεί να ειπωθεί ότι η εξεταζόμενη περίπτωση των δύο δωματίων με δύο υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού (Σχήμα 5.4.1.2), προσφέρει υψηλότερες ποσότητες θερμότητας στα δωμάτια σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Αυτό συμβαίνει διότι ο ίδιος τοίχος με στρώμα PCM φορτίζεται από ανατολή και δύση αρκετές ώρες την ημέρα, αυξάνοντας την θερμοκρασία του και προσδίδει τη θερμότητά του στα δωμάτια τις απογευματινές ώρες, μετά το πέρας της φόρτισης.

Ακολουθεί η εξεταζόμενη περίπτωση δύο δωματίων με έναν υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού, ως προς τα συνολικά αποτελέσματα για την προσδιδόμενη θερμότητα στα δωμάτια. Τέλος, οι περιπτώσεις του Κεφαλαίου 5.5, δηλαδή τα Σχήματα 5.5.1.1 και 5.5.1.2 δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ως προς τη συνολική εικόνα τους στο ποσό της θερμότητας που προσδίδουν στο δωμάτιο, και η διαφοροποίηση στις τιμές είναι ανάλογα με τους μήνες μελέτης.

Όσον αφορά τη βέλτιστη περίπτωση για κάθε μήνα ξεχωριστά, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου: μεγαλύτερη τιμή της θερμότητας συναγωγής που προσδίδεται στον εσωτερικό αέρα του δωματίου κατέχει η περίπτωση του Σχήματος 5.5.1.1, δηλαδή ένα δωμάτιο με έναν υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού
- 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου: παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα η περίπτωση του Σχήματος 5.4.1.1, των δύο δωματίων με έναν υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού
- 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου: υψηλότερη ποσότητα προσδιδόμενης θερμότητας στο δωμάτιο φαίνεται ότι έχει η περίπτωση του Σχήματος 5.4.1.2, των δύο δωματίων με δύο υαλοπίνακες ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, με μικρή διαφορά όμως από την περίπτωση του Σχήματος 5.4.1.1, των δωματίων με έναν υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού
- 21<sup>η</sup> Φεβρουαρίου: περισσότερο εκμεταλλεύσιμο είναι το PCM, το οποίο τοποθετείται σε τοίχο έναντι υαλοπινάκων ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού (Σχήμα 5.4.1.2)
- 21<sup>η</sup> Μαρτίου: και σε αυτόν τον μήνα παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα ως προς την θερμότητα συναγωγής το PCM του Σχήματος 5.4.1.2

Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι τους άκρως χειμερινούς μήνες (Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο) και στις δύο μελέτες (Κεφάλαιο 5.4 και 5.5) ότι περισσότερο αποδοτικό είναι το PCM έναντι υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού και των δύο περιπτώσεων (Σχήματα 5.4.1.1 και 5.5.1.1) (εξετάζοντάς τα ξεχωριστά σε σχέση με συνδυασμό ανατολής και δύσης και όχι μεταξύ τους), ενώ τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο υπερτερεί το

PCM των περιπτώσεων συνδυασμού ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού. Αυτό οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στους διάφορους προσανατολισμούς. Έτσι, όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 5.1, η ηλιακή ακτινοβολία τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο είναι εντονότερη στο νότιο προσανατολισμό, ενώ τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο, παρατηρείται αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον τοίχο έναντι υαλοπίνακα δυτικού προσανατολισμού.

Στον ανατολικό προσανατολισμό, αν και παρατηρείται αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο, συνεχίζει και εκεί να κινείται σε χαμηλά επίπεδα, λόγω της πρωινής θαμπής ατμόσφαιρας. Έτσι, διαπιστώνεται ότι η αύξηση που παρουσιάζει η προσδιδόμενη θερμότητα στο δωμάτιο από το στρώμα PCM που συνδυάζει ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό, οφείλεται κατά κύριο λόγο στην εντονότερη ακτινοβολία που προέρχεται από τη δύση.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5<sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/dg2013/ktirio/DE3-Bioklimatika-final.pdf>
2. Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα, Μέρος Πρώτο – Κίμωνας Αντωνόπουλος
3. <http://www.iene.gr/energy-development2010/articlefiles/PosterSession/tzivanidis.pdf>
4. E.D. Kravvaritis, K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis