ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΔΙΕΡΕΥΝΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ»

ΣΥΓΓΡΑΦΗ: **ΜΠΡΙΟΛΑ ΜΑΡΙΑ**

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: **ΚΙΜΩΝ Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, 2013

Στη μητέρα μου και τον αδερφό μου Ηλία

Ευχαριστίες

Με αφορμή την εκπόνιση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Κίμωνα Αντωνόπουλο για την ανάθεση της εργασίας, τις πληροφορίες που μου παρείχε για το συγκεκριμένο θέμα, την εποπτεία της εργασίας, την καθοδήγησή, την ενθάρρυνση και τον χρόνο που μου προσέφερε για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα αγαπημένα μου πρόσωπα, τους φίλους και συμφοιτητές μου για τη συνεχή ενθάρρυνση και στήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ από καρδιάς την οικογένειά μου για την αγάπη και την ανιδιοτελή προσφορά που μου προσέφεραν από τα πρώτα εκπαιδευτικά μου βήματα μέχρι και σήμερα.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τόσο τη θεωρητική όσο και την πειραματική μελέτη των υλικών αλλαγής φάσης.

Συγκεκριμένα, στο πρώτο μέρος, το θεωρητικό, γίνεται αρχικά αναφορά στην αναγκαιότητα χρήσης νέων τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας και κυρίως των υλικών αλλαγής φάσης. Έπειτα ακολουθεί η παρουσίαση των ιδιοτήτων αυτών των υλικών, της ταξινόμησής τους σε κατηγορίες καθώς επίσης και των προβλημάτων που συχνά εμφανίζονται. Στη συνέχεια αναλύονται διεξοδικά όλα τα είδη των εφαρμογών τους σε διάφορους τομείς της καθημερινότητας με έμφαση στον κτιριακό τομέα και ειδικότερα στις μελέτες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα για την χρήση των υλικών αυτών στην τοιχοποιία.

Στο δεύτερο μέρος εξετάζεται η αποδοτικότητα στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης (PCM) ενσωματωμένου σε τοίχο νότιου, ανατολικού, δυτικού και βόρειου προσανατολισμού, ο οποίος φορτίζεται εξωτερικά, συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων.

Αναλυτικά:

Το πρώτο κεφάλαιο επιχειρεί μία εισαγωγή στην εργασία, με παράθεση στοιχείων γύρω από τη γενικότερη ενεργειακή κρίση που πλήττει τον πλανήτη Γη.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει θεωρητικά στοιχεία γύρω από το φαινόμενο της αλλαγής φάσης, με εισαγωγικά και εγκυκλοπαιδικά στοιχεία γύρω από τις σχετικές υπεισερχόμενες έννοιες. Περιέχει επίσης μια εισαγωγή γύρω από την έννοια της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

Στο τρίτο κεφάλαιο πληροφορούμαστε για τα υλικά αλλαγής φάσης, τις ιδιότητες που πρέπει να έχουν, τις κατηγορίες στις οποίες ανήκουν, τα προβλήματα που παρουσιάζουν καθώς και τους τρόπους αντιμετώπισής τους, τους τρόπους μέτρησης των ιδιοτήτων τους και τέλος, τις μεθόδους προσομοίωσης της αλλαγής φάσης των υλικών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται, αρχικά, μια σύντομη ιστορική αναδρομή των εφαρμογών, στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν υλικά αλλαγής φάσης, από την απαρχή του επιστημονικού ενδιαφέροντος μέχρι σήμερα και στη συνέχεια αναφέρονται αναλυτικά οι πιο γνωστές εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στον κτιριακό τομέα.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει λεπτομερώς τις σημαντικότερες, σύγχρονες, βιομηχανικές εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης σε διάφορους τομείς της καθημερινότητας.

Στο έκτο κεφάλαιο, όπου αρχίζει και το υπολογιστικό μέρος, γίνεται η παρουσίαση της εφαρμογής καθώς και της μεθόδου που εφαρμόζεται και περιέχονται διάφορες εξισώσεις απαραίτητες για την ανάπτυξη του κυρίως θέματος της διπλωματικής.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι δύο παραμετρικές μελέτες και εξετάζεται η αποδοτικότητα των υλικών αλλαγής φάσης συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων. Περιέχονται επίσης και τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις δύο μελέτες.

Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα τελικά συμπεράσματα και αποτελέσματα σπό τη διεξαγωγή της υπολογιστικής αυτής μελέτης και παρουσιάζονται διάφορες προτάσεις για μελλοντική εργασία.

Abstract

This thesis deals with both theoretical and experimental study of phase change materials.

Especially, the first part, the theoretical one, starts with the reference to the need of using new energy-saving technologies with phase change materials. Then follows the presentation of the properties of these materials, their classification in categories as well as the problems that often occur. After that, the dissertation analyzes all kinds of applications in various areas of everyday life with an emphasis on the building sector and specifically on the studies performed concerning the use of these materials in the masonry.

The second part studies the efficiency of a phase change material (PCM) layer, embedded in a south, east, west and north -oriented wall which is loaded externally by the sun, depending on various parameters.

Specifically:

The first chapter is an introduction to the thesis, providing data that have to do with the overall energy crisis affecting our planet.

The second chapter includes details concerning the phase change phenomenon, with sources and encyclopedic information. It also contains an introduction on the concept of thermal energy storage .

In the third chapter we learn more about the phase change materials, the properties they must have, the categories they belong to, the problems we encounter and how we can overcome them, the measurements of their properties and last but not least the methods of simulating the PCM.

In the fourth chapter, at first, there is a brief historical overview of the PCM applications, from the beginning of the scientific interest until today and then there is a well-detailed presentation of the most common PCM applications in buildings.

The fifth chapter refers to the modern, industrial PCM applications in various areas of everyday life.

The sixth chapter begins with the description of the experimental part, the method used and the various equations necessary for the development of the main theme of the thesis.

The seventh chapter describes in detail the two parametric studies and examines the efficiency of the phase change materials by using

different parameters. It also contains a large variety of diagrams from the two studies.

The eighth and final chapter brings together the results and final conclusions drawn by experimental study and presents several recommendations for future work.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή…….……..…….....13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Φαινόμενο Αλλαγής Φάσης…….…….....15

2.1 Κατάσταση της ύλης……..……..…….....15
2.2 Αλλαγή Φάσης…….....……....…..15
2.3 Θερμική ενέργεια στις αλλαγές φάσης……16
2.4 Μικροσκοπική δομή των καταστάσεων της ύλης...……...17
2.5 Ιδιότητες της ύλης ανάλογα με την κατάστασή της……18
2.6 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.....19
2.6.1 Θερμότητα ατμοπαραγωγής.....19
2.6.2 Ολική Θερμότητα.....19
2.6.3 Αισθητή Θερμότητα..... 19
2.6.4 Λανθάνουσα Θερμότητα.....21
2.6.4.1 Εσωτερική Λανθάνουσα Θερμότητα.....22
2.6.4.2 Εξωτερική Λανθάνουσα Θερμότητα..... 22
2.6.5 Σύγκριση Αισθητής και Λανθάνουσας θερμότητας.....24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Υλικά Αλλαγής Φάσης.....26

3.1 Εισαγωγή..... 26
3.2 Ιδιότητες των PCM..... 27
3.2.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες.....27
3.2.2 Κινητικές ιδιότητες..... 28
3.2.3 Χημικές ιδιότητες..... 28
3.2.4 Οικονομικές ιδιότητες.....28
3.3 Κατηγοριοποίηση των PCM..... 29
3.3.1 Οργανικά υλικά.....30
3.3.1.1 Παραφίνες.....30
3.3.1.2 Μη-παραφίνες.....31
3.3.2 Ανόργανα υλικά..... 33
3.3.2.1 Ένυδρα Άλατα..... 33
3.3.2.2 Μεταλλικά PCM….....36

3.3.3 Εύτηκτα μίγματα..... 37
3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κατηγοριών..... 38
3.5 Προβλήματα κατά τη χρήση των PCM και τρόποι αντιμετώπισης..40
3.5.1 Διαχωρισμός των φάσεων.....40
3.5.2 Το φαινόμενο της υπόψυξης/ υπέρψυξης..... 41
3.5.3 Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων των PCM σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση..... 42
3.5.4 Συσκευασία PCM.....43
3.5.4.1 Macroencapsulation.....43
3.5.4.2 Microencapsulation.....44
3.5.4.3 Μαζική αποθήκευση..... 45
3.5.5 Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.....45
3.5.6 Διάβρωση..... 46
3.5.7 Συμβατότητα με άλλα υλικά…….46
3.6 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης.....47
3.6.1 Μέθοδος ενθαλπίας.....48
3.6.2 Μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας..... 49
3.7 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων PCM.....49
3.7.1 Διαφορική Θερμιδομετρία Σαρώσεως (DSC)..... 50
3.7.2 Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)..... 53
3.7.3 Μέθοδος T-History (temperature-history method)..... 53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογές PCM σε κτιριακές εγκαταστάσεις……..57

4.1 Ιστορική Αναδρομή.....57
4.1.1 Πρώτες προσπάθειες..... 57
4.1.1.1 Δρ. Maria Telkes.....57
4.1.1.2 Lawrence Gardshire..... 58
4.1.1.3 Δρ J. W. Hodgins και Δρ T. W. Hoffman.....59
4.1.2 Ερευνητική δραστηριότητα..... 59
4.1.2.1 ΗΠΑ.....60
4.1.2.2 Ευρώπη..... 61
4.1.2.3 Ιαπωνία.....63
4.2 Εφαρμογές των PCM στα κτίρια.....63
4.2.1 Συστήματα παθητικής αποθήκευσης.....64
4.2.1.1 Τοίχος Trombe με PCM..... 64
4.2.1.2 Γυψοσανίδα με PCM (wallboard).....66

4.2.1.3 Παντζούρια με PCM.....67
4.2.1.4 Μπλοκ σκυροδέματος εμποτισμένα με PCM…….68
4.2.1.5 Ηλιακός τοίχος αποθήκευσης θερμότητας για αερισμό κτιρίου.....68
4.2.1.6 Ενδοδαπέδια θέρμανση με χρήση PCM.....70
4.2.1.7 Πάνελ οροφής με ενσωματωμένα PCM.....71
4.2.2 Συστήματα ενεργητικής αποθήκευσης.....74
4.2.2.1 Θέρμανση πατώματος.....74
4.2.2.2 Πάνελ οροφής.....76
4.2.2.3 Free cooling.....77
4.2.2.4 Συνδυασμένο σύστημα ψύξης και θέρμανσης με PCM.....79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βιομηχανικές εφαρμογές των PCM.....82

5.1 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού.....82
5.2 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα..... 90
5.3 Ηλιακό θερμοκήπιο..... 97
5.4 Ηλιακοί φούρνοι.....99
5.5 Ηλεκτρονικά εξαρτήματα.....1 02
5.5.1 Τηλεπικοινωνίες.....102
5.5.2 Ηλεκτρονικοί υπολογιστές.....1 04
5.6 Συσκευασία και μεταφορά αγαθών.....104
5.6.1 Δοχεία για τρόφιμα και ποτά.....105
5.6.2 Ιατρικά προϊόντα.....106
5.7 Οχήματα.....1 07
5.8 Θερμική ένδυση.....108
5.8.1 Διαστημικές στολές.....109
5.8.2 Ρούχα και εσώρουχα.....109
5.8.3 Υποδήματα και αξεσουάρ.....109
5.8.4 Κλινοσκεπάσματα.....110
5.8.5 Ιατρικές εφαρμογές.....110

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Περιγραφή της εφαρμογής- Αρχικοί υπολογισμοί.....112

6.1 Παρουσίαση της εφαρμογής.....112
6.2 Υπολογισμός άμεσης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας Gb, διάχυτης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας Gd και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου G_T.....113
6.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος t_o.....138
6.4 Υπολογισμός θερμοκρασίας ηλίου-αέρος ή ισοδύναμης θερμοκρασίας t_e.....139
6.5 Τα PCM που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη.....142
6.6 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM.....149
6.7 Εφαρμογή του ισολογισμού ενέργειας στο στρώμα PCM.....152

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Παραμετρικές μελέτες.....153

7.1 1η Παραμετρική μελέτη.....153
7.1.1 Καμπύλες Tpcm(°C)–Ώρες(h) και Tpcm(°C)-Μόνωση(m).....154
7.1.1.1 Χειμερινοί μήνες.....238
7.1.1.2 Φθινοπωρινοί-Ανοιξιάτικοι μήνες.....239
7.1.1.3 Καλοκαιρινοί μήνες.....241
7.1.2 Καμπύλες Cp,eff-T.....241
7.2 2η Παραμετρική μελέτη.....249
7.2.1 Καμπύλες Tpcm(°C)–Ώρες(h) και Tpcm(°C)-Μόνωση(m).....250
7.2.1.1 Χειμερινοί μήνες.....339
7.2.1.2 Φθινοπωρινοί-Ανοιξιάτικοι μήνες.....340
7.2.1.3 Καλοκαιρινοί μήνες.....342
7.2.2 Καμπύλες Cp,eff-T.....342

Κεφάλαιο 8: Παρατηρήσεις- Συμπεράσματα.....350

Βιβλιογραφία.....3 52

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Εισαγωγή

Είναι πλέον γνωστό ότι τις τελευταίες δεκαετίες η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αυξάνεται διαρκώς. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας οι ανάγκες του πλανήτη θα αυξηθούν κατά 35-40% μέσα στα επόμενα 15 χρόνια, κυρίως εξαιτίας της σημαντικής αύξησης του πληθυσμού της γης, της αύξησης των οικονομικών και αναπτυξιακών δραστηριοτήτων σε όλο τον πλανήτη και της σημαντικής βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου και όσων αυτή συνεπάγεται.

Παρολ' αυτά τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων του πλανήτη (άνθρακας και πετρέλαιο) δεν είναι ανανεώσιμα και σε προβλέψιμο χρονικό διάστημα θα εξαντληθούν. Επιπλέον η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων προκάλεσε και συνεχίζει να προκαλεί σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου και της όξινης βροχής, καθώς και σημαντικές κλιματολογικές αλλαγές, που αποτελούν μεγάλες απειλές για το μέλλον της ανθρωπότητας.

Από μετρήσεις που γίνονται προκύπτει ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα αυξάνουν σταθερά χρόνο με το χρόνο, με τον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής να έχει τη μεγαλύτερη άμεση συμμετοχή στις εκπομπές αυτές. Είναι, λοιπόν, επιτακτική η ανάγκη να ελαττώσουμε την εξάρτησή μας από τις συμβατικές μορφές ενέργειας αντικαθιστώντας τις με άλλες, ανανεώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον. Μελέτες δείχνουν ότι το συνολικό δυναμικό των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι τουλάχιστον 20 φορές μεγαλύτερο από αυτό που χρησιμοποιείται σήμερα. [1]

Η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η γεωθερμία, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η βιομάζα ή ακόμη και τα αστικά απορρίμματα αποτελούν μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η εκμετάλλευση των οποίων επιφέρει, πέρα από οικονομικά οφέλη, θετικές περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις για μια βιώσιμη ανάπτυξη με οικολογική προοπτική και ανθρώπινο πρόσωπο.

Συνεπώς, η αποθήκευση ενέργειας παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της διαθέσιμης ενέργειας και στη βελτίωση της χρήσης της,

αφού πολλές πηγές ενέργειας είναι διαλείπουσες στη φύση. Η βραχυπρόθεσμη αποθήκευση για λίγες μόνο ώρες είναι απαραίτητη στις περισσότερες εφαρμογές, εν τούτοις, η μακροπρόθεσμη αποθήκευση για μερικούς μήνες είναι απαραίτητη σε μερικές εφαρμογές.

Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας και ως εκ τούτου η εφαρμογή της απαιτεί μια αποτελεσματική αποθήκευση θερμικής ενέργειας έτσι ώστε η περίσσεια θερμότητας που συλλέγεται κατά τη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας να μπορεί να αποθηκευθεί για μετέπειτα χρήση κατά τη διάρκεια της νύχτας. Παρόμοια προβλήματα προκύπτουν σε συστήματα ανάκτησης θερμότητας όπου η διαθεσιμότητα σε περίσσεια θερμότητα και οι περίοδοι χρήσης είναι διαφορετικοί και απαιτούν αποθήκευση της θερμικής ενέργειας. Επίσης, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλλει σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, ειδικά σε εξαιρετικά ψυχρές και θερμές χώρες όπου το μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης οφείλεται στην οικιακή θέρμανση και στον κλιματισμό. Αυτή η διακύμανση οδηγεί σε μια εκτός αιχμής περίοδο, συνήθως μετά τα μεσάνυχτα μέχρι τις πρώτες πρωινές ώρες. Ως εκ τούτου, οι σταθμοί παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να σχεδιαστούν κατάλληλα ώστε να μπορούν να καλύψουν το φορτίο αιχμής.

Διαφορετικά, θα απαιτείτο μια πολύ αποτελεσματική διανομή ενέργειας. Καλύτερη διαχείριση παραγωγής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί αν κάποια από τα φορτία αιχμής μπορούν να μετατοπιστούν προς την εκτός αιχμής περίοδο, το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη θερμική αποθήκευση της θερμότητας ή του κλιματισμού. Έτσι, η επιτυχής εφαρμογή της μετατόπισης φορτίου και της ηλιακής ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την μέθοδο αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιείται. [2]

2. Φαινόμενο Αλλαγής Φάσης

2.1 Κατάσταση της ύλης [3]

Η *κατάσταση της ύλης* ενός σώματος παραδοσιακά περιγράφει το πόσο εύκολα μεταβάλλεται το σχήμα και το μέγεθός του. Υπάρχουν τρεις βασικές καταστάσεις της ύλης η στερεά, η υγρή και η αέρια. Η κατάσταση στην οποία θα βρεθεί ένα σώμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντός του.

Η σύγχρονη περιγραφή της κατάστασης της ύλης γίνεται με σύγκριση των διαφορών σχέσης της κατάστασης των μορίων. Στερεά θεωρούνται τα υλικά στα οποία τα μόρια κρατούνται σε σταθερές θέσεις μεταξύ τους στο χώρο. Υγρά θεωρούνται τα υλικά στα οποία τα μόρια είναι κοντά μεταξύ τους αλλά όχι σε σταθερές θέσεις. Αέρια είναι τα υλικά στα οποία τα μόρια βρίσκονται σε σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ τους και η θέση τους δεν επηρεάζεται από τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης των μορίων. Σαν τέταρτη κατάσταση της ύλης αναφέρεται το πλάσμα, ιδιαίτερα ιονισμένο αέριο σε υψηλή θερμοκρασία. Η ιονισμένη κατάσταση δημιουργεί ελκτικές και απωθητικές δυνάμεις που δίνουν ιδιαίτερες ιδιότητες στο πλάσμα που το ξεχωρίζουν από τα αέρια.

2.2 Αλλαγή φάσης [3]

Αν ένα σώμα βρίσκεται σε διαφορετική κατάσταση από αυτήν που αντιστοιχεί στις συνθήκες του περιβάλλοντός, τότε τη μεταβάλλει για να βρεθεί στην κατάλληλη. Ακόμα κι αν φαίνεται ότι είναι στην κατάλληλη κατάσταση, ένα μέρος του μετατρέπεται σε άλλη λόγω διαφοράς στη τάση ατμών. Η μετατροπή του στερεού σε υγρό ονομάζεται τήξη, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται πήξη. Η μετατροπή από αέριο σε υγρό ονομάζεται υγροποίηση ή συμπύκνωση, ενώ η μετατροπή από αέριο σε στερεό ονομαζεται 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 οποιεσδήποτε συνθήκες και συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια του υγρού.

Γενικά, οι αλλαγές φάσης (που δε 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.

		Σε			
		Στερεό	**Υγρό**	**Αέριο**	**Πλάσμα**
Από	**Στερεό**	-	Τήξη	Εξάχνωση	—
	Υγρό	Στερεοποίηση	—	Βρασμός/Ατμοποίηση	—
	Αέριο	Εναπόθεση	Συμπύκνωση	—	Ιονισμός
	Πλάσμα	—	—	Ανασυνδυασμός/Απιονισμός	—

Πίνακας 2.2.1: Αλλαγές φάσης της ύλης [4]

2.3 Θερμική ενέργεια στις αλλαγές φάσης [3]

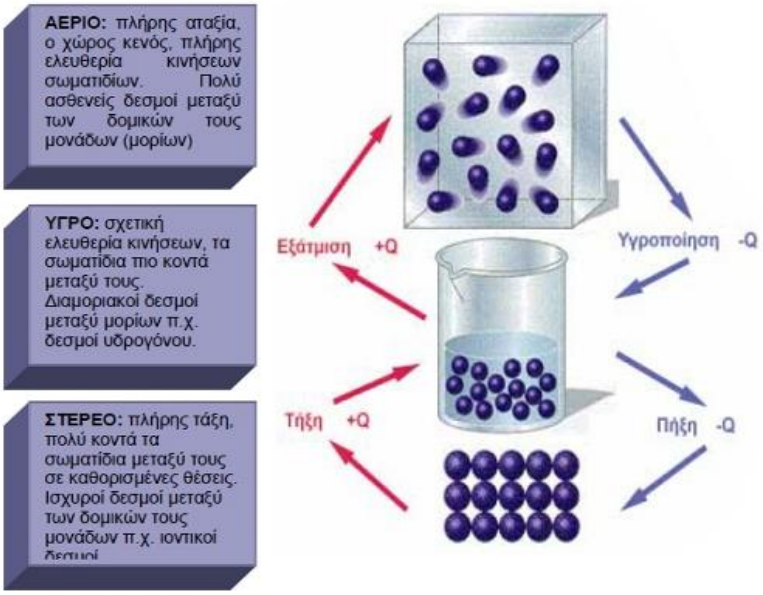
Σημαντικό ρόλο στις αλλαγές φάσεις παίζει η θερμική ενέργεια. Συνήθως οι αλλαγές φάσης γίνονται σε κανονική πίεση (μία ατμόσφαιρα ή 760mmHg), οπότε οι μετατροπές οφείλονται στην αλλαγή της θερμοκρασίας, άρα και την πρόσληψη ή αποβολή θερμικής ενέργειας. Γενικά ένα σώμα είναι στερεό σε χαμηλές θερμοκρασίες, και καθώς αυτές αυξάνονται το σώμα μετατρέπεται διαδοχικά σε υγρό και έπειτα σε αέριο. Σε αυτήν την περίπτωση η θερμική ενέργεια του σώματος αυξάνεται. Αντίστροφα, ένα σώμα σε υψηλές θερμοκρασίες είναι αέριο και καθώς αυτή μειώνεται το σώμα μετατρέπεται διαδοχικά σε υγρό και

έπειτα σε στερεό. Εδώ η θερμική ενέργεια του σώματος μειώνεται. Παρόλ' αυτά, υπάρχει περίπτωση απευθείας μετατροπής από στερεό σε αέριο, η οποία ονομάζεται εξάχνωση.

Κατά την πρόσληψη ή αποβολή θερμικής ενέργειας το σώμα μεταβάλλει τη θερμοκρασία του, εκτός κι αν αλλάζει κατάσταση. Όταν ένα σώμα αλλάζει κατάσταση, τότε η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή, ενώ η ανταλλασσόμενη θερμική ενέργεια αξιοποιείται στη διάλυση ή δημιουργία των διαμοριακών δυνάμεων. Αυτό το φαινόμενο σχετίζεται άμεσα με τη δομή του σώματος σε μικροσκοπικό, μοριακό επίπεδο. Επίσης, αυτή η δομή εξηγεί την ύπαρξη και συμπεριφορά των τριών καταστάσεων της ύλης.

Εκτός από τη θερμότητα, σημαντικό ρόλο παίζει και η πίεση, όταν αυτή μεταβάλλεται. Τότε η μελέτη των αλλαγών φάσεων γίνεται με διαγράμματα φάσεων.

2.4 Μικροσκοπική δομή των καταστάσεων της ύλης [3]



Σχήμα 2.4.1: Οι τρεις καταστάσεις της ύλης [5]

Η ύλη σε μικροσκοπικό μοριακό επίπεδο απαρτίζεται από άτομα, μόρια και ιόντα, αυτά είναι τα δομικά συστατικά της. Οι διαμοριακές δυνάμεις ελκτικές και απωστικές που αναπτύσσονται μεταξύ τους, ώστε να σχηματιστούν διακριτά σώματα, καθορίζουν εκτός των άλλων, το σχήμα, το μέγεθός τους, όπως επίσης και την ευκολία και τον τρόπο με τον οποίο αυτά μεταβάλλονται. Πιο συγκεκριμένα:

- Στα στερεά τα διαμοριακές δυνάμεις είναι ισχυρές. Τα δομικά συστατικά τους ταλαντώνονται γύρω από συγκεκριμένες θέσεις, χωρίς να μπορούν να αλλάξουν θέση. Έτσι, τα στερεά έχουν συγκεκριμένο σχήμα και όγκο που δύσκολα μεταβάλλονται.

- Στα υγρά οι διαμοριακές δυνάμεις είναι σημαντικές. Τα δομικά συστατικά μπορούν να αλλάξουν θέση αλλά δε μπορούν να αλλάξουν τη μεταξύ τους απόσταση. Έτσι, τα υγρά δεν έχουν σχήμα, παίρνουν κάθε φορά το σχήμα του δοχείου τους, αλλά έχουν συγκεκριμένο όγκο.

- Στα αέρια οι διαμοριακές δυνάμεις είναι αμελητέες. Τα δομικά συστατικά είναι ελεύθερα. Έτσι, τα αέρια δεν έχουν συγκεκριμένο σχήμα και όγκο. Καταλαμβάνουν όλην την έκταση του δοχείου τους.

Λόγω έλλειψης των διαμοριακών δυνάμεων στα αέρια, η συμπεριφορά τους μπορεί να περιγραφεί με μία εξίσωση, την εξίσωση των ιδανικών αερίων. Αυτή η εξίσωση ισχύει ποιοτικά και για τα υγρά, ίσως γενικώς για τα ρευστά. Η ποσοτικής της όμως ακρίβεια χάνεται όταν ένα αέριο βρίσκεται κοντά σε συνθήκες υγροποίησης.

2.5 Ιδιότητες της ύλης ανάλογα με την κατάστασή της [3]

Υπάρχει ένα σύνολο από ιδιότητες που σχετίζονται με τον όγκο και το σχήμα της ύλης, άρα και με την κατάστασή της. Μερικές από αυτές είναι η συμπιεστότητα, η ρευστότητα, το ιξώδες, η σταθερότητα.

- *Συμπιεστότητα (ή διασταλτικότητα)*: Είναι η ιδιότητα της ύλης να μειώνεται εύκολα ο όγκος της. Τα στερεά και τα υγρά είναι ασυμπίεστα, ενώ τα αέρια συμπιεστά. Η συμπιεστότητα των αερίων εξαρτάται σύμφωνα με την εξίσωση των ιδανικών αερίων, από την ευκολία μεταβολής της θερμοκρασίας και της πίεσης.

- *Ρευστότητα*: Είναι η ιδιότητα της ύλης να ρέει, δηλαδή να μπορεί να μεταφέρεται αλλάζοντας σχήμα. Τα σώματα που έχουν αυτήν την ιδιότητα ονομάζονται ρευστά. Τα υγρά και τα αέρια, καθώς και τα κολλοειδή είναι ρευστά. Τα στερεά γενικά δεν είναι ρευστά. Ωστόσο, στην επιστήμη της γεωλογίας έχει διατυπωθεί η θεωρία ότι τα στερεά είναι και αυτά ρευστά.

- *Ιξώδες*: Είναι η ιδιότητα των ρευστών να αντιστέκονται στη ροή τους. Για παράδειγμα το μέλι έχει πολύ μεγαλύτερο ιξώδες από ότι το νερό. Όταν το ιξώδες γίνεται υπερβολικά μεγάλο, ή τείνει στο άπειρο, τότε το ρευστό τείνει να μη ρέει, άρα να μην αλλάζει σχήμα, δηλαδή τείνει να είναι στερεό.

- *Σταθερότητα*: Όσον αφορά τις καταστάσεις της ύλης μερικές καταστάσεις προκύπτουν όχι μόνο από τις συνθήκες που τελικά επικρατούν στο περιβάλλον, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο αυτές διαμορφώθηκαν. Τότε μπορούν να προκύψουν ορισμένες καταστάσεις της ύλης, οι οποίες είναι εξαιρετικά ασταθείς και οι οποίες πολύ εύκολα υποκύπτουν σε άλλες σταθερές καταστάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το υπέρκορο υγρό διάλυμα, το οποίο με μία απλή κρούση στο δοχείο μετατρέπεται σε ετερογενές μίγμα. Ίσως μια τέτοια κατάσταση είναι και το υπερκρίσιμο ρευστό.

2.6 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας

2.6.1 Θερμότητα Ατμοπαραγωγής [6]

Ο όρος *θερμότητα ατμοπαραγωγής* χαρακτηρίζει τη θερμότητα που απαιτείται ανάλογα για τη συντέλεση του φαινομένου της ατμοπαραγωγής.

2.6.2 Ολική θερμότητα [6]

Ειδικότερα, το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για την μετατροπή 1Kg αποσταγμένου νερού θερμοκρασίας 0°C σε ατμό ορισμένης πίεσης p και θερμοκρασίας t_2 (της αντίστοιχης με τη πίεση), ονομάζεται "ολική θερμότητα ατμοποίησης".

Η Ολική θερμότητα ατμοποίησης αναλύεται στην "*αισθητή θερμότητα*", (αυτή που γίνεται αντιληπτή), και την "*λανθάνουσα θερμότητα*", (αυτή που τρόπο τινά διαφεύγει της προσοχής, μη γινόμενη αντιληπτή επειδή το θερμόμετρο δείχνει την ίδια θερμοκρασία). Η δεύτερη, η λανθάνουσα θερμότητα, διακρίνεται επιμέρους στην "εσωτερική λανθάνουσα" και την "εξωτερική λανθάνουσα θερμότητα".

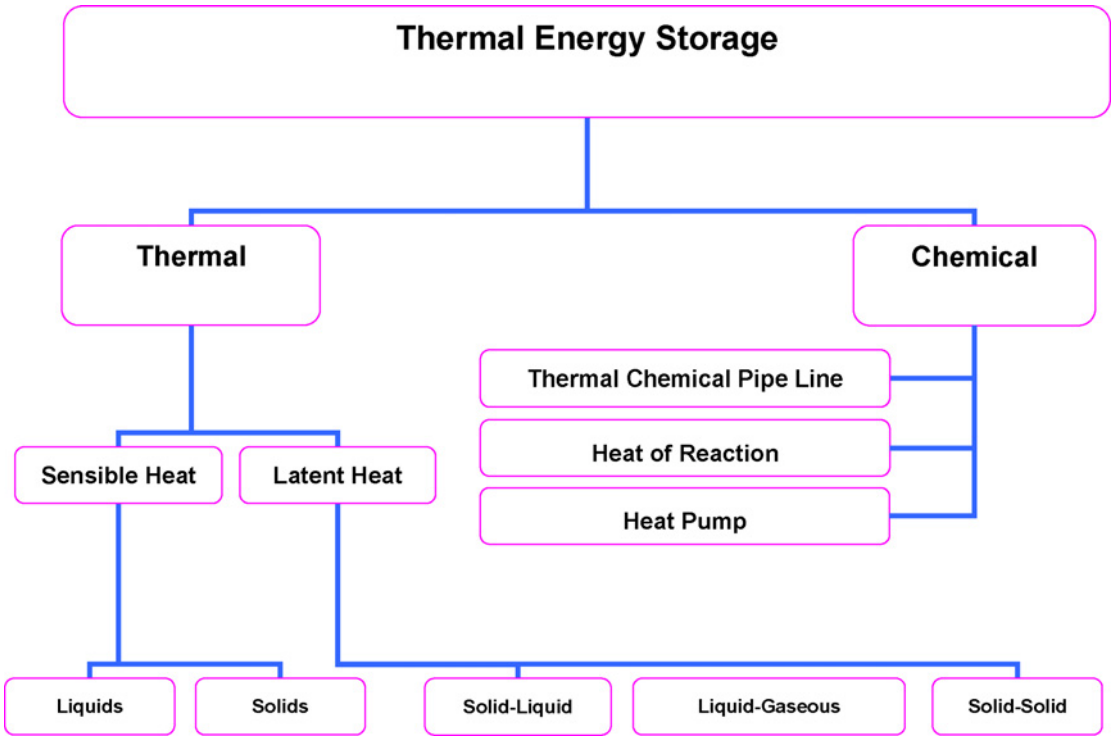
2.6.3 Αισθητή θερμότητα

Αισθητή θερμότητα ονομάζεται το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας 1Kg νερού από 0°C μέχρι τη θερμοκρασία βρασμού, δηλαδή στους 100°C. Φέρεται με την ονομασία

αυτή επειδή γίνεται αντιληπτή από την ανύψωση θερμοκρασίας που παρατηρείται σε προσαρμοσμένο θερμόμετρο.

Η αισθητή θερμότητα ατμοποίησης παρίσταται διεθνώς με το λατινικό γράμμα **q**. Στη περίπτωση ατμοπαραγωγής τύπου "ανοικτού δοχείου" αυτή προσδιορίζεται στα 100kcal/kg, δεδομένου ότι η ειδική θερμότητα του νερού είναι κατά μέσον όρο η μονάδα. Στο αγγλικό σύστημα μονάδων είναι αντίστοιχα οι 180BTU/lb, η οποία αντιστοιχεί σε ύψωση θερμοκρασίας από τους 32°F στους 212°F. [6]

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί ως μια αλλαγή της εσωτερικής ενέργειας ενός υλικού κυρίως με τη μορφή αισθητής θερμότητας, λανθάνουσας θερμότητας ή συνδυασμού αυτών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. [7]



Σχήμα 2.6.3.1: Διάφορες μορφές αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. [7]

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αποθήκευσης θερμότητας είναι υπό τη μορφή της αισθητής θερμότητας. Τα συστήματα αποθήκευσης της αισθητής θερμότητας χρησιμοποιούν τη θερμοχωρητικότητα και την αλλαγή στην θερμοκρασία του υλικού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης και αποφόρτισης. Το ποσό της αποθηκευμένης θερμότητας εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα του μέσου, τη μεταβολή της θερμοκρασίας και την ποσότητα του υλικού αποθήκευσης.

$$Q = \int_{Ti}^{Tf} mCpdT = mCp(T_f - T_i) \qquad (2.1)$$

Η αποθήκευση θερμότητας υπό μορφή αισθητής θερμότητας γίνεται κυρίως σε στερεά δομικά στοιχεία, όπως το τούβλο, η πέτρα κλπ, καθώς επίσης και σε υγρά, όπως το νερό. Τα αέρια λόγω της χαμηλής θερμοχωρητικότητάς τους δεν χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αισθητής θερμότητας**.** [8]

Η ικανότητα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας κάποιων επιλεγμένων στερεών και υγρών υλικών φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα. Το νερό φαίνεται να είναι το καλύτερο διαθέσιμο υγρό υλικό αποθήκευσης αισθητής θερμότητας επειδή είναι φθηνό και έχει υψηλή ειδική θερμότητα. Ωστόσο, πάνω από τους 100°C διάφορα έλαια, λιωμένα άλατα και υγρά μέταλλα χρησιμοποιούνται επίσης. [7]

Table 1
A list of selected solid–liquid materials for sensible heat storage

Medium	Fluid type	Temperature range (°C)	Density (kg/m^3)	Specific heat (J/kg K)
Rock		20	2560	879
Brick		20	1600	840
Concrete		20	1900–2300	880
Water		0–100	1000	4190
Caloriea HT43	Oil	12–260	867	2200
Engine oil	Oil	Up to 160	888	1880
Ethanol	Organic liquid	Up to 78	790	2400
Proponal	Organic liquid	Up to 97	800	2500
Butanol	Organic liquid	Up to 118	809	2400
Isotunaol	Organic liquid	Up to 100	808	3000
Isopentanol	Organic liquid	Up to 148	831	2200
Octane	Organic liquid	Up to 126	704	2400

Πίνακας 2.6.3.1: Υλικά στερεής- υγρής φάσης για αποθήκευση αισθητής θερμότητας [7]

2.6.4 Λανθάνουσα θερμότητα

Λανθάνουσα θερμότητα ονομάζεται το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για την μετατροπή 1Kg νερού θερμοκρασίας βρασμού σε ατμό ίδιας θερμοκρασίας. Φέρεται με την ονομασία αυτή επειδή λανθάνει τρόπο τινά της προσοχής μή γενόμενη αντιληπτή σε προσαρμοσμένο θερμόμετρο που συνεχίζει να παρουσιάζει σταθερά τη θερμοκρασία βρασμού.

Η λανθάνουσα θερμότητα παρίσταται διεθνώς με το κεφαλαίο λατινικό γράμμα **L**. Στη περίπτωση ατμοπαραγωγής τύπου "ανοικτού δοχείου" αυτή ανέρχεται στα 537kcal/kg, ενώ στο αγγλικό σύστημα μονάδων είναι 970BTU/lb. [6]

2.6.4.1 Εσωτερική λανθάνουσα θερμότητα [6]

Η Εσωτερική λανθάνουσα θερμότητα, με προτεινόμενο σύμβολο το ελληνικό γράμμα **ε**, είναι το ποσό των θερμίδων που αντιπροσωπεύουν το μηχανικό έργο που απαιτείται για τη διάσπαση της συνοχής των μορίων του νερού προκειμένου αυτά να ελευθερωθούν και να μετατραπούν σε ατμό.

2.6.4.2 Εξωτερική λανθάνουσα θερμότητα

Η Εξωτερική λανθάνουσα θερμότητα με προτεινόμενο σύμβολο το ελληνικό γράμμα **ξ**, είναι το ποσό της θερμότητας που απαιτείται προκειμένου να υπερνικηθεί η πίεση που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του νερού κατά τη διάρκεια της ατμοπαραγωγής. Εν προκειμένω αυτή αντιπροσωπεύει το υπό του ατμού παραγόμενο εξωτερικό έργο. [6]

Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους αποθήκευσης θερμότητας είναι υπό τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας. Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας βασίζεται στην απορρόφηση ή στην απελευθέρωση της θερμότητας όταν ένα υλικό αποθήκευσης υφίσταται αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό ή υγρό σε αέριο ή αντίστροφα. Η αποθηκευτική ικανότητα ενός συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με μέσο ένα υλικό αλλαγής φάσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο [7]:

$$Q = \int_{Ti}^{Tm} mCpdT + ma_m \Delta h_m + \int_{Tm}^{Tf} mCpdT = m\left[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp}\left(T_f - T_m\right)\right] \quad (2.2)$$

Ανάμεσα στις διάφορες τεχνικές αποθήκευσης θερμότητας, η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας είναι ιδιαίτερα ελκυστική δεδομένου ότι παρέχει πυκνότητα υψηλά ενεργειακής αποθήκευσης και έχει την ικανότητα να αποθηκεύει ενέργεια σε σταθερή θερμοκρασία - ή πάνω από ένα περιορισμένο εύρος θερμοκρασίας - η οποία είναι η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην αλλαγή φάσης του υλικού. Για παράδειγμα, χρειάζεται 80 φορές περισσότερη ενέργεια για την τήξη μιας δεδομένης μάζας νερού (πάγος) από το να αυξηθεί η θερμοκρασία της ίδιας ποσότητας νερού κατά 1°C. [9]

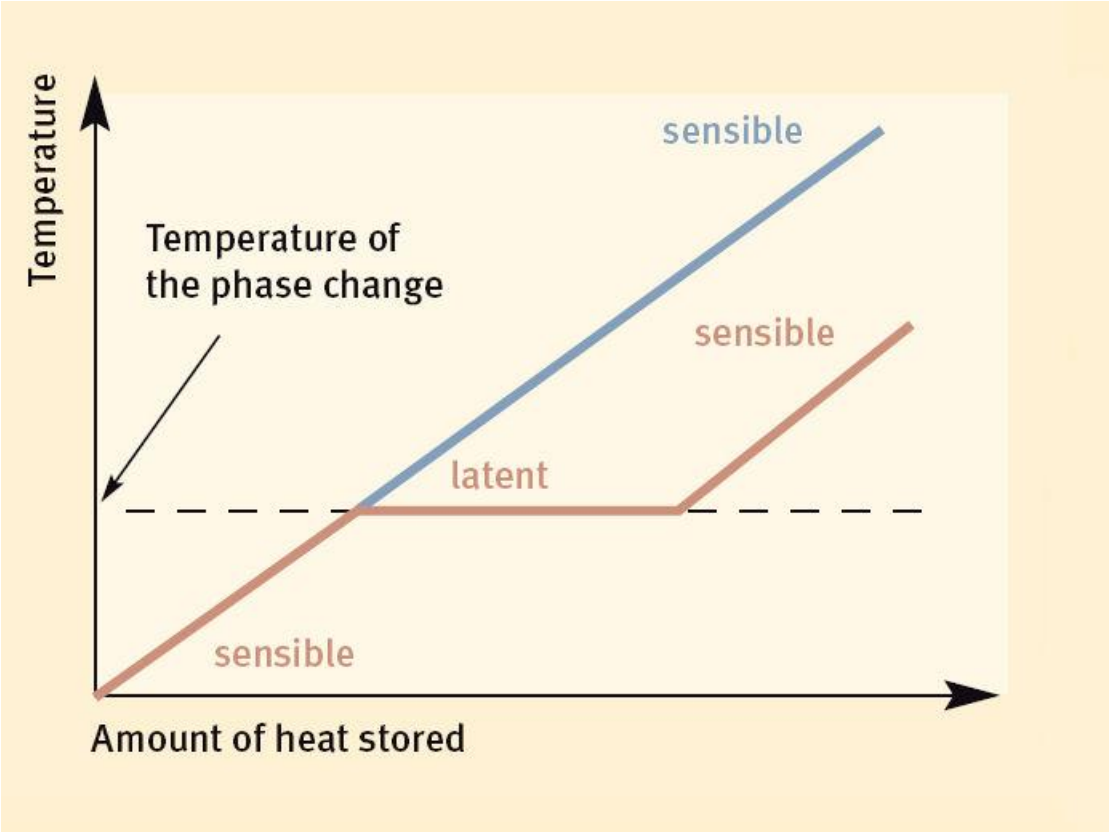
Η αλλαγή φάσης που υφίστανται τα υλικά μπορεί να είναι της ακόλουθης μορφής: στερεού-στερεού, στερεού-υγρού, στερεού-αερίου, υγρού-αερίου και αντιστρόφως. Παρόλαυτα, οι αλλαγές φάσεις στερεού-υγρού και στερεού-στερεού είναι πρακτικού ενδιαφέροντος.

- *Αλλαγή φάσης μεταξύ στερεού και στερεού*. Στην αλλαγή φάσης στερεού-στερεού η θερμότητα αποθηκεύεται καθώς το υλικό μετατρέπεται από τη μια κρυσταλλική δομή στην άλλη. Αυτή η μετάβαση έχει γενικά μικρή λανθάνουσα θερμότητα και μικρές μεταβολές όγκου σε σχέση με τη μετάβαση στερεού-υγρού, γι' αυτό καθίσταται λιγότερο εφαρμόσιμη στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

- *Αλλαγή φάσης μεταξύ στερεού και αερίου, αλλαγή φάσης μεταξύ υγρού και στερεού.* Στις αλλαγές φάσης στερεού-αερίου και υγρού-αερίου παρότι η αλλαγή φάσης έχει υψηλότερη λανθάνουσα θερμότητα, οι μεγάλες αλλαγές του όγκου της σχετίζονται με τα προβλήματα περιορισμού και αποκλείουν πιθανή χρησιμότητα τους σε συστήματα θερμικής αποθήκευσης. Μεγάλες αλλαγές στον όγκο καθιστούν το σύστημα πολύπλοκο και μη πρακτικό.

- *Αλλαγή φάσης μεταξύ στερεού και υγρού (τήξης).* Η αλλαγή φάσης στερεού- υγρού έχει συγκριτικά μικρότερη λανθάνουσα θερμότητα από ό,τι του υγρού-αερίου. Ωστόσο, αυτές οι αλλαγές φάσης αφορούν μόνο μια μικρή διαφορά (της τάξης του 10% ή λιγότερο) στον όγκο. Οι αλλαγές φάσεις στερεού-υγρού αποδεικνύεται ότι είναι οικονομικά ελκυστικές για τη χρήση σε συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και γι' αυτό αποτελούν τις πιο διαδεδομένες αλλαγές φάσεις σε διάφορες τεχνικές εφαρμογές. [7]

Στο σχήμα που ακολουθεί, φαίνεται η αποθήκευση θερμότητας ως λανθάνουσα για την περίπτωση αλλαγής φάσης μεταξύ στερεού – υγρού συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα 2.6.4.1: Λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας μεταξύ στερεού – υγρού συναρτήσει της θερμοκρασίας [10]

Κατά τη διάρκεια της τήξης (αλλαγή φάσης μεταξύ στερεού και υγρού), θερμότητα μεταφέρεται στο υλικό και η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στη θερμοκρασία τήξης. Αν η ενθαλπία τήξης έχει μεταφερθεί στο υλικό, τότε η τήξη έχει ολοκληρωθεί και περαιτέρω πρόσδοση θερμότητας εκλαμβάνεται πλέον σαν ποσό αισθητής θερμότητας. Το ποσό της θερμότητας που απορροφάται κατά την τήξη δεν είναι δυνατόν να ανιχνευθεί μέσω της θερμοκρασίας και η θερμότητα που αποθηκεύεται λέγεται λανθάνουσα θερμότητα. [10]

2.6.5 Σύγκριση Αισθητής και Λανθάνουσας θερμότητας [11]

Η μέθοδος αποθήκευσης θερμότητας ως αισθητής χρησιμοποιείται πιο συχνά σε εφαρμογές ηλιακής ενέργειας. Παρολαυτά τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι ανώτερος τρόπος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Αυτό είναι λόγω της υψηλής της αποθηκευτικής πυκνότητας και της ισοθερμικής φύσης της διαδικασίας αποθήκευσης. Σε αντίθεση με την αισθητή μέθοδο αποθήκευσης θερμότητας, η λανθάνουσα μέθοδος αποθήκευσης θερμότητας παρέχει πολύ υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης με μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της αποθηκευμένης και της ελεύθερης

θερμότητας. Μια σύγκριση μεταξύ της λανθάνουσας και της αισθητής αποθήκευσης θερμότητας δείχνει ότι οι πυκνότητες αποθήκευσης μπορεί να γίνουν 5 με 10 φορές υψηλότερες όταν χρησιμοποιούνται μονάδες αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Ωστόσο, πρακτικές δυσκολίες συνήθως προκύπτουν κατά την εφαρμογή της μεθόδου λανθάνουσας θερμότητας εξαιτίας της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, της αλλαγής πυκνότητας και της σταθερότητας των ιδιοτήτων υπό τον εκτεταμένο διαχωρισμό φάσεων και την υπόψυξη των υλικών αλλαγής φάσης.

3. Υλικά Αλλαγής Φάσης

3.1 Γενικά

Τα Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM) είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν θερμότητα. Τα PCM υφίστανται αλλαγές φάσης στερεού-στερεού, υγρού-αερίου και στερεού-υγρού. Σχετικά λίγα PCM στερεού-στερεού που έχουν αναγνωριστεί είναι κατάλληλα για εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης διότι έχουν υψηλές θερμοκρασίες μετάβασης. Τα PCM υγρού-αερίου δεν είναι ακόμη πρακτικά για τις περισσότερες εφαρμογές εξαιτίας της μεγάλης αλλαγής στον όγκο που συμβαίνει στην αλλαγή φάσης. Τα PCM στερεού-υγρού χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστο σε έρευνες και εφαρμογές καθώς έχουν πολλές δυνατότητες αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας και καλή θερμική αγωγιμότητα, κάτι που τα κάνει πρακτικά στη χρήση. [7]

Τα PCM στερεού-υγρού ενεργούν όπως τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης, η θερμοκρασία τους αυξάνεται καθώς απορροφούν ηλιακή θερμότητα. Σε αντίθεση με τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όταν τα PCM φτάσουν την θερμοκρασία στην οποία αλλάζουν φάση, απορροφούν μεγάλα ποσά θερμότητας χωρίς να γίνονται θερμότερα. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος στο χώρο γύρω από το PCM πέφτει, τότε αυτό στερεοποιείται απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητά του. Τα PCM απορροφούν και εκπέμπουν θερμότητα διατηρώντας παράλληλα μια σχετικά σταθερή θερμοκρασία. Μεταξύ των θερμοκρασιών 295-305K τα υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι πολύ αποτελεσματικά. Αποθηκεύουν 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου σε σχέση με τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας όπως το νερό, τα τούβλα ή οι πέτρες. Τα PCM είναι συνήθως πιο ακριβά από τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης θερμότητας. Το δεκαένυδρο θειικό νάτριο (άλας του Glauber), το εξαένυδρο χλωριούχο ασβέστιο και το κερί παραφίνης είναι τα πιο συνήθη χρησιμοποιούμενα PCM σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης. [12]

Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές δυσκολίες που μπορεί να προκύψουν κατά τη χρήση ορισμένων στερεών-υγρών PCM όπως η υπόψυξη, ο διαχωρισμός των φάσεων και η διάβρωση.

Το μεγάλο εύρος των θερμοκρασιών μετάβασης φάσης που είναι διαθέσιμο καθιστά τα PCM κατάλληλα για ποικίλες εφαρμογές. Παραδείγματος χάριν τα PCM που βρίσκονται κάτω από τους 15 °C μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές κλιματισμού ενώ αυτά που βρίσκονται πάνω από 90°C για εφαρμογές ψύξης. Ανάμεσα σε

αυτές τις θερμοκρασίες, τα PCM έχουν εκτεταμένη έρευνα και χρήση στην ηλιακή ενέργεια και στις κτιριακές εφαρμογές.

Προκειμένου να γίνει επιλογή του πιο πρακτικού PCM για μία συγκεκριμένη εφαρμογή η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης είναι συχνά ο πιο σημαντικός παράγοντας. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του υλικού θα πρέπει γενικά να είναι τόσο υψηλή όσο να καθίσταται δυνατή η αποθήκευση της μέγιστης ποσότητας ενέργειας ανά μονάδα μάζας. Μια ειδικά υψηλή θερμοχωρητικότητα επιτρέπει στο PCM να λειτουργήσει επιπροσθέτως ως υλικό αποθήκευσης αισθητής θερμότητας εκτός από υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας κατά τη λειτουργία σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Μια υψηλή θερμική αγωγιμότητα επιτρέπει στη θερμική ενέργεια να μεταφερθεί πιο αποτελεσματικά μέσα στο υλικό ενώ μια χαμηλή θερμική αγωγιμότητα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες κλίσεις θερμοκρασίας για φόρτιση και αποφόρτιση. Η τελική εφαρμογή και το περιβάλλον στο οποίο το PCM θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή του καταλληλότερου PCM. Τα PCM με διαβρωτικές ιδιότητες δεν είναι κατάλληλα για κτιριακές εφαρμογές ή όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ένα σύστημα που περιέχει μεταλλικά τμήματα. Επίσης, η μεταβολή του όγκου κατά τη διάρκεια της μετάβασης μπορεί να επηρεάσει το σχεδιασμό των συστημάτων ανταλλαγής θερμότητας. Μερικά PCM είναι επίσης τοξικά και εύφλεκτα κάτι που αποτελεί επίσης μια σημαντική παρατήρηση. Ωστόσο, η ανασταλτικός παράγοντας είναι το κόστος το οποίο ποικίλλει σημαντικά σε όλο το φάσμα των διαθέσιμων PCM. [13]

3.2 Ιδιότητες των PCM [8]

Τα PCM που θα χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό συστημάτων θερμικής αποθήκευσης θα πρέπει να ικανοποιούν κάποιες επιθυμητές θερμοφυσικές, κινητικές και χημικές ιδιότητες.

3.2.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες:

- Θερμοκρασία τήξης στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας.
- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου έτσι ώστε ο απαιτούμενος όγκος του δοχείου, που αποθηκεύει μια δεδομένη ποσότητα ενέργειας, να είναι ελάχιστος.
- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα για την παροχή πρόσθετης, σημαντικής αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.

- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα για στερεές και υγρές φάσεις προκειμένου να επιτευχθεί φόρτιση/ αποφόρτιση της ενέργειας των συστημάτων αποθήκευσης.

- Μικρές μεταβολές του όγκου κατά την αλλαγή φάσης και μικρά τάση ατμών στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας προκειμένου να περιορισθεί το πρόβλημα αποθήκευσης.

- Σταθερή συμπεριφορά του PCM για δεδομένη αποθηκευτική ικανότητα με κάθε κύκλο τήξης/στερεοποίησης.

3.2.2 Κινητικές Ιδιότητες:

- Υψηλή εμπύρινη αναλογία προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της υπόψυξης της υγρής φάσης.

- Υψηλό ποσοστό ανάπτυξης κρυστάλλων, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις ανάκτησης θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης.

3.2.3 Χημικές ιδιότητες:

- Χημική σταθερότητα.

- Πλήρης αναστρέψιμος κύκλος τήξης/στερεοποίησης.

- Καμία υποβάθμιση μετά από πολλούς κύκλους τήξης/στερεοποίησης.

- Καμία διαβρωτικότητα στα κατασκευαστικά υλικά.

- Αποφυγή χρήσης τοξικών, εύφλεκτων και εκρηκτικών υλικών για ασφάλεια.

- Χρήση κυρίως ανακυκλώσιμων υλικών για περιβαλλοντολογικούς λόγους

3.2.4 Οικονομικές ιδιότητες:

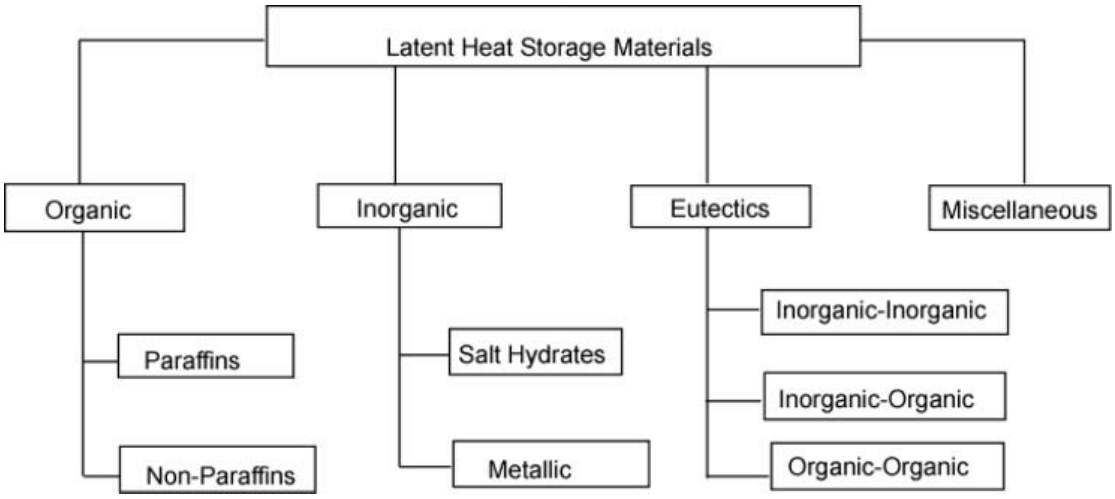
- Χαμηλή τιμή πώλησης, για λόγους ανταγωνιστικότητας σε σχέση με άλλα υλικά που προσφέρουν δυνατότητες αποθήκευσης θερμότητας για ψύξη και θέρμανση.

- Διαθέσιμα σε μεγάλο εύρος κλίμακας

3.3 Κατηγοριοποίηση των PCM

Τα PCM χωρίζονται γενικά σε 3 κατηγορίες με βάση την χημική τους σύνθεση. Αυτές είναι οι ανόργανες ενώσεις, οι οργανικές ενώσεις και τα εύτηκτα μίγματα.

Μια κατηγοριοποίηση των PCM φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.3.1: Κατηγοριοποίηση των υλικών αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. [8]

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός οργανικών και ανόργανων χημικών υλικών, τα οποία μπορούν να αναγνωριστούν ως PCM όσον αφορά τη θερμοκρασία τήξης και τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Ωστόσο, εκτός από το σημείο τήξης στην περιοχή λειτουργίας, η πλειοψηφία των Υλικών Αλλαγής Φάσης δεν πληροί τα κριτήρια που απαιτούνται για μια επαρκή θερμική αποθήκευση. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει κάποιο υλικό που να μπορεί να έχει όλες τις απαιτούμενες ιδιότητες, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, σε μια ιδανική θερμική αποθήκευση πρέπει κανείς να χρησιμοποιήσει όλα τα διαθέσιμα υλικά και να προσπαθήσει να αναπληρώσει με ένα κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος. Για παράδειγμα, μεταλλικά πτερύγια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των PCM, η υπέρψυξη μπορεί να κατασταλεί με την εισαγωγή ενός στοιχείου πυρήνωσης στο υλικό αποθήκευσης και η ασταθής τήξη μπορεί να ρυθμιστεί με τη χρήση κατάλληλου πάχους.

Σε γενικές γραμμές τα ανόργανα υλικά έχουν σχεδόν διπλάσια ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (250-400kg/dm^3) από ότι τα οργανικά υλικά (128-200kg/dm^3). Λόγω των πολύ διαφορετικών θερμικών και χημικών συμπεριφορών τους, οι ιδιότητες κάθε κατηγορίας που επηρεάζει το σχεδιασμό συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με τη χρήση PCM αναλύονται λεπτομερώς παρακάτω. [8]

3.3.1 Οργανικά PCM

Τα οργανικά υλικά χωρίζονται σε παραφίνες και μη παραφίνες. Τήκονται και στερεοποιούνται επανειλημμένα χωρίς διαχωρισμό φάσης. Κρυσταλλώνονται με λίγη ή καθόλου υπέρψυξη και συνήθως καθόλου διάβρωση. [14]

3.3.1.1 *Παραφίνες*

Οι κανονικές παραφίνες τύπου C_nH_{2n+2} είναι μια οικογένεια κορεσμένων υδρογονανθράκων με παρόμοιες ιδιότητες. Οι παραφίνες αποτελούνται από ένα μίγμα κυρίως ευθειών αλυσίδων n-αλκανίων CH3-(CH2)-CH3. Η κρυστάλλωση της (CH3)- αλυσίδας ελευθερώνει μια μεγάλη ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας. Οι παραφίνες μεταξύ των C_5 και C_{15} είναι υγρές και οι υπόλοιπες είναι κηρώδη στερεά. Οι κηρώδεις παραφίνες είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα, εμπορικά, οργανικά υλικά αποθήκευσης θερμότητας. Συνίστανται κυρίως από υδρογονάνθρακες ευθείας αλυσίδας που έχουν θερμοκρασίες τήξης που κυμαίνονται από 23 μέχρι 67^oC. Η εμπορικής ποιότητας κηρώδης παραφίνη λαμβάνεται από απόσταξη πετρελαίου και δεν είναι καθαρή ουσία, αλλά συνδυασμός διαφορετικών υδρογονανθράκων. Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερο είναι το μέσο μήκος της υδρογονανθρακικής αλυσίδας τόσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία τήξεως και τη θερμότητα σύντηξης. Οι παραφίνες θεωρούνται υλικά αποθήκευσης θερμότητας σύντηξης λόγω της διαθεσιμότητας τους σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και είναι εύκολα διαθέσιμες από πολλούς κατασκευαστές. [15]

Ωστόσο εξαιτίας του κόστους, μόνο οι τεχνικού βαθμού παραφίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Οι παραφίνες είναι ασφαλείς, αξιόπιστες, προβλέψιμες, λιγότερο δαπανηρές και μη διαβρωτικές. Είναι χημικά αδρανείς και σταθερές κάτω από τους 500^oC, εμφανίζουν μικρές μεταβολές όγκου κατά την τήξη και έχουν χαμηλή πίεση ατμού σε μορφή τήξης. Χάρις αυτών των ιδιοτήτων των παραφινών, τα συστήματα που χρησιμοποιούν παραφίνες έχουν συνήθως πολύ μεγάλο κύκλο ψύξης-τήξης.

Εκτός από ορισμένα θετικά χαρακτηριστικά των παραφινών όπως η συμβατική τήξη και οι καλές ιδιότητες των πυρήνων εμφανίζουν και κάποιες ανεπιθύμητες ιδιότητες, όπως: η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η μη-συμβατότητα με πλαστικά δοχεία και η μέτρια αναφλεξιμότητα. Όλες αυτές οι ανεπιθύμητες ενέργειες μπορούν εν μέρει να αντιμετωπισθούν με ελαφρά τροποποίηση του κεριού και της μονάδας αποθήκευσης. [7]

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

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

Sr. no.	PCMs	Melting point (°C)	Latent heat (J/g)	Thermal cycles
1.	Paraffin (70 wt%) +Polypropylene(30 wt%)	44.77	136.16	3000
2.	Paraffin ($C_{22.2}H_{44.1}$) (technical grade)	47.1	166	900
3.	Paraffin ($C_{23.2}H_{48.4}$) (technical grade)	57.1	220	900
4.	Paraffin wax 53 (commercial grade)	53	184	300
		53	184	1500
5.	Paraffin wax 54	53.32	184.48	1500
6.	Paraffin wax 58–60	58.27	129.8	600
7.	Paraffin wax 60–62	57.78	129.7	600
8.	*n*-Heptadecane/polymethyl methacrylate ($C_{17}H_{36}$)	18.4	84.7	5000

Σχήμα 3.3.1.1: Οι παραφίνες και οι ιδιότητές τους. [14]

3.3.1.2 *Μη-παραφίνες*

Οι οργανικές μη-παραφίνες είναι τα πιο πολυάριθμα υλικά αλλαγής φάσης με εξαιρετικά ποικίλες ιδιότητες. Κάθε ένα από αυτά τα υλικά έχει τις δικές του ιδιότητες σε αντίθεση με τις παραφίνες οι οποίες έχουν πολύ παρόμοιες ιδιότητες. Αυτή είναι η μεγαλύτερη κατηγορία υποψηφίων υλικών για αποθήκευση αλλαγής φάσης. Αυτά τα οργανικά υλικά χωρίζονται σε περαιτέρω ομάδες των λιπαρών οξέων και άλλων οργανικών μη-παραφινών όπως οι εστέρες, οι αλκοόλες, οι γλυκόλες, κλπ. Αυτά τα υλικά είναι εύφλεκτα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες, φλόγες ή οξειδωτικούς παράγοντες. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτών των οργανικών υλικών είναι ως ακολούθως: η υψηλή θερμότητα σύντηξης, η ευφλεκτότητα, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, τα χαμηλά σημεία ανάφλεξης, το διαφορετικό επίπεδο τοξικότητας, και η αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες.

Ωστόσο, τα **λιπαρά οξέα** είναι τα περισσότερο υποσχόμενα PCM μεταξύ όλων των μη-παραφινών λόγω της διαθεσιμότητάς τους σε κατάλληλες θερμοκρασίες αλλαγής φάσης και της υψηλής θερμότητας τήξεως. [14]

Τα λιπαρά οξέα έχουν υψηλές τιμές στη θερμότητα σύντηξης συγκρίσιμες με αυτές των παραφινών. Τα λιπαρά οξέα επίσης ψύχονται χωρίς υπέρψυξη και γενικά θεωρούνται καλά PCM. Ο γενικός τύπος που περιγράφει όλα τα λιπαρά οξέα δίδεται από τον τύπο $CH_3(CH_2)_{2n}$_COOH. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους ωστόσο είναι το κόστος τους, το οποίο είναι 2-2,5 φορές μεγαλύτερο από εκείνο της τεχνικού βαθμού παραφίνης. Επιπλέον είναι ήπια διαβρωτικά. Μερικά λιπαρά οξέα παρουσιάζουν ενδιαφέρον σε εφαρμογές αποθήκευσης λανθάνουσας ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας. [7]

Επιπρόσθετα, τα λιπαρά οξέα εύκολα μπορούν να παραχθούν από κοινά φυτικά και ζωικά έλαια. Έτσι παρέχεται η εγγύηση συνεχούς παροχής παρά την έλλειψη πηγών καυσίμων. Τα πιο κοινά λιπαρά οξέα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά θερμικής αποθήκευσης είναι το στεαρικό οξύ, το παλμιτικό οξύ, το βουτυρικό οξύ και το μυριστικό οξύ. Το παλμιτικό και το μυριστικό οξύ μπορούν να θεωρηθούν καλύτερα PCM από τα περισσότερα λιπαρά οξέα για μακροπρόθεσμες ηλιακές θερμικές εφαρμογές. Το παλμιτικό οξύ έχει μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα από το μυριστικό. [14]

Μία πολλά υποσχόμενη χρήση είναι ένα σύστημα που συνδυάζει λιπαρά οξέα που μπορούν να αποκτήσουν θερμοκρασίες τήξης που κυμαίνονται από 20-30°C με ακρίβεια ± 0.5^{o}C. Αυτό θα επέτρεπε σε έναν σχεδιαστή να επιλέξει τη βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση ενός συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. Τα στεατικά οξέα τήκονται πέρα από ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας, έχουν δύο σημεία τήξεως και μεγάλες διακυμάνσεις στην λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης. Ωστόσο, έχουν θερμικά σταθερή συμπεριφορά μετά από 1500 επαναλαμβανόμενους κύκλους τήξης / πήξης. Η ποιότητα του στεαρικού οξέος ποικίλλει πολύ στην εμπορική αγορά λόγω της ευρείας χρήσης του σε διάφορα προϊόντα. Ως εκ τούτου, καμία εγγύηση δεν μπορεί να δοθεί για την καθαρότητά του. Αυτός μπορεί να είναι και ο λόγος που η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του στεαρικού οξέος γενικά μειώνεται με τον αριθμό των θερμικών κύκλων. [8]

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι μη-παραφίνες που αναφέρθηκαν παραπάνω μαζί με το σημείο τήξης τους και τη λανθάνουσα θερμότητα τήξεως.

Table 3
Melting point and latent heat of thermal cycled non-paraffins.

Sr. no.	PCM	Melting point (°C)	Latent heat (J/g)	Thermal cycles
1.	Acetamide (CH_3CONH_2)	82.15	262.78	300
		82	263	1500
2.	Acetanilide (C_8H_9NO)	113	169.4	500
3.	Capric acid (55 wt%)+expanded perlite (45 wt%)	31.80	98.12	5000
4.	Erythritol	117	339	1000
5.	Lauric acid ($C_{11}H_{23}COOH$)	43.5	169.3	120
		42.46	176.6	1200
		42.6	211.6	910
6.	Methyl palmitate	29	215	50
7.	Methyl stearate	37.8	270	50
8.	Myristic acid ($C_{13}H_{27}COOH$)	50.4	189.4	450
		52.99	181.0	1200
		53.8	192.0	910
9.	Palmitic acid ($C_{15}H_{31}COOH$)	61.2	196.1	120
		57.8	201.2	450
		61.31	197.9	1200
		59.9	197.9	910
10.	Palmitic acid (80 wt%)+expanded graphite (20 wt%)	60.88	148.36	3000
11.	Stearic acid ($C_{17}H_{35}COOH$)	65.2	209.9	450
		62.59	154.63	300
		54.7	159.3	1200
		53.8	174.6	910
		63	155	1500
12.	Urea	133	250	50

Πίνακας 3.3.1.1: Οι μη-παραφίνες και οι ιδιότητές τους. [14]

3.3.2 Ανόργανα PCM

Τα ανόργανα υλικά ταξινομούνται σε ένυδρα άλατα και μεταλλικά υλικά. Αυτά τα υλικά αλλαγής φάσης δεν υπερψύχονται αισθητά και οι θερμότητες συντήξεώς τους δεν υποβαθμίζονται με κάθε κύκλο. [7]

3.3.2.1 *Ένυδρα Άλατα* [7]

Τα ένυδρα άλατα μπορούν να θεωρηθούν ως μίγματα ανόργανων αλάτων και νερού σχηματίζοντας ένα τυπικό κρυσταλλικό στερεό γενικού τύπου $AB{\cdot}nH_2O$. Η αλλαγή φάσης στερεού-υγρού στα ένυδρα άλατα είναι στην πραγματικότητα μια αφυδάτωση της ενυδάτωσης του άλατος, αν και αυτή η διαδικασία μοιάζει με τήξη ή ψύξη θερμοδυναμικά. Ένα ένυδρο άλας τήκεται συνήθως σε ένα ένυδρο άλας με λιγότερα mol νερού, δηλαδη:

$$AB \cdot nH_2O \rightarrow AB \cdot mH_2O + (n-m)H_2O \qquad (3.1)$$

ή στην άνυδρη μορφή του:

$$AB \cdot nH_2O \rightarrow AB \cdot nH_2O \qquad (3.2)$$

Στο σημείο τήξεως ο ένυδρος κρύσταλλος χωρίζεται σε άνυδρο άλας και νερό, ή σε ένα κατώτερο ένυδρο και νερό. Ένα πρόβλημα με τα

περισσότερα ένυδρα άλατα είναι εκείνο της ανομοιόμορφης τήξης που προκαλείται από το γεγονός ότι το νερό που απελευθερώνεται κατά την κρυστάλλωση δεν επαρκεί για να διαλύσει όλη τη στερεή παρούσα φάση. Λόγω της διαφοράς πυκνότητας, το κατώτερο ένυδρο (ή το άνυδρο άλας) παραμένει στο κάτω μέρος του δοχείου.

Τα περισσότερα ένυδρα άλατα έχουν επίσης φτωχές ιδιότητες πυρήνων με αποτέλεσμα την υπέρψυξη του υγρού. Μία λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι να διατηρηθούν ορισμένοι κρύσταλλοι σε μια μικρή κρύα περιοχή για να χρησιμοποιηθούν ως πυρήνες.

Τα ένυδρα άλατα είναι η πιο σημαντική ομάδα PCM και έχει μελετηθεί εκτεταμένα για τη χρήση της σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμικής ενέργειας λόγω του χαμηλού τους κόστους και της ευρείας διαθεσιμότητας τους. Οι πιο ελκυστικές ιδιότητες των ένυδρων αλάτων είναι: (α) η υψηλή λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης ανά μονάδα όγκου, (β) η σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (σχεδόν διπλάσια από της παραφίνης), και (γ) οι μικρές μεταβολές του όγκου κατά την τήξη. Δεν είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά, είναι συμβατά με τα πλαστικά και μόνο ελαφρά τοξικά. Πολλά ένυδρα άλατα είναι αρκετά φθηνά για χρήση σε εφαρμογές αποθήκευσης.

Τρεις τύποι της συμπεριφοράς των τηκόμενων αλάτων μπορούν να προσδιοριστούν: η ομοιόμορφη, η ανομοιόμορφη και η σχετικά ομοιόμορφη τήξη.

(i) Η ομοιόμορφη τήξη συμβαίνει όταν το άνυδρο άλας είναι πλήρως διαλυτό στο νερό της ενυδάτωσης του στην θερμοκρασία τήξεως.

(ii) Η ανομοιόμορφη τήξη συμβαίνει όταν το άλας δεν είναι εντελώς διαλυτό στο νερό της ενυδάτωσης του στο σημείο τήξεως.

(iii) Η σχετικά ομοιόμορφη τήξη συμβαίνει όταν οι υγρές και οι στερεές φάσεις βρίσκονται σε ισορροπία κατά τη διάρκεια μιας μετάβασης φάσης.

Συμπερασματικά λοιπόν, το κύριο πρόβλημα στην χρήση ένυδρων αλάτων ως PCM, τα οποία κρίνονται κατάλληλα για χρήση σε θερμική αποθήκευση, είναι ότι τήκονται ανομοιόμορφα. Καθώς τα n mol του νερού ενυδάτωσης δεν είναι επαρκή για να διαλύσουν ένα mole άλατος, το προκύπτον διάλειμμα είναι υπερκορεσμένο στην θερμοκρασία τήξεως. Το στερεό άλας λόγω της υψηλής πυκνότητας του κατακάθεται στο κάτω μέρος του δοχείου και δεν είναι διαθέσιμο για επανασυνδυασμό με νερό κατά τη διάρκεια της αντίστροφης διαδικασίας της ψύξης. Αυτό οδηγεί σε μια μη αναστρέψιμη τήξη ψύξη του ένυδρου άλατος και έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση με κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα κοινό στα ένυδρα άλατα είναι η υπέρψυξη. Στη θερμοκρασία σύντηξης, ο ρυθμός των πυρήνων είναι γενικά πολύ χαμηλός. Για να επιτευχθεί μια λογική τιμή του ρυθμού των πυρήνων το διάλυμα πρέπει να υπερψύχεται και συνεπώς η ενέργεια αντί να εκφορτίζεται στη θερμοκρασία τήξης, εκφορτίζεται σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία.

Ακόμη ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα ένυδρα άλατα είναι η επίδραση τους με μικρότερο αριθμό mol νερού κατά την διάρκεια της διαδικασίας αποφόρτισης. Η προσθήκη χημικών μπορεί να αποτρέψει την πυρήνωση των κατώτερων ένυδρων αλάτων, η οποία κατά προτίμηση αυξάνει τη διαλυτότητα των κατώτερων ένυδρων αλάτων περισσότερο από τα αρχικά ένυδρα άλατα με μεγαλύτερο αριθμό mol νερού.

Το πρόβλημα της ανομοιόμορφης τήξης μπορεί να αντιμετωπιστεί με έναν από τους ακόλουθους τρόπους: (α) με μηχανική ανάδευση, (β) με τοποθέτηση των PCM σε αεροστεγή δοχεία αποθήκευσης προκειμένου να μειωθεί ο διαχωρισμού των φάσεων, (γ) με τη χρήση περίσσειας νερού έτσι ώστε οι τηκόμενοι κρύσταλλοι να μην παράγουν υπερκορεσμένο διάλυμα, (δ) τροποποιώντας τη χημική σύνθεση του συστήματος και κάνοντας το ανομοιόμορφο μίγμα ομοιόμορφο.

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

Sr. no.	PCMs	Melting point (°C)	Latent heat (J/g)	Thermal cycles
1.	Calcium chloride hexahydrate($CaCl_2 \cdot 6H_2O$)	29.8	190.8	1000
		28	86	1000
		27	–	5650
		23.26	125.4	1000
2.	Glauber's salt ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$)	32.4	238	320
		32	–	5650
3.	Magnesium chloride hexahydrate ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$)	111.5	155.11	500
		110.8	138	1000
4.	$Na_2SO_4 \cdot nH_2O$	–	–	1000
5.	$Na_2SO_4 \cdot 1/2NaCl \cdot 10H_2O$	20	–	5650
6.	$NaOH \cdot 3 \cdot 5H_2O$	15	–	5650
7.	Sodium acetate trihydrate ($NaCH_3COO \cdot 3H_2O$)	58	230	500
		58	252	100
8.	Trichlorofluoromethane heptadecahydrate ($CCl_3F \cdot 17H_2O$)	8.5	210	100

Πίνακας 3.3.2.1.1: Τα ένυδρα άλατα και οι ιδιότητές τους. [14]

3.3.2.2. *Μεταλλικά PCM* [14]

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τα χαμηλής τήξης μέταλλα και τα εύτηκτα μέταλλα. Αυτά τα μέταλλα δεν έχουν ακόμη ληφθεί σοβαρά υπόψη στην τεχνολογία των PCM λόγω των κυρώσεων του βάρους.

Ωστόσο, όταν λαμβάνεται υπόψη ο όγκος είναι πιθανοί υποψήφιοι λόγω της υψηλής θερμότητας σύντηξης ανά μονάδα όγκου. Έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα, έτσι ώστε οι πληρωτές (fillers) με πρόσθετες κυρώσεις βάρους να μην είναι απαραίτητοι. Η χρήση των μεταλλικών PCM ενέχει έναν αριθμό ασυνήθιστων μηχανολογικών προβλημάτων. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταλλικών και των άλλων PCM είναι η υψηλή θερμική τους αγωγιμότητα.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτών των υλικών είναι ως ακολούθως: (α) η χαμηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα βάρους (β) η υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκο, (γ) η υψηλή θερμική αγωγιμότητα, (δ) η χαμηλή ειδική θερμότητα και (ε) η σχετικά χαμηλή πίεση ατμών.

3.3.3 Εύτηκτα μίγματα [14]

Ένα εύτηκτο μίγμα είναι ένας συνδυασμός ελάχιστης τήξης δύο ή περισσοτέρων συστατικών, καθένα από τα οποία τήκεται και ψύχεται ομοιόμορφα σχηματίζοντας ένα μίγμα των συστατικών κρυστάλλων κατά την κρυστάλλωση. Τα εύτηκτα μίγματα σχεδόν πάντα τήκονται και ψύχονται χωρίς διαχωρισμό φάσεων, δεδομένου ότι ψύχονται σε ένα ιδιαίτερο μείγμα κρυστάλλων, αφήνοντας ελάχιστη ευκαιρία στα συστατικά να διαχωριστούν.

Ένα εύτηκτο PCM είναι ένας συνδυασμός δύο ή περισσοτέρων συστατικών οργανικών, ανόργανων ή και τα δύο. Το κύριο πρόβλημα με αυτά τα συστατικά είναι το κόστος, στην πραγματικότητα περίπου δύο ή τρεις φορές μεγαλύτερο από τα οργανικά ή τα ανόργανα. Ένας σημαντικός αριθμός εύτηκτων μπορεί να προσαρμοστεί σε σχεδόν οποιοδήποτε επιθυμητό σημείο τήξης για θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Καθώς η χρήση αυτών των υλικών είναι πολύ καινούρια στις εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης, μόνο περιορισμένα δεδομένα είναι διαθέσιμα σχετικά με τις θερμο-φυσικές τους ιδιότητες. Συνεπώς, η σταθερότητα από τις θερμικές ιδιότητες των εύτηκτων μιγμάτων είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη απόδοση των συστημάτων θερμικής ενέργειας.

Τα *οργανικά εύτηκτα μίγματα* είναι μίγματα οργανικών ενώσεων και τα *ανόργανα εύτηκτα μίγματα* είναι μίγματα ανόργανων ενώσεων. Τα ανόργανα εύτηκτα μίγματα έχουν ως βάση το αλάτι και τα περισσότερα φτιάχνονται από ένυδρα άλατα.

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τη σύγκριση των σημείων τήξης, των λανθανουσών θερμοτήτων και των θερμικών κύκλων των οργανικών και ανόργανων εύτηκτων μιγμάτων αντιστοίχως. Από τους πίνακες, παρατηρείται ότι τα περισσότερα από τα οργανικά και ανόργανα εύτηκτα μίγματα που προτάθηκαν ως PCM δημιουργήθηκαν από λιπαρά οξέα και ένυδρα άλατα αντιστοίχως. Η θερμική σταθερότητα των περισσότερων εύτηκτων μιγμάτων επιβεβαιώθηκε σχεδόν στους 1000 ή λιγότερους θερμικούς κύκλους.

Table 6
Melting point and latent heat of thermal cycled organic eutectics.

Sr. no.	PCM	Melting point (°C)	Latent heat (J/g)	Thermal cycles
1.	Ammonium alum ($NH_4Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$)(15%)+ ammonium nitrate (NH_4NO_3)(85%)	53	170	1100
2.	Butyl stearate (49 wt%)+ Butyl palmitate (48 wt%)+other (3 wt%)	17	138	100
3.	Capric acid (65 mol%)+lauric acid (35 mol%)	13	116.76	120
		19.6	126.5	360
4.	Capric acid (73.5 wt%)+myristic acid (26.5 wt%)	21.4	152	5000
5.	Capric acid (83 wt%)+stearic acid (17 wt%)	24.68	178.64	5000
6.	Caprylic acid (70 wt%)+1-dodecanol (30 wt%)	6.52	171.06	120
7.	Lauric acid (66 wt%)+myristic acid (34 wt%)	34.2	166.8	1460
8.	Lauric acid (69 wt%)+palmitic acid (31 wt%)	35.2	166.3	1460
9.	Lauric acid (75.5 wt%)+stearic acid (24.5 wt%) +	37	182.7	360
10.	Lauric acid (77.05 wt%)+ palmitic acid (22.95 wt%)	33.09	150.6	100
11.	Methyl stearate (86 wt%)+methyl palmitate (14 wt%)	23.9	220	50
12.	Methyl stearate (91 wt%)+cetyl palmitate (9 wt%)	28.2	189	50
13.	Methyl stearate (91 wt%)+cetyl stearate (9 wt%)	22.2	180	50
14.	Myristic acid (58 wt%)+palmitic acid (42 wt%)	42.6	169.7	360
15.	Myristic acid (64 wt%)+stearic acid (36 wt%)	44.1	182.4	1460
16.	Myristic acid+glyserol	31.96	154.3	1000
17.	Palmitic acid (64.2 wt%)+stearic acid (35.8 wt%)	52.3	181.7	360
18.	Palmitic acid+glyserol	58.50	185.9	1000
19.	Stearic acid+glyserol	63.45	149.4	1000

Πίνακας 3.3.3.1: Οργανικά εύτηκτα μίγματα και οι ιδιότητές τους. [14]

Table 7
Melting point and latent heat of thermal cycled inorganic eutectics.

Sr. no.	PCM	Melting point (°C)	Latent heat (J/g)	Thermal cycles
1.	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ (80 mol%)+$CaBr_2 \cdot 6H_2O$ (20 mol%)	20	117	1000
2.	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ (93 wt%)+$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ (5 wt%)+$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (2 wt%)	24	125	1000
3.	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ (96 wt%)+KNO_3 (2 wt%)+ KBr (2 wt%)	23	138	1000
4.	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ (96 wt%)+NH_4NO_3 (2 wt%)+NH_4Br (2 wt%)	20	141	1000
5.	$NaCH_3COO \cdot 3H_2O$ (90 wt%)+$NaBr \cdot 2H_2O$ (10 wt%)	51	175	1000
6.	$NaCH_3COO \cdot 3H_2O$ (85 wt%)+$NaHCOO \cdot 3H_2O$ (15 wt%)	49	170	1000
7.	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (93 wt%)+$MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (7 wt%)	78	152.4	1000

Πίνακας 3.3.3.2: Ανόργανα εύτηκτα μίγματα και οι ιδιότητές τους. [14]

3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κατηγοριών [15]

Ενώ τα PCM παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα υπάρχει μια σειρά από προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των PCM που αναφέρθηκαν παραπάνω.

	Οργανικά	Ανόργανα	Εύτηκτα
Πλεονεκτήματα	• Χαμηλό κόστος (120Euro/kWh) • Μικρή ή και καθόλου εμφάνιση του φαινομένου	• Μέτριο κόστος (130Euro/kWh) • Υψηλή θερμική αγωγιμότητα (0.6W/m-K)	• Υψηλή τιμή θερμοχωρητικότητας • Ακριβές σημείο τήξης

	υπερψύξης • Μη διαβρωτικά με τα περισσότερα υλικά • Χημικά αδρανή και σταθερά • Όχι διαχωρισμό των φάσεων • Ανακυκλώσιμα • Διαθέσιμα σε μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος	• Υψηλή τιμή θερμοχωρητικότητας (180-300 MJ/m³) • Μη αναφλέξιμα • Μικρές αλλαγές του όγκου κατά την τήξη	
Μειονεκτήματα	• Εύφλεκτα • Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (0.2W/m-K) • Χαμηλή τιμή θερμοχωρητικότητας (90-200MJ/m³)	• Εμφάνιση του φαινομένου υπερψύξης • Διαχωρισμός των φάσεων • Διαβρωτικά, απαραίτητη η αποθήκευση των υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία • Αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση	• Περιορισμένη διαθεσιμότητα

Πίνακας 3.4.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφόρων κατηγοριών των PCM.

3.5 Προβλήματα κατά τη χρήση των PCM και τρόποι αντιμετώπισης

3.5.1 Διαχωρισμός των φάσεων [16]

Το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων είναι ένα από τα βασικότερα προβλήματα που εμφανίζονται στα PCM, ιδιαίτερα μάλιστα σε αυτά που αποτελούνται από παραπάνω από δύο συστατικά. Τα ένυδρα άλατα κυρίως, κατά την διάρκεια αλλαγής της φάσης τους περνάνε από στάδια ενυδάτωσης και αφυδάτωσης, και όχι από τις φάσεις της τήξης και της στερεοποίησης, κάτι που κάνει πιο περίπλοκη την συμπεριφορά τους κατά τη μετάβασή τους από τη μία φάση στην άλλη σε σχέση με τα ανοργανα PCM.

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, τα ένυδρα άλατα εμφανίζουν τρεις κύριους τύπους συμπεριφοράς κατά τη μετάβασή τους από τη μία φάση σε κάποια άλλη: τον ομοιόμορφο, τον ανομοιόμορφο και τον ημι-ομοιόμορφο (σχετικά ομοιόμορφο). Η ομοιόμορφη τήξη, που είναι και η πιο επιθυμητή, συμβαίνει όταν η σύσταση της στερεάς φάσης είναι ίδια με τη σύσταση της υγρής, η σχετικά ομοιόμορφη όταν το PCM έχει δύο ή περισσότερες ένυδρες μορφές με διαφορετικές συστάσεις στερεού μέρους και διαφορετικά σημεία τήξης και η ανομοιόμορφη τήξη όταν κατά την τήξη του PCM εμφανίζονται δύο ξεχωριστές φάσεις: ένα κορεσμένο διάλυμα και ένα ίζημα αδιάλυτης άνυδρης ουσίας.

Η μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα 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 ανύδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος. Αυτό συμβαίνει επειδή τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος στην ανομοιόμορφη τήξη, δημιουργώντας έτσι μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συχνή εξασθένιση των ιδιοτήτων τους. Επομένως, εξαιτίας 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).

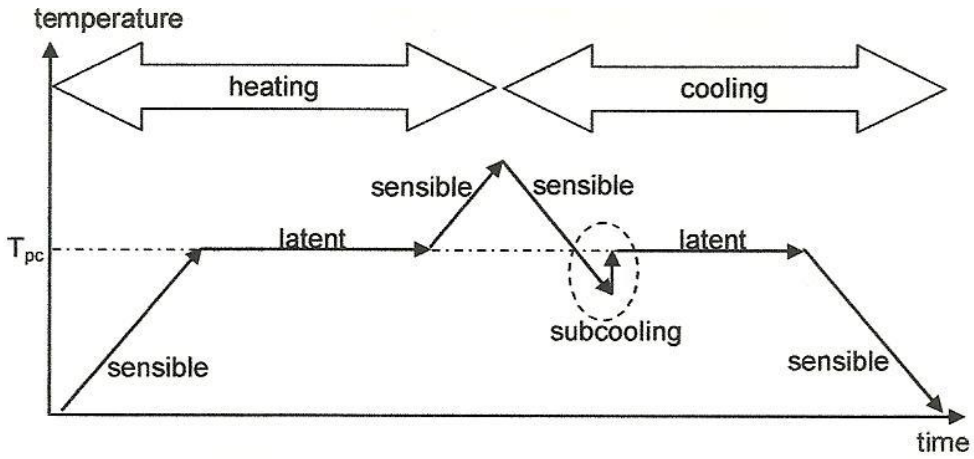
Το πρόβλημα με το διαχωρισμό των φάσεων είναι ότι μπορεί να μειώσει σημαντικά την πυκνότητα αποθήκευσης. Επειδή σε τοπικό επίπεδο η σωστή συγκέντρωση των μορίων για το σχηματισμό του PCM δεν είναι πια δεδομένη, το PCM δεν μπορεί να στερεοποιηθεί ολόκληρο και έτσι η λανθάνουσα θερμότητα της στερεοποίησης μπορεί να μην απελευθερώνεται πλήρως. Για την ανάκτησή της, η σωστή

συγκέντρωση των χημικών συστατικών απαιτείται σε όλο το σύνολο του δείγματος. Μόνο τότε, το PCM μπορεί να στερεοποιηθεί εντελώς.

Ένας τρόπος, λοιπόν, για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων διαχωρισμού των φάσεων μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση *κολλοειδών προσθετικών* (*gelling additives*), τα οποία δημιουργούν μια δομή γύρω από τις φάσεις των συστατικών του υλικού και δεν επιτρέπουν τη διέλευση φάσεων με διαφορετικές πυκνότητες διαμέσου της δομής τους. Ένας δεύτερος τρόπος για να μειωθεί το πρόβλημα του διαχωρισμού φάσης είναι με τη χρήση διαδικασιών διάχυσης για ομογενοποίηση. Η διάχυση όμως είναι αποτελεσματική μόνο σε μικρές κλίμακες και επιπλέον αυτή η προσέγγιση μπορεί να λειτουργήσει μόνο εάν το PCM χωρίζεται σε μικρές αποστάσεις.

3.5.2 Το φαινόμενο της υπόψυξης /υπέρψυξης [11]

Πολλά PCM, όπως π.χ. πολλά ένυδρα άλατα, δεν στερεοποιούνται αμέσως μετά την ψύξη τους κάτω από τη θερμοκρασία τήξης αλλά αρχίζουν να εμφανίζουν κρυσταλλική δομή σε θερμοκρασία πολύ χαμηλότερη από το σημείο τήξης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υπόψυξη (subcooling) / υπέρψυξη (supercooling).



Σχήμα 3.5.2.1: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της τήξης και στερεοποίησης ενός PCM με υπόψυξη [11]

Το υλικό βρίσκεται σε μια μετασταθή κατάσταση κατά τη διάρκεια της υπόψυξης. Είτε ένα υλικό παρουσιάζει υπόψυξη είτε όχι, κατά τη διάρκεια της παροχής θερμότητας στο PCM δεν υπάρχει διαφορά. Ενώ, κατά την εξαγωγή θερμότητας από το PCM αν εμφανίζεται το φαινόμενο της υπόψυξης η λανθάνουσα θερμότητα δεν απελευθερώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία πολύ πιο κάτω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης για να ξεκινήσει η κρυστάλλωση και να απελευθερωθεί η λανθάνουσα θερμότητα που είναι αποθηκευμένη στο υλικό. Εφόσον το υλικό δε διαμορφώσει κρυσταλλική δομή ή καλύτερα δε σχηματίσει καθόλου πυρήνες κρυστάλλων, η λανθάνουσα θερμότητα

δεν απελευθερώνεται καθόλου και το υλικό αποθηκεύει μόνο αισθητή θερμότητα. Το φαινόμενο της υπόψυξης/ υπέρψυξης αποτελεί ένα σοβαρό πρόβλημα σε τεχνικές εφαρμογές των PCM.

Το φαινόμενο της υπόψυξης μπορεί να αντιμετωπιστεί με την προσθήκη στο υλικό μέσου πυρήνωσης, το οποίο έχει κρυσταλλική δομή παρόμοια, αν όχι ίδια με αυτή του υλικού στο οποίο προστίθεται. Έτσι εξασφαλίζεται ότι η στερεή φάση θα σχηματισθεί με μηδαμινή ή καθόλου υπόψυξη. Η πυρήνωση χωρίζεται σε δύο περιπτώσεις:

- Ομογενής πυρήνωση, δηλαδή πυρήνωση αποκλειστικά και μόνο από το ίδιο το PCM. Η ομογενής πυρήνωση ξεκινάει από το ίδιο το PCM σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες ή περιλαμβάνει τη δυνατότητα προσθήκης σωματίδια του στερεού PCM στο ίδιο υποψυχόμενο PCM. Η τελευταία περίπτωση ονομάζεται και δευτερογενής πυρήνωση.

- Ετερογενής πυρήνωση, δηλαδή πυρήνωση όχι από το ίδιο το PCM. Η προέλευση της ετερογενούς πυρήνωσης μπορεί να είναι από ειδικά πρόσθετα που σκόπιμα προστίθεται στο PCM ή ακόμη και από ακαθαρσίες ή ρωγμές στα τοίχωματα δοχείων άλλων στερεών PCM.

3.5.3 <u>Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων των PCM σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση</u> [11]

Το σημαντικότερο κριτήριο για την αξιοποίηση των PCM σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών, χωρίς κανένα υποβιβασμό των ιδιοτήτων τους (εκφυλισμό), ο οποίος μετριέται καλύτερα σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού παρά σε πραγματικό χρόνο. Η ανεπάρκεια σταθερότητας των υλικών οφείλεται σε δύο λόγους: α) στην κακή σταθερότητα των ιδιοτήτων του υλικού ή των υλικών που αποτελούν το PCM και/ή β) στη διάβρωση μεταξύ του PCM και των υλικών του δοχείου που έρχεται σε επαφή.

Η ανάπτυξη των δοχείων των PCM πρέπει να κατευθύνεται προς την επίτευξη φυσικής και θερμικής σταθερότητας των PCM, καθώς αυτά πρέπει να μπορούν να υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους θέρμανσης και ψύξης. Οι περισσότερες μελέτες που ασχολούνται με τη διατήρηση των ιδιοτήτων των PCM κατά την περιοδική φόρτιση και αποφόρτισή τους ή τη διαβρωτική τους ικανότητα έχουν να κάνουν με τα ένυδρα άλατα. Τα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν διαβρωτικές τάσεις όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τα περισσότερο διαδεδομένα μέταλλα ενώ αντιθέτως οι παραφίνες και τα παράγωγα υλικά τους έχουν τέλεια σταθερότητα στις θερμικές τους ιδιότητες καθώς επίσης και καμία

επίδραση όταν έρχονται σε επαφή με τα περισσότερα μέταλλα αλλά και δομικά υλικά.

3.5.4. *Συσκευασία PCM*

Η τοποθέτηση των PCM σε κάψουλες έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών. Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, το PCM πρέπει να τοποθετείται σε κάψουλες αλλιώς η υγρή φάση κινδυνεύει θα διαρρεύσει έξω από το χώρο που χρησιμοποιείται.

Σε γενικές γραμμές, η συσκευασία των PCM θα πρέπει να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

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

Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη συσκευασίας: η ενσωμάτωση σε κάψουλες η οποία ανάλογα με το μέγεθος των καψουλών διακρίνεται σε μικροενσωμάτωση (microencapsulation) και μακροενσωμάτωση (macroencapsulation) καθώς και η μαζική αποθήκευση σε δεξαμενές ανταλλαγής θερμότητας. [16]

3.5.4.1 *Macroencapsulation* [11]

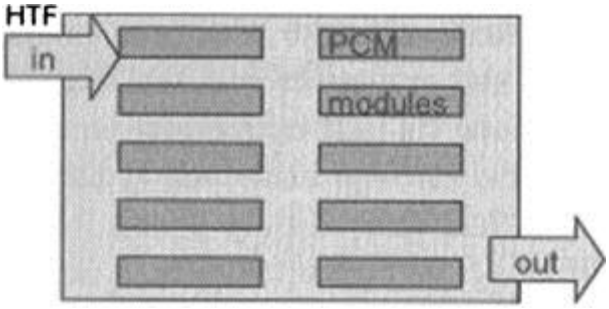
Η Μακροενσωμάτωση περιλαμβάνει την τοποθέτηση σε κάψουλες των PCM με κάποια μορφή της συσκευασίας, όπως είναι οι σωλήνες, οι θήκες, οι σφαίρες, οι πίνακες ή άλλα δοχεία συνήθως με διάμετρο μεγαλύτερη από 1 cm. Τα δοχεία αυτά μπορούν να χρησιμεύσουν απευθείας ως εναλλάκτες θερμότητας ή μπορούν να ενσωματωθούν σε οικοδομικά προϊόντα. Η μακροενσωμάτωση είναι πολύ συνηθισμένη, διότι τέτοια δοχεία ή σακούλες είναι ευρέως διαθέσιμα στην αγορά σε μεγάλη ποικιλία ήδη από άλλες εφαρμογές.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης αυτής της μεθόδου είναι η βελτίωση της συμβατότητας του υλικού με το περιβάλλον, η βελτίωση της διακίνησης του PCM κατά την παραγωγή του και η μείωση στις μεταβολές του όγκου. Το βασικότερο πλεονέκτημα της συσκευασίας σε μακροκάψουλες ωστόσο είναι ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα που χρησιμοποιούν ρευστό μεταφοράς θερμότητας τόσο

σε υγρή μορφή όσο και σε αέρια φάση. Υπάρχει επίσης ευελιξία στο σχεδιασμό του τύπου της μονάδας αποθήκευσης. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των συστημάτων είναι ότι:

- Η μέση πυκνότητα αποθήκευσης έχει υψηλό συντελεστή συσκευασίας (πάνω από 70%).
- Υψηλή ενέργεια στο αρχικό στάδιο.
- Μείωση της ενέργειας σε μεταγενέστερο στάδιο.

Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και η υψηλή ικανότητα ισχύος για φόρτιση και αποφόρτιση είναι επιθυμητές ιδιότητες των συστημάτων αποθήκευσης.



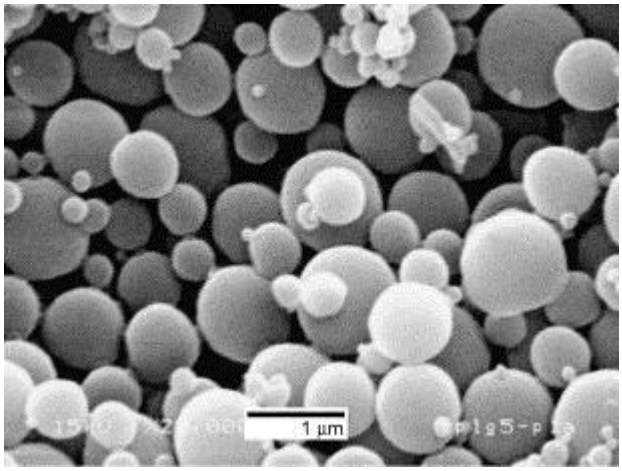
Σχήμα 3.5.4.1.1: Μακροενσωματωμένοι τύποι PCM (module type): η αρχή και η γενική λειτουργία [11]

3.5.4.2 *Microencapsulation* [17]

Η Μικροενσωμάτωση είναι η τοποθέτηση των μικροσκοπικών υλικών (είτε υγρών είτε στερεών) σε μορφή καψούλων που κυμαίνονται σε μέγεθος από λιγότερο από 1mm σε περισσότερο από 300mm. Το υλικό του τοιχώματος της κάψουλας μπορεί να διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας μια μεγάλη ποικιλία υλικών, συμπεριλαμβανομένων φυσικών και συνθετικών πολυμερών.

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα των μικροενσωματωμένων PCM, όπως η αύξηση της περιοχής όπου μεταφέρεται θερμότητα, άρα καλύτερη μετάδοση θερμότητας, η συγκράτηση της υγρής φάσης του PCM, ώστε να μην υπάρχει κάποιου είδους διαρροή προς το εξωτερικό περιβάλλον και ο έλεγχος των αλλαγών στον όγκο του υλικού αποθήκευσης καθώς συμβαίνει η αλλαγή φάσης. Ωστόσο ένα μειονέκτημα της χρήσης μικροκαψουλών είναι ότι η πιθανότητα για υπέρψυξη αυξάνεται. Επιπλέον, η πιθανή χρήση των μικροενσωματωμένων PCM σε διάφορες εφαρμογές θερμικού ελέγχου είναι περιορισμένη, λόγω του κόστους. Παρόλα αυτά, ο θερμικός έλεγχος στις διαστημικές εφαρμογές είναι πιο σημαντικός από το κόστος

και γι’ αυτό η ανάπτυξη αυτών των PCM αποτελεί ορόσημο για τη διαστημική τεχνολογία.



Σχήμα 3.5.4.2.1: *Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου από μικροκάψουλες με PCM* [18]

3.5.4.3 *Μαζική αποθήκευση* [16]

Τα συστήματα μαζικής αποθήκευσης αφορούν την ενσωμάτωση των PCM σε δεξαμενές ανταλλαγής θερμότητας που είναι παρόμοιες στο σχεδιασμό με τις υπάρχουσες δεξαμενές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της ενέργειας, αλλά με μερικές διαφορές. Το βασικό πρόβλημα των μαζικών συστημάτων PCM είναι η ανάγκη για μια πιο εκτενή μεταφορά θερμότητας από αυτή που υπάρχει σε δεξαμενές χωρίς PCM, επειδή η πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας των PCM είναι υψηλότερη σε σύγκριση με άλλα μέσα αποθήκευσης. Η περιοχή μεταφοράς θερμότητας είναι μικρότερη, αλλά εξακολουθεί να απαιτεί έναν υψηλό ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας ή κέρδους. Αυτός ο περιορισμός προσεγγίζεται επιτυχώς με την εισαγωγή πτερυγίων ή τη χρήση σωματιδίων υψηλής αγωγιμότητας, μεταλλικών κατασκευών, ινών στην πλευρά του PCM ή εναλλάκτες θερμότητας άμεσης επαφής.

3.5.5 Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα [11]

Ένα επιπλέον σημαντικό ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι ότι τα περισσότερα PCM έχουν πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Δεδομένου ότι τα PCM αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες θερμότητας σε μικρό όγκο και επειδή αυτή η θερμότητα πρέπει να μεταφερθεί μέσω της επιφάνειας αυτού του όγκου στο εξωτερικό περιβάλλον ώστε να χρησιμοποιηθεί από το σύστημα, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα αποτελεί πρόβλημα.

Συνεπώς διάφορες τεχνικές για τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας είναι απαραίτητες για κάθε εφαρμογή αποθήκευσης λανθάνουσα θερμότητας. Στην υγρή φάση, η χρήση συναγωγής μπορεί να ενισχύσει

σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας, στη στερεά φάση ωστόσο δεν υπάρχει καμία συναγωγή. Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η προσθήκη αντικειμένων με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Τέτοια αντικείμενα είναι τα μεταλλικά πληρωτικά υλικά, τα μεταλλικά πλέγματα, οι κατασκευές με μεταλλικές μήτρες και τα πτερύγια.

3.5.6 Διάβρωση [15]

Για τη σωστή λειτουργία ενός PCM απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί, αυτό να μην είναι διαβρωτικό, κυρίως απέναντι σε μεταλλικά υλικά. Παρόλα αυτά τα περισσότερα ανόργανα υλικά είναι διαβρωτικά σε αντίθεση με τις παραφίνες. Η διαβρωτικότητα ενός PCM, σε συνδυασμό με τις συνεχείς εναλλαγές θερμοκρασίας και φάσης είναι πιθανόν κάποια στιγμή και όχι ιδιαίτερα μακροπρόθεσμα να καταστρέψει τη συσκευασία του PCM και κατ' επέκταση το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. Σε πολλές θερμικές εφαρμογές με PCM ο γραφίτης χρησιμοποιείται για την βελτίωση του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας ταυτόχρονα όμως ενισχύει και το φαινόμενο της οξείδωσης όταν αυτό εμφανίζεται.

3.5.7 Συμβατότητα με άλλα υλικά [15]

Επιπρόσθετα, εξίσου μεγάλης σημασίας είναι και η συμβατότητα των υλικών αλλαγής φάσης με άλλα υλικά καθώς σε περίπτωση μη συμβατότητας είναι πιθανόν να δημιουργηθούν προβλήματα στη διάρκεια ζωής των δοχείων ή των καψουλών που περιέχουν το PCM.
Τα πιο κοινά προβλήματα που εμφανίζονται είναι τα εξής:

- Η μετακίνηση υγρών και αερίων μέσω πλαστικών, η οποία επηρεάζει την απόδοση του περιεχόμενου PCM με το περιβάλλον.

- Η διάβρωση των μετάλλων που έρχονται σε επαφή με ανόργανα PCM

- Η αποσταθεροποίηση των πλαστικών που έρχονται σε επαφή με οργανικά PCM .

Η επίλυση αυτού του προβλήματος καθιστά απαραίτητο τον έλεγχο συμβατότητας ο οποίος προέρχεται από πειράματα που διεξάγονται σε συνθήκες τυπικές της εκάστοτε εφαρμογής. Η τελική επιλογή των χρησιμοποιούμενων υλικών καθορίζεται από τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών.

3.6 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης

Η ανάλυση των προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας στις διαδικασίες τήξης και στερεοποίησης, που ονομάζεται πρόβλημα κινούμενων ορίων στην επιστημονική βιβλιογραφία, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη λόγω του γεγονότος ότι το στερεό-υγρό όριο κινείται εξαρτώμενο από την ταχύτητα με την οποία η λανθάνουσα θερμότητα απορροφάται ή χάνεται στο όριο, με αποτέλεσμα η θέση του ορίου να μην είναι γνωστή εκ των προτέρων και να αποτελεί μέρος της λύσης. [17]

Το πρόβλημα της πρόβλεψης της συμπεριφοράς των συστημάτων αλλαγής φάσης είναι δύσκολο λόγω της μη γραμμικής φύσης των μετακινούμενων διεπιφανειών, για τις οποίες το ποσοστό μετατόπισης ελέγχεται από την λανθάνουσα θερμότητα που χάνεται ή απορροφάται στο όριο. Η ακόλουθη γενική εξίσωση, γνωστή ως η συνθήκη του Stephan, περιγράφει την παραπάνω διαδικασία:

$$\lambda\rho\left(\frac{ds(t)}{dt}\right) = k_s\left(\frac{\delta T_s}{\delta t}\right) - k_l\left(\frac{\delta T_l}{\delta t}\right) \qquad (3.3)$$

όπου λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, ρ είναι η πυκνότητα (δεν διευκρινίζεται αν είναι στερεό ή υγρό), s(t) είναι η θέση της επιφάνειας, k είναι η θερμική αγωγιμότητα, t είναι ο χρόνος και T είναι η θερμοκρασία. Οι δείκτες s και l αναφέρονται σε φάσεις του στερεού και του υγρού αντίστοιχα. [19]

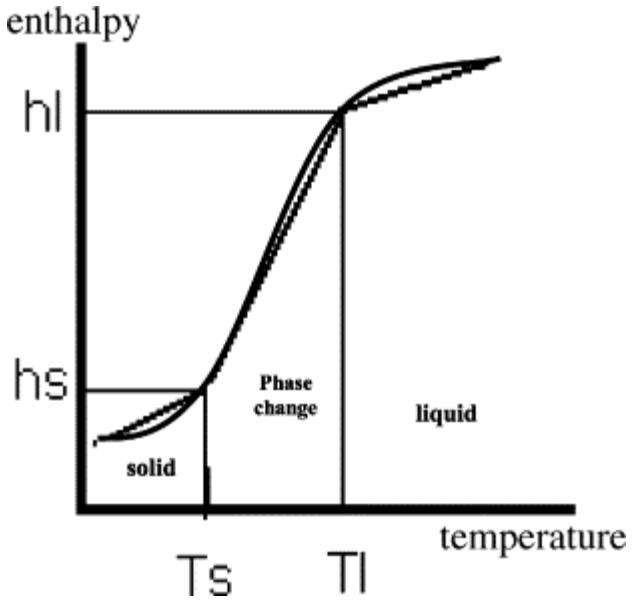
Στη υπάρχουσα κατάσταση η θέση και η ταχύτητα των ορίων δεν είναι εκ των προτέρων γνωστές και αφού οι δύο φάσεις εμφανίζουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, πρέπει να προσεχτούν πολύ οι μη-φυσικές ασυνέχειες οι οποίες μπορούν να προκύψουν.

Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι, ώστε να επιτύχουν μία λύση του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας που να είναι αρκετά ακριβής. Τα προβλήματα αλλαγής φάσης συνήθως επιλύονται με πεπερασμένες διαφορές ή πεπερασμένα στοιχεία σύμφωνα με την αριθμητική προσέγγιση. Το φαινόμενο αλλαγής φάσης πρέπει να μοντελοποιηθεί ξεχωριστά εξαιτίας της μή-γραμμικής φύσης του προβλήματος. Έχει αναπτυχθεί μία μεγάλη γκάμα αριθμητικών μεθόδων για την επίλυση των προβλημάτων με PCM. Η επίλυση των προβλημάτων αλλαγής φάσης χρησιμοποιώντας τις μεθόδους σταθερού τομέα (fixed-domain methods) αποτελεί μια προφανή εναλλακτική λύση. Η συνθήκη του Stefan στο πλαίσιο των μεθόδων σταθερού τομέα αντιμετωπίζεται από την αναδιατυπωμένη εξίσωση και ως εκ τούτου η θέση του κινούμενου ορίου είναι γνωστή όταν η λύση συγκλίνει.

Οι μέθοδοι σταθερού τομέα είναι απλές σε σύγκριση με άλλες. Είναι περισσότερο ευέλικτες, άνετες, προσαρμόσιμες και εύκολα προγραμματιζόμενες. Η εξέλιξη της λανθάνουσας θερμότητας αναπτύσσεται στην κύρια εξίσωση χρησιμοποιώντας είτε τη μέθοδο της ενθαλπίας, είτε την μέθοδο της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, είτε το μοντέλο μετασχηματισμού της θερμοκρασία, είτε τη μέθοδο της πηγής θερμότητας ή άλλες μεθόδους. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά κάποιες από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται ευρέως. [20]

3.6.1 *Μέθοδος ενθαλπίας*

Με τη μέθοδο της ενθαλπίας, το πρόβλημα της αλλαγής φάσης γίνεται πιο εύκολο αφού η κύρια εξίσωση είναι η ίδια και για τις δύο φάσεις, οι συνθήκες της διεπιφάνειας επιτυγχάνονται αυτόματα και δημιουργείται μία πολτώδης ζώνη (mushy region) ανάμεσα στις δύο φάσεις του στερεού και του υγρού, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Με αυτή τη ζώνη αποφεύγονται κάποιες απότομες ασυνέχειες, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν αριθμητικές αστάθειες. Συνεπώς, 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.



Σχήμα 3.6.1.1: Η ενθαλπία συναρτήσει της θερμοκρασίας [17]

Αυτή η μέθοδος έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε πολλά προβλήματα αλλαγής φάσης. Ο Hunter το 1989 και ο Amdjadi το 1990 επιβεβαίωσαν ότι η μέθοδος της ενθαλπίας είναι η καταλληλότερη για τυπικές εφαρμογές, υπό τον περιορισμό ότι δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο αριθμητικό μοντέλο στην διεπιφάνεια. [19]

3.6.2 *Μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας*

Η μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας είναι η πιο εύχρηστη μέθοδος, θεωρώντας ότι η θερμοχωρητικότητα του PCM κατά την αλλαγή φάσης δίδεται από μια συνάρτηση της θερμοκρασίας γνωστή ως συνάρτηση ενεργού θερμοχωρητικότητας. Η συνάρτηση της ενεργού θερμοχωρητικότητας του υλικού (c_{eff}) είναι ανάλογη της ενέργειας που αποθηκεύεται και απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης και της ειδικής θερμότητας. Ωστόσο, είναι αντιστρόφως ανάλογη του εύρους της τήξης ή του θερμοκρασιακού εύρους της στερεοποίησης.

Τα μόνα δεδομένα τα οποία χρειάζονται ώστε να δημιουργηθούν απλές συναρτήσεις του $Cp_{eff}(T)$ είναι η θερμότητα αλλαγής φάσης του PCM που συμβολίζεται ως H, οι θερμοκρασίες Ts και Tl στο τέλος των δύο περιοχών φάσεων του PCM και οι αντίστοιχες θερμοχωρητικότητες σε αυτά τα σημεία Cps και Cpl. Στο υπολογιστικό μέρος της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται η μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας, ενώ επιλέγεται η τριγωνική συνάρτηση (triangular function) και αναφέρονται όλες οι προκύπτουσες εξισώσεις οι οποίες εφαρμόζονται. [21]

3.7 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων PCM

Το κύριο χαρακτηριστικό των PCM είναι η σχέση ενθαλπίας-θερμοκρασίας που καθορίζει τη χωρητικότητα της αποθήκευσης θερμότητας. Η σχέση αυτή καθορίζεται πειραματικά χρησιμοποιώντας θερμιδομετρικές μεθόδους. Τα PCM είναι ιδιαίτερα δύσκολα δείγματα λόγω της εξαιρετικής θερμικής μάζας τους, αλλά και επειδή είναι συχνά ετερογενή υλικά ή επειδή εμφανίζουν αποτελέσματα εξαρτώμενα από τον όγκο. Ως εκ τούτου, η λήψη αντιπροσωπευτικών θερμιδομετρικών δεδομένων δεν είναι εγγυημένη με την εφαρμογή τυπικών μεθοδολογιών καθώς τα δεδομένα μέτρησης μπορούν εύκολα να παρερμηνευτούν. Μια βελτιωμένη μεθοδολογία για τη μέτρηση και την ερμηνεία των θερμιδομετρικών δεδομένων θα βοηθήσει στην αποφυγή παρεξηγήσεων μεταξύ των ερευνητών, των παραγωγών και των καταναλωτών PCM.

Οι μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων των PCM που αφορούν τη μέτρηση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης καθώς και της θερμοκρασίας τήξης των PCM είναι οι εξής [22]:

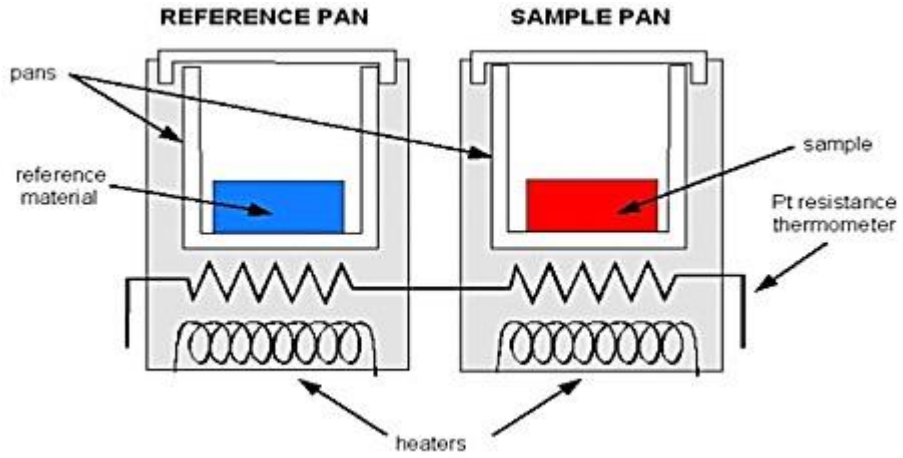
- Διαφορική Θερμική Ανάλυση (Differential Thermal Analysis – DTA)

- Διαφορική Θερμιδομετρία Σαρώσεως (Differential Scanning Calorimetry –DSC)

- Μέθοδος T-History

3.7.1 Διαφορική Θερμιδομετρία Σαρώσεως (DSC)

Η Διαφορική Θερμιδομετρία Σαρώσεως είναι μια μέθοδος μέτρησης της ενέργειας που απαιτείται για να διατηρηθεί μια σχεδόν μηδενική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ενός υλικού- δείγματος και ενός υλικού αναφοράς που υποβάλλονται σε ταυτόσημες αλλαγές θερμοκρασίας και θερμαίνονται ή ψύχονται με ελεγχόμενο ρυθμό. Το δείγμα PCM και το υλικό αναφοράς περικλείονται και συνδέονται με ένα μεταλλικό δίσκο που δρα ως μια διαδρομή θερμικής ροής χαμηλής αντίστασης. Η διαφορά στη θερμοχωρητικότητα μεταξύ του δείγματος PCM και του PCM αναφοράς προκαλεί μία ροή θερμότητας η οποία καταγράφεται και όταν αναλύεται σε σχέση με το PCM αναφοράς, δίνει τις θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM δείγματος. [22]



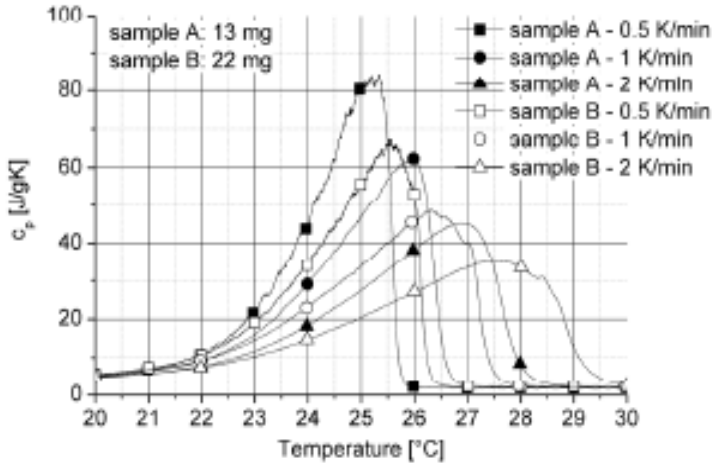
Σχήμα 3.7.1.1: Διάταξη μετρήσεως με θερμιδόμετρα διαφορικής σαρώσεως DSC [23]

Υπάρχουν δύο μοντέλα για τη μέθοδο αυτή: το μοντέλο σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης και το μοντέλο ισόθερμων βημάτων.

- Η *μέθοδος DSC σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης* δεν ενδείκνυται για τη μέτρηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας των PCM, γιατί κατά την αλλαγή φάσης, το δείγμα δεν βρίσκεται σε θερμική ισορροπία και παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές της θερμοκρασίας μέσα σε αυτό. Η απόκλιση που συνήθως παρατηρείται μεταξύ των αποτελεσμάτων εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος, από το ρυθμό θέρμανσης, από τη

θερμοχωρητικότητά του και από την θερμική του αγωγιμότητα. Οι θερμικές ιδιότητες του δείγματος συνήθως δεν είναι επακριβώς γνωστές. Ως εκ τούτου, η απόκλιση δεν μπορεί να εξαλειφθεί με μαθηματικό τρόπο. Πειραματικά, η απόκλιση μπορεί να μειωθεί με τη χρήση μικρότερων συντελεστών ή μέσων θέρμανσης και ψύξης.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν στο ίδιο υλικό, αλλά με διαφορετικές μάζες και ποσοστά θέρμανσης.

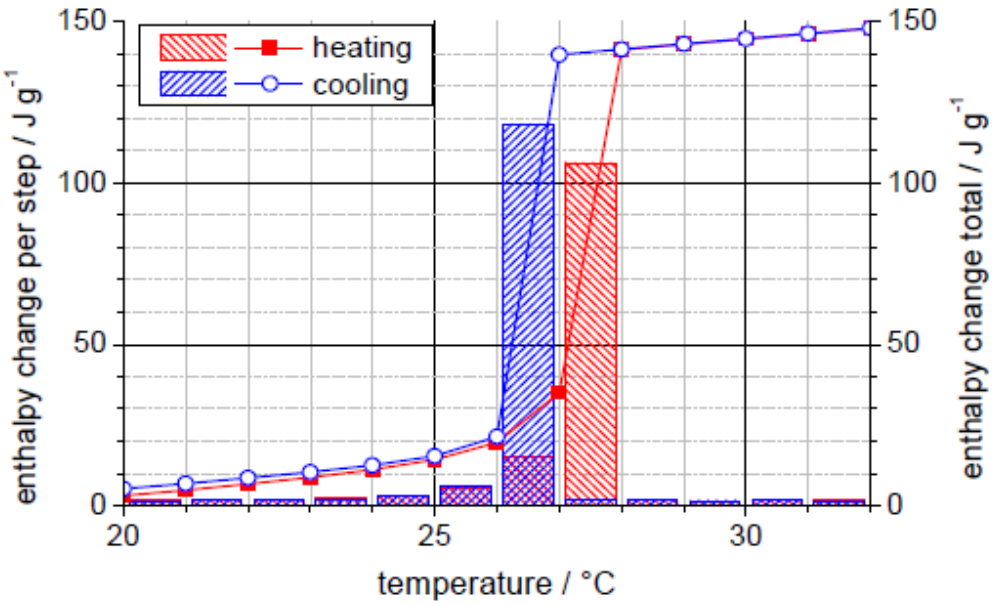


Σχήμα 3.7.1.2: Η επίδραση της μάζας του δείγματος και της μεταβλητής του ποσοστού θέρμανσης στις μετρήσεις της μεθόδου DSC σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης για τις καμπύλες Cp-T. [24]

Στο τέλος, η κορυφή της αλλαγής φάσης στις καμπύλες Cp-T μετατοπίζεται από τους 26°C (0,5 K/min, μικρή μάζα) μέχρι τους 30°C (2K/min, μεγάλη μάζα). Ωστόσο, μείωση της απόκλισης μπορεί να γίνει μόνο εις βάρος του σήματος/ποσοστού θορύβου. Αύξηση του θορύβου μπορεί σαφώς να παρατηρηθεί στις μετρήσεις μας. Ο καλύτερος δυνατός συνδυασμός της μάζας του δείγματος και του ποσοστού θέρμανσης εξαρτάται από το επιμέρους όργανο. Τυπικές τιμές για τα εμπορικά DSC είναι για τα ποσοστά θέρμανσης 0.5-1K/min και για τις μάζες των δειγμάτων 10-25mg. [24]

- Στη *μέθοδο των ισόθερμων βημάτων* το δείγμα θερμαίνεται σε βήματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το δείγμα ακολουθεί τα βήματα με κάποια χρονική υστέρηση και έτσι παράγεται το σήμα εξόδου. Όταν το δείγμα φτάσει σε θερμική ισορροπία, το σήμα μηδενίζεται και ακολουθεί το επόμενο ισόθερμο βήμα. Το εμβαδόν που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη του σήματος είναι ανάλογο της απορροφούμενης θερμότητος του δείγματος στο συγκεκριμένο ισόθερμο βήμα.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το αποτέλεσμα μιας μέτρησης DSC ενός PCM χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ισόθερμων βημάτων.



Σχήμα 3.7.1.3: το αποτέλεσμα μιας μέτρησης DSC χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ισόθερμων βημάτων [26]

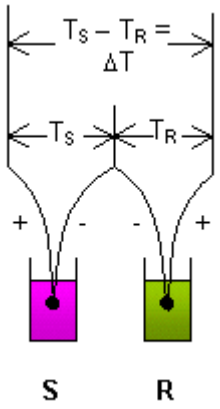
Από αυτό το γράφημα, η δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας του PCM μπορεί εύκολα να ερμηνευτεί. Το PCM εμφανίζει την αλλαγή φάσης του μέσα σε ένα στενό εύρος θερμοκρασίας περίπου στους 27°C τόσο για τη θέρμανση όσο και για την ψύξη. Οι ράβδοι δείχνουν τα 1K-βήματα της μέτρησης και κατά συνέπεια την ανάλυση θερμοκρασίας της καμπύλης της ενθαλπίας. Η συνολική μεταβολή ενθαλπίας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και της ψύξης μεταξύ των 20°C και των 30°C είναι σχεδόν ίδια, αποδεικνύοντας έτσι υψηλή ακρίβεια στην τιμή της ενθαλπίας.

Η μέθοδος αυτή είναι πιο χρονοβόρα και πιο περίπλοκη κατά την επεξεργασία της από την προηγούμενη μέθοδο. Απαιτεί δύσκολο προγραμματισμό και αξιολόγηση δεδομένων, δηλαδή εξειδικευμένο προσωπικό. Παρόλα αυτά, είναι προτιμότερη διότι προσφέρει την ίδια ακρίβεια για όλα τα υλικά-δείγματα χωρίς μακροχρόνιες δοκιμές και διαδικασίες προσαρμογής. [26]

3.7.2 Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA) [27]

Η Διαφορική Θερμική ανάλυση (DTA) είναι μια μέθοδος παρόμοια με τη Διαφορική Θερμιδομετρία Σαρώσεως (DSC). Στην DTA, το υλικό υπό μελέτη και ένα αδρανές υλικό-αναφορά, όπως π.χ. το Al_2O_3, υποβάλλονται σε παρόμοιους θερμικούς κύκλους ενώ παράλληλα γίνεται καταγραφή οποιασδήποτε διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ υλικού δείγματος και αναφοράς. Η διαφορά θερμοκρασίας στη συνέχεια παρίσταται γραφικά συναρτήσει του χρόνου ή της θερμοκρασίας. Αλλαγές στο δείγμα, είτε εξώθερμες είτε ενδόθερμες, μπορούν να ανιχνευτούν σε σχέση με το αδρανές υλικό αναφοράς. Έτσι, μια καμπύλη DTA παρέχει δεδομένα σχετικά με τους μετασχηματισμούς που έχουν συμβεί, όπως τις μεταβάσεις γυαλιού, την κρυστάλλωση, την τήξη και την εξάχνωση. Η περιοχή κάτω από την καμπύλη DTA είναι η ενθαλπία αλλαγής φάσης και δεν επηρεάζεται από τη θερμοχωρητικότητα του δείγματος.

Μια τυπική διάταξη αυτής της μεθόδου παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.7.2.1: Τυπική διάταξη DTA [28]

Οι παραπάνω δύο μέθοδοι θεωρούνται καλές σε γενικές γραμμές για τη μέτρηση της θερμότητας τήξεως. Τα μειονεκτήματα όμως των μεθόδων DSC και DTA είναι εμφανή καθώς το μέγεθος των δειγμάτων το οποίο είναι πολύ μικρό (μεταξύ 1-10mg) σε σύγκριση με το πραγματικό μέγεθος των χρησιμοποιηθέντων PCM, οπότε οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δειγμάτων είναι συχνά πολύ διαφορετικές από τα πραγματικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις πρακτικές εφαρμογές.

3.7.3 Μέθοδος T-History (temperature-history method) [24]

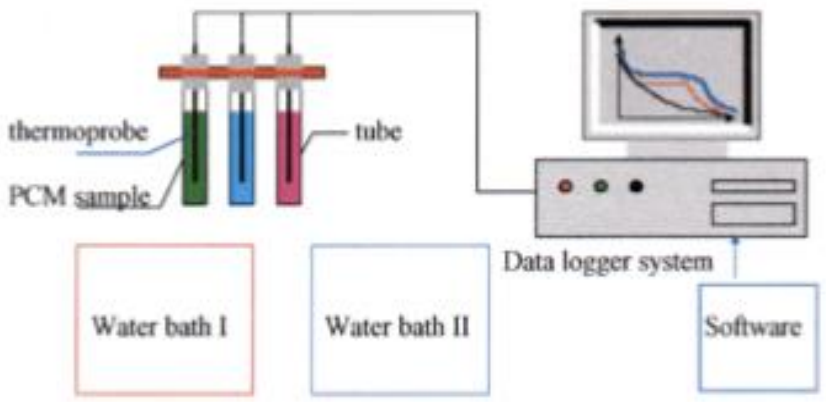
Εν όψει των μειονεκτημάτων των συμβατικών θερμιδομετρικών μεθόδων DSC και DTA συγκεκριμένα ο Zhang και άλλοι επιστήμονες

ανέπτυξαν μια βελτιωμένη μέθοδο μέτρησης PCM την μέθοδο T-history. Η μέθοδος αυτή ονομάστηκε έτσι από την καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου, η οποία είναι αποτέλεσμα των μετρήσεων που πραγματοποιούνται με τη μέθοδο αυτή.

Με τη μέθοδο T-history είναι δυνατόν να προσδιοριστούν θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM όπως η ειδική θερμότητα, το σημείο τήξεως, η θερμική αγωγιμότητα, και η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PCM και η υπόψυξη. Χαρακτηριστικά της μεθόδου T-history είναι τα εξής:

- τα διάφορα δείγματα PCM μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα
- η πραγματική διαδικασία αλλαγής φάσης είναι παρατηρήσιμη
- η διάταξη της μεθόδου είναι απλή

Μια σχηματική αναπαράσταση της διάταξης της μεθόδου T-history φαίνεται παρακάτω.

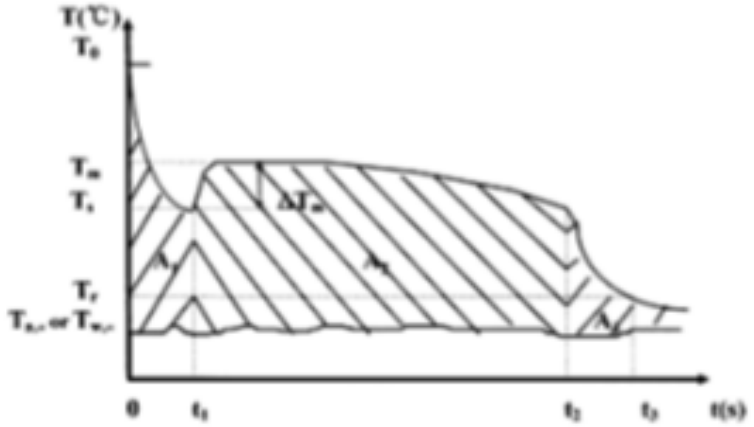


Σχήμα 3.7.3.1: Διάταξης της μεθόδου T-history [24]

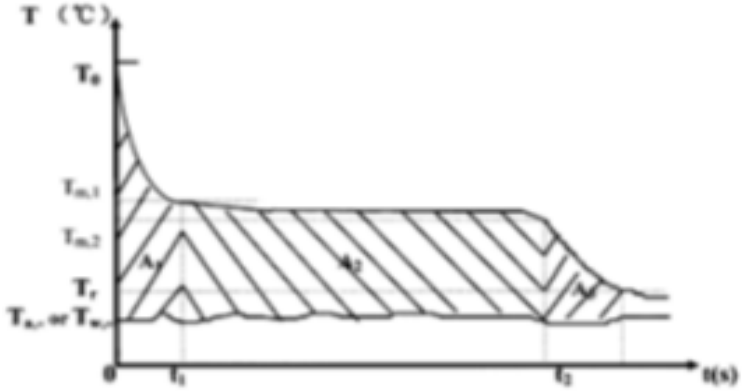
Συνήθως το δείγμα αναφοράς περιέχει νερό, αλλά κάθε είδους υλικό είναι δυνατό εφ 'όσον οι θερμοφυσικές του ιδιότητες είναι γνωστές. Όλα τα δείγματα είναι γεωμετρικά ταυτόσημα. Ο Zhang χρησιμοποίησε κυλινδρικούς σωλήνες γυαλιού με μήκος 180,6mm και διάμετρο 10,4mm. Ο λόγος L/D των δοκιμαστικών σωλήνων πληροί τον όρο Bi<0.1 που είναι απαραίτητος ώστε η γεωμετρία των σωλήνων να επιτρέπει η μεταφορά της θερμότητας να θεωρείται μονοδιάστατη και κάθε σωλήνας να θεωρείται ως ένα μονοδιάστατο σύστημα μπροστά στον αέρα του περιβάλλοντος. Ο αριθμός Biot ισούται με $Bi = \alpha R/2\lambda$ όπου R είναι η ακτίνα του δείγματος, λ η θερμική αγωγιμότητά του και α ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του σωλήνα και του περιβάλλοντος. Για μετρήσεις σε συγκεκριμένες θερμότητες και θερμότητες σύντηξης το ψυκτικό μέσο είναι ο αέρας δωματίου και το νερό χρησιμοποιείται ως δείγμα αναφοράς. Για μετρήσεις που αφορούν τη θερμική αγωγιμότητα το ψυκτικό μέσο είναι κρύο νερό, ενώ ο

υδράργυρος χρησιμοποιείται ως δείγμα αναφοράς, λόγω της υψηλής του θερμικής αγωγιμότητας.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, λιωμένα PCM δείγματα σε συνδυασμό με δείγματα αναφοράς τοποθετούνται σε ελεγχόμενο περιβάλλον, δηλαδή σε κρύο νερό ή κλιματιζόμενο αέρα με μια θερμοκρασία χαμηλότερη από ό, τι η θερμοκρασία τήξης των δειγμάτων PCM. Στη συνέχεια, τόσο το δείγμα όσο και οι σωλήνες αναφοράς ανταλλάσουν θερμότητα με το περιβάλλον παθητικά, ενώ ταυτόχρονα οι θερμοκρασίες τους μετριόνται. Από τις καμπύλες T-history οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δειγμάτων PCM μπορούν να υπολογιστούν όταν αυτές οι καμπύλες συγκρίνονται με τις καμπύλες T-history των γνωστών υλικών αναφοράς. Οι τυπικές καμπύλες ψύξης T-history που λαμβάνονται με αυτή τη μέθοδο φαίνονται στα παρακάτω σχήματα με και χωρίς υπόψυξη αντίστοιχα.



Σχήμα 3.7.3.2: Τυπική καμπύλη T-history ενός PCM με υπόψυξη [25]

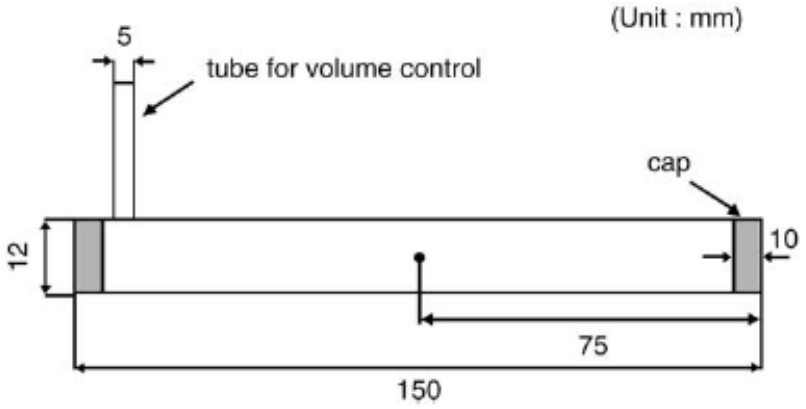


Σχήμα 3.7.3.3: Τυπική καμπύλη T-history ενός PCM χωρίς υπόψυξη [25]

Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος T-history έχει ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών θερμιδομετρικών μεθόδων, όπως η χρήση μεγαλύτερων δειγμάτων, τα χαμηλότερα ποσοστά ψύξης των δειγμάτων και η μικρότερη διάρκεια διεξαγωγής της μεθόδου, υπάρχουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα:

- η οριοθέτηση των κύκλων τήξης-πήξης βάση της υπέρψυξης
- ο μη συνυπολογισμός της αισθητής θερμότητας στην αλλαγή φάσης

Η λύση στο πρώτο έγκειται στην οριοθέτηση μέσω των σημείων καμπής της παραγώγου της θερμοκρασίας, ενώ στο δεύτερο στην εισαγωγή εξισώσεων κατά την ανάλυση για την αισθητή θερμότητα. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν έναν κάθετο σωλήνα ο οποίος έπρεπε να τοποθετηθεί οριζόντια, διότι όταν ο σωλήνας ήταν κάθετος το κάτω μέρος του πάγου έλιωνε πιο γρήγορα λόγω φυσικής συναγωγής. Έτσι ο σωλήνας τοποθετήθηκε οριζόντια αλλά χρειάστηκε επιπλέον σωλήνας ελέγχου του όγκου, κάθετος στον πρώτο όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7.3.4.



Σχήμα 3.7.3.4: Οριζόντιος σωλήνας με επιπλέον σωλήνα για τον έλεγχο του όγκου [24]

4. Εφαρμογές PCM σε κτιριακές εγκαταστάσεις

4.1 Ιστορική Αναδρομή Εφαρμογών

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

Ακολουθεί μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση των σημαντικότερων πρώιμων εφαρμογών των υλικών αλλαγής φάσης. [29]

4.1.1 Πρώτες προσπάθειες

4.1.1.1 *Δρ. Maria Telkes* [29]

Η πρώτη καταγεγραμμένη χρήση των PCM ως μια μορφή παθητικής θέρμανσης ήταν από την Δρ. Maria Telkes, την «Βασίλισσα του Ήλιου», το 1948. Η ουγγρικής καταγαγωγής Αμερικανίδα επιστήμονας είχε ασχοληθεί με τις δυνατότητες της ηλιακής θέρμανσης από το 1920. Το 1948 κατασκευάστηκε το πρώτο μεγάλης κλίμακας πείραμά της, στην περιοχή Dover Mass, στη Βοστώνη των ΗΠΑ. Η περιοχή επελέχθηκε από την Telkes για τα ετήσια επίπεδα ηλιοφάνειας, που για την περιοχή ήταν πάνω από τις μέσες τιμές, πράγμα που εξασφάλιζε τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του ηλιακού συστήματος.

Το σπίτι ήταν ενός ορόφου και είχε πέντε δωμάτια εκ των οποίων τα δύο υπνοδωμάτια, επιφάνειας 135m^2, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Η ηλιακή ακτινοβολία παρείχε θερμότητα μέσω 28 ηλιακών συλλεκτών. Η θερμότητα αυτή οδηγούταν μέσω ανεμιστήρων σε τρία δοχεία αποθήκευσης θερμότητας. Τα δοχεία χρησιμοποιούσαν σαν PCM το άλας του Glauber. Συνολικά περιλάμβαναν 21 τόνους PCM, συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας 11MJ και σημείου τήξεως 32°C.

Σχήμα 4.1.1.1: Το ηλιακό σπίτι στο Dover [29]

Με τα οικονομικά δεδομένα της εποχής ήταν μία ακριβή κατασκευή, κοστίζοντας 20000 δολάρια, από τα οποία τα 3000 δολάρια αναφέρονταν στο θερμαντικό σύστημα (συνολικό ποσοστό κόστους 15%). Τα πρώτα δύο έτη λειτουργίας το σύστημα θέρμανσης αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό ακόμα και σε περιόδους με επτά ημέρες συνεχόμενης συννεφιάς. Το σύστημα λειτούργησε με επιτυχία παρέχοντας ένα άνετο περιβάλλον γύρω στους 21°C, χωρίς να χρειαστεί οποιοδήποτε βοηθητικό σύστημα θέρμανσης. Τον τρίτο χρόνο όμως, το σύστημα άρχισε να εμφανίζει σοβαρά προβλήματα, καθώς το άλας του Glauber είχε διαχωριστεί σε διάλυμα και άνυδρο άλας (Na_2SO_4), χάνοντας έτσι την αποθηκευτική του ιδιότητα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι τα δοχεία αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται δραματικά οι απώλειες του συστήματος.
Δυστυχώς, αυτό σήμαινε ότι η συμβατική θέρμανση ήταν πλέον απαραίτητο να εγκατασταθεί.

4.1.1.2 *Lawrence Gardshire* [29]

Το 1953 ο Lawrence Gardshire κατασκεύασε ένα ηλιακό σπίτι με PCM στη περιοχή του New Mexico. Το κτίριο ήταν διώροφο και κάθε όροφος είχε επιφάνεια 102 m^2. Και ο Gardshire, όπως η Telkes χρησιμοποίησε «δοχεία» αποθήκευσης με PCM χωρητικότητας 1.9 m^3, μόνο που αντί να τα εγκαταστήσει ανάμεσα στα δωμάτια όπως η Telkes, τα εγκατέστησε στη στέγη δίπλα στους ηλιακούς συλλέκτες. Η καινοτομία ήταν ότι πρόσθεσε διφθορικό νάτριο στο άλας του Glauber σαν πηκτικό

παράγοντα, ώστε να βοηθά στην στερεοποίηση του άλατος και να αποφύγει όσο το δυνατόν περισσότερο ο διαχωρισμός. Δυστυχώς και αυτή η κατασκευή αντιμετώπισε τα ίδια προβλήματα με την κατασκευή της Telkes, πιο καθυστερημένα βέβαια, λόγω αύξησης του χρόνου ζωής του PCM χάρην της προσθήκης του πηκτικού παράγοντα.

4.1.1.3 *Δρ J. W. Hodgins και Δρ T. W. Hoffman* [29]

Ένα μεταγενέστερο σχέδιο εκπονήθηκε από τους Δρ J. W. Hodgins και Δρ T. W. Hoffman στη Βασιλική Στρατιωτική Ακαδημία του Καναδά, για την κατασκευή ενός ακινήτου, χρησιμοποιώντας αποθήκευση θερμότητας με τη χρήση PCM. Η Δρ Maria Telkes ανέλαβε να σχεδιάσει τα δοχεία θερμικής αποθήκευσης με PCM λόγω της προηγούμενης εμπειρίας της. Το σπίτι ολοκληρώθηκε το 1959, το οποίο περιλαμβάνει 111m^2 επιφάνεια δαπέδου κατανεμημένη σε δύο ορόφους ενσωματώνοντας 12 τόνους πυρηνοποιημένου άλατος Glauber, στους οποίους περιέχεται πυριτικό νάτριο ως παράγοντας πύκνωσης, και Chromate ως ανασχετικό διάβρωσης. Παρόμοια με το προηγούμενο σχέδιο το PCM περιέχεται σε κυλινδρικά δοχεία χάλυβα διαμέτρου 100mm και ύψους 600mm, κατακόρυφης κατασκευής.

4.1.2 Ερευνητική δραστηριότητα [30]

Η αναγνώριση της ανάγκης για ένα δομημένο πρόγραμμα έρευνας από το πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνια στο τομέα της θερμικής αποθήκευσης με αλλαγή φάσης προκειμένου να ξεπεραστούν πολλά προβλήματα, που προέκυπταν παλαιότερα, οδήγησε το 1971 στην ανάπτυξη του πρώτου ερευνητικού προγράμματος, που εκτελέστηκε από μια ομάδα με τρεις κορυφαίους επιστήμονες στον τομέα λανθάνουσας θερμότητας με χρηματοδότηση από το National Science Foundation των ΗΠΑ. Ο στόχος της έρευνας ήταν να ανακαλυφθεί ένας αριθμός οργανικών και ανόργανων PCM κατάλληλων για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, σε συνδυασμό με μια λεπτομερή ανάλυση του κόστους των PCM και της αποθηκευτικής τους ικανότητας.

Η μελέτη βασίστηκε στις ακόλουθες ομάδες PCM: τα ένυδρα άλατα, τα οργανικά PCM, τα ανόργανα PCM, τα εύτηκτα μίγματα (οργανικά και ανόργανα). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το $K_2HPO_4.6H_2O$ (ανόργανο PCM) και ορισμένα μίγματα παραφίνης (οργανικά PCM) είναι κατάλληλα για εφαρμογές κλιματισμού, ενώ για θέρμανση χώρου τα πιο ελπιδοφόρα PCM είναι τα: $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ και $Ca(NO_3)_2.4H_2O$.

Το έτος 1973 ήταν ένα σημαντικό ορόσημο για την ανάπτυξη της τεχνολογίας λανθάνουσας θερμότητας με PCM και της έρευνας εξαιτίας του Αραβο-ισραηλινού πολέμου και του επακόλουθου αραβικού

πετρελαϊκού εμπάργκο, που κατέστησε πολύ σαφές ότι η μελλοντική παροχή καυσίμου μπορεί εύκολα να διαταραχθεί λόγω πολιτικών γεγονότων και εξάντλησης μιας σημαντικής πηγής καυσίμου. Αυτό ώθησε πολλές κυβερνητικές οργανώσεις στην έρευνα εναλλακτικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με έμφαση στον τομέα της ηλιακής ενέργειας, στην ανάκτηση απωλειών θερμότητας και στην αποθήκευση θερμότητας.

Από το 1973 και μετά ξεκινά η κυβερνητική χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων πάνω στα PCM σε χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, οι ΗΠΑ, η Γερμανία και η Γαλλία, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, που σε μεγάλο βαθμό επικεντρώθηκαν στην ηλιακή ενέργεια, λόγω της έλλειψης προόδου στον τομέα ως σύνολο.

4.1.2.1 *ΗΠΑ*

Ως αποτέλεσμα της ανάγκης για έρευνα, που μεγάλωσε στα συστήματα θερμικής αποθήκευσης, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής πρωτοστάτησαν στο πρώτο μεγάλης κλίμακας ερευνητικό πρόγραμμα που χρηματοδοτήθηκε από το National Science Federation. Η Dow Chemical, επιστημονική ομάδα που ηγείτο στον τομέα των PCM εκείνη την περίοδο, βραβεύτηκε για την εκτέλεση έρευνας που αποτελούταν από περίπου 20.000 δοκιμές πιθανών PCM. Εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους του ερευνητικού έργου επιπλέον σύμβουλοι και επιστήμονες από τον Καναδά συμμετείχαν στη διαδικασία. Η έρευνα χρησιμοποίησε την προηγούμενη εξέλιξη του Πανεπιστημίου της Πενσυλβάνια για να δημιουργήσει μια βάση δεδομένων όλων των προηγούμενων πηγών λανθάνουσας θερμότητας PCM. Από τα 20.000 PCM που δοκιμάστηκαν, μόνο το 1% επιλέχθηκε για περαιτέρω έρευνα, και θεωρήθηκε εν δυνάμει υποψήφιο. Τα υλικά που επιλέχθηκαν ήταν μια σειρά ένυδρων αλάτων ομοιόμορφης τήξης και κοινά οργανικά υλικά.

Κατά τη διάρκεια των ερευνητικών δραστηριοτήτων της Dow Chemical, η Δρ Maria Telkes στο πανεπιστήμιο του Delaware συνέχισε την έρευνα για τους τρόπους βελτίωσης της μακροβιότητας του άλατος Glauber. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση διαφόρων πηκτικών μέσων για την πάχυνση του άλατος Glauber αύξησαν δραματικά τη διάρκεια ζωής των υλικών αν και η μείωση της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας εξακολουθούσε να υπάρχει ακόμα και μετά από περίπου 1000 κύκλους ψύξης-απόψυξης. Περαιτέρω έρευνα πραγματοποιήθηκε από τον Δρ S.B. Marks από το Πανεπιστήμιο του Delaware που προσπάθησε την ανάμειξη του άλατος Glauber με ένα είδος πηλού προκειμένου να ενεργήσει ως πηκτικό μέσο. Αυτό τελικά οδήγησε σε αυξημένους κύκλους αποθήκευσης θερμότητας αλλά με μείωση της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Ο Δρ S.B Marks συνέχισε την έρευνά του χρησιμοποιώντας μια σειρά από άλλες μορφές πηκτικών

μέσων όπως το πολυμερές πολυκαρβοξυλικού οξέος που αύξησε την μακροβιότητα της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας.

Ο Δρ P.G. Rueffel, ενδιαφέρθηκε επίσης για τη χρήση του άλατος Glauber ως PCM και πραγματοποίησε μια σειρά δοκιμών χρησιμοποιώντας μια μήτρα τύρφης προκειμένου να απορροφήσει το PCM. Τα αποτελέσματα βρήκαν ότι η τύρφη σχηματίζοντας ένα ινώδες δίκτυο, που απορροφά το PCM, δημιουργεί ένα ιδανικό πηκτικό μέσο με αποτέλεσμα τη μακροβιότητα της θερμικής αποθήκευσης. Περαιτέρω ανάλυση των φτηνών ένυδρων αλάτων συνεχίστηκε από το Πανεπιστήμιο του Delaware στις ΗΠΑ όπου ένα πειραματικό σπίτι πλήρους μεγέθους κατασκευάστηκε, και στο οποίο το 1976 η ερευνητική ομάδα Dow Chemical με πρόσθετη χρηματοδότηση συνέχισε την έρευνα.

Κατά τη διάρκεια της αρχικής μελέτης της Dow Chemical για τον προσδιορισμό πιθανών PCM, το κερί παραφίνης που είναι μια οργανική ουσία, σχετικά φθηνή και ευρέως διαθέσιμη βρέθηκε να είναι ένα πιθανό υλικό αποθήκευσης για την οικοδομική βιομηχανία. Ο Δρ John Bailey και οι λοιποί συνεργάτες αποφάσισαν να ερευνήσουν αυτήν την περιοχή περαιτέρω επικεντρώνοντας σε θερμοσυσσωρευτές αλουμινίου κυψελωτού πλέγματος με ενσωματωμένη παραφίνη (n-eicosane), που είχε σημείο τήξης 36ºC. Το 1974, περαιτέρω μελέτες πραγματοποιήθηκαν από Δρ T. R. Galloway. Οι μελέτες βασίστηκαν στη χρησιμοποίηση κεριού παραφίνης PCM σε τρεις διαφορετικές εφαρμογές θέρμανσης: σε δεξαμενή PCM με πλαστικό πηνίο ανταλλαγής θερμότητας, σε δοχεία από χάλυβα γεμάτα με PCM που περιβάλλονταν από νερό μέσα σε μια δεξαμενή και σε μεγάλους δίσκους με κερί ενσωματωμένο σε κάψουλες που περιβάλλονταν από νερό σε μια δεξαμενή. Τα ερευνητικά ιδρύματα των ΗΠΑ έχουν κυρίως επικεντρωθεί σε οργανικά PCM με την έρευνα σε μη οργανικά PCM να είναι πιο διαδεδομένη στο εσωτερικό της Ευρώπης.

4.1.2.2 *Ευρώπη*

Οι επιστήμονες στη **Γερμανία** ερευνώντας τη τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης με PCM παρείχαν λεπτομερείς χάρτες και πίνακες των PCM με φυσικές και θερμικές ιδιότητες, υλικών για κατασκευές και ιδιοτήτων μόνωσης. Τα κύρια υλικά που μελετήθηκαν ήταν ένυδρα άλατα, παραφίνες και κάποια εύτηκτα μίγματα για εφαρμογές κάτω των 100ºC. Ερευνητικές ομάδες στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης έχουν πραγματοποιήσει σημαντικές έρευνες διαφόρων οργανικών και υποψηφίων ένυδρων αλάτων σε δοχεία σωλήνων με πτερύγια, που περιέχουν εναλλάκτες θερμότητας σε συνδυασμό με σωλήνες θερμότητας. Μια ιδιωτική εταιρεία στη Δυτική Γερμανία διεξήγαγε έρευνα για να εξετάσει τις διαφορετικές επιδόσεις διαφόρων PCM στο

BBC Solar House, που θερμαίνεται με μια αντλία θερμότητας χρησιμοποιώντας νερό αρχικά ως μέσο αποθήκευσης. Οι ερευνητές αποφάσισαν να αλλάξουν το μέσο αποθήκευσης στη συνέχεια με πάγο και μετά με παραφίνη (σημείο τήξεως 18 έως 25ºC) απ' όπου προέκυψε ότι η παραφίνη παρείχε τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και επίσης αύξησε το COP της αντλίας θερμότητας από 2,6 σε 3,3 καθώς χρειαζόταν το μισό του απαιτούμενου όγκου του νερού παρέχοντας έτσι και μεγαλύτερη οικονομική αποδοτικότητα.

Ακόμα στη **Σουηδία** παρατηρείται σημαντική πρόοδος της τεχνολογίας αποθήκευσης με PCM, που λαμβάνει χώρα στην Energitenik Studsvik AB με επικεφαλή τον Prof. H. Hedman. Η έρευνα επικεντρώνεται γύρω από την εφαρμογή των ένυδρων αλάτων, χρησιμοποιώντας αέρα ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας. Τα συστήματα ενσωματωμένων PCM σε μεταλλικές κάψουλες αποδείχθηκαν πιο αποτελεσματικά από τις δεξαμενές νερού και χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα για παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης σε εγχώρια σπίτια στη Δανία. Ένα κοινό έργο κατασκευής τριών διαφορετικών συστημάτων θέρμανσης, που περιλαμβάνει τρεις μεγάλες μορφές σουηδικής κατασκευής, πραγματοποιήθηκε για την διερεύνηση της δυνατότητας ενσωμάτωσης PCM εντός των υπηρεσιών του κτιρίου. Το πρώτο με ένα τυπικό περιφερειακό σύστημα θέρμανσης ζεστού νερού, το δεύτερο χρησιμοποιώντας εξαναγκασμένη θέρμανση ζεστού αέρα και εκτός αιχμής ισχύ άλλαξε για να αποθηκεύσει ένα ενσωματωμένο PCM σε κάψουλες σε σφραγισμένους γραμμικούς σωλήνες πολυαιθυλενίου. Και το τρίτο, ένα παρόμοιο σύστημα με το δεύτερο, αλλά με ηλιακούς συλλέκτες ψύξης αέρα ως κύρια πηγή θερμότητας.

Για πολλά χρόνια, η **Γαλλία** επίσης έχει δείξει ενδιαφέρον σχετικά με τις θερμικές προοπτικές των PCM και μέσω της έρευνας στο CNRS, στη Νίκαια, έχει κατασκευάσει πολλά κτίρια, που χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη τεχνολογία. Το CNRS αναπτύσσει επίσης έρευνα σχετικά με το κερί παραφίνης ως PCM, μέσω δοκιμών συστημάτων, που ενσωματώνουν μείγματα μετάλλων για να αυξήσουν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας.

Πέρα από τη Γαλλία και το **Ηνωμένο Βασίλειο** με το βρετανικό Κέντρο Ερευνών, Garston, Watford έχει εδώ και πολλά χρόνια πραγματοποιήσει έρευνα για το θέμα της τεχνολογίας θερμικής αποθήκευσης με PCM. Οι A. Bromley, E. McKay και J. Wilkins αποτελούν την ομάδα μελέτης της θερμικής αποθήκευσης και έχουν διεξάγει έρευνα σε εφαρμογές θέρμανσης με αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας και ιδιαίτερα με αποθήκευση σε πάγο. Μια μικρή ομάδα επιστημόνων τώρα στο Πανεπιστήμιο του Salford, πραγματοποίησε έρευνα για το ενυδατωμένο φωσφορικό νάτριο και το εξαένυδρο χλωριούχο ασβέστιο και μαζί με το Πανεπιστήμιο του Cardiff, στην

Ουαλία, ανέπτυξε την τεχνολογία PCM με παραφίνη ως μέσο αποθήκευσης.

4.1.2.3 *Ιαπωνία*

Η Ιαπωνία κατέχει σημαντικό ρόλο στην τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης με PCM έχοντας ερευνητικές ομάδες μελέτης για πολλά χρόνια με ισχυρή κυβερνητική υποστήριξη. Τα υλικά που κρίθηκαν ως τα πλέον επιτυχημένα κατά τη διάρκεια έρευνας από τις Mitsubishi Electronic Corp. και Tokyo Electric Power Co. ήταν τα ένυδρα νιτρικά άλατα, φωσφορικά άλατα, φθοριούχα άλατα και χλωριούχο ασβέστιο. Η έρευνα μέχρι τη δεκαετία του 1970 επικεντρωνόταν στα συστήματα θέρμανσης με αποθήκευση θερμότητας με PCM αν και πιο πρόσφατες εξελίξεις έχουν συγκεντρωθεί και σε εφαρμογές ψύξης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, αρκετές νέες οργανώσεις, συμπεριλαμβανομένων των Nippon Pillar Packing Co., κατασκεύασαν ένα εξαένυδρο βρωμιούχο ασβέστιο ως PCM μαζί με παράγοντες σχηματισμού πυρήνων. Άλλες όπως οι Kureha Chemical Industry Inventors χρησιμοποίησαν την έρευνα του άλατος Glauber ως PCM για θέρμανση και ψύξη, χρησιμοποιώντας γύψο και άλλα ελαφρού βάρους αδρανή υλικά για τη σταθεροποίηση του PCM. Σημαντική έρευνα και ανάπτυξη πραγματοποιήθηκε σε μια σειρά από εύτηκτα νιτρικά άλατα για εφαρμογές σε θερμοκρασία δωματίου.

4.2 Εφαρμογές των PCM στα κτίρια

Η εφαρμογή των PCM σε κτίρια μπορεί να έχει δύο διαφορετικούς στόχους. Πρώτον τη χρήση της φυσικής θερμότητας, που είναι η ηλιακή ενέργεια για τη θέρμανση ή το κρύο της νύχτας για τη ψύξη. Δεύτερον τη χρήση ανθρωπογενών πηγών θέρμανσης ή ψύξης. Σε κάθε περίπτωση η αποθήκευση θερμότητας είναι αναγκαία προκειμένου να ταυτίζονται η διαθεσιμότητα και η ζήτηση ως προς το χρόνο καθώς και ως προς την ισχύ. Βασικά, τρεις είναι οι τρόποι χρήσης των PCM για τη θέρμανση και τη ψύξη των κτιρίων:

- PCM σε τοίχους κτιρίων
- PCM σε δομικά στοιχεία εκτός από τοίχους και
- PCM σε μονάδες αποθήκευσης θέρμανσης και ψύξης.

Τα δύο πρώτα είναι παθητικά συστήματα, όπου η αποθηκευμένη ζέστη ή το κρύο αυτόματα απελευθερώνεται όταν η εσωτερική ή εξωτερική θερμοκρασία αυξάνεται ή μειώνεται πέρα από το σημείο τήξης. Το τρίτο είναι ενεργητικό σύστημα, όπου η αποθηκευμένη ζέστη ή κρύο είναι σε

δοχείο θερμικά διαχωρισμένο από το κτίριο με μόνωση. Ως εκ τούτου, η ζέστη ή το κρύο χρησιμοποιείται μόνο κατόπιν ζήτησης και όχι αυτόματα. Ανάλογα με το πού και το πώς το PCM είναι ενσωματωμένο, υπάρχουν πολλά PCM με διαφορετικά σημεία τήξεως που εφαρμόζονται. Επί του παρόντος, υπάρχει μια έλλειψη εμπορικών PCM στην κατώτερη περιοχή θερμοκρασιών που είναι μεταξύ των 5 με 25°C. Ειδικά μεταξύ των 15 με 20°C τα διαθέσιμα προϊόντα παρουσιάζουν πολύ χαμηλές ενθαλπίες. Τα πιο σημαντικά PCM είναι στην κλίμακα των 22 με 25°C, καθώς σχεδόν όλοι συμφωνούν ότι αυτή είναι η περιοχή για την παθητική θέρμανσης και ψύξη κτιρίων.

Διάφορες πιθανές εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας (LHTES) που μελετήθηκαν για τη θέρμανση και τη ψύξη χώρων παρουσιάζονται στη συνέχεια. [7]

4.2.1 Συστήματα παθητικής αποθήκευσης

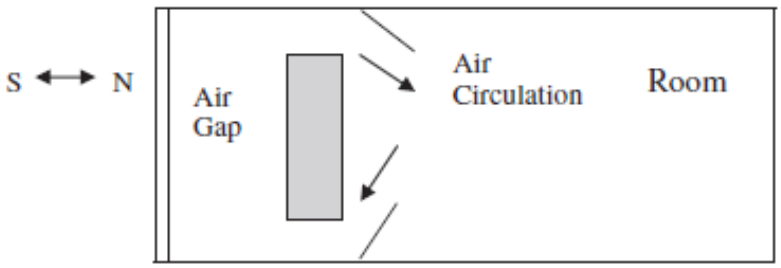
4.2.1.1 Τοίχος Trombe με PCM [31]

Ο τοίχος Trombe είναι ένα πρωταρχικό παράδειγμα μιας προσέγγισης έμμεσου κέρδους. Αποτελείται από ένα λεπτό τοίχο στη νότια πλευρά του σπιτιού. Ένα μονό ή διπλό στρώμα γυαλιού ή πλαστικό τζάμι είναι τοποθετημένο περίπου 4 ίντσες μπροστά από την επιφάνεια του τοίχου. Η ηλιακή θερμότητα συλλέγεται στο χώρο μεταξύ του τοίχου και του τζαμιού.

Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου είναι μαύρου χρώματος και απορροφά τη θερμότητα, η οποία στη συνέχεια αποθηκεύεται στη μάζα του τοίχου. Η θερμότητα διαχέεται από τον τοίχο Trombe στο σπίτι, κατά τη διάρκεια αρκετών ωρών. Τότε η εσωτερική θερμοκρασία πέφτει κάτω από αυτή της επιφάνειας του τοίχου και η θερμότητα ξεκινά να διασκορπίζεται στο δωμάτιο. Οι απώλειες θερμότητας από τον τοίχο Trombe μπορούν να ελεγχθούν από μια κουρτίνα με μόνωση, η οποία είναι κλειστή τη νύχτα στο χώρο μεταξύ του τζαμιού και του τοίχου. Παραδοσιακά οι τοίχοι Trombe βασίζονται στην αισθητή αποθήκευση θερμότητας αλλά λόγω του δυναμικού για μεγαλύτερη αποθήκευση θερμότητας ανά μονάδα μάζας, ο τοίχος Trombe με PCM είναι μια ελκυστική ιδέα. Επιπλέον, στους τοίχους Trombe, χρησιμοποιούνται PCM όπως τα ένυδρα άλατα και οι υδρογονάνθρακες.

Η Telkes πρότεινε την τοποθέτηση PCM σε τοίχους, μεσότοιχους, ταβάνια και πατώματα, για να εξυπηρετήσουν σαν ρυθμιστές θερμοκρασίας. Τα PCM χρησιμοποιήθηκαν για να αντικαταστήσουν τη λιθοποιία σε ένα τοίχο Trombe. Ο Askew χρησιμοποίησε ένα πίνακα συλλεκτών φτιαγμένο από μια λεπτή πλάκα κεριού παραφίνης, το

τοποθέτησε πίσω από το διπλό τζάμι του κτιρίου και βρήκε ότι η θερμική αποδοτικότητα είναι ανάλογη με τους τυπικούς επίπεδους συλλέκτες. Οι Farouk και Guceri μελέτησαν τη χρησιμότητα του εγκατεστημένου τοίχου PCM σε ένα κτίριο για νυχτερινή οικιακή θέρμανση, χρησιμοποιώντας ένα μίγμα από το άλας του Glauber και κερί SUNOCO P-116. Παρατηρήθηκε ότι εάν ο τοίχος PCM ήταν κατάλληλα σχεδιασμένος, περιόριζε μερικά από τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά του κανονικού τοίχου με συγκρίσιμα αποτελέσματα. Σχηματικό διάγραμμα του τοίχου Trombe με PCM φαίνεται στο σχήμα 4.2.1.1.



Σχήμα 4.2.1.1: Σχηματικό διάγραμμα του τοίχου Trombe με PCM [31]

Ο Bourdeau έλεγξε δύο τοίχους συλλογής παθητικής αποθήκευσης χρησιμοποιώντας calcium chloride hexahydrate (σημείο τήξης 29°C) ως υλικό αλλαγής φάσης. Κατέληξε ότι ένας τοίχος PCM 8,1cm είχε καλύτερη θερμική απόδοση από ένα κανονικό τοίχο πάχους 40cm. Πειραματικά και θεωρητικά τεστ διεξήχθησαν για να ανακαλύψουν την αξιοπιστία των PCM σε έναν τοίχο Trombe. Οι Swet, Ghoneim και Chandra χρησιμοποίησαν το sodium sulfate decahydrate (σημείο τήξης 32°C) ως υλικό αλλαγής φάσης στη νότια πλευρά ενός τοίχου Trombe. Ανέφεραν επίσης ότι ο τοίχος Trombe με PCM μικρότερου πάχους ήταν περισσότερο επιθυμητός σε σύγκριση με έναν συνηθισμένο λίθινο τοίχο, για την παροχή αποδοτικής θερμικής ενεργειακής αποθήκευσης. Ο Knowler χρησιμοποίησε κερί παραφίνης CG με μεταλλικά πρόσθετα για αύξηση της συνολικής αγωγιμότητας και αποδοτικότητας του τοίχου Trombe.

Οι Buddhi και Sharma μέτρησαν την μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω υλικών αλλαγής φάσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πάχη. Ως υλικό αλλαγής φάσης χρησιμοποιήθηκε το στεαρικό οξύ. Ανακάλυψαν ότι η μετάδοση των PCM ήταν περισσότερη από του γυαλιού για το ίδιο πάχος και πρότειναν μια νέα εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης σε παράθυρα/τοίχους ως ένα διάφανο υλικό μόνωσης.

Οι Stritih και Novak παρουσίασαν έναν ηλιακό τοίχο για αερισμό κτιρίων, ο οποίος απορροφά ηλιακή ενέργεια σε μαύρο κερί παραφίνης (σημείο τήξης 25-30°C). Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκε

για τη θέρμανση του αέρα και τον αερισμό του σπιτιού. Η αποδοτικότητα της απορρόφησης βρέθηκε να είναι 79%. Τα αποτέλεσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το πάνελ υπαγορεύει την ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας ως αισθητή ή λανθάνουσα και ότι το σημείο τήξεως του PCM έχει επίδραση στη θερμοκρασία του αέρα εξόδου. Η ανάλυση για την περίοδο θέρμανσης έδωσε το βέλτιστο πάχος 50 χιλιοστά και το σημείο τήξεως λίγους βαθμούς πάνω από τη θερμοκρασία του δωματίου.

4.2.1.2 Γυψοσανίδα με PCM (wallboard) [31]

Οι γυψοσανίδες είναι φθηνές και ευρέως χρησιμοποιούμενες σε μια ποικιλία εφαρμογών, κάτι που τις κάνει κατάλληλες για την ενσωμάτωση PCM σε κάψουλες. Παρολ'αυτά, οι αρχές της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε κατάλληλο υλικό κτιρίων. Οι Kedl, Stovall, Salyer και Sircar χρησιμοποίησαν διαποτισμένο τοίχο με κερί παραφίνης για παθητική εφαρμογή. Οι γυψοσανίδες αυτές θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές γυψοσανίδες κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή και της ανακαίνισης ενός κτιρίου. Με τον τρόπο αυτό, θα παρέχουν στο κτίριο την αποθήκευση θερμότητας, η οποία θα διανέμεται σε όλη του την έκταση, ενισχύοντας το παθητικό σύστημα και περιορίζοντας τα απαιτούμενα μέγιστα ηλεκτρικά φορτία για θέρμανση-ψύξη.

Ο Shapiro και οι συνεργάτες του, ανακάλυψαν μεθόδους για διαποτισμό γύψινου τοίχου και άλλων αρχιτεκτονικών υλικών με PCM. Διαφορετικοί τύποι PCM και των χαρακτηριστικών τους, περιγράφηκαν. Ο Shapiro έδειξε πολλαπλά PCM να είναι κατάλληλα για εισαγωγή σε γύψινο τοίχο, με πιθανές εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης για το κλίμα της Φλώριδας. Τα υλικά αυτά ήταν μείγματα μεθυλο-εστέρων και μείγματα μικρής αλυσίδας λιπαρών οξέων. Παρά το γεγονός ότι τα υλικά αυτά είχαν σχετικά υψηλή λανθάνουσα θερμότητα, το θερμοκρασιακό εύρος που απαιτείτο για την επίτευξη της θερμικής αποθήκευσης δεν ενέπιπτε επαρκώς εντός του εύρους της άνεσης για τα κτίρια σε ζεστά κλίματα.

Ο Feldman και οι συνεργάτες του, διεξήγαγαν εκτενή έρευνα όσον αφορά τη χρήση και τη σταθερότητα των οργανικών συστατικών για τη λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων των λιπαρών οξέων (καπρικού, λαυρικού, παλμιτικού και στεατικού), του στεατικού και της πολυαιθυλενογλυκόλης 600. Επιπροσθέτως με τις μελέτες των ιδιοτήτων τους, διεξήχθη έρευνα στα υλικά, τα οποία συμπεριφέρονται ως απορροφητές PCM. Διάφορα υλικά εξετάστηκαν, συμπεριλαμβανομένων των διαφόρων τύπων σκυροδέματος και γύψου. Η χρήση της αποθηκευμένης λανθάνουσας θερμότητας πάνω από ένα άνετο εσωτερικό θερμοκρασιακό εύρος σε κτίρια μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της ικανότητας θερμικής αποθήκευσης της τάξης του 10-130%.

Άλλη έρευνα για τα οφέλη της εφαρμογής των PCM σε γύψινους τοίχους σε παθητικά ηλιακά κτίρια, έκαναν επίσης ο Hawes και οι συνεργάτες του.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του ’80, πολλαπλές μορφές από μεγάλες ποσότητες PCM ενσωματωμένων σε κάψουλες, ελέγχθηκαν για εφαρμογές σε ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα. Ο Neeper εξέτασε το θερμικό δυναμικό μιας γυψοσανίδας, που είναι εμποτισμένη με λιπαρά οξέα και κεριά παραφίνης ως PCMs και που υπόκεινται στην ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας του δωματίου αλλά δεν φωτίζεται άμεσα από τον ήλιο. Οι θερμοκρασίες τήξης αυτών των PCMs προσαρμόζονται με χρήση μίγματος συστατικών. Έχει εξετάσει τρεις παραμέτρους της γυψοσανίδας PCM, που μπορεί να επηρεάζουν την ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί και να απελευθερωθεί παθητικά στη διάρκεια ενός ημερήσιου κύκλου: (i) τη θερμοκρασία τήξης του PCM (ii) το εύρος της θερμοκρασίας κατά το οποίο η τήξη εμφανίζεται και (iii) τη λανθάνουσα χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας της γυψοσανίδας. Η μέγιστη ημερήσια αποθήκευση ενέργειας εμφανίζεται όταν η θερμοκρασία τήξης του PCM ισούται με την μέση θερμοκρασία της γυψοσανίδας, έχοντας παράλληλα ένα στενό εύρος μετάβασης.

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

Οι Stetiu και Feustel παρουσίασαν ένα πρόγραμμα θερμικής προσομοίωσης κτιρίων βασισμένο σε μια προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών για την αριθμητική αξιολόγηση της απόδοσης αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας των επεξεργασμένων γυψοσανίδων με PCM. Η θερμική μάζα χρησιμοποιήθηκε για τη μείωση της αιχμής ζήτησης ενέργειας και του μεγέθους της ψύξης ή της θέρμανσης.

4.2.1.3 <u>Παντζούρια με PCM</u> [31]

Τα πατζούρια στα οποία είναι ενσωματωμένα τα PCM τοποθετούνται έξω από τα παράθυρα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ανοίγουν προς τα έξω και αφήνουν την εξωτερική πλευρά εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία, απορροφάται θερμότητα και το PCM λιώνει. Τη νύχτα τα πατζούρια και τα παράθυρα κλείνουν και η θερμότητα που έχει αποθηκευτεί στο PCM μεταφέρεται στα δωμάτια. Ο Buddhi και οι συνεργάτες του μελέτησαν τη θερμική απόδοση ενός θαλάμου δοκιμής (1m x1m x1m) με και χωρίς υλικό αλλαγής φάσης. Λαυρικό οξύ CG (με

σημείο τήξης 49°C) χρησιμοποιήθηκε ως υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Με τον τρόπο αυτό, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας του θαλάμου λόγω της παρουσίας PCM αυξάνεται έως 4°C για 4 με 5 ώρες.

4.2.1.4 Μπλοκ σκυροδέματος εμποτισμένα με PCM

Μια άλλη δυνατότητα εφαρμογής των PCM στις κατασκευές κτιρίων είναι το ενισχυμένο σκυρόδεμα με PCM.

Ο Lee και η ομάδα του έχουν μελετήσει και παρουσιάσει τα αποτελέσματα δοκιμών μακρο-κλίμακας, που συγκρίνουν την απόδοση της θερμικής αποθήκευσης των απλών μπλοκ τσιμέντου με εκείνα που είναι εμποτισμένα με δύο τύπους PCM, το BS και την εμπορική παραφίνη.

Ο Hawes παρουσίασε τη θερμική συμπεριφορά των PCM (BS, δωδεκανόλη (DD), παραφίνη (PAR), δεκατετρανόλη (TD)) σε διάφορους τύπους μπλοκ τσιμέντου. Η παρουσίαση είχε καλύψει τις επιδράσεις της αλκαλικότητας του σκυροδέματος, της θερμοκρασίας, του χρόνου εμποτισμού και της αραίωσης του PCM κατά την απορρόφησή του στη διάρκεια της διαδικασίας εμποτισμού. [32]

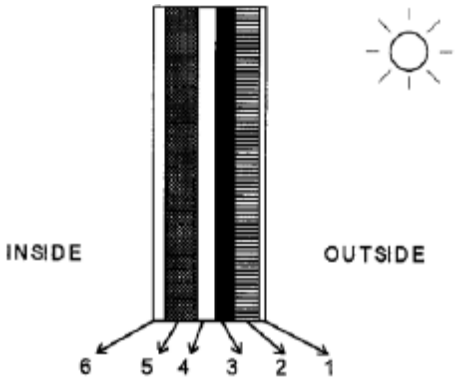
Ο Hadjieva εφάρμοσε την τεχνική εμποτισμού σκυροδέματος με πενταένυδρο θειικό άλας νατρίου ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) ως PCM. Ο λόγος είναι η υψηλή θερμότητα τήξης του $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ (περίπου 210 kJ/kg, 1,5 φορές μεγαλύτερη από της παραφίνης) και η καλή θερμική του αγωγιμότητα (περίπου 0,57 W/mK, δηλαδή περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη) που είναι ελκυστικές ιδιότητες αποθήκευσης ενός υλικού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε σκυρόδεμα PCM. Χρησιμοποίησε πορώδες σκυρόδεμα και κατάφερε να καλύψει τους περισσότερους πορώδεις και τριχοειδείς χώρους του μπετόν έως και 60%. Αυτή η τιμή μειώνεται κατά 10% μετά από επαναλαμβανόμενους θερμικούς κύκλους των δειγμάτων. [31]

4.2.1.5 Ηλιακός τοίχος αποθήκευσης θερμότητας για αερισμό κτιρίου [33]

Ένας τοίχος με ενσωματωμένο PCM έχει τη δυνατότητα να αιχμαλωτίζει μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στους τοίχους και την οροφή ενός κτιρίου. Οι τοίχοι αυτοί με τα ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης επειδή έχουν μεγάλη θερμική μάζα, μπορούν να ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις των διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου που εφαρμόζονται. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί όσον αφορά τη μετατόπιση του φορτίου από τις ώρες αιχμής σε περιόδους μικρότερης ζήτησης.

Οι Arkar και Medved σχεδίασαν και εξέτασαν ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (LTHS) για τον αερισμό ενός κτιρίου. Οι σφαιρικές κάψουλες πολυαιθυλένης τοποθετήθηκαν σε ένα κανάλι του συστήματος αερισμού του κτιρίου και λειτούργησαν ως ένα πορώδες μέσο αποθήκευσης και απορρόφησης. Η θερμότητα που απορροφήθηκε χρησιμοποιήθηκε για να προθερμάνει τον ατμοσφαιρικό αέρα που εισέρχεται στο κτίριο.

Ο «ηλιακός τοίχος» είναι μία άλλη εφαρμογή για την θερμική αποθήκευση με PCM. Σε αυτή την περίπτωση, η ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο απορροφάται από το PCM και αποθηκευέται σε αυτόν. Οι Stritih και Novak κατασκεύασαν έναν πειραματικό τοίχο, ο οποίος περιείχε μαύρο κερί παραφίνης ως PCM. Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκε για την θέρμανση και τον αερισμό του κτιρίου και τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τους ερευνητές, ήταν αρκετά ενθαρρυντικά. Ο τοίχος αποτελείται από έξι κυρίως μέρη, τα οποία παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.

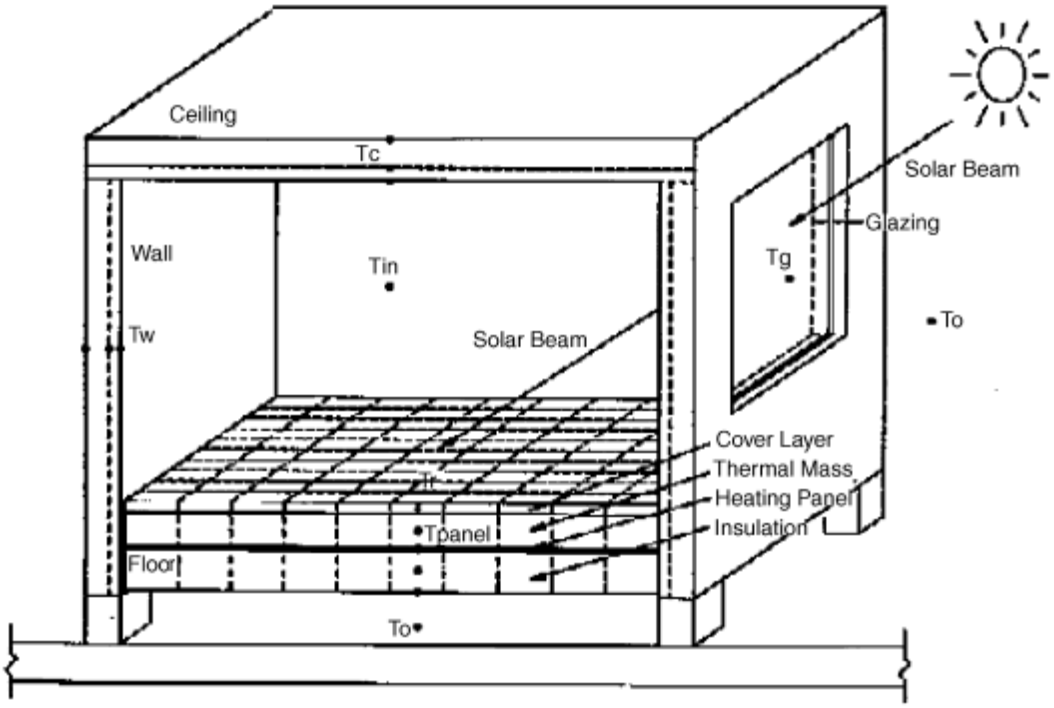


Σχήμα 4.2.1.5: Στοιχεία ηλιακού τοίχου με PCM [33]

Τα πλεονεκτήματα του ηλιακού τοίχου σε σχέση με άλλα συστήματα είναι κατ' αρχάς η υψηλής απόδοσης μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα που οφείλεται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας απευθείας από την παραφίνη που βρίσκεται μέσα σε διαφανές πλαστικό γυαλί το οποίο λειτουργεί την ίδια στιγμή και ως μονωτικό υλικό που αποτρέπει τις απώλειες με συναγωγή και δια ακτινοβολίας στο περιβάλλοντα χώρο. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι και οι απώλειες θερμότητας με αγωγή από το δωμάτιο που μειώνονται στην επιφάνεια, όπου ο τοίχος τοποθετείται. Αρνητικό στοιχείο παρόλα αυτά αποτελεί το γεγονός ότι η παραφίνη παρουσιάζει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, κάτι που καθιστά επιτακτική την ανάγκη για χρήση διάφορων τεχνικών ενίσχυσης της μεταφοράς της θερμότητας. Μια συνήθης τεχνική είναι η χρήση πτερυγίων όπου όχι τόσο το πάχος των πτερυγίων όσο η μεταξύ τους απόσταση έχει μεγαλύτερη επιρροή στη μεταφορά θερμότητας όπως έχει αποδειχθεί.

4.2.1.6 Ενδοδαπέδια θέρμανση με χρήση PCM [31]

Το πάτωμα είναι ένα από τα σημαντικότερα σημεία ενός κτιρίου και για το λόγο αυτό έγιναν κάποιες δοκιμές όσον αφορά τη θέρμανση και την ψύξη του. Οι Ahtienities και Chen έκαναν μελέτη πάνω στη μεταβατική μεταφορά θερμότητας στα συστήματα θέρμανσης του πατώματος. Η μελέτη τους αυτή επικεντρώθηκε στην επίδραση που έχει η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στη θερμοκρασιακή κατανομή του δαπέδου αλλά και στην κατανάλωση ενέργειας. Για το σκοπό αυτό έλαβαν υπόψη περιοχές καλυμμένες ολόκληρες ή και μερικώς από χαλί, καθώς επίσης και περιοχές με σκληρή επικάλυψη τσιμέντου ή μίγματος γύψου-τσιμέντου. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα από προσομοιώσεις σε ένα εξωτερικό δωμάτιο δοκιμών, αποδεικνύουν ότι η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας της περιοχής του πατώματος που τη δέχεται κατά 8°C περισσότερο σε σχέση με αυτή που βρίσκεται υπό σκιά. Η μερική κάλυψη δε του πατώματος με χαλί, αυξάνει την θερμοκρασιακή διαφορά του πατώματος στους 15°C όταν απορροφάται ηλιακή ακτινοβολία.
Η ηλιακή ακτινοβολία που αποθηκεύεται στην θερμική μάζα του πατώματος αποδείχτηκε ότι μειώνει την κατανάλωση ενέργειας για θερμότητα κατά 30% ή και περισσότερο. Αντιθέτως, η αύξηση του πάχους της θερμικής μάζας από 5cm σε 10cm δε φαίνεται να οδηγεί σε περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας με συμβατικά αναλογικά συστήματα ολοκληρωμένου ελέγχου. Παρακάτω δίνεται η σχηματική αναπαράσταση του δωματίου δοκιμών.

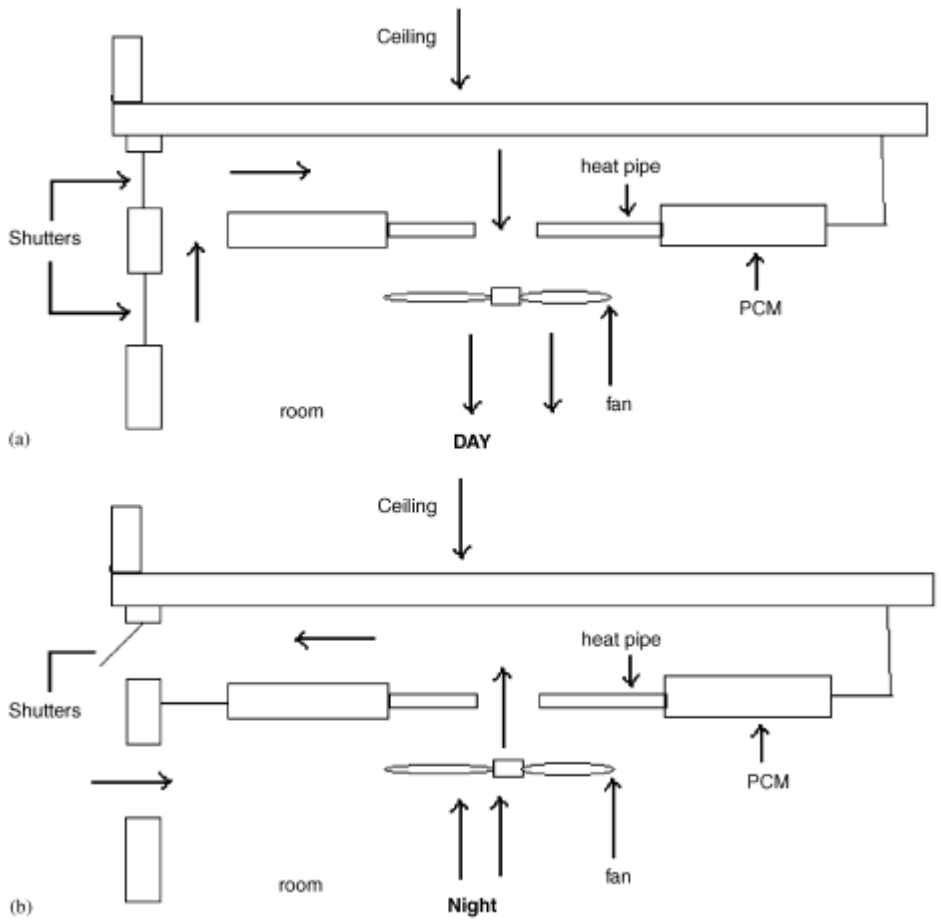


Σχήμα 4.2.1.6: Σχηματική αναπαράσταση του δωματίου δοκιμών με σχεδιάγραμμα διακριτοποιήσης [31]

4.2.1.7 Πάνελ οροφής με ενσωματωμένα PCM [7]

Η Ηλιακή στέγη αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας εξετάστηκε σε ένα Περουβιανό χωριό ώστε να διατηρηθούν σχετικά ισοθερμικές συνθήκες σε ένα πειραματικό σπίτι γέννησης κοτόπουλων. Το σπίτι αυτό χωρίστηκε σε δύο στενά συνδεόμενα μέρη, ένα αίθριο και ένα θερμαινόμενο θάλαμο. Δύο ημικυκλικές δεξαμενές καλυμμένες με γυαλί στο επάνω μέρος, που περιείχαν 42 κιλά παραφίνης η καθεμία, τοποθετήθηκαν κάτω από μια γυάλινη οροφή, η οποία ήταν ερμητικά κλειστή. Τη νύχτα είχε τοποθετηθεί παχιά μόνωση πολυουρεθάνης μεταξύ της γυάλινης οροφής και των δεξαμενών παραφίνης για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του θαλάμου μεταξύ των 22 και 30°C, σύμφωνα με τον Benard και τους συνεργάτες του.

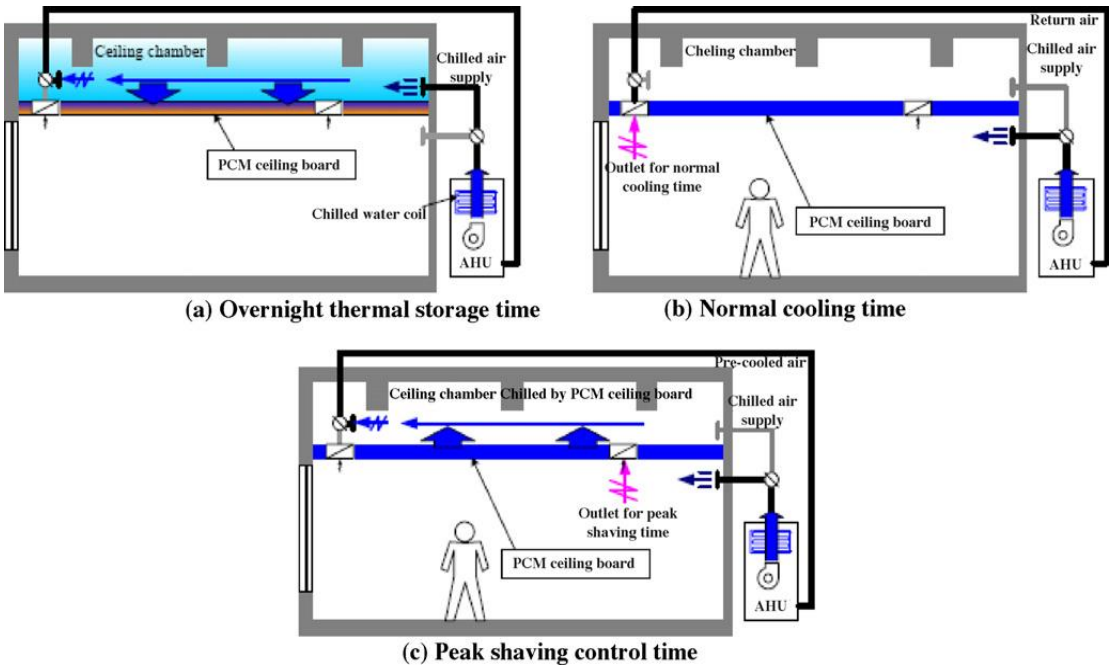
Ένα σύστημα θέρμανσης χώρων που ενσωματώνει PCM το οποίο τοποθετείται στην οροφή αναπτύχθηκε από τους Gutherz και Schiler. Ηλιακοί ανακλαστήρες χρησιμοποιήθηκαν για να κατευθύνουν την ηλιακή ενέργεια που εισέρχεται μέσα από τα παράθυρα πάνω στα PCM. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού ήταν ότι έδωσε μια μεγάλη περιοχή για την αποθήκευση θερμότητας χωρίς την ανάγκη μεγάλου όγκου που θα απαιτούσαν τα μέσα αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση ενός τέτοιου συστήματος έχει τη δυνατότητα να ανακτήσει 17-36% της θερμότητας που χάνεται κατά τη διάρκεια των αρχικών κερδών. Ο Turnpenny και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν μια μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας που περιλαμβάνει αγωγούς θερμότητας ενσωματωμένους σε υλικό αλλαγής φάσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.1.7.1. Το σύστημα αυτό αποθήκευε τη δροσιά κατά τη διάρκεια της νύχτας και την απέδιδε το πρωί.



Σχήμα 4.2.1.7.1: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος μόνωσης αγωγών θερμότητας/PCM [31]

Οι Kodo και Ibamoto εξέτασαν τις επιπτώσεις ελέγχου εξομάλυνσης της κορυφής των συστημάτων κλιματισμού που χρησιμοποιούν PCM για σανίδες οροφής σε ένα κτίριο γραφείων. Η σανίδα οροφής πετροβάμβακα με PCM (σανίδα οροφής PCM) ενισχύθηκε με την προσθήκη μικροκαψουλών PCM, με σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης 24,5°C και 174,4 kJ/kg, αντίστοιχα. Σε αυτό το σύστημα, μια σανίδα οροφής PCM χρησιμοποιείται αντί για σανίδα οροφής πετροβάμβακα. Το σχήμα 4.2.1.7.2 παρουσιάζει μια περίληψη του συστήματος. Κατά τη διάρκεια μιας νυχτερινής θερμικής αποθήκευσης, ο δροσερός αέρας από την AHU ρέει στο χώρο του θαλάμου οροφής και κρυώνει την σανίδα οροφής PCM, αποθηκεύοντας έτσι θερμική ενέργεια ψύξης (σχήμα 4.2.1.7.2 (a)). Κατά τον κανονικό χρόνο ψύξης, ο δροσερός αέρας από την AHU ρέει απευθείας στο δωμάτιο (σχήμα 4.2.1.7.2 (b)). Κατά τη διάρκεια της ώρας εξομάλυνσης της αιχμής, όταν το θερμικό φορτίο παρουσιάζει μέγιστο, ο αέρας από το δωμάτιο επιστρέφει στην AHU μέσω του χώρου του θαλάμου οροφής. Ως αποτέλεσμα της διαδρομής μέσω της σανίδας οροφής PCM, η οποία προσφέρει ψύξη, ο ζεστός αέρας επιστρέφοντας από το

δωμάτιο προψύχεται στο δρόμο της επιστροφής προς την AHU (σχήμα 4.2.1.7.2 (c)).



Σχήμα 4.2.1.7.2: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος σανίδας οροφής [7]

Το μέγιστο θερμικό φορτίο και η χωρητικότητα της πηγής θερμότητας μπορεί κατά συνέπεια να μειωθεί. Ο κανονικός χρόνος ψύξης είναι από τις 7π.μ. έως τις 1μ.μ. Η ώρα εξομάλυνσης της αιχμής είναι από τη 1μ.μ. έως τη λήξη των ωρών της επιχείρησης. Στη μελέτη αυτή, ο χρόνος θερμικής αποθήκευσης είναι από τις 4π.μ. έως τις 7π.μ. Η μειωμένη χρήση της μέγιστης φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας, κατά τη διάρκεια της περιόδου εξομάλυνσης της αιχμής και η χρήση του φθηνότερου συντελεστή κατά τη διάρκεια της νύχτας έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα από αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του χώρου ήταν μόνο περίπου 2°C, σε σύγκριση με την αύξηση των 6°C στη θερμοκρασία του δωματίου, αν δεν χρησιμοποιούταν PCM. Παράλληλα αποδείχτηκε πως το μέγιστο θερμικό φορτίο χρησιμοποιώντας την σανίδα οροφής PCM μειώθηκε κατά 9,4% σε σύγκριση με τη συμβατική σανίδα οροφής από πετροβάμβακα. Το συνολικό λειτουργικό κόστος βρέθηκε ότι ήταν 96,6% χαμηλότερο από αυτό της σανίδας οροφής με πετροβάμβακα, λόγω της χρήσης μειωμένης νυχτερινής φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνοψίζοντας λοιπόν αυτό το σύστημα θερμικής αποθήκευσης έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών συστημάτων θερμικής αποθήκευσης που χρησιμοποιούν πλάκες δαπέδου από σκυρόδεμα:

- Κατ' αρχάς περισσότερη αποτελεσματική θερμική αποθήκευση είναι αναμενόμενη, λόγω των υψηλής πυκνότητας δεξαμενών δροσερού αέρα στη σανίδα οροφής PCM, που σχηματίζει το δάπεδο του χώρου της οροφής.

- Ακόμα όλες οι σανίδες οροφής μπορεί να χρησιμοποιηθούν για θερμική αποθήκευση, δεδομένου ότι ο δροσερός αέρας μπορεί να ρέει μέσα από το θάλαμο οροφής χωρίς να διακόπτεται από δοκάρια.

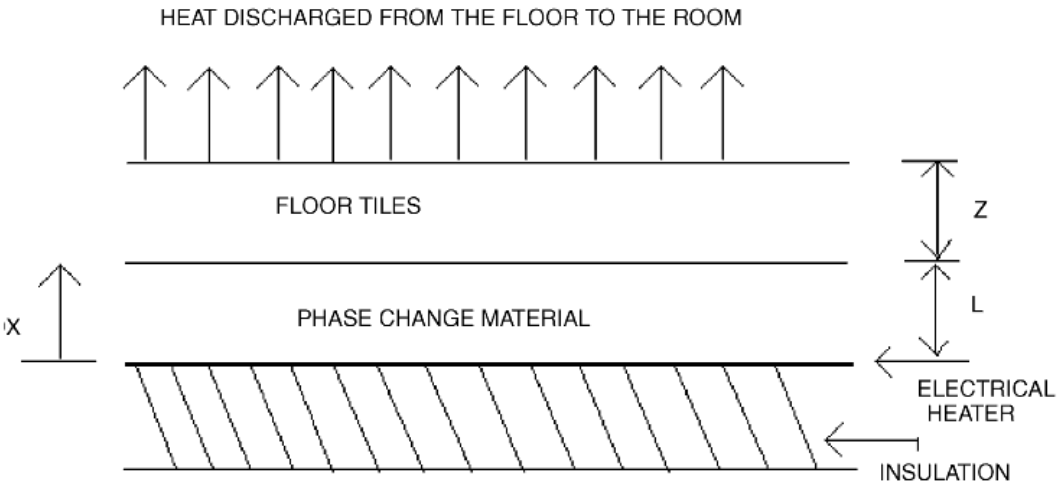
- Τέλος, καθώς η θερμοκρασία της επιφάνειας της σανίδας οροφής διατηρείται στο σημείο τήξης του PCM για μεγάλο χρονικό διάστημα το εσωτερικό θερμικό περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένου του πεδίου ακτινοβολίας, μπορεί να βελτιωθεί.

4.2.2 Συστήματα ενεργητικής αποθήκευσης

4.2.2.1 Θέρμανση πατώματος [7]

Το ενεργητικό σύστημα δαπέδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως για την εκτός αιχμής αποθήκευση θερμικής ενέργειας στα κτίρια. Έτσι, τα φορτία αιχμής μπορούν να μειωθούν και να μετατοπιστούν κατα τη διάρκεια της νύχτας, όταν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερο.

Ένα ηλεκτρικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, έχοντας ως υλικό αλλαγής φάσης κερί παραφίνης (με σημείο τήξης 40^oC), πρότειναν οι Farid και Chen, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τοποθέτησαν μια λωρίδα PCM 30mm μεταξύ της επιφάνειας θέρμανσης και των πλακών του πατώματος. Χρησιμοποιώντας προσομοίωση στον υπολογιστή, ανακάλυψαν ότι η θερμότητα που προέρχεται από το πάτωμα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά από 30 σε $75W/m^2$, εάν χρησιμοποιηθεί αποθήκευση σε PCM.



Σχήμα 4.2.2.1: Ηλεκτρικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με PCM [7]

Αργότερα, ο Nagano και οι συνεργάτες του, παρουσίασαν ένα κλιματιστικό σύστημα πατώματος με λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης σε κτίρια. Το μέγεθος του ορόφου του πειραματικού κελιού ήταν 0.5m^2. Το υλικό αλλαγής φάσης σε κοκκώδη μορφή έγινε από αφρώδες γυαλί αποβλήτων χαντρών και μείγμα παραφίνης. Το συσκευασμένο στρώμα PCM πάχους 3cm είχε εγκατασταθεί κάτω από τη σανίδα του δαπέδου με πολλαπλές μικρές τρύπες. Η αλλαγή στη θερμοκρασία δωματίου και η ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας μετρήθηκαν και τα αποτελέσματα έδειξαν τις δυνατότητες ψύξης του φορτίου μετατόπισης με τη χρήση συσκευασμένων PCM σε κοκκώδη μορφή.

Ο Lin και οι συνεργάτες του, ακολούθησαν με άλλο ένα πείραμα πάνω στο ίδιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Χρησιμοποίησαν 75% κ.β. παραφίνη ως PCM και 25% κ.β. πολυαιθυλένιο ως υποστηρικτικό υλικό. Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης και η θερμότητα τήξης της παραφίνης ήταν 52°C και 200 kJ/kg, αντίστοιχα.

Τα συμπεράσματα από την παραπάνω εφαρμογή ήταν τα ακόλουθα:

- Το σύστημα αυτό αύξησε την εσωτερική θερμοκρασία του χώρου χωρίς να αυξηθεί η θερμοκρασιακή διαφορά.

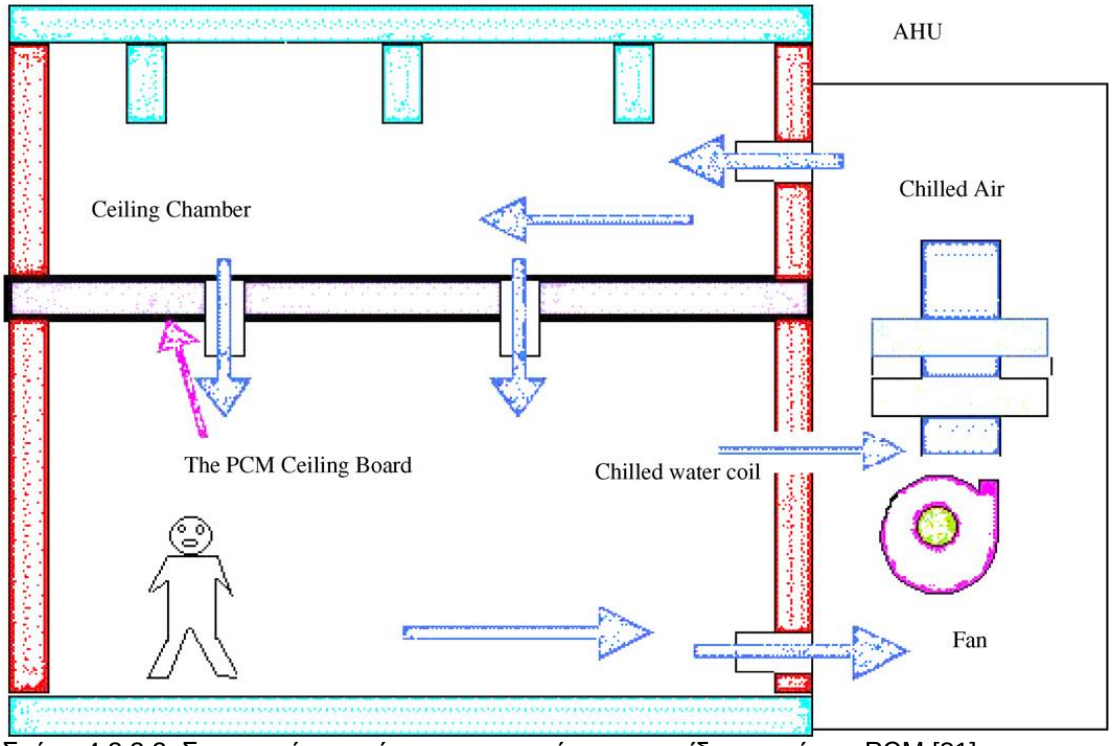
- Η θερμοκρασία των πλακών PCM διατηρήθηκε στη θερμοκρασία μετάβασης φάσης για αρκετό χρονικό διάστημα από τότε που σταμάτησαν να λειτουργούν τα καλοριφέρ. Περισσότερο από το ήμισυ της ηλεκτρικής θερμικής ενέργειας μεταφέρθηκε από την περίοδο αιχμής σε ώρες εκτός αιχμής, γεγονός που αποτέλεσε σημαντικό οικονομικό όφελος αν ληφθούν υπόψη οι διαφορετικές τιμές μεταξύ ημέρας και νύχτας.

- Εμφανίστηκε μικρή διαφορά εσωτερικής θερμοκρασίας κατά μήκος της κάθετης κατεύθυνσης διότι η ενδοδαπέδια θέρμανση μπορούσε να ζεστάνει τον εσωτερικό αέρα ομοιόμορφα. Αυτό το σύστημα θέρμανσης ήταν άνετο και ενεργειακά αποδοτικό.

4.2.2.2 Πάνελ οροφής [31]

Τα πάνελ οροφής είναι το σημαντικότερο τμήμα της οροφής και χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και τη ψύξη στα κτίρια. Ο Bruno ανέπτυξε ένα σύστημα, το οποίο αποθήκευε ενέργεια ψύξης σε υλικό αλλαγής φάσης κατά τη διάρκεια των ωρών χαμηλής ζήτησης, η οποία απελευθερωνόταν τις ώρες αιχμής. Επιπλέον μελετήθηκαν τα αποτελέσματα του ελέγχου των συστημάτων κλιματισμού που χρησιμοποιούν PCM σε τμήματα της οροφής του κτιρίου. Το σημείο τήξης του PCM που χρησιμοποιήθηκε βρισκόταν μεταξύ των 20 και 30°C και ήταν σχεδόν ίσο με την κατάλληλη θερμοκρασία του δωματίου.

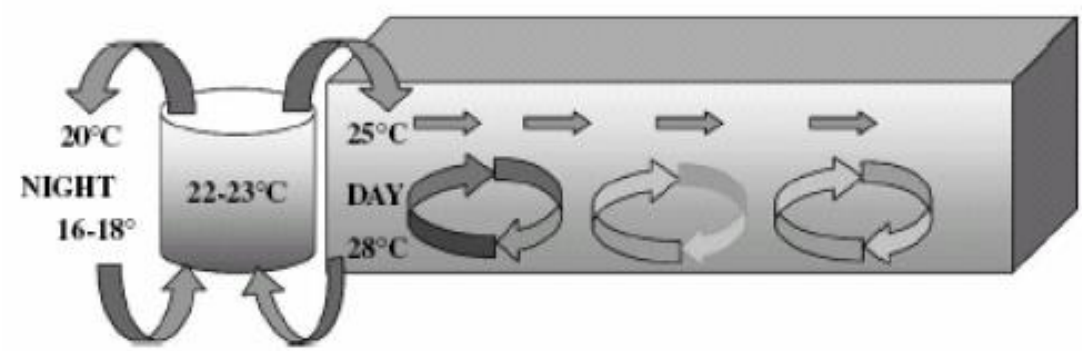
Οι Kodo και Ibamoto έκαναν μια προσπάθεια για τη μείωση του φορτίου αιχμής του συστήματος κλιματισμού που λειτουργεί με PCM στην οροφή. Το σημείο τήξης και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης των χρησιμοποιούμενων PCM ήταν 24,5^{o}C και 174,4kJ/kg, αντίστοιχα. Το σύστημα ήταν ουσιαστικά ίδιο με το σύστημα του θαλάμου οροφής. Κατά τη διάρκεια της ψύξης, ο δροσερός αέρας από τη μονάδα εισαγωγής αέρα περνούσε από το χώρο του θαλάμου της οροφής για να αποθηκεύσει τη δροσιά στο PCM της οροφής. Η δροσιά ανακτήθηκε κατά τη διάρκεια 2 ωρών αιχμής για την ψύξη του δωματίου. Με τη μέθοδο αυτή, διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του χώρου ήταν μόνο 2°C περίπου σε σχέση με την αύξηση 6°C στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, αν δεν χρησιμοποιούταν PCM. Σχηματική απεικόνιση του συστήματος σανίδα οροφής με PCM φαίνεται στο σχήμα 4.2.2.2.



Σχήμα 4.2.2.2: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος σανίδα οροφής με PCM [31]

4.2.2.3 Free cooling [33]

Η τεχνική του free cooling που αποτελεί μια μορφή κλιματισμού ερευνήθηκε πρώτη φορά από το Zalba στο Πανεπιστήμιο της Ζαραγόσα στην Ισπανία. Στόχος της έρευνας ήταν ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας πειραματικής εγκατάστασης για την μελέτη των PCM με θερμοκρασία τήξης μεταξύ των 20 και 25°C, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



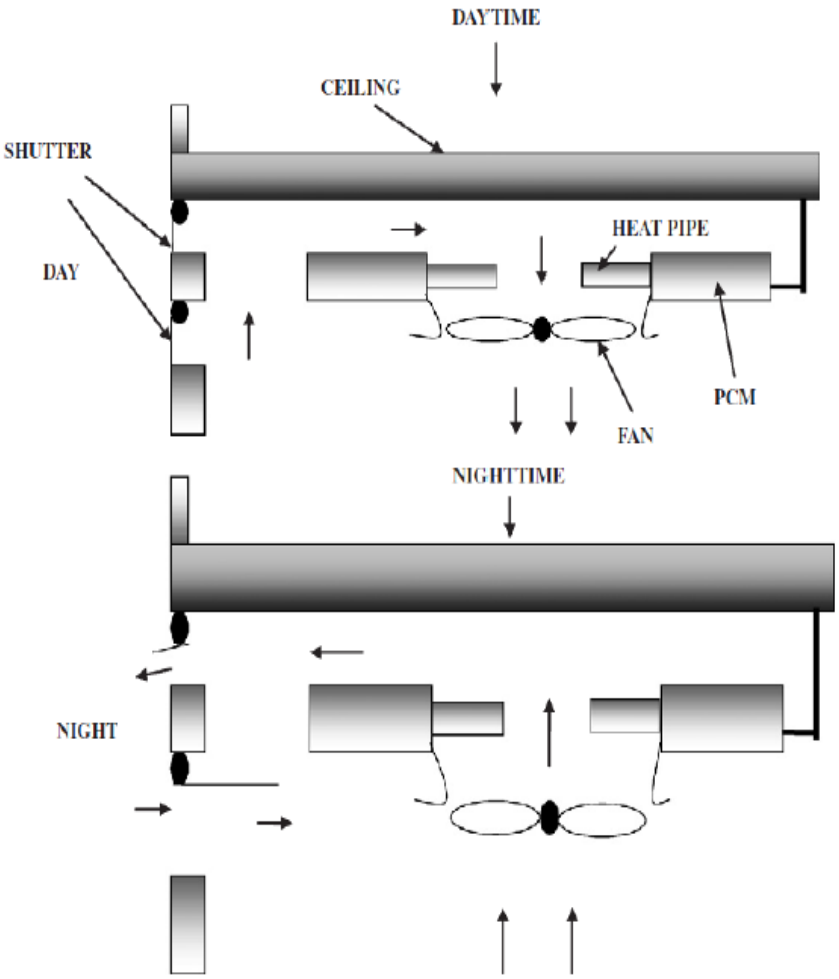
Σχήμα 4.2.2.3.1: Λειτουργία του Free cooling [33]

Αυτό το θερμοκρασιακό εύρος φαίνεται να είναι το καταλληλότερο για το free cooling καθώς οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος τη νύχτα συνήθως πέφτουν κάτω από τους 20-25°C και έτσι είναι αρκετά χαμηλές ώστε να ψύχουν τον αέρα στα κτίρια. Η εγκατάσταση του free cooling αποθηκεύει το κρύο κατά την διάρκεια της νύχτας και το αποδίδει την ημέρα. Για να λειτουργήσει όμως ικανοποιητικά απαιτεί

κλίματα, όπου η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην ημέρα και την νύχτα τους καλοκαιρινούς μήνες, να είναι μεγαλύτερη από 15°C.

Με βάση μια προσέγγιση που έγινε από το Πανεπιστήμιο του Nottingham, είναι δυνατή και εύκολη η αντικατάσταση ενός πλήρους συστήματος κλιματισμού με το νέο νυχτερινό σύστημα ψύξης. Αποτελεί ουσιαστικά ένα σύστημα, τοποθετημένο στην οροφή, με ανεμιστήρες που ρίχνουν αέρα στα εκτιθέμενα άκρα των σωλήνων θερμότητας. Το άλλο άκρο των σωλήνων αυτών είναι ένα στοιχείο PCM αποθήκευσης ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο ζεστός αέρας που παράγεται στο χώρο ψύχεται από το PCM το οποίο απορροφά μέρος της θερμότητας του αέρα. Κατά τη διάρκεια όμως της νύχτας, ο ανεμιστήρας αντιστρέφεται και ανοίγουν τα φύλλα του έτσι ώστε ο κρύος αέρας από έξω να περάσει πάνω από τις σωληνώσεις θέρμανσης και να αφαιρέσει την αποθηκευμένη θερμότητα από το PCM. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται κάθε μέρα.

Οι θερμοκρασίες τήξης και στερεοποίησης του PCM είναι περίπου 22 και 20°C αντίστοιχα. Πλήρης τήξη συμβαίνει σε μία περίοδο 8 περίπου ωρών όταν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του PCM και του αέρα είναι 2°C και σε διάστημα 3 ωρών όταν η διαφορά τους είναι 3,5^{o}C. Οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας είναι 80 και 200W ανα συσκευή αντίστοιχα ή 800 και 2000W για ένα δωμάτιο με 10 συσκευές.

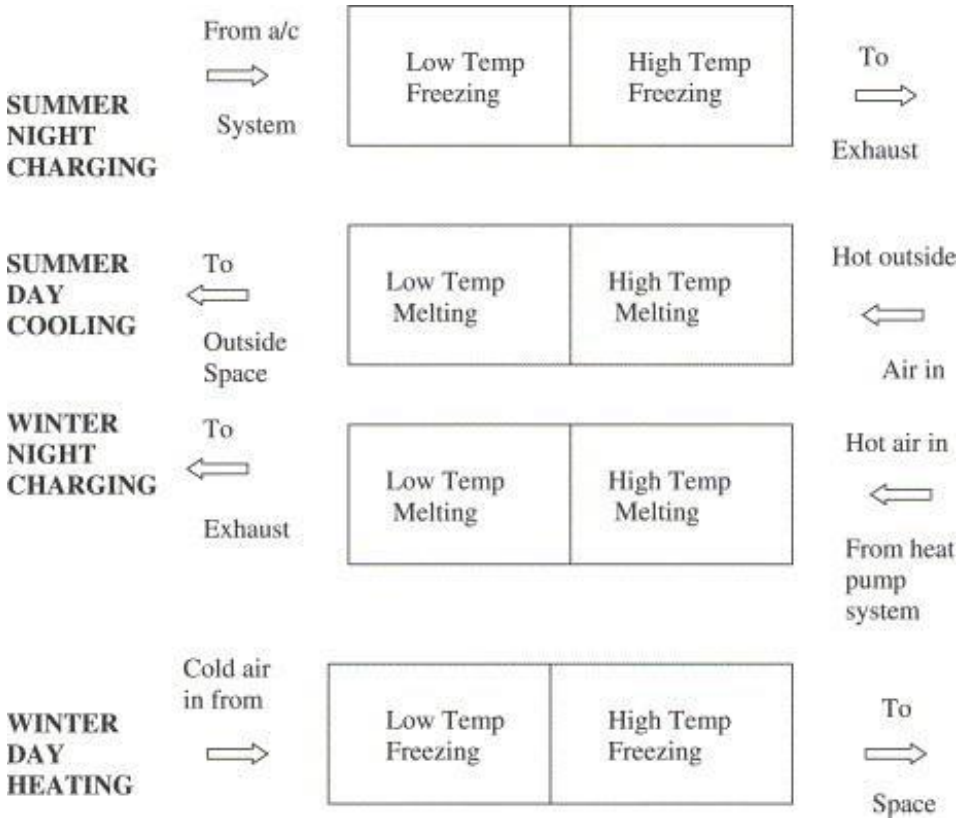


Σχήμα 4.2.2.3.2: Σχεδιασμός του συστήματος free cooling όπως προτάθηκε από το Πανεπιστήμιο του Nottingham [33]

4.2.2.4 Συνδυασμένο σύστημα ψύξης και θέρμανσης με PCM [33]

Το Κέντρο Ανανεώσιμης Ενέργειας (SEC) στο UniSA άρχισε τις εργασίες με PCM στα μέσα της δεκαετίας του 1990 με την ανάπτυξη μιας μονάδας αποθήκευσης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τη θέρμανση όσο και για την ψύξη χώρων. Η διαδικασία της φόρτισης κατά τη διάρκεια της νύχτας και της χρησιμοποίησής της κατά τη διάρκεια της ημέρας σε περιόδους θέρμανσης και ψύξης για ένα σύστημα αποθήκευσης που αποτελείται από δύο διαφορετικά PCM ενσωματωμένα σε ένα σύστημα ψυκτικών αντλιών θερμότητας αντίστροφου κύκλου που χρησιμοποιεί εκτός αιχμής ηλεκτρική ενέργεια είναι η ακόλουθη. Καθώς ο αέρας διοχετεύεται μέσω του συστήματος, υποβάλλεται σε μία διαδικασία δύο σταδίων θέρμανσης και ψύξης. Πηγαίνει πρώτα μέσω του ενός PCM και στη συνέχεια μέσω του δευτέρου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.2.4. Το σημείο τήξης/ψύξης του πρώτου υλικού είναι κάτω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης, ενώ το δεύτερο υλικό έχει σημείο τήξης/ψύξης πάνω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η ροή του αέρα ρυθμίζεται έτσι ώστε το σύστημα θέρμανσης να αποθηκεύει θερμότητα

τη νύχτα (με την τήξη και των δύο υλικών), και να απελευθερώνει τη θερμότητα σε θερμοκρασία υψηλότερη από τις συνθήκες θερμικής άνεσης (μέσω της πήξης) κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το καλοκαίρι η κατεύθυνση ροής του αέρα αντιστρέφεται και το σύστημα αποθηκεύει ψυκτική ενέργεια τη νύχτα και απελευθερώνει το δροσερό αέρα κάτω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης τη μέρα.



Σχήμα 4.2.2.4: Διαδικασίες νυχτερινής φόρτισης και ημερήσιας αξιοποίησης τόσο για θερμές όσο και ψυχρές εποχές. [33]

Το ποσό μείωσης της απαιτούμενης ικανότητας του κλιματιστικού καθώς και το ποσό των θερμικών και ψυκτικών φορτίων που μεταφέρονται εκτός των ωρών αιχμής υπολογίστηκαν με τη χρήση ενός υπολογιτικού μοντέλου για το σύστημα αποθήκευσης. Επίσης υπολογίστηκε και η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας. Χρησιμοποιώντας ένα θερμικό σύστημα αποθήκευσης που περιέχει δύο διαφορετικά PCM μπορεί κάποιος να μειώσει την απαιτούμενη ικανότητα και το αρχικό κόστος του κλιματιστικού για μια κατοικία. Επίσης, μπορεί να μετατοπίσει ένα μέρος των θερμικών και ψυκτικών φορτίων εκτός των ωρών αιχμής, όπου το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερο. Οι υπολογισμοί για ένα τυπικό σπίτι στην Αδελαΐδα έδειξαν ότι ένα σύστημα αποθήκευσης που αποτελείται από 100kg PCM θερμοκρασίας 29°C και 80kg PCM θερμοκρασίας 18°C μείωσε το ονομαστικό ποσοστό του απαιτούμενου φορτίου για το κλιματιστικό στο 50% του συνολικού φορτίου. Επίσης, το ετήσιο κόστος της ηλεκτρικής

ενέργειας μειώθηκε κατά 32%, λόγω της μετατόπισης του φορτίου σε περίοδο εκτός αιχμής. Η εταιρεία κοινής ωφέλειας θα μπορούσε να επωφεληθεί από την μετατόπιση του 52% και 41% των φορτίων κλιματισμού κατά τη διάρκεια των ψυχρών και θερμών εποχών αντίστοιχα από μειωμένη παραγωγή και δυνατότητες μετάδοσης αν το προτεινόμενο σύστημα αποθήκευσης χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα.

5. Βιομηχανικές εφαρμογές των PCM

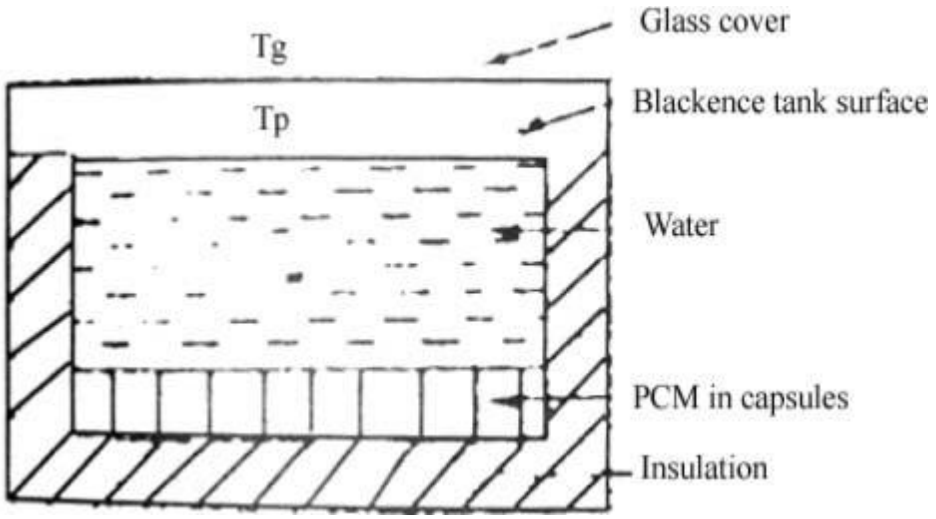
Η χρήση των PCM σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι ευρέως διαδεδομένη και χαρακτηρίζεται από πολλά πλεονεκτήματα με κυριότερα την εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους, κάτι που είναι πολύ βασικό στις μέρες μας.

Για αυτό το λόγο, ένας μεγάλος αριθμός επιστημόνων ασχολήθηκε με την ένταξη των PCM εκτός από τις κτιριακές και σε άλλες τεχνικές εφαρμογές. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, εκμεταλλευόμενα τις ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης. [8]

5.1 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού

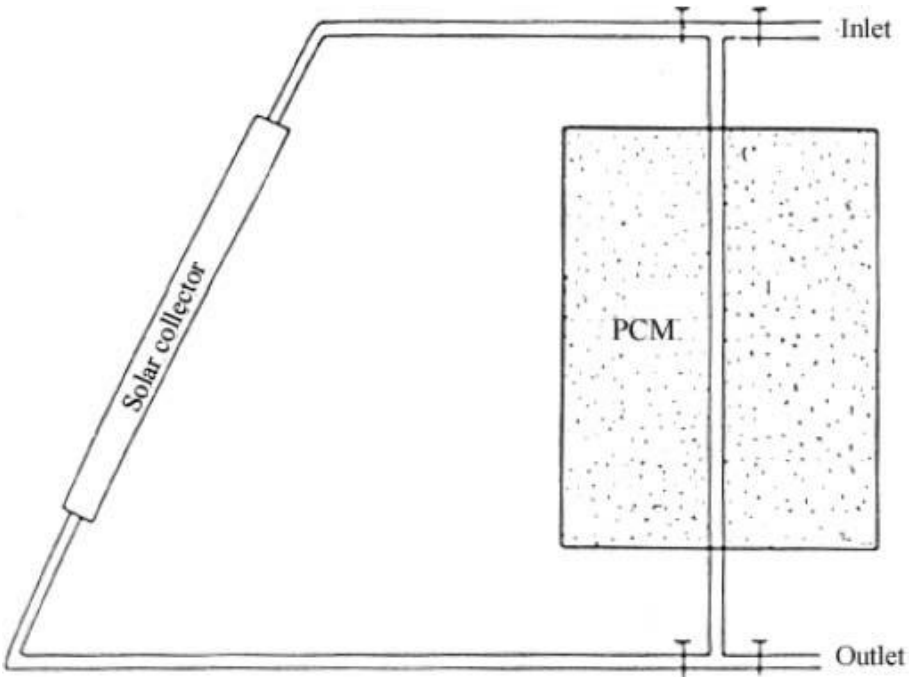
Ένας από τους τομείς όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται ευρέως είναι η θέρμανση του νερού. Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς επειδή είναι σχετικά φθηνοί και απλοί στην κατασκευή και τη συντήρηση.

Ο Prakesh και οι συνεργάτες του (1985) ανέλυσαν ένα θερμαντήρα τύπου νερού με ενσωματωμένη αποθήκευση που περιείχε ένα στρώμα γεμάτο με PCM στο πυθμένα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Κατά τη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας, το νερό θερμαίνεται και αυτό με τη σειρά του μεταφέρει θερμότητα στο PCM κάτω από αυτό. Το PCM τήκεται και συλλέγει την ενέργεια με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας. Κατά τη διάρκεια των ωρών μη ηλιοφάνειας, το ζεστό νερό αποσύρεται και αντικαθίσταται με κρύο, το οποίο κερδίζει ενέργεια από το PCM. Η ενέργεια αυτή απελευθερώνεται από το PCM κατά την αλλαγή της φάσης του από υγρό σε στερεό. Αυτός ο τύπος συστήματος μπορεί να μην είναι αποτελεσματικός λόγω της κακής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του PCM και του νερού. [8]



Σχήμα 5.1.1: Θερμαντήρας τύπου ενσωματωμένης αποθήκευσης με στρώμα PCM [8]

Μία κυλινδρική μονάδα αποθήκευσης στο κλειστό βρόχο με έναν επίπεδο συλλέκτη έχει θεωρητικά μελετηθεί από τους Bansal και Buddhi για τη λειτουργία φόρτισης και αποφόρτισής του, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι υπολογισμοί για τη διεπαφή του κινούμενου ορίου και της θερμοκρασίας του ρευστού έγιναν με τη χρήση κεριού παραφίνης και στεατικού οξέος ως υλικά αλλαγής φάσης. [8]

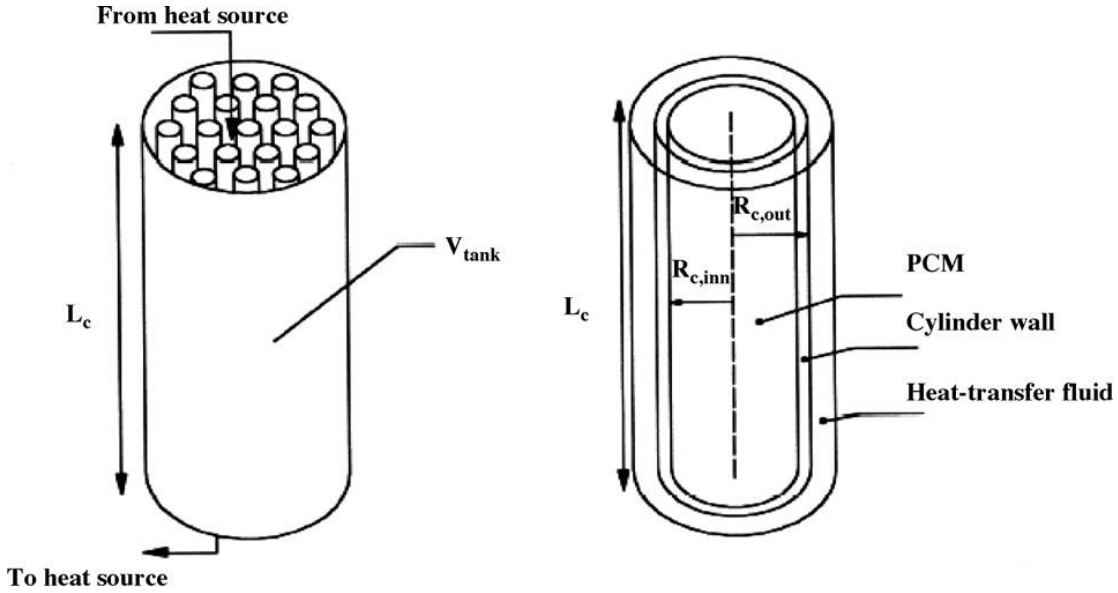


Σχήμα 5.1.2: Ένα οικιακό σύστημα ζεστού νερού με ξεχωριστή μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. [8]

Μια συγκριτική μελέτη των ηλιακών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας που βασίζονται στην τεχνική λανθάνουσας θερμότητας και αισθητής θερμότητας έχει πραγματοποιηθεί για να διατηρηθεί το ηλιακά θερμαινόμενο ζεστό νερό για όλη τη διάρκεια της νύχτας από τον Chaurasia. Χρησιμοποίησε παραφίνη ως PCM για την ηλιακή θέρμανση του νερού. Γι 'αυτό το σκοπό, δύο πανομοιότυπες μονάδες αποθήκευσης χρησιμοποιήθηκαν, μία μονάδα περιείχε 17,5 kg παραφίνης (θερμοκρασία τήξης 54°C) ως υλικό αποθήκευσης συσκευασμένο σε εναλλάκτη θερμότητας κατασκευασμένο από σωλήνες αλουμινίου και μια άλλη μονάδα, που περιείχε απλά νερό ως υλικό αποθήκευσης σε μια γαλβανισμένη δεξαμενή. Και οι δύο μονάδες χωριστά φορτίζονται κατά τη διάρκεια της ημέρας με τη βοήθεια επίπεδων ηλιακών συλλεκτών με την ίδια περιοχή απορρόφησης. Η μελέτη αποκάλυψε ότι το σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας παράγει συγκριτικά περισσότερο ζεστό νερό την επόμενη μέρα το πρωί σε σύγκριση με το σύστημα αισθητής αποθήκευσης.

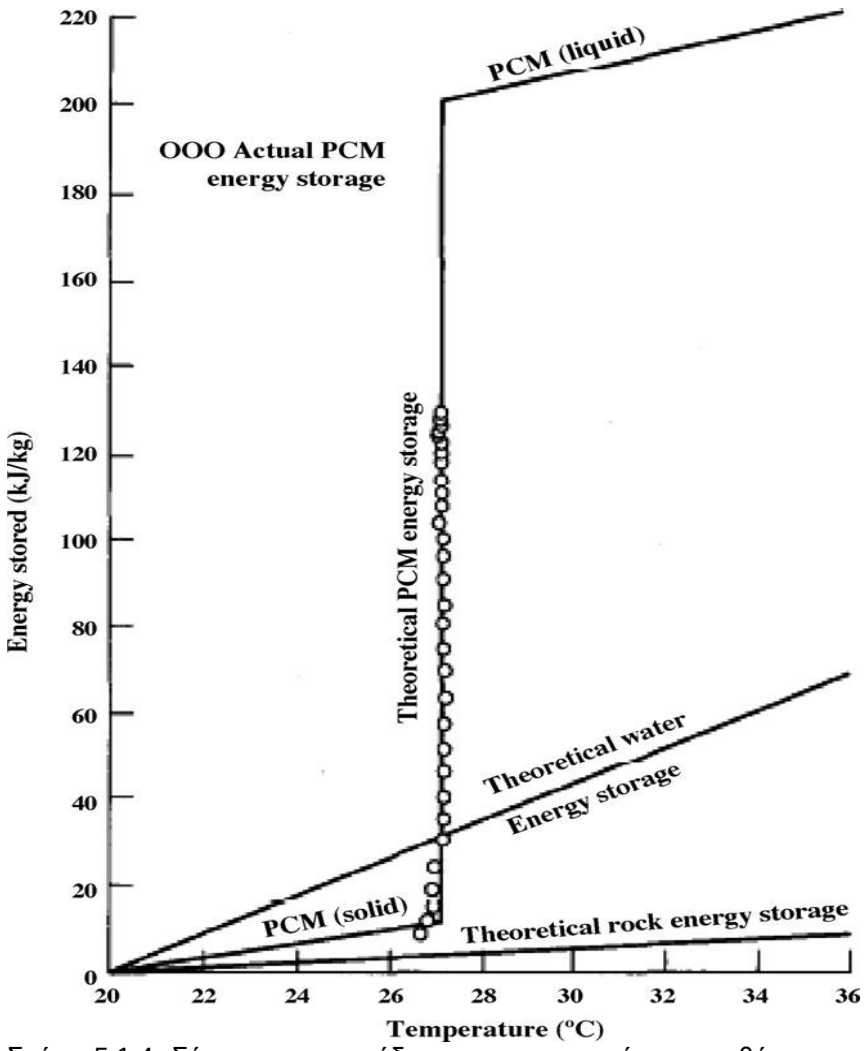
Έχουν γίνει διάφορες συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικού μεγέθους δοχείων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας και δοχείων νερού αποθήκευσης αισθητής θερμότητας με διαφορετικό βαθμό διαστρωμάτωσης. Το δοχείο αποθήκευσης αποτελείται από έναν αριθμό κλειστών κυλινδρικών σωλήνων

γεμάτων με υλικό αλλαγής φάσης. Αυτοί οι σωλήνες περιβάλλονται από υγρό που μεταφέρει θερμότητα. Η διάταξη αυτού του συστήματος φαίνεται παρακάτω. [7]



Σχήμα 5.1.3: Κυλινδρικό δοχείο αποθήκευσης θερμότητας με PCM [7]

Ο Bajnoczy και οι συνεργάτες του μελέτησαν τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας δύο βαθμών (60-30°C και 30-20°C) με βάση το χλωριούχο εξαϋδρικό ασβέστιο και το χλωριούχο τετραένυδρο ασβέστιο. Οι ερευνητές μελέτησαν επίσης τις αλλαγές στη χωρητικότητα αποθήκευσης κατά τη διάρκεια των κύκλων καθώς και την πιθανή χρήση ενός ηλιακού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για οικιακό σύστημα θέρμανσης νερού.
Ο Kamiz Kayguz και οι συνεργάτες του διεξήγαγαν μια πειραματική και θεωρητική μελέτη για τον καθορισμό των αποδόσεων των υλικών αλλαγής φάσης σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού. Χρησιμοποιήθηκε το $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ως υλικό αλλαγής φάσης. Επιπλέον, σύγκριναν την απόδοση των συστημάτων αποθήκευσης με βάση το PCM, το νερό και την πέτρα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. [7]



Σχήμα 5.1.4: Σύγκριση της απόδοσης των συστημάτων αποθήκευσης με βάση το PCM, το νερό και την πέτρα [7]

Κάθε φορά που η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη, συλλέγεται και μεταφέρεται στη δεξαμενή αποθήκευσης ενέργειας που είναι γεμάτη από 1500 kg συσκευασμένου υλικού αλλαγής φάσης (PCM). Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια δεξαμενή τοποθετημένη στην οριζόντια κατεύθυνση με κυλινδρικούς σωλήνες. Το υλικό αποθήκευσης ενέργειας ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$) βρίσκεται εντός των σωλήνων, οι οποίοι κατασκευάζονται από πλαστικό PVC, και θερμαίνει το μεταφερόμενο υγρό (νερό) το οποίο ρέει παράλληλα με τους σωλήνες αυτούς. Ο Rabin μελέτησε επίσης έναν ηλιακό συλλέκτη με αποθηκευτικό χώρο για τη θέρμανση νερού χρησιμοποιώντας ένυδρο άλας ως PCM.

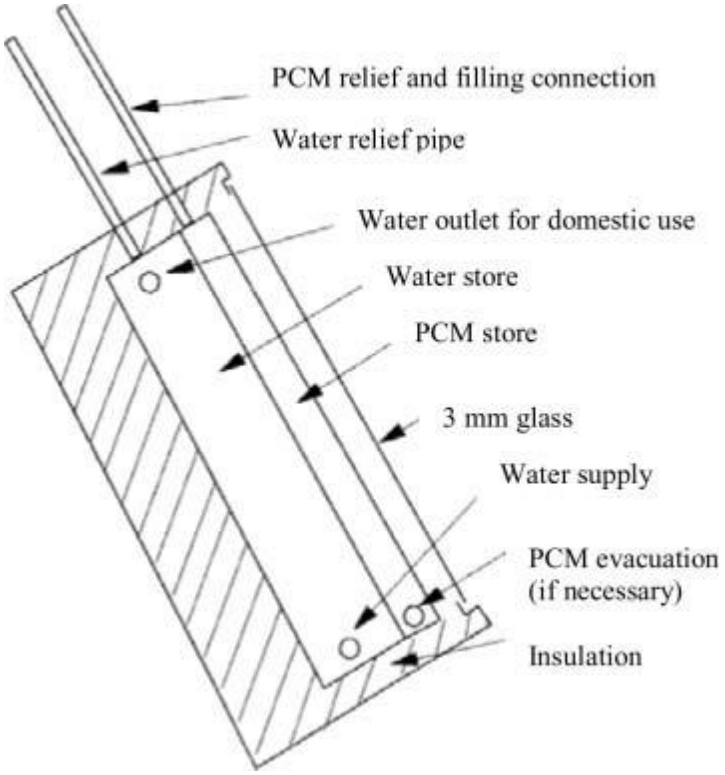
Ο Sharma σχεδίασε και ανέπτυξε μια αξιολόγηση ενός συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με απαιτήσεις σε ζεστό νερό με τη βοήθεια ηλιακών συλλεκτών τύπου πλαισίου. Χρησιμοποιήθηκε κερί παραφίνης ως υλικό αλλαγής φάσης (με σημείο τήξης 54°C) και διαπιστώθηκε ότι η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος ήταν πολύ καλή για ζεστό νερό στο επιθυμητό εύρος θερμοκρασίας.

Ο Tiwari (1998) παρουσίασε μια ανάλυση της αποθήκευσης με PCM για ένα θερμοσίφωνα, ενσωματώνοντας την επίδραση της ροής του νερού μέσω μιας παράλληλης πλάκας που τοποθετείται στη επιφάνεια στερεού-υγρού. Προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας κατά τη διάρκεια της νύχτας από την εκτεθειμένη επιφάνεια, δημιουργήθηκε μια διάταξη κινητής μόνωσης που κάλυπτε το σύστημα. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το ζεστό νερό (θερμοκρασία 15-20 °C > θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος) μπορεί να παραμείνει καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας και ότι οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του νερού μειώνονται με την αύξηση της τηγμένης περιοχή του PCM του θερμοσίφωνα.

Ο Font (1994) διεξήγαγε μια προκαταρκτική μελέτη για τη σχεδίαση ενός οικιακού θερμοσίφωνα χρησιμοποιώντας PCM στερεού-στερεού. Η αριθμητική προσομοίωση έχει γίνει χρησιμοποιώντας μονής κατεύθυνσης μοντέλο και επαληθεύεται με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η συμφωνία μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και της προσομοίωσης δείχνει ότι αυτό το μοντέλο είναι διαθέσιμο για τη μελέτη του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας στο PCM προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός της συσκευής.

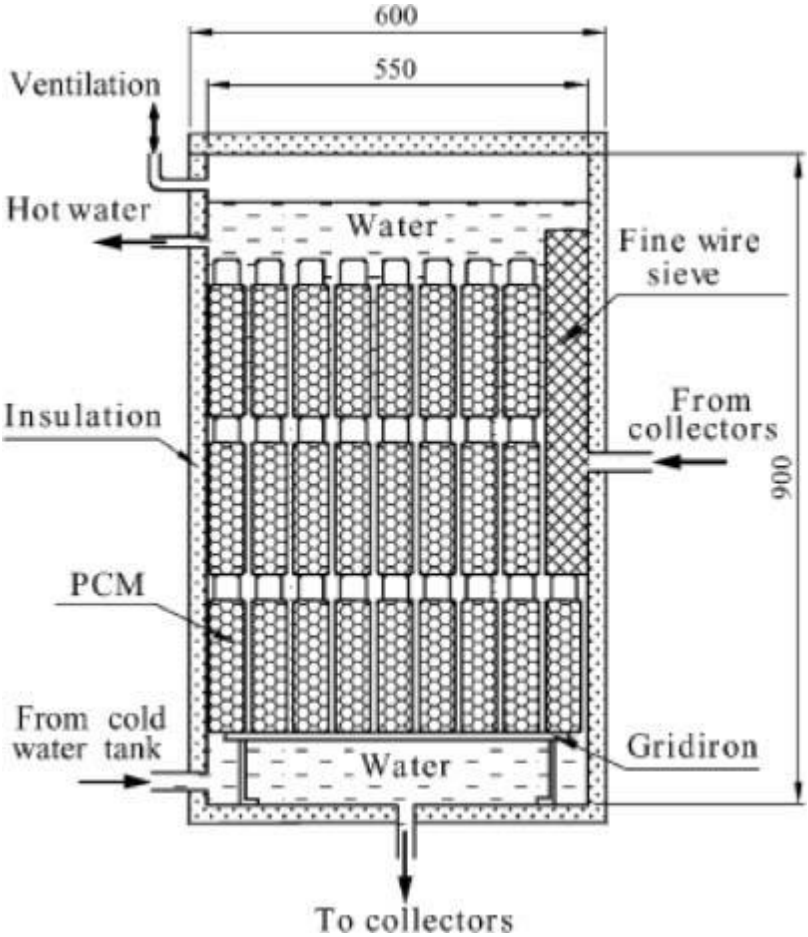
Ο Gu και οι συνεργάτες του (2004) ανέφεραν ότι η παραφίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα σύστημα αποθήκευσης για την ηλιακή θέρμανση του νερού. Οι Baran και Sari (2003) ανέφεραν ότι το εύτηκτο (σημείο τήξης 52,3°C και λανθάνουσα θερμότητα τήξης 182 kJ/kg), του παλμιτικού οξέος (64,2% κ.β.) και του στεατικού οξέος (35.8% κ.β.) είναι κατάλληλο για οικιακές εφαρμογές θέρμανσης νερού.

Ο Kurklu (2002) σχεδίασε, ανάπτυξε και αξιολόγησε τη θερμική απόδοση ενός νέου είδους ηλιακού συλλέκτη νερού-PCM. Ο ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από δύο τμήματα, το ένα γεμάτο με νερό και το άλλο με κερί παραφίνης (50°C) ως PCM όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η θερμοκρασία του νερού υπερέβη τους 55 °C κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας και κρατήθηκε πάνω από τους 30 °C για όλη τη νύχτα. Αυτός ο ηλιακός συλλέκτης νερού-PCM έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών ηλιακών συλλεκτών ζεστού νερού στην Τουρκία όσον αφορά το συνολικό βάρος του συστήματος, το κόστος και τις εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας. [8]



Σχήμα 5.1.4: Ηλιακός θερμοσίφωνας νερού-PCM [8]

Πιο πρόσφατα ο ερευνητής Canbazoglu και η ομάδα του συνέκριναν ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM με τα συμβατικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού. Το ακόλουθο σχήμα δείχνει μια τομή της κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας συνδυασμένη με PCM. [7]

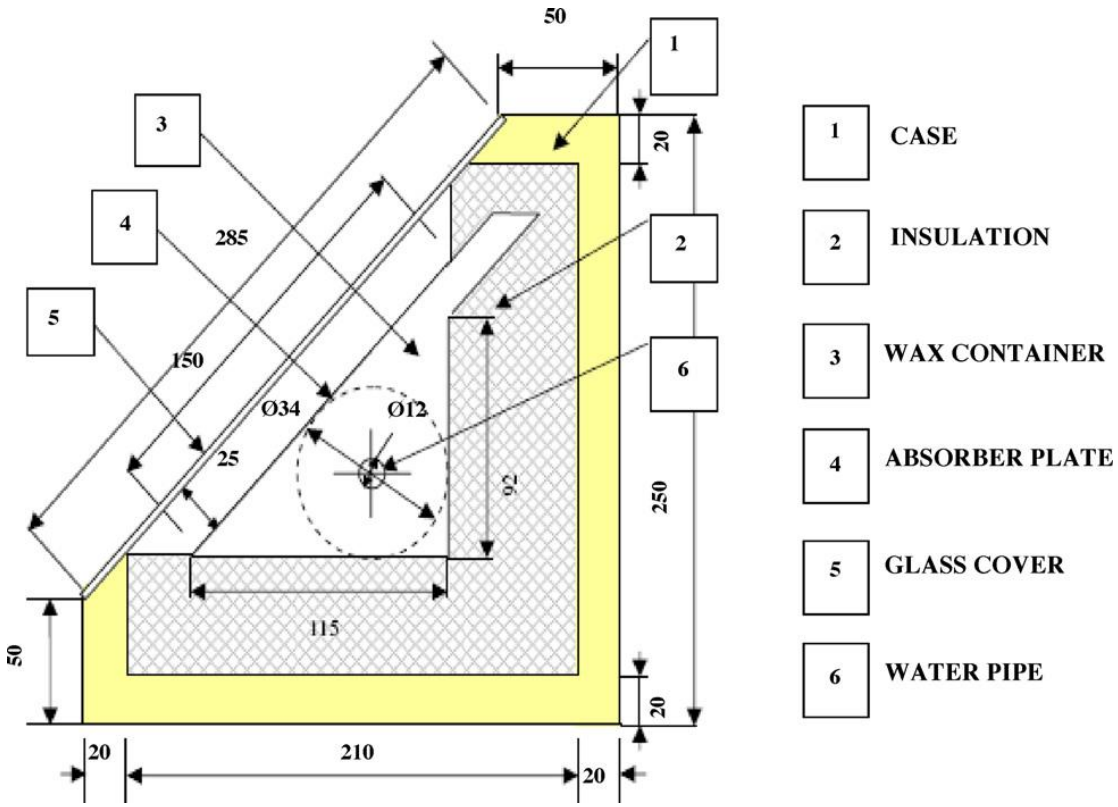


Σχήμα 5.1.5: Τομή κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας συνδυασμένη με PCM [7]

Φιάλες πολυαιθυλενίου γέμισαν με ένα PCM και τοποθετήθηκαν μέσα στη δεξαμενή, σε τρεις σειρές. Η συνολική μάζα του PCM που χρησιμοποιήθηκε στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας ήταν περίπου 180kg. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η θερμοκρασία του νερού έχει μια σταθερή τιμή των 46°C κατά τη διάρκεια της νύχτας μέχρι την ανατολή του ηλίου, καθώς το ζεστό νερό δεν καταναλώνεται. Η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών στο μέσο της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας και στην έξοδο του συλλέκτη της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας με το PCM είναι μεγαλύτερη, με μια κατά μέσο όρο τιμή περίπου 6°C, από ό, τι αυτή του συστήματος χωρίς PCM. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας είναι σημαντική, καθώς παρουσιάζει την υψηλή απόδοση αποθήκευσης θερμότητας του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας με PCM. Ο χρόνος αποθήκευσης του ζεστού νερού, η μάζα του ζεστού νερού που παράγεται για χρήση, και το σύνολο της συσσωρευμένης θερμότητας στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας που περιέχει ορισμένα ένυδρα άλατα ήταν περίπου 2.59-3,45 φορές μεγαλύτερο από αυτόν των συμβατικών συστημάτων ηλιακής ενέργειας με δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας που δεν περιλαμβάνει PCM. Η θερμική απόδοση των ένυδρων αλάτων ως PCM

όπως τα $Na_2S_2O_3.5H_2O$, $Zn(NO_3)_2.6H_2O$, $Na_2HPO_4.12H_2O$, $CaCl_2.6H2O$ και $Na_2SO_4.10H_2O$ εξετάστηκαν θεωρητικά. Το μέγεθος και το σχήμα του δοχείου έχει σημαντική επίδραση στη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία της εκτιθέμενης επιφάνειας προς τον όγκο της, τόσο λιγότερος χρόνος θα απαιτηθεί ώστε η ηλιοφάνεια να θερμάνει την αποθήκη νερού. Για παράδειγμα, για ένα ρηχό ορθογώνιο δοχείο με μεγάλη αναλογία εμβαδού επιφάνειας/όγκο, η προσπίπτουσα ηλιοφάνεια έχει ένα μικρό βάθος νερού για να ζεστάνει. Ωστόσο, μια αποθήκη με μεγάλη περιοχή εκτεθειμένης επιφάνειας θα χάσει επίσης σημαντικά ποσά θερμότητας με συναγωγή και μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία υπό φυσιολογικές συνθήκες και θα κρυώσει σημαντικά από τις απώλειες ακτινοβολίας στο νυχτερινό ουρανό.

Οι ερευνητές Mettawee και Assassa μελέτησαν τη θερμική απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη με συμπαγές υλικό αλλαγής φάσης το οποίο βασίζεται στην αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Σε αυτόν το συλλέκτη, ο απορροφητήρας – δεξαμενή εκτελεί και τη λειτουργία απορρόφησης ηλιακής ενέργειας και τη λειτουργία αποθήκευσής της στο PCM. Κατά τη μελέτη αυτή, η ηλιακή ενέργεια αποθηκευόταν στο κερί παραφίνης που χρησιμοποιήθηκε ως PCM και απορριπτόταν σε κρύο νερό που έρεε σε σωλήνες που βρίσκονταν στο εσωτερικό του κεριού. Η ενεργός επιφάνεια του συλλέκτη ήταν 1 m^2 και ο συνολικός του όγκος ήταν χωρισμένος σε πέντε τμήματα. Η πειραματική αυτή συσκευή είχε σχεδιαστεί για να προσομοιώσει ένα από τα τμήματα του συλλέκτη, με μία συσκευή-απορροφητήρα ενεργού επιφάνειας 0,2 m^2. Διεξήχθησαν εξωτερικά πειράματα για να αποδειχτεί η δυνατότητα εφαρμογής ενός συστήματος που χρησιμοποιεί ένα συμπαγή ηλιακό συλλέκτη για θέρμανση νερού. Καταγράφτηκαν οι θερμοκρασίες του PCM κατά τη διάρκεια των διαδικασιών φόρτισης και αποφόρτισης. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σημειώθηκε κατά τη διαδικασία της φόρτισης. Έγιναν, ακόμη, πειράματα με διαφορετικούς ρυθμούς ροής του νερού από 8,3 έως 21,7kg/h. Μελετήθηκε η επίδραση του διαφορετικού ρυθμού ροής του νερού στο χρήσιμο θερμικό κέρδος. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας υπολογίστηκαν για τη διαδικασία της φόρτισης. Η διάδοση του μετώπου τήξης και στερεοποίησης μελετήθηκε επίσης κατά τη διάρκεια των διαδικασιών φόρτισης και αποφόρτισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι κατά τη διαδικασία φόρτισης, ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται κατακόρυφα με αύξηση του λιωμένου πάχους στρώσης, όσο η φυσική συναγωγή γίνεται εντονότερη. Κατά τη διαδικασία αποφόρτισης, το χρήσιμο θερμικό κέρδος φαίνεται να αυξάνεται καθώς ο ρυθμός ροής της μάζας του νερού αυξάνεται. Η πειραματική διάταξη του συστήματος που περιγράφτηκε παραπάνω φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. [7]



Σχήμα 5.1.6: Πειραματική διάταξη ηλιακού συλλέκτη με συμπαγές υλικό αλλαγής φάσης [7]

Τέλος, ο Cabeza και οι συνεργάτες του κατασκεύασαν μια δοκιμαστική ηλιακή εγκατάσταση στο πανεπιστήμιο της Lleida με σκοπό να ελέγξει την συμπεριφορά των PCM υπό πραγματικές συνθήκες, η οποία θα μπορούσε να λειτουργεί συνεχώς με ηλιακή ενέργεια ή με έναν ηλεκτρικό θερμαντήρα. Η διάταξη της μονάδας αποθήκευσης που υιοθετήθηκε περιλάμβανε τη χρήση αρκετών κυλίνδρων γεμάτων με PCM στην κορυφή μιας δεξαμενής νερού. Αρκετά πειράματα με δύο, τέσσερις και έξι μονάδες PCM διεξήχθησαν στην πραγματική εγκατάσταση. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε σε μορφή σκόνης ήταν σύνθετο με γραφίτη, σύστασης 90% κατ' όγκο οξικού νατρίου 3 μορίων νερού και 10% κατ' όγκο γραφίτη. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ενσωμάτωση μιας μονάδας PCM σε δεξαμενές νερού για οικιακή παροχή ζεστού νερού είναι μια αρκετά υποσχόμενη τεχνολογία που θα επιτρέπει την παροχή ζεστού νερού για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ακόμη και χωρίς την παροχή εξωτερικής ενέργειας ή τη χρήση μικρότερων δεξαμενών για τον ίδιο σκοπό. [7]

5.2 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα

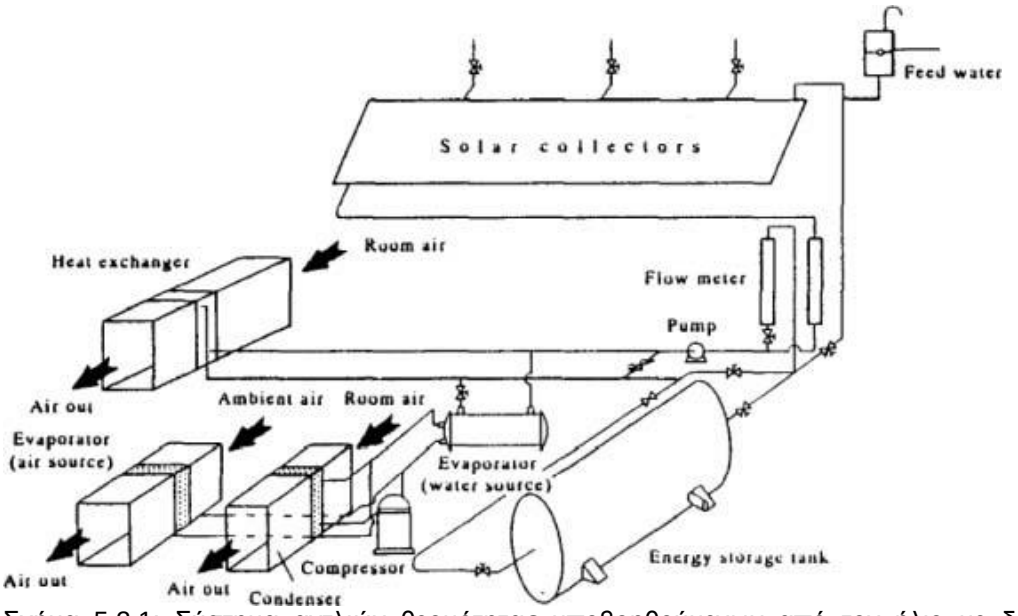
Οι Morrison, Abdel Khalik και Jurinak στις διαφορετικές μελέτες τους αξιολόγησαν τις επιδόσεις συστημάτων αέρα που βασίζονται στην

ηλιακή θέρμανση και χρησιμοποιούν ενεργειακές μονάδες αποθήκευσης με υλικό αλλαγής φάσης. Οι κύριοι στόχοι της εργασίας τους ήταν: α) να προσδιοριστεί η επίδραση της λανθάνουσας θερμότητας και της θερμοκρασία τήξης του PCM στη θερμική απόδοση των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης αέρα και β) να αναπτυχθεί εμπειρικό μοντέλο των σημαντικών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας μέσω αλλαγής φάσης.

Το κύριο συμπέρασμα ήταν ότι το PCM θα πρέπει να επιλέγεται με βάση το σημείο τήξης και όχι τη λανθάνουσα θερμότητα καθώς επίσης και ότι ένα σύστημα αέρα που χρησιμοποιεί θειικό δεκαένυδρο νάτριο ως μέσο αποθήκευσης απαιτεί περίπου το ένα δεύτερο του όγκου αποθήκευσης μιας δεξαμενής νερού.

Οι Ghoneim και Klein σύγκριναν θεωρητικά την απόδοση της αποθήκευσης θερμότητας αλλαγής φάσης και αισθητής θερμότητας σε συστήματα ηλιακής θέρμανσης με αέρα και με νερό. Χρησιμοποίησαν θειικό δεκαένυδρο νάτριο και παραφίνες ως υλικά αλλαγής φάσης και σημείωσαν παρόμοια αποτελέσματα, όπως οι Jurnik και Adbel Khalik. [7]

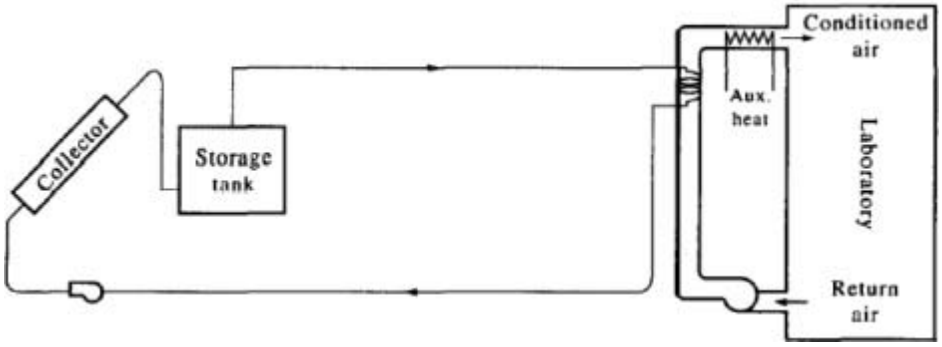
Ο Kaygusuz και οι συνεργάτες του δημιούργησαν ένα πειραματικό μοντέλο για τον προσδιορισμό της απόδοσης ηλιακά υποβοηθούμενων αντλιών θερμότητας, συλλεκτών και δεξαμενών αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την ξήρανση κόκκων. Ο Kaygusuz εξέτασε την απόδοση ενός συστήματος αντλιών θερμότητας διπλής πηγής για τη θέρμανση των κατοικιών, όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.2.1: Σύστημα αντλιών θερμότητας υποβοηθούμενων από τον ήλιο με δεξαμενή αποθήκευσης ενέργειας [8]

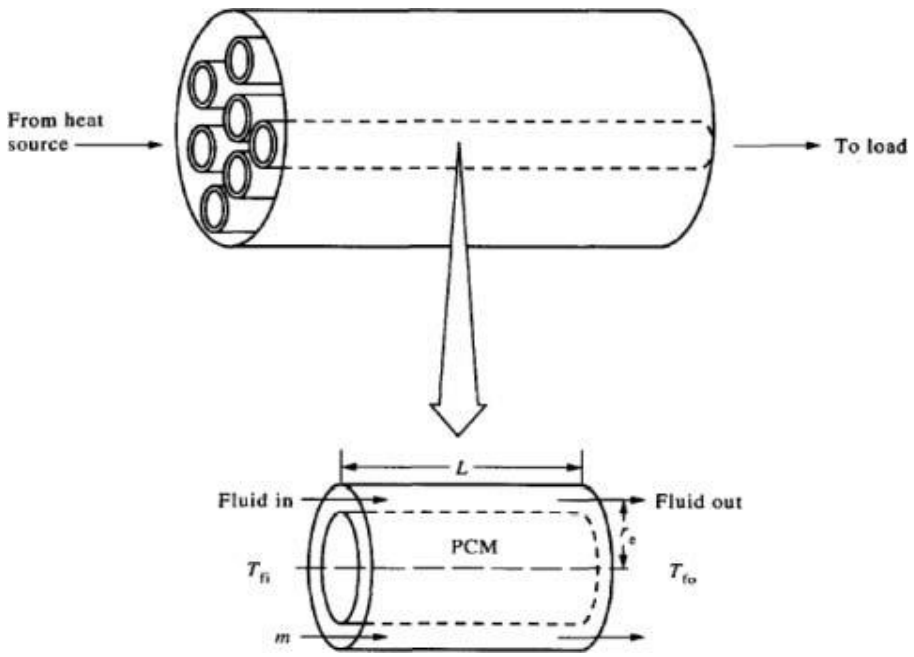
Στη διαμόρφωση της διπλής πηγής ο εξατμιστής έχει σχεδιαστεί να δέχεται ενέργεια από την ατμόσφαιρα. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το σύστημα διπλής πηγής θα μπορούσε να εξοικονομήσει περισσότερη ενέργεια από ό, τι το παράλληλο και το σύστημα σειράς.

Ο Kaygusuz πραγματοποίησε επίσης μια πειραματική και θεωρητική μελέτη για τον προσδιορισμό της απόδοσης της αποθήκευσης με PCM και της διακύμανσης της θερμοκρασίας του ρευστού εξόδου για διαφορετικές τιμές του NTU (αριθμός των μονάδων μεταφοράς της μονάδας αποθήκευσης) για ηλιακά συστήματα θέρμανσης που έχουν σα βάση το νερό. Το σύστημα αυτό περιείχε έναν ηλιακό συλλέκτη, μια δεξαμενή αποθήκευσης ενέργειας, έναν εναλλάκτη θερμότητας, έναν βοηθητικό ηλεκτρικό θερμοσίφωνα, μια αντλία για την κυκλοφορία του νερού καθώς και άλλο εξοπλισμό μέτρησης και ελέγχου, όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.2.2: Σχηματικό διάγραμμα της βάσης του συστήματος ηλιακής ενέργειας [8]

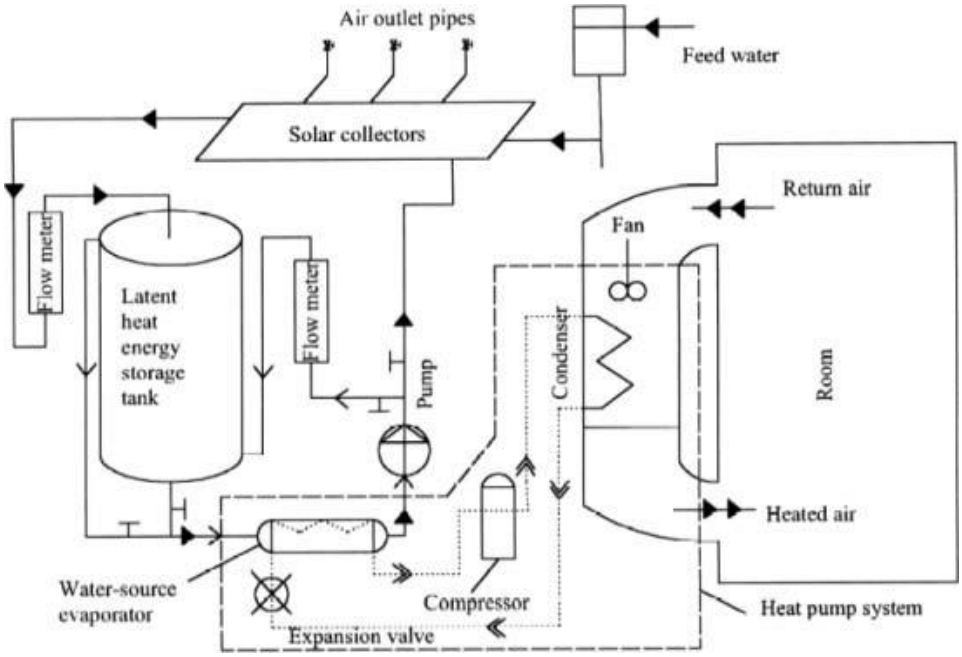
Όποτε η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη, συλλέγεται και μεταφέρεται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης ενέργειας που είναι γεμάτη με 1500 κιλά έγκλειστου PCM σε κάψουλες και το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (νερό) ρέει παράλληλα προς αυτό, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.2.3: Σχηματική διαμόρφωση της δεξαμενής αποθήκευσης λανθάνουσας ενέργειας [8]

Από τις πειραματικές και θεωρητικές έρευνες, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αποθήκευση θερμότητας είναι ένα σημαντικό στοιχείο για συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες και για το σκοπό αυτό ως PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί το $CaCl_2.6H_20$ ή το $Na_2SO_4.10H_2O$ παρέχοντας έτσι μια επιθυμητή εναλλακτική λύση στα συστήματα αποθήκευσης νερού και πέτρας. Η αποθήκευση με PCM είναι προτιμότερη ως πηγή θερμότητας για μια αντλία θερμότητας, επειδή η θερμοκρασία αποθήκευσης ενέργειας του PCM είναι γύρω στους 25-35°C για το $CaCl_2.6H_20$ και το $Na_2SO_4.10H_2O$.

Ο Mehmet αξιολόγησε την θερμική απόδοση μιας κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης που συνδέεται με μια ηλιακή αντλία θερμότητας η οποία χρησιμοποιείται για τη θέρμανση χώρων με μια αντλία θερμότητας. Αυτό το σύστημα σχεδιάστηκε για να θερμάνει μια επιφάνεια $75m^2$, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.4.

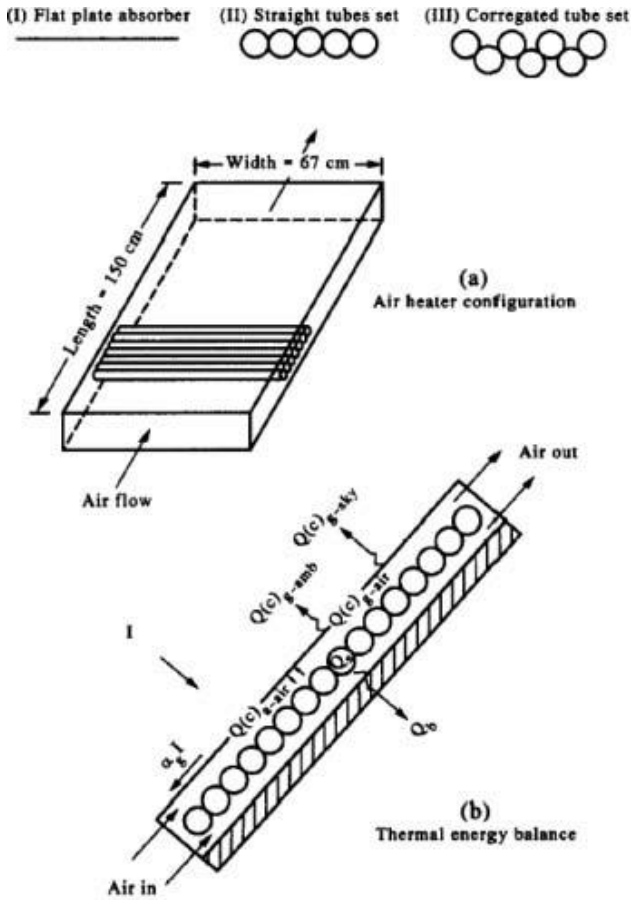


Σχήμα 5.2.4: Σύστημα αντλίας θερμότητας υποβοηθούμενη από τον ήλιο με δεξαμενή αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας [8]

Μια κυλινδρική δεξαμενή αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας συνδέθηκε με ένα ηλιακό συλλέκτη (30 m^2). Η δεξαμενή αποθήκευσης γέμισε με 1090 κιλά καψουλοποιημένου PCM ($CaCl_2.6H_20$). Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, το νερό δέχεται ηλιακή ενέργεια από τον συλλέκτη, θερμαίνεται και πηγαίνει προς την δεξαμενή αποθήκευσης. Μεταφέρει στη συνέχεια κάποια ενέργεια στο PCM μέσα στη δεξαμενή αποθήκευσης. Μετά από αυτή τη διαδικασία, χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας από τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας. Τέλος, αποστέλλεται στον ηλιακό συλλέκτη μέσω της αντλίας για την κυκλοφορία του νερού. Όταν υπάρχει χαμηλή ή καθόλου ηλιακή ακτινοβολία και το φορτίο δεν είναι μηδέν κατά τη διάρκεια της νύχτας και σε συννεφιασμένες μέρες, το κρύο νερό από τον εξατμιστή στέλνεται στη δεξαμενή, αντί για τον συλλέκτη. Το κρύο νερό αφαιρεί θερμότητα από το PCM στη δεξαμενή και ρέει προς τον εξατμιστή για χρήση σαν πηγή θερμότητας. Συνεπώς, το βράδυ και τις συννεφιασμένες μέρες η αποθηκευμένη ενέργεια στη δεξαμενή χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας για την αντλία θερμότητας. Η δεύτερη περίπτωση συμβαίνει όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι διαθέσιμη για τη συλλογή και το φορτίο θερμότητας είναι μηδέν. Σε αυτή την περίπτωση, το ζεστό νερό κυκλοφορεί μεταξύ των συλλεκτών και της δεξαμενής μόνο. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μικρότεροι και λεπτότεροι σωλήνες θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για αποτελεσματικές λειτουργίες θέρμανσης.

Κανονικά, ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης αέρα παρουσιάζει χαμηλή απόδοση και ανεπαρκείς δυνατότητες αποθήκευσης. Ο Fath προσπάθησε να αυξήσει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και

αποτελεσματικότητας με την αντικατάσταση των συμβατικών απορροφητών από σωλήνες διαμέτρου μιας ίντσας οι οποίοι λειτουργούν ως ηλιακοί απορροφητές ενέργειας. Το σχεδιασμένο σύστημα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

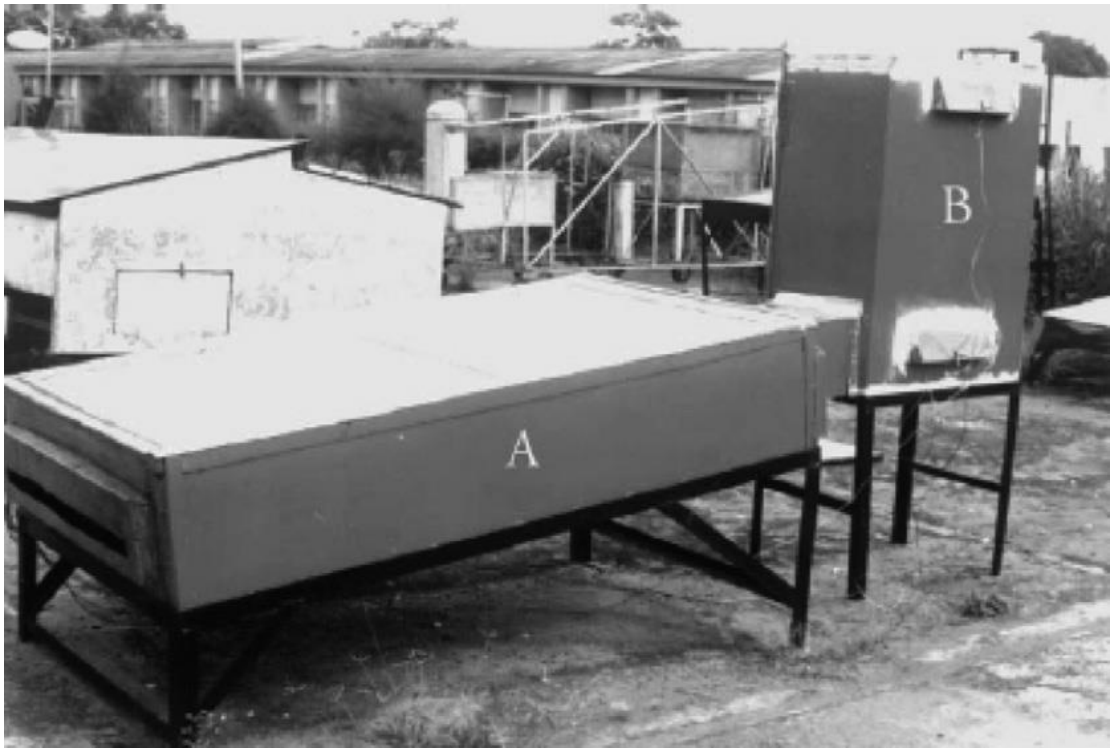


Σχήμα 5.2.5: Σχηματική απεικόνιση ηλιακού θερμαντήρα αέρα με σωλήνες PCM [8]

Οι σωλήνες του απορροφητή του συλλέκτη γέμισαν με θερμομονωτικά υλικά αποθήκευσης ενέργειας (αισθητή θερμότητα: άμμος και λανθάνουσα θερμότητα: παραφίνη $Na_2SO_4.10H_2O$). Τα PCM μπορούν να διατηρήσουν την απορρόφηση της θερμοκρασίας κοντά στο σημείο τήξεως, ενώ η θερμοκρασία του αέρα εξόδου διατηρήθηκε σχεδόν σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα, το οποίο μπορεί να είναι χρήσιμο κατά τη διαδικασία χρησιμοποίησης. Για το σύστημα με ενσωματωμένο PCM, το θερμικό φορτίο παρέχεται για 24 ώρες/ημέρα σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Με το κερί παραφίνης, η θερμοκρασία εξόδου του αέρα διατηρήθηκε 5°C πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος για περίπου 16 ώρες (σχεδόν 4 ώρες μετά το ηλιοβασίλεμα). Η μέση ημερήσια απόδοση με παραφίνη (σημείο τήξης 50°C), είναι περίπου 63,4% σε σύγκριση με το 59% με άμμο ως αποθηκευτικό υλικό και το 38,7% των συμβατικών επίπεδων συλλεκτών. Συνέστησε ότι το $Na_2SO_4.10H_2O$ (σημείο τήξης 32°C)

θα πρέπει να χρησιμοποιείται για χαμηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος και ηλιακής ακτινοβολίας. [8]

Ο Enibe σχεδίασε, ανέπτυξε και αξιολόγησε επιτυχώς έναν ηλιακό θερμοσίφωνα αέρα φυσικής συναγωγής με αποθήκευση ενέργειας σε υλικό αλλαγής φάσης. Η ημερήσια απόδοση του συστήματος σε συνθήκες μηδενικού φορτίου δοκιμάστηκε κάτω από φυσικές συνθήκες περιβάλλοντος οδηγώντας σε μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην περιοχή 19-41°C και καθημερινή παγκόσμια ακτινοβολία στην περιοχή 4,9-19,9MJm^{-2}. Η μέγιστη θερμοκρασιακή αύξηση του θερμαινόμενου αέρα ήταν 15K, ενώ η μέγιστη αθροιστικά ωφέλιμη απόδοση ήταν 50%. Το σύστημα αυτό είναι κατάλληλο για χρήση ως ηλιακός στεγνωτήρας για την καλλιέργεια αρωματικών φυτών, φαρμακευτικών φυτών και άλλων καλλιεργειών, τα οποία δεν απαιτούν άμεση έκθεση στο ηλιακό φως. Ένα τέτοιο σύστημα απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. [7]



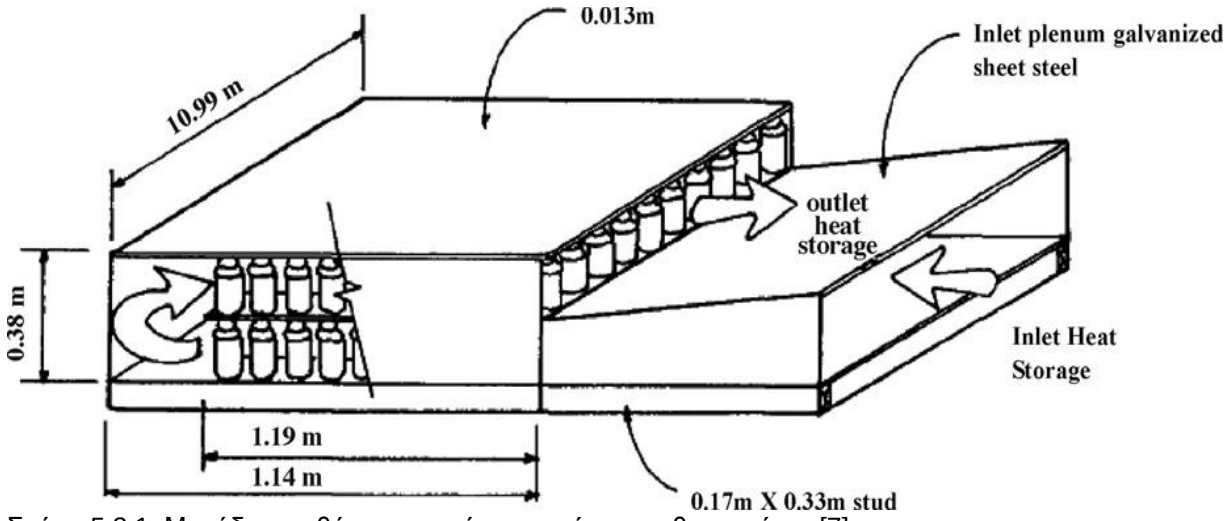
Σχήμα 5.2.6: Φωτογραφία του συστήματος θέρμανσης του αέρα. (Α) Συλλέκτης με υποσυστήματα αποθήκευσης ενέργειας και θέρμανσης αέρα (Β) Θερμαινόμενος χώρος. [7]

Ο Zhou και οι συνεργάτες του εξέτασαν αριθμητικά την απόδοση ενός υβριδικού συστήματος θέρμανσης σε συνδυασμό με θερμική αποθήκευση από σταθεροποιημένου σχήματος πλάκες υλικού αλλαγής φάσης (SSPCM). Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε στο Πεκίνο ένα παθητικό ηλιακό σπίτι άμεσου κέρδους. Η κατασκευή αυτή περιείχε τις πλάκες αυτές (SSPCM) στις εσωτερικές επενδύσεις των τοίχων και της οροφής. Πραγματοποιήθηκε ασταθής προσομοίωση χρησιμοποιώντας

ένα αποδεδειγμένο μοντέλο ενθαλπίας με μια χρονική περίοδο που καλύπτει η θέρμανση το χειμώνα. Δόθηκε πρόσθετη παροχή θερμότητας κατά τις ώρες φόρτισης αργά τη νύχτα και νωρίς το πρωί ή κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας για να διατηρηθεί η ελάχιστη εσωτερική θερμοκρασία του αέρα πάνω από 18°C. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν τη θερμική αποθήκευση στις SSPCM πλάκες, η οποία βελτιώνει το εσωτερικό επίπεδο θερμικής άνεσης και εξοικονομεί περίπου το 47% της χρήσης της ενέργειας κατά τις κανονικές ώρες και τις ώρες αιχμής και το 12% των συνολικής κατανάλωσης ενέργειας το χειμώνα. Αυτό το υβριδικό σύστημα θέρμανσης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει το ηλεκτρικό φορτίο σε μονάδες παραγωγής ενέργειας και να παράσχει σημαντικά οικονομικά οφέλη σε περιοχές όπου ισχύει διαφορετική τιμολογιακή πολιτική ηλεκτρισμού τη νύχτα από την ημέρα. [7]

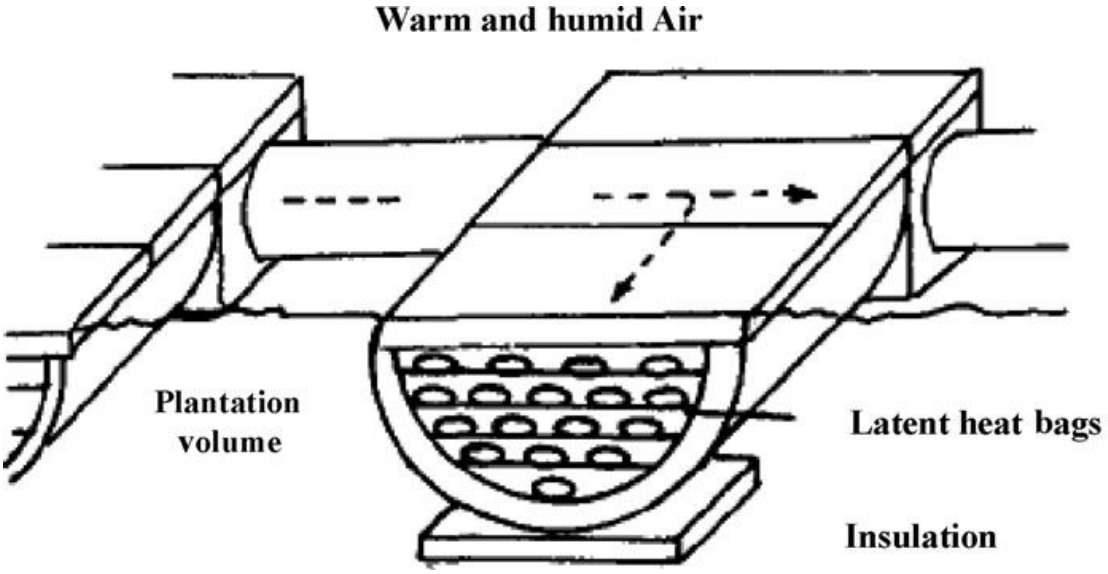
5.3 Ηλιακό θερμοκήπιο [7]

Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε θερμοκήπια για την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας για την ωρίμανση και τη διαδικασία της ξήρανσης και τη φυτική παραγωγή. Οι Kern και Aldrich χρησιμοποίησαν 1650kg $CaC_{12}\cdot 6H_2O$ σε δοχεία αεροζόλ με βάρος 0,74 κιλά το καθένα για να διερευνήσουν τις δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας τόσο εντός όσο και έξω από ένα θερμοκήπιο επιφάνειας 36m^2 που καλύπτεται με δέσμη φύλλων Tedlar επικαλυμμένα με λεπτό υαλόνημα. Κάψουλες με PCM ήταν τοποθετημένες σε ένα δοχείο σε απόσταση 22,86 χιλιοστά και δύο δοχεία, με διαφορετικές ποσότητες PCM, το ένα μέσα και το άλλο έξω από το θερμοκήπιο. Ενώ η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο θερμοκήπιο μπορούσε να συλλέγει θερμό αέρα από την κορυφή του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας, η κατεύθυνση της ροής του αέρα αντιστρεφόταν κατά τη διαδικασία απελευθέρωσης ενέργειας το βράδι. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.3.1: Μονάδα αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο θερμοκήπιο [7]

Οι Hung και Toksoy είχαν σχεδιάσει και κατασκευάσει ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με δύο διαφορετικές διαμορφώσεις βάσης και ο αέρας εμπλεκόταν ως αναπόσπαστο μέρος του συστήματος ηλιακού θερμοκηπίου. Εμπορικές κυλινδρικές ράβδοι αποθήκευσης χρησιμοποιήθηκαν ως πρωτογενή στοιχεία αποθήκευσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα σχεδιασμένα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας ενέργειας επιδείκνυαν σημαντικά υψηλότερη συμπαγή χωρητικότητα αποθήκευσης από την αποθήκευση σε νερό. Αποκαλύφθηκε ακόμη ότι οι σπειροειδείς ράβδοι της μονάδας αποθήκευσης είχαν καλύτερη απόδοση από τις σταυρωτές ράβδους. Χρησιμοποιώντας υλικό αλλαγής φάσης, διεξήχθησαν πειράματα σε θερμοκήπιο μόνο με τζάμι και επιφάνεια 500 m^2 για την παραγωγή τριαντάφυλλων στη Γαλλία. Η ηλιακή θερμότητα που εκλυόταν στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μεταφερόταν και αποθηκεύονταν με ανακύκλωση του αέρα μέσα από υπόγειους επίπεδους εναλλάκτες θερμότητας που είναι γεμάτοι με PCM. Η απόδοση του ηλιακού θερμοκηπίου με αποθήκευση PCM συγκρίθηκε με ένα παραδοσιακό θερμοκήπιο όμοιας γεωμετρίας που παράγει το ίδιο φυτό. Το θερμοκήπιο που χρησιμοποιούσε PCM μπορούσε να πετύχει εξοικονόμηση αέριου προπανίου της τάξεως του 80% σε σύγκριση με το παραδοσιακό θερμοκήπιο με την ίδια θερμοκρασία. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

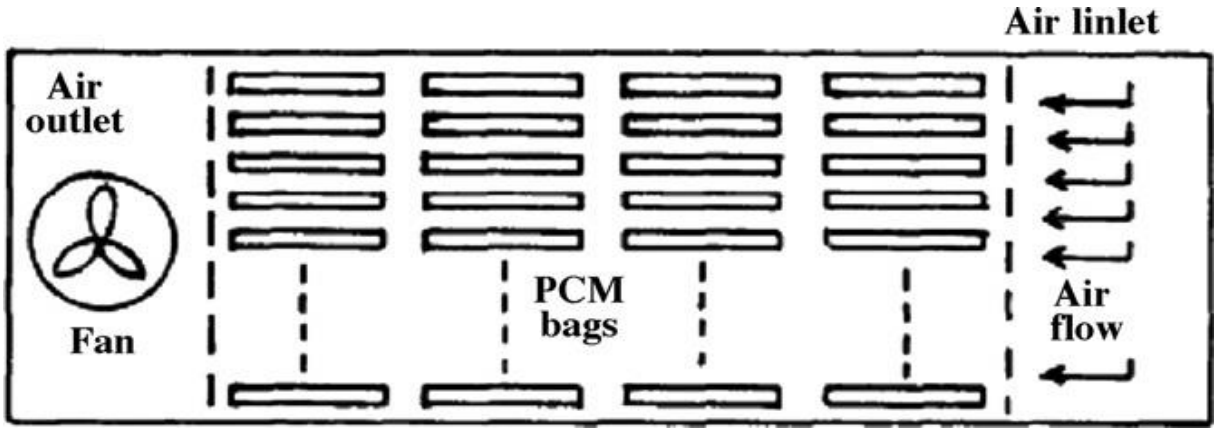


Σχήμα 5.3.2: Υπόγειο τούνελ με PCM [7]

Το υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορεί επίσης να στοιβάζεται σε ράφια σε ένα θερμοκήπιο που θερμαίνεται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία. Στο σύστημα αυτό, ο ζεστός αέρας κυκλοφορεί στο θερμοκήπιο μέσω της αποθήκευσης για να αυξάνεται ο ρυθμός φόρτισης/αποφόρτισης του PCM. Η αποθηκευμένη θερμότητα

χρησιμοποιείται τις ώρες που δεν έχει ήλιο προκειμένου να διατηρείται η επιθυμητή θερμοκρασία στο θερμοκήπιο.

Οι Nishina and Takakura χρησιμοποίησαν ως υλικό αλλαγής φάσης το $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ με διάφορες προσμίξεις για να αποτρέψουν το φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων και κατ' επέκταση τη μειωμένη απόδοση θερμότητας σε θερμοκήπιο στην Ιαπωνία. Έτσι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι απελευθερώθηκε το 40-60% της λανθάνουσας θερμότητας του PCM, γεγονός που υποδείκνυε ότι σχεδόν το μισό PCM δε χρησιμοποιήθηκε επαρκώς κατά τη διαδικασία ανταλλαγής θερμότητας. Η πειραματική τους διάταξη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



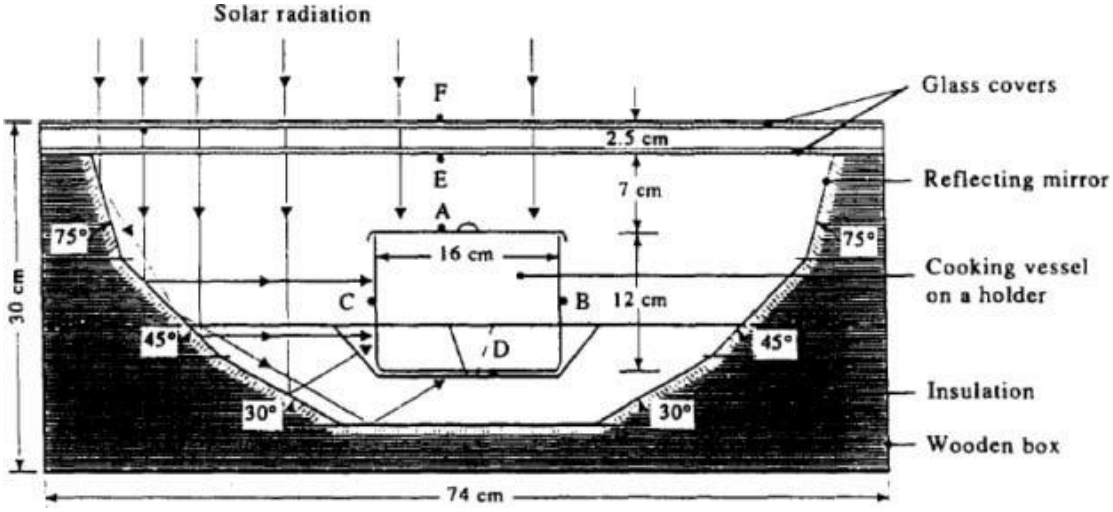
Σχήμα 5.3.3: Γενική εικόνα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας αλλαγής φάσης σε θερμοκήπιο [7]

Οι Takakura και Nishina δοκίμασαν τη πολυαιθυλενογλυκόλη και το $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ως υλικά αλλαγής φάσης για θέρμανση σε θερμοκήπιο επιφάνειας 7,2m^2. Συνέκριναν τα συμβατικά θερμοκήπια με θερμοκήπια αποθήκευσης τύπου PCM. Η αποδοτικότητα ενός συστήματος θερμοκηπίου με αποθήκευση PCM και με ηλιακό συλλέκτη ήταν 59%. Αυτό ήταν σε θέση να διατηρήσει 8^oC μέσα στο θερμοκήπιο τη νύχτα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία έπεφτε στους -0,6^oC. Αναπτύχθηκε ένα σύστημα ελέγχου με μικροϋπολογιστή με σκοπό τον πιο ακριβή και πιο εξελιγμένο έλεγχο για τα ηλιακά συστήματα του θερμοκηπίου.

5.4 Ηλιακοί φούρνοι

Μια από τις σημαντικότερες χρήσεις της ηλιακής ενέργειας είναι στη μαγειρική χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους ηλιακών φούρνων. Η χρήση αυτών των ηλιακών φούρνων είναι περιορισμένη, καθώς το μαγείρεμα των τροφίμων δεν είναι δυνατό το βράδυ. Αν σε έναν ηλιακό φούρνο παρέχεται αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας, η χρησιμότητα και η αξιοπιστία αυτών των ηλιακών φούρνων θα αυξηθεί. Λίγες μελέτες έχουν γίνει με υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε μια ηλιακή κουζίνα που μαγειρεύει το φαγητό αργά το βράδυ. [7]

Ο Domanski και οι συνεργάτες του έχουν μελετήσει τη χρήση ενός PCM, ως μέσο αποθήκευσης για έναν τύπο ηλιακού φούρνου που έχει σχεδιαστεί για να μαγειρεύει το φαγητό αργά το βράδυ ή και κατά τη διάρκεια ωρών χωρίς ηλιοφάνεια. Το δοχείο μαγειρέματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

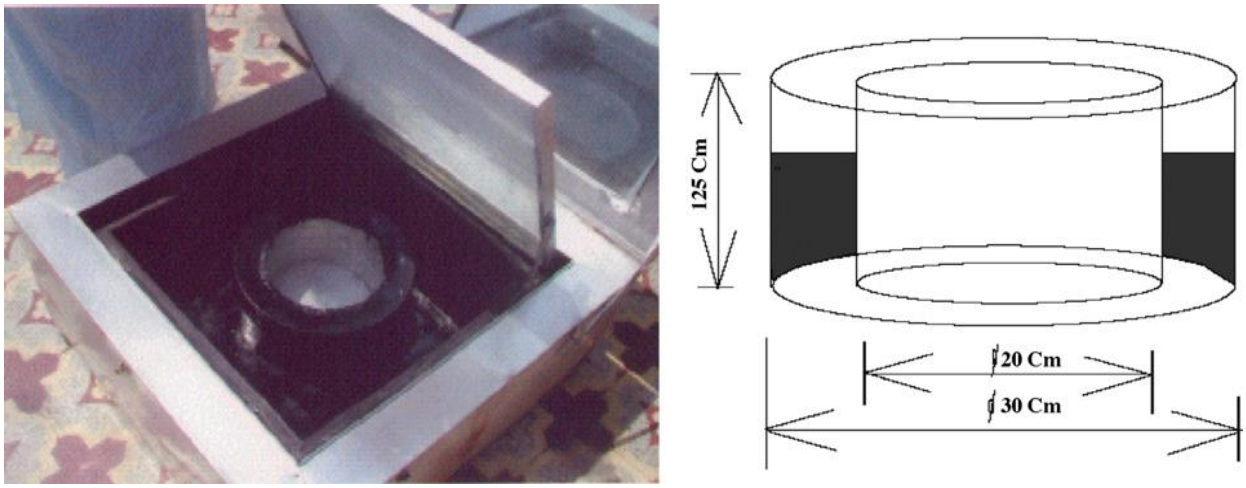


Σχήμα 5.4.1: Ηλιακό σκεύος σχεδιασμένο από τον Domanski [8]

Δύο ομόκεντρα κυλινδρικά δοχεία, κατασκευασμένα από αλουμίνιο, συνδέονται μεταξύ τους στο πάνω μέρος τους, χρησιμοποιώντας τέσσερις βίδες για να σχηματίσουν ένα διπλού τοιχώματος δοχείο με ένα κενό μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών τοιχωμάτων. Αυτό το κενό καλύπτεται από ένα αφαιρούμενο κάλυμμα αλουμινίου στο οποίο τρεις κυκλικές τρύπες ανοίγονται με τρυπάνι για να επιτραπεί η εισαγωγή των θερμοζευγών και επομένως η άμεση οπτικοποίηση κατά την πλήρωση ή την αφαίρεση των PCM. Ένα κυκλικό κάλυμμα αλουμινίου χρησιμοποιείται ως πώμα για το εσωτερικό δοχείο. Οι εξωτερικές επιφάνειες του εξωτερικού δοχείου και τα καλύμματα είναι βαμμένα με συνηθισμένο μαύρο χρώμα για μέγιστη απορρόφηση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας. Το κενό μεταξύ των εξωτερικών και των εσωτερικών δοχείων είναι γεμάτο με 1,1kg στεατικού οξέος, 95% καθαρό, ή 2 κιλά εξαένυδρου νιτρικού μαγνησίου, 99% καθαρό, που αφήνει επαρκή χώρο για την επέκταση των PCM κατά τη τήξη. Επιπλέον, ανέφεραν ότι η απόδοση εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία, τη μάζα του μέσου, που είναι για μαγείρεμα και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM. Η συνολική απόδοση του σκεύους κατά τη διάρκεια αποφόρτισης διαπιστώθηκε ότι ήταν τρεις έως τέσσερις φορές μεγαλύτερη από αυτή των ηλιακών σκευών ατμού και των σωληνώσεων θέρμανσης, που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για εσωτερικό μαγείρεμα. Σε έναν τέτοιο τύπο σχεδιασμού, το ποσοστό της μεταφοράς θερμότητας από το PCM στο μαγειρικό σκεύος είναι αργή,

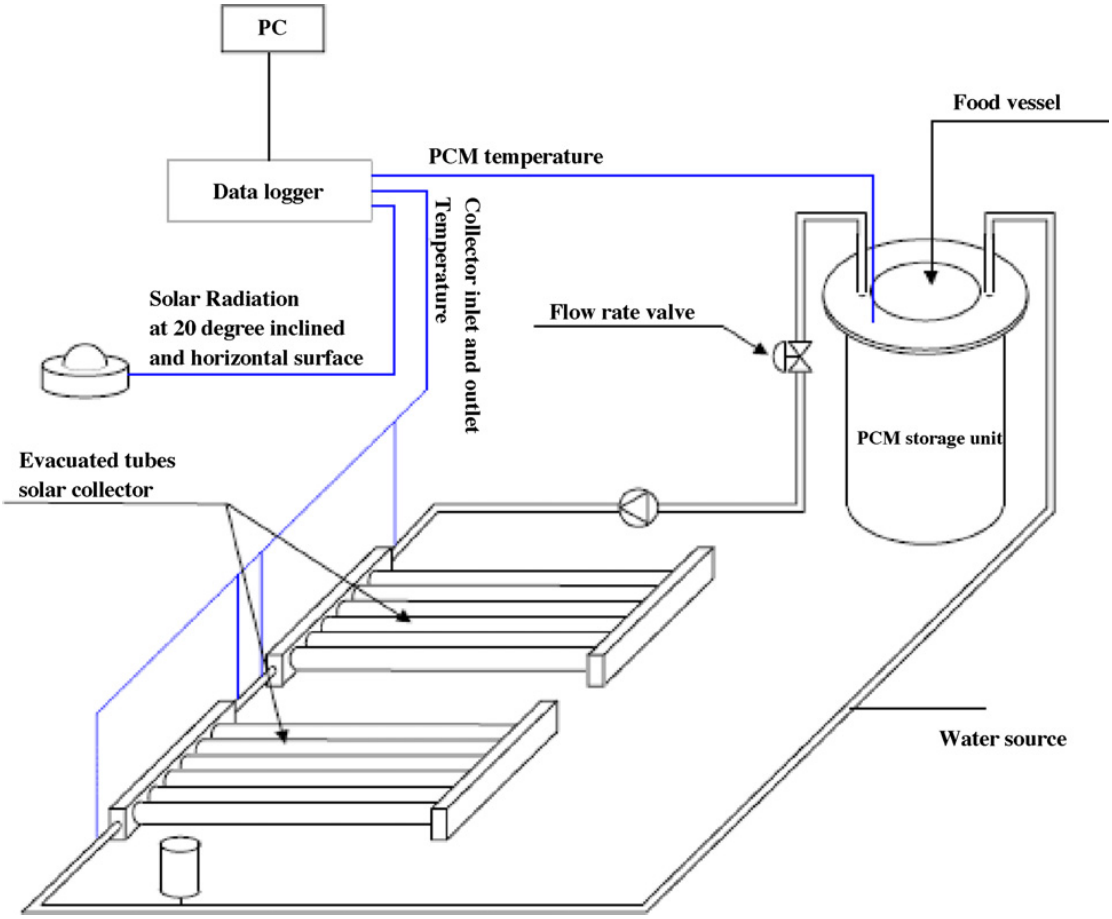
και περισσότερος χρόνος απαιτείται για το μαγείρεμα του βραδινού γεύματος. [8]

Οι Buddhi και Sahoo τοποθέτησαν ένα είδος στεατικού οξέος κάτω από την απορροφητική πινακίδα ενός ηλιακού φούρνου. Ο Sharma και οι συνεγάτες του ανέπτυξαν μια μονάδα αποθήκευσης PCM με ακεταμίδιο για έναν τύπο ηλιακής κουζίνας για το μαγείρεμα φαγητού αργά το βράδυ. Πρότειναν ότι η θερμοκρασία τήξης του PCM θα πρέπει να είναι μεταξύ 105 και 110°C για το μαγείρεμα το βράδυ. Αργότερα, ο Buddhi και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν μια μονάδα αποθήκευσης με ακετανιλίδιο για έναν τύπο ηλιακού φούρνου για την αποθήκευση μεγαλύτερης ποσότητας θερμότητας μέσω PCM, έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται τρεις ανακλαστήρες για να απορροφάται περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο γενικά σε ένα τύπο ηλιακού φούρνου χρησιμοποιείται μόνο ένας ανακλαστήρας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας τύπος ηλιακού φούρνου.



Σχήμα 5.4.2: Σχηματικό διάγραμμα του πλαισίου ενός ηλιακού φούρνου με αποθήκευση [7]

Ο Sharma και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν ερυθριτόλη ως υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για ηλιακό φούρνο που βασίζεται σε ηλιακό συλλέκτη απομονωμένου σωλήνα. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. [7]



Σχήμα 5.4.3: Διάγραμμα του πρωτοτύπου ηλιακού φούρνου με βάση απομονωμένου σωλήνα ηλιακού συλλέκτη που έχει μονάδα αποθήκευσης PCM [7]

5.5 Ηλεκτρονικά εξαρτήματα

5.5.1 *Τηλεπικοινωνίες*

Οι εξοπλισμοί του παγκόσμιου συστήματος κινητών επικοινωνιών ή τηλεπικοινωνιών περιέχουν μηχανήματα και ηλεκτρονικά εξαρτήματα τα οποία είναι υπεύθυνα για την εύρυθμη λειτουργία του αντίστοιχου δικτύου. Τέτοια εξαρτήματα περιέχουν εξεζητημένα ηλεκτρονικά κυκλώματα, ιδιαίτερα ακριβά και καταναλωτικά από άποψης ενέργειας, όπως επίσης και πολύ ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Πολλά από αυτά είναι διασκορπισμένα ανά την επικράτεια για την κατά τόπους ενίσχυση και σωστή διανομή του σήματος του δικτύου. Το καλύτερο δυνατό σημείο τοποθέτησης των περιβλημάτων, που περιέχουν τέτοια μηχανήματα, είναι σε ανοιχτούς χώρους όπως π.χ. κοιλάδες και υψώματα όπως π.χ. βουνά. Έτσι λοιπόν, είναι συνήθως τοποθετημένα σε πρόσβασιμες μεν περιοχές, αλλά μακριά από κατοικημένους χώρους, οπότε είναι δύσκολη η συνεχής παρακολούθηση της θερμοκρασιακής τους κατάστασης. Επιπλέον, οι περιοχές αυτές είναι συνήθως εκτεθειμένες στη βροχή, την υγρασία, τη σκόνη, τους ρύπους, σε σημαντικές ημερήσιες και ετήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, σε

μεγάλες διακυμάνσεις του ηλιακού θερμικού φορτίου καθώς επίσης και σε φυσική κακοποίηση. Τα PCM έχουν βρει εφαρμογή και σε αυτά τα συστήματα. [34]

Οι Marongiu και Clarksean σχεδίασαν και ανέπτυξαν έναν εναλλάκτη θερμότητας PCM για τη θερμική διαχείριση τέτοιων ηλεκτρονικών περιβλημάτων. Αυτοί οι εναλλάκτες θερμότητας κατασκευάζονται από δέσμες σωλήνων αλουμινίου στους οποίους περιλαμβάνονται ενσωματωμένα σε κάψουλες υλικά αλλαγής φάσης. Κατά τη διάρκεια των συνθηκών ενεργοποίησης, αέρας από το περίβλημα ρέει μέσω του εναλλάκτη θερμότητας, έτσι ώστε το PCM να αποθηκεύσει ενέργεια αλλάζοντας φάση, και αργότερα, κατά τη διάρκεια συνθηκών απενεργοποίησης, αέρας από έξω χρησιμοποιείται για τη αφαίρεση της θερμότητας από τον εναλλάκτη θερμότητας.

Ένα στοιχείο του εξοπλισμού που επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, που περιγράφονται από ένα εύρος θερμοκρασιών από -40°C έως +50°C, είναι οι μπαταρίες. Ειδικότερα η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας σχετίζεται άμεσα με το εφαρμοζόμενο φορτίο, καθώς επίσης και τη σωστή επαναφόρτιση, περισσότερο απ'όλα όμως από τη θερμοκρασία της μπαταρίας, η οποία πρέπει να διατηρείται σε βέλτιστες συνθήκες. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται για λόγους εφεδρείας συνήθως αποθηκεύονται σε προσκολλημένους θαλάμους ή μέσα σε καμπίνες εξωτερικού χώρου. Αυτά τα διαμερίσματα εκτίθενται σε ηλιακά φορτία και πρέπει να διατηρούνται σε βέλτιστες θερμοκρασίες, 77F (25°C), όπως ορίζεται από τους κατασκευαστές. Επιπλέον, τα διαμερίσματα αυτά πρέπει να επιτρέπουν τον καλό αερισμό αναθυμιάσεων υδρογόνου που μπορεί να εκλυθούν από τις μπαταρίες κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Το jacket μπαταρίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, είναι μια παθητική προσέγγιση για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των φορτίων αιχμής θερμότητας την ημέρα. Η χρήση των PCM επιτρέπει στα φορτία θερμότητας να απορροφούνται κατά τη διάρκεια της ημέρας και να απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της νύχτας ενώ στη θερμοκρασία του PCM, κατά τη διάρκεια του κύκλου αλλαγής φάσης, να μένει σταθερή. Μονώνοντας τις μπαταρίες με αυτό το PCM, οι μπαταρίες μπορούν να διατηρηθούν σε μια πιο σταθερή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια ενός ημερήσιου κύκλου. [35]

Σχήμα 5.5.1: Jacket μπαταρίας για εξωτερικό χώρο τηλεπικοινωνιών [35]

5.5.2 *Ηλεκτρονικοί υπολογιστές* [36]

Τα υλικά αλλαγής φάσης ενδείκνυνται και για την ψύξη των επεξεργαστών των ηλεκτρονικών υπολογιστών, καθώς αποτελούν προϊόντα αρκετά ανεπτυγμένα τα οποία αντικαθιστούν πλήρως τα μεταλλικά πτερύγια ψύξης του επεξεργαστή. Παρόλο που το κόστος τους είναι αρκετά αυξημένο, λόγω κυρίως του μικρού μεγέθους τους, η λειτουργία τους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και συμφέρουσα από οικονομικής πλευράς, και ειδικά για αυξημένο αριθμό επεξεργαστών ο οποίος οδηγεί σε αυξημένα απαιτούμενη ισχύ για τη λειτουργία του, άρα και σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα.

Αρκετά πρωτότυπη και έξυπνη είναι η ιδέα ανάπτυξης μίας εύκαμπτης επιφάνειας πάχους 8-10mm, η οποία περιέχει υλικό αλλαγής φάσης στο εσωτερικό της και προορίζεται για χρήση σε φορητούς υπολογιστές. Η λειτουργία της είναι πολύ απλή: απλώς τοποθετείται ο φορητός υπολογιστής επάνω της και το προϊόν αναλαμβάνει να απορροφήσει μεγάλο μέρος των θερμικών φορτίων που αναπτύσσονται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας του Η/Υ. [36]

5.6 <u>Συσκευασία και μεταφορά αγαθών</u> [16]

Την τελευταία δεκαετία, η εφαρμογή των PCM σε δοχεία μεταφοράς έγινε μία από τις πρώτες πλήρως εμπορικές εφαρμογές PCM καθώς εξασφαλίζει τη μεταφορά αγαθών, τα οποία είναι ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και απαιτούν πολύ συγκεκριμένα και στενά θερμοκρασιακά πλαίσια κατά τη μεταφορά τους, χωρίς να είναι απαραίτητη η σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής.

Οι εφαρμογές των PCM σε δοχεία μεταφοράς καλύπτουν πολλά διαφορετικά πεδία, όπως η μεταφορά και η αποθήκευση νωπών ή μαγειρευτών φαγητών, κρύων ή ζεστών ποτών, φαρμακευτικά

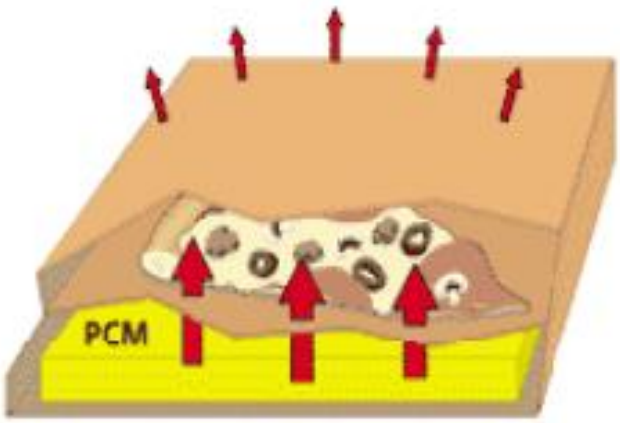
προϊόντα, βιοϊατρικά προϊόντα και πολλά άλλα. Το τεράστιο πλεονέκτημα των PCM είναι ότι μπορούν να απορροφήσουν ή να αποδώσουν μεγάλα ποσά θερμότητας σχεδόν ισοθερμοκρασιακά. Είναι προφανές ότι ανάλογα με τις θερμοκρασιακές απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής επιλέγεται και το υλικό με το αντίστοιχο σημείο τήξης.

5.6.1 *Δοχεία για τρόφιμα και ποτά*

Μία από τις πιο γνωστές εφαρμογές των PCM είναι η μεταφοράς των θερμοκρασιακά ευαίσθητων τροφίμων σε δοχεία. Τα δοχεία αυτά πρέπει να διατηρούνται στο ψυγείο-καταψύκτη πριν από τη χρήση, προκειμένου να στερεοποιούνται τα PCM σε αυτά. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας συσκευής είναι το δοχείο που εμπορευματοποιείται η Sofrigam με σημεία τήξεως των PCM στους 0°C, -15°C, και -20°C. Αυτά τα δοχεία μπορεί να είναι άκαμπτα ή μαλακά. Ορισμένες μόνο εταιρείες εμπορεύονται μαξιλαράκια PCM τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κρατήσουν τα προϊόντα ζεστά ή κρύα κατά τη μεταφορά.

Σχήμα 5.6.1.1: Σκληρά και μαλακά δοχεία από τη Sofrigam [16]

Σε πολλές εφαρμογές τροφοδοσίας, μαγειρεμένα γεύματα παράγονται σε ένα σημείο και πρέπει να μεταφερθούν σε άλλο τόπο όπου και καταναλώνονται. Μερικά παραδείγματα είναι μεταφορές τυριών, σαλατών, κατεψυγμένων επιδορπίων, ειδών ζαχαροπλαστικής ή ψαριών. Δοχεία PCM θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να αποφευχθεί η διάσπαση της κρύας αλυσίδας κατά τη διάρκεια της μεταφοράς προμαγειρευμένων γευμάτων όπως φουά-γκρα, καπνιστού σολομού, γαλακτοκομικών, παγωτού, και πολλών άλλων. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας εφαρμογής που έχει ήδη εμπορευματοποιηθεί είναι ο θερμαντήρας πίτσας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι κύριες εταιρείες που εμπορεύονται τέτοια δοχεία είναι η Rubitherm, η Climator και η Teap PCM.



Σχήμα 5.6.1.2: Θερμαντήρας πίτσας [16]

Μια ακόμη εφαρμογή που έχει εμπορευματοποιηθεί είναι το λεγόμενο «ισοθερμικό μπουκάλι νερού», ειδικά σχεδιασμένο για ποδηλασία. Πρόκειται για ένα διπλού τοιχώματος μπουκάλι με ενσωματωμένο PCM. Η ιδέα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλά άλλα ποτά, όπως η ισοθερμική συντήρηση του κρασιού, της σαμπάνιας, των αναψυκτικών, κ.λ.π.

Σχήμα 5.6.1.3: Το ισοθερμικό μπουκάλι νερού, διαθέσιμο στην αγορά [16]

5.6.2 Ιατρικά προϊόντα

Στον ιατρικό τομέα, μία από τις κύριες εφαρμογές είναι η μεταφορά του αίματος και των οργάνων. Τα δοχεία που χρησιμοποιούνται για αυτούς τους σκοπούς λειτουργούν παρόμοια με εκείνα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά τροφίμων. Η διατήρηση μιας χαμηλής θερμοκρασίας είναι ζωτικής σημασίας κατά τη μεταφορά των ευπαθών σε

θερμοκρασίες ανθρώπινων οργάνων ή του ανθρώπινου αίματος. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των PCM στις εφαρμογές αυτές είναι η μεγάλη αξιοπιστία τους, καθώς στις εφαρμογές αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μην εμφανίζεται διακύμανση της θερμοκρασίας.

Σχήμα 5.6.2: Σύστημα μεταφοράς αίματος με PCM [16]

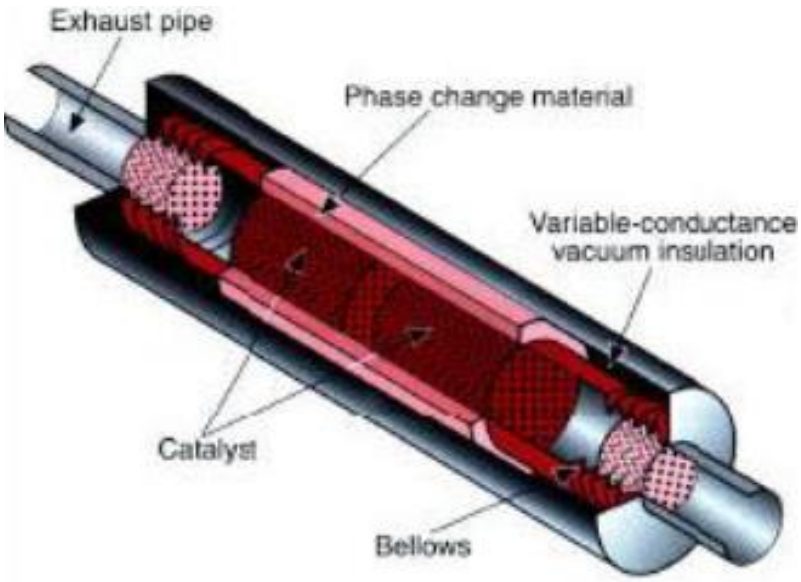
5.7 Οχήματα

Τα υλικά αλλαγής φάσης με τις αξιοσημείωτες δυνατότητες βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς διαφόρων συστημάτων που παρουσιάζουν εφαρμόζονται με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και στον τομέα των οχημάτων. Αρκετά ενδιαφέροντα στοιχεία προκύπτουν από την αυτοκινητοβιομηχανία, στα πλαίσια της οποίας έχουν γίνει δοκιμές με τα υλικά αυτά σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

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

Μία ακόμη εφαρμογή των PCM είναι στο σύστημα εξαγωγής του οχήματος. Με τη χρήση των υλικών αυτών διατηρείται ο καταλύτης στη θερμοκρασία σχεδιασμού, ελαττώνοντας με τον τρόπο αυτό τις αναγκαστικά αυξημένες εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων κατά το ξεκίνημα του κρύου κινητήρα. Ο καταλύτης (καταλυτικός

μετατροπέας) μετατρέπει μέσω οξείδωσης χάρη στα ευγενή μέταλλα που περιέχει (Ρόδιο, Παλλάδιο, Λευκόχρυσο) τα μονοξείδια του αζώτου και του άνθρακα από την καύση του καυσίμου στον κύλινδρο, σε λιγότερο βλαβερά και σίγουρα όχι δηλητηριώδη διοξείδια. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει η θερμοκρασία του καταλύτη να είναι πολύ υψηλή, καθώς για την εν λόγω χημική διαδικασία η μεγάλη θερμοκρασία είναι απαραίτητος παράγοντας. Αυτή όμως η θερμοκρασία δεν αναπτύσσεται άμεσα κατά την εκκίνηση του αυτοκινήτου, αλλά μετά από λίγα λεπτά. Έχει παρατηρηθεί ότι κατά την περίοδο της «κρύας εκκίνησης» εκλύεται το 60%-80% των τοξικών καυσαερίων. [37]



Σχήμα 5.7: PCM σε καταλύτη αυτοκινήτου [38]

Τέλος, τα PCM χρησιμοποιούνται για την παραγωγή καλυμμάτων στα καθίσματα των αυτοκινήτων. Για τις εσωτερικές εφαρμογές των αυτοκινήτων χρησιμοποιούνται παραφίνες λόγω της υψηλής χωρητικότητας αποθήκευσης της θερμότητας, της έλλειψης τοξικότητας και διαβρωτικότητας και του χαμηλού κόστους. Οι παραφίνες ενσωματώνονται σε μικροκάψουλες και εφαρμόζονται σε μια υφαντική μήτρα. [39]

5.8 Θερμική ένδυση [39]

Τα υλικά αλλαγής φάσης σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα προσαρμόζονται στην θερμικά λειτουργική ρύθμιση της απόδοση των υφασμάτων με PCM μεταβάλλοντας την κατάσταση της συσσωμάτωσης σε ένα καθορισμένο θερμοκρασιακό εύρος. Εφαρμογές των PCM σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα περιλαμβάνουν είδη ένδυσης, κουβέρτες, ιατρικές εφαρμογές, προστατευτικά ρούχα και πολλά άλλα. Τα παρακάτω είναι μερικές από τις εφαρμογές των PCM στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας.

5.8.1 *Διαστημικές στολές*

Η τεχνολογία χρησιμοποιεί υλικά αλλαγής φάσης, τα οποία αναπτύχθηκαν αρχικά για την παραγωγή διαστημικών στολών και γαντιών για την προστασία των αστροναυτών από το τσουχτερό κρύο, όταν βρίσκονταν στο διάστημα. Τα υλικά αλλαγής φάσης παρείχαν στους αστροναύτες άνεση στο διάστημα.

5.8.2 *Ρούχα και εσώρουχα*

Ξεκινώντας από τις διαστημικές στολές, σήμερα οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης έχουν επεκταθεί στα ρούχα και γενικότερα στα υφάσματα. Χρησιμοποιούνται σε στολές που εκτίθενται σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα σε πυροσβεστικές, ορειβατικές και αγωνιστικές (F1) στολές. Η χρήση τους όμως έχει εξαπλωθεί και σε καθημερινά.

Στα ενδύματα χρησιμοποιούνται κυρίως οργανικά υλικά αλλαγής φάσης σε μικροκάψουλες, για να μην εμφανίζονται διαρροές κατά τη μετάβαση στην υγρή φάση. Τα υλικά αυτά όταν προστίθενται στις υφασμάτινες ίνες ή ανάμεσα στα στρώματα των ενδυμάτων, μπορούν να ελαττώσουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και να αυξήσουν τη θερμοχωρητικότητα του ενδύματος περίπου 10 φορές.

Σχήμα 5.8.2: Εμπορικά ενδύματα ενισχυμένα με PCM [40]

5.8.3 *Υποδήματα και αξεσουάρ*

Σήμερα τα PCM χρησιμοποιούνται επίσης και σε υποδήματα, ειδικές μπότες του σκι, μπότες ορειβασίας, μπότες ειδικές για αγώνες αυτοκινήτων, κλπ. Η τεχνολογία των PCM αντιδρά άμεσα στις αλλαγές τις θερμοκρασίας τόσο του εξωτερικού ενδύματος όσο και του

σώματος. Τα θερμορυθμιζόμενα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα μπορούν να απορροφήσουν, να αποθηκεύουν, να αναδιανείμουν και να απελευθερώσουν τη θερμότητα προκειμένου να εμποδίσουν δραστικές αλλαγές στο κεφάλι, το σώμα, τα χέρια και τα πόδια αυτού που τα φοράει. Στην περίπτωση των μποτών του σκι, το PCM απορροφά τη θερμότητα, όταν τα πόδια παράγουν υπερβολική θερμότητα, και τη στέλνει πίσω όταν τα πόδια κρυώσουν. Αυτό διατηρεί τα πόδια άνετα. Οι μπότες του σκι και τα παπούτσια του γκολφ είναι μερικά από τα προϊόντα που χρησιμοποιούνται PCM.

Σχήμα 5.8.3: Κάλτσες και γάντια ενισχυμένα με PCM [40]

5.8.4 *Κλινοσκεπάσματα*

Ενσωματωμένες μικροκάψουλες σε παπλώματα, μαξιλάρια και στρώματα καλύπτουν τη διασφάλιση του ενεργού ελέγχου της θερμοκρασίας του κρεβατιού. Όταν αυξηθεί η θερμοκρασία του σώματος, η πρόσθετη θερμική ενέργεια απορροφάται και το σώμα κρυώνει. Όταν η θερμοκρασία του σώματος πέφτει, η αποθηκευμένη ενέργεια απελευθερώνεται και το σώμα διατηρείται έτσι ζεστό.

5.8.5 *Ιατρικές εφαρμογές*

Τα PCM μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε ιατρικές εφαρμογές. Ειδικότερα υφάσματα με μικροκάψουλες PCM όπως περιγράφηκαν παραπάνω μπορούν να εφαρμοστούν σε χειρουργικά ενδύματα, σε υλικά κλινοσκεπασμάτων ασθενών, σε επιδέσμους και γενικά σε προϊόντα για τη ρύθμιση των θερμοκρασιών των ασθενών σε μονάδες εντατικής θεραπείας.

Μία ακόμη εφαρμογή για ιατρικούς σκοπούς είναι ένα ειδικό στρώμα για τα τραπέζια των εγχειρήσεων, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποφευχθεί η μείωση της θερμοκρασίας του σώματος σε μεγάλης διάρκειας εγχειρήσεις, ή κατά τη διάρκεια εγχειρήσεων ανθρώπων με σοβαρά εγκαύματα. Το στρώμα θερμαίνεται ηλεκτρικά πριν από τη χρήση του (το PCM θα είναι με μια θερμοκρασία τήξης περίπου 37°C),

και θα απελευθερώνει τη θερμότητα κατά την εγχείριση. Τέλος, ζεστά ή κρύα μαξιλαράκια, ως μια άλλη ιατρική εφαρμογή, χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση του τοπικού πόνου.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6. Περιγραφή της εφαρμογής- Αρχικοί υπολογισμοί

6.1 Παρουσίαση της εφαρμογής

Σκοπός της παρούσας εφαρμογής είναι η εξέταση της αποδοτικότητας στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης (PCM) ενσωματωμένου σε κάψουλες σε τοίχο νότιου, ανατολικού, δυτικού και βόρειου προσανατολισμού, ο οποίος φορτίζεται εξωτερικά. Αρχικά για κάθε τοίχο μελετάται η συμπεριφορά του PCM και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε αυτό όταν το στρώμα του PCM βρίσκεται από την έξω πλευρά του τοίχου και η μόνωση από μέσα ενώ στη δεύτερη περίπτωση το στρώμα του PCM είναι στη μέσα πλευρά του τοίχου και η μόνωση από έξω.

Θεωρούμε λοιπόν 4 εξωτερικούς τοίχους τύπου G1 στην περιοχή της Αθήνας με διαστάσεις μήκος x πλάτος x ύψος = (10m)x(10m)x(3m). Για την πρώτη περίπτωση, η διαστρωμάτωση κάθε τοίχου τύπου G1 από μέσα προς τα έξω διαμορφώνεται ως εξής: ως πρώτο στρώμα του τοίχου έχει ληφθεί σοβάς πάχους 20mm, αμέσως μετά τούβλο πάχους 90mm και στη συνέχεια μόνωση 40mm. Έπειτα έχει θεωρηθεί στρώμα PCM πάχους 30mm. Αμέσως μετά το στρώμα του PCM υπάρχει τούβλο 90mm και τέλος σοβάς 20mm. Ενώ για τη δεύτερη περίπτωση η διαστρωμάτωση είναι η εξής: αρχικά σοβάς πάχους 20mm, αμέσως μετά τούβλο 90mm, έπειτα τοποθετείται στρώμα PCM πάχους 30mm, στη συνέχεια μόνωση 40mm, στη συνέχεια τούβλο 90mm και τέλος σοβάς 20mm. Επιπλέον, το πάχος της μόνωσης παίρνει και άλλες τιμές κατά τη διάρκεια της μελέτης 0mm, 20mm, 60mm και 80mm.

Έτσι με αυτόν τον τρόπο μελετάται η συμπεριφορά του PCM και ειδικότερα οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει καθ’ όλη τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας όταν σε αυτό επιδρούν διάφοροι παράγοντες όπως η αλλαγή του μήνα μελέτης, η αλλαγή του πάχους της μόνωσης, η αμοιβαία αλλαγή του στρώματος PCM και της μόνωσης καθώς επίσης και η αλλαγή προσανατολισμού του τοίχου που περιέχει το PCM.

6.2 Υπολογισμός άμεσης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας Gb, διάχυτης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας Gd και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου G_T [41]

Για τον υπολογισμό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας G_T χρησιμοποιούμε τις σχέσεις της άμεσης G_b και της διάχυτης G_d προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

$$\boldsymbol{Gb = Mt + At\ sin(\frac{360}{365} \times D - Pt)} \qquad (6.1)$$

$$\boldsymbol{Gd = mt + at\ sin(\frac{360}{365} \times D - pt)} \qquad (6.2)$$

- όπου οι συντελεστές Mt, At, Pt, mt, at, pt δίνονται από τον παρακάτω πίνακα για τις ώρες 07.00-18.0, ο οποίος βρίσκεται στη σελίδα 27 του βιβλίου Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα.

t [hrs]	Mt	At	Pt	Mt	At	Pt
07.00	0,007	0,046	86,18	0,048	0,111	81,23
08.00	0,057	0,068	87,31	0,134	0,127	82,45
09.00	0,119	0,104	87,94	0,208	0,133	83,94
10.00	0,191	0,129	88,31	0,261	0,129	85,6
11.00	0,258	0,153	89,35	0,283	0,117	86,05
12.00	0,319	-0,18	-88,9	0,271	0,095	82,71
13.00	0,342	-0,19	-89,2	0,243	0,081	81,95
14.00	0,325	0,183	87,21	0,21	0,083	87,23
15.00	0,269	0,166	86,22	0,176	0,087	89,53
16.00	0,183	0,147	82,1	0,141	-0,09	-88,2
17.00	0,078	0,131	79,85	0,104	-0,08	-89
18.00	-0,03	0,114	77,36	0,051	0,091	86,79

Πίνακας 6.2.1: Τιμές των συντελεστών για τον υπολογισμό των Gb και Gd.

- D=1÷365 μέρες του τυπικού έτους

Τους παραπάνω τύπους αντικαθιστούμε στην σχέση:

$$\boldsymbol{G\tau = GbRb + Gd\left(\frac{1+cos\beta}{2}\right) + (Gb + Gd)\rho(\frac{1-cos\beta}{2})} \qquad (6.3)$$

- όπου ρ είναι η ανακλάστικότητα του εδάφους, που για συνηθισμένο έδαφος έχει τιμή ρ=0.2

- β=90°, εφόσον ο τοίχος πάνω στον οποίο προσπίπτει είναι κατακόρυφος

- $$\boldsymbol{Rb} = \frac{\boldsymbol{sin\delta\, sin(\varphi-\beta)+cos\delta\, cos(\varphi-\beta)\, cos\omega}}{\boldsymbol{sin\delta\, sin\varphi+cos\delta\, cos\varphi\, cos\omega}} \qquad (6.4)$$

Για επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο και είναι στραμμένες προς το νότο (αζιμούθιο επιφάνειας γ=0°)

- *φ=37,97^o* γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας
- ωριαία γωνία ω, υπολογίζεται από τη σχέση ω=0,25x(min από το ηλιακό μεσημέρι)
- ηλιακή απόκλιση δ, υπολογίζεται από τη σχέση $\delta = 23{,}45 sin\,(\frac{360(284+n)}{365})$, όπου n ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους δηλαδή n=1÷365

Οι υπολογισμοί έγιναν με το πρόγραμμα Excel για την 21^η κάθε μήνα και για τους δώδεκα μήνες του χρόνου, για τον Νότιο προσανατολισμό. Τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα G_b, G_d, G_T συναρτήσει της ώρας παρατίθενται παρακάτω:

- Για την 21^η Ιανουαρίου έχουμε:

Ώρες	**Gb (kw/m^2)**	**Gd (kw/m^2)**	**G_T(kw/m^2)**
7	-0,034843	-0,048632	-0,006311
8	-0,005391	0,022140	0,013284
9	0,023107	0,089257	0,106366
10	0,071736	0,144193	0,222846
11	0,115512	0,176672	0,308217
12	0,148479	0,187122	0,366035
13	0,159575	0,171994	0,382546
14	0,157181	0,133874	0,379038
15	0,117937	0,094878	0,326478
16	0,053952	0,060584	0,233162
17	-0,034428	0,029616	0,017769
18	-0,120196	-0,032162	0,123393

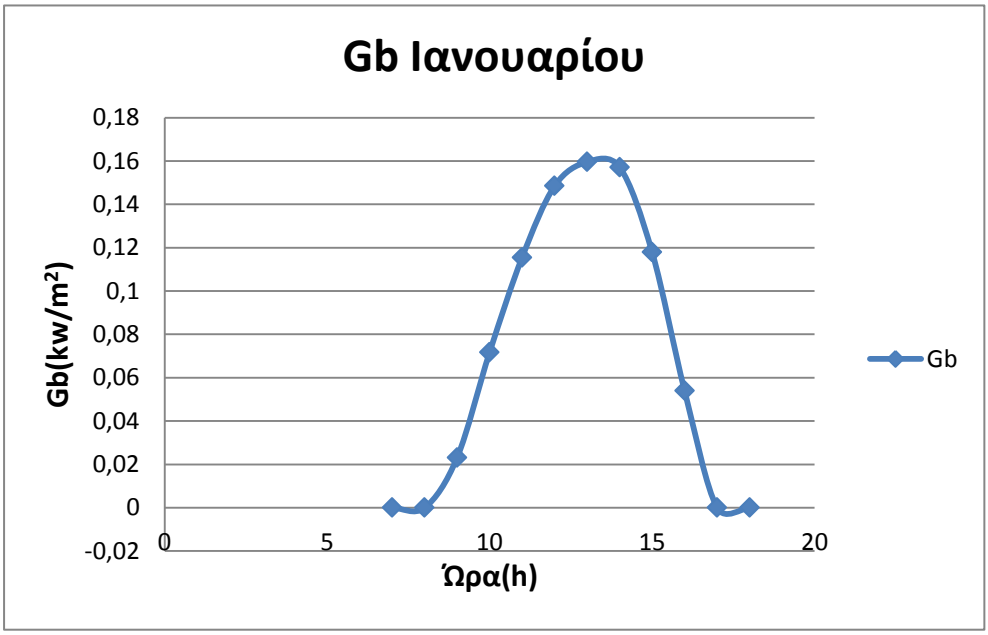
Πίνακας 6.2.2: Άμεση Gb , διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για της 21 Ιανουαρίου.

Όπως είναι εύκολο να παρατηρήσουμε μερικές τιμές δεν είναι λογικές. Διότι παραδείγματος χάρη δεν είναι δυνατόν να υπάρχουν αρνητικές.

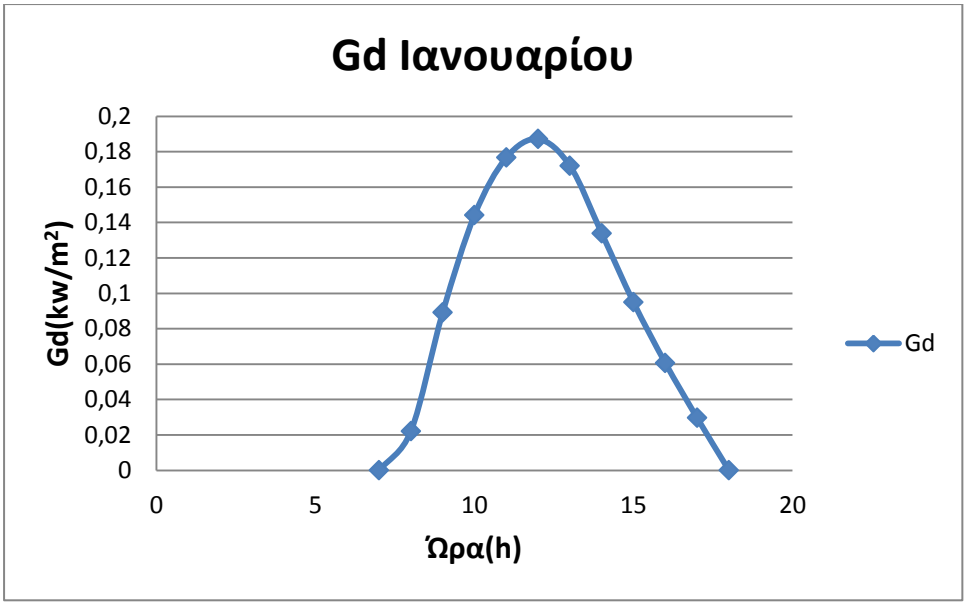
Έτσι αυτές οι τιμές απορρίπτονται και στη θέση τους βάζουμε μηδέν.
Η ενέργεια αυτή, δηλαδή η απαλοιφή των μη λογικών τιμών γίνεται και για τους υπόλοιπους μήνες και οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται κατευθείαν διορθωμένοι. Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

Ώρες	Gb(kw/m^2)	Gd(kw/m^2)	G_T(kw/m^2)
7	0	0	0
8	0	0,02214	0,013284
9	0,023107	0,089257	0,106366
10	0,071736	0,144193	0,222846
11	0,115512	0,176672	0,308217
12	0,148479	0,187122	0,366035
13	0,159575	0,171994	0,382546
14	0,157181	0,133874	0,379038
15	0,117937	0,094878	0,326478
16	0,053952	0,060584	0,233162
17	0	0,029616	0,017769
18	0	0	0

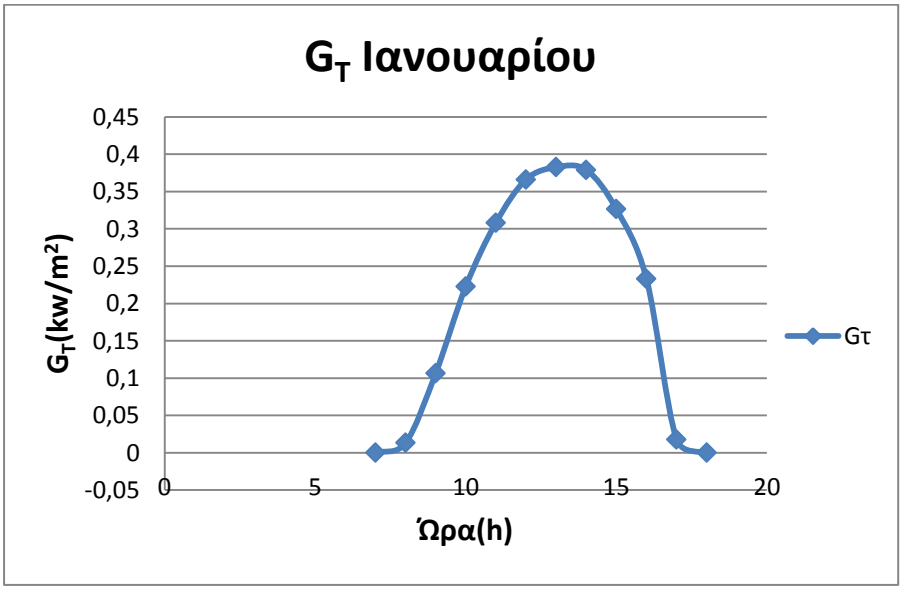
Πίνακας 6.2.3: Άμεση Gb , διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για την 21^{η} Ιανουαρίου.



Σχήμα 6.2.1: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιανουαρίου.



Σχήμα 6.2.2: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιανουαρίου.



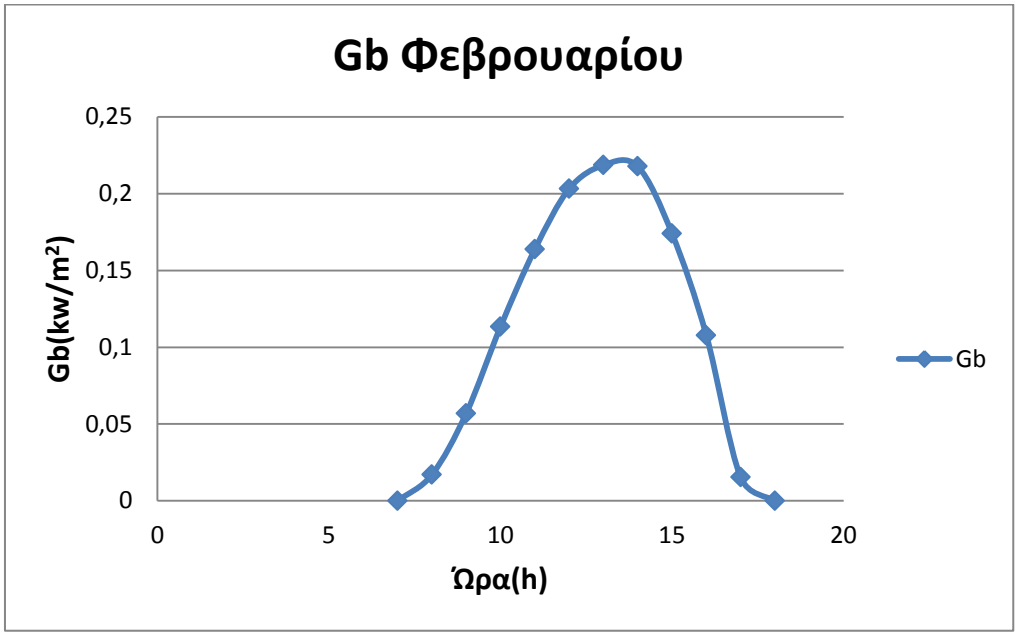
Σχήμα 6.2.3: Μεταβολή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιανουαρίου.

- Για την 21η Φεβρουαρίου έχουμε:

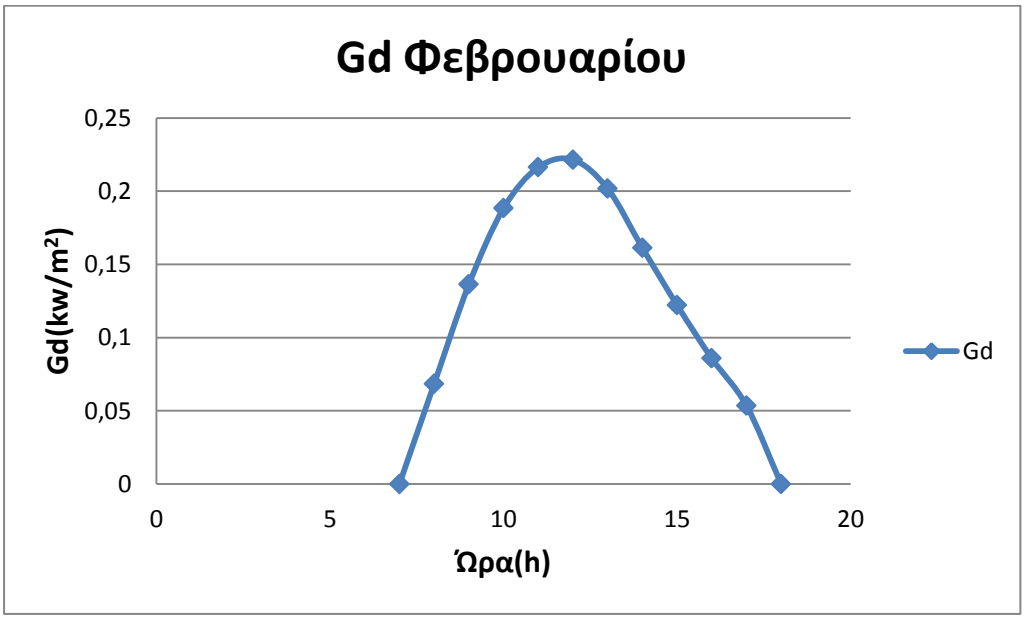
Ώρες	Gb(kw/m^2)	Gd(kw/m^2)	G_T(kw/m^2)
7	0	0	0
8	0,017009	0,068282	0,071847
9	0,056916	0,136241	0,165093
10	0,113326	0,188282	0,264134
11	0,163673	0,21629	0,33896
12	0,203062	0,221472	0,389159

13	0,218516	0,201692	0,400295
14	0,217636	0,161281	0,387073
15	0,173947	0,122148	0,328016
16	0,107703	0,085772	0,246985
17	0,015367	0,053492	0,093639
18	0	0	0

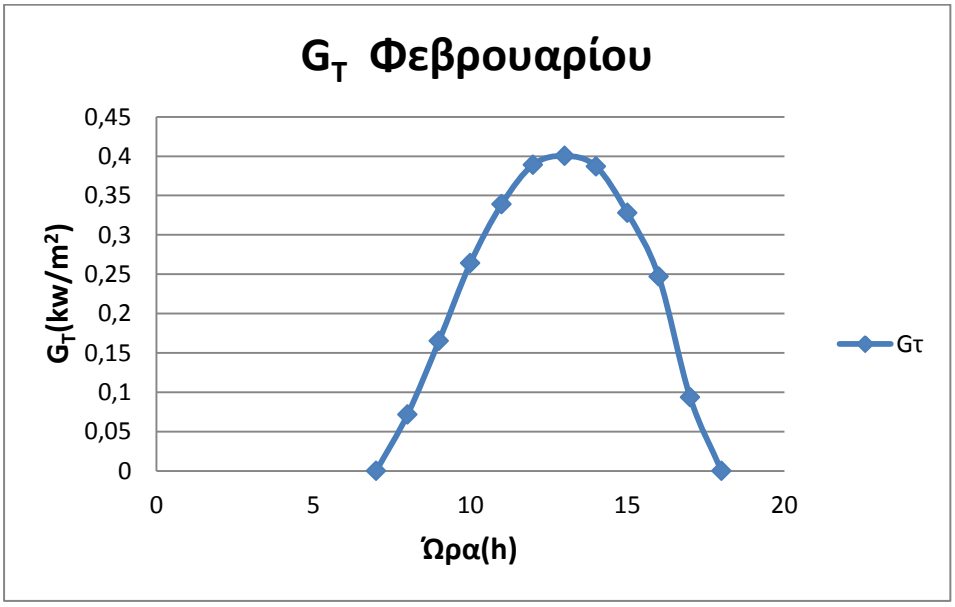
Πίνακας 6.2.4: Άμεση Gb, διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για την 21η Φεβρουαρίου.



Σχήμα 6.2.4: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Φεβρουαρίου.



Σχήμα 6.2.5: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Φεβρουαρίου.

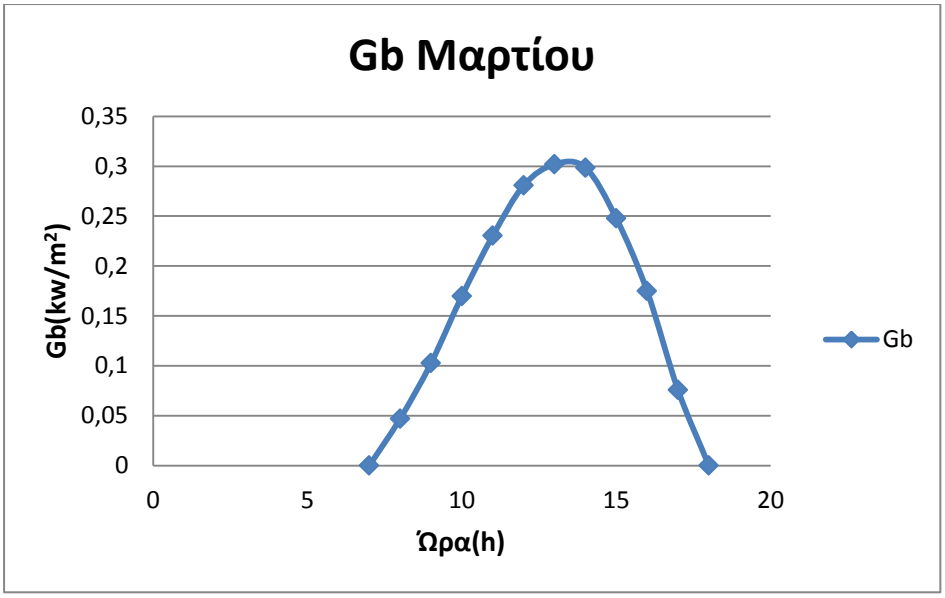


Σχήμα 6.2.6: Μεταβολή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Φεβρουαρίου.

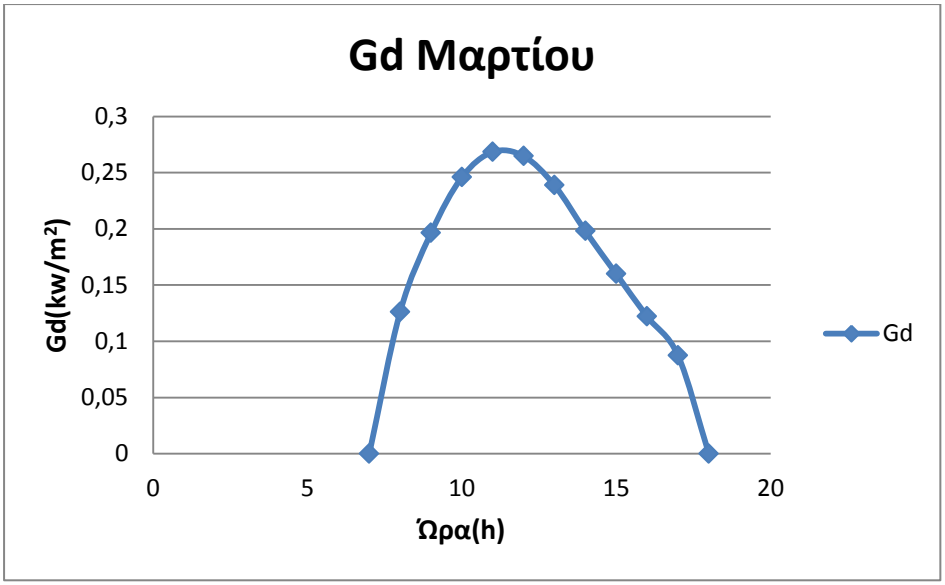
- Για την 21η Μαρτίου έχουμε:

Ώρες	Gb(kw/m^2)	Gd(kw/m^2)	G_T(kw/m^2)
7	0	0	0
8	0,047059	0,126145	0,118442
9	0,102666	0,196325	0,210243
10	0,169918	0,245959	0,299978
11	0,23026	0,268446	0,367218
12	0,280701	0,264694	0,409992
13	0,301944	0,238696	0,413546
14	0,298564	0,197981	0,386577
15	0,247862	0,159958	0,319166
16	0,174805	0,122015	0,232023
17	0,075837	0,087405	0,123317
18	0	0	0

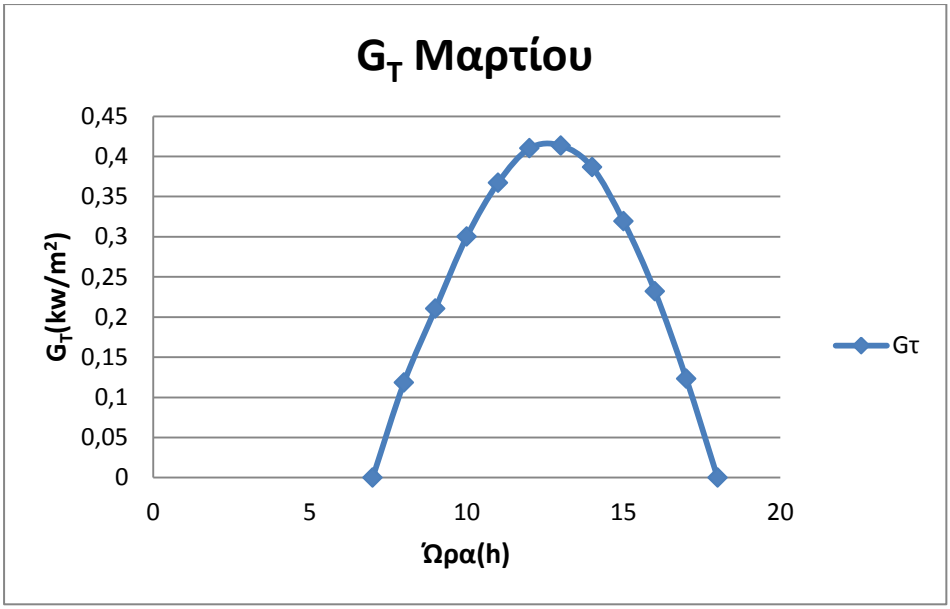
Πίνακας 6.2.5: Άμεση Gb, διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για την 21η Μαρτίου.



Σχήμα 6.2.7: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαρτίου.



Σχήμα 6.2.8: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαρτίου.

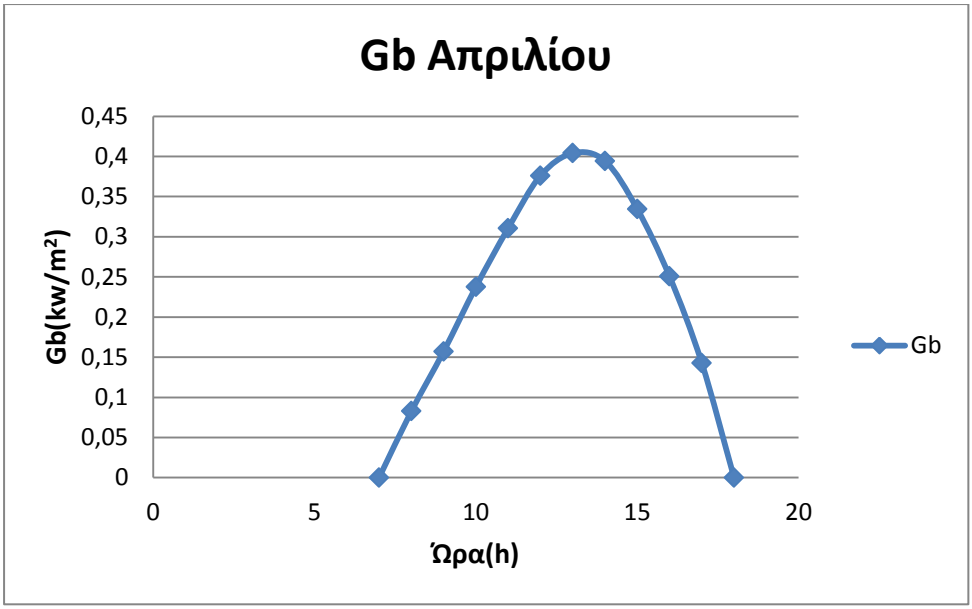


Σχήμα 6.2.9: Μεταβολή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαρτίου.

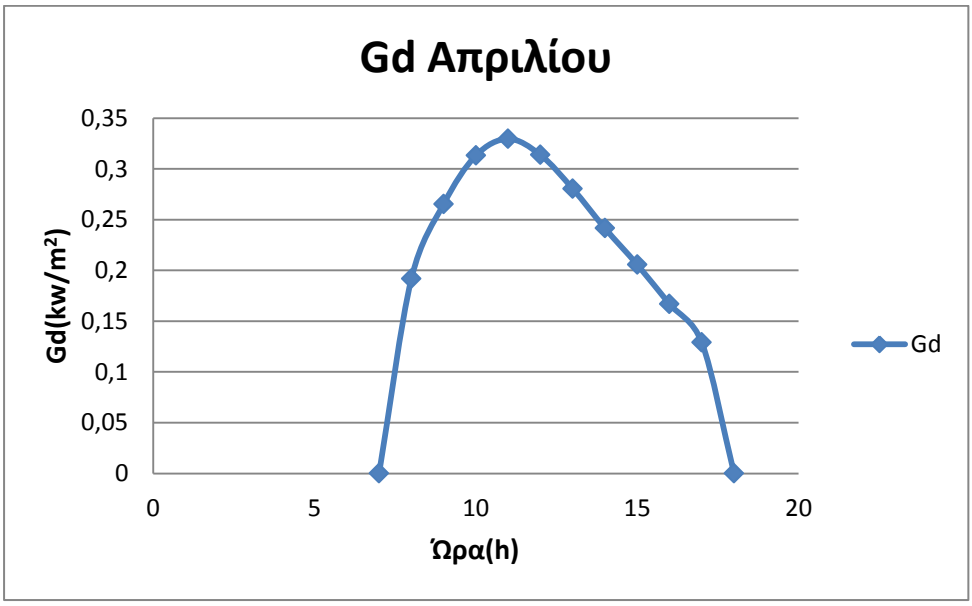
- Για την 21η Απριλίου έχουμε:

Ώρες	Gb(kw/m²)	Gd(kw/m²)	G_T(kw/m²)
7	0	0	0
8	0,08266	0,191715	0,146752
9	0,157183	0,265341	0,238226
10	0,237585	0,313221	0,321318
11	0,310654	0,329521	0,380944
12	0,376011	0,313788	0,413275
13	0,404069	0,280439	0,406593
14	0,39435	0,241427	0,366252
15	0,334553	0,205684	0,291601
16	0,250603	0,1668	0,196256
17	0,142765	0,129001	0,091199
18	0	0	0

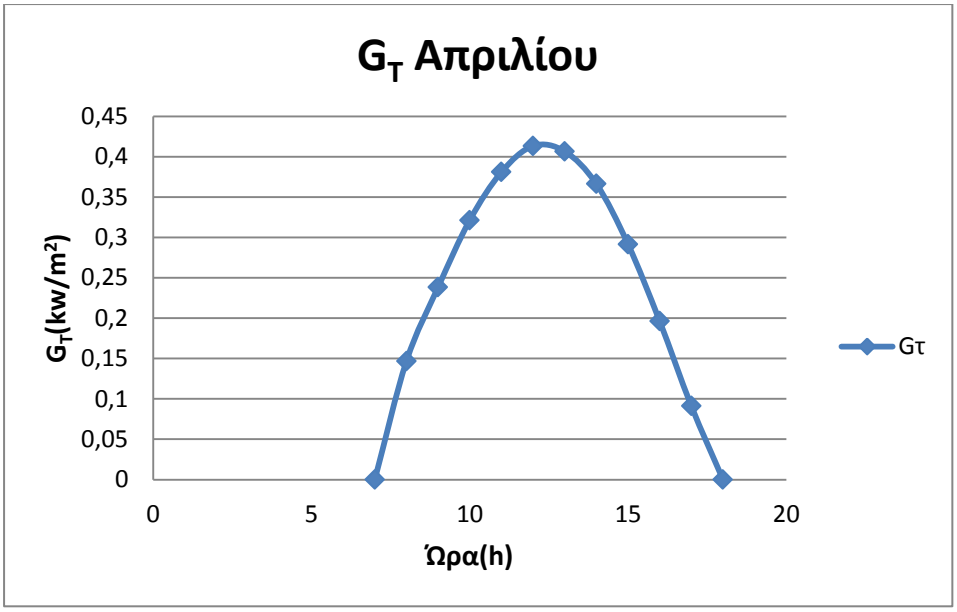
Πίνακας 6.2.6: Άμεση Gb, διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για την 21η Απριλίου.



Σχήμα 6.2.10: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Απριλίου.



Σχήμα 6.2.11: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Απριλίου.

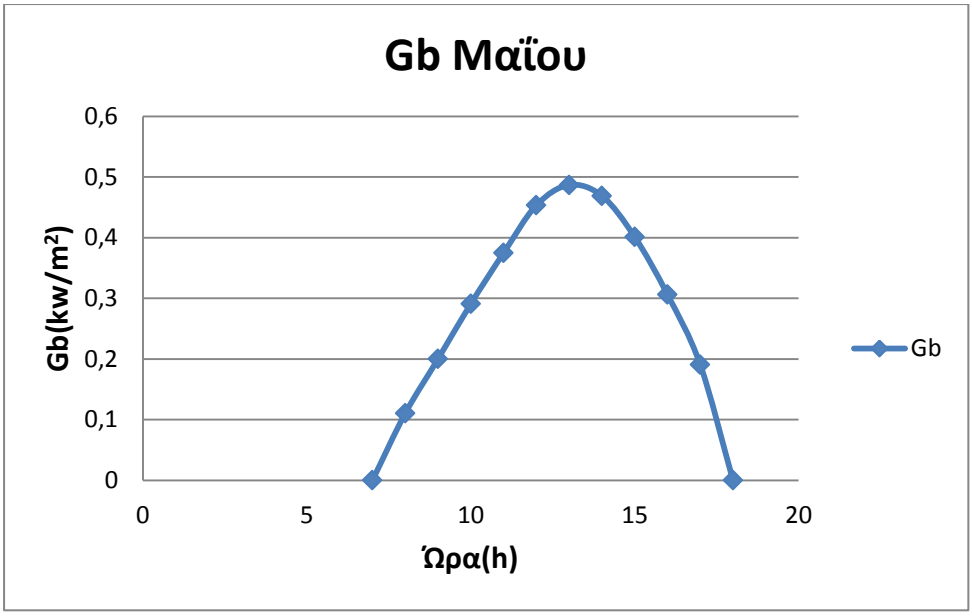


Σχήμα 6.2.12: Μεταβολή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Απριλίου.

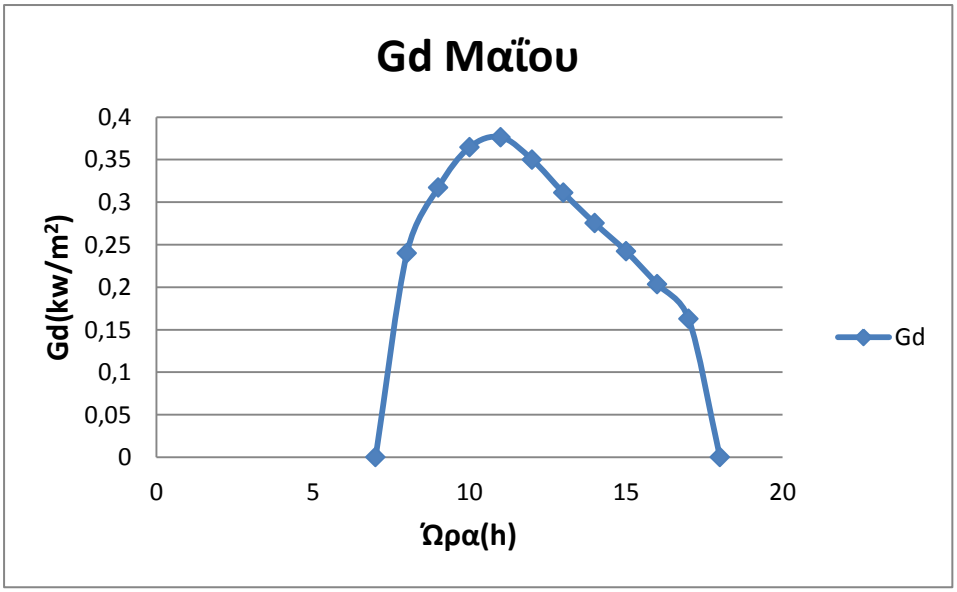
- Για την 21η Μαΐου έχουμε:

Ώρες	Gb(kw/m²)	Gd(kw/m²)	G_T(kw/m²)
7	0	0	0
8	0,110408	0,240048	0,158558
9	0,19997	0,317118	0,247856
10	0,290909	0,364655	0,32638
11	0,37472	0,376463	0,379756
12	0,4534	0,350089	0,401896
13	0,486732	0,311023	0,38649
14	0,468927	0,275261	0,338579
15	0,401309	0,242193	0,26088
16	0,306241	0,203426	0,162355
17	0,190545	0,162744	0,059462
18	0	0	0

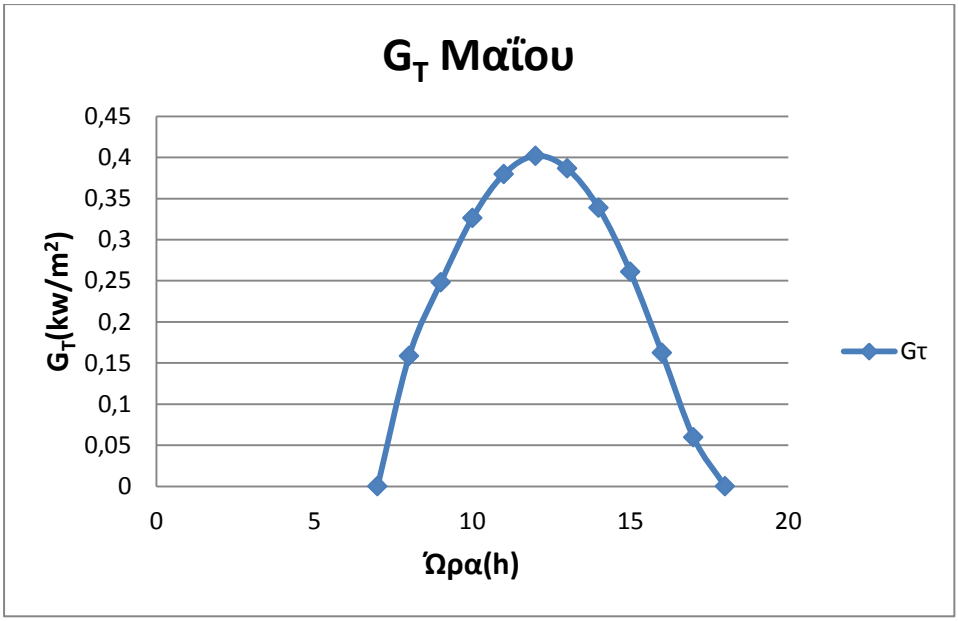
Πίνακας 6.2.7: Άμεση Gb, διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για την 21η Μαΐου.



Σχήμα 6.2.13: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαΐου.



Σχήμα 6.2.14: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαΐου.

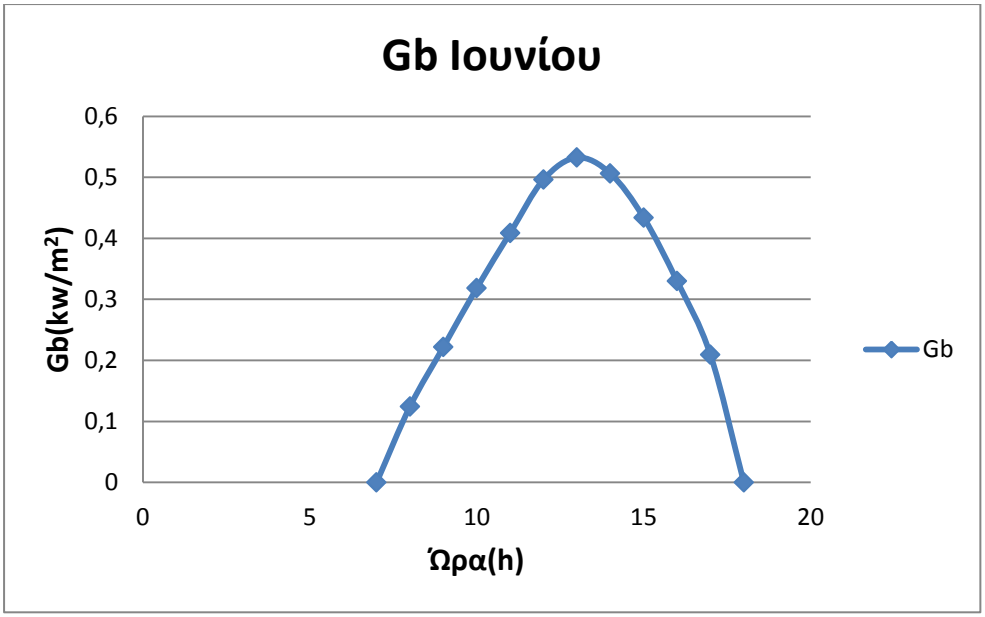


Σχήμα 6.2.15: Μεταβολή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Μαΐου.

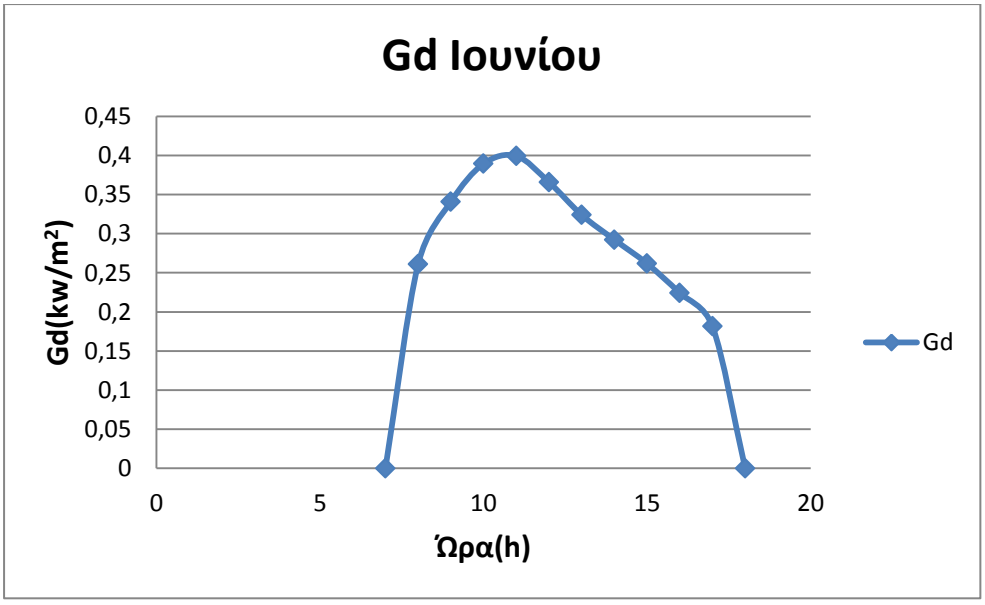
- Για την 21η Ιουνίου έχουμε:

Ώρες	Gb(kw/m^2)	Gd(kw/m^2)	G_T(kw/m^2)
7	0	0	0
8	0,124392	0,260848	0,162555
9	0,221912	0,340626	0,251748
10	0,318527	0,389304	0,329635
11	0,40881	0,399269	0,380985
12	0,496381	0,365864	0,397999
13	0,532321	0,323934	0,378511
14	0,506407	0,292274	0,328073
15	0,433908	0,261708	0,249653
16	0,329865	0,224091	0,150487
17	0,208999	0,181445	0,048803
18	0	0	0

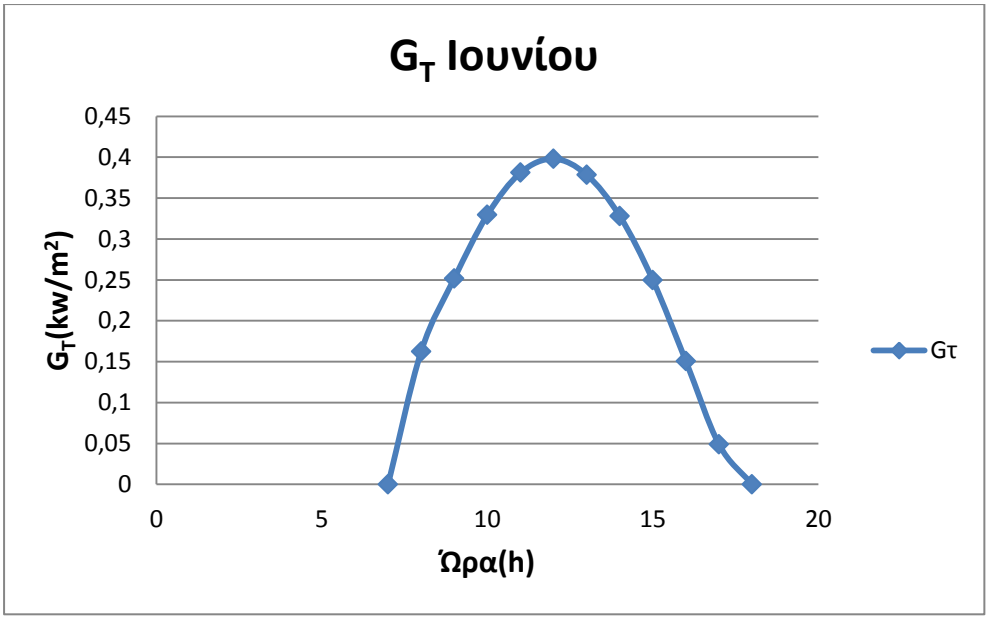
Πίνακας 6.2.8: Άμεση Gb, διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για την 21η Ιουνίου.



Σχήμα 6.2.16: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουνίου.



Σχήμα 6.2.17: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουνίου.

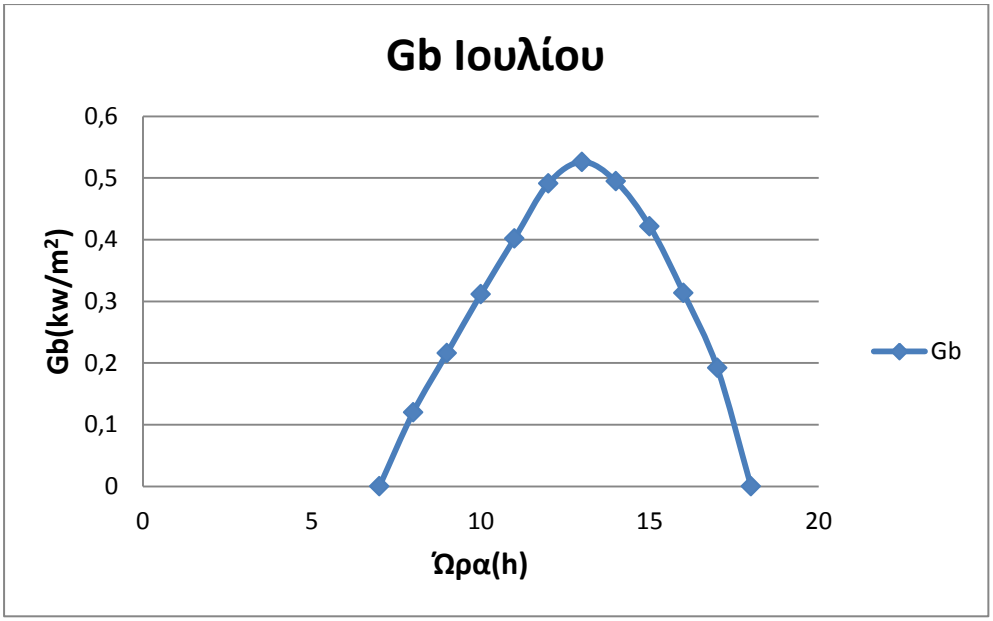


Σχήμα 6.2.18: Μεταβολή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουνίου.

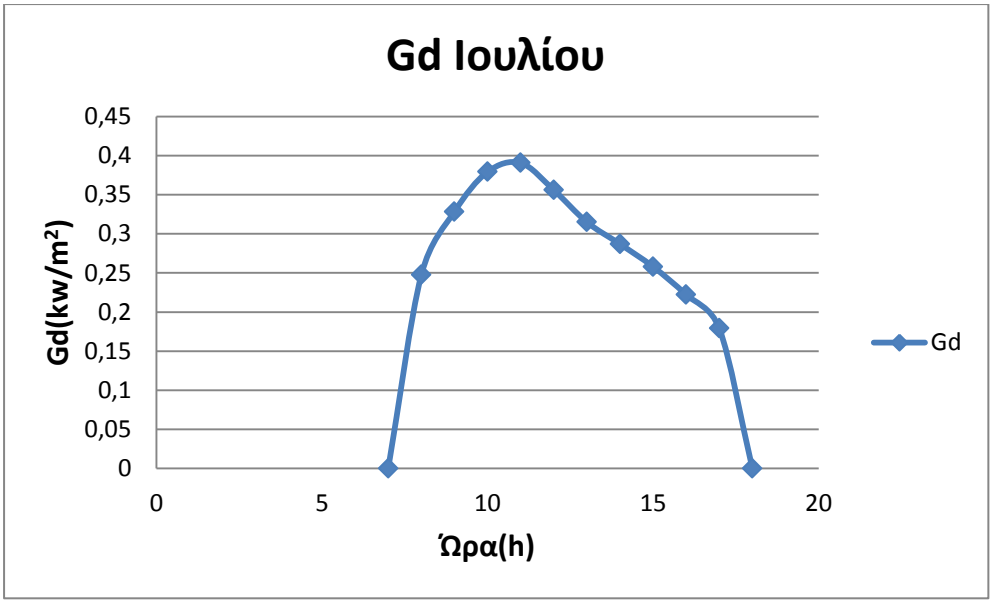
- Για την 21η Ιουλίου έχουμε:

Ώρες	Gb(kw/m^2)	Gd(kw/m^2)	G_T(kw/m^2)
7	0	0	0
8	0,120083	0,247376	0,163005
9	0,215901	0,32825	0,257172
10	0,311494	0,379181	0,340144
11	0,40188	0,390553	0,396237
12	0,491031	0,356002	0,417619
13	0,526068	0,314989	0,400931
14	0,494647	0,286955	0,351036
15	0,421789	0,257906	0,272395
16	0,313823	0,2221	0,171361
17	0,192148	0,179047	0,06682
18	0	0	0

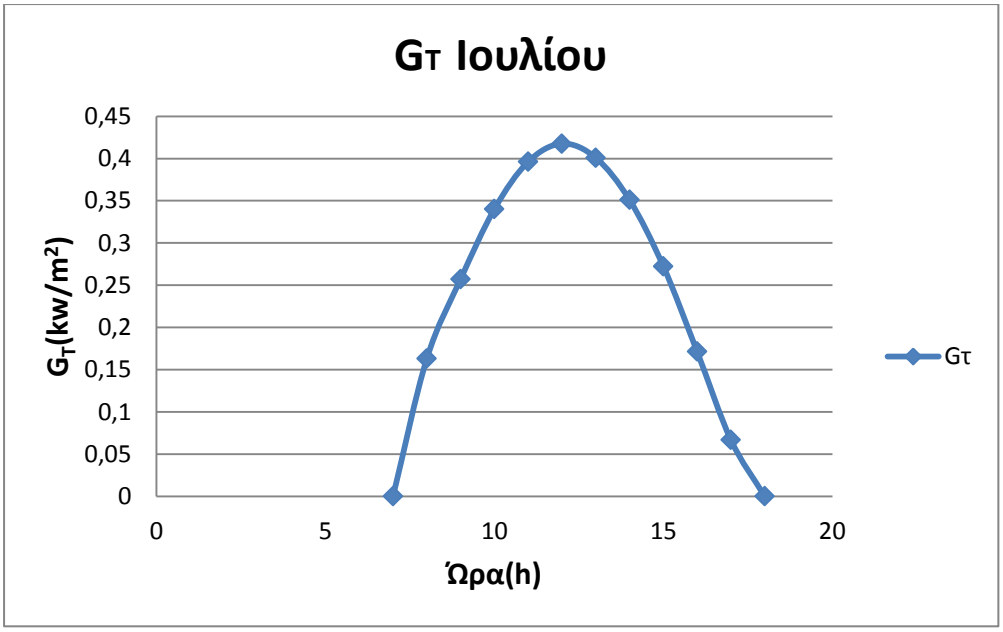
Πίνακας 6.2.9: Άμεση Gb, διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για την 21η Ιουλίου.



Σχήμα 6.2.19: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουλίου.



Σχήμα 6.2.20: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουλίου.

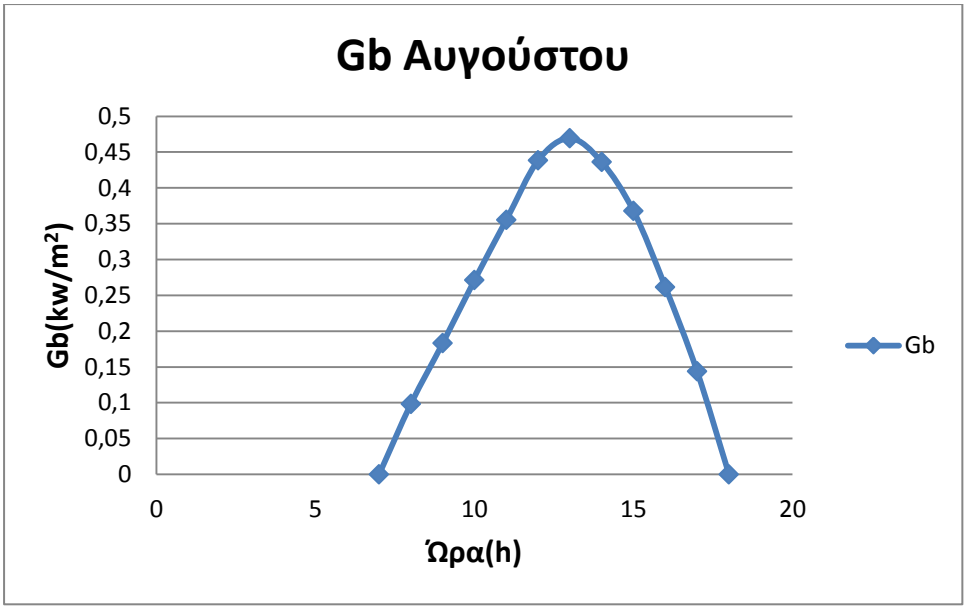


Σχήμα 6.2.21: Μεταβολή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Ιουλίου.

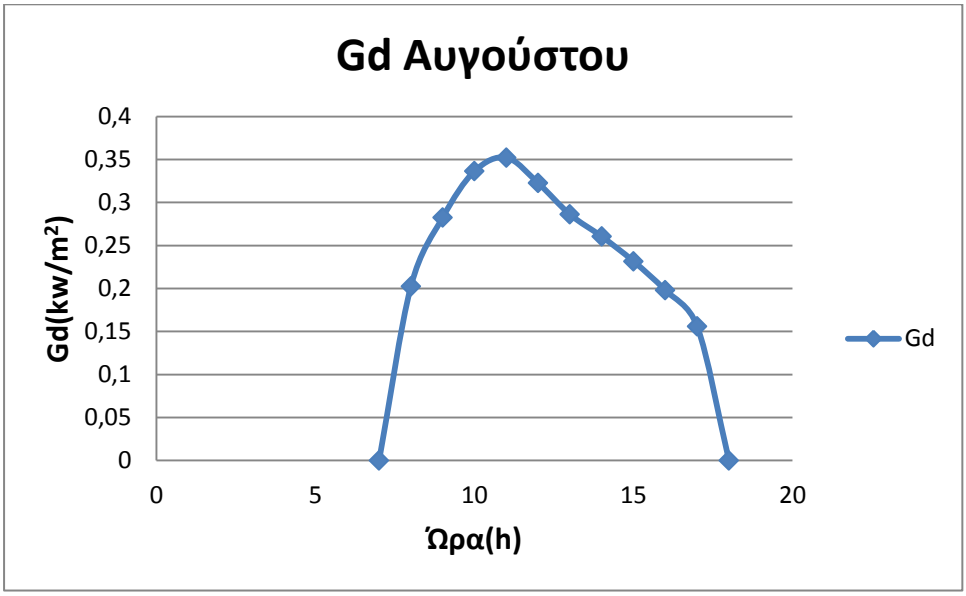
- Για την 21η Αυγούστου έχουμε:

Ώρες	Gb(kw/m²)	Gd(kw/m²)	G_T(kw/m²)
7	0	0	0
8	0,098397	0,202502	0,158154
9	0,183217	0,282626	0,25999
10	0,271308	0,336445	0,351987
11	0,355406	0,35217	0,418262
12	0,438488	0,322604	0,452741
13	0,469306	0,286093	0,444943
14	0,436154	0,260437	0,397596
15	0,367535	0,231598	0,32033
16	0,261532	0,197878	0,216147
17	0,143583	0,156059	0,105436
18	0	0	0

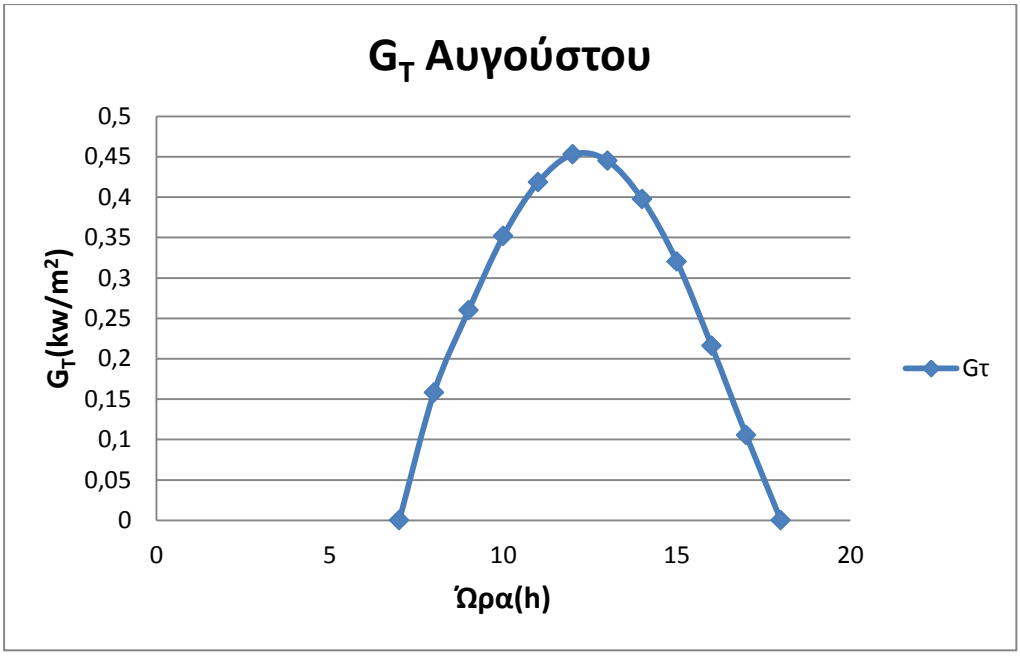
Πίνακας 6.2.10: Άμεση Gb, διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για την 21η Αυγούστου.



Σχήμα 6.2.22: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Αυγούστου.



Σχήμα 6.2.23: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Αυγούστου.

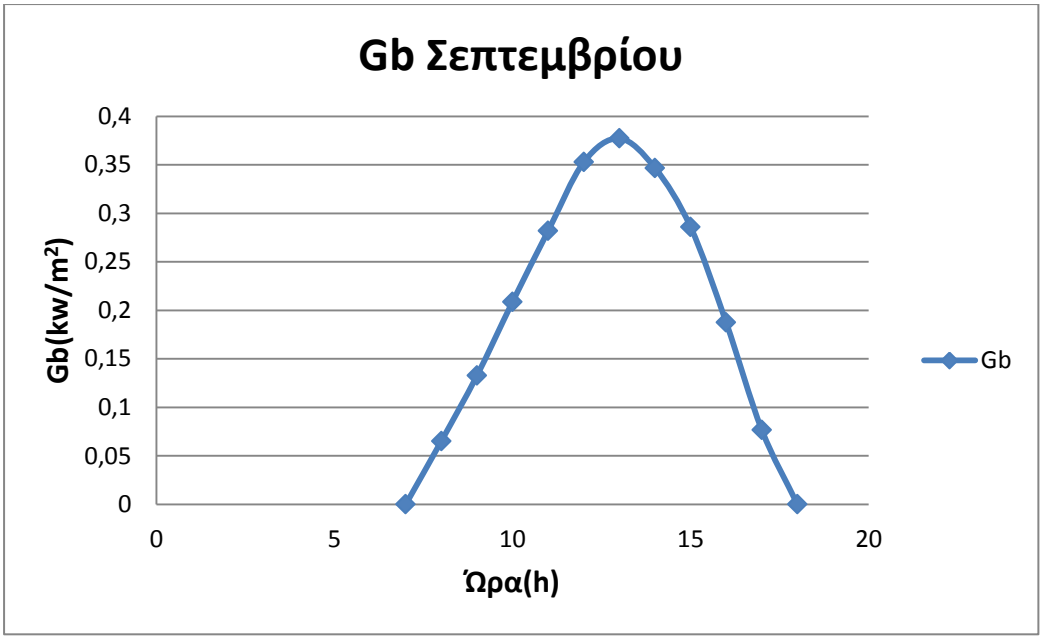


Σχήμα 6.2.24: Μεταβολή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Αυγούστου.

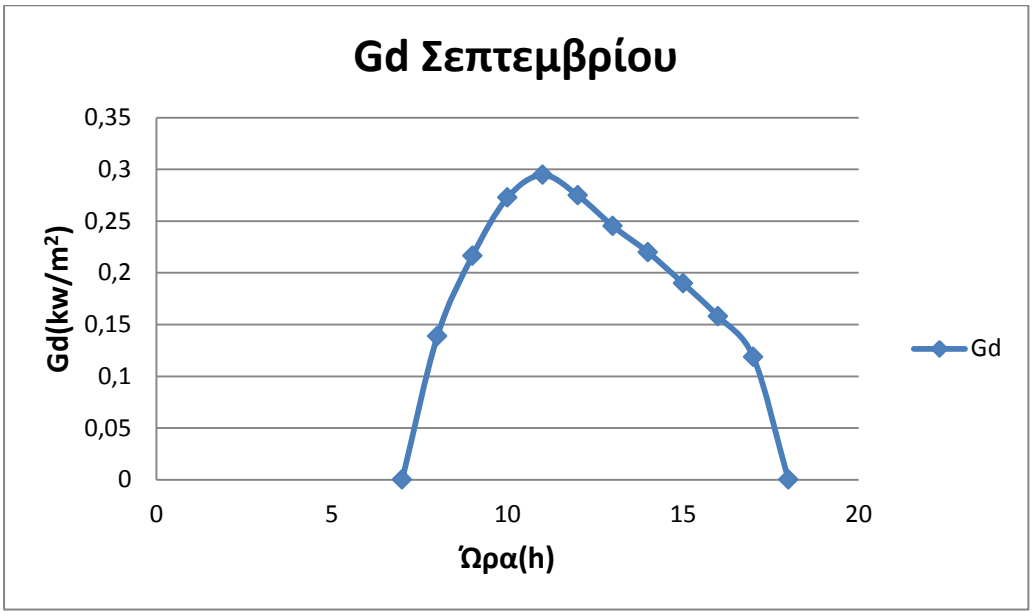
- Για την 21η Σεπτεμβρίου έχουμε:

Ώρες	Gb(kw/m^2)	Gd(kw/m^2)	G_T(kw/m^2)
7	0	0	0
8	0,0652	0,138579	0,140937
9	0,132676	0,21625	0,24715
10	0,208789	0,272728	0,348249
11	0,281846	0,294552	0,425855
12	0,352719	0,274856	0,47665
13	0,377142	0,245214	0,480484
14	0,346752	0,219894	0,438535
15	0,28588	0,189829	0,366861
16	0,187403	0,157839	0,260806
17	0,07678	0,118595	0,139574
18	0	0	0

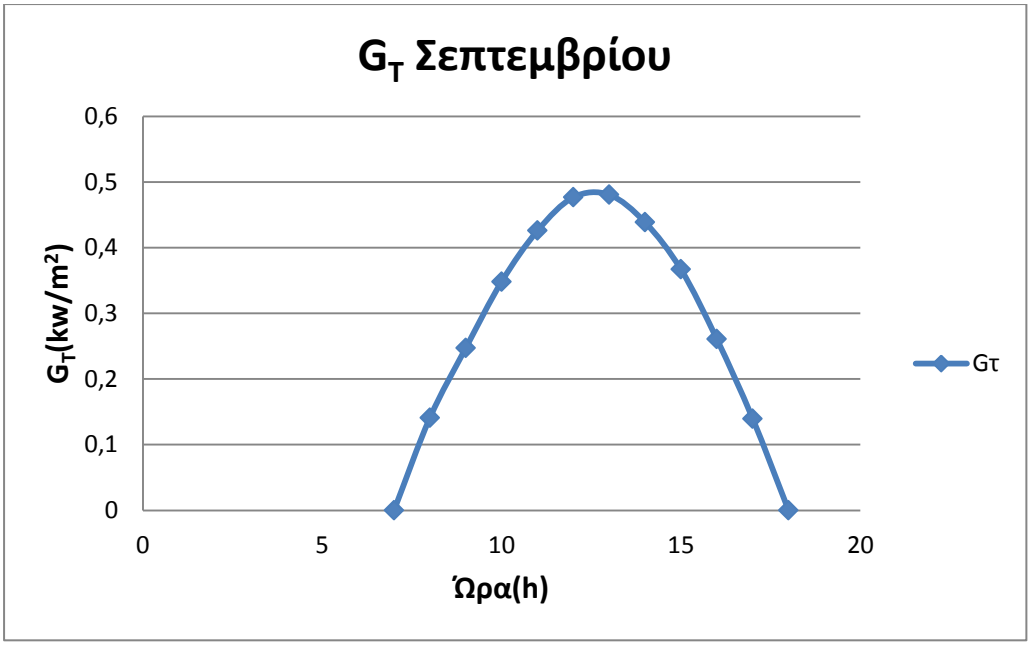
Πίνακας 6.2.11: Άμεση Gb, διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για την 21η Σεπτεμβρίου.



Σχήμα 6.2.25: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Σεπτεμβρίου.



Σχήμα 6.2.26: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Σεπτεμβρίου.

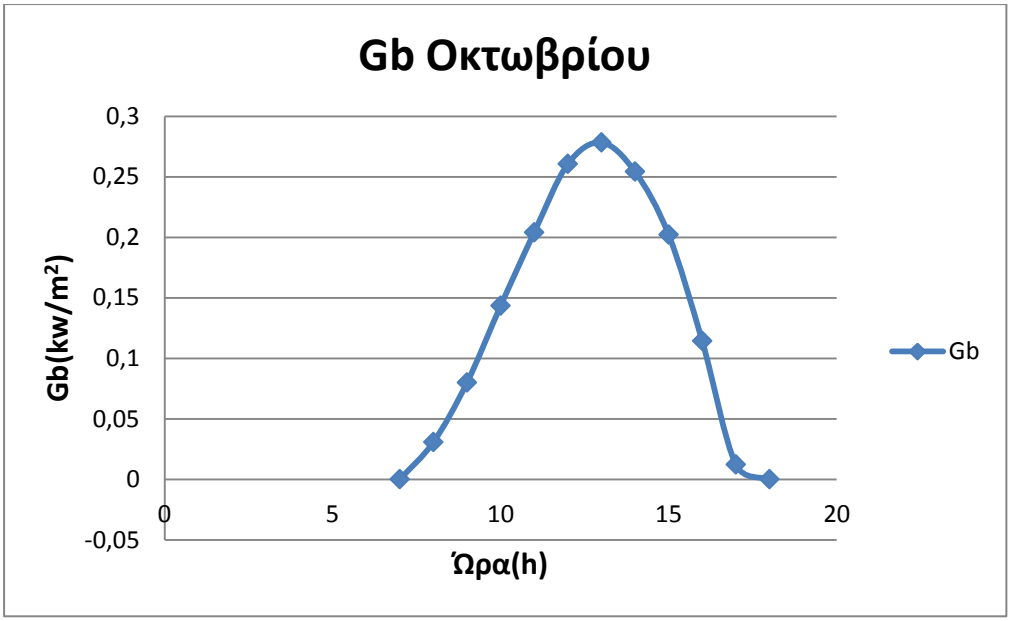


Σχήμα 6.2.27: Μεταβολή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Σεπτεμβρίου.

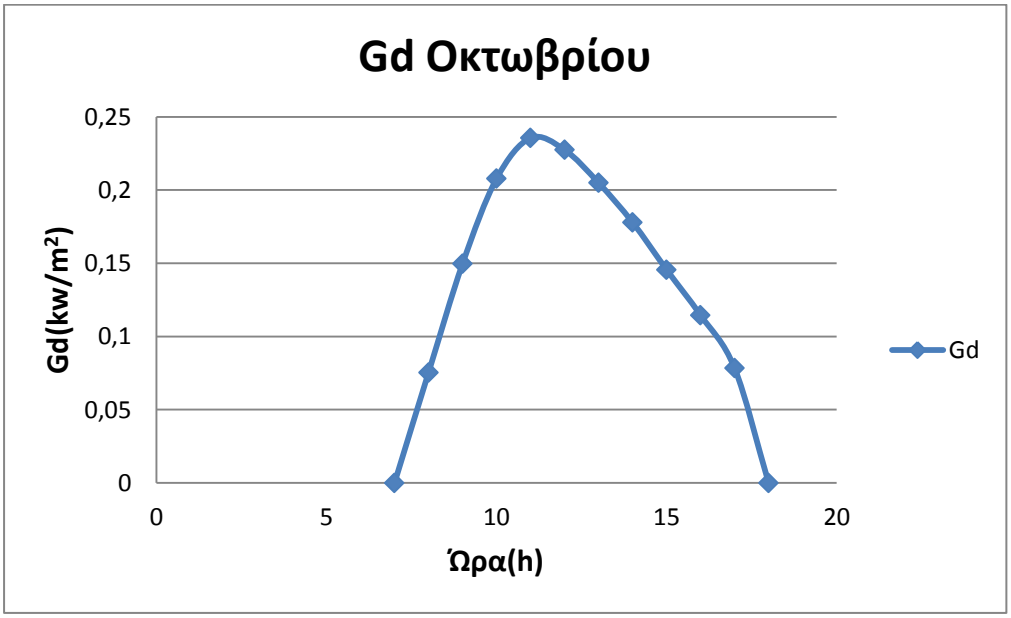
- Για την 21η Οκτωβρίου έχουμε:

Ώρες	Gb(kw/m^2)	Gd(kw/m^2)	G_T(kw/m^2)
7	0	0	0
8	0,030799	0,075313	0,102511
9	0,079986	0,149629	0,208916
10	0,143381	0,207766	0,318565
11	0,204112	0,235556	0,405434
12	0,260513	0,227483	0,469202
13	0,278351	0,204945	0,483126
14	0,254195	0,177913	0,450515
15	0,202137	0,145614	0,38845
16	0,114276	0,114504	0,281393
17	0,012257	0,078355	0,099473
18	0	0	0

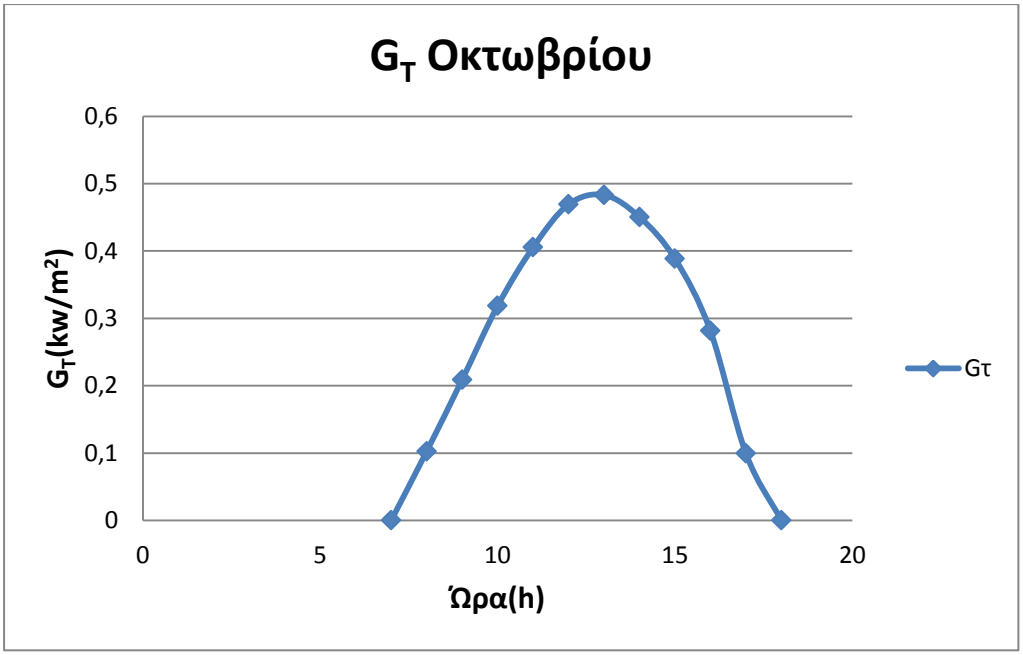
Πίνακας 6.2.12: Άμεση Gb, διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για την 21η Οκτωβρίου.



Σχήμα 6.2.28: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Οκτωβρίου.



Σχήμα 6.2.29: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Οκτωβρίου.

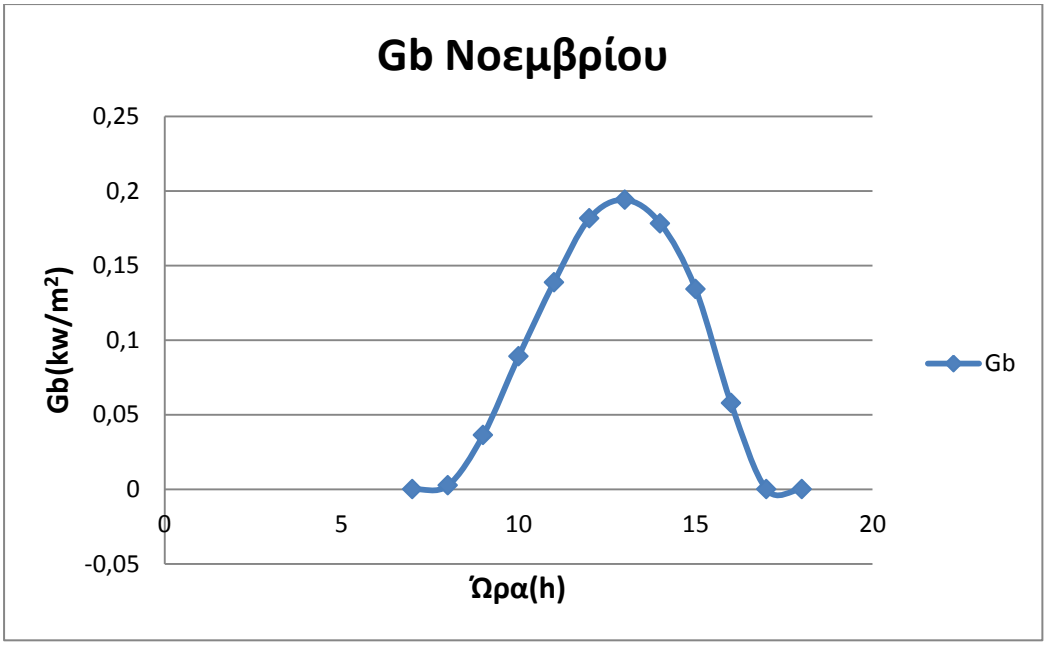


Σχήμα 6.2.30: Μεταβολή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Οκτωβρίου.

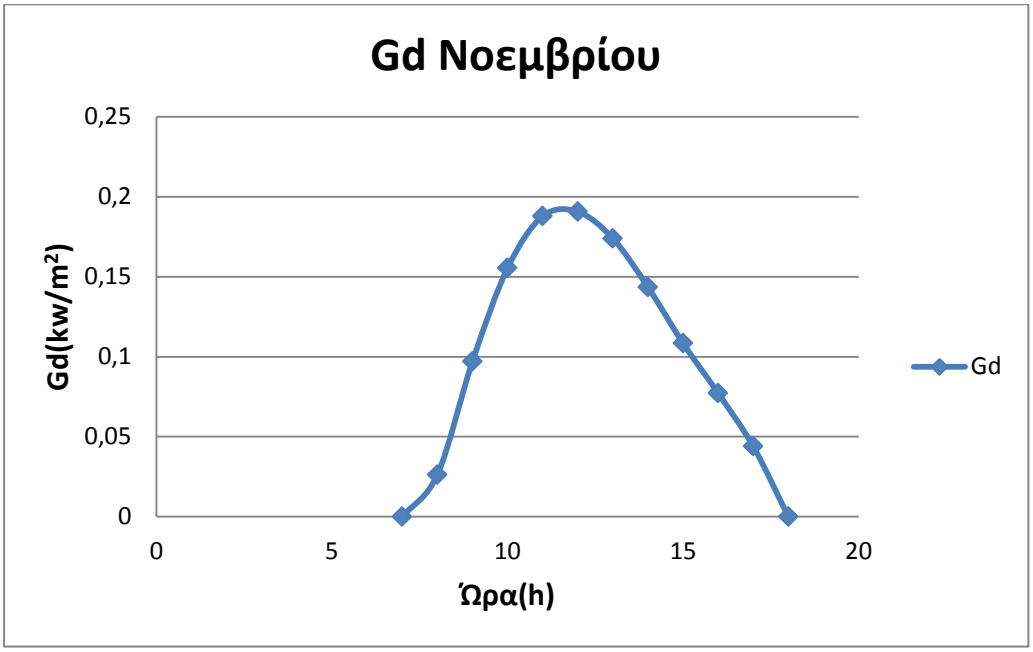
- Για την 21η Νοεμβρίου έχουμε:

Ώρες	Gb(kw/m^2)	Gd(kw/m^2)	G_T(kw/m^2)
7	0	0	0
8	0,002523	0,026183	0,025131
9	0,036372	0,096955	0,142428
10	0,089018	0,155397	0,264184
11	0,138765	0,187751	0,35781
12	0,181514	0,190578	0,427318
13	0,193981	0,173864	0,44703
14	0,178203	0,143437	0,428275
15	0,134147	0,108371	0,375772
16	0,057732	0,077105	0,26181
17	0	0,043912	0,026347
18	0	0	0

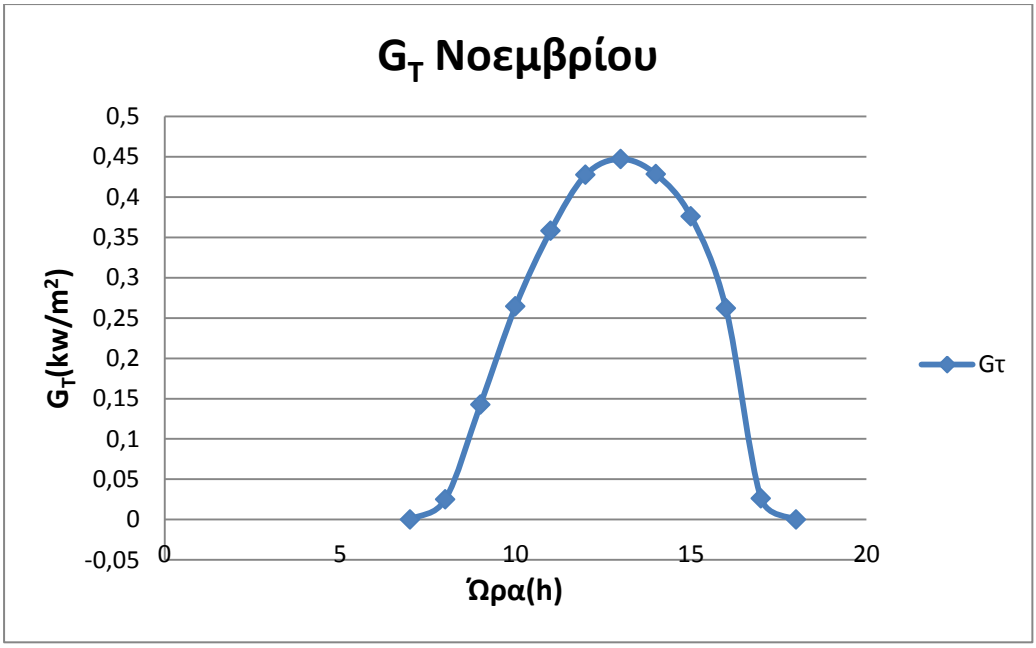
Πίνακας 6.2.13: Άμεση Gb, διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για την 21η Νοεμβρίου.



Σχήμα 6.2.31: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Νοεμβρίου.



Σχήμα 6.2.32: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Νοεμβρίου.

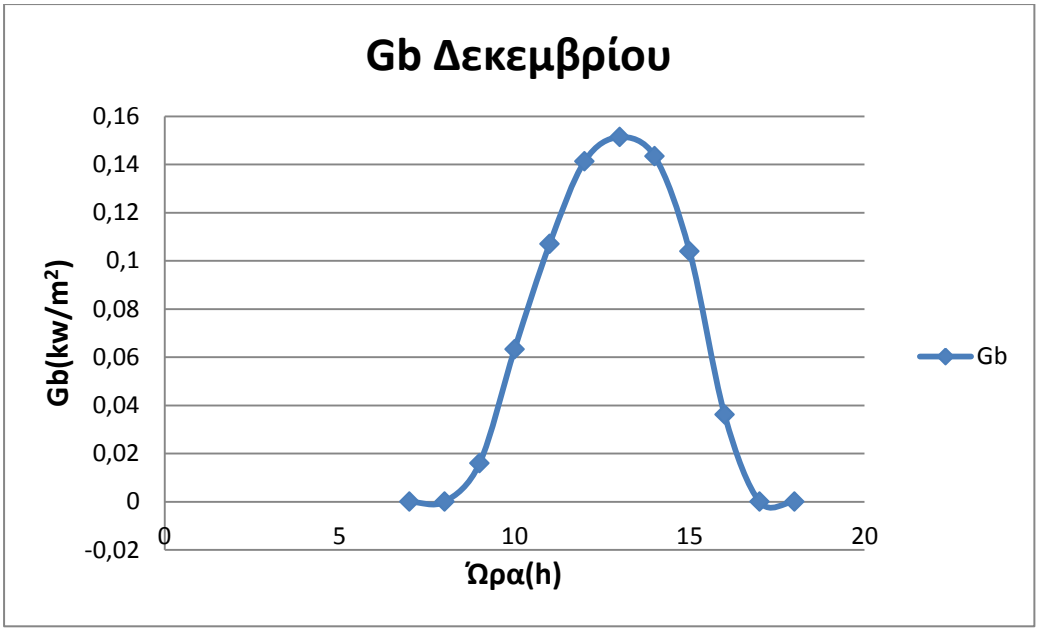


Σχήμα 6.2.33: Μεταβολή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Νοεμβρίου.

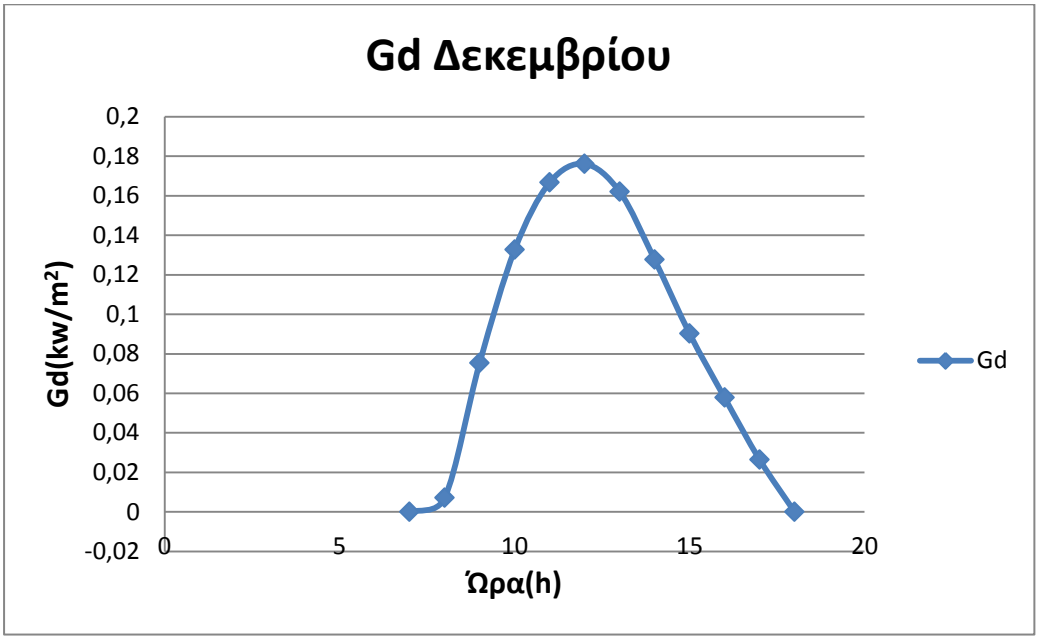
- Για την 21η Δεκεμβρίου έχουμε:

Ώρες	Gb(kw/m^2)	Gd(kw/m^2)	G_T(kw/m^2)
7	0	0	0
8	0	0,007103	0,004262
9	0,015963	0,075293	0,089528
10	0,06331	0,132586	0,219246
11	0,106974	0,166623	0,313425
12	0,141315	0,176096	0,379519
13	0,151362	0,162041	0,399248
14	0,143393	0,127635	0,392978
15	0,103935	0,090166	0,34288
16	0,036086	0,057758	0,222935
17	0	0,026423	0,015854
18	0	0	0

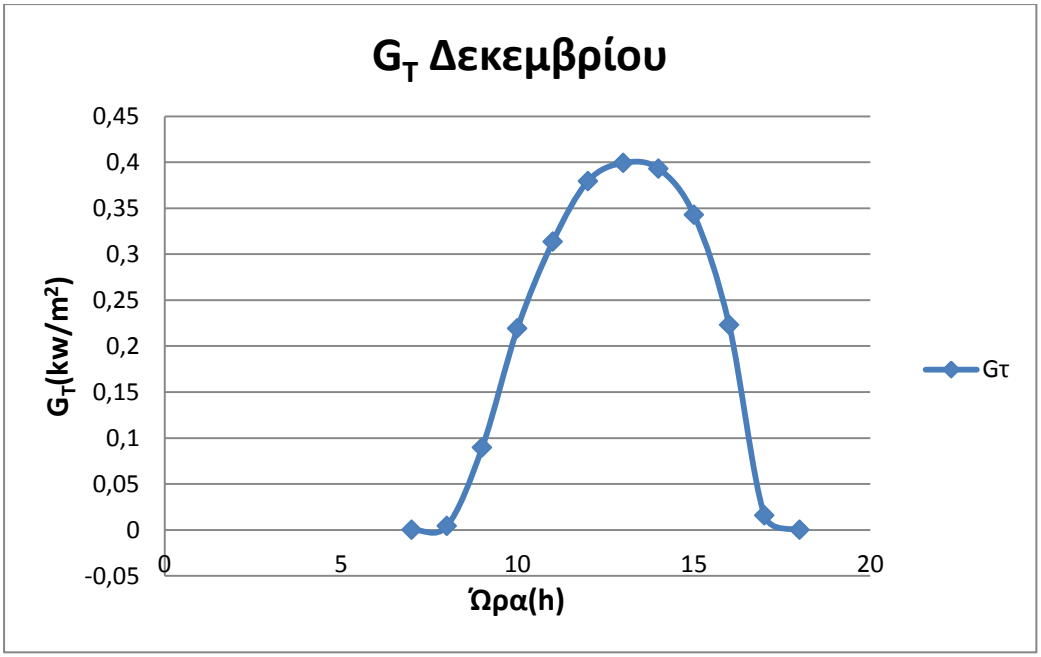
Πίνακας 6.2.14: Άμεση Gb, διάχυτη Gd ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου για την 21η Δεκεμβρίου.



Σχήμα 6.2.34: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Δεκεμβρίου.



Σχήμα 6.2.35: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Δεκεμβρίου.



Σχήμα 6.2.36: Μεταβολή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας στις 21 Δεκεμβρίου.

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται η άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολίας Gb, η διάχυτη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία Gd και η ολική ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_T και για τους υπόλοιπους προσανατολισμούς.

6.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος t_o [42]

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις που υπολογίστηκαν από το εργαστήριο του Τομέα Θερμότητας του Ε.Μ.Π. και βρίσκονται στο βιβλίο του Κλιματισμού:

$$\boldsymbol{to = M + \sum_{i=1}^{3} Ci\ cos\left[i\frac{360}{24}(H-0,5)\right] + \sum_{i=1}^{3} Si\ sin\left[i\frac{360}{24}(H-0,5)\right]} \qquad (6.5)$$

Όπου:

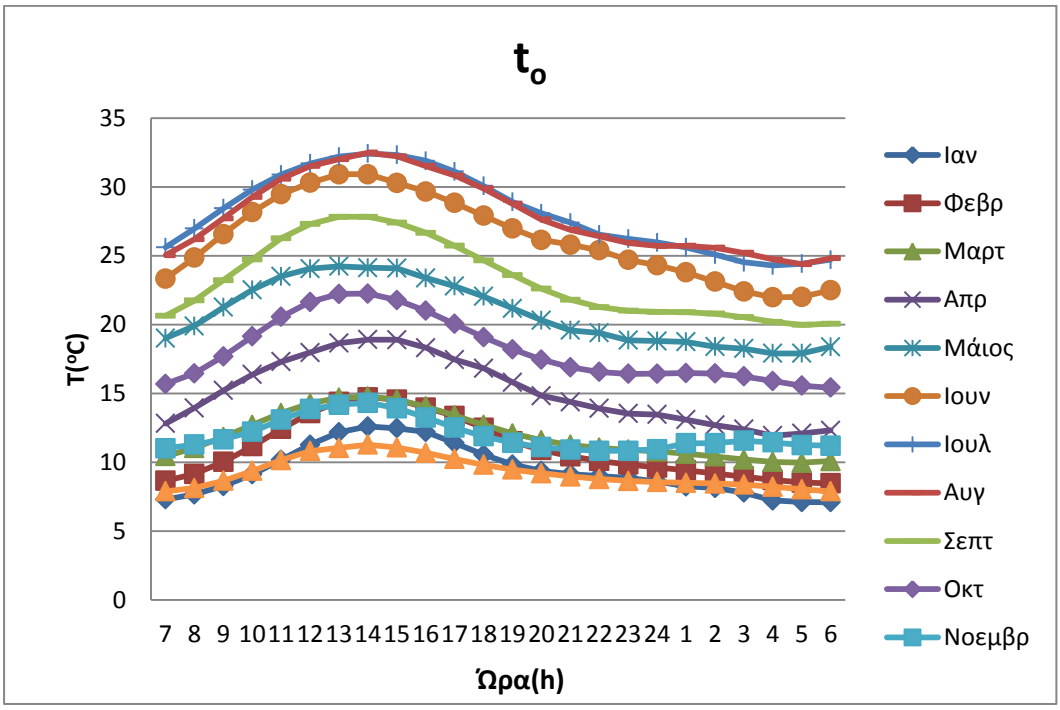
- H= η ώρα της ημέρας= 1÷24
- M, C_i, S_i : συντελεστές που δίδονται από πίνακες του βιβλίου και φαίνονται παρακάτω:

Day	M	C1	C2	C3	S1	S2	S3
21 Jan	9,384	-1,673	0,711	0,009	-1,723	0,524	-0,241
21 Feb	10,984	-2,150	0,785	-0,107	-1,750	0,578	-0,072

21 Mar	11,955	-1,898	0,651	-0,010	-1,084	0,255	-0,009
21 Apr	15,072	-2,668	0,727	0,269	-1,763	0,243	0,212
21 May	20,724	-2,795	0,759	0,093	-1,344	0,119	0,308
21 Jun	26,192	-3,393	1,115	0,156	-2,196	-0,139	0,157
21 Jul	28,08	-3,359	0,811	0,272	-2,077	0,134	0,140
21 Aug	27,88	-3,113	0,884	0,067	-1,978	0,486	0,361
21 Sep	23,236	-3,310	1,035	-0,050	-1,696	0,477	0,221
21 Oct	18,144	-2,630	1,085	-0,144	-1,427	0,604	0,138
21 Nov	11,968	-1,300	0,616	-0,252	-0,317	0,629	-0,049
21 Dec	9,264	-1,110	0,521	-0,152	-0,881	0,333	0,008

Πίνακας 6.3.1: Συντελεστές M, C_i, S_i

Οι θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος απεικονίζονται και στο παρακάτω διάγραμμα όπου μπορούμε να δούμε γραφικά τις μεταβολές της θερμοκρασίας ανά ώρα υπολογισμού για τον κάθε μήνα. Από το διάγραμμα εύκολα μπορούμε να διαπιστώσουμε, όπως είναι λογικό, ότι τους χειμερινούς μήνες οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες σε σχέση με τους θερινούς. Βάσει αυτών των θερμοκρασιών εξωτερικού περιβάλλοντος θα γίνουν και οι υπολογισμοί για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 6.3.1: Εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος

6.4 Υπολογισμός θερμοκρασίας ηλίου-αέρος ή ισοδύναμης θερμοκρασίας t_e [42]

Η θερμοκρασία ηλίου-αέρος ή ισοδύναμη θερμοκρασία, t_e, είναι η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρος η οποία σε απουσία όλων των

θερμικών συναλλαγών δι' ακτινοβολίας, δίδει σε μια επιφάνεια την ίδια εισερχόμενη θερμορροή με αυτήν που προκύπτει με τον πραγματικό συνδυασμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, με την συναλλαγή θερμότητας δι' ακτινοβολίας με τον ουρανό και τα πέριξ και με τη συναλλαγή δια συναγωγής με τον εξωτερικό αέρα.
Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης θερμοκρασίας χρησιμοποιείται η εξίσωση που υπολογίστηκε από το εργαστήριο του Τομέα Θερμότητας του Ε.Μ.Π. και βρίσκονται στο βιβλίο του Κλιματισμού:

$$\boldsymbol{te = to + \frac{aI\tau}{ho} - \frac{\varepsilon\Delta R}{ho} \Rightarrow te = to + \frac{a3600G\tau}{ho} - \frac{\varepsilon\Delta R}{ho}} \qquad (6.6)$$

Όπου:

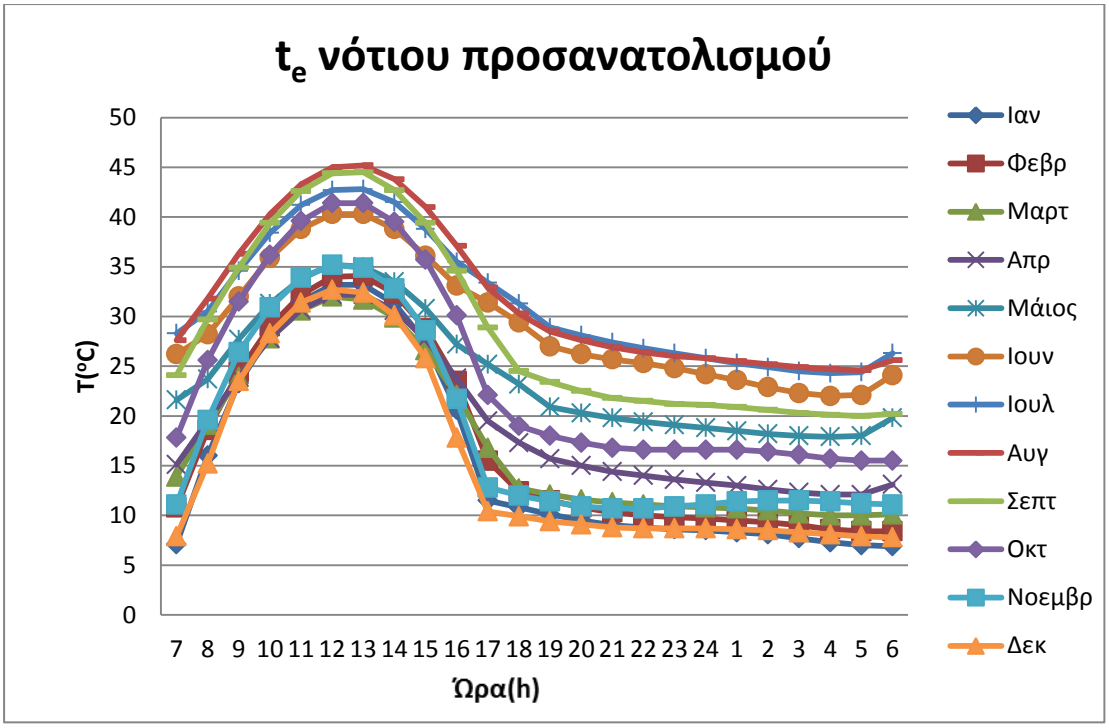
- t_o: η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος που υπολογίστηκε παραπάνω

- ο λόγος α/h_o λαμβάνει την τιμή 0,026 για ανοιχτόχρωμες επιφάνειες

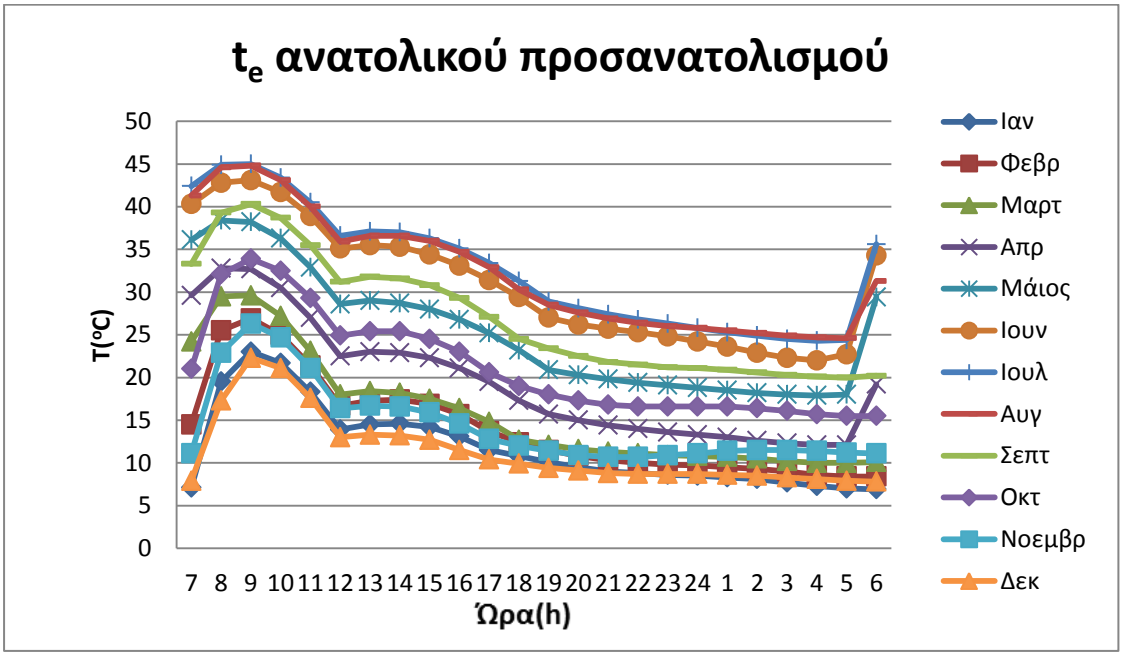
- G_T**:** η ολική ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου όπως υπολογίστηκε παραπάνω

- $\boldsymbol{\frac{\varepsilon\Delta R}{ho} = 0}$ για κατακόρυφη επιφάνεια

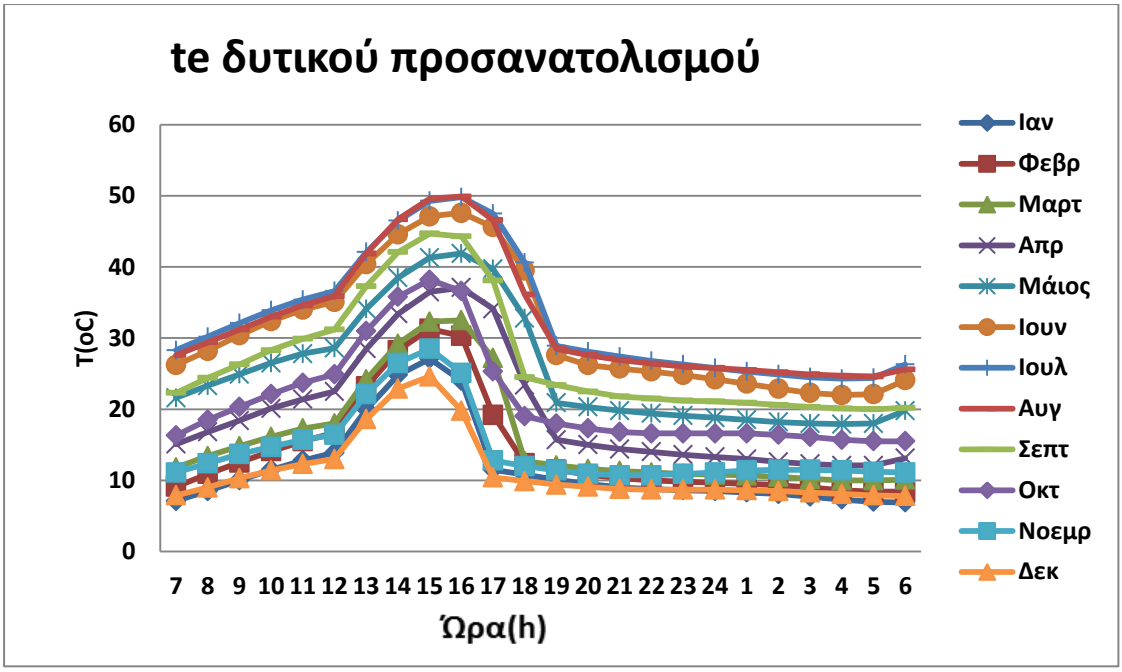
Οι ισοδύναμες θερμοκρασίες απεικονίζονται και στα παρακάτω διαγράμματα όπου μπορούμε να δούμε γραφικά τις μεταβολές της θερμοκρασίας ανά ώρα υπολογισμού για τον κάθε μήνα και τον κάθε προσανατολισμό. Όπως και παραπάνω, προκύπτει ότι τους χειμερινούς μήνες οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες σε σχέση με τους θερινούς. Βάσει αυτών των ισοδύναμων θερμοκρασιών θα γίνουν και οι υπολογισμοί για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων παρακάτω.



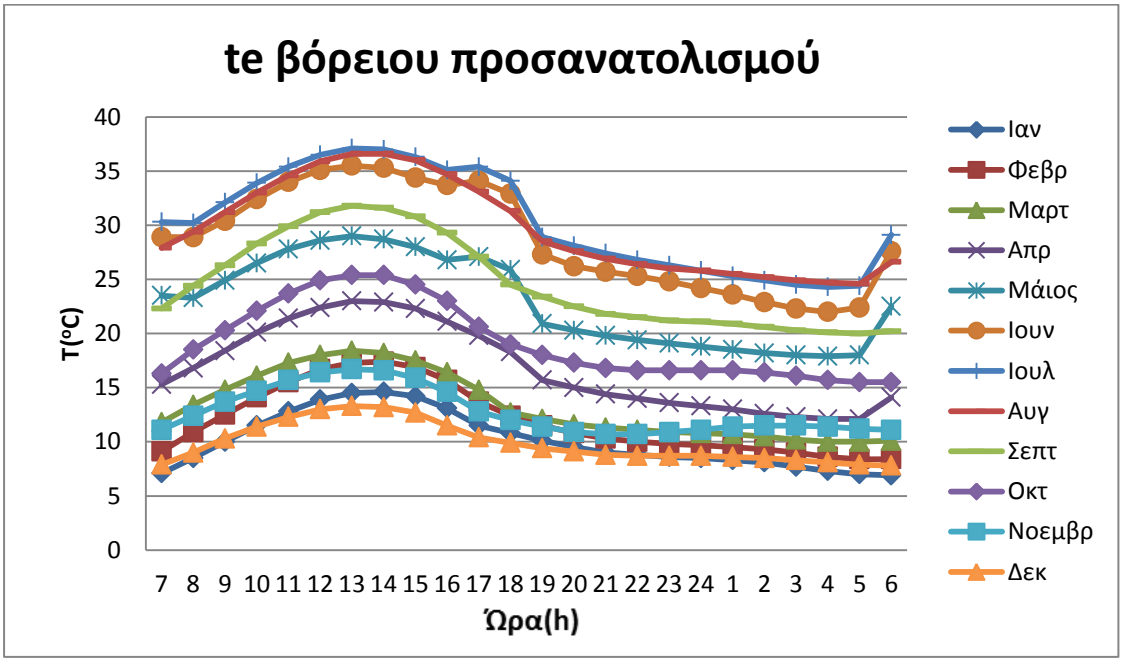
Σχήμα 6.4.1: Ισοδύναμη θερμοκρασία σε Νότιο προσανατολισμό



Σχήμα 6.4.2: Ισοδύναμη θερμοκρασία σε Ανατολικό προσανατολισμό



Σχήμα 6.4.3: Ισοδύναμη θερμοκρασία σε Δυτικό προσανατολισμό



Σχήμα 6.4.4: Ισοδύναμη θερμοκρασία σε Βόρειο προσανατολισμό

6.5 Τα PCM που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη [43]

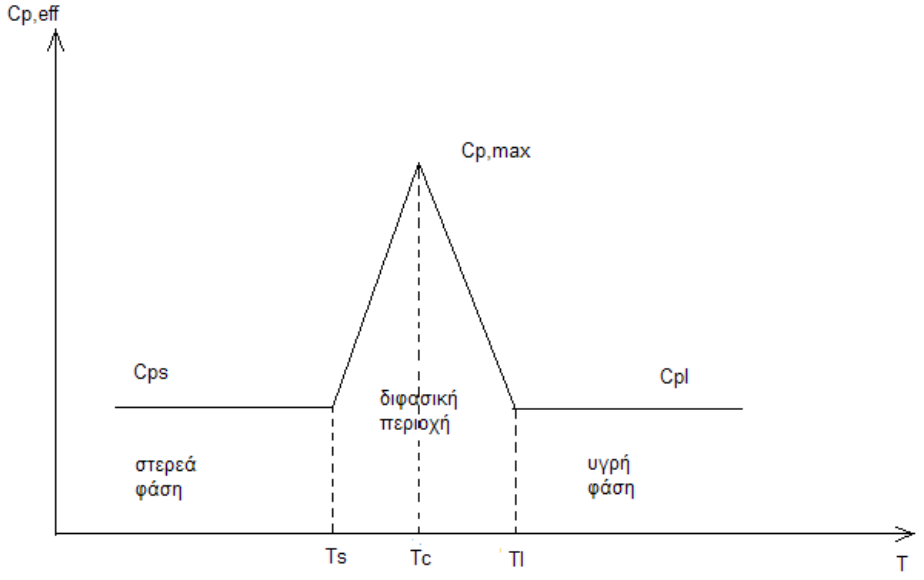
Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν πέντε διαφορετικά PCM. Αυτά είναι η ελληνική παραφίνη και τα PCM με εμπορικές ονομασίες RT20, RT27, RT58 και SP25A8 της εταιρείας Rubitherm, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Είδος PCM	ελληνική παραφίνη	RT20 (Rubitherm)	RT27 (Rubitherm)	RT58 (Rubitherm)	Μείγμα οργανικού-ανόργανου SP25A8(Rubitherm)
H(KJ/Kg)	136,5	132,1	167,4	166,1	141,5
Ts(^oC)	50	15	22	53	22
Tl(^oC)	58	26	31	62	32
Cps(KJ/Kg^oC)	2,7	1,9	2	1,9	2,6
Cpl(KJ/Kg^oC)	4,4	2,5	2,3	2,6	2,7

Πίνακας 6.5.1: Χαρακτηριστικά των PCM που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη

Στη συγκεκριμένη εργασία, επελέγη το μοντέλο της συνάρτησης θερμοχωρητικότητας $Cp_{eff}(T)$ διότι, η αλλαγή φάσης ενδιαφέρει μόνο σαν μακροσκοπικό φαινόμενο χωρίς την ανάγκη υπολογισμού περαιτέρω λεπτομερειών. Θα χρησιμοποιήσουμε την απλή μορφή του $Cp_{eff}(T)$ δηλαδή η ενεργός θερμοχωρητικότητα θα βρεθεί από τις παρακάτω εξισώσεις και με την χρήση της τριγωνικής μορφής της καμπύλης ενεργούς θερμοχωρητικότητας (τριγωνική κατανομή).

Έτσι λοιπόν η συνάρτηση $Cp_{eff}(T)$ τριγωνικής μορφής παρουσιάζεται στο σχήμα 6.5.1 και περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:



Σχήμα 6.5.1: Καμπύλη της ενεργούς θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM

Θεωρούμε $\boldsymbol{Tc} = \frac{\boldsymbol{Ts+Tl}}{\mathbf{2}}$ η οποία είναι η θερμοκρασία όπως φαίνεται και από το σχήμα με τη μέγιστη θερμοχωρητικότητα, Cp,max.

Για $T \leq T_s$:

$$Cp,_{eff}(T)=Cp_s \qquad (6.7)$$

Για $T_s \leq T \leq T_c$:

$$\mathrm{Cp, eff(T)} = 4(\mathrm{H} - \mathrm{bCps})\left(\frac{T-Ts}{b^2}\right) + \mathrm{Cps} \qquad (6.8)$$

με $b=T_l-T_s$ είναι το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του εκάστοτε PCM

Για $T_c \leq T \leq T_l$:

$$\mathrm{Cp, eff(T)} = 4(\mathrm{bCpl} - \mathrm{H})\left(\frac{T-Ts-\frac{b}{2}}{b^2}\right) + 2\frac{H}{b} - Cpl \qquad (6.9)$$

Για $T \geq T_l$:

$$Cp,_{eff}(T)=Cp_l \qquad (6.10)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις διαμορφώνονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του PCM που επιλέγεται κάθε φορά.

- Για την ελληνική παραφίνη ισχύουν:

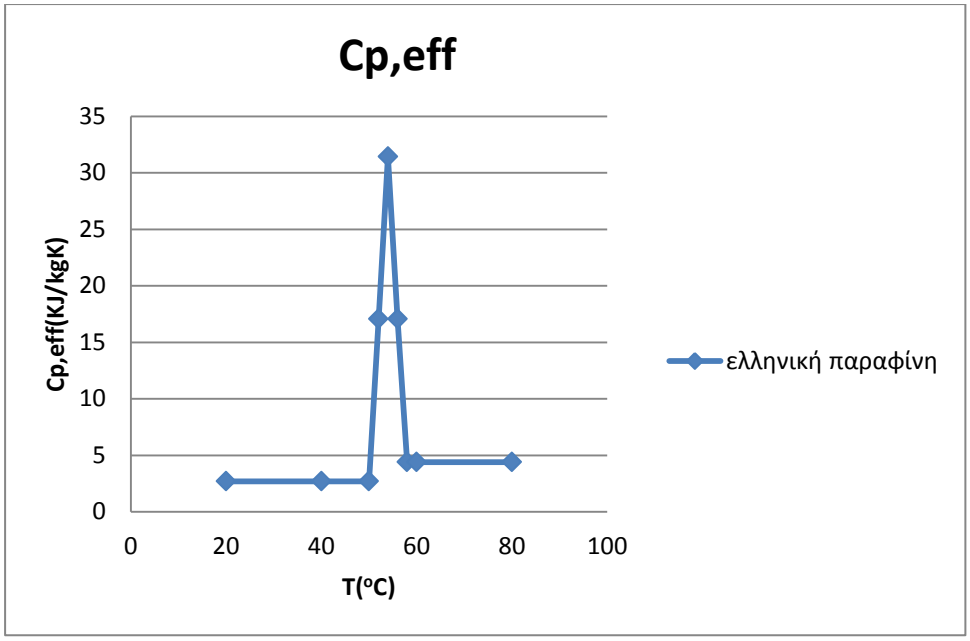
  Για $T \leq 50^oC$: $Cp,_{eff}(T)=2,7KJ/kgK$

  Για $50\,^oC \leq T \leq 54\,^oC$: $\mathrm{Cp, eff(T)} = 459,6\left(\frac{T-50}{64}\right) + 2,7$

  Για $54\,^oC \leq T \leq 58\,^oC$: $\mathrm{Cp, eff(T)} = -405,2\left(\frac{T-54}{64}\right) - 29,725$

  Για $T \geq 58\,^oC$: $Cp,_{eff}(T)=4,4KJ/kgK$

  Και το διάγραμμα έχει ως εξής:



Σχήμα 6.5.2: Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας της ελληνικής παραφίνης.

- Για το RT20 ισχύουν:

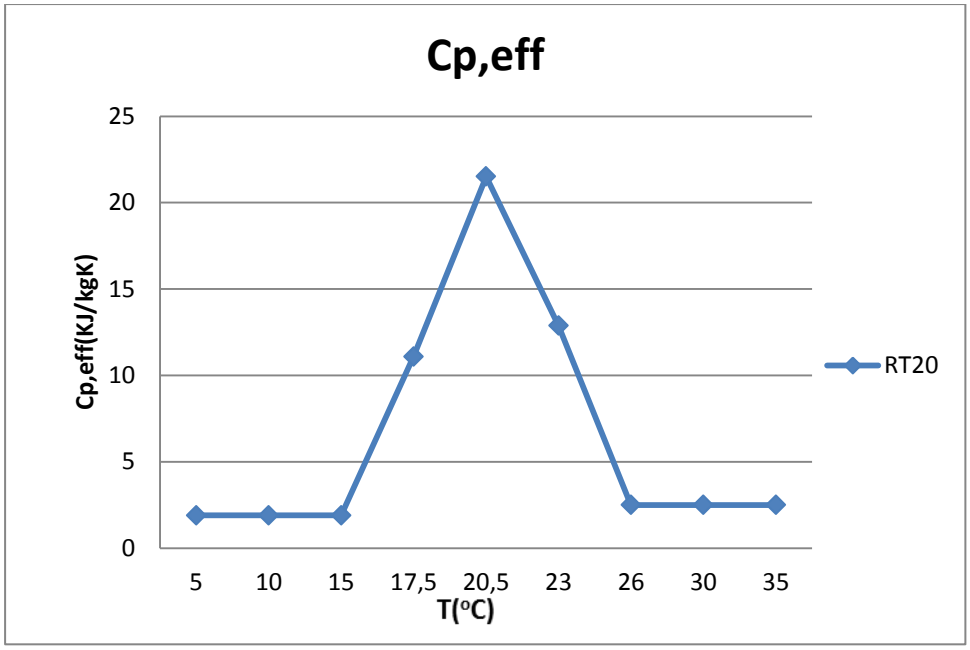
Για $T \leq 15^{o}C$: $Cp,_{eff}(T)=1,9KJ/kgK$

Για $15^{o}C \leq T \leq 20,5^{o}C$: $\mathrm{Cp,eff(T)} = 444,8\left(\frac{T-15}{121}\right) + 1,9$

Για $20,5^{o}C \leq T \leq 26^{o}C$: $\mathrm{Cp,eff(T)} = -418,4\left(\frac{T-20,5}{121}\right) - 21,518$

Για $T \geq 26^{o}C$: $Cp,_{eff}(T)=2,5KJ/kgK$

Και το διάγραμμα έχει ως εξής:



Σχήμα 6.5.3: Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας του RT20.

- Για το RT27 ισχύουν:

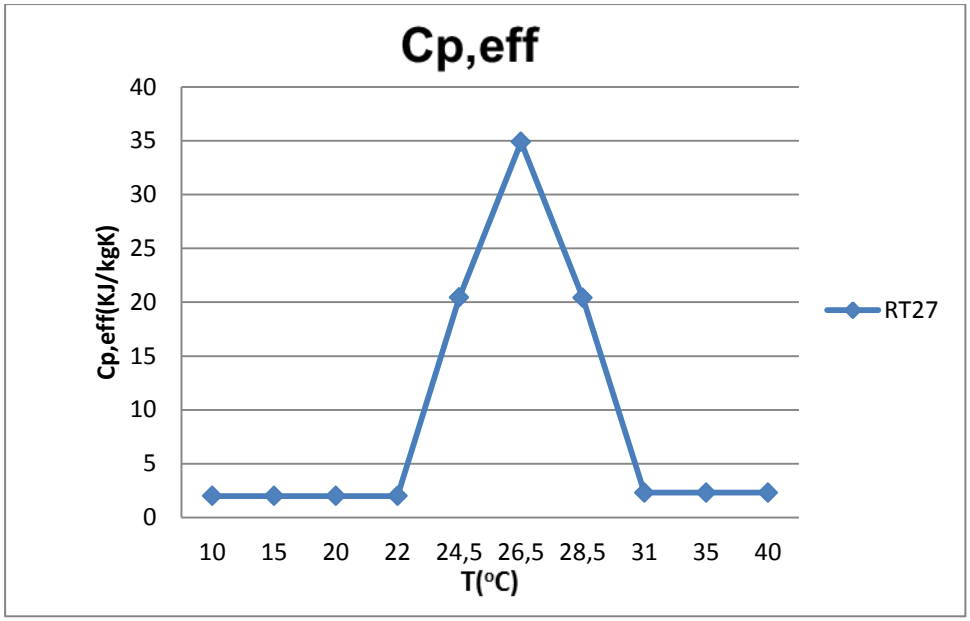
Για T≤22°C: $Cp,_{eff}(T)=2KJ/kgK$

Για 22°C ≤T≤26,5°C: $\mathrm{Cp,eff(T)} = 597{,}6\left(\frac{T-22}{81}\right) + 2$

Για 26,5°C ≤T≤31°C: $\mathrm{Cp,eff(T)} = -586{,}8\left(\frac{T-17{,}5}{81}\right) - 34{,}9$

Για T≥31°C: $Cp,_{eff}(T)=2{,}3KJ/kgK$

Και το διάγραμμα έχει ως εξής:



Σχήμα 6.5.4: Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας του RT27.

- Για το RT58 ισχύουν:

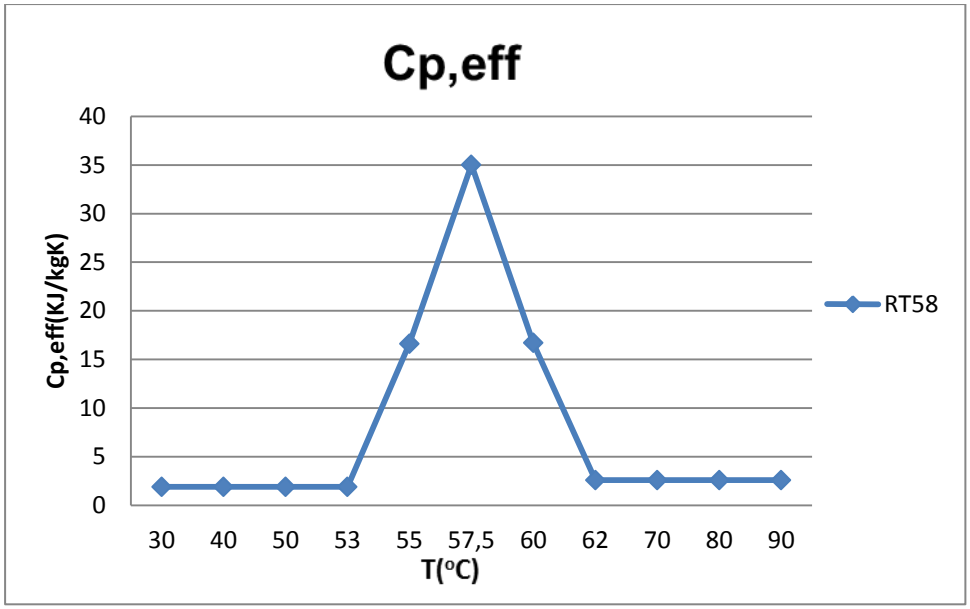
Για T≤53°C: $Cp,_{eff}(T)=1,9KJ/kgK$

Για 53°C ≤T≤57,5°C: $\mathrm{Cp,eff(T)} = 593{,}6\left(\frac{T-53}{81}\right) + 1{,}9$

Για 57,5°C ≤T≤62°C: $\mathrm{Cp,eff(T)} = -570{,}8\left(\frac{T-57{,}5}{81}\right) - 34{,}3$

Για T≥62°C: $Cp,_{eff}(T)=2,6KJ/kgK$

Και το διάγραμμα έχει ως εξής:



Σχήμα 6.5.5: Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας του RT58.

- Για το μείγμα οργανικού-ανόργανου SP25A8 ισχύουν:

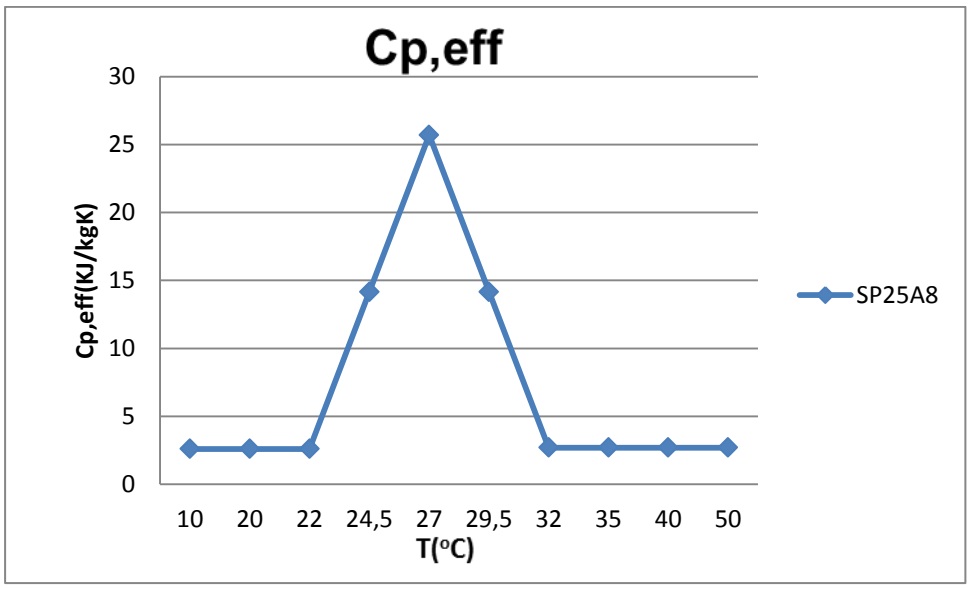
Για T≤22°C: $Cp,_{eff}(T)=2,6KJ/kgK$

Για 22°C ≤T≤27°C: $\mathrm{Cp,eff(T)} = 462\left(\frac{T-22}{100}\right) + 2,6$

Για 27°C ≤T≤32°C: $\mathrm{Cp,eff(T)} = -458\left(\frac{T-27}{100}\right) + 25,6$

Για T≥32°C: $Cp,_{eff}(T)=2,7KJ/kgK$

Και το διάγραμμα έχει ως εξής:



Σχήμα 6.5.6: Καμπύλη ενεργούς θερμοχωρητικότητας του SP25A8.

Εύκολα μπορούμε να διακρίνουμε ότι τα διαγράμματα αυτά επιβεβαιώνουν το προηγούμενο διάγραμμα τριγωνικής μορφής.

6.6 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM

Οι παραδοχές που έχουν γίνει για τη διευκόλυνση της μελέτης του στρώματος PCM είναι οι ακόλουθες:

- Στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης επικρατεί ομοιόμορφη και ενιαία θερμοκρασία κάθε χρονική στιγμή.

- Μεταξύ του στρώματος του υλικού αλλαγής φάσης και της μόνωσης δεν υπάρχει συναλλαγή θερμότητας δηλαδή υπάρχει αδιαβατικό όριο μεταξύ τους, τέλεια μόνωση.

- Η θερμοκρασία της αίθουσας θεωρείται σταθερή.

Συμπερασματικά λοιπόν προκύπτει ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας του στρώματος του PCM εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο κατά τη διάρκεια της ημέρας, τη συναλλαγή θερμότητας με συναγωγή με τον αέρα στο εσωτερικό του δωματίου, τη συναλλαγή θερμότητας με συναγωγή με τον αέρα έξω από το δωμάτιο καθώς και από τη μάζα και τη θερμοχωρητικότητα του ίδιου του PCM.

Η ενέργεια που δίνει το PCM υπολογίζεται από τον εξής ενεργειακό ισολογισμό:

$$Q_{PCM}=Q_{\text{αέρα,ισοδ}}+Q_{\text{αέρα,εσ}} \Rightarrow \mathrm{Cp,eff(T)m}\left(T_{pcm}-T_{pcm}^{0}\right)= 3600U_oA_{\tau o\iota\chi}\left(T_E-\frac{\left(T_{pcm}+T_{pcm}^{0}\right)}{2}\right)+3600\,U_iA_{\tau o\iota\chi}\left(T_i-\frac{\left(T_{pcm}+T_{pcm}^{0}\right)}{2}\right) \quad (6.11)$$

Όπου:

- T_{pcm} είναι η θερμοκρασία του στρώματος του PCM στο τέλος της χρονικής περιόδου.

- T_{pcm}^{0}είναι η θερμοκρασία του στρώματος του PCM στην αρχή της χρονικής περιόδου, η οποία επειδή δεν είναι γνωστή στην αρχή των επαναλήψεων θα θεωρηθεί μια τυχαία τιμή για μια τυχαία ώρα της ημέρας και όπως θα αποδειχθεί αργότερα δεν επηρεάζει καθόλου το τελικό αποτέλεσμα.

- $Cp,_{eff}(T)$ είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα η οποία δίνεται από τους παραπάνω τύπους ανάλογα με τη θερμοκρασία και το είδος του PCM.

- m η μάζα του PCM και υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$m=\rho V \qquad (6.12)$$

Η πυκνότητα ρ διαφέρει για κάθε PCM αλλά θεωρούμε ότι παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, η μεταβολή της οποίας για ένα PCM πραγματοποιείται εντός στενών και προκαθορισμένων ορίων. Για υλικό αλλαγής φάσης RT27, που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια, η ρ είναι ίση με 820kg/m^3. Όσον αφορά τώρα τον όγκο του PCM, αυτός μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

V= (πλάτος τοίχου) x (ύψος τοίχου) x (πάχος στρώματος PCM)=(10m)x(3m)x(0,03m)=0,9m^3

- $A_{τοιχ}$ είναι η επιφάνεια του τοίχου νότιου προσανατολισμού η οποία προκύπτει ίση με:

$A_{τοιχ}$ =(πλάτος τοίχου)x(ύψος τοίχου)=(10m)x(3m)=30m^2

- T_i είναι η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του δωματίου

  - Για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο και Απρίλιο: T_i=20°C

  - Για τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο: T_i=26°C

  - Για τους μήνες Μάιο και Οκτώβριο: T_i=22°C

- T_E είναι η ισοδύναμη θερμοκρασία

- U είναι η ειδική θερμική διαπερατότητα, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

  - Για την περίπτωση το στρώμα του PCM βρίσκεται από την έξω πλευρά του τοίχου και η μόνωση από μέσα ισχύει ότι:

    ❖ $$\frac{1}{U_O}=\frac{1}{h_O}+\frac{l_{σοβ}}{k_{σοβ}}+\frac{l_{τουβλ}}{k_{τουβλ}}+\frac{\frac{l_{PCM}}{2}}{k_{PCM}} \qquad (6.13)$$

❖ $\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{l_{σοβ}}{k_{σοβ}} + \frac{l_{τουβλ}}{k_{τουβλ}} + \frac{l_{μον}}{k_{μον}} + \frac{\frac{l_{PCM}}{2}}{k_{PCM}}$ (6.14)

όπου ο όρος $\frac{1}{h}$ παριστά την θερμική αντίσταση συναγωγής με συντελεστή συναγωγής μεταξύ του τοίχου και του εσωτερικού του δωματίου h_i=8 W/m^{2}K και μεταξύ του τοίχου και του εξωτερικού περιβάλλοντος h_o=16 W/m^{2}K και ο όρος $\frac{l}{k}$ παριστά τη θερμική αντίσταση αγωγής διαμέσου των διαφόρων υλικών που υπάρχουν πριν και μετά το PCM με πάχος $l_{σοβ}$=0,02m, $l_{τουβλ}$=0,09m, l_{PCM}=0,03m και θερμική αγωγιμότητα $k_{σοβ}$=1,2 W/mK, $k_{τουβλ}$=0,72 W/mK, $k_{μον}$=0,038 W/mK, k_{PCM}=0,8 W/mK

- Για $l_{μον}$=0,04m ⇒ U_o=4,49 W/m^2 ^{o}C και U_i=0,75 W/m^2 ^{o}C

- Για $l_{μον}$=0m ⇒ U_o=4,49 W/m^2 ^{o}C και U_i=3,5 W/m^2 ^{o}C

- Για $l_{μον}$=0,02m ⇒ U_o=4,49 W/m^2 ^{o}C και U_i=1,23 W/m^2 ^{o}C

- Για $l_{μον}$=0,06m ⇒ U_o=4,49 W/m^2 ^{o}C και U_i=0,54 W/m^2 ^{o}C

- Για $l_{μον}$=0,08m ⇒ U_o=4,49 W/m^2 ^{o}C και U_i=0,42 W/m^2 ^{o}C

▪ Ενώ στη δεύτερη περίπτωση το στρώμα του PCM είναι στη μέσα πλευρά του τοίχου και η μόνωση από έξω ισχύει ότι:

❖ $\frac{1}{U_O} = \frac{1}{h_O} + \frac{l_{σοβ}}{k_{σοβ}} + \frac{l_{τουβλ}}{k_{τουβλ}} + \frac{l_{μον}}{k_{μον}} + \frac{\frac{l_{PCM}}{2}}{k_{PCM}}$ (6.15)

❖ $\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{l_{σοβ}}{k_{σοβ}} + \frac{l_{τουβλ}}{k_{τουβλ}} + \frac{\frac{l_{PCM}}{2}}{k_{PCM}}$ (6.16)

Όπου:

- Για $l_{μον}$=0,04m ⇒ U_o=0,78 W/m^2 ^{o}C και U_i=3,5 W/m^2 ^{o}C

- Για $l_{μον}$=0m ⇒ U_o=4,49 W/m^2 ^{o}C και U_i=3,5 W/m^2 ^{o}C

- Για $l_{μον}$=0,02m ⇒ U_o=1,3 W/m^2 ^{o}C και U_i=3,5 W/m^2 ^{o}C

- Για $l_{μον}$=0,06m ⇒ U_o=0,55 W/m^2 ^{o}C και U_i=3,5 W/m^2 ^{o}C

- Για $l_{μον}$=0,08m ⇒ U_o=0,43 W/m^2 ^{o}C και U_i=3,5 W/m^2 ^{o}C

6.7 Εφαρμογή του ισολογισμού ενέργειας στο στρώμα PCM

Επιλύοντας ως προς T_{PCM} τον παραπάνω ενεργειακό ισολογισμό που διατυπώθηκε με τη σχέση (6.11) προκύπτει έπειτα από πράξεις:

$$T_{PCM} = \frac{mCp,eff T_{PCM}^0 - \frac{3600 U_i A_{τοιχ}}{2} T_{PCM}^0 - \frac{3600 U_o A_{τοιχ}}{2} T_{PCM}^0 + 3600 U_o A_{τοιχ} T_E + 3600 U_i A_{τοιχ} T_i}{mCp,eff + \frac{3600 U_i A_{τοιχ}}{2} + \frac{3600 U_o A_{τοιχ}}{2}} \quad (6.17)$$

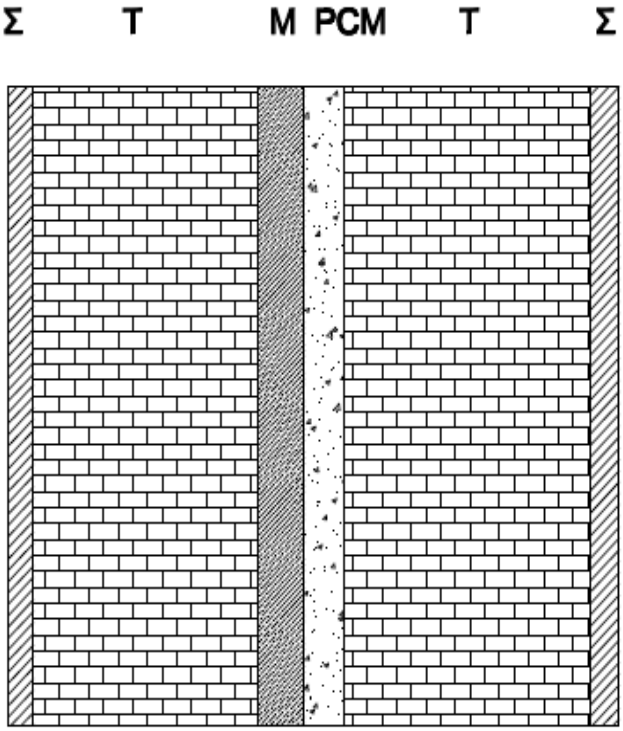
Υπολογίζουμε με βάση τον παραπάνω τύπο, με το πρόγραμμα Excel, τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο στρώμα του PCM για μια τυπική μέρα την 21^η κάθε μήνα του έτους ανάλογα με το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιούμε και τον προσανατολισμό του τοίχου που περιέχει το PCM και για τις δύο περιπτώσεις.

7. Παραμετρικές μελέτες

7.1 1η Παραμετρική μελέτη

Στη μελέτη αυτή θα εξετασθεί η συμπεριφορά του υλικού αλλαγής φάσης με την εμπορική ονομασία RT27 της Rubitherm όταν αυτό τοποθετηθεί σε εξωτερικό τοίχο με νότιο, ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό για την 21η κάθε μήνα του έτους. Η διαδικασία αυτή θα πραγματοποιηθεί για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης 0,04m, 0m, 0,02m, 0,06m και 0,08m.

Η παραμετρική μελέτη θα γίνει πάνω στην προσομοίωση της ηλιακής φόρτισης τοιχοποιίας που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6.1, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχέδιο, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση το στρώμα του PCM βρίσκεται από την έξω πλευρά του τοίχου και η μόνωση από μέσα.

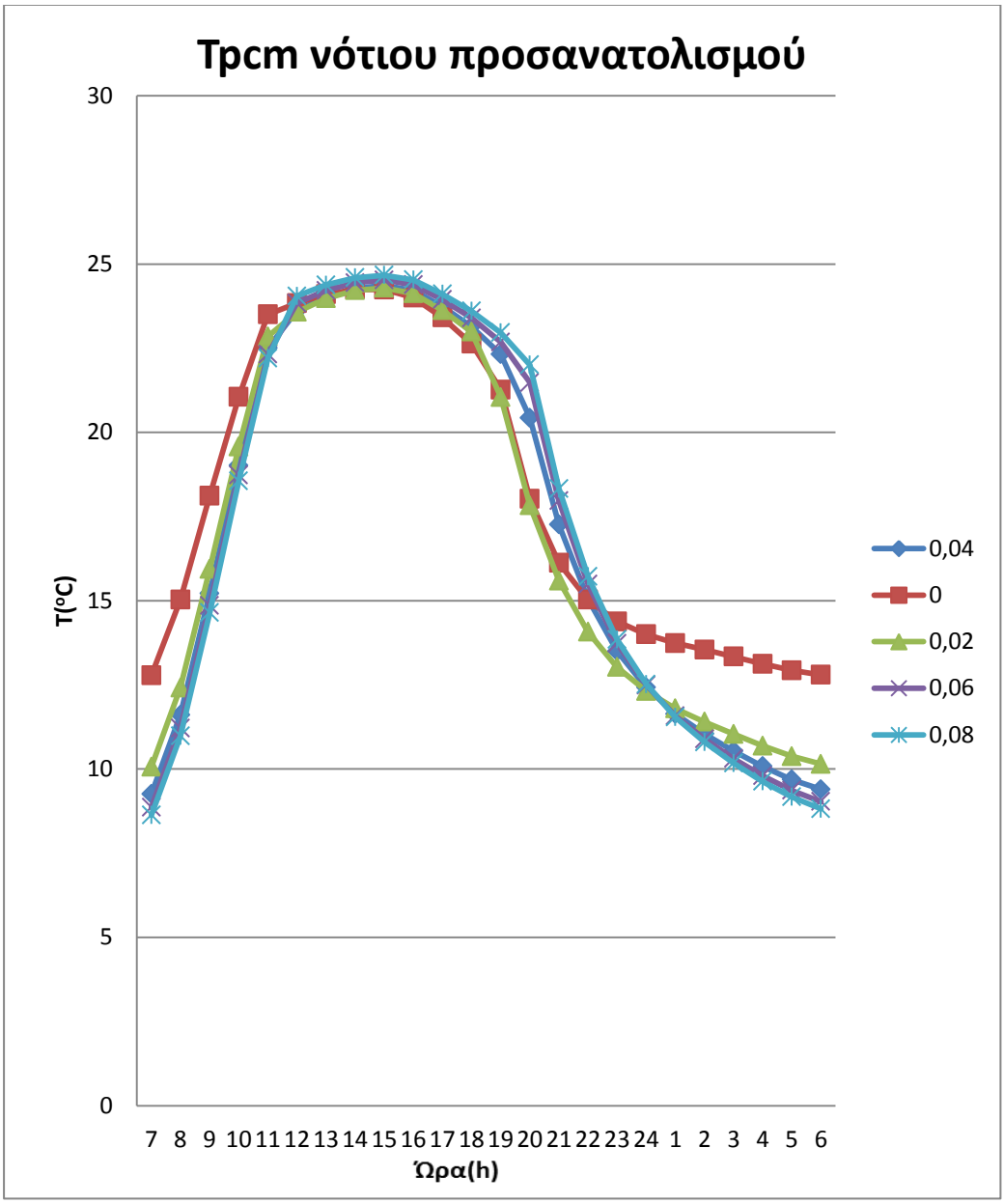


Σχήμα 7.1.1: Γραφική αναπαράσταση της διαστρωμάτωσης του τοίχου για την 1η παραμετρική μελέτη

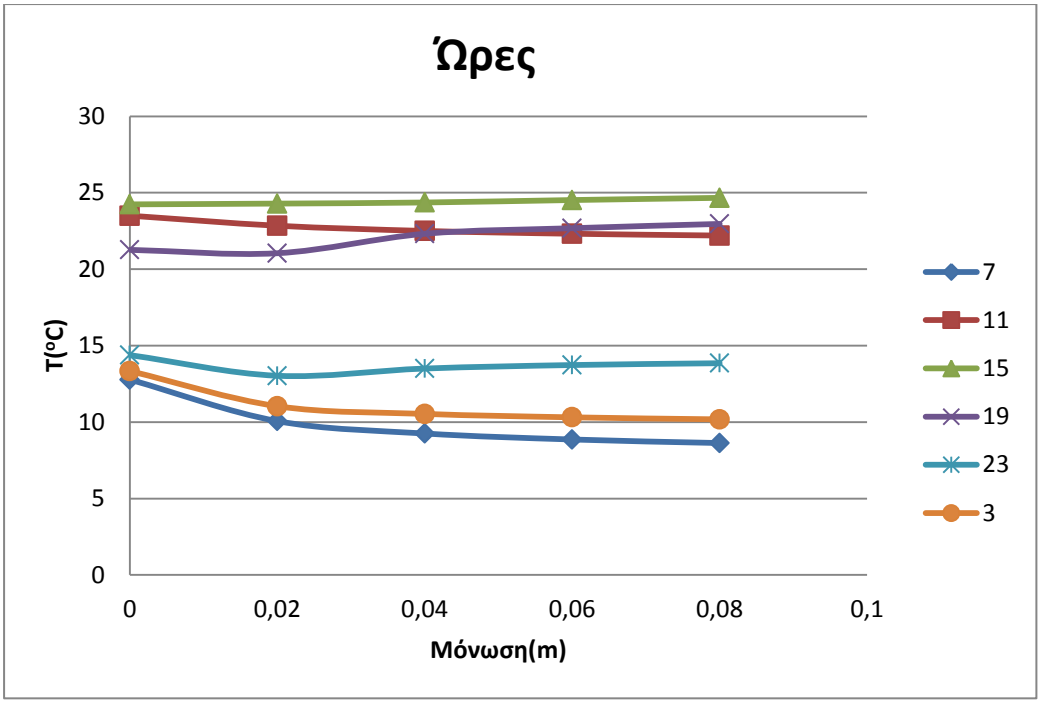
Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες Tpcm(°C)–Ώρες(h) και Tpcm(°C)-Μόνωση(m) προκειμένου να μελετηθεί αναλυτικά η συμπεριφορά του PCM.

7.1.1 Καμπύλες Tpcm(°C)–Ώρες(h) και Tpcm(°C)-Μόνωση(m)

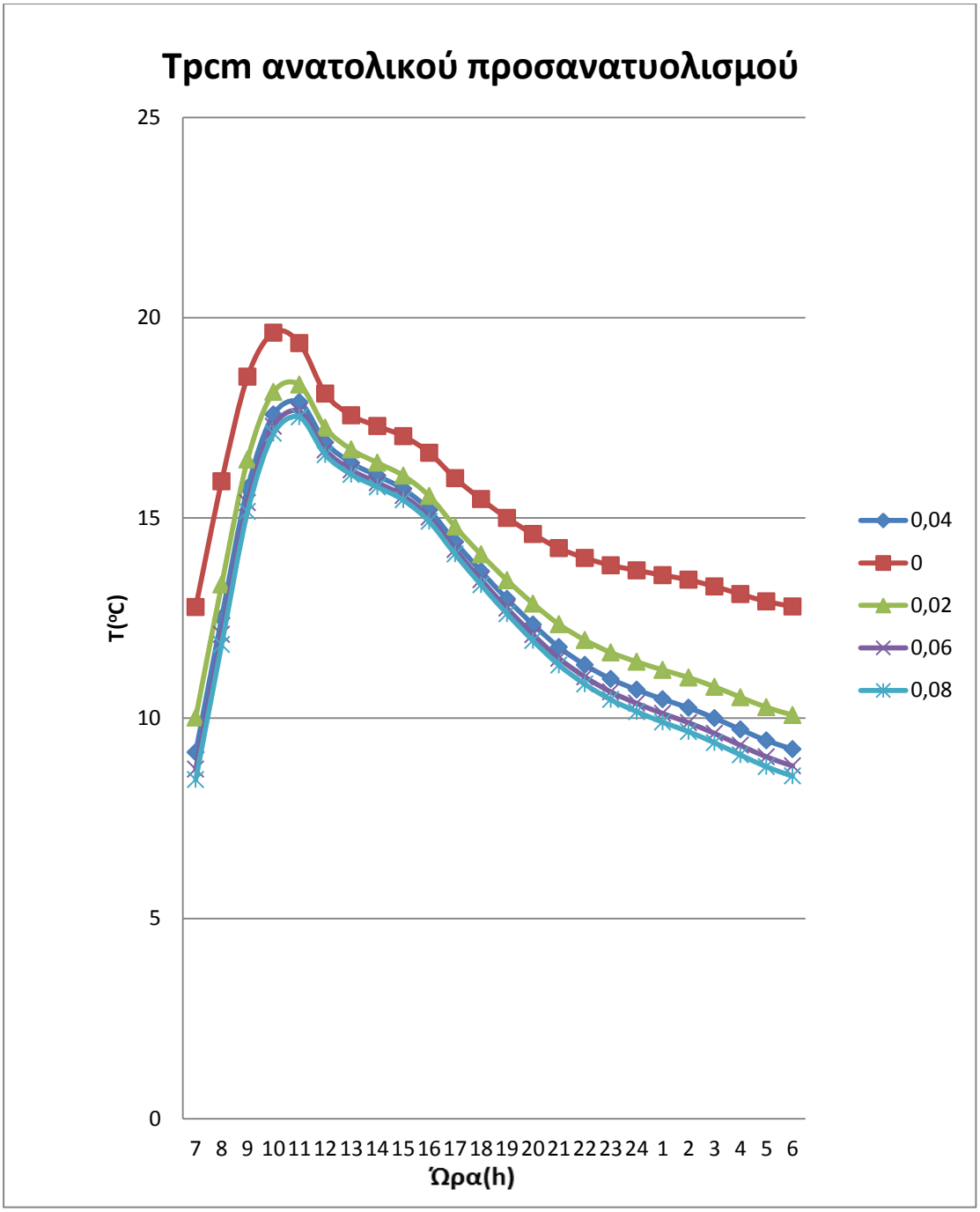
- Για την 21η Ιανουαρίου:



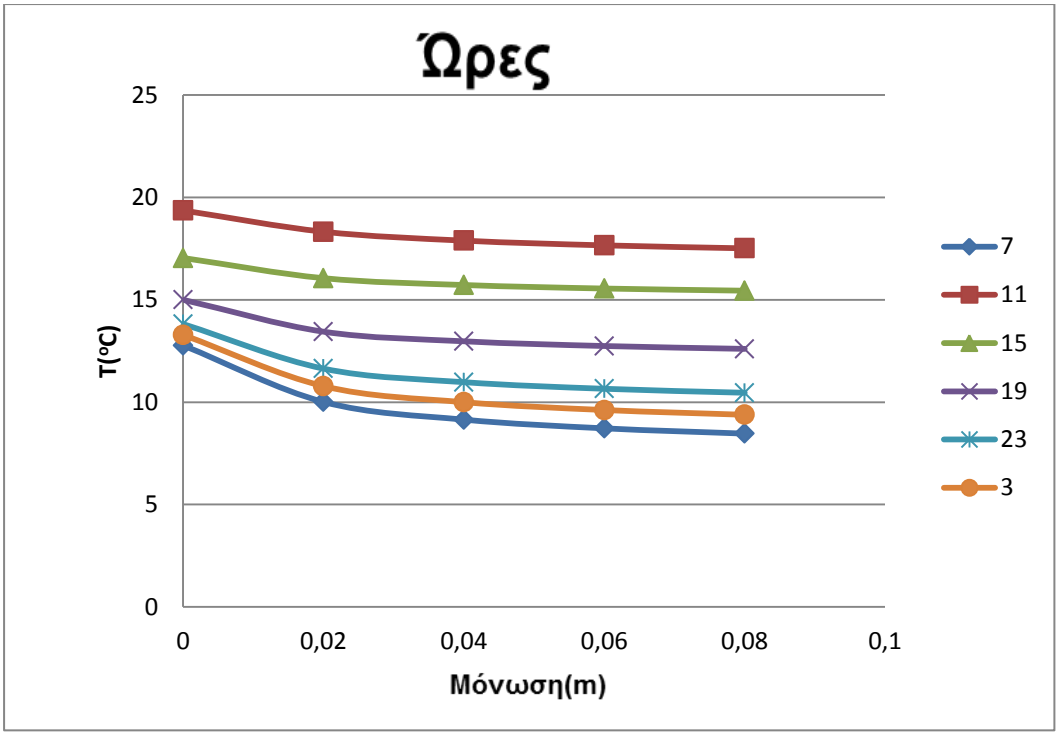
Σχήμα 7.1.1.1: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



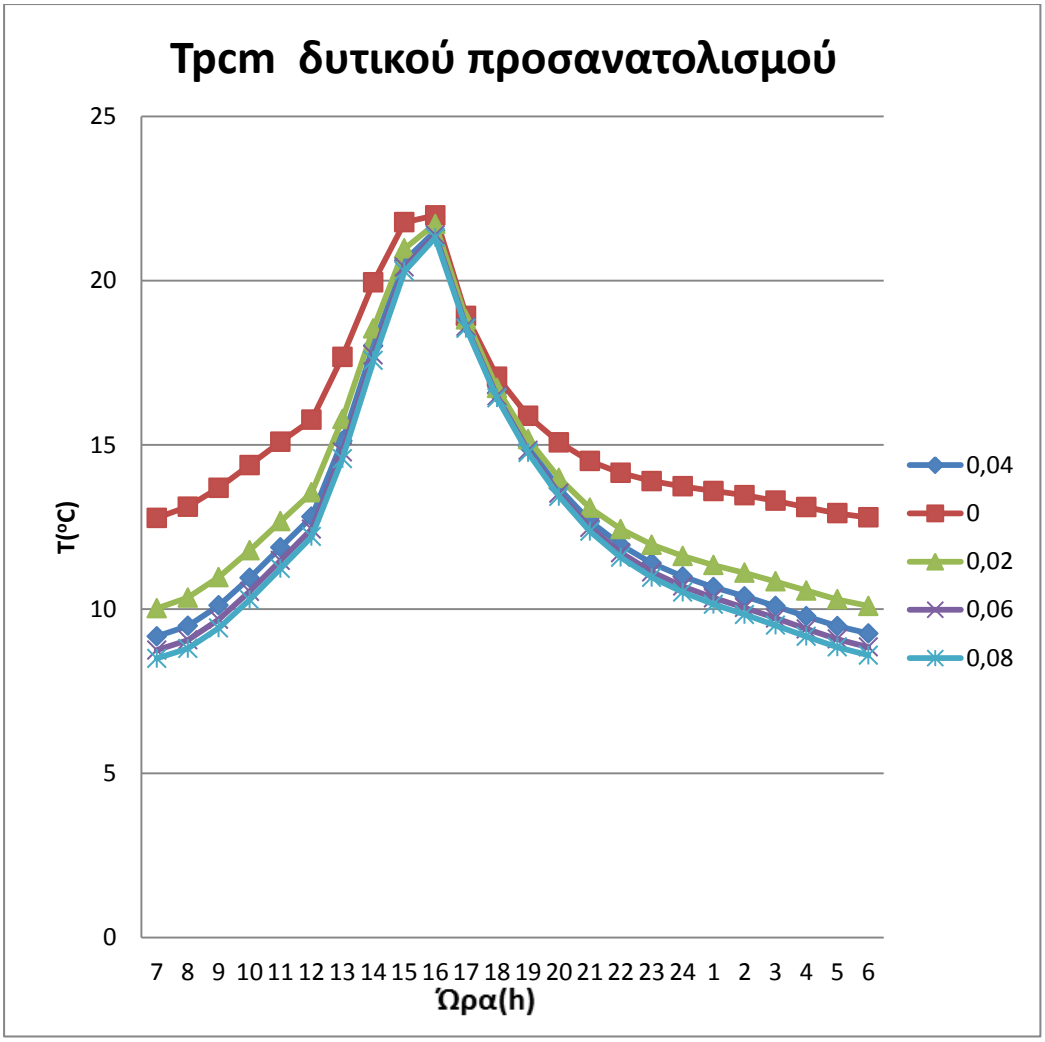
Σχήμα 7.1.1.2: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



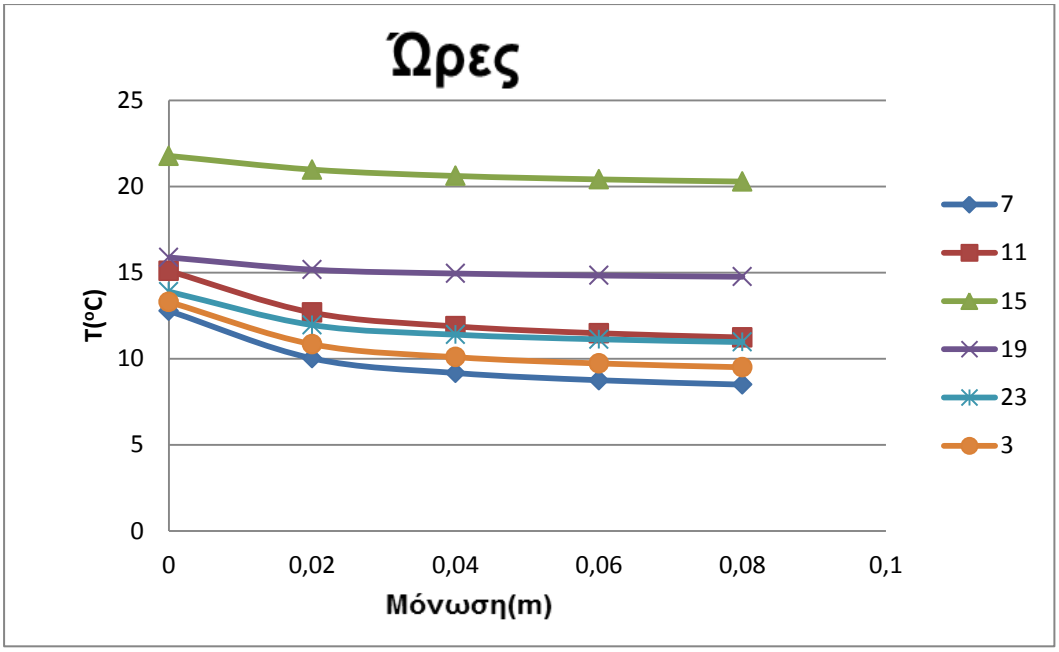
Σχήμα 7.1.1.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



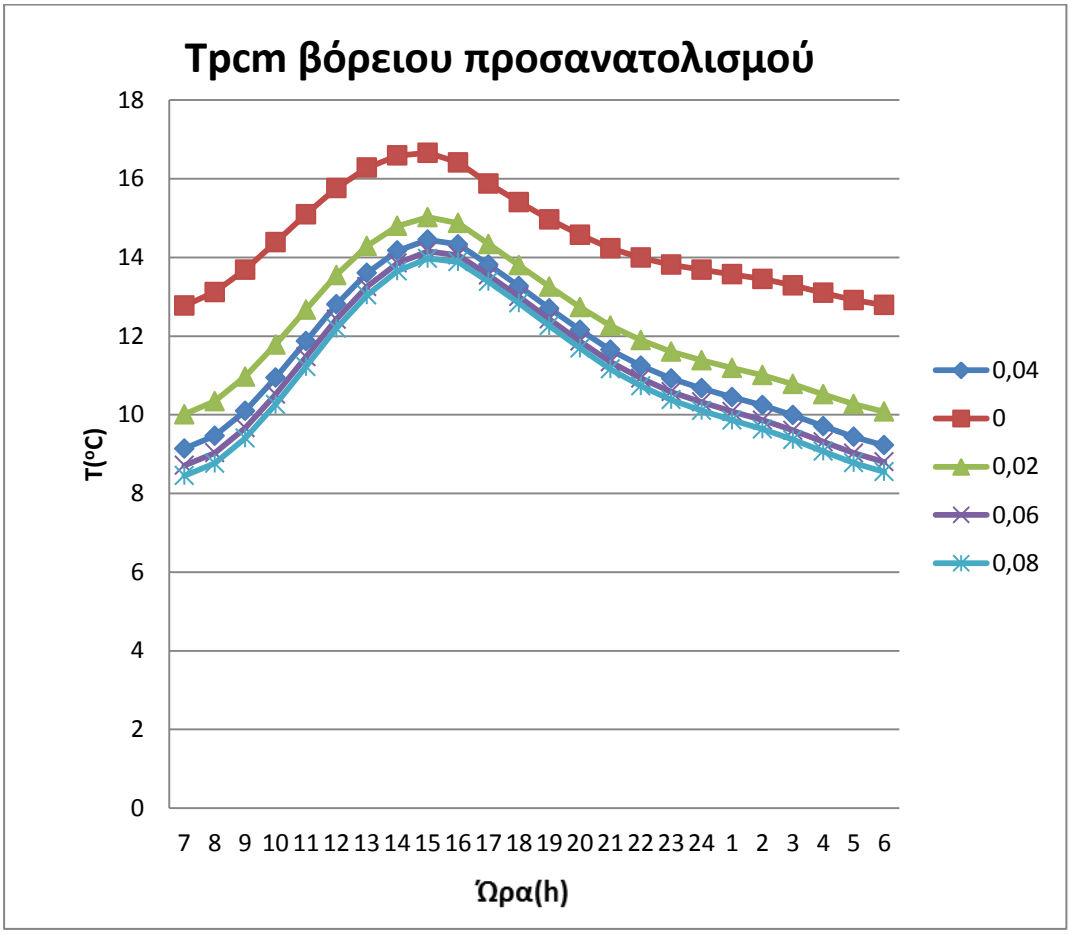
Σχήμα 7.1.1.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21^{η} Ιανουαρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



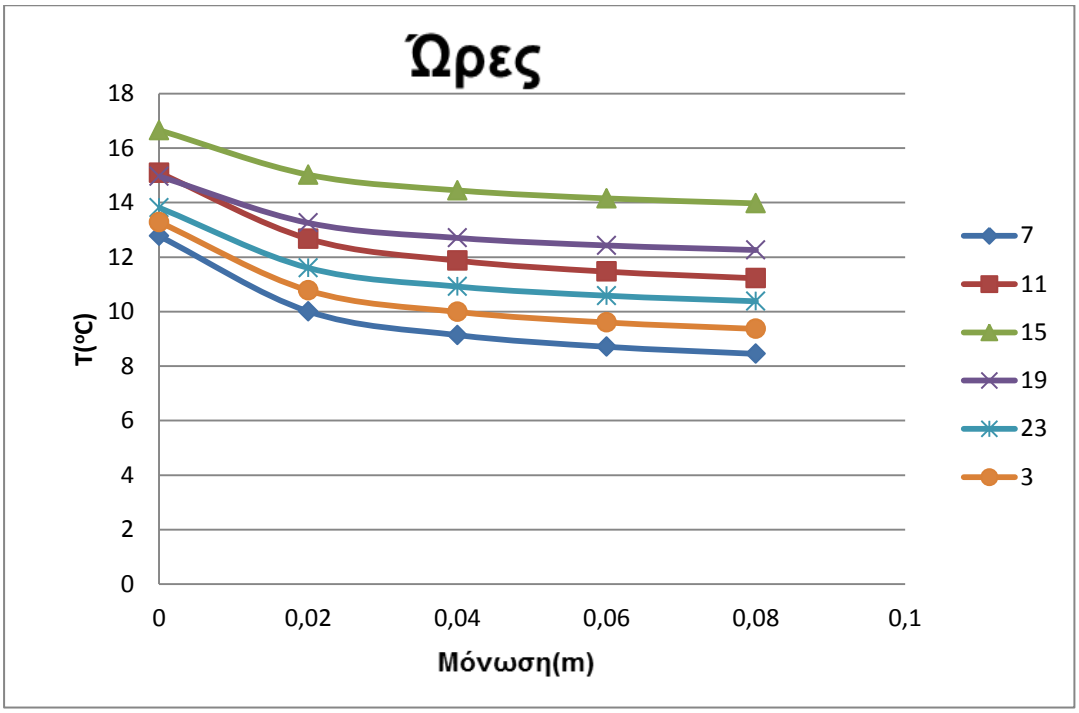
Σχήμα 7.1.1.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.6: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

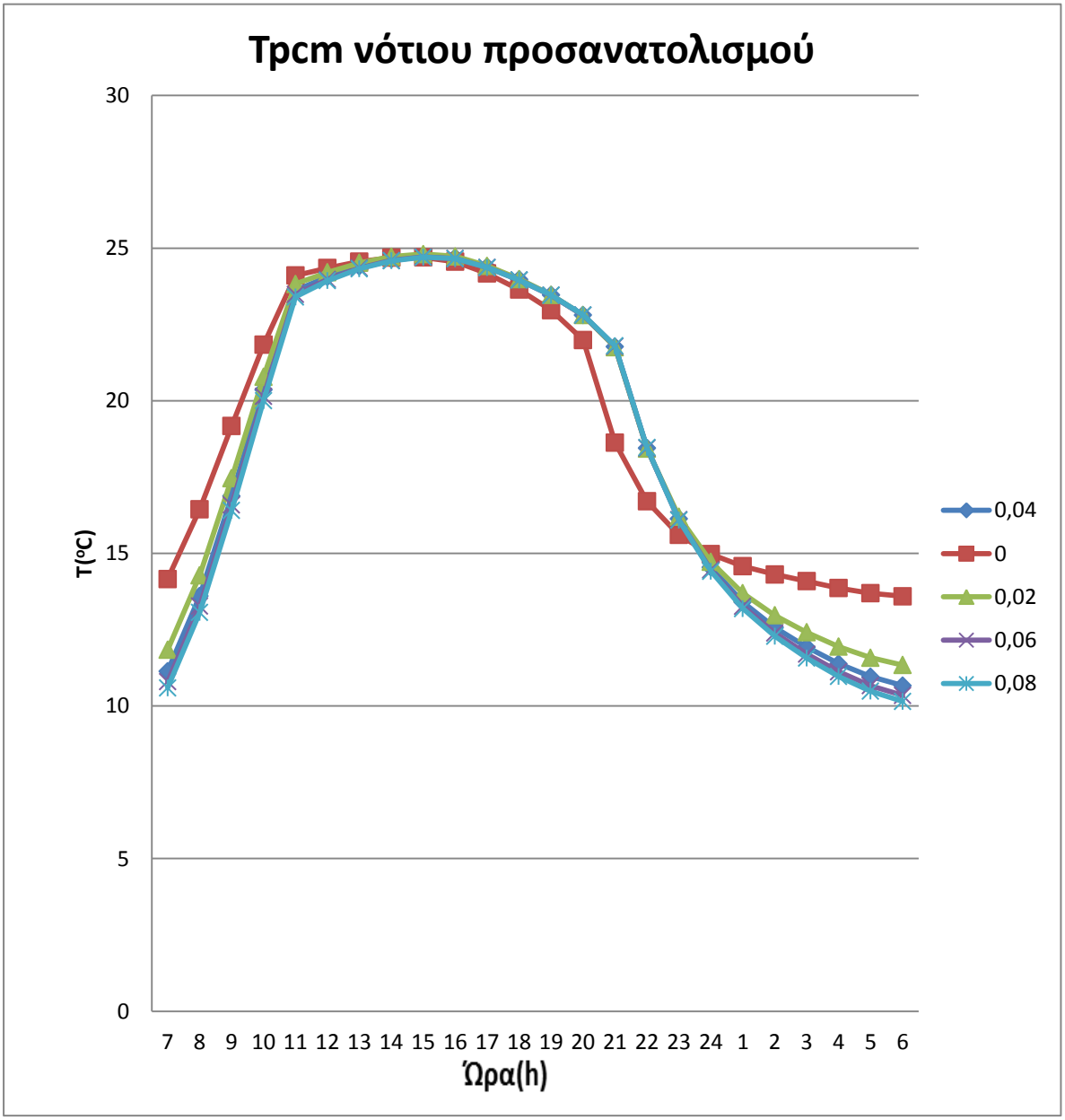


Σχήμα 7.1.1.7: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

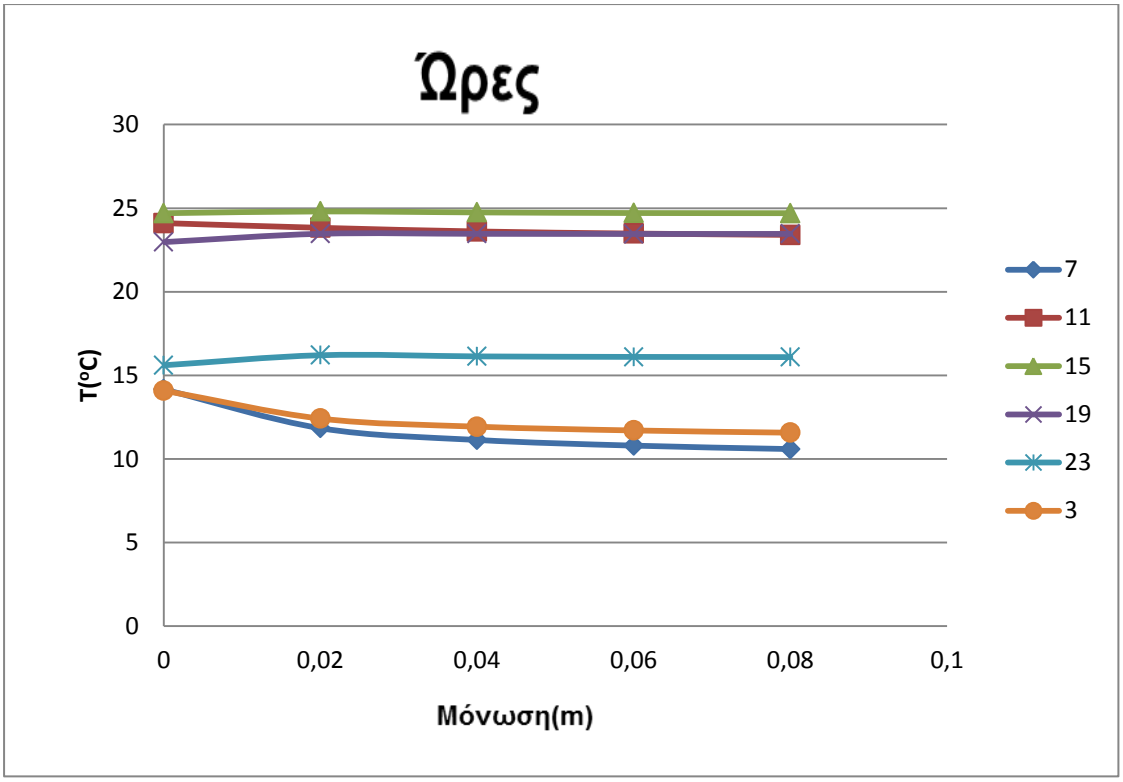


Σχήμα 7.1.1.8: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

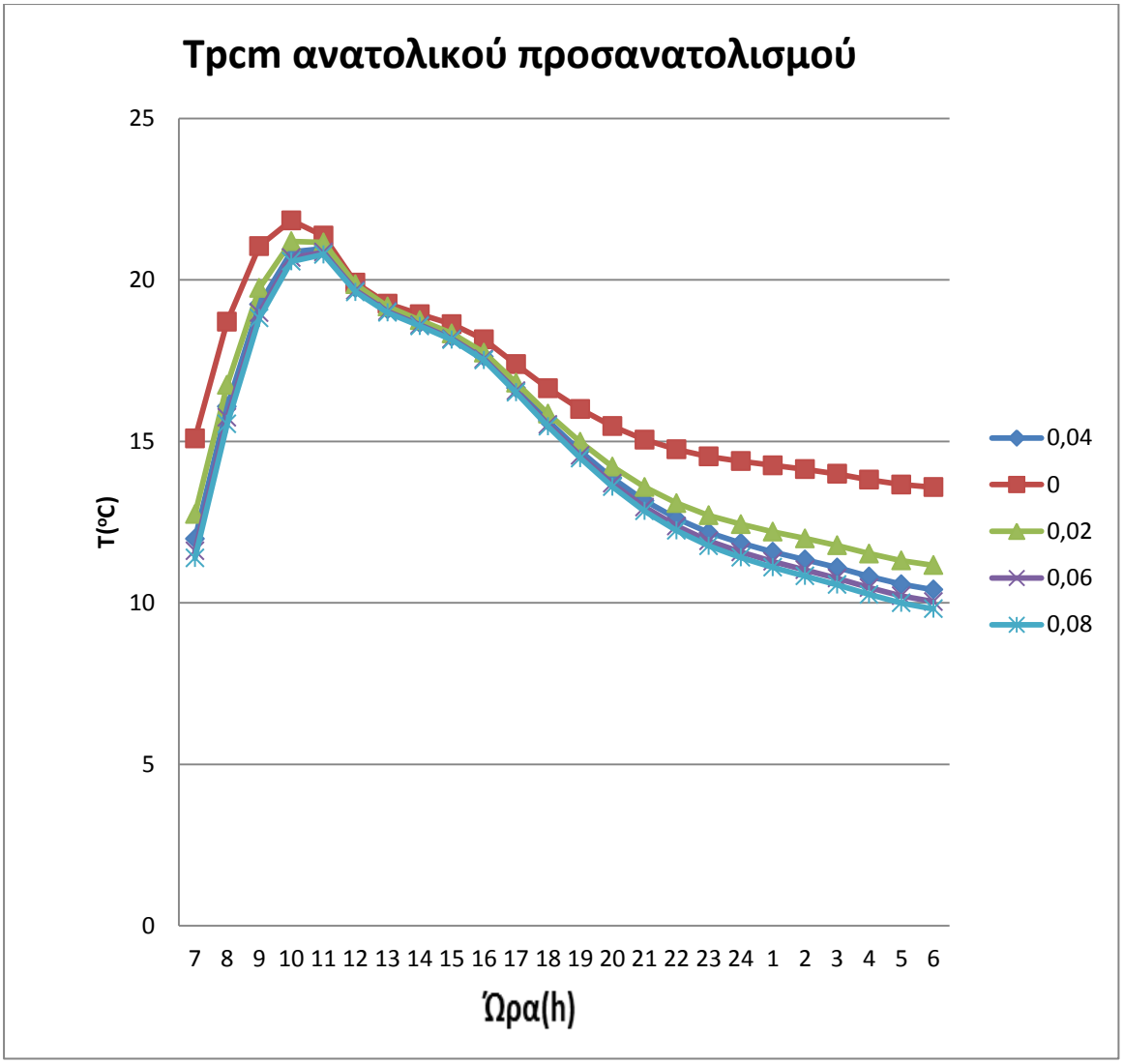
- Για την 21η Φεβρουαρίου:



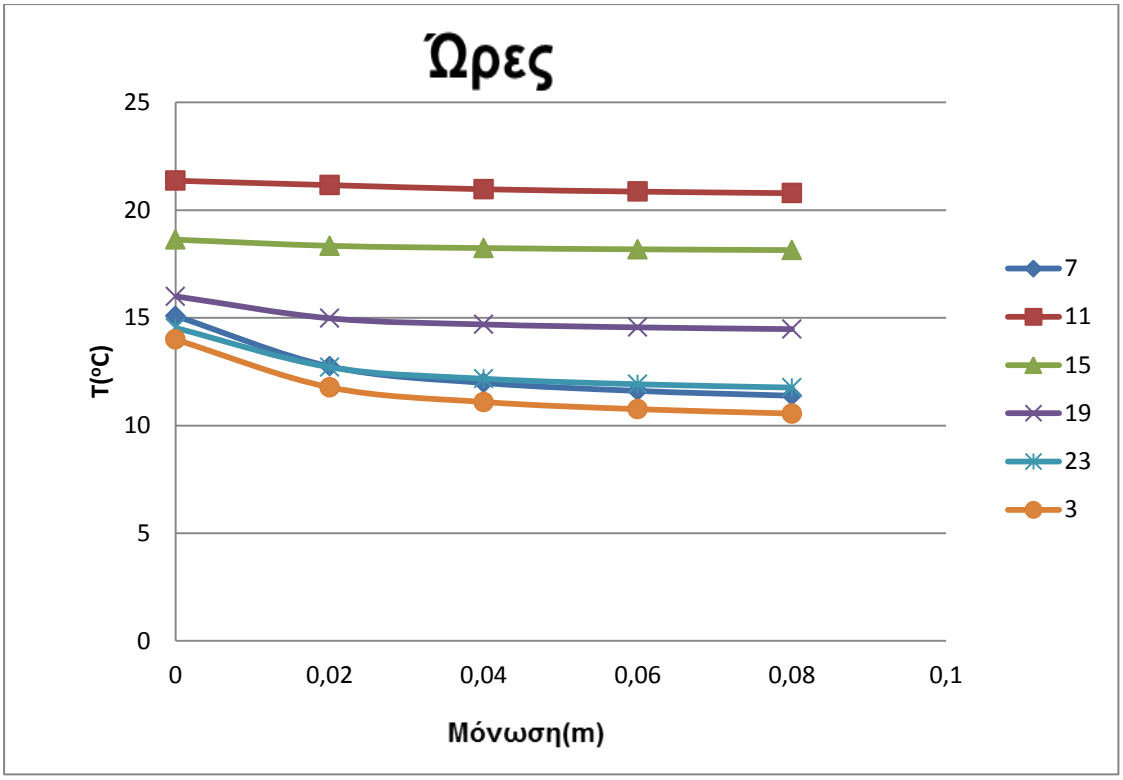
Σχήμα 7.1.1.9: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Φερβρουαρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



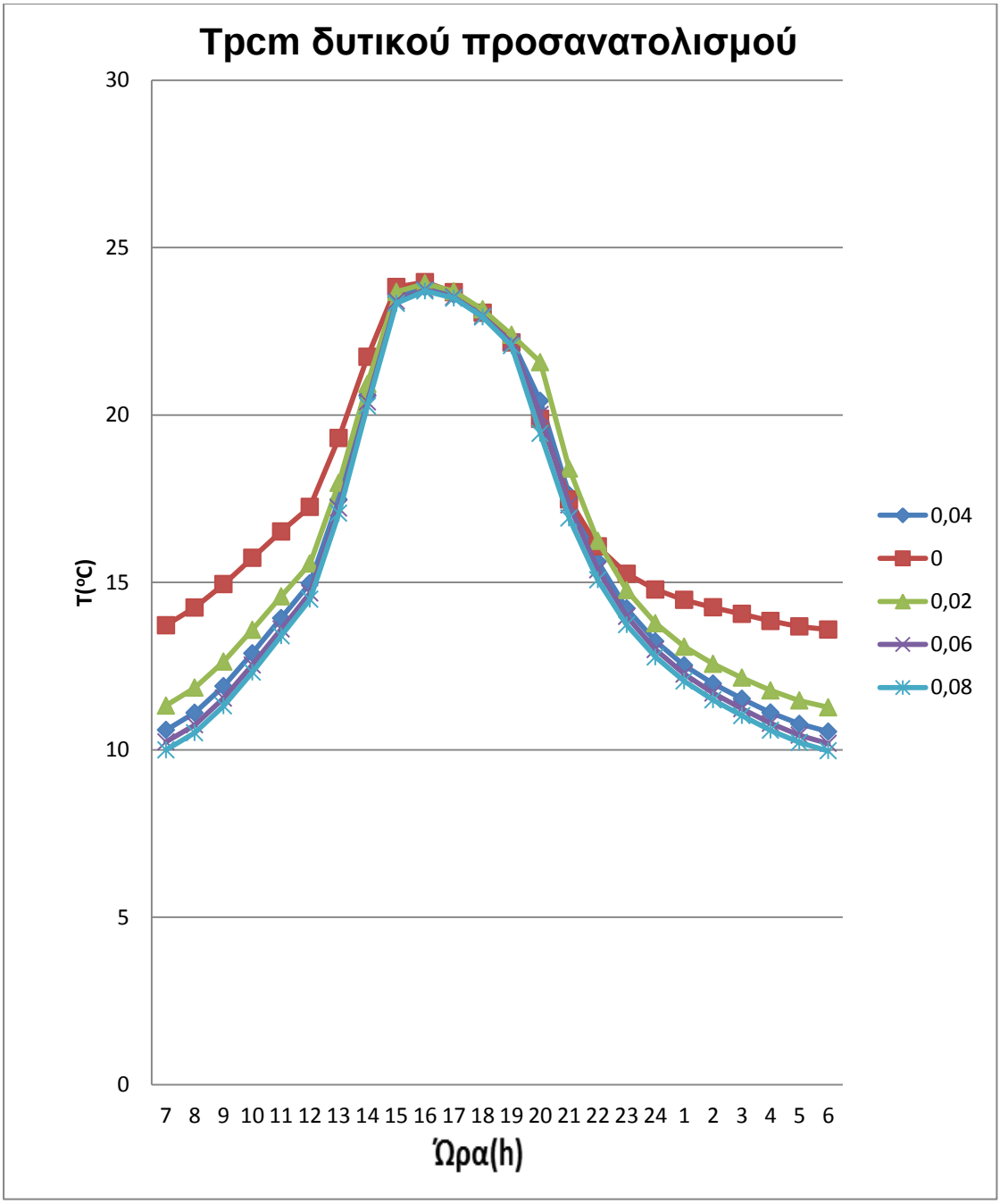
Σχήμα 7.1.1.10: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Φερβρουαρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



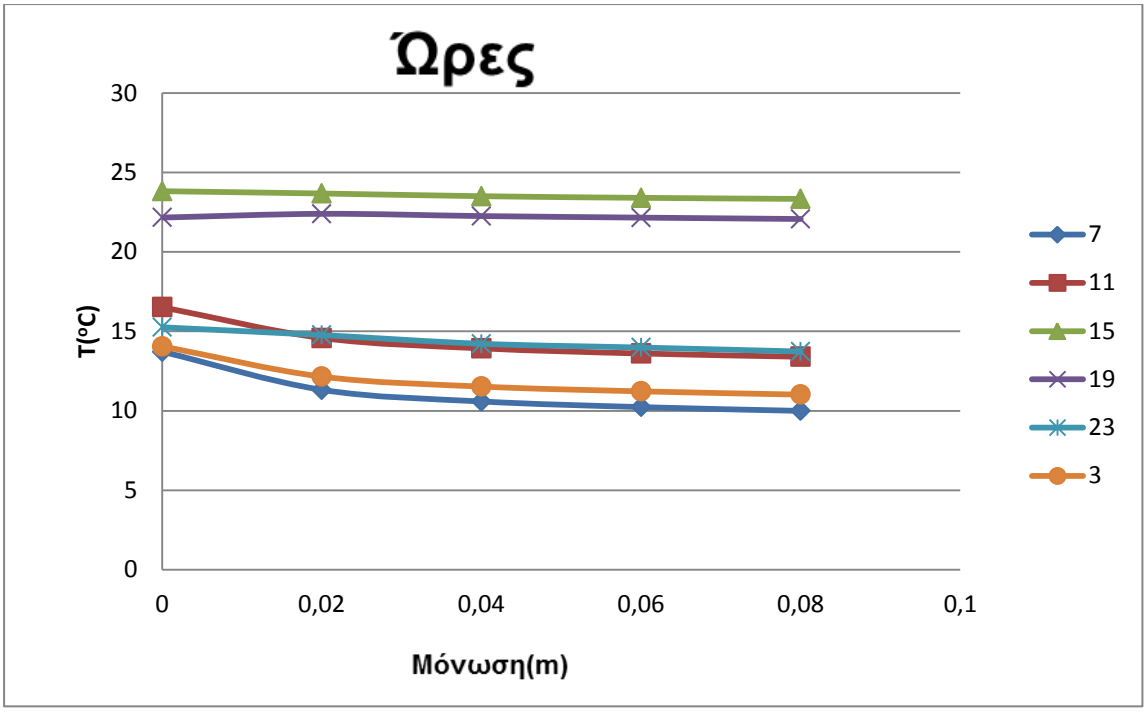
Σχήμα 7.1.1.11: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



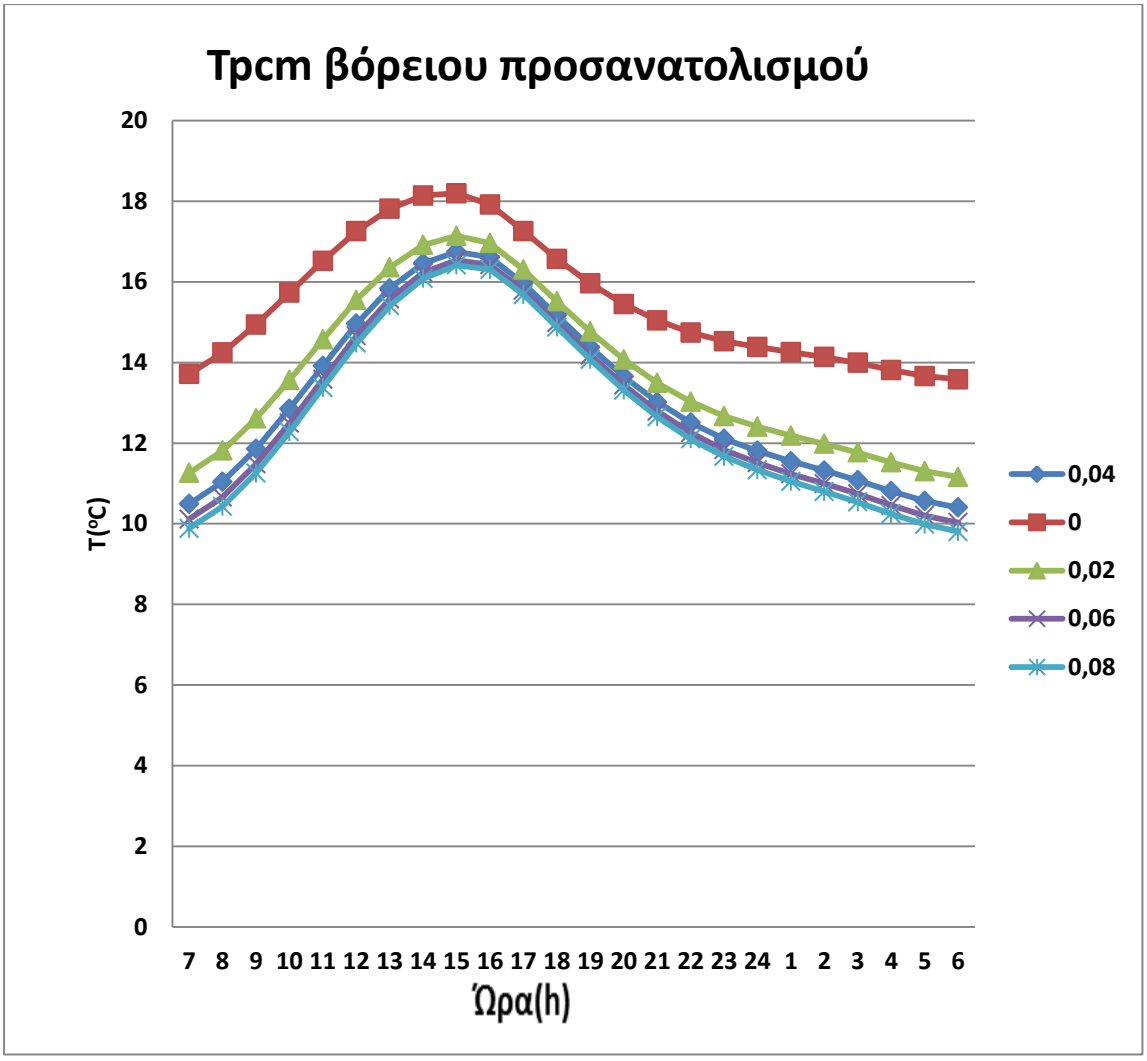
Σχήμα 7.1.1.12: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



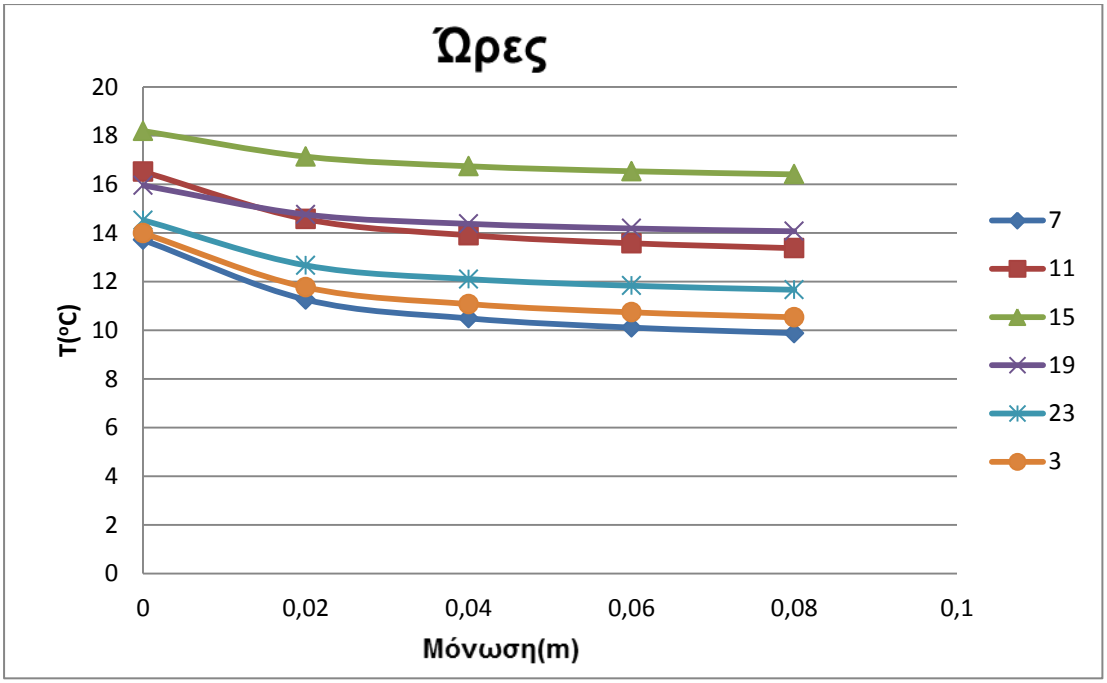
Σχήμα 7.1.1.13: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.14: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

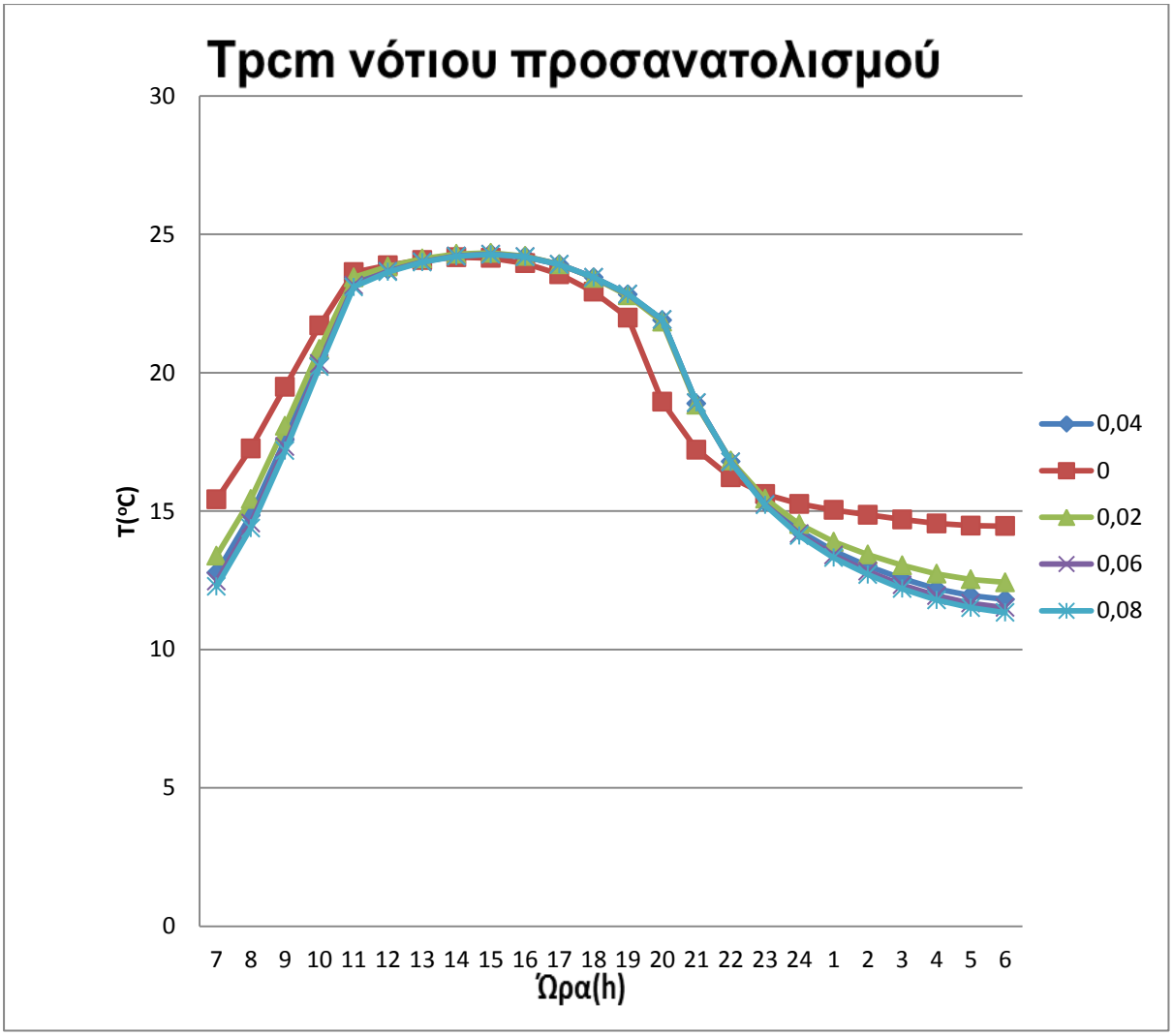


Σχήμα 7.1.1.15: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

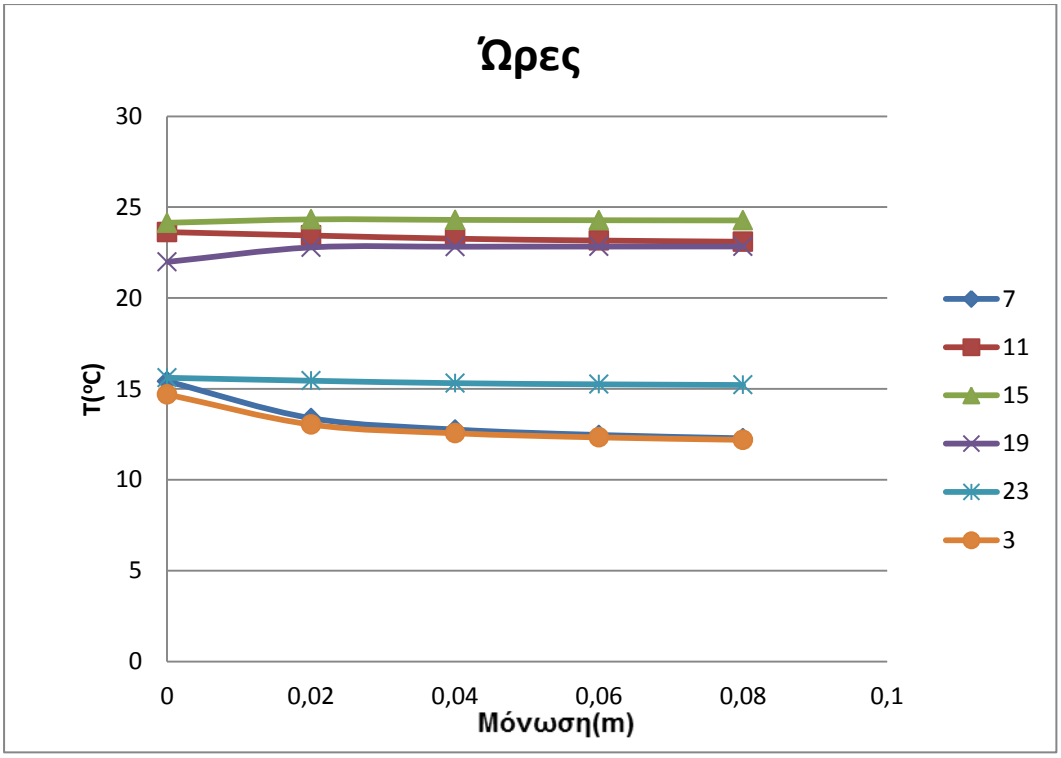


Σχήμα 7.1.1.16: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

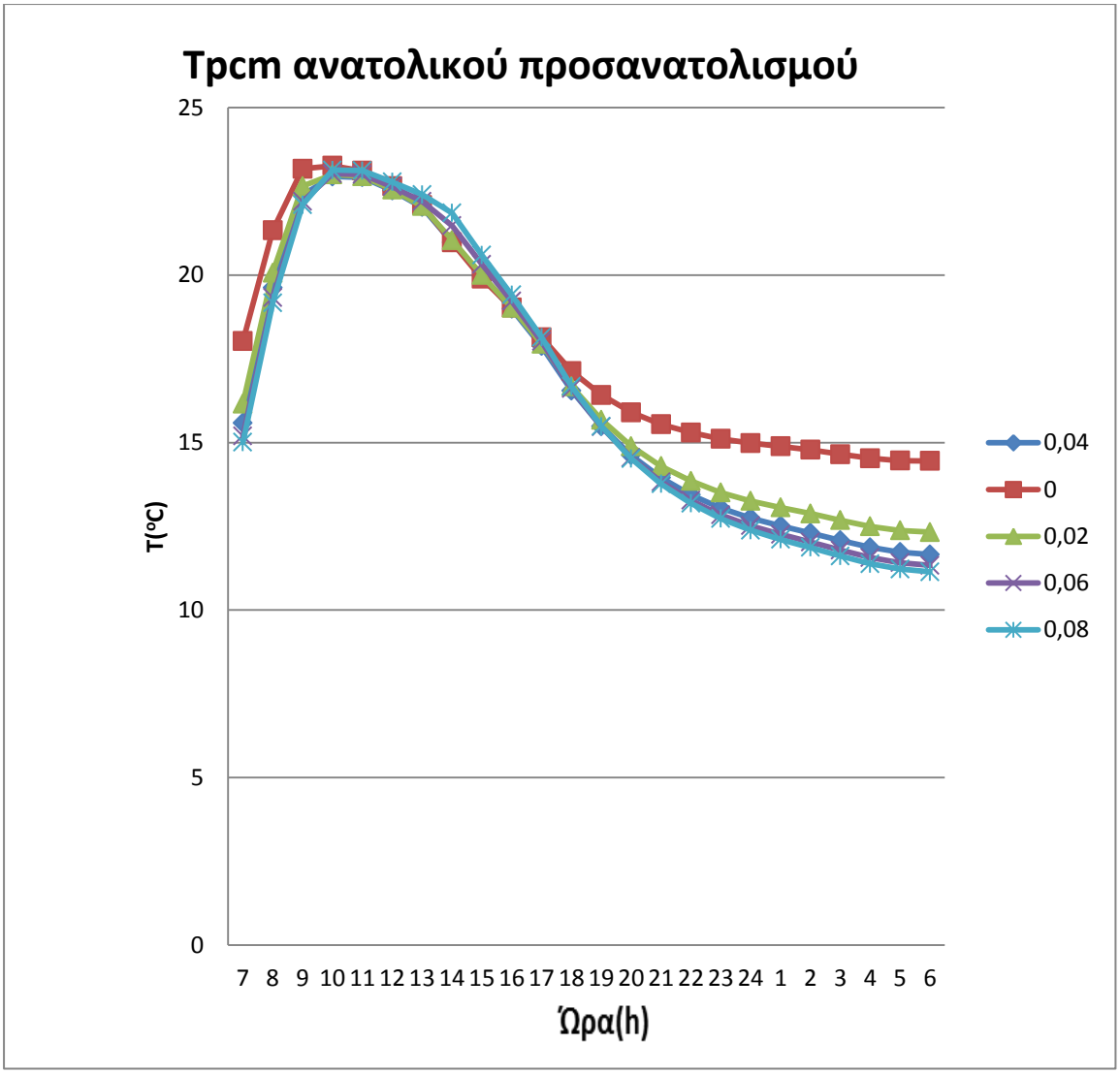
- Για την 21η Μαρτίου:



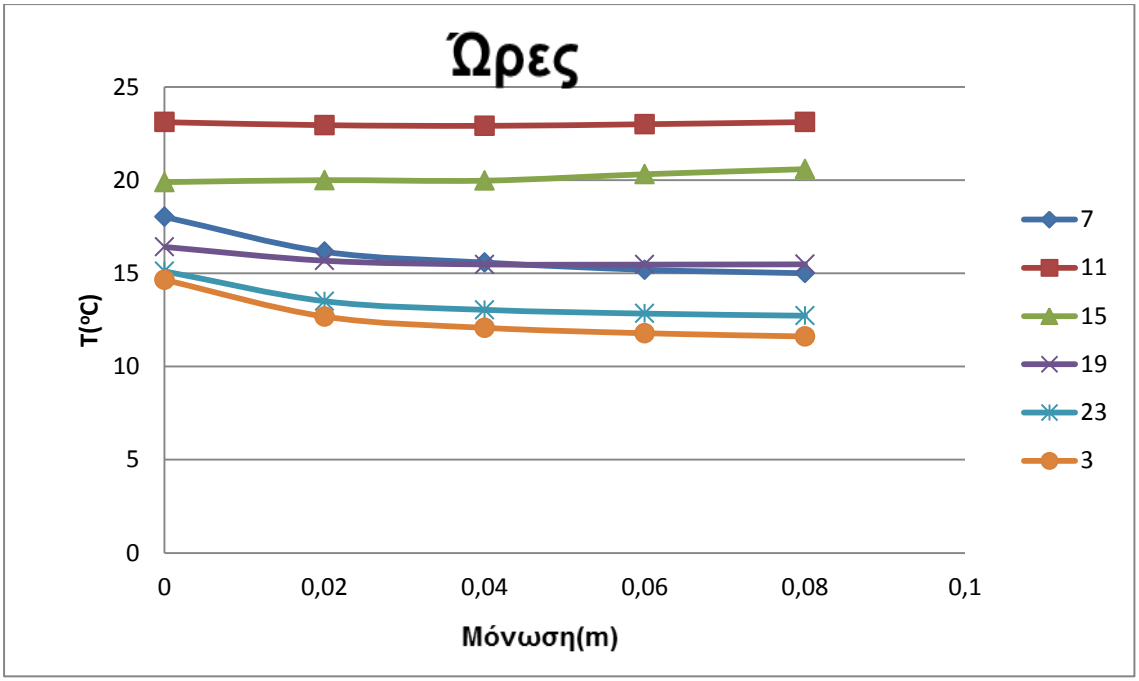
Σχήμα 7.1.1.17: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαρτίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



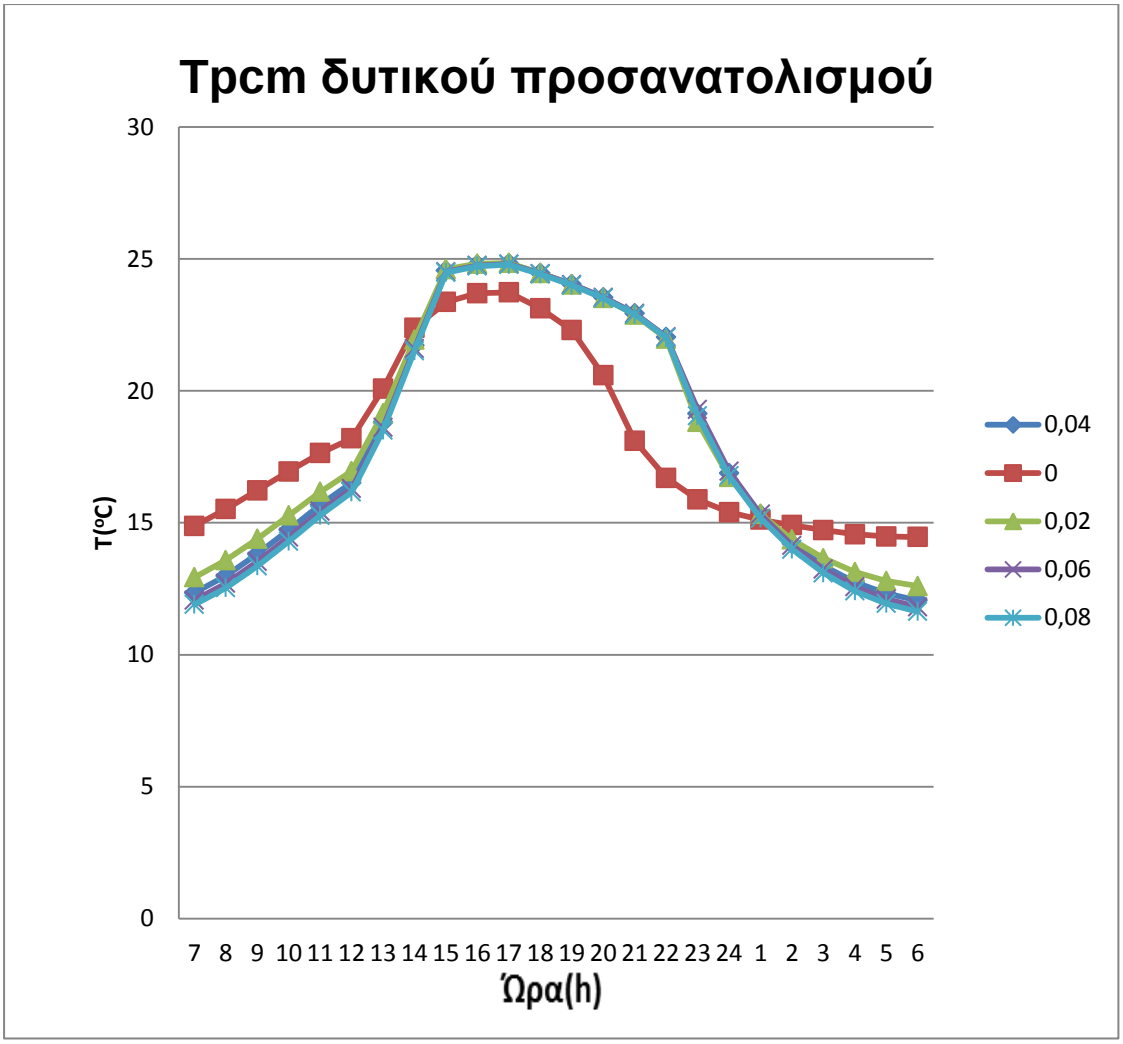
Σχήμα 7.1.1.18: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαρτίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



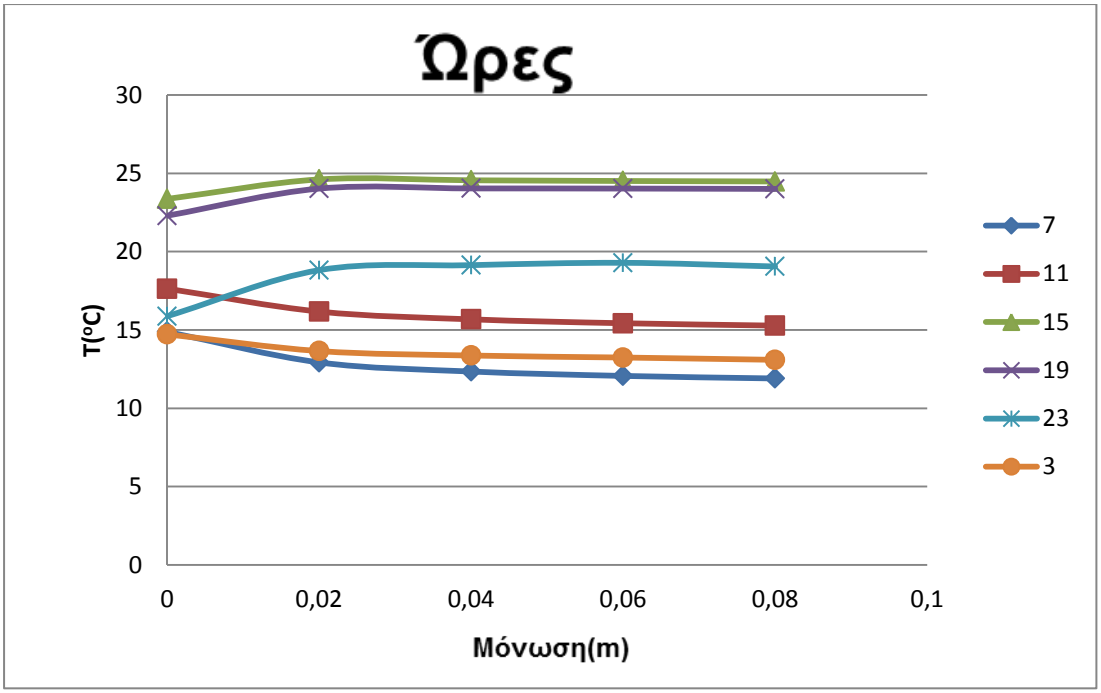
Σχήμα 7.1.1.19: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαρτίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



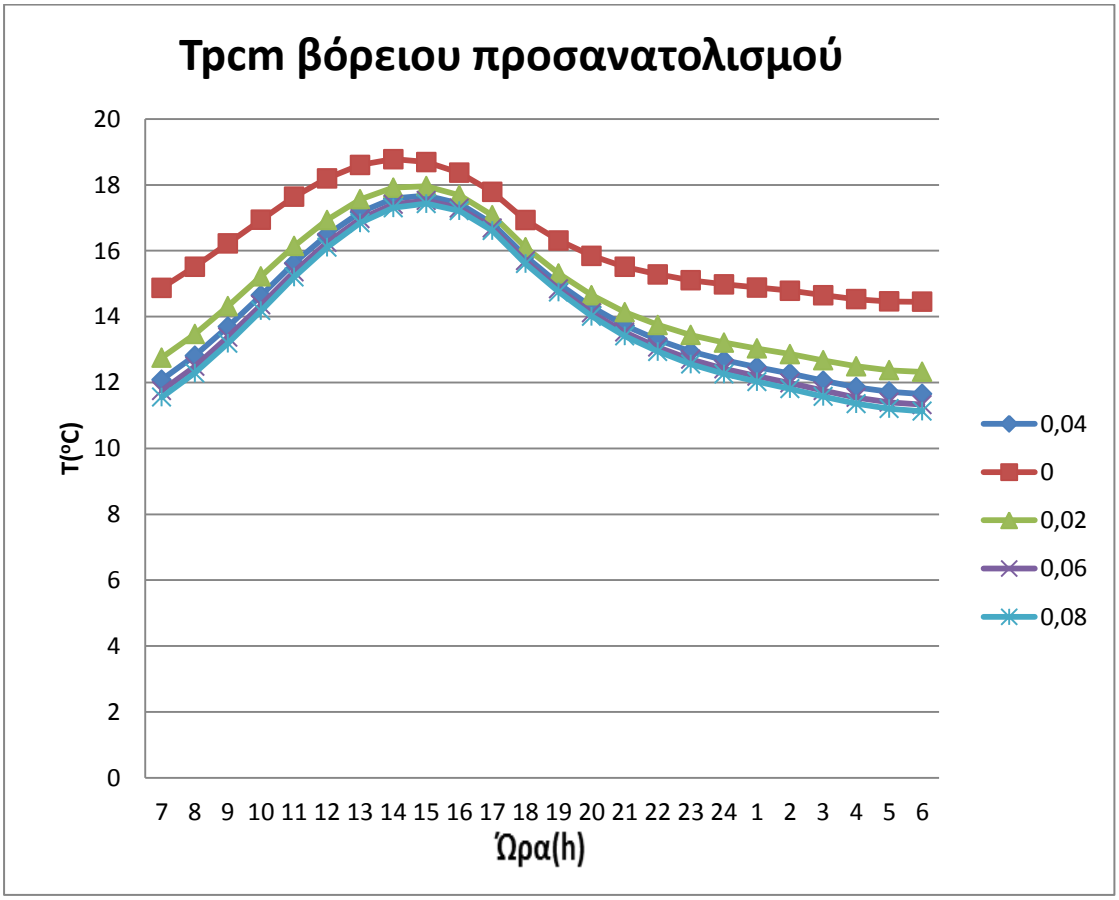
Σχήμα 7.1.1.20: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαρτίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



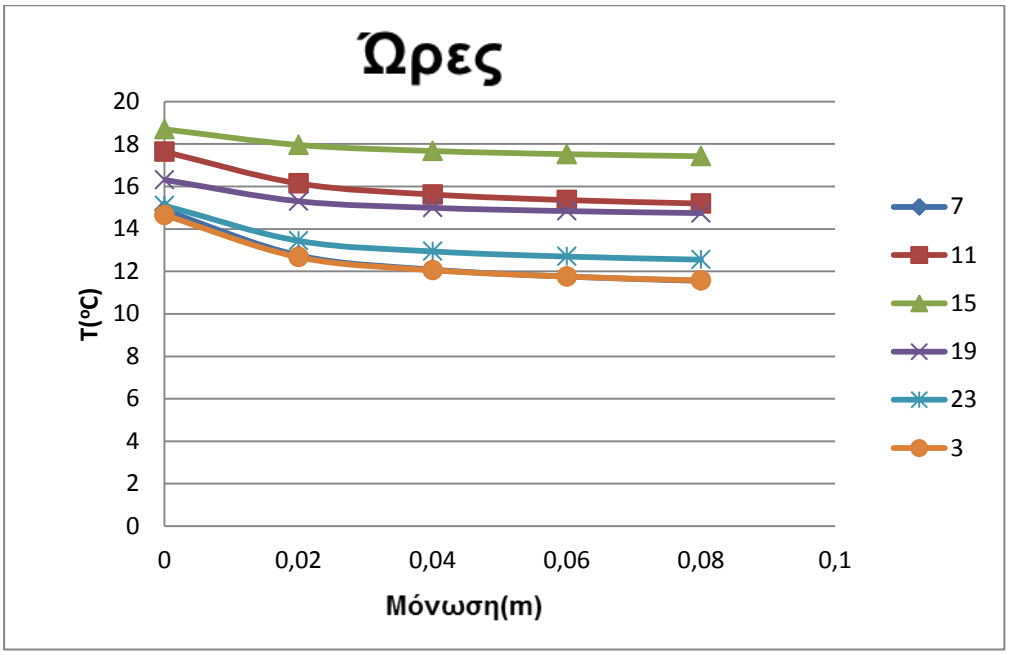
Σχήμα 7.1.1.21: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαρτίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.22: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαρτίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

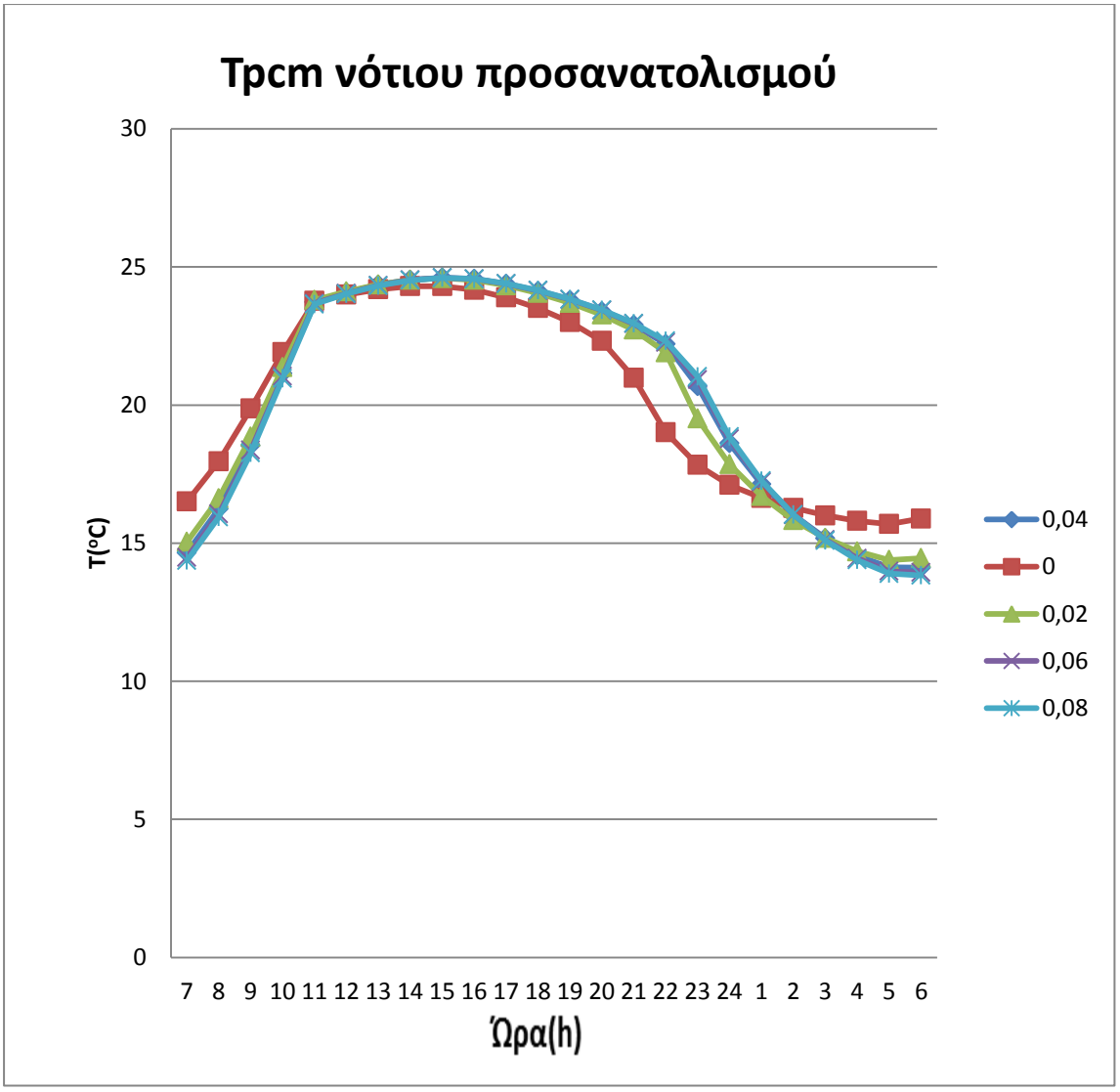


Σχήμα 7.1.1.23: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαρτίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

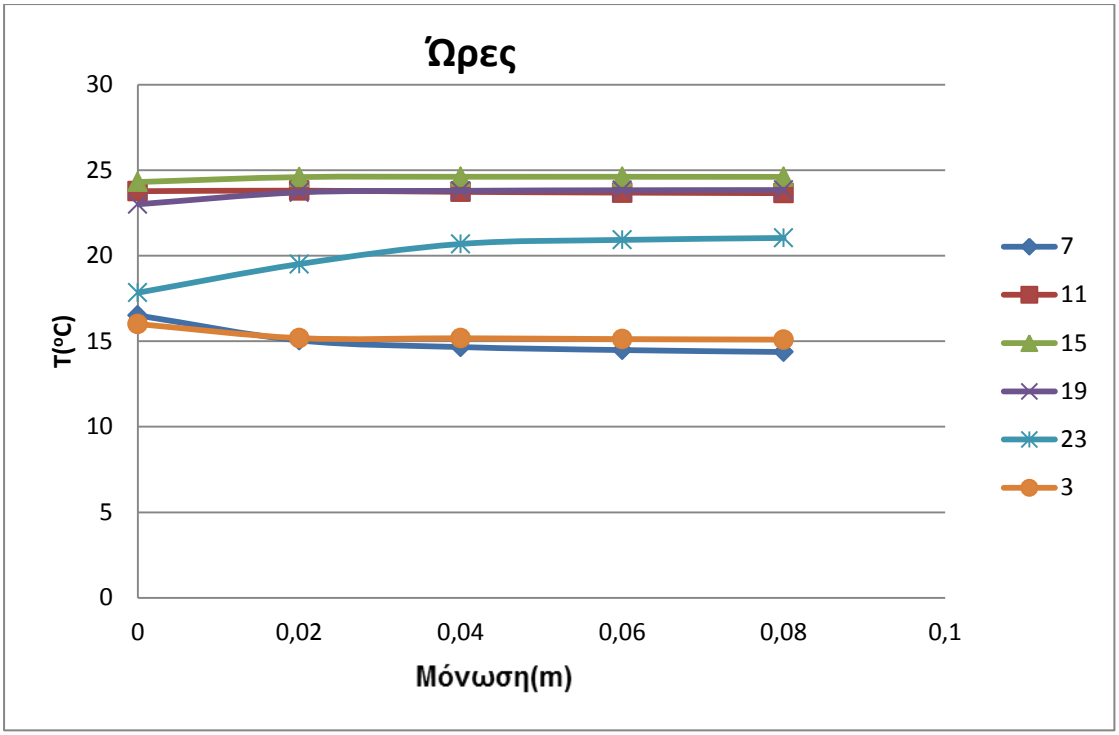


Σχήμα 7.1.1.24: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαρτίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

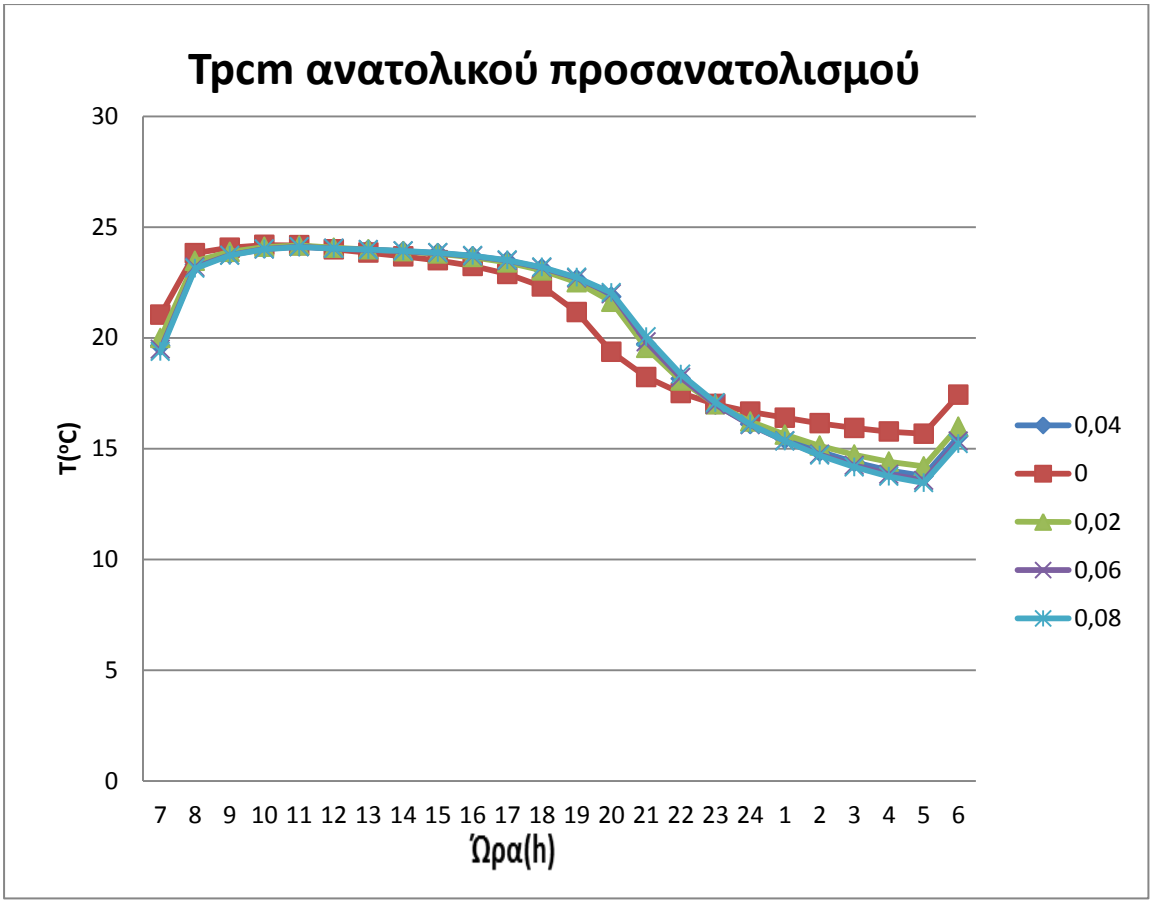
- Για την 21η Απριλίου:



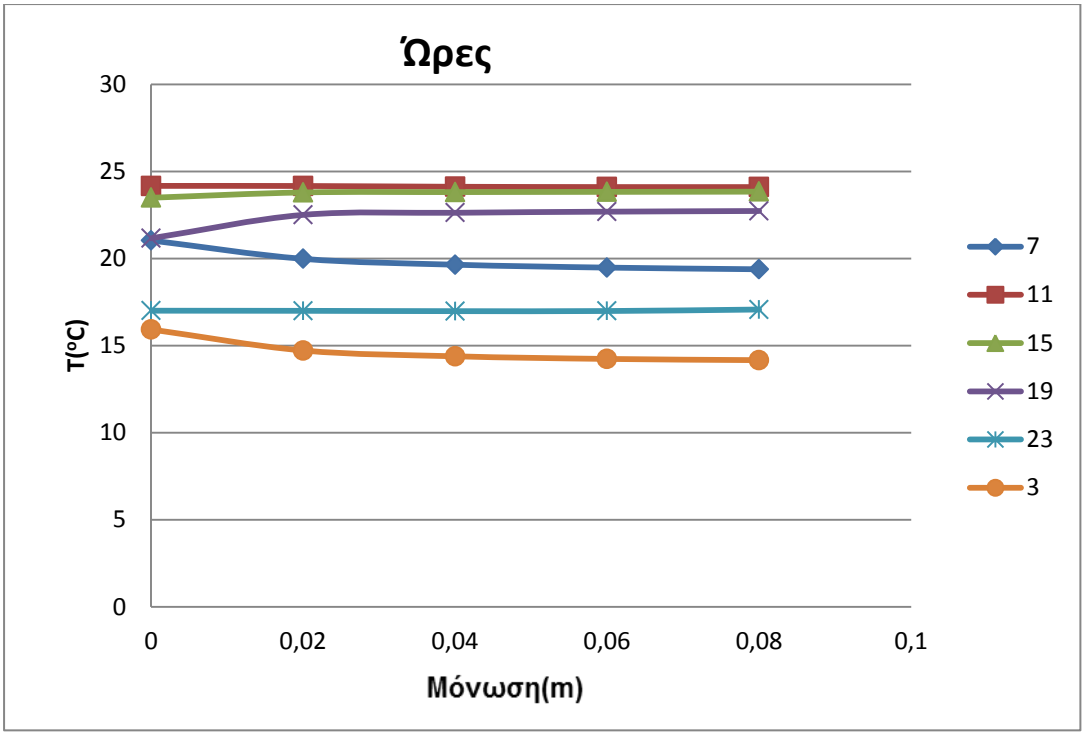
Σχήμα 7.1.1.25: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Απριλίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



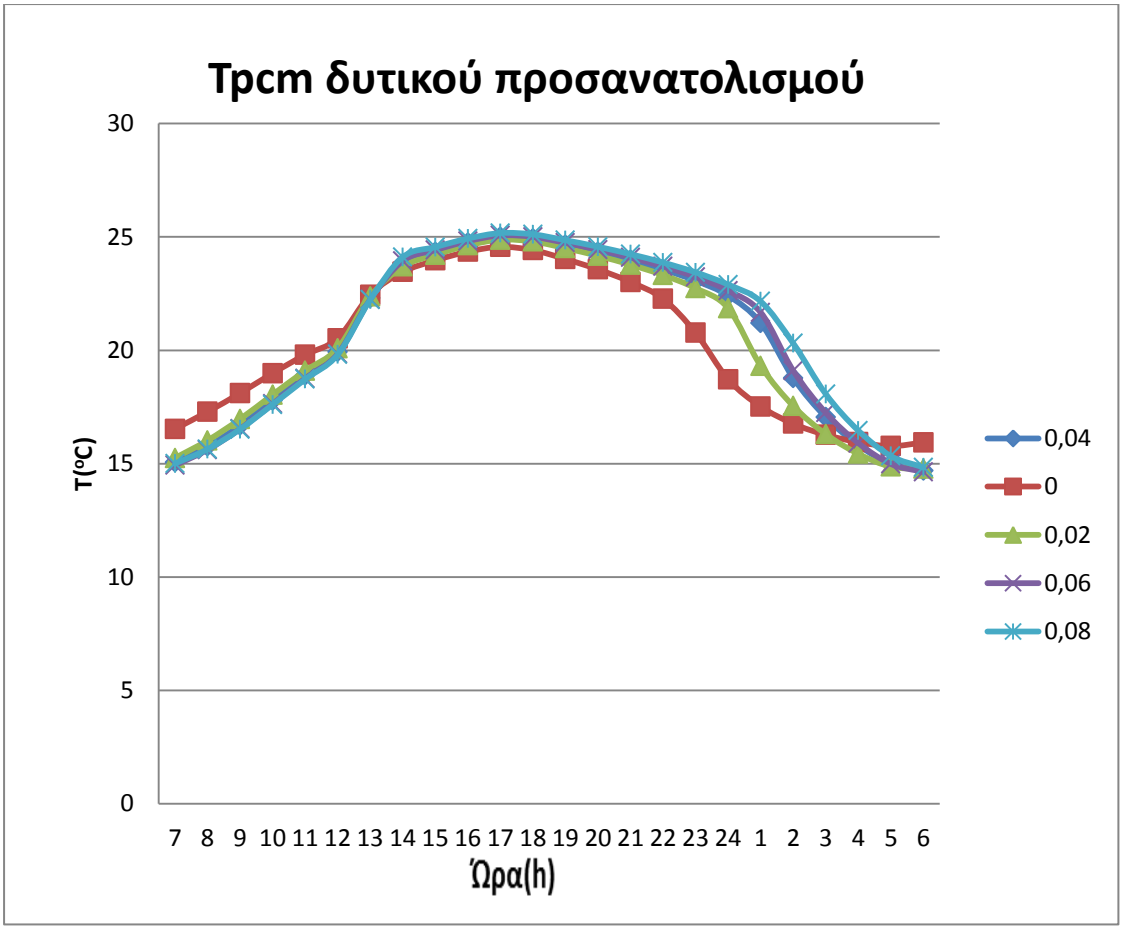
Σχήμα 7.1.1.26: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Απριλίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



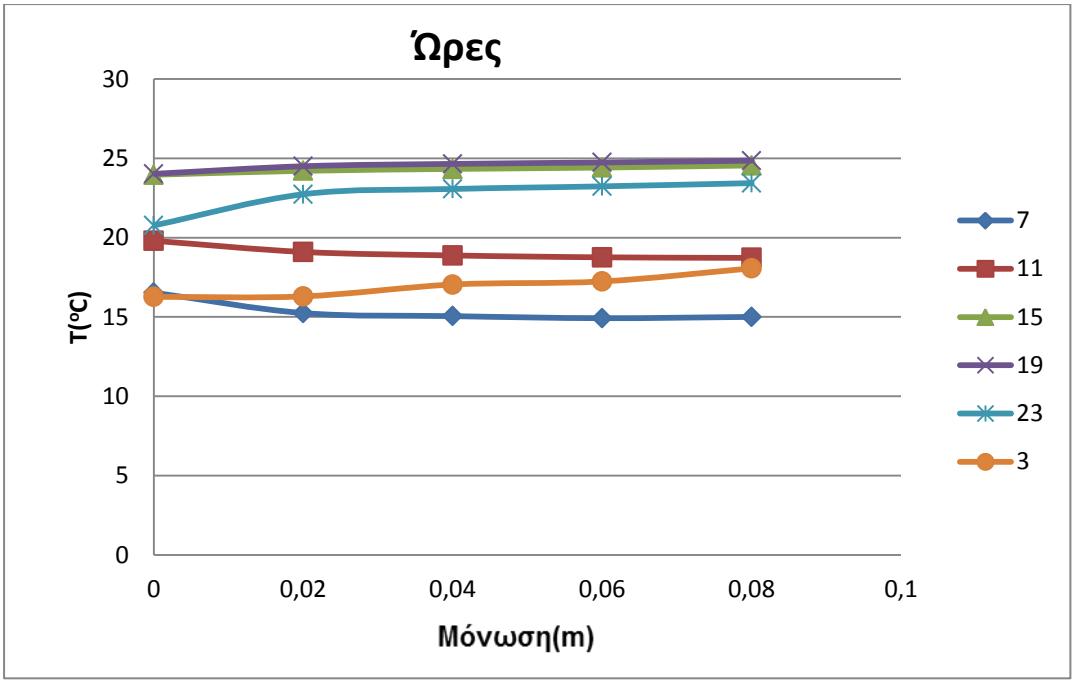
Σχήμα 7.1.1.27: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Απριλίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



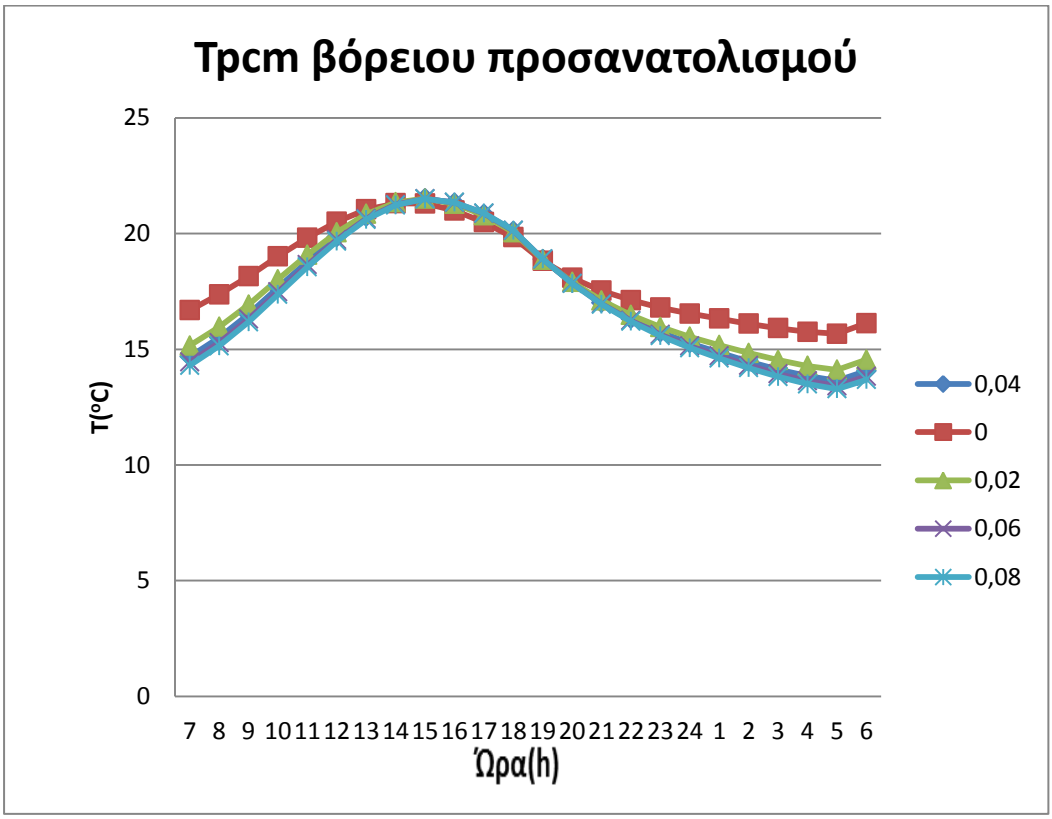
Σχήμα 7.1.1.28: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Απριλίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



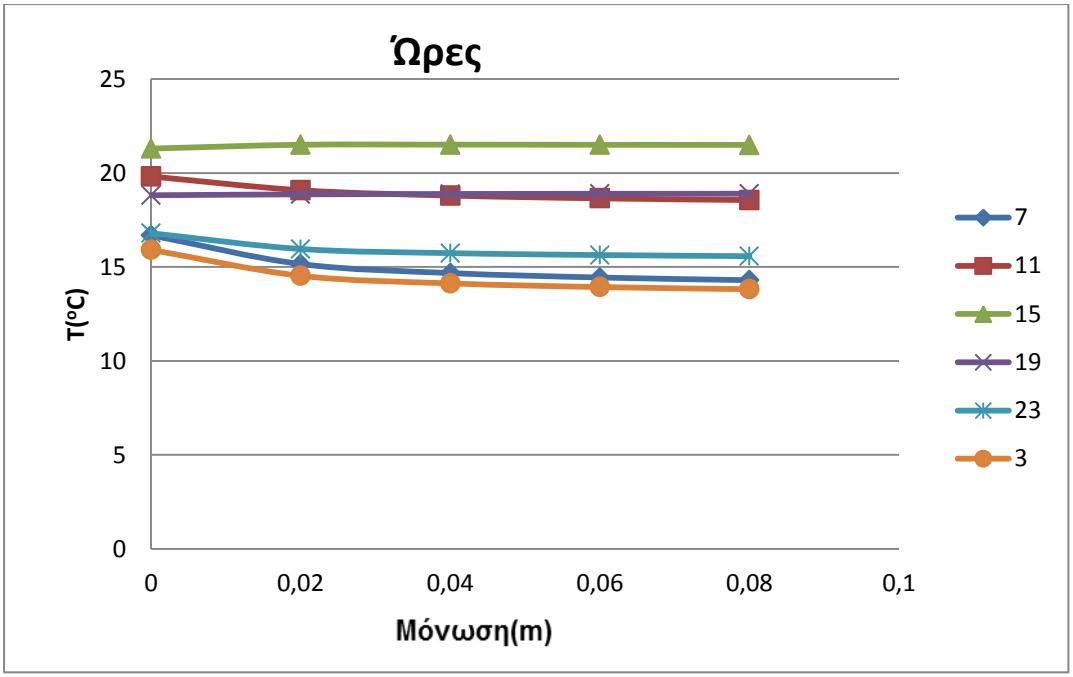
Σχήμα 7.1.1.29: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Απριλίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.30: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Απριλίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

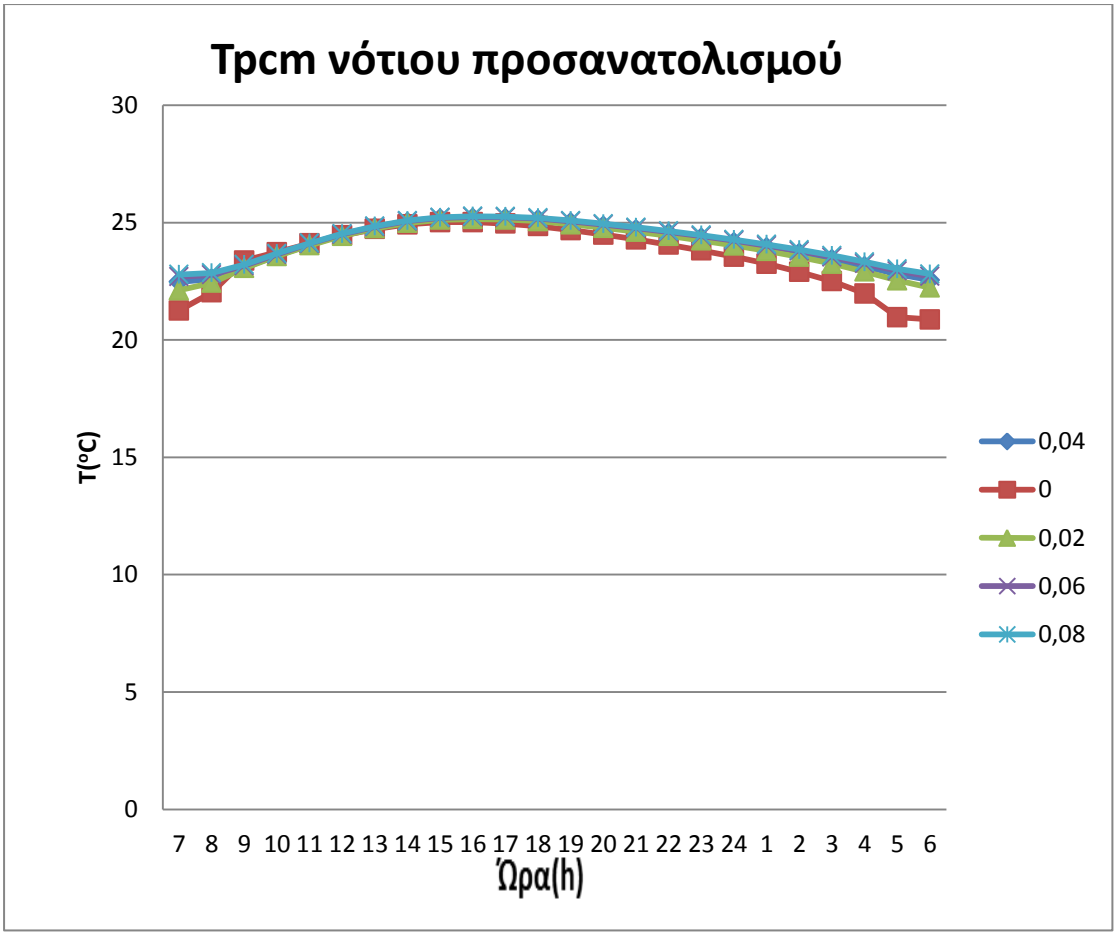


Σχήμα 7.1.1.31: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Απριλίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

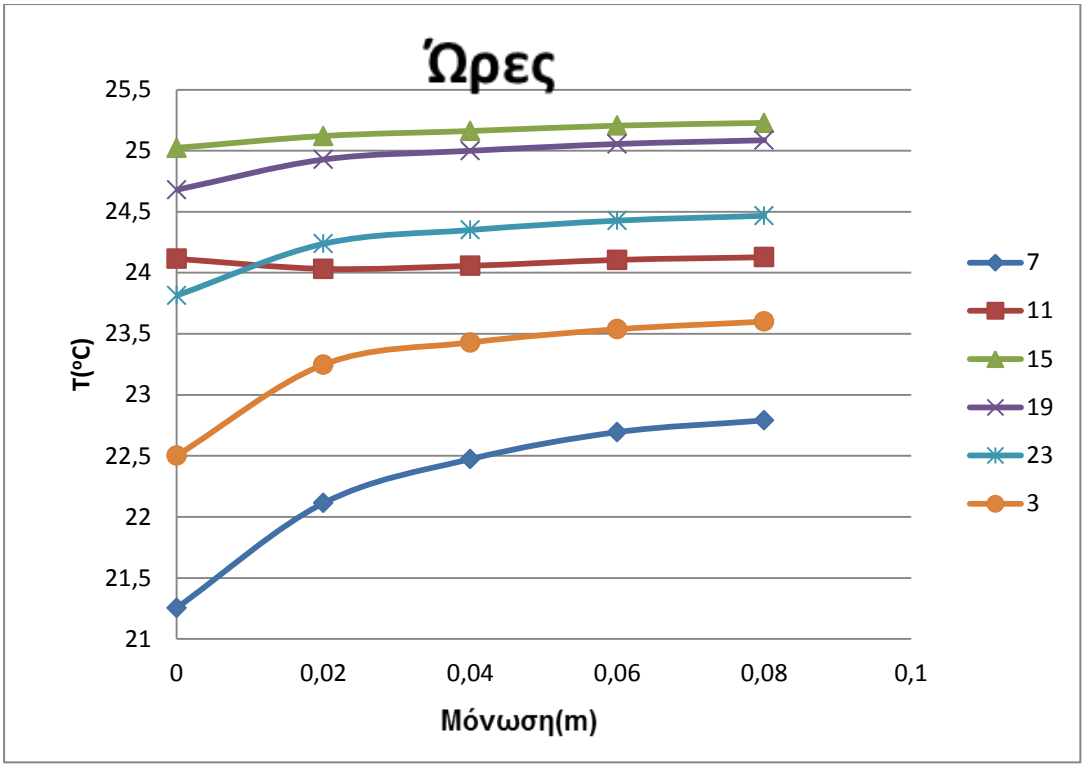


Σχήμα 7.1.1.32: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Απριλίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

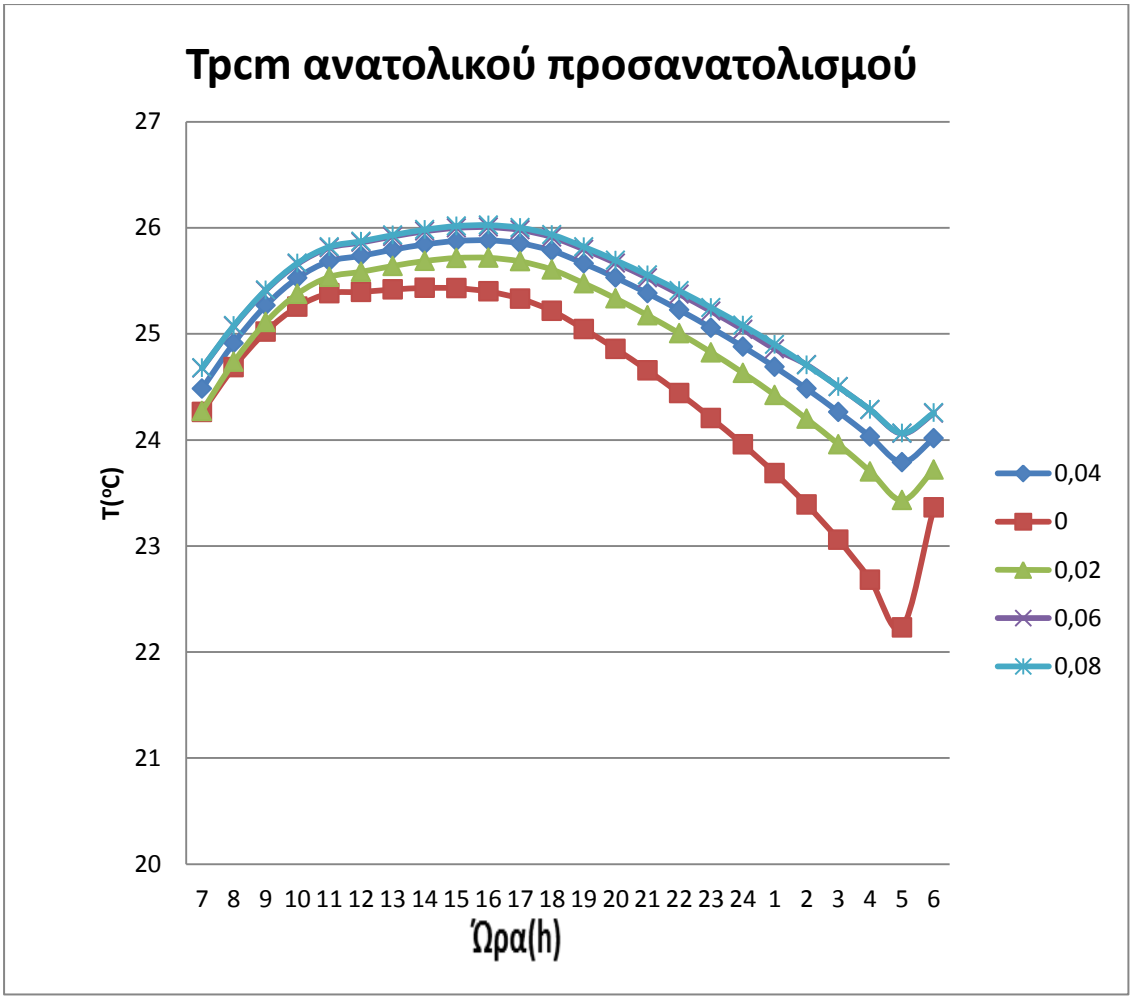
- Για την 21η Μαΐου:



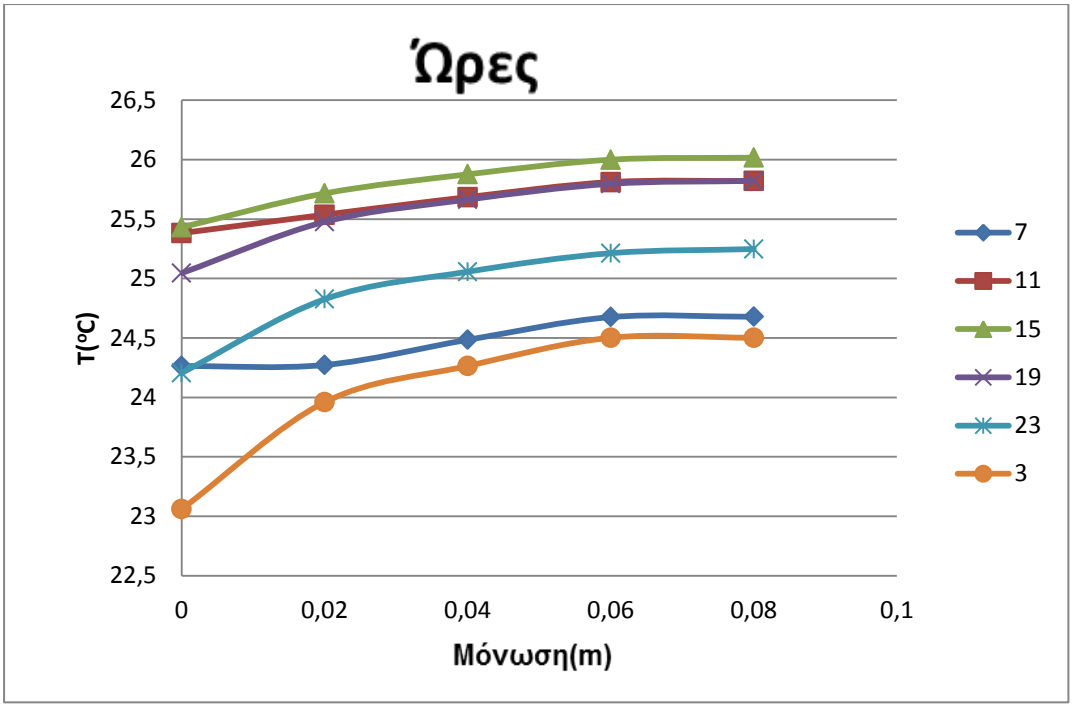
Σχήμα 7.1.1.33: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαΐου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



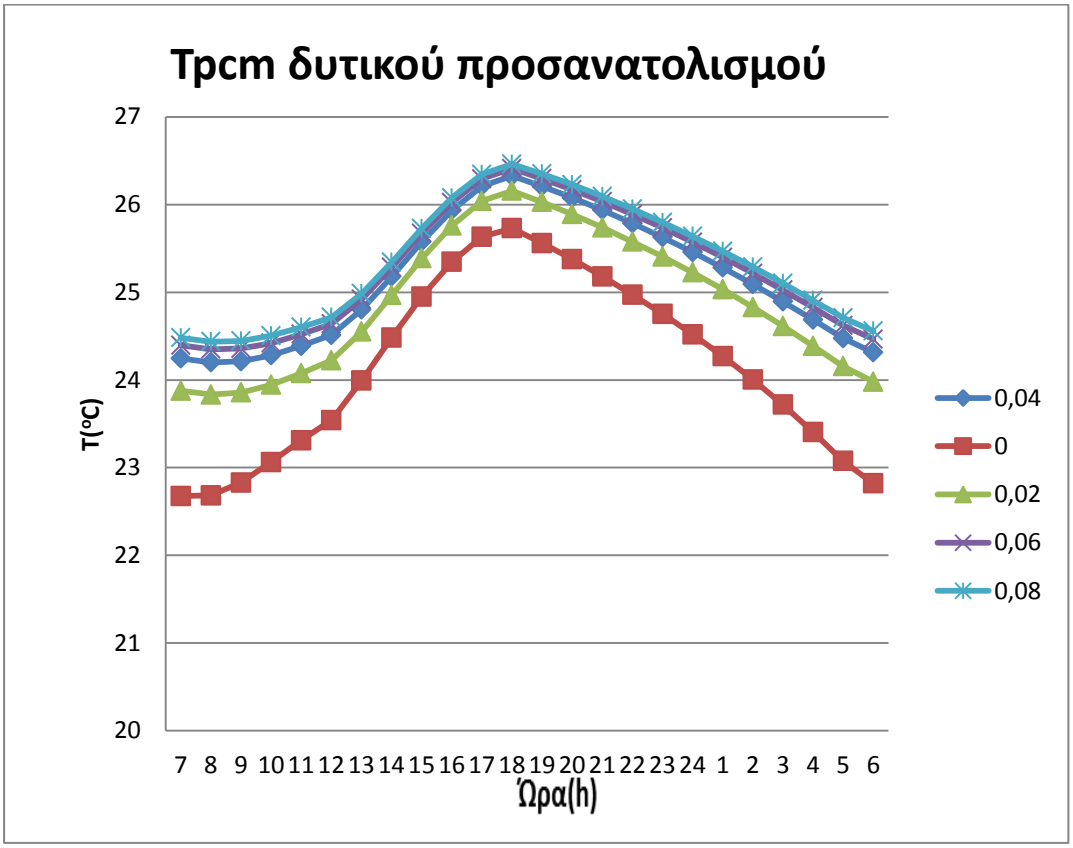
Σχήμα 7.1.1.34: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαΐου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



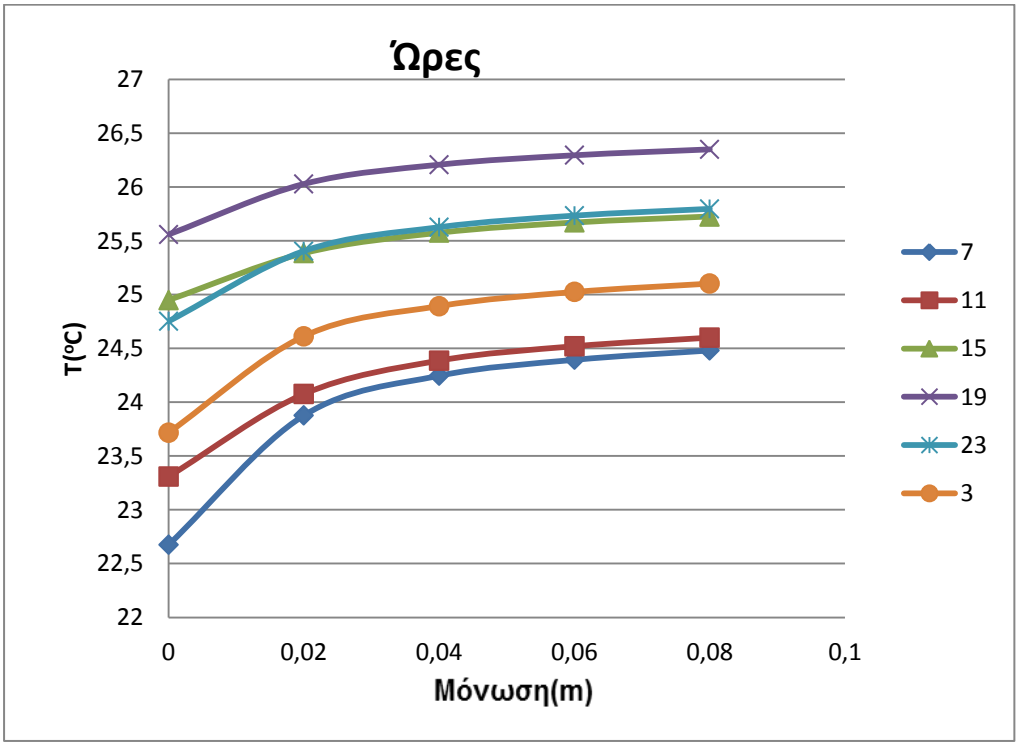
Σχήμα 7.1.1.35: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαΐου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



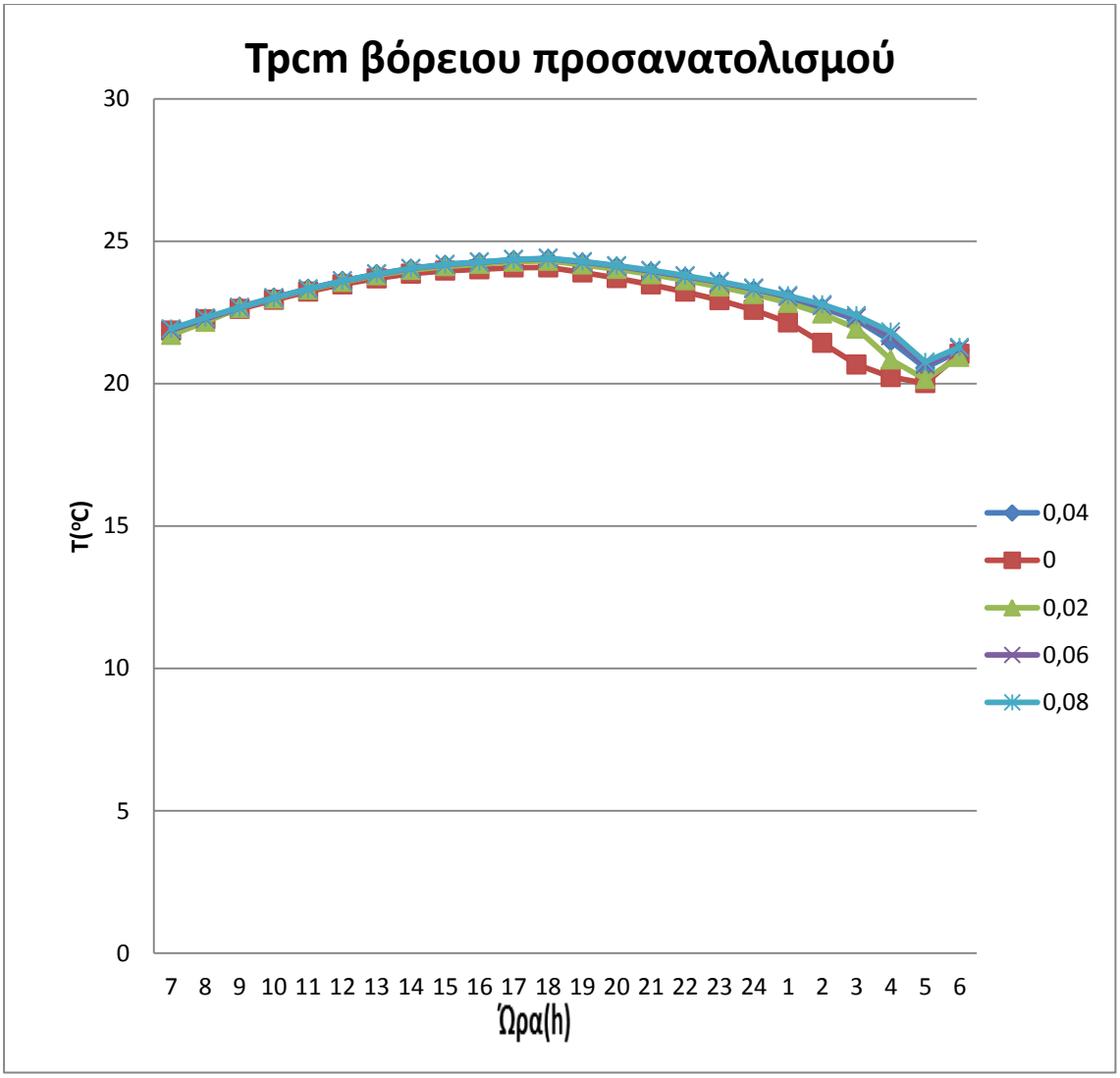
Σχήμα 7.1.1.36: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαΐου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



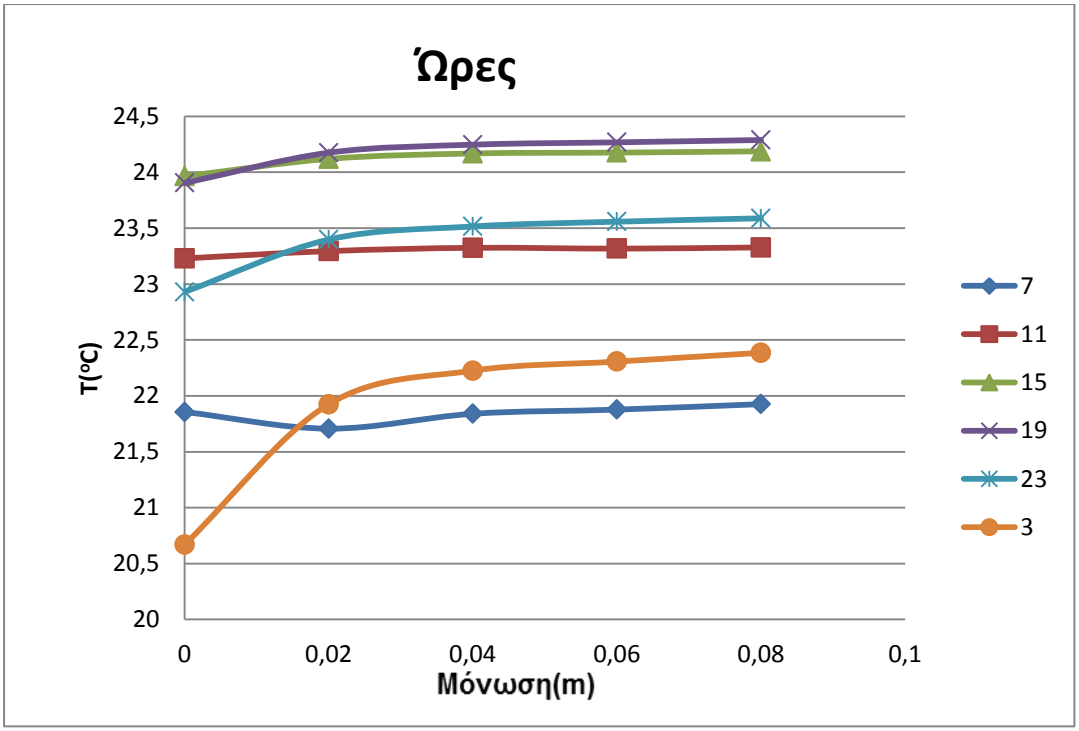
Σχήμα 7.1.1.37: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαΐου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.38: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαΐου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

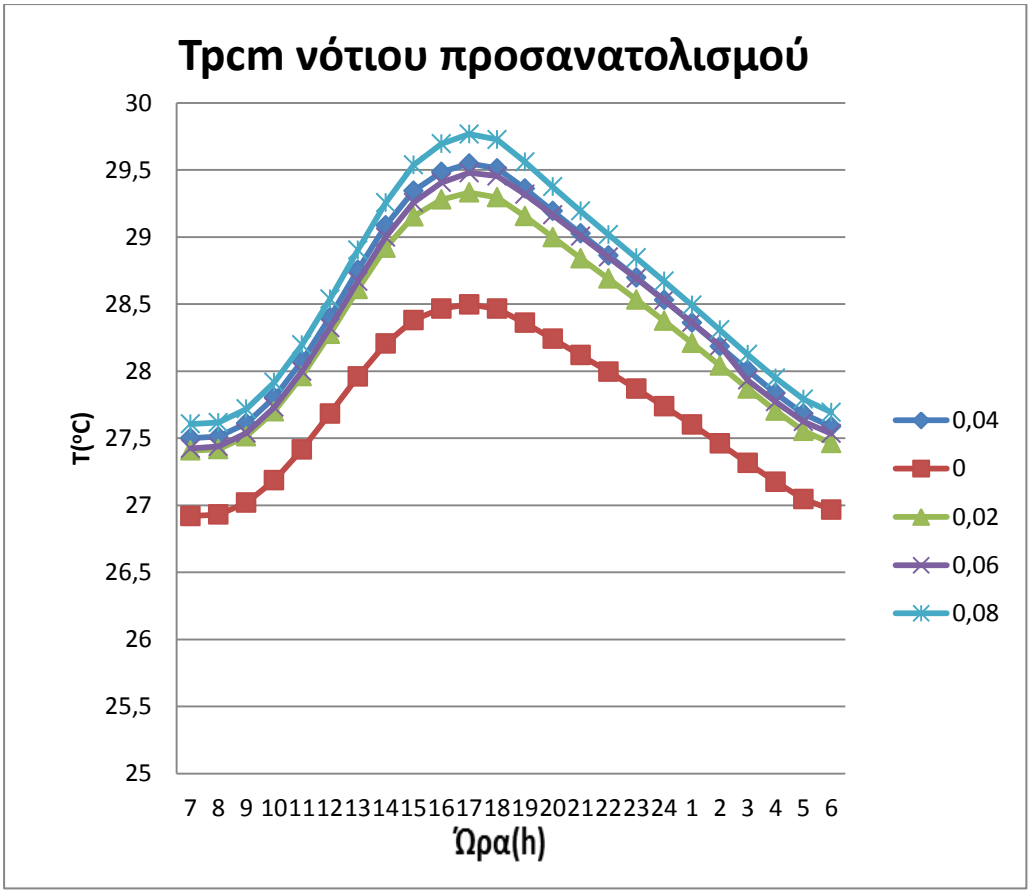


Σχήμα 7.1.1.39: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαΐου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

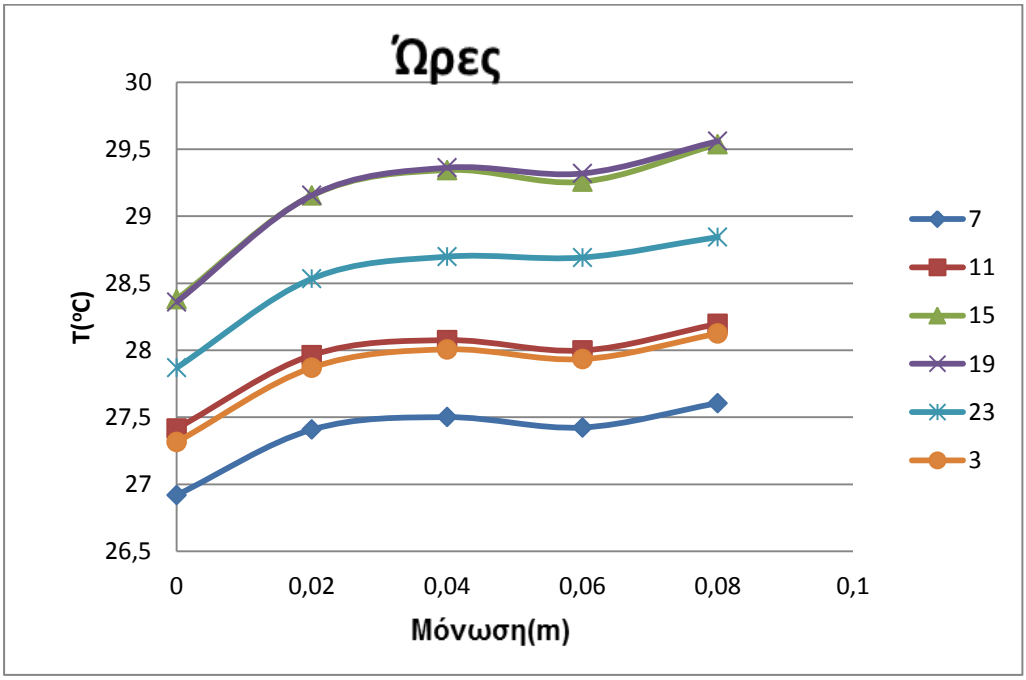


Σχήμα 7.1.1.40: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαΐου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

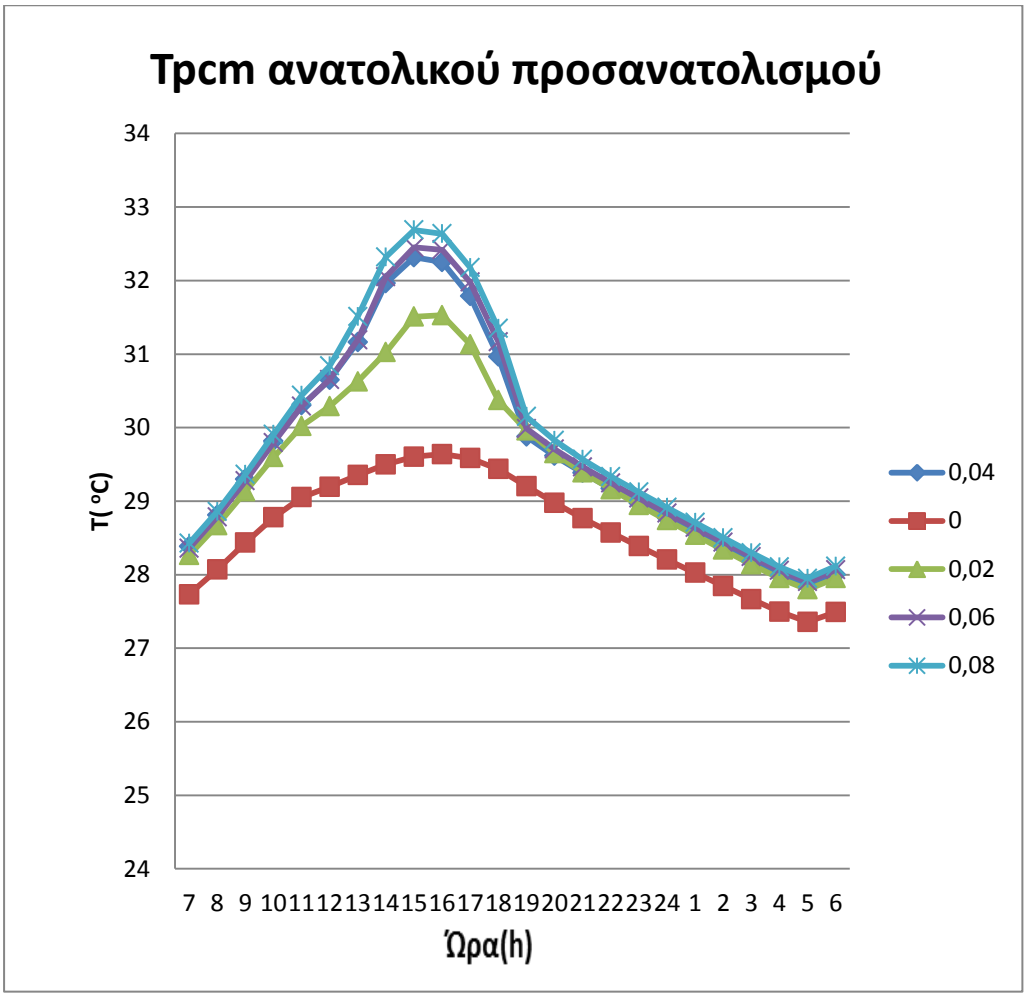
- Για την 21η Ιουνίου:



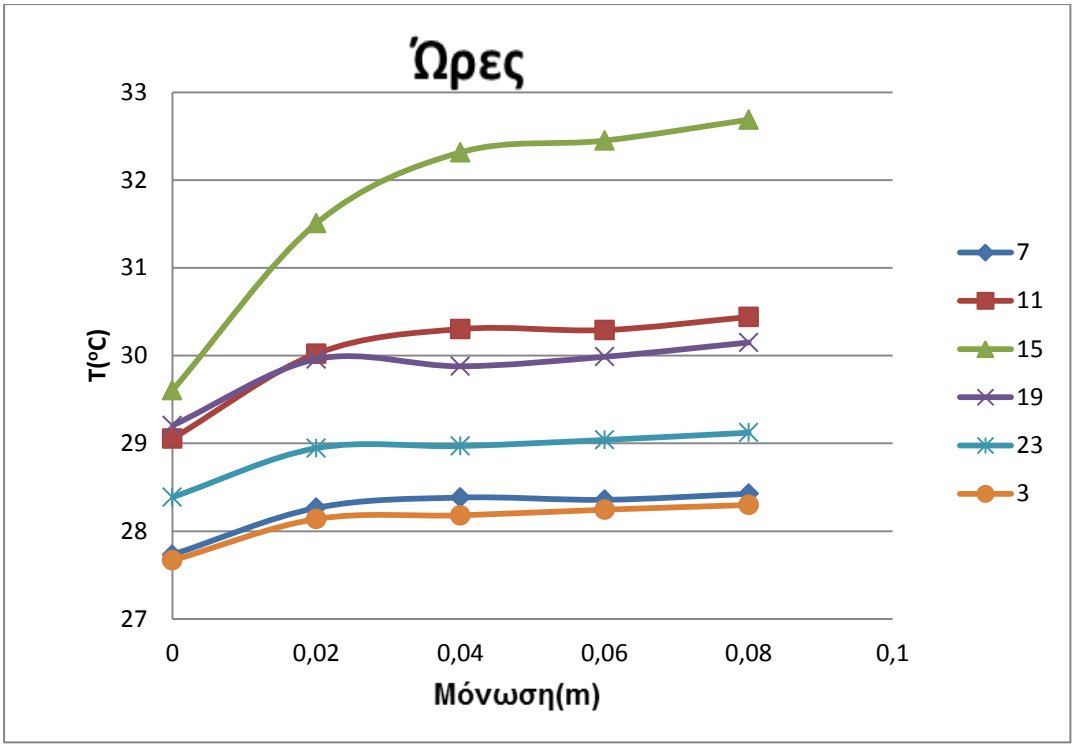
Σχήμα 7.1.1.41: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουνίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



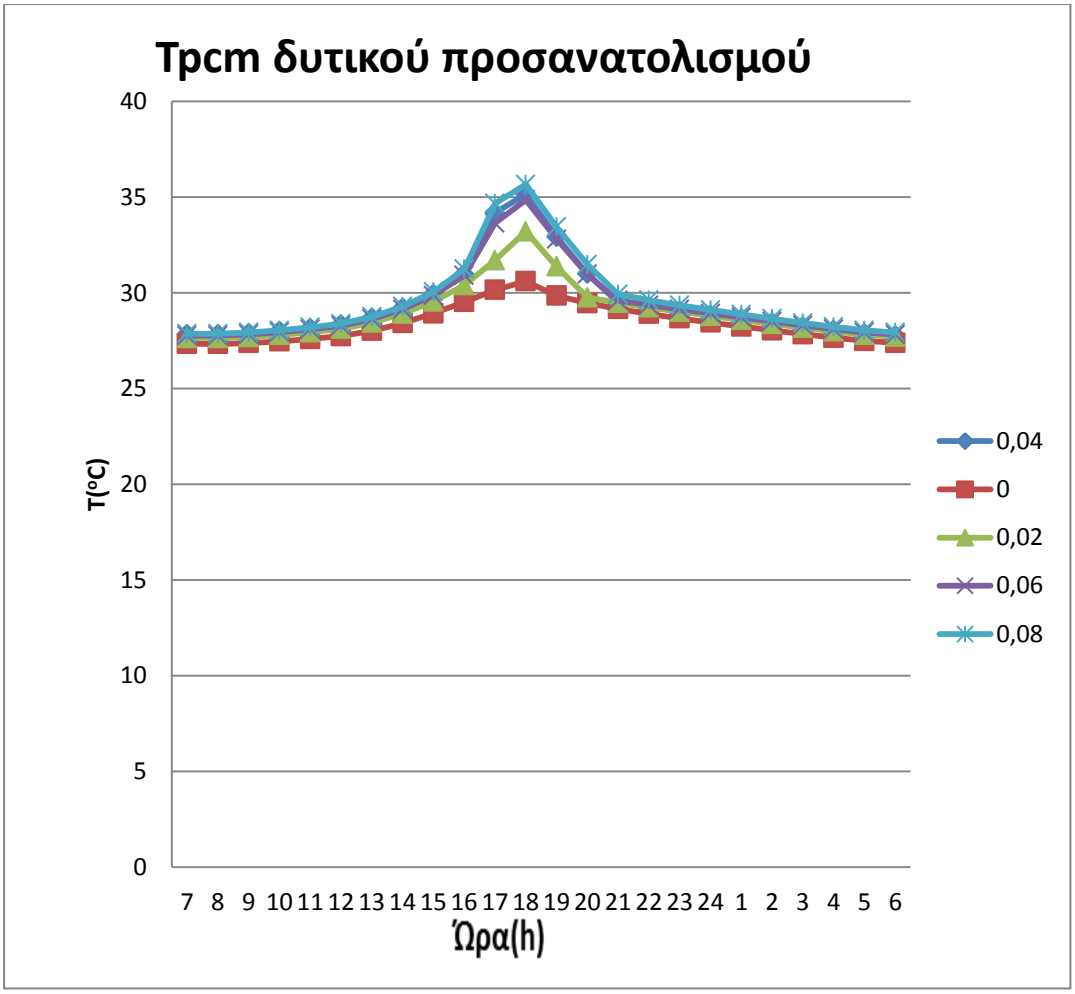
Σχήμα 7.1.1.42: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουνίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



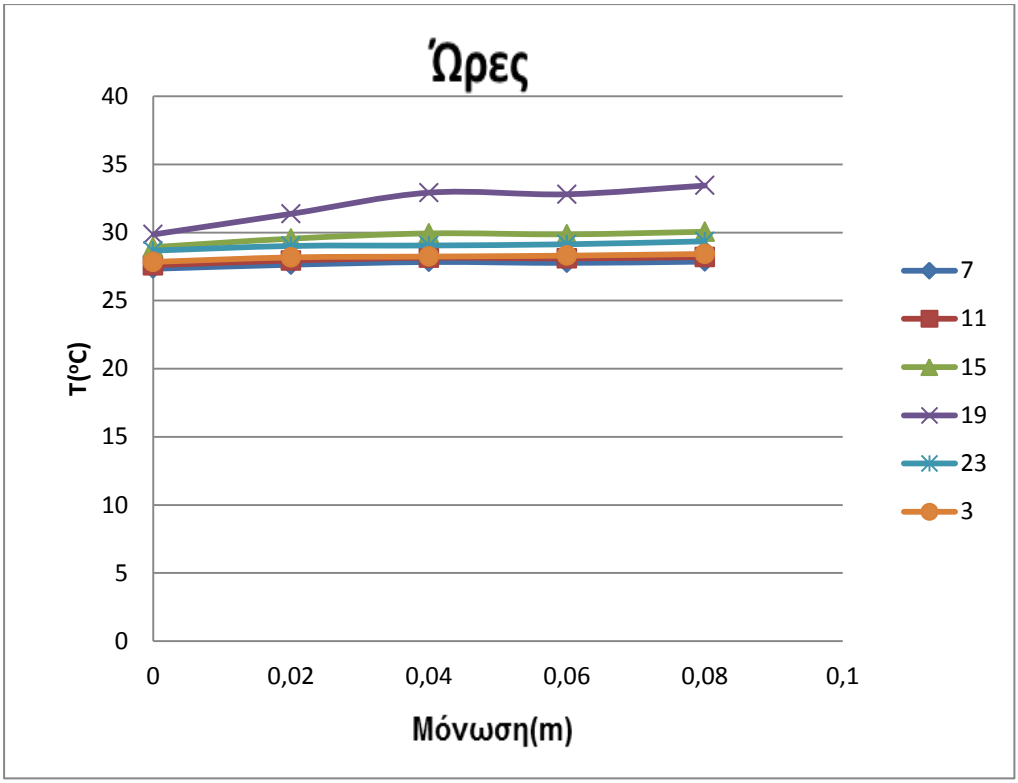
Σχήμα 7.1.1.43: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουνίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



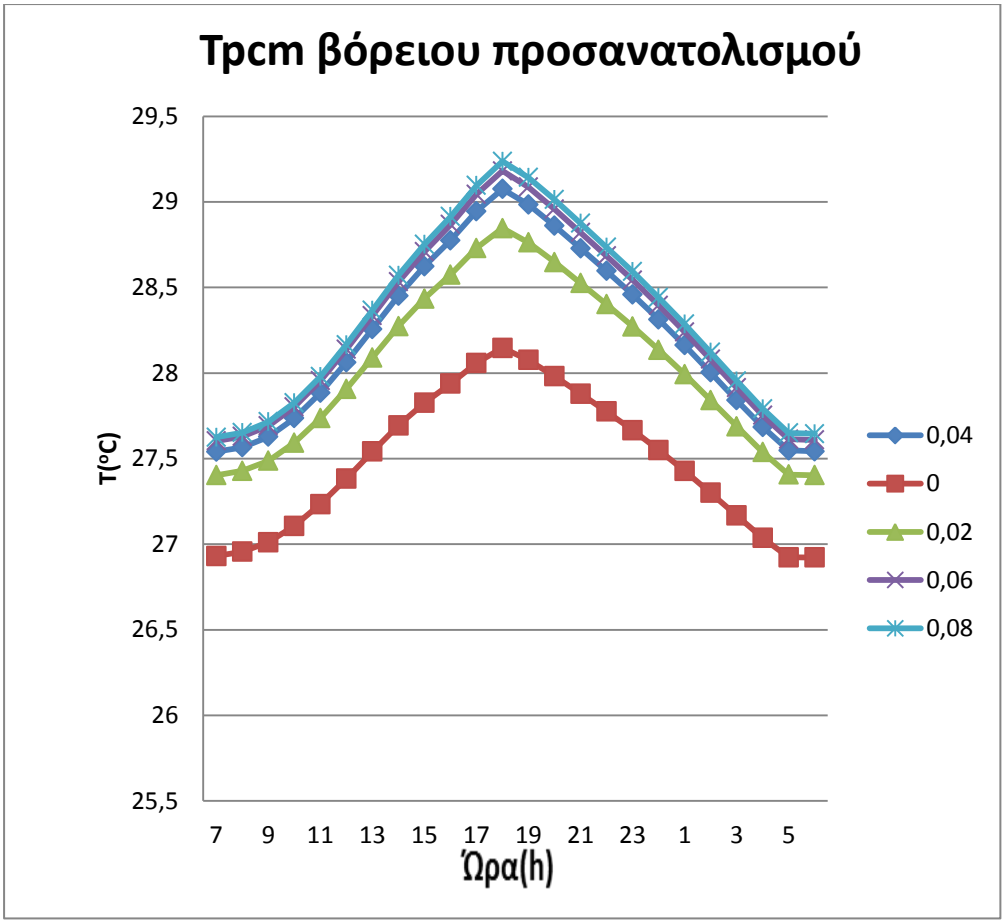
Σχήμα 7.1.1.44: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουνίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



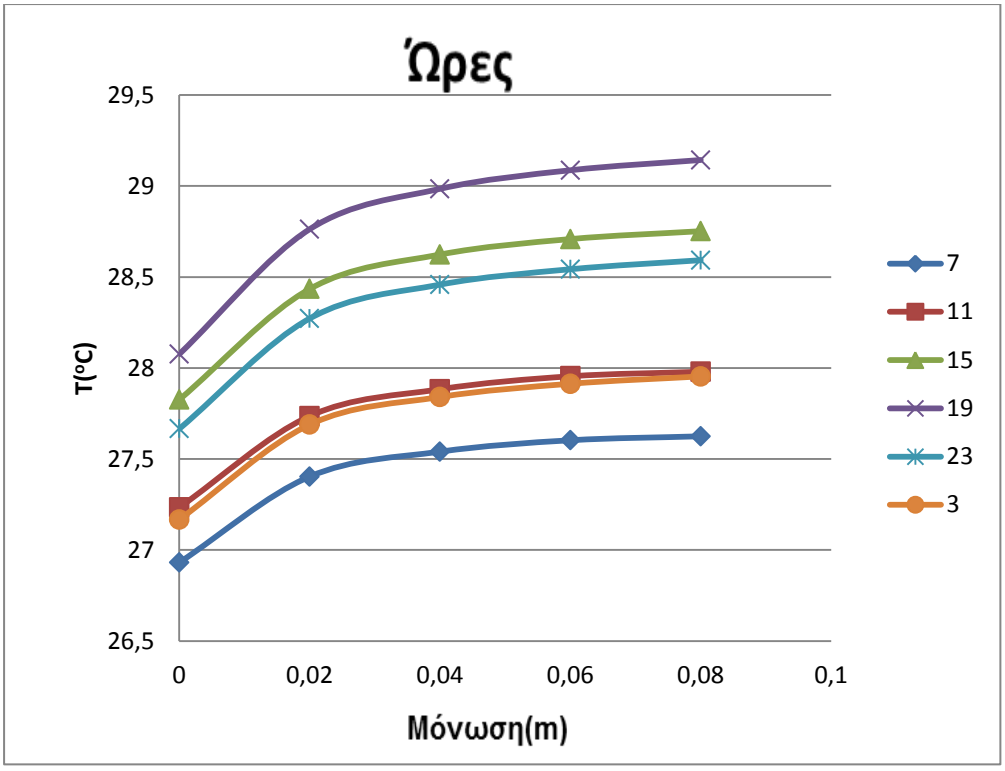
Σχήμα 7.1.1.45: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουνίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.46: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουνίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

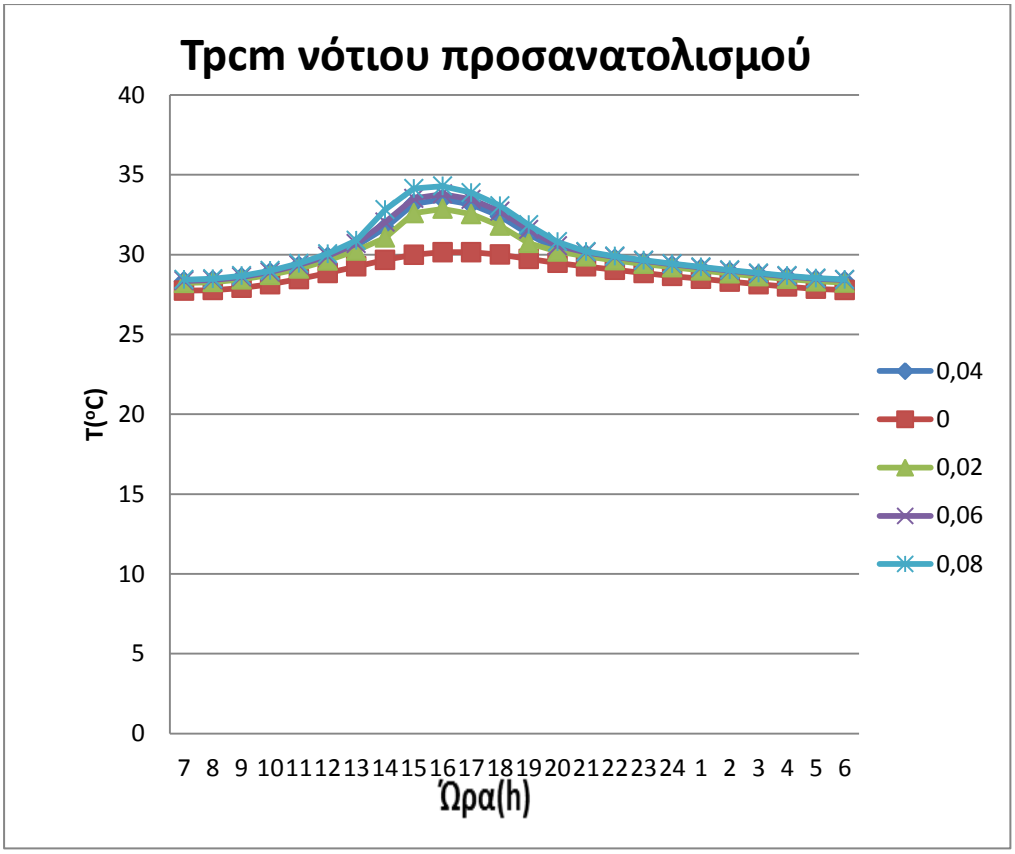


Σχήμα 7.1.1.47: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουνίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

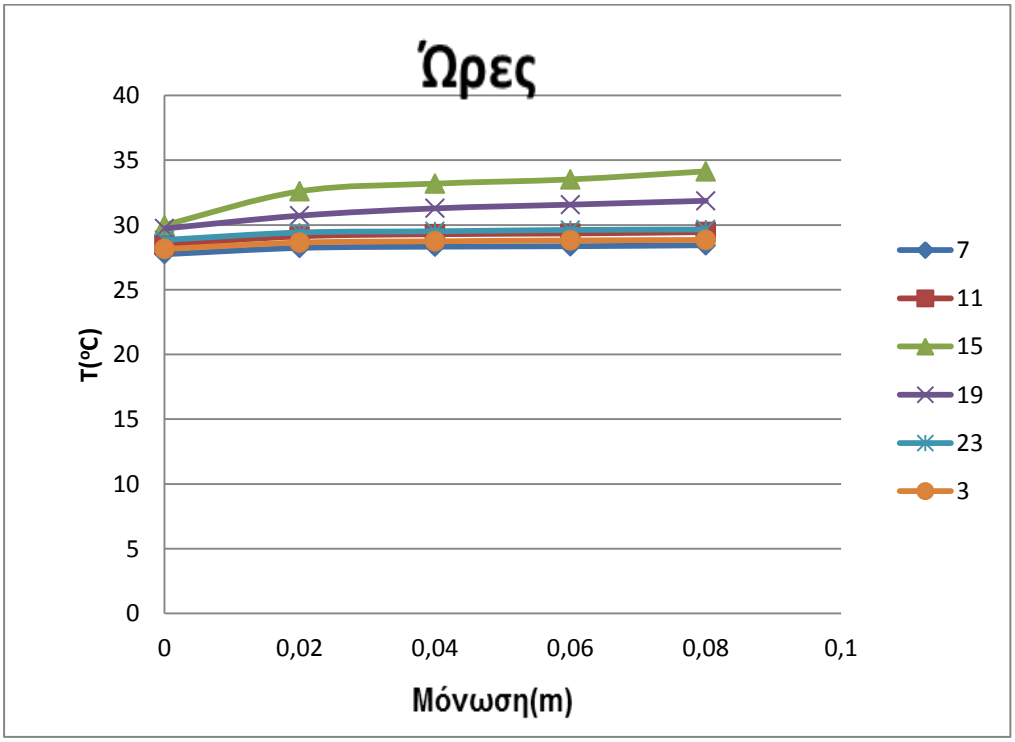


Σχήμα 7.1.1.48: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουνίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

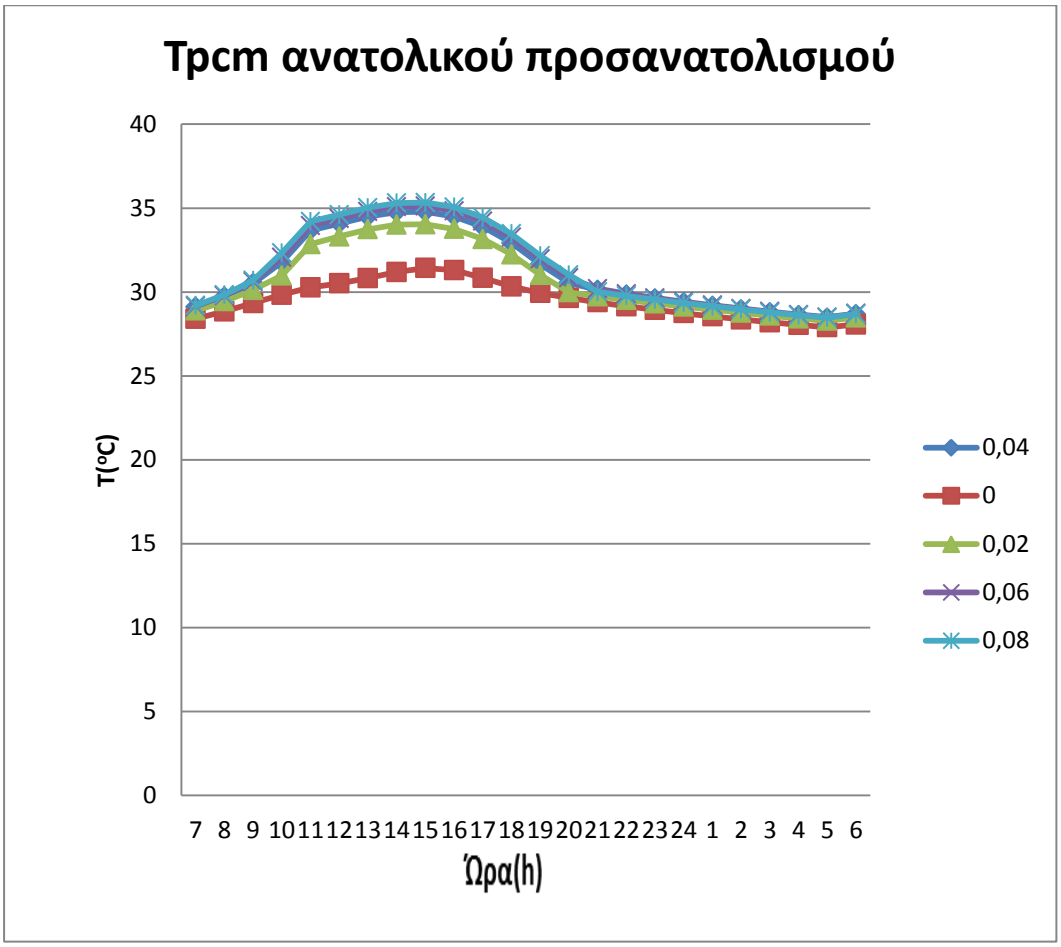
- Για την 21η Ιουλίου:



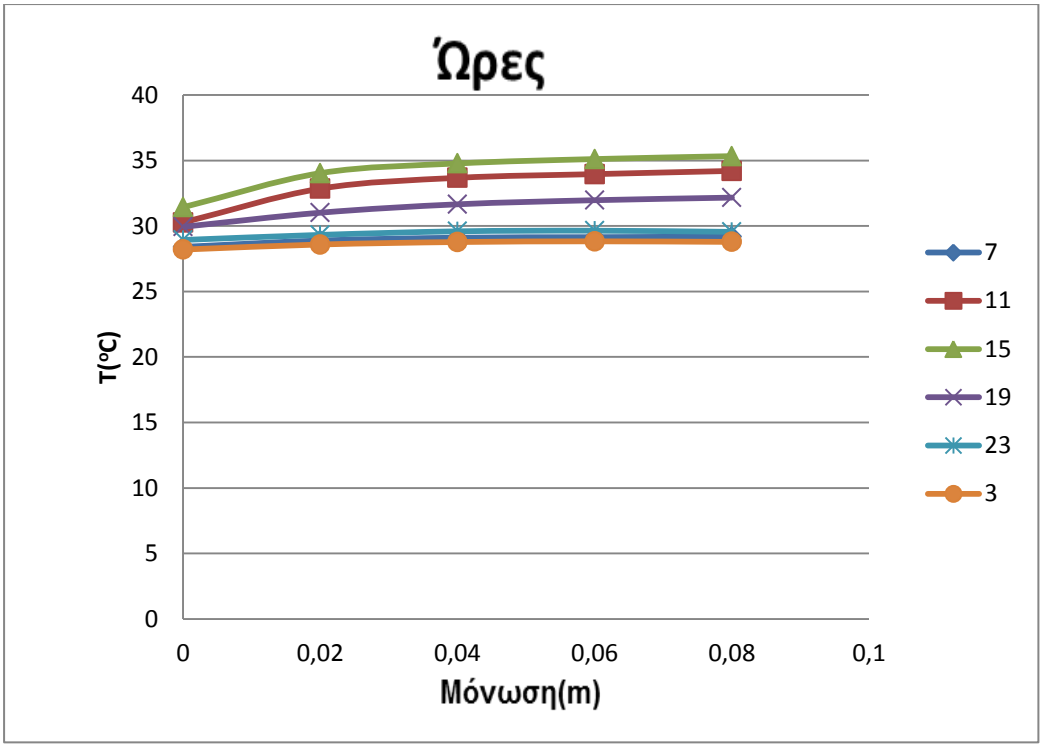
Σχήμα 7.1.1.49: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουλίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



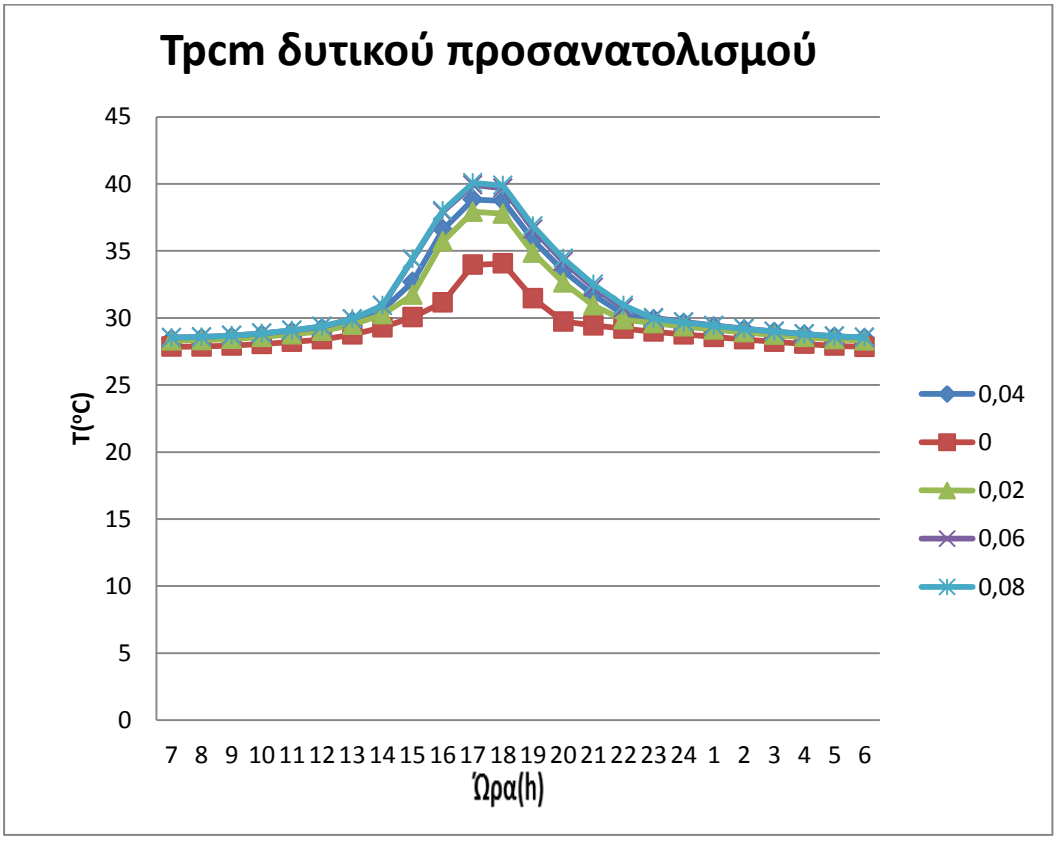
Σχήμα 7.1.1.50: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουλίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



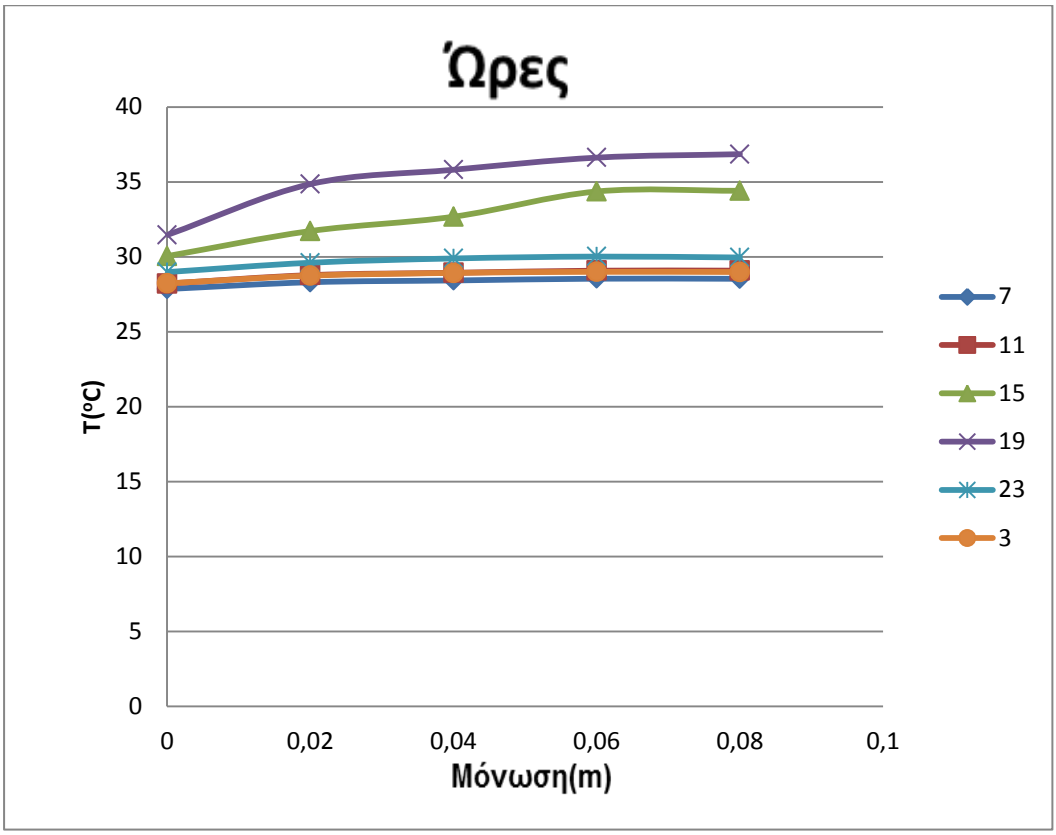
Σχήμα 7.1.1.51: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουλίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



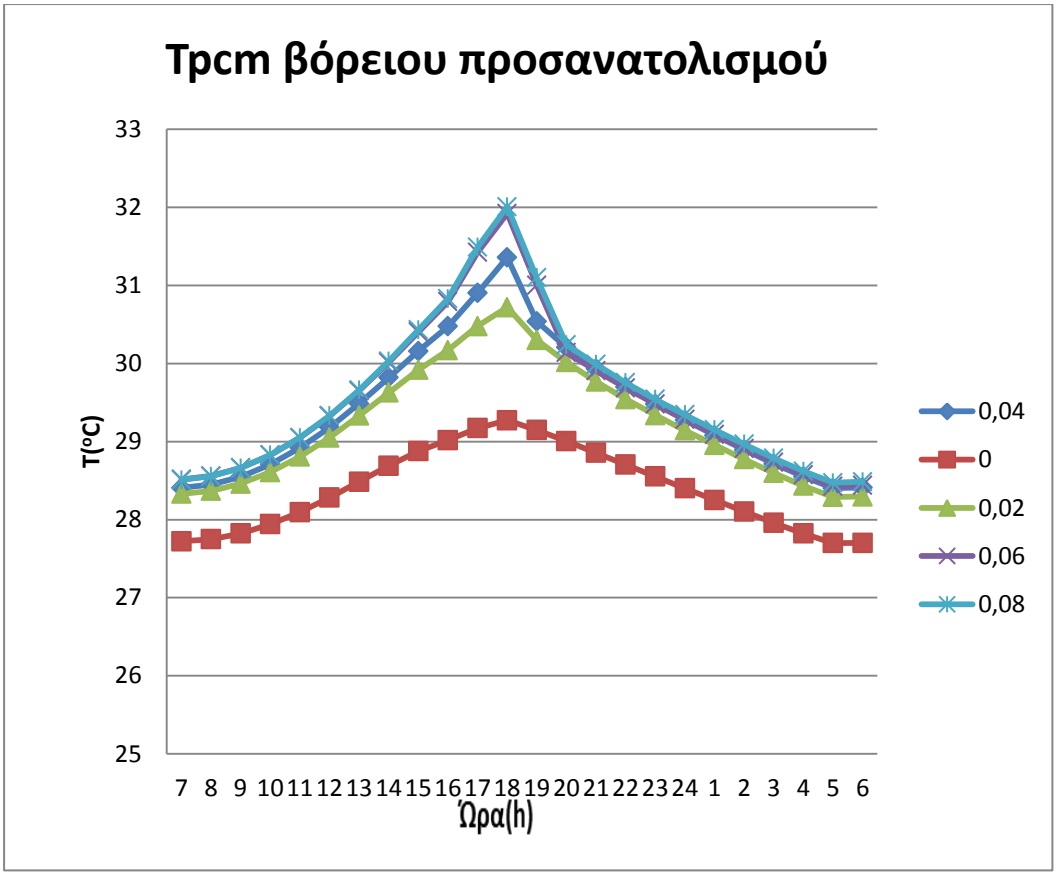
Σχήμα 7.1.1.52: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουλίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



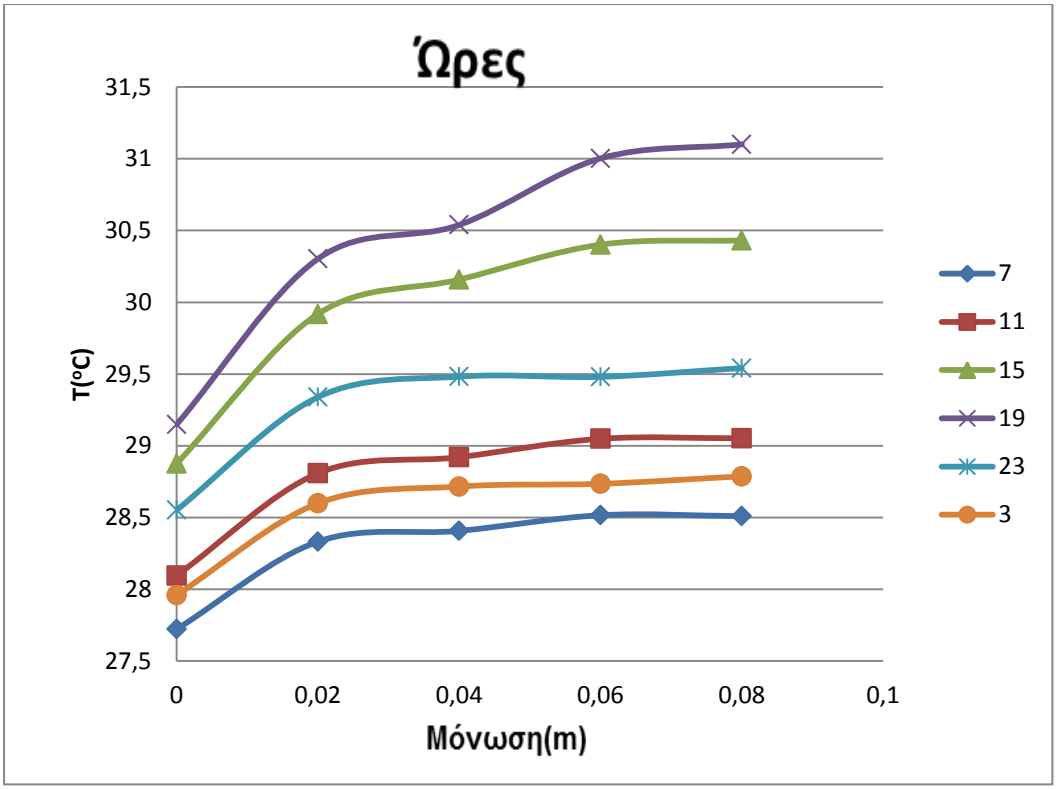
Σχήμα 7.1.1.53: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαΐου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.54: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαΐου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

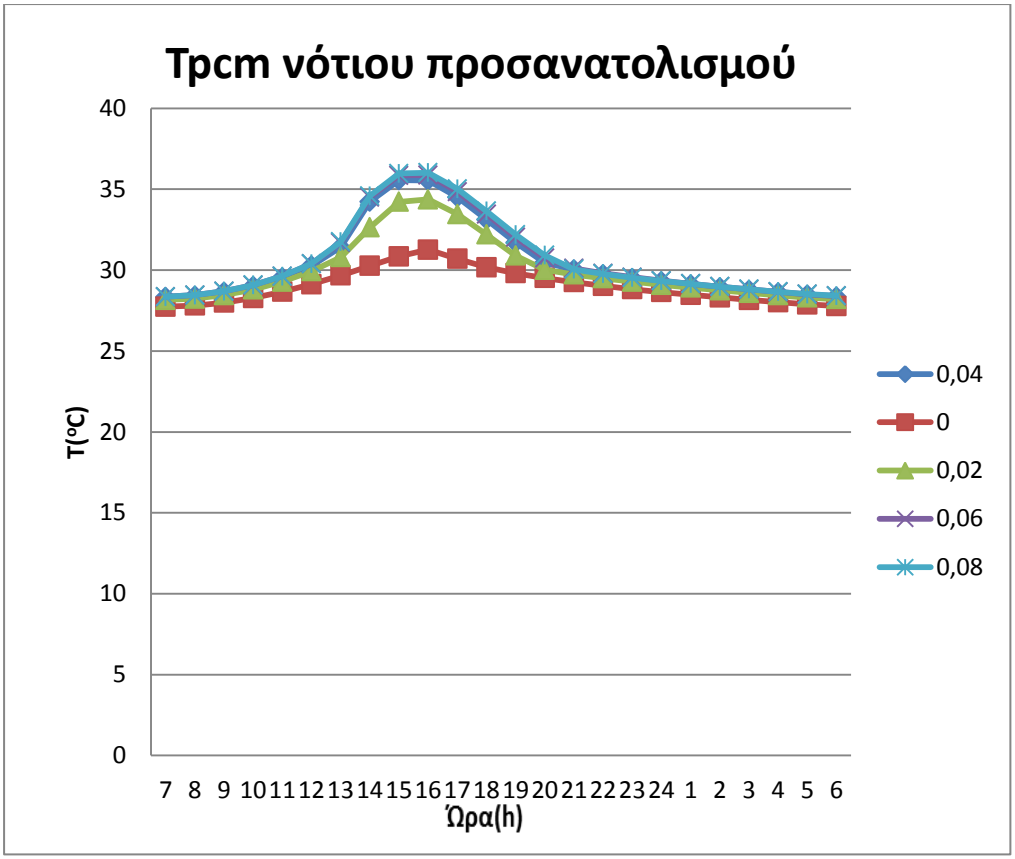


Σχήμα 7.1.1.55: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουλίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

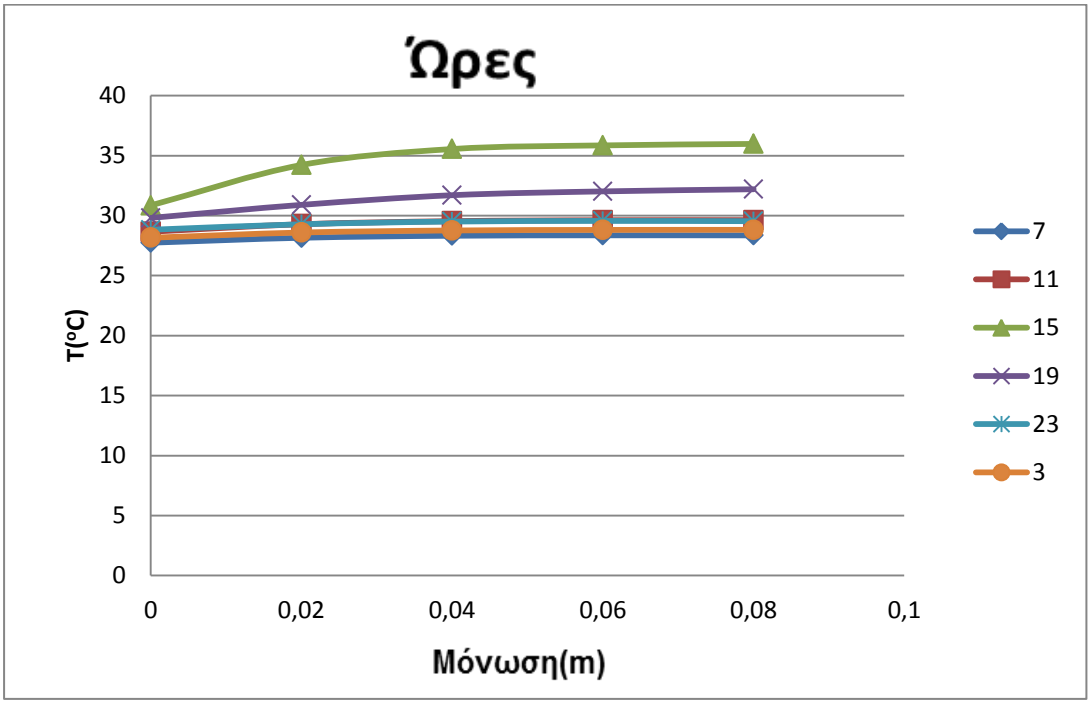


Σχήμα 7.1.1.56: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουλίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

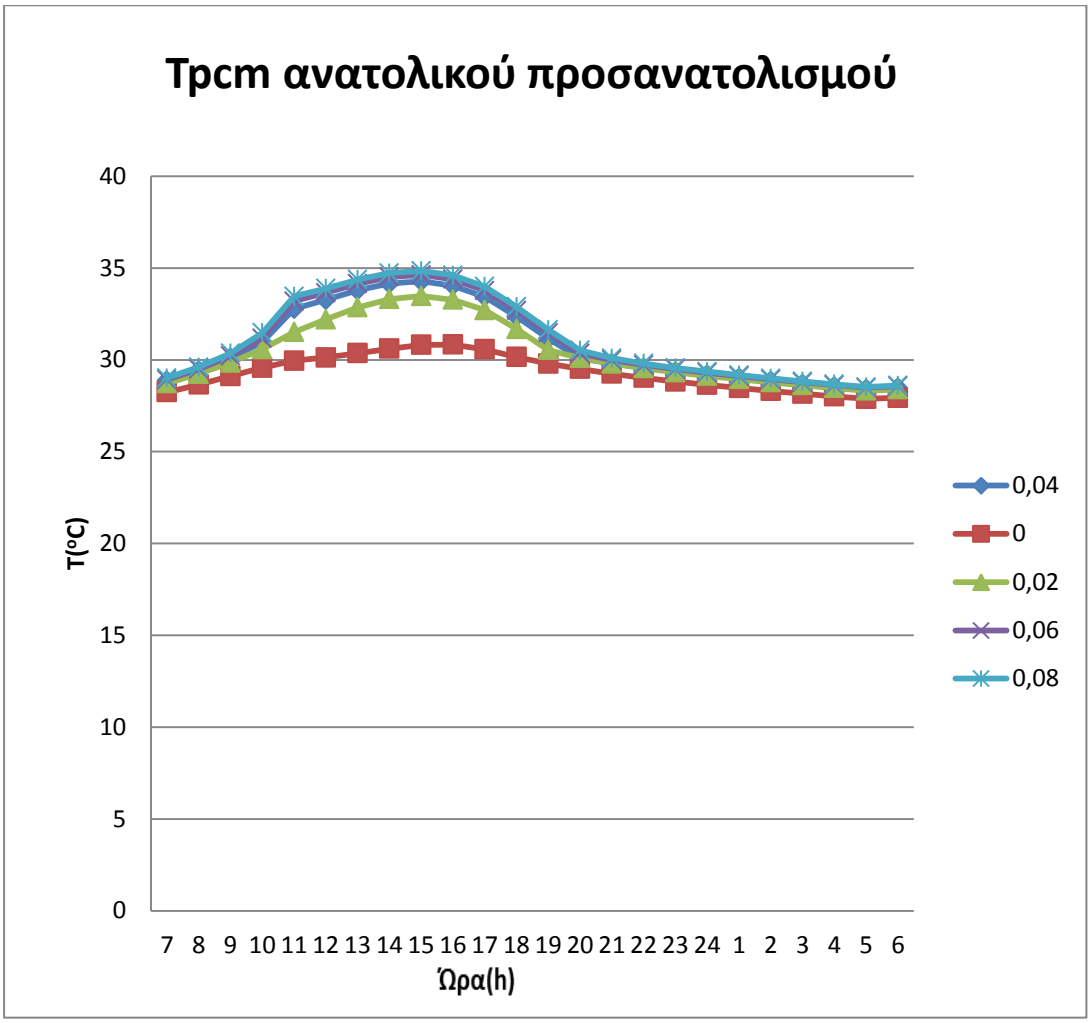
- Για την 21η Αυγούστου:



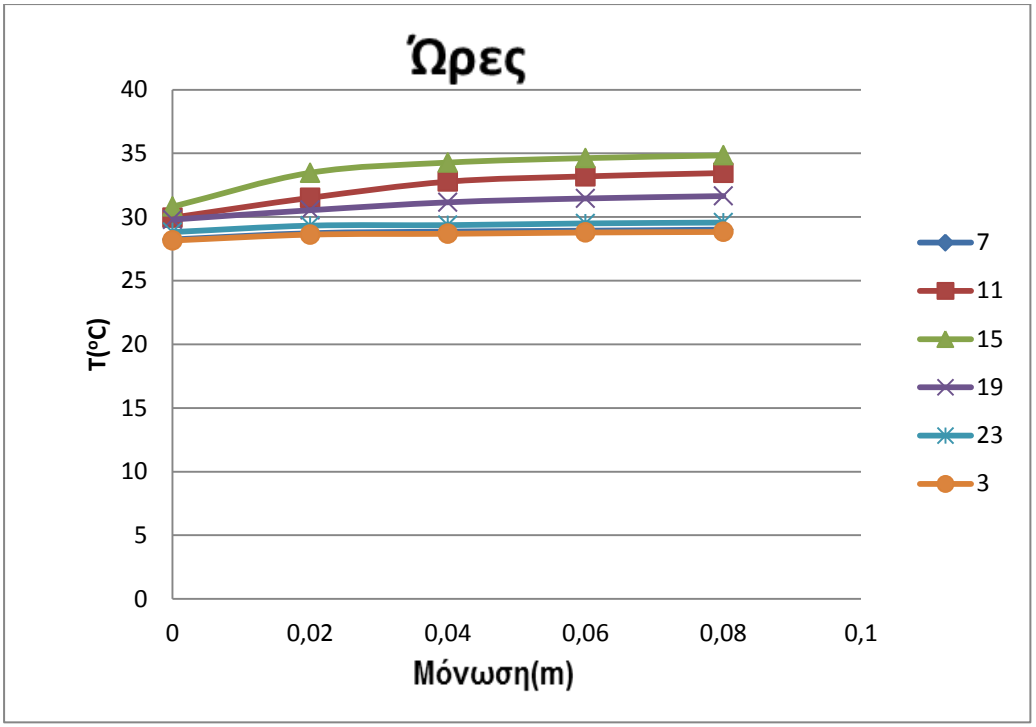
Σχήμα 7.1.1.57: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Αυγούστου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



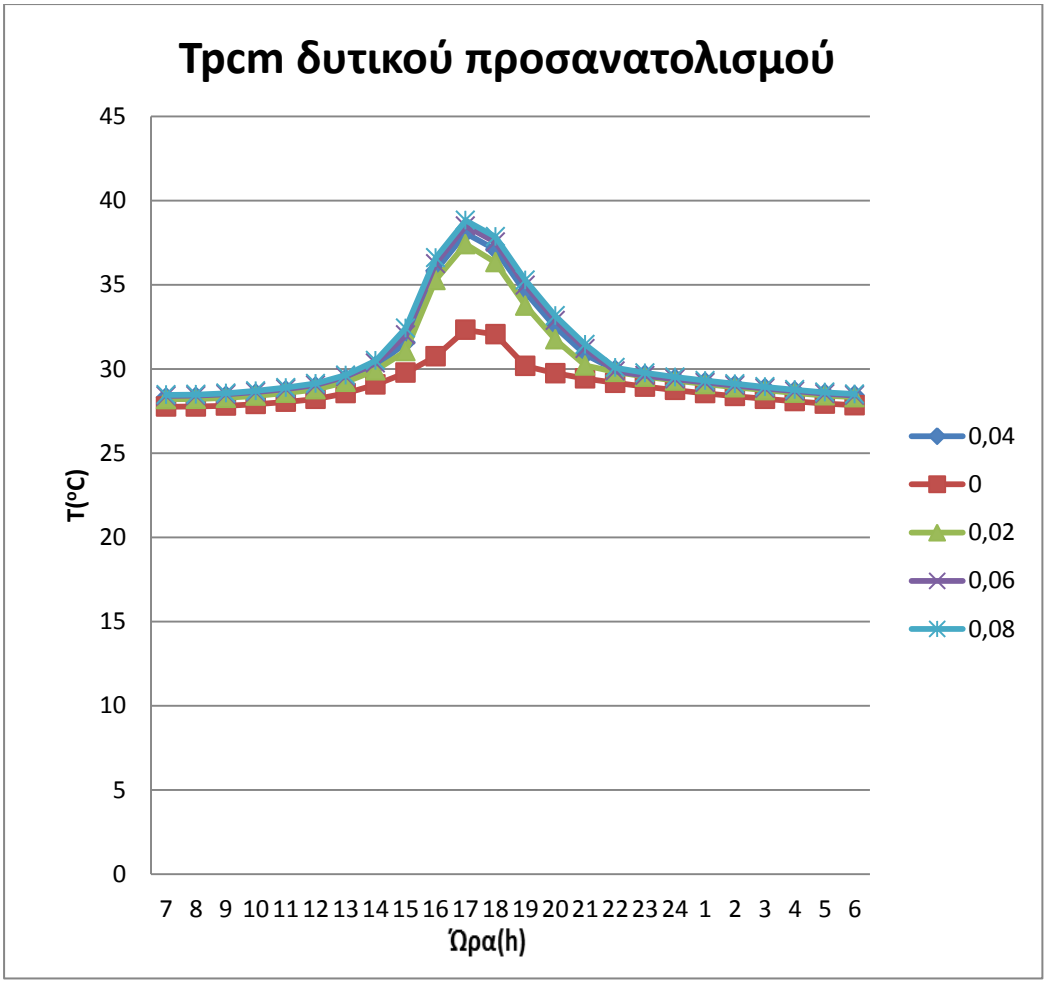
Σχήμα 7.1.1.58: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Αυγούστου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



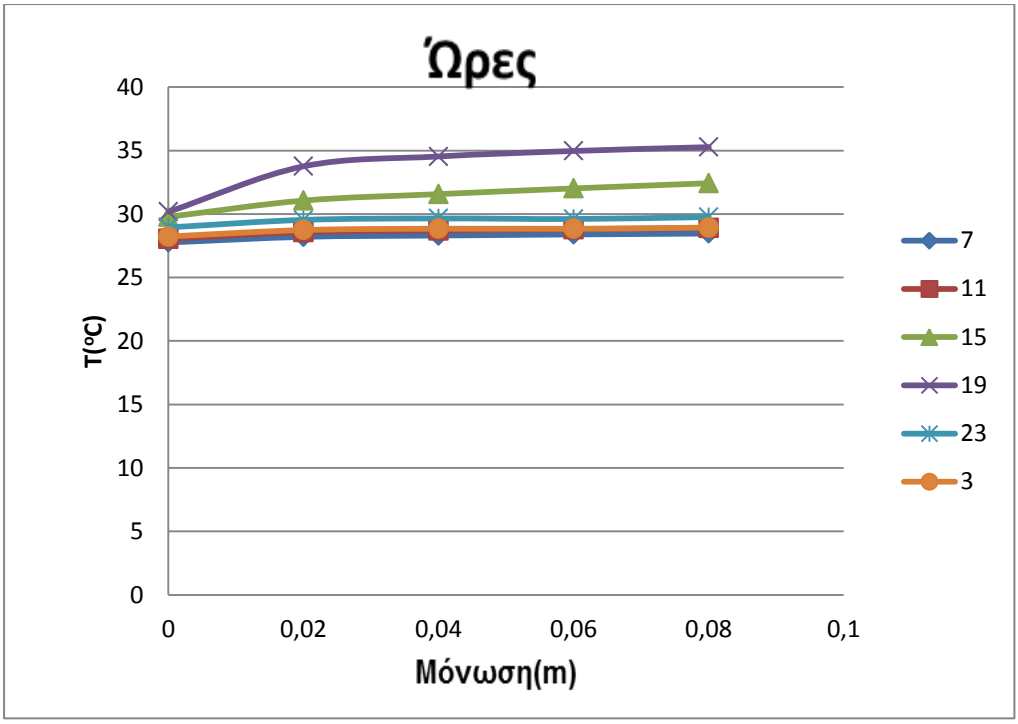
Σχήμα 7.1.1.59: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Αυγούστου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



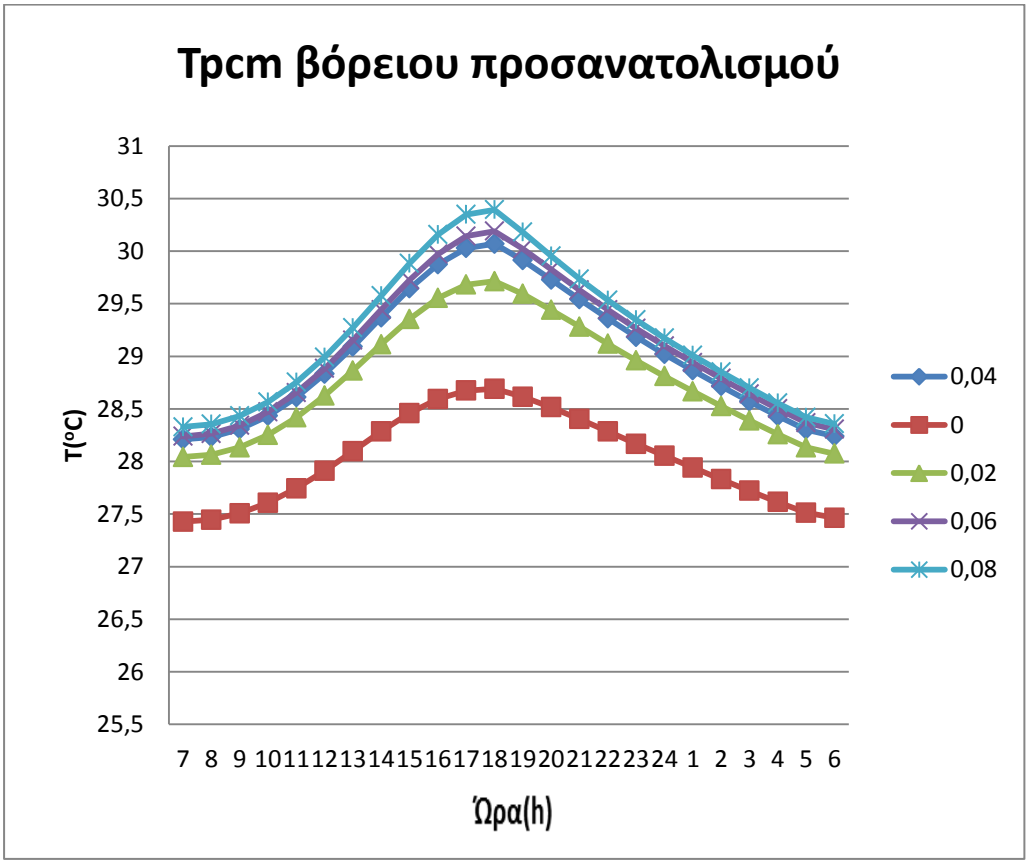
Σχήμα 7.1.1.60: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21^{η} Αυγούστου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



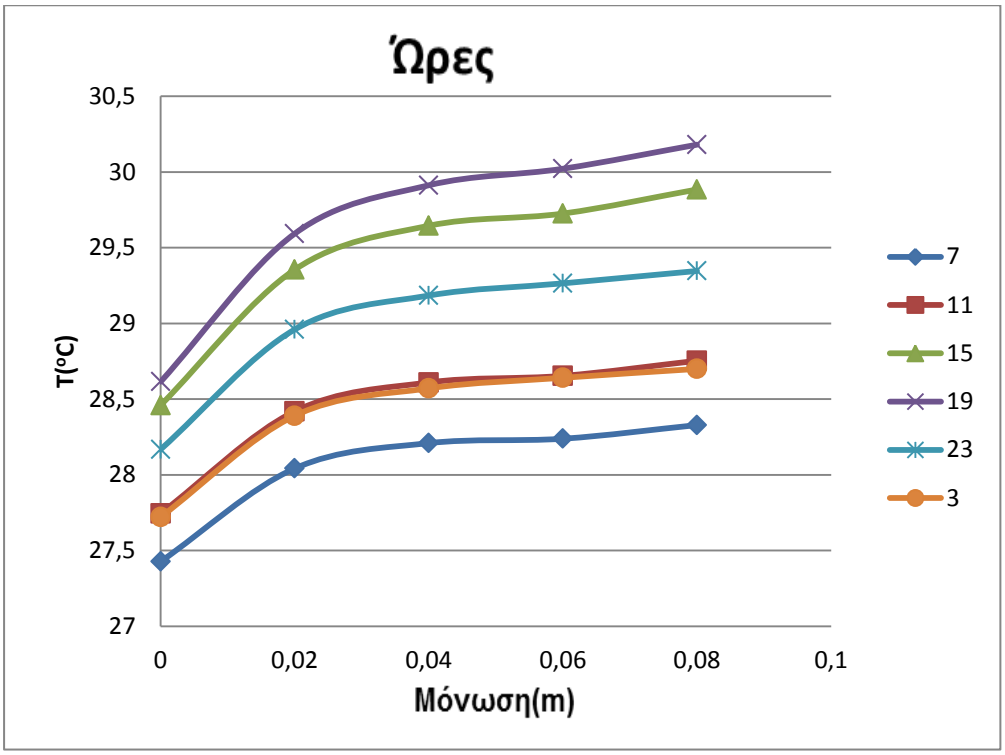
Σχήμα 7.1.1.61: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Αυγούστου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.62: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Αυγούστου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

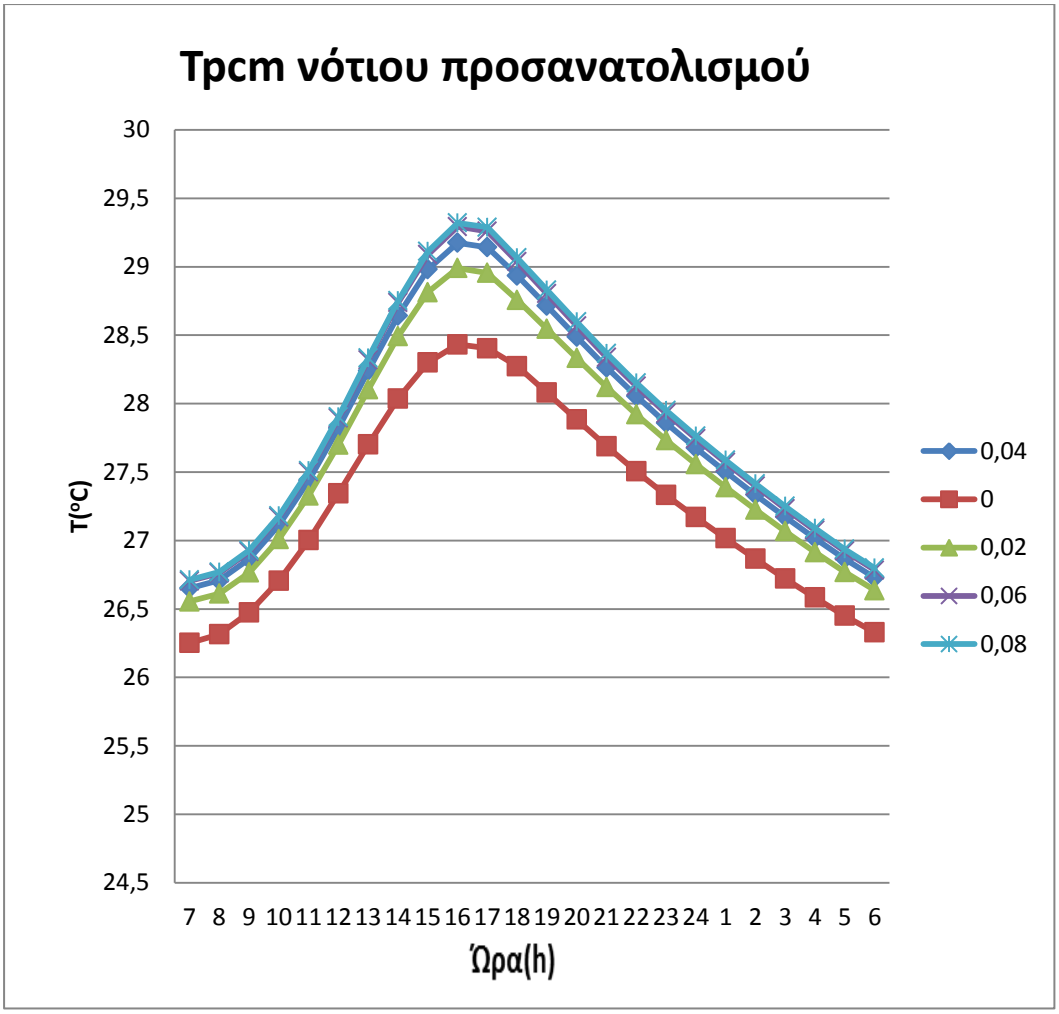


Σχήμα 7.1.1.63: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Αυγούστου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

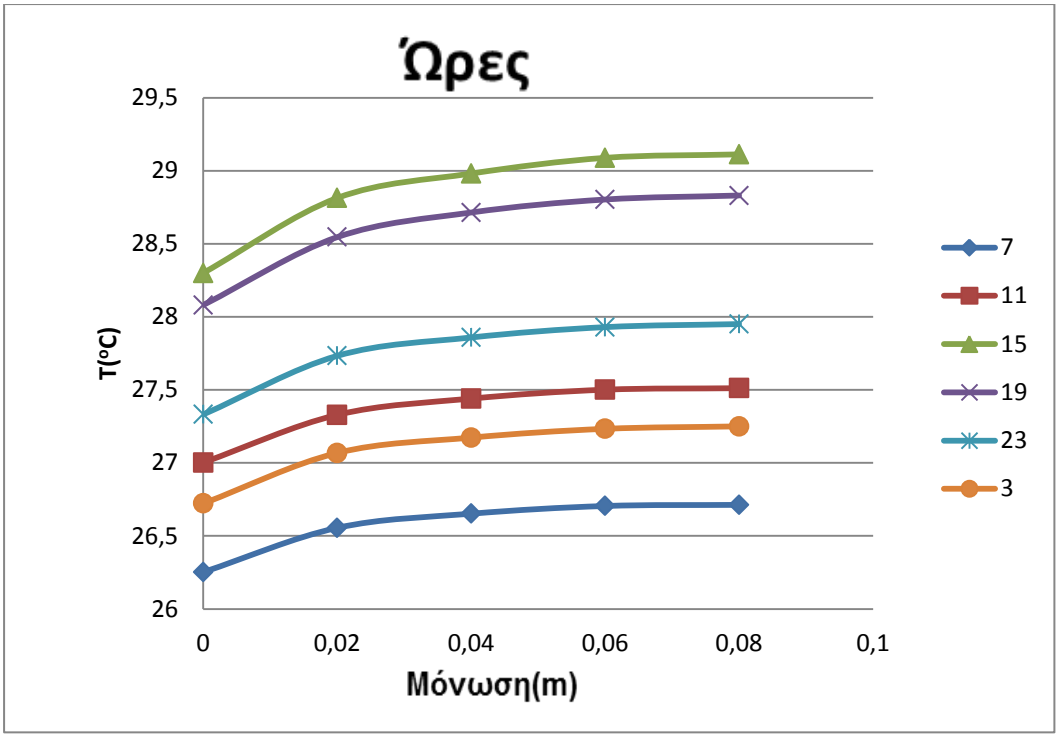


Σχήμα 7.1.1.64: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Αυγούστου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

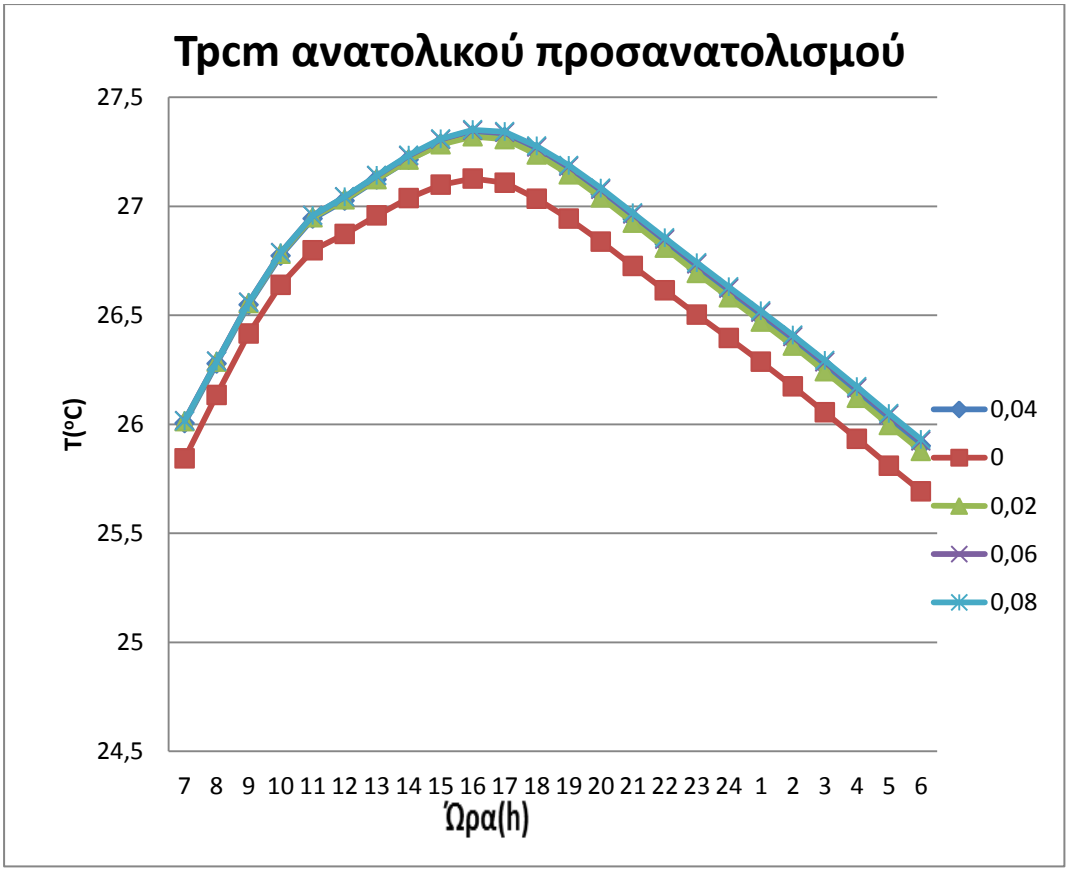
- Για την 21η Σεπτεμβρίου:



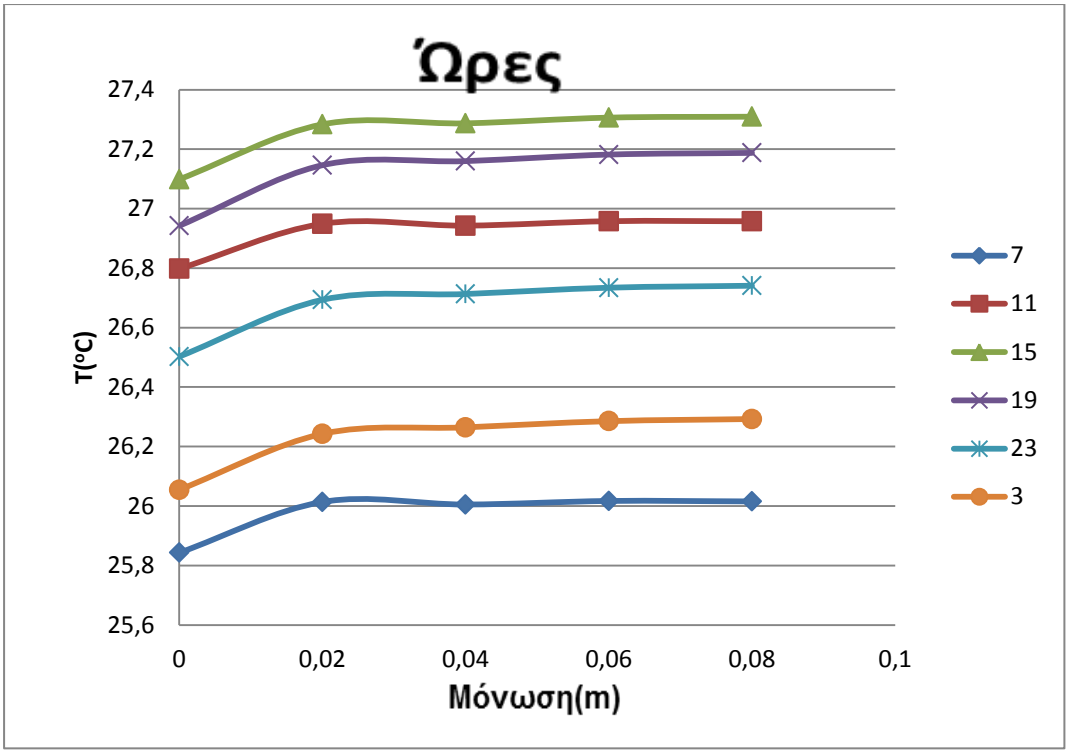
Σχήμα 7.1.1.65: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



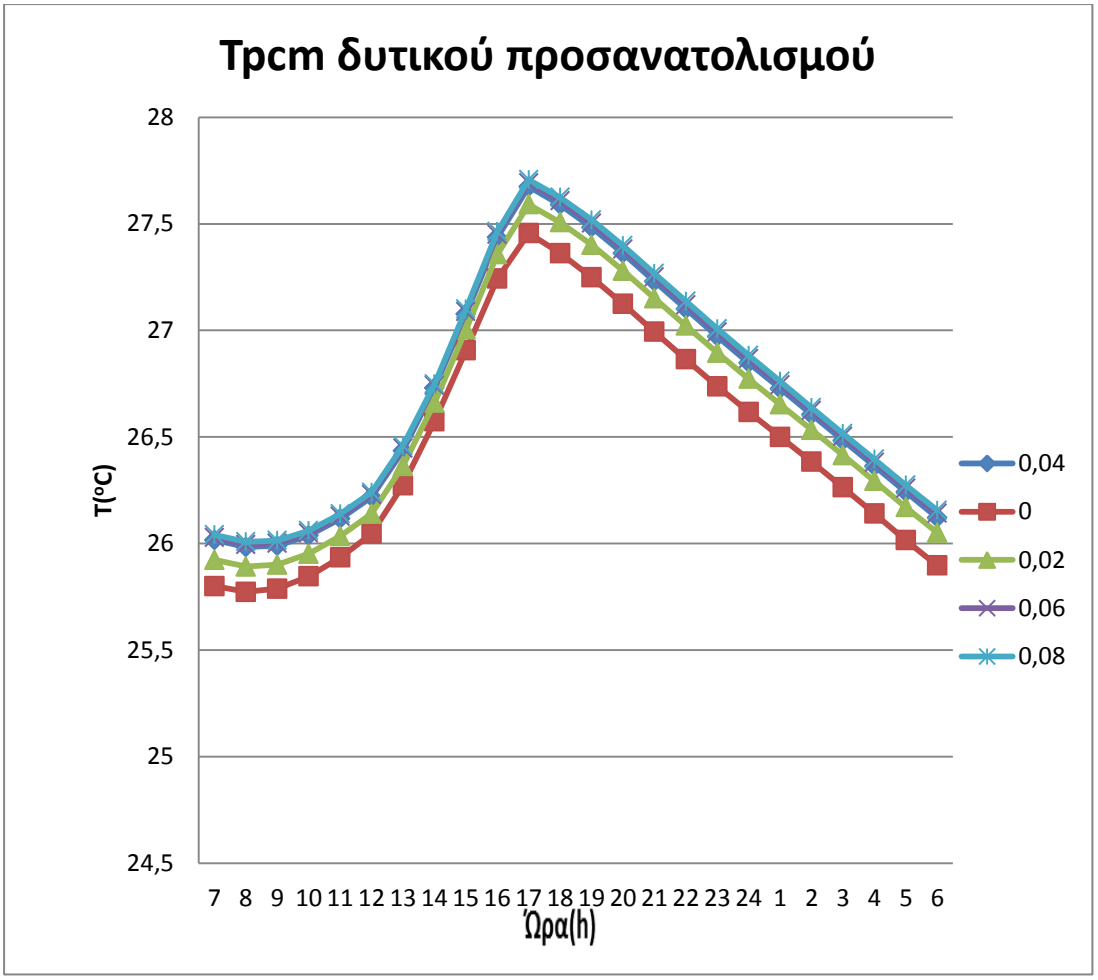
Σχήμα 7.1.1.66: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21^{η} Σεπτεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



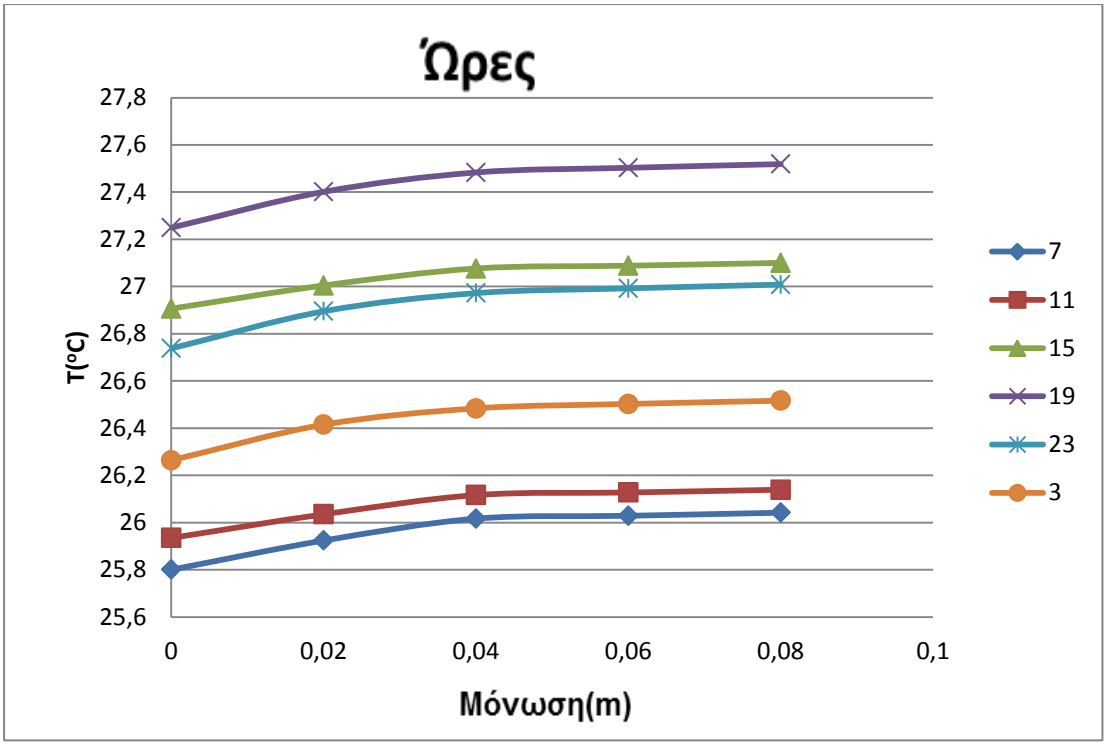
Σχήμα 7.1.1.67: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



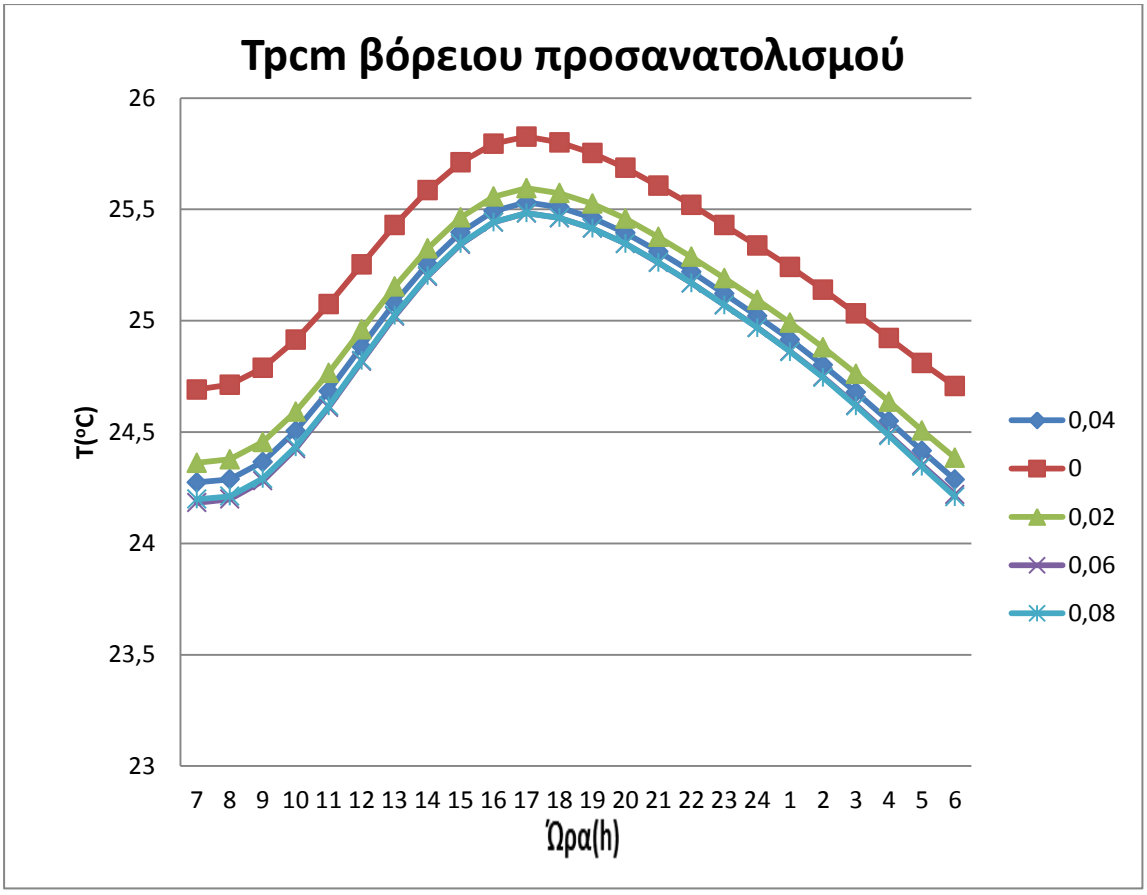
Σχήμα 7.1.1.68: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



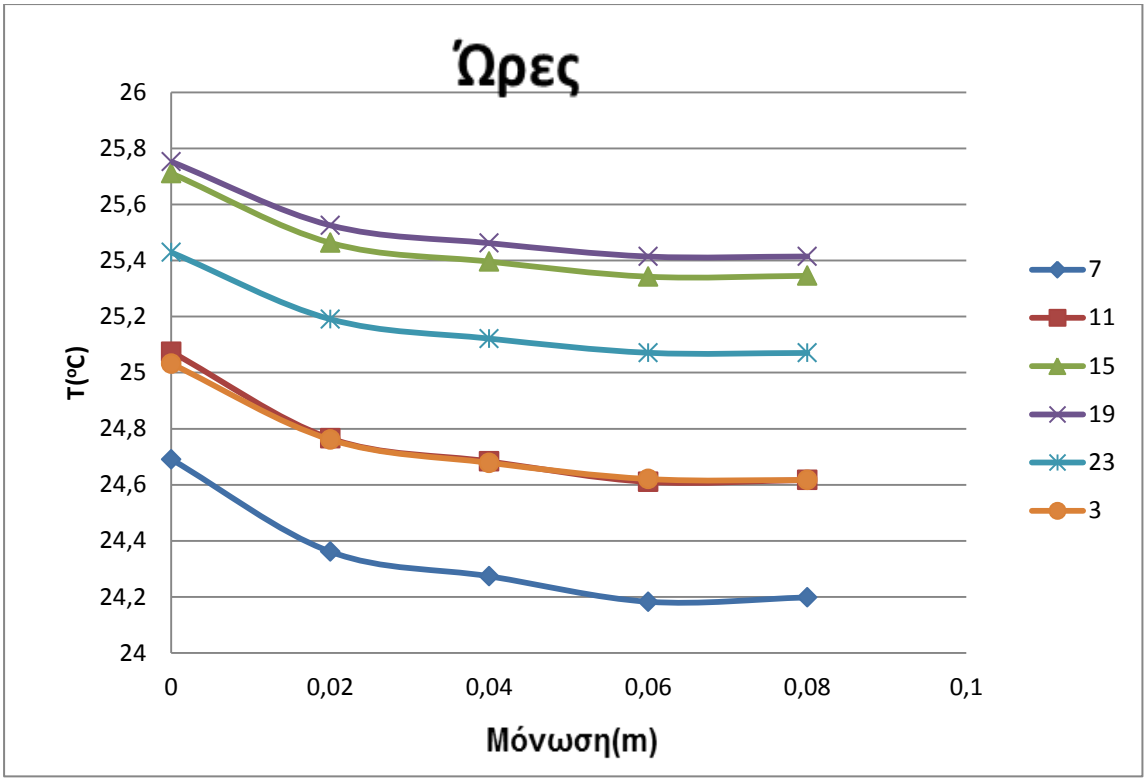
Σχήμα 7.1.1.69: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.70: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

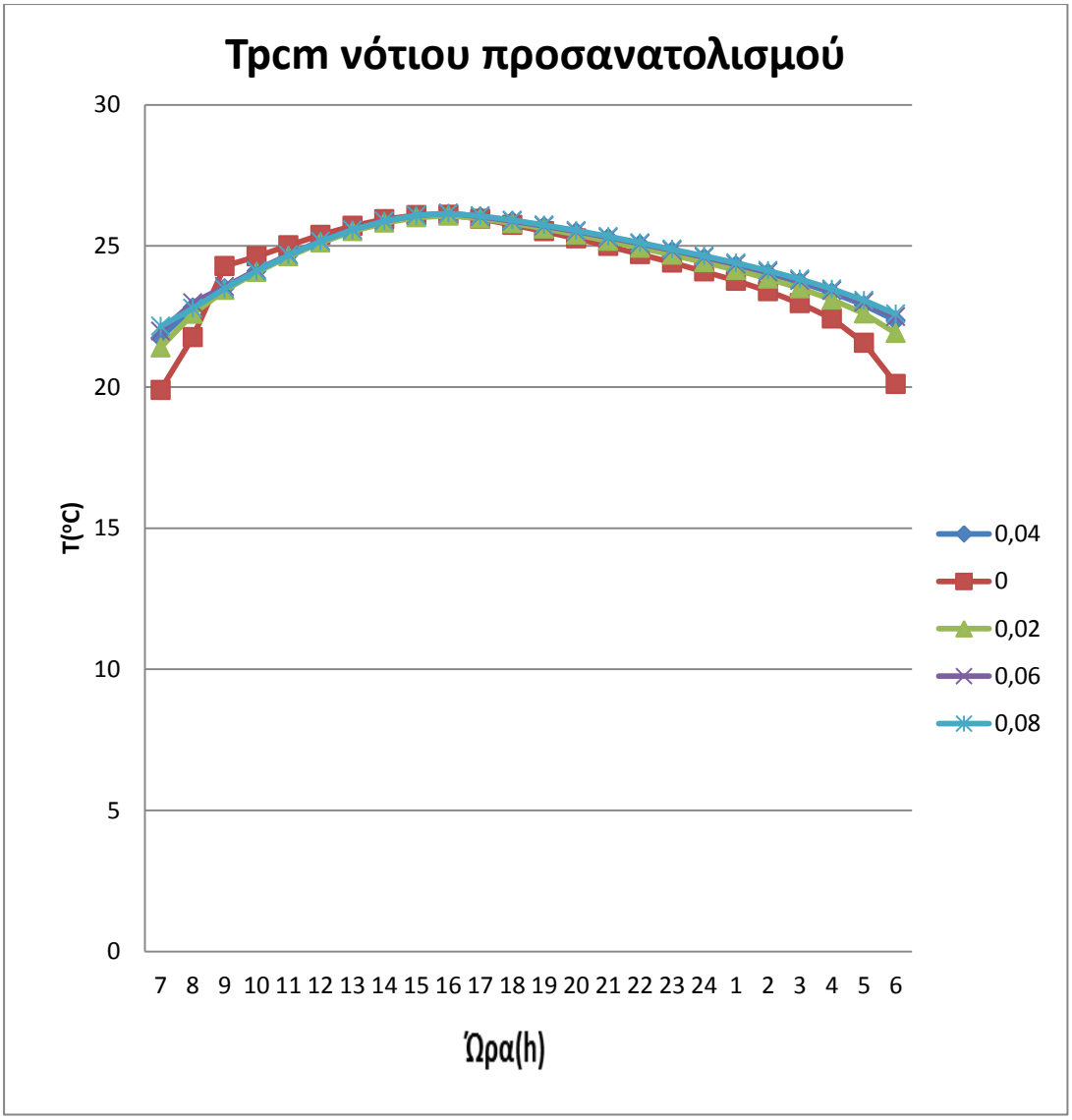


Σχήμα 7.1.1.71: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

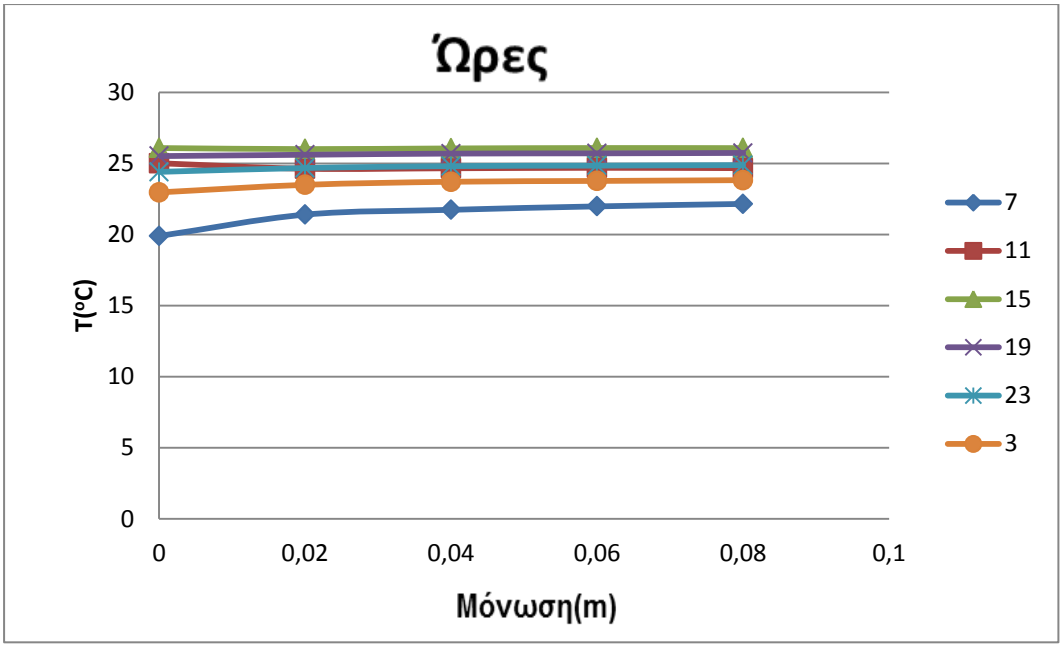


Σχήμα 7.1.1.72: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

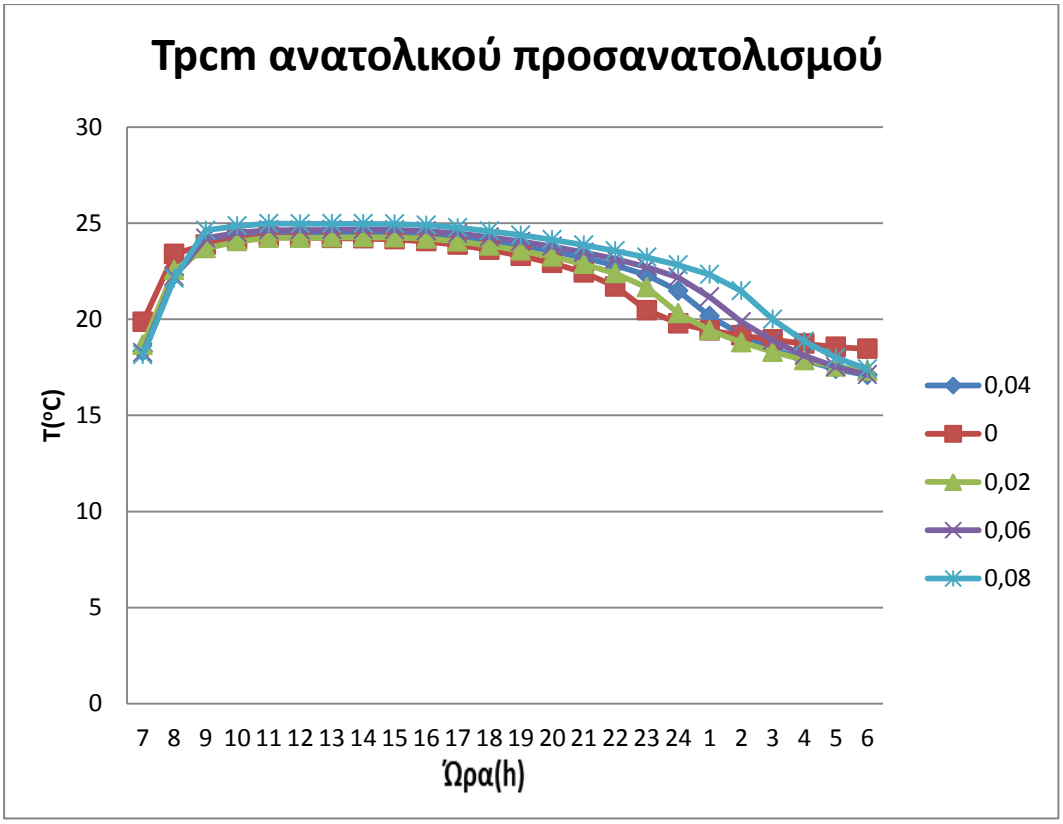
- Για την 21η Οκτωβρίου:



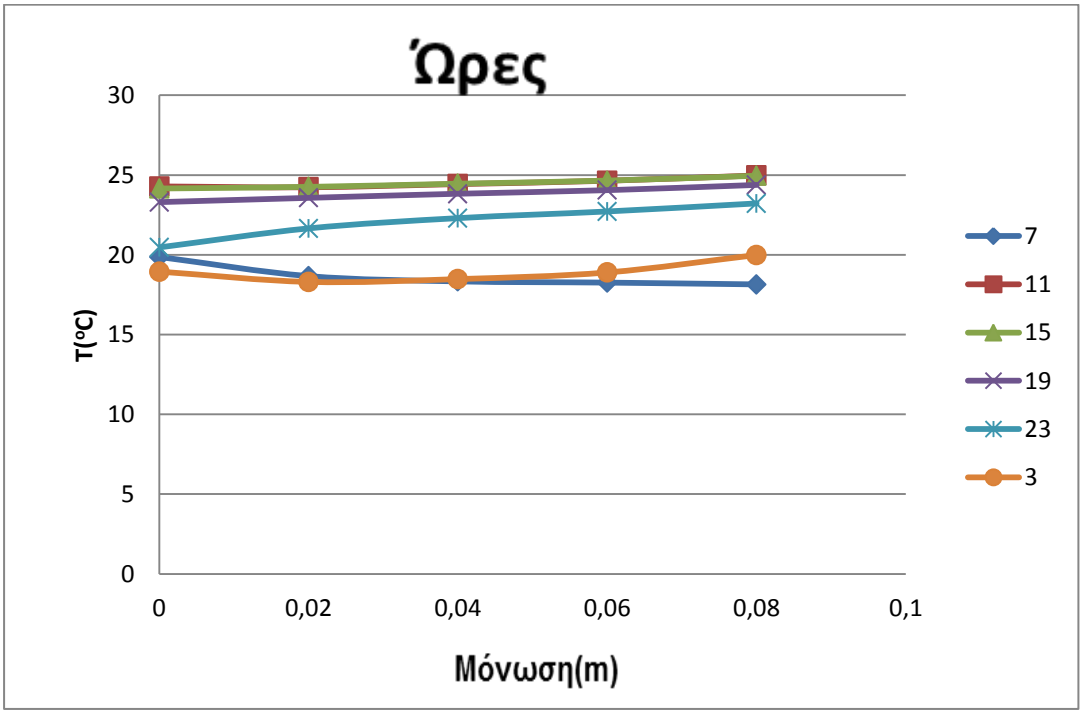
Σχήμα 7.1.1.73: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



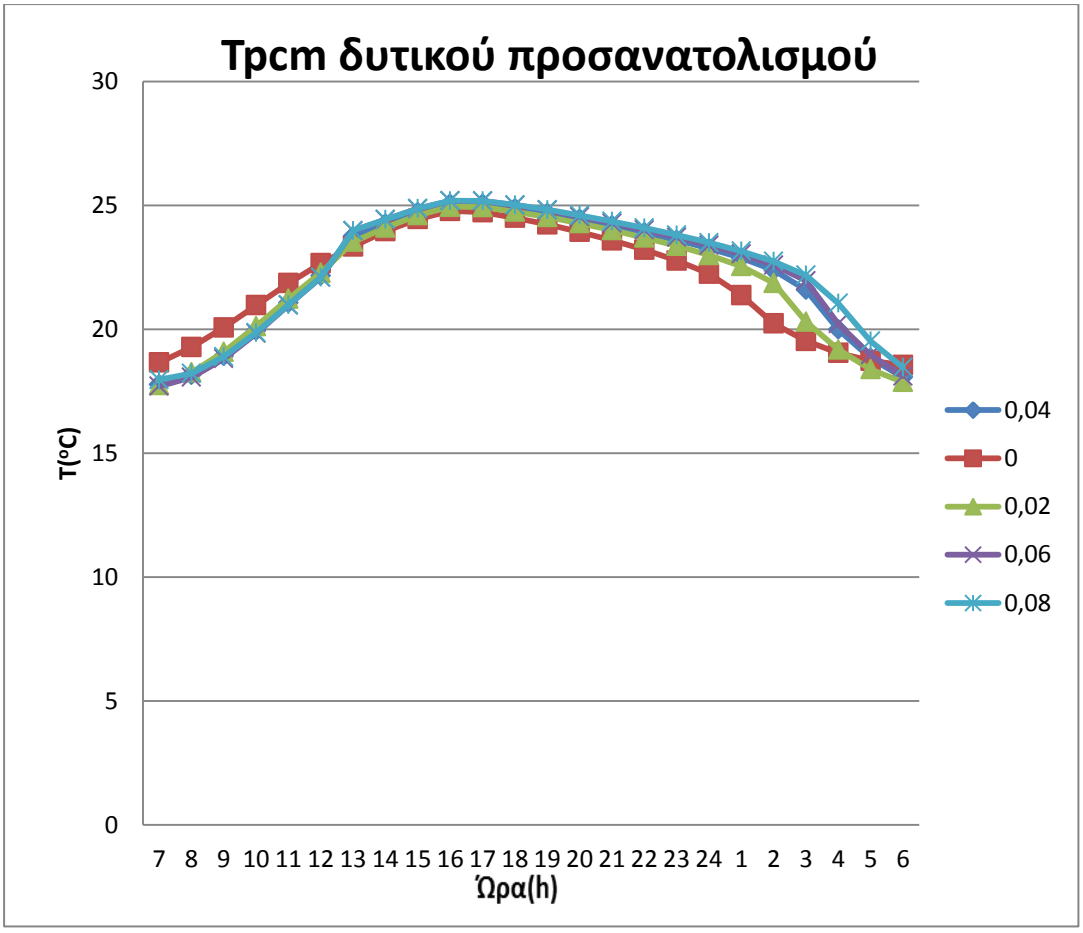
Σχήμα 7.1.1.74: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



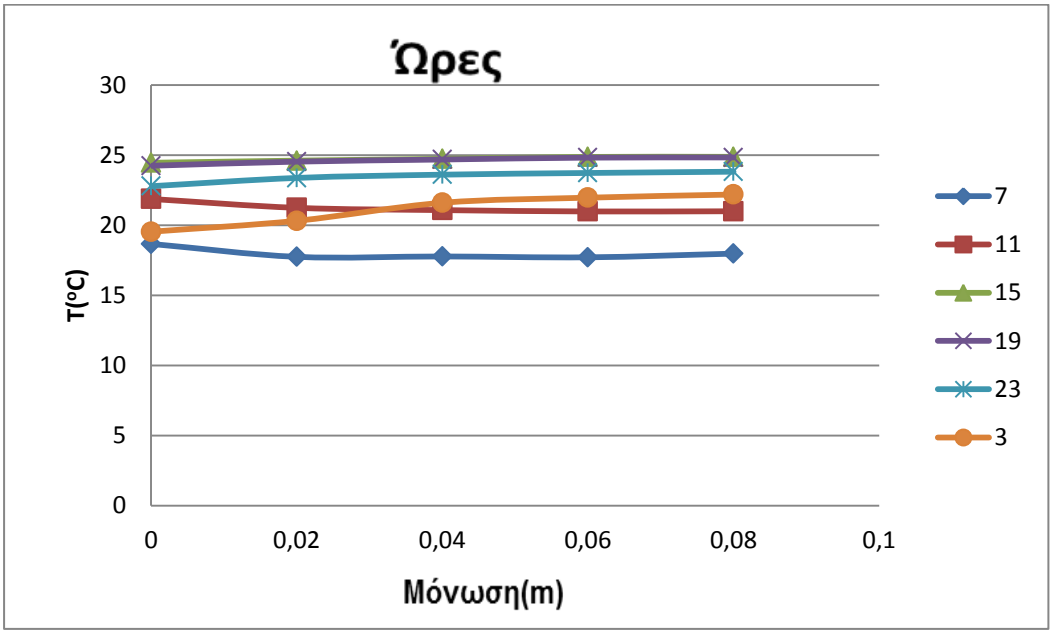
Σχήμα 7.1.1.75: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



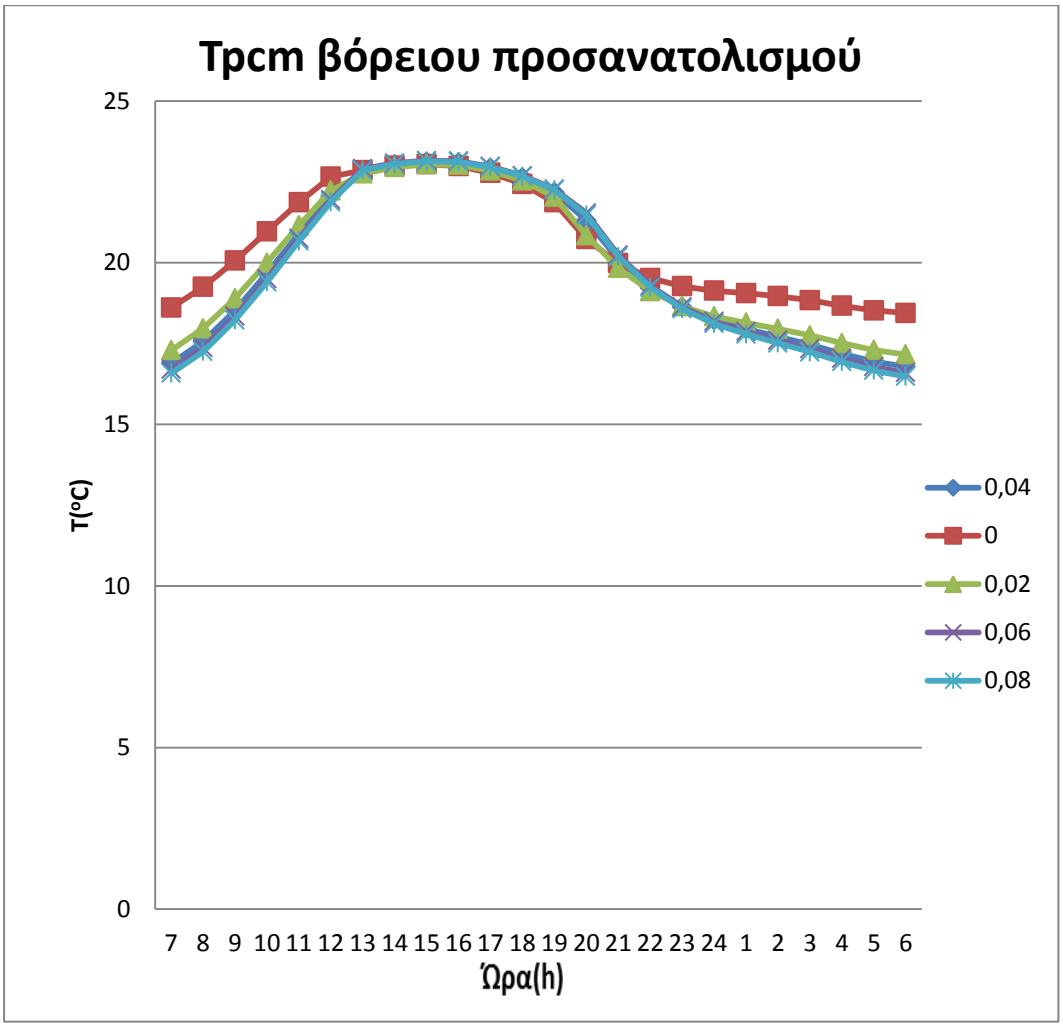
Σχήμα 7.1.1.76: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



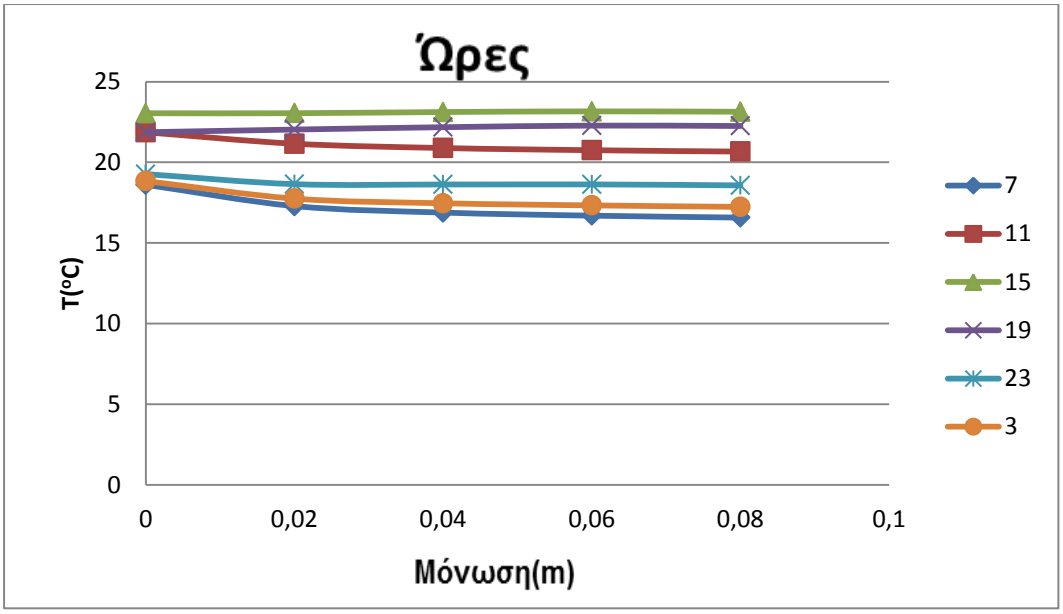
Σχήμα 7.1.1.77: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.78: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

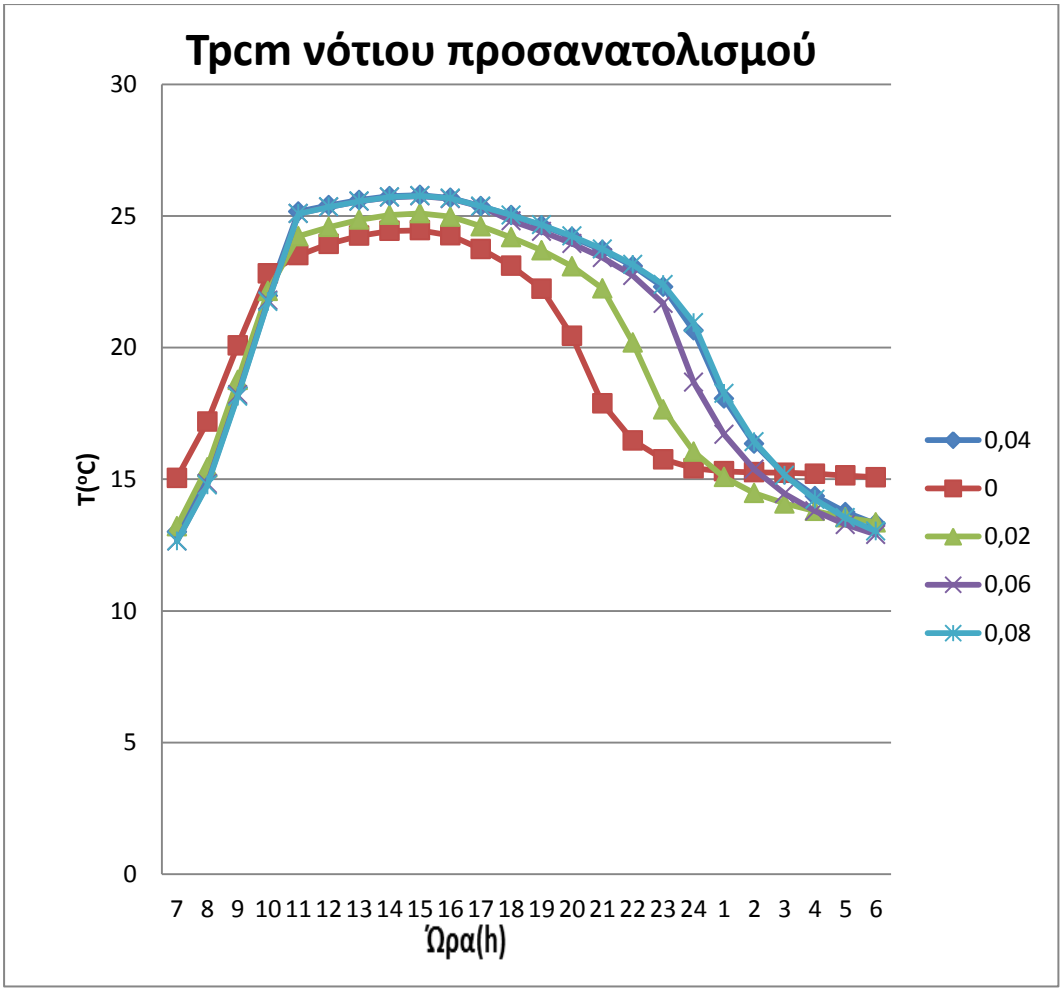


Σχήμα 7.1.1.79: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

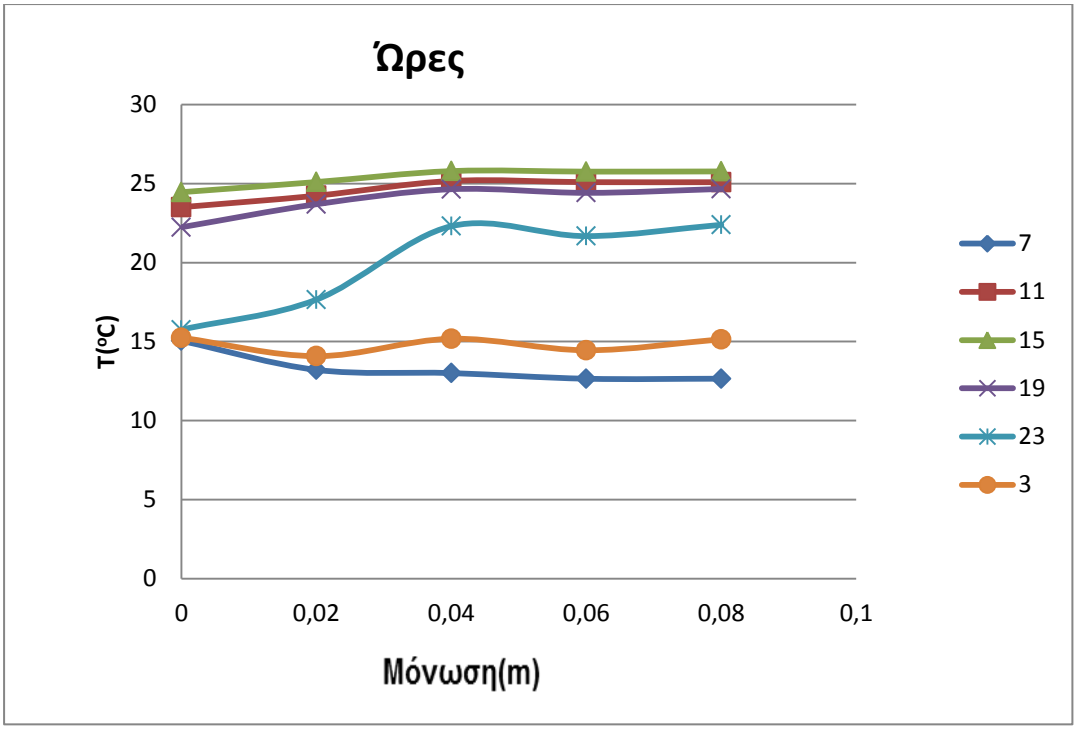


Σχήμα 7.1.1.80: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

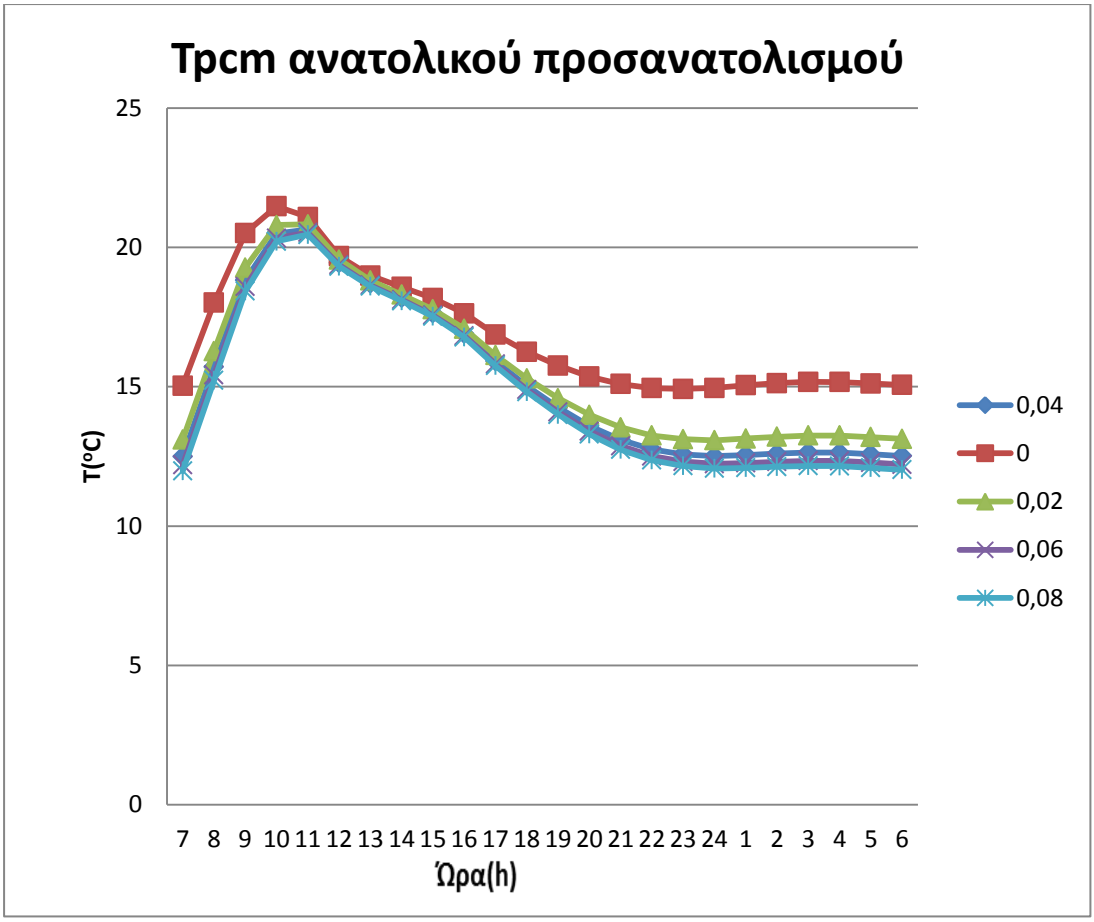
- Για την 21η Νοεμβρίου:



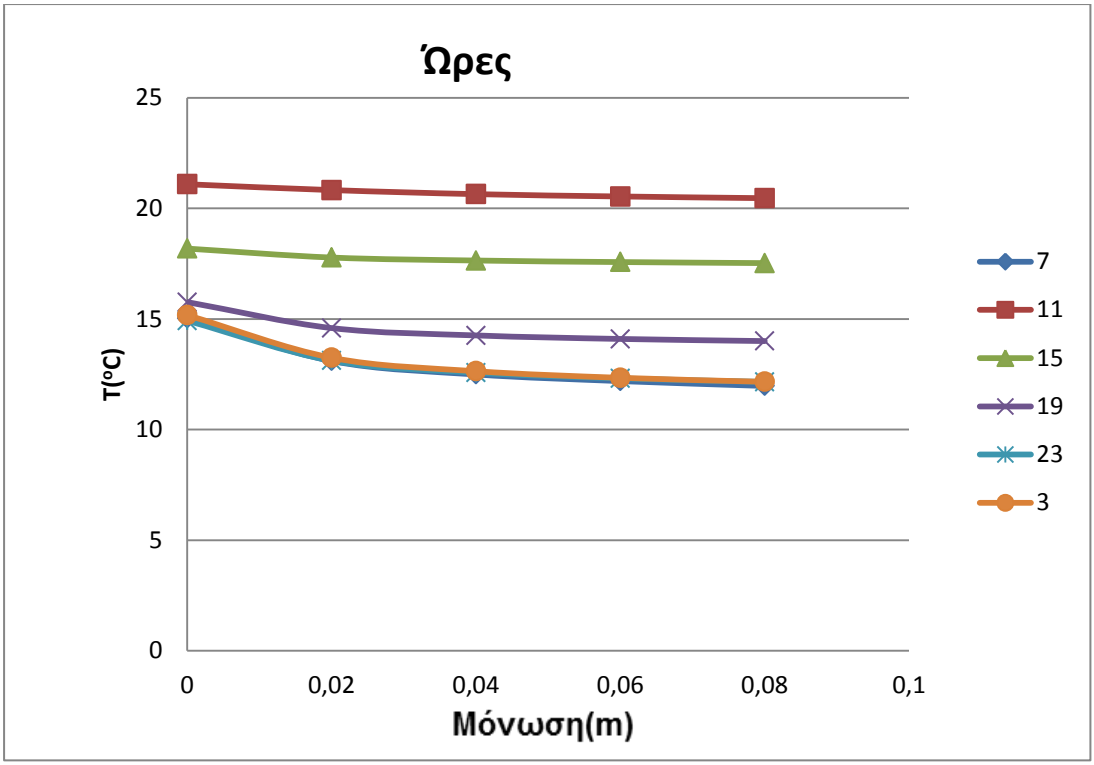
Σχήμα 7.1.1.81: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



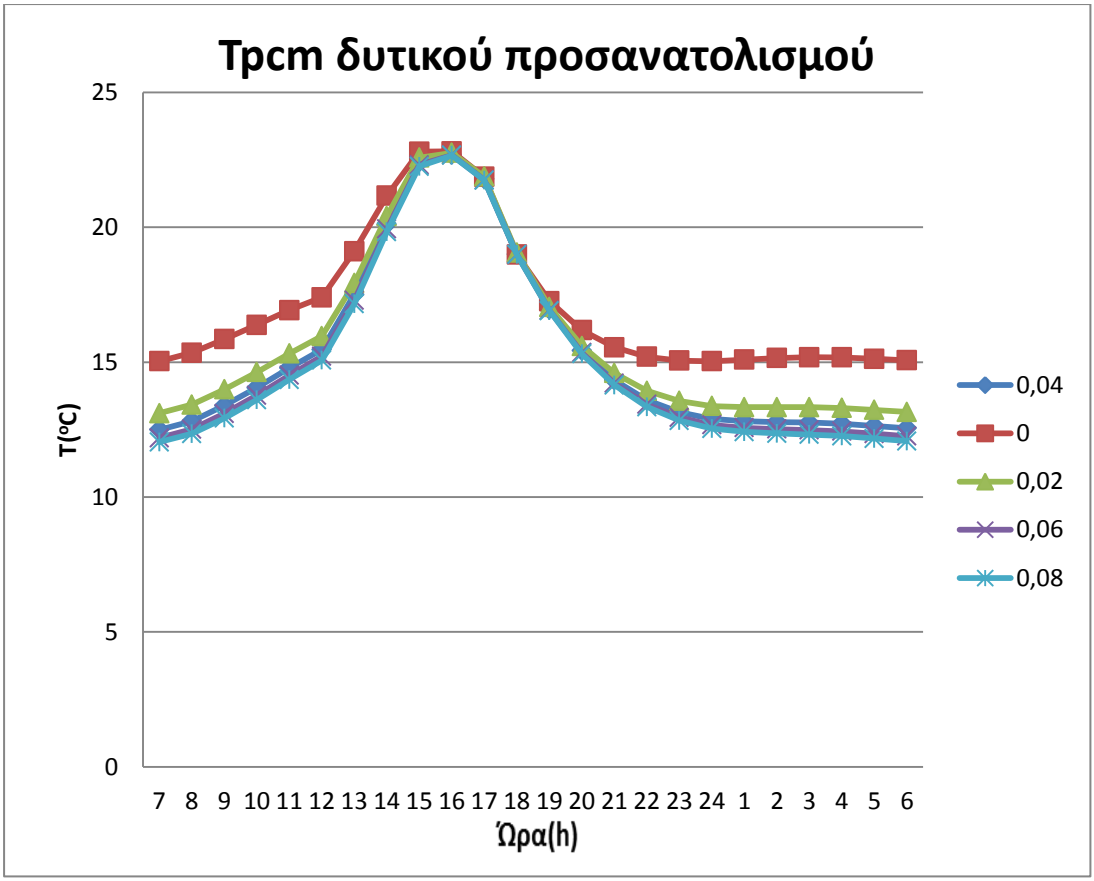
Σχήμα 7.1.1.82: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



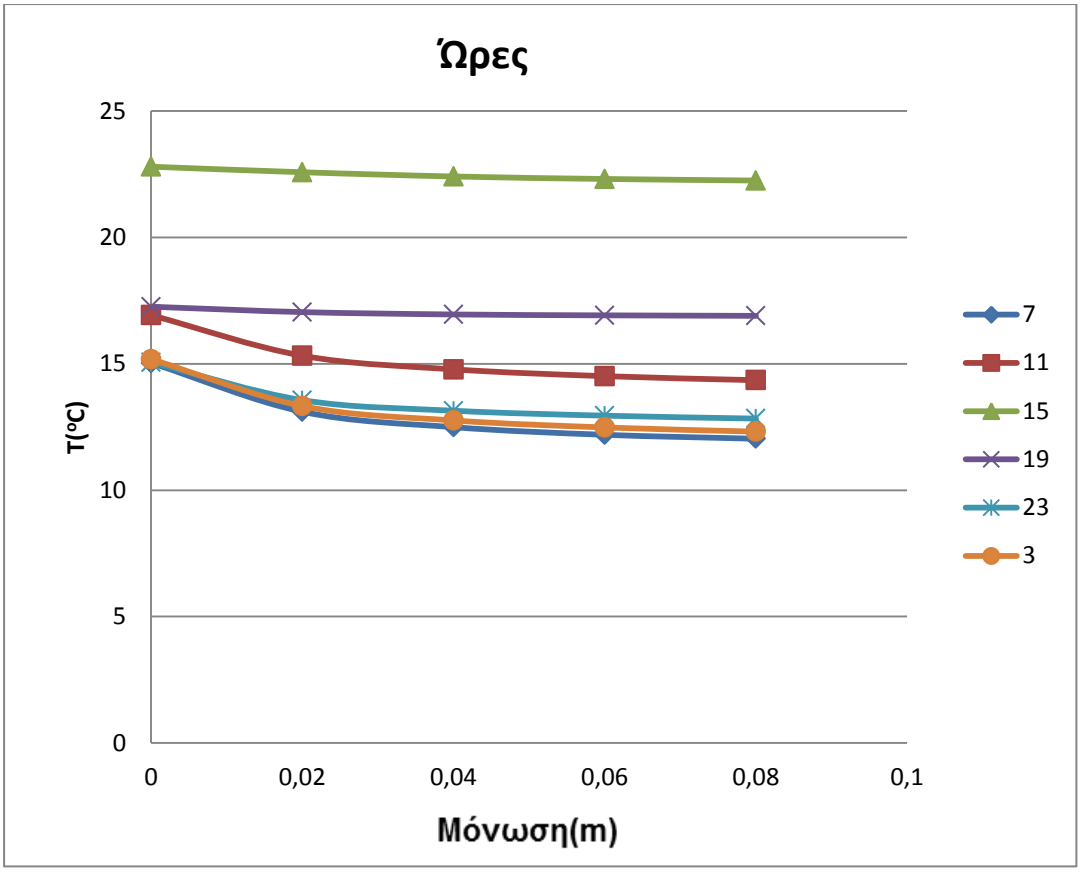
Σχήμα 7.1.1.83: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



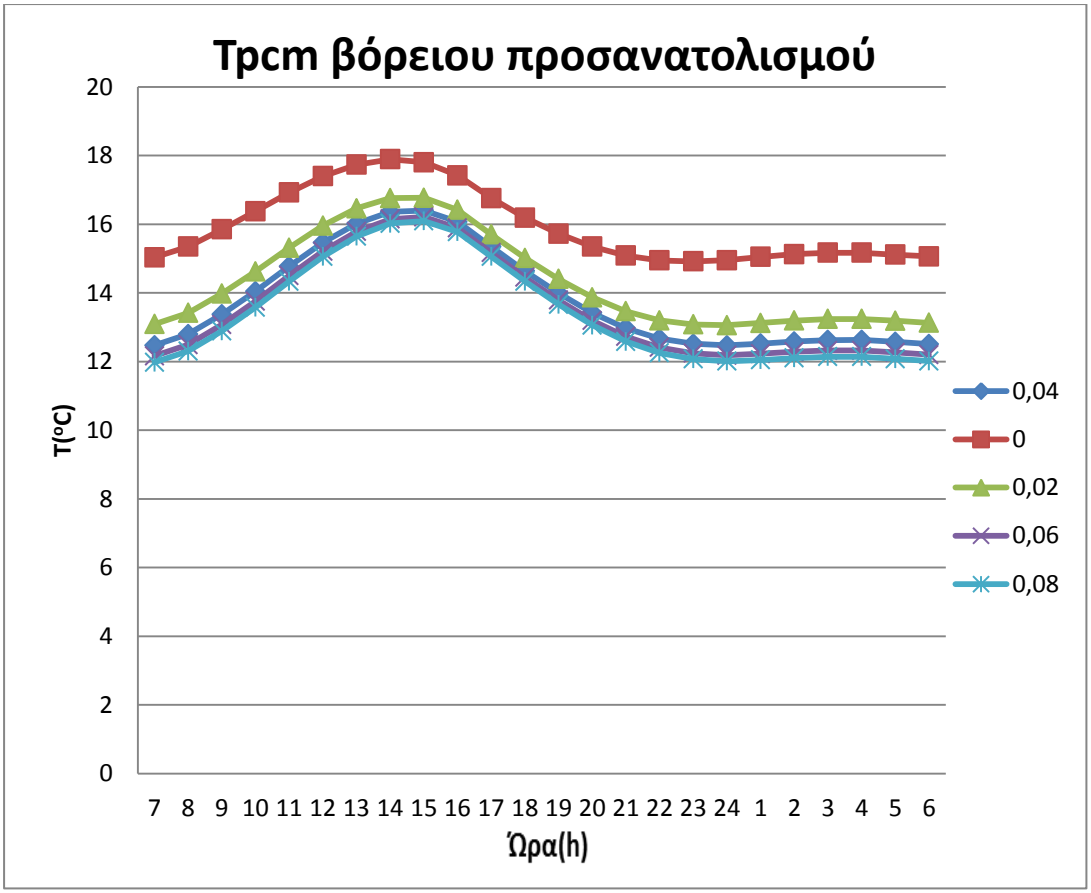
Σχήμα 7.1.1.84: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



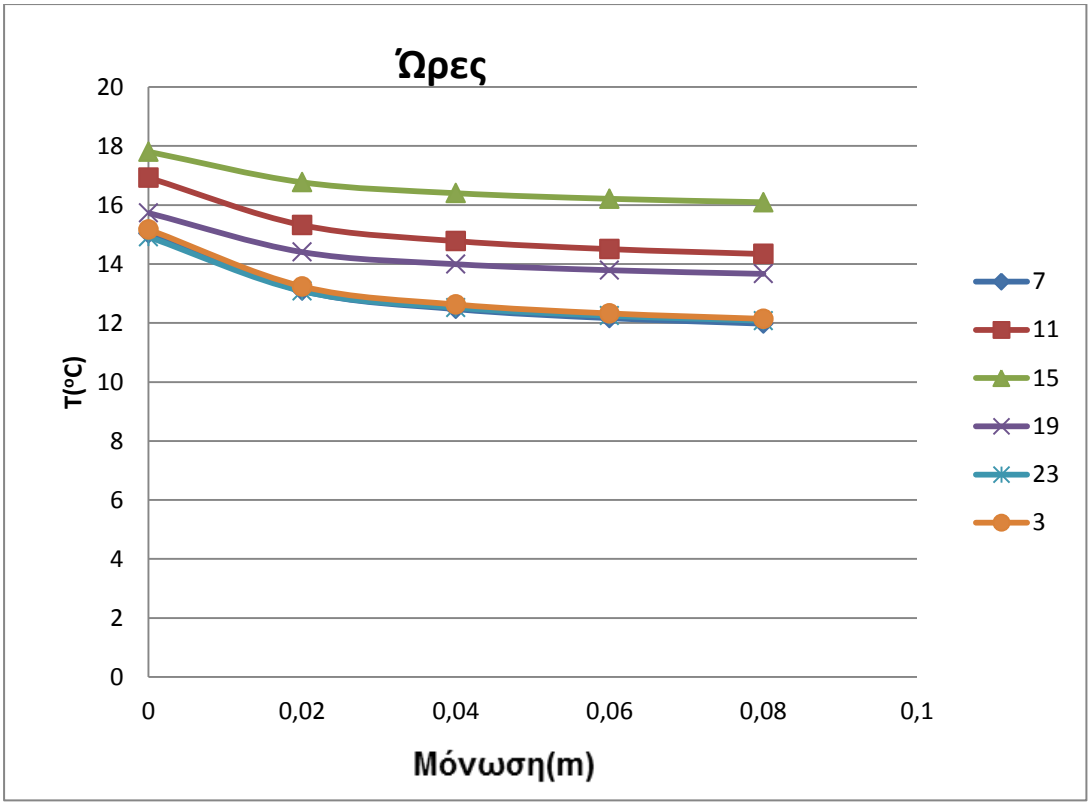
Σχήμα 7.1.1.85: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.86: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

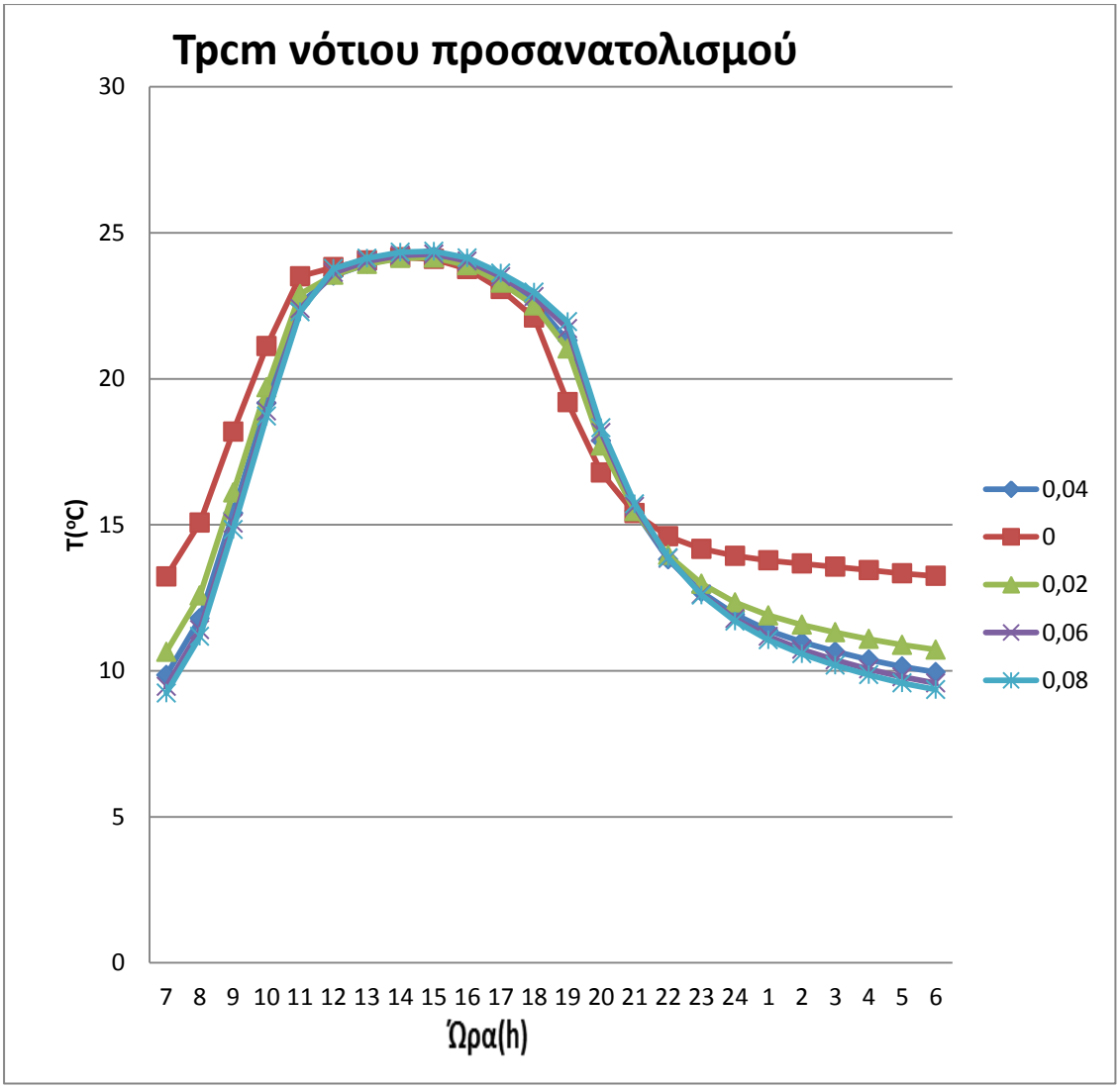


Σχήμα 7.1.1.87: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

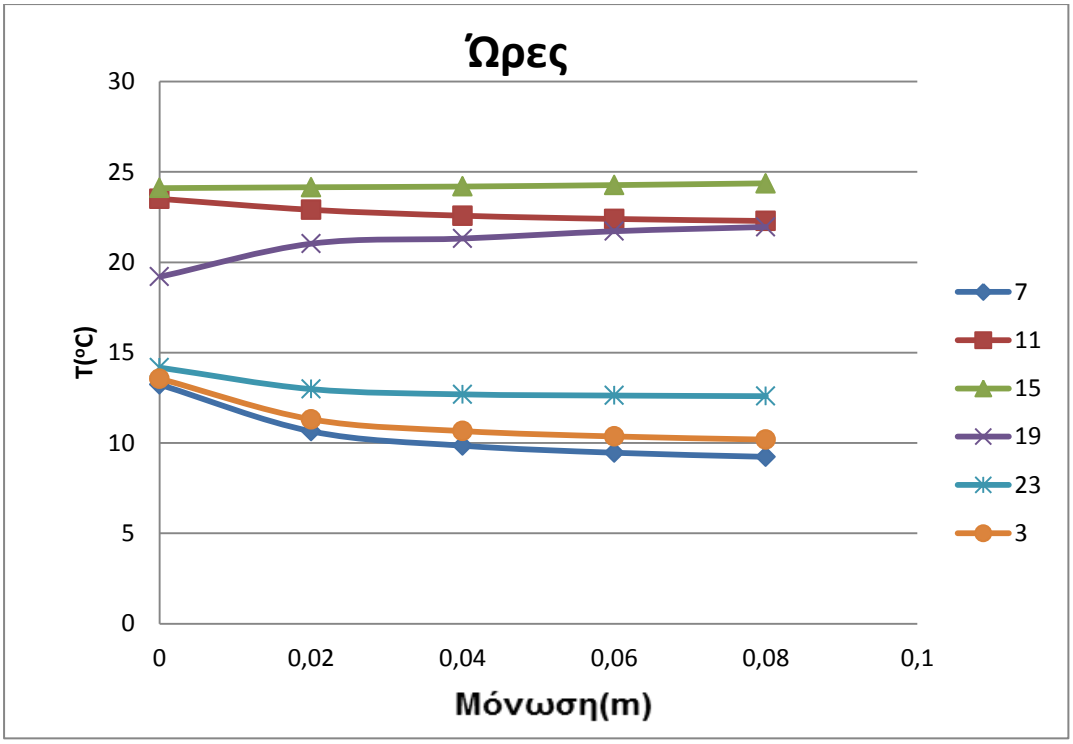


Σχήμα 7.1.1.88: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

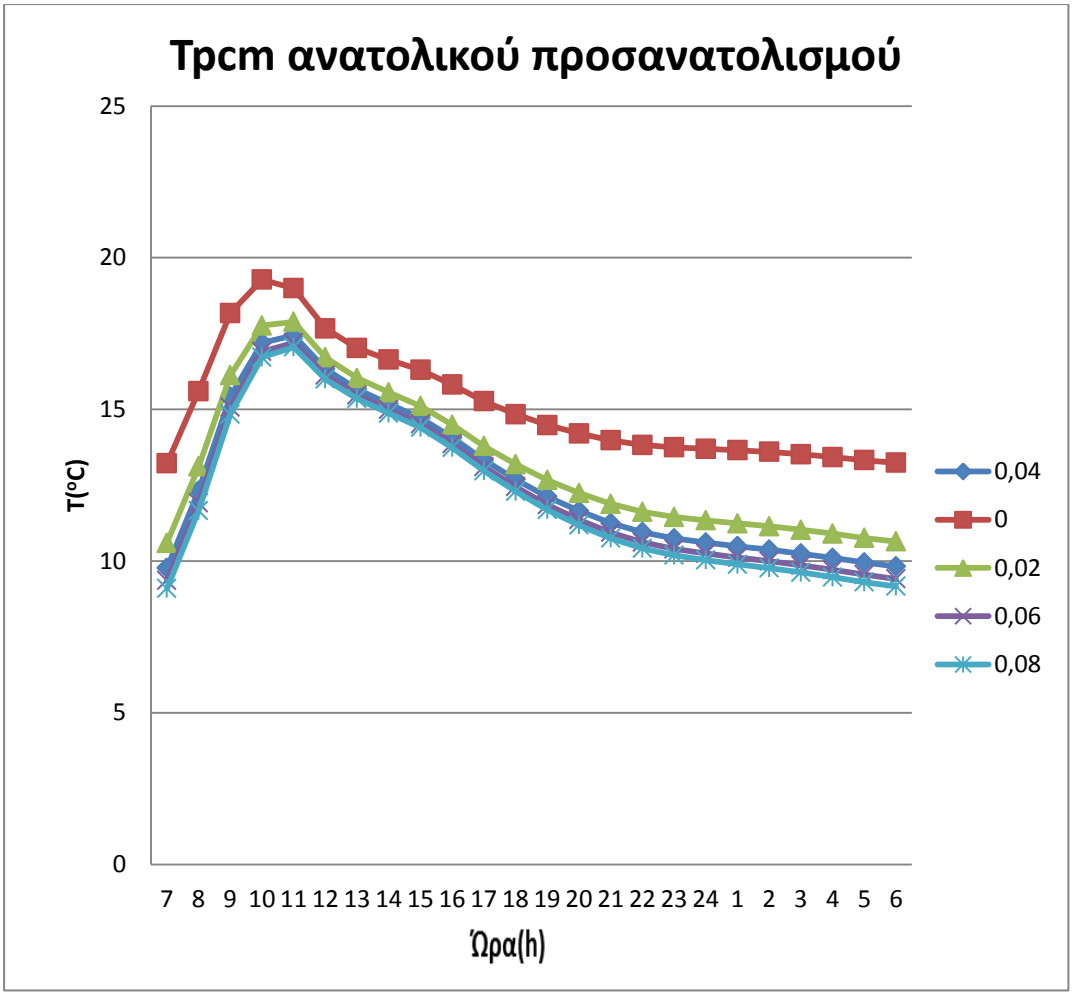
- Για την 21η Δεκεμβρίου:



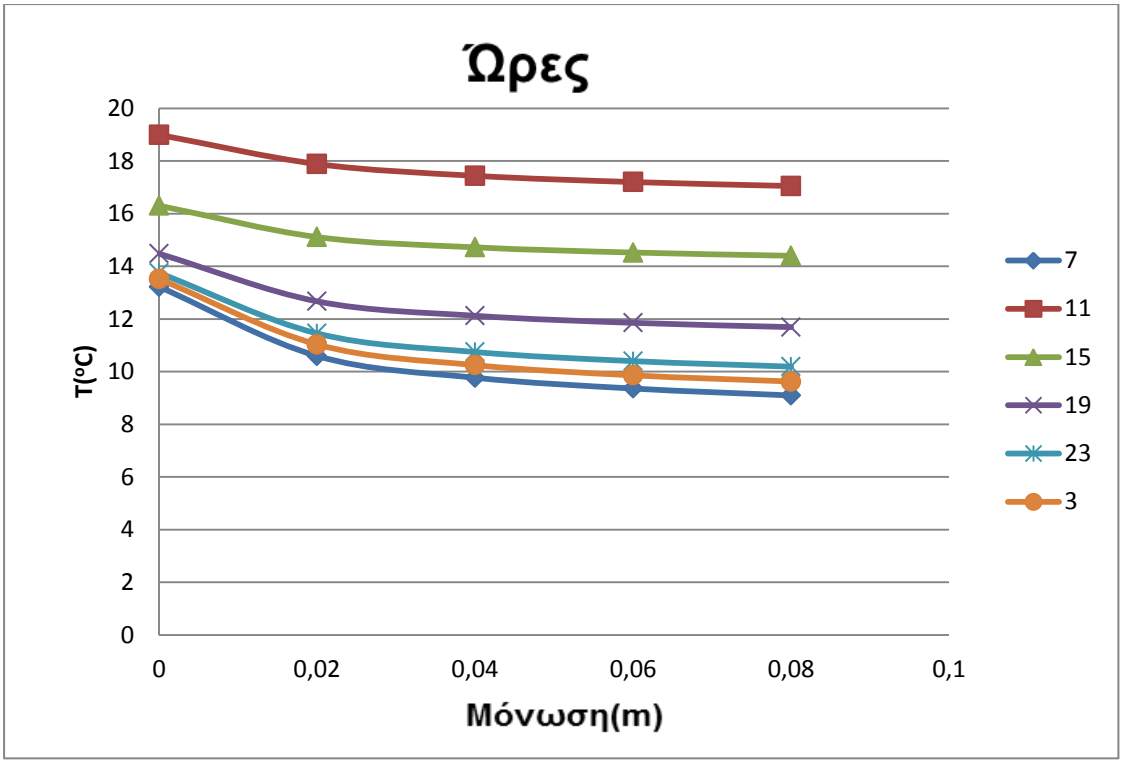
Σχήμα 7.1.1.89: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



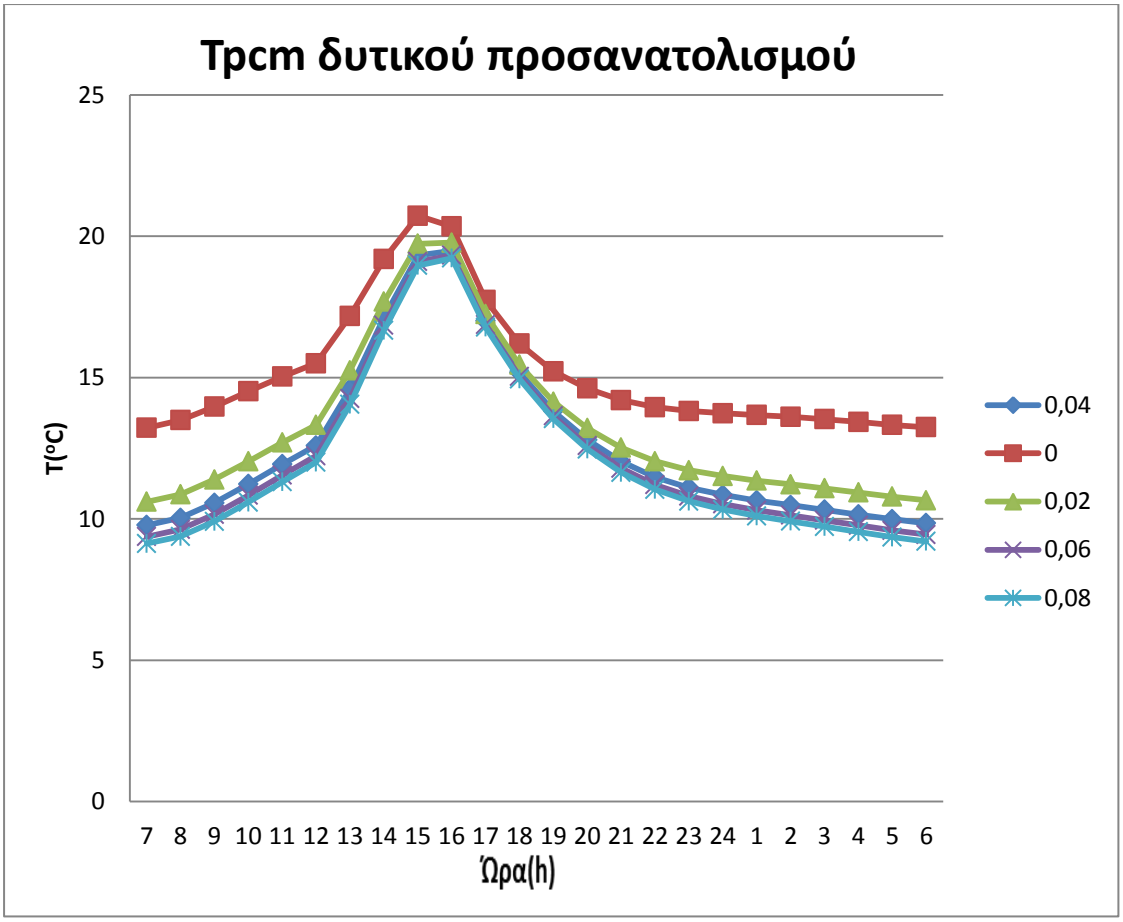
Σχήμα 7.1.1.90: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



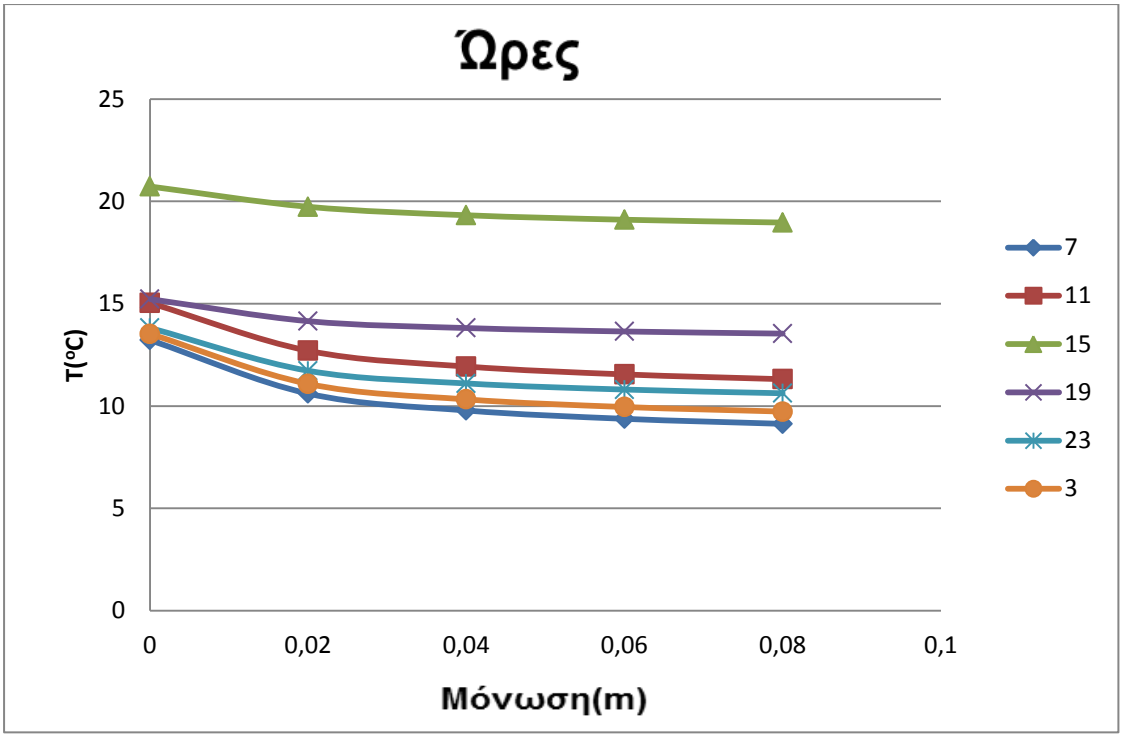
Σχήμα 7.1.1.91: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



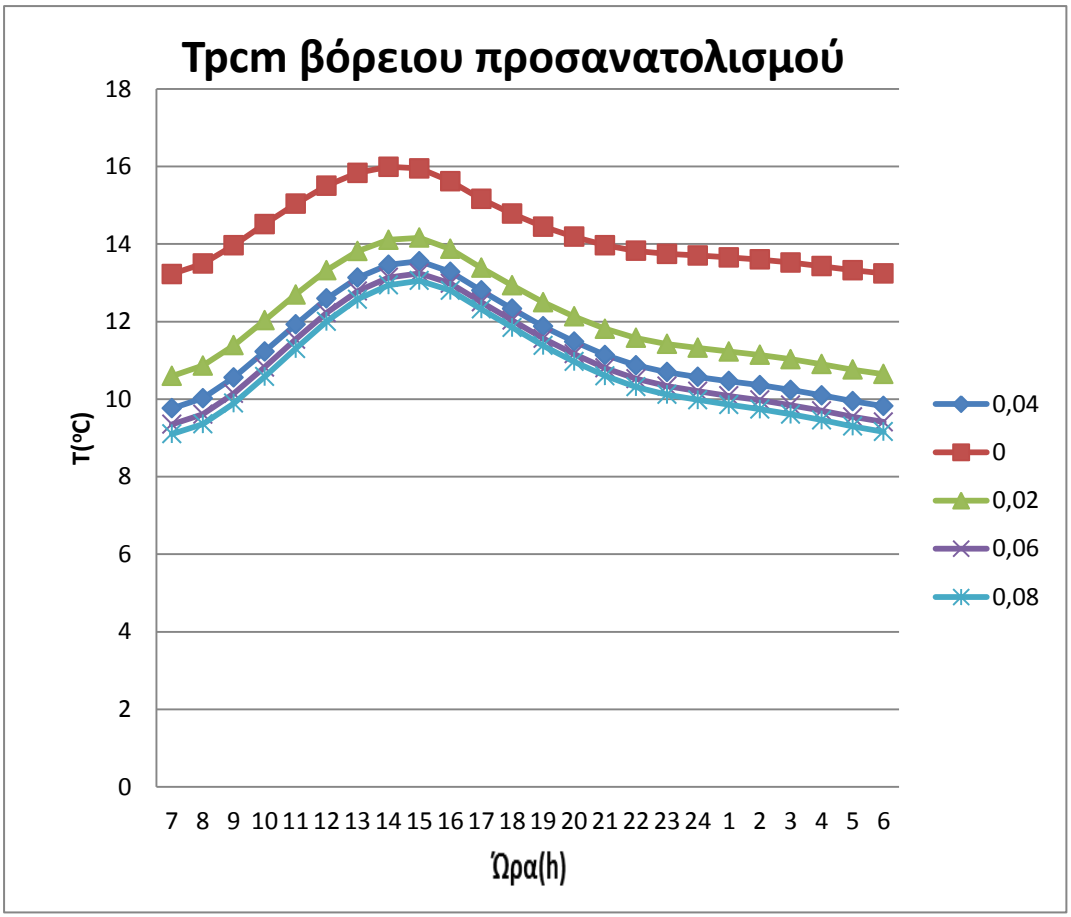
Σχήμα 7.1.1.92: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



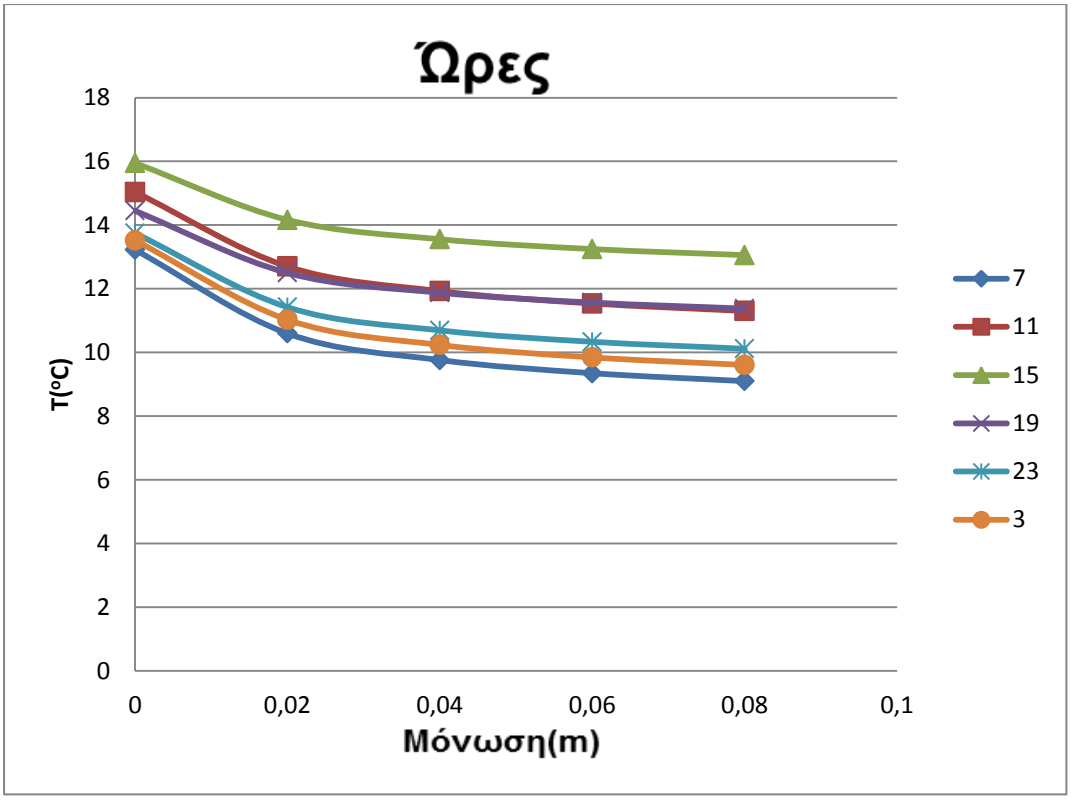
Σχήμα 7.1.1.93: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.94: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.95: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.1.1.96: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού

7.1.1.1 *Χειμερινοί μήνες*

Για τον μήνα Ιανουάριο, όπως προκύπτει από τα σχήματα 7.1.1.1 και 7.1.1.2, παρατηρούμε ότι κατά κύριο λόγο στο τοίχο με **νότιο προσανατολισμό** αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης και κατά συνέπεια το PCM καλύπτει μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος της αλλαγής φάσης. Αναλυτικά, όταν το PCM εφαρμόζεται σε τοίχο νότιου προσανατολισμού παρατηρούμε ότι όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται κατα τη διάρκεια της νύχτας επειδή μεταφέρεται θερμότητα από το δωμάτιο στον τοίχο με συναγωγή ενώ κατά τη διάρκρεια της μέρας παρατηρείται πτώση στη θερμοκρασία του PCM διότι το PCM δίνει στο δωμάτιο τη θερμότητα που έχει αποθηκεύσει από τη νύχτα. Αύτό φαίνεται ξεκάθαρα και από το σχήμα 7.1.1.2. Ανάλογα είναι τα συμπεράσματά μας και για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο και Απρίλιο όπως μπορούμε να διακρίνουμε από τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Όταν το PCM εφαρμόζεται σε τοίχο **ανατολικού προσανατολισμού**, το μήνα Ιανουάριο, παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του παρουσιάζει αύξηση τις πρωινές ώρες και αυτό συμβαίνει επειδή η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλότερη το πρωί. Επιπλέον παρατηρούμε ότι όσο

αυξάνεται το πάχος της μόνωσης η θερμοκρασία του PCM μειώνεται, όπως φαίνεται και από το σχήμα 7.1.1.3, επειδή η μόνωση εμποδίζει τη μεταφορά θερμότητας από το δωμάτιο στον τοίχο. Παρόμοια είναι τα συμπεράσματά μας για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο.

Αντίστοιχα σε τοίχο **δυτικού προσανατολισμού** η θερμοκρασία του PCM, το μήνα Ιανουάριο, είναι υψηλότερη τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες και φυσικά όπως και πριν όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης η θερμοκρασία του PCM μειώνεται. Ανάλογα είναι τα συμπεράσματά μας και για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Φεβρουάριο όπως παρατηρούμε από τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Τέλος, σε τοίχο **βόρειου προσανατολισμού** το θερμοκρασιακό εύρος, για τον Ιανουάριο, είναι αρκετά μικρό με μια μικρή άνοδο της θερμοκρασίας του PCM τις μεσημεριανές ώρες. Και σε αυτή την περίπτωση όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης η θερμοκρασία του PCM μειώνεται. Παρόμοιες είναι οι παρατηρήσεις μας για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο.

7.1.1.2 *Φθινοπωρινοί-Ανοιξιάτικοι μήνες*

Τους μήνες Μάιο και Οκτώβριο η εσωτερική θερμόκρασία δωματίου αυξήθηκε στους 22°C. Για τον τοίχο **νότιου προσανατολισμού** ισχύει ότι όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται παρατηρείται μια μικρή πτώση της θερμοκρασίας του PCM κατα τη διάρκεια της νύχτας επειδή μεταφέρεται θερμότητα στο δωμάτιο ενώ κατά τις μεσημεριανές ώρες υπάρχει μια οριακή αύξηση στη θερμοκρασία του PCM διότι το PCM παίρνει θερμότητα από το δωμάτιο, κάτι που φαίνεται και από τα σχήματα 7.1.1.33 και 7.1.1.73 Μια επιπλέον παρατήρηση είναι ότι το θερμοκρασιακό εύρος κατά τη διάρκεια της μέρας είναι μικρό 20-26°C για τα διάφορα πάχη της μόνωσης.

Όταν το PCM είναι τοποθετημένο σε τοίχο **ανατολικού προσανατολισμού** για τον Σεπτέμβριο το θερμοκρασιακό εύρος κατά τη διάρκεια της μέρας είναι μικρό 25,5-27,5^{o}C για τα διάφορα πάχη της μόνωσης και η θερμοκρασία παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές τις μεσημεριανές ώρες της ημέρας. Η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης. Εν συνεχεία, για τον μήνα Οκτώβριο παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια του 24ωρου υπάρχει μια σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας του PCM όσο μειώνεται το πάχος της μόνωσης και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μεταφέρεται θερμότητα από το PCM στο δωμάτιο με εξαίρεση τις πολύ πρωινές ώρες που υπάρχει μια μικρή άνοδος στη θερμοκρασία. Αυτό φαίνεται και από τα διαγράμματα 7.1.1.75 και 7.1.1.76. Όσον αφορά τον μήνα Απρίλιο, είναι εμφανές από τα σχήματα 7.1.1.27 και 7.1.1.28 ότι το PCM παρουσιάζει

μέγιστη θερμοκρασία τις πρωινές- μεσημεριανές ώρες αφού η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο ανατολικού προσανατολισμού είναι υψηλότερη εκείνες τις ώρες της ημέρας. Επιπλέον, όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται τόσο η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται οριακά κατά της διάρκεια της νύχτας ενώ υπάρχει μια μικρή μείωση της θερμοκρασίας τις απογευματινές ώρες. Από τα σχήματα 7.1.1.35 και 7.1.1.36 προκύπτει ότι για το μήνα Μάιο η θερμοκρασία του PCM μειώνεται όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται κυρίως τις βραδινές ώρες επειδή μεταφέρεται θερμότητα από το PCM στο δωμάτιο. Επιπρόσθετα, το θερμοκρασιακό εύρος κατά τη διάρκεια της μέρας είναι μικρό 22-26°C για τα διάφορα πάχη της μόνωσης και η θερμοκρασία παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές τις πρωινές- μεσημεριανές ώρες της ημέρας.

Για τον μήνα Μάρτιο, όπως προκύπτει από τα σχήματα 7.1.1.21 και 7.1.1.22, παρατηρούμε ότι όταν το PCM τοποθετείται σε τοίχο **δυτικού προσανατολισμού** όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται τις βραδινές και πρωινές ώρες επειδή μεταφέρεται θερμότητα από το δωμάτιο στον τοίχο με συναγωγή ενώ κατά τις μεσημεριανές και ασπογευματινές παρατηρείται πτώση στη θερμοκρασία του PCM διότι το PCM δίνει στο δωμάτιο τη θερμότητα που έχει αποθηκεύσει από το πρωί. Ανάλογα είναι τα συμπεράσματά μας και για τους μήνες Απρίλιο και Οκτώβριο όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από τα αντίστοιχα διαγράμματα. Για τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο το θερμοκρασιακό εύρος κατά τη διάρκεια της μέρας είναι μικρό για τα διάφορα πάχη της μόνωσης και η θερμοκρασία παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές τις απογευματινές ώρες. Η θερμοκρασία του PCM μειώνεται όσο μειώνεται το πάχος της μόνωσης κάτι που οφείλεται όπως έχουμε εξηγήσει και παραπάνω στη θερμότητα που συναλλάσσεται μεταξύ του τοίχου και του αέρα του δωματίου με συναγωγή.

Τέλος, σε τοίχο **βόρειου προσανατολισμού** το θερμοκρασιακό εύρος για τους μήνες Οκτώβριο και Απρίλιο είναι αρκετά μικρό με μια μικρή άνοδο της θερμοκρασίας του PCM τις μεσημεριανές ώρες ενώ ταυτόχρονα όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται η θερμοκρασία του PCM μειώνεται κυρίως τις βραδινές και πρωινές ώρες. Το θερμοκρασιακό εύρος γίνεται ακόμα μικρότερο 20-24°C για το Μάιο με μια μικρή πτώση της θερμοκρασίας του PCM κατά τη διάρκεια της νύχτας. Επιπρόσθετα, για το μήνα Σεπτρέμβριο παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του PCM τις μεσημεριανές ώρες κάτι που οφείλεται στην αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας εκείνες τις ώρες της ημέρας ενώ παράλληλα είναι σαφές από τα διαγράματα 7.1.1.71 και 7.1.1.72 ότι η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται όσο μειώνεται το πάχος της μόνωσης.

7.1.1.3 *Καλοκαιρινοί μήνες*

Για τους καλοκαιρινούς μήνες και το Σεπτέμβριο η εσωτερική θερμόκρασία δωματίου αυξήθηκε στους 26°C. Στο τοίχο **νότιου προσανατολισμού**, όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται τόσο η θερμοκρασία του PCM μειώνεται καθόλη τη διάρκεια της μέρας καθώς μεταφέρεται θερμότητα από το PCM στο δωμάτιο.

Παράλληλα όταν το PCM τοποθετείται σε τοίχο **ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού** η θερμοκρασία του PCM είναι υψηλότερη τις μεσημεριανές και τις απογευματινές ώρες αντίστοιχα και φυσικά όπως και πριν όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται κυρίως σε αυτές τις ώρες.

Όσον αφορά το τοίχο **βόρειου προσανατολισμού** το θερμοκρασιακό εύρος είναι αρκετά μικρό με μια μικρή άνοδο της θερμοκρασίας του PCM τις μεσημεριανές ώρες. Και σε αυτή τη περίπτωση όσο μειώνεται το πάχος της μόνωσης η θερμοκρασία του PCM μειώνεται.

7.1.2 <u>Καμπύλες Cp,eff-T</u>

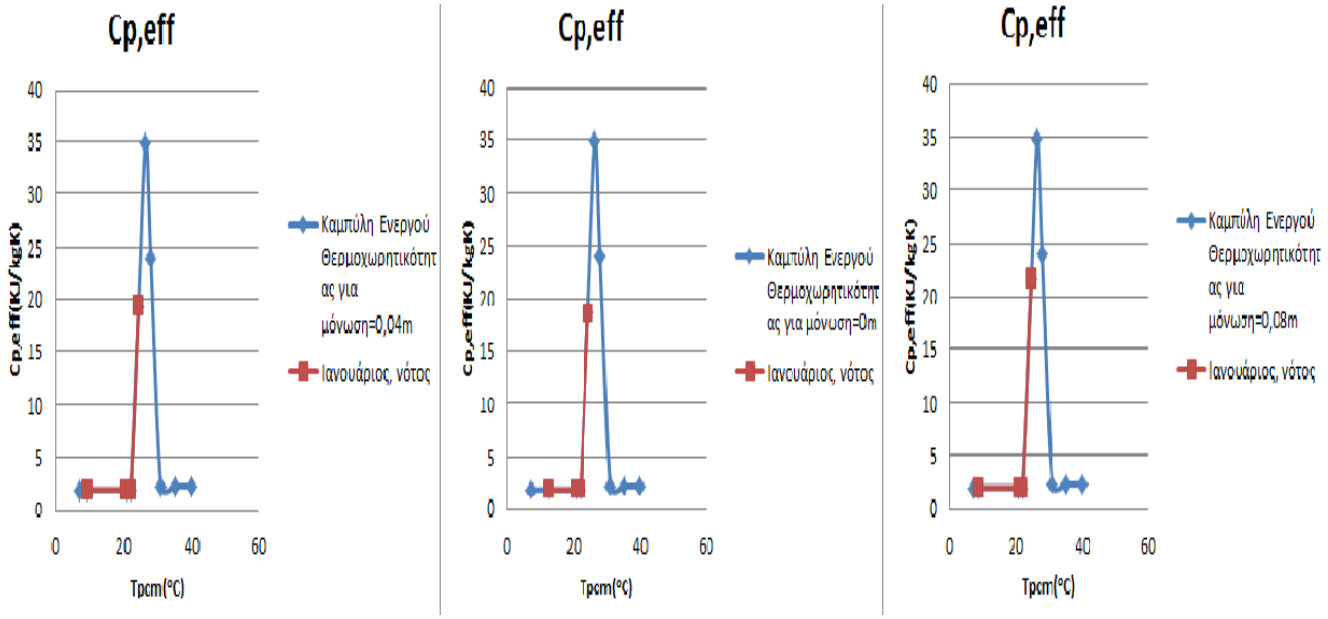
Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι το PCM που χρησιμοποιούμε στην εφαρμογή μας έχει καλύτερη απόδοση και καλύπτει μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης κυρίως όταν τοποθετείται σε νότιο προσανατολισμό για τους **χειμερινούς μήνες**. Επιπλέον, για το νότιο προσανατολισμό, παρατηρείται ότι όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται αξιοποιείται όλο και περισσότερο η ικανότητα του PCM να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση καθώς υπάρχουν περισσότερες τιμές της θερμοκρασίας στην διφασική περιοχή και γενικά οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες κατά τη διάρκεια της μέρας. Αντίθετα όταν το PCM τοποθετείται στον ανατολικό και βόρειο προσανατολισμό η καμπύλη Cp,eff-T καλύπτει μόνο την περιοχή της στερεάς φάσης ενώ όσο μειώνεται το πάχος της μόνωσης τείνει να προσεγγίσει και τη διφασική περιοχή. Στο δυτικό προσανατολισμό η καμπύλη Cp,eff-T καλύπτει ένα μικρό μέρος της διφασικής περιοχής τους μήνες Φεβρουάριο και Νοέμβριο και παρουσιάζει μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται.

Για τους μήνες Οκτώβριο και Μάιο όταν το PCM τοποθετείται σε τοίχο νότιου προσανατολισμού καλύπτει μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης για περισσότερες ώρες μες την ημέρα όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται. Παράλληλα όταν το PCM εφαρμόζεται σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού για τους **φθινοπωρινούς και ανοιξιάτικους μήνες** αξιοποιεί όλο και

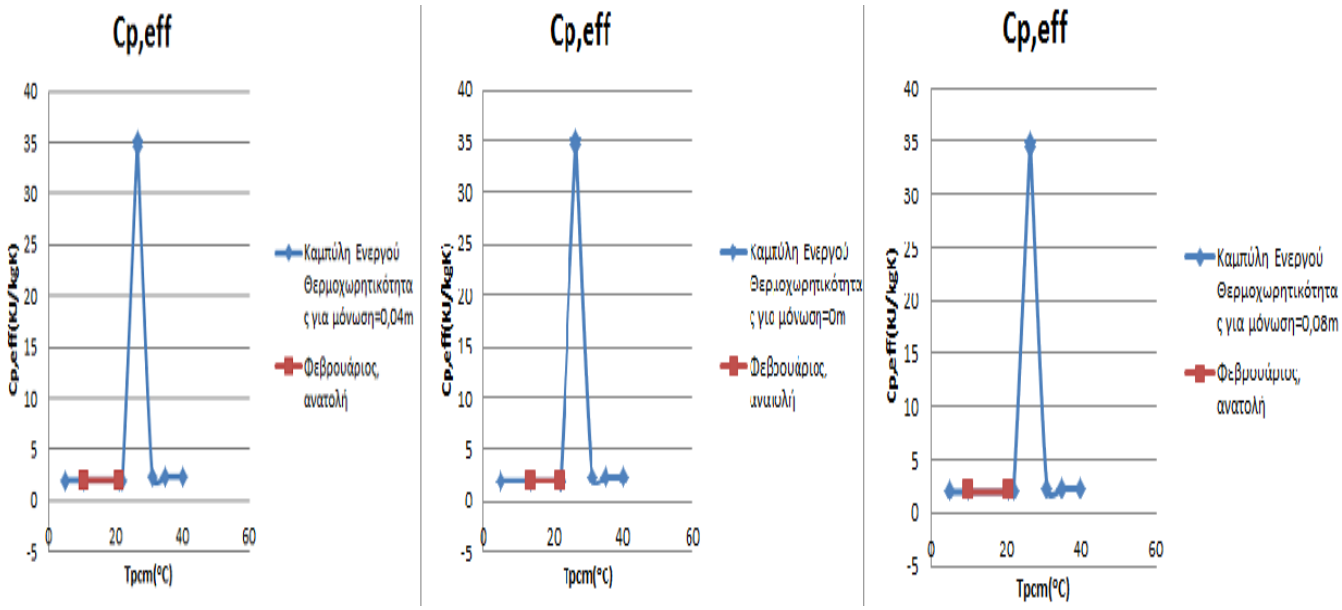
περισσότερο την ικανότητά του να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση καθώς όλο και περισσότερες θερμοκρασίες βρίσκονται στη διφασική περιοχή όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης. Επιπλέον, στο δυτικό προσανατολισμό για τους μήνες Οκτώβριο, Μάρτιο και Απρίλιο η καμπύλη Cp,eff-T καλύπτει ένα μεγάλο μέρος της διφασικής περιοχής όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται ειδικά τις απογευματινές ώρες ενώ αντίστοιχα για τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο η καμπύλη Cp,eff-T καλύπτει μόνο διφασική περιοχή και το θερμοκρασιακό εύρος είναι μεγαλύτερο όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται. Τέλος όταν το PCM τοποθετείται σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού για τους μήνες Σεπτέμβριο, Οκτώβιο και Απρίλιο καλύπτει μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται ενώ αντιθέτως το Μάιο το θερμοκρασιακό εύρος αυξάνεται οριακά όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται. Και σε αυτή την περίπτωση το υλικό μας εμφανίζει χαμηλότερες θερμοκρασίες όταν βρίσκεται σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού ενώ αντιθέτως παρουσιάζει μεγαλύτερες όταν βρίσκεται σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού τους ανοιξιάτικους μήνες. Οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες όταν το PCM τοποθετείται σε τοίχο νότιου προσανατολισμού τους φθινοπωρινούς μήνες.

Επιπρόσθετα συμπεραίνουμε ότι το PCM που χρησιμοποιούμε στην εφαρμογή μας έχει καλύτερη απόδοση και καλύπτει μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης όταν τοποθετείται σε τοίχο δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού από ότι σε νότιου και βόρειου για τους **καλοκαιρινούς μήνες**. Επιπλέον ισχύει ότι όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται αξιοποιείται όλο και περισσότερο η αποθηκευτική ικανότητα του PCM επειδή υπάρχουν περισσότερες τιμές της θερμοκρασίας στην διφασική καθώς και την υγρή περιοχή και γενικά οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η εκμετάλευση μεγαλύτερου μέρους της ενέργειας που μπορεί να προσφέρει.

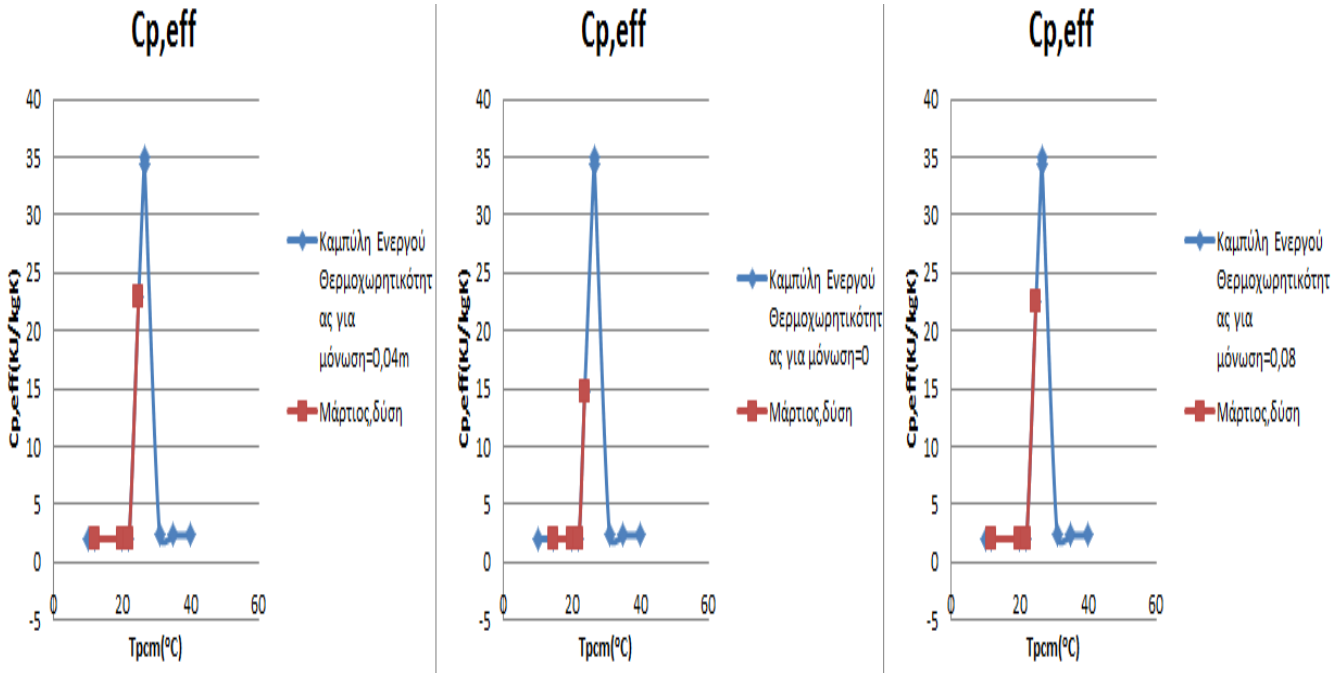
Στη συνέχεια παρουσιάζεται με διαγράμματα η κάλυψη του θερμοκρασιακού εύρους της αλλαγής φάσης του PCM για διάφορους μήνες και προσανατολισμούς.



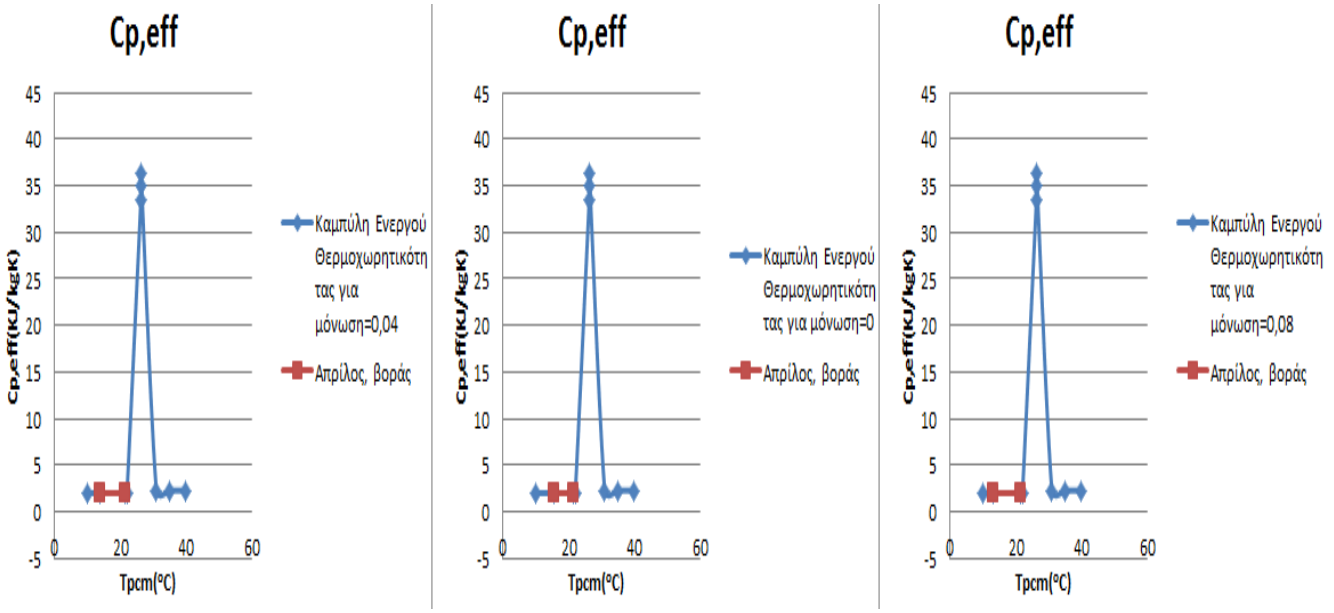
Σχήμα 7.1.2.1: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού



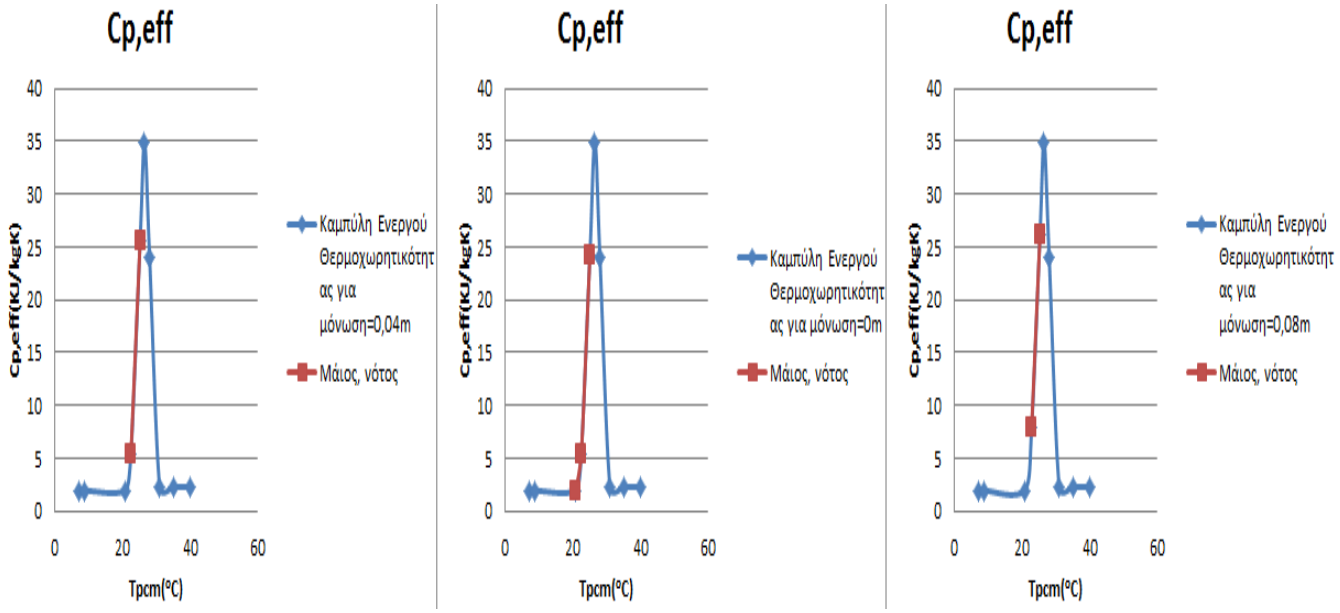
Σχήμα 7.1.2.2: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού



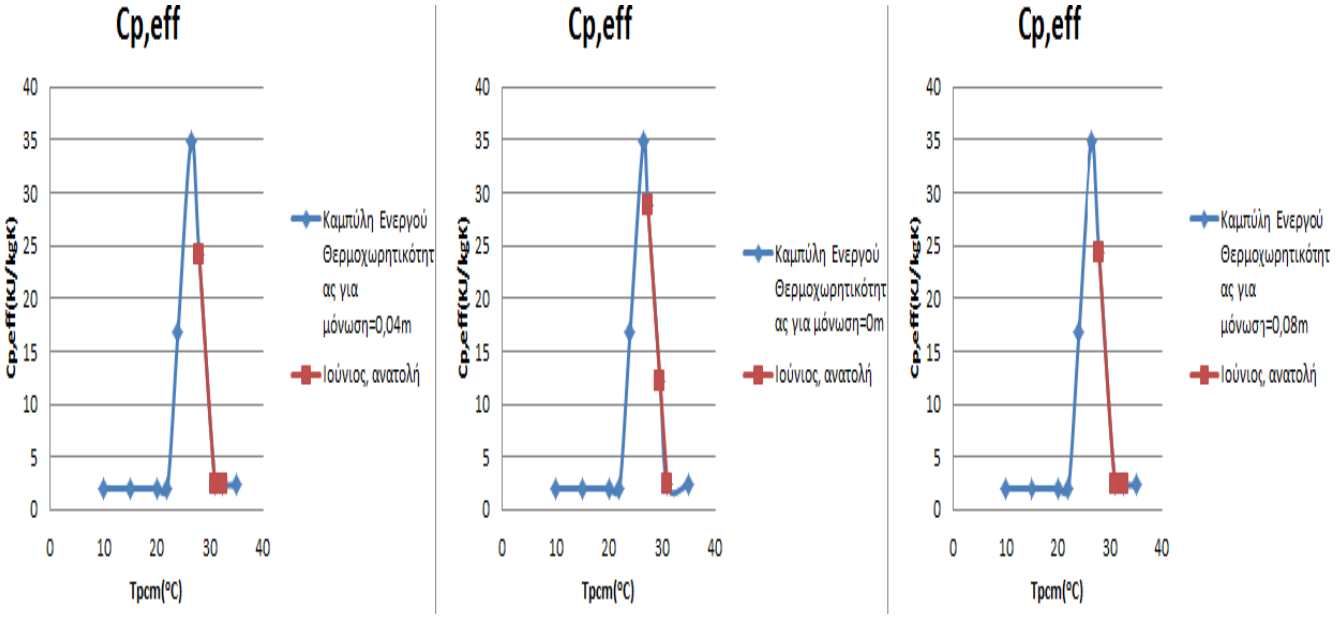
Σχήμα 7.1.2.3: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Μαρτίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού



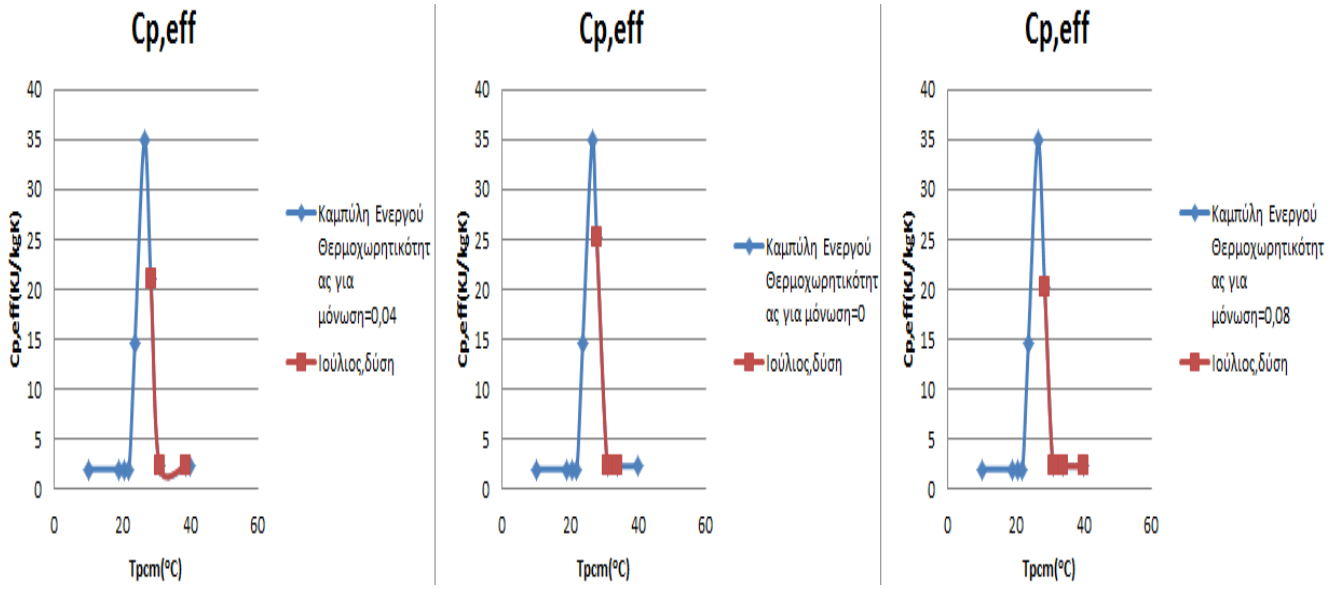
Σχήμα 7.1.2.4: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Απριλίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού



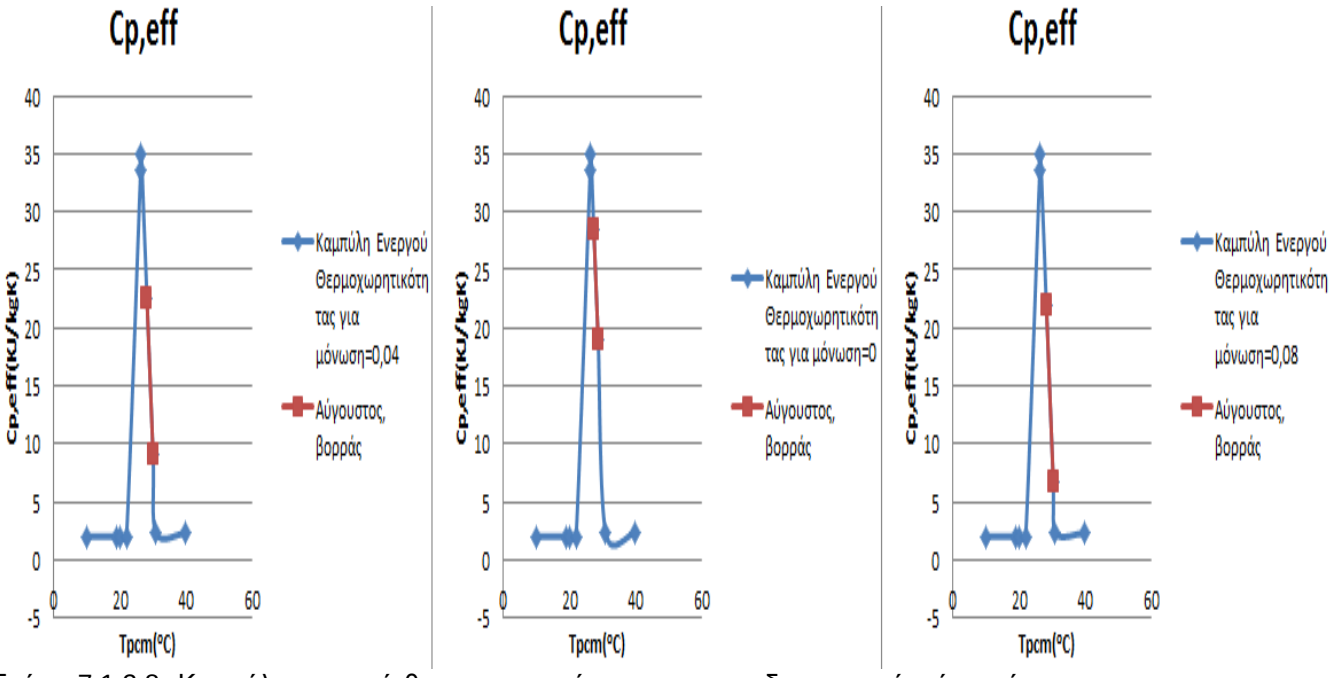
Σχήμα 7.1.2.5: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Μαΐου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού



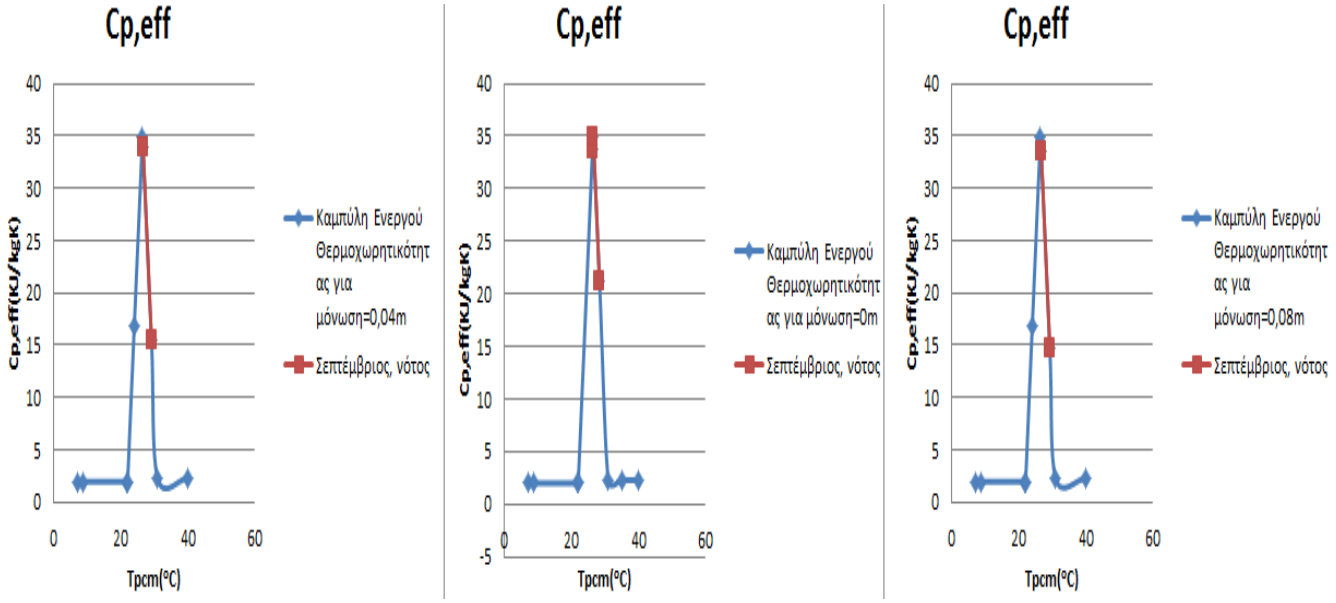
Σχήμα 7.1.2.6: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Ιουνίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού



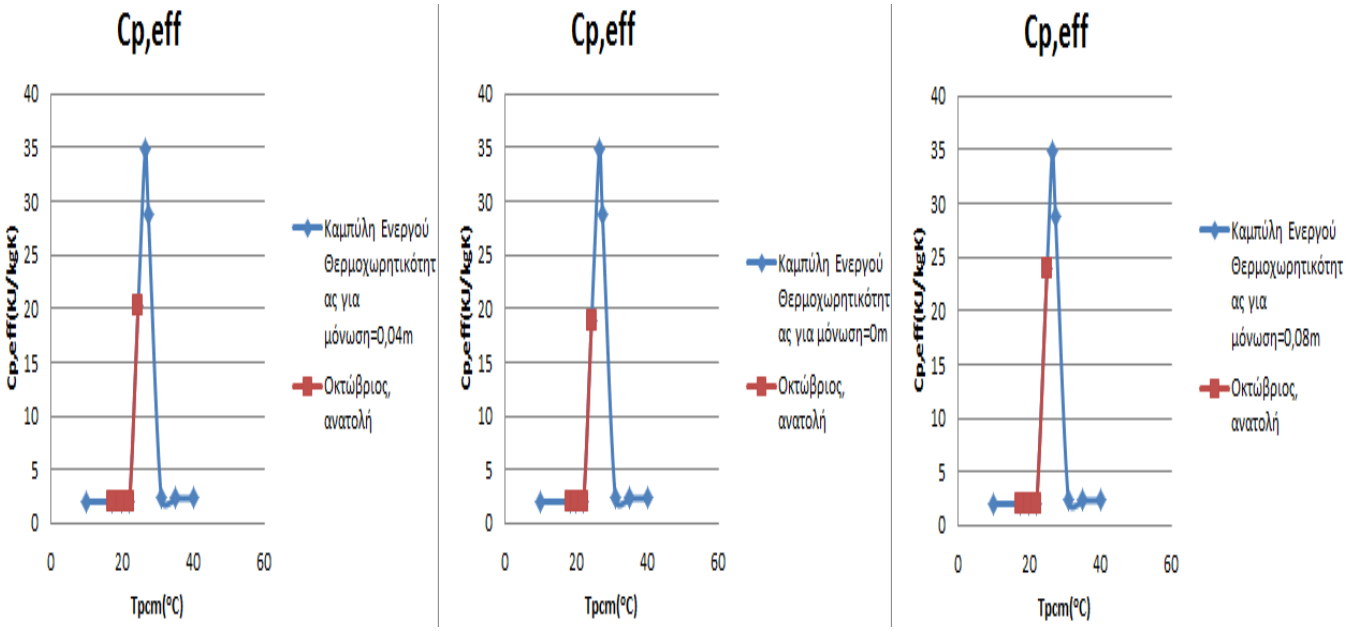
Σχήμα 7.1.2.7: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Ιουλίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού



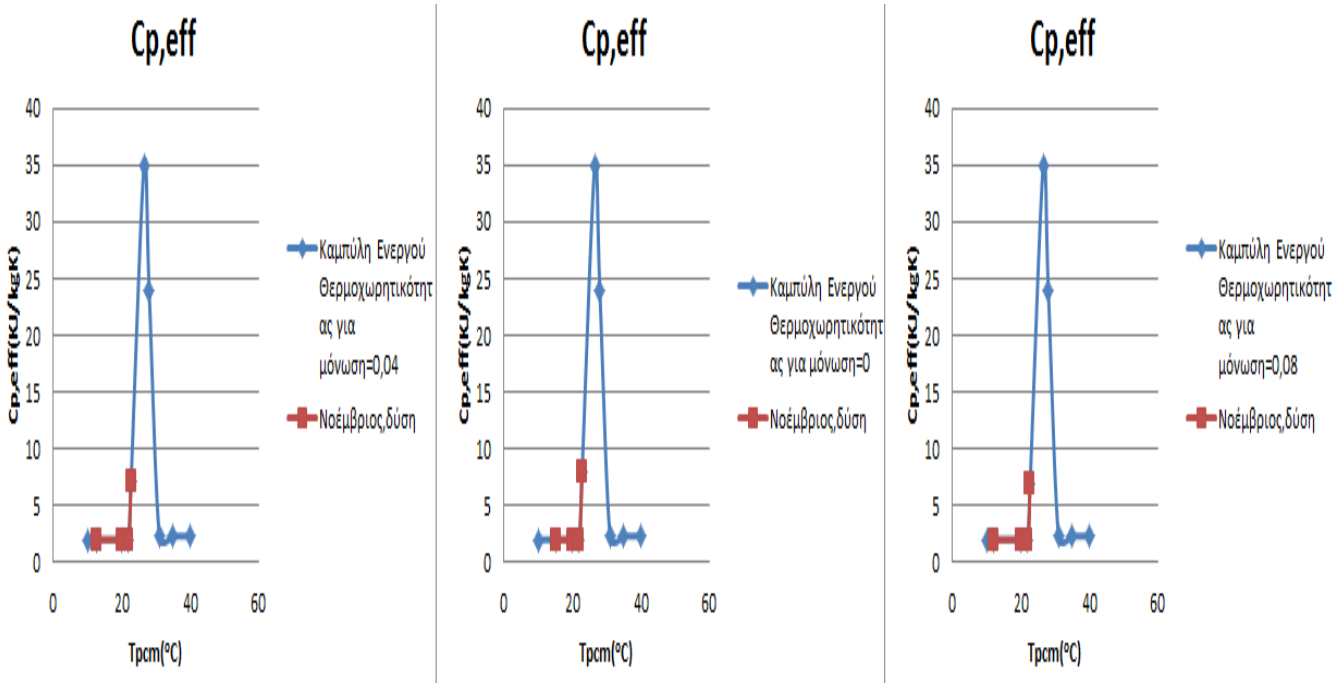
Σχήμα 7.1.2.8: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Αυγούστου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού



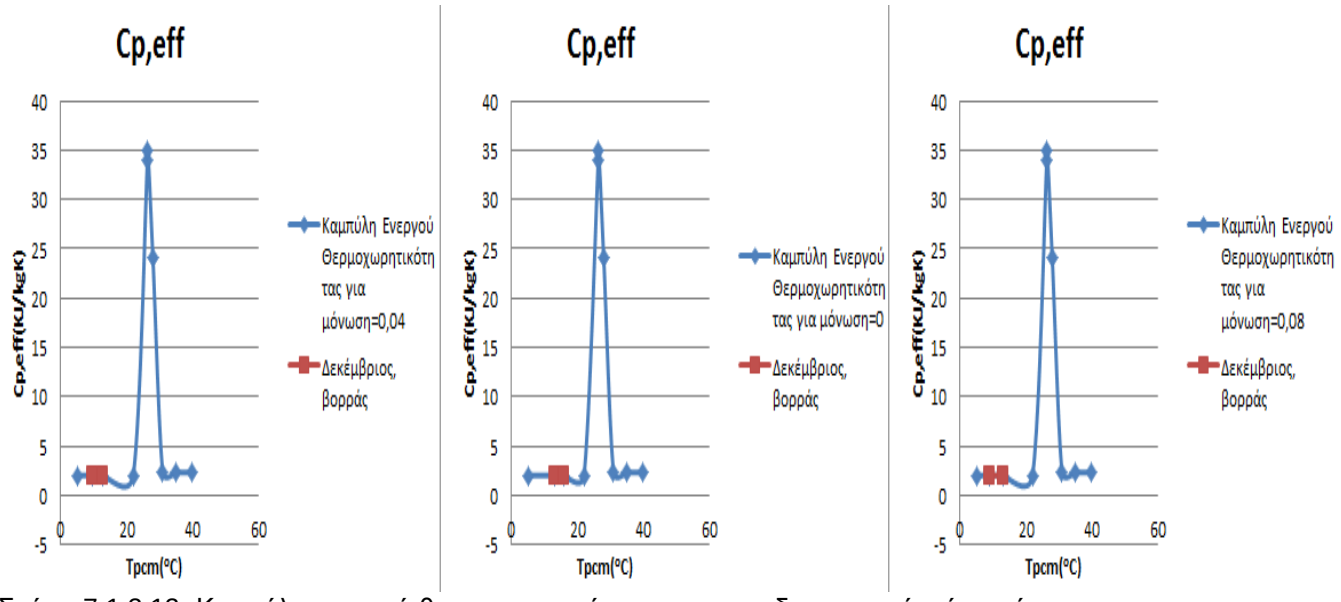
Σχήμα 7.1.2.9: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού



Σχήμα 7.1.2.10: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού



Σχήμα 7.1.2.11: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού

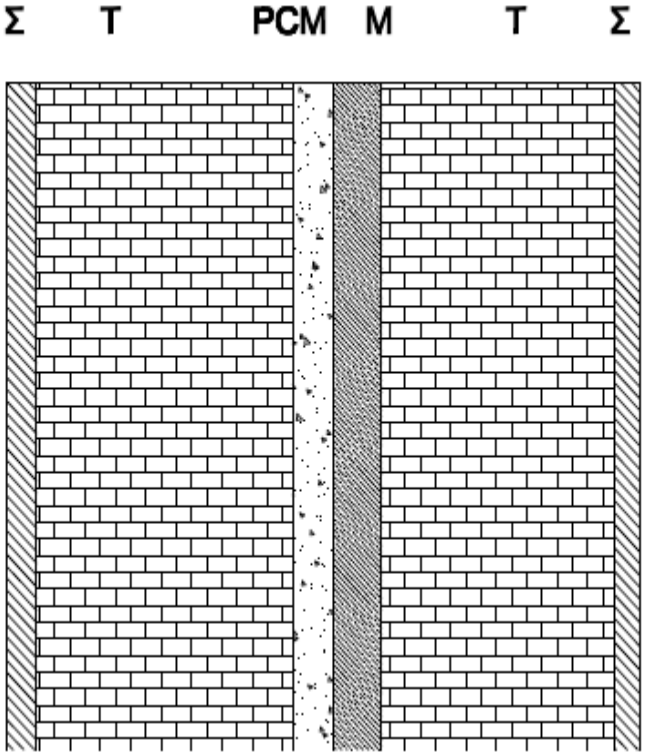


Σχήμα 7.1.2.12: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού

7.2 2η Παραμετρική μελέτη

Στη συγκεκριμένη μελέτη θα εξετασθεί η συμπεριφορά του υλικού αλλαγής φάσης RT27 της Rubitherm όταν αυτό τοποθετηθεί σε εξωτερικό τοίχο με νότιο, ανατολικό, δυτικό και βόρειο προσανατολισμό για την 21η κάθε μήνα του έτους. Η διαδικασία αυτή θα πραγματοποιηθεί για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης 0,04m, 0m, 0,02m, 0,06m και 0,08m.

Η παραμετρική μελέτη θα γίνει πάνω στην προσομοίωση της ηλιακής φόρτισης τοιχοποιίας που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6.1, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχέδιο, όπου αυτή τη φορά το στρώμα του PCM βρίσκεται από την μέσα πλευρά του τοίχου και η μόνωση από έξω.

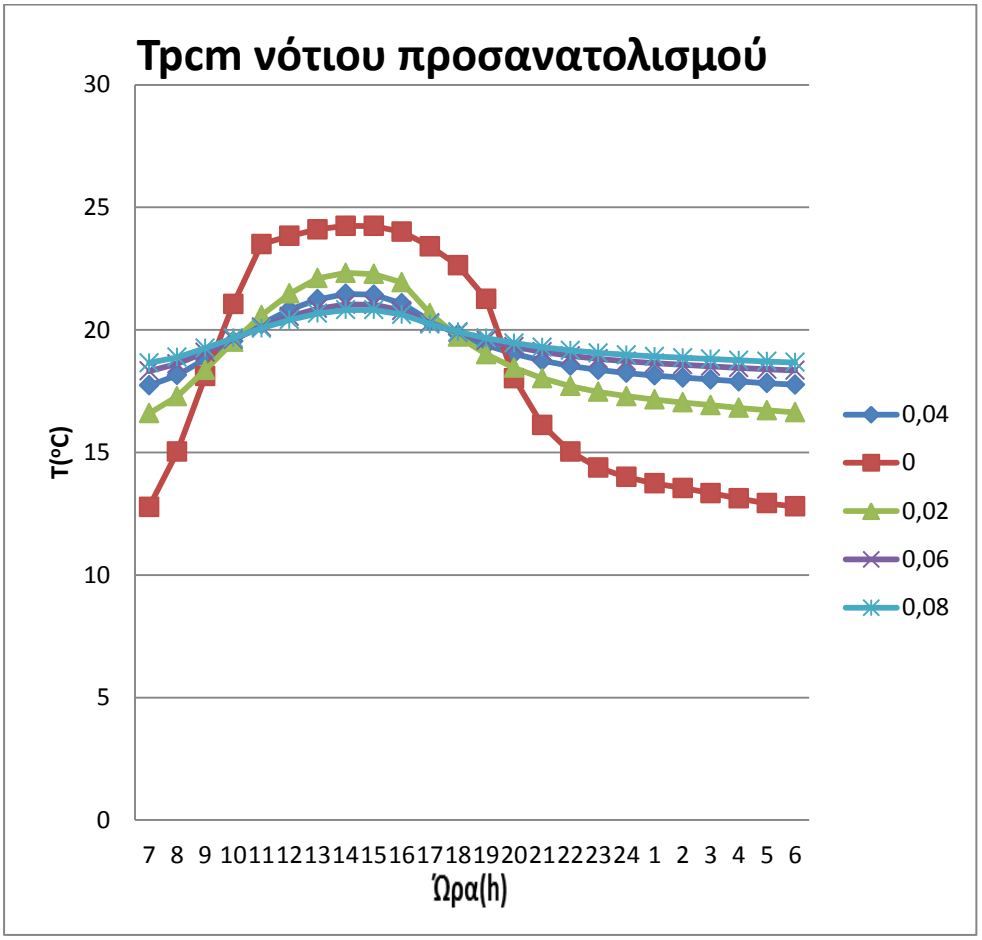


Σχήμα 7.2.1: Γραφική αναπαράσταση της διαστρωμάτωσης του τοίχου για την 2η παραμετρική μελέτη

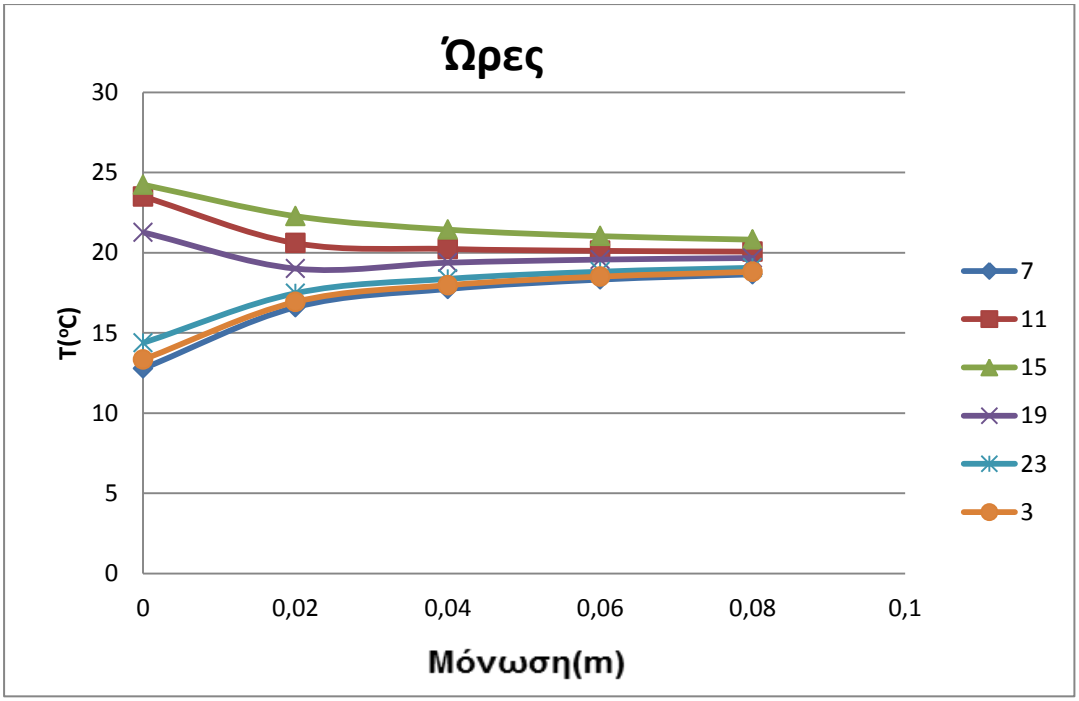
Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες Tpcm(°C)–Ώρες(h) και Tpcm(°C)-Μόνωση(m) προκειμένου να μελετηθεί αναλυτικά η συμπεριφορά του PCM.

7.2.1 Καμπύλες Tpcm(°C)–Ώρες(h) και Tpcm(°C)-Μόνωση(m)

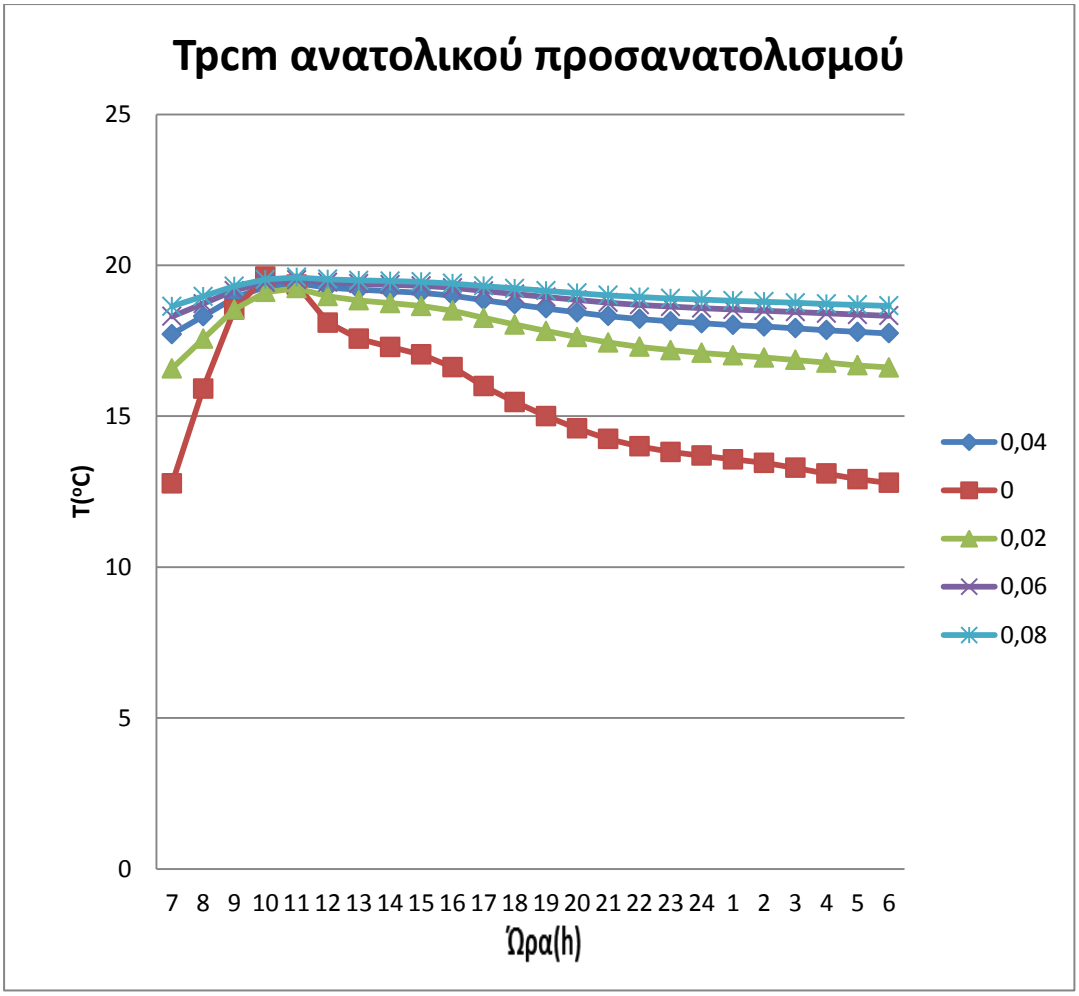
- Για την 21η Ιανουαρίου:



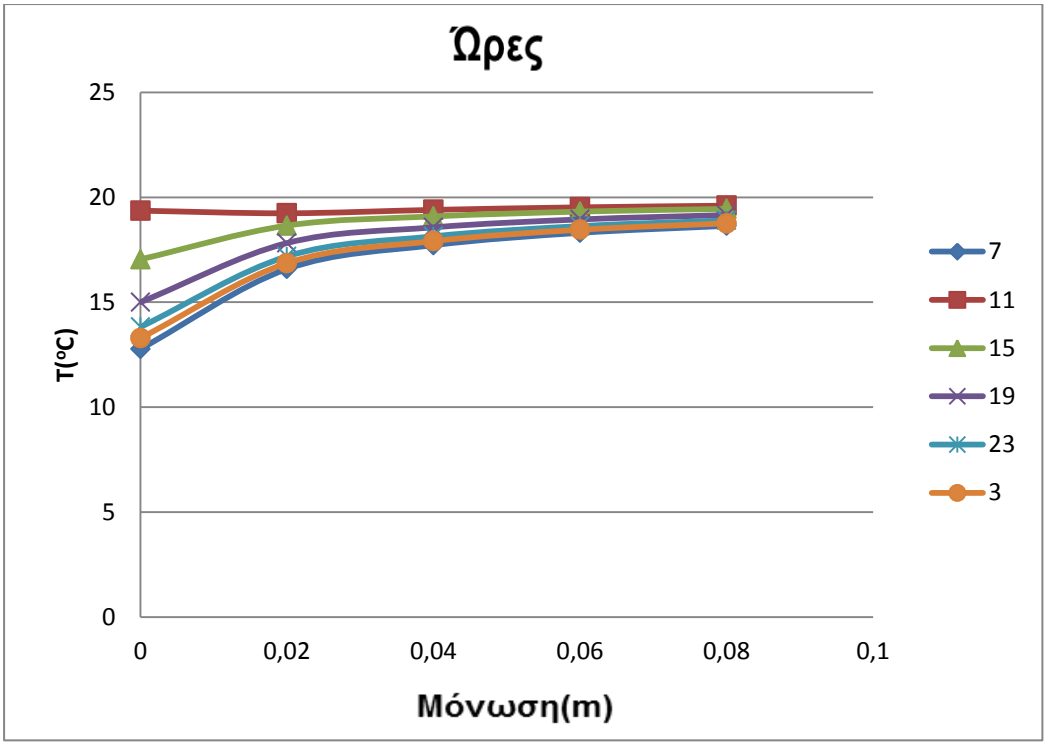
Σχήμα 7.2.1.1: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



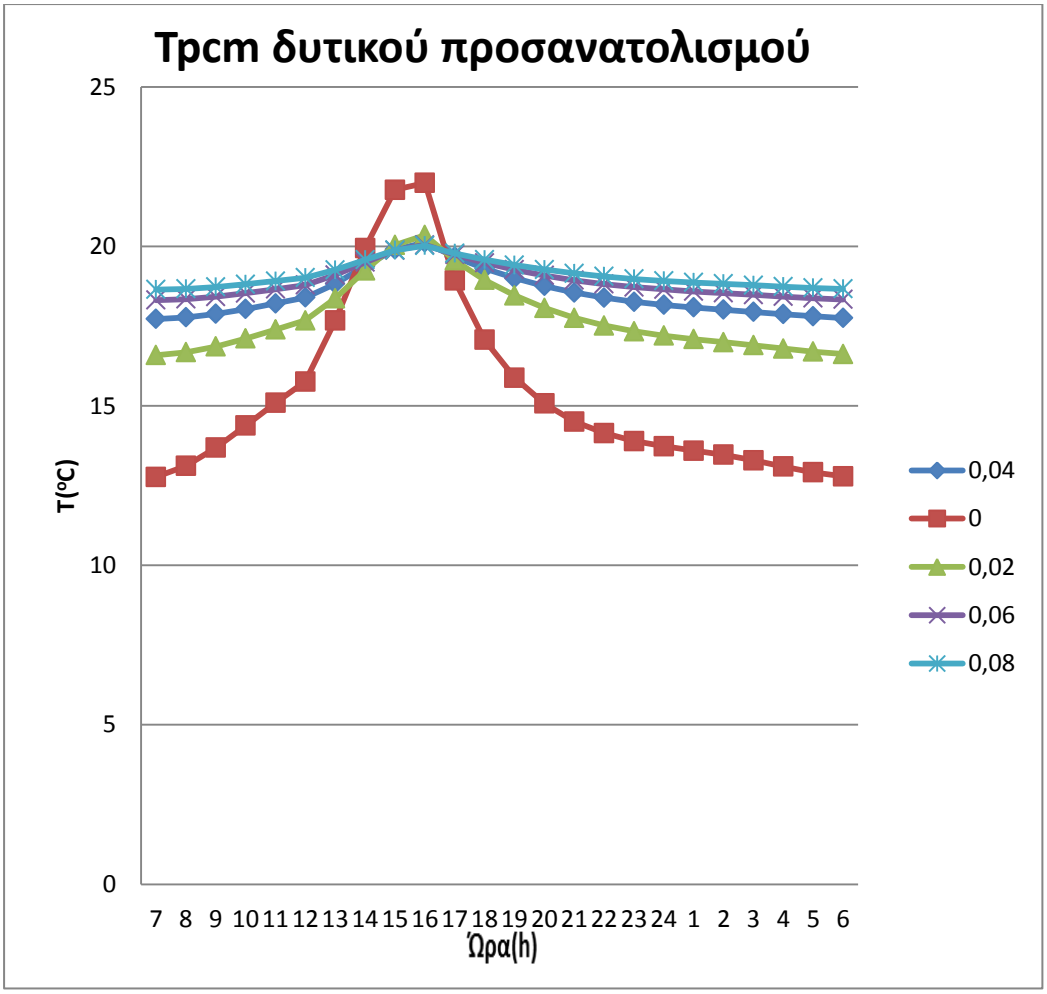
Σχήμα 7.2.1.2: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



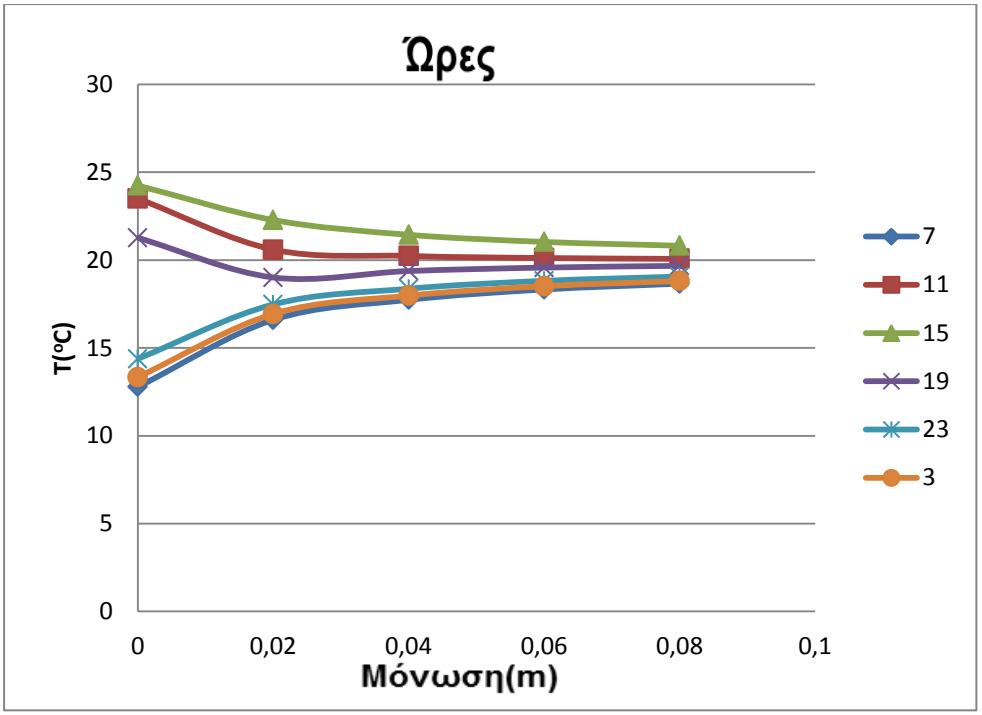
Σχήμα 7.2.1.3: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



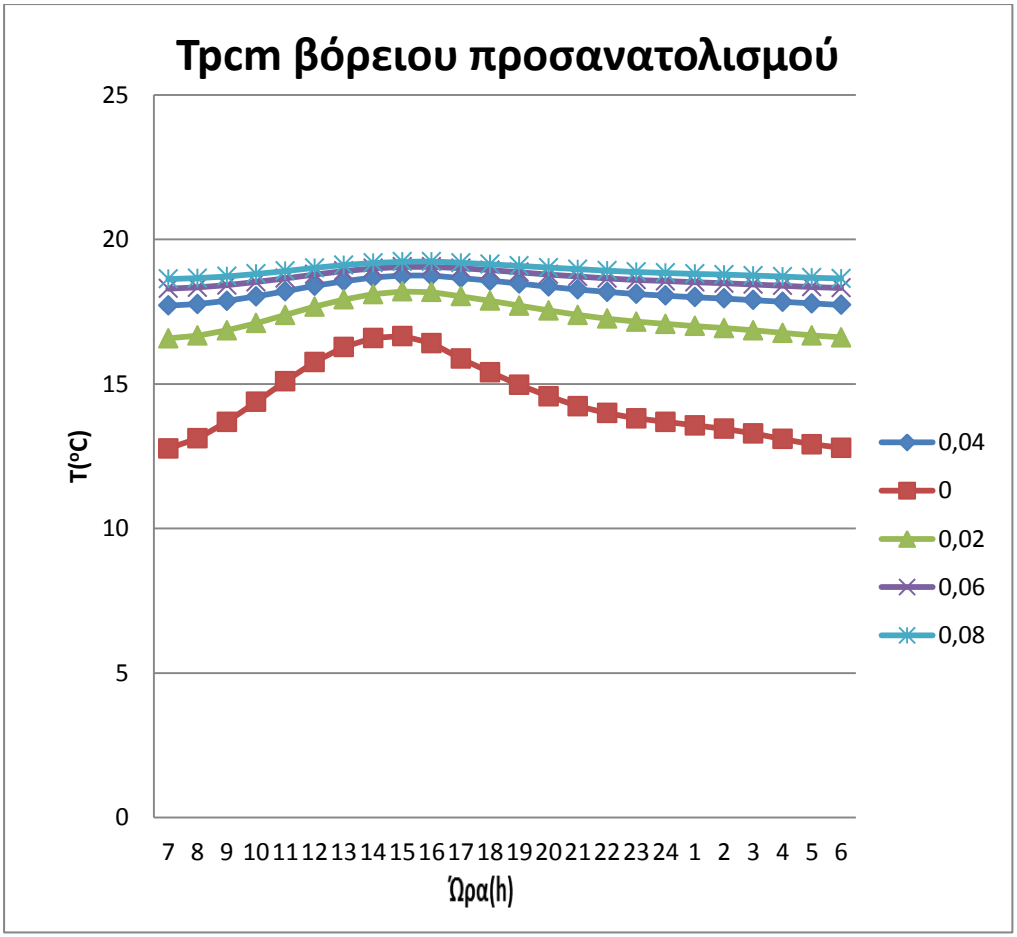
Σχήμα 7.2.1.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



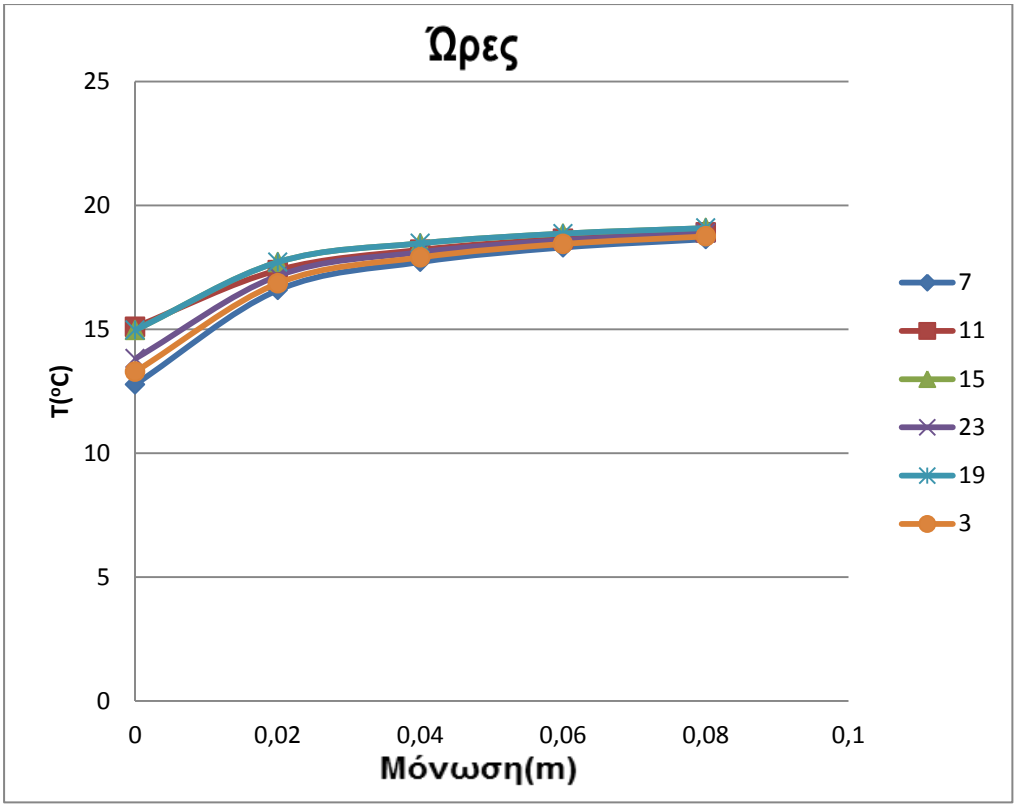
Σχήμα 7.2.1.5: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.6: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21^{η} Ιανουαρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

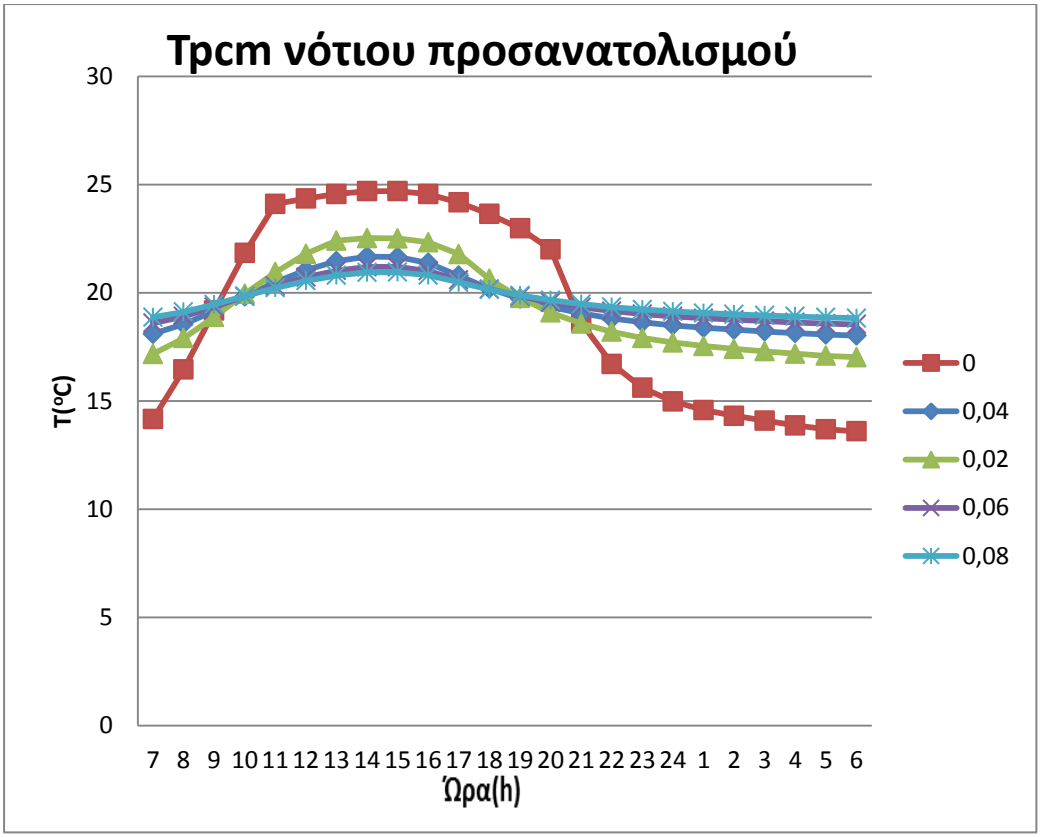


Σχήμα 7.2.1.7: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

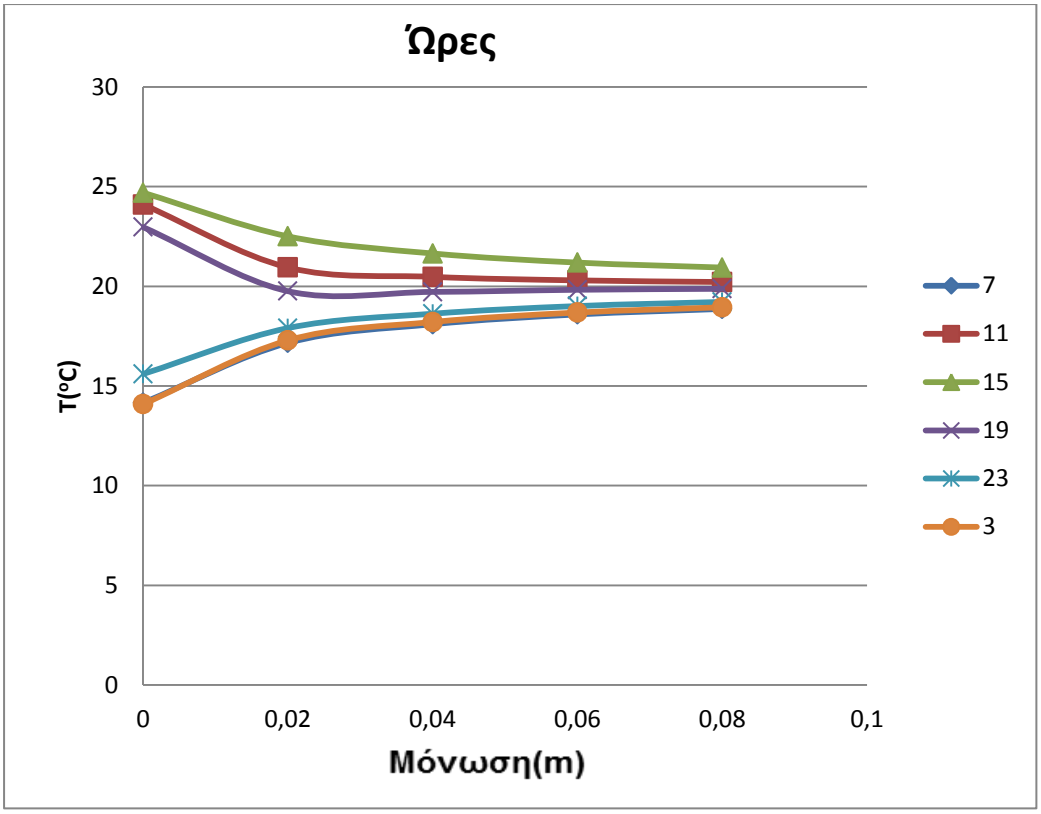


Σχήμα 7.2.1.8: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

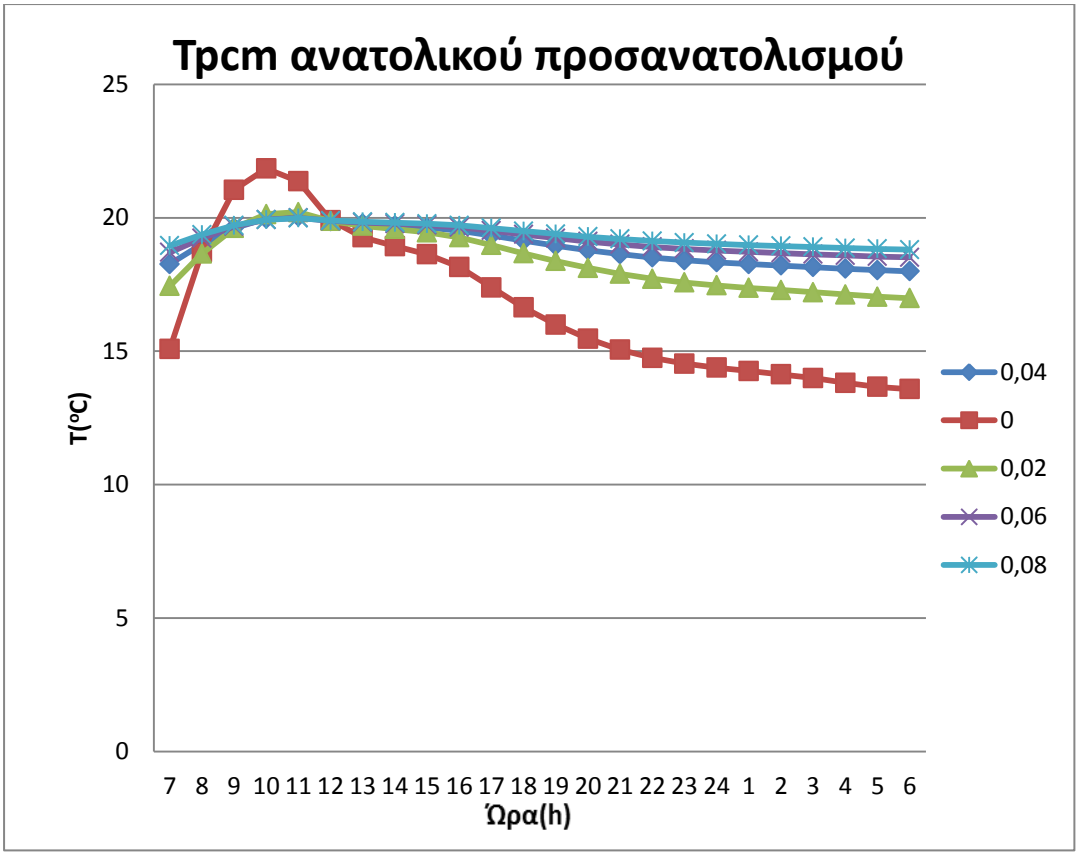
- Για την 21η Φεβρουαρίου:



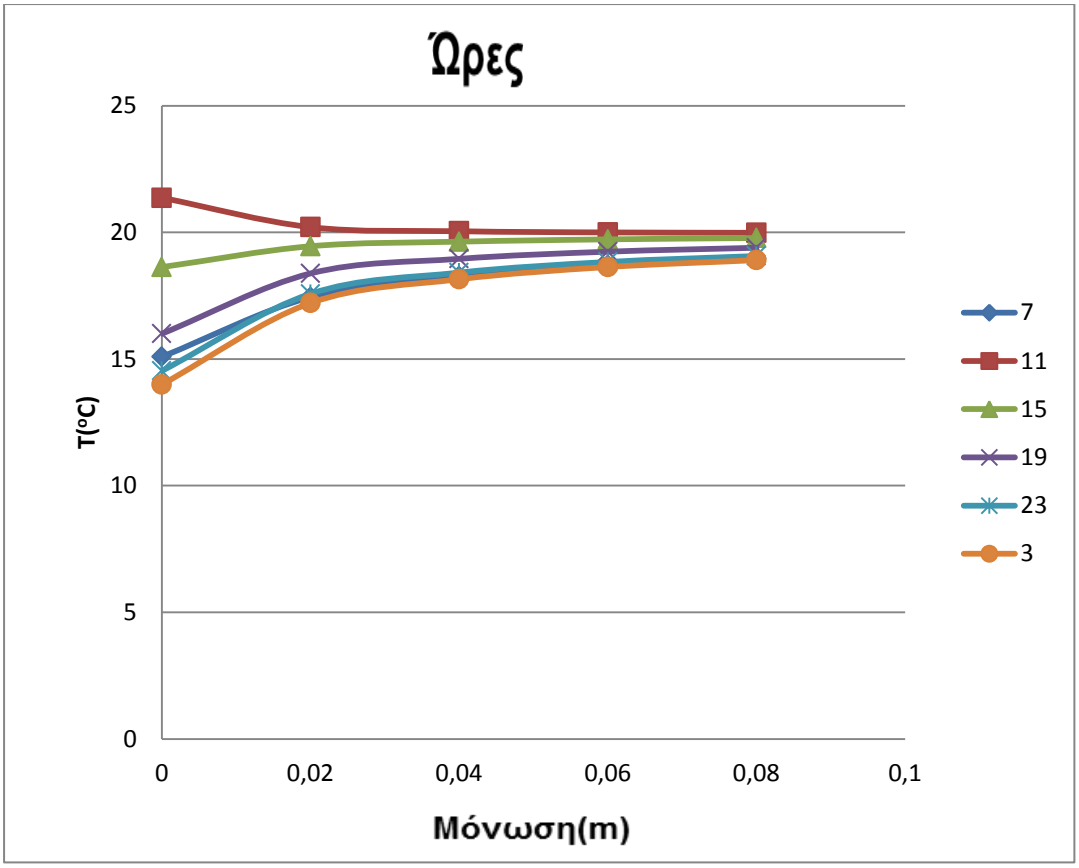
Σχήμα 7.2.1.9: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



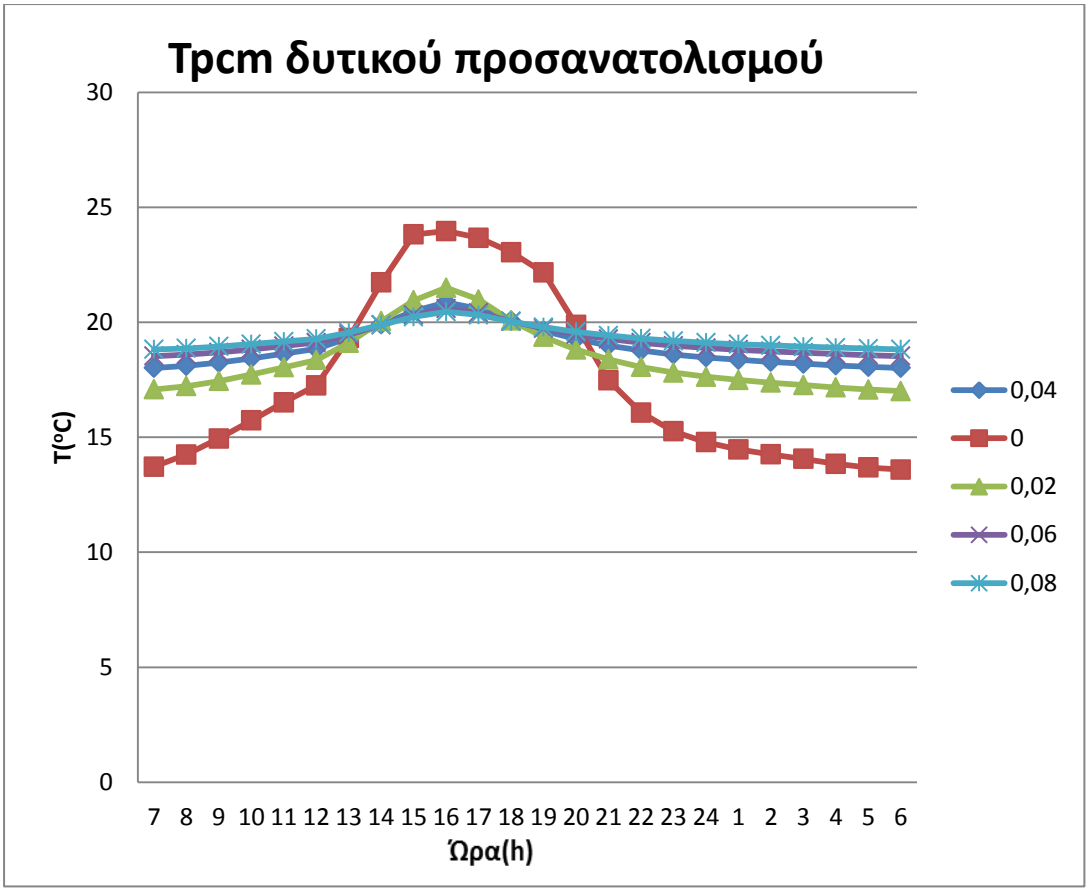
Σχήμα 7.2.1.10: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21^{η} Φεβρουαρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



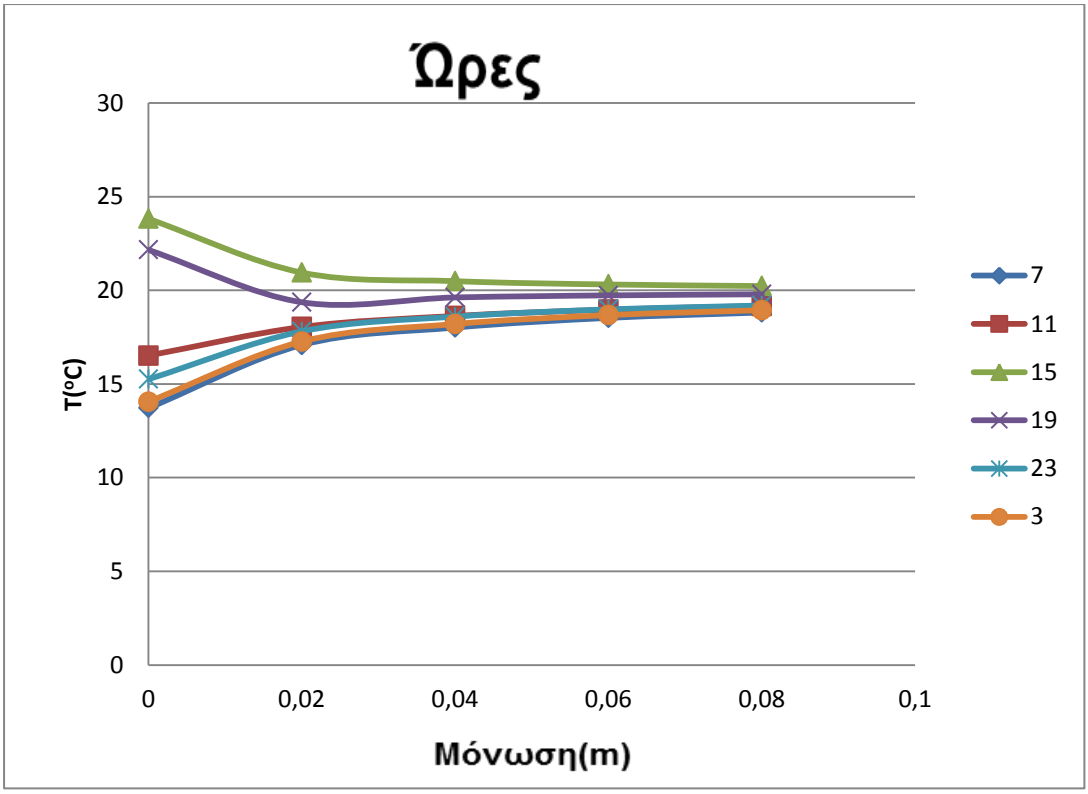
Σχήμα 7.2.1.11: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



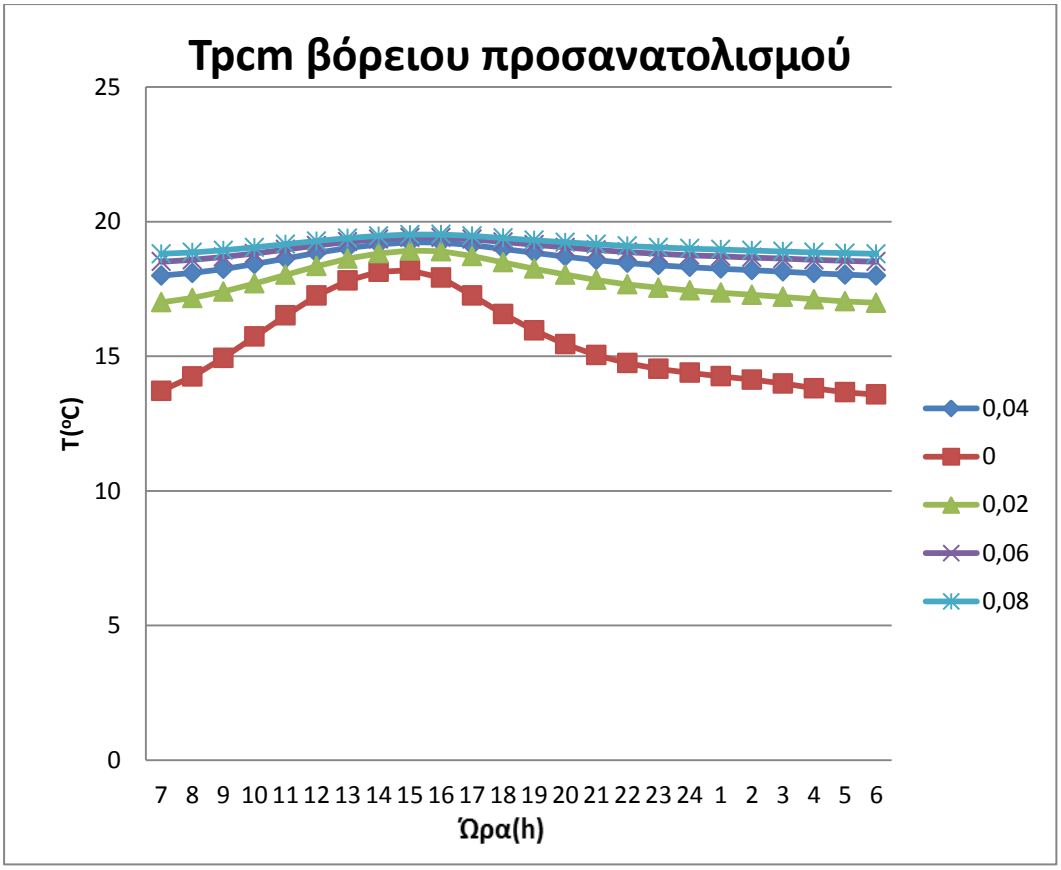
Σχήμα 7.2.1.12: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



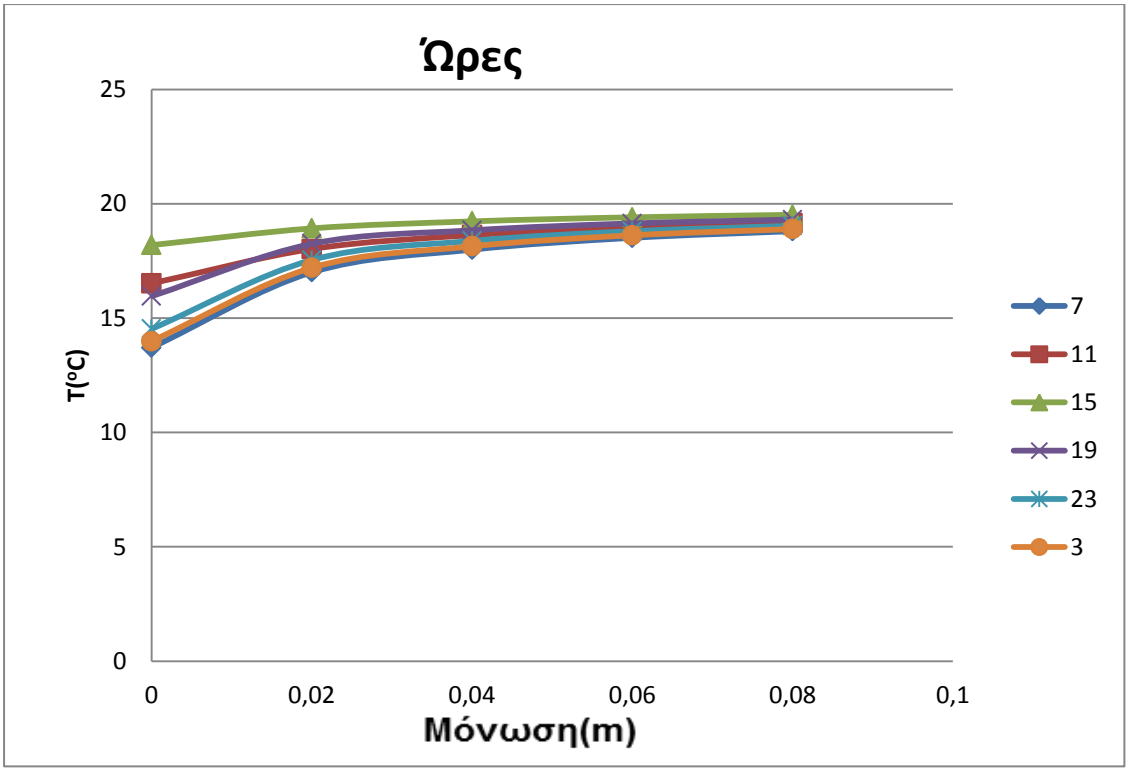
Σχήμα 7.2.1.13: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.14: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21^{η} Φεβρουαρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

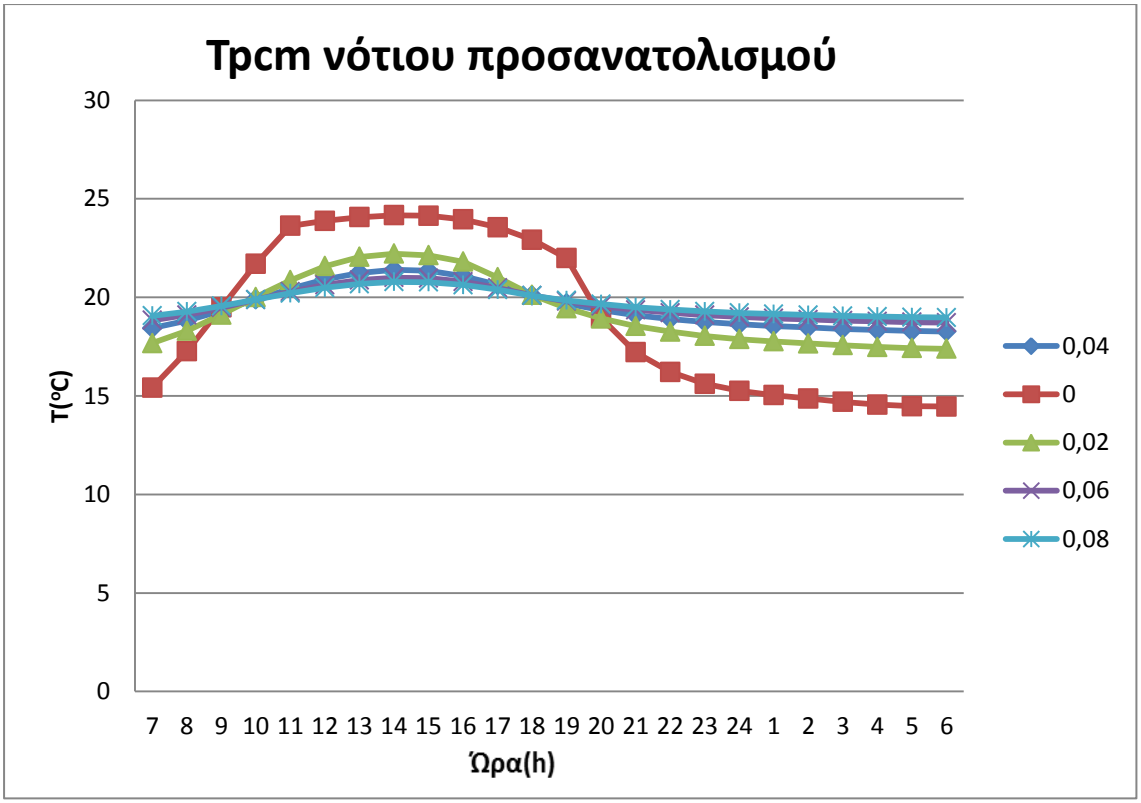


Σχήμα 7.2.1.15: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

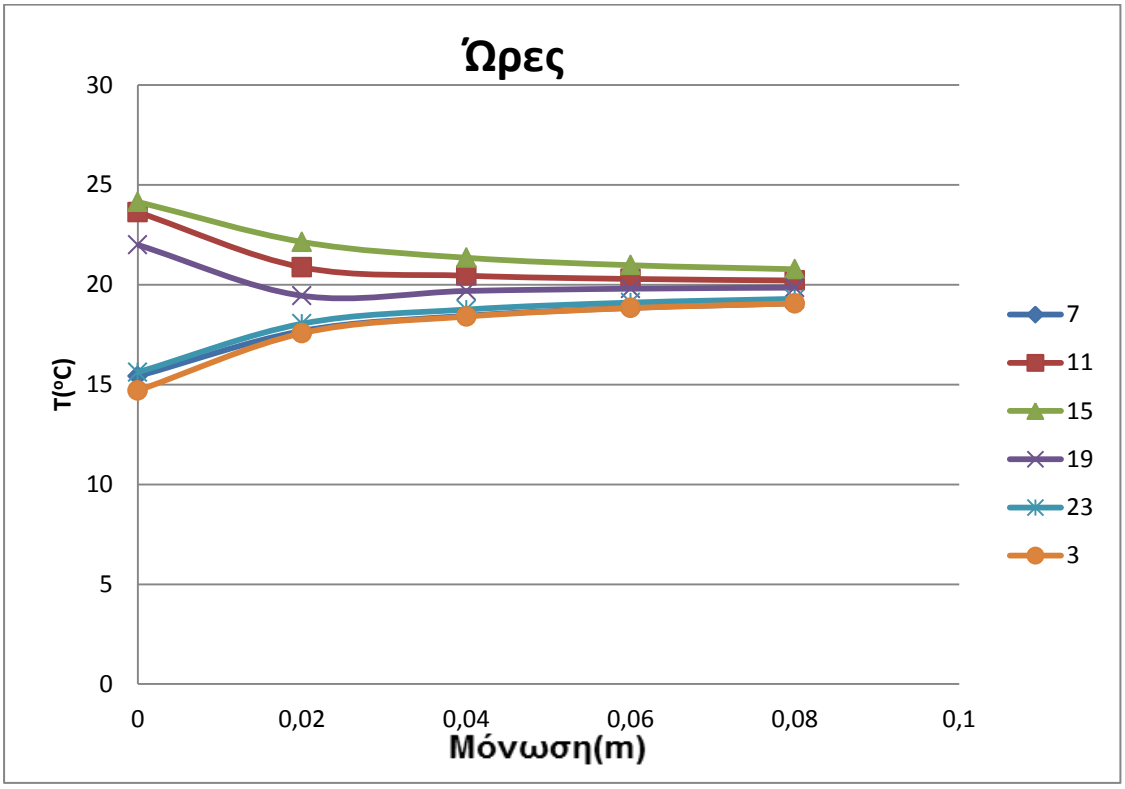


Σχήμα 7.2.1.16: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

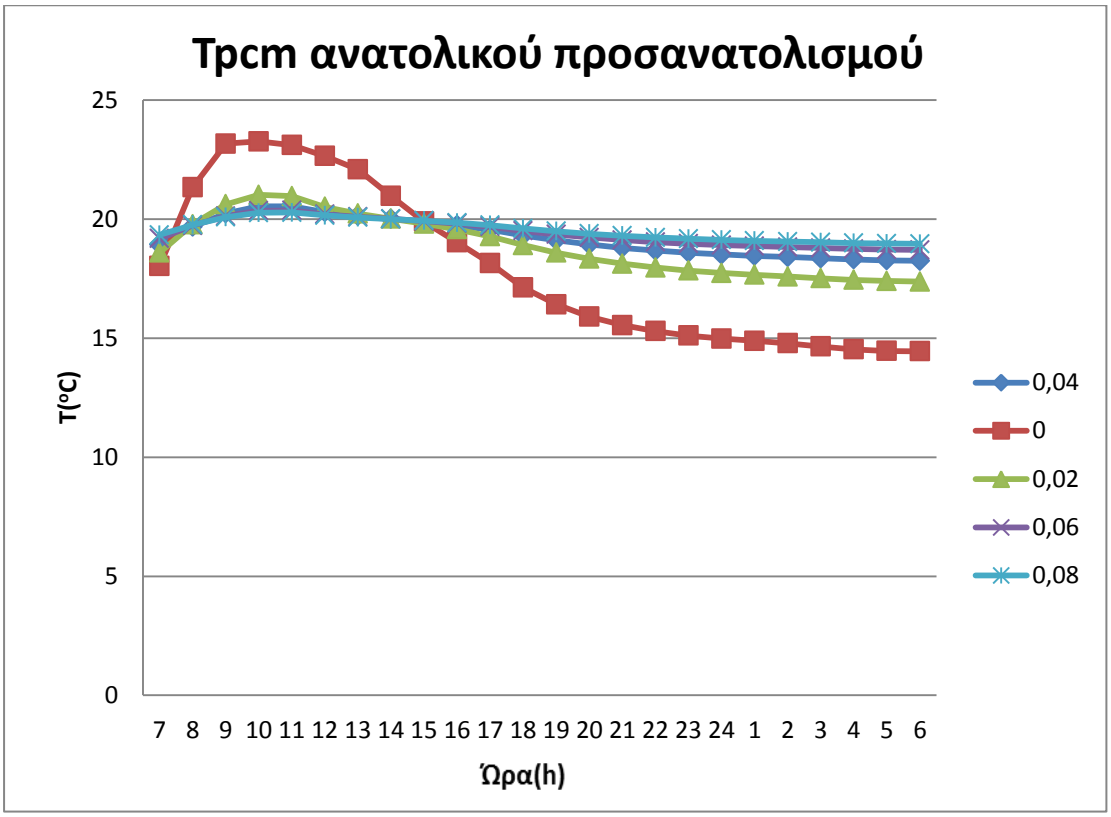
- Για την 21η Μαρτίου:



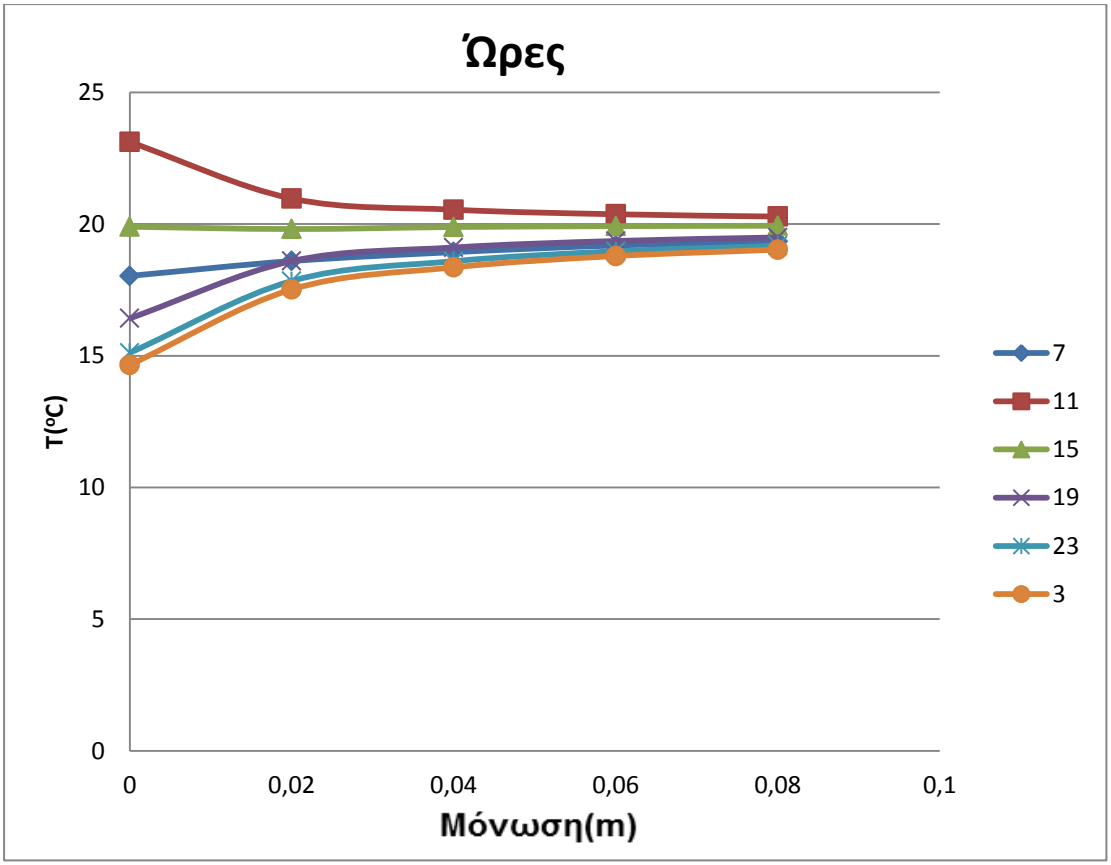
Σχήμα 7.2.1.17: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαρτίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



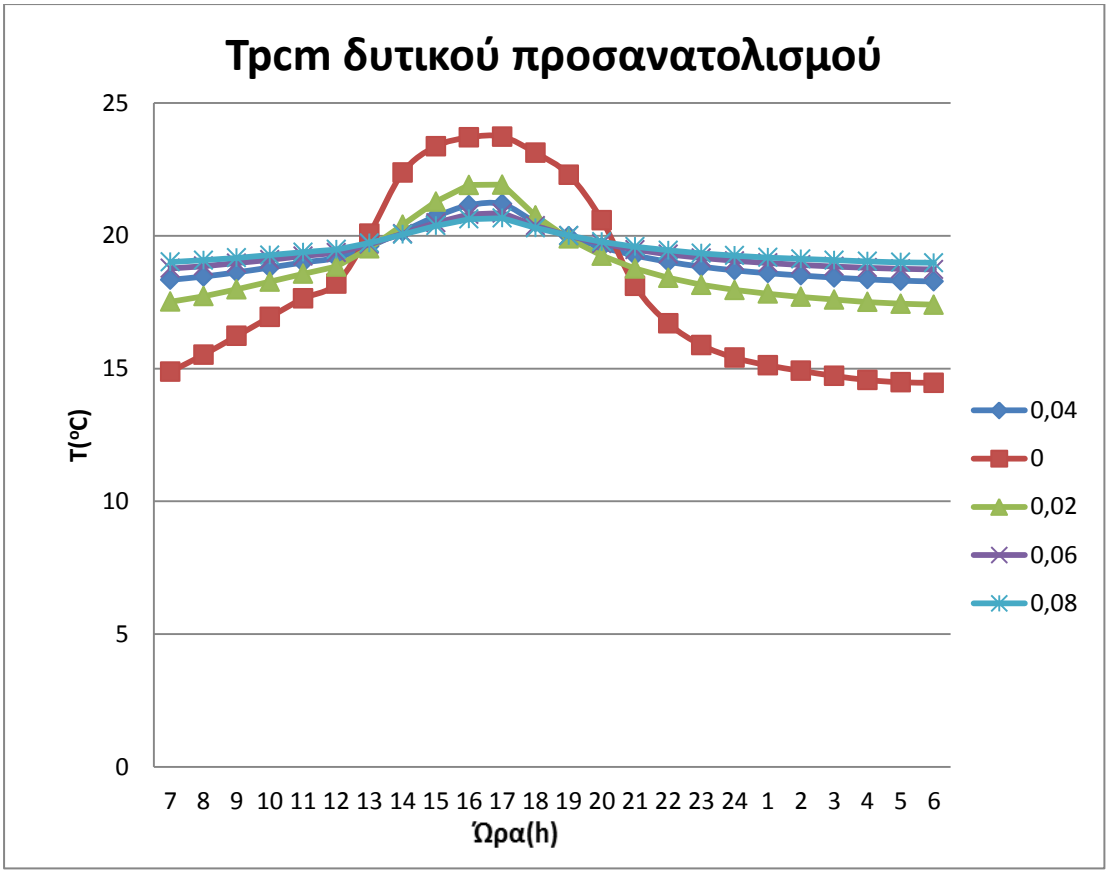
Σχήμα 7.2.1.18: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαρτίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



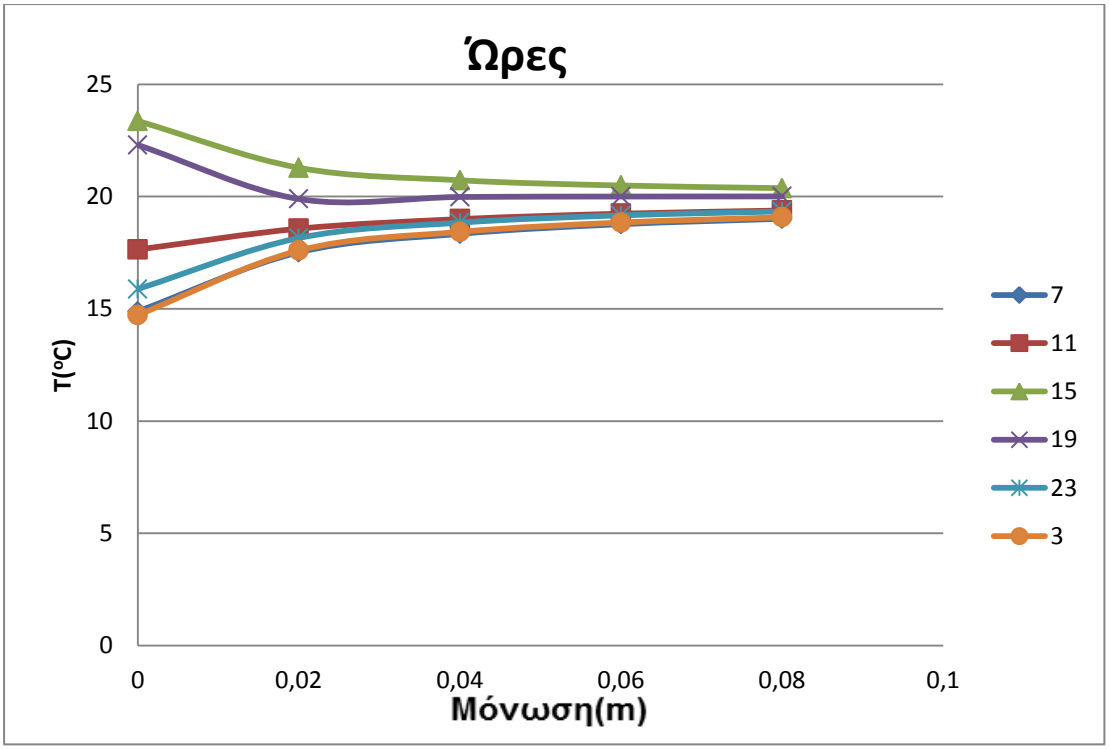
Σχήμα 7.2.1.19: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαρτίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



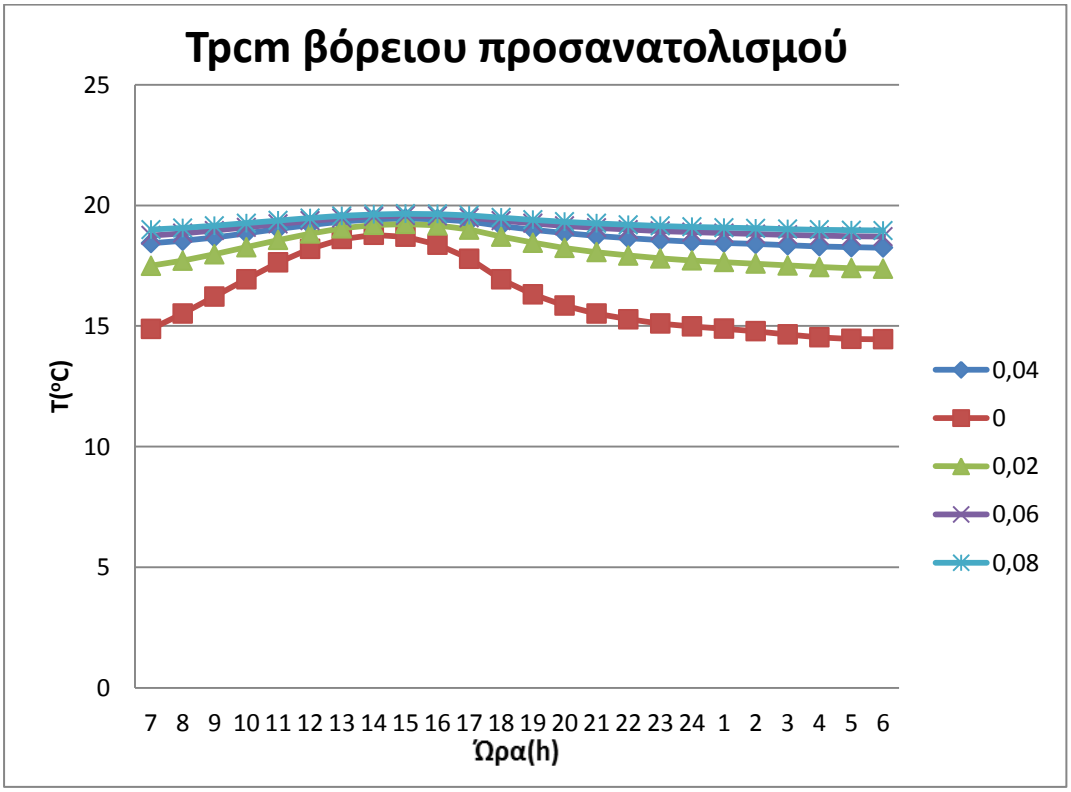
Σχήμα 7.2.1.20: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαρτίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



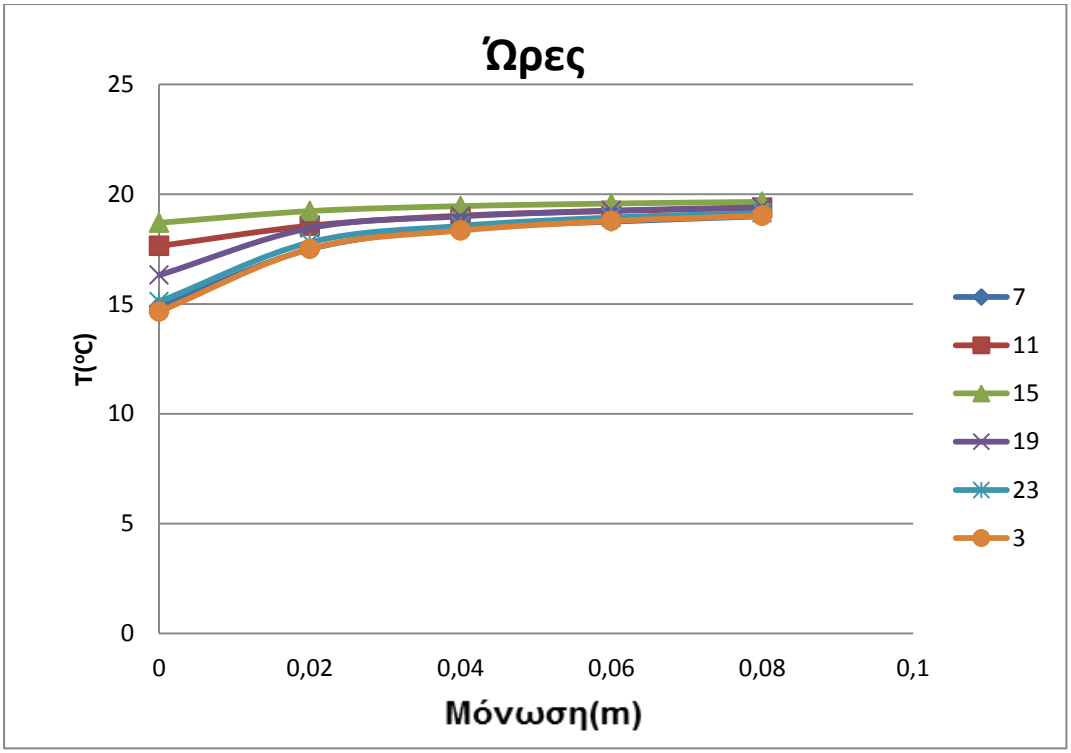
Σχήμα 7.2.1.21: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαρτίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.22: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαρτίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

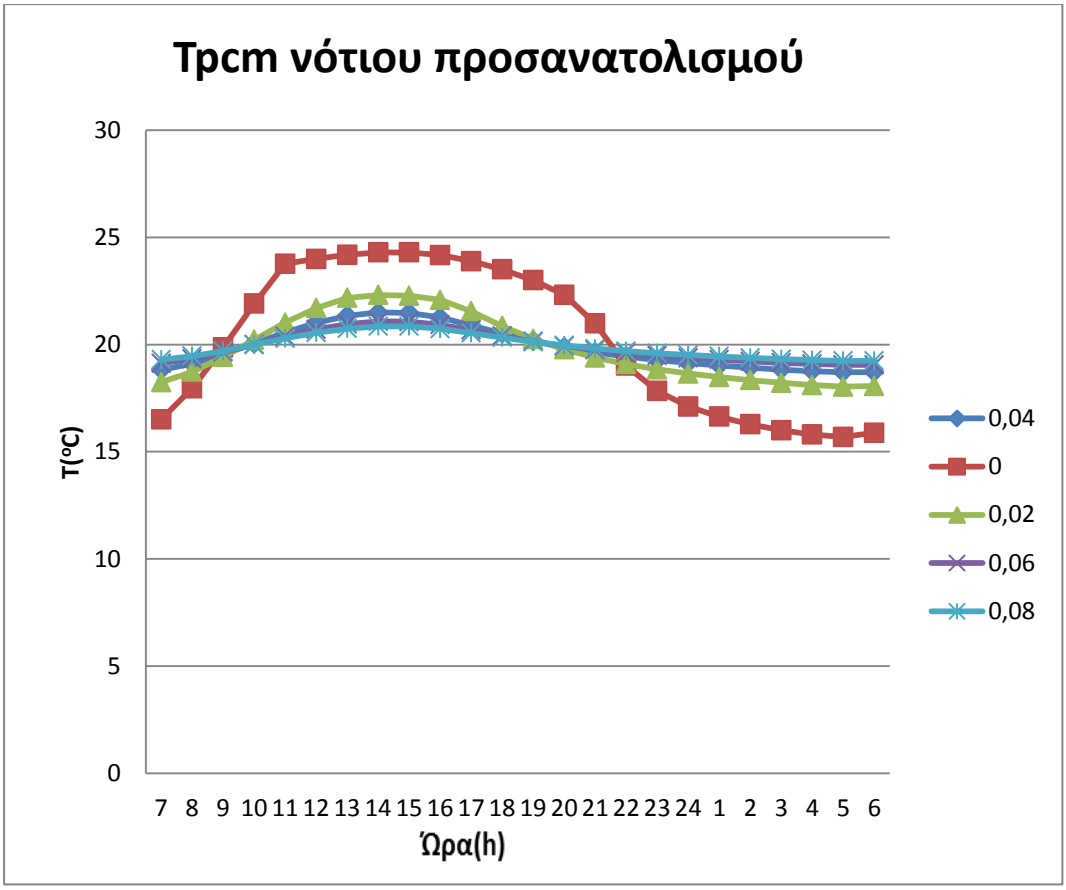


Σχήμα 7.2.1.23: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαρτίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

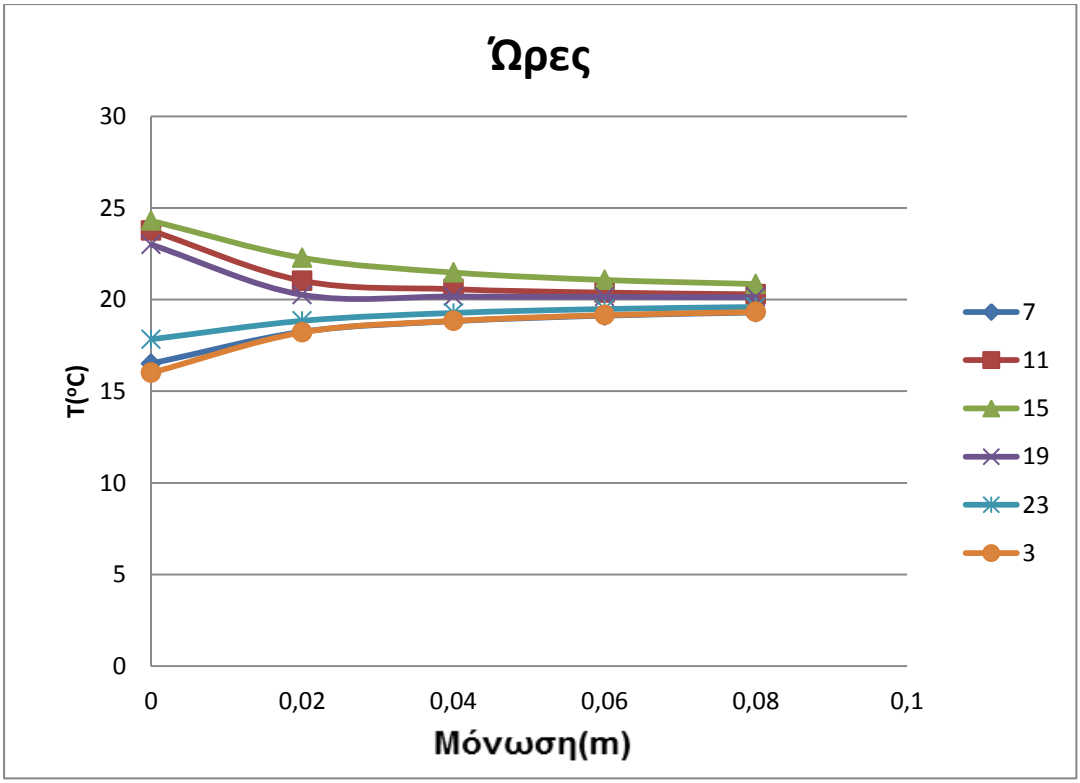


Σχήμα 7.2.1.24: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαρτίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

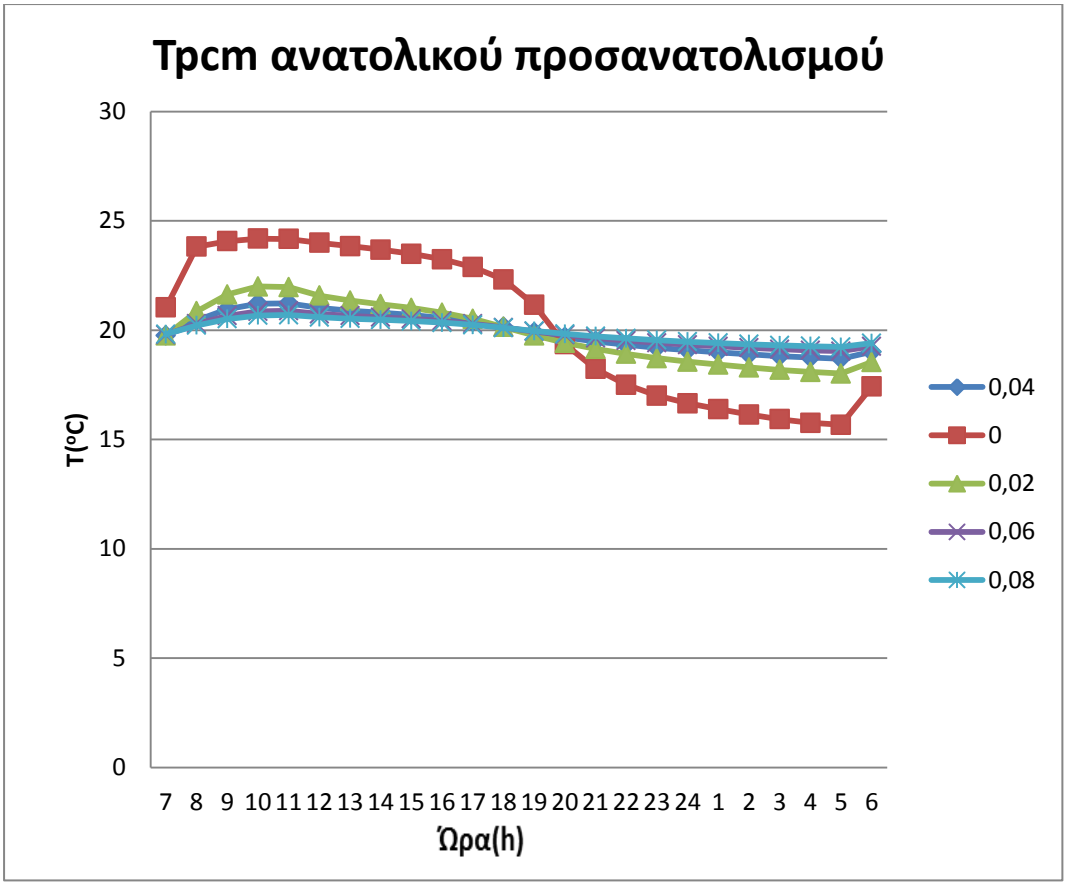
- Για την 21η Απριλίου:



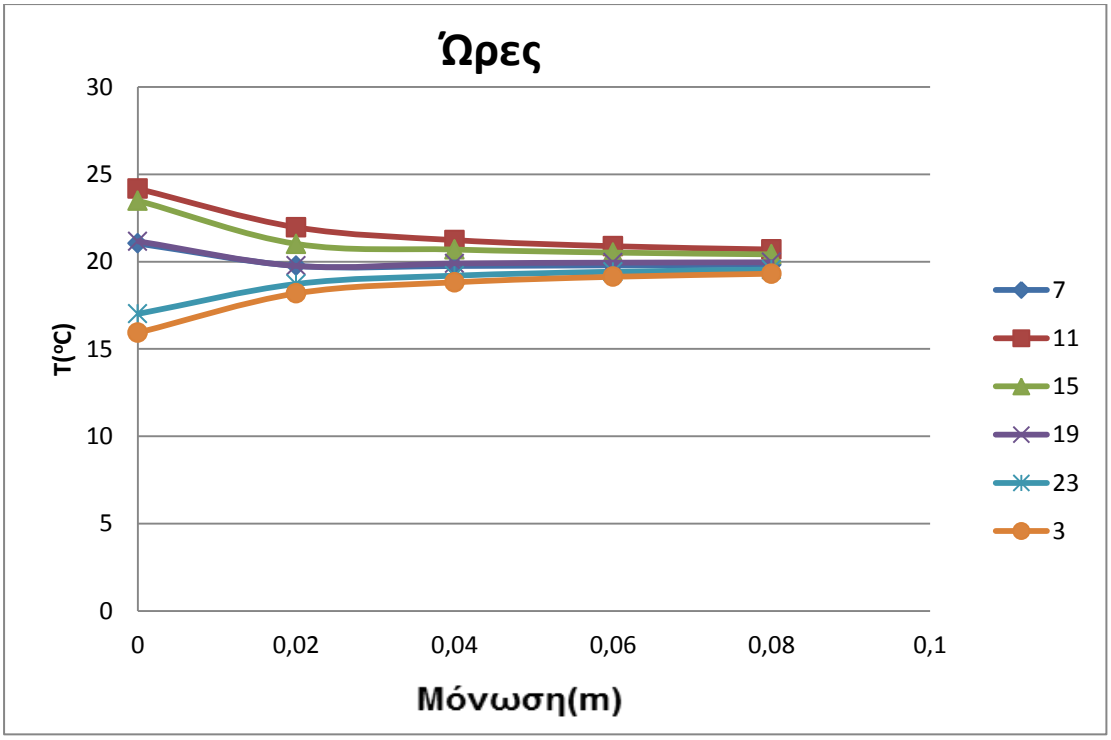
Σχήμα 7.2.1.25: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Απριλίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



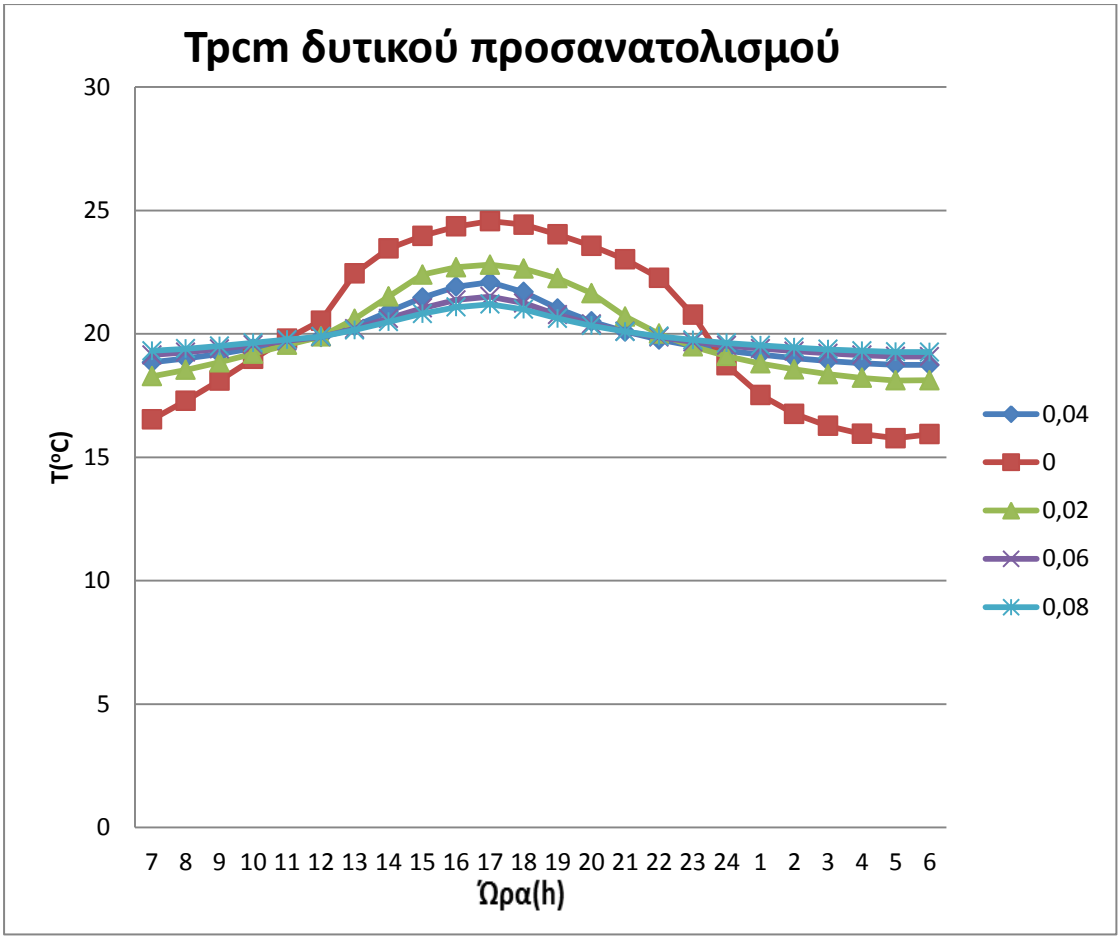
Σχήμα 7.2.1.26: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Απριλίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



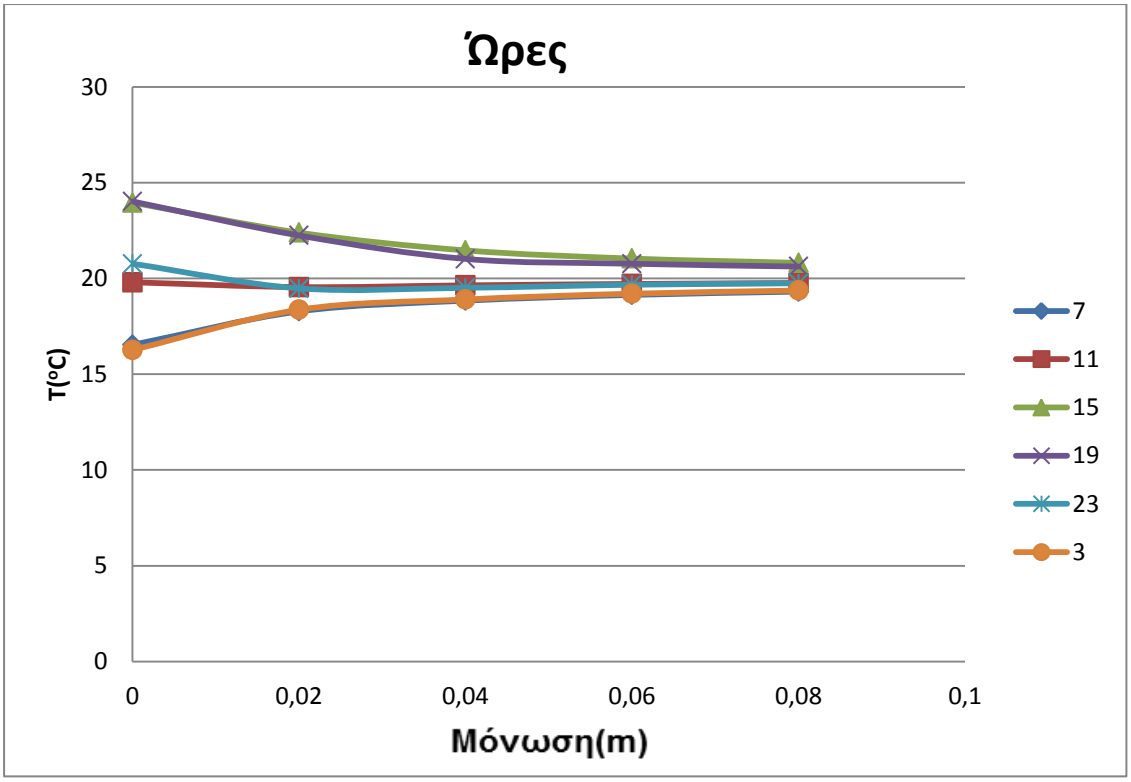
Σχήμα 7.2.1.27: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Απριλίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



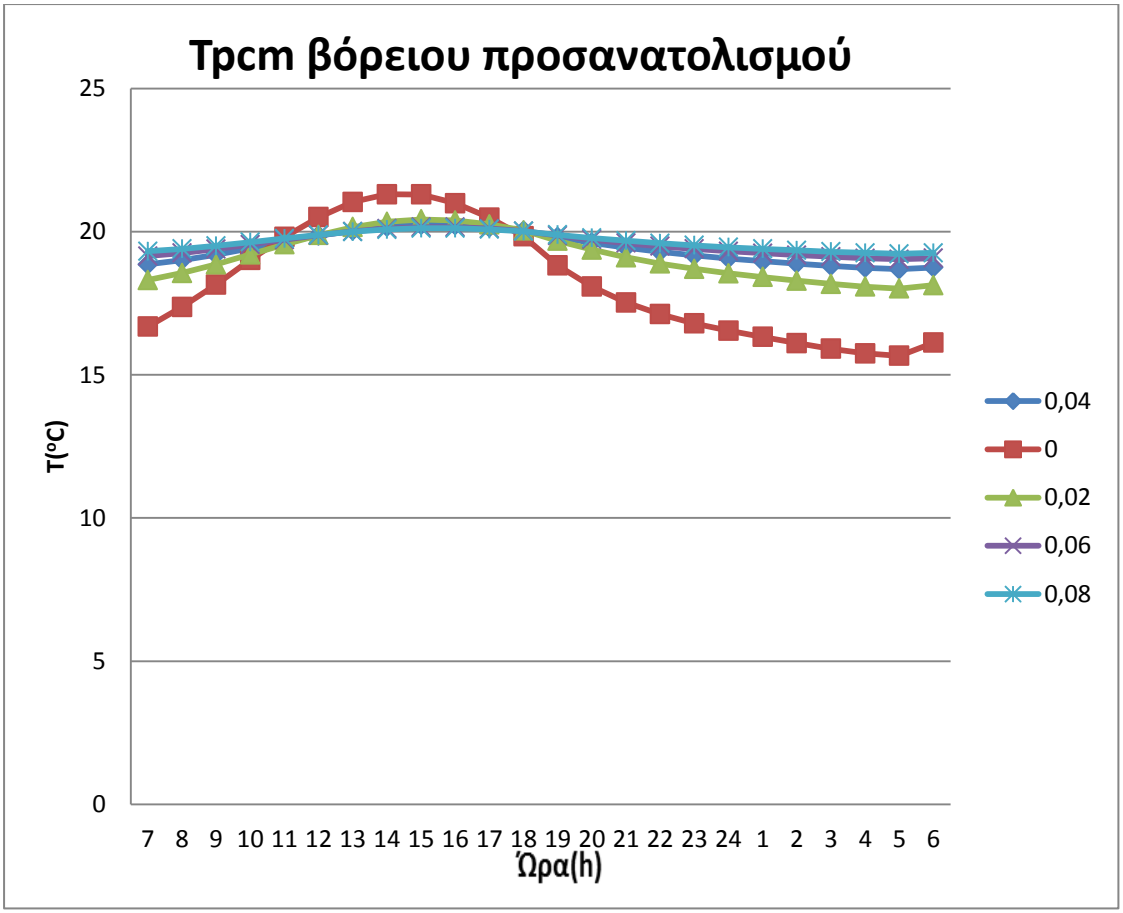
Σχήμα 7.2.1.28: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21^{η} Απριλίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



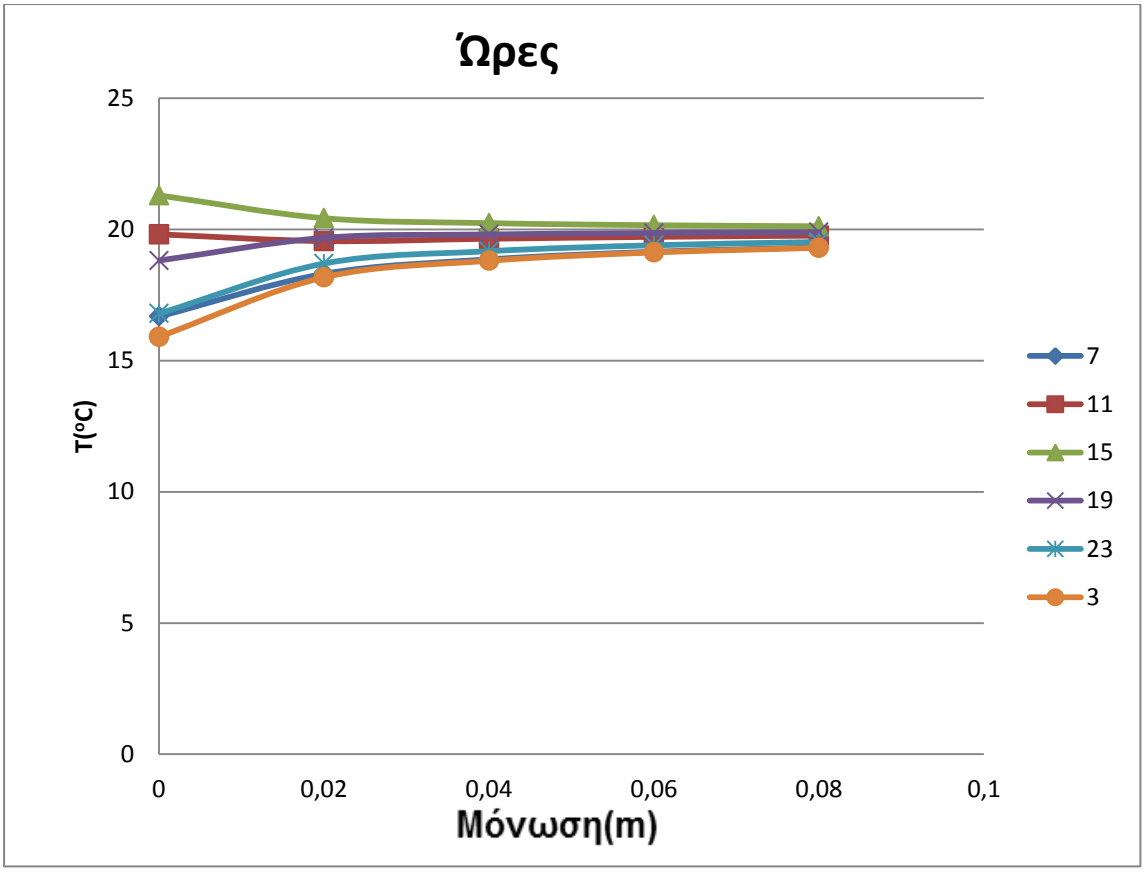
Σχήμα 7.2.1.29: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Απριλίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.30: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Απριλίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

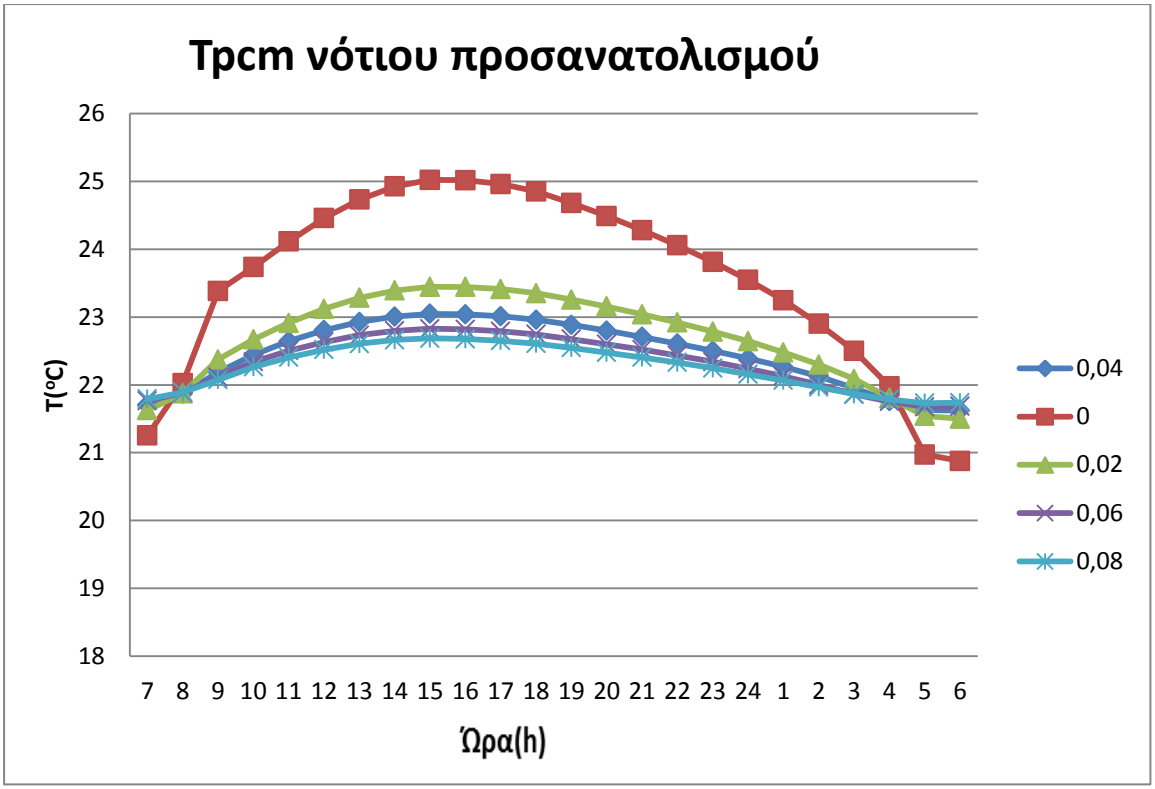


Σχήμα 7.2.1.31: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Απριλίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

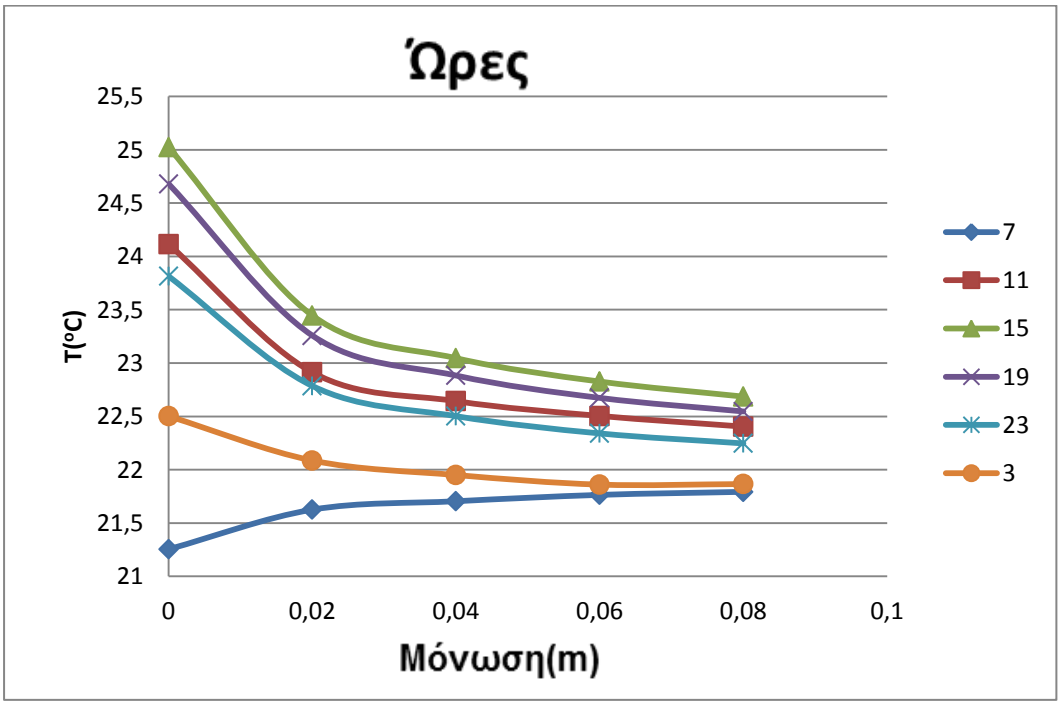


Σχήμα 7.2.1.32: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Απριλίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

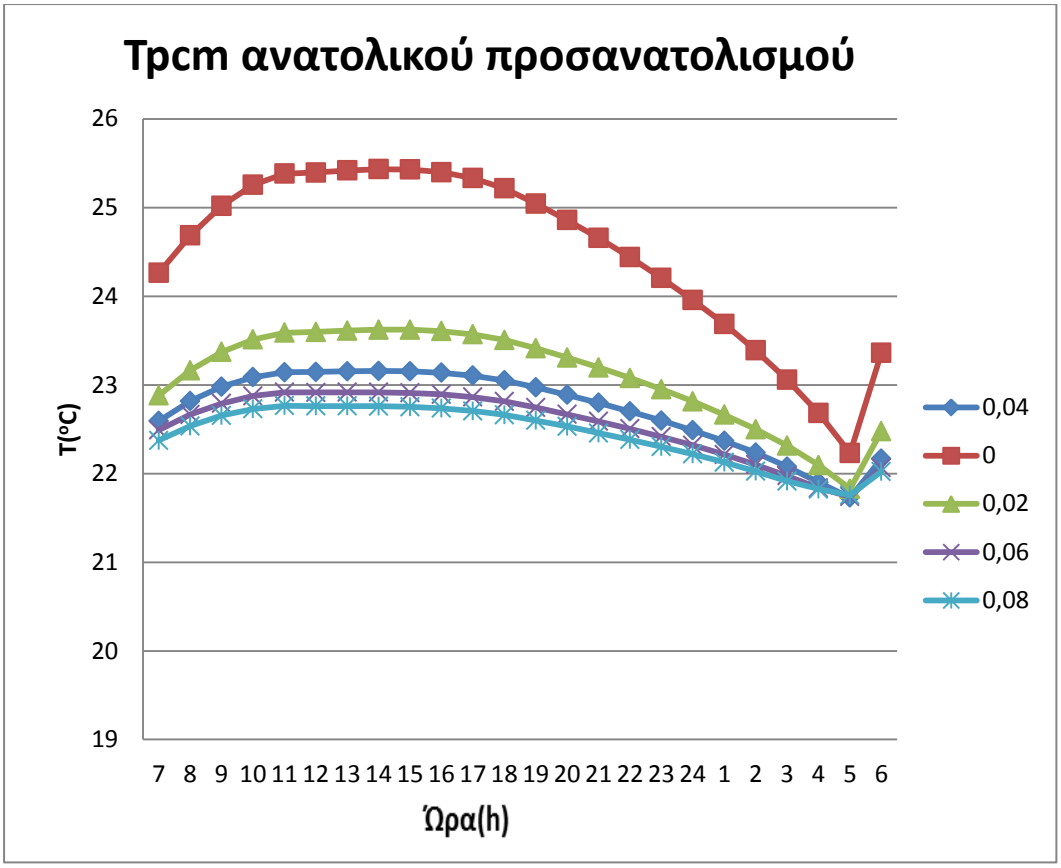
- Για την 21η Μαΐου:



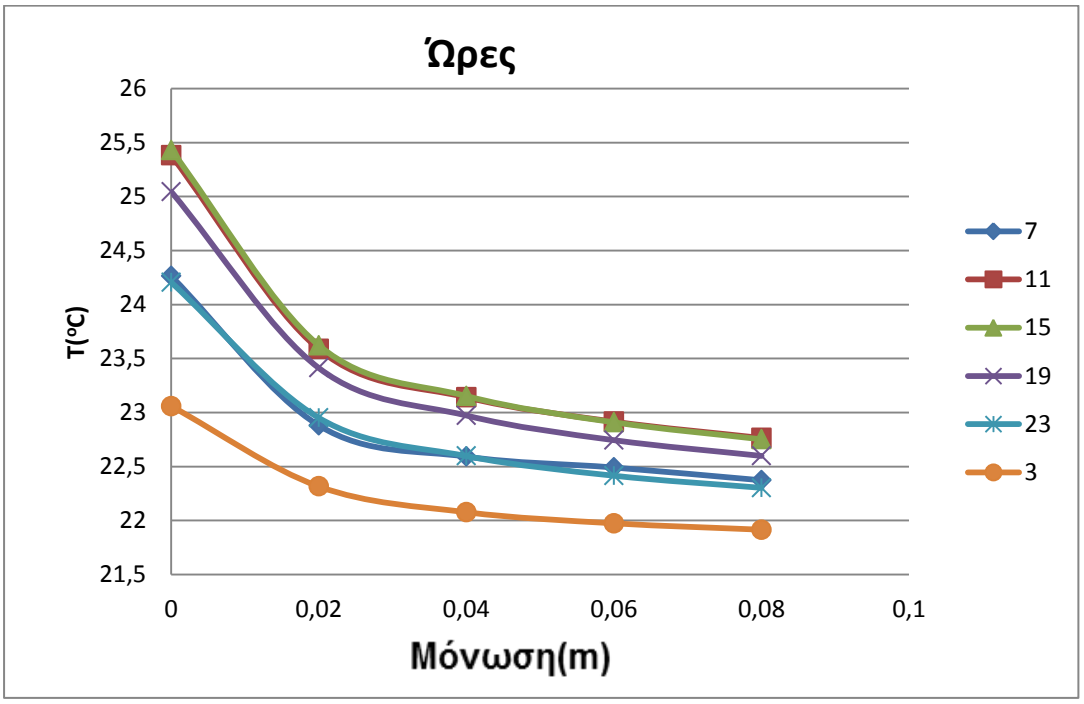
Σχήμα 7.2.1.33: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαΐου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



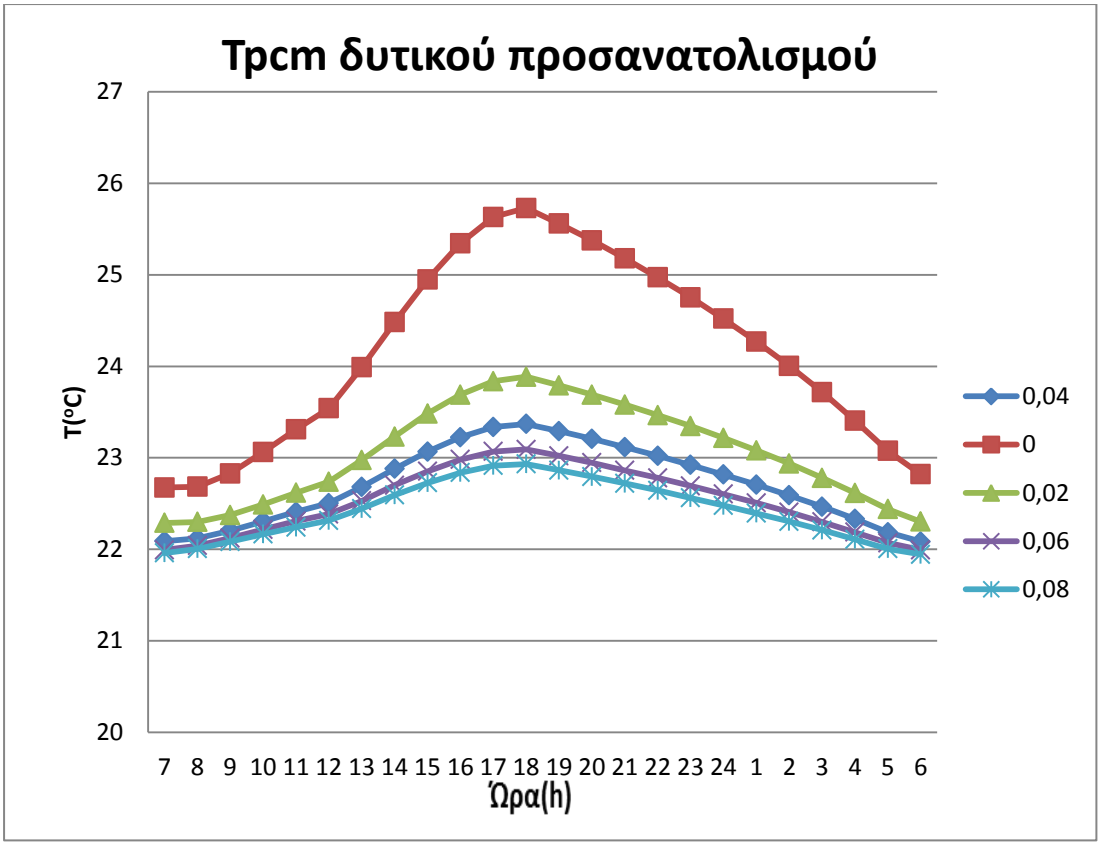
Σχήμα 7.2.1.34: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαΐου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



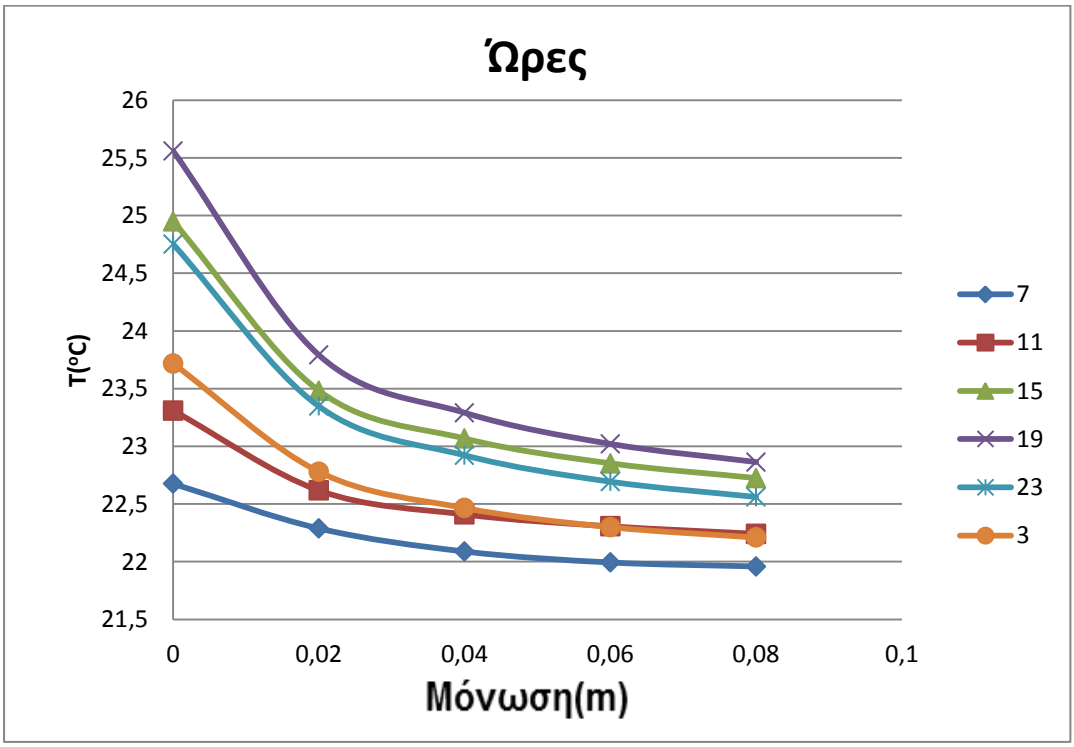
Σχήμα 7.2.1.35: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαΐου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



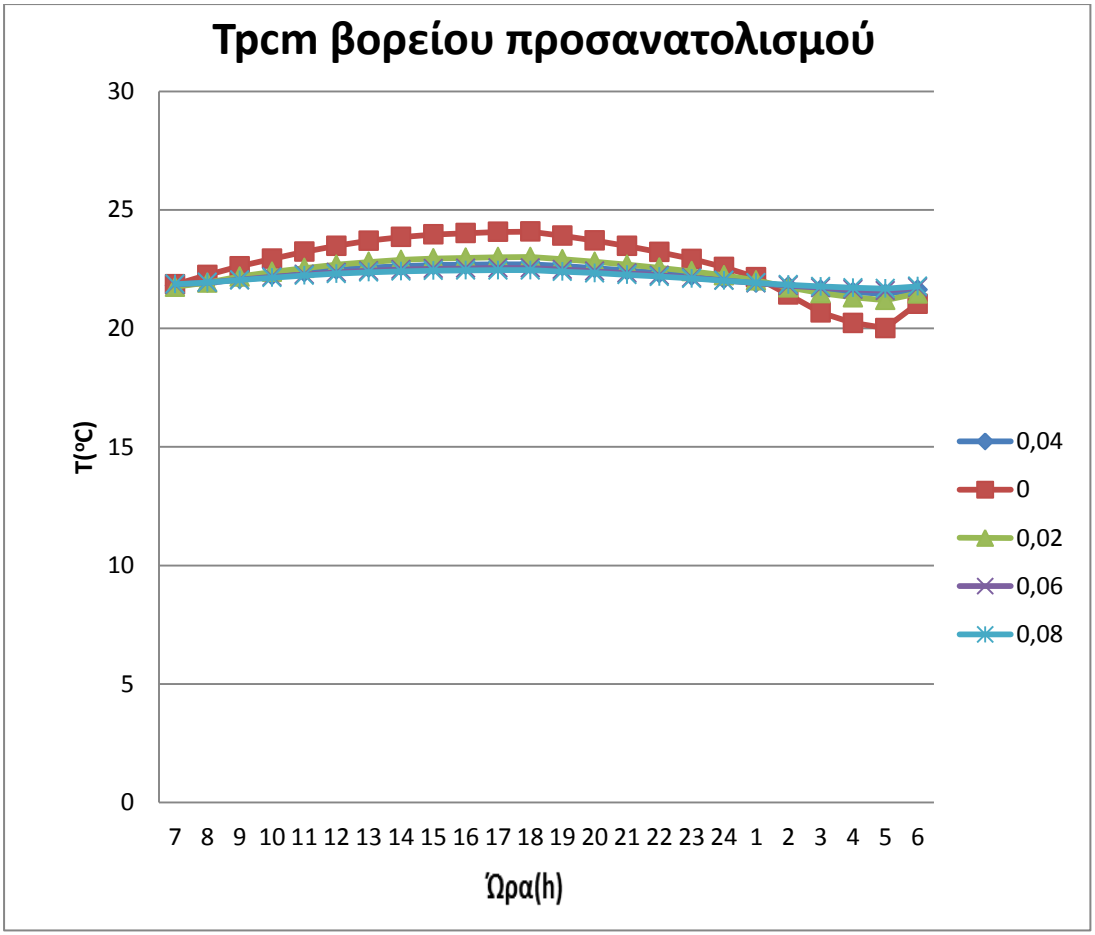
Σχήμα 7.2.1.36: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαΐου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



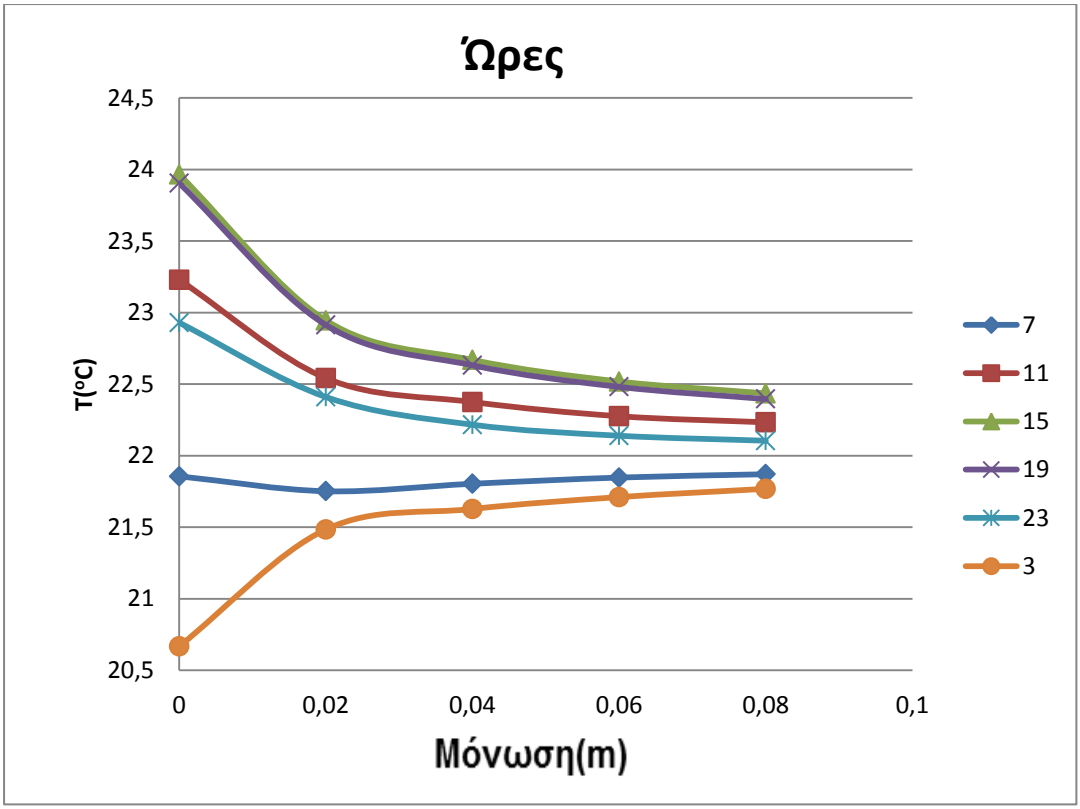
Σχήμα 7.2.1.37: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαΐου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.38: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαΐου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

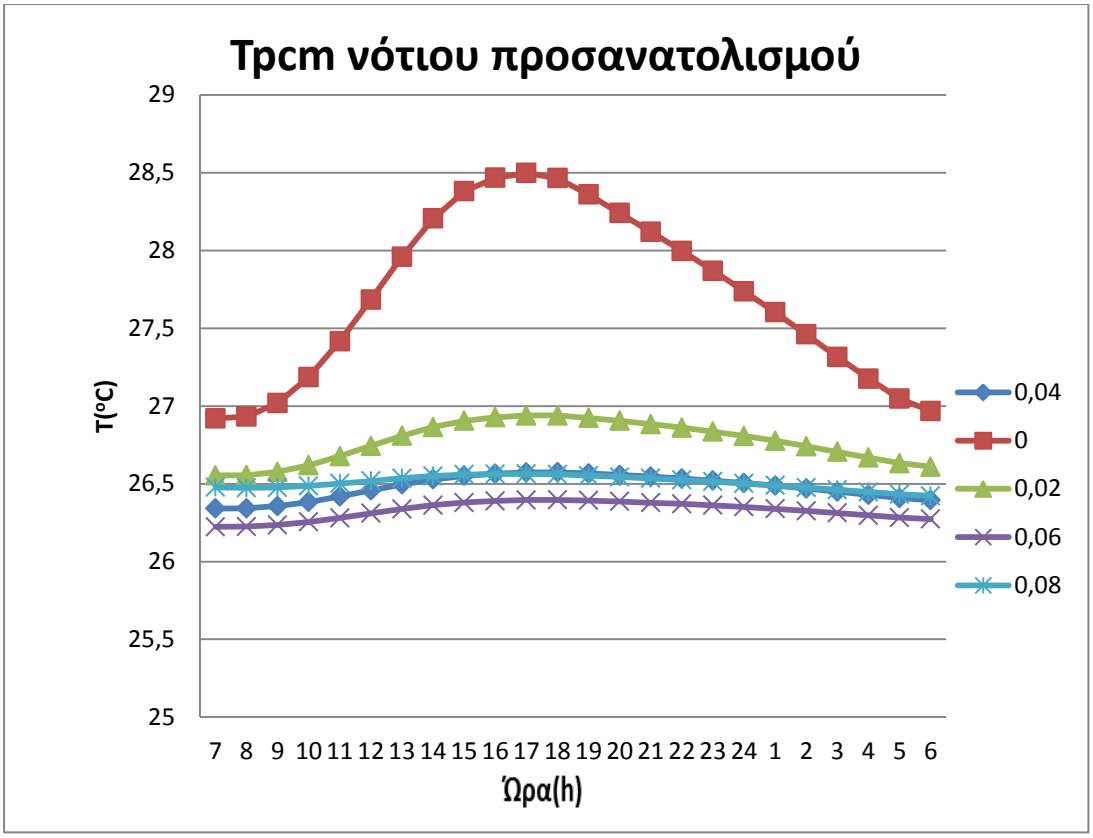


Σχήμα 7.2.1.39: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Μαΐου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

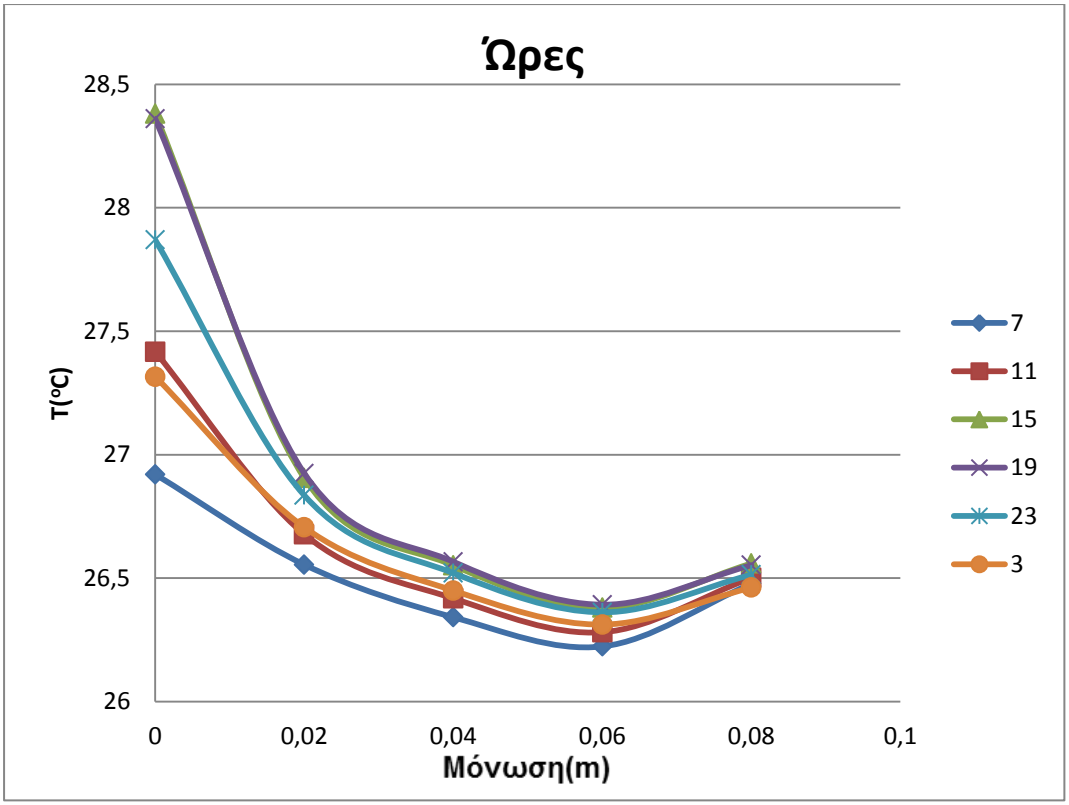


Σχήμα 7.2.1.40: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Μαΐου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

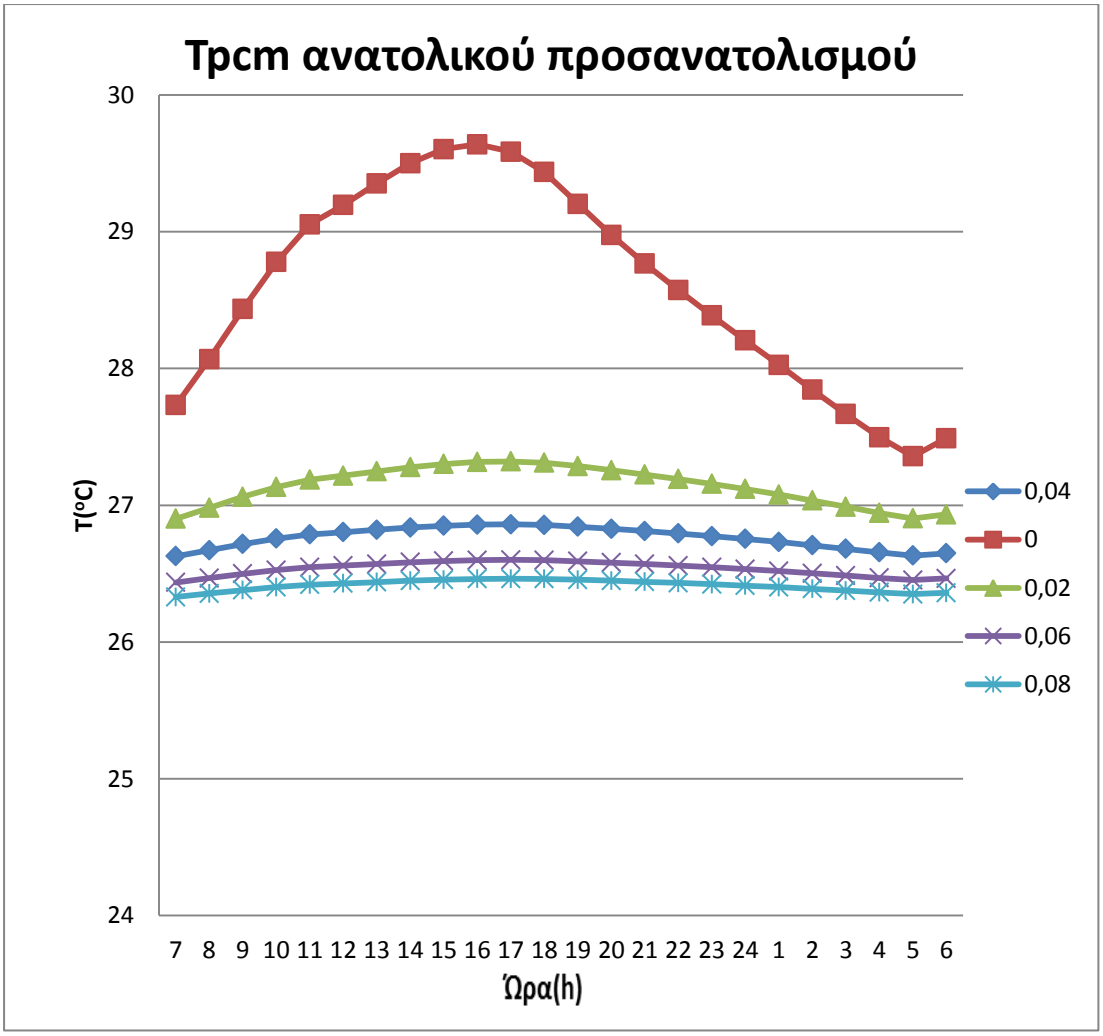
- Για την 21η Ιουνίου:



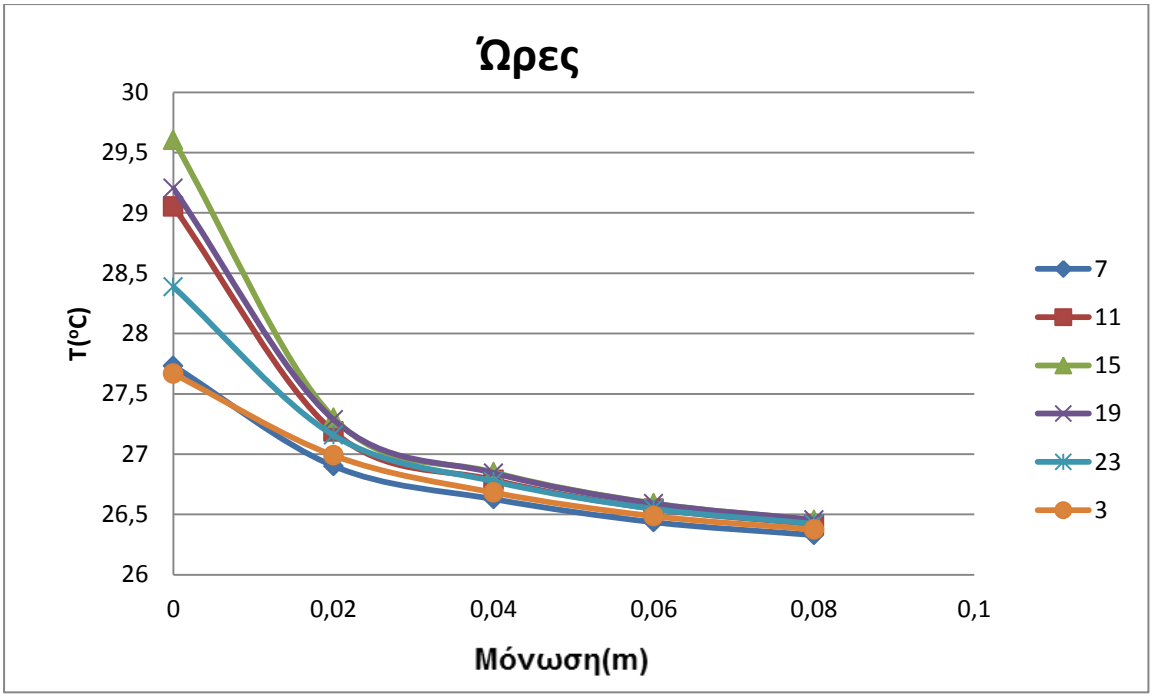
Σχήμα 7.2.1.41: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουνίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



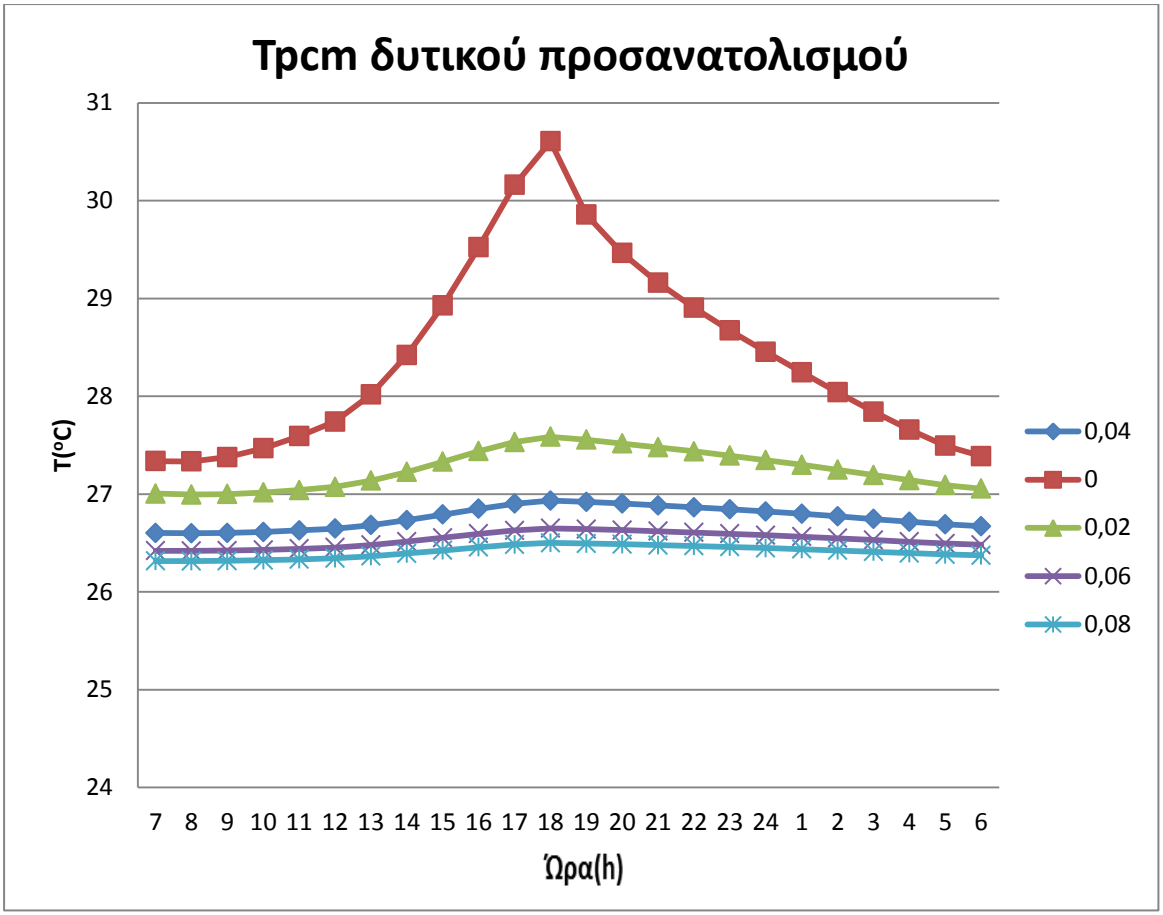
Σχήμα 7.2.1.42: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουνίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



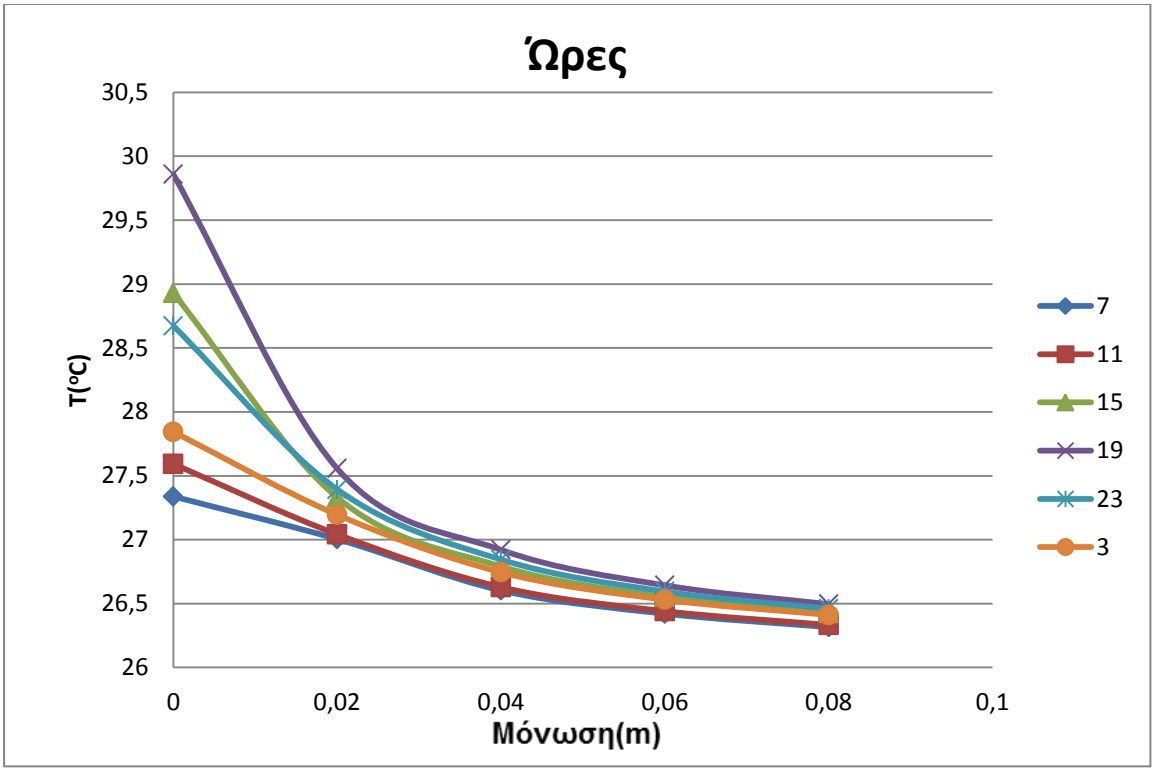
Σχήμα 7.2.1.43: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουνίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



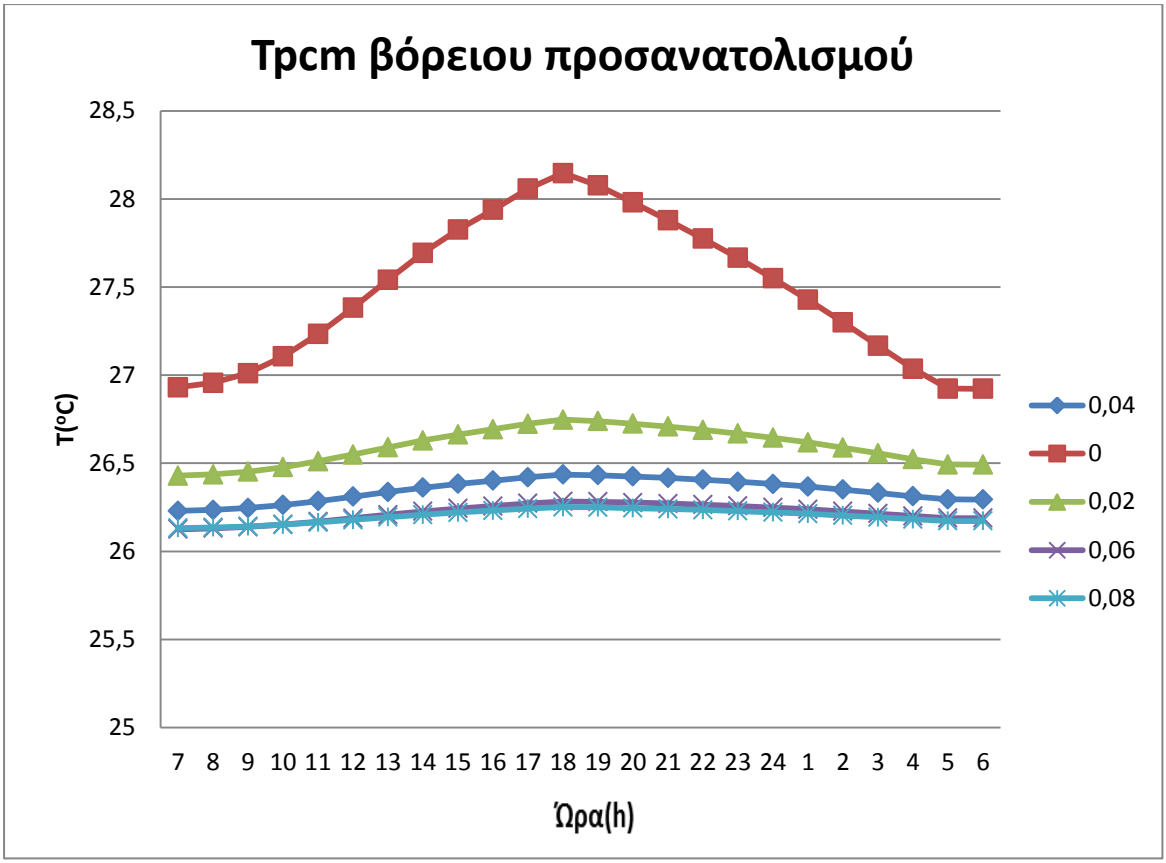
Σχήμα 7.2.1.44: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουνίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



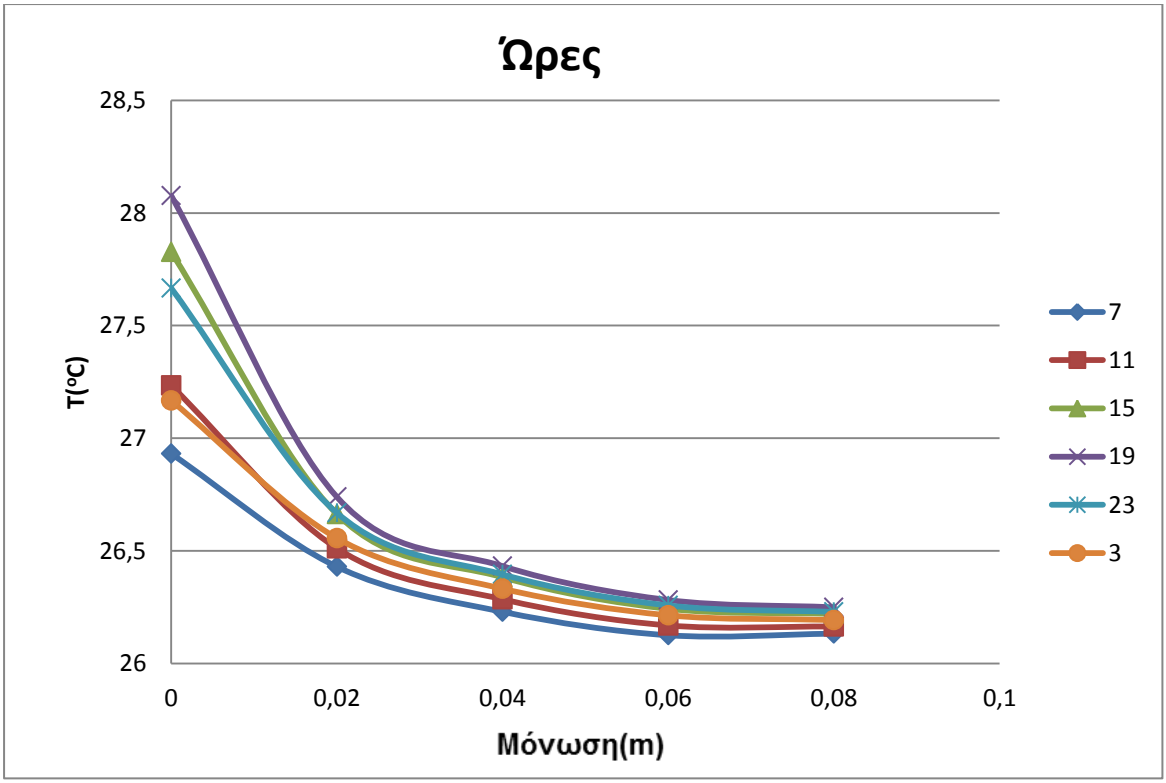
Σχήμα 7.2.1.45: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουνίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.46: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουνίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

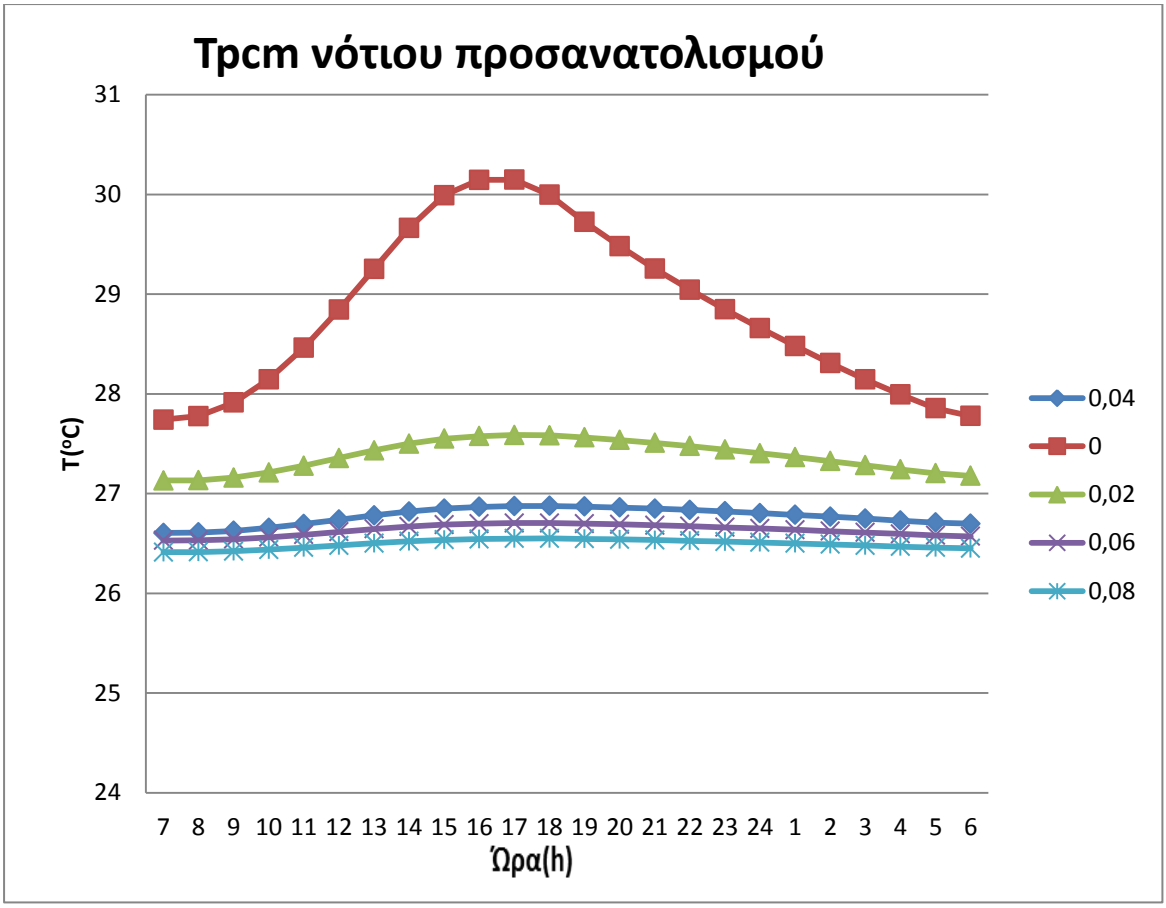


Σχήμα 7.2.1.47: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουνίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

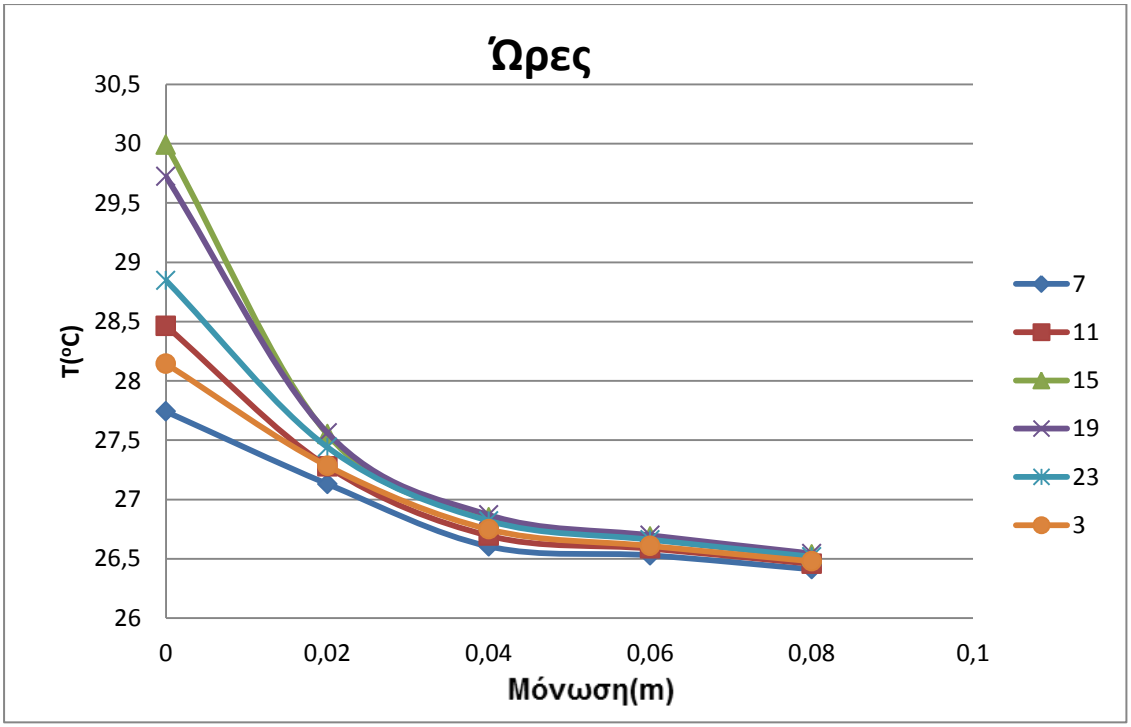


Σχήμα 7.2.1.48: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουνίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

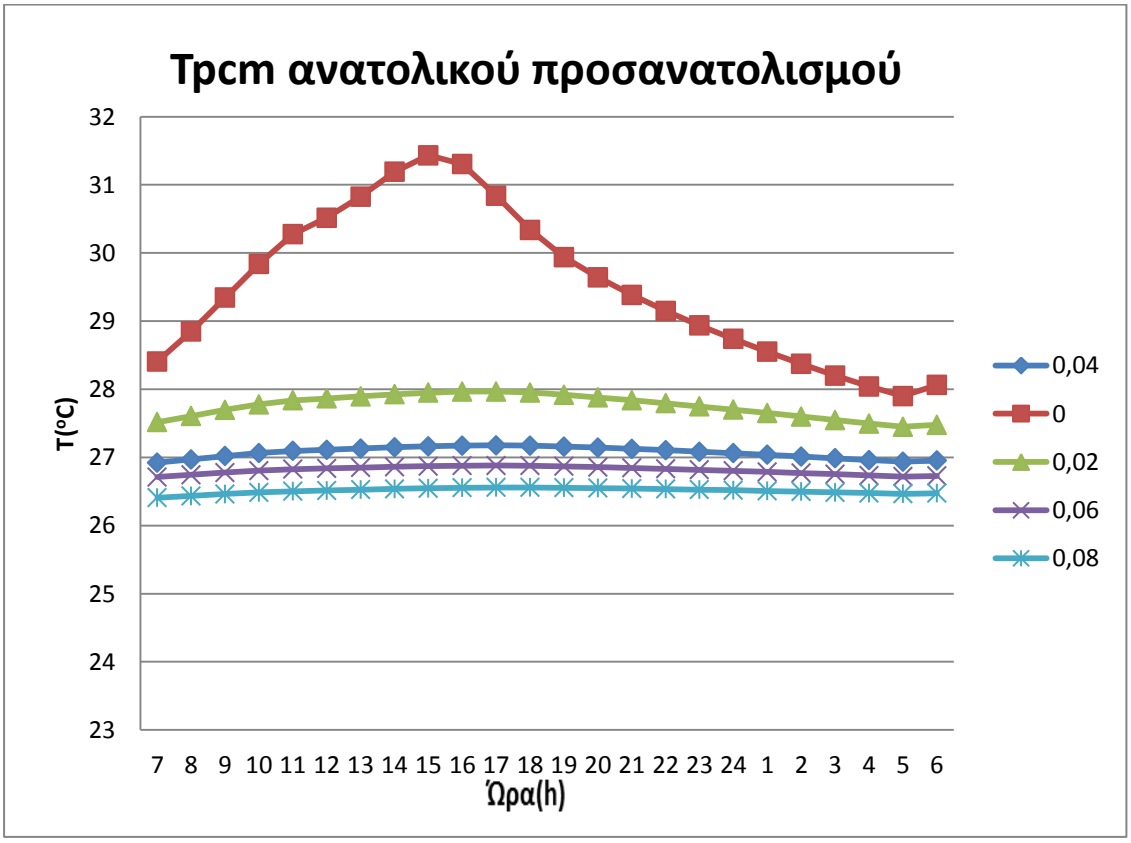
- Για την 21η Ιουλίου:



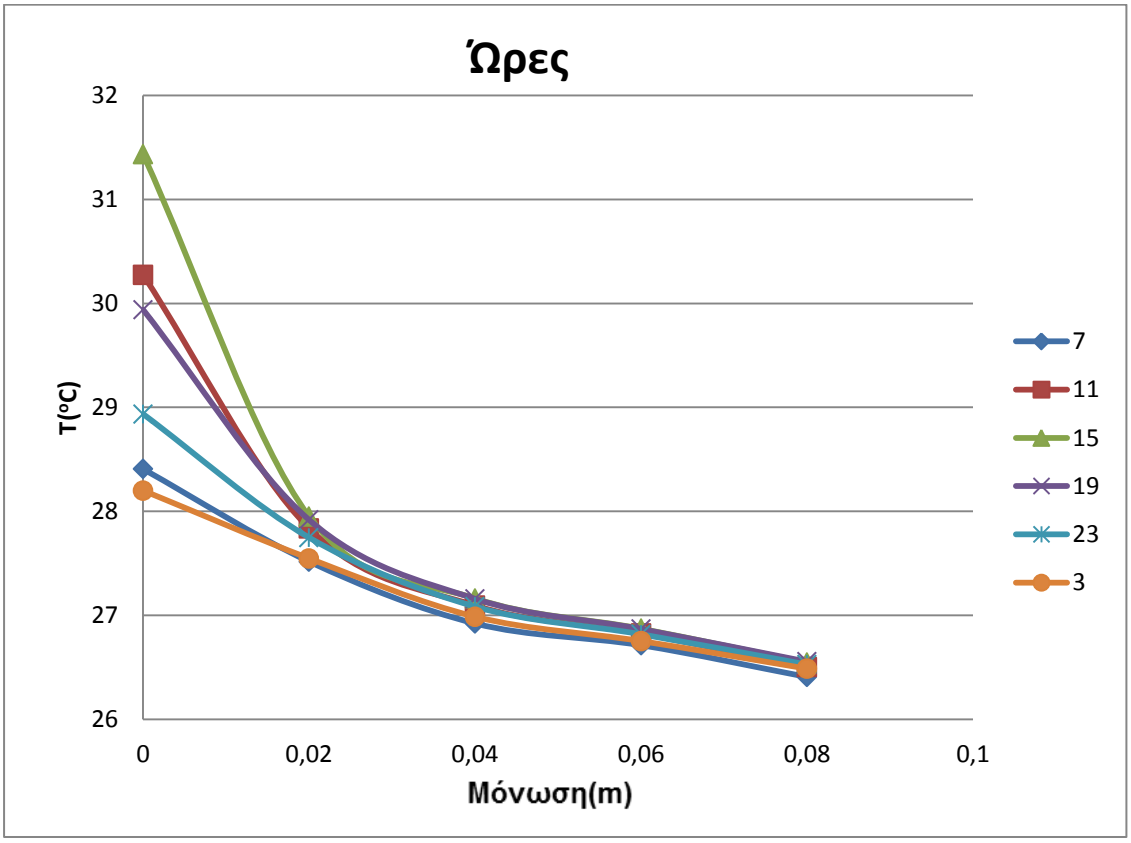
Σχήμα 7.2.1.49: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουλίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



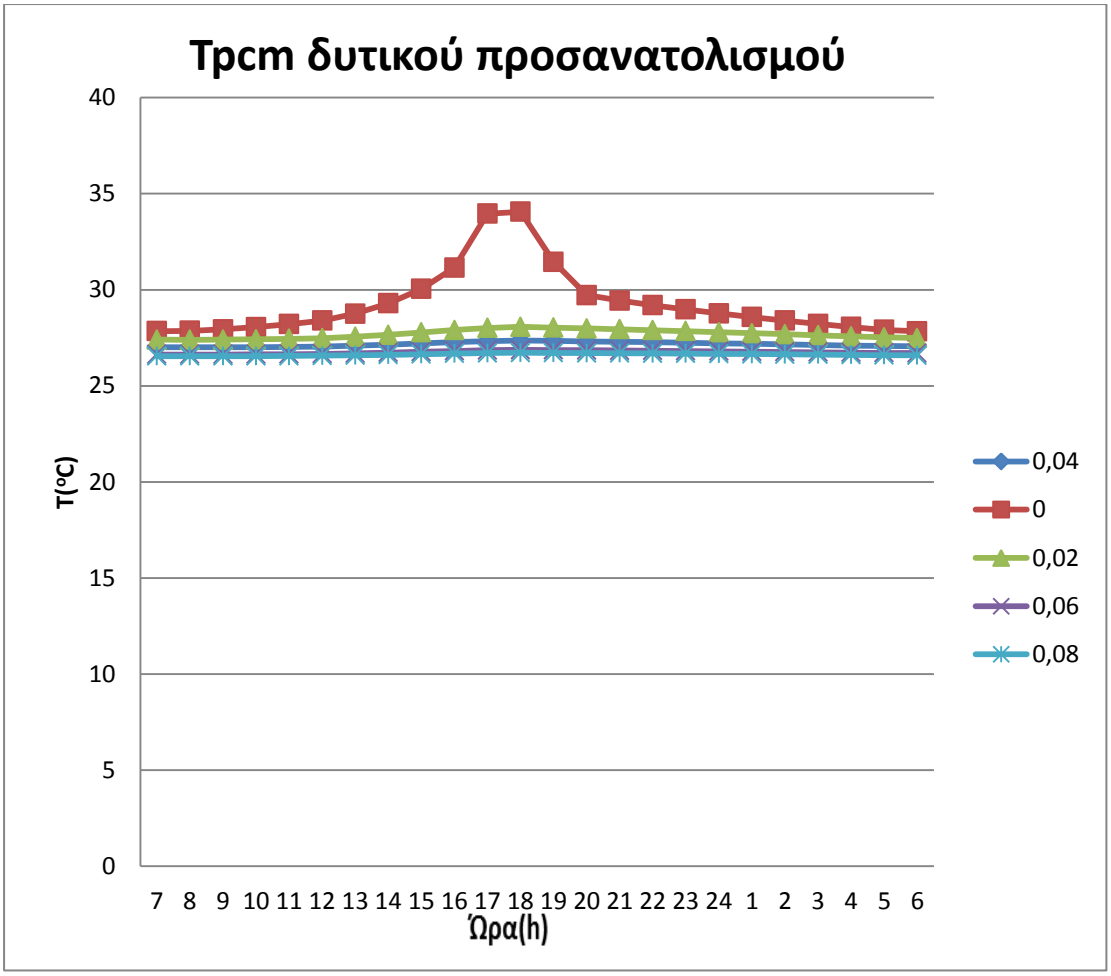
Σχήμα 7.2.1.50: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουλίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



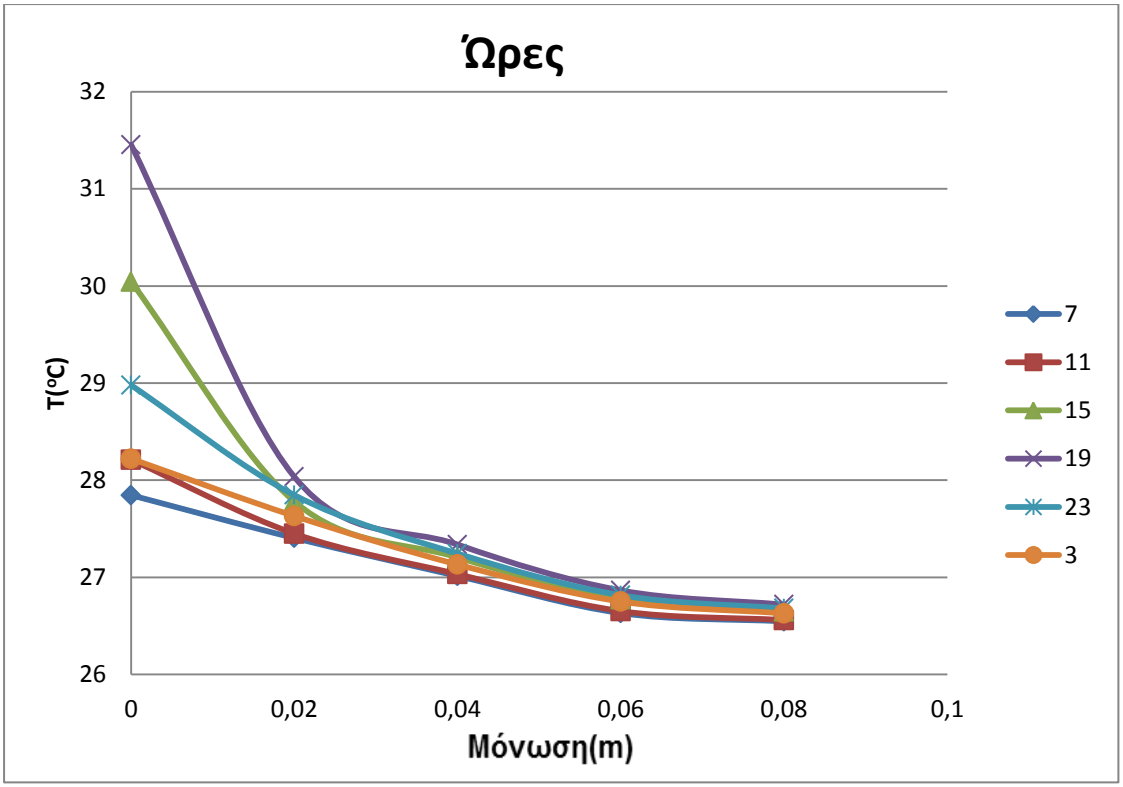
Σχήμα 7.2.1.51: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουλίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



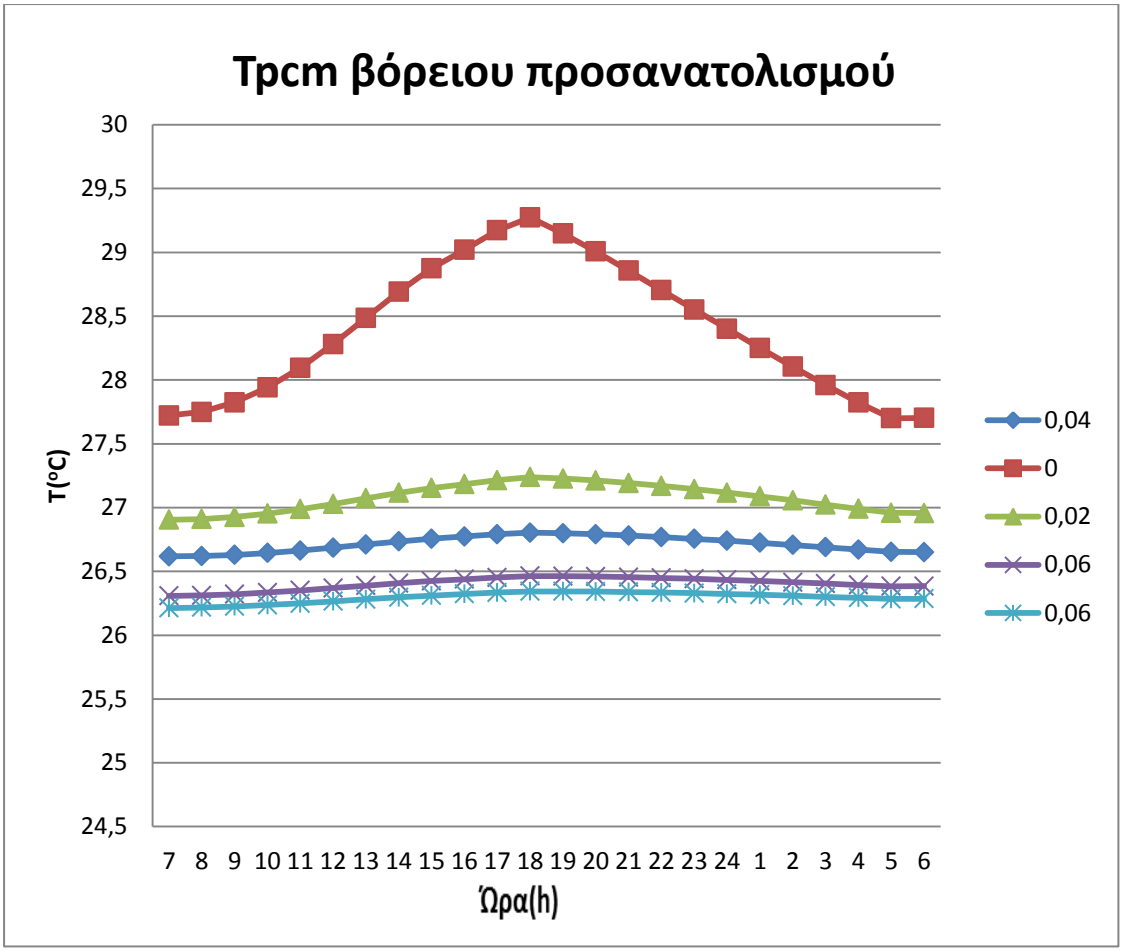
Σχήμα 7.2.1.52: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουλίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



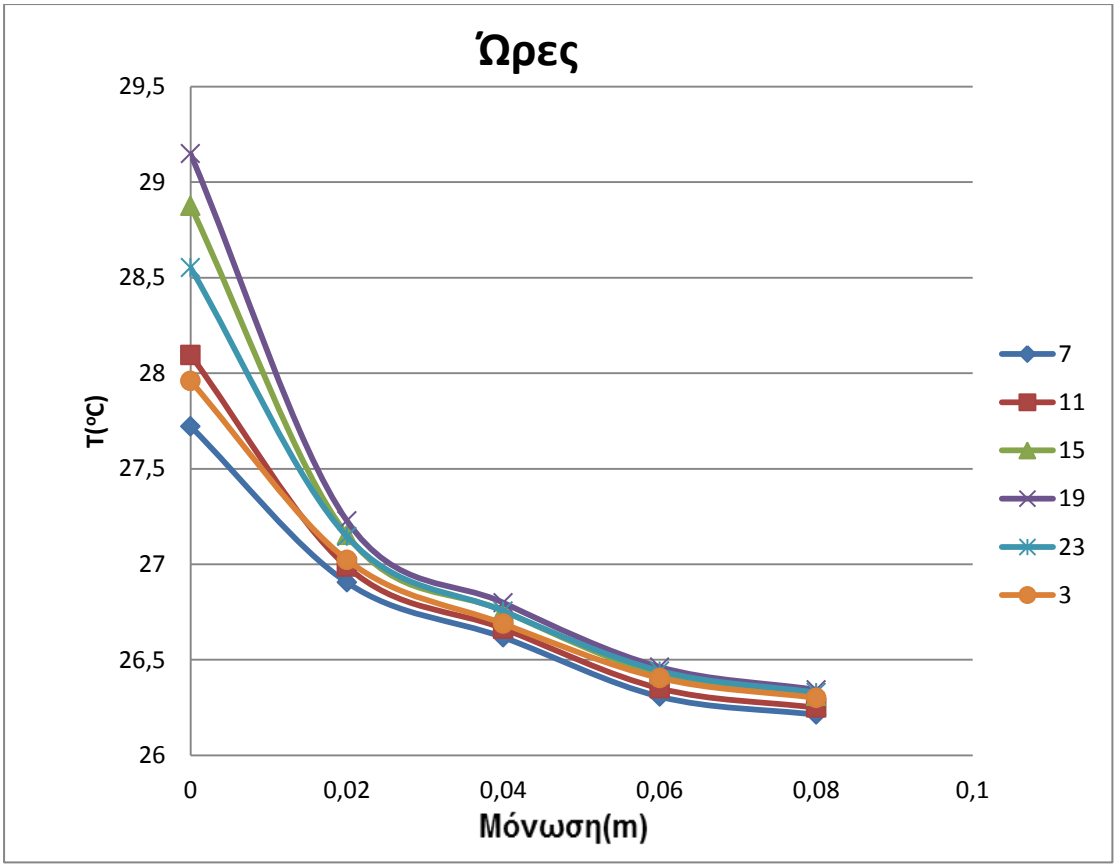
Σχήμα 7.2.1.53: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουλίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.54: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουλίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

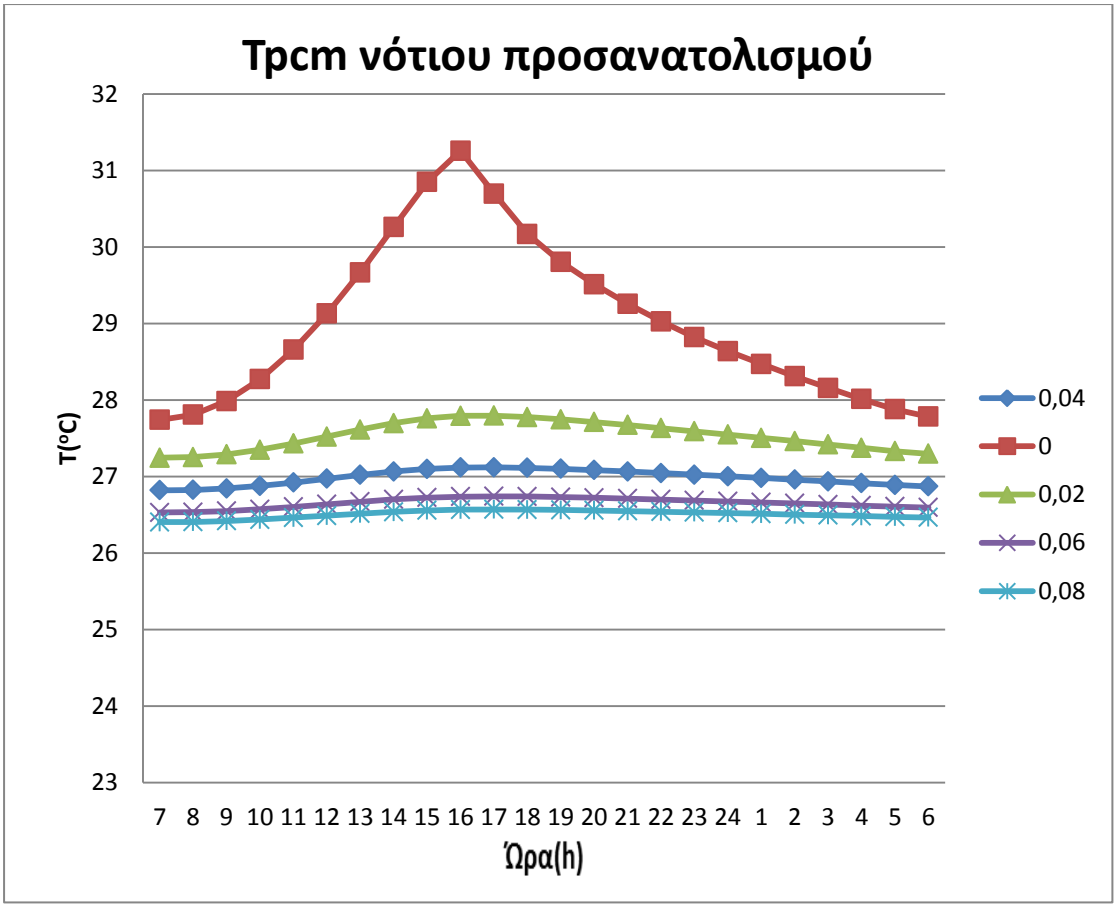


Σχήμα 7.2.1.55: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Ιουλίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

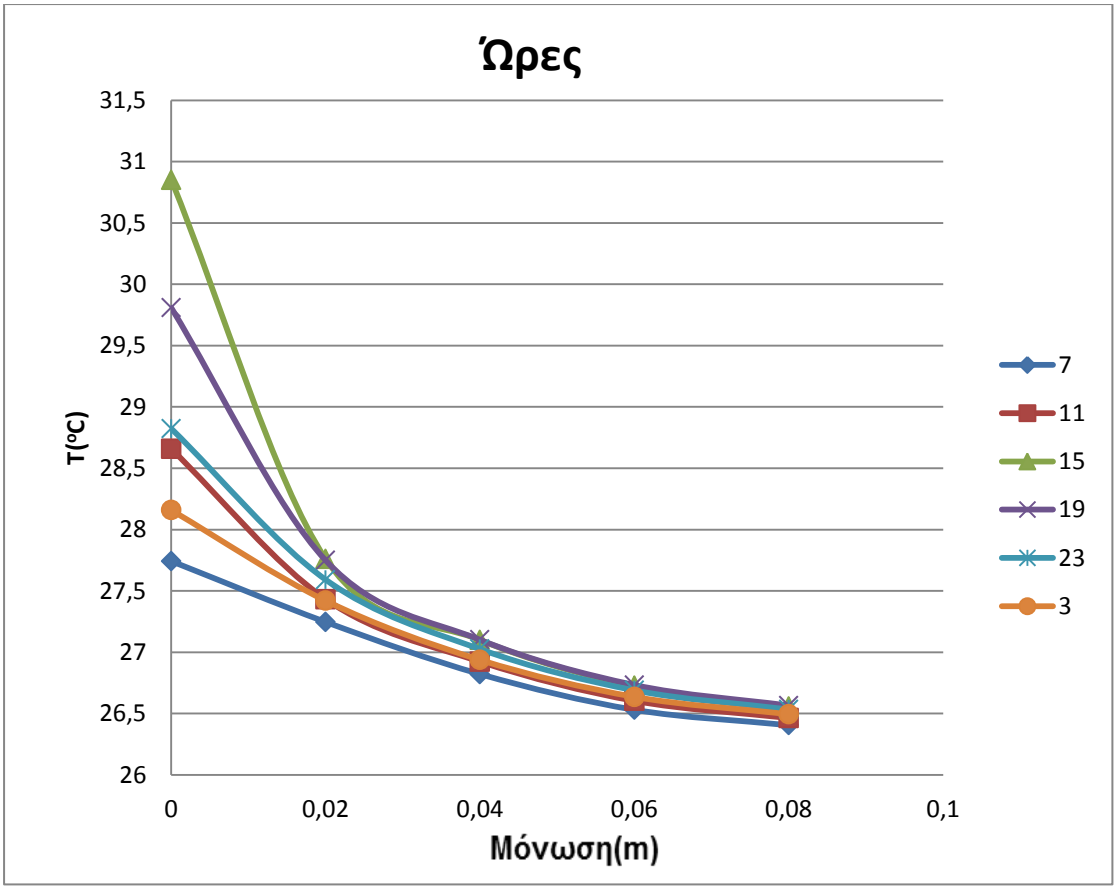


Σχήμα 7.2.1.56: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Ιουλίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

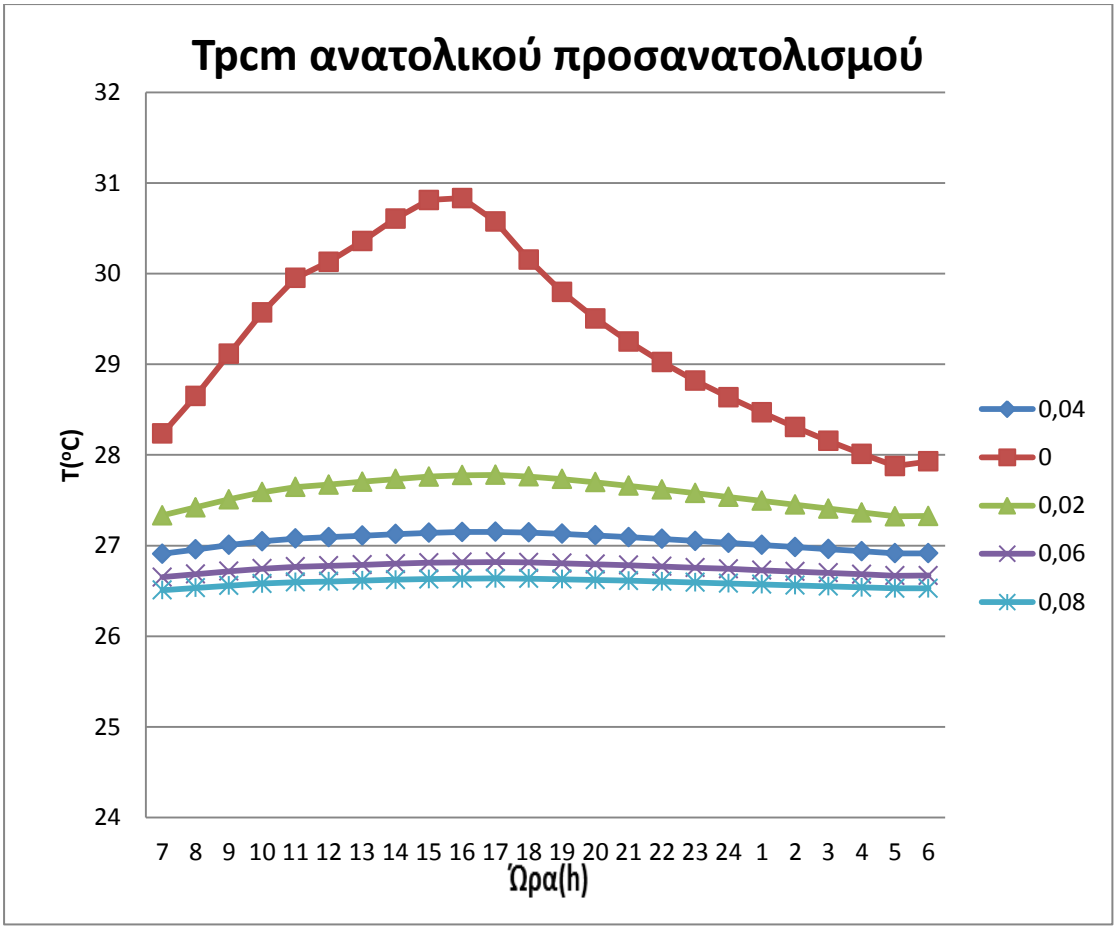
- Για την 21η Αυγούστου:



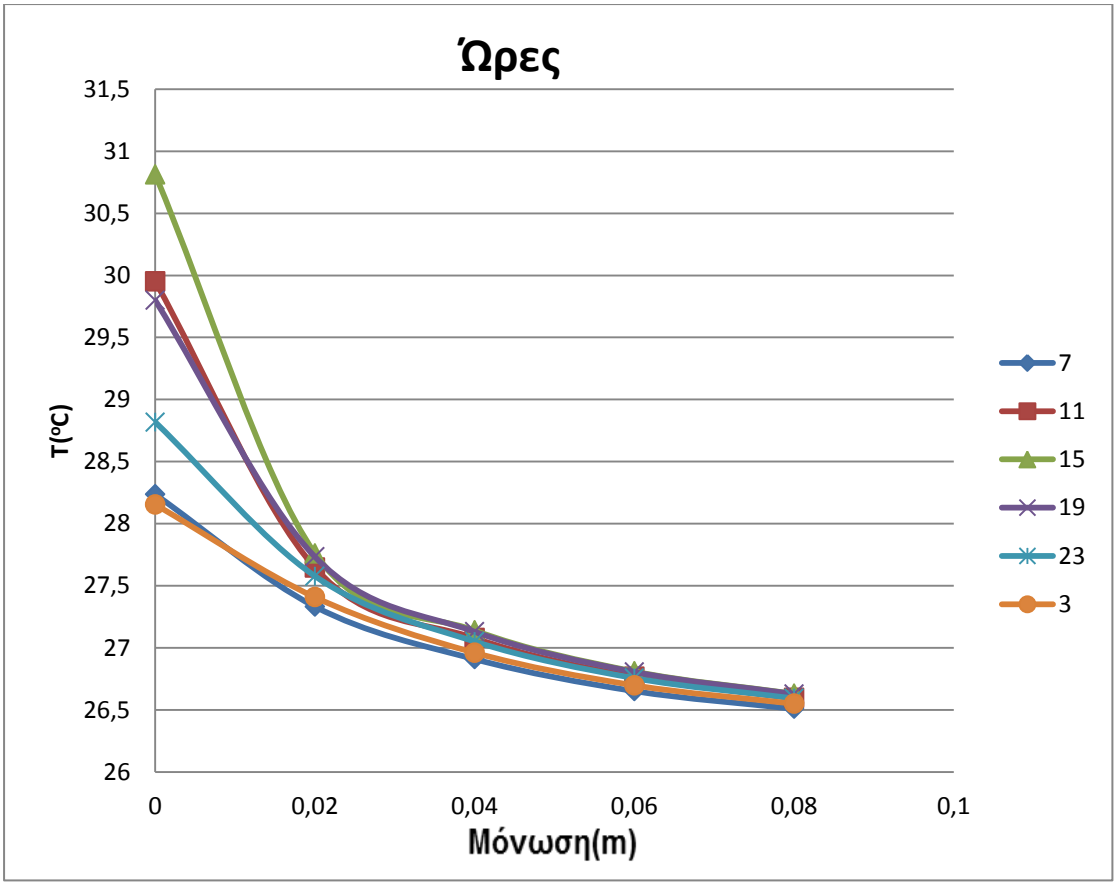
Σχήμα 7.2.1.57: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Αυγούστου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



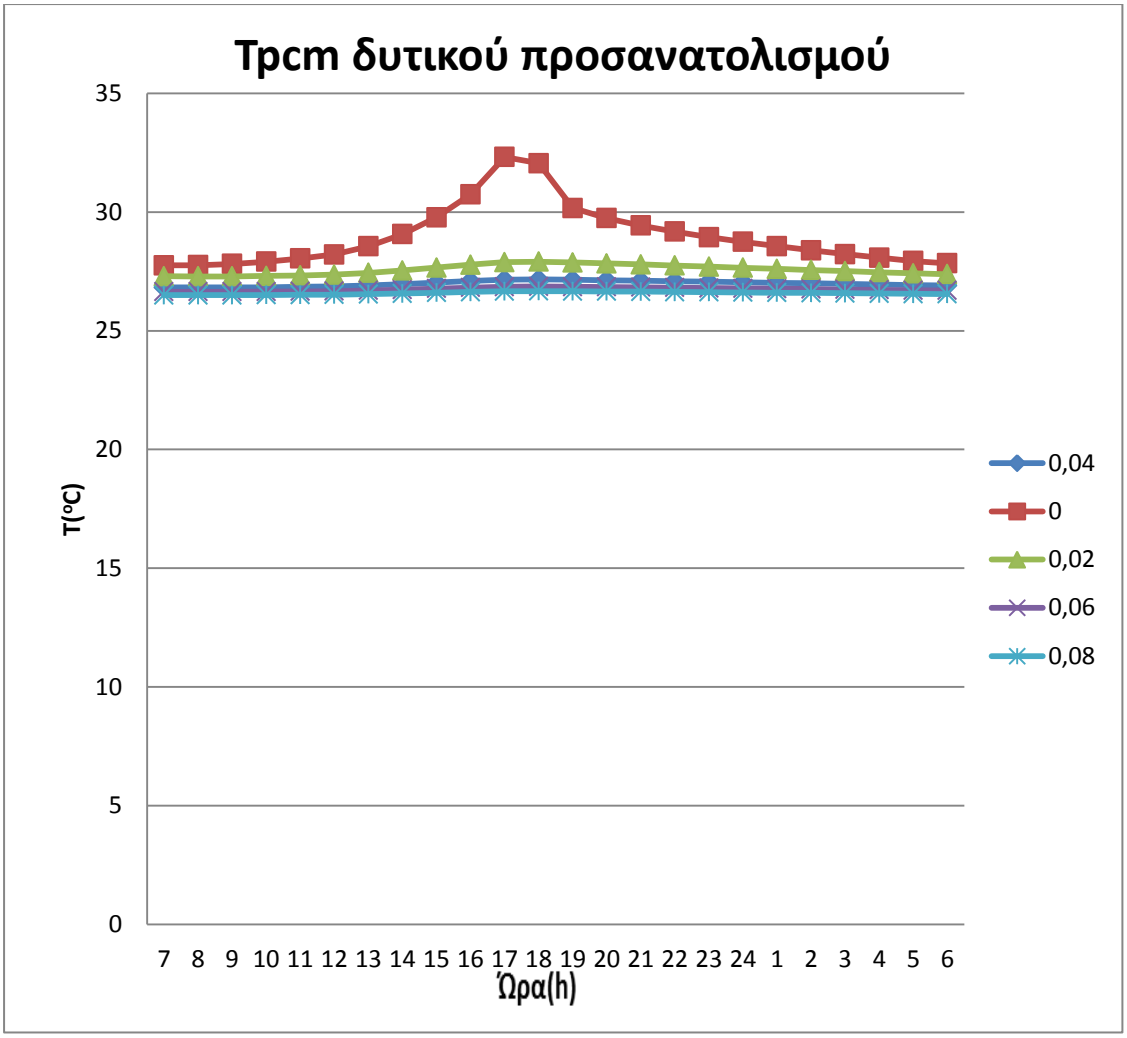
Σχήμα 7.2.1.58: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Αυγούστου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



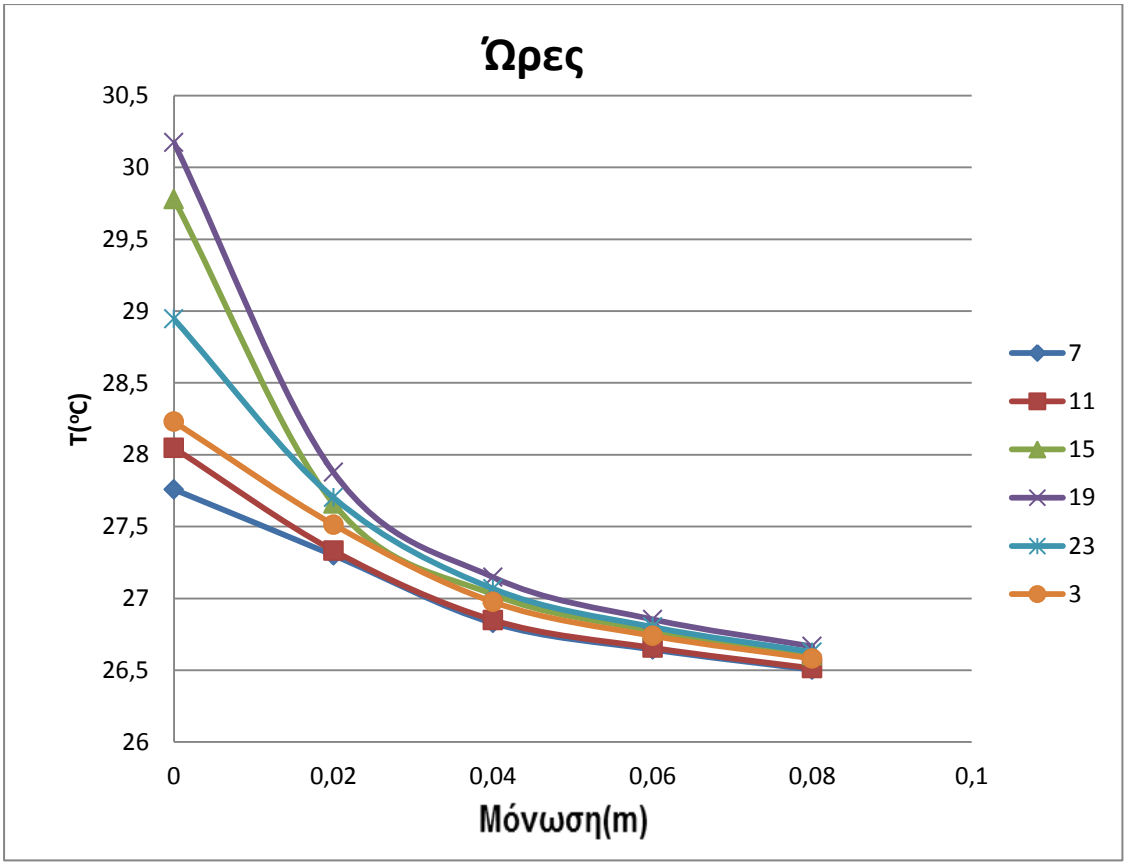
Σχήμα 7.2.1.59: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Αυγούστου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



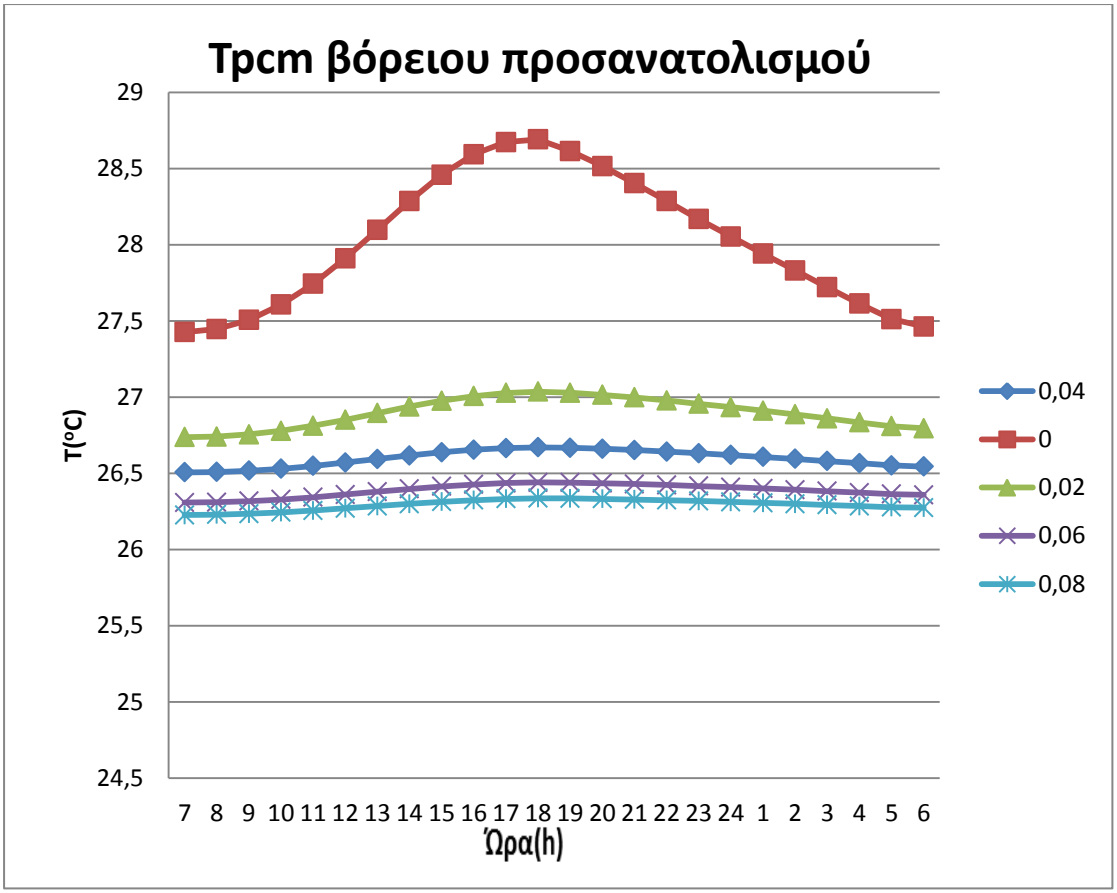
Σχήμα 7.2.1.60: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Αυγούστου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



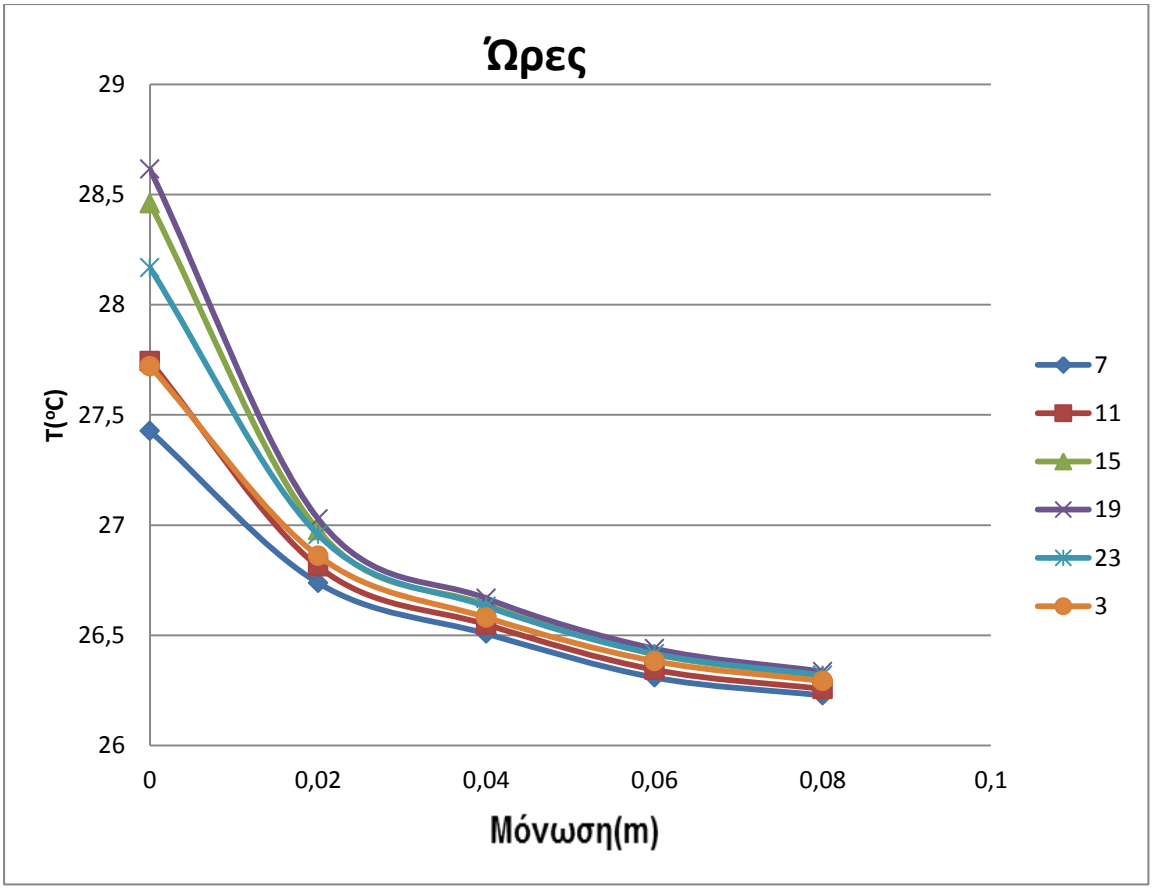
Σχήμα 7.2.1.61: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Αυγούστου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.62: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Αυγούστου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

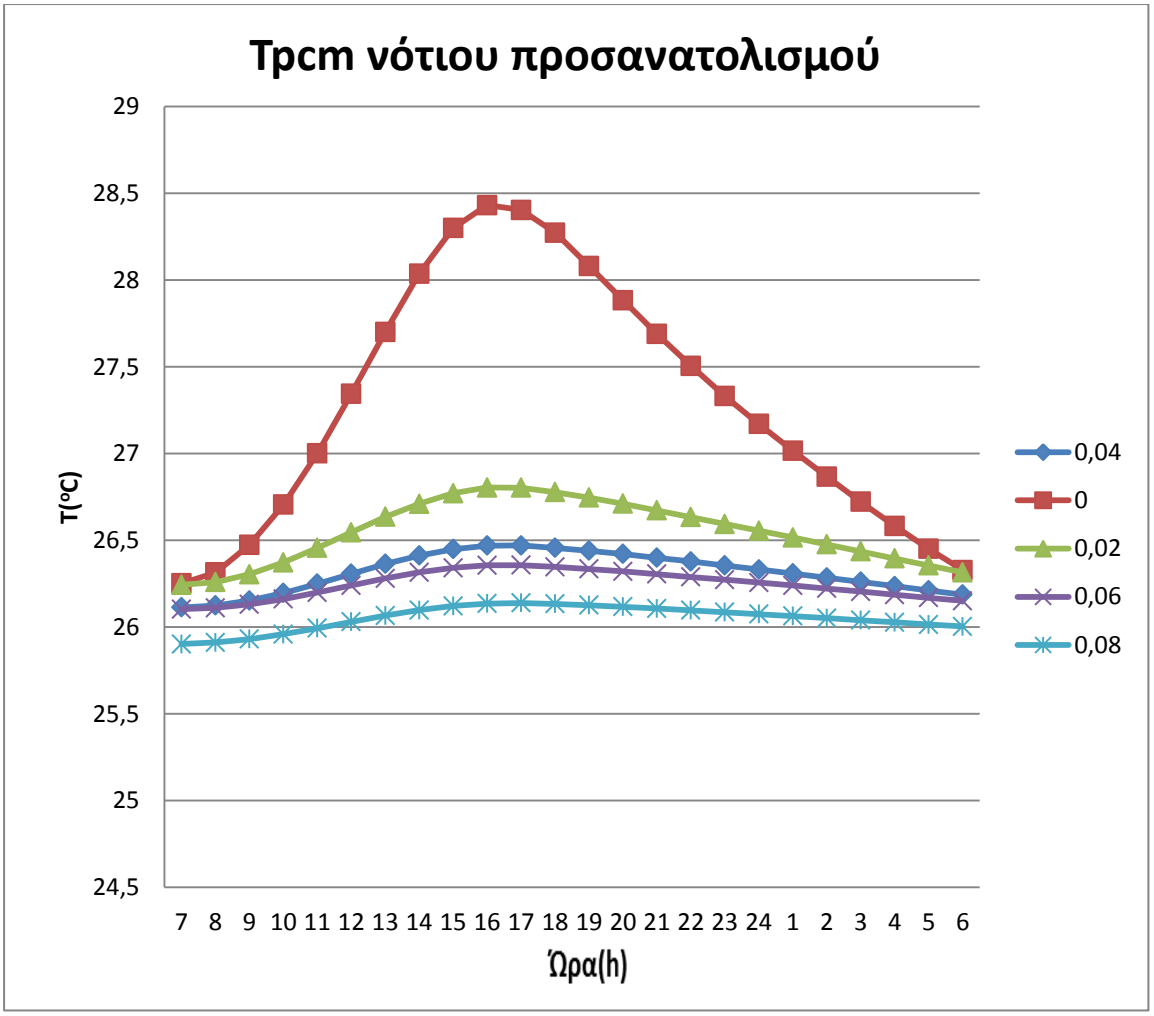


Σχήμα 7.2.1.63: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Αυγούστου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

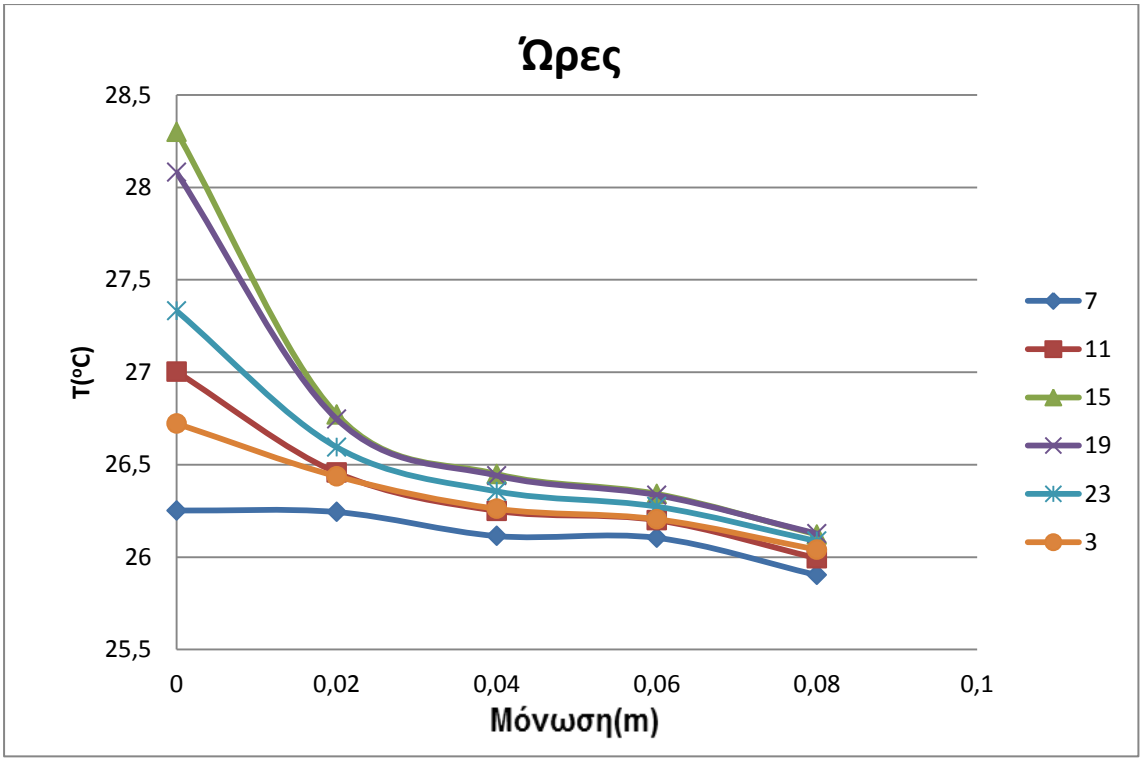


Σχήμα 7.2.1.64: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Αυγούστου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

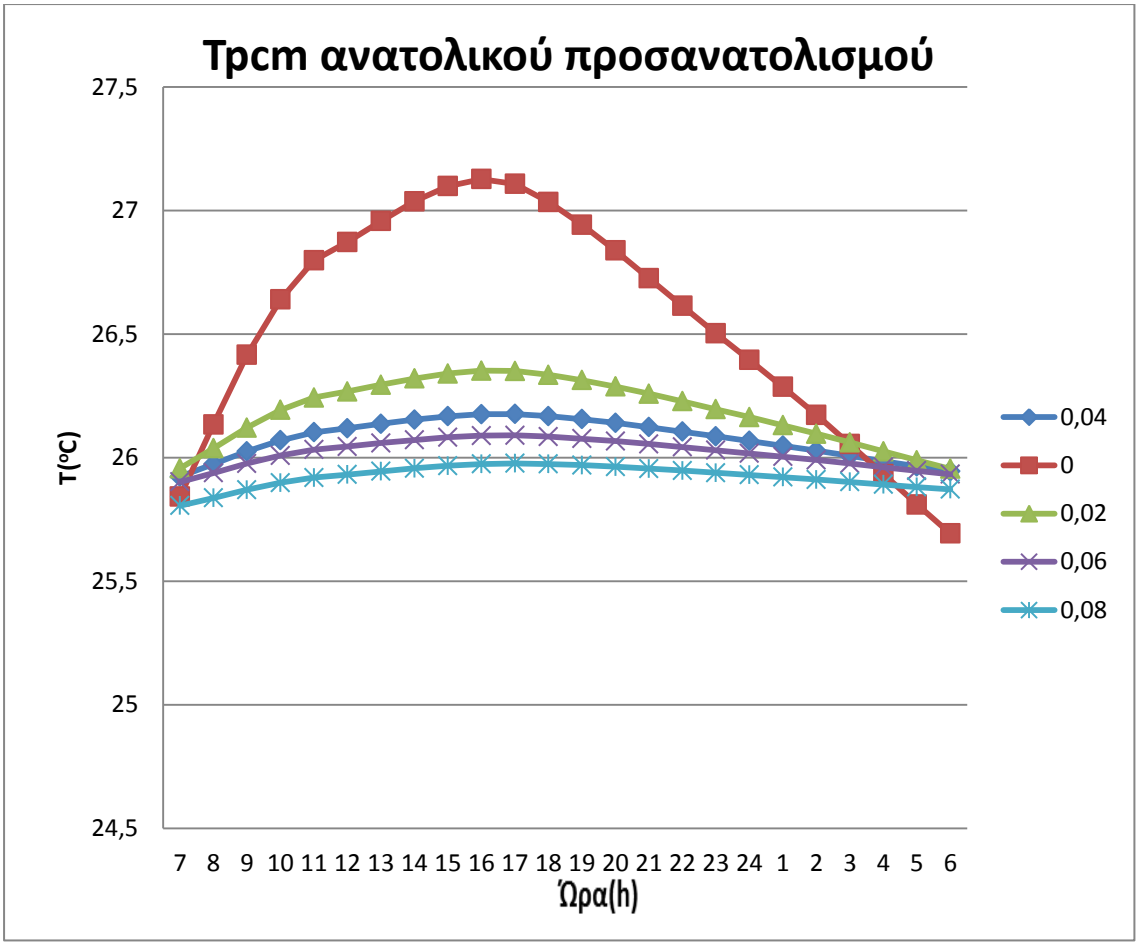
- Για την 21η Σεπτεμβρίου:



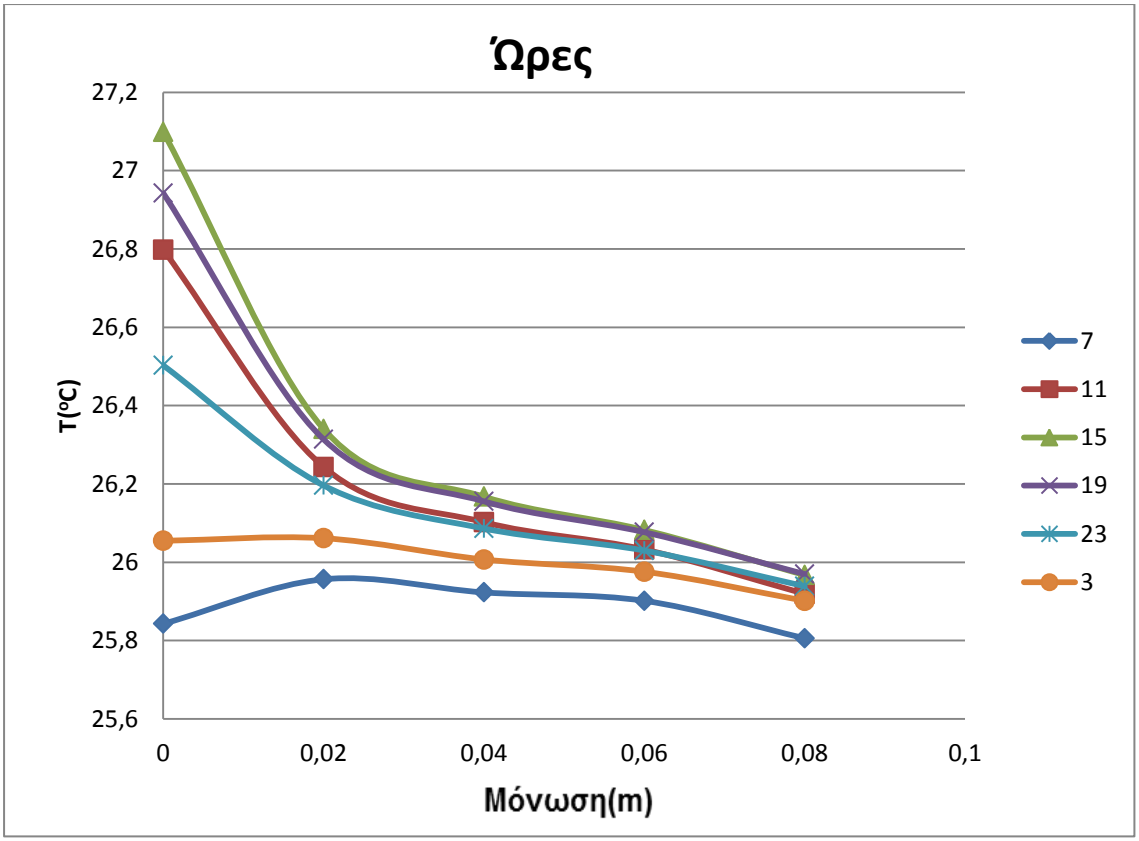
Σχήμα 7.2.1.65: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



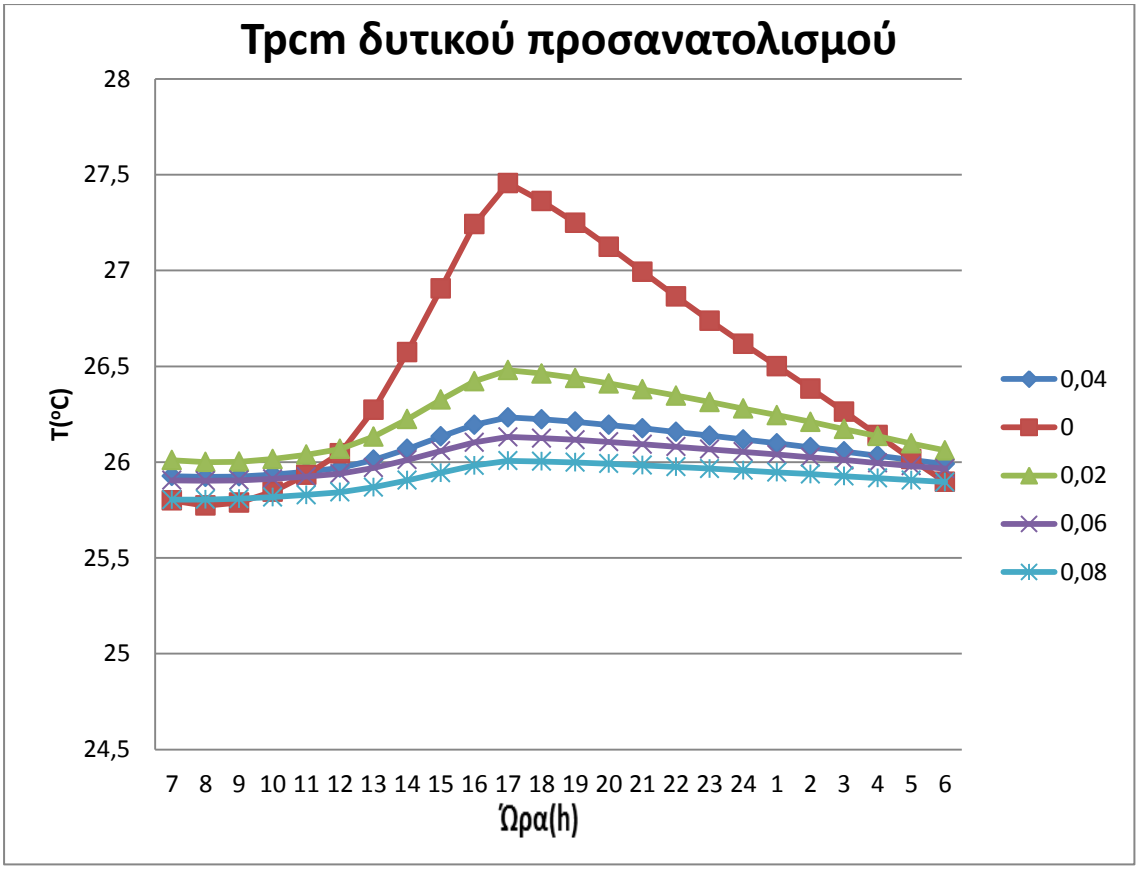
Σχήμα 7.2.1.66: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



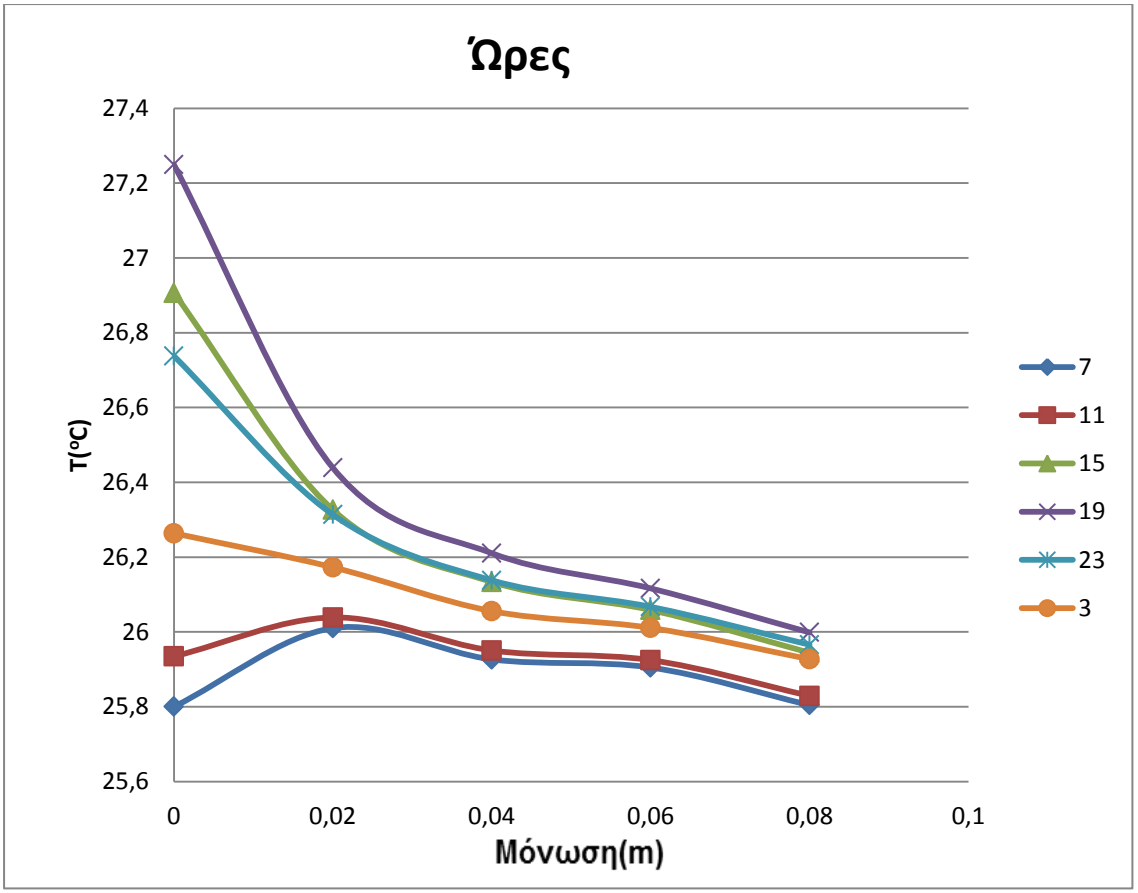
Σχήμα 7.2.1.67: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



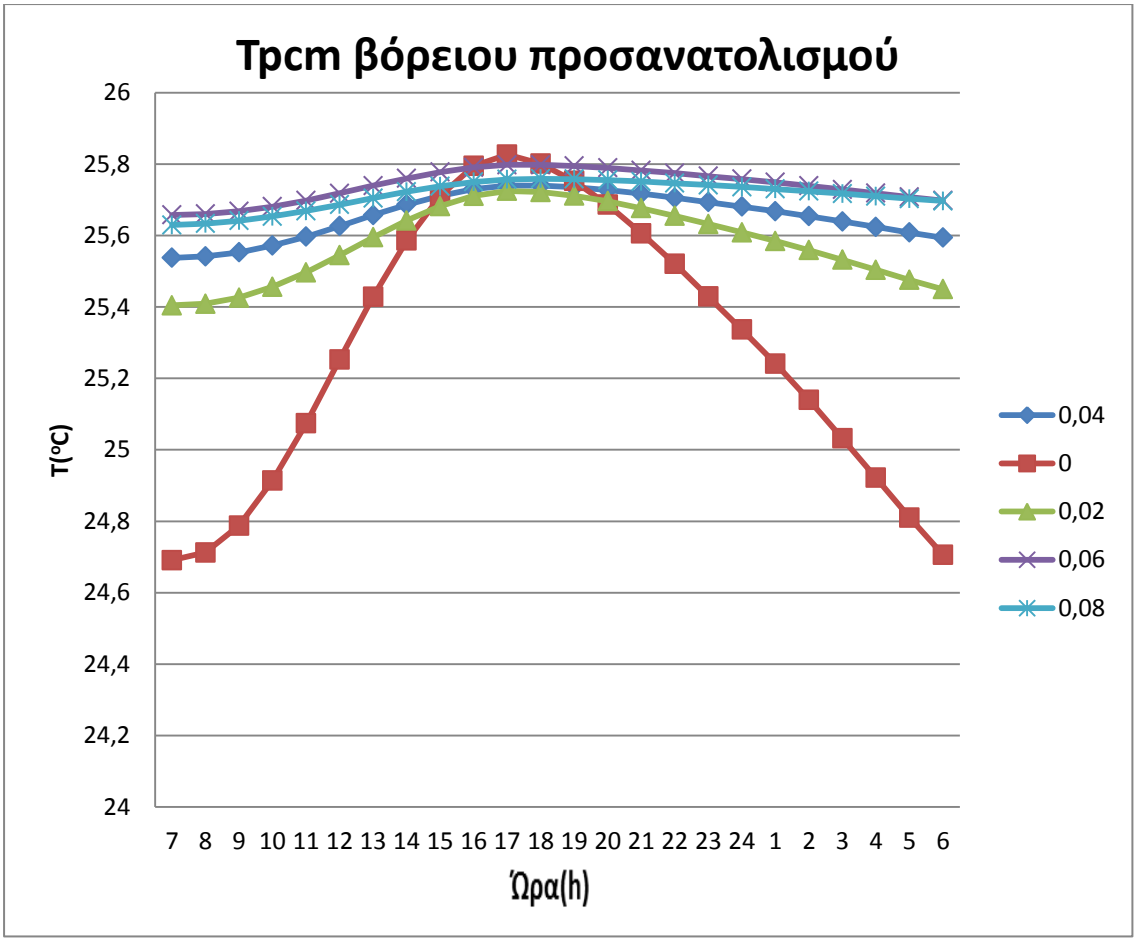
Σχήμα 7.2.1.68: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



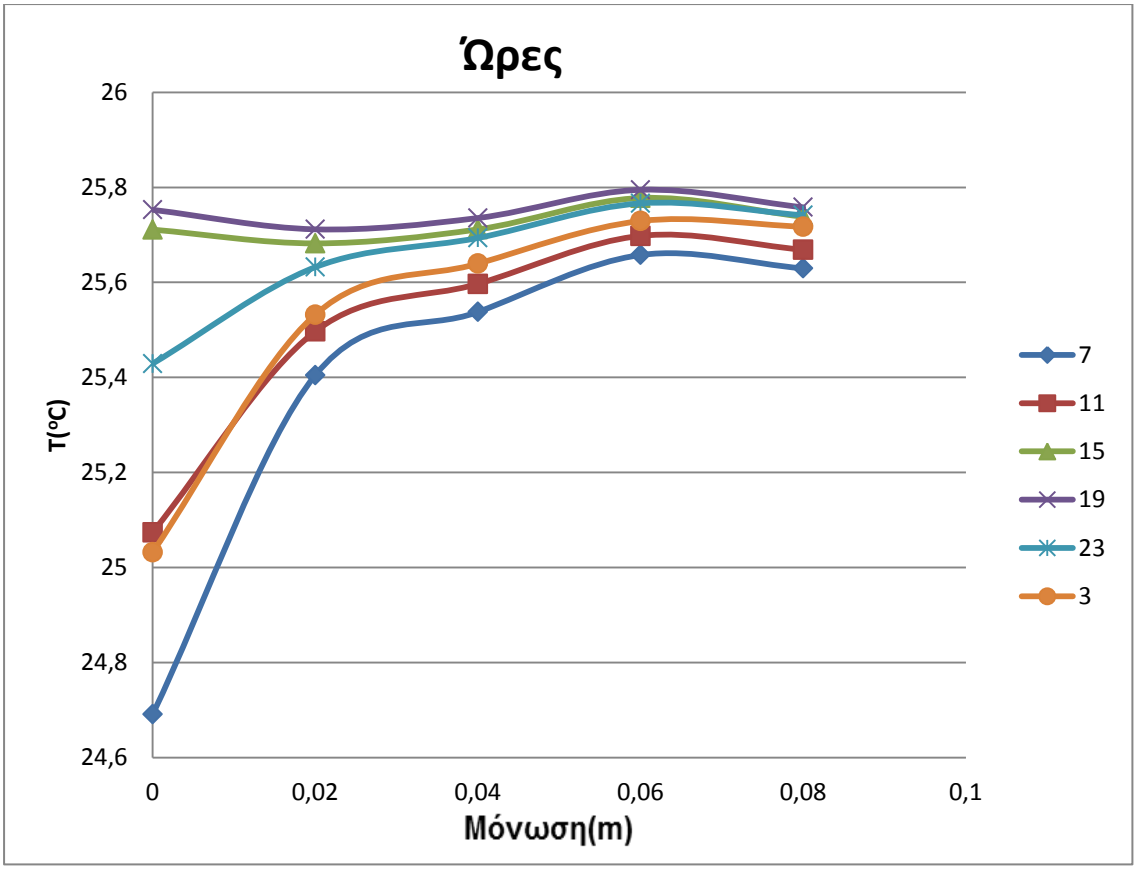
Σχήμα 7.2.1.69: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο δύτικου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.70: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο δύτικου προσανατολισμού.

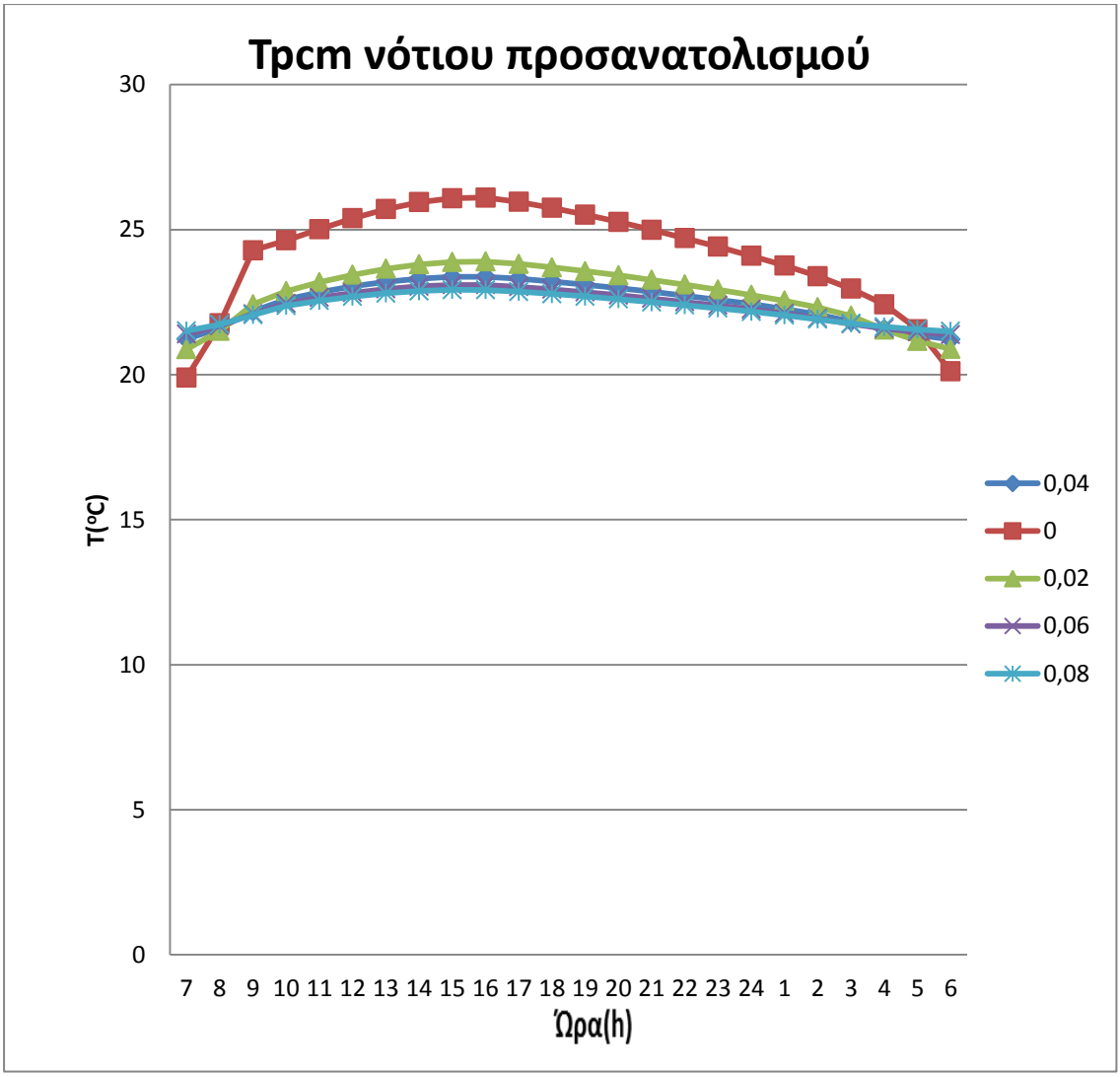


Σχήμα 7.2.1.71: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

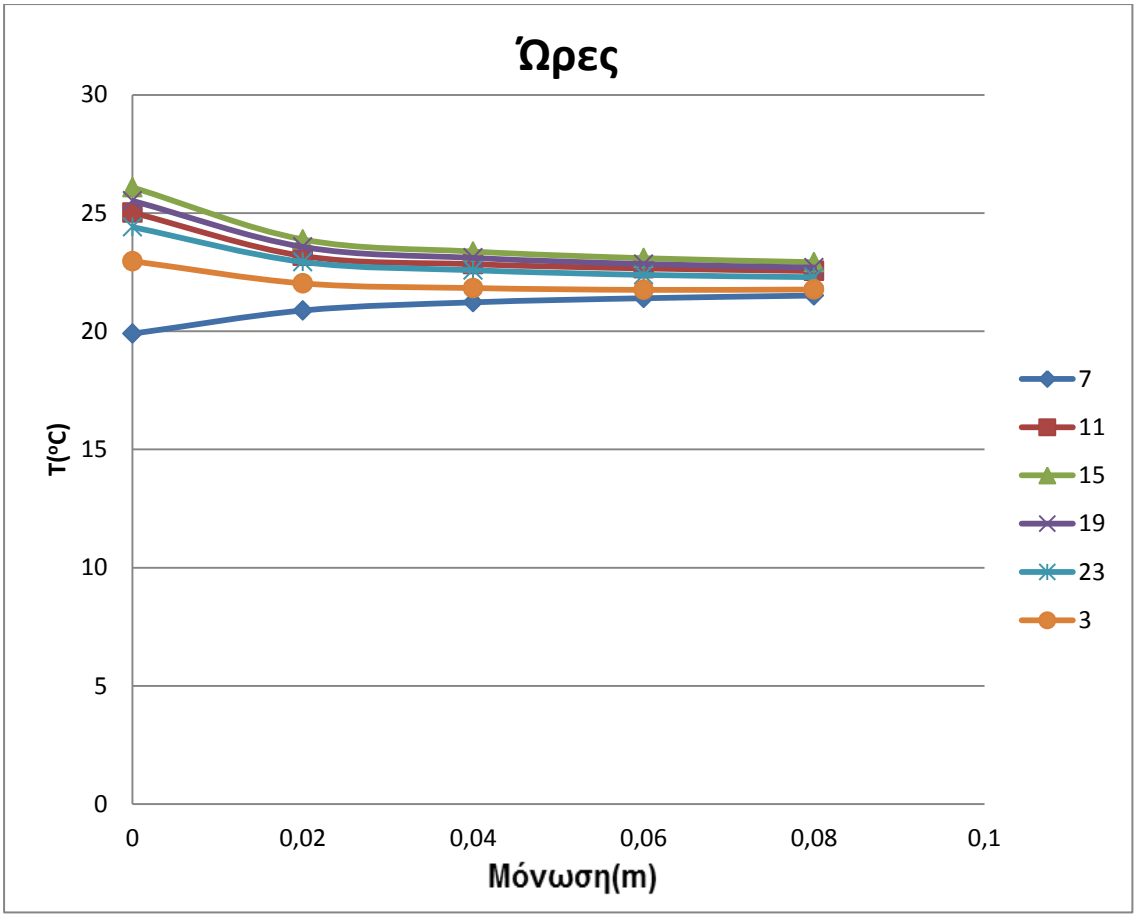


Σχήμα 7.2.1.72: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

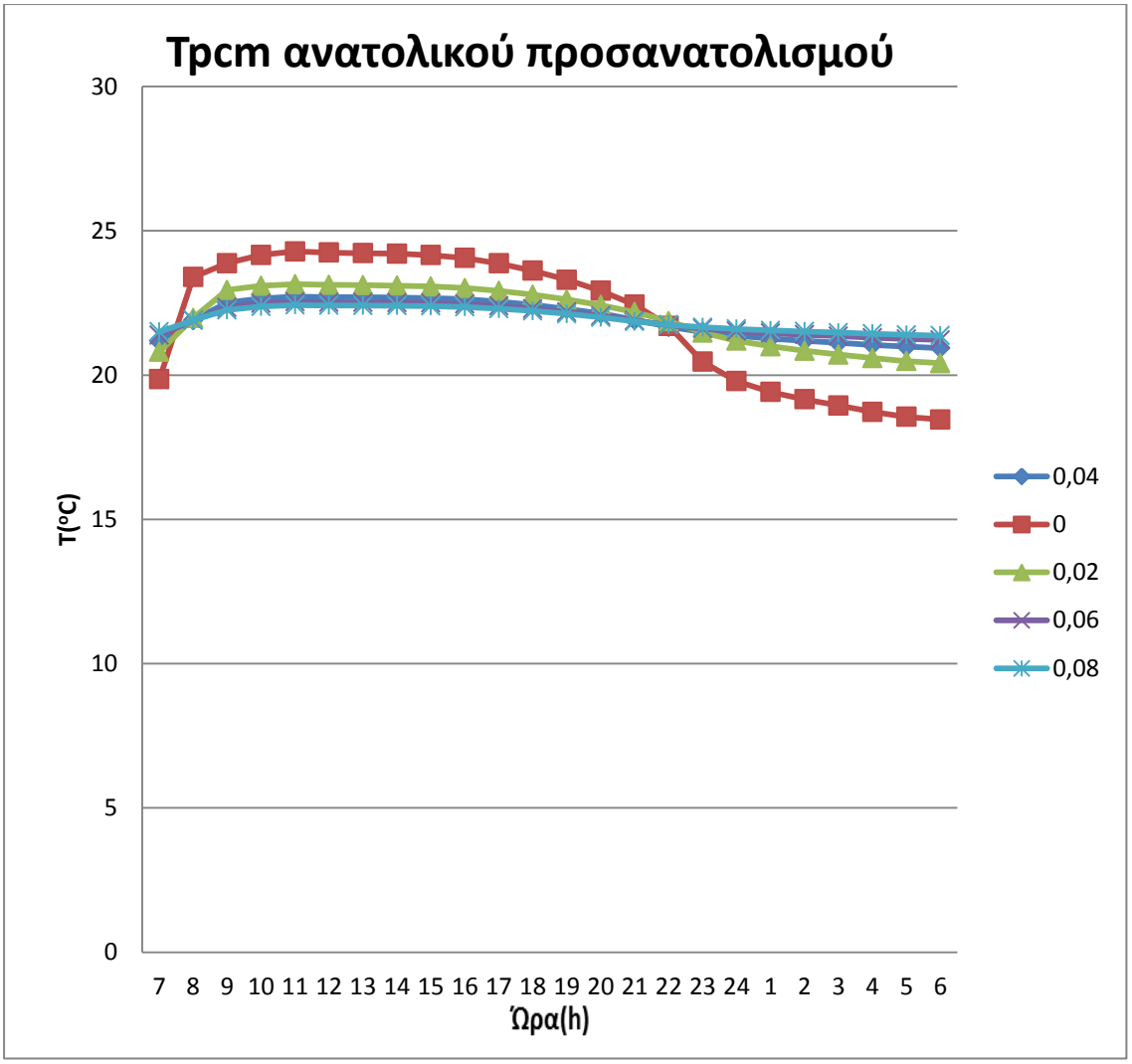
- Για την 21η Οκτωβρίου:



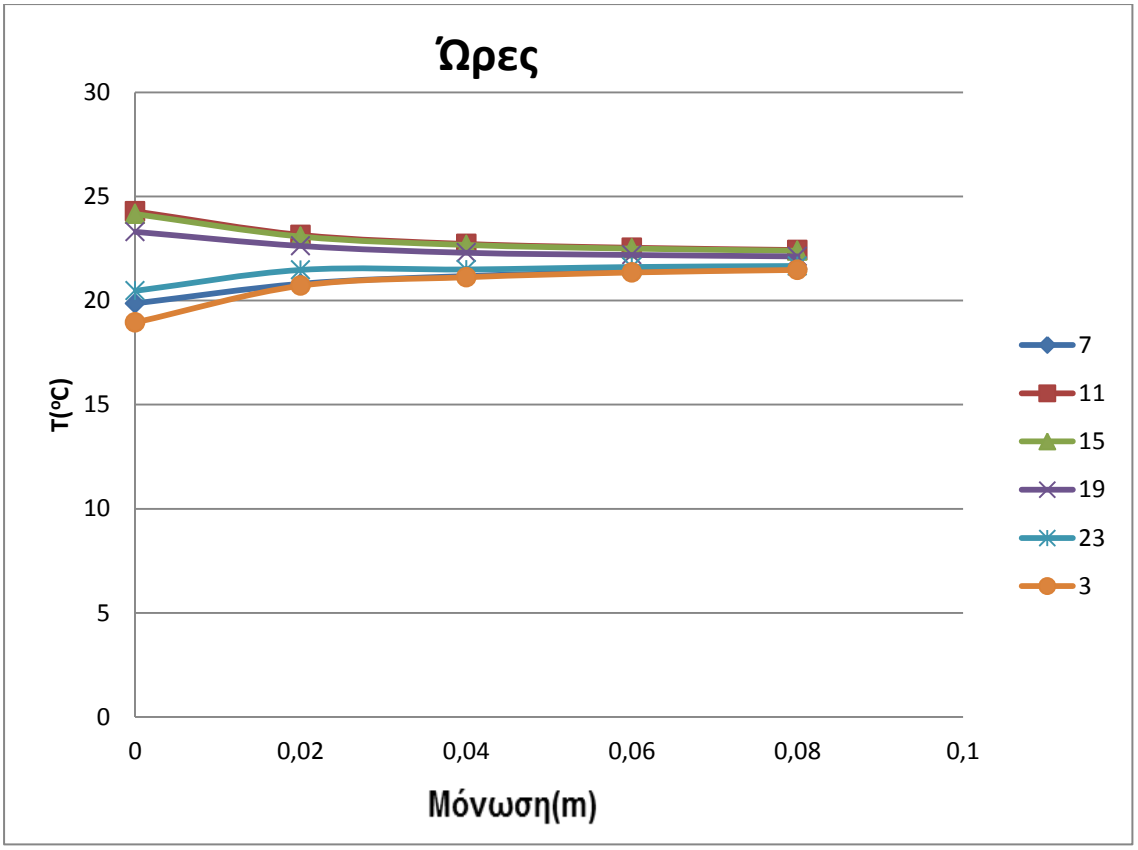
Σχήμα 7.2.1.73: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



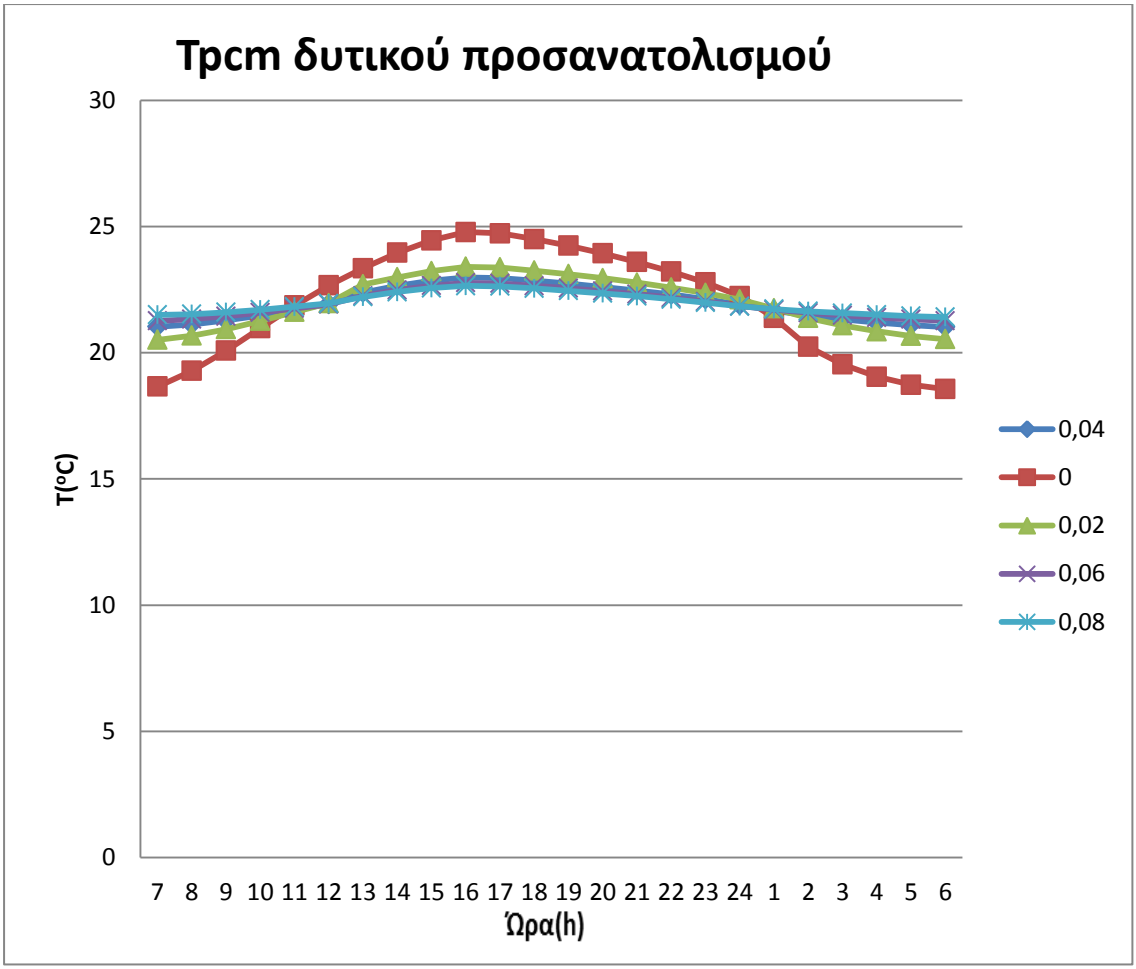
Σχήμα 7.2.1.74: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



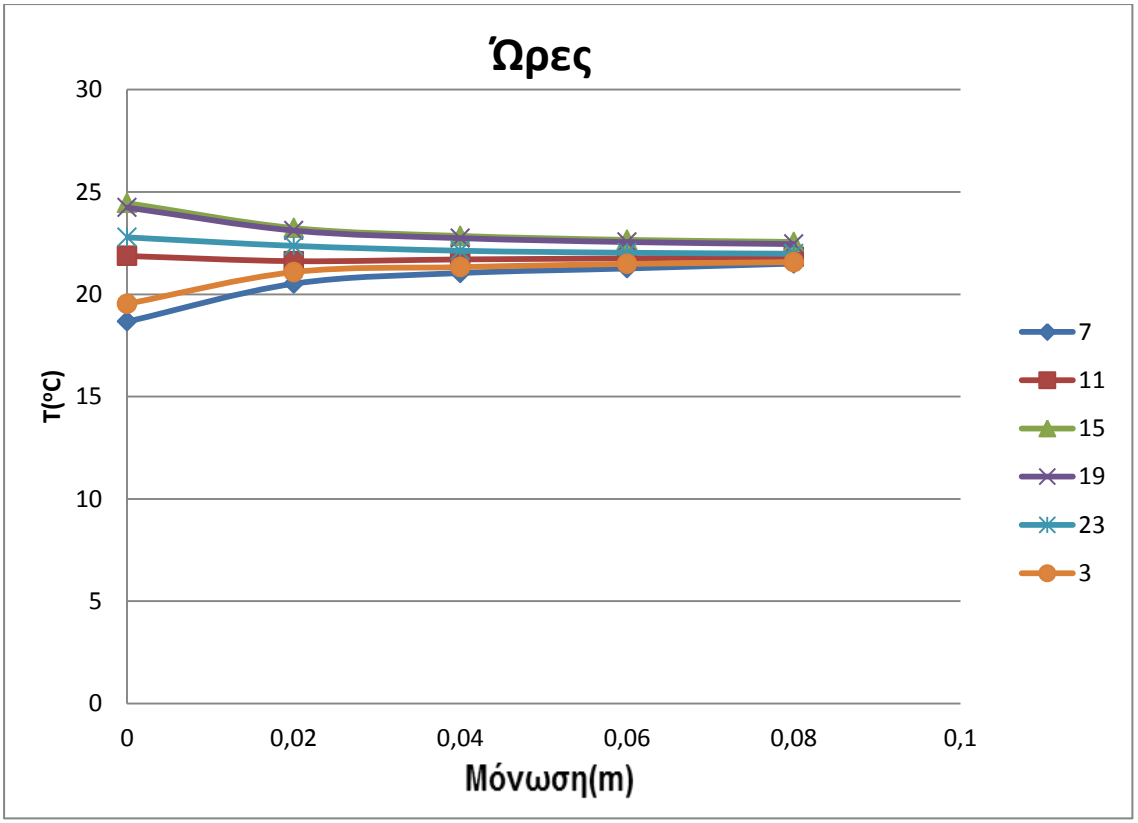
Σχήμα 7.2.1.75: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



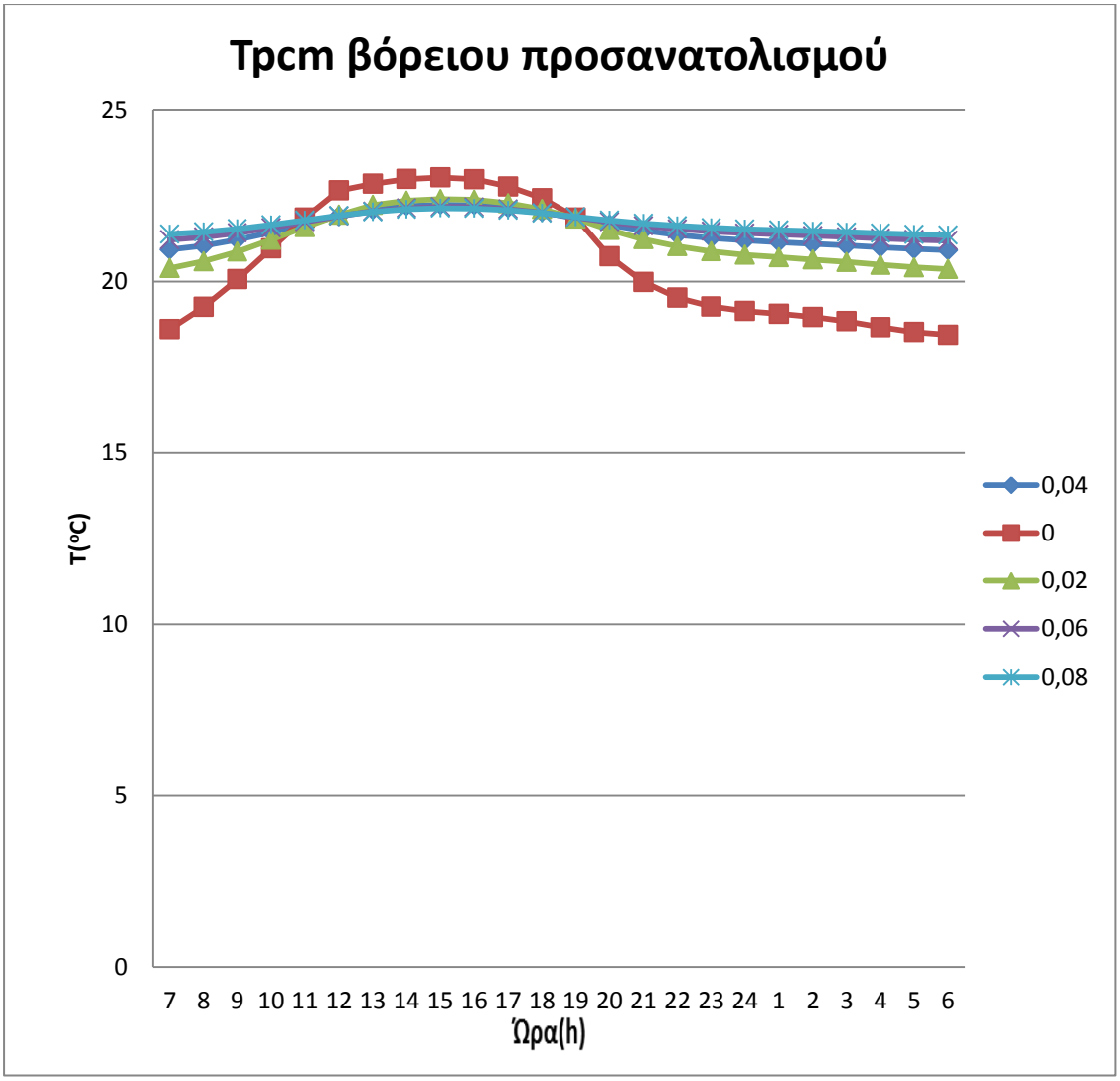
Σχήμα 7.2.1.76: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



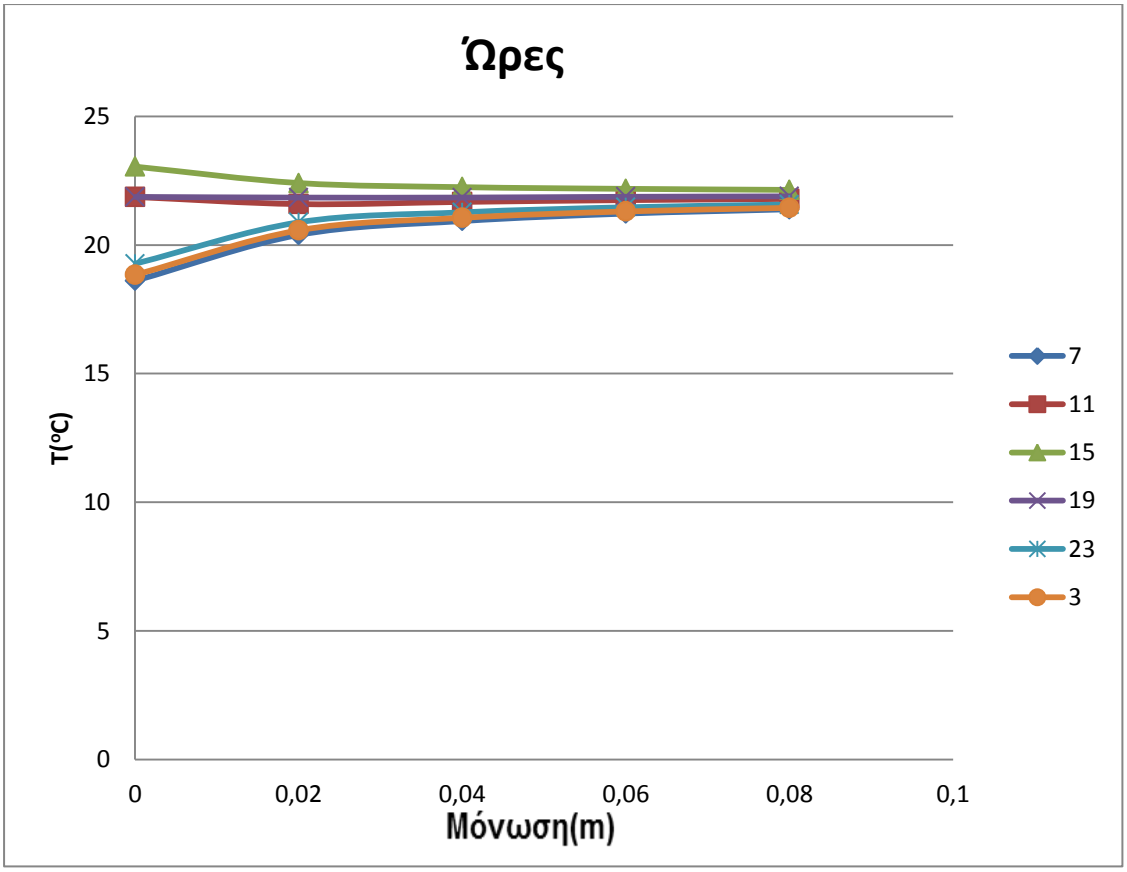
Σχήμα 7.2.1.77: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.78: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

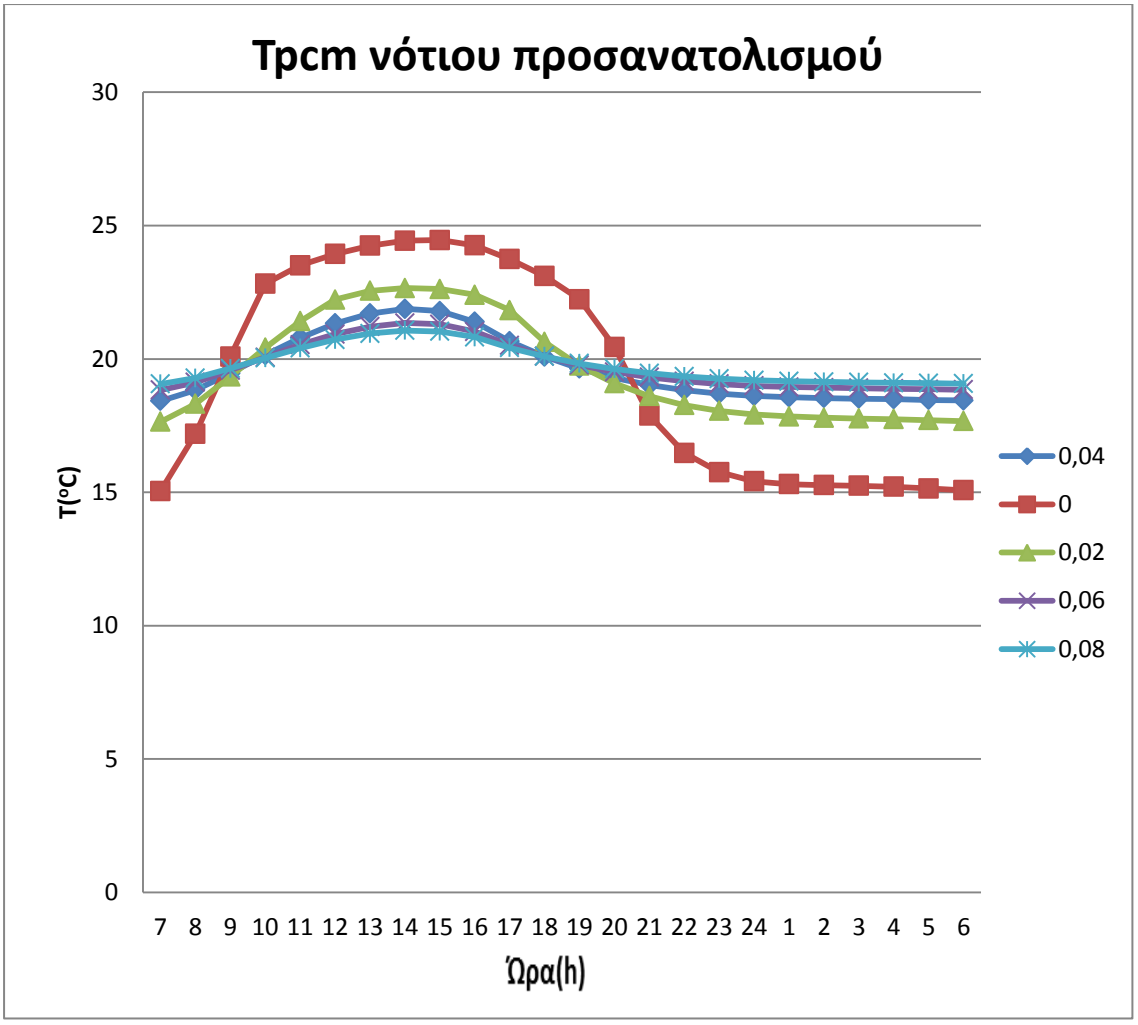


Σχήμα 7.2.1.79: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

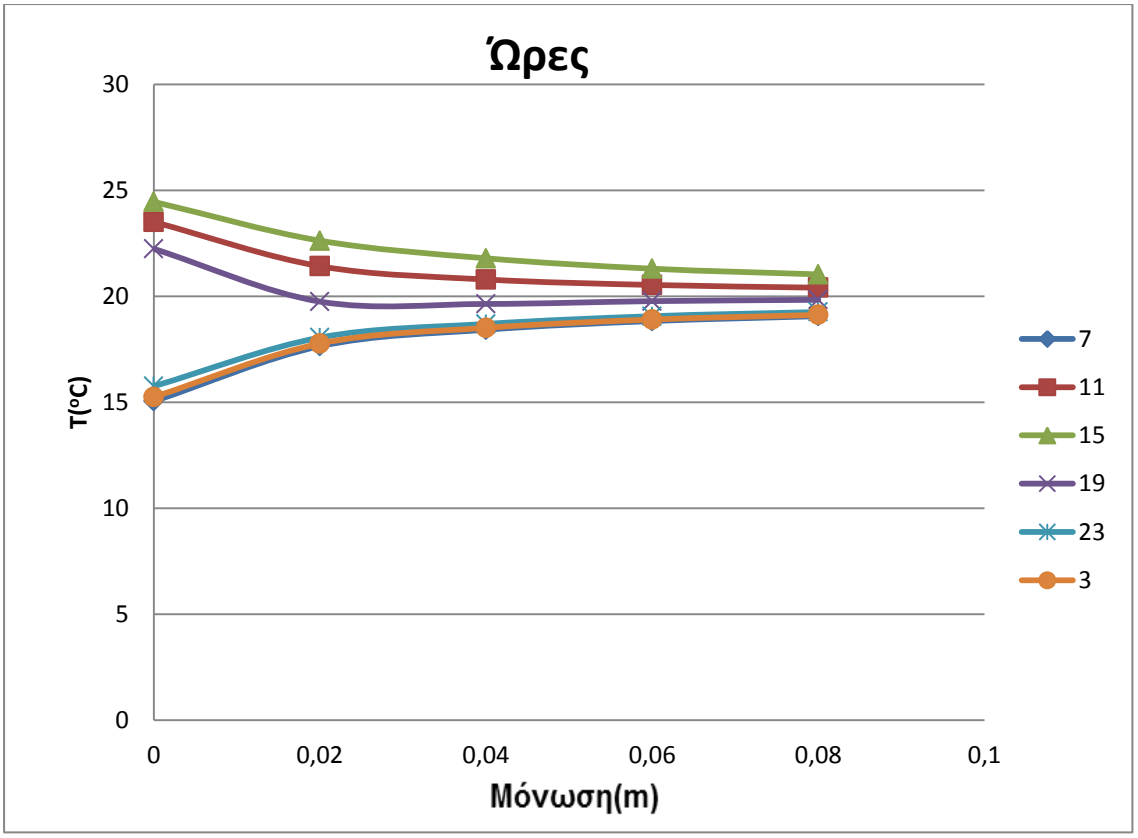


Σχήμα 7.2.1.80: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

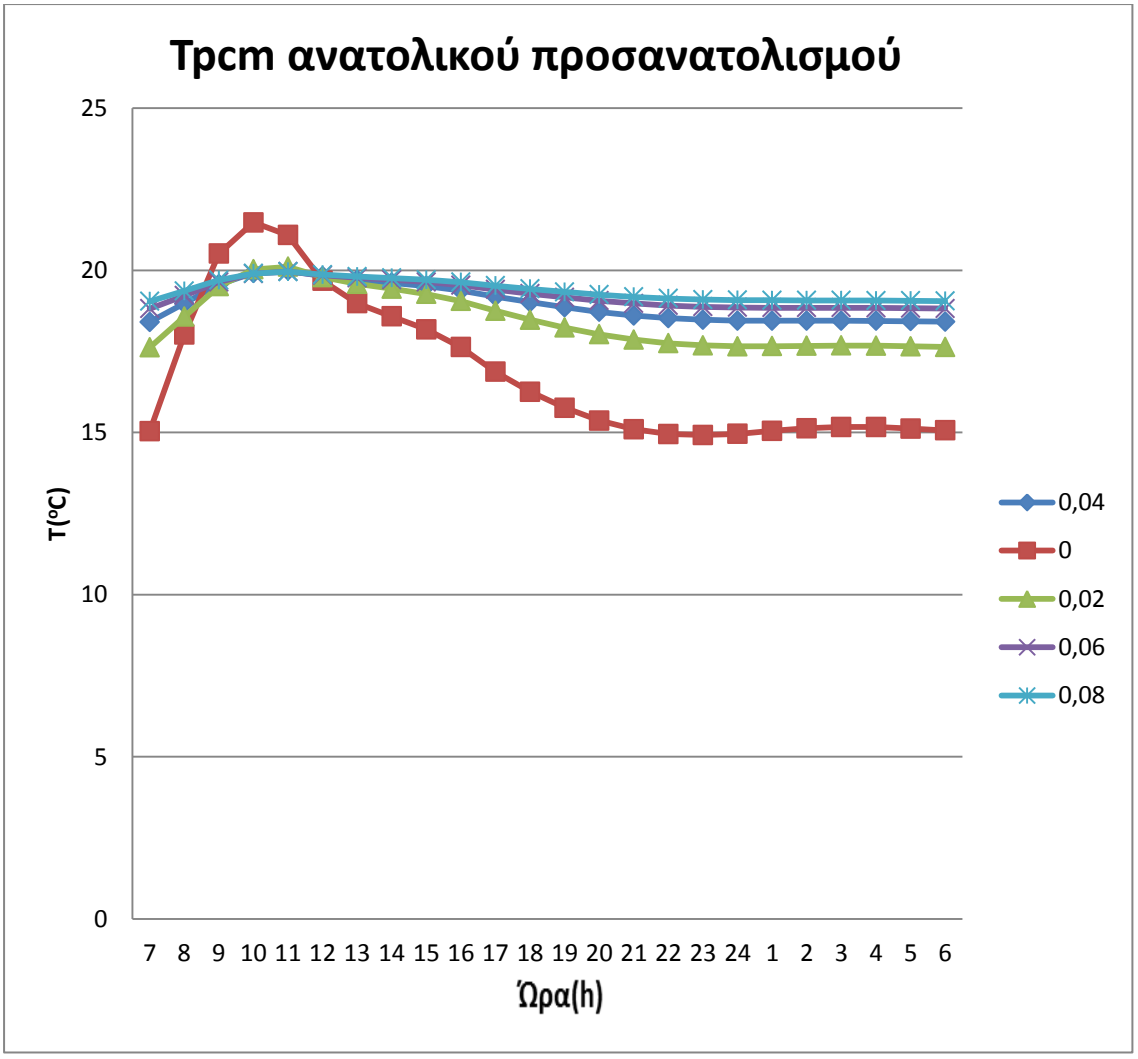
- Για την 21η Νοεμβρίου:



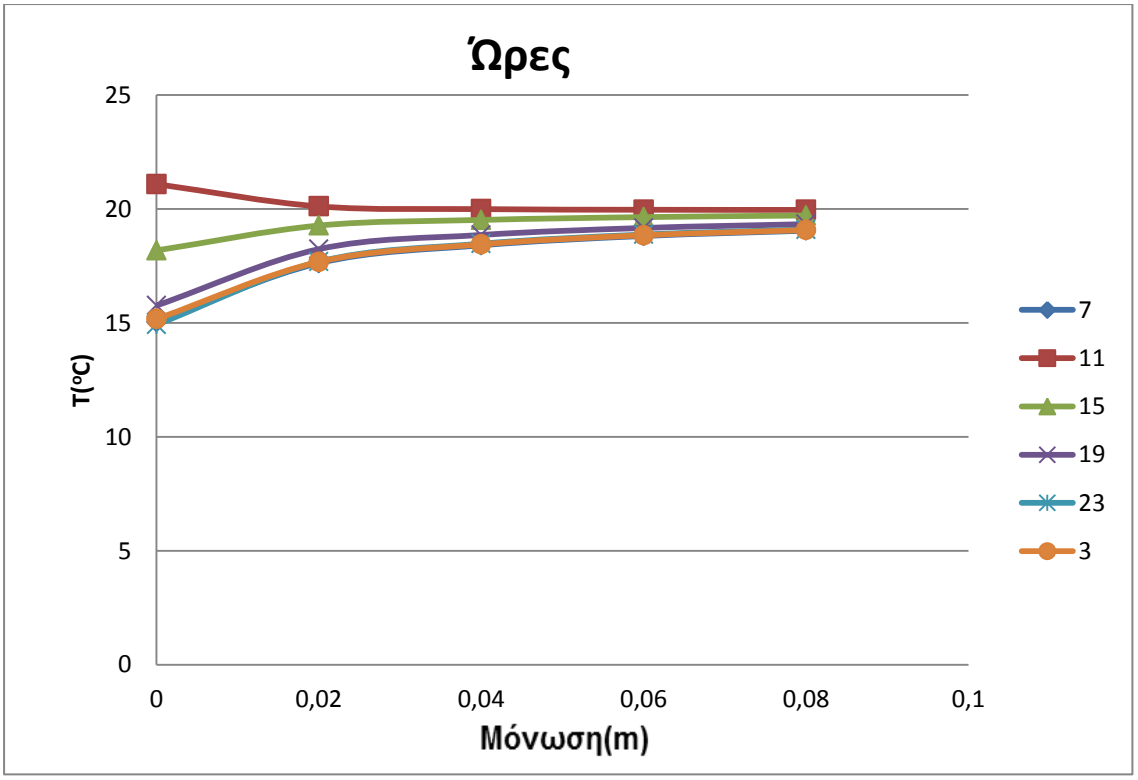
Σχήμα 7.2.1.81: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



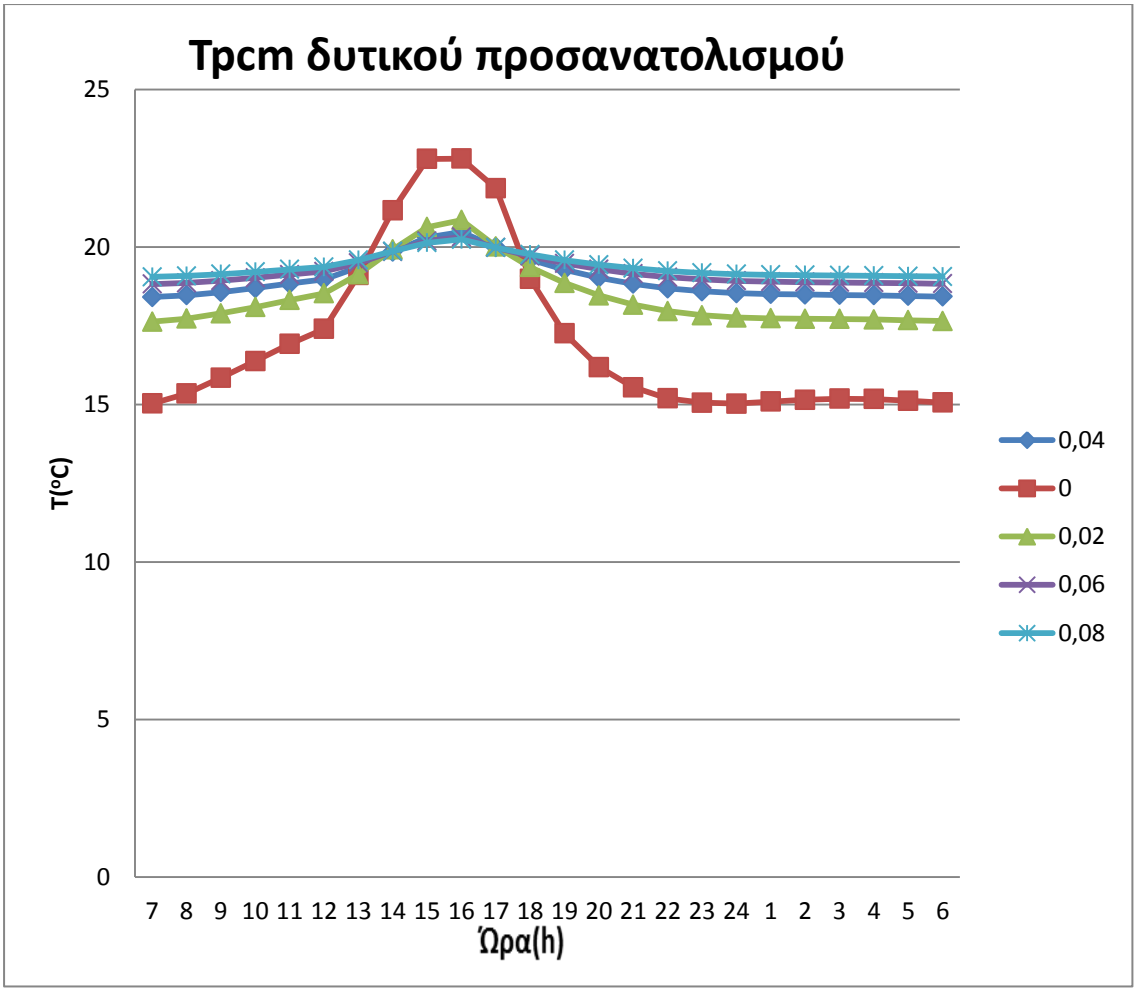
Σχήμα 7.2.1.82: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



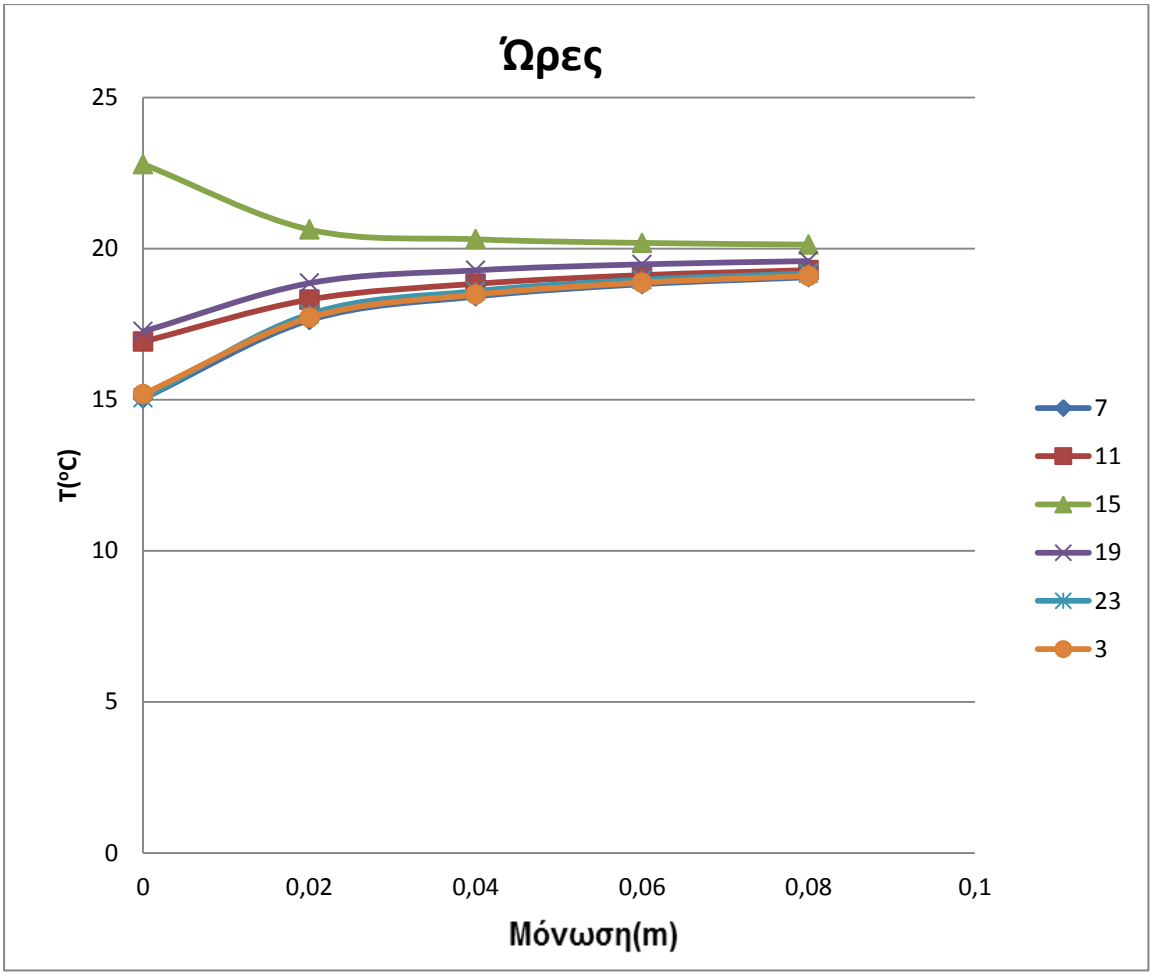
Σχήμα 7.2.1.83: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



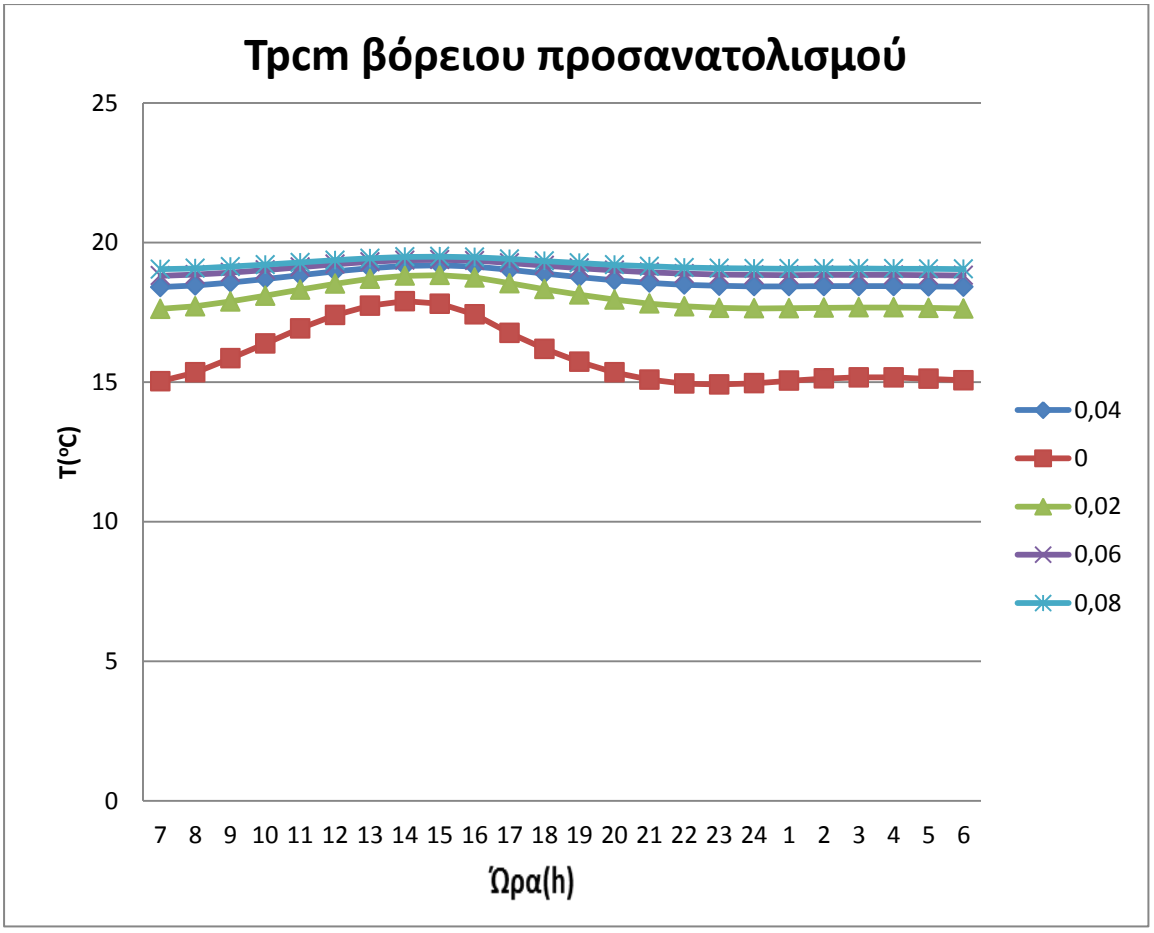
Σχήμα 7.2.1.84: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



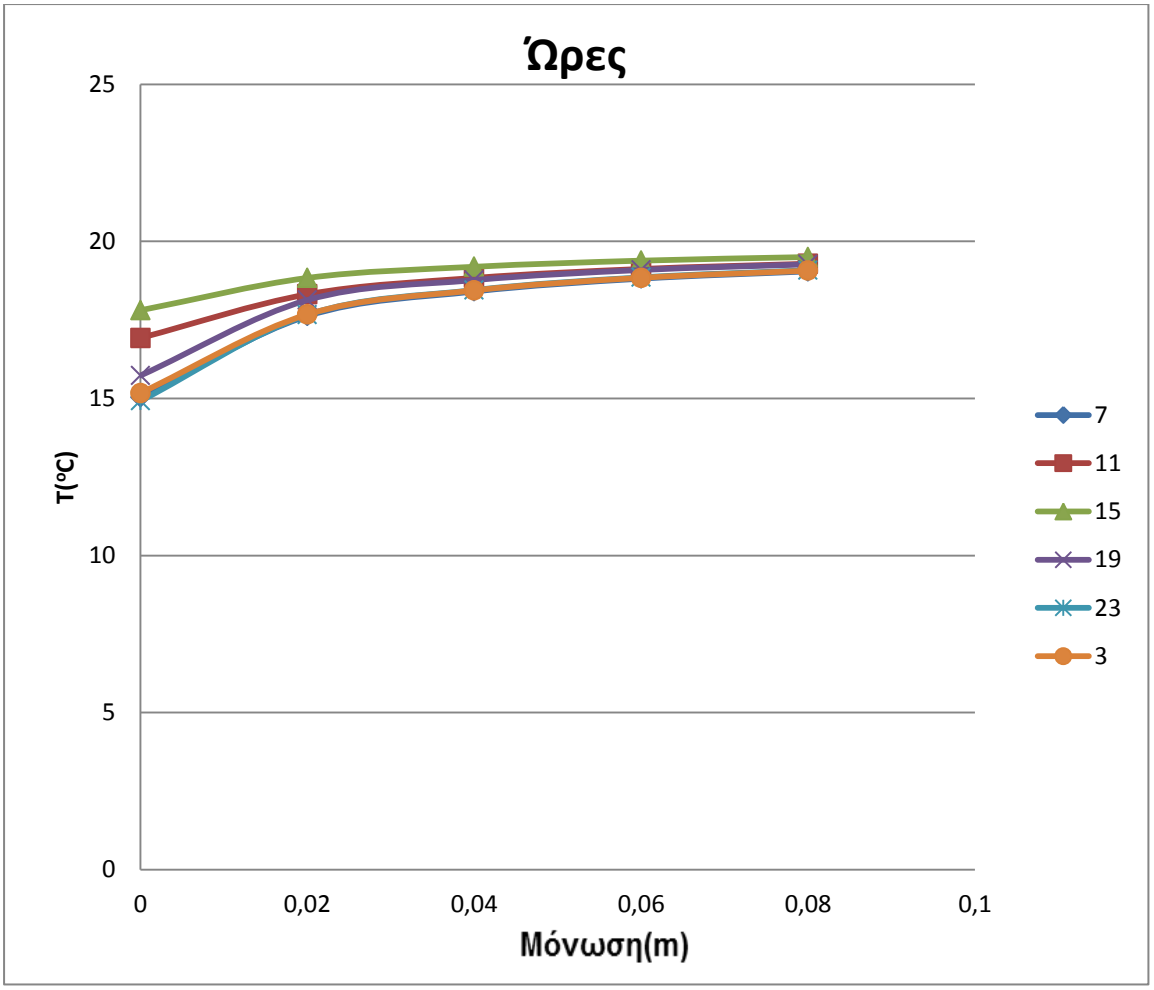
Σχήμα 7.2.1.85: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.86: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.

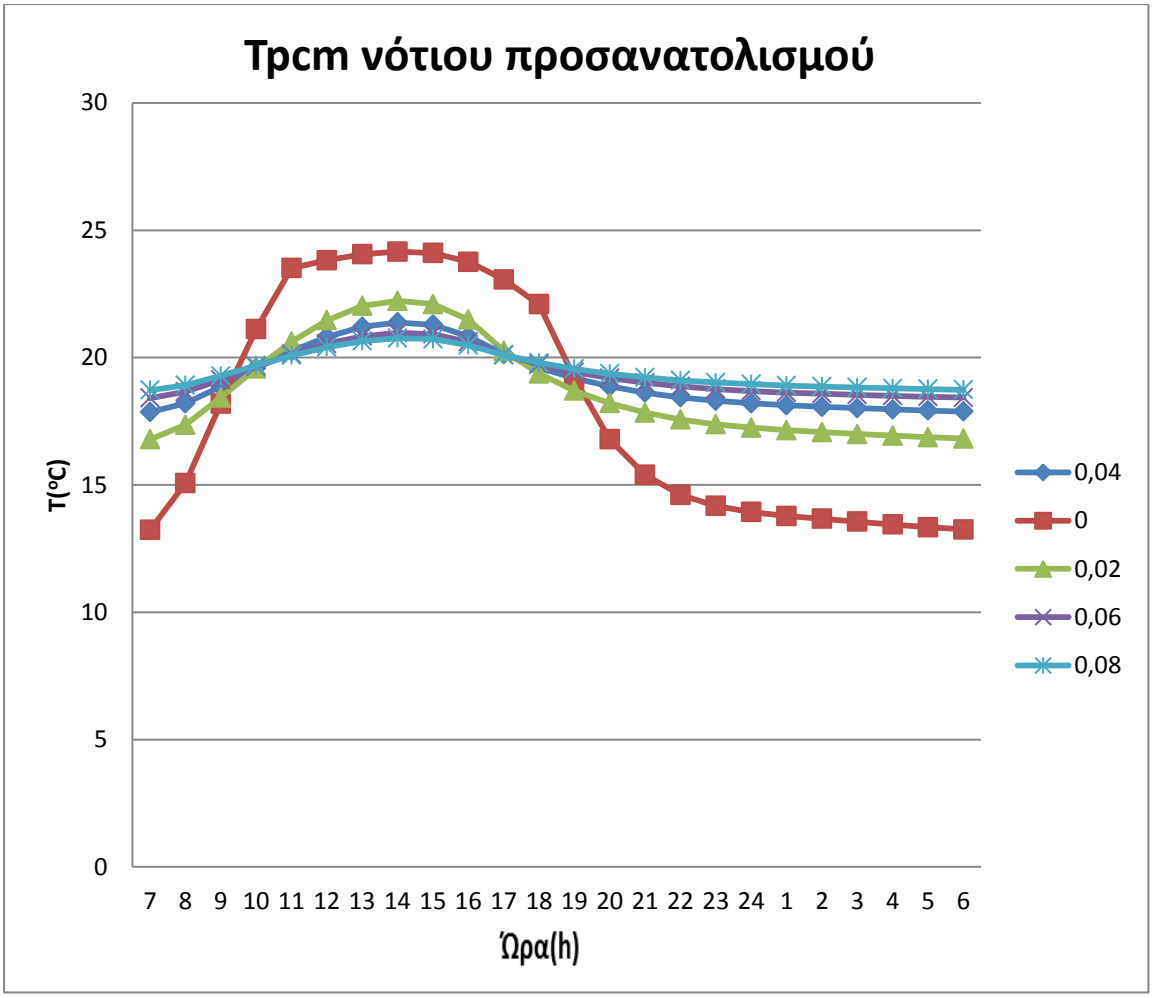


Σχήμα 7.2.1.87: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

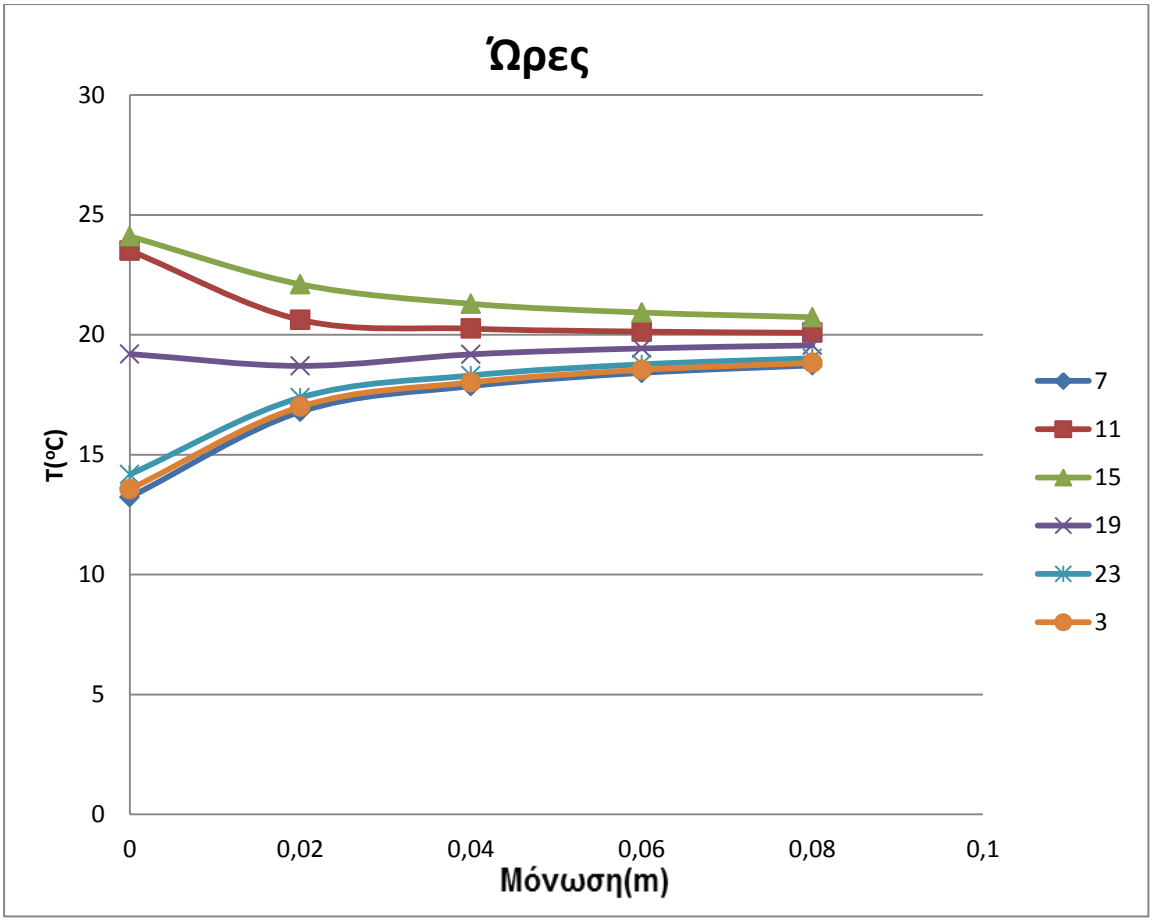


Σχήμα 7.2.1.88: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

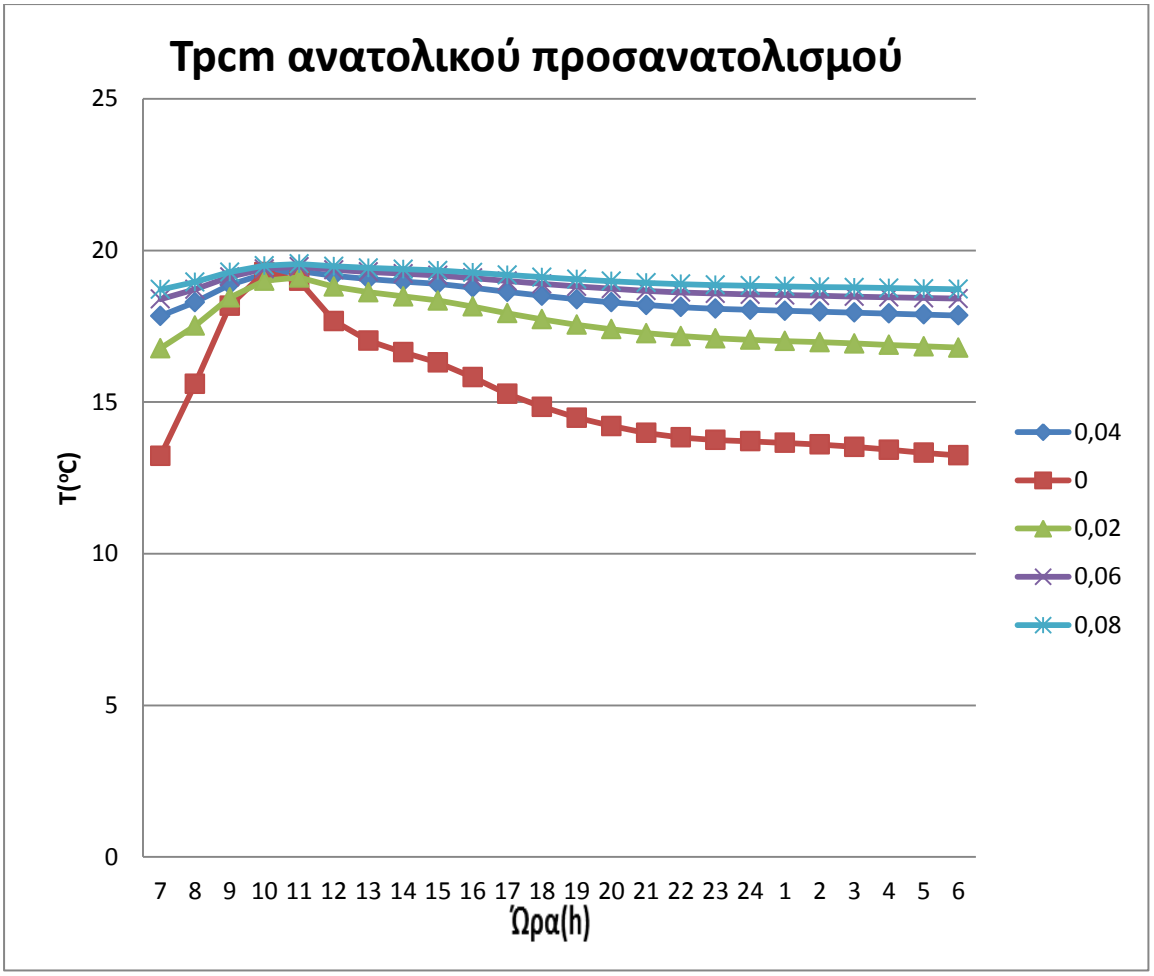
- Για την 21η Δεκεμβρίου:



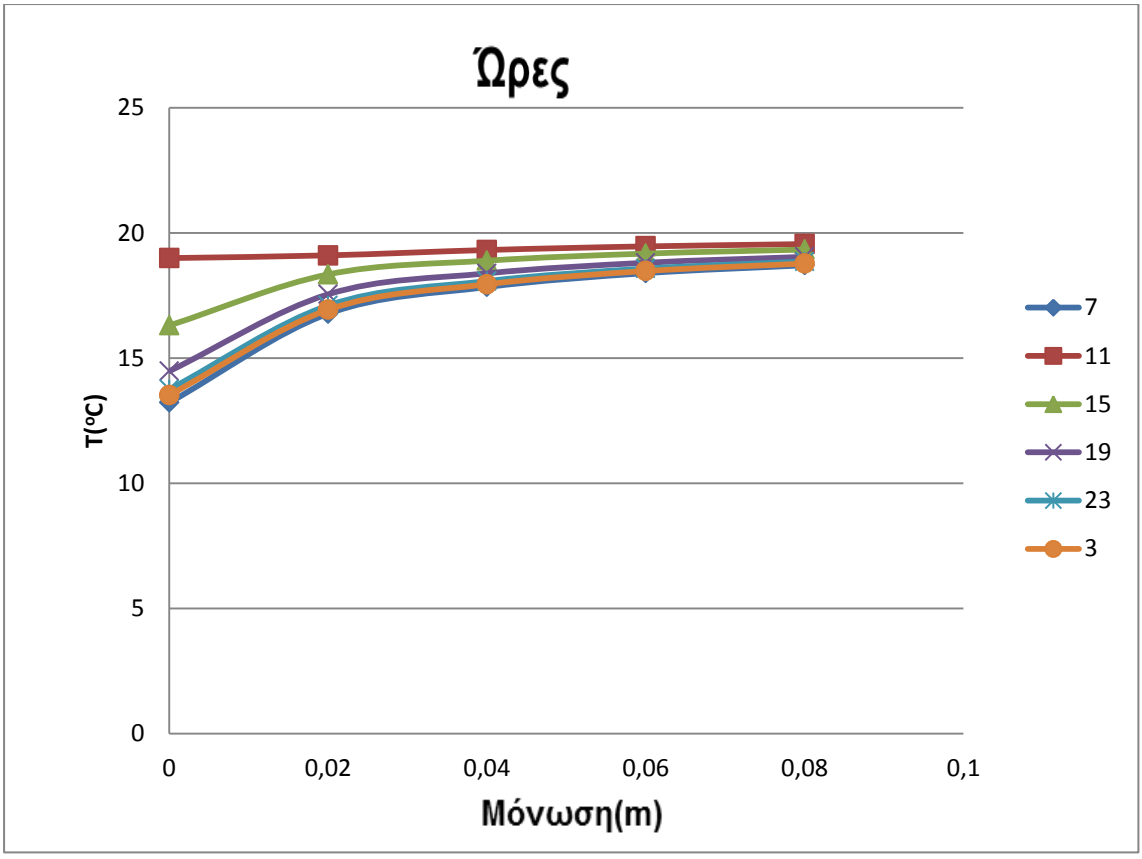
Σχήμα 7.2.1.89: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



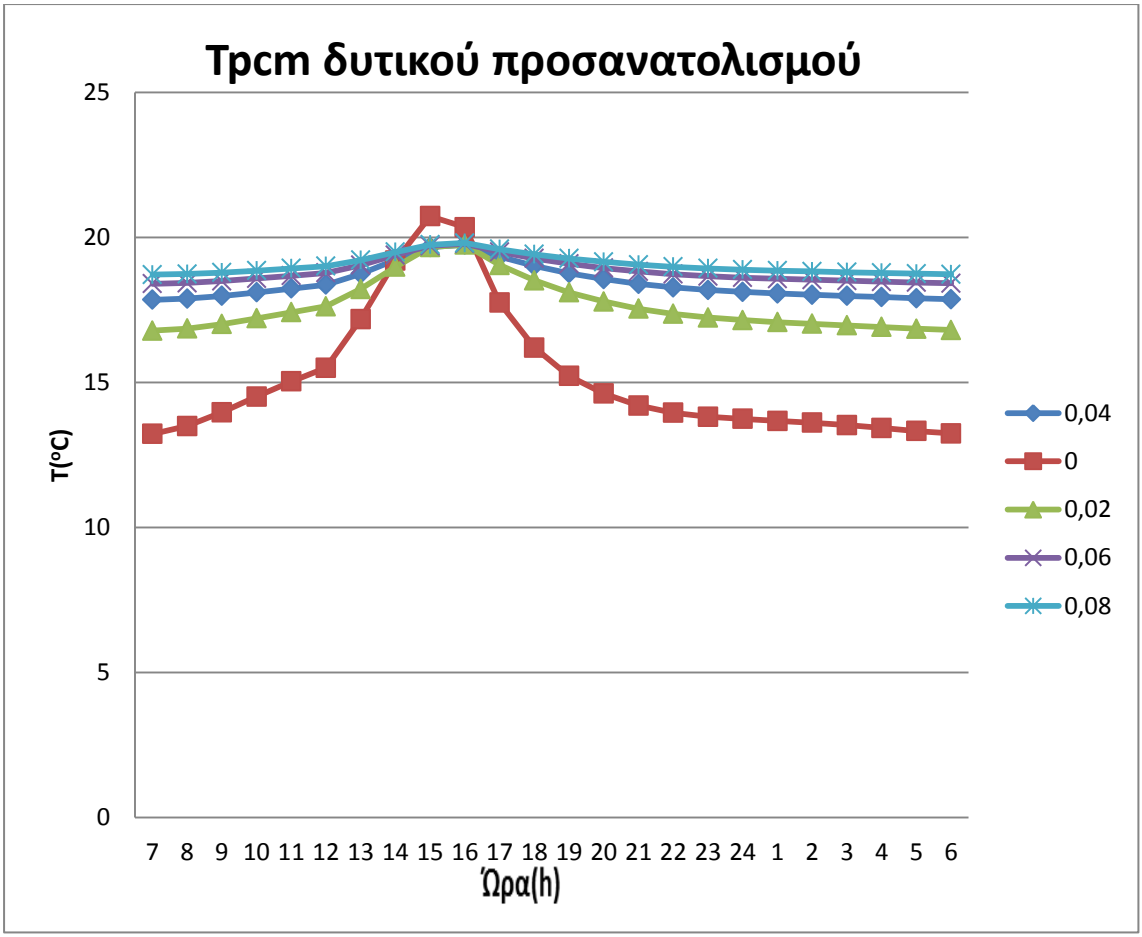
Σχήμα 7.2.1.90: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού.



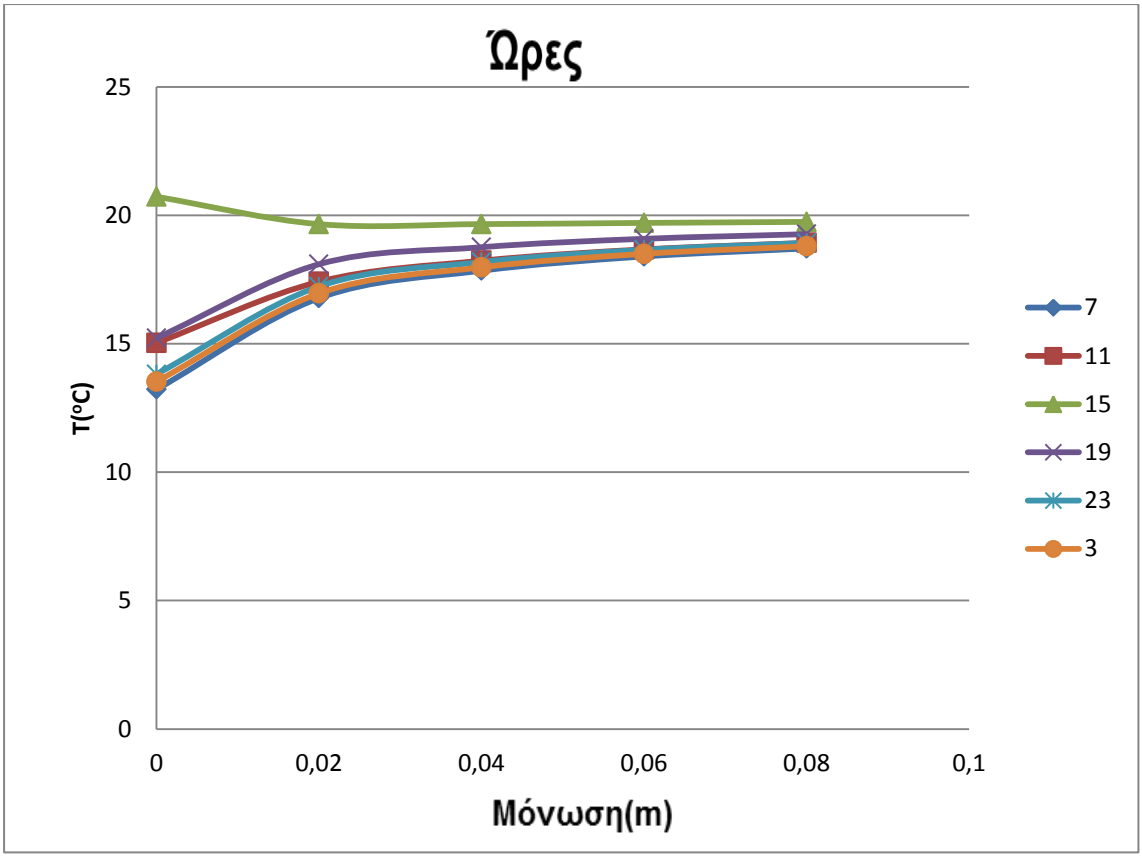
Σχήμα 7.2.1.91: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



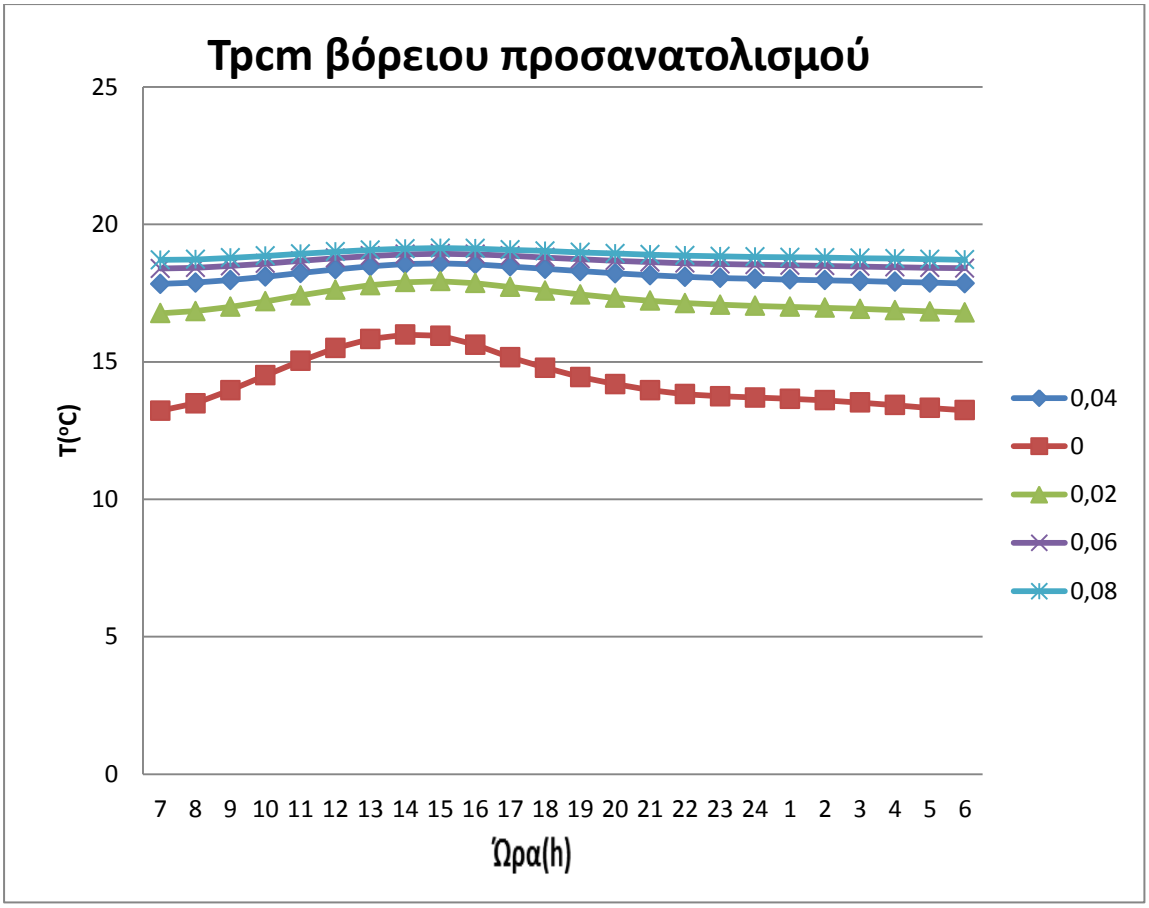
Σχήμα 7.2.1.92: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού.



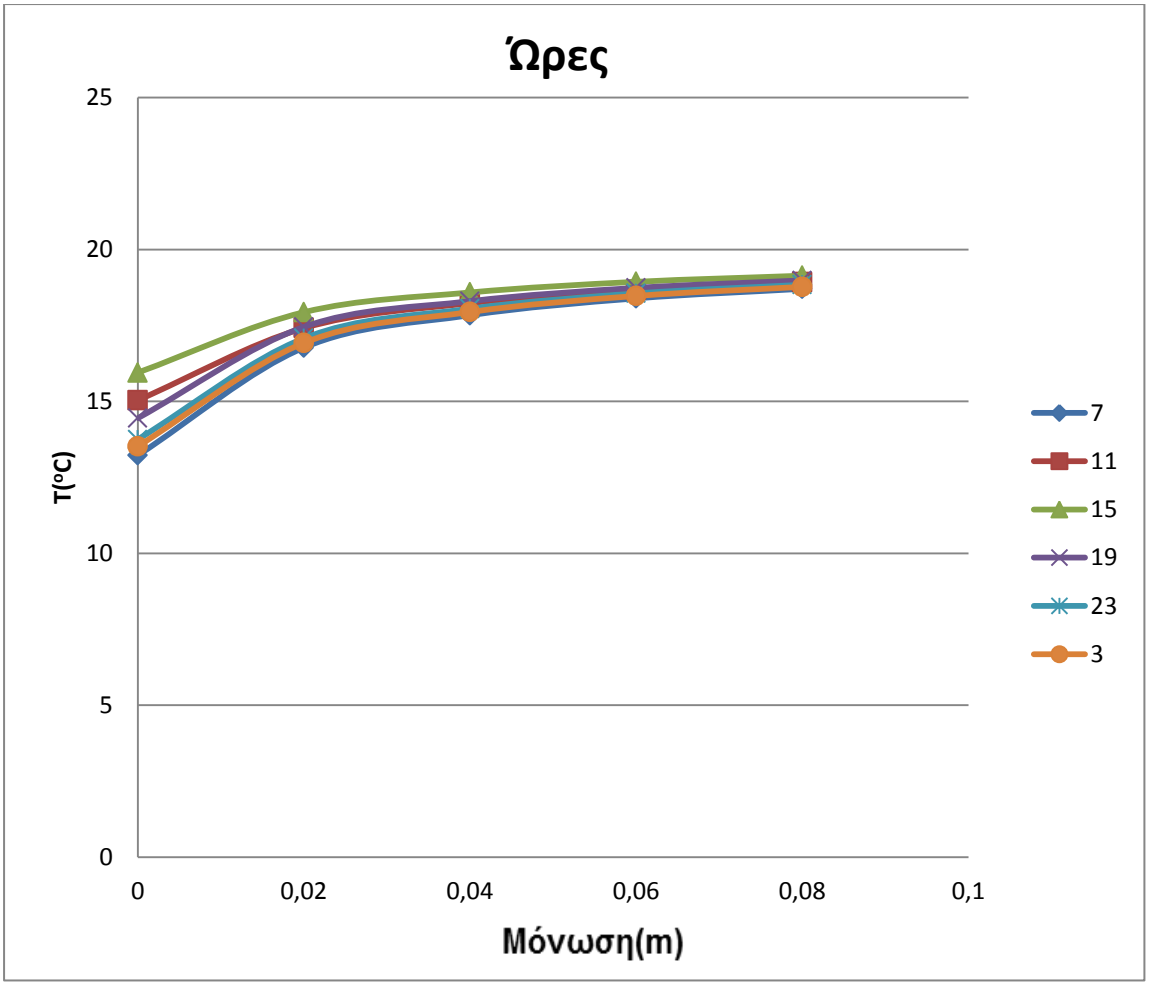
Σχήμα 7.2.1.93: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.94: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.95: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για πέντε διαφορετικά πάχη μόνωσης συναρτήσει της ώρας για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.2.1.96: Μεταβολή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο RT27 για έξι διαφορετικές ώρες συναρτήσει της μόνωσης για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

7.2.1.1 *Χειμερινοί μήνες*

Για τον μήνα Ιανουάριο, όπως προκύπτει από τα σχήματα 7.2.1.1 και 7.2.1.2, παρατηρούμε ότι όταν το PCM εφαρμόζεται σε τοίχο **νότιου προσανατολισμού** όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται κατα τη διάρκεια της μέρας ενώ αντιθέτως μειώνεται κατα τη διάρκεια της νύχτας. Η παραπάνω παρατήρηση είναι πιο εμφανής όταν το πάχος της μόνωσης γίνεται μηδέν επειδή όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης τόσο πιο πολύ εμποδίζεται η μεταφορά θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον στον τοίχο δια ακτινοβολίας και το PCM παίρνει θερμότητα μόνο από το δωμάτιο. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται το θερμοκρασιακό εύρος γίνεται ολοένα και μικρότερο. Ανάλογα είναι τα συμπεράσματά μας και για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο και Απρίλιο όπως μπορούμε να διακρίνουμε από τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Όταν το PCM εφαρμόζεται σε τοίχο **ανατολικού προσανατολισμού**, για το μήνα Ιανουάριο, παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του PCM παρουσιάζει αύξηση τις πρωινές ώρες όταν δεν υπάρχει μόνωση καθώς η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλότερη το πρωί. Όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιείται σε θερμοκρασίες πλησιέστερες στην θερμοκρασία του δωματίου, δηλαδή στους 20°C, όπως φαίνεται και από το σχήμα 7.2.1.3. Αυτό συμβαίνει επειδή η μόνωση εμποδίζει τη συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του τοίχου και του εξωτερικού περιβάλλοντος, οπότε θερμότητα μεταφέρεται μόνο από το δωμάτιο στον τοίχο. Παρόμοιες είναι οι παρατηρήσεις μας και για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο.

Αντίστοιχα σε τοίχο **δυτικού προσανατολισμού** η θερμοκρασία του PCM τον Ιανουάριο αυξάνεται τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες όταν η μόνωση μηδενίζεται και φυσικά όπως και πριν όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιείται σε θερμοκρασίες πλησιέστερες στην θερμοκρασία του δωματίου. Ανάλογα είναι τα συμπεράσματά μας και για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο όπως παρατηρούμε από τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Τέλος, σε τοίχο **βόρειου προσανατολισμού** το θερμοκρασιακό εύρος, για το μήνα Ιανουάριο, είναι αρκετά μικρό για όλα τα πάχη της μόνωσης με μια μικρή άνοδο της θερμοκρασίας του PCM τις μεσημεριανές ώρες όταν το πάχος της μόνωσης γίνεται μηδέν. Και σε αυτή τη περίπτωση όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιείται στους 20°C. Παρόμοιες είναι οι παρατηρήσεις μας για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο.

7.2.1.2 *Φθινοπωρινοί-Ανοιξιάτικοι μήνες*

Τους μήνες Μάιο και Οκτώβριο η εσωτερική θερμόκρασία δωματίου αυξήθηκε στους 22°C. Για τον τοίχο **νότιου προσανατολισμού**, όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του PCM καθόλη τη διάρκεια της μέρας, ειδικά όταν η μόνωση είναι μηδέν, επειδή μεταφέρεται θερμότητα από το εξωτερικό περιβάλλον στον τοίχο, ενώ κατά τις αρκετά πρωινές ώρες υπάρχει μια μικρή πτώση στη θερμοκρασία καθώς μεταφέρεται θερμότητα από τον τοίχο στο εξωτερικό περιβάλλον, κάτι που φαίνεται και από τα σχήματα 7.2.1.33 και 7.2.1.73. Μια επιπλέον παρατήρηση είναι ότι το θερμοκρασιακό εύρος είναι ιδιαίτερα μικρό όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται καθώς η μόνωση εμποδίζει τη συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του τοίχου και του εξωτερικού περιβάλλοντος και γίνεται συναλλαγή θερμότητας μόνο μεταξύ του δωματίου και του τοίχου.

Όταν το PCM είναι τοποθετημένο σε τοίχο **ανατολικού προσανατολισμού** για τους μήνες Απρίλιο και Οκτώβριο παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του PCM παρουσιάζει αύξηση τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες όταν δεν υπάρχει μόνωση ενώ αντιθέτως τις βραδινές ώρες μειώνεται. Όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιείται σε θερμοκρασίες πλησιέστερες στην θερμοκρασία του δωματίου, όπως φαίνεται και από τα σχήματα 7.2.1.27 και 7.2.1.75 επειδή θερμότητα συναλάσσεται κυρίως μεταξύ του τοίχου και του δωματίου. Αντίστοιχα για το μήνα Σεπτέμβριο, όταν δεν υπάρχει μόνωση, παρατηρείται αύξηση στη θερμοκρασία του PCM καθόλη τη διάρκεια της μέρας με εξαίρεση τις πολύ πρωινές ώρες όπου η θερμοκρασία μειώνεται.

Για τους μήνες Σεπτέμβριο, Οκτώβριο και Απρίλιο, όπως προκύπτει από τα σχήματα 7.2.1.29, 7.2.1.69 και 7.2.1.77, παρατηρούμε ότι όταν το PCM τοποθετείται σε τοίχο **δυτικού προσανατολισμού** όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται επειδή το PCM αποθηκεύει θερμότητα από το περιβάλλον καθόλη τη διάρκεια της μέρας ενώ τις αρκετά πρωινές ώρες παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας καθώς μεταφέρεται θερμότητα από το PCM στο εξωτερικό περιβάλλον. Αύτό φαίνεται ξεκάθαρα και από τα σχήματα 7.2.1.30, 7.2.1.70 και 7.2.1.78. Και σε αυτή την περίπτωση όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιείται σε θερμοκρασίες πλησιέστερες στην θερμοκρασία του δωματίου.

Τέλος, σε τοίχο **βόρειου προσανατολισμού** για τους μήνες Οκτώβριο και Απρίλιο παρατηρείται άνοδος της θερμοκρασίας του PCM τις μεσημεριανές ώρες όταν το πάχος της μόνωσης γίνεται μηδέν ενώ όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιείται. Το θερμοκρασιακό εύρος για τον μήνα Μάιο είναι ιδιαίτερα μικρό 20-23°C ιδιαίτερα όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται. Όταν το πάχος της μόνωσης γίνεται μηδέν η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται καθόλη τη διάρκεια της μέρας ενώ τις αρκετά πρωινές ώρες παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας. Επιπρόσθετα, για το μήνα Σεπτρέμβριο παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας του PCM καθόλη τη διάρκεια της μέρας με εξαίρεση τις απογευματινές ώρες όπου υπάρχει μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας κάτι που οφείλεται στο ότι μεταφέρεται ενέργεια από το περιβάλλον αλλά και από το δωμάτιο στο PCM ενώ παράλληλα είναι σαφές από τα διαγράματα 7.2.1.71 και 7.2.1.72 ότι η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιηθεί στους 26°C όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης.

7.2.1.3 *Καλοκαιρινοί μήνες*

Για τους καλοκαιρινούς μήνες και το Σεπτέμβριο η εσωτερική θερμόκρασία δωματίου αυξήθηκε στους 26°C. Στο τοίχο **νότιου προσανατολισμού**, όσο το πάχος της μόνωσης τείνει να μηδενιστεί η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται καθόλη τη διάρκεια της μέρας καθώς μεταφέρεται θερμότητα από το εξωτερικό περιβάλλον στον τοίχο ενώ ταυτόχρονα όταν το πάχος της μόνωσης αυξάνεται η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιείται σε θερμοκρασίες πλησιέστερες στην θερμοκρασία του δωματίου, δηλαδή στους 26°C.

Παράλληλα όταν το PCM τοποθετείται σε τοίχο **ανατολικού προσανατολισμού** για τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο η θερμοκρασία του PCM είναι υψηλότερη τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες όταν το πάχος της μόνωσης είναι μηδέν και φυσικά αυξάνεται καθόλη τη διάρκεια της μέρας καθώς μεταφέρεται θερμότητα από το εξωτερικό περιβάλλον στον τοίχο. Αντίστοιχα όταν το πάχος της μόνωσης αυξάνεται η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιείται.

Για τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο παρατηρούμε ότι όταν το PCM τοποθετείται σε τοίχο **δυτικού προσανατολισμού** όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται η θερμοκρασία του PCM αυξάνεται επειδή το PCM αποθηκεύει θερμότητα από το περιβάλλον καθόλη τη διάρκεια της μέρας. Επιπλέον παρατηρούμε ότι οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες τις απογευματινές ώρες καθώς η ηλιακή προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι υψηλότερη εκείνες τις ώρες. Και σε αυτή την περίπτωση όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιείται σε θερμοκρασίες πλησιέστερες στην θερμοκρασία του δωματίου.

Όσον αφορά τον τοίχο **βόρειου προσανατολισμού** για τους καλοκαιρινούς μήνες το θερμοκρασιακό εύρος είναι αρκετά μικρό για όλα τα πάχη της μόνωσης με μια μικρή άνοδο της θερμοκρασίας του PCM τις απογευματινές ώρες όταν το πάχος της μόνωσης γίνεται μηδέν. Και εδώ όπως και πριν όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιείται στους 26 ^{o}C.

7.2.2 <u>Καμπύλες Cp,eff-T</u>

Από όλες τις παραπάνω παρατηρήσεις μας συμπεραίνουμε ότι το PCM που χρησιμοποιείται στην εφαρμογή μας έχει καλύτερη απόδοση και καλύπτει μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης κυρίως όταν τοποθετείται σε νότιο προσανατολισμό για τους **χειμερινούς μήνες**. Επιπλέον συμπεραίνουμε ότι όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται το θερμοκρασιακό εύρος περιορίζεται όλο και

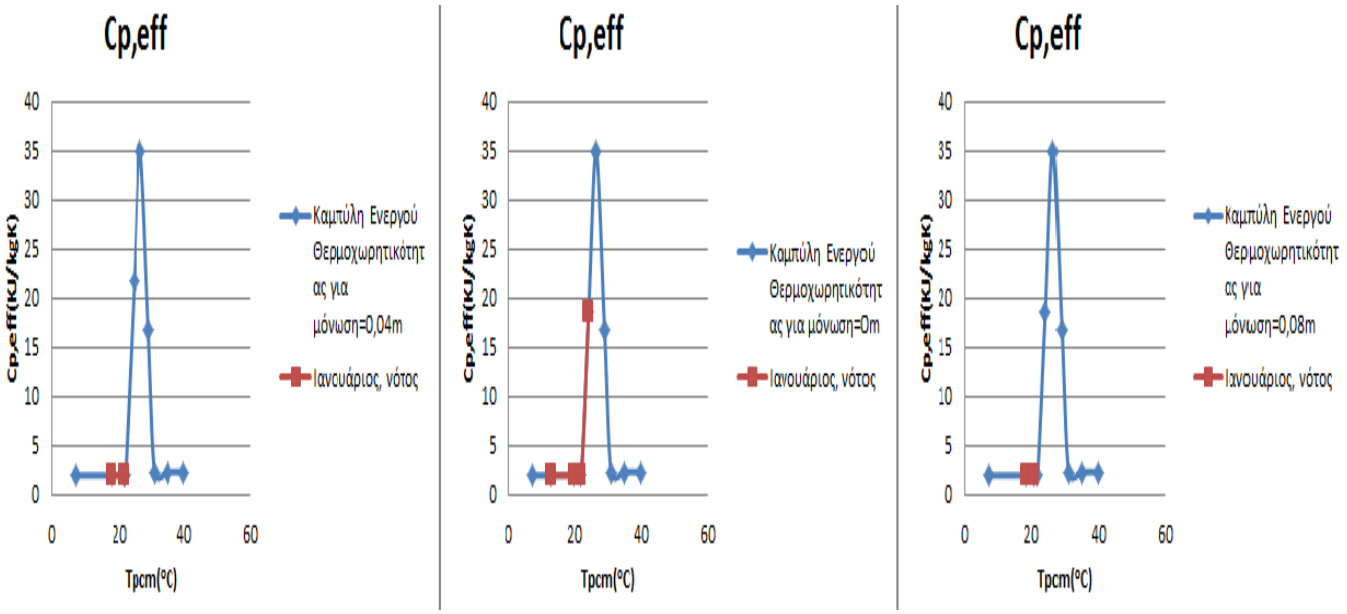
περισσότερο και η αποθηκευτική ικανότητα του PCM δεν αξιοποιείται καθώς η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιείται στη θερμοκρασία του δωματίου. Ακόμα, όπως και στην προηγούμενη μελέτη μας έτσι και εδώ όταν το PCM τοποθετείται σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού η καμπύλη Cp,eff-T καλύπτει μόνο την περιοχή της στερεάς φάσης για όλα τα πάχη της μόνωσης.

Για τους μήνες Οκτώβριο και Μάιο όταν το PCM τοποθετείται σε τοίχο νότιου προσανατολισμού καλύπτει μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης όσο το πάχος της μόνωσης τείνει να μηδενστεί. Παράλληλα όταν το PCM εφαρμόζεται σε τοίχο ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού για τους μήνες Οκτώβριο και Απρίλιο η καμπύλη Cp,eff-T καλύπτει ένα μεγάλο μέρος της διφασικής περιοχής όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ για τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο το PCM αξιοποιεί ολοένα και περισσότερο την ικανότητά του να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση καθώς όλες οι θερμοκρασίες βρίσκονται στη διφασική περιοχή για όλα τα πάχη της μόνωσης και ειδικότερα όταν η μόνωση είναι μηδέν. Τέλος όταν το PCM τοποθετείται σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού για τους μήνες Οκτώβιο και Απρίλιο, μόνο ένα μικρό μέρος της διφασικής περιοχής καταφέρνει να καλύψει η καμπύλη Cp,eff-T τις μεσημεριανές ώρες όταν το πάχος της μόνωσης γίνεται μηδέν ενώ για το μήνα Μάιο το PCM έχει εμφανώς καλύτερη απόδοση και καλύπτει μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης για όλα τα πάχη της μόνωσης. Και σε αυτή την περίπτωση το υλικό μας εμφανίζει χαμηλότερες θερμοκρασίες όταν βρίσκεται σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού για όλα τα πάχη της μόνωσης ενώ αντιθέτως παρουσιάζει μεγαλύτερες θερμοκρασίες όταν βρίσκεται σε τοίχο δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού τους μήνες που προσεγγίζουν περισσότερο τους καλοκαιρινούς και νότιου προσανατολισμού τους μήνες που προσεγγίζουν περισσότερο τους χειμερινούς αντίστοιχα.

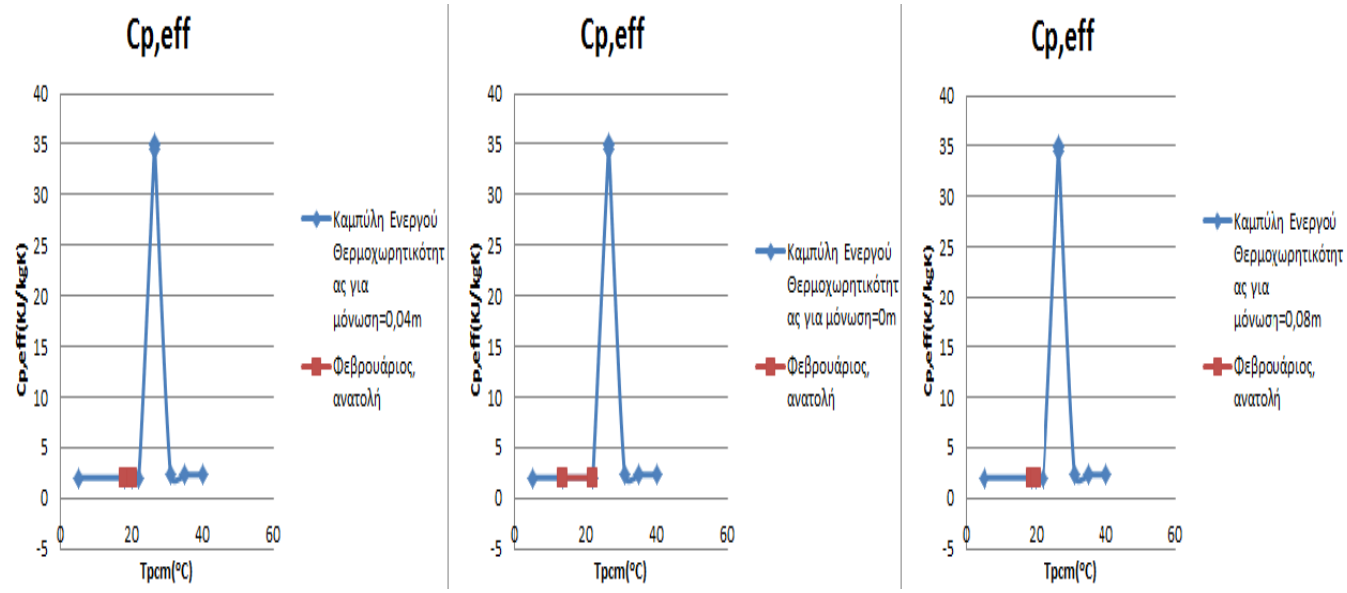
Επιπρόσθετα συμπεραίνουμε ότι το PCM που χρησιμοποιούμε στην εφαρμογή μας για τους **καλοκαιρινούς μήνες** έχει καλή απόδοση και καλύπτει μεγάλο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης όταν τοποθετείται σε δυτικό και ακόμα περισσότερο όταν τοποθετείται σε ανατολικό προσανατολισμό από ότι σε νότιο και βόρειο. Επιπλέον ισχύει ότι όσο το πάχος της μόνωσης μειώνεται αξιοποιείται όλο και περισσότερο η αποθηκευτική ικανότητα του PCM επειδή υπάρχουν περισσότερες τιμές της θερμοκρασίας στην διφασική καθώς και την υγρή περιοχή και γενικά οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η εκμετάλευση μεγαλύτερου μέρους της ενέργειας που μπορεί να προσφέρει. Όταν το πάχος της μόνωσης αυξάνεται το θερμοκρασιακό εύρος περιορίζεται σε θερμοκρασίες που προσεγγίζουν την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου και η καμπύλη

Cp,eff-T συνεχίζει να καλύπτει μέρος της διφασικής περιοχής του υλικού.

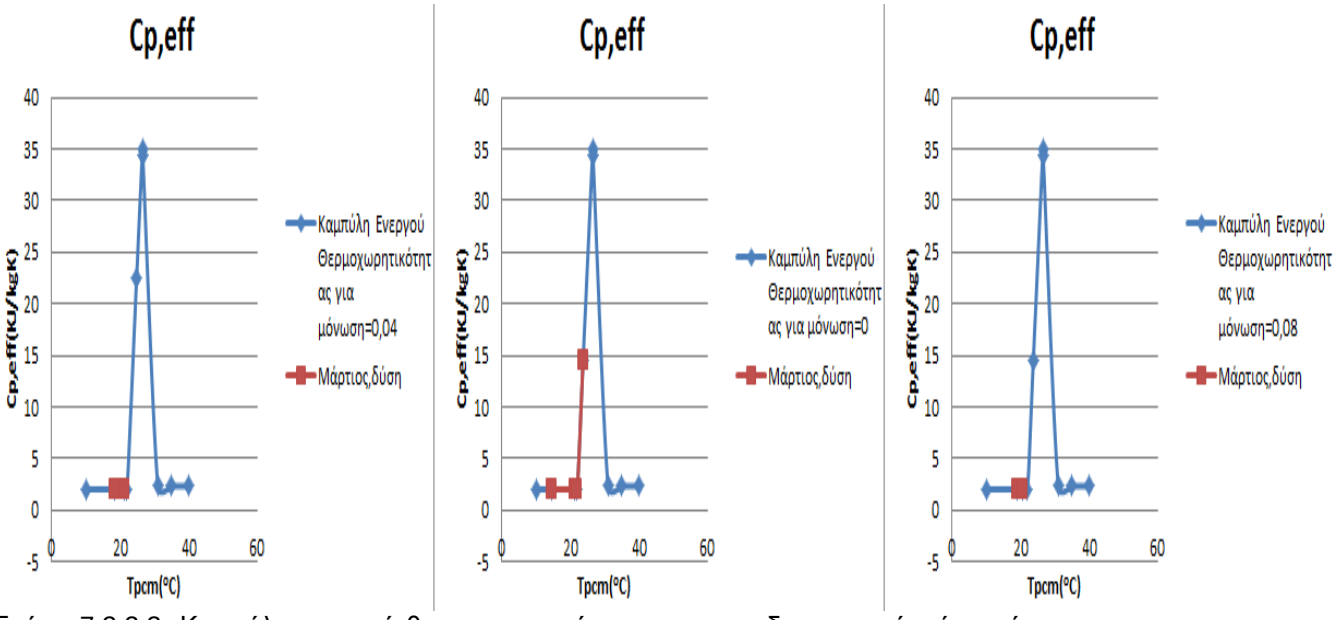
Στη συνέχεια παρουσιάζεται με διαγράμματα η κάλυψη του θερμοκρασιακού εύρους της αλλαγής φάσης του PCM για διάφορους μήνες και προσανατολισμούς.



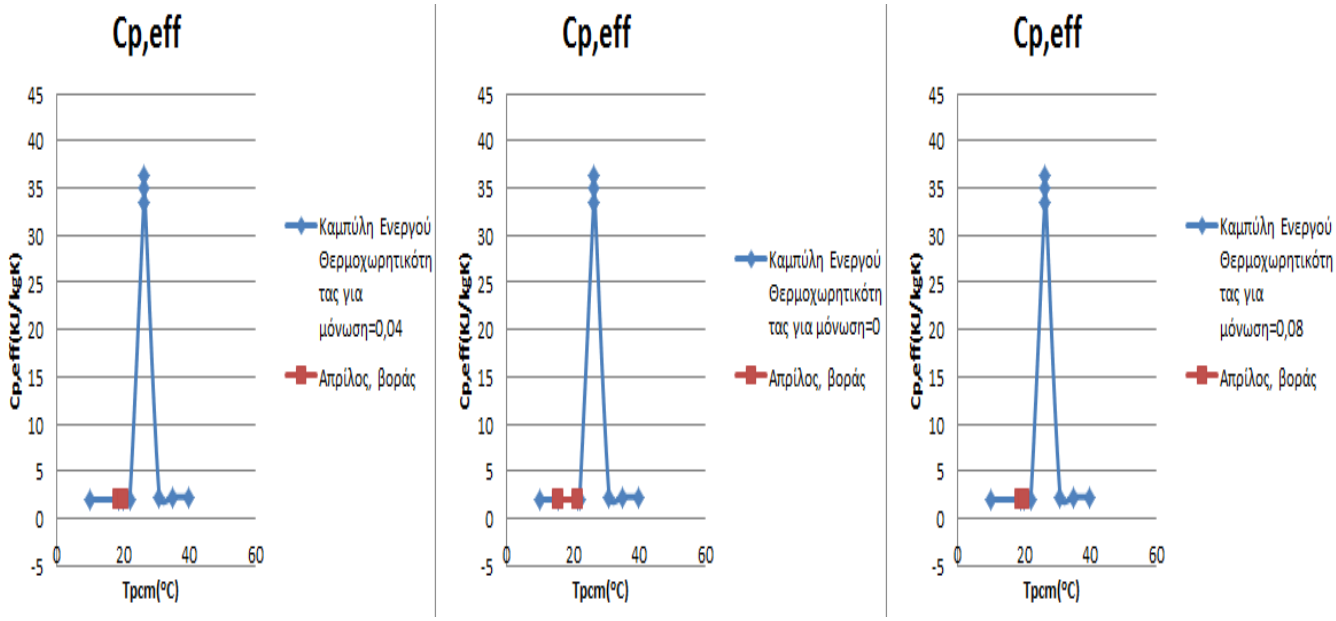
Σχήμα 7.2.2.1: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Ιανουαρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού



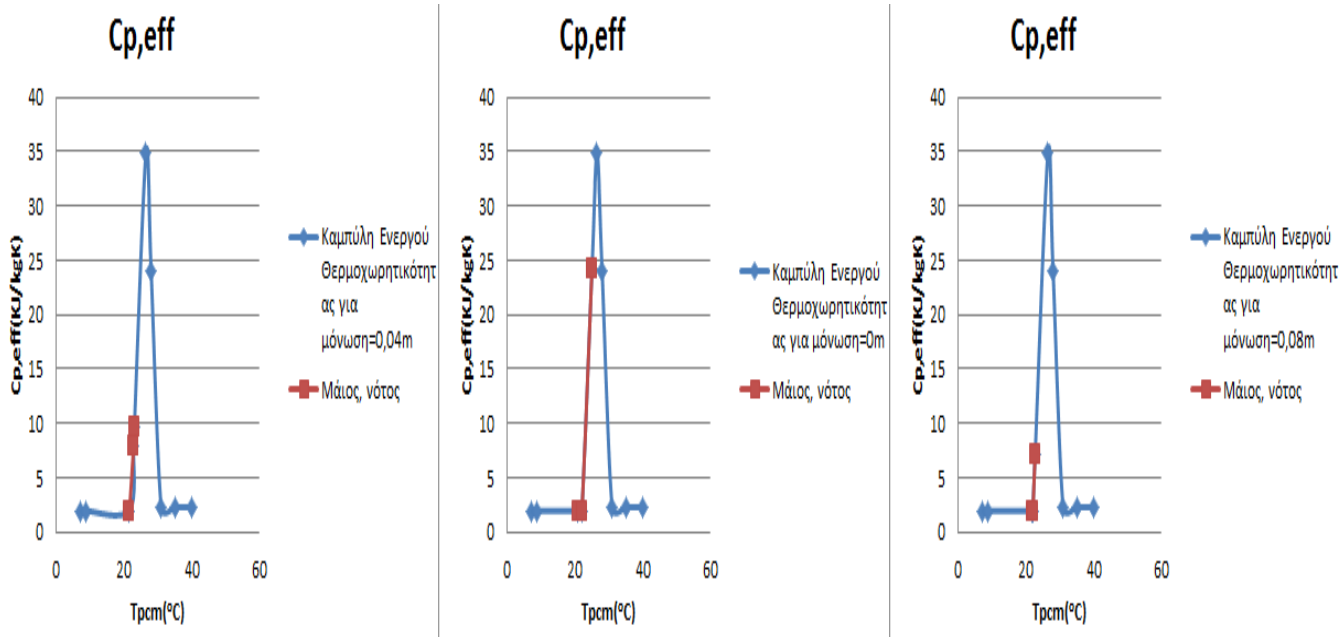
Σχήμα 7.2.2.2: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Φεβρουαρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού



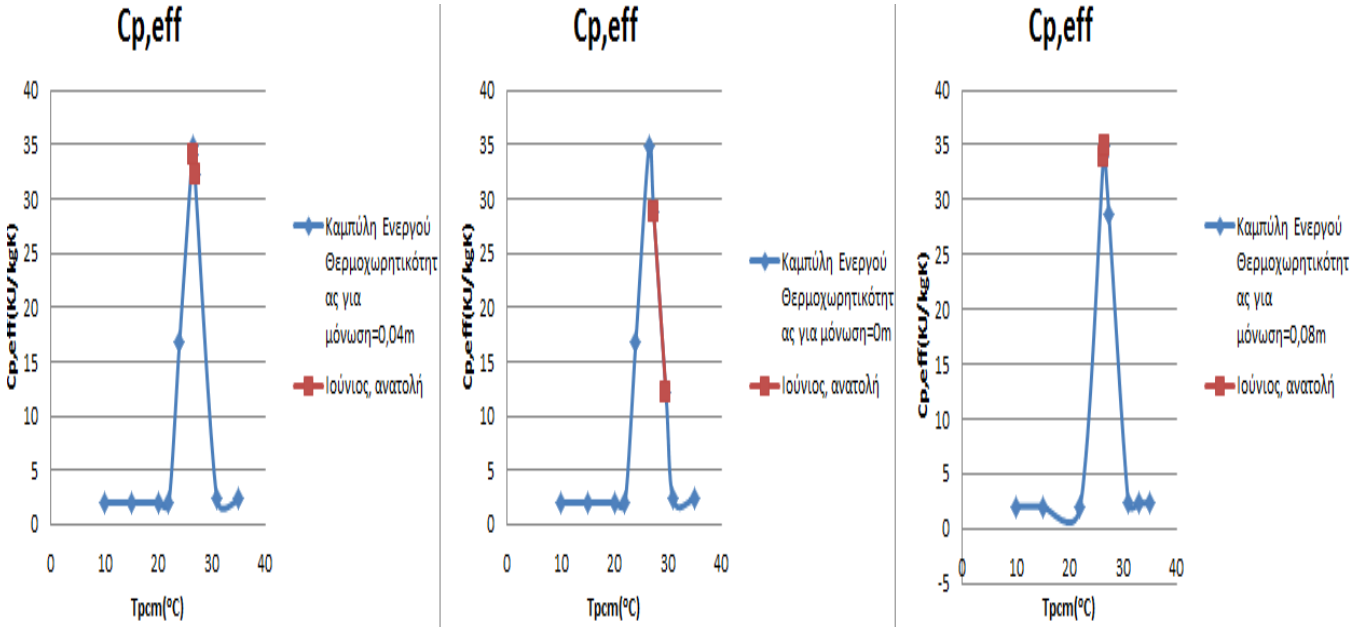
Σχήμα 7.2.2.3: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Μαρτίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού



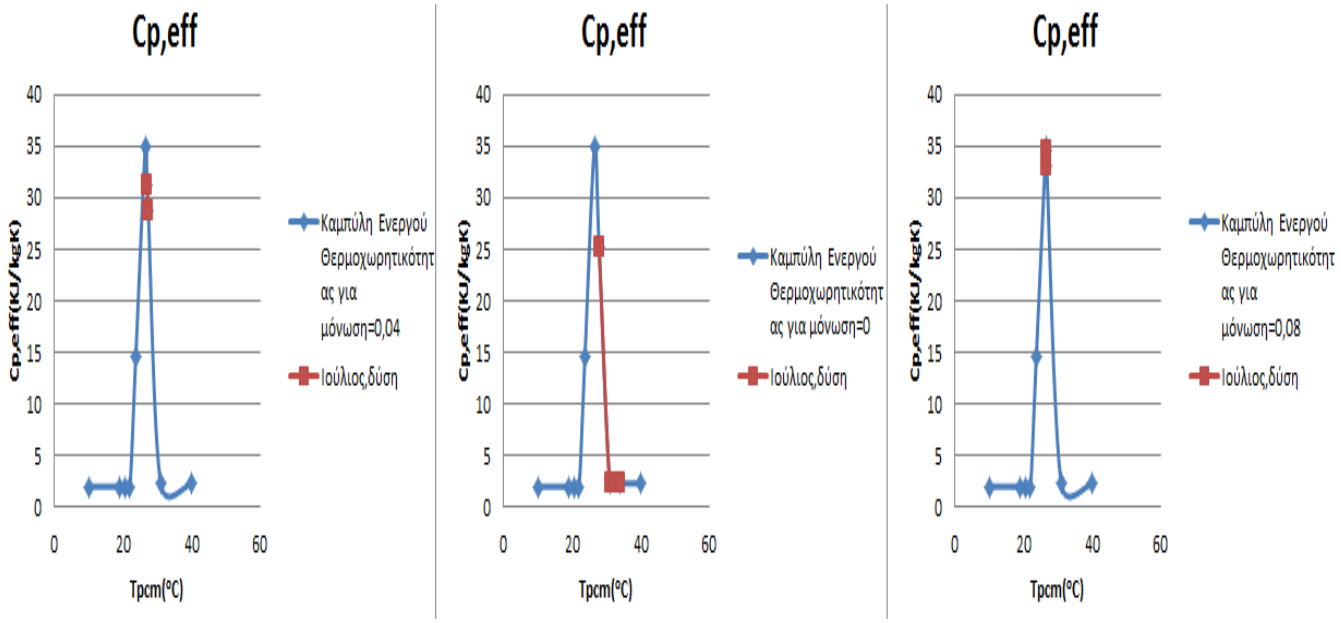
Σχήμα 7.2.2.4: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Απριλίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού



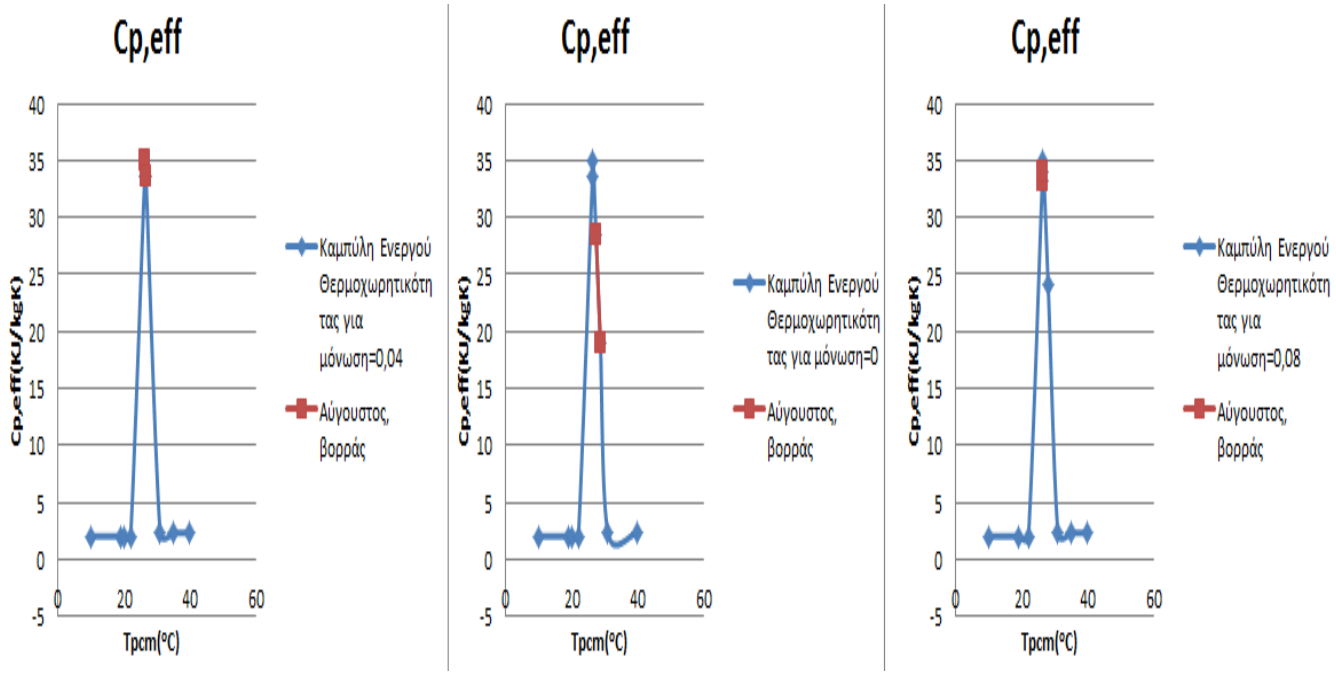
Σχήμα 7.2.2.5: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Μαΐου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού



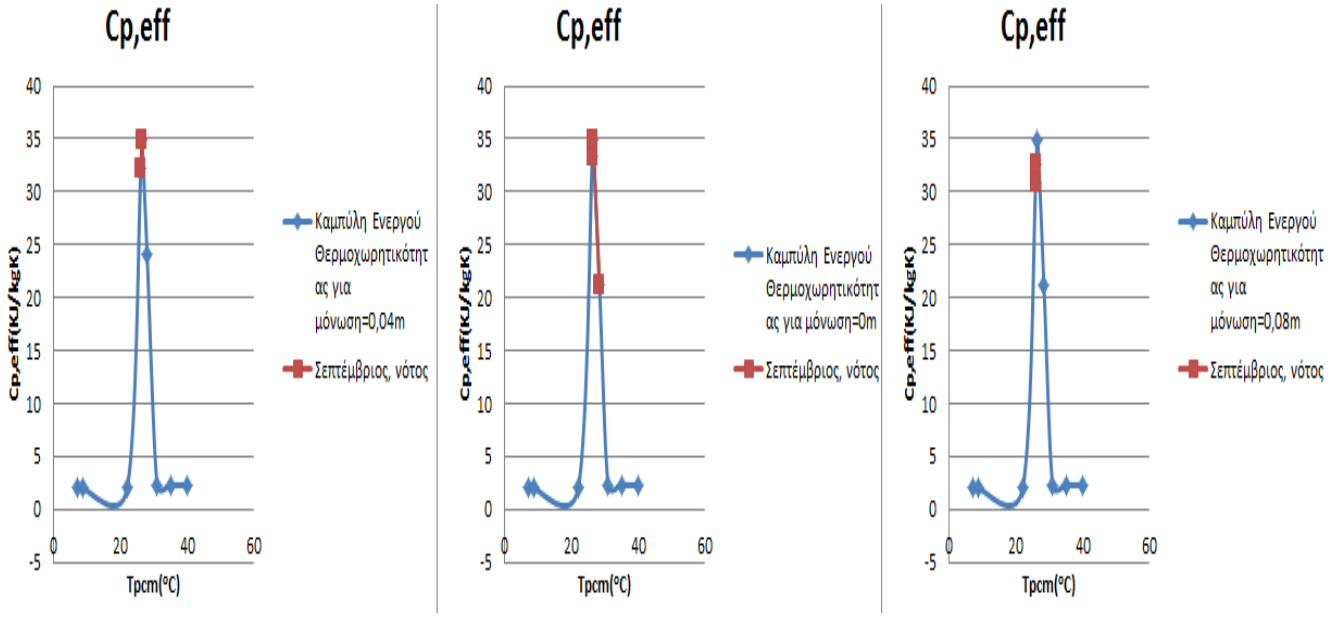
Σχήμα 7.2.2.6: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Ιουνίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού



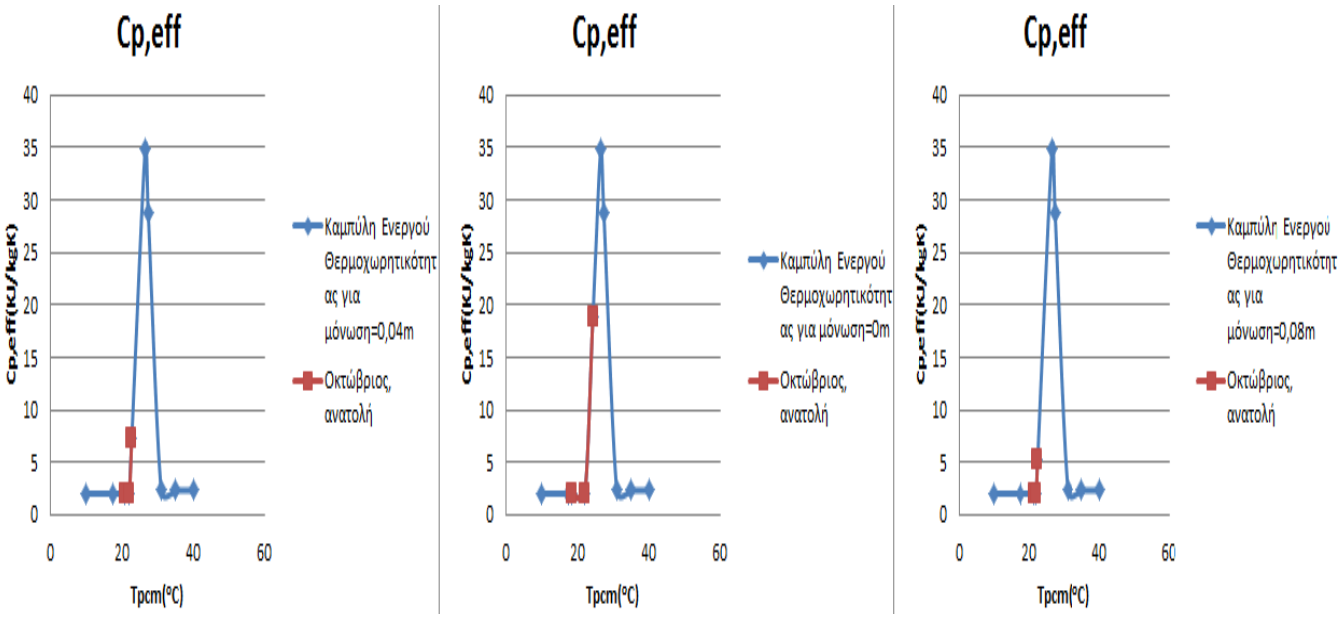
Σχήμα 7.2.2.7: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Ιουλίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού



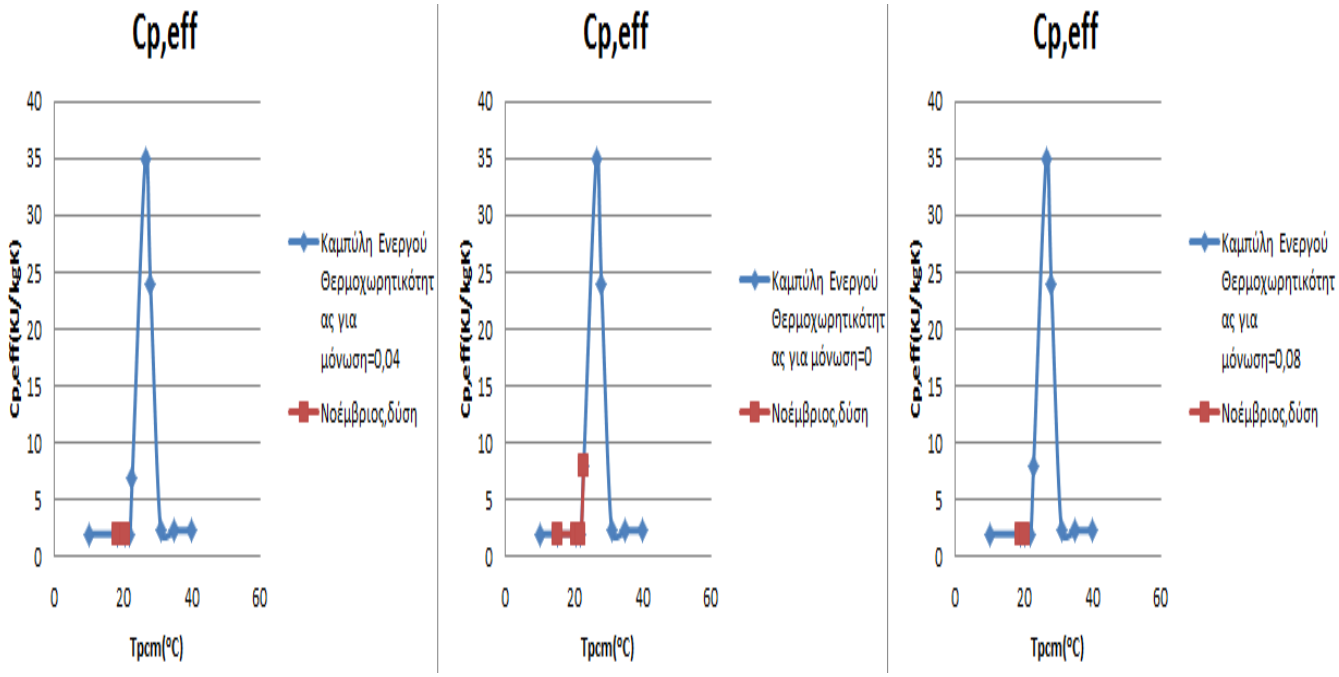
Σχήμα 7.2.2.8: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Αυγούστου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού



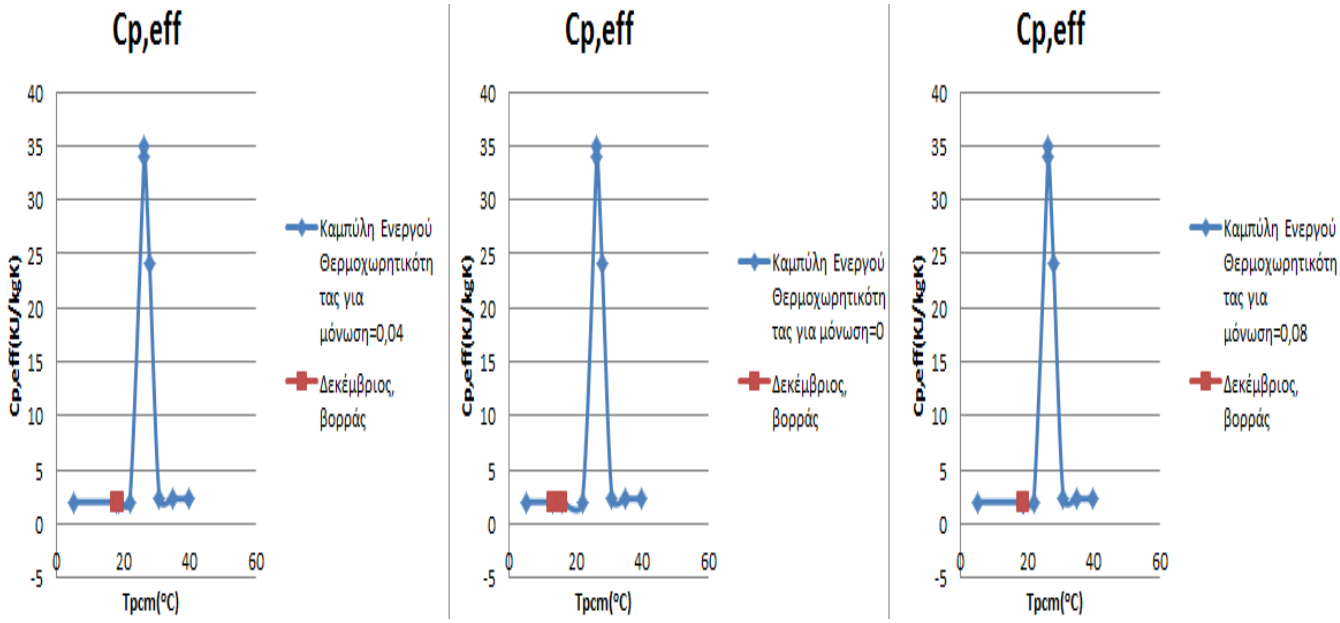
Σχήμα 7.2.2.9: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Σεπτεμβρίου σε τοίχο νότιου προσανατολισμού



Σχήμα 7.2.2.10: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Οκτωβρίου σε τοίχο ανατολικού προσανατολισμού



Σχήμα 7.2.2.11: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Νοεμβρίου σε τοίχο δυτικού προσανατολισμού



Σχήμα 7.2.2.12: Καμπύλη ενεργού θερμοχωρητικότητας για τρια διαφορετικά πάχη μόνωσης για την 21η Δεκεμβρίου σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού

8. Παρατηρήσεις- Συμπεράσματα

Αφού ολοκληρώθηκαν οι δύο μελέτες υλικού αλλαγής φάσης (PCM) με την εμπορική ονομασία RT27 ενσωματωμένου σε τοίχο νότιου, ανατολικού, δυτικού και βόρειου προσανατολισμού, ο οποίος φορτίζεται εξωτερικά, αρχικά όταν το στρώμα του PCM βρίσκεται από την έξω πλευρά του τοίχου και η μόνωση από μέσα ενώ στη συνέχεια το στρώμα του PCM είναι στη μέσα πλευρά του τοίχου και η μόνωση από έξω, οδηγούμαστε στα ακόλουθα συμπεράσματα.

Καταρχήν, καθίσταται προφανές ότι το PCM μας είναι πολύ πιο αποδοτικό στην πρώτη περίπτωση όπου η μόνωση βρίσκεται από τη μέσα πλευρά του τοίχου και το στρώμα του PCM απ' έξω επειδή έτσι η μόνωση δεν εμποδίζει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ τοίχου και εξωτερικού περιβάλλοντος. Οι θερμοκρασίες του PCM είναι μεγαλύτερες και αξιοποιείται καλύτερα η αποθηκευτική ικανότητα του PCM καθώς περισσότερες θερμοκρασίες βρίσκονται στη διαφασική περιοχή. Αντίθετα στη δεύτερη μελέτη όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται η θερμοκρασία του PCM τείνει να σταθεροποιείται σε θερμοκρασίες πλησιέστερες στη θερμοκρασία του δωματίου, το θερμοκρασιακό εύρος περιορίζεται και έτσι η αποθηκευτική ικανότητα του PCM μας αξιοπείται λιγότερο.

Επιπρόσθετα, από τις παραπάνω παρατηρήσεις μας συμπεραίνουμε ότι το PCM που χρησιμοποιείται στην εφαρμογή μας έχει καλύτερη απόδοση και καλύπτει μεγαλύτερο μέρος του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης όταν τοποθετείται σε τοίχο νότιου προσανατολισμού τους χειμερινούς μήνες και σε ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού τους καλοκαιρινούς. Αυτό οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στις θέσεις που καταλαμβάνει ο ήλιος σε σχέση με τη γη στον ουράνιο θόλο κατά τη διάρκεια του έτους. Ο ήλιος το χειμώνα βρίσκεται πιο χαμηλά και το μεσημέρι οπότε η καθετότητα του ηλίου με τον τοίχο είναι καλύτερη και έτσι ο τοίχος νότιου προσανατολισμού δέχεται περισσότερη ακτινοβολία. Το καλοκαίρι ο ήλιος βρίσκεται πιο ψηλά και η καθετότητα του ήλιου με τον τοίχο το μεσημέρι δεν είναι τόσο καλή οπότε ο νότος "χάνει" αντιθέτως τις πρωινές και απογευματινές ώρες που ο ήλιος είναι έτσι κι αλλιώς πιο χαμηλά η καθετότητα είναι καλύτερη και έτσι ευνοείται ο ανατολικός και ο δυτικός προσανατολισμός. Τέλος, ο βόρειος προσανατολισμός απ' την άλλη δεχεται τη μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία καθόλη τη διάρκεια του χρόνου και γι' αυτό το PCM μας δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικό όταν εφαρμόζεται σε τοίχο βόρειου προσανατολισμού.

Εν κατακλείδι, το PCM μας είναι περισσότερο αποδοτικό, κυρίως στην πρώτη περίπτωση, όταν εφαρμόζεται σε τοίχο νότιου προσανατολισμού

τους χειμερινούς μήνες και σε τοίχο ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού τους καλοκαιρινούς. Επιπλέον παρατηρούμε ότι όσο το πάχος της μόνωσης αυξάνεται τόσο μεγαλύτερο είναι το θερμοκρασιακό εύρος γιατί η μόνωση εμποδίζει τη συναλλαγή θερμότητας μεταξύ τοίχου και δωματίου και έτσι το PCM κρατάει περισσότερη ενέργεια αποθηκευμένη.

Τέλος πρέπει να επισημάνουμε ότι παρότι έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες και μελέτες για την εύρεση υλικών αλλαγής φάσης που να μπορούν να αποδώσουν το 100% της ενέργειας που έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν πρέπει στο μέλλον να γίνουν και άλλες παραμετρικές μελέτες για να βρεθούν PCM με ιδιότητες τέτοιες ώστε να εκμεταλλεύονται πλήρως όλη τη λανθάνουσα θερμοκρασία τους και να αναπτύσσονται σε αυτά τέτοιες θερμοκρασίες ώστε να καλύπτεται όλο το θερμοκρασιακό εύρος της αλλαγής φάσης τους.

Βιβλιογραφία

[1] http://www.cres.gr/kape/index_gr.htm

[2] http://www.cie.org.cy/sxoliko.html

[3] http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%B1%CF%84%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%B7_%CF%84%CE%B7%CF%82_%CF%8D%CE%BB%CE%B7%CF%82

[4] http://en.wikipedia.org/wiki/State_of_matter

[5] http://digitalschool.minedu.gov.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-B130/472/3123,12557/images/img1_17.jpg

[6] http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1_%CE%B1%CF%84%CE%BC%CE%BF%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%CF%82

[7] Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, October 2007

[8] S.D. Sharma, Kazunobu Sagara, Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review, International Journal of Green Energy, Februaty 2007

[9] Yvan Dutil, Daniel Rousse, Frédéric Kuznik, Jean-Pierre Dumas, Albert Castell, Luisa F.Cabeza, Modeling phase change materials behavior in building applications: Comments on material characterization and model validation, World Renewable Energy Congress 2011, Sweden, 6 May 2011

[10] http://www.bine.info/en/publications/themeninfos/publikation/latentwaermespeicher-in-gebaeuden/phasenuebergang-puffert-waerme/

[11] Mohammed M. Farid, Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, Said Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, Department of Chemical & Materials Engineering, The University of Auckland, Center for Electrochemical Science and Engineering, Illinois Institute of Technology, Chicago, 2003

[12] M. Fatih Demirbas, Thermal Energy Storage and Phase Change Materials: An Overview, Energy Sources, 2006

[13] Alkan C., Ahmet Sari, Ali Karaipekli, Preparation, thermal properties and thermal reliability of microencapsulated n-eicosane as novel phase change material for thermal energy storage, Energy Conversion and Management Vol. 52, 2011

[14] Manish K. Rathod, Jyotirmay Banerjee, Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 November 2012

[15] Ajeet Kumar Rai, Ashish Kumar, A Review on Phase Change Materials and Their Applications, International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology Vol. 3, December 2012

[16] E. Oró, A. de Gracia, A. Castell, M.M. Farid, L.F. Cabeza, Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications, Applied Energy Vol. 99, November 2012

[17] Belén Zalba, José Ma Marín, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering Vol. 23, Issue 3, February 2003

[18] Nihal Sarier, Emel Onder, Organic phase change materials and their textile applications: An overview, Istanbul Technical University, Department of Textile Engineering, April 2012

[19] Yvan Dutil, Daniel R. Rousse, Nizar Ben Salah, Stephane Lassue, Laurent Zalewski, A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations, Renewable and Sustainable Energy Reviews, June 2010

[20] Saleh Nasser AL-Saadi, Zhiqiang (John) Zhai, Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, February 2013

[21] Piia Lamberg, Reijo Lehtiniemi, Anna-Maria Henell, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage, International Journal of Thermal Sciences Vol. 43, July 2003

[22] Nitin Shukla, Ali Fallahi, Jan Kosny, Performance characterization of PCM impregnated gypsum board for building applications, Energy Procedia Vol. 30, 2012

[23] http://www.evitherm.org/default.asp?lan=1&ID=982&Menu1=982

[24] E. Günther, S. Hiebler, H. Mehling, Determination of the Heat Storage Capacity of PCM and PCM-Objects as a Function of Temperature, Bavarian Center for Applied Energy Research, Germany

[25] Zhang Yinping, Jiang Yi and Jiang Yi, A simple method, the t-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, December 1998

[26] E. Günther, S. Hiebler, H. Mehling, Measurement of the Enthalpy of PCM , Bavarian Center for Applied Energy Research, Germany

[27] http://en.wikipedia.org/wiki/Differential_thermal_analysis

[28] http://www.anasys.co.uk/library/dsc1.htm

[29] Lane, G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I, RC Press Inc., Florida, USA, 1983

[30]
http://freespace.virgin.net/m.eckert/carl_vener%27s_dissertation.htm

[31] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol.
11, 2007

[32] D.W. Hawes, D. Banu and D. Feldman: Latent heat storage in concrete. II

[33] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishment, 2006

[34] http://www.pcmenergy.com/products/telecom.htm

[35] Luisa F. Cabeza, Cecilia Castello'n, Miquel Nogue's, Marc Medrano, Ron Leppers, Oihana Zubillaga: Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings

[36] http://www.ablesealanddesign.com/category/9/Thermal_Materials/page/116/Thermal_Phase_Change.aspx

[37] L. Vasiliev, V. Burak, Latent storage modules for preheating internal combustion petrol engines, Applied Engineering, Vol 20

[38] http://www.sglgroup.com/cms/international/applications/automotive/applications/cab-air-conditioning.html?__locale=en

[39] S. Mondal, Phase change materials for smart textiles – An overview, Applied Thermal Engineering Vol. 28, 2008

[40] http://www.outlast.com/en/end-uses/

[41] «ΘΕΡΜΙΚΑ-ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ», Κίμων Αντωνόπουλος, Αθήνα 2007(Εκδόσεις Ε.Μ.Π.)

[42] «ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ», Κίμων Αντωνόπουλος, Αθήνα 2007 (Εκδόσεις Ε.Μ.Π.)

[43] www.rubitherm.com